



学科发展战略研究报告(2011~2020)

机械工程学科 发展战略报告

► (2011~2020)

国家自然科学基金委员会
工程与材料科学部



科学出版社
www.sciencep.com

第1章 总论

Chapter 1 Overview

1.1 机械工程学科的战略地位

钱学森指出：“技术科学是人类知识的一个新部门。”作为一门技术科学，机械工程学科以自然科学为基础，研究人造的机械系统与制造过程的结构组成、能量传递与转换、构件与产品的几何与物理演变、系统与过程的调控、功能形成与运行可靠性等，并以此为基础构造机械与制造工程中共性和核心技术的基本原理和方法。机械工程学科是联结自然科学与工程行为的桥梁。

胡锦涛在2006年两院院士大会上强调指出：“要高度重视技术科学的发展和工程实践能力的培养，提高把科技成果转化为工程应用的能力。”这充分表明了机械工程学科在国家经济发展与学科发展布局中的重要战略地位。《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006～2020）》（以下简称《规划纲要》）强调大力振兴装备制造业，机械工程学科的地位又一次得到彰显。当前，持续发展是全球竞争焦点，以低碳技术为特征的新型工业化对机械工程学科提出了新的挑战。

在我国经济发展的现阶段，机械工程学科的战略地位在下面几个方面表现得更为突出。

1.1.1 机械工程学科为满足国家目标的物质需求基础提供技术科学支持

我国正在大力推进的新型工业化进程以及让全球恐慌的世界经济危机都充分证明了创造物质产品的制造能力是人类社会稳定发展的基石，彰显了我国调整产业结构、建设和谐社会战略目标的紧迫性和战略意义。作为社会物质财富生产的共同基础——机械工程学科必然承担起支撑这一世纪变革的历史重任，并面对从科学纵深探索中创造新技术原理的高难度挑战。

人类从未像今天这样深刻理解和努力追求：创造一个更清洁、更健康、更安全的和谐社会。面对严重的能源、资源、环境、气候、食品、疾病、贫穷等生存与持续发展问题，需要寻求有效的综合解决方案^[1-3]。一项自然科学的发现并不直接等同于一项创造新物质的工程技术，而仅仅依赖于工程研究也几乎不可能产

生超越现状的重大工程技术的突破,进而解决人类生存面临的重大“瓶颈”。因此,机械工程学科必须突破传统思维束缚,通过机械与制造科学的新探索和技术方法的新构思、新实践,发现与创造可以面对世纪挑战的制造原理、过程和装备,建立起新的学科理论,形成融多学科为一体的机械系统,实现创造“和谐”的高端产品目标。这就是当代社会与经济大变革中机械工程学科独有的作用和战略地位。

1. 为可再生能源的社会应用提供产业装备解决方案

现代工业文明建立在能源与资源的大量消耗基础上,造就当今辉煌成就的同时,也驱使人类进入“化石能源资源”日益枯竭、无以为继的危险境地。能源资源的严重短缺、生存空间与资源的国际竞争无不提醒着我们,新能源资源开发是解决人类最紧迫生存危机的首要任务^[4]。其中,机械工程学科必须创造新装备予以保障和支撑。

当前,应对全球能源资源紧缺的压力,实现从“化石能源经济”向“可再生能源经济”的转变,发展核能、太阳能、风能、氢能等新能源装备及其制造技术成为保障人类能源安全的重要需求。与此同时,矿产资源的深部开采和深海资源开发,也对服役于超常环境的装备提出了新的挑战。

1) 核能装备制造

核电是重要的清洁能源之一,多数发达国家已将核能作为主要的电力来源。法国的核电装机容量6300万kW,占电力总量的78%,美国是9800万kW,占电力总量的20%。国家《核电中长期发展规划》提出,到2020年我国核电装机容量将增加到4000万kW,需要投入4000亿元新建32座百万千瓦级核电站。为实现大型核电站关键装备的自主中国制造,推动核电装备的性能升级,需要针对核主泵等关键核电装备大力开展制造科学的基础研究,发展以新一代“高安全、高效率、长寿命、低成本”大型核主泵为核心的大功率核电新技术与新装备。

2) 太阳能装备制造

太阳能是可望彻底摆脱化石能源制约的清洁、高效和永不衰竭的新能源形式。发达国家的高研发投入促进太阳能装备技术迅速发展,展示了巨大的前景,光伏市场正在以年均30%的速度增长。物理学研究表明,太阳能电池能量转换效率的理论极限在70%以上,但是,工业化生产的太阳能电池转换效率却约为17%,其主要原因之一是缺少先进的制造技术。例如,太阳能电池的表面减反射结构挑战微/纳制造技术。要实现太阳能的高效利用和太阳能电池的大批量、低成本制造,推进“超晶格电池、热载流子电池、新型叠层电池和热光伏电池”等新一代太阳能电池的技术进步,需要针对新型太阳能电池材料,太阳能电池陷

光吸收、减反、增透和表面自清洁等功能微结构设计制造等方面开展基础研究,形成工业化大批量制造新技术,并解决太阳能电池材料制造过程的高能耗与环境问题,为最终摆脱化石能源束缚取得实质性突破。

3) 风能装备制造

风力发电直接利用风能而不对环境带来任何负面影响,在世界各国得到迅速发展。但自然风场气流的复杂多变,对风能装备的传动、承载、换能等机械科学与技术提出了新的挑战。目前,在役的风力发电装备存在运行效率低、故障率高、可靠性差、寿命短等问题。特别是我国风能装备尚处于仿制阶段,风能的实际利用率与欧洲等发达国家还存在很大差距。为高效利用风能,迫切需要加强风力发电机复杂气动-结构-机电-控制耦合系统建模与分析、多变载荷条件下风力发电机特种传动系统、非平稳工况换能结构设计理论、关键零部件腐蚀、冲蚀行为和失效机理及控制等机械学科的基础研究,实现风能的稳定高效转化和高可靠、长寿命运行。

4) 氢能装备制造

美国已将燃料电池金属极板制造列为制造业的三大优先资助领域之一。由于氢能燃料电池制造正处在由实验室向工业应用转化的前期阶段,缺少工程化的关键制造技术,如具有纳米结构特征的电池极板低成本大批量制造方法和工艺、电堆的高效高精度装配技术等,需要构造新原理,突破低成本、大批量生产的制造技术,解决氢能的大规模应用“瓶颈”。

5) 深海资源开发装备制造

陆地资源的日益枯竭促使人类不得不向深海寻求新的矿产资源,深海资源因此成为各国争夺资源的新热点。我国在太平洋海底拥有 7.5 万 km^2 的多金属结核矿区,深海矿产资源开发研究已被列入国家中长期规划。深海资源开发装备的作业环境为海底 2000 ~ 6000m,水压力 20 ~ 60MPa,海洋环境的风、浪、流耦合特性多变,海底介质的低剪切强度特性与地形奇异多变,需要解决在极端环境下的能源、物料与信息连续输送、准确行走、高效作业等技术挑战,迫切需要开展具有极端服役功能的复杂机电系统集成科学等研究,为极端环境作业装备提供基础理论支持。

综上所述,为解决 21 世纪人类的能源资源问题,机械工程学科需要发展新理论、构造装备新原理。

2. 为实现我国产业向低碳经济目标迈进创造新装备

我国新型工业化发展战略需要机械与制造科学为产业经济提供高效、节能、

环境友好的先进装备与制造技术,运用新知识、新技术,提升传统产业^[5],核心内容是要实现技术节能、装备节能、系统节能。

例如,燃气轮机效率提升的过程,就是其叶片制造技术进步的过程,由20世纪60年代的单一铸造叶片发展到单晶叶片,工作温度由原来的1200℃提高到当前的1800℃,实现了当前高达92%的效率。又例如,机器轴承制造精度增加,摩擦系数可由0.1减小到0.01,可大幅降低机器的非作功能耗;内燃机摩擦损失减小10%,其经济效应可提高3%~5%;将电解铝和后续铝加工直接连接,减小一次加热工艺,系统可节能20%。

支持国家新型工业化和低碳经济,需要机械与制造科学在深层次研究复杂机电装备的机构创新、驱动与传动新原理、系统集成科学等基础科学问题,创造和发展新装备及其制造技术,建立强大的装备制造体系,保障石油、化工、冶金、材料、交通等基础产业向节能、节资、高效、环境友好型产业变革和发展。

3. 为和谐社会创造人性化、智能化和时空高效化的产品

不断追求社会和谐、提高生活品质是人类文明进步和发展的根本目标,其物质基础是多种多样的人性化、智能化、时空高效化的新产品^[6,7]。20世纪开始的信息化技术和产品,缩短了人类活动的时空差距,极大程度提高了人类的生活品质。为适应人类智能化生活的更高要求,21世纪的信息技术正在探索后摩尔时代的新突破,装备制造在尺度、精度和速度上将迎来更大技术挑战和发展机遇。

1) 微电子装备制造

微电子产业已成为我国第一大产业,预计2015年我国IC制造业产值将达8500亿元,装备市场1360亿元。据预测,在2010~2019年间,IC技术发展路线图为“DRAM线宽:45nm→32nm→22nm→16nm”。IC线宽的量变将导致制造原理、工艺和装备的质变。微电子装备不断创造制造尺度、精度、效率的新极端。当前机械工程学科需要对这个与传统制造有本质变化的新方向开展若干基本问题的研究,如对近原子尺度的表面材料去除与精度形成机理、纳米精度表面制造的界面与尺度效应、信息输运与尺度变化中的快速能量通道形成机制与性能调控、制造系统的高速精确测量与纳米运动精度生成等关键问题提出新的机理解释,构造面对新极端的技术。

柔性电子是建立在非晶硅、低温多晶硅、柔性基板、有机和无机半导体材料等基础上的新型电子技术,可实现在任意形貌、柔性衬底上的大规模集成。据预测,全球柔性电子产能2015年将达到350亿美元,2025年可达到3000亿美元。目前,待解决的关键技术包括有机和无机电路与有机基板的连接技术、精微致动技术和跨尺度互联技术,需要机械工程学科提出全新的制造原理和制造

工艺。

2) 光电子装备制造

21 世纪光电子信息技术的发展将遵从光电子的“摩尔定律”，即光纤通信的传输带宽平均每 9~12 个月增加一倍。据预测，未来 10 年内光通信网络的商用传输速率将达到 40Tb/s。支持和引领下一代光通信技术发展，将经济社会的信息化水平提高到新的高度，需要突破集成光路制造、光电集成设计制造、具有纳米精度的光电子制造装备等关键技术，这无疑依赖于机械工程学科在光电子功能结构控形控性制造及高性能光学耦合界面制造等微/纳制造方面提供基础理论支持。

4. 为国家安全、国防装备性能的极端化提供制造科学支撑

具有极端服役能力和强大功能的复杂机电装备是现代国防、空天运载与国家核心竞争力发展的支撑，其核心装备与制造技术包括极高性能大型材料构件一体化制造、超大型复杂零件高精度数字化制造、极高服役功能复杂机电装备的集成设计制造等。以大型金属构件流变成形制造能力为例，二战以后随着制空权竞争的激烈化，美国、俄罗斯、法国等国家迅速发展超大型金属构件锻造能力，迅速建造巨型水压机。例如，美国已拥有三台 4.5 万 t 水压机，俄罗斯已建造两台 7.5 万 t 水压机，法国也已建造了一台 6.5 万 t 水压机。三国以此为基础迅速发展空中作战能力和洲际运载能力。

当前，我国的军、民重大工程用大规格高性能构件和高精度、高性能基础传动件距需求都有很大差距；高端精密数控制造技术与机床的水平限制了我国整体制造能力。总体来说，我国的极大尺度制造技术与装备与发达国家差距约 20~30 年，远不能满足国家武器装备、空天运载、大型基础产业装备的需求，无法保障我国国防与经济安全以及在国际竞争中取得制高点。

以 16 个重大专项为代表的国家系列重大工程是提升国家核心竞争力、实现国家发展目标的集中体现，系列重大工程的实现将重建我国的产业结构和国家的持续发展能力。几乎所有重大工程的实施都需要由装备与制造技术保证，其中一些关键装备由于以往缺乏基础研究而成为困扰领域发展的症结，如各类运载装备的发动机、高精度数控机床、激光武器和对地观测装备、核动力装备等^[8]。这些核心装备与技术是国际科技竞争的热点，也是国家核心竞争力的支柱。

可见，无论是应对国家安全的国防装备性能极端化，还是提升国家的经济实力，都迫切需要机械工程学科在装备集成设计制造、高性能构件成形制造、高精度数字化制造等方面进行深层次基础研究，构架坚实的知识与技术支撑。

1) 极端服役装备的设计制造

我国的巨型、重型等极端服役装备设计能力薄弱，核心技术有较大空白。例

如,在大型空压机、大型能源装备、大型盾构机和大型高端数控机床等方面缺乏设计能力和核心技术,需要机械工程学科针对极端服役装备的功能生成、多过程耦合、能量流传递与转换、功能界面行为、系统建模、非线性动力学、安全运行以及精确测量等方面进行基础研究,为重大装备创新提供理论基础。

2) 高性能构件成形制造

航空、航天、国防装备制造等需求的牵引,特别是大飞机制造、载人航天与探月工程等重大专项的推动,使高性能构件设计制造成为十分重要的前沿技术^[6]。近20年来,发达国家通过一系列研究计划的实施,掌握了当代重大装备的高性能构件设计、制造与使用的科学原理与关键技术,奠定了他们的经济与军事竞争力。处于后起国家,我们不仅需要自主创新突破国外现阶段的技术垄断,还必须前瞻性地开展功能更高的发动机设计制造研究,以便在未来的竞争中取得主动或优势。美国国防部在“综合高性能涡轮发动机技术”计划中,提出2015~2020年研制出推重比15~20的涡扇发动机的目标,材料和制造技术对高性能发动机的贡献率为50%~70%。现代战机或民用飞机机身采用高性能铝合金、钛合金与复合材料的大型整体构件,是飞机减重、提高飞行和作战能力的主要技术路线,其中先进的结构设计理念、性能增强型成形制造、提高损伤容限的构件缺陷控制等都是机械工程学科面临的挑战性难题。

3) 高精度数字化制造

超精密数字化加工是现代科学技术的重要基础,推进着制造科学向新前沿发展,是极大规模集成电路制造技术及成套工艺、高分辨率对地观测系统、惯性约束激光核聚变、载人航天与探月工程等多项国家重大专项或者工程实施的重要技术基础。我国的核聚变工程,需要在5~10年的时间内完成7000余件大口径、20000余件小口径光学平面、曲面零件的高精度制造与检测;对于大口径的光学元器件,要求其面形精度达到 $\lambda/10 \sim \lambda/20$,表面粗糙度 $R_a < 5\text{nm}$,要求月产60~80片。然而,就目前我国的光学元器件制造水平,举全国之力也很难在15~20年内完成这一浩大的光学制造工程。各种特殊光学元器件的超精密、高效数字化加工的关键技术与装备,已成为制约我国核聚变工程能否成功实施的“瓶颈”。同时,高精度数字化加工在国防装备发展和高技术竞争中发挥着关键作用,也是一个国家制造业实力的综合体现。高精度数字化制造技术的发展依赖制造过程的数字化描述、工艺参数对产品性能的影响规律、制造过程中物质流、信息流和能量流的传递规律与定量调控等方面的基础研究。

综上所述,国家未来10~20年发展的战略需求要求机械工程学科的基础研究能够提供工程与技术解决方案的理论基础,并在以下共性科学问题上取得突破:

- (1) 跨尺度制造的科学原理。
- (2) 极端服役装备的功能创成。
- (3) 制造过程的数字化表达和数据流调控。
- (4) 产品制造中生命科学与制造科学的融合通道。

在此基础上, 发掘新的制造资源、创造新的制造原理、发明新的制造技术、构架新的制造模式, 为提升经济建设各领域的装备水平和运行能力、保障能源和资源的安全和高效利用、占领国防和航空航天工业的制高点、实施重大战略工程、提高人民的生活质量等提供根本支撑。

1.1.2 机械工程学科的突破将催生社会重大经济变革

机械与制造科学创造了18、19世纪的诸多奇迹, 如引发第一次工业革命的蒸汽机的发明、第二次工业革命中透平发电机组的大规模工业应用等。

时至今日, 社会需求的产品已远非传统制造所能获取, 需要新的制造原理的出现。在科学技术高度发展的今天, 人类的智慧往往是在高度丰富的知识交汇和碰撞中冒出火花, 重大工程技术的变革毋庸置疑是源自于基础科学和工程科学的新发现。当今制造科学与现代物理、化学的深度融合正在不断创造着新的制造原理和技术^[7,8]。

例如, 可能突破衍射极限的高能束制造新原理。紫外曝光技术的衍射极限限制已成为制约集成电路制造水平提升的“瓶颈”。高能束制造的最新进展给突破衍射极限带来了希望: 特殊纳米结构使人射紫外光与纳米结构相互作用, 产生电子的集体振荡, 形成的光斑能够突破衍射极限, 利用该光源进行的光刻线宽小于入射光的半个波长(小至几个纳米), 可以实现大面积纳米结构和器件的低成本制造。利用超快激光多光子吸收和强阈值效应, 也可以突破衍射极限, 得到纳米级加工精度, 并能实现三维加工。用超快脉冲序列设计来控制被加工材料电子吸收激光光子的过程将进一步提高加工精度。激光近场加工能获得远小于衍射极限的纳米结构等。这些制造原理上的新发现、新认识给后摩尔时代带来了新的发展空间。基于分子振动、电子激发、电子电离等多能带/能级耦合的协调共振激发效应都有可能成为人们创造出制造新原理的源头, 其中机械工程学科的任务在于: 每一原理都需要在与之匹配的载体上实现, 如能束参数的精确控制载体、能束的复杂传输载体、被加工对象的纳米精度运动载体等。这类载体不同于传统机械系统, 需要能在微观尺度上精确驾驭载能粒子行为的特殊功能微/纳结构及其精确控形控性制造技术。

21世纪, 生命、信息、纳米和认知科学的交叉领域正在成为科学探索的热点, 在此基础上崛起的生物制造有可能实现人造系统与生命系统融合, 使机械工

程学科产生根本性的变化,催生人类文明的重大变革。生物制造将制造技术延伸到生命科学领域,特别是生物制造与纳米制造的结合可望对医学工程的发展提供全新的科学原理与技术手段,它孕育着重大新兴产业。据报道,在未来10年生物医学工程产业中,人体器官和功能组织的人工替代产品将占50%。机械工程学科在其中的重要方向将成为科技支撑:生物功能替代装置的功能再现原理与生物相容性、生物感知与致动系统的能量/信号转换和传递、生机电系统的生机接口等方面都需要多学科交叉基础研究。

机械与制造科学的发展必将促进基础科学与技术科学的深度融合,催生全新的制造原理和技术,引发新的重大工程技术变革,为实现人与自然和谐、高品质的人类社会提供物质支持。

1.1.3 机械工程学科拓宽自然科学的研究领域和视野,并为之提供有效的研究途径

机械工程学科的发展对自然科学研究具有重要支持和促进作用,为物理、化学、生物等自然科学拓宽了研究领域和视野,乃至催生新的学科,并为自然科学实验研究提供精密仪器的高精度制造技术保障。例如,微电子制造装备支撑着微电子技术按照摩尔定律发展,使得制造尺度不断突破新极限,由此产生的各种新效应促使物理、化学等学科开展相关的机理研究;计算机硬盘/磁头的纳米间隙飞行促使物理学科研究其稀薄气体效应和飞行动力学;大型光学镜面的纳米精度抛光促使物理、化学等学科研究其抛光过程中能场对物质的作用机制,并研究其高能量聚集行为与镜面几何形貌间的相关机制;原子力显微镜等微观研究实验设备依赖机械工程学科的超精密制造与测量技术;特种能束与能场对物质的作用机理研究需要机械工程学科提供能量传递、转换以及能场精确控制技术;纳米科学研究依赖精密运动控制技术和纳米精度运动平台等。

机械工程学科的发展必将为纳米、生物、医学、信息、材料、新能源等学科领域的发展不断提出新的基础科学问题,提供实验装备与条件,注入新活力,大力促进相关学科的发展。

1.2 机械工程学科的总体发展趋势

21世纪的全球变化与人类社会的进步驱动机械工程学科呈现出以下发展趋势和特点。

1.2.1 机械工程学科发展趋势

在产品的服役功能与工作品质不断向新的极端发展的挑战下,需要发现更深层次的和谐制造原理和更知识化的智能制造技术。机械工程学科由此形成了如下几个重要趋势:

(1) 运用新的制造资源和基础理论发掘新的制造原理与方法——发展新概念产品。

IC、微机电系统(MEMS)和纳机电系统(NEMS)等高端、新兴产业领域的不断涌现和发展,对传统制造能力的极限提出挑战。传统制造原理难以满足这类产品的极端尺度与性能需求,从微电子芯片制造技术的突破开始,引发了一系列新的制造原理与技术。

物理学、化学等基础学科在与机械、电子等工程学科交叉融合中产生了一批新兴制造技术,其中一个典型例子是高能束制造。高能束制造技术的发展主要得益于物理学的成就,它利用高能束流使材料熔化、蒸发、汽化、沉积、凝固、固态相变等,通过材料的去除、添加或形变,实现合成、加工或成形。高能束制造的材料适应性强(超硬、超薄等),可实现高质量、高效率、非接触、高精度和跨尺度制造,特别是在三维复杂结构的高精密制造方面有独特的优势。又例如,在芯片的p-n结制造中,由于引入了离子注入的原理,才能达到传统方法无法企及的目标。

高能束制造有望继续突破加工极限,特别是未来5~10年内,超强超短聚焦激光的光强预计达到 $10^{25} \sim 10^{28} \text{ W/cm}^2$,而脉冲宽度可以缩短至数阿秒(10^{-18} s)。激光的波长可能会推进到极紫外甚至X射线波段,同步辐射将会进入制造领域。而这些对制造科学带来的研究任务将集中在揭示高能束的物理特性和对制造界面特性、制造体形成性过程的影响规律,针对不同的材料、结构与尺度要求提出高能束制造的工艺方法,研究和发现高能束制造的极限制造能力,并为高能束制造装备的研发提供科学和技术原理。但是,为了揭示该领域能场与材料间的作用原理、探求其加工极限,传统加工赖以发展的许多经典的理论不再适用,量子力学效应将会凸现,激光与物质相互作用的机理、物质光学和热力学特性的瞬时局部变化特性等都成为需要解决的科学问题。

与此同时,研究新的制造原理的过程规律和承载装备集成原理,实现制造原理的工程技术化与产业化,满足国家基础产业和新兴产业的发展需求,是机械与制造科学研究的一个重要发展趋势^[10]。

总之,今后的发展充分体现在如何利用新的能源和材料,通过探索它们之间的相互作用,研究其相互作用的物理和化学本质,突破基于力学的制造规

律,不断挖掘新的制造方法,突破传统的制造方法,探索基于各种能场、能束的零件、结构的成形性制造新原理、新方法,创造出新功能的零件、器件和装备。

(2) 从多尺度演变及其界面效应传递的角度探索零件几何结构与物理性能的高精度调控原理与方法——发展高效、高品质制造技术。

无论如何提高宏、微制造构件服役性能,其共同的必然途径是经历宏、微协同与形、性协同制造,其中的关键科学问题是揭示实现协同的演变机制与规律。因此,研究制造中的尺度效应和界面效应,推进零件由形、性协同制造实现服役能力的跨越,是机械与制造科学发展的重要趋势。

一个典型的例子就是“极大规模集成电路制造”等领域具有极端精度要求的表面与结构制造。极大规模集成电路制造所需光刻物镜的精度要求为 $PV \lambda/300 \sim \lambda/400$ ($\lambda = 632.8 \text{ nm}$),而目前的制造精度只能达到 $PV \lambda/50 \sim \lambda/60$ 水平。随着集成电路制造向 32 nm 及其以下线宽的推进,由尺寸效应引起的铜导线的电阻率以指数函数上升,超低 k 介电质材料的引入成为必然趋势。由于其与 Cu 力学性能的巨大差异,导致在图形转移、平坦化等工艺中的界面问题成为关键“瓶颈”之一。在平坦化方面,如何在微区粗糙度、中等区域波纹度和大尺寸晶圆的全局平整度这三个跨尺度(纳米—微米—毫米)域中实现高精度控制,如何避免互连线损伤和界面剥离,如何在降低平坦化压力的情况下实现高效、大面积、均匀的材料去除等问题成为急需克服的屏障。同时,作为图形高保真转移的关键方法之一,即在纳米压印光刻方面,随线宽的缩小,界面的物理化学性能对阻蚀胶流变将产生很强的约束作用,其流变特性将显示出明显的尺度效应。为实现图形的高保真转移,界面的分子作用机制、纳米间隙流变规律、静电场诱导的分子自组装过程的界面行为等都是急需研究的问题。

再例如,在三维纳米结构和纳米器件的制造原理、可产业化的纳米尺度制造工艺、“宏/微/纳”跨尺度结构的制造与集成原理等方面均未完全突破。这种近乎极限的挑战要求研究制造过程多尺度的结构、性能演变,追溯其原因,特别是在每个尺度上的主导过程和界面上产生的效应及其传递,阐述产生宏观结构、性能的本质原因,深入到物质结构上寻找实现传统制造精细化的根本。强调制造过程中产品几何结构与物理性能形成的多尺度的演变过程,特别是在多尺度演变过程中,在不同尺度上的主效应和各尺度界面上不同效应的转化与传递,突破现有技术极限,以实现零件几何结构与物理性能的高精度调控,满足产品的服役功能以及产品工作品质的极端化需求。

(3) 以系统科学的视野研究复杂制造过程和装备的集成科学——拓展装备设计理论。

极端的需求将零件制造过程推高到极高品质以及装备服役功能的极大丰富与强化,使得制造过程和载体均呈现复杂化、多维多元化特点,相应的机械装备也成为集成的复杂系统。这样的复杂系统必然成为载有多过程的载体,载有多种能量与物质的交互、作功演变与耗散演变、工作主流与随机扰动、快变和慢变过程等,导致这种载体的质量分布复杂,技术模块间、物理模块间以及信息模块间的界面丰富、多样,为服役的高品质精度造成种种扰动因素。这一系列问题使得我们无法再单纯依靠经验和灵感来解决,而必须从系统科学的角度研究日益复杂化的制造过程和装备,因此机械与制造的系统科学将成为研究热点^[1,2,9]。

为实现各种不同工况的高精度传动现代复杂装备,需要发展各种传动原理和方法,如高精度航空遥感对传动机构精度的高要求、激光惯性约束核聚变工程中对高能激光脉冲压缩器性能的苛刻要求、新型激光武器对多自由度精密传动装置传动精度和传动带宽等的严格要求等都需要新的传动技术及相关的科学原理支持。

复杂机电系统中的诸多界面,既是功能形成的必须,又是奇异、扰动和故障产生的重要因素,是现代高端装备设计制造要予以特别关注的问题。由于物理单元之间存在机械连接,有必要认识复杂机电装备中广泛存在的固-固界面、固-液界面、固-气界面对接触、黏着、摩擦、材料转移和损伤等自然现象,基体材料、表面构造、介质和外场的作用机理,以及界面特性对装备宏观服役行为的影响规律,为界面设计提供科学依据。然而,由于复杂装备在尺度、服役条件等方面不断突破原有极限,使装备的运动界面特性变得十分复杂。例如,在巨型重载成形装备和操作装备中,单个铰链的承载高达1000~2000kN,且运动副处于重复起停的非连续运动状态,易造成接触区润滑膜破裂和弹塑性变形以及力流畸变、偏载等非线性力学行为,影响装备的作业性能和可靠性。因此,如何解决装备的运动界面设计,减少结构弹性变形在运动界面和操作界面的积累效应,降低摩擦和磨损,已成为重型制造装备设计中无法回避的问题。再例如,对于微观磨损问题(微牛到纳牛量级载荷、微观尺度形貌的摩擦表面),现有的认识仅限于现象的观察,对其机理的研究和分析还不够深入。从更广的意义上说,复杂机电装备中的界面不仅仅是运动界面,其功能形成的因果传递中,有许多界面在起作用。各物理单元之间的功能集成、能量转换和传递、物质流-能量流-信息流的耦合和协调等都是通过特殊的界面来实现的。与运动界面一样,这些非物理形态的功能界面特性对装备的整体功能和作业性能有直接的影响。

而对于复杂装备的设计与集成,除了必须解决高性能功能器件、功能单元、功能界面设计等单元技术及其相关的基础科学问题以外,在设计方法和多学科集成优化方法等方面也需要系统的科学理论支撑。集成设计方法学需要解决的重要

问题是复杂装备的功能要求出发,研究装备功能与结构的映射关系,从能量流、物质流和信息流的层面将不同功能单元进行协同组织和集成,构建能够满足预定功能要求的复杂装备。多学科集成优化的目标是充分利用各学科间相互作用所产生的协同效应,获得复杂机电装备的最优设计与集成方案,需要解决的问题包括复杂机电装备多领域设计知识的获取、演化与集成,多学科统一建模与多物理场关联分析,多性能多参数仿真分析与协同优化等。

运用系统科学研究复杂化的制造过程与装备,其核心就在于寻找和发现集成、融合与演变过程的规律。特别是从系统的角度去研究“融合集成效应”,研究融合的新机理,获得新认识;从融合集成过程中的预期效果与实际差异中研究和发现系统集成的复杂规律;从系统动力行为的奇异性中研究系统集成中的功能保障与突变机制。系统集成需要解决多场耦合、多尺度效应协同、多技术界面多因素融合等问题。与此同时,这一趋势也将引导机械工程学科各领域的基础研究更加向真实性、系统性、界面、多尺度等内涵方向发展。

(4) 以信息流全局监控为基本线索实现制造与服役过程精确调控——实现智能化制造。

极端制造过程和复杂装备是一个复杂的、相关参数处于可行域边界上运行的敏感系统。对多种外场条件、多形式能量的传递、多层次信息运行、多界面耦合等进行精确控制,是复杂系统精确稳定运行的保证。当复杂系统的不确定性成为导致制造与服役过程随机扰动的重要因素时,信息的获取与监控信息流的网络设计成为机械工程学科的重要研究前沿。

现代复杂装备已发展成为由信息流驱动且实现高精度、高稳定、高可靠的复杂机电系统。为实现其精确调控,必须研究:调控微变量与系统主运动的机电耦合与变异机制,小尺度特征参数扰动与系统宏观动力失稳行为,多种控制模式运行中的多重交互作用、扰动与协同控制机制,基于能量流、物质流与信息流的全局协同的系统稳定性分析与调控。

信息流全局监控是复杂系统精确调控的需求,需要探寻可靠的信息获取手段,研究复杂系统的故障演化机理,得到反映设备故障状态信号与设备系统参数之间的关系;研究微弱损伤、多故障耦合、多干扰源和强噪声等动态信号处理与损伤特征提取的理论与技术,实现早期故障动态定量诊断;进行人工智能研究,形成知识丰富、推理正确、判断准确、预示合理、结论可靠的设备智能诊断与预示功能的实用技术,实现合理、可靠的服役设备安全评估。

(5) 制造过程和产品将更多体现和谐世界的目标与追求——实现人造系统与自然世界的和谐相容,提升人类生活品质。

人类对于和谐世界的终极追求,是赋予当代机械工程学科发展的大命题和大

使命。针对这一使命,需要我们探求如何将能量、物质、信息融合成为更加和谐、简约的制造过程并制造出更加人性化的产品。

为了追求和谐社会与生活,必须首先解决全人类所面临的能源、资源、环境和安全问题。发展资源节约、环境友好和安全可靠的和谐制造技术也就成为制造业面临的挑战和必须解决的问题。除了前面已经提到的氢能、太阳能、风能等新能源的利用和资源的循环利用将成为实现和谐制造的重要发展方向之外,产品回收、再制造及安全服役等带给机械工程学科的诸多全新的科学问题也将成为一个重要的方向。当然,也包括以减少制造过程中的能源消耗、提高材料利用率为目标的传统制造工艺的突破与变革。

其次,生物制造和仿生制造科学正在使生物技术和制造技术的内涵发生深刻的变化,从而将成为21世纪科学研究的前沿之一。而它的应用领域也将是机械与制造科学服务和谐社会目标的重要组成部分。生物制造与仿生制造最直接的应用领域是医学和康复工程,其中由生物制造、仿生制造技术设计和制造的人工生物组织或功能替代装置是最典型的例子。它不仅需要解决替代装置的设计与制造问题,还需要解决与生物体的集成问题。

总之,作为制造技术的时代要求和特征,和谐制造对机械科学和制造技术赋予了新的内涵。

1.2.2 机械工程学科的研究特点

1. 与自然科学和其他工程科学深度交叉融合,开辟学科新方向

建立在牛顿力学基础上的机械与制造科学在经历了数百年的辉煌以后,其内涵正在发生深刻变化。在工业需求牵引和学科自身发展的驱使下,机械工程学科不断吸收物理、化学、材料科学、生命科学的新发现和新发明,开辟新方向,不断提出制造新原理,同时也促进装备功能趋于极端化。例如,高能束这一源自物理学的研究成果,为机械制造提供了全新的技术原理和手段;物理学领域新兴的同步辐射技术为制造新原理和新工艺的研究提供了技术手段;在微/纳制造领域,基于物理和化学方法的制造工艺也已成为主流技术;仿生制造的新原理、新技术在国防、航空航天、能源等工业领域展示了美好前景。

机械工程学科与自然科学高度交叉,探索新的制造原理和装备功能;也与多类工程科学高度交叉,追求高的功能品质。它与相关自然科学、工程科学的交叉融合向纵深发展已成为当今机械与制造科学研究的重要特点。

2. 技术突破与科学发现高度依存、互动, 实现制造尺度、精度与品质的跨越

现代工业过程的高效、集成与精良调控需求, 促使工程科学问题的求解和工业过程的调控必须以精确掌控其多过程耦合的行为规律为基础, 也使得工程科学与自然科学的分界趋于模糊。

当代机械工程学科面临制造尺度和精度极端化的任务, 必须精确掌握制造过程和装备运行中的自然科学规律, 建立其真实的物理模型、制造工艺模型和过程监控模型, 从科学意义上实现更有深度的数字化设计制造, 才能实现制造尺度精度与服役品质的跨越。

例如, 航空发动机整体叶盘的结构复杂, 叶片薄, 弯扭大, 易变形, 材料多为钛合金等难加工材料, 必须掌握加工过程中的残余应力消除、变形和颤振等行为规律, 精确建立其加工过程和精度的数字化模型, 才能实现其高精度制造。再如, 正在迅速发展的微/纳制造, 其中三维微/纳结构和微/纳器件的制造原理、可产业化的微/纳制造工艺、“宏/微/纳”跨尺度结构的制造与集成等, 只有更加依赖物理、化学的机理认识和规律探索, 才有可能获得机械工程学科期望的工艺控制模型和精度、性能形成规律, 突破实验室的缺乏重复性的“艺术”, 真正形成可支持产业发展的工业化制造技术。

追求自然科学规律的探索, 获得精确的过程与工艺模型, 实现高精度、高性能的数字化制造, 是当前机械工程学科的一个鲜明特色。

3. 探索机械与制造系统的集成科学成为本学科的新兴方向

服役于工业的各类重大装备不断追求强大功能、高效率、高精度, 促使装备系统将多种单元技术高度集成, 成为将机、电、液、光等多物理过程融合于载体的复杂机电系统, 在完成复杂的多物理过程中, 实现能量、物质与信息流的传递、转换和演变, 形成强大功能。空天运载装备、冶金装备、高速列车、大型火、水、核电机组和盾构掘进机等都是耦合高度复杂、功能异常丰富、运行控制能力强大的复杂机电系统。

然而, 传统的机械设计主要基于模块化思想, 通常将系统按照功能结构分为不同模块或子系统, 简化了模块与子系统间的耦合关联, 无法顾及系统中真实的复杂界面行为特性。机械设计方法则更多注重设计方法本身, 对机电系统载有工艺过程的物理行为的变化关注少。在此设计理论基础之上构建的机电装备在运行过程中出现了各种各样的奇异或故障现象, 如高速回转机械几乎都出现了复杂的振动障碍问题, 发散性振动、微幅颤振、频谱非常复杂的随机振动等多种复杂振动形态, 依存于系统的某种工况或耦合状态; 重型承载复杂装备由于力能传递时

变导致奇异内力作用下的异常损伤。

服役中的大型工业装备出现的种种奇异行为促使科技工作者重新审视机电装备的物理本质,思考机械设计理论与方法的新思路。在这种趋势下,“复杂机电系统”等概念、“耦合设计”等思想也因此被提出,其基本思想是从系统科学的视角分析认识制造与装备的种种规律。“复杂机电系统”的研究思路推进了对机电装备服役过程不确定、随机、奇异现象的认识,为形成新的设计理论、制造系统和运行监控系统打开了思路。

当今的机械工程学科正在形成“复杂机电系统设计制造的集成科学”,将“机械设计”提升到系统集成科学的层面,扩大与深化了设计的科学内容,如界面科学、非线性科学、信息传递科学等;由传统的注重“设计方法”变革为设计“机械”载有的物理过程如何经集成演化产生机械功能;将模块化设计变革为“物质流-能量流-信息流全系统协同设计”。从集成科学的高度设计机电装备的新思想必将大力促进功能更为强大、性能更加优越的各类机电装备的发展。

4. 和谐制造成为当代机械工程学科的终极追求与驱动力

当前能源资源短缺、传统工业排放污染破坏生态,促使机械工程学科寻求节能、节资、人与自然和谐的制造模式,同时追求服役于各类工业生产的机电装备运行安全、环境友好。

资源循环利用的理念已经贯穿产品设计、制造和使用的全生命周期,绿色设计、绿色制造、材料回收和再制造已成为机械与制造科学的重要研究内容。在设计阶段就考虑产品零部件及材料回收的可能性、回收处理方法、回收处理结构工艺性等。在产品回收工艺、装备等方面开展了系统的理论研究和技术研发。

“和谐制造”的追求也推动了传统制造工艺的技术革新。例如,大型构件的自由锻造,作为一种传统的坯料加工工艺,由于高温锻造过程中的材料损耗和锻造误差等的影响,从构件到形成目标产品的过程中平均材料利用率约为75%~80%。为减少制造过程中的能源消耗、提高材料利用率,发达国家在锻造过程中的力测量、高温条件下的大尺度几何测量等方面率先开展研究,提高了对工艺过程的可控性、制造精度和成形性质量,使大型锻件的锻造效率大幅度提高,材料利用率提高到90%以上,使得锻造工艺向“精密化”方向发展。

可靠与安全运行是复杂机电系统的重要属性,是其高效服务于工业生产的基本条件。复杂机电装备大多在复杂载荷历程下服役,存在多种失效机理。由于服役过程中零部件在随机载荷反复作用下损伤不断积累或演化,失效率也随时间变化,而且多种失效机制往往相关并存,传统的独立失效机制的假设不再适用。近年来,国内外学者为了揭示零件、结构和装备寿命的本质规律进行了深入研究,

探索了机械结构性能衰退与失效演化的物理机制,提出了一些能反映零件失效相关性的可靠性预测模型,以形成寿命预测的理论基础;同时致力于发展先进的失效评价理论,以形成满足工业要求的安全评定技术和相关标准。

复杂机电系统的状态监控与维护,是确保装备长期安全、可靠运行的重要手段。先进的状态监测和故障诊断技术可以实现故障的早期识别,避免恶性事故的发生,实现设备的预知维修,保障重大装备安全运行。复杂机电系统的监测诊断已向系统机内监测发展。当前重大装备监测与诊断的核心问题仍然是如何全面地掌握服役过程中装备的运行信息,寻找更加有效和直观的振动信息提取方法和表达方式,通过理论分析和实际运行状态监测诊断经验相结合,提高诊断准确性。近年来,结合典型重大装备,从平稳信号分析方法到非平稳非线性诊断方法,从常见多发故障诊断到早期、复合故障的定量诊断与寿命预测、装备的远程智能诊断系统等方面进行了大量研究,大力支持了各类服役装备的安全运行。

追求和谐制造和装备安全运行作为当今机械工程学科的重要研究特点和时代特征之一,对机械科学和制造技术赋予了新的内涵,必将在新时期得到深入研究和更大发展。

1.3 未来5~10年发展战略

构建服务于各种功能要求的机械系统,为各行业提供功能强大的各类装备。面向国家重大需求,密切结合学科未来的发展趋势和科学前沿,规划出本学科未来5~10年的基本框架、优先发展领域和综合交叉领域。所构筑的本学科基本体系以及各领域之间的关系见图1.1。

1.3.1 发展布局的指导思想

机械工程学科发展布局的指导思想有以下几点:

(1) 立足学科基本任务,涵盖基本内容,以科学新概念提炼新方向,注重学科基础均衡发展,建设与发展本学科基本体系。

机械工程学科的基本任务是为各行业提供功能强大的各类装备,也就是通过设计与制造,构建服务于各种功能要求的机械系统。机械系统需要承载各种运动、传递能量、完成各类功能,需要机构学与机械振动学、机械的驱动与传动、复杂机电系统的集成科学等领域的支持。机械系统的安全可靠运行要求其足够的结构强度和准确的界面行为,需要机械的表面界面科学与摩擦学、零件与结构失效与安全服役等领域的支持。机械系统的零部件要求高精度、高性能,才能保障

系统的工作品质,需要高性能精确成形制造、高精度数字化制造、机械的制造与运行参数测量等领域的支持。

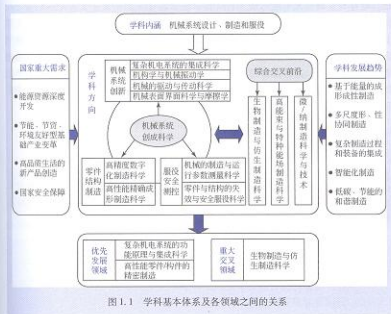


图 1.1 学科基本体系及各领域之间的关系

(2) 注重学科的新发展和科学技术的时代特色,设立和支持前沿新方向。

近年来,学科深层次交叉融合的大发展催生了一系列独具特色、性能卓越的制造新原理、新工艺。它们赋予了新的时代特色,成为新的研究前沿,可望成为生物、信息、纳米技术等高科技领域强有力的支撑,如高能束与特种能场制造、生物制造与仿生制造等。这就需要设立新的学科领域与方向,支持其迅速发展。

(3) 将学科的传统内涵和创新方向结合,构架学科的知识创新体系。

当代机械科学与技术发展十分迅速,传统学科方向不断形成新的研究前沿和热点。传统方向是学科发展的基础,本次规划注重其前沿发展,注入创新思想和内容。例如,将传统的“摩擦学”方向提升为“机械表面界面科学与摩擦学”,新增“特种工况下的机械表面界面效应”、“纳米制造中的表面界面科学”等新内容;以“复杂机电系统的集成科学”取代传统的“现代设计理论与方法”,由传统的“设计方法”变革为机械系统的“物质流-能量流-信息流协同设计”,将

机械设计学与设计方法学统一于复杂机电系统设计理论。

(4) 瞄准未来 10~20 年国际经济发展对制造的核心挑战, 选择优先支持领域, 培育与发展对未来做出最大贡献的学科知识与能力。

未来 10~20 年国际经济发展对制造的核心挑战主要表现在 3 个方面: 支撑工业发展、具有极端功能的各类复杂机电装备; 高精度、高性能、高效率的多尺度制造原理与技术; 面向人类健康的生物制造。为此, 选择复杂机电系统的功能原理与集成科学、高性能零件/构件的精密制造为优先发展领域, 同时, 鉴于生物制造的多学科交叉特性, 选择生物制造与仿生制造科学作为优先支持的交叉领域。

1.3.2 部署学科优先领域的建议

1. 11 个优先资助领域

21 世纪是机械工程学科大变革的时代, 战略研究需要强烈感受到这种变革的大趋势, 部署舞台, 抢占先机, 引导学科新平台的兴起和努力创成学科的异军突起, 因此, 建议设立如下优先资助领域:

- (1) 机构学与机械振动学。
- (2) 机械的驱动与传动科学。
- (3) 复杂机电系统的集成科学。
- (4) 零件与结构的失效与安全服役科学。
- (5) 机械表面界面科学与摩擦学。
- (6) 生物制造与仿生制造科学。
- (7) 高性能精确成形制造科学。
- (8) 高能束与特种能场制造科学。
- (9) 高精度数字化制造科学。
- (10) 机械的制造与运行参数测量科学。
- (11) 微/纳制造科学与技术。

2. 两个优先发展领域

在上述 11 个优先资助领域基础之上, 建议以下两个领域为优先发展领域:

- (1) 复杂机电系统的功能原理与集成科学。
- (2) 高性能零件/构件的精密制造。

3. 一个重大交叉领域

建议一个重大交叉领域为生物制造与仿生制造科学。

基于上述构架,未来5~10年在复杂机电系统的集成科学、高性能精确成形制造、高精度数字化制造、高能束与特种能场制造、生物制造与仿生制造等领域争取安排重大项目;在机构学与机械振动学、机械的驱动与传动、零件与结构的失效与安全服役、机械的表面界面科学与摩擦学、微/纳制造科学与技术、机械的制造与运行参数测量等领域争取安排重点项目。

1.4 人才队伍、资助现状、重要成果与存在问题分析

1986~2009年,机械工程学科资助各类项目共计4771项,资助经费总额约为11.45亿元(如表1.1所示)。资助的项目数和资助经费的年度情况如图1.2所示。其中,资助面上项目3202项,资助经费总计6.56亿元。2006年学科的年度资助经费首次超过1亿元。与1986年(资助100项、经费361万元)相比,2009年(资助594项、经费2.15亿元)年资助项数增长了5.94倍,年度经费增长了59.66倍。

表1.1 机械工程学科项目分类汇总(1986~2009)

项目类型	项目数/项	批准经费/万元
面上项目	3202	65 552
青年科学基金	929	16 400
地区科学基金	73	1431.2
国家杰出青年科学基金	50	6880
重点项目(含学部优先资助领域重点项目群的6个)	85	12 791
重大项目	5	1800
创新研究群体科学基金	4	2710
海外及港澳学者合作研究基金	15	600
重大国际(地区)合作项目	4	392
科学仪器基础研究专款	8	770
重大研究计划	42	3396
其他项目	354	1818
总计	4771	114 540.2

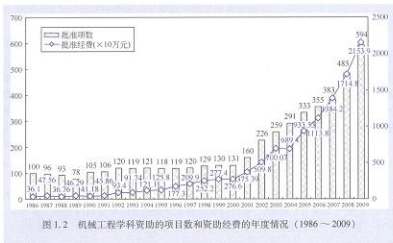


图 1.2 机械工程学科资助的项目数和资助经费的年度情况 (1986~2009)

培养和造就具有创新能力的人才和群体人才,是推动学科发展的保障。到目前为止,学科共资助了4项创新研究群体科学基金,分别是中国科学院兰州化学物理研究所刘维民负责的“空间润滑材料与技术研究”(2004)、西南交通大学周仲荣负责的“高速列车运行安全的关键科学技术问题研究”(2005)、清华大学雒建斌负责的“微/纳制造中的表面/界面行为与控制技术”(2007)以及上海交通大学林忠钦负责的“复杂装备的数字化设计”(2008)。由于取得了突出的成果,中国科学院兰州化学物理研究所刘维民负责的群体、西南交通大学周仲荣负责的群体结题后又分别得到了为期3年的延续资助。创新研究群体科学基金的资助经费总计2710万元。

国家杰出青年科学基金获得者是人才队伍的重要组成部分,对相关学科领域以及研究单位的科研水平提升和发展具有重要作用。截止2009年,学科共资助国家杰出青年科学基金获得者50位,资助经费总计6880万元。其中,2005~2009年,共资助杰出青年基金22位,机械学领域8位,制造工程科学领域14位。学科重视杰出青年项目的均衡性,基本确保了每个研究领域都有国家杰出青年科学基金项目获得者,进一步扩大了国家杰出青年科学基金项目的影响。

青年科学基金作为人才类项目,也得到了进一步的关注。1986~2009年共资助项目929项,经费总计1.64亿元。与1987年(资助2项、经费8万元)相比,2009年(资助194项、经费3870万元)年资助项数增长了97倍,年度经费

增长了483.8倍。该项基金的资助率和经费都有了大幅度的提高。

1986~2009年,机械工程学科共资助重大项目5项,资助经费总计1800万元。此外,共资助重点项目85项(含学部优先资助领域重点项目群6项),资助经费总计1.279亿元。其中,2005~2009年共资助重点项目42项,机械学领域16项,制造科学领域26项。

2009年获得重大研究计划“纳米制造的基础研究”资助的有6个重点支持项目(经费1580万元)、36个培育项目(经费1816万元)以及1项计划实施管理费项目(经费200万元),批准项目总经费为3596万元。

通过重大、重点、面上、重大研究计划等创新型战略类项目的资助,机械工程学科在基础共性研究领域取得了较好的成果,使机构学与机器人机械学、传动机械学、机械动力学、机械结构强度学、机械摩擦学与表面技术、机械设计学、零件成形制造、零件加工制造、制造系统与自动化、机械测试理论与技术等相对较为传统的二级学科代码方向有更加明确的新内容、新概念,推动着基础研究向广度、深度方向进一步发展。同时,结合国家重大社会和安全方面的需求,在资源、能源、国防、运载等重大制造装备的设计制造以及重大关键零件/构件的高性能/高精度加工等方面也取得了较好的成果,推动着国民经济建设和国防安全建设的进一步发展。

经过学科“十五”、“十一五”的精心布置,通过在微/纳机械系统领域资助的重点项目群,以及重大项目“先进电子制造中的重要科学技术问题研究”,拓展了传统的制造科学领域,有力地推动了我国微/纳制造技术的自主创新和相关产业的发展,为微/纳制造奠定了坚实的基础。通过与物理、化学、信息等学科的综合交叉,以机械工程学科为主,设立了“纳米制造的基础研究”重大研究计划。该计划于2009年正式启动,预计通过5~8年的连续资助,有望在亚纳米级材料去除原理、纳米结构成形理论、纳米精度理论与测试方法、纳米制造装备新原理等方面取得突破,建立纳米制造工艺与装备的理论体系与技术基础,为我国实现“纳米为计量单位的制造”提供理论指导与技术支撑。

在生物制造与仿生制造以及高能束与特种能场制造等前沿方面,学科也进行了精心部署,通过重点项目、面上项目群的资助,形成了一定的研究特色,在某些方面也取得了具有国际领先水平的成果。这将为学科在“十二五”期间的发展奠定坚实的基础。

在推动学科发展和人才队伍建设的同时,基金项目也促进了各个国家重点实验室、省(部)重点实验室以及各国家级、省部级工程技术研究中心的基础研究工作的持续发展,为一批实验室成长为国家重点实验室奠定了基础,更为其成长为优秀国家重点实验室提供了有力支持,为科研环境的营造做出了贡献。

1.5 未来5~10年机械工程学科发展的保障措施

1) 实施“顶层设计”，打破条块分割，统筹科学规划

纵观美国、英国、日本以及欧洲一些国家前沿领域的发展，其都有系统的国家级发展计划，且制定了5~10年的发展目标，资助了一批战略科学家从事“顶层设计”工作，快速推进了前沿领域的发展。因此，结合国家重大需求，应使各种规划衔接与协同，克服短期行为和条块与利益分割，避免一些重要的规划出现部门条块分割，促进国家基础研究资源更加有效使用。

2) 瞄准国际前沿，实行适当的倾斜政策，孕育重点突破

在科学技术与经济、社会以及自然界的协调发展中，瞄准世界工程科学技术的潮流和趋势，开展科学研究和技术攻关，突破一批制约我国机械工程学科发展的瓶颈问题。通过科学分析，凝练能够突破的重点发展领域，选择具有重要意义的科学问题和共性的关键技术，全面规划，提高我国科技创新能力，逐步缩小与国际差距。

3) 营造良好的科技环境，支持科学家潜心研究

当前社会上不良的浮躁现象也在科技和教育界蔓延，“跑项目、跑奖励、学术权力与行政权力不分、甚至学术不端行为”等现象常发生，而创新需要营造相对自由宽松的环境，要为高素质开阔视野的创新型科技人员提供良好的研究设备和条件支持，支持他们长期潜心研究与持续的努力。

4) 加大科技投入，加强队伍建设与培养

加大国家相关部门科技投入，着力培养具有创新精神和多学科交叉基础的战略人才和研究人才，以适应未来以高新技术为基础的竞争新环境；稳定、优化和培养现有人才队伍，不断增强科技人员勇于创新 and 开展协同研究的能力；吸引海外及港澳优秀人才为国（内地）服务，充分利用国际前沿科技资源，着力提升我国科技人员基础研究的创新能力；鼓励青年研究人员投身基础研究行列，增加青年基金的资助率，增加年轻学者国际交流项目的资助率。

5) 加强国际合作，逐步形成以我为主的国际研究计划

充分发挥我国基础性研究优势或利用我国特有资源和条件开展国际合作。在共同研究的基础上，提高我国基础性研究水平，增强研究实力，以在国际大型科研合作计划中占有一席之地，并逐步形成以我国为主的国际研究计划。

在国际合作交流费的使用方面，摆脱目前比较单一的开会或短期互访的形式，鼓励开展实质性国际交流以及提高国际影响力的活动，由“输入型”、“单向学习型”向“平等交流型”、“优势互补型”转变。

6) 加强项目的评审与管理

提高优先资助领域的各类项目的资助率和资助强度,实行滚动资助;鼓励大胆探索创新,促进新原理、新方法的快速涌现;为创新前沿研究而非共识项目制定一套保护性的专家评审措施与办法;促进实质性的学科交叉、融合与渗透,设立由不同学科背景研究人员共同负责、共同申请的双负责人制项目。

加强项目进展报告、结题的审核;强调文章、成果的水平和质量而不是数量;严惩学术不端行为,如学术造假、与基金无关的文章中出现基金资助编号、一稿多投等。

参 考 文 献

- [1] 美国未来学研究所,美国机械工程师学会. 机械工程未来二十年发展预测. 中国机械工程学会译. 2008.
- [2] “2008 机械工程之未来全球高峰论坛”总结;2028 年机械工程展望. 中国机械工程学会译. 2008.
- [3] 日本机械学会. 日本机械学会技术路线图. 中国机械工程学会译. 2008.
- [4] 中华人民共和国国务院. 国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020). 2006.
- [5] 国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见(国发[2006]8号文).
- [6] 温家宝. 让中国的大飞机翱翔蓝天. 国防科技工业, 2008, 5: 6—9.
- [7] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 学科发展战略研究报告(2006~2010): 机械与制造科学. 北京: 科学出版社, 2006.
- [8] 中国科学技术协会. 机械工程学科发展报告(2006—2007). 北京: 中国科学技术出版社, 2007.
- [9] 钱学森. 创建系统学. 太原: 山西科学技术出版社, 2001.
- [10] 钟掘. 极端制造——制造创新的前沿与基础. 中国科学基金, 2004, 18(6): 330—332.

第2章 机构学与机械振动学

Chapter 2 Mechanisms and Mechanical Vibration

本领域包括机构学和机械振动学两部分。机构学研究的目的是根据功能和性能要求发明和设计新机构,是创造新机器的源泉和基础。机械振动分析是认识机械产品动力行为的基础,动态设计是提高产品性能的有效途径。机构学和机械振动学均属于机械工程学科的共性基础研究领域。

机构是传递运动和力的可动装置,机构学是研究机构的组成原理,分析已有机构的功能和性能,设计满足特定功能和性能新机构的一门科学,主要内容包括拓扑学、运动学和动力学,具有系统的理论体系。传统机构学将机构的概念局限于仅含刚性构件和理想运动副的机械系统,而现代机构学拓展了内涵,主要体现在:①采用多自由度串联、并联、混联和变拓扑等多种结构形式;②将理想刚性运动副扩展到含间隙或具有柔性的运动副;③将刚性构件扩展到柔性构件;④实现驱动器/传感器与运动构件的一体化集成设计。由于机构是机械装备的特征骨架,机构创新决定了产品的创新性,所以机构设计理论研究是现代机械装备设计的重要基础和发明创造的源泉,是提高国家制造业水平和国际竞争能力的关键。

机械振动学是研究结构和机械系统在载荷作用下微幅往复运动规律的一门科学。随着机械系统与结构向极端、高速、高加速、重载、轻量化等方向发展,由此带来的机械振动问题更为突出。机械振动严重影响机械系统的工作精度、运行可靠性和服役寿命,主要研究内容包括机械系统的动力学建模、机械系统各种复杂振动-冲击-噪声的分析与控制,机械系统的动态设计和优化。机械振动学是先进制造领域的重要理论基础。

2.1 内涵与研究范围

2.1.1 机构学内涵与研究范围

18世纪下半叶,在第一次工业革命的推动下,机构学在一般力学基础上逐步发展为一门独立的学科,通过对机构的拓扑学、运动学和动力学的研究形成了

机构学的独特体系和研究内容。早期机构的概念局限于具有确定运动的刚性构件系统。随着现代科技的发展,机构学已经由单纯研究机构的拓扑学、运动学和动力学发展成为一门研究机构功能、类型、分析与设计方法,以及机器的运动状态和特征、控制方式等的技术基础学科。

机构学主要研究机构拓扑学、机构运动学与动力学,包括分析和设计两个方面。目前,国际上机构分析理论已较完善,并形成了商业实用软件,但是复杂机构的设计仍缺乏系统、完整、有效的实用理论与方法。机构设计包含两部分,即机构拓扑结构设计和尺度参数设计,二者彼此衔接。其中,考虑工作载荷、服役环境等外部扰动的机构尺度参数设计可分为构件尺度与结构、驱动器、运动副等的参数设计,以便体现出真实机构的特点。随着现代科学技术的发展,极端服役装备的真实机构、微/纳机构、仿生机构和变胞机构等已成为机构学活跃的研究内容。

机构拓扑学包括机构的自由度分析、拓扑结构分析与综合,目的是建立机构系统组成的理论体系,为产品的机构创新和发明提供实用的理论和方法,同时也为揭示拓扑学、运动学与动力学三者之间的内在联系奠定理论基础。机构拓扑学的基本问题包括机构拓扑与功能的数学表述、拓扑与功能之间的映射关系及其运算、基于拓扑与功能映射关系的解空间求解以及优化设计理论与方法等。

机构尺度与结构的耦合设计是现代机构学的重要研究内容。机构的尺度综合主要研究机构性能评价、机构选型、目标建模、模型求解和结果优选等,特点是与工程应用、作业任务、工作载荷和服役环境等实际因素密切关联。考虑机构尺度与结构以及动力学特性的耦合设计应引起机构学界的高度重视。

机构动力学研究多刚体、多柔体、动平衡等问题,旨在揭示机构构型和尺度以及结构参数与运动、驱动、承载、刚度等之间的映射规律,主要研究内容涉及机构运动规律、动态性能分析与评价、动态设计等。现代机械在高密度能量传递中向重载、多自由度、高速度、高加速度、高精度、高刚度和高可靠性等方向发展,对机构的设计提出了严峻挑战。主要研究范围包括:分析机构的非线性动力学特征,研究机构振动主动控制,探讨真实构件弹性、运动副界面摩擦、尺寸随机误差等多种因素对机构动力学性能的影响。

微/纳机构包括微/纳操作机构和微/纳尺度机构,主要表现形式为柔顺机构。柔顺机构是以柔性关节代替传统运动铰链,采用柔顺元件的弹性变形而非刚性元件的运动来传递或转换运动、力或能量的一种新型非装配一体式机构,在微/纳制造、生物芯片技术、微电子制造、精密和超精密加工、精密操作以及 MEMS 中具有广泛的应用。微/纳机构是机构学研究的前沿领域,研究的主要问题包括基于设计域的拓扑优化理论、微机构的驱动与传感技术以及尺度效应等。

仿生机构作为机构学的一个重要分支,是生物学、机构学、力学和材料学等诸多学科的交叉研究领域。仿生机构主要涉及结构仿生和功能仿生两个方面。结构仿生是通过研究生物肌体的构造,设计类似生物体或其中一部分的特种机构,通过相似机构实现相近的功能;功能仿生的目的是使人造的机构具有或能够部分实现动物的某些功能。仿生机构的研究范围包括结构仿生和功能仿生的机理、考虑生物结构的刚度和阻尼匹配时欠驱动机构仿生设计原理、高密度能量冗余驱动仿生原理以及高承载自重比的行走机构仿生方法等。

变胞机构是一类变自由度、变拓扑、可适用于多工况的机构。这类机构适用于非结构化环境、变工况和多任务场合。其研究内容包括变胞机构多组态的耦合关系、多功能切换的灵活度和可控性以及变胞机构性能评价和优化设计方法等。

2.1.2 机械振动学内涵与研究范围

机械振动学是以力学、声学 and 数学等为理论基础,结合控制论、信息科学、环境科学和材料科学等相关学科而形成的工程技术学科。振动是工程实际中普遍存在的一种现象,机械振动的存在严重影响着机械产品的工作精度、运行可靠性和服役寿命。掌握机械振动的产生机理,对于设计制造安全可靠和性能优良的机械系统与结构,抑制和防止振动带来的危害是十分必要的。机械振动学是机械科学的重要组成部分,其主要研究范围包括机械振动的非线性分析、振动系统的载荷与参数识别、振动控制与利用、机械结构与系统的动态设计以及基于振动的机械故障诊断等。

机械结构与系统的非线性振动是工程实际中的复杂问题。由于在几何关系、本构关系、约束条件、拓扑、激励因素、耦合方式、时空尺度和演化机理等方面存在着非线性因素,因此研究非线性振动方能较准确地描述机械系统的动态特性。非线性振动系统除了有由外部激励直接激发的主共振和亚/超谐共振模态外,还存在由共振和参数共振引起的间接激发模态,产生饱和、跳跃、锁相、周期与混沌调制等复杂现象。另外,有些实际振动问题需要描述为时变参数系统和时滞系统,其特点是它们的线性化方程的特征方程是超越方程,有无穷多特征根,是机械振动的热点问题。

机械振动与噪声控制是振动工程领域内的一个重要分支。现代振动控制一般分为被动、主动和半主动控制等类型。被动控制是采用隔振、吸振和阻尼耗能技术等来减小机械结构吸收的能量,达到减振目的。主动控制是根据所检测到的振动信号,采用控制策略驱动作动器对控制目标施加一定的外部能量,达到抑制或消除振动的目的。半主动控制是可控的被动控制。机械噪声控制分为无源噪声控制和有源噪声控制(ANC)两类。无源噪声控制是通过消声、隔声、吸声、振动

隔离和阻尼减振等措施,达到降低噪声的目的。ANC 是在指定区域内人为地产生一个次级声信号,控制初级声信号,实现降噪的技术方法。

机械设备故障诊断是以机械设备运行过程中产生的振动噪声信息分析与判断机械设备是否发生故障,并准确给出故障类型和发生位置。现代机械振动故障诊断研究内容包括振动故障机理、振动信号测试以及振动信号分析与诊断。振动故障识别与诊断决策过程中采用的方法主要有基于模型的故障诊断、模式识别故障诊断和人工智能故障诊断等。

研究机械振动学的理论与方法、解释机械结构系统中的各种复杂运动现象、实现复杂装备振动与噪声的有效控制以及振动的有效利用是提升机械装备性能的重要手段。

未来5~10年,在国家重大需求的驱动下,密切围绕国际学术前沿,以自主创新为主线,系统研究复杂机构的拓扑与参数一体化设计理论与方法、机械产品的动态设计等理论问题,为设计出具有自主知识产权、功能和性能优良的机械产品奠定理论基础。

2.2 在国民经济、社会发展和学科发展中的重要意义

2.2.1 机构学在国民经济、社会发展和学科发展中的重要意义

人类创造的机械史体现出机构的发展历程。从远古的简单机械、东汉时期的地动仪、文艺复兴时期的计时装置和天文观测器到当代的巨型天文观测系统;从诸葛亮的木牛流马、达·芬奇的军事机械、工业革命时期的蒸汽机到当代的机器人;从百年前莱特兄弟的飞机、奔驰的汽车到现代的飞机和汽车;从20世纪60年代的登月飞船到现代的航天飞机和星球探测器,这些机械装备的进步都留下了机构的烙印。

随着电子技术的发展,芯片封装等领域迫切需要新的高效、高速、稳定的制造装备。这类电子制造装备中机构的特点是快速启停、短距、高频、多自由度往复运动。机构运动加速度可达 $15 \sim 20g$,往复运动频率大于 15Hz ,运动精度在微米级,这些对机构的动态设计提出了严峻的挑战。在电子、医药、食品生产等领域,必须以很高的速度、加速度与定位精度完成插装、封装、包装、分检等工作,这需要借助高速机器人机构实现。例如,最具特色和代表性的 Stewart 和 Delta 机构就体现了机构学对现代工业技术发展的贡献。

在医疗和康复领域,灵巧操作医用手术机器人在普通外科、神经外科、骨科、放射科和康复外科等领域得到了广泛应用,多维微操作机构在显微外科发挥

了不可替代的作用。多自由度的人机交互力觉感知机构应用于遥操作手术和医疗培训的虚拟现实装备中,应用多自由度机构模拟人体关节和肢体运动开发的康复机械为人类的健康发挥了积极的作用。

在航天领域,采用冗余容错驱动的多自由度机械臂、多连杆大尺度缩放太阳帆板机构、多自由度空间飞船对接机构及其地面动态模拟并联机构、多输入多自由度星球漫游车机构等,不仅有效促进了航天科技进步,也拓展了机构学的应用领域。

综上所述,机构是机械产品发明创造的源泉,机构创新设计决定了机械产品的创新性。当今制造业的飞速发展对机构原始创新提供了空前的机遇,促进了现代机构学的加速发展,极端服役复杂机构、并联机器人机构、微/纳机构、仿生机构和变胞机构等设计理论的进一步研究,将对提高我国机械产品自主创新能力具有十分重要的意义。

2.2.2 机械振动学在国民经济、社会发展和学科发展中的重要意义

振动理论是现代许多科学技术领域的基础理论。振动可引起噪声污染,降低机械加工的精度,加剧构件的疲劳,缩短机器的使用寿命,甚至造成灾难性的事故。因此,研究机械振动的机理是机械系统设计的重要任务之一。

随着先进制造业的飞速发展,需要准确迅捷地分析、预测机械产品的动态性能。1972年日本海南电厂的一台66kW汽轮发电机组,在试车中因发生异常振动而全机毁坏。美国的亚利桑那电站(1956年)、匹兹堡电站(1956年),前苏联的切尔诺贝利核电站四号机组(1986年),我国的大同电厂(1985年)、秦岭电厂(1988年)、阜新电厂(2000年),都由于各种振动发生过灾难性事故,造成了巨大经济损失。在航空航天飞行器发生的重大事故中,有40%的事故与异常振动有关。在冶金设备中,剧烈的扭转振动和横向振动可导致设备的各种故障发生。这些事故多表现为非线性低频振动失稳,但该失稳机理至今研究的还不够清楚。

模态分析技术是从20世纪60年代后期发展起来的一种结构动力学分析方法。模态分析是结构动力学中的一种逆问题分析方法,与传统的正问题方法不同,它是在对结构进行实际测试的基础上,采用实验与理论相结合的方法来处理工程结构的振动问题。模态参数能够准确直观地反映系统动态特性,振动模态参数识别是模态分析的核心内容也是模态分析的基础,是解决工程中振动问题的重要手段,在机械、航空、航天、土木、建筑、造船和化工等工程领域被广泛应用。

振动会使机械产品加速磨损、降低精度和缩短寿命,对产品的动态特性设计

和振动控制提出了更高要求。美国的 Explorer-1, 由于刚性本体附带的4根鞭状天线的不希望振动导致卫星姿态翻滚而失效; Hubble 太空望远镜由于进入阴影区时太阳帆板的不均匀热变形引发了太阳帆板振动, 严重影响卫星的姿态稳定度, 成像分辨率也大大降低。单点金刚石超精密切削加工可得到0.1nm级的表面粗糙度, 高精度惯性仪表的校准要求具有振动加速度控制在 $6 \sim 10g$ 的环境, 研究先进的振动控制技术十分必要。

故障诊断是机械产品安全运行和维护的基础, 振动分析是机械故障诊断的基本方法之一。先进的机械振动故障诊断技术, 是保证国民经济建设中重大装备健康稳定运行的重要技术手段。日本实施故障诊断后, 事故率可减少75%, 维修费用可降低25%~50%。对英国2000个工厂的调查表明, 采用设备诊断技术后维修费用每年节约3亿英镑。由此可见, 实施故障诊断的经济效益显著, 研究机械振动故障诊断理论与技术是有明显的理论意义和实用价值。

虽然振动会产生危害, 但也有广泛的利用价值。振动与波的利用技术与工业生产及人类生活联系密切。利用振动原理设计的机械和仪器种类已达百余种, 在工业、农业、国防以及人类生活各个方面发挥了重要作用。随着科学技术的发展, 利用振动的新技术、新工艺和新产品层出不穷, 如振动输送技术、振动破碎技术、振动时效技术、超声波振动切削技术等。随着生产实践和科技的不断发展, 人们对振动过程的认识将日益深化, 机械振动的利用将会更加广泛。

机械振动学已发展为包括振动建模、振动分析、振动仿真、振动控制、振动测试和故障诊断等一系列领域的内容丰富的综合学科, 广泛应用于结构振动、传动系统振动、高速转子振动、机器人系统振动、运载装备振动、机床振动和航空航天飞行器振动等多个领域。目前, 对非线性振动机理的研究还不够深入, 如强非线性多自由度系统的精确求解、复杂时变过程的特性、复杂系统失稳的机理、复杂自激振动的形成和发展过程等问题仍缺乏系统的理论方法。因此, 紧密结合国家重大战略需求发展机械振动学学科至关重要。

2.3 研究现状、存在问题和发展趋势分析

2.3.1 机构学研究现状、存在问题和发展趋势分析

机构学是机械领域的传统基础学科。17~18世纪, 随着蒸汽机、纺织机等相继发明, 机构成为当时国际上热门的研究问题。19世纪初, 机构学从一般力学分离出来, 开始成为一门独立学科。经过半个世纪的发展逐渐形成以德国学者为代表的德国学派。20世纪上半叶, 前苏联学者对机构学的发展做出了重大

贡献，形成前苏联学派。20 世纪下半叶，以美国学者为代表，推动机构学与计算机技术相结合，形成美国学派。随着科学技术的发展，机构经历了从平面向空间、从单自由度向多自由度、从串联向并联、从刚性向柔性、从静态设计向动态设计的发展过程。机构学的发展和数学与力学的发展密不可分，从早期的初等代数、几何学，到后来的微积分、微分几何、拓扑学、李群等。现代数学工具的使用大大推进了机构学发展的步伐。尤其是自 20 世纪 70 年代以来，图论、螺旋理论、拓扑学、李群李代数、集合论等数学工具在机构研究中的广泛应用，即使发明了一批新型机构。图 2.1 所示为机构学在时间、数学、力学、方法与研究进展等方面的发展历程。

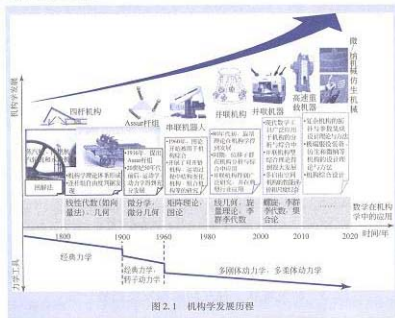


图 2.1 机构学发展历程

目前，现代机构学理论研究在国际上发展迅速，在现代装备上应用广泛。在北美，美国机械工程师协会（ASME）从 1955 年起举办机构学双年会，2000 年以后改为机构学与机器人学双年会，2004 年后改为机构学与机器人学年会。会议主要讨论机构的综合、运动学、动力学、机器动力学、生物机械、仿生机械以及机构学在航空航天中的应用等问题。国际机构学和机器科学联合会（IFTOMM）

是具有代表性的机构学国际学术组织。欧洲主要代表性的机构学组织是 RoMance ARC 协会和英国机械工程师协会 (IMechE) 等。在中国, 主要学术组织有中国机构学专业委员会和 IFToMM 中国委员会等。中国机构学专业委员会每年都组织机构学年会, 有效促进了我国机构学的国际化、现代化和实用化。IFToMM 中国委员会扩大了中国机构学国际交流范围, 提高了中国机构学国际影响度和国际学术地位。

机构学研究源远流长, 但从古到今, 机构学研究的核心问题不外乎机构的组成原理与新机构的发明创造、机构运动学与动力学的分析方法及设计理论等。机构拓扑、性能评价、尺度综合、动力学设计、仿生及微/纳机构等方面是现代机构学的前沿领域。

1. 机构拓扑学

从机构组成原理的角度看, 机构是由运动副和构件按一定的拓扑组成的, 机构结构学的主要研究内容是机构的型综合理论与方法。所谓机构的型综合是指确定机构的构件数目、运动副数目及其类型, 以及可能的连接方式, 以获得确定满足功能要求的所有机构。其发展趋势是由研究者的经验和灵感向系统理论与方法发展。在平面机构构型理论方面, Assur 最早提出了平面机构构型“杆组法”, 其后, Freudenstein 和 Crossley 提出用“图论”理论研究平面机构拓扑综合问题。国内的一些学者也基于“杆组法”, 研究了由单铰和复合铰组成的机构的结构分类及类型综合问题。

目前, 国内外机构构型研究主要集中在并联机构构型创新方面。并联机构的结构属于空间多环、多自由机构, 其机构构型综合是一个具有挑战性的问题。用于机构拓扑综合的理论主要有以下几种: 基于螺旋理论的末端瞬时运动约束法^[1]、基于李代数的有限位移群法(位移流形法)^[2,3]、基于单开链和方位特征的拓扑综合方法^[4]和集合论方法^[5]等。其中, 螺旋理论方法是一种主要基于运动螺旋、约束螺旋、反螺旋和螺旋系统线性等相关概念研究并联机构的构型综合方法。关于机构原始创新设计问题, 法国 Merlet 教授指出:“并联机构的优化设计可分为两个主题: 拓扑综合与尺度综合, 虽然还不清楚拓扑综合能否与尺度综合分离, 但其性能与这两类综合密切相关, 这是一个很大的课题, 只有通过机构学家、数学家和产业界的密切合作才能完成。”

机构的构型综合方面存在的问题突出体现在缺乏拓扑学、运动学和动力学的统一建模的方法, 缺乏可视化、智能化、工程化机构设计软件系统。该领域的发展趋势是系统研究机构的拓扑结构、运动学和动力学性能的映射规律, 建立机构构型的优选理论与方法。

2. 机构的性能评价

机构性能分析与设计首先需要解决的是机构的性能评价问题^[6]。机构的构型与参数设计问题通常是通过在一定的约束条件下优化性能指标来完成的,这些指标应具有明确的物理意义,并具有可计算性。目前,国内外关于机器人机构性能评价指标的研究主要集中在工作空间、奇异位形、解耦性、各向同性、速度、承载能力、刚度和精度等方面^[7,8]。虽然国内外已有许多有关机构的性能评价指标的研究,但是由于工程实际中问题的复杂性和多样性,目前,相关研究还主要是对个例的研究,缺乏系统全面的理论方法,尤其是对多自由度并联机器人机构等复杂机构的性能评价指标的研究还很不成熟。机构性能评价的主要发展趋势是借助数学和力学等工具,研究具有明确的物理意义、可用数学方程描述、具有可计算性、可全面描述机构综合性能的评价指标。

3. 机构的尺度综合

尺度综合是在选定构型前提下,为实现特定的任务或完成预期的功能确定机构运动学参数的过程^[9]。机构的构型种类繁多、尺度域性能多样和尺度域无穷造成了机构尺度综合问题十分复杂,因此,其挑战是如何揭示多种性能与机构尺寸型之间的映射规律。

18世纪末,欧拉、罗蒙诺索夫、蒙日和彭赛列等科学家的研究奠定了机构综合理论的基础。19世纪后半期,逐步形成了以勒洛和布尔梅斯特为代表的建立在运动几何学基础上的几何学派,以及以俄罗斯的切比雪夫为代表的建立在函数逼近论基础上的代数学派。电子计算机和计算数学的发展为机构综合提供了先进的工具和方法,使解决复杂的机构尺度综合问题成为可能。20世纪90年代以来,并联机构的尺度综合方法主要分为两类,即基于矩阵奇异值理论的目标函数优化方法和空间模型理论方法^[10]。图2.2所示为机构的性能指标、机构类型和特征的发展历程。

从数学意义上来讲,选取合适的初始值和加权系数,基于目标函数的方法能够获得理论最优解,但未必是工程设计最优解。随着装备制造业的快速发展,机构尺度综合问题通常需要考虑多种约束条件、多个目标函数,涉及众多优化参数。近年来,国内外学者对串联、并联及混联机构的尺度综合问题进行了较深入的研究。但是,机构设计中的若干基础理论问题,如拓扑设计模型与参数设计模型的有机衔接、数学模型的完备性及性能评价指标的合理性等尚未得到妥善解决。

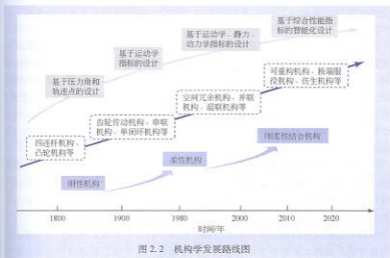


图 2.2 机构学发展路线图

主要存在的问题包括：

(1) 拓扑设计与参数设计在数学层面上严重脱节。寻求机构拓扑设计的普适性理论与方法是近年来并联机构的研究热点，在研究内容上主要侧重于并联机构的拓扑创新，缺乏与后续的尺度综合环节的内在联系，因而导致拓扑优选缺乏科学依据，缺乏完备的尺度综合模型。建立相关机构的参数化模型，是对该类机构进行性能分析与优化设计的首要环节。但与拓扑综合相比，机构的参数建模理论研究还远未成熟，大量研究工作仅针对某一特定机构的某类参数建模，各类参数模型的映射算子维数并不一致，数学模型缺乏完备性和普适性。

(2) 缺少兼顾机构综合性能的决策理论。映射算子的代数特征，如条件数、最小奇异值和可操作性等可作为评价系统局部性能的指标，而其全域数字特征，如均值、波动量及其组合等又可作为优化设计的目标函数。现有指标评价体系存在如下三方面的问题：其一是对于某类性能，如速度、精度、刚度和动态特性等，尚未揭示出多种指标的差异和选取原则；其二是对于同类指标，尚未揭示出用其评价不同性能的适应性；其三是仅将与运动空间对应的指标作为评价测度，而缺乏对与约束空间对应的指标给予充分考虑。

如何解决上述问题，揭示多种性能与机构尺寸型之间的映射规律，建立一种面向工程应用的具有普遍适用性的机构尺度综合方法是未来的研究目标。

4. 机构动力学

机构动力学是机构学的重要研究内容之一,其研究内容可分为两个层次:一是研究机构动力学的一般规律;二是针对特定的真实机构,综合考虑机构的材料、工作环境、工作载荷、服役时间、操作或受控特性等多种因素,研究机构的动态特性。现代机械向多自由度、高速度、高加速度、高精度和重载方向发展,机构动力学问题已经成为直接影响机械产品性能的关键问题。机构及机器人动力学领域研究内容主要包括弹性机构动力学、柔顺机构动力学、多刚体系统动力学和多柔体系统动力学等。

目前,有关弹性机构动力学的研究相对成熟^[11],该类研究假设机构的刚体运动是已知的,机构的运动假设是小幅快变的弹性振动与大幅慢变的刚体运动的线性叠加。随着对机构弹性动力学研究的不断深入,人们发现以小变形假设为基础的弹性机构动力学分析方法在理论上存在局限性,不能很好地对具有较大弹性变形的柔性机构进行动力学分析。目前,已有一些以多柔体系统动力学为基础的分析方法,其基本思路是采用有限元、假设模态、校正模态和奇异扰动等方法获得柔性体动力学有限维逼近的坐标基,联同关节变量作为广义坐标,通过拉格朗日方程或变分原理导出动力学方程组,但其求解过于复杂,数值稳定性问题一直没有得到有效解决,因而研究对象一般均为简单机构,与实际应用还有较大差距。

机构动力学的发展趋势是,从避免构件柔性变形的发生向充分利用构件柔性变形、综合提高机构性能的方向发展。机构的非线性特性、振动分析与振动控制、运动稳定性等方面均有待进一步研究。值得引起重视的是,目前机构动力学研究大都是建立在对真实机构的简化基础上进行的,其处理方法一般是把无穷维自由度和若干种属性的构件处理为有限自由度和仅保留密度、质量、惯量等属性的描述;对运动副的描述也大都采用理想光滑铰链约束,这一方法在结构刚度较大、精度要求不高的情况下是有效和适用的。技术的发展对机构的精度、耐久性、运行速度和可靠性等提出了更高的要求,这就需要综合考虑机构的设计、材料选择、工作环境、工作载荷、服役时间和操作特性等影响因素。真实机构可以发生弹、塑性变形,构件的材料具有变异特性、热特性和时效特性等;运动副具有间隙、摩擦、磨损和迟滞等特性,这些特性会对高速、高精度机构产生不可忽视的影响。传统的基于多刚体和理想约束机构学研究不能描述上述特性。因此,如何引入多学科知识,建立真实机构学理论与方法是机构学研究的重要发展趋势之一。航天器中大型空间机构和柔顺机构的可靠性问题也是人们关注的热点。

运动副间隙是影响机构动力学特性的重要因素之一^[42]。在含间隙机构的动力学模型、运动副分离准则、混沌特性及优化设计等方面的基础性工作研究还不够成熟,尚需要进行系统深入研究。该领域的发展趋势是将构件柔性、误差等因素也纳入研究范围,与间隙问题一起考虑,这样才能进一步反映机械系统的真实情况。

5. 仿生机构学

仿生机构学是将生物运动机理与机构学的分析与综合理论相结合而形成的一门交叉学科。其研究对象是分析生物体的结构、运动转化形式及过程,再利用机械技术对这些过程进行模拟,以改善现有机构并创造出崭新的现代机构。目前,仿生机构学的主要研究内容是模仿生物的行走运动,出现了多足机器人、蛇形机器人、机器鱼、扑翼飞行器和仿人机器人等。2000年以来,最具代表性的仿生机构为美国波士顿动力公司研发的“大狗(Big Dog)”,其四条腿完全模仿动物的四肢设计,内部安装有减震装置。日本本田公司研制的ASIMO是目前最先进的仿人形机器人。ASIMO具有髋关节、膝关节和足关节,共有26个自由度,分散在身体的不同部位。其中,脖子有2个自由度,每条手臂、腿各有6个自由度。

仿生机构具有高度的灵活性、自由度冗余、结构复杂,目前的仿生机构承载能耗与总能耗功率的比例低,仿人机器人在该项的比例为1:30,难于应用于实际。因此,在机构仿生中存在的挑战是高承载自重比机构的结构仿生设计和仿生冗余驱动。另外,仿生机构的动态稳定的可靠性理论研究薄弱,适应环境的刚度与阻尼匹配和构态变化的功能仿生机构研究缺乏。

6. 微/纳与柔顺机构

微/纳与柔顺机构在生物医学、微电子制造、精密和超精密加工、精密定位与操作等领域中具有广泛的应用^[13,44],是现代机构学研究的前沿热点。20世纪90年代以来,有关微/纳与柔顺机构的运动学分析与设计研究取得了许多成果。Howell等提出著名的伪刚体(pseudo-rigid-body)模型法促进了该领域的发展。伪刚体模型法存在的突出问题是柔性铰链与刚性铰链存在本质上的区别,如存在转轴漂移、非特征方向上存在伴生运动等^[45]。从等效刚体机构到对应柔顺机构的设计过程中,其运动类型经历了一个变形映射。伪刚体模型仅是柔顺机构的一个小范围线性近似,它与物理原型的符合程度与分析的对象相关。另外,将柔顺机构转化成刚性机构,或从已有的刚体机构出发对柔顺机构进行分析和设计,对少自由度简单系统是可行的,但对于多输入多输出这类较复杂的机构往往很难

凭经验找到合适的初始机构。

微/纳柔顺机构设计的另一类方法是拓扑优化方法,采用该方法在寻找柔顺机构的最佳拓扑时只需给定设计域和指定输入输出位置,从而有效克服了凭经验设计柔顺机构的盲目性,且所得的机构具有优化的力-位移输入输出关系,因而引起了人们的重视。这方面研究最多的是单输入单输出问题,常用的拓扑优化方法主要有均匀化方法、基础结构法和水平割集法等。目前,对多输入多输出柔顺机构拓扑优化设计的研究还不多。

由于柔顺机构是依赖柔顺元件的弹性变形而非刚性元件的运动来传递或转换运动、力或能量的一种新型机构,因而考虑疲劳可靠和非线性的拓扑优化问题尤为重要。如何从柔顺机构的本质出发,建立更准确的模型用于分析与设计是柔顺机构研究取得突破性进展的一个关键。随着微/纳技术应用领域的不断扩大,从微/纳技术最初与机械学的结合,到与光学、生命科学、核科学等领域结合,产生了越来越多的新机构、新系统。这使得在设计时,不仅要考虑器件的机械力学特性,还必须要设计器件的电学特性、热学特性和光学特性等。微/纳和柔顺机构的多场耦合模型的建立与仿真工具都面临着新挑战。

7. 变胞机构

变胞机构具有自由度、拓扑可变等特点,是一类适用于多种工况的多功能机构。这类机构能够根据环境和工况的变化和任务需求,进行自我重组和重构,使其适应于不同任务和场合。经过十余年的研究和发展,变胞机构已成为国内外机构学研究的热点之一^[16]。其研究涉及机构的重组重构、奇异性、灵活性、可控性和柔顺性等关键科学问题,在航空航天、农业、轻工等领域具有重要的应用前景。

变胞机构正向多样化方向发展。美国 Howell 等给出了一种柔顺正交平面变胞机构,将二维平面机构转变为三维机构,在三维空间中实现特定功能。法国巴黎机器人科技实验室提出一种可伸缩变胞车轮,车轮的直径可以根据实际需要进行调节。这种变胞车轮能大大提高探测车的灵活性和越野能力,在星球探测中有着广泛的应用前景。近年,我国学者利用变胞机构理论研制了太空舱舱门开关操作机构^[17],实现了真空热环境下对飞船舱门性能的测试,设计了球面变胞机械手等,在变胞机构研究方面取得了一定进展。国内外对空间可折展式变胞机构进行了相关研究,它在航天工程中有广泛的应用前景。宇航空间可折展式机构种类繁多,可折展式桁架机构是最具发展前景和应用潜力的结构形式,该类机构由连杆、展开铰、连接铰、锁定器和驱动机构组成,在折展过程中表现为机构变胞特征。

针对设计新型可伸展空间机械臂、可展天线、太阳能帆板等航天装备问题,如何应用现代变胞机构设计理论,描述宇航空间可折展式机构的拓扑,建立具有可展特征的机构结构组成理论,解决宇航空间可展机构在构态转换过程中的变化和重组问题,是该领域的重要研究内容。

2.3.2 机械振动学研究现状、存在问题和发展趋势分析

1. 机械振动理论及分析方法

机械振动学的研究历史悠久,如图 2.3 所示,线性振动理论研究始于牛顿时代。欧拉、拉格朗日、达朗伯(d'Alembert)和伯努利(Bernoulli)等先后建立了离散和连续介质系统线性振动的一般理论。1873 年瑞利(Rayleigh)基于系统的动能和势能分析给出了确定基频的近似方法;里茨(Ritz)发展了瑞利法使之推广为几个低阶固有频率的近似计算;随后,这一方法又被伽辽金(Galerkin)于 1915 年进一步推广。由于线性微分方程理论的发展已经成熟,加之线性振动理论中的叠加原理、Duhamel 积分、模态分析和模态综合等技术,进入 20 世纪后线性振动理论的研究已逐渐趋于完善。

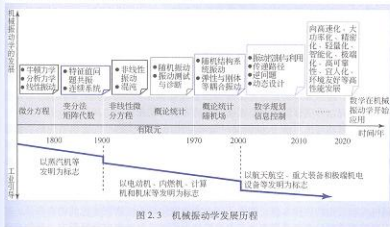


图 2.3 机械振动学发展历程

非线性振动的研究始于 19 世纪后期。庞加莱(Poincare)奠定了定性分析的理论基础。在他 1881~1886 年的一系列论文中,他讨论了二阶系统奇点的分类,引入了极限环概念并建立了极限环的存在判据,定义了奇点和极限环的指数;此外,他还研究了分岔问题。1788 年拉格朗日建立了保守系统平衡位置稳定性判

据。1892年李雅普诺夫(Lyapunov)给出了稳定性的定义和判别方法。伯松(Poisson)、林滋泰德(Lindstedt)、达芬(Duffing)、范德波尔(van der Pol)等在定量求解非线性振动方面,分别提出了摄动法、谐波平衡法和KBM渐近法等方法。非线性振动的研究使人们对振动的机制有新的认识,发现了混沌振动。分岔、混沌的研究成为非线性振动理论新的研究热点,并在工程中得到了广泛应用。21世纪以来,非线性振动的理论及其工程应用是非线性科学研究的前沿和热点^[18,19]。近年来,我国学者将Lyapunov-Schmidt方法与奇异性理论结合,提出了可以揭示非线性振动系统拓扑周期分岔解与系统结构参数之间关系的C-L方法^[20],为结构优化设计、参数识别和分岔控制提供了新途径,形成了研究非线性系统周期解高余维分岔的方法体系。计算非线性自治系统正规形的直接方法和复内积平均法的提出,为揭示高维非线性系统局部分岔和全局分岔机制提供了工具。在机械系统中的应用方面,对突发低频失稳非线性机理、转子裂纹、转子静动碰摩以及轴承油膜引发的故障进行了一系列研究,成功应用于大型发电机组重大振动故障治理;基于分段线性系统的非线性振动理论,设计了大型共振筛。

近年来,时滞动力学系统已成为重要的研究对象^[21]。发现具有时滞状态反馈的Duffing系统存在无限多次Hopf分叉以及由此产生的共存的稳定周期运动,在无限维相空间的子空间中给出了多个共存稳态运动的吸引域。通过时滞状态反馈和稳定性切换分析,获得了振子周期运动的镇定条件;对存在时滞的刚-柔耦合系统,提出一种降维方法;提出采用实验数据对时滞反馈系统建模和参数辨识的方法。目前,对时滞动力系统的研究主要还集中在几个典型的问题上,对时滞系统动力学的认识还有限。以时滞反馈控制为中心的控制策略、非线性因素对时滞的影响、时滞导致的多级分岔等都是非线性振动的基础问题^[22]。通过对这些问题的研究,可以有效推动非线性时滞动力学的发展。

随机振动理论^[23]是机械振动与概率论相结合的产物。机械和结构的不确定性主要来源于环境载荷和机械结构参数的不确定性^[24],使得系统的响应过程不确定。在理论方面,研究者提出并发展了随机激励下耗散的哈密顿系统理论。形成了非线性随机动力学与控制的哈密顿理论体系,为解决多自由度强非线性系统的随机动力学与控制问题提供了理论基础。理论方面的另一个重要成果是给出了随机振动理论的物理本源,阐明了概率密度演化与系统物理演化的内在联系。在工程应用方面,主要成果集中于大规模结构的随机振动响应计算研究。研究者从不确定性激励过程的能量随频率的分布出发,结合时域快速积分和大型结构空间离散技术,提出了虚拟激励算法,将虚拟激励法与精细积分法相结合,可以求解非平稳随机振动问题。这一方法在我国已被广泛地应用于大坝、桥梁、空间大跨度结构、高层建筑、海洋平台和车辆工程等多个领域中,并进入了美国CRC出

版社2005年出版的《振动与冲击手册》。

2. 振动系统建模及辨识

振动结构动态载荷识别属于机械振动的反问题。动载荷识别技术开始于20世纪70年代,早期的动载荷识别技术源于军事用途。动载荷频域识别是将系统的动力学方程转化到频域中,运用已知条件识别未知动载荷,最后将频域中的动载荷进行傅里叶反变换,转化为时域动载荷。动载荷时域识别是利用阶跃力假设的积分方法来处理载荷识别问题。该技术发展尚不完善,对结构的边界条件和初值条件比较敏感,稳定性和鲁棒性有待提高。目前的动载荷识别方法的研究对象仍停留在以线性系统为主的阶段,与工程实际应用要求相差较远。在对非线性系统、线性时变系统、耦合结构机械系统等动载荷识别研究中,出现了模态滤波、小波、分形和神经网络等理论。

经典的模态参数识别建立在系统的输入输出可以测量的基础上,通过对这两者进行信号分析处理,得到系统的频响函数或传递函数,通过曲线拟合等方法识别出系统的频率、阻尼和振型。近年来,环境激励模态分析技术得到越来越广泛的重视。环境激励是指风载、工作激励、冲击波等随机扰动。在进行模态参数识别过程中,无需增加特殊测量设备,不影响结构的正常运行,只需要测得系统的输出响应数据就可以进行模态分析。环境激励模态参数识别主要包括频域识别方法、时域识别方法和时频域识别方法。振动模态参数识别是一个具有广阔工程应用前景的研究课题,虽然关于振动模态的参数识别方法已有大量的研究结果,但仍有一些关键问题需要在今后的研究中解决:①在模态密集、实验数据不完备情况下,如何有效识别振动模态的参数;②如何从实验模态中有效地甄别和剔除噪声模态;③对实验模态进行定阶、模态阶数估计,这两者理论上与结构自由度的数量有关,是参数识别的关键;④发展精确的测量信息处理技术,以期获得更加精确的模态参数识别方法。

在实际工程中,动力模型的理论分析结果与实测结果往往存在偏差。随着建模技术和动力测试技术的日益成熟,对机械系统动力模型的修正十分必要。传统的模型修正方法包括矩阵型法和设计参数型法。依据振动测量结果修正机械系统动力模型的研究得到了快速的发展,许多新的理论方法在这一领域得到应用:①敏感性分析法与上述两种传统方法的结合,其基本思想是先通过参数敏感性分析确定机械系统的修正参数,再用模型修正方法修正确定的模型参数;②有的学者将优化算法与传统模型修正方法进行了结合,它通过采用不同的优化算子计算需修正的机械系统参数,使得所确定的目标函数最小;③近年发展起来的基于神经网络的参数型动力模型修正方法,对噪声干扰和测量数据不完善具有强的鲁棒

性。它首先建立训练好的神经网络模型,然后输入模态测量值得到模型的修正量,最后通过结合原始的机械系统模型得到修正的动力模型。目前,机械系统动力模型修正方法距离在大型复杂机械系统中的实际应用还相差甚远。

3. 机械振动控制与利用

在机械振动控制中,被动控制方法由于不需要外界能源,装置结构简单,许多场合下减振效果与可靠性较好,获得广泛应用。振动主动控制技术的研究始于20世纪50年代末期,80年代后已经进入蓬勃发展阶段,不仅取得了丰富的理论研究成果,而且成功应用于航天、土木以及车辆结构的振动控制等领域^[25]。在机械工程领域,振动主动控制研究主要包括整机的振动主动控制、转子的振动主动控制以及其他方面的振动主动控制。对于整机的振动主动控制,主要是精密工作机械的主动隔振,防止地基的振动传给机体,如精密、超精密机床、精密测量仪器和电子加工设备。在整机的振动控制中,通常使用的作动器有电磁的、气浮的、液压的作动器以及压电陶瓷和磁致伸缩作动器等。转子振动主动控制研究始于20世纪70年代中期,主要研究对象是挠性转子。高速旋转机械如高速高精度机床、涡轮发电机组和离心机组等,常处于超临界转速下运转。如何抑制振动,防止失稳,确保转子运行安全可靠已成关键问题。目前,常用的主动控制技术有主动磁悬浮技术、挤压油膜技术、电流变技术、主动静压轴承技术和间接控制技术等。上述技术一般都是应用于小型转子系统,对于大型转子的振动主动控制,由于要求控制力很大,因而较难实现,但这也是转子振动控制应该解决的问题之一。除了整机和转子的振动控制外,随着机器人和各种操作手向高速、精密、重载和轻量化方向发展,柔性机械臂的振动控制日益受到重视,正成为机器人研究领域的热点。随着超精密加工、超精密测量技术以及航天技术的发展,微幅、超微幅振动的影响变得十分突出,尤其是亚微米以下的超精密加工更需要超静环境作保障。因此,研究微幅、超微幅的振动对主动控制具有十分重要的意义。

振动在弹性媒质中的传播即为声波,而噪声是紊乱、断续或统计上随机的声振动,因此噪声与振动有着密切的关系。ANC是在指定空间实时产生与噪声源在该处噪声幅值相等而相位相反的二次声,使之与主噪声叠加,最终达到消减噪声的目的。从德国物理学家 Paul Lueg 发明的“电子消声器”首次提出 ANC 的概念到现在的60多年时间里,随着科技的发展,ANC由最初的引起重视到现在已经有了相关产品问世。20世纪60年代末到80年代中期,电子技术水平限制了人们从事管道有源消声方面的研究,当时也生产出了相关的管道有源消声产品。80年代末到90年代中期,随着控制系统理论和数字信号处理技术(DSP)的发展,有源消声开始以自适应、三维空间有源消声为主要研究方向。国内一些著名的声

学实验室在自适应有源消声控制器及算法方面都取得了很重要的研究成果。英国 Southampton 大学的 Nelson 等对 ANC 进行了具有开创性的研究。90 年代后期,人们开始尝试将神经网络方法应用于有源消声中,例如,使用神经网络来解决具有非线性交叉串扰的自适应噪声抵消问题,采用多层前向神经网络代替线性自适应滤波器对非线性噪声进行控制,使用人工神经网络解决传统自适应有源消声算法在应用中稳定性不足等缺点,这都决定神经网络在 ANC 中起着非常重要的作用。目前,ANC 的研究主要集中在宽带噪声抵消的多通道自适应系统,以及利用基于人工神经网络的有源消声系统解决多通道信号处理和扩展消声频段。此外,智能结构噪声控制也是当前的研究热点。

由于振动与波的利用技术与工业生产及人类生活十分密切,振动的利用技术^[26]正处在迅速发展中。我国学者首先在国际上提出了振动利用工程的新概念,构建了振动利用工程学科的理论框架,提出了若干新的振动利用工艺原理,如概率等厚筛分新原理、研究物料在振动平面上及振动锥体内的运动机理、物料筛分过程理论、振动压实过程中的振动摩擦的机理等问题,发明了激振器偏转式新机构、惯性共振式双质体近共振新机构、内外锥组成双激振器用于破碎的新机构、不对称弹性力的双质体非线性近共振新机构、振动同步传动的自同步新机构、激振器偏转式自同步非共振新机构等,建立了间隙滞回系统新模型、惯性力项为非线性的动力学模型、不对称软式分段线性动力学模型、硬软式复合分段线性动力学模型、分段慢变的非线性的动力学模型、双参数慢变的非线性动力学模型、带间隙的滞回非线性动力学模型,发展了振动同步理论,包括振动传动、激振器偏转式自同步振动机同步性判据和同步运转状态的稳定性判据、倍频同步的同步理论,研究了振动同步传动的理论、振动与控制复合同步等新理论。

4. 机械结构与系统的动态设计

机械动态设计^[27,28]是依据机械产品的动态特性与预定的设计目标,进行机械产品的设计、预测、修改与重分析,确定符合产品的静态、动态特性的结构形状、尺寸等物理与几何参量,直到满足产品结构系统的动态特性的设计要求。

根据机械产品的结构变化与动态特性变化之间的关系,在得到能够反映实际机械结构系统动态特性的数学模型以后,就可以对机械结构系统进行动态修改与优化设计。结构动态修改也有正、逆两类问题,即已知结构变化求动态特性变化称为动态修改的正问题和已知动态性能变化求结构系统变化量是动态修改的逆问题。目前常用的方法是用人机交互的方法,根据设计者的要求,通过振动建模和动态特性分析,进行结构系统修改,从而改变结构系统的动态特性,然后再进行

计算分析,在优化过程中需要反复多次分析,直到所设计的机械动态特性满足要求为止,这是一个再设计和再分析的修改过程。这种设计过程,是广义概念上的优化设计,很大程度上依赖于设计者的经验和专业知识来完成。进一步的发展方向仍然是减少人机交互的程度,采用数学规划法或准则法,以固有特性或动态响应作为目标函数,由计算机自动完成结构系统分析的优化过程。这种动态优化设计,还有大量的理论工作和实际问题有待解决,目前对于简单的零件或少自由度系统有实现的可能。可见,机械动态设计涉及机械振动理论、计算机技术和现代设计方法等诸多学科范畴,至今还没有形成完整的动态设计理论、方法与体系,许多问题尚需进一步深入研究。

5. 基于振动的机械设备故障诊断

由于大型旋转机械的故障信息常在振动状况方面体现出来,根据振动信号进行监测与诊断目前仍是设备维护管理的主要手段。目前,国内设备振动故障诊断技术主要研究故障诊断的传感器匹配技术、信号分析与处理技术、人工智能专家系统、诊断系统、专门化与便携式诊断仪器和设备等^[29]。故障诊断技术的发展趋势是与激光测试技术、现代信号处理方法、非线性理论和方法、多元传感技术、现代智能方法等的融合。设备状态的智能监测和故障诊断是该领域的发展目标。

机械振动学是一门传统学科。如图 2.4 所示,它的发展与产业的革命、学科

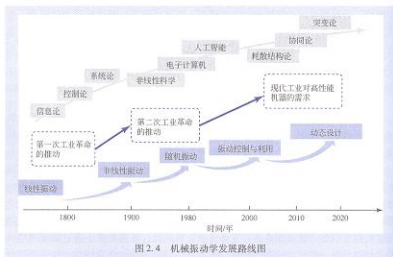


图 2.4 机械振动学发展路线图

的基本问题和方法论等密切相关,渗透到了机械工程学科的各个分支。面向工程中不断出现的各种实际问题,为了提升我国复杂机械装备的性能和运行可靠性,研究复杂机械系统在多场耦合环境下进行动力学特性和复杂机械系统的动态优化设计,仍是机械振动学研究的前沿课题。

2.4 未来5~10年的研究前沿与重大科学问题

机构是机械产品发明创造的源泉,是实现机器给定功能的主体。机械振动学为认识、设计具有优良性能机构和机械产品提供理论基础。机构动力学的实质是研究机构的振动学,机构学与机械振动学本身就具有紧密的联系。

当前,现代机械装备与系统正在向高速、高加速、高精度、智能化方向发展。现代制造业的飞速发展,对机构功能的要求也在不断出新,这也为机构的原始创新提供了空前的机遇,进而加速了现代机构学的发展步伐。为满足新功能要求,就要从机构构型创新上取得突破;为满足机构高速、高加速、高精度等性能方面的要求,就要从机构的精度设计、动态设计和可靠性设计等方面取得新的突破。

近几十年来,基于机械振动学与机械动力学的动态设计凸显其重要性,深入研究机械产品的动态概率设计与动态综合设计,可以为我国机械产品的设计、制造、使用和评估提供合理和必要的理论依据,为解决我国机械领域内动态概率设计与动态综合设计的核心技术“空心化”问题、形成产品创新能力及自主开发能力提供理论支撑,从而为提升我国机械产品设计的技术水平、加速我国机械产品设计的数字化步伐、扭转我国机械产品动态概率设计与动态综合设计落后的局面、增强我国机械产品在国内外市场中的竞争能力发挥重要作用。总之,开展现代机构学和机械振动学的研究,对提高我国机械产品自主创新能力和竞争力具有十分重要的意义。

未来5~10年通过对机构学和机械振动学的研究,需实现两个重大转变:①在基础研究方面,密切围绕国际学术前沿,以自主创新为主线,实现从结构与机构拓扑、性能等的孤立研究到综合动态设计研究的转变,为设计出具有自主知识产权、功能和性能优良的机械产品奠定重要的理论基础;②以提高机械产品的综合性能为目标,在机构学方面实现从理想机构的研究到真实机构的研究转变,在机械振动学方面实现从简单零部件振动的研究到复杂结构系统振动的研究转变,重点围绕机器与机构的高速化、大功率化、精密化、轻量化和智能化等发展趋势,探索和解决其中的科学问题,支撑国家重大装备研制的需要。

未来5~10年内的重大科学问题有:

1) 复杂与真实机构性能、拓扑与尺度映射规律

基于功能与性能要求,揭示机构拓扑结构、运动学和动力学模型间的内在联系规律,探寻综合反应拓扑与尺度特征的性能评价指标,构建复杂与真实机构拓扑、运动学与动力学集成建模与优化设计的理论体系与方法。

2) 机械振动产生与传播机理和控制

研究复杂机械振动产生与传播的机理,激励与动力学参数的识别及故障诊断方法,驱动模式对机械振动的影响和振动控制理论,分析机械的输入力、承载能力、惯量、刚度与阻尼等的关联关系,实现对机械振动的有效控制与利用。

3) 机械产品的动态特性与动力学参数匹配规律

研究机构和机械系统的动态特性与动力学参数的关联关系,分析振动系统的非线性特性,探讨载荷、工况、运行环境和机械系统动力学参数匹配方法,建立机械振动动态概率设计系统理论。

2.5 未来5~10年的发展规划

在机构学研究中,重大科学问题涉及的是产品机构的原始创新问题,着力解决拓扑综合与尺度综合的集成设计问题。这是国内外机构学界长期未能很好解决的基本理论难题,该问题的突破会发明一批功能、性能优越的新机构,对我国装备制造业的发展会起到积极的支撑作用,同时对学科的发展具有重要推动作用。

在机械振动学研究中,虽然非线性振动学、随机振动学、振动控制与利用、振动测试与诊断等领域已经取得了很大的进展,但仍然是需要不断努力发展的重要研究方向。复杂机电产品的振动建模、载荷预测、概率设计、可靠性设计及综合振动分析、系统识别、环境预测的综合动态设计技术依然是国际性难题,极端机械振动学分析及设计是我国学术界面临的重要前沿课题。

在未来5~10年里,为了在上述重大科学问题上取得突破,设置若干个重点项目和国际合作项目进行联合攻关,在重点项目中鼓励数学和力学等相关学科的研究人员参加,组成跨学科研究团队。为了促进实质性的学科交叉,可考虑由不同学科背景研究人员对项目共同负责。积极开展国际合作,与欧美等机构学研究发达的地区和国家开展广泛的学术交流和与合作。具体发展规划如下:

1) 真实机构的设计理论

(1) 面向设计的机构速度、精度、刚度和动态特性等特性普适性建模理论与方法。

(2) 考虑构件/运动副几何、惯性、弹性和阻尼等因素的数字化建模与仿真。

(3) 考虑服役环境的性能评价与考虑驱动器特性的多目标分段递阶设计

方法。

(4) 材料特性、运动副几何与力学参数工程数据库和虚拟样机仿真软件系统集成。

(5) 几何精度、静/动态特性、热特性等检测技术与评价方法。

(6) 重大装备中高速度、高精度、低能耗重载机构系统的可靠性设计理论与方法。

2) 复杂机构性能、拓扑与尺度映射规律

(1) 机构拓扑创新和拓扑类型优选的系统理论与方法。

(2) 机构与功能之间映射关系。

(3) 面向功能和性能要求的机构系统性能评价。

(4) 尺度与结构参数一体化设计方法。

(5) 机构系统集成创新可视化综合设计平台。

(6) 面向国家重大需求的极端服役装备的机构设计方法。

3) 微/纳柔顺机构设计理论

(1) 微/纳柔顺机构的拓扑优化理论。

(2) 微/纳机构跨尺度效应。

(3) 微/纳机构的精度创成原理。

(4) 微/纳操作系统驱动器/传感器与运动构件的一体化设计方法。

(5) 微/纳操作机构的工作空间、驱动与承载、惯性与刚度等动态关联关系。

(6) 微/纳操作系统振动的抑制原理。

(7) 微/纳操作系统的高速、高精度的力、位移混合控制。

4) 性能与结构仿生机构设计原理

(1) 高承载自重比机构的结构仿生设计。

(2) 仿生冗余驱动原理。

(3) 仿生机构的动态稳定的判定。

(4) 适应环境的刚度与阻尼匹配欠驱动仿生原理。

(5) 变结构、变构态和变自由度等变胞仿生机构设计。

5) 振动、噪声产生与传播机理

(1) 复杂机械振动产生与传播机理。

(2) 振动、噪声传递路径贡献度与传递度。

(3) 激励与动力学参数的识别。

(4) 振动、噪声中的故障信息挖掘。

6) 振动与噪声控制及利用

(1) 非线性振动系统特性分析及控制。

- (2) 振动抑制机理和多源振动与噪声的主动控制。
- (3) 振动与波在机械测量与制造中的应用基础。
- (4) 驱动模式对机械振动和控制的影响。
- 7) 机械产品的动态特性与结构参数匹配规律
 - (1) 机械系统的动态特性与结构参数的关联关系。
 - (2) 载荷、工况、运行环境和机械系统动力学参数匹配方法。
 - (3) 机构的输入力、承载能力、惯量、刚度与阻尼等的关联关系。
 - (4) 机械振动动态综合设计理论体系。

参考文献

- [1] 黄真, 赵永生, 赵铁石. 高等空间机构学. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [2] Lee C C, Hervé J M. Translational parallel manipulators with doubly planar limbs. *Mechanism and Machine Theory*, 2006, 41 (4): 433 - 455.
- [3] Meng J, Liu G F, Li Z X. A geometric theory for analysis and synthesis of sub-6 DoF parallel manipulators. *IEEE Transactions on Robotics*, 2007, 23 (4): 625 - 649.
- [4] 杨廷力. 机器人机构拓扑学. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] Gao F, Li W, Zhao X, et al. New kinematic structures for 2-, 3-, 4-, and 5 DOF parallel manipulator designs. *Mechanism and Machine Theory*, 2002, 37: 1395 - 1411.
- [6] Merlet J P. Jacobian, manipulability, condition number, and accuracy of parallel robots. *Trans. ASME Journal of Mechanical Design*, 2006, 128: 199 - 206.
- [7] Huang T, Li M, Li Z X, et al. Optimal kinematic design of 2-DOF parallel manipulators with well-shaped workspace bounded by a specified conditioning index. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004, 20 (3): 538 - 542.
- [8] Wu C, Liu X J, Wang L, et al. Optimal design of spherical 5R parallel manipulators considering the motion/force transmissibility. *ASME Journal of Mechanical Design*, 2010, 132 (3): 031002.
- [9] Pierrot F, Nahat V, Company O, et al. Optimal design of a 4-DOF parallel manipulator; From academia to industry. *IEEE Transactions on Robotics*, 2009, 25 (2): 213 - 224.
- [10] Gao F, Liu X J, Gruver W A. Performance evaluation of two degree of freedom planar parallel robots. *Mechanism and Machine Theory*, 1998, 33 (6): 661 - 668.
- [11] 张策, 黄永强, 王子良, 等. 弹性连杆机构的分析与设计. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [12] Dupac M, Marghitu D B. Nonlinear dynamics of a flexible mechanism with impact. *Journal of Sound and Vibration*, 2006, 289: 570 - 592.
- [13] Wang H, Zhang X M. Input coupling analysis and optimal design of a 3-DOF compliant micro-positioning stage. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43 (4): 400 - 410.

第4章 复杂机电系统的集成科学

Chapter 4 Integrated Science of Complex Electromechanical Systems

现代机电装备在不断追求高效率、高精度、高品质和极限功能的进程中,催生了一系列结构复杂、工况极端、信息融通、高效节能和精确稳定的复杂机电系统。复杂机电系统的功能日趋丰富,载有的物理过程更趋极限,系统内各种物理过程的非线性、时变特征更为突出,过程之间的耦合、交融关系更为复杂,某些新的科学现象与规律将在更深层次上“凸显”出来,需要从系统集成的角度探索各种新知识、新原理和新方法。就本质而言,复杂机电系统集成科学的内涵就是运用系统论的理论和方法,按设定的功能形成原理将各种物理过程与其载体从能量流、物质流与信息流的层面进行全局性(全过程)协同组织,从而构建能够满足预定功能指标和性能价格比的人造系统。复杂机电系统集成科学需要解决能量流-物质流-信息流融合协同、多场-多过程-多界面耦合、系统安全可靠与高品质运行保障理论等共性科学问题。

未来的复杂机电系统将不断提升多学科知识融合、高新技术集成的水平。机械工程学科必须积极适应这一变化,研究复杂机电系统的功能生成与多物理过程耦合机制,寻找和发现复杂机电系统集成、融合与演变过程的规律,特别是从系统科学的角度去研究“融合集成效应”,为创造功能极端强化、技术性能趋于极限的复杂机电装备提供系统集成设计的科学理论与方法。复杂机电系统客观上以装备存在,其行为功能在集成演变中产生,有实效的研究最终应结合实际装备来开展,服务于国家经济建设与社会发展。

4.1 内涵与研究范围

4.1.1 复杂机电系统及其特点

重大装备制造业是我国工业的重要组成部分,是主要为能源开发、原材料生产、加工制造、交通运输等基础工业与国防工业提供技术装备的战略性产业。当代重大装备在不断追求功能强大、高效率、高精度和高品质的进程中,随之而来

的是系统的高度集成化,服役环境、工作条件的极端化与技术的精密化,从而催生一系列结构复杂、信息融通、高效节能、工况极端、精确稳定的功能系统——复杂机电系统 (complex electromechanical systems)。

复杂机电系统将多种单元技术集成起来,在完成高度复杂的多物理过程中,实现能量、物质与信息的传递、转换和演变,形成特定的产品功能^[1]。空运运载工具,高速列车,大型舰船,高速连轧连铸机,微电子/光电子制造装备,高性能电子装备,大型火、水、核电机组和全断面隧道掘进机等都是高度复杂、功能异常丰富和运行控制能力十分强大的复杂机电系统(见图4.1)。

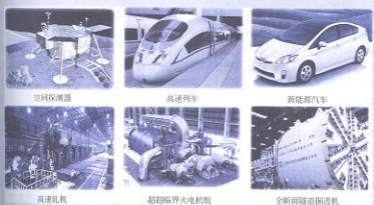


图4.1 几种典型的复杂机电系统

现代复杂机电系统是机、电、液、光等多物理过程融合于同一载体的复杂系统,其共有特性至少表现在下面4个方面^[2,3]:

(1) 集成了多种高新技术的多功能复杂机电系统,具有物理结构复杂、技术深度高与宽度广、多学科知识密集交叉与融合的核心特征。

(2) 系统由多个相同或不同层次的子系统组成,各子系统之间通过耦合构成结构复杂的有机整体。

(3) 系统具有动态性和开放性,通过耦合和协同进行能量流、物质流与信息流的传递、转换及演变,实现多个复杂的物理过程,并形成系统的基本功能。

(4) 由于复杂机电系统在功能、结构、耦合关系和物理过程等各方面所具有的复杂性,表现出一般复杂系统的典型特征。

4.1.2 内涵

复杂机电系统是现代科技发展的必然产物,是解决人类生存面临的能源、资源、环境等重大“瓶颈”问题的必要物质基础。复杂机电系统及其载有的生产制造过程所涵盖的科学技术问题跨越了多个相对独立的基础科学和应用科学领域,在本质上需要在系统科学的统领下,综合利用各类专门学科知识,从宏观、细观和微观的层面上加以研究解决。目前,因为复杂机电系统研究尚缺乏成熟的系统科学理论体系,一般将复杂装备按客观子系统或学科分解,采用多个子系统先“串行”、后“回溯”的研发模式进行综合开发与技术集成。显然,这种“化整为零”、“化繁为简”的单学科串行研发模式的优点是简单、易行,并在已有的生产实践中取得了较好的应用效果。但是,研究开发高品质复杂机电系统时,单学科“串行”与“回溯”研发模式的不足也是显而易见的:设计修改频繁,研发周期长,实际复杂装备的功能、性能和品质难以把握,更为严重的是复杂机电系统的某些功能突变、性能劣化、故障演变与涌现等问题,难以在研究开发过程中准确找到其本质原因。

事实上,随着复杂机电系统的功能日趋丰富,载有的物理过程更趋极限,系统内各种物理过程的非线性、时变特征更为突出,过程之间的耦合、交融关系更为复杂,某些新的科学现象与规律将在更深层次上“凸显”出来,仅仅依据现有知识无法清晰解释和明确回答。例如,多种复杂机电装备屡屡出现在混沌与有序之间的“无规则”演化,高速剧烈运动引起的多介质非线性耦合振动,多层次复杂交互作用引起的结构损伤与功能劣化的涌现行为等。要解决复杂机电装备运行中出现的各种“系统级”科学难题,必须从系统角度研究复杂机电系统的客观规律,在多学科实质性交叉研究基础上,掌握复杂机电系统多过程耦合、功能生成与异化、服役性能动态演变的内在机制,形成复杂机电系统创新研究、设计与开发的系统知识体系——复杂机电系统的集成科学。

系统集成是一种创造性的融合过程。只有当各个物理和功能要素经过主动的优化、选择搭配,相互之间以最合理的结构形式结合在一起,形成一个由适宜要素组成的、匹配的整体系统时,这样的过程才称之为集成^[4]。因此,本章中复杂机电系统集成科学的内涵是指:运用系统科学的方法研究复杂机电系统的功能生成与多物理过程耦合机制,寻找和发现复杂机电系统集成、融合与演变过程的规律;从系统的角度研究机电装备的“融合集成效应”,从融合集成过程中的预期效果与实际差异中研究和发现系统集成的复杂规律,从系统动态行为的奇异性中研究系统集成中的功能保障与突变机制;基于复杂机电系统集成融合的新知识、新原理和新方法,逐步构建复杂机电系统的集成科学理论体系。

当代科技发展趋势表明,各领域、各学科知识纵横交错,相互渗透,多种知识和技术的融合集成已成为科技创新的重要模式。因此,在加强原始性创新的同时,积极调整科技创新的模式,从注重单项创新转变到更加强调各种技术的集成,强调在集成科学基础上形成有竞争力的产品和产业,是我国建设创新型国家和新型工业化国家的战略需求。复杂机电系统集成科学需要解决的多场、多过程、多界面耦合及多尺度效应等问题,反映了当代科技多学科深度交叉融合的发展趋势,是机械与制造科学的研究前沿。机械工程学科也正在形成“复杂机电系统设计制造的集成科学”,将“机械”设计提升到系统集成科学的层面,扩大与深化设计的科学内容,如界面科学、非线性科学和信息传递科学等;将传统的注重“设计方法”变革为设计“机械”载有的物理过程如何经集成演化产生机械功能;将模块化设计变革为“物质流-能量流-信息流全系统协同设计”。从集成科学的高度构建“设计-制造-运行”由物质流-能量流-信息流融合协同的理论体系,将促进多物理过程耦合、多技术模块协同、多几何结构选择性增强、无奇异动力演化的功能极端强化以及高性能、高智能、节能环保型复杂机电装备的创新研究、设计与开发。

4.1.3 研究范围

由各种重大工程装备抽象而来的复杂机电系统本身是一个动态开放的大系统,任何单个学科或单元技术的重大突破,都有可能拓展复杂机电系统的研究领域;同时,科学技术的日新月异促使高品质复杂机电装备追求的极限目标越来越多,如高速化、精密化、智能化、绿色化和集成化等。由复杂结构与多物理过程、多极限目标驱动映射而来的多元化研究内容,使得复杂机电系统集成科学的研究层次极为丰富,研究视角多种多样。当前,复杂机电系统集成科学研究应聚焦于基础性系统科学问题及其关键共性技术。其中,系统科学问题包括:结构-功能-性能创成原理,多物理过程与物质流-能量流-信息流融合协同原理,全过程全周期服役性能优化及精确调控机理,复杂系统集成理论与方法等;关键共性技术主要有:多领域建模与多学科优化理论与方法,复杂系统动力学分析方法与动态性能匹配技术,系统可靠性设计理论与方法,复杂系统服役性能监测、故障诊断与预示技术等。

复杂机电装备具有高维度的广义质量属性(全过程、全功能与全性能),构建复杂机电系统的集成科学理论体系时,既需要有系统的宏观基础理论与方法,用以支撑复杂系统全功能与全性能设计;同时,也需要有考虑系统时变耦合效应的关键质量的微观甚至微观设计理论与方法,满足多样化复杂机电系统的多层次技术开发与应用需求。因此,复杂机电系统集成科学的研究范围可以概括为如下

6个层次。图4.2显示了它们之间的内在关系及其所蕴含的科学技术问题。



图4.2 复杂机电系统集成科学的研究范围及主要研究内容

(1) 复杂机电装备的系统科学方法。探索以机械为主要载体的多学科知识交叉、融合与集成的系统性方法；构建复杂机电装备集成创新的“自顶而下”的理论与方法体系。

(2) 复杂机电系统功能生成、多过程耦合、动态性能演变的内在机理与规律。揭示复杂机电系统多介质、多尺度、多能场、多界面与多过程耦合机制，发现蕴涵于多物理过程之中的系统功能生成原理；揭示复杂机电系统动力畸变、性能突变与故障动态演化的内在规律等。

(3) 复杂机电系统的多领域建模理论与分析方法。探索复杂系统多领域统一建模理论与方法；研究复杂机电系统多学科综合分析理论与方法；寻找适用于复杂系统高维、强非线性、多过程与多界面耦合动力系统的建模与分析方法等。

(4) 复杂机电装备的系统设计理论与方法。研究能量流-物质流-信息流协同设计理论；研究复杂机电装备顶层设计理论与方法；构建复杂系统的集成设计理论等；探索复杂机电装备的“结构-功能-性能”一体化设计、“设计-制造-运行”全过程协同设计的新理论与新方法。

(5) 复杂机电装备的关键质量设计理论与共性技术。研究复杂机电系统动

力学分析理论与方法,以及复杂机电系统动态性能匹配设计方法;研究复杂机电系统的可靠性理论与设计方法;研究复杂机电系统智能化(智能感知、智能诊断、智能调控、智能制造)理论与技术;研究复杂机电系统故障诊断与智能预示理论与技术;研究信息流与智能化传递于复杂机电系统全过程的安全运行保障理论与方法等。

(6) 典型复杂机电装备的系统集成理论与方法。结合《规划纲要》和国家重大工程项目,对当前国家急需的典型复杂机电装备,如超高速与高精度机电装备、载有超强物理场与能量流机电装备、具有多相流与多物理过程机电装备、具有小尺度与高能量密度机电装备、具有极端服役工况与特殊控制要求的复杂机电装备等,有针对性地开展典型复杂机电装备的集成科学理论研究与关键技术攻关。

4.2 在国民经济、社会发展和学科发展中的重要意义

1. 高度集成的复杂机电系统是人类科技进步和机械学自身发展的必然

回顾人类科技发展史,可以看到人类对物质、能量和信息的认识和利用经历了不同的阶段。最初主要是对物质的认识和利用,人类可以制造简单工具。后来发展到对能量的认识和利用,例如,18世纪60年代,第一次技术革命的主导技术是蒸汽机将热能转换成机械能,利用这种能量的转换,给作坊式生产带来了一场变革,促使工场手工业转向机器大工业时代;19世纪70年代,对电磁能的认识和利用为我们开辟一条道路;使不同形式能量——热、机械运动、电、磁、光相互转化,并在工业中加以利用,出现了以电机的制造和电力的应用为主要标志的第二次技术革命,开创了电力时代。

20世纪中期以来,原子能、电子计算机和空间技术的发展促进了整个科学与技术的新的跃进和各学科之间的相互渗透,产生了系统论、控制论和信息论等新型基础理论学科。这一新技术革命中所产生的高技术,其主导技术是由信息技术、生物技术、新材料技术、新能源技术、新制造加工技术、激光技术、海洋技术和空间技术等高技术组成的技术群^[3]。从社会生产的技术方式来看,从机械化、电气化、自动化发展到了信息化,当代科技革命主导技术群体化的特点,必然促使传统机电系统走向自适应、协同控制的智能复杂机电系统。机械工程学科必须适应这一变化,站在开发、集成新技术的前沿,将不同门类的科学技术有机地组织到一起,规划复杂机电系统中不同学科知识交叉融合的有效路径,创造高效、高精度、高品质的复杂机电装备,以应对现代社会日益严重的能源、环境、

食品、住房、水资源、交通、安全和健康危机,创建一个更清洁、更健康 and 可持续发展的世界。

2. 先进的复杂机电系统是国民经济发展和国防建设的需要

装备制造业是为经济社会发展提供技术装备的基础性、战略性产业,重大技术装备处于制造业的高端,是衡量一个国家工业发展水平的重要标志。复杂机电系统是重大技术装备的主要组成部分,加强复杂机电系统的集成科学研究,提高重大技术装备自主创新能力,推进国家重大技术装备国产化,对推动产业结构优化升级、提高产业国际竞争力、增强国家经济实力和国防实力具有重要的战略意义。

复杂机电系统具有高定位、高投入、高产出和高回报的显著特点,在国家重点工程建设和国民经济各产业部门的发展中都占有十分重要的地位,是国际贸易中技术含量与附加值较高的出口创汇产业。近20年来,我国自主研发了一系列复杂机电装备,明显加快了我国社会经济发展。例如,首钢水厂铁矿1000万t级、平朔煤矿2000万t级露天开采成套设备,百万吨级大型乙烯成套设备,2250mm热连轧成套设备,60万kW火力发电机组,直径6.3m盾构掘进机,时速300km高速列车等重大成套设备等。

复杂机电系统在打破国外技术垄断和封锁、提升国家科技核心竞争力方面有重要作用。复杂机电装备技术难度大、成套性强,是机械加工技术、自动控制技术、计算机技术和系统工程等多学科技术的综合应用结果,集中体现了国家的综合经济技术实力和装备工业水平。2009年7月,我国3.6万t黑色金属垂直挤压机研制成功,打破美国、德国、日本三国在该领域的垄断地位,为我国大功率发电设备、大型舰船和空运工具等大型装备的高端材料制备铺平了道路。例如,直径50m和40m大口径天线的研制成功为嫦娥及载人航天测控系统的构建奠定了基础;直径500m大射电望远镜的开工建设为深空探测创造了必要条件。

复杂机电系统是我国国防现代化的重要支柱。复杂机电装备是制造各种武器装备最重要的生产资料,是国防军工实现战备现代化和产业化的必要保证。新中国成立以来,我国大型复杂装备为我国航空航天事业发展和国防军工建设提供了有力的支持与保障。例如,歼-10战斗机、空警2000预警机和“太行”涡扇发动机的成功研制,使我国航空武器装备具有了与国外现役先进装备相抗衡的能力,标志着我国航空武器装备自主研发能力跻身于世界先进行列。

3. 加强复杂机电系统研究是落实我国中长期科技规划的需要

《规划纲要》指出我国中长期科技工作的指导方针是:自主创新,重点跨

总,支撑发展,引领未来,并确立了68个优先主题、16个重大专项、27项前沿技术和18个基础科学问题,这其中包括了新型能源装备、大型冶金装备、轨道交通装备、空天装备等大量复杂机电系统的科学技术问题。结合《规划纲要》,我国还发布了《可再生能源中长期规划》、《核电中长期发展规划》、《中长期铁路网规划》、《综合交通网中长期规划》等多个行业规划,进一步细致规划了今后20年内将要启动的一系列重大工程。为进一步提高我国装备制造能力,促进产业结构优化升级,推进我国装备制造业由大到强的转变,《装备制造业调整和振兴规划》(以下简称《振兴规划》)明确提出要在重大装备研制上取得突破:全面提高重大装备技术水平,满足国家重大工程建设和重点产业调整振兴需要,百万千瓦级核电设备、新能源发电设备、高速动车组、高档数控机床与基础制造装备等一批重大装备实现自主化。

《规划纲要》和《振兴规划》等多个行业规划明确了我国机械工程学科的战略发展方向。今后5~10年,结合我国重点建设工程,突出重大技术装备的自主研发是全面落实《规划纲要》的需要。我国在实现工业化的同时形成高水平重大装备的自主研发能力,是建设创新型国家的战略决策赋予机械工程学科的历史重任,也是机械工程学科自身发展的良好机遇。

4.3 研究现状、存在问题和发展趋势分析

4.3.1 复杂机电系统的工业发展现状

全球经济的飞速发展和不断增长的世界人口使得人类赖以生存的能源、环境、食品、住房、水资源、交通、健康等问题日益突出,加速发展的现代科学技术为人类创造活动提供了良好的基础,为了创造更为精彩的未来世界,人们对高速、高功效、高精度、智能化机电产品的需求从来没有像今天如此迫切。

复杂机电系统的市场需求持续上升。节能环保基本上是所有现代机电系统必须具备的特性,对于生产能源的机电装备显得尤为重要。节约型和新型能源装备技术市场需求强劲。例如,风能已成为世界上发展最迅速的绿色能源之一,被称为“未来的能源”。截至2008年年底,全球风电总装机容量已经超过了1.2亿kW;2008年全球风电增长速度达到28.8%^[6]。中国风电发展强劲,2008年连续第四个年度新增装机翻番,已实现风电装机容量1324万kW,成为亚洲第一、世界第三、装机容量超千万千瓦的风电大国。

复杂机电系统产业分布高度集中。复杂机电系统是高成本、技术密集型产品,容易出现“木桶效应”。一些技术难度大、成套性强、需跨行业配套制造的

技术装备,其设计与制造涉及多个学科、多种技术,需要多个企业和部门联合开发制造,容易形成高度集中的产业链。例如,全球冶金设备生产线 50% 以上的市场份额由德国 SMS 集团公司、西门子奥钢联集团公司和意大利达涅利集团这三大公司控制;目前,为全球提供成套高速铁路技术的公司以德国西门子、法国阿尔斯通、加拿大 Bombardier 和日本川崎重工为主;大型盾构掘进装备的核心技术主要由德国海瑞克和维尔特、日本三菱重工和川崎重工、美国罗宾斯等跨国集团垄断;全球风机市场由老牌制造商主导,仅维斯塔斯、通用 (General Electric, GE)、歌美飒、Enercon、Suzlon 和西门子 6 家公司就占据了全球市场份额的 70% 以上。

中国已经成为推动全球大型机电设备市场繁荣的主要力量。中国制造业增速已经连续 20 年居全球之首 (截至 2007 年),已培养出一个强大的装备制造企业。例如,中国是世界上最大的钢铁生产国,有色金属的产量连续多年位居世界第一,钢铁与有色金属工业的发展带动了对冶金设备的强劲需求,中国已成为全球最大的冶金设备市场。我国未来 5 年将建设铁路、公路、水利和能源输送工程隧道超过 4000km,预计需要大型掘进装备 300 台以上,我国正在成为全世界掘进装备需求量最大的国家。我国已掀起了高速铁路建设高潮,按 2008 年调整后的《中长期铁路网规划》,2020 年我国高速客运专线总里程将超过 1.8 万 km,是目前世界上其他国家高速铁路总长的 3 倍左右。中国铁路高速化浪潮吸收了所有的国际轨道交通设备厂商,是新一代高速列车技术全面发展的主要推动力量。

4.3.2 复杂机电系统的技术发展趋势

复杂机电装备为了高速、高精度、高效服务于现代工业,正在并将永不停息地吸收现代力学、电磁学、光学、材料学、信息工程、生物技术和纳米技术等高新技术,不断完善机电装备的多目标功能,挑战人类智力极限,创造复杂机电系统的理想极限功能。

总体来说,复杂机电系统的发展趋势主要表现为两个方面:

- (1) 复杂机电系统不断挑战技术极限。
- (2) 复杂机电系统不断提升多学科知识融合、高新技术集成的水平。

在基础制造装备方面:现代连轧机可使轧制材料在 1km 长度范围内的纵向延伸偏差控制在 1mm 以内;用 7.5 万 t 压力制造出 A380 客机横截面直径达 $\phi 5.5\text{m}$ 的承载框架;高档数控机床的重复定位精度可以达到 $1\mu\text{m}$,主轴转速达到每分钟几十万转、移动速度每分钟超过百米、换刀时间降低到 1s 以下,机床控制技术进入远程控制的网络化和智能化阶段。

在动力机械方面,先进核电机组的最大单机功率高达 1500MW,超越临界机

组的效率比亚临界机组提高了近12%，最高热效率已达47%，等效可用系数超过了95%，强迫停机率 $<0.5\%$ 。在过去半个多世纪中，美国和日本等发达国家在重型燃气轮机联合循环机组方面取得了惊人的进步：单机功率提高了近30倍；压气机压比提高了近4倍；联合循环效率超过60%；叶片寿命高达2.4万h；可靠性接近94%~96%，整机寿命约为30年。

在高速轨道交通装备方面，2003年，日本MLX超导磁悬浮列车创造了581km/h的有轨交通最高速度世界纪录；法国TGV高速列车不断刷新轮轨列车最高试验速度记录，2007年4月竟创下574.8km/h的惊人世界纪录，远大于早期科学家预言的轮轨黏着极限速度。21世纪初我国快速、跨越式发展轨道交通技术，2002年，我国自行设计的“中华之星”动车组在秦沈客运专线冲刺试验创造了321.5km/h的最高速度；2008年8月1日，在京津城际铁路上CRH3高速列车创下了394.3km/h的试验速度记录。

复杂机电装备在不断挑战技术极限的过程中，不断提升自身多学科知识融合、高新技术集成的水平。例如，掘进装备的服役条件极端复杂，装备必须适应500~125000kN·m范围内的突变载荷，必须采用多达30多组液压缸、50台液压马达、24台泵和12台电机组成的并联冗余驱动系统。掘进作业必须保证长达20km的隧道轴线误差小于20mm；地表隆起小于10mm、下沉小于30mm，这对装备的导向纠偏和密封舱压力平衡控制带来极大挑战。盾构掘进装备的设计、制造和集成涉及机械、土木、力学、控制、电气、材料和信息等多学科交叉的一系列基础科学问题。高速列车是高度集成机械、材料、信息和控制等现代技术的机电设备，是在极端服役条件下以逼近极限地面速度安全舒适运行的复杂机电系统。高速列车系统的复杂性问题涉及尺度效应、时间效应和空间效应，系统严重的非线性导致的脱轨不确定性问题，高速列车与线路基础以及外部流场耦合机理和协同设计问题，在多场耦合作用下高速铁路系统的失效机制等。因此，高速列车技术发展必然促进机械、材料、信息和力学等多学科领域知识及其相应高新技术在高速铁路中的交叉融合与高度集成。

基于目前复杂机电系统的研究进展，可以预测未来机电系统的技术发展趋势：

- (1) 系统功能愈加丰富，速度和精度大幅提高，运行工况进一步极端化。
- (2) 系统智能化程度显著提高，先进机电设备能按照人的意图进行自动控制和信息自动检测采集及处理，具备自调节、自诊断和自动保护等功能，甚至实现操作全自动化和智能化。
- (3) 复杂机电装备的系统性更强，各子系统间协调性要求提高，多种技术的综合及多个部分的组合更具科学性。

(4) 系统可靠性、故障预示与安全运行保障理论和方法得到发展,复杂机电系统可靠性更高、使用寿命增长。

(5) 随着系统科学、非线性科学和复杂性科学等基础与新兴学科的发展,复杂机电系统集成设计与制造理论、方法和技术手段不断完善,对复杂机电系统客观规律的认识进一步加深,并为新系统的构建提供方法论的指导。

(6) 各种基础学科发展与前沿新技术进步为复杂机电系统集成提供了新方法和新技术,不断创造出功能更强、结构更复杂和性能更优越的新一代机电装备。

4.3.3 复杂机电系统的研究现状

1. 国外总体研究现状

人们对复杂机电系统的研究首先源于对“机械-电子”技术相结合的研究。

20世纪60年代之前,人们自觉或不自觉地利利用电子技术来完善机械产品的性能。特别是第二次世界大战刺激了机械产品与电子技术的结合,出现了许多性能相当优良的军事用途的机电产品,这些机电结合的军事技术在战后转为民用。1971年,机械电子(mechatronics)一词最早出现在日本杂志《机械设计》的副刊上,日本政府颁布了《特定电子工业和特定机械工业振兴临时措施法》,要求企业界“应特别注意促进为机械配备电子计算机和其他电子设备,从而实现控制的自动化和机械产品的其他功能”。20世纪70~80年代,日本机电技术着重用于发展家用电器,美国则在大型电站设备、航空航天和制造设备方面独占鳌头。

20世纪90年代,信息技术和新材料技术等高新技术的迅速发展及其向装备制造业的渗透,将机械与电、气、液、光、生物和信息等技术融合在一起,显著改变了传统机械产品的结构和功能,出现了越来越多高度集成的复杂机电装备;科学家与工程师开始重视对复杂机电系统的研究,ASME、美国电气和电子工程师协会(IEEE)、IMechE、国际电气工程师学会(IEE)等相继创办专门的学术研究期刊;1999年,Science杂志还专门出版了Complex Systems专辑。

ASME早在1996年召开专题国际会议,重点讨论复杂机电系统的设计理论与方法、系统设计自动化、计算机辅助工程等相关主题。美国橡树岭国家实验室的高能电子及电气机械研究所的科研方向就主要集中在复杂机电系统的研究与开发,运用信息、计算机技术和微电子技术研究与开发新型机械电子产品(包括能源转换装置、电器机械、超高速驱动技术和飞轮储能系统等);另一个制冷、制热及能量集成实验室则重点研究与开发以分布式能源装备为主的高端技术。麻省理工学院的d'Arbeloff实验室也主要从事跨学科领域的研究,其主题只有一个:

促进信息科学与技术与传统机械工程学科的交叉与融合,从而创造、产生出新的技术和各种不同的智能机器系统。同样,德国 Duisburg 大学为此也设立了专门的研究所,从事如现代数控机床、机器人以及自动驾驶车辆等复杂机电系统的研究。英国剑桥大学早在 1990 年起就定期组织和召开以“机械电子学——智能机器设计”为题的国际会议,并由 IEEE 和 IMechE 联合定期举办通信论坛。英国 Sussex 大学 SPRU 研究中心主要开展复杂产品和系统 (complex product and system, CoPS) 创新模式的研究。瑞士、荷兰、芬兰等国家也几乎于同期通过设立各种资助项目,专门支持复杂机电系统的基础研究及应用研究。

发达国家在复杂机电系统研究方面除了起步较早之外,还具有以下明显特征:

(1) 几乎所有的技术需求和背景都最先发端于军事目的,然后迅速向民用领域扩散。

(2) 基础研究集中在大学和研究所,从新概念、新理论到应用技术和开发环境同步开展,并已初步形成了完整的体系。

(3) 科学研究与重大目标任务紧密结合,如美国的国防先进研究计划 (DARPA) 和综合高性能涡轮发动机技术计划 (IHPTET),都是在美国科学基金会 (NSF) 和美国国家航空航天局 (NASA) 长达十余年、甚至二十余年的连续资助下才取得突破性进展的。

冷战结束后,随着国际竞争的焦点日益从军事力量转向以高科技竞争为核心、经济竞争为主要内容的综合国力竞争,欧美发达国家制定的科技计划日益突出高科技发展,力图全面控制和抢占新时期科技制高点。例如,美国 IHPTET 计划及其后续的多用途先进涡轮发动机计划 (VAATE),美国交通部智能汽车高速公路系统和国家磁悬浮计划,美国国家标准技术研究院制造推广伙伴计划和先进技术计划,欧洲的先进核心军用发动机 (ACME) 计划和先进军用发动机技术 (AMET) 计划等,这些科技计划所涉及的研究内容都是围绕新一代复杂机电系统而展开的,包括对于处理器、传感器、信息技术和人机系统的研究等。

2008 年,美国未来学研究会和 ASME 发布了“机械工程未来 20 年发展预测”,日本机械工程学会 (JSME) 制定了“日本机械学会技术路线图”,ASME 和 JSME 都对复杂机电系统的技术发展予以了高度重视。

2. 国内总体研究现状

新中国成立以来,我国重大机电装备技术发展经历了 4 个阶段。第一阶段是新中国成立初期环境下借鉴苏联的自主制造,以苏联援建的 156 项工程为载体,使我国初步形成了装备制造业的现代生产体系。第二阶段是 20 世纪 50 年代末经

济封锁下的自力更生,我国依靠自身力量开发出了“两弹一星”等国民经济和国防建设急需的重大装备。第三阶段是改革开放环境下的引进开发。第四阶段是经济全球化环境下的自主创新。

20世纪70年代末,我国一批重大建设项目相继规划投产,由于当时我国装备制造水平比较低,所需的成套机电设备几乎全部进口。这一阶段我国充分利用开放的国际大环境,系统地安排一批重大装备的技术引进、消化吸收与再创新,用大约10年时间掌握了300MW和600MW火电机组、板坯连铸机等重大装备的关键技术,实现了国产化。但是由于单纯依靠技术引进而忽视了消化吸收,我国重大装备技术发展陷入“引进—落后—再引进—再落后”的怪圈。

1983年,国务院下发了110号文件《关于抓紧研制重大技术装备的决定》,拉开了我国重大技术装备科技攻关和振兴装备制造业的序幕。从“六五”到“十一五”的20多年间,我国一直把重大装备的研发作为支持的重点,通过国家科技计划推动以企业为主体的产学研结合;通过建立国家重点实验室集聚国内外优秀的研发人员,共同解决装备设计制造中存在的一系列问题;通过一些重大关键设备的攻关来解决国家重大技术需求。2006年,国务院发布了《关于加快振兴装备制造业的若干意见》,2009年初又发布了《振兴规划》,在政策层面上进一步引导我国装备制造业的未来发展,并提出了我国今后重点发展的多个重大技术装备领域。

进入21世纪以来,我国重大技术装备自主研发取得了可喜的成果,重大机电装备新产品大量涌现:嫦娥探月工程装备,神舟载人航天飞船,歼-10战斗机,三峡右岸70万kW水发电机组,超超临界100万kW机组,9F级燃气轮机联合循环机组,大型冷、热连轧机等。我国装备制造业虽然取得了令人瞩目的成就,一些重大装备的研发水平得到了显著提高,强劲的国内市场需求也推动着重大装备技术不断发展,但由于我国长期以来对重大技术装备基础研究的投入不足,导致我国装备制造业大而不强,特别是高端技术装备的总体设计、成套能力薄弱,关键核心技术对外依存度较高,在国际市场上缺乏竞争力。目前,我国重大机电装备业存在的主要问题有^[3,4]:

(1) 重大技术装备主要依赖进口。近年来我国进口的各种基础设备价值大致占我国进口总值的50%,设备投资的2/3依赖进口,其中,95%以上的光纤制造设备,90%的大型发电设备,85%的集成电路芯片制造设备,80%的石油化工设备,70%的轿车工业设备、数控机床、纺织机械和胶印设备都来自于进口。中国民航现有大型飞机1000多架,全部从外国进口。

(2) 关键技术自给率低,对外技术依存度居高不下,产业发展受制于人,我国重大技术装备的核心技术仍主要依赖国外,对外技术依存度达50%以上。

许多重点领域特别是国防领域的对外技术依赖,会对国家安全构成严峻挑战。

(3) 自主创新能力薄弱。我国装备制造业始终没有摆脱技术引进模仿的模式,技术空心化问题严重。

(4) 缺乏总体设计、系统集成和系统服务的总承包能力。我国至今没有一家企业能够像美国 GE 和 IBM、德国西门子、日本三菱重工、法国阿尔斯通那样提供成套系统服务。

20 世纪末,为了提升我国重大装备技术水平,缩短与发达国家差距,国内学者开始关注和重视复杂机电系统的研究。针对大型轧制装备、大型旋转机械、大型工程机械、电子装备结构、混合动力系统、数控机床、MEMS 系统和机器人等,国家相关部门设立了一些重要科学技术研究计划,开展了复杂机电系统相关基础理论和方法研究,在复杂机电系统全局建模、多学科并行设计和耦合动力学等方面取得了可喜进展。2006 年,我国《规划纲要》明确提出了 16 个国家科技重大专项,其中“极大规模集成电路制造技术及成套工艺”、“高档数控机床与基础制造技术”、“大型飞机”、“载人航天与探月工程”等可以认为是一系列以复杂机电系统为载体的基础研究项目。

4.3.4 复杂机电系统的研究趋势

1. 复杂机电系统研究的方法论

在现代科学整体化和高度综合化发展的趋势下,在人类面临许多规模巨大、关系复杂、参数众多的复杂问题面前,传统分析方法已显得无能为力。在系统论或系统科学出现之前,人们一般采用还原论的方法,把复杂事物分解成若干部分,抽象出最简单的因素,然后再以部分的性质去说明复杂事物。这种方法的着眼点在局部或要素,遵循的是单项因果决定论,虽然这是几百年来在特定范围内行之有效且人们最熟悉的思维方法,同时,在今后相当长一段时间内仍有可能是我们不得不采用的方法,但是它在本质上不能如实地说明事物的整体性,不能准确地反映事物之间的联系和相互作用,因而不能胜任对复杂问题的研究。

1968 年,贝塔朗菲(von Bertalanffy)^[9]出版了《一般系统理论基础、发展和应用》学术专著,奠定了系统论的理论基础。系统论与控制论、信息论等新兴学科为研究复杂问题提供了有效的思维方式。兴起于 20 世纪 80 年代的复杂性研究或复杂性科学,是系统科学发展的新阶段,也是当代科学发展的前沿之一。现代科学技术的发展表明,不能把复杂性全部归结为认识过程的不充分性,必须承认存在客观的复杂性,真正的复杂性应当具备自身特有的规律,即使已被人们认识,即使找到解决办法,它仍然是复杂的。钱学森教授多年致力于系统工程研

究,他对系统科学的创建与发展,可以追溯到1954年出版的学术专著《工程控制论》,1990年初又提出了开放的复杂巨系统以及从定性到定量的综合集成法^[10],并在我国火箭、导弹研制中发挥了重大的作用。

20世纪后半叶,系统科学以其交叉性、综合性、辐射性的特征,成为现代科学技术的重要组成部分,也为复杂机电系统的研究提供了方法论。复杂机电系统是“复杂系统”的一种,需要运用系统科学的方法和理论来认识和发现复杂机电系统的规律,不宜采用分解成若干个小系统分别研究,然后进行叠加的方法。应该从总体上把握整个系统,以解决系统从功能需求到系统物理结构映射等系统层面的问题;将科学理论、科学实验和经验知识相结合,加深对系统内部各不同层次间的认识;把宏观研究和微观研究相结合,阐明系统的复杂性成因和奇异性机理,发现并描述重要的系统行为。

事实上,系统科学方法已经在现代复杂机电系统的总体设计、系统集成、制造安装、运行控制、故障检测与维护等各个环节有所应用。国内外以重大项目为依托的复杂机电装备技术开发,都是通过组织大规模、跨区域和跨学科的研究团队甚至是大学中心进行集体攻关,实质上也是人们试图利用专家群体优势弥补目前尚不成熟的系统科学体系。

2. 复杂机电系统的多领域建模理论与方法

伴随着现代科学技术的飞速发展,目前已经形成较为成熟的单领域建模理论与方法,如多体系统动力学、固体力学、流体力学、电磁学、液压系统和控制系统等建模理论与方法,产品开发过程中各领域的设计和仿真能力得到不断加强。但是,各种单领域建模理论与方法往往具有不同的底层构架、假设前提与边界条件,难以支撑复杂机电系统统一建模与协同设计。因此,目前的复杂机电系统建模仍以各子系统独立建模为主,忽略或弱化了子系统之间的耦合,使得系统模型丧失了某些固有的复杂性,多学科设计则主要基于串行设计,使设计结果常常不是最优解,增加了设计循环和设计成本。

复杂机电系统通常涉及机械、控制、电子、液压、气动和软件等多学科领域,在本质上需要基于统一的多域性模型进行系统优化设计,其开发是一个多领域交叉的系统工程。多领域物理建模理论与方法就是为解决现代产品复杂化和多领域耦合问题而出现的,它反映了现代产品复杂化和多领域耦合的发展趋势,以及各学科交叉融合的趋势,因而在国际学术界与工业界得到高度重视。

多领域统一建模理论与方法的发展,经历了从单一领域独立建模到多领域统一建模、连续域或离散域分散建模到连续离散混合建模、面向过程建模到面向对象建模等发展阶段。目前,尽管国内外在各专业领域建模技术集成和统一建模理

论与方法上有了明显的进展^[11]，但在今后很长一段时期内，复杂机电系统模型化研究的基本任务仍旧是寻找和建立统一、透明而柔性的复杂机电系统的建模理论与方法。它们应该具备如下特性：

(1) 能方便地构建系统的全局数学模型，既可用于系统全局分析，也可用于子系统分析。

(2) 能清晰地表达系统的跨能域耦合机制。

(3) 能描述系统的全局特性。

(4) 能够方便地实施量纲转化、求解与分析。

3. 复杂机电系统动力学

非线性是复杂机电系统所固有的特性，通常是由于子系统内部非线性环节以及子系统之间的机电耦合、刚弹耦合、流固耦合、热弹耦合或者非线性控制所引发。目前，复杂机电系统的非线性动力演变已经成为大型机电装备功效和精度降低与服役性能恶化的主要原因。人们已经发现相当一大类系统所发生的奇异变化与子系统性质无关，复杂机电系统的整体行为不完全取决于各独立子部件的行为；同时，复杂机电系统的整体行为在大时间尺度上也不能唯一地被确定。在现代复杂机电系统中，由于系统自组织和它组织现象的并存，许多有关系统性能不确定性、不稳定性、变异性、不可预测性等问题有待于现代科学给出合理的解释。例如，图4.3所示铁道车辆在轨道上高速运动是一个复杂的动力作用过程，轮轨界面激励会引起车辆系统振动，反过来车辆振动又会改变轮轨接触状态，进一步在其他因素的交互影响下，轮轨系统将发生多种复杂的动力学现象，在最不利情况下就会打破系统稳定状态，造成脱轨、翻车等重大安全事故^[12]。轮轨系统动力学问题至今已有百余年研究历史，但列车脱轨机理、轮轨动力作用引起的钢轨波磨等复杂问题并没有得到彻底解决，需要从系统的角度去深入研究复杂多因素影响下车辆与轨道耦合动力作用问题，在充分认识其内在机制与规律的基础上控制脱轨发生。

许多复杂机电系统的动力学问题难以在设计与仿真分析阶段得以认识和解决，主要的障碍不仅仅在于高维非线性动力学理论与方法的严重不足，还与人们对复杂机电系统的各种非线性环节模型表述不全面、不精确有很大关系。必须重视子系统之间的非光滑非连续界面、非线性功能界面、控制饱和与迟滞效应等在多层次耦合作用下造成的系统本身的“脆弱”和性能劣化，在抽象出复杂机电系统的非线性模型基础上，再寻找或探索相应的理论与数值分析方法，通过演绎、实验等途径解释系统出现的分叉、混沌、分形、突变等非线性演变机理，为复杂机电系统的集成设计、运行状态监测与控制、故障诊断与预示等提供理论指导。

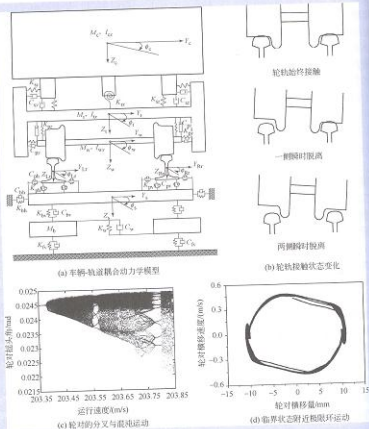


图 4.3 铁路车辆系统的轮轨耦合及其复杂动力学问题

近 20 年来,我国机械、力学、数学等领域的学者在复杂机电系统动力学与控制方面进行了广泛、深入的研究,取得不少创新性成果。例如,大系统耦合动力学的研究思想在高速轧机、高速列车、高(超)速回转机械、数控机床和 IC 制造装备等复杂机电系统的研究中得到充分体现,现代复杂机电系统设计与分析中更全面、更为准确考虑了各种非线性环节和整体系统集成效应,为改善和

提高现代复杂机电设备的安全可靠性、高功效和高精度做出了贡献^[3,42]。我国学者通过对高速轧机中存在的多类机电耦合、工作界面动力耦合以及非线性振动的研究,提出复杂机电系统耦合设计与解耦控制等相关理论,促进了复杂机电系统设计与运行监控理论的发展。在轨道交通领域提出了车辆-轨道耦合动力学理论,为研究提速及高速列车在轨道上运行安全平稳性、轮轨磨损、线路动力恶化等铁路工程技术问题提供了综合分析方法,推进了铁路技术进步。此外,我国学者在转子系统典型故障(油膜振荡、碰摩等)的非线性动力学模型、低频亚谐波振动和碰摩振动的失稳机理、轴系支撑内共振综合治理等方面取得了不少研究成果^[43]。

非线性动力学经过多年的发展,在机械系统中得到了若干应用,但复杂机电系统不断涌现出的高维非线性动力学问题一直没有得到很好解决。图4.4给出了机电系统动力学分析技术路线图。该图表明:经过半个多世纪的发展,动力学分析理论与方法已有长足进步,但庞大规模复杂非线性系统的动力学分析理论与方法仍将是机械、力学和数学等多学科领域专家长期面临的科学挑战。

复杂机电系统非线性动力学研究今后应该主要解决以下问题:

- (1) 确定性系统的非确定性动态行为。
- (2) 非确定性系统的非线性动态行为。
- (3) 时滞受控系统的动力学行为。

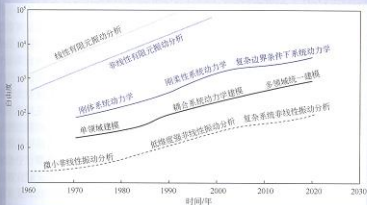


图 4.4 机电系统动力学分析技术发展趋势图

此外,控制技术在复杂机电系统中得到了广泛的应用。各种真实的受控系统,包括高速运动或低速运动下的大量动力学系统、人机交互作用下的动力系统,由于控制信号传输或控制设备自身存在的不可避免的某些缺陷,使得在控制与系统作动之间存在的时间差或时滞,于是形成的系统成为时滞动力系统。尽管在过去的处理中,人们常常忽略时滞并解决了许多问题,但随着对被控系统动力学行为要求越来越精确化,就需要考虑时滞对系统的影响。

4. 复杂机电系统的系统可靠性

由于现代化系统、装备、仪器仪表等日益庞大与复杂,可靠性问题更加突出。系统越复杂,出故障的可能性就越大、不可靠的代价也越大。产品不可靠造成的损失不仅限于经济和信誉方面,重大技术装备如核电机组、人造卫星、军用装备等的可靠性问题直接威胁国家能源、动力、信息等重大基础设施与国防安全,甚至引起重大环境灾难。产品可靠性指标如可靠度、失效率、平均首次失效时间、平均无故障工作时间等已经被视为复杂机电系统的基本质量属性。

复杂机电系统大多在复杂载荷历程下服役,多种失效机理、多种失效模式并存且存在相互作用及竞争关系;服役过程中系统性能逐渐劣化,零部件在环境载荷持续作用下损伤不断发展,呈时变性和多状态特征,规律复杂;零部件失效之间、各失效机理或各失效模式之间存在明显的相关性,零件独立失效假设不能成立、传统的系统可靠性模型不适用。因此,复杂机电系统的可靠性问题需要在更大的系统层面上探索新理论与新方法。

对于复杂机电系统的可靠性设计、可靠性制造、可靠性评估以及基于可靠性的维修管理而言,其关键问题主要包括:对复杂服役环境及其不确定性的正确描述,在可靠性模型中对各种失效机理的包涵与覆盖,可靠性试验中对真实服役环境及失效模式的再现,以及可靠性统计分析中的数据挖掘与信息融合等。

近年来,国内外学者结合航空航天、交通运输、化工和能源等行业重大装备的研发与服役安全,在系统的多状态性及零部件的失效相关性、基于失效机理的可靠性建模方法、可靠性敏感因素识别、系统可靠性设计与优化以及可靠性仿真与实验技术等方面进行了深入探索^[14~16]。系统可靠性设计主要是可靠性优化分配问题,可靠性评价主要是小样本统计问题。目前,国内外在系统可靠性分配方法方面的研究主要集中在不同结构形式的系统的可靠性优化技术研究,较少涉及子系统、零部件间的失效相关性对系统可靠性及其分配策略的影响,也缺乏在概率意义上对子系统或零部件复杂程度的深刻认识和详细研究。由于缺乏可操作的可靠性分配方法和可靠性设计模型,常常使得可靠性设计理论与方法的应用受到严重制约。在复杂系统可靠性试验与评估方面,大部分研究工作还仅限于单纯的

失效数据统计, 尚未与失效的物理背景很好地结合起来。

总体来说, 国际上在机电装备及系统可靠性方面的总体发展趋势是: 以系统科学的思想方法, 应用多学科知识, 基于失效的物理背景研究典型服役环境下, 典型零部件和复杂系统的可靠性设计、可靠性制造和可靠性维修问题。当代研究者更加深刻地认识到利用概率理论与方法分析、表征系统行为及性能的重要性, 并开始探讨区间运算、凸集理论等非概率方法在可靠性问题中的应用, 尤其是突出强调了在可靠性问题中深入研究载荷环境、失效机理、时间相关等问题的重要性、必要性与复杂性。

5. 复杂机电系统运行安全与故障诊断

复杂机电系统在服役期间能否安全、可靠、高效运行, 首先需要在设计阶段从系统层面上进行运行安全性能的分析评估, 其次是在服役期间进行实时监测与控制, 并能在线进行故障诊断与预示。这需要了解系统运行基本规律的基础上, 形成一套关于复杂机电系统安全运行的技术保障体系。《规划纲要》明确指出: 重大产品和重大设施寿命预测技术是提高运行可靠性、安全性、可维护性的关键技术。

大型机电设备通常处于动态开放的复杂外部环境, 其自身功能与结构也极为复杂, 这就导致了机电系统安全性能分析、状态监控与故障诊断的困难。要掌握复杂机电系统运行安全的科学保障体系, 需要在系统故障动态演化机理、动态信号处理与特征提取、故障定量识别和剩余寿命预测、人工智能诊断与机械故障预示方法等方面开展基础性的研究。

自20世纪60年代美国故障诊断预防小组和英国机器保健中心成立以来, 故障诊断技术逐步在世界范围内推广普及, 全球工程和科研领域工作者在信号获取与传感技术、故障机理与征兆联系、信号处理与特征提取、识别分类与智能决策等方面开展了积极的探索。例如, 麻省理工学院综合利用混合智能系统实现核电站大型复杂机电系统的在线监测、故障诊断和预知维修。在NASA倡导下成立的机械故障预防小组, 主要研究故障机理研究、检测、诊断和预测技术、可靠性设计和材料耐久性评估。美国密西根大学、辛辛那提大学等在美国自然科学基金的资助下, 联合工业界共同成立了“智能维护系统(IMS)中心”, 旨在研究机械系统性能衰退分析和预测性维护方法^[17]。

近20年来, 我国学者在机械系统状态监测、故障演化机理、故障智能诊断与自愈、轴系非线性振动的混沌和分岔、全息谱与小波变换等先进故障诊断技术方面开展了卓有成效的研究工作^[18-20]; 在柔性转子全息谱动平衡技术、大型机械振动故障治理与非线性动力学设计、机械结构裂纹的小波有限元定量诊断等方

面取得了重要的研究成果。但是,当前重大装备监测与故障诊断技术的核心问题仍然是:如何全面地掌握服役过程中装备的运行信息,寻找更加有效和直观的动态信息提取方法和表达方式;通过理论分析和不断积累实际运行状态监测和故障诊断经验相结合,达到区别各种典型故障以及确定故障发生的位置、程度等,进一步提高故障诊断的准确性。

当前复杂机电系统故障诊断存在的问题主要有:

(1) 故障机理研究缺乏。尽管国内外在非线性和故障机理方面开展了深入研究,但是针对新型重大装备故障机理还缺乏相应的深入研究。

(2) 早期故障、微弱故障和复合故障等信号特征提取困难。目前,在非平稳、非线性特征提取方面,现有信号处理方法取得了长足进展,提出了许多有效的“望闻问测”诊断学手段。但是在早期故障、微弱故障和复合故障等信号的处理方面还存在不足。

(3) 故障定量诊断困难。现有多种方法多局限于损伤等故障的定性分析,故障部位、类型和程度的定量分析困难,尚缺乏有效的技术手段。

(4) 缺乏基于底层基础研究的人工智能诊断方法。具备底层基础研究的人工智能才能形成知识丰富、推理正确、判断准确、预示合理和结论可靠的设备智能诊断与预示的实用技术。

先进的状态监测和故障诊断技术可以实现故障的早期识别,避免恶性事故的发生,实现设备的预知维修,为企业创造可观的经济效益。结合典型重大装备,从传统的平稳信号分析方法到非平稳、非线性诊断方法,从常见多发故障诊断开展早期、微弱、复合故障的定量诊断,实现装备运行寿命预测,建立装备的远程智能诊断系统,同企业的产品数据库结合,保障服役装备安全运行,是故障诊断的当前发展趋势。

6. 复杂机电系统的顶层设计与集成设计理论

设计方法学是机电产品设计的核心基础,研制高质量产品最重要的一个环节是产品的设计工作,因为产品设计可赋予产品“先天性”质量特性,因此,对绝大多数产品而言,设计在保证产品质量的过程中起着头等重要的作用^[21]。迄今为止,国外学者已提出了数十种产品设计理论与方法,如发明问题解决理论(TRIZ)、普适设计理论、公理化设计理论、三次设计法和质量功能配置设计法(QFD)等。多年来,我国学者对机电产品的设计理论与方法进行了大量及深入的研究,并取得了一些新的研究成果,如创新设计、绿色设计和功能优化设计等。近几年,源于我国重大装备制造业的蓬勃发展,我国科技人员在复杂机电装备系统设计理论方面开展了较为深入的研究,提出了复杂机电系统耦合设计理论

与方法^[1]、基于系统工程的综合设计理论与方法^[2]等。这些前沿性的研究成果为我国重大机械装备的设计与制造做出了贡献。

对于集成了机械、电子、液压和控制等多个学科子系统于一体的复杂机电系统,尽管在开发某种新型复杂机电装备时,通常综合运用多个单一设计方法来确保获得高质量的产品,但多场多介质多物理过程耦合、高维强非线性、不确定性因素导致的功能异化和性能劣化仍时常发生,甚至出现重大安全事故。因此,在复杂机电系统集成科学研究中,从宏观角度进行系统结构与功能的顶层设计理论研究显得尤为重要。在今后相当长一段时间内,在充分利用和深化研究已有设计理论与方法的基础上,集成设计理论将是复杂机电系统研究的前沿与热点,而且更为强调自上而下的“顶层设计”理论与方法的研究。

一般而言,传统的单学科设计或目前较常用的多学科“串行”设计,人为分割或弱化了复杂机电系统不同层次子系统之间的耦合效应,在本质上不利于复杂机电系统的全功能、全性能、全过程的融合与协同设计。应当从系统层面研究复杂机电系统的机械单元、信息感知单元、控制单元、功放和作动器单元的划分、设置和设计,统筹考虑系统的硬件集成、信息集成和功能集成等问题,即开展复杂机电系统的集成设计理论与方法研究,具体可以按如下几个层次进行研究:

(1) 功能集成。能够同时支持系统多目标任务的实现;支持系统对于工业过程参数的智能监控及调节;支持系统的自感知、自学习、自适应、自组织和自维护;支持对于紧急状态的处理;支持人机交互;支持网络环境。需要重点处理不同单元技术在系统构建时所出现的矛盾与冲突,从系统层面上解决多功能或功能多元性问题以及功能相容性问题。

(2) 硬件集成。从系统层面统一考虑、设计和制造系统部件,模块化是系统集成有效工具。主要包括对于嵌入式硬件模块、传感器/作动器集成模块、数据处理模块和紧凑型低功耗电源模块的集成设计,实现统一的编程、时钟设置和逻辑控制等。需要重点解决复杂机电系统的结构相容性、结构完整性问题。

(3) 信息集成。多源信息的冗余、融合、数据预处理和综合利用,以及软件处理及补偿;在综合系统相关物理过程和动态行为信息的基础上,利用各种已有的专家知识,实现对测量信号的动态调节和补偿(热胀、温漂、不平衡、参数辨识、运算以及模式切换等)。需要重点解决复杂机电系统的功能实现、过程监测、诊断与信息交互协同设计问题。

(4) 前沿高技术集成。电子、信息、计算机和控制技术的发展促使新的共性或基础技术的不断涌现和产生,并且这些新的共性或基础技术是以往机械学内涵所不能包含的,因为它们可能同时具有信息采集、能量转换或传输等多重功

能,但它们又可以作为构成新型机电系统的基本单元而存在。

(5) 系统总体集成。融合多学科领域知识,采用多学科优化设计方法,研究复杂机电系统在多物理过程实现中的高度非线性、复杂性、不确定性、不可测度性、时滞以及自组织性规律,研究复杂机电系统的多场多过程耦合作用与功能实现基本规律,阐明基于目标功能/状态的复杂机电系统中能量、物质和信息流的协同机制,形成高功效、高精度、高可靠总体系统。

4.4 未来5~10年的研究前沿与重大科学问题

4.4.1 研究前沿

1. 复杂机电系统的物质流、能量流、信息流协同设计

复杂机电系统中的机械系统与其他系统一样都存在着能量流、物质流和信息流的传递和变换。机械系统的能量流、物质流和信息流又存在它们特殊的形态和变化规律。任何一个机械系统的主要特征和功能都是从能量流、物质流的信息流中体现出来的,物质流是能量流的载体,同时又在能量驱动下运动着,二者都是在信息流控制与协同下进行。要设计一台新机器首先应从剖析能量流、物质流和信息流着手,构建各种可供选择的能量流、物质流和信息流及其协同方法与技术,就可得到多种新机器系统的设计方案。

由于智能控制的日益发展,复杂机电系统功能(动作)已不仅是由动力源驱动的机电设备,它已成为实现高精度、高稳定性、高可靠性的由信息流驱动的复杂机电系统。根据系统运行状态与目标功能/状态的差异,信息流通过控制机械单元(主要是作动器单元),调整系统的能量流状态与物质流状态,实现系统目标功能或运行状态,如图4.5所示。

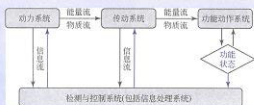


图 4.5 复杂机电系统的物质流、能量流与信息流

基于复杂机电系统的物质流、能量流、信息流的协同设计,可以从复杂机电系统所要实现目标功能的物理本征原理出发,从系统的层面上解决复杂机电系统的科学集成与创新设计的难题,这是我国大型复杂成套装备要从根本上实现自主创新设计,突破单体设备单元性能优良、集成装备系统功能失调(失谐)所必须解决的关键基础问题,也是实现现代复杂机电装备的高效、低耗与稳定协同的直接支撑基础。

2. 复杂机电系统能量高效转换、传递、分配及控制

以高效、低排放为核心的“低碳经济”必将促使重大工程装备的技术变革,低碳技术的争夺战已在全球悄然打响。发展低碳经济必须以强大的装备制造为后盾,装备制造业本身在生产过程中减少资源与能源消耗是走低碳经济最直接的路线,开发新能源和使用节能型装备成为了社会可持续发展的必由之路。因此,未来的机电装备必须具备高效、节能和清洁环保的特点,为了提高机电系统中能量转换与传递的效率,必须开展复杂机电系统能量高效转换、合成、传递和存储等基础理论与方法研究。同样,对于节能型复杂机电装备,探索复杂机电系统能量高效传递、分配与自适应控制理论也十分重要。

复杂机电系统为实现其运行功能与性能,通常具有较为复杂的动力合成、分解、存储与传递系统。为发挥整机在多种功能需求、不同运行工况条件下的高效率和高性能,往往采用了不同种类(或不同能域)的动力源或传递链。各种动力源以及动力合成、分解、存储与传递系统分别以自身的功能和控制方式构成不同的子系统,通过子系统的集成与综合控制实现整机预定的复杂功能;系统在运行过程中,存在不同能域的能量转换、合成、分解、存储与传递,从而构成了系统的混合能量流。复杂机电装备的能量转换、传递、分配的环节和界面多样,能量流的动态变化与多物理过程演变密切相关,这就需要在多能域能量耦合界面建模与分析、在复杂多变运行环境下多能域能量高效转化、传递的系统匹配与控制理论与方法等方面开展研究,为开发节能高效的复杂机电装备提供基础理论。

3. 复杂机电系统多学科设计优化

现代机电产品的复杂化趋势,包括设计对象的大型化、功能和结构的复杂化、追求目标的多元化等,使得现代机电产品的设计必须同时涉及众多不同学科或专业领域,复杂机电系统的多学科设计优化理论与方法的研究成为必然。

复杂机电系统的集成不仅是多子系统的结构集成、功能集成与性能集成,更重要的是多领域设计知识的集成。目前,复杂机电系统设计的重心已由传统的基

于经验的设计转变为基于知识的设计,设计知识的累积与应用成为制造企业最为重要的智力和资产。多学科设计优化在复杂系统的整个设计过程中集成各个学科(或领域)的知识,应用有效的设计/优化策略以及分布式计算机网络系统,组织和管理整个系统的设计过程,通过充分利用各个学科之间的相互作用所产生的协同效应,协调不同学科设计之间的耦合和可能遇到的冲突,使复杂工程系统的设计从孤立的、串行的过程成为并行的、协同的过程,将设计的重点从单独的部件级转移到系统级整体性能优化。

多学科设计优化方法在复杂产品,特别是航空、航天、舰船、车辆等产品开发中的应用,在国外已显现出巨大作用和潜力,代表了当前设计技术的重要发展方向。目前,多学科设计优化研究与应用正在向纵深发展,应用范围不断扩大,解决实际问题的能力不断增强,其关键科学与技术问题包括复杂系统统一建模与控制、复杂多领域物理系统仿真方法、复杂多学科系统优化设计方法等。此外,虚拟仿真是继理论建模、实验验证后工程科学的三大手段之一,通过数字样机进行复杂机电产品的功能验证与性能分析,可以减少实物样机试制次数,降低复杂机电产品开发成本,缩短开发周期。近年来,复杂机电系统数字样机的发展趋势主要表现为从数值仿真发展到图形仿真、从几何模拟发展到物理模拟、从阶段性设计功能模拟与性能验证发展到产品全生命周期多性能多参数模拟。因此,围绕复杂机电系统多参数多性能仿真分析与协同优化,需要研究面向产品全生命周期的复杂装备数字样机构建、复杂性数学描述、功能验证、多性能分析、多目标决策与优化等基础理论与方法。

4. 复杂机电系统的系统可靠性

以系统科学的观点、基于失效的物理背景研究可靠性问题,是可靠性理论与方法发展的必然趋势。目前,融合多方面信息的可靠性评估、预测与监测、检测及诊断技术的结合,可以有效地提高完全基于先验信息的可靠性评估的精度,这已逐步成为学者们的共识。

对于存在涌现现象的复杂系统,根据零件行为预测系统行为的机械论“分析”方法有很大的局限性,突破传统系统建模思想方法的限制,充分应用有关复杂系统的新理论、新方法、新观念,是发展复杂系统可靠性设计与可靠性评价理论与方法的新途径。复杂系统可靠性的基础理论研究主要包括:复杂系统可靠性建模方法,系统可靠性与零部件可靠性关系,以及重要影响因素的识别;零件系统多状态可靠性问题,包括系统及其零部件性能退化规律、零部件失效与系统失效之间的关系、各种失效机理以及失效模式之间的关系等;特殊环境、长寿命要求下的可靠性问题,尤其是机构精度保持的可靠性问题。

与零部件可靠性试验及统计分析相比,系统可靠性试验理论方法体系研究方面还存在许多空白。为此,需要探索系统可靠性试验与评估理论与方法问题,包括最优的系统可靠性试验方案、小样本可靠性统计以及必须获取的最低信息量或系统可靠性试验的截尾原则等。

5. 复杂机电系统服役过程监测、故障诊断与安全评估

复杂机电系统的功能与结构的复杂化,导致系统监测与维护所需的信息量急剧增加,故障诊断与安全评估越来越需要对于系统的总体把握。为使复杂机电系统能够长期、稳定、安全、可靠运行,一方面需要发展复杂系统的信息感知与智能控制理论与技术,运用信息技术使得各子系统之间、系统与外部环境之间、系统与操作者之间在信息层面构成真正统一的整体;另一方面,还需要探索复杂机电系统的故障演化机理,研究复合故障诊断、人工智能诊断与故障早期预示等新理论与新方法,为智能化机电装备的开发提供基础理论。

复杂机电系统结构复杂,部件繁多,采集到的故障动态信号是系统各部件综合反映。现有信号处理与特征提取方法为机电设备运行状态监测与故障诊断提供了基础,但仍需将现有方法不断在理论和实践方面加以完善,如改善经验模式分析的边界效应和均值计算等;同时,也需要将信号处理领域新的研究成果引入到机械故障诊断领域,研究适合早期、潜在、微弱、复合等典型故障的特征提取和诊断识别方法。

4.4.2 重大科学问题

就本质而言,复杂机电系统集成科学的内涵就是运用系统论的理论和方法,按设定的功能形成原理将各种物理过程与其载体从能量流、物质流与信息流的层面进行全局性(全过程)协同组织,从而构建能够满足预定功能指标和性能价格比的人造系统。

本领域的核心科学问题是:复杂机电系统功能生成中的多过程耦合与能量流-物质流-信息流融合协同,包含以下基本研究内容:

1) 复杂机电系统的多物理过程耦合机制与功能生成

复杂机电装备的感知、控制、驱动、执行系统等多功能单元和机、电、液、光等多物理过程高度集成,装备的功能和性能通过能量流与物质流以及感知和控制系统的信息流的耦合作用实现,装备的结构、功能、物理场动态变化及其耦合关系复杂,非线性因素导致系统宏观行为的微演变,从而造成装备功能、精度的不确定性。必须在系统科学的基础上,研究复杂机电系统的多物理过程耦合机制与功能生成,为其设计、制造和可靠运行提供系统的基础理论。

2) 能量流对物质流的作用原理与功能界面设计

复杂机电系统的强大功能从本质上说可归结为能量流对物质流的科学与精确作用过程,其载体主要为功能界面,因此其作用原理与界面设计是复杂机电系统创新的根本。这方面需要研究:多物理场作用下能量流对物质流的作用原理与物质流形性演变规律,功能界面上的能量转化机理,界面参数与系统功能的映射规律,功能界面设计理论与方法,不同尺度主导物理过程的能量流转化条件、控制与系统参数设计。

3) 能量流的传递、转换、聚集与耗散规律及控制设计

能量流的科学传递是实现复杂机电系统高效功能的前提,但复杂机电系统的多过程与多子系统以及传载能场巨大,能量传递过程极易产生畸变。需要研究:多能场的产生机理与多能场耦合协同规律,机械系统多载体间高密度能量传递路径与承载结构设计,材料与构件在各种复合能场作用下的阻尼作用与能量耗散机理,复杂机电系统能量流的聚集与主能量在非传递方向上的动态发散规律,复杂机电系统能量传递畸变控制。

4) 信息流对能量流-物质流作用过程的精确协同调控与系统稳定运行

复杂机电系统是一个复杂的、相关参数处于可行域边界上运行的敏感系统,对多种外场条件、多形式能量的传递、多层次信息运行、多界面耦合等进行精确控制,是复杂机电系统精确稳定运行的保证。需要研究:调控微变量与系统主运动的机电耦合与变异机制,小尺度特征参数扰动与系统宏观动力失稳行为,多种控制模式运行中的多重交互作用、扰动与协同控制机制,基于能量流、物质流与信息流的全局协同的系统稳定性分析与调控。

4.5 未来5~10年的发展规划

基于复杂机电系统的研究现状及现阶段发展需求,围绕复杂机电系统的基础性研究仍显不足,明显滞后于国家对重大机电装备的发展应用需求,因此,在未来5~10年间应加强对复杂机电系统共性基础科学问题的研究。组织跨学科优势研究团队进行联合攻关,力争在复杂机电装备的系统研究方法、物质流-能量流-信息流协同设计、复杂机电系统多领域建模与多学科优化等共性科学问题上取得重要的理论突破,解决复杂机电系统运行安全性、可靠性、故障诊断与运营维护等关键基础技术问题(如图4.6所示),逐步形成复杂机电系统集成科学的综合理论体系与关键基础技术,使我国复杂机电系统的整体科研水平位于国际前列,某些领域处于国际领先地位。复杂机电系统客观上以装备存在,其行为功能在集成演变中产生,种种隐含的问题也由集成而来,因此,有实效的研究应结合实际装备来开展,特别是结合

《规划纲要》和国家重大工程项目,有针对性地加强与深化相关应用基础研究,产生一批既有理论创新、又有显著社会效益的重大标志性研究成果。



按照图 4.6 所示复杂机电系统的总体研究框架,建议在以下研究方向上开展重点研究:

1) 复杂机电系统物质流-能量流-信息流融合协同设计

由于大型成套装备的复杂性,其物质流、能量流与信息流很难高度协同,在运行过程中表现出状态奇异或故障,限制了机电装备功能的提升。因此,实现物质流-能量流-信息流的协同是复杂机电系统创新与功能强化的根本问题之一。研究主要包括:

(1) 能量流对物质流的作用原理及功能界面设计。

(2) 能量流传递、转换、聚集、耗散规律及其传递畸变行为的精确调控原理。

(3) 物质流-能量流-信息流融合设计理论与协同优化方法。

2) 复杂机电系统多学科设计优化与集成设计理论

复杂机电系统的多场、多态、多尺度耦合效应及其极端服役条件,已经突破

了各种传统学科基础理论及技术的理想假设,基于传统单学科领域知识的串行设计方法已不能满足复杂机电系统的集成设计需求,需要探索复杂机电系统集成创新的基础理论,用以有效缩短复杂机电系统研发周期,提高系统集成设计质量。研究主要包括:

- (1) 复杂机电系统多领域设计知识的获取、演化与集成。
- (2) 复杂机电系统多学科统一建模与多场关联分析。
- (3) 复杂机电系统多性能多参数仿真分析与协同优化。
- 3) 复杂机电系统的系统动态可靠性设计理论

复杂系统可靠性问题涉及状态多样性和演化性、载荷复杂性、子系统之间失效相关性、多种失效机理及失效模式相互作用及竞争等问题。传统可靠性理论建立在系统中零部件、元器件独立失效假设基础上,可应用于简单载荷环境下、具单一失效模式的简单系统,但不能满足复杂系统可靠性设计与评价的需要。为了支撑复杂系统的设计制造及服役安全,需要系统、深入研究复杂机电系统中零部件、元器件之间的失效相关性问题、复杂载荷环境对系统可靠性影响问题、复杂失效模式下可靠性问题等,从系统科学的角度建立动态可靠性设计、评价理论。研究主要包括:

- (1) 系统可靠性涌现行为、零部件、元器件失效相关性 & 多失效模式竞争规律。
- (2) 复杂机电系统可靠性精确建模理论与方法。
- (3) 极端环境下庞大系统可靠性设计、可靠性优化分配方法与原则。
- (4) 复杂系统可靠性仿真与可靠性试验理论、方法与技术。
- 4) 复杂机电系统动力学理论及动态性能匹配设计

对于大多数复杂机电系统,特别是空天运载工具、高速列车和超超临界发电机组等高速机电装备,动力学性能的优劣直接影响系统整体功能与性能指标,是决定系统能否安全、高效和和谐运行的关键因素。多场、多态、多尺度耦合及时滞控制作用下的复杂机电系统涌现出众多非典型的动力学现象,迫切需要从系统层面研究复杂机电系统动力冲击、非线性振动分析的新理论,获得复杂机电系统全局动态性能匹配设计方法。研究主要包括:

- (1) 复杂机电系统多场、多态、多过程耦合动力学理论。
- (2) 极端服役条件下复杂机电系统动力学建模与仿真。
- (3) 复杂机电系统与其外部结构及环境的动力性能匹配与设计。
- (4) 典型高速复杂机电系统的动力学综合设计。
- 5) 复杂机电系统故障动态演化机理及早期故障智能诊断与预示

故障机理反映故障的原因和效应,是通过理论或大量试验分析得到的反映量

备故障状态信号与设备系统参数之间联系的表达式。深入研究复杂机电系统故障机理与故障自愈原理,能够形成推理正确、判断准确、预示合理、结论可靠的设备智能诊断与预示的新理论和实用技术,从而确保复杂机电系统安全稳定运行。研究主要包括:

- (1) 复杂机电系统故障动态演化机理。
- (2) 复杂机电系统早期故障动态定量诊断理论与方法。
- (3) 复杂机电系统智能诊断与预示功能。
- 6) 复杂机电装备能量高效转换与利用的基础理论与技术

人类对能源的过度消耗导致了传统石化能源的逐步耗竭,使能源危机日趋迫近,而石化能源的过度使用也造成了对环境的破坏,导致大气污染、温室效应和全球变暖,给社会的可持续发展带来了沉重的负担。因此,未来的新型复杂机电系统(特别是新能源装备)必须具备节能、高效和清洁环保的特点,探索复杂机电系统能量高效转换与利用理论及技术十分必要。研究主要包括:

- (1) 多能域机电系统能量转换、传递与存储新原理。
- (2) 能量转换、存储、传递中各子系统的拓扑关联设计理论。
- (3) 能量转换、合成、分解、传递及存储的多工况匹配设计与节能控制理论。

参 考 文 献

- [1] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 学科发展战略研究报告(2006~2010): 机械与制造科学. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 钟掘, 陈先霖. 复杂机电系统耦合与解耦设计——现代机电系统设计理论的讨论. 中国机械工程, 1999, 10(9): 1051-1054.
- [3] 钟掘. 复杂机电系统耦合设计理论与方法. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [4] 张华胜, 薛渊. 技术创新管理新范式: 集成创新. 中国软科学, 2002, (12): 6-22.
- [5] 殷登祥, 威廉姆斯, 沈小白. 当代科学、技术与社会 STS 前沿——技术的社会形成. 北京: 首都师范大学出版社, 2004.
- [6] World Wind Energy Association. World Wind Energy Report 2008. 2009.
- [7] 路涌祥. 中国制造科技的现状与发展. 中国科学基金, 2006, 20(5): 257-261.
- [8] 徐建平, 夏国平. 我国装备制造业的国际比较及对策研究. 中国机械工程, 2008, 19(20): 2510-2518.
- [9] von Bertalanffy L. General System Theory: Foundations, Development, Applications. New York: George Braziller, Inc., 1968.

第5章 零件与结构的失效与安全服役科学

Chapter 5 Failure and Service Safety of Mechanical Elements and Structures

零件与结构的失效与安全服役科学研究机械零件与结构的失效规律、发展相应的安全评价理论与安全保障技术。零件与结构的失效依机械产品的类型与服役条件的不同,可以包括变形失效(弹性与塑性变形)、断裂失效(韧性断裂、脆性断裂、疲劳断裂、环境断裂)、表面损伤失效(磨损、腐蚀、疲劳)中的一种或多种。零件与结构的安全服役在理论层面上包括结构强度设计理论、断裂力学、损伤力学、疲劳理论、腐蚀理论、磨损理论、可靠性理论和结构完整性理论等学科基础;在技术层面上包括安全试验与检测、安全监测与控制、维修与再制造技术等。尽管机械零件与结构的失效与安全服役的研究本身并不着眼于机械产品功能的创新与拓展,但几乎所有高技术机械产品的实现都必须以其安全运行为前提,因此,零件与结构的安全服役也成为现代机械工程重要的“使能技术”(enabling technology)。随着全球性资源和环境问题的日益凸显,现代机械工程的尺度与服役环境日趋极端化,要求机械零件与结构的失效与安全服役的研究面向先进制造工艺与极端服役条件,不断拓宽其研究领域;面向多尺度与多场耦合问题,不断深化其学科内涵;面向机械产品安全运行,不断提高结构安全检测与运行监控的智能化程度;面向集约生产,不断发展先进的修复与再制造工艺,以实现更为绿色的制造。这些前所未有的挑战也为机械结构失效与安全服役相关学科领域的发展提供了更大的空间,使得今后在失效评价与寿命预测、修复与再制造、安全检测与在线健康监测的基本原理与技术诸方面可望产生新的突破。

5.1 内涵与研究范围

5.1.1 内涵

现代机械产品从投入使用到寿命终了大体要经历如下环节(如图5.1所示):在投用初期,需根据可能的失效模式确定合理的检验和维修周期;在达到设计寿命时,必须进行寿命预测和失效评价,以确定实际使用寿命和后期的安全检测与

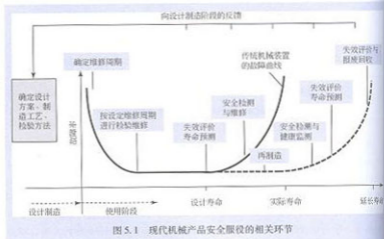


图 5.1 现代机械产品安全服役的相关环节

维修周期,或根据产品的状况进行修复或再制造,然后再进行失效评价与寿命预测。对于重大机械产品,延长寿命期间常常需要安全检测与在线健康监测并与在线监测网络一体化的安全分析系统能及时给出终止运行的警报,以确保使用中的安全性。在保障机械产品安全服役的这些相关环节中,形成的科学方法与经验积累,进而可以向设计制造阶段反馈,以最终实现改进产品设计制造的目的。传统机械产品多按照图 5.1 中实线方式运行,而现代机械产品从经济集约和安全可靠的原则出发,则按虚线方式运行。显然在寿命的延长阶段,对失效评价、寿命预测、修复或再制造、安全检测与监测技术均提出了更高的要求。

机械产品失效评价与寿命预测是安全设计、维修规划、安全监测、再制造延长寿命的基础与前提。所谓失效,是指机械产品丧失规定功能的现象。一般地说,发生下列三种情况之一时,机械零件或结构被定义为失效。第一,完全不能继续服役,如断裂或扭曲;第二,虽然还能运行,但已部分失去它原有的功能,如旋转设备因磨损而产生振动,达不到原有的精度;第三,虽然能运行,发挥原有功能,但因受损伤而不能安全可靠地继续服役。寿命预测是指通过科学的分析计算,预测零件或结构失效(达到临界载荷、速度等)的时间或循环周次。寿命预测可以分为以下三种类型:①以失效机制为基础的寿命预测。关键零部件的失效能代表整个系统失效,已知该零部件的失效机制的条件下,从该失效机制的动力学特性来预测其剩余寿命,这是工程上常用的方法之一。当零件的失效是唯一的失效机制或由一种失效机制起主要控制作用时,其剩余寿命的预测相对比较

简单,如疲劳寿命预测、蠕变寿命预测和磨损寿命预测等。②以可靠性物理模型为基础的寿命预测。根据所建立的可靠性物理模型,通过确定特征值随时间分布和失效概率,预测在要求的可靠度下的寿命。可靠性物理模型主要有应力-强度模型、反应论模型、最弱环模型(串联模型)、绳子模型以及退化模型或损伤累积模型。③以数理统计为基础的寿命预测。根据产品的试验数据和现场数据,利用数理统计的方法,并结合实际使用及各种相关因素给出产品寿命的过程。

机械产品的修复或再制造是实现产品延寿与制造过程节能降耗的重要技术基础。大量的工程实践表明,达到设计寿命的机械零件或结构往往还有很大的承载能力,简单地更换新品,显然是十分浪费的做法,尤其是重大机械产品的零部件,一般价格昂贵,供货周期长,在保障安全的前提下对其进行修复并重新使用是降低成本、实现经济集约运行的重要途径。再制造是指将废旧或发生失效的机械产品及其关键零部件,运用先进制造工艺进行修复或升级改造,使其质量和性能恢复到原产品甚至超过原产品的制造过程,这是维修工程发展的新阶段。无论是毛坯来源还是再制造过程,对能源和资源的需求、对废物废气的排放都是极少的,特别是规模化、标准化的再制造,具有显著的绿色制造的特征。先进的表面工程技术通过在损伤的零件表面制备耐磨、耐蚀、耐高温、抗疲劳的涂层,不仅恢复了零件尺寸、提升了零件性能,而且延长了产品寿命,更重要的是有效提高了资源利用率,减少了能源消耗,实现了制造过程的节能降耗。

机械产品的安全检测与在线健康监测是保障重大机械产品安全服役的重要手段,在现有寿命预测技术不能准确预测产品失效时间的情况下,它是确保产品安全服役的根本方法。结构安全检测是指通过无损或有损的物理或化学方法获得结构材料内部的损伤信息,进而判断结构的安全状态。这是实现机械零件与结构安全运行的重要基础,研究内容涉及结构的力、声、光、电、磁、温度等信号的测量,以及这些信号与材料损伤和结构失效之间的关系。许多无损检测技术(NDT)可用于结构的缺陷和损伤的检验,如超声波成像、涡流测量、射线测量、磁性检测、声发射、热成像和光纤测量等。其中不接触超声波检测、超声相控阵技术、多探头涡流检测、导波检测、激光检测、红外检测及检测信号的图像化、数字化、智能化还有很大的发展空间。有损的结构安全检测方法涉及对结构的破坏性或半破坏性取样和对试样的实验室理化检验(如拉伸、冲击、弯曲、金相和成分分析等)。结构健康监测是利用现场无损传感技术和先进传感网络,在线实时地获取与结构健康状况相关的信息(如变形、应力、应变、模态和温度等)的方法和技术,可以及时发现结构出现的任何异常信息,警示安全隐患。与传统的NDT不同,NDT主要是通过人工操作,离线、静态地测量结构参数,以确定结构的物理状态,它的评价结果主要取决于测量设备的分辨率与精度,较少地依

赖于被测对象的历史记录数据。而结构健康监测,则是在基本无人工干预的条件下,自动、在线、实时、连续地监测结构状态,并根据结构状态参数的历史记录数据,结合信息处理方法和力学建模方法,提取特征参数,进而由专家系统自动诊断软件来诊断识别结构的健康状态。因此,结构健康监测涉及许多学科,如传感、信号处理、通信、计算、结构力学与材料等,特别是对结构损伤的识别涉及被诊断对象的专业技术领域的科学知识。

5.1.2 研究范围

根据机械产品服务过程的特点,零件与结构的失效与安全服役的研究应包括失效评价与寿命预测、修复与再制造、安全检测与在线健康监测等方面的内容。

1. 失效评价与寿命预测

失效评价与寿命预测的研究主要探索零件与结构的失效规律,揭示失效过程的信息,以及零件与结构破坏的临界值,并据此预测相关产品的寿命。它涉及变形与损伤、疲劳与断裂、腐蚀与磨损、寿命预测与安全评定等方面内容。在揭示结构失效规律和准确预测寿命的同时,应用新发现的知识,可望改进机械产品的安全设计,促成新的安全设计理论。

近年来,随着运行环境的复杂化和零部件尺寸的极端化,机械产品的失效模式和破坏机理均有异于传统研究对象,给失效评价和寿命预测的研究提出了许多新的挑战。构筑极端条件下失效评价与寿命预测的学科基础已成为迫切需要解决的问题,这包括对断裂力学、实验力学、疲劳科学、腐蚀科学、磨损理论以及结构完整性理论等学科基础的再认识。

2. 修复与再制造

修复与再制造的研究内容贯穿产品的全寿命周期。在产品的设计阶段,要考虑产品的可维修性与再制造性设计(如可拆卸性设计、可回收性设计和可再加工性设计等);在产品的服役阶段,常常要考虑产品安全检测以及状态监测与跟踪;在产品的报废阶段,要进行零部件的失效分析及剩余寿命演变规律的探索;在产品的修复与再制造实施阶段,需确保产品的再制造质量以及后续运行的安全可靠,针对不同运行环境,发展抗疲劳、抗腐蚀、抗高温、抗磨损的先进修复与再制造工艺。为此,修复与再制造的研究应包括可维修性与再制造性设计、先进修复与再制造工艺、修复与再制造部件的失效规律与寿命预测,以及质量检验方法等。

5.2 在国民经济、社会发展和学科发展中的重要意义

随着人类文明的高度发展和科学技术的日益发达,当代经济活动、生产活动与科学探索中的事故更具有突发性、灾难性、中断性以及社会性,安全问题也因此越来越成为人类活动所关注的主题。世界上发达国家和许多发展中国家都把安全技术作为21世纪优先发展的领域之一,以体现现代人文主义的精神。以安全可靠为前提的高新技术产品研发,促进了产品为公众接受的程度,从而提升了企业及国家的竞争力。

机械零件与结构的安全服役对于民用及国防的诸多领域,如电力、石化、冶金、航空航天、武器、车辆、舰船等重大或重要的机械产品与基础设施,均极具重要性。特别是进入21世纪以后,随着能源短缺、环境恶化问题的日益严峻,促使制造工艺向更高参数和更大装置规模发展,生产过程大型化、自动化、高参数运行、高能量储备的趋势使得机械产品的安全问题具有前所未有的重要性。

1. 预防重大事故发生,减少经济损失的需要

机械产品的失效往往导致严重事故的发生,造成重大经济损失。长期以来机械零件与结构的运行失效十分惊人,与机械装置直接相关的重大事故时有发生。例如,在特种设备领域,重大设备多在高温高压、易燃易爆、深冷、有毒等介质环境下运行,一旦发生事故往往造成严重后果。近年来我国承压设备安全技术取得了前所未有的进步,但在制造检验和使用检验过程中发现的问题率仍大大高于欧美发达国家,重特大事故发生率是发达国家的5倍以上,造成的经济损失十分巨大。在航空领域,由于疲劳和腐蚀等引起的飞机结构的破坏事故屡见不鲜,民用飞机的多部位损伤,军用飞机的振动疲劳、超高周疲劳和腐蚀疲劳等已被认为是航空飞行器失效的主要原因之一。在铁路交通领域,在近200年的铁路运输历史上大小脱轨事故时有发生,随着列车运行速度提高、运输重量增大和运行环境的复杂化,机车部件的磨损、疲劳和失效问题将更加严重,脱轨事故将可能频繁发生。尤其在我国,近年来列车不断提速,新的线路不断建设,确保复杂环境状态下高速列车的安全性已成为保障我国高速铁路快速发展的关键。在核电领域,核电装置由于其特殊的反应条件和工艺流程,一旦发生事故将造成灾难性的后果。历史上,已有美国三哩岛核电站严重失水事故(1979年3月)、前苏联的切尔诺贝利核电站爆炸事故(1986年4月)的惨痛教训。近年来仍时有核电站泄漏的事故报道,造成了重大经济损失和严重的社会影响。核电装置长时间运行也是威胁设备安全的因素,设备老化、腐蚀与出现缺陷情况常有发生。经过20余

年发展,我国已有11座商用反应堆投入运行,设备在役检查中也不时发现一些缺陷,但目前国内研究工作还不足以支持核电设备的失效评价、安全检测与寿命预测。对此我国国家领导人曾指示:“要抓紧制定我国核电建设法规和标准,加强安全验证等基础性工作。”

工程实践表明,疲劳、蠕变和脆化等会导致零件与结构严重劣化,所造成的破坏往往是灾难性的。而腐蚀与磨损的失效造成的经济损失则十分惊人,粗略统计表明:我国因腐蚀造成的损失占GDP的5%,因摩擦磨损造成的损失占到GDP的4.5%,两项损失合计占到了GDP的9.5%,而发达国家一般只达到4%~5%^[1]。但过去的安全评定与延寿技术的实践也表明:通过寿命预测技术、先进再制造技术以及安全监测技术的实施,大多数机械零件和结构的失效是可以避免的。

2. 保障重大工程建设、实现工业现代化的需要

在今后10年,将有越来越多的重大工程项目在我国建设。根据我国的核电发展规划,至2020年核电要达到总电量的4%,未来20年将新增40余座核电站;为了提高燃煤机组的效率、降低污染物的排放,高参数超超临界发电技术已成为我国电力行业的重要战略选择,目前已运行的百万千瓦超超临界机组占全世界的一半以上,投入运行的机组仍不断增加;而高速铁路预计到2020年,将占世界高速铁路总里程的一半以上;大飞机计划2014年首飞,2016年取得适航证。这种建设的规模与速度是世界上许多国家所难以企及的,要保障这些装置与设施运行的安全可靠,其所带来的挑战与压力也是不言而喻的。特别是对于重大机械产品,我们还不能回避这些基本问题,即关键部件靠进口、失效规律不掌握以及寿命评价无规程等问题。大的零部件如超超临界机组的高温部件的设计制造缺乏对其失效规律的研究,缺乏基础数据和强度设计方法的支持,因此还全部依赖进口;汽轮机制造企业为了实现机组大型化,致力开发大型焊接转子,但对蠕变疲劳交互作用下焊接接头的寿命还缺乏基础研究,制约了自主设计制造;小的元件如许多高技术机械产品的密封,包括核级泵(特别是核主泵)轴端密封、核级阀密封、高速低温航空航天密封、深潜器自动变压密封及高速、高压(超高速、超高压)干气密封等,目前对它们的失效规律的研究还十分欠缺,无法实现自主设计制造,还主要依赖进口。而对大飞机结构,先进复合材料结构的寿命与可靠性已成为大飞机能否实现商业成功的关键之一。新一代航空航天飞行器将大量采用先进复合材料,其复杂使用环境和载荷工况下的安全性设计与评估是亟待解决的问题。因此,今后加大基础研究的力度,发展零件与结构的失效与安全服役理论无疑具有重要的现实意义的。

3. 推进再制造工程、加速发展循环经济的需要

促进循环经济发展是实现节约资源和保护环境的重要手段。对许多达到设计寿命的重大产品与重大设施,在寿命预测的基础上,采用先进的修复与再制造技术进行延寿,可最大限度地实现节能降耗,面对面广量大的机电产品实施再制造,其经济与社会效益将十分可观。为此,2009年1月生效的《中华人民共和国循环经济促进法》多处阐述了再制造,这标志着再制造已进入国家法律体系。

据美国《再制造工业发展报告》统计,每再制造1kg的新材料,可以节约5~9kg的原材料,每年全世界通过再制造节省的材料达到1400万t;再制造产品的能耗仅为新品生产的15%,全世界每年通过再制造可节省1600万桶原油,相当于600万辆汽车一年中所需的汽油。根据对我国某循环经济示范试点企业的数据分析,若每年再制造5万台汽车发动机,可节省3.825万t金属,回收附加值16.15亿元,节电7250万度,减少CO₂排放3000t。但一个产品或部件能否再制造,除了看其经济价值,更重要的是其后续服役过程中的安全可靠。这是再制造工程向重大机械产品(发电、石化、航空等)拓展的前提。要使再制造产品达到甚至超过原来产品的质量和安全性能,必须在再制造工艺和安全评价方法上有所创新,这也是机械零件与结构失效与安全服役领域的新课题。

上述国家经济建设的重大需求,一方面给机械零件与结构的失效与安全服役的研究带来新的挑战,另一方面,也给新理论的创建乃至新学科的诞生提供了重要的时代与社会背景的支持。断裂力学的建立与发展便是一个典型的例子。20世纪20年代,Griffith通过对大量脆性断裂事故的研究,提出了金属材料的脆性断裂理论。第二次世界大战期间,“自由轮”(liberty ship)壳体的大量脆性断裂事故以及在20世纪40年代发生的北极星导弹爆炸事故等,大大推动了人们对裂纹体在低应力下断裂的研究,从而催生了断裂力学这一新的学科分支。进而断裂力学的发展带动了疲劳力学、损伤力学、结构完整性原理等学科的研究,并在航空航天、石油化工、冶金、发电、交通运输等行业获得了成功应用,这进一步保障了工业装置大型化的实现。今天,许多新的制造工艺在不断涌现,机器尺度和服役条件向极端化发展,新的失效模式也将不断出现,只要持之以恒探索失效的本质与规律,我们完全可以期待,新的理论和新的学科分支也将被不断创立并蓬勃发展。

5.3 研究现状、存在问题和发展趋势分析

5.3.1 失效评价与寿命预测

在过去的一百余年里,人们针对不同材料与结构的破坏规律曾经提出了不下百种强度模型或准则,它们构成了近代强度理论的基础^[2],使得大型机器与装置的建造成为可能,为20世纪制造业突飞猛进地发展奠定了重要基础。但是,随着机械零件与结构服役条件的日益复杂,失效形式也日显多样,传统的强度理论已很难解释复杂多样的失效模式,为此基于失效机制的寿命预测理论逐渐取代基于强度准则的设计理论已成为必然趋势。

当前国内外学者在机械零件与结构的失效与安全服役领域的研究主要集中在两方面:一方面研究探索结构性能衰退与失效演化的物理机制与过程,以形成寿命预测的理论基础;另一方面则致力于发展建立失效评价的科学方法,以形成满足工业要求的技术和相关标准。对于机械结构单一形式的失效与寿命预测,目前已形成较为完整的理论和技术体系,先后提出了多个描述裂纹状态的断裂参数与失效评价方法。近年来的研究工作更多地考虑了复杂结构和制造工艺的影响,如大型焊接构件、制造缺陷和表面加工质量等对寿命的影响。诸多基础研究成果正在向技术层面转化,在欧盟9个国家多个研究机构长期研究工作基础上形成的欧洲工业结构完整性评定方法(SINTAP)采用了失效评定图(FAD)和裂纹推动力技术(CDF),近年进一步考虑了焊接、薄壁结构及拘束的影响,已逐渐发展成为欧盟统一的“合乎使用性”规程(FITNET-FFS)^[3],可以应用于各种承力结构的安全评定,如承压设备、管道、航天结构、旋转结构、海岸工程结构乃至医用植入结构等。经过多年的基础研究和攻关,我国也形成了若干结构完整性的标准或规程。但是就总体而言,我国标准与工业发达国家相比,其科学基础还相对薄弱,缺乏足够试验数据的支持,一般只能处理常温下线弹性断裂、弹塑性断裂和疲劳失效评定问题,对复杂环境下的失效还无能为力。此外,由于机械产品失效模式的复杂多样性,目前还难以形成基于寿命预测的设计标准,无法在源头上保障机械产品的服役安全性能。

针对高温下的结构失效,英国学者提出的R5方法逐渐完善,并得到广泛重视和更多工程案例的验证^[4]。我国学者在国家自然科学基金的支持下,致力构建高温结构完整性原理,提出了高温构件延寿的基本原则^[5],以及与时间相关的失效评定图方法和统一的失效评定框架^[6],针对高温下焊接结构蠕变特性、缺陷合并准则、断裂力学参量和裂纹扩展速率等问题,取得了一系列创新成果。但是高

温下多种失效机制并存的问题仍然是世界性的难题,诸如超超临界电站、高温核电装置、乙烯裂解装置、高温燃料电池堆等,由于服役环境、材料与结构均差异甚大,失效机制十分复杂,安全保障面临重大挑战。虽然单一的蠕变或疲劳的失效机制已有许多寿命预测模型,蠕变与疲劳同时存在时的失效也历经了数十年的研究积累,但是蠕变-疲劳交互作用下的寿命预测的精度还远不能令人满意^[7]。

高温与复杂介质环境的共同作用对核电设备的寿命有显著的影响。一般核电站设备的设计寿命为40年,而目前最先进的AP1000已要求延长到60年。但从近30年国内外核电站实际运行情况看,相当一部分核电设备和结构达不到电站的设计寿命,实际运行寿命往往仅达设计寿命的50%左右,大多因高温疲劳、辐射、腐蚀等各种不易克服的损伤或维修效果不佳而提前退役。核反应堆压力容器(RPV)是其中最为关键的设备,在安全上处于特殊地位。决定RPV寿命的主要问题是辐照脆化和应力腐蚀开裂。而应力腐蚀开裂在其他核承压设备与管道中频频发现。针对应力腐蚀开裂,核电发达国家在最近的20多年里,在定性预测方面已做了不少的研究工作,在定量预测特别是应力腐蚀裂纹扩展动力学方面也取得了一定进展^[8],但还未能形成像Manson-Coffin公式那样为工程界一致认可的寿命预测理论。对于环境作用与疲劳载荷同时存在下的裂纹扩展分析,目前应用较多的是叠加模型。但实验研究表明^[9]:在高温含氧水环境中的裂纹扩展速率比传统叠加模型预测的值高,说明腐蚀和疲劳二者的交互作用使裂纹扩展速率加快,因此需要发展考虑二者交互作用的预测模型。针对环境促进开裂的问题,近年研究的热点还包括:镍基合金和不锈钢的应力腐蚀开裂机理、缝隙化学、杂质浓缩、腐蚀电化学过程等对开裂行为的影响,低合金钢和不锈钢服役零部件辐照后的性能变化、辐照促进应力腐蚀开裂的关系等。在我国,由于多种核电技术并举,失效机理将更加复杂多样,强化应用导向的基础研究,建立科学的安全评价规程则显得尤为迫切而又任重道远。

复杂环境下的摩擦磨损问题仍然是一个难题。如在轨道交通领域,轮轨是关键零部件。以Kalker为代表的滚动接触力学理论从力学的范畴看已较完善,但仍无法表述滚动接触表面的第三介质的影响和制动过程引起的局部升温和高速度性的影响,也无法描述力学和环境耦合作用。例如,车轮和钢轨材料内部都存在原子氢,即使不存在白点,这些原子氢对车轮和钢轨的力学性能以及磨损疲劳性能存在明显的损伤作用。到目前为止,国内外还鲜见报道氢、空气湿度等对轮轨磨损疲劳影响的研究。又如,机械密封的失效多源于端面摩擦和腐蚀因素,和密封面的表面微结构及其中介质性密切相关^[10],一般均是力学与化学因素的耦合作用下导致的失效。由此可见,复杂环境下的零部件表面失效是典型的多场耦合问题,它的解决有赖于研究力学行为的机械科学家与研究材料服役行为的材料学

家和化学家们的紧密合作。

复杂载荷和复杂载荷下结构失效机理与寿命预测一直是研究的热点与难点。过去几十年中人们对相对简单的加载条件和载荷历程下的结构损伤及裂纹形成与扩展进行了研究,积累了大量的数据,然而大量工程构件,如工程机械承力构件、航空飞行器结构、燃气轮机的转子、涡轮叶片、压力容器和核电设备等均在复杂载荷和恶劣环境条件下工作。结构零部件在承受多轴复杂循环应力作用时,其疲劳行为与单轴疲劳有很大的不同,如图 5.3 所示。因此,将单轴疲劳模型应用到多轴情况已不能满足现代工业的设计要求,建立一个合适的多轴疲劳理论成为众多学者关注的目标。由于多轴应力问题的复杂性(如多轴非比例循环本构、疲劳裂纹路径、多轴疲劳破坏准则和材料多轴疲劳性能表征等),这一领域的研究多数仅停留在实验室仿真与模拟,仍未能形成可靠的强度分析理论和设计准则^[11]。目前,针对多轴疲劳研究,我国学者也开展了大量研究^[12-13];材料多轴非比例循环性能及本构模型、多轴疲劳损伤参数、多轴载荷下的疲劳裂纹扩展和多轴随机载荷谱下的疲劳损伤积累律等。同时,基于目前的工业需要,高温下的多轴疲劳研究也已经逐步开展起来^[14]。但多轴疲劳与复杂环境相互作用的损伤演化规律仍需高度重视,如考虑腐蚀环境的多轴疲劳及高温多轴疲劳的棘轮应变预测等。

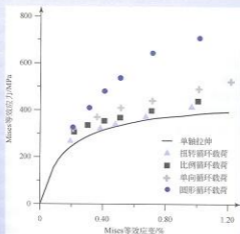


图 5.3 循环稳定 Mises 等效应力-等效应变关系图

现代大型结构日趋复杂也是失效研究的难点,尤其在航空航天等现代运载工具上,复合材料结构的应用日益广泛,使得问题更加具有挑战性。在飞机制造中,大量采用先进复合材料已被认为是实现新飞机机体减重及降低直接运营成本的有效途径,如空客 A380 上复合材料结构的用量占总重量的 25%,波音 787 上复合材料结构的用量达到 50% 左右,无人作战飞机上大模块复合材料结构的用量高达 80%。同常规金属结构相比,复合材料的结构力学性能及损伤模式要复杂得多。在飞行器上的复合材料结构受力情况也比较复杂,作为主承力结构,多数受有弯、剪、扭的复合载荷,静载、动载、疲劳载荷俱全,有的部位还可能在过屈曲状态下受载,这为保证飞机的安全性提出了新的要求。现代战机的超机动性、高效率空战和日趋恶化的战场环境对飞机的动力性能和气动性能也提出了更高的要求,迫切需要解决复杂动力学和气动环境下,飞行器结构所面临的安全性问题。先进的超高温复合材料对于开发下一代可重复使用的空天飞行器、火箭发动机和超高音速宇宙飞船非常关键。这类材料具有独特的综合性能,能够适应高超音速长时飞行、大气层再入、跨大气层飞行和火箭推进系统等极端环境,但也不可避免地存在高温损伤失效问题。由于多相和界面的存在,复合材料结构的损伤模式与各向同性材料完全不同,在复杂载荷和极端环境下,结构内部损伤的产生、演变、监测和评估等方面的问题都值得进一步研究。

大型机械零件与结构在制作加工以及服役过程不可避免的会产生缺陷,并且常常出现多个缺陷或裂纹并存的复杂情况。一个缺陷或裂纹可能对于构件的使用是安全的,但多个缺陷或裂纹的存在往往会降低构件的安全裕度,导致裂纹扩展,寿命缩短。如在航空领域,老龄飞机常发生多部位损伤(multiple site damage, MSD),这已成为保证飞机结构可靠性的热点研究问题^[15]。断裂力学研究指出多裂纹扩展的相互干扰的机理是^[16]:某一条裂纹的扩展改变了应力场的分布,从而改变了其他裂纹尖端的应力场强度,导致裂纹扩展速率发生变化。如何处理多个裂纹之间的相互干涉效应和自由表面对裂纹的影响,是进行缺陷安全评定中的重要内容。国内外针对疲劳载荷下多裂纹问题进行了许多的实验和理论研究,并纳入了诸多缺陷评定的规范,但通常的处理方法大多是基于弹性假定的。对于高温与环境作用下的非线性情况,目前还缺乏足够的试验与理论研究。

微/纳器件的失效行为和机理目前还有待深入研究。纳米技术和微/纳系统被公认为是 21 世纪高新技术的制高点,无论是在国内还是国际,微/纳制造都是一项具有前瞻性和基础性的技术。而掌握微/纳器件的失效行为是实现微/纳制造设计制作的基础。宏观块体下所测得的机械弹性模量、拉伸强度、断裂韧性及疲劳强度等并不一定适用于微/纳器件的设计。国内外试验研究表明,许多材料在微/纳

米尺度下的失效机理与宏观状态相比已发生了本质上的改变,如金属微薄膜的疲劳强度与宏观状态相比有显著的改变^[17]。对于某些依靠固有频率稳定性来工作的MEMS产品(如加速度传感器、微陀螺仪等),即使不发生疲劳断裂,其疲劳损伤的累积也会导致测量结果发生较大的偏差,引起控制系统误判,酿成灾难性事故。近年来,微/纳米线、管、带等微结构不断出现,失效模式也更加多样、复杂,为此针对微/纳系统的设计制造,研究微/纳元件的失效行为对于发展新的学科方向和提高国家在高科技领域的竞争力无疑是十分重要的。

无论是宏观大型构件的破坏还是微/纳元件的失效均有明显的多尺度特征,因此,要从本质上把握失效的规律,必须研究失效的多尺度性质。进入21世纪后,多尺度的强度与断裂问题逐渐成为研究的热点^[18]。科学家从不同的角度进行了大量的基础研究,基于大规模原子和分子模拟的直接方法首先得到重视,进而发展了基于原子模拟与连续有限元耦合的方法,但是基于原子模拟的技术往往受限于原子作用力模型和机器的计算能力,因此,在连续介质框架下考虑尺寸效应便显得必要。于是,基于分形的方法、塑性应变梯度理论和双尺度应力强度模型等纷纷被提出,且均获得了不同程度的成功应用。例如,基于细观机制的应变梯度塑性理论可获得微观下裂纹尖端局部的应力场,由此可望演绎微观下(微结构)的破坏过程^[19];用双尺度的局部应力强度或局部能量密度来描述疲劳裂纹扩展进程的损伤,可以很好地关联宏观和微观两个尺度下的疲劳裂纹的扩展速率^[20];新近提出的基于原子断裂力学的强度与寿命概率分布的尺度分析理论^[21],既应用唯像的概率分布,也考虑微观下热激活原子键裂的物理基础,尽管限于脆性结构,但无疑为尺度分析提供了一个新的思路。但是,必须指出的是,目前这些多尺度理论还不能描述环境中化学因素的作用,因此解决复杂环境下的失效问题,今后仍需更多的努力,尤其是化学-力学协同作用的多尺度特性值得深入研究^[22]。

图5.4为对失效评价与寿命预测领域发展路线图。不同时期失效评价理论与寿命预测技术的发展,也促成了不同设计方法的诞生。传统的设计主要是基于无裂纹的静强度理论和疲劳强度理论。随着断裂力学理论的发展,在20世纪70年代出现了损伤容限设计方法;在80~90年代在不同类型损伤研究的基础上建立了耐久性损伤容限设计方法;进入21世纪以后,全寿命设计的理念被提出,以期在机械产品设计阶段便能预知其性能、风险乃至寿命,实现全寿命周期内安全性与经济性的最优化。但是,目前零件与结构的寿命设计还主要是相对寿命的设计,离精确的寿命设计还相距较远,因此,全寿命设计还更多地停留在理念阶段,今后,随着各种寿命预测理论的发展与成熟,相信全寿命设计将在不同机械产品设计中得以全面实现。

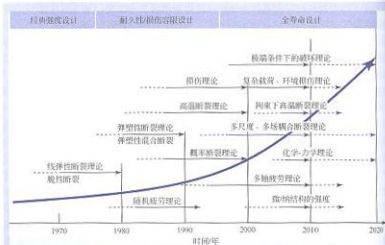


图 5.4 失效评价与寿命预测领域发展路线图

5.3.2 修复与再制造

基于熔焊方式的补焊是迄今为止最为常用的修复方法，多采用手工电弧焊（SMAW）、氩弧焊（GTAW）、熔化极气体保护电弧焊（GMAW）、药芯焊丝电弧焊（FCAW）等。但工程实践发现，补焊部位往往也是新的失效起始点，因此，必须合理预测其安全服役寿命^[25]，同时发展更为先进的修复与再制造技术。近年来，越来越多的先进技术被用于机械零部件的修复与再制造，如表面涂层/薄膜技术（喷涂、磁控溅射和离子注入等）、表面改性技术（激光熔覆、等离子熔覆、激光冲击和喷丸处理等）以及整体处理技术（修复热处理和深冷处理等），均被实践证明可以有效地提高机械产品的抗疲劳、抗腐蚀、抗磨损和耐高温等诸多性能。特别是基于激光的修复与再制造技术近年来得到了长足的发展。自 1972 年美国巴特勒研究院（Battelle Memorial Institute）首次应用高功率脉冲激光诱导的应力波来改变铝合金的显微结构组织以后^[26]，激光冲击（喷丸）强化在许多国家得以广泛的研究与应用。高能激光冲击强化可用于提高许多关键零部件的服役寿命，如发动机的叶片、飞机舱壁桁架上弦与斜撑杆接点以及容器的焊缝。不同的失效模式，激光冲击处理的效果不同，寿命增益可以是几倍乃至数十倍不等^[25]。激光熔覆技术应用到表面修复，可以极大提高零件表面的耐磨性、耐腐蚀和耐疲劳等机械性

能,从而提高再制造产品的使用寿命。激光表面合金化能够在廉价金属材料的表层得到任意成分的合金及相应的微观组织,从而获得良好的综合机械性能^[26]。

目前,结构的修复方式大多是离线的修复。以复合材料为例,自复合材料诞生以来,其修补方法就一直在进行研究,目前的修补方法主要是通过填充或注射树脂胶液进行,也可进行加热或增加表面涂层来修补,但这些方法都不能实现自动修复。自然界的生物都存在恢复自身健康的功能。对于各种结构和零件,人们也希望不仅能够监测出结构中各类安全隐患的存在、发生位置、大小程度及对结构性能的影响,而且能够实现对结构中的不安全因素进行主动地控制和修复,这对于提高结构的安全性和降低维护费用具有重大意义。目前,已有的研究进展主要是利用 SMA、空芯光纤、空芯纤维及微胶囊来实现自动修复。对埋入 SMA 的简单试件的研究表明:试件在承受拉伸载荷、弯矩或扭矩时,通过触发 SMA,试件上的最高应力水平会大幅度降低,这意味着试件的应力分布得到了明显的改善。因此,在复合材料结构中合理地埋入 SMA,不仅能够提高结构的承载能力,同时可以降低结构中危险区域的应力水平,防止损伤的发生或阻止损伤的扩展。如孔板承受载荷时,孔边会出现应力集中现象。但对植入 SMA 的孔板,由于 SMA 的诱发应变可在孔边产生压应力,能降低孔边的应力集中因子,从而改善应力分布^[27]。在复合材料损伤控制的研究中,一种自修复方法是基于微囊方式的复合材料结构自愈方法。这种方法的基本思想是在复合材料制造过程中加入填充有胶液的微囊物质,一旦结构中有损伤,微囊破裂,其中的胶液流出,对损伤进行自动愈合^[28]。另外一种报道的自修复方法是带胶空心纤维事先埋入结构,在结构出现损伤时进行修补。目前研究的空心纤维主要有两种:一种空心光纤,另外一种是中空玻璃纤维。如果采用双组分胶,则采用两根中空纤维为一组,每根纤维中分别注有一种胶组分。如果采用双组分胶同时结合催化剂使用,则需要再增加一根中空纤维用来注入催化剂,作为一组工作。中空纤维的布置位置确定以后,将其采用环氧树脂固化,制成预浸料,埋入结构,经高压固化以后,将胶液组分采用真空吸取的方法填充到中空纤维中。目前,实验室的损伤自修复表明:采用这种方法试件的强度可以恢复到未损伤时的 87%,自修复的效果是明显的^[29]。

在“十一五”期间,国家自然科学基金委员会对修复与再制造工程的研究给予了高度重视,持续资助了一批与再制造相关的课题,相继取得了多项成果与突破^[30]。在理论基础方面,完善了涂层残余应力的计算方法,探索并初步建立了涂层各组元寿命预测模型。例如,引入均益系数,修正了残余应力经典公式 Stoney 方程,研究并初步提出了再制造零部件涂层中残余应力的计算方法;以废旧柴油机曲轴为对象,研究了非线性动力学分析模型,探讨了废旧零部件疲劳试验数据与模型分析数据的映射关系,初步建立了剩余寿命预测模型;基于金属磁记忆原理,根据

残余应力与应力集中间的映射关系,以及磁畴与载荷和磁记忆信号之间的关系,初步构建了铁磁性材料废旧零部件的疲劳裂纹萌生寿命模型和疲劳裂纹扩展寿命模型^[28]。在技术基础方面,发展了多项再制造关键技术,并深入研究了相关的技术基础。例如,将高速电弧喷涂技术与粉芯丝材相结合的方法应用于再制造零部件的表面修复,实现了Fe-Al(基)金属间化合物的制备与涂层成形一体化技术;发现了一种“双通道、双温区”的超音速等离子喷涂新工艺,使较高熔点的陶瓷材料在高温熔流处熔融、较低熔点的金属材料在低温区熔融,解决了涂层熔滴的过熔、夹生及烧损问题;研究了基于强激光冲击波的修复与再制造技术,应用于多种材料与结构的抗疲劳、抗磨损再制造,取得了很好的疲劳寿命增益;解决了微米颗粒在多离子溶液体系中的均匀分散与悬浮稳定的难题,实现了纳米电刷镀过程中非导电的纳米颗粒与导电的基质金属镍的高效共沉积;制备了纳米软金属、纳米氧化物及纳米稀土化合物等多种性能优异的纳米减摩自修复添加剂,初步实现了在机械产品运行过程中纳米自修复添加剂对磨损部位的原位动态自修复。

在过去10年,虽然修复与再制造工艺技术的研究发展迅速,但目前还较多地侧重于具体的技术与工艺研究,对共性基础问题的研究相对匮乏,对于产品继续服役后安全性能的研究还相对较少,特别是针对再制造部件寿命的定量研究较少。实际上,再制造产品能否继续投入运行,必须有严格的质量控制,对于重大产品还应进行失效评价与寿命预测,以确保在延长寿命期内的服役安全。图5.5所示为

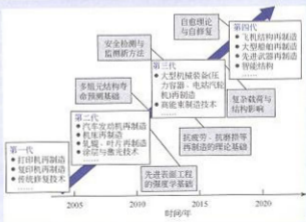


图 5.5 机械产品的修复与再制造技术路线图

机械产品修复与再制造工程的技术预期和相应理论发展的预见。要在今后10年实现航空、能源、冶金、先进武器等重大产品的再制造,必须进一步发展基于寿命的再制造工程,强化再制造部件强度与寿命预测基础理论的研究,进而研究复杂环境、复杂结构的影响以及结构损伤自愈的原理等。

5.3.3 安全检测与健康监测

安全检测与监测是失效评价和寿命预测的基础,一般包括无损检测、应力与应变测试、振动检测和材料试验等。其中,无损检测常用的方法有射线探伤、超声波探伤、磁粉探伤、渗透探伤和涡流探伤。此外,近年来声发射检测和红外热像技术也已得到越来越多的应用。实际上,材料的每一种特性几乎都可以用作某种无损检测方法的基础,所有形式的能量几乎都能被利用来确定材料的物理特性或者用于检测缺陷,因此,基于新原理新方法的 NDT 也不断被提出。随着超声导波的成功应用,导波的理论研究成为了近年来无损检测界的热点。相对于传统的超声波检测技术,超声导波具有传播距离远和速度快的特点,因此,在大型构件(如在役管道)和复合材料板壳的无损检测中具有良好的应用前景。目前的研究发现 Lamb 波非线性谐波量与材料蠕变损伤三阶弹性常数具有强相关性,这表明了该技术方法可望进一步用于疲劳、蠕变以及辐照等导致的损伤定量研究^[32]。利用磁致伸缩换能器的超声导波检测已可应用于非铁磁性材料和非金属的检测。太赫兹(Terahertz,简称 THz)波在无损检测领域异军突起,成为无损检测行业的新技术之一。这得益于超快激光技术的发展,为 THz 波脉冲的产生提供了稳定、可靠的激发光源,使 THz 辐射的研究蓬勃发展^[33]。利用 THz 波可以探测深埋在绝热材料中的缺陷,而这对于红外热波检测是较为困难的。目前,THz 波技术已成功应用于航天飞机隔离层泡沫材料中缺陷的探测。今后进一步提高信噪比、分辨率和环境适应性已成为 THz 波 NDT 的主要研究方向。高能同步辐射衍射配合断层重建技术可实现原位观测块体试样内的空洞扩展与微结构,这为研究界面上的蠕变损伤提供了重要的工具^[34],推进其应用于研究微结构演化动力学和寿命预测的可行性。材料性能试验也是安全检测的必要手段。对于服役的零部件,当一般无损检测方法无法判断材料的损伤状态时,往往需要取样进行解剖和试验检查。近年来微创试验方法得到了重视,采用各种尽可能小(微)的试样来测量材料的拉伸、断裂和蠕变等性质,其关键是如何建立非标准试样与标准试样之间的关系。从总体来看,虽然我国科技工作者在机械产品安全检测技术方面已取得了很好的成就,但是无论在测试的理论和方法方面,还是在测试手段与仪器方面,与世界先进水平相比仍有较大差距。

在结构健康监测方面,土木工程领域已有大量实施的案例,针对飞机结构也

进行了许多探索。随着飞机结构大量使用复合材料及采用先进焊接工艺,结构健康监测已被视为是提高飞机安全性和降低维护费用的关键技术。目前,波音和空客两大飞机制造公司都非常重视结构健康监测技术的研究。波音公司在新型飞机7E7上探索采用结构健康监测技术探测结构微裂纹。空客公司也积极开展了这一领域的研究,探索在多个机型上应用健康监测系统,如A380即是Airbus结构健康监测技术探索研究的主要目标产品^[35]。民机结构的健康监测对象重点包括关键部位的应力应变情况,机翼、机头、机身和垂尾等部位所受的冲击情况,以及关键部位的疲劳裂纹等。

国内在结构健康监测方面也有一定的研究基础。早在20世纪90年代初,国内一些高校和研究机构就开展了有关航空航天结构和土木工程结构的健康监测研究^[36],主要探索基于光纤传感器、基于压电元件以及基于疲劳累积传感器的结构健康监测方法;研究内容涉及结构健康监测系统中的传感与驱动器件的封装和优化配置方法,结构裂纹、复合材料结构冲击、脱黏和分层等典型结构损伤的监测方法和理论,结构损伤的力学建模、结构损伤的信号信息处理及辨识方法等。相关研究成果已被用于土木工程结构或航空结构的健康监测演示系统^[37]。

高温、高压等极端环境下重大机械产品的健康监测是极具挑战的问题,尤其是长期在线的监测往往受限于传感元件的稳定性与可靠性。目前,尚缺乏有效手段检测和监测损伤与缺陷的发展,缺乏信息采集、特征信息提取和传输等一系列关键技术的支持,缺乏相应的安全分析与寿命预测软硬件系统,尤其是缺乏特殊环境下的传感装置、常用产品/材料的失效模式数据库、材料与结构的基础性能数据库。因此,迫切需要针对极端环境下重大机械产品,结合典型失效模式、失效机理及寿命预测技术,开展信号传感、状态监测、远程状态诊断及预警关键技术研究,建立大型零部件与结构在线检测及监测、健康诊断及维护决策管理平台,从而降低现有设计制造手段难以避免的或实际动态服役过程中可能产生的风险,真正实现大型机械产品的安全、可靠和长周期运行。

重大机械产品从安全检测走向结构健康监测的技术路线图如图5.6所示。以飞机为例,目前结构健康监测系统的应用主要集中在飞机的地面结构强度及疲劳实验中以及装机后的离线测试,今后5年可望实现在役飞机的在线监测,用10年左右的时间实现飞机全面的健康监测。要实现这些目标,必须优先发展更为先进、可靠和稳定的传感技术,嵌入式健康监测网络、损伤状态的特征提取方法、安全监测-评价一体化技术,并逐步实现智能测控,以确保安全可靠运行。

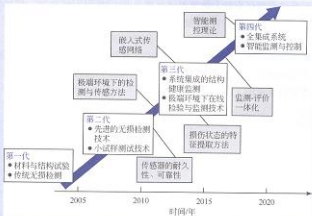


图 5.6 结构安全检测与健康监测路线图

5.3.4 相关研究方向的国际竞争力比较

科技文献是各个国家研发活动和科技产物的重要反映。为了比较不同国家在寿命预测与安全监测方面所做出的贡献，我们系统地分析了近 10 年来（2000～2009）在寿命预测与安全监测方面的文献。寿命预测所用主题包括涉及断裂、疲劳、蠕变、腐蚀、磨损和冲蚀的寿命，安全监测的主题包括结构健康监测、结构完整性监测、安全状态监测和寿命监测等。查询 EI 数据库，检索范围为：题目/摘要/主题，可检出 24 566 篇文献。美国、中国（不含“台湾”）、日本是发表文献最多的前三个国家：美国的发表论文 4717 篇，占总数的 19.0%；中国论文 4184 篇，占总数的 17.0%；日本论文 2105，占总数的 8.6%。从发展趋势看，我国论文数量的增长是十分迅速的，10 年前论文数量不及美国的一半，近 3 年已全面超过了美国，如图 5.7 所示。由此可以认为，《规划纲要》将重大产品和重大设施寿命预测技术纳入亟须发展的前沿技术，国家 863 计划在先进制造技术领域设立寿命预测技术专题，以及国家自然科学基金的长期资助起到了重要的推进作用。进一步用相同的主题词检索 SCI 扩展数据库（ISI web of knowledge），可得到 2000～2009 年间 12 176 篇文献。其中，美国的论文数 3136 篇，占总数的 25.98%；中国大陆 1365 篇，占总数的 11.21%；日本 1204 篇，占总数的 9.89%。尽管我国的高水平论文数量不断增长，但增长速度尚不如 EI 数据库论

文显著,总量与美国仍有较大的差距(见图5.8)。从引用频次看,超过50次的论文美国有30篇,占其论文总量的1.16%;日本有5篇,占其论文总量的0.49%;而中国仅有3篇,占其论文总量的0.26%。在过去的10年间,我国学者在微电子封装可靠性、超高周疲劳、非比例加载多轴疲劳、块体金属玻璃疲劳与断裂等方面的研究工作得到了国际上较多的关注,但被引次数最多的前10篇论文中没有我国学者的文章。

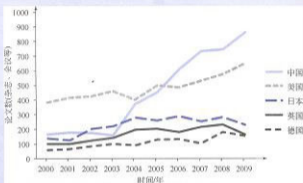


图 5.7 中国、美国、日本三国在寿命预测与安全监控方面发表论文的趋势

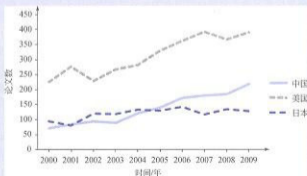


图 5.8 中国、美国、日本三国在寿命预测与安全监控方面发表 SCI 检索论文的情况

从简单的文献计量学分析可以看出,我国相关研发活动量的增长在诸多国家

中是最为快速的,但是,从论文的质量和影响力看,我国与美国等发达国家相比还有较大差距,因此,强化基础研究的投入势在必行。

综上所述,机械零件与结构失效及安全服役领域面向经济建设和学科发展的需要,整体显现出蓬勃发展的趋势,研发活动日益活跃:

(1) 失效评价与寿命预测理论面向极端工况、复杂结构、先进制造工艺不断拓展其外延。

(2) 失效评价的科学基础向多尺度、多场耦合方向不断深化。

(3) 基于智能的结构健康监测已逐渐成为保障重大机械产品安全服役的热点研究方向。

(4) 绿色制造理念成为共识,先进再制造工艺在机械产品上不断拓展应用,再制造工程的安全科学基础研究日显重要。

5.4 未来5~10年的研究前沿与重大科学问题

在未来5~10年机械及其相关制造业将历经前所未有的发展与变革,我国的经济将发展是这些变化的重要推动力。显然,对机械失效与安全服役领域的研究应该更加有所作为,这有利于保障我国经济与社会的安全与可持续发展,同时,有利于推进相关学科的快速进步。从揭示机械零件与结构的失效规律、建立寿命预测理论、发展各种安全保障方法与技术的科学基础的角度出发,相应的研究前沿应包括:寿命预测理论、结构健康监测-评价一体化方法、基于寿命的再制造工程以及受损结构的自愈原理等,而关键的科学问题应包括极端条件下的损伤与新裂理论及基于失效机制的全寿命设计理论。

5.4.1 研究前沿

1. 寿命预测理论

寿命预测理论是机械零件与结构安全服役的关键基础,也是现代机械设计必须覆盖的重要方面。在过去近一个世纪与诸多失效事故作斗争的历程中,已经系统地建立了断裂力学、蠕变力学、疲劳理论、损伤理论和磨损理论等学科分支,然而当今设备与零件的极端化趋势对现有寿命预测理论和方法带来了新挑战:零件与结构的极大或极小化,导致其失效模式和破坏机理均有异于传统研究对象,需要在寿命预测模型与方法中嵌入尺度效应、表面界面效应以及边缘效应的影响。复杂载荷下的寿命预测是本领域传统的难点问题,多轴应力以及非比例载荷下的寿命设计仍没有可靠的设计方法,蠕变、疲劳交互破坏机理在不同材料、不

同温度下表现出的差异性仍未得到深入认识,接触疲劳、摩擦磨损等交互作用下的寿命预测方法迫切需要建立。零件与结构服役环境和介质日益复杂化,传统破坏理论框架下的寿命预测模型不可避免引起较大误差,需要研究高温或低温破坏机制下的寿命预测方法,空天环境、辐照、气液固多相冲刷、光电磁以及化学介质等多场耦合作用对寿命的影响,需要在化学-力学-物理的理论分析和计算手段上具有新的突破。零部件的长寿命与高可靠性设计对寿命预测提出了新挑战,如对于核电设备60年的寿命设计与运行维护,目前仍缺乏科学理论和技术支撑;传统寿命预测模型中的材料常数和不变量的假设均需要重新考核与评价,需要建立纳入材料老化与蜕化的预测模型。新型制造工艺和方法不断涌现,如高能束与特殊能场制造、大型铸锻件的成型新方法、表面修复工艺方法,要求寿命预测理论不断深化与拓展。先进的寿命试验与数据分析也是当今研究热点,一方面,需要研究如何在传统试验方案基础上模拟环境/介质对寿命的影响,并形成可靠的测试手段;另一方面,微尺度和非传统试样技术的实现及其与传统实验数据的转化与关联,也需要发展新的理论方法;同时,实验室模拟寿命数据以及实时检测监测数据的融合与统一和非完整数据库的构建技术方法,也是寿命预测与分析的重要基础。

建立寿命预测理论的另一个重要目的是形成新的零件与结构的设计方法,由此催生基于寿命(失效模式)的设计、基于可靠性的设计以及基于风险的设计等,可望有力促进机械工程学科的发展。

2. 结构健康监测-评价一体化方法

鉴于在设计制造阶段,很难准确预知服役的风险,即使最完美的设计,也很难避免服役条件变化所带来的风险,因此,寿命监测成为最后解决重大机械产品服役安全的关键。这需要研究发展先进的结构健康检测与监测手段,以提供损伤和缺陷演化信息和基础数据;研究结构信息采集、特征信息提取及传输等技术,特别是结构健康检测与监测和失效评价一体化方法的研究,可望实现检测与监测和失效评价技术的无缝集成,准确预警设备故障。

尽管一般工况条件下结构健康监测已得到不同程度的实施,但是在极端环境下服役的重大机械产品具有更高的风险,目前还缺乏有效的手段监测损伤和缺陷的发展,缺乏损伤信号传感、信息采集、特征提取、分析等系列关键技术的支持。为此,迫切需要发展极端环境下服役的重大机械产品检测与监测技术及其与失效评价一体化的方法。

3. 基于寿命的再制造工程

再制造工程得以实施的前提是再制造产品的可靠性,只有把握了再制造产品失效规律,准确预知不同再制造工艺对寿命的影响,才能确保再制造产品的安全服役。但是由于再制造零部件失效形式与退化机理的多样性、外力作用的复杂性以及边界条件的不确定性,同时还缺乏有效的无损检测与模拟分析方法,缺少复杂环境下高强度涂层的制备技术及高能量密度快速成形再制造的关键技术,使这一问题具有高度的挑战性和紧迫性。为此应重点关注服役条件下再制造产品失效规律和寿命预测基础,再制造产品质量控制与安全检测的方法与技术,以及面向不同失效模式的再制造工艺及其寿命增益等。

4. 受损结构的自愈原理

在结构或材料发生损伤时,利用损伤诱发的结构或材料自我修复能力,自动修复材料损伤部位,保障结构安全。结构损伤自修复需要研究新型自修复材料的自修复原理、方法以及实现技术途径等。例如,自修复涂层可以采用先进的涂层制备技术,依据仿生学原理及相关成型技术,在零部件表面制备可适应苛刻环境的自愈涂层。当涂层受到损伤(如腐蚀、磨损等)并产生裂纹后,涂层内部增强成分(特殊元素或微/纳胶囊等)可以自动流出、填充并固化后形成相对平整并有良好屏蔽性的膜层,以防止基体的进一步损伤。为此应重点关注相关前沿研究的进展:先进涂层材料的配制或微/纳胶囊的制备方法;复杂外场作用下涂层材料及性能的演变规律,建立与涂层材料时间相关的退化机制及相关理论;实现涂层增强成分的新陈代谢,所制备的涂层在服役过程中能够实现颗粒智能化及选择性破碎,并能迅速反应与固化,形成新的保护层;研究涂层与基体材料的化学作用,实现基体与涂层之间的元素互扩散,并在基体表面形成阻碍或扩散障层,阻止腐蚀介质的进一步渗透。此外,油润滑条件下材料表面的自修复机理值得深入研究,如油液中添加元素(剂)在零部件表面的沉积行为及随时间的损伤机制、材料表面沉积膜厚度可控性和尺度效应及其对材料自修复及磨损性能的影响规律等。结构受损后的自我调整还可通过智能结构加以实现,集驱动元件和传感元件于一体的智能结构不仅具有承受载荷的能力,还具有识别、分析、处理及控制等多种功能,通过动作调整可改变结构的应力分布、强度和刚度等,从而使结构材料本身具有自诊断、自适应、自修复的能力。

随着微/纳米科学技术的快速进步,微/纳器件的应用逐渐广泛,其失效机制和可靠性设计必须加以重视,相关内容可以参见本书第12章。疲劳是微/纳器件的主要失效形式,微/纳器件的疲劳失效规律和寿命预测方法将是今后一段时间的研

研究热点,相关问题包括:微/纳元件疲劳试验技术、微/纳元件材料的循环应力应变特征、微机械疲劳损伤累积模型和寿命预测方法、微/纳尺度疲劳断裂理论等。

5.4.2 重大科学问题

1. 极端服役条件下的结构损伤与断裂

根据前述分析,可以认为在今后5~10年里在极端服役条件下的结构损伤与断裂理论上取得突破将带动整个学科领域的发展,其中的关键是科学描述多场耦合作用下跨尺度的破坏现象。在基于多尺度、多场耦合的损伤与断裂理论的基础上,可望形成更为精确的寿命预测方法,提供关键零部件修复与再制造的安全科学基础,并建立关键结构的寿命监测技术。为此,建立极端服役条件下的结构损伤与断裂理论是一项具有重要前瞻意义和现实意义的研究课题。

极端环境下材料的损伤或老化是随时间而渐变的过程,因此,零件与结构破坏的预测涉及时间尺度和空间尺度(尺寸)外推的双重复杂性,一方面必须研究如何根据实验室短时间的试验(<10 000h)预测材料长时间服役后的损伤状态,另一方面必须研究如何根据实验室小试样的试验结果预测大构件(或微小零件)的服役行为。尤其是复杂服役环境条件下,有多种损伤机制交互作用,除了机械力学的作用,服役环境的物理化学作用已经不能忽略,环境中的化学元素可以通过扩散进入材料中,进而与材料发生物理化学的作用,导致材料的劣化与结构的失效,因此,必须在分子原子的层面上来把握材料的破坏,建立化学-力学跨学科基础,进而研究复杂应力状态对失效过程的影响,在结构层面上研究失效的发展,建立材料-结构一体化的多尺度、多层次的寿命预测理论。此外,应建立极端服役环境下的材料与结构试验技术,针对服役零件与结构的特点,研究不同尺寸(形状)试样之间、试样与结构之间的转换关系,以期获得服役零件与结构的真实失效行为。

2. 基于失效机制的全寿命设计理论

在机械产品的构思与设计阶段便能针对其全寿命过程中的风险与失效规律进行防范性设计,是机械产品安全服役科学研究的最高追求。全寿命设计是指针对机械产品与零部件的规划、设计、制造、运行、维修、再制造以及回收再利用的全过程,实现产品全寿命周期内总体性能的最优设计。我国传统的机械设计中一般未设定机械产品整体及主要零部件的设计寿命,设计寿命的确定也缺乏理论和具体设计方法的支持,对全寿命过程诸环节的经济性与安全性、资源利用与环境和谐统一等问题鲜有研究,导致了现有机械产品存在使用性能差、使用寿命短和

全寿命经济性指标差等问题。针对产品服役过程中出现的损伤与失效,探索其形成与发展规律,在此过程中所建立的科学方法与积累的经验可以向设计制造阶段反馈,从而改进产品的设计与制造,即所谓“失败乃成功之母”。为此,在现有断裂理论、损伤理论和多尺度破坏理论的基础上,形成基于失效机制的全寿命设计方法,对提升机械设计水平具有重要的理论与现实意义。

基于失效机制的全寿命设计,一方面探索零部件失效机制及其演化规律的建模,另一方面必须考虑全寿命过程中影响安全性与综合经济性的因素,实现全寿命过程的最优设计。为此,应研究防失效的零件与结构的设计,发展大型零件与复杂结构的损伤与寿命的数值分析方法,建立面向检测、维修与再制造的结构设计方法,以及面向节材节能的全寿命周期优化设计方法等。

5.5 未来5~10年的发展规划

5.5.1 本领域发展布局的指导思想

1. 面向全球经济竞争,夯实机械产品安全的学科基础

机械零件与结构安全服役理论的发展必须与机械及其相关制造业的发展相适应,并适度超前,才能保障现役设备的安全运行和高技术产品的研发。在未来10~20年我国制造业将全面进入全球经济竞争,这也是重大装备制造赶超发达国家的时期。为了提升中国制造的竞争力,应特别注重产品的寿命与可靠性,面向先进制造工艺和安全与质量标准的制定,开展系统协同的基础与应用基础研究。

2. 面向学科发展,在多学科交叉发展中寻找突破

机械零件与结构的失效与安全服役的研究涉及诸多学科领域。当代力学、数学、化学、物理、材料科学、计算机与信息科学等学科的进展为零件与结构安全服役的研究提供了坚实的科学基础。随着服役环境的复杂化,可以预见,化学手段在结构失效与安全服役的研究中将发挥日益重要的作用,而随着机械结构尺度的极端化,多尺度数学的发展和运用也势在必行。因此,机械零件与结构的失效与安全服役的研究必须坚持多学科交叉和综合的思想方法,不断从其他学科的研究成果中吸取营养,在 multidisciplinary 交叉发展中寻找新的突破。

3. 强化科学基础设施的建设

工业发达国家高度重视机械结构安全与寿命预测技术的基础设施投入,美

国、日本、德国、英国等国家均有相关国家实验室或科研院所支撑这一领域的研究。与发达国家长期坚持不懈的投入相比,我国针对机械结构失效与安全服役研究基础设施建设的投入是不足的,同时有限的投入也显得相对分散。因此,我国一方面应发挥现有机械振动、机械传动、牵引动力、车辆和工业装备等国家重点实验室和国家实验室的作用,在这些实验室中部署相关机械产品安全服役的课题,并逐渐形成人才队伍;另一方面,对于现有教育部和行业的重点实验室,如对机械强度、破坏力学、承压系统安全科学等实验室加强投入,促使它们成为机械结构安全服役基础研究的国家团队。

4. 强化合作,建立协同研究联合体

作为具有基础性、前瞻性、公益性的研究,机械结构失效与安全服役的研究必须强化合作,建立合作攻关的联合体。目前,我国由多所大学与院所组成的结构完整性联合体(China Consortium of Structural Integrity)已在发挥作用,他们所组织的断裂力学系列会议已成为国际上的重要学术会议,并在基础研究与应用中协同攻关,取得了较好的成效。但面向不同的科学问题,我们仍需更多的联合与合作。

我们应该认识到,西方发达国家在其工业发展过程中,对机械零件与结构的失效规律积累了较为丰富的经验,有较为深入的研究,我国作为后发展国家可以借鉴他们的经验,建立自己的体系,而加强国际合作是十分必要的。例如,在高温材料与结构强度领域,日本有丰富的数据积累,中日双边合作的平台可以发挥更加重要的作用。此外,应支持我国研究机构和科学家更多参与国际试验数据共享的组织,如新材料试验与评价的国际协作组织(VAMAS)虽然已经启动,但是由于我国科学家缺乏经费的支持,进展尚不尽如人意。

5.5.2 主要资助方向的建议

本领域研究的总体思路是以国家战略需求及学科前沿为牵引,兼顾应用基础研究和基础研究的比重,致力研究机械零件与结构的失效规律,建立寿命预测的理论,同时发展各种安全保障方法与技术的科学基础,以保障机械装置的安全、高效、长寿运行。建议在今后5~10年里设立如下优先资助方向:

1) 复杂服役环境下机械零件与结构的失效评价理论

复杂环境与复杂载荷下损伤/缺陷演化的机理和规律,制造缺陷或不完整性对零件与结构安全服役寿命的影响,基于多尺度、多场耦合的新损伤理论,基于非传统试验技术的新断裂理论,损伤/寿命数据库及失效知识库的构建。

2) 极端环境下的结构健康(完整性)监测

极端环境下在线监测与检测的新原理与新方法, 极端环境条件下的传感装置、传感器的耐久性与可靠性, 小尺寸、低功耗、便于在线实时监测的智能传感技术, 复杂结构损伤状态的特征提取方法、辨识策略及一体化的安全评价方法。

3) 再制造部件的质量控制与寿命预测

复杂服役条件下再制造产品失效规律和寿命预测基础, 抗疲劳、抗磨损、抗高温和抗腐蚀再制造的科学基础, 再制造产品质量控制与安全检测的新原理和新方法。

4) 受损结构的自愈原理

重大结构件的损伤识别与自修复原理, 埋入式新型自修复材料和元件, 复杂环境下的表面损伤及其自愈原理, 具有自诊断、自控制和自适应功能的智能结构。

5) 基于失效机制的重大零部件设计理论

复杂环境/复杂载荷下重大零部件防失效设计方法, 复杂结构的损伤与寿命的数值分析方法, 面向检测、维修与再制造的设计方法, 面向安全与节材节能的全寿命周期优化设计方法。

依据学科发展规律和现实需求的紧迫性, 建议在未来 5~10 年期间重点发展多尺度、多场耦合的损伤与断裂理论, 复杂结构的损伤与寿命的数值模拟方法, 再制造部件的可靠性与寿命评价理论, 以及极端环境下安全监控的方法与智能传感技术。

参 考 文 献

- [1] 徐滨士. 国内外再制造的新发展及未来趋势//科技支撑, 科学发展. 北京: 中国科技出版社, 2009.
- [2] 俞茂宏. 强度理论百年大总结. 力学进展, 2004, 34 (4): 529-560.
- [3] Gutiérrez-Solana F, Cicero S. FITNET FFS procedure: A unified European procedure for structural integrity assessment. Engineering Failure Analysis, 2009, 16 (2): 559-577.
- [4] Ainsworth R A. R5 procedures for assessing structural integrity of components under creep and creep-fatigue conditions. International Materials Reviews, 2006, 51 (2): 107-126.
- [5] Ts S T. Some fundamental aspects of redesign and remanufacture of high temperature components. Advanced Materials Research, 2008, 44-46: 25-32.
- [6] 徐善东, 轩福贞, 王卫泽. 高温蠕变与断裂评价的若干关键问题. 金属学报, 2009, 45 (7): 781-785.
- [7] Takahashi Y, Dogan B, Gandy D. Systematic evaluation of creep-fatigue life prediction methods for various alloys. Proceedings of PVP2009 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, Prague, 2009.

第6章 机械表面界面科学与摩擦学

Chapter 6 Surface and Interface Science in Machinery and Tribology

机械表面界面是指在机械产品设计、制造和生物机械领域中存在的工程表面与界面,发生在机械表面界面的物理和化学现象具有特殊性和复杂性,对机械产品的功能和性能都有重要影响。机械表面界面科学不仅研究表面效应和界面效应,而且研究利用机械技术对其改造和调控的工程技术。摩擦学是一门与机械表面界面科学密切相关的学科,主要研究相互运动表面之间的摩擦、磨损和润滑以及相关问题与实践的科学与技术。机械表面界面科学与摩擦学的研究范围十分广泛,涉及机械零部件、系统和装备中的表面界面行为与性能设计、机械制造和微/纳制造过程中的表面界面行为及控制、生物与仿生机械系统中的表面界面特性与规律,此外,还涉及自然界和人类日常生活中的许多表面界面现象。机械表面界面科学和摩擦学的研究成果可以用于改善机械系统的工作效率、延长使用寿命、提高机械系统和装备的可靠性,为解决人类社会面临能源短缺、资源枯竭、环境污染和健康问题提供有效方案。随着摩擦学研究从宏观向微观领域不断深入,表面效应和界面效应越来越突出,从而催生出更为宽广的一个新的研究领域——机械表面界面科学,成为新的学科增长点。当前,本领域面临着一系列重要科学问题需要研究解决,主要包括:机械中的表面界面效应及其跨尺度行为、摩擦表面能量耗散机制与有效利用原理。未来5~10年,建议优先资助以下方向的研究:①环境友好摩擦学;②超常摩擦状态的原理、方法和关键技术;③生物摩擦学;④特殊工况下的机械表面界面行为及控制;⑤先进制造中的表面界面科学;⑥机械表面界面的功能设计与制造。

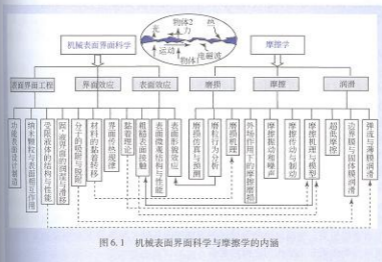
6.1 内涵与研究范围

6.1.1 内涵

表面是所有固体和液体都具有的基本属性之一,固体表面指固体与气体(含真空)间形成的界面,液体表面指液体与气体间形成的界面;界面则是不同的相

(成分、结构和状态均一致的区域)之间存在的区域。除上述固-气界面、液-气界面外,自然界还广泛存在固-固界面、固-液界面和液-液界面。这里所论述的表面和界面仅限于机械工程领域中大多数场合遇到的宏观工程表面和界面,机械零件材料内部存在的晶相界面等不属于本领域的范畴。机械产品中的表面和界面大都发挥着传递运动和能量的作用,有些还具备防腐、减阻、吸声等特殊功能,表面和界面的行为对机械系统的效率、精度、可靠性和寿命等具有重要影响,有些场合甚至决定了产品的基本功能。机械表面界面科学就是关于机械工程中表面和界面上发生的物理化学行为及其与系统行为之间关系的学问。

机械表面界面科学尚处于孕育阶段,还没有形成一个比较系统和完整的学科体系。根据现有的认识水平,可以认为其内涵包括表面效应、界面效应和表面界面工程三个方面,如图6.1中左侧所示。随着机械工程科学不断向微观和基础层面的深入,其内涵将会不断丰富和发展。



表面效应包括表面形貌效应、表层微结构与表面性质。机械零部件表面形貌的几何不规则性从微米尺度延续至原子尺度,对表面的接触刚度、黏着、传热、导电和摩擦学特性有重要影响,是衡量机械产品品质的重要指标。大多数零件由于成形和服役过程中的受力变形以及环境的作用,表层存在微米级的变形层、纳米级的微晶或非晶层以及化学反应层,从而导致表面(层)的物理性能和化学

性能与体相不同。

界面效应指界面处发生的物理作用和化学作用,表现为接触、润湿、吸附、扩散与键合、黏着、材料转移以及界面传热等。机械工程中的固-固界面通过微观接触形成真实接触面积,表面力、固体表面能以及微凸体的大小和分布对接触状况有重要影响。材料的黏着转移、液体分子和气体分子在机械表面的吸附与脱附规律、固-液界面的润湿与滑移行为等均与界面效应相关;当液体处于与其分子大小接近的间隙内时,其分子排列和性能与体相时会有很大差异,在薄膜润滑和纳米压印(nano-imprint lithography)等场合需要考虑受限液体结构与性能的变化。界面上的热传导与物体内部的热传导规律不同,它是界面科学的重要课题之一。此外,纳米颗粒、微气泡与固体表面间的相互作用也受到界面效应的支配。

表面界面工程是指以调控和改善表面界面性能为目的的工程技术,主要分为“改性”和“改形”两大类,前者通过各种表面涂层、镀膜和表面强化等手段改变表面的材料、结构和物理性质,后者利用表面微/纳加工手段改变表面的微观几何形态,也称为表面织构技术。通过表面界面工程,可以使机械产品具备某些特殊的功能,如自清洁、减阻、抗腐蚀、吸声等,或优异的机械、电磁、传热、光学等性能。表面界面工程设计的基础是表面效应和界面效应。

与机械表面界面科学密切相关的一个学科领域是摩擦学。摩擦学是研究相互运动表面之间的相互作用以及相关理论与实践的科学与技术。摩擦学的基本内容可以概括为有关摩擦、磨损与润滑三个方面的学问,如图6.1右侧所示。

摩擦理论与技术是有关两个相互接触物体之间发生相对滑动或滚动过程中的运动阻力和能量耗散规律的学问。经典的摩擦定律只是描述了宏观摩擦力的大小与正压力、名义接触面积和滑动速度之间的经验关系,并没有正确回答摩擦起源的问题,现代摩擦学研究则力图从原子和分子水平揭示摩擦发生的基本物理机制,并建立摩擦的定量预测模型。

磨损的研究旨在揭示物体在摩擦过程中发生表面损伤和流失的规律和机理。磨损的产生不但与表面所受的力学作用有关,而且与摩擦过程中表面发生的化学作用密切相关。磨损理论的发展试图准确阐明各种工况条件下磨损发生和演化过程与力学作用和化学作用之间的关系。

润滑是以减小摩擦和降低磨损为目的的技术手段。润滑理论通过物理模型和数学模型建立起润滑介质的物理化学性质与摩擦副的几何、物理性能和工况参数之间的关系,形成润滑设计的基础。经过一个多世纪的发展,流体润滑和弹性流体动力润滑理论已趋于成熟,薄膜润滑、边界润滑和混合润滑成为润滑理论发展的主要方向。

由于摩擦和磨损主要发生在接触界面处,摩擦学与机械表面界面科学之间有

着非常密切的联系。例如,摩擦机理和模型的研究需要建立在粗糙表面接触理论和黏着理论的基础之上;材料的黏着转移是磨损的基本形态之一;边界润滑膜的形成取决于分子在摩擦表面的吸附和脱附行为;薄膜润滑的特性与受限液体的结构和性能密切相关。此外,摩擦学行为也影响甚至改变机械表面界面的特性。例如,磨损不但改变表面的形貌,而且往往导致表层微观结构和性能的变化(如产生非晶层);磨损产物会改变界面的构成元素和状态;摩擦热和摩擦过程中产生的新鲜表面也会显著影响黏着的大小。当然,两者之间也存在很多重要区别。首先,机械表面界面科学的涵盖面比传统的摩擦学宽广,不但涉及接触、黏着、摩擦和磨损问题,还涉及热、声、电磁波、光波等表面效应和界面效应。其次,摩擦学是多学科交叉领域,既与表面界面科学相关,也与机构运动学、动力学、固体力学、流体力学、传热学等其他学科相关,在工程界和学术界已形成了一个比较明确和公认的学科体系^[1,2]。因此,机械表面界面科学与摩擦学之间既存在交叉融合也存在互补的关系。

6.1.2 研究范围

机械产品和装备在设计、制造和运行维护过程中发生在表面和界面处的物理和化学现象都属于机械表面界面科学与摩擦学的研究范围。近几十年来,随着机械工程和生物医学工程之间的交叉融合以及仿生技术的兴起,生物体本身存在的各种各样表面界面问题、人工器官(如关节、支架等)植入体内后出现的表面界面问题以及仿造自然界中动物、植物的表面结构和形态时遇到的问题受到越来越多的关注,成为新的学科生长点。机械表面界面科学与摩擦学的研究范围可以大致分为如下3个领域:

(1) 机械零部件、系统和装备中的表面界面行为与性能设计。通用的机械零部件如滚动轴承、滑动轴承、齿轮、精密导轨、机械密封、离合器和制动器等的设计依赖于摩擦学和表面界面科学的理论知识,发动机、压缩机和减速器等机械系统核心单元的工作效率、可靠性和寿命与其运动界面的行为密切相关。对于运输机械和一些工作在高温、太空和深海等特殊环境下的装备来说,除了系统内部的表面界面问题外,还需要解决与外部介质接触界面的问题。随着微/纳机械系统的出现,表面效应和尺寸效应相对增强,使表面界面行为处于更加突出的地位。

(2) 机械制造和微/纳制造过程中的表面界面行为及控制。对机械产品的制造过程来说,机械表面界面科学与摩擦学需要解决制造工艺流程中影响产品形状和尺寸精度、表面和内部质量、加工效率、能耗、成品率等方面的表面界面问题。例如,在粉体压制成形过程中,颗粒与颗粒之间、颗粒与模具壁面之间的摩

接触状况显著影响颗粒在模腔内的流动、颗粒结构、颗粒的变形分布,进而影响填充性和产品的致密度;在微电子封装的键合工艺中,键合面的表面形貌、真实接触面积以及黏着特性决定了器件的键合强度和质。

(3) 生物与仿生机械系统中的表面界面特性与规律。对生物医疗和仿生工程来说,机械表面界面科学与摩擦学需要揭示生物活体组织之间以及人工植入体与活体组织间的界面相互作用规律,解决植入体与活体之间的界面相容性问题。例如,人工心脏瓣膜和血管支架容易出现凝血问题,通过表面功能设计和改性可以得到显著改善;人工关节长期植入体内后会出现“磨屑病”问题,需要加以研究和解决。

此外,自然界和人类日常生活中的许多现象,如地震、泥石流等自然灾害,滑冰、滑雪等体育运动,动物在地面的行走,小提琴、二胡等乐器的演奏,都与表面界面现象密切相关,也属于表面界面科学与摩擦学的研究范畴。

6.2 在国民经济、社会发展和学科发展中的重要意义

可持续发展是人类社会面临的重大挑战。机械表面界面科学与摩擦学在解决能源、资源、环境和人类健康这些重大课题方面能够发挥巨大的作用。据估计,世界三分之一总能源被一种或多种形式的摩擦所消耗,摩擦热也加速了全球气温的升高。2009年发布的中国工程院咨询项目报告^[3]指出,2006年我国消耗在摩擦、磨损和润滑方面的资金约为9500亿元,通过正确运用摩擦学知识可节省资金达3270亿元,占国内生产总值的1.55%。以机械装备中常用的深沟球轴承为例,先进的高能效轴承较普通轴承能耗降低30%~50%,轴承工作时的温升降低5~15℃,若用高能效轴承全部替代电机中的普通轴承则每年可以省电数十亿度^[4]。今后,如果能够在广泛的工业领域实现和应用“超滑”(滑动摩擦系数比常规情况低一个数量级,小于0.005)技术,则其工业节能的效果将是十分巨大的。除了经济效益外,机械表面界面科学研究对于减缓资源枯竭和环境破坏问题也能发挥重要作用,比如通过改进表面增强技术和摩擦学设计可以延长机械的使用寿命,减少维修成本和零件更换次数;通过表面自修复技术可以减小汽车尾气的排放;通过研发高效水基润滑剂、空气润滑和固体润滑技术可以逐步取代矿物油润滑剂,减轻对石油的依赖和对环境的污染等。

通过对生物体内部以及生物体与内植入物界面的研究,有助于认识和借鉴生物系统的表面界面特性,解决医学或生物学中的表面界面和摩擦学问题,推动医疗器械的临床应用,探索疾病的诊断、预防和治疗新途径,结合仿生理念创造新技术,发展环境友好的产品。据调查,我国每年约有100万患者需要进行人工

关节置换手术,包括髋关节、膝关节、踝关节、肘关节、腕关节和肩关节等。一般要求人工关节置换到体内的使用寿命达到20年以上,但是人工关节置换后松动导致的失效率约为10%,松动失效的主要原因是人工关节在体内发生磨损。磨损产生的磨屑在体内发生毒性和免疫反应、骨吸收和无菌松动、变态反应、局部形成肿瘤等生物反应,这些被称之为“磨屑病”,其中无菌松动是人工关节置换术后最常见的并发症和最终失效的重要因素,解决这类医疗问题离不开表面界面科学和摩擦学的进步。

从自然科学的发展趋势来看,自牛顿力学以来,以物理和化学为代表的物质科学取得了巨大的进步,人们可以基于基本的物理定律和化学组成预测从微观到宏观的物质性能和演化规律,但是由于表面界面现象固有的复杂性,对于诸如黏着和摩擦之类的问题,目前的物理学和化学知识仍然停留在现象学的层次,尚未达到从本质上彻底揭示和描述的水平。机械表面界面科学与摩擦学的发展水平直接关系到机械工程其他领域的进步。例如,真实机构学理论体系的建立需要能够准确描述运动副间隙变化、接触和摩擦的基础理论;机械可靠性设计和寿命预测理论离不开表面和界面损伤规律的认识;在切削加工、磨削加工、成形加工以及纳米压印中,工具和被加工件接触界面的特性决定了加工的表面质量和精度。因此,机械表面界面科学与摩擦学对于机械工程学科的发展具有巨大的支撑和推动作用。

6.3 研究现状、存在问题和发展趋势分析

表面界面问题历来是机械工程学科的重要研究对象之一。20世纪60年代以前,关于机械表面界面现象的研究分为摩擦、磨损、润滑和密封几个分支,各分支之间的相互联系和交流不够密切。1966年,英国学者首先提出了摩擦学(tribology)的概念,并被世界各国接受,从而诞生了一门综合摩擦、磨损、润滑与密封的独立学科。自摩擦学诞生以来,国内外的研究工作都在试图努力建立起一套能够涵盖多种多样运动表面之间相互作用的理论体系。随着研究工作的不断深入,特别是在近年来纳米科学理论和实验成果的推动下,人们逐渐认识到以表面物理和表面化学为基础的表面界面科学是构建摩擦学理论不可或缺的科学基础。同时,现代工业的发展对机械产品和装备的功能、苛刻环境适应性、精度与性能等提出了广泛和越来越高的要求,因此,除摩擦学外,关于机械表面界面的研究成为近年来快速发展的研究领域。

6.3.1 机械产品设计中的表面界面科学研究

接触理论是研究固-固界面问题的基础,其核心是建立载荷与真实接触面积、法向位移之间的关系。固体表面之间的接触模型一般从理想光滑表面间的接触模型出发。接触理论已从早期的宏观 Hertz 弹性接触理论发展到考虑表面力作用的 JKR 理论和 DMT 理论、弹塑性接触理论及黏弹性接触理论。由于工程表面都具有各种尺度的粗糙度,将理想光滑表面的接触理论推广到粗糙表面间的接触具有非常重要的意义。自 20 世纪 60 年代以来,已经提出随机粗糙面间的弹性接触模型和弹塑性接触模型,但这些模型都有各种条件假设,应用范围不够普适。微观接触理论及力学模型仍需进一步发展。

自 20 世纪 90 年代以来,固-固界面和固-液界面黏着的研究受到了国内外学术界的重视。黏着是指将两接触表面法向分离时需要克服一定大小的力的现象,它与两表面接触状态与表面能密切相关。宏观物体只有当两接触表面非常平整光滑或很柔软的情况下黏着力才比较可观,但在微/纳米尺度,黏着力与其他力相比可能处于主导地位。影响黏着的主要作用力有:分子间作用力、静电力、毛细作用力和化学键力^[5]。微/纳机械系统中由于表面力作用显著增强,当微观黏着区域小到分子、原子尺度,宏观连续介质理论不再适用,尺寸效应、表面效应和量子隧道效应等将使界面相互作用变得相当复杂,建立亚纳米尺度下的黏着理论是一个巨大挑战。近年来,人们开始研究可控黏着,希望黏着力的大小可以随时随地按照人们的愿望在一定范围内自如地调节以使机构、机器或装置达到一定的运动或动力功能与性能。自然界的许多动物(如壁虎)早就利用黏着力和摩擦力的自如控制实现运动^[6]。与黏着控制密切相关的研究包括可控黏着的原理和界面条件、界面材料和微细结构的设计、宏观尺寸物体及微/纳尺度器件的黏着调控等。

通过在微米和纳米尺度下对表面进行几何构造和材料组织的特殊设计和加工,可以获得具有特种奇异功能或性能的表面,如具有自清洁功能的超疏水表面,可以有效增强阳光散射、抑制反射从而提高太阳能发电效率的织构表面,能够降低高速物体在空气或水中运动阻力的减阻表面,能够改变电磁波、声波传播特性的表面可以实现隐身和吸声等。这方面的研究属于表面物理、材料物理和机械工程学科的交叉领域,近年来发展非常迅速。除了各种镀膜技术及复合涂层技术在不断进步外,有两方面研究特别值得关注:一方面是将不同电磁特性的材料在微米、纳米尺度下形成特定构造的超介质(metamaterials),超介质具有自然界介质所不具备的奇异反常特性,由超介质所形成的复杂表面界面(超表面界面)

具有独特的物理行为^[7]；另一方面是利用激光加工、聚焦离子束加工和其他微/纳加工方法在表面获得图案化的非光滑表面（表面织构），与传统的加工表面或随机性粗糙表面相比，其具有一系列独特的表面物理和表面化学特性。例如，过去通常认为表面越光滑，则摩擦越小；而通过表面织构化处理，有意识增加表面粗糙度和图案化，能够降低摩擦^[8]。这一结果，突破了机械表面界面的传统认识，积极推动了机械表面界面的研究与发展。

自20世纪70年代以来，表面工程技术取得了显著的发展，目前各种物理气相沉积、化学气相沉积、离子注入等表面镀膜和改性方法在机械工程领域的应用非常广泛，今后仍是机械表面界面科学的一个重要领域。以发动机为例，气缸套、活塞、活塞环组和配气机构等关键部件，涉及高/低速、重载、热疲劳、富油润滑/贫油润滑以及无油等环境和变工况环境，活塞环的密封和磨损性能对燃油消耗和废气排放有直接影响，采用合适的表面工程技术可显著降低磨损，提高燃油效率。因此，发展发动机关键零部件新型高性能表面工程技术具有重要学术价值和社会经济效益，是一直备受关注的研究领域。

各类机械系统中，机械运动或电磁部件往往产生大量的热，热导致的温升会影响机械部件之间的配合及运行特性。对机械中各种原因产生的热需要通过界面尽快传递出去，以利于对机械系统性能的控制。传热主要有对流、辐射和热交换几种方式，都会涉及界面处能量的交换形式及效率问题。界面处的微观传热机理与宏观情况下有较大区别。薄膜的热导率与其体相材料相比有很大的差别，一般认为主要由边界效应和结构差异造成。纳米尺度传热理论研究主要集中在不同材料界面热导率的计算，界面性质在纳米尺度结构的热传导中占有重要地位，热导率随结构尺寸变化很大，一部分是由于界面传热所占比重增加。界面传热与物体内部的传热特性有很大的不同，特别是当界面存在黏性发热、摩擦发热或其他化学反应的热交换过程时，热流的分配、温度在界面区内的分布、辐射等与界面间的真实接触状况、介质以及间隙的大小都有非常密切的关系，与摩擦和黏着问题一样，机理尚不清楚。

对于热辐射，当两物体间距离较大时，传统理论的预测较为准确。但是2009年，麻省理工学院的华人科学家实验发现普朗克的黑体辐射定律在纳米间隙的界面之间不成立，当界面间隙小于数十纳米时，通过辐射传递的热量可以增大上千倍^[9]。此外，微观传热领域最重要的概念之一就是温度。通常温度定义为与系统粒子的平均动能相关，统计力学所定义温度的特征尺度大于声子平均自由程，如果两个区域的温度不同，则两个区域声子频率的分布就不同，其计算结果会有很大差异。温度的定义在非平衡情况下和微/纳区域的适用性还需要深入探讨。

6.3.2 机械制造过程中的表面界面科学研究

制造过程中的表面界面问题是机械表面界面科学的一个重要方面,与机械产品和装备工作中的表面界面问题相比,有许多特殊的现象和不同的微观机制。

在超大规模集成电路、光电子器件、微/纳电子机械系统以及计算机硬盘制造中,超光滑平整表面制造是其关键制造工序之一,其特点是在大尺寸平面范围内获得极高的全局平整度和极低的表面粗糙度,同时,表面划痕或凸起必须限制在亚纳米级。化学机械抛光是能够满足上述全局平整化要求的应用最广泛的工艺。化学机械抛光所用的抛光液含有纳米颗粒和氧化剂、螯合剂、缓蚀剂等多种成分。从微观层面来分析,抛光液和基材表面间的氧化反应速率与抛光液中纳米颗粒对表层材料去除速率之间的平衡对表面质量有决定性影响。此外,抛光液中的纳米颗粒对磨屑的吸附作用和去除机制以及颗粒在工件表面的化学吸附也是亟待解决的重要问题^[10]。

自20世纪90年代以来,一批新的微/纳结构制造工艺和方法涌现出来,其中代表性的微/纳制造方法有以下几类,它们都与界面科学密切相关。例如,在纳米压印中,由于光刻胶在数十纳米的间隙内流动,其流变特性受模板界面效应的强烈影响,光刻胶与模板之间的界面张力也显著影响光刻胶的填充性能,光刻胶固化后与模板表面之间的黏着力影响脱膜过程;软印刷(soft lithography)的成败取决于聚合物分子在橡胶模板上的吸附特性以及在一定压力下向基体的黏着转移,其中的界面黏着问题和分子迁移过程的表面界面问题已成为其主要技术瓶颈;纳米切削(tip-based nano lithography)是在原子力显微镜的基础上发展起来的一种纳米加工方法,有研究发现可通过摩擦诱导在单晶硅等表面加工出纳米尺度的凸结构,表现出与一般纳米切削相异的特性^[11]。对摩擦引起的表面隆起、下陷和材料去除等微观损伤的规律和机理目前尚不完全清楚。

键合是微电子器件、MEMS器件、微流控系统制造中常用的制造工艺。硅片与玻璃之间的键合采用阳极键合工艺,两结合面的平整度、粗糙度以及表面的氧化状态等对键合强度有重要影响,属于界面黏着的一类问题。硅片-硅片或硅片-氧化硅之间的键合可用硅直接键合工艺,它是把待键合的两个平整表面首先进行亲水化处理,使两个表面均富含羟基,然后使两者贴合,再在适当温度下退火实现键合。两表面间的真实接触状态对键合强度有重要影响。

利用纳米颗粒材料的物理和尺寸效应制备功能独特的器件和性能优异的零部件是机械制造科学与材料科学的一个交叉领域,具有广阔的发展前景。目前,有以下几类微/纳颗粒组装和成型加工的方法:第一类方法是直接在图案化的表面上进行纳米颗粒的自组装。通过预先对基底表面进行图案化或亲水/疏水处理,

然后将分散在气相或液相中的纳米颗粒组装在基底表面上。已有研究成功将表面活性剂分子团、碳纳米管团簇、纳米金属颗粒等组装起来,形成功能器件。纳米颗粒之间以及颗粒与基底表面之间的引力和斥力以及成键情况是自组装过程的决定性因素。第二类方法是将微颗粒分散在液态的基体材料中,形成一定的有序或无序结构,液体材料挥发或凝固后就形成微/纳颗粒构成的结构或复合材料。对于磁性颗粒,可以通过施加外磁场,使颗粒沿外加磁场方向形成有序的链状或柱状结构;对于介电颗粒,则可以通过施加外电场。颗粒之间的团聚以及颗粒磁化或极化后的磁(电)偶极子作用对微/纳结构形成具有重要影响。第三类方法是将颗粒材料与胶黏剂等混合在一起形成浆液,然后在一定压力下模压成型,并在控制气氛的环境下高温烧结形成形状复杂的零部件。在模压成型阶段,颗粒与颗粒之间、颗粒与模壁之间都存在摩擦力,影响浆液的流动、填充压力以及零件的致密度分布。

6.3.3 机械系统中的摩擦学研究:摩擦、磨损、润滑、密封

从机械系统动力单元(如电机、内燃机)、连接机构(螺旋副连接、铆接、搭接、销接等)、传动和支撑机构(轴承、齿轮、液压阀门、铰链、密封、制动等)到执行机构(如抓取、切削、模压等)广泛存在摩擦、磨损、润滑和密封问题,长期以来一直受到工程界和学术界的重视。

摩擦理论一直是界面作用的关键和核心问题。人类从15世纪开始就一直在努力探索摩擦的起源问题。20世纪50年代,英国学者Bowden和Tabor提出黏着摩擦理论,即摩擦来自真实接触面积处黏着点或表面膜的剪切抗力,前苏联科学家克拉盖尔斯基提出摩擦二项式,即摩擦力由表面间机械作用和分子间作用力组成。近20年来人们更多从原子分子尺度开展纳米摩擦学研究^[12],认为摩擦力主要与界面弹性系统在滑动过程中存在能量积累和突然释放的非稳态过程相关,非稳过程导致原子振动并最终耗散为热。这一类摩擦被称为界面摩擦、无磨损摩擦、原子尺度摩擦和声子型摩擦等。界面处分子、原子之间失稳与所在基底材料力学特性也有密切关系,从而微观的界面能量耗散导致宏观摩擦现象中的热、力、振动、噪声等现象。微观尺度下,已无法用连续介质力学来描述处于原子、分子状态的固体或液体的动力学特性,实践证明分子动力学模拟是一种描述微观现象的有效方法。最近的分子动力学模拟结果表明:在纳米尺度下,摩擦力与真实接触面积成正比的关系仍然成立,只是真实接触面积需要根据化学键的数目和分布来定义^[13]。

黏着和摩擦分别反映了接触界面发生法向和切向相对运动时的抗力。黏着力可不依赖摩擦单独存在,但大多数情况下摩擦力和黏着力同时出现。研究表明,

考虑黏着过程中的非平衡态界面作用,两表面法向运动产生的单位面积黏着滞后与侧向运动产生的摩擦能量耗散之间存在一定的定量关系,相关研究也有利于理解摩擦过程中的能量耗散过程。在大多数实际的机械系统中,界面法向运动和侧向运动之间往往存在耦合关系,而且是时间的函数。摩擦诱发的系统振动和噪声是机械振动学和摩擦学的交叉研究领域,以往的理论工作主要包括离散质量系统的自激振动稳定性分析、有限元弹性振动稳定性分析和瞬态动力学分析等,在试验方面主要进行了摩擦振动和噪声的试验、模态特性试验、振动和噪声信号的全息测量、润滑剂降低摩擦振动和噪声的试验等。但摩擦尖叫噪声发生机理仍未得到充分揭示。由于最终的摩擦现象是由摩擦副材料的跨尺度特性共同决定的,微观分子、原子尺度的接触和作用需要与宏观材料的力学特性结合,建立跨尺度物理模型,系统全面揭示宏观摩擦学现象与微观原子、分子尺度的表面界面作用的联系。这一跨尺度模型是微观摩擦机理最终解决宏观实际问题的重要桥梁。

磨损是指伴随界面的相对运动发生在零件工作表面物质的持续损失,是材料失效的主要形式之一。对于材料磨损的研究,获取表面与磨粒之间的相互关系具有重要意义,目前利用三维表面数字化描述的新方法,能够获得精确的磨粒和磨损表面的三维形貌,然后用小波理论分离表面的粗糙度、波纹度和形状误差等参数,并用计算机图像技术来获取相应的表面特征参数,进而开展磨损机理的研究是一个新的发展趋势。但磨屑行为(产生部位、种类、数量、形态以及分布)的模拟仍相当困难,是研究的瓶颈,对磨屑颗粒的特征参数的识别和演变行为的研究,有利于揭示材料磨损的机理,这在磨粒磨损的研究中受到格外的关注。综合利用多学科的知识及计算机及信息技术,进行摩擦系统的建模、数值模拟和磨损损伤的预测与评价也是近年来磨损研究的发展趋势。另外,人们也通过表面三维形貌重构,借助弹塑性力学和破坏力学的理论基础和数值分析方法,并考虑摩擦过程中热、振动、材料相变等因素的影响,进行仿真,如将轮轨滚动接触理论与车辆系统动力学和有限元分析相结合,成功预测了不同工况下轮轨的波磨。

由于各类机械系统不同的服役环境、工况和功能,磨损机理也各不相同。铁路的轮轨接触是最复杂,也是材料损失最大的摩擦副,现在每年我国在轮轨材料消耗、大修和维护上的费用超过100亿元。随着列车高速化的不断推进,轮轨摩擦学研究成为一个热点。作为接触疲劳的一种特殊类型,高速带来的钢轨表面裂纹,直接威胁着列车的行车安全,但至今没有形成一个统一的滚动接触疲劳理论。滚动体材料的磨损和表面疲劳裂纹形成之间存在强耦合关系,近年的研究揭示磨损类型转变的主要因素是接触表面的滚滑比,当磨损类型为黏着磨损时,易导致表面裂纹。列车速度越高,黏着系数降低,使得高速黏着问题成为限制高速列车安全的关键科学问题。在轮轨材料的降耗研究中,发展新材料、打磨轮

轨、优化轮轨型面、优化材料硬度匹配、改善轨道和车辆结构性能和提高轨道平顺质量等方法为重点的研究方向,尤其是将磨损与列车及轨道系统作用相耦合的研究。

微动磨损广泛存在于现代工业的各个领域,它主要研究在振动环境(机械振动、电磁震动、热循环、人体运动等)下紧配合界面中在微幅相对运动下的接触界面材料相互作用行为、损伤规律和防护机理。近10年来,研究从单一的切向模式扩展到了径向、扭动和转动等其他相对运动模式及其两两复合的复杂模式,为模拟和研究工程实际中复杂微动损伤提供了重要的理论指导,我国在该领域的研究处于国际领先水平^[46]。不同微动模式的研究揭示了接触界面不同的相对运动形式,对磨损的机制产生了显著的影响,为揭示局部接触区的磨损与疲劳的竞争机制,在接触条件下的非线性材料变形与损伤行为将成为新的研究重点和热点。

在冲击磨损条件下,材料的服役工况条件十分恶劣,由此导致的零件磨损失效而造成的经济损失每年数以亿计。如振动压路机中使用的振动轴承,它除了承受元件之间的滚动和滑动摩擦作用之外,还需要承受由偏心轴或偏心块所产生的离心力与振动轮自重复合作用下的冲击。这些零件的特点是要求外硬内韧,硬度与韧性有良好的匹配。国内外研究表明,双金属复合强化或表面局部复合强化技术的应用可有效地提高此类零部件的使用寿命。

通常认为制动能量大于 $1000\text{kJ}/\text{m}^2$ 时,就属于高能(高能量密度)制动。随着现代交通工具(如高速动车组、大飞机、高速磁悬浮等)的高速化以及重大机械(如绿色能源风电机组)的发展需求,高能摩擦制动成为关键技术之一。高能制动的重要特征在于表面层(含次表层)的形成与破坏,同时,制动过程中的能量耗散及温度场也与常规制动存在较大差异。开展高能制动条件下摩擦副表面层的形成机理和失效机制研究是目前热点方向。

海水液压传动是近年来蓬勃发展的新型流体传动技术,也是深海探测和开发的一项关键技术,它具有常规技术所无法比拟的优点。深海这一特殊极端环境中的材料摩擦学特性表现为材料异常转移、异常磨损以及异常的摩擦副配副效果,研究其产生的机理和规律具有非常重要的意义。

随着科学技术发展与工业进步,强电以及电、磁复合作用条件下的摩擦学问题越来越突出,摩擦接触系统和电接触系统相互影响、共同作用。电场、电流及电弧等因素介入摩擦系统,电场、磁场、应力场和温度场等共同耦合作用产生磨蚀;润滑状态对摩擦副的摩擦载流能力常常有负面影响,在电、磁复合作用下,增加润滑与减小接触电阻之间存在着矛盾。目前,针对电流、电场、磁场、电弧、特殊环境气氛和复杂动力作用等对材料的摩擦磨损特性的影响以及多场之间

的耦合作用关系是研究的热点。

长期以来,塑性成形时工件与模具壁面之间的摩擦以及切削时刀具与工件接触面之间的摩擦对加工性能的影响一直都受到人们的重视,同时,模具和刀具的磨损寿命也是金属塑性成形和切削加工的重要研究内容,特别是随着计算机辅助工程技术的成熟和广泛应用,摩擦作为金属塑性流动分析所必要的边界条件,如何准确地处理成为影响有限元模拟精度的重要问题。除摩擦问题外,如何延长模具和刀具的磨损寿命也是关系到加工质量和制造成本的重要问题。特别是对于苛刻的加工条件,磨损问题尤为突出,对模具和刀具的耐磨性能提出了越来越高的要求。

润滑是降低摩擦和磨损的主要技术途径。常用的润滑方式有流体润滑和固体润滑。流体润滑可以实现 10^{-3} 以下较低的摩擦系数,但不适合在真空、高温、空间等条件下使用。固体润滑在解决高精密、微尺寸、特殊工况条件下的润滑问题方面发挥了润滑油难以替代的作用,但与油脂润滑相比,常规固体润滑的摩擦系数(0.1)比油脂润滑要高出几十倍到上百倍。

流体润滑指利用流体压力让两相对运动表面脱离直接接触实现减摩抗磨。根据润滑膜厚变化,流体润滑可分为边界润滑、薄膜润滑和弹性流体动力润滑。边界膜的形成、成分、构造与失效,其发展与演变的原位观察是边界润滑研究中的重要问题。薄膜润滑具有润滑剂分子结构从边界膜到有序膜再到无规则排列变化的特征,其润滑失效机理、有序和无序膜在受限情况下的流变特性等基础问题还需深入研究^[15]。弹流润滑以黏性流体膜为特征,典型膜厚在 $0.1\mu\text{m}$ 以上,自20世纪40年代建立弹性流体动压润滑理论以来,其理论体系趋于完备,并将向表面界面相关的物理化学研究领域扩展。空气润滑始于19世纪末,1959年气体动压轴承在美国第一颗人造卫星上应用成功,并在精密仪器和装备、计算机硬盘中得到广泛应用。但表面粗糙度及气体分子平均自由程等因素对气体润滑的影响、纳米间隙下的稀薄气体效应等问题需进一步深入研究。

固体润滑可分为薄膜/涂层润滑和块体自润滑。机械运行的环境具有多样性,如何设计、构筑能够满足不同环境条件要求的高性能固体润滑材料、搞清其服役过程中的失效机理和性能演化规律成为一项具有挑战性的长期研究。通过揭示固体润滑材料在摩擦或服役过程中发生的物理、化学、机械等演化规律及其失效机制,能够在理论上指导固体润滑的材料选择、结构组分设计、制备等技术。目前,固体润滑由初始的单一组分、单一结构、单一功能向多组分、纳米结构、多层结构、梯度结构、异质相(多相)、环境自适应等方向发展^[16]。

与电学中的“超导”相对应,机械系统中可能存在“超滑”或超低摩擦。日本学者 Shinjo 和 Hirano 通过对原子链运动的计算机模拟,表明非公度表面间随

滑动速度增加摩擦力驱于消失,提出了“超滑”的假设。在实验方面实现超低摩擦(摩擦系数低于0.005)是近年来受到关注的热点研究方向。具有工程应用价值的超低摩擦研究主要集中于类金刚石(DLC)薄膜。美国 Argonne 国家实验室的 Erdemir、法国里昂实验室的 Sanchez-Lopez 和 Fontaine 等的研究发现,DLC 薄膜具有超润滑特性^[17]。在干燥惰性气体条件下 DLC 薄膜的摩擦系数在 0.001~0.008,在湿润的空气下薄膜的摩擦系数在 0.06~0.20。薄膜表面吸附的水分会对含氢类金刚石薄膜产生不利的影响。但对其超润滑机理的研究不够充分,还没有提出一个大家普遍接受的摩擦学机理。有机薄膜也可以达到超低摩擦。Chen 等^[18]报道聚甲基丙烯酸-磷酸胆碱聚合物刷在水环境中表面水合导致其具有超润滑特性(摩擦系数低至 0.0004)。根据现有研究结果,普遍认同实现超滑通常需要超光滑的接触表面和弱表面相互作用。为在工业技术中真正实现超滑,需解决:润滑分子间的接触与摩擦机制,超滑状态的产生条件及其与工况参数的关系,超光滑、弱相互作用表面制备等基础问题。这些新的超低摩擦的研究成果目前还不够成熟,需要向实用化方向发展。

有机润滑薄膜在 MEMS、生物微机电系统(BioMEMS)方面的研究和应用,目前仍然是解决 MEMS 关键问题——黏着和摩擦的首选途径。德州仪器公司在其高清晰投影仪中已经采用了有机分子润滑薄膜。其微观摩擦学研究较广泛系统,但其宏观摩擦学研究不多。有机润滑薄膜的最大缺点是其耐磨性太差。此外,高温环境下的润滑也是难点之一,目前的研究热点在于气相润滑、异质异相金属间化合物、陶瓷基复合材料在室温到高温的结构和组分及摩擦磨损特性的演变机制。

密封件在各类机械设备中是一类看似简单,但是非常重要和复杂的基础零件。它在机械设备中起着双重隔离作用,一方面防止内部工作介质和润滑液向外部环境泄漏,另一方面防止外部环境中的颗粒物和尘埃等有害物质向机械内部渗透和扩散。密封件的性能对设备整体的安全性、工作性能、可靠性以及环境保护功能有非常重要的影响,一旦失效,往往会造成重大安全或环境事故。

实验研究发现,良好的密封设计需要具备密封、润滑和泵送三重功能,这些功能与密封材料和结构的宏观设计和接触面的粗糙度等微观设计密切相关。先进的密封理论模型已能结合表面纹理和粗糙度分布的微观流体混合润滑理论和非对称密封压力分布特性解释密封、润滑和泵送的机制。此外,液体的表面张力、非牛顿流变特性以及高速旋转时的涡流效应对密封的影响也得到重视。但是,现有的密封理论模型还未达到能够比较精确预测密封性能的水平,其困难在于实际中发现即使是完全同样的密封件应用在同一轴系的不同部位,其性能也会有相当差异,因为在跑合阶段密封面的表面形貌和纹理会发生显著变

化,这一点即使在相同的压力和速度条件下也会有千差万别;另外,目前的理论分析模型多数针对稳态工况,对于非稳态工况下的密封特性和行为还无法描述。非接触式的螺旋槽端面密封可以基于计算流体力学和固体力学进行比较系统完善的建模和分析,随着计算流体力学和固体力学的进步,这方面的理论近些年也有很大进步。特别是基于表面织构的密封设计受到了广泛研究,以以色列学者 Etsion 为代表,已经在理论和实验、工程应用方面取得了很重要的成果^[8]。但是非接触式密封在起停阶段也会处于混合润滑和边界润滑状态,这方面的理论模型还有待进一步完善。

6.3.4 生物医疗及仿生工程中的表面界面科学与摩擦学

生物医疗及仿生工程中的表面界面问题根据研究对象的不同涉及以下 3 个方面^[9]:

1) 人体硬组织(骨、关节、牙齿)及其植入体

人骨由表层的密质骨和内层的松质骨构成,其基本功能是支撑和保护。在骨及其植入体的研究方面,医学领域的研究人员主要关注其病理学行为,很少研究植入体与骨界面行为对骨组织的影响。实际上,假体与骨界面整合不佳是植入体-骨界面松动的主要诱因。以牙种植体为例,其植入成功的重要指标之一就是种植体-骨界面间的动度值。种植体的动度是指种植体-骨界面在负荷作用下产生的相对位移。种植成功的假体与骨之间的相对运动幅值通常在 $200\mu\text{m}$ 以下,这在微动运动幅度范围之内。研究表明,在植入初期,骨与种植体之间的相对运动幅度小于 $28\mu\text{m}$ 时,不影响界面结合;当微动量处在 $50\sim 100\mu\text{m}$ 时,骨形成量与微动量成反比;当相对位移达到 $150\mu\text{m}$ 时,可导致骨吸收和界面结缔组织增生,骨生长将受到抑制。此外,在具有生命组织参与的界面中,由于环境腐蚀性行为与生物学反应同时存在,其界面行为的内涵与过程将比机械系统更为复杂。因此,进一步的研究应综合考虑上述诸因素的耦合作用,深入开展骨及其植入体的界面行为与机理研究。

关节是人体承受载荷最大的生物摩擦副。人工关节置换术是治疗关节疾病的有效方法,一般要求人工关节置换到体内的使用寿命达到 20 年以上。现阶段人工关节的临床寿命一般约为 $10\sim 20$ 年,远不能满足患者尤其是年轻患者的需要,严重制约了人工关节的发展和应用。现有研究主要侧重于人工关节材料的摩擦磨损性能,很少关注天然关节软骨的摩擦学问题。为数不多的研究表明,天然关节软骨对关节的润滑和保护起到了极其重要的作用。关节软骨含有 80% 的水,是一种高黏弹性双相材料,力学性能独特,润滑机理复杂。无论是机械还是病理学原因导致的磷脂层破坏,都将使软骨中的液体成分透过表面的切向纤维层外

量,降低软骨的两相流承载机制,使纤维层发生机械性磨损。

一般情况下,心脏瓣膜与保持架之间每年要承受约4000万次的周期性血流冲击力,因此,在生态环境下的耐冲击磨损性能是影响人工瓣膜疲劳寿命的重要因素。此外,人工心脏瓣膜的抗血凝和疲劳断裂也是影响其使用寿命的重要问题;血红细胞在毛细血管中的流动阻力、与血管壁间的摩擦阻力以及流动特性都是该领域十分关注的研究内容。

牙齿是人体重要的咀嚼器官,由外层牙釉质、内层牙本质和牙髓构成。牙齿过度磨损会诱发多种口腔疾病,甚至全身疾病,对日常生活产生不良影响。研究表明,有机酸具有螯合从牙齿中释放的钙的能力,对牙齿硬组织极具腐蚀性,并加速牙齿磨耗。尽管如此,现有研究仍多为牙齿磨损现象及病因的临床观察,为数不多的体外研究通常采用销-环式或往复滑动试验机等传统工程摩擦学测试手段,模拟人牙的摩擦磨损行为,考察牙齿的摩擦系数和磨损量,缺乏对牙齿磨损机制及其酸蚀自修复机制的系统研究,无法阐明天然牙摩擦磨损的演变过程及特性。由于人牙的摩擦磨损行为是其内部不同微结构综合作用的结果,有必要系统研究牙釉质内部釉柱、釉间质等微结构的微摩擦磨损特性,考察它们在牙齿磨损过程中的分工和协同作用,揭示牙齿摩擦磨损的微观本质。在此基础上,进一步探索人牙在口腔环境下的摩擦-腐蚀-自修复耦合机制,提出临床防治人体天然牙过度磨耗的有效措施。

2) 软组织(皮肤、眼睛和血管等)

皮肤是人体最大的器官,覆盖全身。在日常生活中,由于劳动、锻炼、保健、保健和美容等需要,人体皮肤离不开与其他多种材料的接触摩擦,从而产生了许多皮肤摩擦问题。由于人体皮肤具有新陈代谢的特性,在摩擦过程中会表现出自我适应、自我修复的过程,因此与无生命的常规摩擦学材料相比,皮肤摩擦学研究显得更加复杂。研究显示,皮肤摩擦系数不仅涉及皮肤本身的特性(如皮肤的弹性、皮肤湿度、含油程度、皮肤微观形貌轮廓、皮肤物理化学特性、所处部位和个体差异),而且与测试条件(如法向载荷、接触材料的性质、探头运动速度和频率等)密切相关。对手臂皮肤的摩擦性能进行实验显示,手臂表皮的摩擦系数在0.4~0.6,其差异源自手臂上的不同测量位置,而性别、年龄的差异对皮肤摩擦系数影响不大。皮肤摩擦特性的研究目前仍处于初级阶段,主要表现为:获得的数据相对分散,缺乏系统性和深度;涉及面广但具有重大工程背景的研究很少;研究时学科的交叉程度体现不够,尤其是与临床医学、生物医学工程等学科的结合不够。

眼睛是典型的生物流体动力润滑系统。在眨眼时出现高剪切率(15 000 1/s)和剪切应力,这种情况下的摩擦系数约为0.005。而人造隐形眼镜的摩擦系数

实验值达到了0.08,远大于人眼球的摩擦系数。因此,研究眼睛的生物摩擦学为对研制低摩擦系数和具有生物舒适性的隐形眼镜具有借鉴意义。

3) 仿生工程

仿生工程通过揭示生物体的表面形态、材料拓扑和行为调控机制,从自然界获得启示,结合具体的工程背景,采用工程许可的材料和可实现的加工方式,构筑满足机电系统节材、节能、提高安全性和系统功能的部件。从表面界面和摩擦学角度来看,仿生工程的研究内容主要包括:仿生黏附与脱附、仿生减阻与增阻、仿生润滑、仿生耐磨、仿生结构表面以及仿生材料的加工制造技术等。

我国学者较早地开展了基于仿生原理的农机抗黏附研究^[20],并取得很好的应用效果。土壤动物(包括蛭螂、蝼蛄、蚯蚓和田鼠等)具有很好的土壤抗黏着特性,主要是由于其体表呈现粗糙形态和多种特征的非光滑几何结构。土壤动物体表微观尺度和纳观尺度的粗糙形态将增强其体表疏水功能,疏水性与表面粗糙性的综合作用是土壤动物防黏功能的重要机制。例如,蛭螂前胸背板上存在凸包型和凹坑形非光滑表面,各种土壤昆虫腹部存在台阶形或棱纹形非光滑表面等。将土壤动物体表非光滑结构放大到毫米和厘米尺度,制备出的抗黏着仿生表面具有良好的防黏性能,在农业机械、工程机械和煤炭机械的一些部件的防黏减阻表面上得到成功应用。

此外,许多生物都具有独特的表面润滑和抗磨机制,值得在机械工程中借鉴。研究发现,蚯蚓和泥鳅是典型的具有分泌体表液体的动物。当蚯蚓在土壤中运动或受刺激时,便从体腔内分泌出液体物质,在蚯蚓与土壤滑动接触过程中体表液起着润滑体表的作用,减小黏湿土壤对动物体表的黏附和摩擦,体表生物电有可能会刺激出更多的体表液。蛇皮表面层的超微孔可能是输送润滑剂和防黏剂的系统,这种润滑剂和防黏剂控制着蛇皮的润湿性、渗透性和润滑性。蛇皮上低黏附性的有序排列的微毛与润滑剂输送系统的综合作用使得蛇皮表面具有独特的摩擦学性能。

生物医疗和仿生工程中的表面界面与摩擦学研究目前存在以下一些问题:①对生物体内部组织的表面界面行为和摩擦机理研究不够深入;②对生物摩擦研究对象的选择不平衡,以往的生物摩擦学主要研究对象是人工关节,而对于人工心脏、人工心脏瓣膜、人造血管等重要生命器官的研究重视不够,前者是人体活动功能恢复所需,而后者是生命维持之需,对生命质量的影响更加关键;③对人体生物界面的共性基础问题研究比较薄弱,缺少对生物体与植人体内的协同效应、柔性软体的润滑机理、假体材料的体内退化行为以及磨屑迁移反应等问题的研究;④对指导临床实践的相关研究仍需加强。

6.3.5 机械表面界面科学与摩擦学的发展趋势分析

从一个多世纪以来摩擦学的发展历程(见图6.2)可以看出,摩擦理论由18世纪末期的经验性定律发展到20世纪中叶基于表面粗糙峰接触的黏着学说和21世纪初基于原子间相互作用的界面理论,接触理论和流体润滑理论也由19世纪末期基于连续介质理论的赫兹方程和雷诺方程逐渐修正和发展,融入越来越多的表面因素和界面因素。在未来5~10年乃至更长远的一段时期,表面界面科学将进一步深入到原子、分子和化学键的世界,向着建立跨越亚原子至宏观尺度的界面相互作用的统一理论迈进。随着理论的不断进步以及矿物润滑油、极压添加剂、二硫化钼固体润滑、类金刚石薄膜、表面织构等众多新技术的涌现,在过去一百多年来,典型机械产品的润滑膜厚度由近百微米下降到数十纳米,滑动摩擦系数由0.3左右下降到0.05左右,而磨损率也下降了3~4个数量级,使得机械产品的摩擦能耗越来越低,磨损寿命越来越长,润滑油的用量则越来越少。可以预计,未来的技术发展趋势仍然会朝着近零摩擦和近零磨损的方向发展,在10~20年内,使摩擦系数降低数倍以上,磨损率降低1个数量级以上。

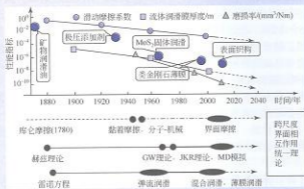


图6.2 摩擦学理论和技术发展历程与路线图

基于上述历史回顾及国内外研究现状和存在问题的分析,结合我国中长期科技规划的目标,未来5~10年我国的机械表面界面科学与摩擦学的研究将呈现如下发展趋势:

1) 机械系统节能延寿的研究将进一步深化

摩擦能耗在一些机械系统的功耗中占有相当的比例,通过减摩可以取得可观

的节能效果。研究大幅度降低摩擦系数的超低摩擦(超润滑)的新方法、新原理和新技术,无疑将促进节能技术的进步。同时,改善表面界面耐磨、耐腐、减阻和抗空蚀等性能的表面工程理论和技术研究也将推动机械系统工作寿命的延长。

2) 绿色和环境友好的研究将得到重视

环境问题正在引起全世界的重视。研究绿色润滑剂和添加剂、水润滑及新型的微量或无油润滑方法,将减轻润滑过程对环境的污染;研究摩擦诱发的机械振动和噪声问题,有助于改善人类的工作和生活环境质量。

3) 生物与仿生研究将进一步发展

我国人口众多,生物医疗的市场需求增长迅速。研究解决人体软/硬组织植入体的摩擦学问题和生物相容性问题,查明磨粒对人体的影响和作用,发展生物机械和仿生材料、结构和系统,具有广阔的发展空间。

4) 特殊工况下的机械表面界面科学研究将占据重要地位

随着我国一系列空间探测、核能和海洋开发等计划的实施,空间环境、强磁场环境、强辐射环境、超高速、超高能量密度、高低温、微动和深海等特殊工况下机械的表面界面效应将愈加突出,需要加强特殊工况下表面界面效应及其系统耦合作用规律的研究。

5) 先进制造中的表面界面科学研究将快速发展

未来5~10年,我国的制造技术将向世界先进水平看齐,由制造大国转变为制造强国。纳米制造、高速高精加工、特种材料成型等先进制造中的尺寸效应和表面效应等基础问题的研究将得到重视,并快速发展。

6) 涌现出新的机械表面界面的功能设计理论与制造方法

随着人类对表面界面科学认识的不断深入,结合先进的材料设计和加工的手段,未来将会涌现出具有特殊功能(如特殊的黏着与摩擦性能、超亲水(油)或超疏水(油)性能、电磁辐射防护功能、降噪功能以及可增强或产生特殊电效应)表面的设计理论以及批量制造方法。

6.4 未来5~10年的研究前沿与重大科学问题

1945年诺贝尔物理奖获得者 Pauli 的名言:“上帝制造了固体,魔鬼制造了表面”很早就形象地阐明了研究表面和界面行为比块体行为更困难、更复杂、更富有挑战性和魅力的哲理。1981年诺贝尔化学奖获得者 Hoffmann 在其名著 *Solid and Surfaces* 中特别强调了表面和界面科学是物理、化学及工程科学等的交叉学科,并具有跨尺度特性。1991年诺贝尔物理奖获得者、被誉为“当代牛顿”桂冠的 de Gennes 在其名著 *Soft Interfaces* 的第一章中,多次指出:“界面是移动的。

扩散的和活跃的 (mobile, diffuse and active)”, 同样强调和归纳了表面和界面行为的复杂性。到目前为止, 人类对表面界面现象的基本科学规律的认识和掌握还处于初级层次, 与表面界面相关的科学和技术需要大力培育和发展。未来 5~10 年乃至更长时间内, 本领域需要解决以下两个重大科学问题。

1. 机械中的表面界面效应及其跨尺度行为

对于表面界面效应的研究, 国内外相关研究领域突出若干热点问题 and 主要挑战, 包括: ①表面和界面是否存在真实结构? ②分子间(表面)力在表界面行为中的作用如何? ③多场耦合下表面和界面性质如何改变? ④表面界面行为的跨尺度理论如何表征? 如何进行跨尺度模拟? ⑤表面和界面行为能否实现主动控制? 等等。

对于固-气和固-固界面而言, 应首先考虑建立表面界面的弹性本构模型以及考虑热、电、磁等多场作用下的表面弹性本构模型, 即使在小变形情况, 也应该区分参考构型和当前构型, 否则将略掉应力表达式中与表面初始曲率和表面旋转相关的额外项; 同时, 还应该进一步考虑表面和界面的真实结构(具有一定厚度), 考虑表面弛豫、表面重构和表面能(或表面张力)等表面效应的综合影响。

分子间(表面)力的作用有时是表面和界面效应中必须考虑的因素。在微/纳尺度下, 比较重要的分子间力有范德华力(van der Waals force)、Casimir力、毛细力、亲/疏水力(hydrophilic/hydrophobic force)、双电层以及水合力(hydration force)等, 每一种力都有其作用条件和作用范围^[5]。有两个特征尺度分别给出了Casimir力和范德华力的作用范围: 第一个特征长度是 c/ω_0 (c 是光速, ω_0 是电介质的基频, 且 c/ω_0 为5~100 nm); 第二个特征长度是温度 $T=300\text{K}$ 时光子的de Broglie波长 $\lambda_T = hc / (k_B T)$ 约为 $7\mu\text{m}$ 。当两个介电物体间的距离 d 小于 c/ω_0 时, 范德华力起主导作用; 而当两个介电物体间的距离 d 大于 c/ω_0 但小于 λ_T 时, Casimir效应起主导作用。

液-固界面行为非常复杂, 仅仅针对移动接触线这个问题, 就需要从以下3个方面开展研究: ①液滴铺展前沿在分子间力-分离压力作用下所形成的前驱膜, 目前很多学者在分析上结合分子动理论来分析液体和真实固体表面的相互作用以及滑移机制; ②考虑液-气界面的真实结构-扩散层的存在, 此时对于软基底, 还需考虑在液气界面张力的垂直分量的作用下基底的弹性变形; ③液-固界面的滑移机制, 虽然已经开展了大量的实验、理论和跨尺度模拟, 但仍然没有一个公认的物理机制和模型。影响滑移的因素包括表面亲/疏水性、表面粗糙度、纳米气层、双电层、近壁面流体黏度变化、液体分子形状及排列、剪切速率等, 在未来相当长的时间里, 仍是该领域的研究重点之一。

目前, 越来越多的学者关注在力、电等多场耦合条件下, 表面界面和摩擦行

为的主动控制和应用。例如,当水分子通过单壁碳纳米管时,单壁管中的自由载流子与管内的水分子产生一定程度的耦合,通过这种耦合作用碳管内的载流子将动量传递给管内水分子,导致水分子定向运动。碳纳米管中载流子与水偶极链相互作用,正是该相互作用使得水偶极链很少发生翻转,从而建立起稳定的电动势,使纳米水力发电成为可能^[23]。

机械的表面界面科学与摩擦机制所涉及的研究尺度在0.1nm至宏观范围,大致可分为电子、分子、连续体三个模拟设计层次,跨越了纳米-微米-宏观等尺度,属于典型的跨尺度问题的范畴。针对宏观尺度的研究往往基于连续介质场假设,应用有限元方法或解析方法对机械结构的力学、电学等特性进行分析优化。近年来,随着微/纳机械迅速发展,机械结构特征尺度不断减小。一方面,表面效应和尺寸效应的影响会逐步增大;另一方面,在很低的温度(mK)或很高频率(GHz)的条件下,热占有数 $[N_{th} = k_B T / (\hbar \omega)]$,其中 k_B 为玻尔兹曼常数, T 是温度, \hbar 是约化普朗特数, ω 是角频率]小于或等于1,则量子效应($\hbar \omega$)大于热扰动效应($k_B T$),此时需要考虑量子效应。在包含电子层次的研究方法上,以Hartree-Fock自洽场计算、密度泛函理论(DFT)为代表,可以精确地研究各种化学键力、静电力以及分子间作用力,从而为机械结构发生界面行为给出较为本质上的解释。但是这种包含电子行为计算的方法,由于其计算量巨大,多用于研究相对较小的计算体系的基态行为。在处理原子-分子层次的体系时,分子动力学经验性近似了对电子行为的计算,在计算规模和速度上具有很大的优势,能给出表界面的原子运动和受力的细节以及动态演化过程。综上所述,综合考虑宏观和微观效应的跨尺度模拟手段亟待发展和提高,无论是在对传统意义上的机械表界面问题的机理探究上,还是在指导迅猛发展的微/纳机械设计及其表面效应的研究上,都将提供强有力的基础支撑。跨尺度数值模拟的构思可参阅图6.3^[22]。

2. 摩擦表面能量耗散机制与有效利用原理

摩擦机制跨越化学键(0.1~1nm)、原子分子相互作用(0.5~10nm)、晶格位错、裂纹扩展和材料损伤(nm~ μ m)、弹塑性变形场(μ m~cm)乃至机械系统的宏观动力学(cm~m),不但需要研究每个尺度下的物理机制,还需要研究不同尺度间的交互作用机制^[23]。该科学问题涉及以下一些基础问题:

(1) 摩擦的本源是什么?摩擦能是通过什么物理机制耗散的?摩擦力应如何定量描述?

(2) 磨屑生成的能量或力学条件是什么?如何描述磨粒和磨屑在摩擦界面的运动及其与表面间的相互作用?如何定量分析磨损产生和发展的动力学过程?磨损过程中磨损产物、表面层发生相变和化学反应的热力学机制是什么?

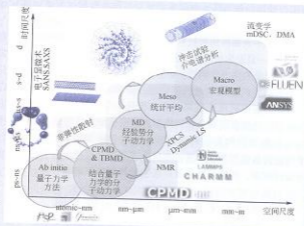


图 6.3 跨尺度模拟框架示意图

(3) 润滑剂分子在纳米间隙的受限空间内和高压、高剪切条件下的分子结构、相态如何变化？润滑剂分子与表面间的物理和化学作用机理是什么？边界润滑膜的剪切强度与其分子结构的关系？分子膜的极限承载能力取决于什么？

针对以上问题，需要加强以下 7 个方面的理论和实验研究：

(1) 摩擦的机制和摩擦力的定量规律。建立跨尺度摩擦力计算模型和方法；研究稳态和非稳态运动过程中摩擦力与界面剪切强度、真实接触面积以及载荷之间的定量关系；针对摩擦理论模型开展实验验证研究。

(2) 工程表面的接触和黏着模型。建立宏观接触力学分析与考虑工程表面微观形貌、表面层化学成分和组织结构特性以及表面力作用的微观接触相结合的跨尺度接触、黏着分析模型和模拟方法；研究各种改性表面、镀膜表面、织构化表面的接触和黏着特性。

(3) 润滑分子膜与表面界面的相互作用规律。研究各种沉积膜、吸附膜在表面的构型和构性关系；纳米薄膜在界面约束作用下的结构、相变和流变行为；润滑分子膜的剪切强度、承载极限和界面滑移的规律。

(4) 表面层结构的跨尺度（0.1nm ~ μm ）表征及其在摩擦过程中的演化规律。机械工程中的摩擦副加工表面一般具有非常复杂的多层次几何和组织结构，各种表面改性、镀膜和润滑技术的应用使得表面状况更加多样化，大多数情况下摩擦表面伴随摩擦化学反应和损伤而经历复杂的变化。需要研究可在线或离线测

试和表征表面层结构的新方法,并研究表面层结构在摩擦过程中的演化规律,建立定量分析模型和方法。

(5) 摩擦过程中表面损伤和材料转移发生的判据。表面损伤和材料转移往往发生在介观尺度,一旦发生会对摩擦进程产生不可逆转的影响。需要研究发生表面损伤和材料转移现象的热力学判据,研究其发生和发展的必要条件和充分条件。

(6) 具有普适性的磨损寿命预测模型。磨损寿命预测是机械可靠性设计的基础之一。需要将磨损机理研究和断裂与损伤力学及其他先进的计算方法相结合,建立具有普适性的磨损寿命预测模型,达到机械疲劳寿命预测的水平。

(7) 摩擦能的调控和有效利用原理。研究各种调控表面界面黏着、摩擦、抗磨和润滑性能的新原理和新方法,如仿生表面设计原理、具有自组织或自修复特性的界面设计原理、智能涂层以及外场主动控制的原理和方法。

6.5 未来5~10年的发展规划

随着我国经济的持续高速发展,特别是国家中长期科技发展计划已进入实施阶段,许多重大的工程建设项目、高技术项目和重要科学研究项目为机械表面界面科学研究提出了众多新的挑战,也为该领域的发展提供了良好的机遇。未来5~10年内,我国在该领域的基础科学研究应更加紧密地结合国家重大需求,着力于解决长期以来制约我国机电产品国际竞争力的单元技术和基础技术问题以及共性科学问题,大力加强与生物、纳米、信息、航空航天技术相关以及极端工况环境下的表面界面科学技术,使我国的机械表面界面科学与摩擦学研究的总体实力处于世界前列。为此,应重点规划和部署下列6个方向的研究:

1) 环境友好摩擦学

环境友好是机械工业适应国家和社会实现绿色可持续发展的要求,符合国家的重大需求。主要包括:

(1) 摩擦系统宏观动力学模型与振动耦合特性研究。

(2) 摩擦系统自激振动与摩擦尖叫噪声机理研究。

(3) 环境友好纳米微粒润滑油脂添加剂研究。

(4) 水基润滑及微量润滑的研究。

2) 超常(超低、超高、超稳)摩擦状态的原理、方法及关键技术

实现超低摩擦(或超滑)是人类的梦想之一。它对工业技术发展和节能减排具有重要意义。另外,随着现代机械机电一体化、超精密化和微型化的发展趋势,许多高新技术装置要求摩擦性能不随工况和环境条件的变化而波动;在摩擦自锁、驱动、制动和传动等应用场合,摩擦系数越高安全系数越高。主要包括:

- (1) 超低摩擦产生所必备的固体表面界面物理、化学因素。
 - (2) 超低摩擦过程中固体表面界面材料结构与性能的演化规律。
 - (3) 超低摩擦能量损耗与模拟。
 - (4) 表面几何特征与超低摩擦的相关性。
 - (5) 摩擦界面的稳定性与鲁棒性。
 - (6) 摩擦力和摩擦能有效利用新原理、新方法。
- ### 3) 生物摩擦学

生物摩擦学是提高人类生命质量的关键前沿学科，其驱动力源于摩擦学同材料学、生物学、医学等学科交叉的创新需要及科技造福人类的需求。随着人工器官的不断发展及其应用领域的迅速扩大，生物摩擦学已逐渐成为提高人工器官使用可靠性的关键技术支撑。主要包括：

(1) 人体天然硬/软组织及人体与外界环境之间的摩擦磨损行为、机理及防护研究。

- (2) 硬组织替换生物材料和内固定器械的生物摩擦学研究。
- (3) 心血管植入器械的生物摩擦学研究。
- (4) 生物摩擦学研究的新方法。

4) 特殊工况下的机械表面界面行为及控制

根据国家发展规划，航空航天、高速动车组、大飞机工程、汽车发动机、轨道交通、绿色能源风电、核电和深海探测等将成为现代高速交通工具和重大机械装备需求的主要研究方向，这些项目的开展，必然面临材料在诸如空间环境、强电磁场环境、强辐射环境、超高速、超高能量密度、高低温、微动和深海等特殊工况下的特殊机械表面界面效应。主要包括：

- (1) 空间环境条件下材料的表面物理、表面化学行为及其与摩擦磨损性能的相关性研究。
- (2) 高能量密度制动条件下表面层的形成与破坏机理及其与制动性能的关联研究。
- (3) 载流条件和电磁环境下的表面界面行为。
- (4) 深海特殊极端环境条件下机械表面界面特性的研究。
- (5) 重载高速轨道交通轮轨异常磨损和黏着机理及控制方法的研究。
- (6) 重大工程关键紧配合部件复杂微动的界面间行为及防护措施研究。
- 5) 先进制造中的表面界面科学研究

在纳米制造、高速高精加工、特种材料成型等先进制造中涉及多层次、多方面的表面界面科学问题，包括纳米薄膜流变、纳米间隙控制、界面黏着行为以及材料转移等众多基础问题，对这些问题的研究会大大促进相关制造技术水平的发

展。主要包括:

- (1) 超光滑平整表面制造中的表面界面问题。
- (2) 微/纳结构制造中的表面界面问题。
- (3) 微/纳结构键合与器件封装中的表面界面问题。
- (4) 微/纳颗粒组装和成型加工中的表面界面问题。
- 6) 机械表面界面的功能设计与制造

经过长期的自然进化,自然界很多生物表面获得了如超疏水、减黏、减阻、抗磨等功能表面,而这些功能的实现主要来自于其表面的特殊微/纳几何结构材料。自然界中发现的功能表面可发挥常规机械加工表面无可比拟的特殊功能,实现黏着与摩擦的自适应控制、超疏水、自清洁、电磁辐射防护、减噪降噪以及产生奇异的光波、电磁波传播行为,从而赋予机械产品或装备高的附加价值,具有广阔的应用前景。主要包括:

- (1) 具有各向异性黏着与摩擦特性的功能表面设计制造原理及技术。
- (2) 超疏水表面与减阻表面的设计原理和制造技术。
- (3) 电磁辐射防护表面的设计与制造。
- (4) 吸声和降噪表面的设计与制造。
- (5) 光电功能表面与超介质表面的设计与制造。

参考文献

- [1] Dasic P, Franek F, Asenova E, et al. International standardization and organizations in the field of tribology. *Industrial Lubrication and Tribology*, 2003, 55: 287 - 291.
- [2] 周仲荣, 富源忠, 张嗣伟. 摩擦学发展前沿. 北京: 科学出版社, 2005.
- [3] 谢友柏, 张嗣伟. 摩擦学科学及工程应用现状与发展战略研究——摩擦学在工业节能、降耗、减排中的地位与作用的调查. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [4] http://www.designnews.com/article/443844-Energy_Efficient_Bearings_Focus_on_Reducing_Friction.php [2010-01-01].
- [5] Israelachvili J N. *Intermolecular and Surface Forces*, 2nd Ed. San Diego: Academic Press, 1992.
- [6] Tian Y, Peirika N, Zeng H, et al. Adhesion and friction in Gecko Toe attachment and detachment. *Proceedings of the National Academy of the United States of America (PNAS)*, 2006, 103: 19320 - 19325.
- [7] Ozbay E. Plasmonics: Merging photonics and electronics at nanoscale dimensions. *Science*, 2006, 311: 189.
- [8] Etsion I. State of the art in laser surface texturing. *Journal of Tribology*, 2005, 127: 248 - 253.
- [9] Shen S, Narayanaswamy A, Chen G. Surface phonon polaritons mediated energy trade between nanoscale gaps. *Nano Letters*, 2009, 9: 2909 - 2913.

第8章 高性能精确成形制造科学

Chapter 8 High Performance Precision Forming Manufacturing Science

成形制造技术,主要在力场或温度场,或二者耦合作用,或者再辅助以其他场的作用下,改变材料的形状与尺寸,并控制着甚至改善零件的最终使用特性。其主要包括凝固成形、塑性成形、焊接成形和热处理等。成形制造是材料质量不变或增加的成形过程,更是零构件成形成性一体化,且涉及多学科交叉融合、高度非线性的物理过程。在合适的成形方式与成形条件下,成形制造技术不仅能赋予零构件近净的甚至精确的复杂形状与尺寸,而且能赋予高性能,从而发展成为高性能精确成形制造技术。高性能精确成形制造,能通过成形过程使得零构件宏观性能在坯料性能基础上得到提高(或者使原有微观组织也得到改善),这不仅可使零构件更好地发挥效能并延长寿命,而且还可减少材料用量以达到轻量化的目的。因此,高性能精确成形制造技术是少无废料产生、绿色、节约型、技术密集、知识密集与高增值的轻量化零构件制造技术,在节能减排乃至发展低碳经济、建设创新型国家等方面都发挥着关键的不可替代作用。高性能精确成形制造技术是先进制造技术发展的重要方向,是支撑国民经济发展与国防建设的主要技术之一,其能力、技术水平和技术经济指标已经成为衡量一个国家的制造技术与工业发展水平以及重大、核心关键技术装备自主创新能力的标志之一。发展高性能精确成形制造技术依赖于高性能精确成形制造科学发展的强有力支撑,如何从多场耦合、多尺度与全过程的角度深入研究并深刻认识大型、复杂构件高性能精确成形成性一体化的机理与规律,把握形/性一体化调控的理论与方法,是高性能精确成形制造前沿领域的核心科学问题。

8.1 内涵与研究范围

8.1.1 内涵

成形制造技术,主要通过力场或温度场,或两者耦合作用,或者再辅助以其他场的作用,改变材料的形状与尺寸,并控制着甚至改善零件的最终使用特性。成形制造技术主要包括凝固成形、塑性成形、焊接成形和热处理等。

凝固成形本质属液态金属材料质量不变的成形过程。材料的累加制造通过材料的逐渐累加实现成形,是材料成形制造的拓展,而高性能致密金属零件激光成形是其中最具挑战性的研究方向,其科学内涵核心仍是凝固问题。塑性成形和热处理属固态金属材料质量不变的成形过程,而焊接成形则属固态金属材料质量增加的成形过程。塑性成形有板材坯料与体积坯料两种主要形式,从而带来不同的技术特点和科学问题。大型复杂构件和具有微细特征的零件的成形是两种极端成形制造方式,面临“极端的尺度效应”问题,多种成形方式交叉、融合所带来的耦合效应问题,多尺度效应问题,以及成形成性一体化等问题。模拟仿真与优化技术已成为加快高性能精确成形制造技术和先进材料的研究与开发不可缺少的关键主流技术,对于具有极端尺度或复杂形状构件的高性能精确成形过程研究与开发更是如此。

通过创造合适的成形方式与成形条件,成形制造技术不仅能赋予零构件近乎的甚至精确的复杂形状与尺寸,而且能赋予零构件高性能,从而发展成为高性能精确成形制造技术。高性能精确成形制造通过成形过程能使得零构件宏观性能在坯料性能基础上得到提高(或者使原有微观组织也得到改善),这不仅可使零件更好地发挥效能并延长寿命,而且还可减少材料用量以达到轻量化的目的。因此,高性能精确成形制造技术是少无废料产生、绿色、节约型的轻量化零构件制造技术,对国民经济发展与国防建设具有重要作用。

8.1.2 研究范围

从上述的成形制造技术的特点、客观作用、国家的重大需求以及学科发展的前沿出发,先进成形制造科学与技术研究未来的总体发展趋势汇聚在高性能精确成形制造这个焦点上。概括地讲,其研究范围主要包括高性能凝固精确成形、轻质高强板材复杂件精确成形、高效高性能精确体积成形、超常条件下焊接与高效焊接、特大型构件成形成性一体化制造、低成本批量微成形和高性能精确成形过程的建模仿真与优化等。

1) 高性能凝固精确成形

主要包括钢铁材料、轻合金（铝、镁、钛）等大型/复杂件凝固成形过程中组织及性能、尺寸精度与表面质量的演化机理与控制技术，如多能场作用下的凝固成形、高性能致密金属零件激光成形、定向与单晶精确凝固成形、压力下凝固精确成形以及高分子和复合材料等构件的先进成形等。

2) 轻质高强板材复杂件精确成形

主要包括轻质高强钢、铝合金、钛合金等板材刚性模具整体冲压成形、柔性增量成形（液压/伺服、多点、单点、旋压等）与基于管坯的内高压成形和多约束成形等过程所涉及的材料本构关系、起皱、开裂等缺陷形成机制、加载路径与应力应变场、成形极限与回弹预测、热成形多场耦合材料组织性能演变与工艺过程控制技术等。

3) 高效高性能精确体积成形

主要包括在力场与温度场耦合作用下体积坯料整体加载成形（精密模锻、等温模锻、多向模锻、挤压等）与局部加载成形（楔横轧、辗锻、辗环、摆辗等）形状变化、微观组织与宏观性能变化的关系，发展高效、精密、节能、环境友好的成形制造理论及技术。

4) 超常条件下焊接与高效焊接

主要包括高效焊接新方法、新材料及异种材料的连接机理，特种环境下焊接、大型复杂结构焊接、微细结构焊接，以及焊接过程传感与质量控制理论与方法等。

5) 特大型构件成形性一体化制造

主要包括多因素、多场耦合下特大型高性能构件的铸、锻、焊成形与热处理，高效高性能成形性一体化质量控制理论与技术，特大型构件局部加载等温整体成形、分段组合成形制造，预制坯成形与缺陷抑制及淬火智能控制等。

6) 低成本批量微成形

主要包括介观尺度下可控批量化微成形机理（成形零件的两个维度特征尺寸在 $100 \sim 1000 \mu\text{m}$ 、尺寸精度在 $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ 、表面精度在纳米级）、介观尺度下微成形新工艺以及面向介观尺度特征的检测方法等成形制造技术基础。

7) 高性能精确成形过程的建模仿真与优化

主要包括凝固、塑性成形、焊接、热处理过程及特大型构件多场耦合、成形性全过程，多尺度的建模、仿真与优化，发展数字化与智能化的高性能精确成形技术等。

本领域主要研究内容之间的关系如图 8.1 所示。

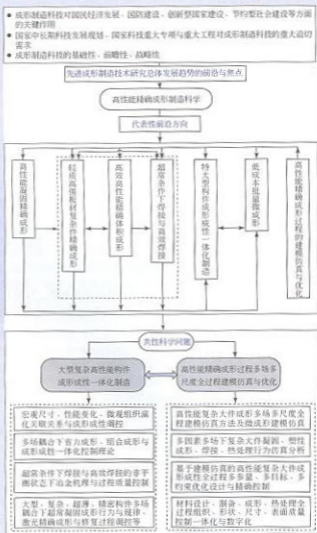


图 8.1 本领域主要研究内容之间的关系

8.2 在国民经济、社会发展和学科发展中的重要意义

成形制造技术是支撑国民经济发展与国防建设的主要技术之一，而高性能精确成形制造的能力、技术水平和技术经济指标已经成为衡量一个国家的制造技术与工业发展水平以及重大、核心关键技术装备自主创新能力的标志之一。高性能成形制造技术在零部件轻量化制造、节能减排、乃至发展低碳经济、建设创新型国家方面都发挥着关键的不可替代的作用，将为我国航空航天工业、汽车工业、重大装备制造工业、兵器工业、能源工业、造船工业、信息工业的发展做出新的更大的贡献。目前，90%以上的各种零部件在其制造过程中都经历了凝固过程，全世界钢材的75%要进行塑性加工，65%的钢材要用焊接才得以成形。我国已是铸造、塑性加工、焊接和热处理的世界第一大国，2008年的钢产量已超过了5亿吨；汽车工业涉及的技术密集、产业关联度高、规模效益明显，是我国国民经济发展的支柱产业，2009年我国汽车的产量已超过1300万辆，稳居世界第一；航空航天装备制造是最具前沿引领性与产业带动性的国家战略性新兴产业，是国家综合实力的重要体现。未来20年是我国航空航天与汽车制造业发展的战略机遇期，需要高性能精确成形制造技术与科学的全面提升与支撑。

凝固成形不仅可以直接实现零件形状、尺寸及内部性能的控制，更是包括塑性成形、焊接与机械加工等工序所需坯料的主要来源。金属零部件内部组织和性能在很大程度上受到凝固过程的制约，例如，铝合金轧制、挤压和锻造产品的缺陷，70%以上是在凝固过程中形成的。因此，凝固成形是实现金属零件高性能的基础。作为高推重比（ >15 ）航空发动机的核心关键部件之一，高温合金单晶叶片，对研制大飞机和新一代战机也至关重要，其高质量、低成本、短周期高性能精确成形制造依赖于高性能定向凝固精确成形技术与科学的发展与进步。

当今高端制造业的竞争不仅取决于产品设计与制造技术的水平，而且取决于产品的快速低成本开发的能力。在航空航天等国防领域，复杂零件的单元少批量精确制造技术至关重要，快速原型制造这一材料累加成形技术在产品快速开发中发挥了越来越重要作用。各类金属、工程塑料、陶瓷材料均可在计算机控制下通过材料逐渐累积，可以优质快速制造出各类复杂形状零件，制造所采用的能源以激光为主，也包括电子泵和离子束等，这些能量与材料之间的作用原理及其对材料形状精度和组织性能的影响，引发了许多科学问题，其研究大大丰富了制造学科。而高性能致密金属零件激光成形是其中最具挑战性的研究方向，其科学内涵核心仍是凝固问题。

用于制造业的钢材60%以上为板材，都要通过成形制造成为零部件，板材

成形是最为量大面广的精确成形技术,汽车车身覆盖件、车体框架、底盘和排气管件,飞机蒙皮、机翼和不同种类的小型曲面铝合金薄壁件,航空发动机火焰筒、密封环等高温合金和钛合金构件,以及火箭和导弹等钛合金和高强铝合金异型管件、整流罩等薄壁件均需采用板材精确成形技术进行制造。能源、环保、城市交通等制约的日益显现,以节能减排为目标的汽车轻量化需要轻质高强板材复杂件的先进精确成形技术来支撑。日本近年来高强钢板的使用率超过40%,并逐步增加,在超轻钢车身概念车与白车身上全部使用了高强度钢板及复合钢板,从而使汽车白车身减重20%。轻质高强板材复杂件精确成形制造也是航空航天结构件制造的关键支撑技术。与传统的锻造或车削相比,轴承套圈如果采用高效高性能体积精确成形技术——精密轧制可节材15%~30%,而且其内部金属组织呈流线分布,晶粒细化、组织致密、碳化物分布均匀,其使用寿命大幅度提高,并能显著降低能耗。我国高速铁路机车、风力发电系统、高档数控机床等发展十分迅速,迫切需要加快发展与之相关的高效高性能局部连续精确成形制造技术。大型、特大型铸锻件是许多重型机械装备的关键零部件,既可以作为重大成套设备制造的坯料,也可直接以构件形式应用于电力、航空航天、船舶、冶金、石化于重型机械等重大工程中。铸造、锻压、焊接是大型、特大型铸锻件成形制造的关键环节,而热处理是控制特大型构件微观组织和性能的最后一道关键性工艺,特别需要形成形成性一体化制造基础研究作为支撑。

从超大型结构到微电子芯片,从太空到深海,从金属材料到人体材料,现代许多重要结构和大型工程都必须采用焊接或连接技术才能解决制造问题。例如,我国长江三峡水电站的水轮机转轮直径10.7m,高5.4m,重达440t,为世界最大、最重的不锈钢焊接制造的转轮,每个转轮需要消耗12t焊丝;同样,三峡水电站的电机定子座直径22m,高6m,重832t,是我国焊接的最大钢结构机座。国家体育场“鸟巢”主体结构是国际上尚无先例的焊接结构,用钢量达4.19万t,关键部位采用了Q460E-Z35高强钢,焊接结构最大厚度达110mm。当今世界最重最大的大型热壁加氢反应器(总重量为2050t、壁厚337mm、长62m、直径5.5m)也是由我国焊接制造成功。我国还通过焊接建造了15万m³国内首例单罐容积最大的大型储油罐,其高24m,直径93m,总重2867t,主要焊缝长度(罐底、罐壁)6000m多。载人航天工程中的中性浮力水槽,是宇航员出舱训练中模拟失重环境的设备,直径23m,深10m,全部采用不锈钢焊接制造。由此可见,超常条件下焊接与高效焊接是先进焊接成形制造发展的重要方向。

随着人们对健康生活、社会安全和环境环保等需求的不断加大,新能源产品、生物医学产品、电子产品和微小武器装备的制造将成为制造业未来发展的重要方向,如微型机械式引信中的微型齿轮类零件、微型发动机中的微型涡轮盘

件、微型燃料电池中的微型波纹板件、微创手术器械和微针传感器、柔性平板显示器、微型制导武器、太阳能器件和微燃料电池等。这些产品具有突出的介观尺度特征，只有在介观尺度下低成本批量微成形制造科学与技术上取得突破，才能满足不断增长的微细产品高精度、低成本和批量化制造需求。

正因为存在上述国家需求，发展高性能精确成形制造技术，已经成为正在实施的国家与国防中长期科技发展规划以及“大型飞机”、“载人航天与探月工程”与“高档数控机床与基础制造装备”等一系列科技重大专项与重大工程的重点内容，是其取得重大突破的核心关键支撑技术之一。

成形制造也是制造学科的重要组成部分。而高性能精确成形制造实现的是少无废料产生、绿色、节约型、技术密集、知识密集与高增值的轻量化制造，是制造学科发展的前沿，在学科发展中发挥着越来越重要的作用。发展高性能精确成形制造科学与技术需要材料、机械、力学、热学、计算机、控制和信息等多学科与技术的交叉与有机融合研究，由此将推动制造科学的发展。深入研究与系统发展高性能精确成形理论、方法与技术，将为零部件轻量化制造、节能减排打下关键的不可替代的理论与技术基础，将为我国航空、航天、汽车、新能源、重大装备制造、兵器、造船、信息等工业的发展，乃至发展低碳经济、建设节约型社会与创新型国家，提供更加坚实的、重要的理论、方法和技术支撑手段。

大型复杂构件和具有微细特征的零件的成形制造，是两种极端成形制造方式，面临“极端尺度效应”与多种成形方式的耦合效应问题、宏微观耦合、多尺度效应、成形成性一体化以及建模仿真与优化等问题，这使得其成形制造表现出许多不同于通常的宏观成形制造理论、机理和方法。基于激光的高性能精确成形技术将快速原型技术与激光熔覆技术相结合，把快速成形从仅制造“原型”发展到制造可承载高载荷的致密金属零件，可以解决传统技术在成形金属复杂件时难以兼顾高精度、高性能、高柔性、快速反应的难题。同时，应用激光成形技术进行零部件的激光修复，可使修复区与零件本体的成分组织和性能高度一致，从而使得激光成形技术成为当今建设循环经济和节约型社会的一种重要的技术基础。而发展基于激光的高性能精确成形科学与技术，则更显著依赖于激光与凝固、材料、机械、力学、热学、计算机、控制、信息等多学科与技术的交叉与有机融合研究。

由于高性能精确成形制造涉及问题的复杂性，基于理论、经验和反复试验的方法难以满足对该过程研究与高技术化、数字化发展的需求，而采用计算机建模仿真，与理论及实验研究有机结合的方法，特别是集成成形过程模型、微观结构模型与宏观性能模型的成形全过程、多尺度建模仿真与优化技术，能虚拟成形现实，将大量反复试验在计算机上完成，可以比理论和实验做得更全面、更深刻、

更细致,可以进行一些理论和实验暂时还做不到的研究,已成为高性能精确成形制造研究与开发以及材料与制备工艺快速开发与技术创新不可缺少的关键环节和强有力的主流技术。同时,成形制造建模仿真与优化技术的发展涉及材料、力学、机械、信息、软件工程学、计算机图形学等相关学科的交叉融合。模拟仿真与优化技术已在成形制造领域得到了广泛应用。根据美国科学研究院工程技术委员会的测算,模拟仿真可提高产品质量5~15倍,增加材料利用率25%,降低工程技术成本13%~30%,降低人工成本5%~20%,增加投入设备的利用率30%~60%,缩短产品设计和试制周期30%~60%。

综上,高性能精确成形制造已成为制造学科的核心关键之一,是既有挑战性又充满机遇的学科领域,在国民经济、社会可持续发展与国防建设中具有不可替代的关键作用。

8.3 研究现状、存在问题和发展趋势分析

我国已成为成形制造业大国,取得了许多令人振奋的成就。我国对该领域的科学研究也极为重视,在凝固、焊接、塑性成形等方面建有6个国家级重点实验室,近年来每年都有100项左右国家自然科学基金项目获准资助,也得到了多项国家自然科学基金重点项目、国家“973”课题的支持,已有10多人获得了国家杰出青年科学基金的资助。高性能精确成形制造科学与技术研究总体发展趋势是向高性能精确成形制造方向汇聚,目的是使得零件成形制造朝着轻量化、高性能、高效率、低成本、能源高效利用和环境友好的方向发展。世界各国都非常注重对高性能精确成形制造的科学研究与技术开发,其研究现状、存在问题与发展趋势分析如下。

8.3.1 高性能凝固精确成形

1. 高性能凝固精确成形基础

我国铸造技术^[1]和铸造机械的发展水平与国外^[2]相比有较大的差距,例如,我国的铸件尺寸精度普遍比发达国家低1~3级,表面粗糙度也比发达国家差1~2级,如发动机铸铁材质缸体的粗糙度,我国为25~100 μm ,国外为12.5~25 μm ;同时,铸件内部组织和性能的控制难以满足航空、航天、汽车、新能源等领域的战略性发展对高端精密铸件质量的需求;另外,我国铸造行业的能耗占机械工业总耗能的25%~30%,能源平均利用率为17%,能耗约为铸造发达国家的2倍;我国每生产1t合格铸铁件的能耗为550~700kg标准煤,国外水平为

300~400kg 标准煤,铸件生产过程中材料和能源的投入约占产值的55%~70%。如何解决我国铸件存在的尺寸精度、表面质量差、质量稳定性差、铸件性能低和能耗大等问题迫切需要有利的科学与基础研究支持,因此,需要对凝固精确成形与高性能控制进行系统深入的基础研究。

随着世界能源需求的不断加大以及不可再生能源的日益枯竭,风力及水力等清洁能源的开发和利用成为了十分紧迫的任务。然而,目前我国风力及水力发电机组中使用的大型叶轮铸件在现有技术条件下其使用性能和寿命难以得到保证。而如何对大型叶轮铸件中的成分偏析、组织构成及分布进行控制以形成系统的解决方案是解决上述客观需求的关键科学与技术基础问题。定向凝固柱状晶及单晶空心高效冷却涡轮叶片,是现代高推重比航空发动机和地面燃气轮机发展必不可少的关键部件之一。其发展趋势是,叶片材料合金化程度的不断提高,叶片内部冷却通道结构的日益复杂精密和零件壁厚超薄,凝固组织精细化。但我国在叶片合金材料技术、定向凝固成形工艺技术、叶片内部质量和叶片成品率等方面同国外先进水平存在较大差距。因此,应深入研究精密超薄复杂空心涡轮叶片定向凝固过程和凝固界面的动量传输、热量传输和热质传输行为,组织形成规律与缺陷形成机理,以建立内部质量主动控制方法。

航空、航天等领域在强调构件的性能的同时对构件重量十分关注,由此对铸件的尺寸、形貌精度以及内部性能均提出了极高要求。目前,大型复杂薄壁整体构件的铸造充型与冶金质量可通过调压成形精密铸造技术获得有效的解决方案。例如,我国通过凝固成形原理、技术与装备的集成创新解决了铝合金大型复杂薄壁铸件成形的难题,但其成形中的变形规律、表面粗糙度形成规律和主要的影响因素及其作用原理如何?进而可形成尺寸精度及表面质量精确控制原理如何?应是显著提升航空航天领域大型复杂薄壁件铸造成形技术能力和水平需要解决的关键科学问题。连铸连轧是金属材料高性能精确成形的重要方法之一,是连接合金冶炼与型材制备的重要环节。然而,目前我国在连铸连轧板坯、带坯的质量控制方面的技术水平还相对落后,大飞机研制等重大工程所需的铝合金预拉伸厚板依赖进口的局面长期未能改变。我国先后从国外引进了先进的大铸锭生产线,目前,已试制出厚度达600mm的7B50合金锭坯,但仍未达到相关战略工程所需的800mm厚锭坯的规格要求,并且锭坯的性能质量低。均质、细晶、无裂纹大尺度优质铸锭高性能精确成形制造面临的挑战是:如何控制高性能大规格铸锭凝固时易产生的裂纹、内部组织的粗大和不均匀?因此,需要深入研究并解决超高合金大规格锭坯的成形成性问题。一个发展趋势是采用多能场耦合作用。

高性能精确凝固成形过程中涉及多场之间的非稳态耦合作用,需要解决的科学问题和工艺规律还应该包括:应力、变形、界面、组织性能演化规律如何?如

何给出铸造过程中非稳态温度场、应力变形以及凝固偏析等问题更为精确的描述?铸造成形过程中铸型与铸件之间的相互作用机制如何?如何获得铸件尺寸精度、表面质量及内部性能的有效控制手段,以实现凝固精确成形与高性能控制?

高分子合成工业的飞速发展和汽车、航空、航天等领域的巨大需求推动了高分子材料构件成形技术的迅猛发展。据统计,世界塑料总产量按体积计算已经超过钢铁和有色金属的总和。发达国家目前平均每辆车塑料的用量为150kg以上,而我国目前仅为85kg/辆左右。高分子材料成形新应用是实现生物可相容、可降解组织工程支架的微孔注射成形。高分子材料构件成形方法包括加热熔化、成形、冷却固化等工艺过程,因此,高分子材料构件已成为材料凝固成形的重要组成部分。从科学内涵看,重点关注成形中的流动与传热问题(宏观)和凝固过程中的形态结构与性能问题(介观),这与金属凝固成形是类似的。高分子材料成形面临的挑战是:加工条件、形态结构演化与制品性能之间的关联建模。

复合材料轻质高强的优势在国防工业与国民经济发展中获得了越来越广泛的应用,“大型飞机”、“载人航天与探月工程”等国家重大科技专项和重大工程都对大型复合材料构件提出了迫切的要求。而面临的挑战是:如何实现复合材料构件高性能、高效和低成本的正固与成形制造。

2. 基于激光的高性能快速凝固精确成形

材料累加制造,依靠材料的逐点累加成形而不受工模具的可制造性及零件空间可达性的制约,可实现复杂形状零件的制造,被认为是与材料成形、切削加工并列的第三种制造技术,在产品开发、复杂零件单件或小批量制造的快速响应方面显示出独特的工艺优势,已在机械、电器、航空航天、车辆、船舶、生物医疗等工业领域获得了应用。自20世纪80年代发明以来,该技术获得迅猛发展。被美国NSF认为是20世纪以来制造技术的一次革命性进展。现在,发展的技术有光固化(SL)、叠层制造(LOM)、选择性粉末烧结(SLS)和熔融法制造(SFM);采用的能量形式有激光、电子束、离子束和电弧等;可用于材料累加制造的材料有高分子树脂、金属、陶瓷、生物细胞等各类材料。同时,材料累加制造给制造学科也带来了许多研究挑战。目前,航空航天等领域基于激光的金属复杂零件直接成形已成为研究热点。德国的激光研究所可以实现特征为0.05的金属材料成形。钛合金、高温合金等高性能金属构件激光快速成形技术是材料累加制造中一种最具挑战性的快速原型制造技术。该技术以合金粉末为原料,将高性能材料快速凝固制备技术与复杂零件近净成形制造技术有机融为一体,通过激光熔化逐层沉积(生长制造),直接由零件CAD模型完成高性能金属零件的“近净成形”,使得零件具有细小、均匀、稳定的快速凝固组织和优异的综合力学性

能;对大型构件成形,无需大型锻造装备、大型模具及大规格锻坯制备;具有柔性高以及对产品和结构设计变化快速响应制造能力和快速修复能力,在飞机、航空发动机、石化等重大工业装备研制中具有技术创新突破能力和广阔应用前景。美国于1995年首先开展飞机机身大型钛合金结构件激光快速成形技术研究。我国自“十五”开始重视研究与发展激光快速成形技术与科学,并开展大量研究,在激光快速成形工艺、组织和性能控制等关键技术方面取得了多项重要进展,已实现在先进飞机、航空发动机和口腔修复体等上的应用^[3,4]。例如,激光成形制造了钛合金大型复杂承力结构件并得到实际应用。然而,金属大型整体和复杂关键结构件激光快速成形过程物理、化学和材料冶金过程复杂,技术难度大,材料瞬间的熔化、固化机理及温度场对制造精度、表面粗糙度影响如何?如何寻求材料与高能束的匹配以获得工艺的优化和成形件优良的组织与力学性能?而如何控制内部质量和如何预防变形开裂是目前国际上一直未有效解决而制约该技术发展和应用的关键难题;还有,如何实现性能、精度、效率与成本的平衡?激光成形技术在金属零件快速修复等方面也具有很强的技术优势和发展潜力,已引起航空、航天、机械、能源、船舶等工业界的关注。2009年3月在美国举行的激光快速成形学术研讨会(LAM 2009)上,全部24个报告几乎都重点介绍激光快速成形技术在零件修复上的发展和应用。另外,充分发挥激光快速成形工艺柔性灵活的技术特点,与锻造、铸造和机械加工等传统制造技术结合,取长补短,发展激光复合制造技术也应该是激光快速成形技术的重要发展方向之一。

总之,高性能凝固精确成形领域研究的主要发展趋势是:

- (1) 多能场下高性能、高洁净、高均质大型零构件的精确凝固成形;钛合金等大型整体、复杂高性能金属零构件的激光等快速凝固精确成形与修复。
- (2) 轻金属高性能精确凝固成形和高性能难加工金属新材料凝固制备与精确成形一体化新工艺与新装备。
- (3) 高温合金定向及单晶凝固成形过程工艺-组织-性能的精确控制。
- (4) 高分子材料构件成形向高效、高性能、低成本、全回收、零排放、多尺度关联建模仿真方向发展。发展高性能复合材料高效和低成本的固结与成形制造技术。

8.3.2 轻质高强板材复杂件精确成形

大飞机、新一代战机、高推重比发动机、大型运载火箭、长寿命卫星和节能型汽车的发展,要求使用高比强、高比模的轻质高强板材,要求使用复杂曲面、薄壁、空心变截面、整体和带筋等轻量化的结构。应用轻质高强度板材能在保证综合性能的前提下有效减轻汽车车身质量,同时大幅提高碰撞安全性,因此,其

在世界汽车工业发达国家得到广泛应用并成为当前的研究热点^[5]。例如,高强度钢板(AHSS)在我国一汽奔腾轿车上的应用,可将厚度1.0~1.2mm车身板减薄至0.7~0.8mm,使车身质量减小15%~20%,节约油耗达8%~15%。今后,高强度钢板在奔腾轿车上用量将会从目前的5%发展到未来的40%以上。DP、TRIP、AHSS和MART等先进高强度钢板成为近年来车身轻量化中的主要应用材料。

轻质高强板材属难变形材料,而轻量化结构属难成形结构。轻质高强板材与轻量化结构的广泛应用迫切要求研究与发展轻质高强板材和管材复杂件精确成形理论与技术。近年来迅速发展的热冲压、斜拉延筋冲压、变压边力冲压、内高压成形,充液成形,时效成形,多点、单点(旋压)柔性模具成形,蠕变时效成形,以及管数控弯曲等都有望在这方面发挥作用。其中,热冲压、斜拉延筋冲压、变压边力冲压属于刚性模具整体冲压精确成形;充液成形,时效成形,多点、单点(旋压)成形和蠕变时效成形属于柔性模具增量精确成形;内高压成形与管数控弯曲则是基于管坯的复杂件精确成形。

1. 刚性模具整体冲压精确成形

刚性模具整体冷、热冲压精确成形已成为轻质高强板材复杂件精确成形批量生产的先进成形技术。热冲压成形技术是将板材热冲压与随即淬火相结合的一种充分利用材料潜力的新工艺。一些汽车上的高强板材防撞件,如前挡、门内加强梁和车身侧梁等开始大量采用刚性模具整体热冲压精确成形。

国外在轻量化车身高强度板材先进成形技术的研发方面已经达到了工业化程度,有力地推动了轻质高强板材刚性模具整体冷、热冲压成形和数控伺服/液压成形等其他工艺复合精确成形的研究与发展。

对材料流动有很好控制作用的斜拉延筋冲压工艺,能有效克服拉延件的起皱或拉裂缺陷,解决难成形零件精确成形问题。基于冲压成形中压料面不断变化而主动控制压边力变化,是解决复杂形状板材精确成形难题的另一项重要的技术。目前,较为先进的变压边力冲压工艺装备多采用CNC液压拉深系统和独立控制的多点压边系统,伺服/液压成形复合成形也能在这方面发挥作用^[6]。

2. 柔性模具增量精确成形

柔性(模具)增量成形技术是基于产品三维CAD模型直接驱动,通过形状简单工具的包络面或液压力、电磁力来实现三维曲面零件的成形。时效成形、多点成形、单点增量(旋压)与液压成形是比较有代表性的板材柔性模具增量精确成形技术。从广义角度看,很多回转成形,如摆动碾压以及楔横轧也都是增量

成形。采用柔性模具成形技术不仅可以节省大量的整体模具设计、制造及修模调试的费用,还可省去保存各种大型模具所需的大型厂房等;所成形的零件尺寸越大,批量越小,其优越性越突出。这种技术可广泛用于汽车工业、航空航天、船舶制造和民用产品的小批量、多品种、轻质高强板材复杂件(难成形的金属板材件)的成形制造及相应的新品研制。

多点成形,由规则排列的系列基本体(或称冲头,其高度由计算机控制)所构成的点阵曲面代替传统整体模具的连续曲面实现成形,是一种数字化精确成形技术。多点成形研究与开发起步于20世纪60年代,东京大学、东京工业大学、京都大学和麻省理工学院的学者及工程技术人员对多点成形技术和可重构模具成形技术进行了大量试验研究。MIT和Cyril Bath公司等研制了可用于实际生产的可重构模具蒙皮拉形机,Warner Robbins将其用于飞机机身与机翼的蒙皮件制造,表明可替代45%~75%的现有模具,蒙皮制造周期缩短到原来的1/8,同时还显著减少了模具存储成本。我国发展了板材多点成形理论与技术,开发出分段成形、多道次成形、反复成形以及闭环成形等多种多点成形工艺与具有自主知识产权的多点成形装备^[7],并采用多点成形技术解决了如北京奥运会鸟巢建筑中大型钢板弯扭结构件成形的难题。近年来,兴起的单点增量成形(或称单点数控增量成形),是由快速原型制造技术的分层制造思想启发,将三维数字模型沿高度方向离散成一系列等高线层,而成形工具在计算机控制下沿该等高线层面上的轨迹运动,使板材逐次变形代替整体成形。由于工件与工具的接触面积小,载荷并不大。旋压成形也可归为单点增量精确成形技术的一种。目前,日本的AMINO公司已实现了单点渐进成形设备的产业化,并形成出汽车覆盖件、子弹头列车车头覆盖件以及医疗器械方面的系列化产品零件;另外,德国与韩国在单点增量成形方面也进行了大量研究工作。随着产品生产的多样化、个性化及柔性化制造的需求增大,多点成形及单点增量精确成形技术的发展趋势是进一步向大型化、精密化、高速化、连续化及成形材料轻质高强度方向发展。

时效成形工艺是解决高效整体壁板成形质量和使用寿命的有效的技术途径,但国内缺乏系统的工艺理论、技术基础与过程控制研究。

3. 基于管坯的复杂件精确成形

管坯可看成是一个方向有曲度的板材,是板材坯料的深度延伸。基于管坯的复杂件精确成形技术已经成为精确成形制造薄壁复杂件的重要先进技术。

基于管坯的内高压成形是实现封闭空心截面轻量化结构件制造的主流技术,而且有节约材料、缩短工艺流程、提高零件疲劳强度和刚度及降低生产成本等优势。欧美发达国家系统研究了内高压成形缺陷与加载路径的关系、成形区间

与成形极限、壁厚分布、管材性能测试及预成形坯优化等基础理论问题,并在汽车工业实现大批量应用。1999年国内开始系统研究内高压成形基础理论、工艺和设备关键技术^[4],研制的400MPa多工位数控内高压成形装备已在工业生产中得到应用,成形出奔腾轿车副车架、克莱斯勒300C轿车仪表盘支架、底盘前梁、火箭接头等用于实际。实现了难度极大的超薄三通管件和异型管件成形,其径厚比达到了180,膨胀率达110%。但总体来看,我国内高压成形的基础理论和关键技术与欧美差距在10年左右时间,工业应用方面差距则在20年左右的时间。

铝合金大口径小弯曲半径薄壁弯管与钛合金弯管是大飞机、先进军机和发动机上有广泛应用价值的关键轻量化构件,也是“血管”件。多模具约束下的数控弯曲成形是能够实现其高效、节约、稳定、数字化精确成形主流先进技术。然而,该过程需要多种模具协同作用和严格配合,需要解决多场多因素耦合下起皱、回弹和截面畸变等难题。国外相关先进航空企业已掌握数控弯管技术。我国于1995年开始在该领域进行研究,并取得了重要进展,已成功实现了6061铝合金大口径薄壁管小半径弯曲成形($\phi 127\text{mm} \times 1.245\text{mm} \times R190.5\text{mm}$,相对弯曲半径1.5D),为解决我国大飞机与先进军机研制在这方面的重大需求和难题奠定了基础^[9]。

4. 轻质高强板材复杂件精确成形领域需解决的问题与发展趋势

与传统低碳软钢相比,轻质高强度钢板冲压更易破裂,尺寸和形状精度不能倾向更大,对模具寿命影响大,特别是对大型整体模具影响更是如此。高强度钢板、铝合金板、激光拼焊板和管材的广泛应用以及板材热成形等新技术的发展,需要重点研究解决如下科学问题以支撑轻质高强板材复杂件精确成形的发展:

轻质高强板材的成形特性如何评价?复杂加载下本构关系与成形极限如何准确描述与确定?回弹如何精确预测与控制?刚性模具整体冲压成形工艺与大型模具如何快速优化设计以实现精确成形,并提高模具寿命等。

不同管材在内高压成形三维应力状态和多模具约束数控弯曲条件下的摩擦行为、塑性失稳行为如何?成形规律如何?管材性能和成形极限圈的如何准确确定?

为了真正使成形过程不但能“成形”,也能实现“成性”,以便使成形零件同时满足尺寸精度与性能两方面的要求,应重点研究微观结构演化与表征、宏观本构建模支撑成形过程的多尺度模拟方法等,以及材料制备与成形智能化。

总体上,轻质高强板材复杂件精确成形领域研究的主要发展趋势是:

(1) 刚性模具整体冷、热冲压成形、柔性增量成形(液压成形、时效成形、多点、单点、旋压等增量成形)成为实现轻质高强板材复杂件精确成形的重要

手段。

(2) 内高压成形正在向超高压成形、热态内压成形、超高强钢成形和异型管成形等方向发展,高性能轻合金管多约束数控精确成形方兴未艾。

(3) 轻质高强度板材、管材宏微观耦合的本构理论、强化机理和破裂准则是板材精确成形成性的研究基础与重点。

(4) 大型模具的模块化、并行设计理论与制造技术、模具表面磨损的定量分析与寿命的控制也是重要发展方向。

1.3.3 高效高性能精确体积成形

体积塑性成形可以有3种技术路线:一是用大型设备对坯料进行整体加载成形;二是利用专用成形设备进行连续或断续局部加载成形;三是局部加载成形与整体加载成形相结合的技术路线。第一种技术路线一次性设备投资大,成形载荷与能耗大,但工艺相对简单,生产效率高,设备的控制相对容易;第二种设备投资少,成形载荷与能耗小,但工艺复杂,设备的控制相对要求高;第三种,结合前两者的优点,使体积分配转移与精压成形有机结合。

整体加载成形的主要方法及工艺有精密模锻、等温锻造、多向模锻、自由锻和挤压等。它一直是塑性成形的主要手段之一。例如,美国Cameron公司采用300MN的多向模锻液压机可以成形大口径的多通道大型零件^[10],一直占领着该成形领域的国际制高点。我国在该领域也进行了大量研究工作,并取得重要进展,如研究发展了钛合金近 β 锻造新工艺,发明了等轴 α 、条状 α 与 β 转变基体新型的三态组织,开创了通过工艺途径来充分发挥钛合金性能潜力的途径,解决了要求钛合金锻造时强度-塑性-韧性等匹配的重大需求和难题^[11]。

局部加载成形的主要工艺有楔横轧、辗锻(含精确旋转辗锻)、辗环、摆辗等。其中,楔横轧是一种高效节能节材零件先进成形技术,与传统的切削、锻造零件成形工艺比较,它具有提高生产效率3~7倍,提高材料利用率20%~40%,降低生产成本30%左右等优点。基础研究为我国在楔横轧成形研究与技术开发方面处于国际领先^[12]做出了重要贡献,目前拥有楔横轧轴类零件轧制生产线近200条,生产零件有数百种,每年生产零件20多万t;还提出了凸轮轴与此凸轮轴高效精确轧制成形的办法。但我国在轴承环件精密冷轧成形技术、齿轮冷摆辗精密成形技术、丝杠精密滚轧成形技术等方面的研究与创新能力还十分薄弱,与国际先进水平(瑞典SKF,日本NSK,德国FAG等)有较大差距,以致重要主机的轴承,如160km/h以上的高速铁路轴承、中高档数控机床和加工中心轴承、中高档轿车轴承、风电机组轴承高速精密冶金轧机轴承等,主要依赖进口。

我国高效高性能近净体积成形研究与发展需要重点研究解决的科学问题包

括:整体加载和局部加载力场与温度场耦合作用下材料变形流动行为;材料的微-介-宏观组织演化规律及其对零件的形状、尺寸与性能作用机制;整体与局部加载下成形过程和模具的优化设计与精确控制。

总体上,高效高性能近净体积成形领域研究的主要发展趋势是:

- (1) 高效、节约型高性能整体与局部加载精确成形新原理与先进技术基础。
- (2) 整体与局部加载成形的集成研究,以实现高效高性能体积精确成形。
- (3) 基于多场耦合多尺度宏微观建模的体积成形精度与性能协同控制研究。

8.3.4 超常条件下焊接与高效焊接

高效、精密、无污染焊接技术的快速发展^[13, 14]需要焊接成形制造基础研究的有力支持。我国对焊接基础研究非常重视,近年来每年平均有40项左右的项目获得国家自然科学基金的资助,涉及焊接电弧物理、焊接冶金、扩散连接、无铅钎焊材料与微电子连接、材料的表面改性、低温节能焊接新方法、复合焊接方法及机理等,几乎覆盖了整个焊接领域。与自动控制、计算机、电子学、声学、光学和摩擦学等进行多学科交叉,对激光-电弧复合焊接、电子束焊接、微连接、机器人焊接和搅拌摩擦焊接^[15]等技术基础进行了大量研究。

我国对焊接空间焊缝质量智能控制技术及其系统进行了深入研究,掌握了焊接机器人的核心技术,提出了机器人焊接柔性加工单元(WFMC)的概念,把多项技术集成为焊接柔性加工系统,实现了具有控制智能,能适应不确定因素空间焊缝的焊接,并自主开发了弧焊机器人系统等。

焊接在国际合作研究方面也取得了重要的进展。例如,在中俄双方政府的资助下,与俄罗斯包曼国立技术大学开展了焊接接头质量检验与寿命评估的联合研究;与德国亚琛工业大学联合开展了电子束焊接及质量控制的研究。此外,还从乌克兰巴顿电焊研究所、英国焊接研究所引进了多项焊接技术,如搅拌摩擦焊技术引进专利使用权以后,进行了设备开发和应用基础理论研究,研制的设备已在航天飞行器、交通车辆、船舶制造等方面得到应用,正在向汽车制造与航空等领域推广。

我国焊接成形研究发展虽然很快,但存在如下主要基础问题需要研究解决。

1) 优质高效焊接新方法 & 轻质高强材料的焊接基础问题

航空航天、核能、造船、汽车等领域的快速发展需要实现高性能金属材料、金属间化合物、金属基复合材料、无机非金属材料、高纯功能材料和生物材料等新材料的焊接或连接。例如,为减轻车身的重量,要解决高强钢的应用导致的焊接问题。航天领域中卫星及火箭的姿态控制发动机要求高温下工作,为了解决减

重和高性能之间的矛盾,需要采用复合材料和金属焊接制造发动机的部分结构,如尾喷管为耐高温复合材料,发动机头部为钛合金,二者需要焊接在一起。高强铝合金、镁合金、钛合金等轻质高强材料的越来越广泛的应用,对焊接接头的性能,特别是对疲劳性能提出了更高的要求。在微电子组装中,为了实现新材料及异种材料的连接,表面活化连接新方法也正在逐渐受到人们的重视。

上述客观需求需要研究发展优质高效焊接新方法 & 轻质高强材料的焊接先进技术,应开展复合热源的焊接基础研究,包括激光-电弧复合焊接, PLASMA-MIG、TIG-MIG 电弧复合焊接, 超声-搅拌摩擦复合焊接技术, 超声-钎焊及超声-扩散连接, 熔焊-钎焊复合焊接、双面电弧焊接等及新技术基础研究。

2) 超常条件下焊接基础问题

超常条件涉及超常结构及超常环境。超常结构是指超大厚度、超大焊接截面、复杂及多维焊缝,以及 IC 产业中的微电子互联及微小尺度的焊接结构等。航空航天、核能、海洋等工程涉及很多大型复杂结构,海洋平台、大型舰船、矿山与工程机械中,几乎都是大型结构和高强材料。8 万 t 水压机制造中就涉及的焊接结构的最大厚度达 600mm。这些结构如果采用常规的焊接方法很难稳定控制焊接质量和实现高效焊接。另外,一般重量超过 200t 的大型铸锻件,本身易出现如疏松、裂纹等缺陷。因此,迫切需要研究与发展大型复杂构件等超常结构的高效焊接方法及技术。

特种环境下的焊接主要是指空间环境、水下环境及核环境下的焊接与修复。近年来,随着深空探测及空间开发的进行,需要研究空间环境下的焊接方法、焊接机理、焊接热源特性及传热传质、焊接材料冶金过程、焊接缺陷产生机理等问题。目前,乌克兰巴顿电焊研究所已研制出空间焊接设备,并进行了大量的试验研究,美国、日本、欧洲等也相继开展了有关研究工作。日本大阪大学研究获得了微重力与地面焊接条件下的接头组织。开发和利用海洋资源,需要建造海洋平台,铺设及维修海底管线,建设海底工作站或实验室,这就需要研究与发展水下焊接与切割技术。另外,核环境下的焊接技术近年来随着核电设施的发展而受到各国的重视,特别是核设施在运行过程中的检修及出现故障时的维修都是在辐射环境下进行,为了减少环境对焊接操作人员的污染,应采用专门的自动化焊接设备及焊接技术,因此应研究解决遥控焊接技术及机器人自主焊接技术。

3) 焊接物理过程及焊接冶金基础问题

为了进一步探索新的焊接方法,提高自动化焊接程度和实现焊接质量的实时控制,应对焊接中的物理、化学现象及过程进行深入研究,找出其内在规律,提取焊接过程的特征信息,经计算处理后用于焊接控制。主要基础问题包括焊接过程中电弧、激光-电弧、熔滴及溶池信息描述、电弧作用机理、固-液-气作用过

程及控制、柔性焊接过程控制、焊接路径识别及自主规划(智能焊接)、高速过程中的焊接质量实时检测与控制等。

总之,超常条件下焊接与高效焊接领域研究的主要发展趋势是:

(1) 深入研究轻质高强度材料优质高效焊接新方法基础问题,包括激光电弧复合焊接、超声-搅拌摩擦复合焊接、超声-钎焊及超声-扩散连接以及熔焊-钎焊复合焊接等。

(2) 系统研究大型复杂结构与特种环境下的焊接基础问题,包括空间环境下的焊接、水下焊接及核环境下的焊接与修复等。

(3) 深入研究焊接物理过程及焊接冶金问题,实现大型结构的焊接过程传感与焊接质量控制,包括电弧及熔池等信号的声光传感及信号处理等。

8.3.5 特大型构件成形性一体化制造

2005年我国大型铸锻件的使用量就占世界总量的60%,已成为世界大型铸锻件使用第一大国。我国国防、电力、船舶、冶金、石化及重型机械等领域需要特大型高性能轻合金枢类件、壁板类件、核电转子、特大曲轴、特大型轧辊和大型环类件来支撑。大型铸锻件高端成形研究与制造主要集中在日本、韩国、德国、美国等国家。我国第一重型机械集团公司、第二重型机械集团公司和上海重型机器有限公司在大型铸锻件的制造能力与水平方面近年来取得长足进步。例如,2009年采用重560t的特大型钢锭在160MN水压机上成功锻造我国首支1100MW核电发电机半速转子,使我国核电产品制造获得重大突破。所锻造出的转子直径2050mm,总长16400mm,坯料重310t。但总体来说,我国在这一领域的研究与国家的重大需求和国际水平有很大差距。例如,我国已具备制造百万千瓦机组成套设备的能力,可为我国实现节能减排目标所急需的重大装备——超超临界汽轮发电机组提供支撑,但其中的高中压转子却全部依赖进口,而发达国家历经20余年研究掌握了其中的关键。

1. 特大型构件成形性一体化制造的基本问题

特大型构件制造是集材料、铸造、锻造、焊接和热处理等为一体的综合技术^[16]。由于特大型构件重量重特别是尺寸大的特点,使得所要用到的特大型铸锭在凝固成形过程可能产生偏析、缩孔、非金属夹杂物和组织不均匀性等多种缺陷,而这些缺陷将影响后续锻造与热处理工艺。如何创造合适的成形方式与成形条件来抑制或消除这些缺陷是一项极具挑战性的研究工作。例如,可通过塑性成形的墩粗和拔长等合理的锻造工序与优化的工艺参数以实现打碎锻件体内碳化物、压实疏松、锻合孔洞、细化晶粒、改善铸态组织,从而获得均质致密的坯料

来降低,甚至消除这些缺陷。但后续的锻造与热处理过程中又可能产生新的缺陷,这将会很大程度上影响到大型铸锻件的成品率和使用寿命。因此,特大型铸锻件成形制造过程十分复杂,涉及材料科学、弹塑性力学、冶炼凝固技术、热处理、组织性能优化控制等领域的交叉与融合研究。淬火智能控制可通过调节淬火介质流场和不同阶段冷却时间,实现合理冷却,保证高性能大型构件的淬透,而且可使应力最小,有望为解决大型构件高性能难题做出贡献。因此,特大型构件制造特别需要耦合多种成形方式和多尺度效应的成形成性一体化制造基础研究的支撑。

特大型构件制造的主要途径之一是利用巨型压力机强力模锻成形。美国、俄罗斯、法国等发达国家拥有450~750MN级的巨型模锻液压机。我国已建和正在建造多台1.5~1.8万t的锻造液压机,正在设计制造4万t的航空模锻液压机,于2006年投巨资启动了8万t巨型液压机的研制。为了使大型整体薄壁复杂铝型材在大飞机、鱼雷、导弹和高速列车等领域广泛应用,急需开发大型铝型材快速等温挤压技术与装备,为此我国研发了100MN、并正在研发125MN等油压双动铝挤压装备,即将建成世界上最大的3.6万t大口径钢管垂直挤压成套装备。为充分发挥这些重大装备的能力,如何从全过程研究与发展与之配套的创新成形成性一体化制造理论与成形质量控制及模具技术是需要解决的关键科学与技术问题。

2. 提高特大型构件成形制造能力的核心关键技术基础

如何创新成形技术,提高核心关键成形技术能力,以突破设备能力的限制是特大型构件成形成性一体化制造关注的焦点问题之一。其中,局部加载等温增量成形技术以及基于焊接或连接的组合成形技术是该领域有发展前途的高性能精确成形技术。例如,高性能轻合金大型整体构件是大运输机与新一代战机中广泛使用的用以减重、提高飞机性能关键构件。美国通过工艺创新研究在4.5万t压机上成功制造了投影面积达 5.53m^2 的大型整体钛框。我国目前现有最大的压机是3.5万t,由于未深入研究并掌握核心关键成形技术,所能稳定制造的整体钛框面积不到 1m^2 。对于钛合金大型整体钛框,不得不采用分多段锻造成形,然后焊接成整体,再进行数控铣的工艺路线和制造技术,从而导致获得的构件可靠性低、重量重、制造周期长、而且昂贵的钛材利用率极低(10%以下)。通过局部加载成形与等温成形的基础研究及集成创新,有望发展省力成形技术,提高关键成形技术能力,突破设备能力的限制,解决成形成性制造难题^[17]。其中,需要重点研究解决的关键科学问题包括:局部加载等温多场耦合下大型复杂整体构件不同变形区及过渡区宏观不均匀变形和微观组织演化规律;缺陷形成机制与预测;成形成性一体化调控方法;坯料预成形过程与模具如何优化设计和精确控制

方法等。大型复杂环件是航空、航天、风电、核电工业迫切需求的一类关键零件^[28]，如航空发动机上涡轮盘等大量环盘类零件，登月工程、风力发电、核电站及原子能工业用大型环圈等，其环件直径可达10m，高度可达4m，且大多为非矩形的复杂异型截面环，成形质量要求高，所用材料大多为昂贵的难变形材料，如钛合金、铝合金和高温合金等。这些环件的优质成形制造迫切需要研究发展局部加载增量成形——径轴向环件精确轧制先进成形理论与技术。其中，多参数耦合下非对称、非稳态、三维连续时变、宏微观变形机理以及成形过程优化设计与稳健控制及集成建模仿真是需要解决的难题。再如，先进飞机、航天器、火箭及导弹技术的快速发展，需要大量采用大型整体复杂薄壁壳体（曲母线，具有突变壁厚或起伏形状特征的大型薄壁曲面壳体）以减重和提高整体性能和结构效益。其成形性制造面临的挑战是：采用什么局部加载增量成形方式和成形条件？逐点逐次成形机制是什么？旋轮加载轨迹如何优化设计与控制？

总体来看，特大型构件成形性一体化制造领域研究的主要发展趋势是：

(1) 研究铸、锻、热处理及外场条件的耦合对大型坯料组织性能的影响；通过集成创新发展特大件高性能坯料的成形性技术。

(2) 特大型高性能构件的多场耦合多尺度效应下成形性一体化质量控制基础研究与关键技术研发是重要的发展方向。

(3) 研究与发展节约型的局部加载省力成形和组合成形先进技术，解决特大件高性能构件的成形性制造难题。

8.3.6 低成本批量微成形

近10年来，美国、日本、欧洲、韩国等针对新能源装置、微电子产品、医疗器械与微小武器系统中具有微细特征零件微成形需求制订了各种研究计划，国际学术界也对介观尺度下微成形制造研究给予了高度重视^[19, 20]，已经形成一支比较活跃的介观尺度下微成形制造研究力量，并取得了重要研究进展。20世纪90年代，日本产业技术研究所投入250亿日元率先开展Micro Factory原型研究；Olympus等许多知名企业也在微成形与微型机械研究方面进行大量研究；美国NSF自2000年开始对介观尺度微成形制造的基础理论、微细机床工程化以及工艺研究进行了持续资助；欧盟通过“4M (Multi Material Micro Manufacture Network of Excellence)”跨国研究计划先后在介观尺度微成形制造上投入15亿欧元，在微细零件成形与装配技术上积累了大量典型案例；韩国在2004~2009年间也投入6000万美元用于“Development of Micro-factory System for Next Generation”计划；这些研究工作为介观尺度微成形制造技术的工程应用提供了基础。

介观尺度下微成形工艺效率高,适合低成本可控批量制造。国内外学者结合典型微细零件开展了体积微成形和薄板微成形研究,先后研究制造出微连接器、微弹簧、螺钉、顶杆、齿轮、阀体、泵和叶片等微型零件,还研究了微拉深、微冲裁、增量成形及微弯曲等薄板微成形工艺。例如, Saotome 等采用闭式模锻成形工艺,成形出模数为 0.1mm、分度圆直径分别为 1mm 和 2mm 的微型双齿轮,并组装出减速比为 1/128 的微型减速装置; Vollertsen 等采用微拉深工艺成形出应用广泛的微型圆筒件; Manabe 采用多步微拉深成形工艺,成形出不同直径的微型圆筒件; Mori 采用直径为 14 μm 的 SiC 纤维冲头在铝合金、铜合金和不锈钢等多种材料上成功冲出微型孔,该类微型孔件在打印机、印染机等行业有着广泛的应用前景。针对电子行业中使用广泛的微型插件、引线框等, Shinko 等使用微冲裁和弯曲复合工艺,研究并成功研制出微型引线框。Hayakawa 研究了板材的增量成形工艺,不使用模具成形出复杂的三维微小壳体零件。国际知名公司如飞利浦、西门子等开发出一系列获得应用的微型零件。

微成形工艺的实现与研究需要微成形装置的保证。基于新型驱动方式的微成形装置受到重视,如直线电机、电磁致动器和压电陶瓷等应用到微成形系统中,并借助计算机、微型传感器以及数据采集系统实现对微成形过程的实时控制和数据处理。Saotome 等自 20 世纪 90 年代以来一直致力于微成形装置的研究,设计和制造了多种形式的微成形系统,如基于压电陶瓷驱动的微反挤成形系统,集合了微型模具、加热器、压电陶瓷和微传感器等部分。德国的 BIAS 研究所针对微型零件的成形研制了基于直线电机驱动的微成形设备。

国内多家高等院校和科研院所对微成形理论、关键技术进行了大量研究,建立了考虑尺度效应的“宏-微”跨尺度本构模型,采用晶体塑性理论和分子动力学与有限元耦合对微成形机理进行了数值仿真,研究了非晶材料的微成形、超塑性材料微成形、超塑性微挤压、超导带材宏域微成形、薄板微成形中的尺寸效应、薄板弯曲成形模拟及薄板微细流道成形工艺,研制了基于压电陶瓷驱动和直线电机驱动的微成形设备。

介观尺度下微成形技术是实现微细结构可控批量、低成本制造的关键,必将成为未来微细制造技术的研究重点。目前,微成形技术研究主要体现在成形尺度对材料、工艺过程、工模具设计与加工、产品质量检测和控制的影响规律方面,旨在建立较为系统的介观尺度成形工艺设计理论和方法来指导成形模具设计和成形过程控制。零件尺度参数对材料的影响主要表现在成形过程中流动应力、各向异性、延伸率及成形极限等方面,这些都与材料的微观晶体粒度及产品的微小结构有关;成形尺度对材料的影响进一步波及具体的工艺过程,如成形力、摩擦、回弹、毛刺以及制品精度等都表现出与宏观工艺不同的特性,在使用有限元分析

模拟中也必须考虑这些影响。因此,如何设计介观尺度成形工艺?把宏观工艺参数、结构参数、物理参数简单地按几何比例缩小应用到微成形过程中难以可行,应采用新型的工艺设计理论。此外,产品的微细化还波及整个工艺系统的其他方面,如对微细成形工艺装备应考虑零件的定位精度和传输速度问题,产品的微型化也向成形工艺检测与控制提出了挑战。

综上所述,微成形工艺理论与技术还处于初级阶段。特别是由于成形尺度的减小,导致成形中出现了有别于传统宏观成形的尺度效应现象,使得传统宏观尺度成形工艺理论和技术难以有效地指导这种微成形工艺设计。

总体上,低成本批量微成形领域研究的主要发展趋势是:

- (1) 材料在微观和细观尺度上的非连续、非均质效应已成为研究的重点。
- (2) 微细结构的低成本批量微成形制造技术是重点发展方向。

8.3.7 高性能精确成形过程的建模仿真与优化

模拟仿真与优化技术是提高零件成形质量、节约时间与成本,加快先进材料、高性能精确成形制造研究与开发不可缺少的关键主流技术^[21],发挥着越来越重要的作用。对于大型与复杂件的精确成形过程研究与开发更是如此。美国、欧洲及日本等工业发达国家和地区均把成形制造模拟仿真与优化作为优先资助和发展的领域之一,并已将计算机模拟大量应用于飞机、导弹、汽车等产品的设计和成形制造等研发过程,从而有效帮助实现成形制造零构件的结构与形状设计及成形制造过程的优化控制,预测零件性能和使用寿命等。高性能精确成形制造要求模拟仿真的研究由建立在温度场、速度场、变形场基础上的旨在预测形状、尺寸、轮廓的宏观尺度模拟进入到以预测组织、结构、性能为目的的多尺度全过程模拟仿真^[22]与优化。

铸造 CAE 研究与开发起步于 20 世纪 60 年代,并于 1989 年在德国国际铸造博览会上推出第一个铸造 CAE 商品化软件。铸件充型凝固过程的数值模拟及缩孔缩松预测、应力分析等方面的研究及实用化在国外都取得了很大进展,CAE 商品化软件的功能正向低压铸造、压力铸造及熔模铸造等特种铸造方向发展,代表性的软件有 MAGMA、ProCAST、Simulor、Soldia、Solstar、ANSYS 和 MARC 等。我国的凝固成形模拟仿真技术研究起步较晚,但发展较快,已从早期个别单位单项研究发展成为以高校为主体的具有一定规模的、优势相对集中的科研群体,所开发的商品化软件的部分功能已与国外软件相当,可以满足铸造工厂的一般需要。但需更进一步深入的理论研究,以便建立更为准确的数学模型,并在更宽广的尺度上对铸件的凝固过程及微观组织形成进行数值模拟,预测与结晶有关的缺陷形成及零件在实际使用过程的寿命。特别是大型复杂高性能金属凝固过程的多

尺度、多学科数理建模仿真,凝固过程中形核、枝晶生长及微观组织形成过程的建模与仿真、溶质传输及宏观偏析建模与仿真、凝固收缩特性、缩孔缩松预测判据及其建模与仿真,材料高温力学行为、应力应变模拟及热裂预测判据等应是需要深入研究的内容。

20世纪70年代末,英国的 Zienkewicz 教授就尝试用有限元方法分析金属塑性成形过程,以确定成形中材料的流动状况和应力应变分布等。由于塑性成形过程包含塑性大变形、接触和摩擦等非线性物理现象,特别是体积成形(锻压、挤压、轧制等)中还往往会产生很大的变形畸变,使得数值分析变得十分复杂和异常困难,因此,金属成形的 CAE 技术研究进展缓慢并走过一段曲折的摸索道路,其研究首先在发达国家的实验室、研究所和大学开始展开,现已大规模向专业软件公司转移并从工程角度加以完善。这方面的代表性成果包括 LS-DYNA、ABAQUS、Optris、ITAS-3D、AUTOFORM 与 PAM-STAMP 等大型通用商品化软件。我国在塑性成形技术建模仿真与优化方面已进行了大量研究工作,但主要以引进和消化国外的技术为主,但也开始推出自主知识产权的软件,如 CADEM 和 KMAS 等。该领域存在如下主要问题:

(1) 对材料的成形性能试验及理论分析的尺度大多停留在宏观层次,对于细观尺度和微观尺度的实验与分析较少,对全过程多尺度建模仿真缺乏系统深入研究。要进入到模拟材料微观和细观(多晶体塑性)的阶段,应有更深入的物理模拟实验来对塑性成形理论、反映塑性成形特征的材料宏观微观本构模型、材料参数确定等方面进行支持。

(2) 材料在塑性加工中的断裂损伤的物理模拟研究应进一步深入,否则难以有效建立预测材料断裂损伤的模型和参数,将会导致对不同工艺条件下的成形件断裂预测不准,大大降低数值模拟分析的准确性。

(3) 对复杂大变形模拟精度和效率有待进一步提高;现有 CAE 软件都是解决正向问题的,即给定设计方案后进行仿真分析,帮助设计者判断设计是否合理,但难以给出合理的设计方案;而且对用户要求较高,需用户了解或掌握较多的相关知识并提供较复杂的参数,否则软件的使用价值和效率便难以发挥。

焊接过程数值模拟与仿真的研究和学术交流在国际上十分活跃。国际焊接学会第 IX 专业委员会和奥地利格拉茨工业大学主办的国际专题研讨会“Numerical Analysis of Weldability”,每两年举行一次,至今已经举办了7届。发达国家在这方面投入了大量的人力物力。20世纪90年代,美国能源部组织了一个由美国、日本和欧盟25位焊接专家组成的特别工作组,研讨“焊接科学的模拟仿真”问题,提出了21世纪的重点研究内容。美国国防部联合宾夕法尼亚大学、橡树岭国家实验室、林肯焊接设备公司等不同部门共同进行焊接过程仿真与模拟研究,

从焊接熔滴过渡、焊接熔池的凝固、凝固后的组织和性能、焊接结构应力与变形预测等焊接过程各个环节入手进行了模拟与仿真研究。英国剑桥大学开展了从材料设计与制备、铸造、锻压、焊接及热处理过程的物理模型和数值模拟的全方位研究工作。由于焊接是高温、瞬态、非平衡、强耦合的过程,而且缺乏材料在焊接瞬态的物理、力学特性数据,使得精确数值模拟变得十分困难,在这方面已经落后于铸造、塑性加工和热处理过程。我国焊接模拟研究刚刚起步,对各种焊接现象特别是组织和力学性能的建模尚有许多未解决的难题,阻碍了焊接数字化进程。除了焊接应力与变形的数值模拟在实际中得到了一些应用之外,焊接热过程、焊接冶金与焊接裂纹的数值模拟与实际应用有较大的差距。研发的软件系统,由于缺少焊接接头力学性能模型和焊缝及热影响区组织转变模型,还不能进行焊接接头力学性能准确评定和组织预测及焊接工艺优化设计。这些都是今后该领域应该研究解决的理论和技术问题。

材料内部发生的相变是热处理中最重要的物理现象,相变量精确计算是热处理模拟中的关键与难点,也是一个材料成形过程计算机仿真的共性问题,界面传热也是共性问题。我国热处理数值模拟处于国际领先,在超超临界高中压转子淬火过程温度-相变-应力的耦合模拟等方面取得突破进展。但热处理模拟还存在如下主要问题:①如何实现相变量的进一步精确计算、界面换热参数精确测算,非等速变温过程中的相变与应力场演变及相互作用如何?现有的模型尚不足以反映实际热处理过程的复杂现象,应开发出在全三维尺度上反映多变量相互作用的模型;②应使数值模拟与实验测试、物理模拟、工艺试验和KBE技术的深度结合。

成形制造的智能化,就是应用人工智能、数值模拟仿真和先进数据库等技术,按照使用要求设计材料的成分、组织和性能,在性能设计的同时,设计出切实可行的制备成形工艺,从而实现零构件性能设计与制备成形工艺设计的一体化。成形制造的智能化可在材料设计、制备与成形的全过程中,对材料的组织性能、形状尺寸和表面质量实行精确控制与精确成形制造,从而获得最佳的材料组织性能与成形制造质量。该项技术受到日本、美国等发达国家的高度重视,被认为是21世纪材料制备与成形加工新技术中最具潜力的前沿研究方向。

高性能精确成形制造过程建模仿真领域研究的主要发展趋势是:

(1) 全过程、多学科、多尺度、多功能及高精度、高效率是发展主要趋势,将实现多场和多尺度模拟的整体优化设计和成形全过程的数字化和敏捷化。

(2) 更加关注与物理模拟及理论分析的有机结合,开展特大型和复杂构件成形性全过程多场耦合多尺度建模仿真与优化。

(3) 建立能反映各种因素的相互作用的热处理多场耦合模型及扩展求解域的模拟方法,包括非等速变温过程相变量精确计算及其与应力/应变场耦合的模

型,三维多场耦合的综合换热模型。

(4) 关注成形制造的智能化(控制)技术,通过对成形参数、材料组织和性能等在线闭环控制,实现精确制造,从而获得预期的材料组织性能与成形质量。

另外,粉末材料与复合材料构件的高性能低成本先进成形与成形质量控制技术研究也受到关注,具体内容可见材料学科的规划。

图 8.2 是高性能精确成形制造领域研究发展状态图。

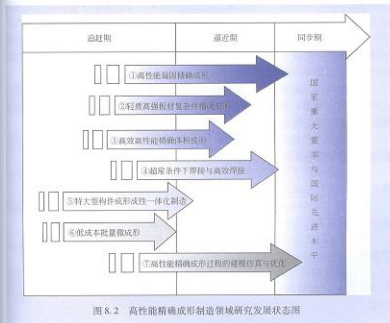


图 8.2 高性能精确成形制造领域研究发展状态图

8.4 未来 5~10 年的研究前沿与重大科学问题

8.4.1 研究前沿

航空航天和汽车等高新技术领域与高端产业的发展,不断要求零构件的高性能、轻量化、高可靠性与功能高效化,由此导致零构件的形状复杂化、大型整体

化、薄壁化、大小几何尺寸极端结合,所用材料难变形又十分昂贵;关键构件的应用又往往处于极端苛刻的环境。因此,只有不断发展技术密集、知识密集与高增值的高性能精确成形制造新原理新技术,并把这种技术发展到极限,发展成为核心关键技术,才能解决问题。这必然要求在技术与科学上的系统深入研究,同时还必须追求研究方法上的系统性与综合性,技术与装备上的系统性和集成性,由此形成高性能精确成形制造科学的创新源头和学科的前沿。因此,发展高性能精确成形制造科学与技术不仅是国民经济发展与国防建设的重大需求,而且是先进制造科学的研究前沿,具有带动国家制造技术和工业技术水平整体提升的关键作用。高性能精确成形制造研究前沿包括以下方面:

(1) 高性能凝固精确成形,主要包括大型复杂整体构件与超薄精密零件超常凝固多场耦合精确成形行为与工艺-组织(性能)-形状(尺寸)关联关系、激光成形与修复等。

(2) 轻质高强板材复杂件精确成形,主要包括轻质高强板复杂件整体模具成形、柔性(增量)精确成形、管材复杂件先进成形的机理、多场耦合成形规律与缺陷控制理论等。

(3) 高效高性能体积精确成形,主要包括不同加载条件下体积成形过程中多场耦合精确成形成性机理与协同控制等。

(4) 超常条件下焊接与高效焊接,主要包括大型复杂结构与特种环境下的高效焊接与新材料及异种材料的优质焊(连)接冶金机理等。

(5) 特大型构件成形成性一体化制造,主要包括不同成形方式、不同加载条件下特大型高性能坯料与构件多场耦合成形成性规律与一体化控制等。

(6) 低成本批量微成形,主要包括介观尺度下低成本批量微成形建模、工艺分析、设计与过程控制方法等。

(7) 高性能精确成形过程的建模仿真与优化,主要包括复杂成形成性多场多尺度全过程精确高效建模、仿真、优化与数字化高性能精确成形关键问题。

8.4.2 重大科学问题

不断要求成形零构件的轻量化、高性能化、高可靠性化与功能高效化,使得成形零构件所采用的材料与结构必须是轻质高强材料和结构,但实际上却是难变形材料和复杂难成形结构,由此导致零构件在成形过程中要经历复杂的不均匀变形和组织演化历程,并易产生多种成形缺陷。而所经历的成形过程是关于材料、几何、边界三重高度非线性的,对涉及的材料、几何与工艺等多种成形参数及其耦合作用极为敏感,因此,这样的成形过程的优化设计与稳健控制极其困难。如

可从多场耦合、多尺度与全过程的角度深入研究并深刻认识大型复杂构件高性能精确成形性一体化的机理与规律,把握成形性一体化调控的理论与方法,进而发展数字化高性能精确成形制造科学与技术,是高性能精确成形制造前沿领域需要解决的重大科学问题。

1) 重大科学问题一:大型复杂高性能构件成形性一体化制造

(1) 轻质高强材料大型复杂高性能构件成形制造过程中宏观尺寸、性能变化与微观组织演化关联关系与成形性调控。

(2) 多场耦合多尺度效应下大型复杂高性能构件的局部加载(省力)成形、组合成形与成形性一体化控制理论。

(3) 超常结构、超常环境下与新材料及异种材料的高效焊(连)接的非平衡状态下冶金机理与过程质量控制。

(4) 高性能轻合金超薄精密件凝固成形规律,大型构件多场耦合下超常凝固成形行为,瞬态高功率密度能场对材料的作用机理,激光精确成形与修复过程调控。

2) 重大科学问题二:高性能精确成形制造过程的多场多尺度全过程建模仿真与优化

(1) 大型复杂高性能构件成形性全过程多场耦合多尺度建模与模拟仿真方法,介观尺度下微成形过程建模仿真方法。

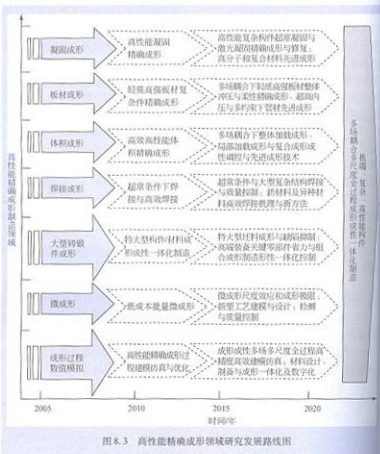
(2) 多场下大型复杂高性能金属零部件凝固与塑性成形性规律,超常条件下焊接与高效焊接行为的多尺度全过程模拟仿真与分析。

(3) 基于多场多尺度全过程模拟仿真的大型复杂高性能构件成形性过程的多参量、多目标、多约束优化设计、稳健控制与及数字化精确成形。

(4) 零件性能与材料制备成形工艺的一体化设计、数字化与智能化,包括材料设计、制备、成形与热处理全过程组织、形状、尺寸和质量的精确控制方法。

8.5 未来5~10年的发展规划

针对未来5~10年的高性能精确成形制造领域的研究前沿与重大科学问题,建议优先资助方向为:高性能凝固精确成形、轻质高强板材复杂件精确成形、高效高性能精确体积成形、超常条件下焊接与高效焊接、特大型构件成形性一体化制造、低成本批量微成形,以及高性能精确成形过程建模仿真与优化等。发展规划路线图如图8.3所示,具体表现在如下7个方面。



1. 高性能凝固精确成形

(1) 大型金属构件多场耦合超常凝固成形。主要包括：大型复杂薄壁件铸造成形中尺寸精度及表面质量精确控制原理；大型零件多场耦合作用下非均匀形核及相变界面形态形成规律与内部质量控制方法。

(2) 超薄、精密零件及高性能轻合金凝固成形。主要包括：面向高温合金

定向柱晶及单晶空心涡轮叶片等复杂件的精确定向凝固成形规律与过程控制；高性能轻合金件和超薄精密复杂件精确凝固成形过程机制与控制。

(3) 大型整体与复杂高性能金属零部件激光等快速凝固精确成形。主要包括瞬态高功率密度能场对材料的作用，钛合金等高性能大型整体、梯度材料等构件激光凝固精确成形与修复中的应力形成、分布规律与复合制造的力学性能匹配关系。

(4) 高分子材料与复合材料构件先进成形。主要包括振动、超声、强电磁等外场条件下形态结构演化与制品性能间的关联建模、形态结构控制的理论、方法与绿色成形装备；复合材料高性能低成本成形方法。

2. 轻质高强板材复杂件精确成形

(1) 板材成形过程中多场耦合与微观组织演变及调控规律；温度场-应力场耦合下材料性能变化规律和成形机理；加热和冷却过程中的宏微观本构关系与材料强化规律；复杂件成形性的新原理与新方法。

(2) 轻质高强板材冲压与柔性精确成形机理。主要包括轻质高强板材刚性模具整体冷、热冲压与柔性增量精确成形机理、不同成形模式下影响因素、影响机制、变形规律与成形参数优化方法等；高精度长寿命大型模具设计基础。

(3) 超高压作用和多约束下管材塑性失稳行为和变形规律。管材超高内压作用下变形、失稳起皱、开裂机理与摩擦行为；钛合金、铝合金等管材多约束复杂加载下成形规律、成形缺陷与回弹控制。

3. 高效高性能体积精确成形

(1) 复杂体积成形过程中多场耦合下宏微观力学与组织性能演化、成形性协调控制；局部加载成形与整体加载成形集成的复合成形先进技术基础。

(2) 针对优质、高效、精确、节约型冷、温、热整体成形新工艺与先进技术基础，包括精密模锻、等温精锻、多向模锻、挤压等。

(3) 面向不同材料复杂件的优质、高效、精确、节约型局部加载连续成形新工艺与先进技术基础，包括模横轧、斜轧、辗环、辗锻、摆辗等。

4. 超常条件下焊接与高效焊接

(1) 复合热源高效焊接机理与新方法，包括激光-MIG 电弧作用机理、超声辅助搅拌摩擦焊接的金属流变行为、超声-钎焊及扩散连接的界面反应、熔焊-钎焊复合连接机理和多热源焊接新方法及其机理。

(2) 新材料及异种材料的连接，包括面向新材料的高效焊接方法、焊接裂纹产生机理及防治、陶瓷及其复合材料与金属的界面反应、高强合金的接头性能

控制、薄壁多维结构的焊接变形控制及提高疲劳性能的方法。

(3) 特种环境下的焊接,包括核环境、水下及空间焊接的遥控及自主关键技术,太空焊接地面模拟(包括激光及电子束焊接的传热传质、温度场及力场与材料的相互作用、微重力环境下电弧形态等)。

(4) 大型复杂结构的焊接及接头质量控制,包括大型复杂构件焊缝成形及变形控制、缺陷检测及寿命评价,复杂构件虚拟焊接与模拟仿真,高效焊接过程中焊接质量实时检测与控制,以及自动化及柔性焊接过程控制基础理论。

5. 特大型构件/材料成形性一体化制造

(1) 铸造、锻造与热处理规范对特大型坯料与成形件组织性能的影响规律;预制坯成形与缺陷抑制技术;多场耦合下淬火智能控制关键基础问题。

(2) 特大型高性能构件的整体加载成形、局部加载(省力)成形、分段成形组合制造等多场耦合多尺度效应下关键基础问题。

(3) 面向大型高性能轻合金框类件、壁板类件、超超临界汽轮高中压转子坯料、曲轴、特大型轧辊和环类件的成形性一体化制造质量控制基础。

6. 低成本批量微成形

(1) 微成形过程中的尺度效应和成形极限准则,包括材料与制造界面力学行为的尺度效应,介观尺度下的材料本构模型,以及微成形性能、失稳模式、成形极限评价标准和预测。

(2) 微成形新工艺分析建模和工艺设计方法,包括工艺过程摩擦模型、微/纳尺度到宏观尺度变化过程中材料及其接触界面力学行为的统一描述,以及微成形工艺的介观尺度建模方法和工艺综合优化。

(3) 介观尺度制造过程检测与质量控制,包括介观尺度成形及新工艺在线测量原理和方法,成形缺陷控制方法,工艺与工艺顺序及其耦合作用对产品质量的影响规律,以及相融合的工艺过程控制方法。

7. 高性能精确成形制造过程的精确高效建模仿真与优化

(1) 多场多尺度模型与成形性全过程模拟仿真,包括高温、瞬态、非平衡、多场耦合多尺度建模方法,以及多场、多尺度、多功能仿真计算方法。

(2) 大规模复杂成形性过程的高精度、高效率求解方法及并行计算,包括具有较高计算效率和计算精度的新型单元理论和数值模拟方法,基于多CPU的并行计算方法,以及基于GPU的快速计算方法。

(3) 复杂成形制造过程的优化设计,包括复杂成形过程确定与不确定优化

模型的建立, 以及多参量、多目标、多约束、非线性、确定与不确定优化问题的求解方法。

(4) 零件性能设计与材料制备成形工艺设计的一体化、数字化与智能化, 包括复杂成形制造过程中微观组织与界面换热精确表征, 材料设计、制备、成形与热处理全过程中预期的组织性能、形状尺寸和质量精确控制方法、数字化与智能化。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院技术科学部. 我国铸造技术的现状与发展对策. 中国科学院院刊, 2006, (5): 395-398.
- [2] Howard J. Solidification Processing Proceedings of the 5th Decennial International Conference on Solidification Processing. Sheffield: University of Sheffield, 2007.
- [3] 王华明, 张述泉, 汤海波, 等. 大型钛合金结构激光快速成形技术研究进展. 航空精密制造技术, 2008, 44 (6): 28-30.
- [4] 黄卫东, 林鑫, 陈静, 等. 激光立体成形. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [5] Kopp R. Innovations in metal forming in the world. Proceedings of the 9th International Conference on Technology of Plasticity, Gyeongju, 2008.
- [6] 林志钦, 李淑慧, 于忠奇, 等. 汽车板精益成形技术. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [7] Li M Z, Cai Z Y, Sui Z, et al. Principle and applications of multi-point matched-die forming for sheet metal. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture, 2008, 222 (5): 581-589.
- [8] 苑世剑, 刘钢, 何祝斌, 等. 内高压成形机理与关键技术. 数字制造技术, 2008, 6 (4): 1-34.
- [9] Yang H, Yan J, Zhan M, et al. 3D numerical study on wrinkling characteristics in NC bending of aluminum alloy thin-walled tubes with large diameters under multi-die constraints. Computational Materials Science, 2009, 45 (4): 1052-1067.
- [10] Jeswiet J, Geiger M, Engel U, et al. Metal forming progress since 2000. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2008, 1: 2-17.
- [11] Zhou Y G, Zeng W D, Yu H Q. An investigation of a new near-beta forging process for titanium alloys and its application in aviation components. Materials Science and Engineering A, 2005, 393 (1-2): 204-212.
- [12] 胡正寅, 张康生, 王宝雨, 等. 横轧零件成形技术与模拟仿真. 北京: 冶金工业出版社, 2004.
- [13] 林尚扬, 杜兵. 焊接行业现状与自主创新战略. 焊接, 2006, (6): 15-21.

附录 机械工程学科资助重点项目一览表 (2006~2010)

Appendix Key Projects Funded in Mechanical Engineering Discipline (2006—2010)

序号	项目批准号	负责人	项目名称	第一承担单位	申请代码	批准金额	起止年月	备注
1	50535010	闻邦椿	现代机构创新及机械系统动态优化设计理论与方法的研究	东北大学	ED50601	200	2006.01~2009.12	
2	50535020	张飞虎	各向异性软脆功能晶体高效精密和超精密加工技术基础	哈尔滨工业大学	ED50903	200	2006.01~2009.12	
3	50535030	蒋庄藩	微型机械电子系统(MEMS)测试计量技术与理论研究	西安交通大学	ED51202	240	2006.01~2009.12	
4	50535040	袁巨龙	先进陶瓷精密高效加工技术基础研究	浙江工业大学	ED509	150	2006.01~2009.12	
5	50535050	葛世荣	植入假体的生物摩擦学关键基础问题研究	中国矿业大学	ED50504	180	2006.01~2009.12	
6	50635010	高金吉	机械复杂系统建模仿真、运行优化和自愈调控理论与方法	北京化工大学	ED50302	150	2007.01~2010.12	
7	50635020	柳林	特种宏微近净塑性成形基础研究	华中科技大学	ED50802	210	2007.01~2010.12	
8	50635030	任露泉	机械仿生耦合设计原理与关键技术	吉林大学	ED507	170	2007.01~2010.12	
9	50635040	宋 欢	微细电加工及其微小装备的基础研究	南京航空航天大学	ED512	180	2007.01~2010.12	

续表

序号	项目批准号	负责人	项目名称	第一承担单位	申请代码	批准金额	起止年月	备注
10	50635050	曹攀	铋系高温超导带材节能高效形成加工基础研究	清华大学	E0508	160	2007.01 ~ 2010.12	
11	50635060	虞烈	资源节约型高速驱动系统创新设计理论、方法和技术研究	西安交通大学	E050601	150	2007.01 ~ 2010.12	
12	50730007	温诗铸	纳米器件中的表面界面行为与控制	清华大学	E0512	220	2008.01 ~ 2011.12	学部优先资助领域重点项目群
13	50730008	张亚非	场效应纳米器件中表面/界面的行为与控制	上海交通大学	E051204	180	2008.01 ~ 2011.12	学部优先资助领域重点项目群
14	50730009	刘俊	e 指数半导体器件嵌入式微纳机械结构高灵敏传感器基础研究	中北大学	E0512	180	2008.01 ~ 2011.12	学部优先资助领域重点项目群
15	50735001	张永康	基于孪微光冲击波效应的非传统制造原理及方法研究	江苏大学	E0509	150	2008.01 ~ 2011.12	
16	50735002	黄卫清	压电精密致动技术的基础研究	南京航空航天大学	E050102	150	2008.01 ~ 2011.12	
17	50735003	郭继贵	恶劣现场条件下超大空间坐标精密测量原理与方法研究	天津大学	E051102	150	2008.01 ~ 2011.12	
18	50735004	李伟	海洋流体动能利用机械装备应用基础研究	浙江大学	E0506	160	2008.01 ~ 2011.12	
19	50735005	张治民	重大复杂构件多向主动加载控制成形基础研究理论	中北大学	E0508	170	2008.01 ~ 2011.12	
20	50735006	徐滨士	机电产品可持续性设计与复合再制造的基础研究	中国人民解放军装甲兵工程学院	E0506	180	2008.01 ~ 2011.12	

续表

序号	项目批准号	负责人	项目名称	第一承担单位	申请代码	批准金额	起止年月	备注
21	50735007	段吉安	阵列波导器件封装制造的基本原理与关键技术	中南大学	E0512	180	2008.01 ~ 2011.12	
22	50735008	王家序	新型高性能传动件及系统的可靠性设计理论与方法	重庆大学	E0502	180	2008.01 ~ 2011.12	
23	50830201	袁德芳	飞行器智能结构系统的集成研究	南京航空航天大学	E0503	220	2009.01 ~ 2012.12	学部优先资助领域重点项目群
24	50830202	李平	自供电智能传感器基础及关键技术研究	重庆大学	E051103	190	2009.01 ~ 2012.12	学部优先资助领域重点项目群
25	50835001	贾振元	多源约束面形再设计类复杂曲面零件的加工理论与技术	大连理工大学	E050901	190	2009.01 ~ 2012.12	
26	50835002	郭斌	微型构件精密型微成形关键技术与基础理论	哈尔滨工业大学	E050802	200	2009.01 ~ 2012.12	
27	50835003	涂善东	高温装置结构完整性保障关键基础问题的研究	华东理工大学	E0504	190	2009.01 ~ 2012.12	
28	50835004	熊有伦	大型复杂曲面零件的数字化设计·加工·测量一体化理论与技术	华中科技大学	E051002	210	2009.01 ~ 2012.12	
29	50835005	刘胜	大功率LED制造中的关键科学问题	华中科技大学	E0512	190	2009.01 ~ 2012.12	
30	50835006	王树新	基于环境能源的水下机器人多尺度性能驱动设计方法和动态自适应网络构建技术	天津大学	E0501	150	2009.01 ~ 2012.12	
31	50835007	李洪尘	三维光子晶体微/宏结构可控制造方法及其性能研究	西安交通大学	E050804	190	2009.01 ~ 2012.12	

续表

序号	项目批准号	负责人	项目名称	第一承担单位	申请代码	批准金额	起止年月	备注
32	50835008	谭建荣	复杂机电产品质量特性多尺度耦合理论与预防性控制技术	浙江大学	E0510	210	2009.01 ~ 2012.12	
33	50835009	薛群基	界面减阻与表面行为机理	中国科学院兰州化学物理研究所	E0505	220	2009.01 ~ 2012.12	
34	50930005	汤勇	面向醇类制氢的多尺度微通道反应器设计与制造基础研究	华南理工大学	E050901	200	2010.01 ~ 2013.12	学部优先资助领域重点项目群
35	50935001	王西彬	微细切削刀具设计理论与微铣刀具制造技术基础	北京理工大学	E050901	200	2010.01 ~ 2013.12	
36	50935002	郑宗全	空间新型大尺度可伸展式机构创新设计理论与方法研究	哈尔滨工业大学	E050101	200	2010.01 ~ 2013.12	
37	50935003	何宁	基于多重尺度效应耦合的超硬微铣刀设计理论和制造技术	南京航空航天大学	E050901	200	2010.01 ~ 2013.12	
38	50935004	谢友柏	机械系统集成设计中的知识流理论与建模	上海交通大学	E0506	200	2010.01 ~ 2013.12	
39	50935005	周祖德	基于光纤光栅传感的复杂机械系统损伤动态监测基础理论与关键技术	武汉理工大学	E050302	200	2010.01 ~ 2013.12	
40	50935006	卢秉恒	复杂机械系统装配基础理论与质量保障技术研究	西安交通大学	E051002	200	2010.01 ~ 2013.12	
41	50935007	杨合	钛合金复杂大件等温局部加载不均匀变形与组织一体化测控	西北工业大学	E050802	200	2010.01 ~ 2013.12	
42	50935008	关桥	大厚度钛合金结构电子束焊接制造基础研究	中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所	E050803	200	2010.01 ~ 2013.12	