DOI 10.15302/J-SSCAE-2017.01.015

中国仪器仪表工程科技 2035 发展趋势研究

王雪 [1]，张莉 [2]

（1. 清华大学，北京 100084；2. 中国仪器仪表学会，北京 100088）

摘要：仪器仪表工程科技是智能制造、科学研究、环境监测、医疗健康、国防建设等必不可少的基础技术和装备核心。仪器仪表工程科技作为实现国家创新驱动战略的重要支撑，其发展水平决定新兴信息产业、高端装备制造业、新能源和新材料等战略性新兴产业的发展。本文分析了仪器仪表领域 2035 年的发展目标，围绕新型仪器仪表的数字化、智能化、网络化的发展趋势，从智能仪器仪表、医疗仪器和微机电系统（MEMS）三个领域阐述了未来我国仪器仪表工程科技领域的发展方向及关键技术，提出了 2035 年我国仪器仪表工程科技领域的总体趋势。

关键词：仪器仪表；智能仪器仪表；医疗仪器；微机电系统；趋势分析

中图分类号：TP393　　**文献标识码：**A

Development Trends for China's Instrumentation Engineering Science and Technology to 2035

Wang Xue[1], Zhang Li[2]

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. China Instrument and Control Society, Beijing 100088, China)

Abstract: Instrumentation is the fundamental technology and essential equipment for intelligent manufacturing, scientific research, environmental monitoring, healthcare, national defense construction, and so forth. As an important support toward achieving a national innovation strategy, instrumentation development determines the level of strategic new industries, which include the innovative information industry, high-end equipment-manufacturing industry, energy industry, materials industry, and so forth. This paper analyzes development trends of instrumentation engineering science and technology to 2035. Within the requirements of digital, intelligent, and networked instruments, key technologies and future trends are depicted for three main aspects: intelligent instrumentation, medical instruments, and micro-electro-mechanical systems (MEMS). Development strategies and suggestions for China's instrumentation engineering science and technology to 2035 are also put forward.

Keywords: instrumentation; intelligent instrumentation; medical instrument; MEMS; trend analysis

一、前言

仪器仪表工程科技是智能制造、科学研究、环境监测、医疗健康、国防建设等必不可少的基础技术和装备核心。著名科学家王大珩院士曾经将其形象地比喻为工业生产的“倍增器”，科学研究的“先行官”，军事上的“战斗力”以及现代社会活动的“物化法官”[1]。

仪器仪表工程科技作为实现国家创新驱动战略的重要支撑，其发展水平决定了新兴信息产业、高

收稿日期：2016-12-15；**修回日期：**2016-12-27

通讯作者：王雪，清华大学，教授，研究方向为精密测量与智能传感技术、物联网测控技术等；E-mail: wangxue@mail.tsinghua.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“中国工程科技 2035 发展战略研究”(2015-ZD-14)

本刊网址：www.enginsci.cn

端装备制造业、新能源和新材料等战略性新兴产业的发展 [2]。面向数字化、智能化、网络化的新型仪器仪表的发展是实现测量信息智能感知、决策控制的重要手段，是智能制造装备的重要组成部分。仪器仪表工程科技的发展水平已经成为衡量一个国家创新水平和制造能力的重要标志 [3~5]。

仪器仪表所涉及的技术领域众多，对新技术高度敏感，是现代工业中更新换代快、新技术应用和发展极快速的领域之一。其关键技术的研发涉及数学、力学、材料学、工业学、电子学、信息学、控制论、人工智能等多种学科的综合性交叉应用以及许多边缘科学。

仪器仪表产品的设计、开发、制造涉及敏感机理、敏感材料、工艺技术、工艺装备、测试技术等基础研究，攻关难度较大。其产业的发展，不仅涉及产品的技术水平，而且与工程应用技术密切相关。

仪器仪表应用领域广泛，其广泛应用于工业、农业、国防、科研和人类生活的各个方面。针对不同的应用需求须开展专用技术研究，并为用户制定个性化的解决方案。

仪器仪表领域的上述特点，决定了仪器仪表工程科技发展对专业型人才和复合型人才的高要求和大需求。

综上所述，提出我国面向 2035 年的仪器仪表工程科技的发展目标，提出若干具有重大需求、符合重大发展趋势的重点任务，突出重点和新亮点，进一步深化研究其发展路径，对行业发展和政府决策具有借鉴意义。

仪器仪表工程科技的研究前沿，目前主要集中在高灵敏度“源”与“探测器”、新型传感技术、智能感知系统互联互通技术、微机电系统（MEMS）共性技术。在应用技术上需要突破无损、快速、在线检测技术，痕量精准定量检测技术，全集成基因检测系统等。以 MEMS 技术为基础，将传感器与信号处理、控制电路、微执行器相互集成，形成具有一定完整功能的微系统已成为业界的研究热点和投入重点，其规模效应和应用拓展的前景，将给个人消费、交通运输、工业控制、军事国防等众多领域带来革命性的影响 [6,7]。

本文采用德尔菲法开展技术预测，对面向 2035 年仪器仪表工程科技领域需重点发展的关键技术、共性技术等做出研判，得出我国仪器仪表工程科技 2035 的发展趋势。

二、发展目标

我国仪器仪表工程科技发展将通过跟踪信息技术、纳米技术和生物技术等高新技术来实现发展，研究前沿技术和新兴技术，突破关键仪器，有效地缩小与国外产品的差距；成体系、成系统地发展仪器仪表产业相关的材料、元器件、设备，构建门类齐全、结构相对合理的产业结构，打造具有世界先进技术水平的仪器仪表产品体系；坚持高质量和高标准的发展原则，突破长期制约我国仪器设备发展的可靠性和稳定性问题，增强我国仪器设备的工程化和产业化能力。

2025 年战略目标为突破物理量获取与传感技术，延伸仪器仪表的应用范围，解决环境污染监测、核能辐射安全监测、物质成分分析、生物化学分析、新能源和绿色能源发展等难题；利用量子力学、纳米电子学、太赫兹（THz）电磁学、物联网测量技术和人工智能信息处理等新兴学科的研究成果解决制约仪器仪表技术发展的瓶颈问题，实现关键技术的突破和工程化应用，为科学研究、能源开发、生命健康等提供高端仪器设备。2035 年战略目标为我国发展所需的高端仪器仪表基本实现国产化，完善高端仪器技术体系；构建以“网络为中心”的远程测量与故障诊断平台以及嵌入式测量平台；突破仪器仪表故障预测与健康管理技术，实现仪器仪表的零故障、自修复、免维修等智能化功能。我国仪器仪表技术水平总体达到世界先进水平，产品质量和可靠性达到世界先进水平 [8,9]。

三、发展趋势

面向 2035 年，量子计算机与量子通信、干细胞与再生医学、合成生物和人造叶绿体、纳米科技和量子点技术、石墨烯材料等方向诱人的应用前景，以及新材料、生命科学、空间利用、海洋开发、新能源等领域的开拓，都对仪器精度提出了更高层次的要求 [3]。

先进制造正向结构功能一体化、材料器件一体化的方向发展，极端制造技术向极大（如航母、极

大规模集成电路等）和极小（如微纳芯片等）方向迅速推进。人机共融的智能制造模式、智能材料与3D 打印结合形成的 4D 打印技术，将推动工业品由大批量集中式生产向定制化分布式生产转变，从而引领“数码世界物质化”和“物质世界智能化”。仪器仪表作为工业生产的基础支撑，必将适应新兴产业的需求，产生新的测量方法 [10]。

（一）智能仪器仪表领域

发展传感器融合感知技术，实现振动、温度、压力、噪声、应变、图像等多参量的监测；发展多源自供电微功耗连续传感器，从根本上解决测量前端的电源供给问题；充分利用无线通信系统和网络平台，实现全天候、全空间的传感和监测，实现不受空间、环境限制的传感 [11]。

与人工智能方法相结合，突破一批关键的本体检测技术，提高仪器仪表本体的管控智能化程度，构建自诊断等高级智能功能。构建本体现场数据自动跟踪的收集能力，打造仪器仪表全生命周期质量跟踪体系 [12]。

构建基于物联网的传感测量架构，从顶层应用到底层传感，搭建端到端的大数据传输链路和大数据网络。突破仪器仪表单机本地化运行现状，构建仪表无缝接入现场总线或者集散型分布式系统（DCS）网络的连接能力，实现通信网络融合接入仪表技术。提高仪表数据信息的丰富程度，在仪表本身扩展主变量信息以外，提升数据源的多样化程度，提高数据流的数据规模，形成支持大数据和工业互联的多元服务和庞大的数据基础。

突破兼容多种有线和无线通信的汇聚网络设备的相关技术，从数据链路上整合多种通信方式，提高智能仪器仪表的组网能力和通信网络节点的丰富程度。构筑工业物联网打通仪器仪表传感网的最后一公里，促进仪器仪表更高端的智能化服务和智能功能发展，凸显仪器仪表的工业互联数据价值。

（二）医疗仪器领域

推进医疗产品科技与巅覆性技术的发展。在医学影像领域，重点发展应用分子成像、脑磁成像、荧光成像、太赫磁成像、电阻抗成像、激光成像、虚拟成像等未来新技术的产品。在急救领域，重点发展自适应呼吸机、智能中央监护及远程监护。在手术与康复领域，重点发展智能化骨科手术和脑外科手术智能化定位导航机器人、智能护理机器人、有感知的智能假肢及辅具设备。在临床检验领域，重点发展第三代测序技术及新型的测试技术；建立基于基因检测的个人健康管理信息系统；建立人类基因组数据库；发展自主研发的基因数据读取与分析处理软件系统；构建基于人体特征参量的体域网；基于大规模云计算的人工智能方法，发展可穿戴的人体健康体征辨识参数检测监控设备；开展基因库资源应用研究。在有源植入物领域，重点发展电磁兼容性更好的无线心脏起博器、神经刺激器、治疗与监测用植入性生物芯片等。

平台性技术相应发展较快，如医疗经验挖掘技术、智慧医疗技术、面向医疗的智能技术、云诊断技术、医疗资源智能化运营平台技术，以及专家系统和医疗路径描述体系。

（三）MEMS 领域

进一步研究并重点突破 MEMS 一体化设计与仿真技术、先进功能材料的 MEMS 制造技术、芯片级 MEMS 集成技术、MEMS 可靠性技术、MEMS 测试与标准化技术等。研制各类国产微纳制造、检测设备。

面向仪器仪表工程科技 2035 发展战略优先布局研究方向，包括高可信度的系统级 MEMS 正向设计理论、复杂三维 MEMS 制造工艺方法、单片 MEMS 集成方法、极端条件下的 MEMS 应用方法、MEMS 集成射频前端技术、微型导航定位授时技术、MEMS 智能传感微系统技术、MEMS 执行器技术等。

四、基础研究方向

（一）智能仪器仪表领域

研究传感层相关设备、链路、数据安全处理与功能的安全技术；研究适应于全生命周期数据管理的智能仪器仪表；研究仪表适应工况的本地和远端自学习调整功能；研究仪表的本地、远端数据冗余功能；研究仪表的远程升级及回溯功能；研究仪表的自动预防性检测与维护功能；研究基于人工智能的高精度测量方法；提高各种仪表本体测量能力和测量精度，研究仪表本体硬件诊断和软件诊断技术等 [13]。

研究仪器网络化的构建技术。研究传输层通信技术，研究可以支撑仪器仪表的服务数据和控制数据融合的全生命周期数据传输手段，重点研究支撑大数据流传输的工业新型高速两线制通信网络及网络通信卡、通信芯片、通信安全。研究汇聚层设备、通信核心技术，研究可支撑多链路诊断分析等特色各异的服务数据和控制数据聚合与分离的网络关键设备、网络接口卡及网络安全相关技术。研究适应于传统现场总线的主站数据处理、路由处理和流量控制、数据安全和优先级通信调度技术等。研究骨干层通信调度和传输技术，研究支撑控制网络和服务互联网分离的数据交换、分发设备，研究数据隔离等网络安全技术。研究基于工业物联网的安全通信技术，研究基于工业互联网的智能制造系统的安全传输和冗余。

（二）医疗仪器领域

重点开展医学影像新型成像机理、影像融合技术及远程图像诊断信息的系统研究。重点研究新型手术器械及仪器设备、应用新技术的新型急救设备工程基础技术，以及根据临床疾病特征开展的新的智能化急救仪器设备基础理论与工程技术。开展先进治疗的仪器设备机理与工程技术应用和智能化医用机器人的生物力学基础应用，开展软体机器人技术、远程手术技术、基于人工智能的医疗大数据分析技术、辅助介入治疗技术、智能化仿生假肢及智能辅具的智能技术与生物力学基础研究。开发预测重大疾病发病风险的生物芯片，发展全基因组测序技术和全系列、高通量、集成式、流程化的实验室检验分析系统。开发基因读取与分析系统以及基因资源应用的基础研究。重点推进生物相融性更好的智能化记忆骨科植入物、血管支架及应用生物材料的开发，研究智能化新型生物材料。对生物材料性能及其加工工艺与处理技术、生物相融性及生物力学基础、有源植入物与生物融合基础应用，加大研究力度 [13]。

（三）MEMS 领域

重点突破 MEMS 领域的科学前沿研究。MEMS 制造、器件与微系统的一体化正向设计至关重要，突破正向设计理论及方法，优先开展跨尺度多能域系统的建模仿真、材料性能表征与工艺兼容性、恶劣环境下的失效机理与验证方法等研究，解决 MEMS 器件建模仿真及正向设计理论和方法的科学前沿问题。

研究 MEMS 领域的核心技术工艺。开展单片集成、3D 集成和混合集成方法研究，研究先进结构与先进材料工艺，研究 MEMS 晶圆级封装及在线监控，解决 MEMS 器件与微系统的芯片级集成方法及核心关键工艺技术。

突破 MEMS 领域的重点应用。MEMS 器件与微系统的应用环境适应性也必须重视，如面向发动机、燃气轮机等 MEMS 器件与系统，面向战术武器的超高精度、高过载的 MEMS 器件与系统，面向汽车工业的高可靠、高性能的 MEMS 器件与系统，面向未来物联网的集成化、智能化 MEMS 器件与系统等方面都需要进一步加强研究，解决我国亟须突破的重大战略需求问题。

五、结语

随着 MEMS 技术的不断成熟，其应用领域也会不断增加。微型化是未来仪器仪表发展的必然趋势，微型仪器仪表将不仅具有传统仪器仪表的功能，而且能在自动化、航天、军事、生物、医疗等领域起到独特的作用。

多功能化是仪器仪表发展的重要趋势，多功能的综合型产品在各种测试功能上提供了较好的解决方案。

随着网络技术的飞速发展，物联网技术正在逐渐向工业控制和智能仪器仪表系统设计领域渗透，网络化仪器仪表的概念是对传统测量仪器概念的突破。

人工智能技术将在仪器仪表领域得到更广泛的应用，未来仪器仪表将进一步智能化，可以代替人的一部分脑力劳动，其在视觉、听觉、思维等方面具有一定的类人能力。人工智能在仪器仪表领域的应用，不仅可以解决传统方法难以解决的问题，而且有望解决用传统方式根本不能解决的问题，能够极大地提高生产效率和能力。

参考文献

[1] 中华人民共和国工业和信息化部. “十二五”装备制造业发展和结构调整的思路、目标、重点及对策研究 [R]. 北京: 中华人

民共和国工业和信息化部, 2010.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Guidelines, goals, highlights and methods for development and structure adjustment of manufacturing industry in "12th Five-Year Plan" [R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 2010.

[2] 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所. 传感器与仪器仪表技术和市场研究报告 [R]. 北京: 机械工业仪器仪表综合技术经济研究所, 2012.
Instrumentation Technology and Economy Institute. Market research report on sensor and instrumentation technology [R]. Beijing: Instrumentation Technology and Economy Institute, 2012.

[3] 庄松林, 肖中汉. 我国仪器仪表与测量控制科技的发展 [J]. 自动化仪表, 2009, 30 (5): 1–6.
Zhuang S L, Xiao Z H. Development of science and technology in instrumentation, measurement and control area of China [J]. Process Automation Instrumentation, 2009, 30 (5): 1–6.

[4] 中华人民共和国工业和信息化部. 加快推进传感器及智能化仪器仪表产业发展行动计划 [R]. 北京: 中华人民共和国工业和信息化部, 2013.
Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Plan for accelerating the development of sensor and intelligent instrumentation industry [R]. Beijing: Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China, 2013.

[5] Cabinet Meeting of Japan. Science and technology basic policy [R]. Tokyo: Cabinet Meeting of Japan, 2006.

[6] 中国工程院. 制造强国战略研究 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2015.
Chinese Academy of Engineering. Research on the manufacturing power strategy [M]. Beijing: Electronic Industrial Publishing House, 2015.

[7] Office of science and technology policy [EB/OL]. (2016-05-10) [2016-10-25]. www.whitehouse.gov/administration/eop/ostp.

[8] 赵阳华. 我国仪器仪表产业发展现状、问题及政策研究 [J]. 中国仪器仪表, 2009 (3): 29–33.
Zhao Y H. A Study on development, challenges and strategies of instrumentation industry in China [J]. China Instrumentation, 2009 (3): 29–33.

[9] 陈庆. 浅谈智能仪器仪表的发展趋向及其应用前景 [J]. 科技创新导报, 2009 (6): 16.
Chen Q. A brief probe into trend and application foresight of intelligent instruments [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2009 (6): 16.

[10] 孙柏林. 从2014 年改革新动向看2015 年仪器仪表行业发展 [J]. 仪器仪表用户, 2015 (1): 5–10.
Sun B L. From 2014 new trends see 2015 years instrument industry development direction [J]. Electronic Instrumentation Customer, 2015 (1): 5–10.

[11] 袁涛. 我国仪器仪表行业发展综述 [J]. 电子测试, 2016 (6): 122–123.
Yuan T. Summary of the development of the instrument and meter industry in China [J]. Electronic Test, 2016 (6): 122–123.

[12] 宋宜豪. 我国智能仪器仪表的发展 [J]. 科技创新导报, 2013 (25): 233.
Song Y H. Development of intelligent instrumentation in China [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013 (25): 233.

[13] 谢少锋, 王韬, 王实. 关于推动我国仪器仪表行业健康发展的思考 [R]. 北京: 中国仪器仪表学会, 2010.
Xie S F, Wang T, Wang S. Considerations on the healthy development of China's instrumentation industry [R]. Beijing: China Instrument and Control Society, 2010.