

计量的空间

段宇宁¹, 李进源¹, 朱美娜², 杨平¹, 晏刘莹¹

1. 中国计量科学研究院, 北京 100029

2. 国家市场监督管理总局计量司, 北京 100820

摘要 2018年国际计量大会(CGPM)通过国际单位制(SI)重新定义,为计量的发展和应用打开了更为广阔的空间。从计量的定义出发,用演绎和归纳相结合的方式,梳理计量涉及的要素和内容,提出“计量的空间”概念,从计量学基础、法制计量、计量的应用等不同层面阐释计量的丰富内涵。提出计量学基础包含测量理论研究、量值溯源、测量新手段、操作规范性、测量结果分析等基本要素。提出计量学基础与法制计量共同构成计量基础设施,支撑计量的产业应用。从计量的空间角度回顾了计量发展的3个阶段,展望了计量3.0时代SI重新定义可能带来的新变化。

关键词 计量;测量科学;法制计量;产业计量

2018年11月16日,第26届国际计量大会(General Conference on Weights and Measures, CGPM)全票通过了国际单位制(International System of Units, SI)基本单位的新定义,SI基本单位全部改为用精确不变的常量定义,新定义于2019年5月20日正式生效,标志着计量进入了“全新的3.0时代”^[1]。过去SI单位定义所依赖的最后一件实物基准——国际千克原器(International Prototype of the Kilogram, IPK)退出了历史舞台。这一变革彻底改变了国际计量界以国际计量局(Bureau International des Poids et Mesures, BIPM)为顶点的金字塔形溯源结构,在新定义下,任何机构在理论上都可以依据物理规律和定义常量实现SI单位和量值

并满足溯源性要求。国际计量格局将从单中心模式转变为多中心模式,先进国家计量院将凭借其先进的测量技术建立溯源至SI的基准装置,直接为其区域内或更大范围的用户提供计量溯源,而无需再溯源至国际计量局^[1]。产业内的高端测量传感器和测量仪器制造厂商,也可以基于SI新定义和有关的物理规律实现测量过程,将计量溯源嵌入传感器和仪器内部,实现自校准。

SI新定义带来的计量体系变革、产业发展以及其他影响将在未来依次展现。人们所熟悉的计量是保证单位统一、量值准确的活动这一传统认识已经遇到挑战,中国各级计量机构、仪器仪表厂商和产业内校准检测实验室将迎来挑战与机遇并存的

收稿日期:2022-06-16;修回日期:2022-10-08

作者简介:段宇宁,研究员,研究方向为热学计量、计量管理、计量国际合作,电子信箱:duanyin@nim.ac.cn

引用格式:段宇宁,李进源,朱美娜,等.计量的空间[J].科技导报,2023,41(5):91-98;doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2023.05.009

新发展时期。如何应对这一艰巨挑战,抓住这一赶超世界先进的难得机遇,是中国计量人应该思考的重要问题。本文从计量的定义出发,提出“计量的空间”概念,并阐释计量的广阔内涵,以期对解决上述问题提供一些新思路。

1 从计量的定义到计量的空间

根据由BIPM、国际标准化组织(International Organization for Standardization, ISO)、国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)、国际法制计量组织(International Organization of Legal Metrology, OIML)、国际临床化学和检验医学联合会(International Federation of Clinical Chemistry and Laboratory Medicine, IFCC)、国际纯粹和应用化学联合会(International Union of Pure and Applied Chemistry, IUPAC)、国际纯粹和应用物理学联合会(The International Union of Pure and Applied Physics, IUPAP)、国际实验室认可合作组织(International Laboratory Accreditation Cooperation, ILAC)8个国际组织联合制定的国际标准《国际计量学词汇 基础和通用概念及有关术语》(International Vocabulary of Metrology, VIM),“计量”被定义为测量的科学及其应用。计量包括测量的理论与应用的所有方面,无论测量不确定度大小和应用领域如何^[2]。而测量是通过实验确定量值的过程^[2]。

对于简单测量过程,例如用直尺测量未知长度,通过将未知长度与作为参照对象的直尺比较,获得未知长度的一个量值。该测量过程可以表示为

$$X = x \cdot X_0 \quad (1)$$

式中, X 为未知长度, X_0 为参照对象, x 为 X 与 X_0 之比的数值。

对于更复杂的一般性测量过程,往往可用式(2)表示为

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2)$$

式中, Y 为被测量或测量的输出量,它由 N 个输入量 X_1, X_2, \dots, X_N 通过函数 $f(\cdot)$ 计算得到,而每个 X_i 都

进一步通过类似式(2)或式(1)的测量过程得到。式(2)称为测量函数^[2]。

社会的进步要求越来越多的精密测量,精密测量涉及诸多要素。仅就单一测量而言,测量的结果是否准确取决于测量方法的科学性、测量手段的溯源性、测量操作的规范性、测量结果分析的合理性等环节。作为测量科学的计量的范畴必然要涵盖上述这些环节。

式(2)和式(1)表达的一般性测量过程有助于梳理和理解各环节所涉及的要素。其中,在求 Y 和各 X_i 时的每个 $f_i(\cdot)$ 所利用的物理现象为测量原理,这是测量方法的基础,有关测量原理和方法的整套理论构成测量理论。每一个 X_i 都通过类似式(2)或式(1)的测量向上溯源,最终溯源到一系列类似 X_0 的参照对象,这些参照对象的量值是已知的或事先已定义的,这一过程即为量值溯源,这些参照对象为测量标准所实现的量值。当利用相关技术把式(2)的测量过程整合成测量仪器,则构成了测量手段。在测量过程中,为得到准确有效的测量结果,尤其对于复杂的测量过程,必然要求操作过程满足一定的规范,即为操作规范性。最后,在得到被测量的测量值后,对其准确性(测量不确定度)的评价即为测量结果分析。

这些计量基本要素和每个要素下的内容,构成一个二维结构,可称为计量学基础(图1)。其中,平面二维坐标的纵轴为要素,横轴为每个要素下的

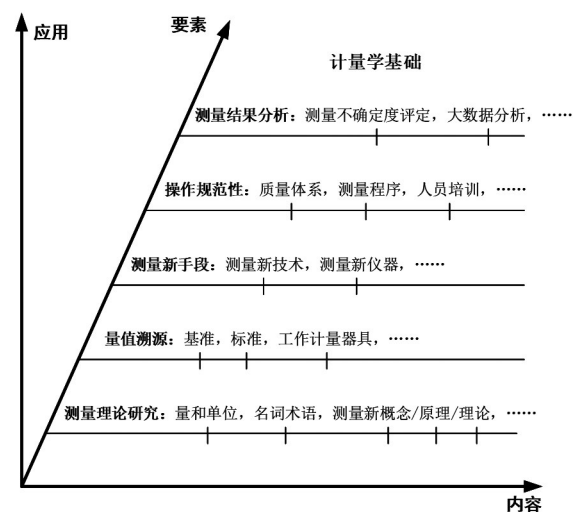


图1 计量学基础

内容。在测量理论研究要素中,包含量和单位、名词术语、测量新概念、测量新原理、测量新理论等内容;在量值溯源要素中,包含基准、标准、工作计量器具等内容;在测量新手段要素中,包含测量新技术、测量新仪器等内容;在操作规范性要素中,包含质量体系、测量程序、人员培训等内容;在测量结果分析要素中,包含测量不确定度评定、大数据分析等内容。与计量学基础二维平面正交的轴是测量科学的应用。

法制计量是测量科学的重要应用,在测量科学基础之上增加法律法规对计量的要求,则构成法制计量。在要素—内容二维平面上,法制计量包含的要素有(图2):基础设施要素提供计量溯源性,支撑精准测量;测量法定要求要素包含法定计量单位、计量器具的型式评价和检定等内容;符合性评定、监管2个要素均包含规定产品、规定活动等内容。

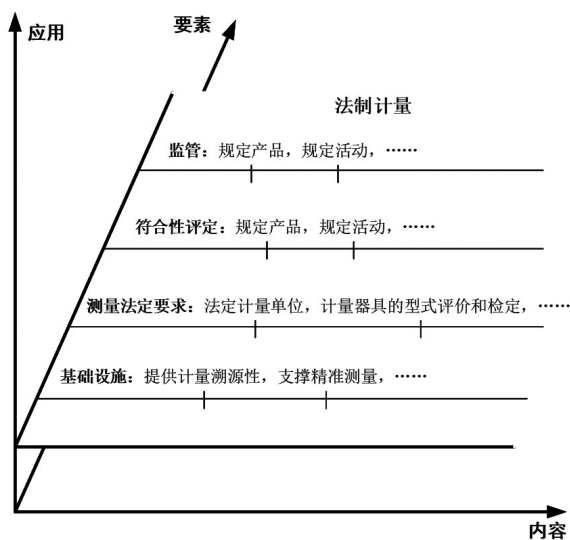


图2 法制计量

计量学基础和法制计量共同构成计量基础设施,支撑计量在能源、环境、健康等各产业中的应用。为满足不同产业需求而开展的计量活动构成了产业计量的工作。归纳而言,在要素—内容二维平面上,产业计量具有如下共性特点(图3):针对重点产业,如现代高技术产业、战略新兴产业等;面向产业特点,开展如量传技术、测试技术、测试装备等的研究与开发;服务产品全寿命周期,包括研发、设计、生产、使用等各个环节;构建产业计量服务体系,包括服务平台、监管平台等。

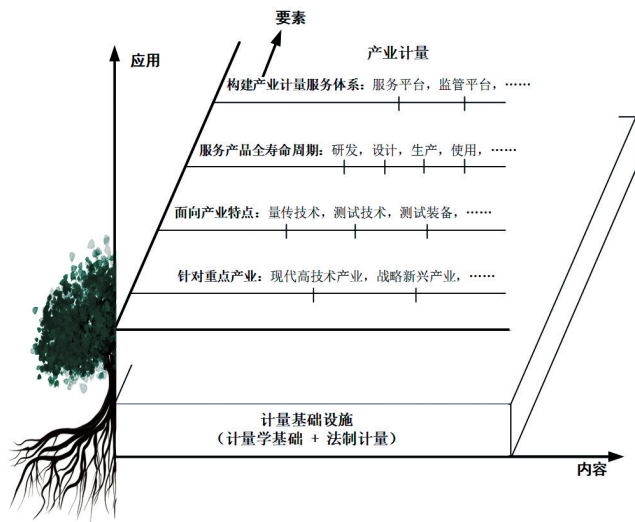


图3 产业计量

从计量的定义出发,借助一般性的概念推导,得到了三维“计量的空间”。这个空间包含要素、内容、应用3个维度,计量所涉及的对象和活动可以有条件地归纳到该空间中。随着科学技术的发展以及人们认识的深入,一些新工作可能被纳入到该空间中,计量的空间范围将随之不断扩大。

图1、图2和图3从维度和空间的角度分别列出计量学基础、法制计量和产业计量所涉及的要素和内容,目的是为明确计量工作的细分方向,并不意味着各项要素和内容是完全独立发展的。事实上,不同要素和内容之间存在支撑关系。例如,测量新原理和新技术催生测量新仪器的研发,新仪器经过校准作为基础设施的一部分支撑法制计量的要求,然后与其他有关要素一起支撑某产业中的测量需求。总体而言,计量学基础和法制计量如同树根和树干,支撑了位于树冠的产业计量(图3)。计量学基础、法制计量和产业计量的关系也可以借用地球的结构图来形象地表示(图4),位于地心的计量学基础支撑了位于地幔的法制计量,进一步支撑地表不同区域所代表的各个产业计量;计量最核心的内容,例如国际单位制,位于地心中最深处的位置;支撑不同产业计量的法制计量和计量学基础的内容有不同的侧重。

以下逐一阐述图1~图3中计量学基础、法制计量、产业计量中各要素的内涵和所涉及的具体内容。

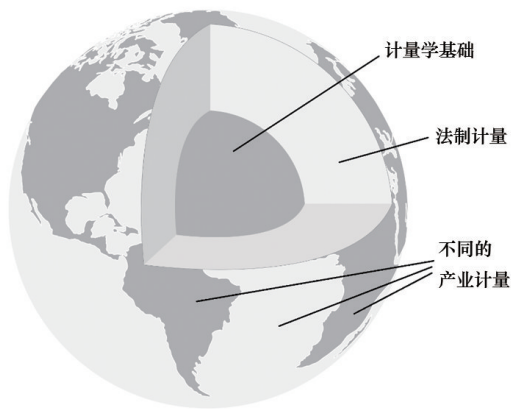


图4 计量学基础、法制计量和产业计量的关系

2 计量学基础

从测量发生的过程看,计量涉及以下方面的工作:建立测量理论、研制测量工具、进行量值溯源、开展测量操作和分析测量结果。其中,测量理论依据相关测量原理而建立;测量工具的研制需要利用相关应用技术,而且测量工具需要具有计量溯源性^[2]。以下5个方面共同构成了计量学基础。

2.1 测量理论

现代测量科学起源于法国大革命时期出现的米制,从18世纪末米和千克2个单位的实物标准建立开始,经过高斯、韦伯、麦克斯韦等科学家的推动,经历厘米克秒制和米千克秒制建立和应用,到1960年国际单位制SI正式建立和命名,最后迎来2018年SI的重新定义。在此过程中,基本单位的扩充和重新定义带来单位制的不断更新,科学家对于量和单位的研究驱动着测量科学的不断发展。量和单位是计量的核心内容。有关量和单位的权威资料是《SI手册》^[3],提供了关于SI的定义和使用的完整内容。

与任何学科或应用一样,如果要深入分析和讨论,必须先统一名词术语。只有这样,才能把具体的现实事物抽象成概念,同一个名词术语在不同人头脑中才具有同一个概念、对应同一个事物,深入的讨论和推理才得以实现。因此,名词术语在计量中占据基础性地位,这方面的全球统一标准即为VIM,中国的对应规范文件是JJF1001《通用计量术

语及定义》。SI与名词术语一起构成了计量最根本的基础。

物理、化学、生物及生命科学等基础学科中发现的一些具有特定规律的现象可以用来作为测量原理^[2]。例如,摆钟计时就是利用了单摆具有固定摆动周期这一物理现象,而物理学指出,摆动周期与摆长和重力加速度之间满足特定的数学关系,因此利用单摆测量时间具有了科学基础。又如,玻尔兹曼常量将热力学温度和能量联系起来,通过测量能量就能测量温度,这也是物理学提供的测量原理。关于某一类测量的系统化的测量原理和知识构成了测量理论。为了满足更准确、更便捷、更经济、尺寸更小等不同测量需求,往往需要利用和组合不同的测量原理或理论;反过来,基础学科中的新发现也往往能够给计量带来新的发展方向。因此,发展测量理论是可能给计量带来突破发展的基础性工作之一。

2.2 测量有关应用技术

有了测量原理或理论后,需要利用合适的工具才能实现测量。例如,日常生活中测量长度时需要一把尺,根据不同的使用场景,这把尺可能需要是硬的,也可能是要软的;根据耐久性的要求可能还需要其耐磨损或耐腐蚀,对于精度要求高的情况,尺子还需要精密加工等。根据这些不同的要求制作尺子可能需要材料技术、精密加工技术等不同的应用技术。

计量所涉及的应用技术非常多,包括传感技术、光电技术、量子技术、自动控制技术、过程控制技术、数字信号处理技术、电子技术、计算机技术、材料技术、精密加工技术、精密仪器技术等。这些技术的应用,根本目的是为了制造更加适用的计量器具或测量仪器。应用技术的发展或新技术在测量中的应用往往能为计量带来飞跃性发展。例如,基于量子技术原子钟的诞生使时间计量的准确度在半个世纪左右提高了6个数量级。

2.3 单位统一和量值溯源

测量工具如果没有计量溯源,那么使用它得到的测量结果就没有可比性,也谈不上准确性。为了实现计量溯源,需要校准测量工具,就是将其与作

为参照对象的测量标准进行比较,这一过程已用式(1)表达。用于校准的测量标准还要进一步向上一级溯源,直至溯源至最上一级的基准。

在新SI框架下,全世界最顶级的基准将是各国计量院基于单位实现方法(*mises en pratique*)^[4]规定的原级方法或次级方法建立的SI单位实现装置,它们通过与新SI的7个定义常量相关联的方式、以很高的准确度实现计量溯源体系中最基础的一些SI单位,其他所有量值都直接或间接地溯源到这些SI单位。

从以上过程可以看出,测量单位统一十分重要。统一测量单位,能够实现测量结果之间的计量可比性^[2]。各国的最高测量标准通过国际比对检验并实现量值的一致性,即计量兼容性^[2]。各国国内的量值通过检定或校准,藉由各级测量标准通过不间断的比较链条溯源至最高标准,实现量值的计量溯源性。中国最高的测量标准为计量基准^[5],此外还有各级的计量标准。以上保证计量溯源性的过程涉及基标准和检定系统的建立、校准规范和检定规程的制定、比对规则的建立等内容。这些工作即是狭义计量所包含的大部分内容,即“确保单位统一、量值准确的活动”。

2.4 测量程序与质量保证

有了统一的单位和具有溯源性的计量装置或器具(包括合适的环境条件),有经验的计量从业者能够完成准确的测量。但为了使测量过程尽可能摆脱人为因素的影响,使不同的测量操作者都能得到具有满意准确度、具有一致性的测量结果,从而提供规模化的测量服务以满足工业生产中大量的计量需求,需要制定一套完整的测量程序和质量管理体系。

国际标准ISO/IEC 17025《检测和校准实验室能力通用要求》^[6]规定了对于检测和校准实验室的整体质量管理要求和认可准则,涉及人员、仪器、材料、方法、环境等各方面。国际标准ISO 17034《标准物质/标准样品生产者能力认可准则》^[7]对标准物质/标准样品的生产者规定了质量管理要求。国际标准ISO 10012《测量管理体系》^[8]对组织的测量管理体系提出了指引。依据这些国际通行准则建立

的质量管理体系(*quality management system*, QMS)、制定的测量程序和测量方案,能够很好地规范组织中计量人员的测量操作,从而得到具有预期准确度的测量结果。

2.5 测量结果分析

当测量得到一个结果后,往往需要定量地评测结果质量,也就是要知道结果的准确程度如何。例如,在对计量器具进行合格评定时,所用计量标准装置的测量结果质量要高于被评定的计量器具。又如,在开展测量比对时,需要先评价测量结果的准确程度,才能判断不同测量结果的一致性。

计量使用测量不确定度^[2]定量地表征测量结果的质量。由BIPM、ISO、IEC、OIML、IFCC、IUPAC、IUPAP和ILAC等8个国际组织联合发布的《测量不确定度表示指南》^[9](*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM*)给出了测量不确定度评定与表示的详细导则。中国对应发布的国家计量技术规范是JJF1059.1《测量不确定度评定与表示》^[10]。测量不确定度在计量中非常重要,通常作为测量结果的一部分一同给出^[2]。测量不确定度在计量溯源、测量比对、测量结果的符合性判定中极为重要。有关测量不确定度评定方法的研究、GUM的应用实践都是计量工作中很重要的一部分。

3 法制计量

以上计量学基础是世界通用的,适用于每个国家。然而,实际的计量应用实践需要与每个国家的法律法规相适应,进而产生了法制计量。按照国际法制计量组织OIML的定义,法制计量是将法律法规的结构和强制要求应用于计量的实践和过程^[11]。法制计量的范围在各国可能是不同的^[11]。法制计量包括:(1)建立法律要求;(2)规定产品、规定活动的控制或符合性评定;(3)规定产品、规定活动的监管;(4)为规定的测量和测量仪器提供溯源性的必要基础设施。

OIML发布了一系列建议文件,涵盖计量法要素^[12]、法定计量单位^[13]、测量仪器的法定要求^[14]等不同方面。

计量学基础与法制计量一起构成了国家计量基础设施,支撑计量在各个领域的应用。

4 计量的应用

计量在能源、海洋、环境、通信、医学等不同领域中均得到广泛应用。以长度、温度、力学、电学等计量学科为代表的传统计量体系虽然能够满足很多应用需求,但随着各领域的不断发展,不同领域中的很多测量问题已逐渐不能完全用传统计量方法解决,例如出现了极端量、动态量、多参量、在线测量、原位测量等新的测量需求。现今在各领域蓬勃发展的数字化转型也对计量提出了新的要求,要求计量对各领域的数字化过程提供支持,为数字世界提供质量保障。因此,领域需求引领计量向更广的空间发展,要求计量打破学科界限,用更加融合的方式解决应用中的新问题。

为使计量能够更好地服务产业需求,我们提出产业计量的定义,即为满足产业需求而开展的一系列计量活动的统称。产业计量包括所有利用测量原理、测量仪器、测量方法、测量程序、测量结果为产业提供技术创新和服务的活动。产业计量以能够为产业提供全溯源链、全产业链、全生命周期以及前瞻性的计量测试服务为目标和任务。

在每一个产业中,计量工作涉及图1和图2中的各个要素和内容。例如,在一个产业中,需要根据产业要求研究测量理论,形成测量方法,研制测量仪器,实现量值溯源,制定测量规范,有效评估测量结果。特别地,针对产业需求,提出测量仪器的指标以及相应的测量方法和程序,并制定国家标准、行业标准或计量规程规范,也是产业计量或计量应用中需要开展的工作。面向特定产业,可建立产业计量中心,为产业计量发展提供共性服务平台。

因此,计量应用要求计量能够服务不同的产业,涉及的计量工作包括跟踪产业测量需求、提供测量解决方案、开展计量成果转化、开发专用测量仪器等,此外还包括计量科普与知识传播等工作。

5 从计量的发展阶段看计量空间的拓展和演变

全球计量发展可以分为3个阶段^[1]:从古代到19世纪末,以度量衡为标志的计量1.0时代;从19世纪末到2018年SI重新定义,以《米制公约》和SI为代表的计量2.0时代;2018年SI重新定义,标志着全面进入以基于量子技术的现代测量科学为代表的计量3.0时代。这3个阶段体现了测量标准从建立到范围不断扩大、稳定性和精准性不断提升的趋势,也对应了计量空间的不断拓展和演变。

在计量1.0时代,在皇权的影响之下,世界上不同国家和地区统一各自的度量衡,促进了当时的社会 and 经济发展。例如,中国在公元前221年由秦始皇统一了度量衡,英格兰国王亨利一世(1068—1135年)规定码是其鼻尖到指尖的距离。这些皇权的规定在一定地理区域内统一了测量标准,满足了农耕文明下自给自足的需求。但各个区域的测量标准并不统一,阻碍了国家和地区之间的贸易发展。这时的计量工作仅涉及计量的空间中“量值溯源”条线上的部分内容,其他的计量学范畴和内容还没有发展起来。

18世纪欧洲工业革命和启蒙运动之后,各国混乱不一的度量衡给货物贸易和科学研究带来了极大不便。18世纪末基于地球子午线长度的米定义的出现揭开了向计量2.0时代演进的序幕。在这一时代,世界计量体系得到极大发展,计量的空间中的各个要素和内容,特别是计量基础设施中的部分,不断得到建立和拓展。1875年5月20日,17个成员国在法国签署《米制公约》,标志着正式进入计量2.0时代。由此,米、千克、秒等基本计量单位的定义在当时世界上一些主要国家中得到统一,BIPM成为国际计量体系的量值溯源源头。在计量2.0时代,计量学基础和法制计量得以逐步建立和发展。1960年SI得到命名。1955年建立OIML,随后陆续建立了法制计量的各项准测和规定。1970年发布第一版《SI手册》,1984年发布第一版VIM,1993年发布第一版GUM,1999年发布第一版ISO/

IEC 17025。计量基础设施由此得到不断完善。

计量 2.0 时代建立的计量基础设施有效支撑了社会经济发展。首先,计量保障了贸易的公平,为贸易提供了便利。例如,中国西气东输从土库曼斯坦进口的天然气经过哈萨克斯坦从新疆霍尔果斯入境,口岸的天然气流量表由中国国家计量院校准,测量结果得到中国与哈萨克斯坦两国的认可。又如,中国地方政府对电能表实行强制检定,消除了曾经普遍存在的“负公差”(即实际电能小于电表示数)情况。此外,计量服务了国家战略需求和重要民生需求。例如,对于时间的精准计量支撑了北斗卫星定位的准确性,严重急性呼吸综合征(SARS)和新型冠状病毒肺炎(COVID-19)疫情期间对于温度的精准计量支撑了对潜在病患的快速筛查,“奶粉三聚氰胺”事件中对于化学成分的精准计量支撑了三聚氰胺的快速检测,新型冠状病毒肺炎疫情时的核酸标准物质研制支撑了准确高效的核酸检测。在这些事例中,国家和省级的计量机构发挥了主要作用,这一方面源于其在计量研究方面的实力,另一方面也得益于其在计量 2.0 时代的量值溯源体系中的关键地位。总体而言,2.0 时代计量的发展极大促进了贸易的便利和公正,也服务了一些贸易之外的应用需求,但计量应用的广度和深度还有所不足。

在计量 3.0 时代,SI 基本单位通过常量和物理规律定义,不再依赖特定的实物,SI 单位定义的实现不再受方法限制,有能力的机构能够按照定义实现计量单位,由此将能够缩短量值溯源链,提高终端测量准确度。相应地在计量学基础方面,测量方法、溯源方法、测量仪器等方面都会出现创新。由于计量溯源体系将变得扁平化,对应的法制计量管理体系也应调整以适应这一变化,提升计量管理效能。在产业计量方面,SI 新定义将为传感器、仪器仪表等行业打开广阔发展空间,结合信息技术,这些行业可以将计量嵌入产品设计、生产、使用的全过程,实现泛在测量、在线校准、实时校准、自校准等,由此支撑更广泛的测量应用。

可借助时间单位量子化定义后的发展理解和推测 SI 重新定义可能给其他领域带来的变化。

1967 年 SI 单位秒的量子化定义推出后,经过几十年的发展,时间频率计量的准确度大大提升,并得益于 GPS 和北斗等全球定位系统和无线通信的广泛应用,目前大多数的终端用户已无需通过手表或时钟来计时,利用手机和电脑可以几乎不限时间地点、无成本地获取毫秒级准确度的时间,满足绝大多数对于时间的需求。时间频率计量服务仅针对法制计量管理要求的检定校准、对时间测量要求更高的科学研究、涉及时间测量新产品的第三方验证等几类情况,校准需求已大大小于其他计量领域。未来,随着对新定义下其他 SI 单位实现方法研究和应用的不断突破,其他计量领域也可能出现时间频率领域的情况。在以后,能够准确测量时间、位移、速度、加速度、温度、湿度、光强等量的传感器也许会无处不在,并无需送到实验室校准就能长期稳定地、准确地提供测量值,由此支撑先进制造、智能驾驶、智慧生活等场景的应用。经过这样的发展,计量的空间中的测量理论、量值溯源、测量手段、测量操作、结果分析,以及法制计量和产业计量等方面的要素和内容必然会出现扩展和重心的转移。

在未来,计量中的概念和方法还有可能被拓展应用到科学技术以外的人文社科领域中,为广义测量问题提供统一的标尺,支撑其质量的提升。

6 结论

从计量的定义出发,用演绎和归纳相结合的方式,梳理计量涉及的要素和内容,提出“计量的空间”概念,从计量基础、法制计量、计量的应用等不同层面阐释计量的丰富内涵。

在全新的计量 3.0 时代,一方面,任意主体在任意时间和任意地点都能用任意原级方法实现最佳测量,一大批革命性新技术将因此陆续涌现;另一方面,过去长期发展形成的国际、国内计量溯源体系将面临被打破、被重构的重大变化。在这一机遇和挑战并存的新时代,计量工作者应勇于突破以计量基标准保证量值溯源的传统工作思维,积极努力在更加广阔的计量的空间中开展工作,共同开创计量事业的美好明天!

致谢 张钟华院士,李天初院士,原遵东首席研究员,高蔚主任,徐学林、屈继峰、房芳研究员,李健主任提出了宝贵建议和意见。特别感谢郑葳的帮助。

参考文献(References)

- [1] 段宇宁,刘旭红.漫谈国际单位制变革[J].计量技术,2019,5:3-7.
- [2] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). International vocabulary of metrology—Basic and general concepts and associated terms (VIM): JCGM 200: 2012[S]. 3rd ed. Paris: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2012.
- [3] Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). SI Brochure: The International System of Units (SI)[M]. 9th ed. Paris: BIPM, 2019.
- [4] Bureau International des Poids et Mesures (BIPM). Practical realization of the definition of some important units [EB/OL]. (2019-05-20)[2022-11-10]. <https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique>.
- [5] 全国法制计量管理计量技术委员会.通用计量术语及定义: JJF1001—2011[S].北京:国家质量监督检验检疫总局,2011.
- [6] International Organization for Standardization (ISO)/International Electrotechnical Committee (IEC). General requirements for the competence of testing and calibration laboratories: ISO/IEC 17025[S]. Geneva: ISO/IEC, 2017.
- [7] International Organization for Standardization (ISO). General requirements for the competence of reference material producers: ISO 17034[S]. Geneva: ISO, 2016.
- [8] International Organization for Standardization (ISO). Measurement management systems—Requirements for measurement processes and measuring equipment: ISO 10012 [S]. Geneva: ISO, 2003.
- [9] Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). Evaluation of measurement data—Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM): JCGM 100: 2008[S]. Paris: Bureau International des Poids et Mesures (BIPM), 2008.
- [10] 全国法制计量管理计量技术委员会.测量不确定度评定与表示: JJF1059.1—2012[S].北京:国家质量监督检验检疫总局,2012.
- [11] International Organization of Legal Metrology (OIML). International vocabulary of terms in legal metrology (VIML): OIML V 1[S]. Paris: OIML, 2013.
- [12] International Organization of Legal Metrology (OIML). National metrology systems—Developing the institutional and legislative framework: OIML D 1[S]. Paris: OIML, 2012.
- [13] International Organization of Legal Metrology (OIML). Legal units of measurement: OIML D 2[S]. Paris: OIML, 1999.
- [14] International Organization of Legal Metrology (OIML). Legal qualification of measuring instruments: OIML D 3 [S]. Paris: OIML, 1979.

On dimensions of metrology

DUAN Yuning¹, LI Jinyuan¹, ZHU Meina², YANG Ping¹, YAN Liuying¹

1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

2. Department of Metrology, State Administration for Market Regulation, Beijing 100820, China

Abstract The redefinition of the International System of Units (SI), approved by the General Conference on Weights and Measures (CGPM) in 2018, opened up a wider scope for the development and application of metrology. Starting from the definition of metrology, this paper analyzes the aspects and elements of metrology by deduction and induction and then puts forward the concept of "dimensions of metrology". The basics of metrology as a science, legal metrology, and application of metrology in industry are explored accordingly. It is proposed that the aspects of the basics of metrology include research on measurement theories, traceability of quantity values, new measurement devices, operational specifications, and analysis of measured values. It is proposed that the basics of metrology and legal metrology constitute a metrological infrastructure that underpins applications of metrology in various industries. Three development stages of metrology are reviewed from the perspective of the dimensions of metrology. The paper also looks ahead at new changes in the Era of Metrology 3.0 that may be brought about by the redefinition of SI.

Keywords metrology; measurement science; legal metrology; industrial metrology ●



(责任编辑 傅雪)