DOI:10.16262/j.cnki.1000-8217.2009.03.011

·学科进展与展望·

我国机械工程领域研究进展与展望

雷源忠

(国家自然科学基金委员会，北京 100085)

[摘 要] 本文介绍了机械工程科学的定义和范围，综述了该领域的国内外发展现状以及近年来我国机械工程领域的重要进展和成果、主要差距，并对其发展趋势进行展望。

[关键词] 机械工程，研究现状，重大成果，发展趋势，发展预测

1 机械工程科学的定义和范围

机械工程科学是研究机械系统和产品的性能、设计及制造的理论、方法和技术的科学，包含机械学和制造科学两大领域。

机械学是研究机械结构和系统性能及其设计理论与方法的科学，包含制造过程及机械系统所涉及的机构学、传动学、动力学、强度学、摩擦学、设计学、仿生机械学、微纳机械学及界面机械学等。

制造科学是研究制造过程及其系统的科学，涵盖产品设计、成形制造(铸造成形、塑性成形、连接成形、模具制造、表面工程等)、加工制造(超精密加工、高效加工、非传统加工、复杂曲面加工、测量及仪器、装备设计及制造、表面功能结构制造、微纳制造、仿生和生物制造)和制造系统运作管理等科学[1]。

2 我国机械工程研究重要进展综述

机械工程科学研究是先进制造技术的不竭源泉。推动我国制造业自主发展的主要驱动力是先进制造技术，航天和国防先进装备几乎完全立足于自主创新技术。在航空、车辆、家电、微电子、轻工业、石化、工程机械等制造业，自主创新的技术和自主品牌也越来越多[2]。

在国家自然科学基金等的资助下，机械工程研究近年来取得了一系列突出进展和原创性成果，为我国经济建设和机械工程提供了大批新理论、新技术和新方法，在国内外产生了重要影响，有的领域已在国际学术界占有一席之地。

2.1 摩擦学领域

清华大学在纳米摩擦学及其技术研究领域取得了重要进展。在计算机硬盘基片表面超精化学机械抛光(CMP)研究中，提出了超精表面纳米粒子的行为机制，发现了化学与机械作用均衡规律，探索出硬盘基片超精表面新型CMP技术及先进的抛光工艺，使抛光后表面波纹度和粗糙度均低于0.1 nm(纳米)[3]。西南交通大学结合高速铁路中的轮轨关系问题进行研究，首次在试验中再现了轮轨波磨现象，从理论和试验上深入分析了轮轨波磨的形成机制[4]。中国科学院兰州化学物理研究所将研究发明的纳米固体润滑技术用于我国航空航天工程，发挥了重要作用。摩擦学成为我国机械工程学科在国际学术界最具影响的学科之一。

2.2 机器人机构学领域

燕山大学、上海交通大学等以螺旋理论、李群、集合论等为数学工具，提出少自由度并联机结构综合的普适性方法和通用的自由度计算公式，主螺旋解析识别模型理论，利用上述理论综合出数十种新机构，开发出力传感器、微操作机器人、地震模拟器等[5]。天津大学、清华大学等提出基于线性空间理论的少自由度并联机构雅可比矩阵普适性建模方法，开发出5轴联动大型龙门混联机床、高速包装机器人等多种工程化装备[6]。

2.3 机械动力学领域

东北大学提出了概率-等厚筛分理论、振动同步和控制同步理论，设计研制了数十种工程振动机械。南京航空航天大学提出了含时滞控制系统动力学、

本文于2009年2月23日收到.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

含弹性约束的振动控制系统分叉机理和控制方法、含迟滞阻尼振动控制系统的建模和控制方法，美国控制专家 Schaechter 评价为“耳目一新的系统方法”。西南交通大学发展了机车车辆-轨道系统耦合动力学模型，研制了自主知识产权的机车车辆轨道耦合动力学仿真系统和安全性现场测试评估体系[7]。

2.4　机械传动学科领域

南京航空航天大学超声电机研究中心在新型超声电机运动机理、机电耦合模型、驱动与控制技术等方面提出了系统的理论和设计方法，发明了几十种独具特色的行波、驻波超声电机以及驱动器。华中科技大学在高速超精密运动控制研究中，率先发现并阐明了气浮轴承气旋现象产生的机理。重庆大学发明了具有多曲面与直线圆弧凹槽有机组合的水润滑橡胶合金轴承，这种轴承节省了大量贵金属，在国内外船舶等传动系统中得到广泛应用。

2.5　仿生机械和生物制造领域

吉林大学在仿生柔性动态减阻、仿生电渗脱附理论研究中取得了重要进展，创建和发展了机械仿生学科、发明了一系列地面机械脱附减阻仿生技术，并成功地应用于农业机械和国防工程。西安交通大学在人工骨仿生制造研究中建立了骨组织的模型，提出了骨缺损的复合结构修复方法，采用快速成型法制造了人工骨的结构框架，并在动物骨缺损修补中获得成功[8]。

2.6　先进电子制造领域

中南大学提出了“极端制造”的理念。上海交通大学、清华大学等围绕硬盘驱动器和芯片制造中的关键科学问题开展了系统研究，提出了纳米量级划痕深度和长度可控的单颗磨粒磨削方法，建立了硅片自旋转磨削的砂轮临界切深模型；揭示了高加速度运动系统的宽频多模态复合运动特征，提出了高加速度、高精度、高可靠性精密驱动平台的设计理论与控制方法；阐明了超声键合界面原子快速扩散机理，发现了键合界面的“粘滑”运动特性，提出了变参数加载工艺。

2.7　数字制造领域

华中科技大学提出了基于可视锥的几何推理新方法、复杂曲面轮廓误差的统一判别等理论，开发出复杂产品数字建模和可制造性分析软件系统，建立了集成快速测量、数字建模及面向制造设计于一体的系统平台，应用于缸盖类叶片类等复杂曲面零件快速产品开发。武汉理工大学提出了数字制造建模理论、基于制造网格的数字制造资源共享、数字制造环境下敏捷供应链理论模型、数字制造车间智能调度的理论和算法；建立了数字制造环境下虚拟数控加工系统设备远程操作、监控与诊断平台。上海交通大学将距离函数和伪距离函数理论应用于力旋量和运动旋量空间的定性与定量几何推理，建立了夹具和夹持机构的封闭性、稳定性的定性与定量分析和评价指标体系。

2.8　机械测量学科领域

天津大学发明了空间尺寸测量的现场校准方法和装置，解决了现代制造中急需解决的现场校准及其装置问题。清华大学发明了频差大于 40 MHz 双折射双频激光器和测量位移的“激光器纳米测尺”。哈尔滨工业大学发明了高性能系列直线及回转运动基准装置；发明了多种共焦扫描测量装置和显微镜，使水平、垂直分辨力达到了亚纳米量级；为我国研制出第一台圆柱度和微小深孔测量仪标准装置，使我国具备了在该领域进行量值传递和溯源的能力。重庆大学提出了“智能虚拟控件”概念和原理，建立了信号变换的统一模型，研制成功了上千种独具特色的虚拟仪器开发系统。重庆工学院提出了精密位移测量“时空转换”思想，发明了时栅位移传感器及其测试系统，仅用圆周单刻线就实现了任意圆周分度精密测量。

2.9　加工制造学科领域

大连理工大学提出了硬脆材料复杂曲面天线罩精密制造技术与装备。针对天线罩电性能的特殊要求，提出了面向天线罩电性能补偿的精密修磨理论，建立了天线罩综合电性能误差与几何参数补偿量关系的理论模型，发明了数字化修磨装备，解决了国防工程中的一项重大科技难题。湖南大学在高速精密磨削加工研究领域，提出“四点恒线速法”，使非圆轮廓表面磨削力相差十几倍造成的磨削缺陷得以改善，表面质量明显提高。华中科技大学提出了磨削表面烧伤的形成机理、理论模型、参数优化及控制策略，解决了磨削烧伤的难题。

2.10　超精密加工领域

哈尔滨工业大学在微纳米切削过程的加工机理、刀具磨损破损机制、脆性材料超精密切削去除机制等方面进行了深入研究，成功开发多台超精密切削加工专用设备，并已用于激光核聚变关键零件 KDP 晶体的超精密加工。国防科技大学在国内率先突破了离子束和磁流变光学抛光技术，建立了磁流体和离子束等可控柔体介质抛光的基础理论，形

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

成了一整套光学镜面全波段误差控制的工艺路线和设备，可稳定实现平面、球面和非球面镜面形精度(RMS)纳米量级的加工。

2.11 设计学领域

浙江大学针对基于智能计算的产品概念设计与虚拟样机技术进行了系统深入的研究，提出并实现了产品配置、产品变型、产品进化和产品递归这4项大批量定制关键设计技术；实现了产品设计概念的创新生成与设计性能的虚拟仿真验证；研发了计算机辅助产品创新设计技术与系统，并与国外著名CAD系统的数据接口对接。河北工业大学创造性地发展了TRIZ理论，提出了多冲突的定性和定量分析方法与领域解转化技术，归纳了产品创新模糊前端中创新设想4种产生模式。

2.12 成形制造领域

快速原型制造(RPM)是传统制造向多学科交叉和数字化现代制造发展的最具代表性制造技术。西安交通大学、清华大学、华中科技大学等对光固化(SLA)、薄材制造(LOM)、丝材熔覆(FDM)、粉材烧结(SLS)方法进行了深入研究，推动了快速成形学科的形成和发展，RPM技术应用到汽车、医疗康复工程、农业节水器件等领域，推动了新技术的产业化。

湖南大学在汽车覆盖件模具成型理论和技术领域，建立了相对完整的接触碰撞过程仿真理论和方法体系，解决了汽车碰撞安全性和车身冲压工艺分析计算中的共性技术问题。上海交通大学在车身冲压成形研究中，提出了基于变压边力控制技术，实现成形过程中金属流动的精确控制，建立了高强度钢汽车板精益成形技术体系。西北工业大学在轻合金成形中揭示了大型铝型材挤压速度对挤压过程及其温度场变化的影响规律，解决了大型铝型材挤压中温度速度效应及协调控制等重大难题。哈尔滨工业大学在内高压成形研究中，建立了壁厚分界圆和塑性起皱临界应力理论模型，揭示了成型的缺陷形成机制和壁厚分布规律、发明了“有益皱纹”预制坯和降低成形压力方法等核心技术和装备。武汉理工大学应用体积成形理论，发明了滚碾及摆碾设备，成功应用于轴承套的冷压精密成形，大大提高了成形件的强度及制造效率。

2.13 高能束加工领域

中国科学院力学研究所发明了特殊声光开关调制技术，在世界上首次实现将YAG激光毛化技术用于规模生产。湖南大学发明了一种切割焊接用折叠式准封离型高光束质量千瓦级CO_2激光器。江苏大学研制了重复频率千兆瓦钕玻璃激光器和激光冲击成形系统，实现了难成形金属薄板的激光冲击小曲率半模成形。华中科技大学发明了一种新型实用的金刚石圆锯片激光焊接系统。

2.14 微纳制造领域

西北工业大学提出了支持任意流程的MEMS集成设计工具。北京大学开发出三套标准工艺流程，建立了高水平的硅基MEMS加工平台。中国科学院上海微系统所等发明了多层硅微机械结构一次成型技术、玻璃上硅基光波导制造技术和圆片级封装新方法，形成了基于单硅片结构的双面体微机械压阻传感器制造工艺。大连理工大学研制塑料微流控芯片自动化制造装备，掌握了微结构热压成形金属模具、微流控芯片批量制作的关键技术。西安交通大学提出了常温软压印下“保压-释放-固化”的纳米压印工艺，发现了阻蚀胶与模具液-固界面、固-固界面特性对模腔填充质量及其脱模效果的影响规律，实现了50 nm线宽的纳米压印，具有良好的复型保真度。中国科学院物理研究所成功研制出具有对称式机械结构的双探针扫描隧道显微镜(STM)探头。中北大学研制了基于拉曼光谱的圆片级微结构应力测试平台，完成了静态应力和动态应力的测试。

3 机械工程科学领域发展总趋势

我国机械工程研究虽然已经取得了瞩目的创新及进展，但必须清醒地认识到，我国机械工程科学总体上还处于落后状态。主要体现在：中国机械工程的理论、方法和技术对中国制造业的自主创新和发展的贡献不显著；中国学者提出的机械领域的新概念、新理论不多；有重要国际影响的机械工程理论、方法和技术不多；国际机械领域学术界有较大影响的中国学者很少。总体上中国机械工程学术领域在国际上的地位滞后于中国制造业在国际制造界的地位。

未来机械工程领域的发展将主要受到两个轮子的制约和推动：一个是制造业的创新发展，另一个是学科的演变进步。

鉴于未来制造业领域发展的总趋势是全球化、信息化、绿色化、知识化和极端化，机械工程科学的基本任务就是为制造业的“五化”提供所需求的机械系统新理论、新方法和先进制造技术。

随着世界的进步、国家的需求和学科的发展，机械工程科学的发展出现了以下显著特点和趋势：一

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

方面，高技术领域如光电子、微纳技术、航空航天、生物医学、重大工程技术的发展，要求机械与制造科学向这些领域提供更多更好的新理论、新方法和新技术，因而出现和发展着微纳制造、仿生及生物制造、微电子制造等制造科学新领域；另一方面，随着机械与制造科学与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科学技术的交叉，除了推动着机构学、摩擦学、动力学、结构强度学、传动学和设计学的发展外，还产生和发展着仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新的交叉科学。

由于我国未来将大力推进拥有自主知识产权的先进仪器及装备技术，因此，基于自主创新的高技术仪器及装备的设计制造的基础研究将得到更充分地重视和更快地发展；此外，由于 21 世纪我国资源和环境面临空前的严峻挑战，要求机械与制造科学比以往任何时候更重视环境的保护、产品的安全性和绿色度、材料和能源的节省、机电装备的再制造以及新能源制造领域的基础研究。

3.1　机械学领域发展展望

(1) 机构学是机械工程学科中最有代表性的学科之一。机构学研究一方面应注重机构学基础理论研究，以使我国在国际机构学界保持优势地位，另一方面应注重与制造和控制学科交叉，在设计理论和关键技术两个方面同时取得突破，以开发出性能优良且具有工程实用价值的新机构和新装备。工程中存在大量机构，如航空航天器、机器人机构，纺织机械、工程机械、微纳机构、仿生机构等，因此机构学将大有用武之地。

(2) 摩擦学研究自 20 世纪 90 年代起有了长足发展，其基本经验是与纳米、生物、计算机以及与工程问题的交叉结合，发展了纳米摩擦学、生物摩擦学、分子动力学模拟、表面减阻及亚纳米抛光技术等。今后的发展是向学科面更宽的交叉方向——界面机械与制造科学、纳米制造摩擦学和生物摩擦学方向发展。此外，中国摩擦学领域的青年学者应当进一步加强在国际学术界的影响，争取在国际学术界占有更重要的位置。

(3) 机械动力学研究中，非线性动力学、复杂机电系统动力学分析和故障监测等领域已经有了很大的进展和成果，但复杂系统和多场耦合的非线性动力学分析建模和故障预示依然是个国际性难题，大型复杂机电系统动力学设计仿真、微纳系统动力学分析及设计是我国学术界面临的重要前沿课题。

(4) 机械设计学，目前我国制造业中高端技术装备自主产权的产品少，现有机械设计理论、方法和技术落后是其重要原因，急需重点推动我国装备设计技术的发展。要重点推动复杂机电系统的概念设计、复杂系统总体设计、设计支撑系统(设计数据、知识、智能和信息平台)、基于网络的系统性能仿真虚拟设计等领域的理论、方法和技术的发展[1]。

3.2　制造科技领域发展展望

制造技术的发展总趋势是基于资源节约和环境保护基础上的数字网络化、智能集成化、高效精确化及制造极端化技术。采用德尔菲调查方法及研究分析，我国将要重点发展的制造科技主要有以下 8 个领域：

(1) 空天及深海装备制造科技。未来飞机将进一步向大型、快速、轻型、舒适性、安全性方向发展；用于国防的各种飞行器，将向超快、精确、轻微及智能监控方向发展。高速、精确、智能化微型飞行器技术；微小制导技术；超低温、超真空、无重力极端条件下的装备设计与制造科学技术、智能作业机器人、超大型射电望远镜、适于高压腐蚀环境作业的深海装备的设计与制造技术等将得到大的发展。

(2) 信息制造科技。未来 20 年内，量子、纳米或商业基因计算机将问世；网络光通讯技术，卫星通讯技术，基于网络的虚拟制造技术，非硅、量子、纳米、基因计算机芯片及其后封装科学技术将有大的发展；产品信息化和数字化：将传感技术、计算机技术、软件技术“嵌入”产品，实现产品的数字化和智能化；产品设计制造过程的数字化、虚拟化、网络化与智能化。

(3) 微纳米制造科技。从纳米尺度器件发展到纳米尺度产品的批量纳米制造是今后 20 年制造领域的最大变化。纳米机械学、纳米尺度和精度器件的设计、制造、测量及装配科学技术；具有批量生产工艺的“自下而上”的生长型和“自上而下”的去除型以及前两者相结合的混合型制造技术将得到很大发展。

(4) 新能源装备制造技术。由于一次能源将逐步枯竭，核能、深海能源、再生能源及清洁能源的研发和使用将大大促进该领域制造技术的发展。核能工艺及装备、深海探测及采掘工艺及装备、新能源和再生能源的装备制造、基于新能源的经济型汽车发动机及车辆设计与制造技术研究将得到更大重视和关注。

(5) 绿色制造科技。指无污染无废弃物制造技术、绿色设计与制造技术、废旧机电产品的再制造技

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

术，还包括所有节能节材装备制造技术。

(6) 仿生制造科技。由于生物制造技术得到充分发展，仿生人或动物器官开始用于临床；仿生机械、机器人更普遍地进入人们的生活。仿人器官制造技术，仿生机电系统，如仿飞禽类飞机、仿动物机器人、智能机器人制造技术将有大的发展，与此相关的仿生机械学及仿生制造科学的深入研究是此项领域得以突破的关键。

(7) 光子制造科技。研究表明，未来以激光为基础的光子学将超越电子学。激光由于所具有的准确性、高能量密度和可传输变换等其他任何能源无法比拟的突出优点，被誉为"未来制造系统的共同加工手段"，包括光子加工制造、激光加工、光化学加工、光电加工技术。其中强激光、飞秒皮秒激光加工、微纳尺度光子制造技术及科学是该领域的重点发展方向。

(8) 数字装备制造科技。数字化制造装备包括极大、极小尺度、高效率、高精度的智能数字化加工制造装备、各类精密仪器和复杂机械系统。机械制造装备是机械制造工程和产业得以实现的工具和依赖，是我国由制造大国走向制造强国的重要标志。涉及相关工程重要需求和学科交叉的关键装备及仪器设计理论与方法、创新制造工艺技术以及基于网络的智能数字化控制理论是需要重点突破的科技问题[1]。

4 结语

机械工程科学领域虽然已经取得了长足的进展，但与国际先进水平仍然存在很大差距。我们必须保持清醒的头脑，高瞻远瞩，尽快制定机械工程领域的长远发展规划。加强对基础研究中原创性理论方法的支持力度，加强对原创性技术发明的支持力度。在继续保持和发扬摩擦学、机器人机构学等在国际学术界占有一席之地的同时，力争在2020年前后机械与制造领域总体上进入国际先进行列。在本领域学术界，涌现多个在国际上有重大影响的科技成果和著名科学家，在国际学术界占有更多席位；有一批国际一流并在国际上有重要影响的国家实验室和工程研究中心；有一大批自主创新的重大科技成果转化为生产力，促使我国制造业产生更多的高技术产品和世界名牌企业。

参考文献

[1] 中国科学技术协会主编，中国机械工程学会编著. 2008—2009 机械工程(机械制造)学科发展研究报告，中国科技出版社，2009.

[2] 路甬祥. 坚持科学发展，推进制造业的历史性跨越. 机械工程学报，2007，43(11).

[3] J Xul, J B Luo, X C Lu et al. Atomic scale deformation in the solid surface induced by Nanoparticle impacts. Nonotechnology, 16(2005)855—864.

[4] 金学松等. 曲线钢轨初始波磨形成的机理分析. 机械工程学报，2008，44(3).

[5] 高峰. 机器学研究现状与发展趋势的思考. 机械工程学报，2005，41(8).

[6] 黄田等. 可重构 PKM 模块的选择原则——理论与实践. 机械工程学报，2005，41(8).

[7] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 学科发展研究报告——机械与制造科学. 科学出版社，2006.

[8] 雷源忠，周祖德，王国彪主编. 机械科学基础研究 20 年. 武汉理工大学出版社，2007.

RECENT RESEARCH PROGRESS AND PROSPECTS OF MECHANICAL ENGINEERING IN CHINA

Lei Yuanzhong

(*National Natural Science Foundation of China*, *Beijing* 100085)

Abstract Nowadays mechanical engineering science is an important area of engineering sciences. This paper includes 1) the definition and scope of mechanical engineering science; 2) the current situation and the recent important results and development on mechanical science and technology in China; 3) the trends, forecast and primary gaps between the advanced countries and China on mechanical engineering; and 4) some useful strategies and suggestions.

Key words mechanical engineering science, current situation, important research results, trends and forecast, strategy

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net