

中国工程科技论坛

测量技术发展与 精密仪器创新

● 中國工程院

高等教育出版社

中国工程科技论坛

测量技术发展与精密仪器创新

Celiang Jishu Fazhan Yu Jingmi Yiqi Chuangxin



高等教育出版社·北京

内容提要

本书是中国工程院“中国工程科技论坛”系列丛书之一。

近年来,信息技术与制造业的深度融合,正在催生新的生产方式和产业形态,引发产业变革。制造信息化给测量理论与技术发展提出了新的要求:测量尺度拓展、测量精度提高、测量实时柔性在线、测量数据多源融合、测量环境条件严苛、测量需求多样等。信息通过测量或仪器获得,准确获取信息是智能制造的前提和基础。本书以“测量技术发展与精密仪器创新”为主题,邀请相关领域的院士、专家共同分析制造信息化背景下测量理论与技术发展所面临的挑战,梳理精密测量与先进制造的互动关系,探讨仪器学科的发展战略、关键技术、学科交叉方式与研究方法创新,交流人才培养和服务《中国制造 2025》的思考,把握仪器科学与技术学科的发展机遇。

本书适合相关领域的研究者、工程技术人员、学生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

测量技术发展与精密仪器创新 / 中国工程院编著.

— 北京 : 高等教育出版社, 2017.1

(中国工程科技论坛)

ISBN 978-7-04-046629-4

I. ①测… II. ①中… III. ①测量技术-研究②测量
仪器-研究 IV. ①TB22①TH761

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 252738 号

总 策 划 樊代明

策划编辑 王国祥 黄慧靖 责任编辑 黄慧靖 张 冉

封面设计 顾 斌 责任印制 韩 刚

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landraco.com
印 刷	北京汇林印务有限公司		http://www.landraco.com.cn
开 本	787mm×1092mm 1/16		
印 张	17.5		
字 数	320 千字	版 次	2017 年 1 月第 1 版
购书热线	010-58581118	印 次	2017 年 1 月第 1 次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	60.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 46629-00

编辑委员会

主 任：金国藩 叶声华

委 员：葛墨林 尤 政 胡小唐 谭久彬

谢少锋 曲兴华 曾周末 祝连庆

于连栋 段发阶 吴 斌

编辑人员：曾周末 段发阶 吴 斌

目 录

第一部分 综述

综述	3
----------	---

第二部分 主题报告及报告人简介

科学仪器从“制造”走向“创新”之路	金国藩	13
现代制造中的精密测量问题	叶声华	20
泛制造中微纳测试技术	胡小唐	33
测控技术与仪器产业发展现状及展望	尤政	52
以“引领质量观”指导我国先进制造业的发展	谢少锋	63
压缩感知理论(CS)应用于极微弱信号测量	葛墨林,等	74
智慧制造企业测量智能管理平台——先进制造过程中的大数据 分析和应用	周亮,等	95
自由曲面超精密加工在位测量技术及其进展	房丰洲,等	107
无缆遥测地震数据采集技术进展	林君,等	120
增材制造(3D 打印)中的精度问题与精密检测测量技术研究 ...	苑伟政,等	150
大气探测激光雷达技术进展及应用瓶颈	华灯鑫,等	168
表面形貌测量技术及仪器	刘晓军	216
复杂高速波形合成技术及应用	田书林,等	229
面向国家和地区发展需求,建设测控技术与仪器专业	宋爱国,等	243
依托优势学科平台,深入推进创新创业,共育仪器类高端人才	刘俊,等	252
附录 主要参会人员名单		261
后记		271

第一部分

综 述

综 述

一、论坛背景

测量作为源头信息获取手段在当今信息社会发挥着基础性和决定性作用已获得广泛共识。我国是世界制造大国,但制造技术基础薄弱,创新能力不强;产品以中、低端为主;制造过程资源、能源消耗大,污染严重,距制造强国还有相当大的距离。必须把握信息化这一重大历史机遇,实施以信息化带动工业化的战略,大幅度提高产品档次、技术含量和附加值,全面提升企业自主创新能力、提升制造业整体技术水平,这是建成创新型国家的基础和可持续发展的关键。

精密测量是先进制造发展的前提和基础,正是由于测量方法的突破和测量装置的实现,开创了以互换性为基础的批量制造方式,极大地提高了生产效率、降低了生产成本,直接推动人类社会的发展。在制造信息化大背景下,精密测量理论与技术的发展面临极大挑战,表现在测量尺度拓展、测量精度提高、测量实时柔性在线、测量数据多源融合、测量环境条件严苛、测量需求多样等多个方面。作为先进制造的先导技术,精密测量方法与仪器技术必须超前或与先进制造同步发展,为先进制造精密化、柔性、极端尺度制造模式的发展提供信息支撑,没有创新的测量原理、先进的测量技术、高性能的测量设备和高水平的工程应用,就不可能实现信息化制造。

重视和加强精密测量理论与精密仪器技术的研究已获得社会广泛共识,为此国家在“十二五”期间启动了分别由国家自然科学基金委员会和科技部组织实施的两类重大科学仪器设备专项,提升我国测量仪器设备的自主创新能力和自我装备水平。在当前社会各界高度关注形势下,如何合理整合并充分利用优势资源、推动测量源头思想创新、突破关键技术瓶颈、研制高性能仪器设备提升我国先进制造技术水平、培养符合社会发展需求的专业人才、服务《中国制造2025》,是专家、学者和工程技术人员必须认真思考的重大问题。

二、论坛基本情况

2015年12月10~12日,由中国工程院主办,中国工程院信息与电子工程学部、精密测试技术及仪器国家重点实验室(天津大学,清华大学)、合肥工业大学、北京信息科技大学联合承办的“第221场中国工程科技论坛——精密测量与

先进制造”在合肥举行。中国工程院三局副局长安耀辉、北京信息科技大学校长王永生、合肥工业大学副校长吴玉程分别致辞,中国工程院院士、天津大学叶声华教授主持会议。来自国内外仪器领域科研院所、企业、高校的 200 多位专家和科技工作者参加了会议。

6 位专家为论坛带来了精彩的大会报告。中国航天科技集团总工程师、国家制造强国战略咨询专家委员会委员杨海成教授做了“全面认识互联网+对工业创新发展影响,大力推进智能制造,践行中国制造 2025”的大会报告。中国工程院院士、华中科技大学段正澄教授做了“中国制造 2025 与智能制造浅述”的大会报告。中国工程院院士、合肥工业大学杨善林教授做了“互联网的资源观”的大会报告。中国科学院院士、中科院安徽光机所刘文清所长做了“大气环境立体监测技术”的大会报告。中国工程院院士、西安交通大学蒋庄德教授做了“精密加工与精密测量技术的研究进展”的大会报告。中国科学院院士、北京航空航天大学房建成教授做了“原子陀螺仪技术与展望”的大会报告。10 位专家围绕论坛主题进行了专题报告,10 位来自高校仪器专业所在学院的院长、副院长交流了他们在人才培养服务社会发展方面的经验和成果。与会人员围绕精密测量和先进制造与物理、材料等基础学科的交叉融合,高端精密仪器的关键共性技术,新型精密仪器在先进制造中的应用,精密测量与先进制造领域协同创新的内容、形式及机制,精密测量与先进制造领域专业人才合作培养模式及教育教学改革等议题各抒己见,积极参与讨论,交流了具有前瞻性的新观念、新思路、新思考,论坛取得圆满成功。

三、专家报告内容概要

(一) 互联网时代下的工业变革

云计算、物联网、大数据、移动互联网等新兴信息技术的飞速发展,引发了新一轮科技革命和产业变革。可以预言,互联网即将引爆第四次工业革命,我们的共同使命就是凝聚共识,去探索、去实践互联网大时代下的工业变革之路。我国为破解制造业发展存在的若干问题、迎接“双重挤压”的挑战、应对经济发展新常态,提出了“中国制造 2025”、“智能制造重大工程”、“互联网+”等行动发展战略。在此大背景下,需要全面认识“互联网+”给制造业发展带来的机遇与挑战,实现跨越。

互联网时代引发了以信息技术为核心的科技革命和产业变革,从科学技术发展趋势看,集成电路制造中的摩尔定律正在逼近物理极限,软件技术面临体系性重构,云计算重新定义计算资源,感知技术使万物互联成为可能,大数据处理

技术面对每两年翻番的全球信息量增长需求,应用技术需求越来越智慧化,用户需求越来越个性化。互联网已经改变并正在改变媒体、商贸、金融、旅游、教育、医疗等产业,制造业将是互联网要改变的下一个产业。以软件定义功能为特征的产品智能化,以智能工厂为特征的制造过程智能化,以全生命周期服务为特征的制造服务化,以规模化产品向个性化定制产品延展为特征的制造个性化,以集中组织生产向分散化组织生产转变为特征的制造分散化,以社会制造资源有效组织按需取用为特征的制造资源云化,等等。传统制造业应该跟随科技变革的大趋势,把握创新驱动发展和制造业转型升级的总体要求,积极参与我国制造业发展战略的实施过程。

(二) 智能制造

智能制造是人类的智慧向制造装备转移的过程,旨在将人类智慧物化在制造活动中,使得制造装备能进行并完成感知、学习、利用专家在制造过程中的经验,实现智能控制等活动,通过人与智能机器的合作交互,扩大、延伸和部分地取代人类专家在制造过程中的脑力劳动,提高制造装备和系统的适应性与自治性。智能制造的主要支持技术包括:数字化、网络化制造技术,如 CNC/CAD、CAM、CAE 等;传感与控制技术,如新型光机电传感系统、嵌入式控制系统等;人工智能技术,如知识表示、机器学习、自动推理、智能计算等;互联网、物联网及射频识别技术,如 RFID、电子标签等;数学,包括数理逻辑、数学机械化、随机过程与统计分析、运筹与决策分析、计算几何、非线性系统动力学等。

智能制造的重点任务包括以下几个方面。

1) 网络协同制造:研究个性化定制、创客与众包设计、敏捷生产、制造服务等先进的互联网制造模式;开发产品创意创新设计、云服务、工业大数据决策支持平台;制造业信息化科技工程的应用示范,促进业务模式、企业协作方式创新;增强产业链整体竞争力,改造提升传统制造业和促进新兴产业的发展。

2) 智能工厂:研究 IP 化工业网络技术、现场监控技术、信息物理融合技术、工控过程信息安全与防护技术等;研制信息实时采集、工业网络设备、过程监控设备、安全保障与防护设备等;进行智能化工厂示范,降低生产过程能源消耗、排放;构建智能车间,提高产品个性化响应能力,提高产品质量。

3) 智能机器人:开展机器人应用技术、产业瓶颈技术及下一代机器人核心技术研究;研发具有自主知识产权的工业机器人、特种机器人及服务机器人产品及关键零部件;在汽车、民爆、制药、电子、食品等典型行业,结合其他智能装备开展机器换人应用,构建智能生产线,提高产品质量和效率,改造传统产业。

4) 高端成套装备:实现从高性能化向智能化升级发展,研究智能数控系统、

自学习自适应监测优化运行、智能工艺规划、CPS 网络通信标准等关键技术和应用;新一代柔性电子制造装备面向穿戴式电子等新兴产业,研究开发柔性电子制造关键技术、重大制造装备、系统集成、示范应用等。

5) 3D 打印制造:研究专用材料、工艺规律与控制、分析检测与质量控制、多材料复合制造等技术;开发高温合金、高强度塑料、复合材料、低成本普及型等 3D 打印整机,攻克关键零部件及专业软件;重点开展航空航天关键结构件直接制造、医疗个性化定制、创客众包等创意设计的示范应用。

6) 智能制造保障基础:与材料领域协同攻关,突破一批高端基础部件和基础工艺;研制一批高端传感器、仪器仪表;建成一批面向基础部件的测试验证平台,形成基础数据库;研发平台软件和核心知识库系统;研究安全体系、安全保障核心技术、安防设备与产品;研究共性技术、关键产品、软件接口、安全保障标准规范。

智能制造的核心目标是强化制造业核心基础能力,构建企业业务系统及创新应用模式,推进制造过程向智能化、绿色化、服务化发展,提升装备制造水平。经过五年的努力,使我国先进制造领域关键技术取得重大突破,在一些重点领域掌握一批具有自主知识产权的核心技术和关键技术,显著增强我国先进制造技术基础能力、集成能力和创新能力。

(三) “感知”是智能化制造的核心

“感知”是一个由高灵敏度、高精度、高可靠性和高环境适应性的传感器与信息处理器组成的系统,它与人类的各种器官一样,在制造过程中,实时获取智能装备的加工工况和装备、工装、刀具、环境等的各种物理、化学、生物参数,分别或融合后传输给推理器进行推理,为实时改变或不改变装备、工装、刀具、环境等工作现状提供依据。“感知”系统的技术支撑包括采用新原理、新材料、新工艺的传感技术(如量子测量、纳米聚合物传感、光纤传感等),高灵敏度、高精度、高可靠性和高环境适应性的传感技术及新型传感器,微弱传感信号提取与处理技术,故障诊断与健康维护技术,高可靠实时通信网络技术,集成化传感技术(如单传感器阵列集成和多传感器集成)和无线传感器网络,多传感器信息融合技术,工业通信网络信息安全技术和异构通信网络间信息无缝交互技术,智能、精密二次仪表(信息处理器),基于微纳制造超小体积的传感器等。智能制造中的“感知”,是由各类传感器和信号处理器组成的智能感知系统。智能制造中的感知是智能制造的核心。

我国智能制造的主攻方向主要关注基础材料、核心基础零部件(元器件)、先进基础工艺、质量技术基础的关键核心技术缺失的问题,重大成套技术装备、

高端智能装备、工作母机等高端装备集成质量差的问题,总体认知能力、系统设计能力、集成制造能力薄弱的问题。从仪器、感知这个角度,在“四基”方面关注新机理传感技术和新原理测量技术,关注发明新原理高端仪器等;在高端装备集成方面关注新原理集成测试仪器与实验系统等;在基础材料方面关注表面微结构测量仪器、表层组织测量仪器、材料内部应力分布测量仪器、磁机特性测量仪器等;在核心基础零部件(元器件)方面关注形状位置精度测量仪器、尺寸精度测量仪器、空间坐标测量仪器等;在核心基础零部件(元器件)、仪器核心零部件方面关注大口径平面光栅系统、大口径三维激光光栅系统、大口径精密立体/曲面网栅、大口径微阵列器件等;在先进基础工艺方面关注在线/在位测量技术与仪器、加工测量一体化技术与系统、基于微机理分析的表面和表层测量仪器等;在质量技术基础方面关注国家量值溯源和传递体系、国家级计量标准装置、军工计量标准装置、省市级计量标准装置、企业级计量标准装置等;在装备集成测试方面关注大型专用集成测试装置等;在装备整机性能测试关注高端加工测量一体化工作母机,激光束、电子束、离子束直写机,高端环控技术与装备等。

科学仪器设备是科学研究和技术创新的基石,是经济社会发展和国防安全的重要保障。更宏观地讲,仪器作为信息的源头,对国民经济、科学技术、公共安全、国防建设等方面的发展都有深远的影响,应是我国经济社会发展支柱性、战略性的产业。我国已把仪器行业发展列入《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》,科技部设立的“重大科学仪器设备开发专项”以市场需求为导向,重视仪器核心部件和重大科学仪器设备产品的开发和产业化应用,推进企业自主创新能力提升。国家自然科学基金委员会设立的“重大科学仪器设备研制专项”则面向科学前沿和国家需求,以科学目标为导向,鼓励和培育具有原创性思想的探索性科研仪器研制,着力支持原创性重大科研仪器设备研制,为科学研究提供更新颖的手段和工具,全面提升我国的原始创新能力。“十三五”开局,“重大科学仪器设备开发专项”优先启动,聚焦高端通用科学仪器设备和专业重大科学仪器设备的仪器开发、应用开发、工程化和产业化开发,推动以企业为主体的仪器开发,带动科学仪器系统集成创新,有效提升我国科学仪器设备行业整体创新水平与自我装备能力,构建“仪器原理验证→关键技术研发(软硬件)→系统集成→应用示范→产业化”的国家科学仪器开发链条,完善产学研用结合、协同创新发展的成果转化与合作模式,激发企业创新动力和活力。强化技术创新和产品可靠性、稳定性实验,引入用户应用示范、拓展产品应用,大幅提升我国科学仪器行业可持续发展能力和核心竞争力。我国科学仪器行业发展迎来了历史机遇期。

“仪器是认识物质世界的工具,机器是改造物质世界的工具”、“测量技术是

信息技术的重要组成部分,是信息技术的源头”,这些观点和描述都充分说明了仪器在我国社会发展过程中的作用和战略地位,发展仪器产业已经成为国家战略发展的需要。

(四) 人才培养

新时期仪器学科人才需求的特点可以归纳为三个字:“急”——面向高端制造业的精密仪器应用人才急需,“缺”——面向前沿科学探索的高端科学仪器开发人才奇缺,“广”——社会各行业发展需求对仪器专业人才需求多元化。近年来,仪器科学与技术学科人才培养工作呈现出良好的发展态势,这得益于近年来先进制造业、信息产业的飞速发展,社会对复合型人才培养的需求旺盛;得益于行业的大力支持,仪器科学与技术领域得到空前的社会认同;得益于各高校自身的努力,各高校依托各自行业优势致力于本专业的教学改革,取得了不菲的成绩。但离社会发展的需求特别是仪器学科在“中国制造 2025”所应该承担的责任还有比较大的差距,还需要大家的努力。教育要满足人的发展需要,满足社会发展对各种人才的需要,仪器专业教育改革和发展的战略选择最终必然集中到人才培养上。

教育理念强调“以学生为中心”和“学生学习成果导向”。以学生的学习和发展为中心,强调学生建立个人知识、能力结构的自主性,帮助学生自己去发现和创造知识,帮助学生规划个人发展、适应社会需求。强调树立终身学习观念,努力创造条件形成以主动参与、积极探索、主动思考、主动创造为基本学习方式的新型教学过程,培养学生发现问题、解决问题的能力。强调学生在知识、能力转化过程中的主体作用,提倡“教学相长”,引导学生独立思考,敢想、善思、有识、标新立异,提高学习质量,使学生在知识、能力和素质上获得全面提升。以学生为中心必然以成果导向教育为理念,强调明确所有学生毕业后能胜任某类任务的能力,教育过程则致力于促使学生达成此能力。

办学定位强调多样化和适应性。各学校的仪器类专业以及各层次人才培养,应根据学校定位和自身特色,选择适应自身的办学定位、培养模式和教育教学方法,适应新技术、全球化、信息革命和人才市场变化的新形势。专业培养目标必须与学校的办学定位相适应。培养目标是一定教育目的和约束条件下对教育活动的预期结果,即对学生预期发展状态所作的“规定”,具有定向功能、调控功能和评价功能,处于人才培养过程的核心地位。目前出现了一种倾向,过分强调综合化,丧失行业特色,丧失工程特色,更缺乏本校、本专业特质的东西,专业培养目标只是几句口号,不研究本专业需要做什么、能做什么,对教学工作没有任何指导作用,这种倾向必须避免。把培养目标与能力要求挂钩,将能力培养落

实到具体的教学环节,将能力培养与教师的责任相联系,每个学校的工作都是自己所独有的,这才是真正的多样化和适应性。

教学体系强调工程实践能力养成。实践是工程的基本属性,实践能力的培养是工程教育的核心问题。工程实践能力包括运用知识能力、工程分析与设计能力、工程操作能力、沟通与表达能力、团队融入与团队协作能力、研究与创新能力、领导力和工程商务与管理能力等。仪器学科的技术性、应用性特点更决定了其对学生工程实践能力培养的重要性。目前仪器类专业教育过程中,教学体系设计仍普遍存在着重知识的倾向,片面理解实践能力就是实验动手能力,无论需要什么通过增加课程来解决,忽视教学过程中的引导和身教,缺乏学生个人工程实践能力养成的环境和氛围,忽视与产业界的联系,不注重学生综合素质、发展意识、交流能力和协作精神培养。学校的基本目标是给予学生终身受益的东西,包括清晰地认识和界定问题,分辨出同一问题的不同论点与利益关系,搜集相关材料,并分析不同材料之间的相互联系,围绕某一问题尽可能多地提出可行的解决方案,分析证据并运用推断、类比等常见的推理方式考察各种方案,提出合理的判断和最佳方案。

培养过程强化学科交叉和产学合作。现代意义的工程是“大工程”,涉及多学科的知识和技能支撑,涉及如何利用这些学科的知识和技能来创造新的技术。另一方面,现代意义的工程是“社会工程”,在技术集成过程中,非工程化因素的影响,远高于技术和工程本身。仪器更多地用于评价对象的功能和性能,更多地用于评价对象对环境的影响,其交叉特征、社会特征更强。工程人才是针对一定的市场需求进行培养的,只有这样才能“适销对路”。专业教育不是简单地增加实践环节、引入工程案例,还需要应对社会发展和社会需求的变革,需要在培养过程中强化学科交叉和产学合作,确立知识、能力、素质全面培养的育人理念,把人才培养置于大工程背景下,培养学生的工程意识、工程素质和工程能力,锤炼学生的创新精神。

四、结语

“没有测量就没有科学。”测量和仪器在社会发展和人类进步的历史进程中发挥了极其重要的作用。同样,信息技术与制造业的深度融合,将成为引发产业变革,形成新的生产方式、产业形态、商业模式和经济增长点,推动制造强国战略实施的着力点,“新技术革命的关键技术是信息技术,信息技术包括测量技术、计算机技术、通信技术,测量技术则是关键和基础”。信息通过测量技术和测量仪器获得,准确获取信息是基础。测量技术、控制技术和关键测试设备,是自主、完整地掌握和发展重大装备的关键。在产品质量评价与建设法治国家中,仪器承

担着“物化法官”的职责。“创新驱动,质量为先,绿色发展,结构优化”的每一个要素都与测量和信息技术的发展密切相关,这充分证明了测量和仪器在推动科技创新和经济社会发展中的重要地位。在本次论坛中,相关领域的多名院士、专家,以及全国两百多名仪器科学与技术学科的带头人、教师齐聚合肥,梳理精密测量新原理、新方法的发展趋势,探讨实现上述目标的关键技术、研究方法创新及学科交叉方式,探索精密测量技术发展的动因,揭示其与先进制造产业发展的互动关系,分析面临的主要技术挑战和需要突破的难点,探讨制造强国战略背景下仪器科学与技术学科发展的机遇与挑战,交流仪器科学与技术学科服务《中国制造 2025》的思考等,势必将启示未来仪器科学与技术学科的发展方向,共同努力培养出适应社会发展需求的人才,对于落实创新驱动发展战略、建成制造强国具有重大意义。

第二部分

主题报告及报告人简介

