

doi : 10.3969/j.issn.1008-6145.2020.06.035

SI 基本单位重新定义后国外计量测试技术发展综述

邱喜鹏,张倩,马茂冬,杨帆
(中国兵器工业标准化研究所,北京 100089)

摘要 对 SI 基本单位重新定义后国外在计量技术领域的最新研究进展进行综述。通过收集整理 SI 单位重新定义后国内外文献,从量子精密测量技术、SI 单位制技术转化、新材料测试技术等方面分析了国外工业发达国家在计量技术领域的最新研究成果。结合当前计量前沿技术发展趋势,从技术、资源、管理 3 方面对我国国防计量发展提出了建议。研究成果可为我国计量发展提供参考和借鉴。

关键词 计量; SI 基本单位; 量子计量; 成果转化; 新材料测试

中图分类号: O657 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-6145(2020)06-0156-05

Review of the foreign metrology and measurement development after the redefinition of SI basic unit

QIU Xipeng, ZHANG Qian, MA Maodong, YANG Fan

(China Ordnance Industrial Standardization research Institute, Beijing, 100089, China)

Abstract The latest research progress of metrology technology abroad after the redefinition of SI basic unit was reviewed. By collecting and sorting of the domestic and foreign literatures after the redefinition of SI system of units, the latest research achievements in the field of measurement technology in developed countries were analyzed from the aspects of quantum precision measurement technology, SI unit technology transformation, new material testing technology. Combined with the development trend of current measurement frontier technology, suggestions were put forward for the development of national defense metrology in China from the aspects of technology, resources and management. The research results can provide reference for the development of measurement in China.

Keywords metrology; SI basic unit; quantum metrology; achievement transformation; new material testing

随着 2017 年 SI 基本单位制的重新定义,国际前沿计量技术向量子化、扁平化、定制化方向发展。跟踪国际先进计量测试技术,并做好对应领域的比对研究工作,成为我国突破国外技术封锁,占领先进计量测试技术制高点的重要措施。笔者在梳理归纳国内外文献的基础上,对 SI 基本单位制重新定义后国外在计量检测关键领域,如量子精密测量领域、SI 新型成果转化领域、新材料测试技术发展领域取得的技术突破及发展成果进行了综述,以期为我国计量工作者和管理决策者提供参考。

1 基本单位重新定义

国际单位制 (International System of Unites, SI) 于 1960 年第十一届国际计量大会通过建立,包括基本单位、导出单位和辅助单位。其中基本单位有长

度单位“米(m)”、质量单位“千克(kg)”、时间单位“秒(s)”、电流单位“安培(A)”、温度单位“开尔文(K)”、发光强度单位“坎德拉(cd)”和物质的量单位“摩尔(mol)”。SI 是全球公认的基本计量单位,是国际计量体系的基石,基本单位制的稳定是所有测量活动量值稳定可靠的重要基础。

2017 年 7 月,国际计量委员会 (CIPM) 提出了基于普朗克常数、玻尔兹曼常数、阿伏伽德罗常数、电子电量重新定义开尔文、千克、安培、摩尔 4 个基本单位的方案。2018 年 11 月 26 日,在法国巴黎召开了第 26 届国际计量大会,4 个国际基本单位正式被重新定义,标志着量子基准时代的全面来临,基本单位重新定义前后对比见表 1。与实物基准相比,量子基准的准确度和稳定性将大幅提高,并将给计

通讯作者 邱喜鹏,硕士,主要从事国防计量技术及管理方向研究, E-mail: qiuxipengbit@163.com

收稿日期 2020-09-30

引用格式 邱喜鹏,张倩,马茂冬,等. SI 基本单位重新定义后国外计量测试技术发展综述[J]. 化学分析计量,2020,29(6): 156-160.

QIU X P, ZHANG Q, MA M D, et al. Review of the foreign metrology and measurement development after the redefinition of SI basic unit [J]. Chemical analysis and meterage, 2020, 29(6): 156-160.

量检测技术发展造成重大影响^[1-4]。

表 1 SI 基本单位新旧定义对比表

单位	符号	新定义	旧定义
米	m	当真空中光的速度 c 以单位 m/s 表示时,将其固定数值取为 299 792 458 来定义米,其中秒用 DnCs 定义	米是长度单位,等于光在真空中 $1/299\,792\,458$ 秒的时间间隔内所经路程的长度
千克	kg	当普朗克常数 h 以单位 $J \cdot s$, 即 $kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$ 表示时,将其固定数值取为 $6.626\,070\,15 \times 10^{-34}$ 来定义千克,其中米和秒用 c 和 DnCs 定义	千克是质量的单位,等于国际千克原器的来定义千克,其中米和秒用 c “质量”
秒	s	当铯的频率 DnCs, 即铯 -133 原子基态的超精细能级跃迁频率以单位 Hz, 即 s^{-1} 表示时,将其固定数值取为 9 192 631 770 来定义秒	秒是铯 -133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁相对应的辐射的 9 192 631 770 个周期的持续时间
安培	A	当基本电荷 e 以单位 C, 即 $A \cdot s$ 表示时,将其固定数值取为 $1.602\,176\,634 \times 10^{-19}$ 来定义安培,其中秒用 DnCs 定义	安培是电流单位,在真空中,截面积可忽略的两根相距 1 米的无限长平行圆直导线内通以等量恒定电流时,若导线间相互作用力在每米长度上等于 2×10^{-7} 牛顿,则每根导线中的电流为 1 安培
开尔文	K	当玻尔兹曼常数 k 以单位 $J \cdot K^{-1}$, 即 $kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$ 表示时,将其固定数值取为 $1.380\,649 \times 10^{-23}$ 来定义开尔文,其中千克、米和秒用 h , c 和 DnCs 定义	开尔文是热力学温度单位,等于水的三相点热力学温度的 $1/273.16$
坎德拉	cd	当频率为 $540 \times 10^{12} Hz$ 的单色辐射的发光效率以单位 lm/W , 即 $cd \cdot sr \cdot W^{-1}$ 或 $cd \cdot sr \cdot kg^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^3$ 表示时,将其固定数值取为 683 来定义坎德拉,其中千克、米、秒分别用 h , c 和 DnCs 定义	坎德拉是一光源在给定方向上的发光强度,该光源发出频率为 $540 \times 10^{12} Hz$ 的单色辐射,且在此方向上的辐射强度为 $1/683$ 瓦特每球面度
摩尔	mol	1 摩尔精确包含 $6.022\,140\,76 \times 10^{23}$ 个基本粒子。该数即为以单位 mol^{-1} 表示的阿伏伽德罗常数 N_A 的固定数值,称为阿伏伽德罗数。 一个系统的物质的量,符号 n , 是该系统包含的特定基本粒子数量的量度。基本粒子可以是原子、分子、离子、电子,其它任意粒子或粒子的特定组合。	摩尔是一系统的物质的量,该系统中所包含基本单元数与 0.012 千克 ^{12}C 的原子数目相等。 使用摩尔时,基本单位应予以指明,可以是原子、分子、离子、电子及其它粒子,或是这些粒子的特定组合。

在新的定义方式中,基于普朗克常数、玻尔兹曼常数、阿伏伽德罗常数、电子电量等物理常数没有测量不确定度的固定值,各常数之间存在清晰明确的依赖关系,这些常数的测量不确定度转移至相关物理量中,国际千克原器、水的三相点等量值的测量不确定度增大。新旧单位测量不确定度变化关系如图 1 所示。

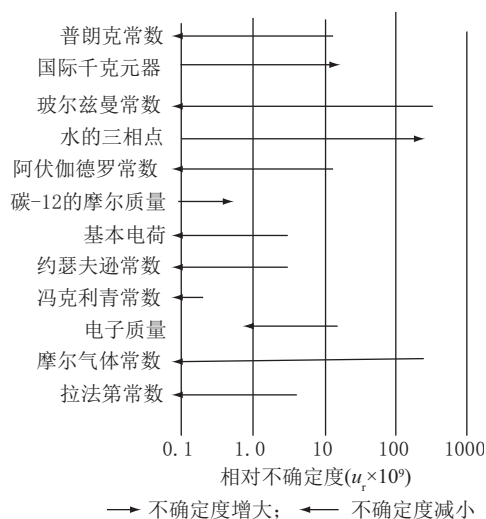


图 1 SI 单位重新定义后各基准及物理常数的不确定度变化

2 量子精密测量技术发展

2.1 量子传感器

几个世纪以来,人类通过高精度测量光和物质来加深对世界的了解。随着 SI 基本计量单位的量子化重新定义,量子传感器也逐渐引起发达国家研究人员的关注。量子传感器可以达到传统物理学定律无法实现的灵敏度,但是形成和控制量子状态却十分复杂,需要很高的探测灵敏度,且相关测量容易受到外界干扰。此外由于量子非经典态测量通常需要适应特定的参数,根据海森堡不确定性原理,通常会增大其它相关参数的测量不确定度。德国联邦物理技术研究院 (PTB)、汉诺威大学 QUEST 研究所和意大利国家光学研究院联合研究了一种基于同时适应两个测量参数非经典态的方法。该方法借鉴对单个原子或分子组成的量子探测系统的了解和操控经验,利用量子单摆,在外力作用下,使单个原子摆在镁离子“量子阱”中产生震荡行为,并测量原子振荡的振幅和频率(如图 2 所示)。这种测量方式在测量时间不变的情况下,能够将分辨率提高一倍。研究团队还计划利用耦合光场开发新的冷却程序以简化量子模拟器。该项目研究成果将实现精度和分辨率的测量突破,有助于研发新一代原子钟、原子干涉仪等量子传感器^[5-8]。



图 2 原子摆测量两个非经典态试验模拟图

2.2 单原子晶体管

晶体管在计算机中用途广泛且用量巨大,晶体管微缩技术是量子计算机研制的关键之一,关系到新一代计算机的存储和处理能力。2018年德国卡尔斯鲁厄理工学院托马斯·希梅尔教授领导的团队开发出了单原子晶体管,能够实现电流控制单个原子的位移,进而操控电路开关。其基本原理是在单一金属原子宽度的缝隙间建立两个微小金属触点,在缝隙间通过电脉冲来移动单个原子,从而完成电路的闭合和切断。新型单原子晶体管利用固体电解质的工作原理,通过水溶性银电解质凝胶与热解法二氧化硅凝胶电解质结合,并且完全由金属材料构成,降低了晶体管能耗,提高了使用安全性^[9]。

2020年5月,美国国家标准与技术研究所(NIST)与马里兰大学针对单原子管开发了一套原子级生产设备,成为继德国之后第二个能够制造单原子管的国家,也是世界第一个能够批量生产单原子晶体管的团队。NIST团队首先在硅芯片上覆盖一层氢原子(蓝色原子),用扫描隧道显微镜的精细尖端在选定部位去除氢原子,然后将磷化氢气体导入硅表面,并附着在氢原子移除的位置将硅表面加热,氢原子受热喷出,磷原子嵌入硅表面(灰色原子);最后经过进一步处理,磷原子作为量子位元形成原子器件^[10],其原理如图3所示。

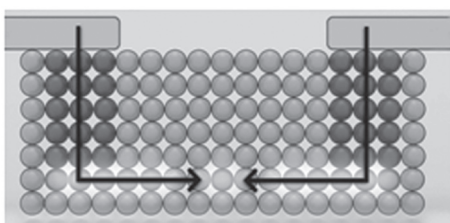


图3 NIST原子晶体管生产原理

2.3 量子霍尔效应

量子霍尔效应将数学中的拓扑概念引入物理学,超越了Landau根据对称性破缺理论对物质分类的传统标准,为拓扑物态与拓扑材料的快速发展奠定了基础,并且成为超导之外的另一个凝聚态物理宏观量子现象。合肥微尺度物质科学国家研究中心国际功能材料量子设计中心(ICQD)和中国科学技术大学物理系的乔振华教授与南方科技大学张立源教授、新加坡科技设计大学杨声远教授、美国佛罗里达州立大学的杨昆教授、麻省理工学院的Lee教授和布鲁海文国家实验室的Gu教授等进行了理论与实验合作,在碲化锗($ZrTe_5$)块状单晶体材料中首次

观测到三维量子霍尔效应。

在层状碲化锗材料中,电子在垂直磁场的平面中形成Landau能级,在侧边界施加电流,边界电子形成单向传输的边缘态。研发团队利用系统体相的绝缘性及电子之间的关联作用,在侧边界形成电荷密度波。由于沿着磁场方向的电子运动不受磁场影响,一个初始的金属态在弱电子关联效应下无法变成绝缘体。对于三维体系,当系统进入仅有一个Landau能级被占据的量子极限区域时,电子之间的关联效应大大增强,导致费米面不稳定,体系内部形成量子态—电荷密度波,即电子的密度沿着磁场方向以一定的周期振荡,整个体系转化为三维量子霍尔绝缘体。该研究结果将为凝聚态物理的应用提供重要参考^[11-12]。

3 单位制成果转化技术

3.1 新“千克”定义的技术成果转移

在三维物体的体积测量中,球体是测量精度能达到最高的最佳形状,SI基本单位“千克”被重新定义后,高纯度硅球取代千克元器成为质量物理实体具有明显优势,即在丢失或损坏的情况下,使用正确的材料和技术即可复制。另外硅球在阿伏伽德罗常数的精确测定中也起着重要作用。为了便于与千克原器进行比较,球体的质量要尽量接近1 kg(直径约为93.6 mm)。为了确保1 kg硅球的精度,直径加工精度必须在1 nm之内。澳大利亚CSIRO精密光学中心(ACPO)加工的单晶硅球,其球面度已达到50 nm,即在各个方向直径的测量误差均达到 5×10^{-4} 量级(如图4所示)。利用激光干涉法测得的硅球体积不确定度达到 10^{-8} 量级,由球面度误差引起的体积相对不确定度小于 10^{-12} 。



图4 CSIRO科学家加工的高纯度硅球

德国联邦物理技术研究院(PTB)的研究成果对重新定义“千克”作出了突出贡献,其研究团队已按照TransMeT项目框架,将高纯度硅球生产技术转移至J.Hauser公司,并协助该公司研发了带有专利

轴承和复杂生产链的新型生产机器,另外还将硅球处理技术转移至 Häfner 公司,并提供高度稳定和精确的质量标准,该项目获得了布伦瑞克工商会颁发的技术转移奖。

3.2 原子钟技术成果转化

美国国家标准与技术研究院 (NIST) 及其合作者利用铷原子在太赫兹 (THz) 波段频率上的周期性震动而产生“嘀嗒”的原理,将该震动作用于外接红外激光器(时钟激光器),产生的激光分别通过 THz 梳与 GHz 梳两个光学频率梳,转换成千兆赫 (GHz),成功研制出新一代实验性原子钟。该时钟能够产生 GHz 微波电信号,稳定在铷原子的 THz 震动上供传统电子仪器测量。从宏观上看,该原子钟在高光学频率下仅由 3 个微米级芯片及支持电子和光学器件组成,其大小与一颗咖啡豆相似(如图 5 所示),运行功率仅有 275 mW,在 4000 s 时的不稳定性为 1.7×10^{-13} ,优于芯片型微波原子钟 100 倍左右。但是从稳定性改进的角度,信噪比还存在不足。芯片级原子钟将广泛用于导向系统、通信网络及卫星时钟备份的传统振荡器等领域。随着时钟体积的进一步缩小,将有望应用于各种手持设备^[13-14]。

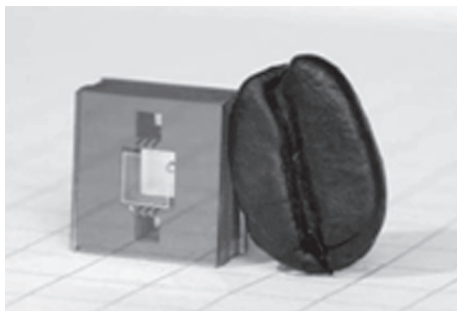


图 5 新型芯片级原子钟体积对比

3.3 交流电压计量溯源研究及转化

电压单位“伏特 (V)”是电学领域的重要物理单位,可以由 SI 基本单位直接导出。直流电压能够直接溯源到 SI 基本单位,交流电压目前无法溯源。针对这一问题,欧洲计量创新与研究计划 (EMPIR) 基于频谱纯约瑟夫森电压的波形计量研究开发了可溯源交流电压测量系统。根据约瑟夫逊效应,利用金斯普顿光学驱动探测器 (JAWS) 测量单晶硅表面约瑟夫逊结的反向偏压,再通过数模转换器获得更大的电压,进而得到约瑟夫逊常数,通过构建量子实时测量系统实现约瑟夫逊效应与 SI 电压单位间的转换。该项目研发的交流电压量子器件测量系统能够在 1 V 的电压水平上合成和测量波形,最大测量

电压可达 1 kV,测量频率达到 1 MHz,与传统热传导标准器件相比,测量时间从 1 h 减少到 1 min,测量不确定度为原来的百分之一。与上一代测量系统相比,新型交流电压量子器件测量系统的更新频率达到 100 MHz,1 kHz~1 MHz 全频率范围内测量误差为 10 nV~1 V。该研究团队还优化了新系统光电二极管安装程序,使之能够产生纯交流电压信号,使测量结果更加可靠。EMPIR 的下一步工作将设计量子系统交互界面,提供重新定义的基本单位“伏特”的直接溯源^[15-16]。

4 新型材料测试技术发展

4.1 石墨烯技术在标准电阻上的应用

量子霍尔效应是复现 SI 单位制中电阻单位的重要工具。英国国家物理研究院 (NPL)、查尔莫斯技术大学与 Graphensic 公司联合研究了一套桌上电阻基准装置(如图 6 所示),该装置利用碳化硅上生长的外延石墨烯在高温和低磁场环境下的性能,使量子霍尔效应能够在低磁场和高温环境下得以复现,同时仍然能保持十亿分之一的准确度^[17]。外延石墨烯能够显著缩短溯源链,并提供更准确的测量方法,该研究表明基于外延石墨烯的量子霍尔仪器不仅能够用于传递电学单位,还能传递基于电学测量的其它标准。

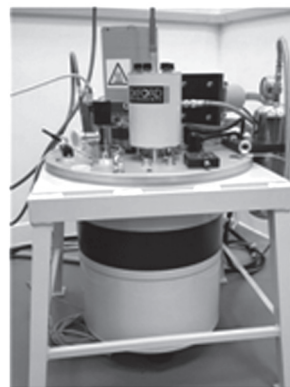


图 6 NPL、查尔莫斯技术大学及 Graphensic 公司共同研发的桌上电阻基准装置

4.2 新型纳米薄膜材料研究进展

日本物质材料研究机构 (NIMS) 和筑波大学领导的研究团队开发出一种仅由硼和氢组成的新型导电纳米薄膜材料,利用吸附在该薄膜材料表面的杂质影响其导电性的特性,可将该材料用作分子吸附性的分子感应式传感器材料和催化剂材料等。另外 NIMS 还研究了纳米多孔非晶硅薄膜,结果表明,其阳极具有良好的循环稳定性,而且锂离子存储容量

极高,在充放电 100 次后,储存量为 2 962 mAh/g。将纳米多孔非晶硅薄膜与无机固体电解质相结合,可以解决容量衰减问题。同时纳米多孔结构可适应硅的体积变化,从而限制阳极的力学破坏及雾化。该研究成果可应用于汽车电池、能源工程等多个领域^[18]。

5 措施与建议

5.1 从技术入手,紧跟国际先进技术,推进自主研发

SI 重新定义后,计量技术发展向着量子化、微纳尺度发展。围绕 SI 基本单位量值传递技术的研究层出不穷,各发达国家均在抢占扁平化计量新时代的制高点,并加快运用量子基准的优势,研制能够随时复现 SI 基本量的计量设备。我国应紧跟国际先进计量技术发展,大力加强计量基础研究,推进计量先进成果转化,为国家国防技术产品质量提升提供技术保障。

5.2 从资源入手,整合军地计量资源,形成合作态势

当前我国计量机构存在重复建设,国家、国防、军队计量资源建设并行,计量机构间彼此缺乏交流,局部计量能力较弱,难以攻克高精尖计量技术,难以实现对发达国家计量研究的弯道超车。应加紧出台相应措施,整合计量资源,加强学术交流,形成整体合力,发挥各专业机构的专业优势,突破现有计量测试技术研发瓶颈,从量子计量、微纳计量、新材料测试等新角度实现研究创新。

5.3 从管理入手,加快建设计量体系,强化计量作用

当前我国计量整体规划偏弱,国防计量存在一定滞后性,不能适应武器装备计量保障发展需求。国务院印发的《计量发展规划(2013-2020年)》已经处于收官阶段。从国家层面,应加强对国外计量技术发展的跟踪,总结目前计量规划体系建设中的不足,并按照实际需求制定新规划,保证我国计量技术体系平稳快速发展;从国防计量层面,要注重计量成果的转化应用,跟踪国外武器装备先进计量体系,制定适合我军装备的计量保障体系,从管理、实施、监督等多个角度推动我军计量保障体系建设发展^[19-20]。

参考文献

- [1] BIPM. Resolution 1 of the 26th CGPM [Z]. Paris: BIPM, 2018.
- [2] 马爱文,曲兴华. SI 基本单位量子化重新定义及其意义[J]. 计量学报, 2020, 41(2): 129-133.
- [3] GIRARD G. The Third periodic verification of national prototypes of the kilogram (1988-1992) [J]. Metrologia, 1994, 31(4): 317-336.
- [4] STOCK M. The Revision of the SI—towards an international system of units based on defining constants [J]. Measurement techniques, 2018, 60(1): 1 169-1 177.
- [5] 梁志国. 计量测试标准化[M]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 309-321.
- [6] 洪生伟. 计量管理[M]. 北京: 中国质检出版社, 2012: 26-30.
- [7] National Institute of Standards & Technology. Standard Reference Material 2512: Single atom transistor [R]. Gaithersburg: NIST, 2020.
- [8] TAL E. Naturalness and convention in the international system of Units [J]. Measurement, 2018, 116: 631-643.
- [9] 任同祥,王军,李红梅. 摩尔的重新定义[J]. 化学教育, 2019, 40(12): 19-23.
- [10] 楚珺尧,王强. NIST 下一代芯片级原子钟研究进展[J]. 中国计量, 2020(2): 63-64.
- [11] 甘海勇,刘想靓,林延东. 光子计量技术发展展望[J]. 计量技术, 2019(5): 64-67.
- [12] 韩冰,贺青,李世松,等. 普朗克常数 h 测定与质量量子基准的最新研究进展[J]. 计量学报, 2013, 34(1): 90-96.
- [13] FISCHER J. Progress towards a new definition of the kelvin [J]. Metrologia, 2015, 52(5): 364-375.
- [14] 许文琪. 国外量子信息技术发展分析[J]. 国防科技工业, 2019(5): 46-48.
- [15] Empire projects AC voltage technology featured on cover of IEEE publication [DB/OL]. <https://www.euramet.org/publications-media-centre/news>, 2019-12-02/2020-08-01.
- [16] 刘星. 军事装备试验计量技术管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 60-65.
- [17] 杜晓爽,胡毅飞,冯英强,等. 国外计量测试技术发展动态及其趋势综述[J]. 宇航计测技术, 2018, 5(38): 24-31.
- [18] 张寅. 浅谈如何做好检测实验室计量管理工作[J]. 计量与测试技术, 2015, 42(2): 77-79.
- [19] 黄耀文. 现代企业计量工作指导手册[M]. 北京: 中国质检出版社, 2019: 30-51.
- [20] 王良,黄莹,易卉,等. 型号计量保障工作典型问题分析[J]. 宇航计测技术, 2019, 39(Z1): 91-94.