

# 计量数字化发展研究与实践进展综述



胡泊<sup>1,2</sup>

1. 中国计量科学研究院, 北京 100029

2. 清华大学, 北京 100088

**【摘要】** 基于已有文献, 梳理计量数字化概念、国际探索、我国计量数字化发展的研究现状, 总结我国计量数字化发展实践、分析面临的问题, 并提出持续完善计量数字化顶层设计、建立计量数字化研发应用体系、培养计量数字化复合型人才等为我国未来计量数字化转型提供保障的建议。

**【关键词】** 计量学; 数字化; 计量数字化; 数字校准证书; 计量数据; 计量管理

**【中图分类号】** TB91-64

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 2096-9015(2023)05-0039-06

**DOI:** 10.12338/j.issn.2096-9015.2022.0278

**【引用本文】** 胡泊. 计量数字化发展研究与实践进展综述 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(5): 39-44.

## A Review of Advances in Research and Practice of Metrology Digitalization

HU Bo<sup>1,2</sup>

1. National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

2. Tsinghua University, Beijing 100088, China

**【Abstract】** This review is built upon existing literature to explicate the concept of metrology digitalization, the global explorations in this field, and the current state of metrology digitalization research in China. It encapsulates the developmental practices of metrology digitalization in China, scrutinizes the challenges encountered, and suggests potential strategies for securing the future transformation of metrology digitalization in China. Such strategies encompass the continual refinement of the overarching design of metrology digitalization, the establishment of a comprehensive research, development, and application system for metrology digitalization, as well as the cultivation of versatile talent specializing in metrology digitalization.

**【Key words】** metrology, digitalization, metrology digitalization, digital calibration certificate, metrology data, metrology management

### 0 引言

计量数字化来源于数字时代发展的要求。当今时代, 以信息技术为代表的新一轮科技革命加速推进, 引起生产、生活和治理方式的全面变革, 对经济社会发展、人民生活产生广泛影响。

从国际来看, 各行业各领域数字化程度日益加深, 数字发展、数字治理、数字安全等新理念层出不穷, 新技术、新产品、新业态正在成为新的全球经济增长点, 数字技术为世界带来一场革命。

从国内来看, 我国先后出台《网络强国战略实施

纲要》和《数字经济发展战略纲要》等重要规划, 从国家层面部署推动数字经济发展。《计量发展规划(2021—2035年)》把计量数字化放在更加突出的位置, 提出要加快计量数字化转型, 加强计量和数字技术深度融合。

全球数字秩序与规则的博弈日益激烈, 数字经济正在成为国际竞争的主要方面。我国数字经济正转向深化应用、高质量发展的阶段。为应对新形势新挑战, 数字化转型成为必由之路。在这样的时代背景下, 计量工作的数字化转型必须得到高度重视, 以服务创新发展, 支撑快速发展的数字经济, 把握数

收稿日期: 2022-11-17; 修回日期: 2023-02-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF0608100)。

作者简介: 胡泊(1990-), 中国计量科学研究院战略中心工程师, 清华大学在读博士研究生, 研究方向: 计量战略等, 邮箱: hubo@nim.ac.cn。

字化的新机遇。例如,缩短计量产品和服务的供应周期,压缩审批时限,助力创新发展<sup>[1]</sup>。因此,计量的数字化转型与政府、产业和企业的数字化转型相辅相成、互相促进。

## 1 计量数字化概念

### 1.1 计量的定义及任务

计量是关于测量及其应用的科学,计量的基本任务是定义基本量,建立计量基标准传递量值给社会,为社会提供全球一致的量值服务。测量广泛应用于科技与经济社会中,承担着基础性和支撑性的功能,具有举足轻重的地位。各类特性指标的准确计量是保证各生产环节符合工艺标准,并实现顺利衔接的必需技术支持。在国际贸易、健康与生态环境保护等领域,许多重大问题都与测量密切相关。例如,疾病诊断和治疗需要获得关于机体指标的测试结果;有效的测量会促进市场交易的顺利进行,产品是否符合质量标准需要通过测量来确定;保持良好的生态环境需要对大气、水、土壤等成分进行分析测量等。

计量、标准、合格评定(主要包含认证认可、检验检测)并称为国家质量基础(NQI)的三大支柱。计量是国家质量基础设施的核心组成部分,关键参数、性能指标等重要数据需要以大量准确的测量数据为依据。2018年11月16日,第26届国际计量大会1号决议通过国际单位制(SI)七个基本量的重新定义。2019年5月20日新定义正式生效,计量从此迈入量子时代。国际单位制七个基本量的新定义不仅适应新技术发展需要,而且改变了传统计量以实物进行量值传递的模式,使计量量值传递更加扁平化和准确高效。国际单位制七个基本单位基于物理常数的定义方法,为测量准确度的提升开拓了广阔的空间,为计量数字化的全面深入发展打下基础,并正在塑造全球计量体系的新格局。

### 1.2 计量数字化

“数字化”与创新密切相关。对此,存在“数据化”(Digitization)和“数字化”(Digitalization)两个相近、易混淆的概念。数据化是用一系列数字表达物体、图像、声音、文档、信号等的实践,是将模拟信息转化为数字信息的过程。而数字化使用数字技术对商业模式变革,通过数字化手段收集数据信息的价值,强调对社会的影响<sup>[2]</sup>。数字化转型通常被定义为使用数字技术来创造新的或修改现有的流程、

服务和文化和客户体验,以满足不断变化的业务和市场要求<sup>[3]</sup>。嵌入式系统、物联网(IoT)、云计算、区块链和大数据等数字技术在过去的十年中快速发展,开拓了全新的技术领域和数据驱动的市场,如工业互联网、工业4.0、机器学习,以及基于人工智能的服务等。

在这些技术和数据驱动、数字平台的概念提出的基础上,计量领域专家就计量数字化转型(Digital Transformation)展开探讨研究。尽管目前还未形成一致、权威的定义,但在数字技术可以为计量的所有利益相关者带来好处方面已取得一定共识,例如,克服法规设置的创新障碍、更好地协调法律程序、降低开发成本,并缩短新产品的上市时间<sup>[4]</sup>。

国际计量局(BIPM)局长马丁·米尔顿认为公开透明的信息交流是数字化转型的基本要求,其中,数据应具有易于查找、可互用、可复用的特征,符合“FAIR”原则中可发现(Findable)、可获取(Accessible)、可互用(Inter-Operable)、可复用(Reusable)的要求。支持开放数据实践的数据应是可信的,具有机器可读的功能,从而为人工智能的进一步应用打下基础<sup>[1]</sup>。由此可见,计量数字化的基础是数据信息,计量数字化亦是下一步人工智能在计量领域应用的基础。

## 2 计量数字化国际探索

目前,国际计量界对发展“计量数字化”已形成共识。2018年,国际计量委员会(CIPM)制定2030+战略并成立Digital-SI任务组,把计量数字化转型作为重点任务进行全球研究与合作。BIPM/CIPM-OIML/CIML联合任务组一致认为,要与质量基础设施领域的所有利益相关方密切合作,积极开展工业计量、法制计量和科学计量活动和流程的数字化转型工作,使用数字化国际单位制和“FAIR”原则促进全球计量数字化转型进程。对于国际计量组织BIPM和OIML而言,实现数字化目标的过程将分为两步:一是促进各项活动和服务的数字化“转型”;二是在此基础上为测量数据的所有用户提供支持<sup>[1]</sup>。OIML正在探索以符合“FAIR”原则的数字符合性证书为试点,将数字原理和实践引入标准和技术法规<sup>[1]</sup>。2021年,CIML第56次会议决定通过设立OIML数字化任务组(DTG),负责组织开展有关数字化转型的研究工作,以支持法制计量流程和服务的数字化转型;支持关于OIML文件的机器可读性的OIML

小组; OIML 定义和实现 OIML 在国际数字计量系统中的作用; 支持 CEEMS 咨询小组开发和吸收数字技术的指导; 在科学和质量基础设施(QI)方面与国际和区域组织的代表密切合作等<sup>[5]</sup>。2022 年, OIML、BIPM、国际计量联合会(IMEKO)、国际科学理事会(ISC)及其数据委员会(CODATA)、国际电工委员会(IEC)、国际实验室认可合作组织(ILAC)和国际标准化组织(ISO)签署关于国际科学和质量基础设施(QI)数字化转型的联合意向声明(JIS), 支持 SI 数字框架的开发、实施和推广, 作为国际科学和质量基础设施更广泛的数字转型的一部分<sup>[6]</sup>。区域组织中, 欧洲计量合作组织(EURAMET)和美洲计量组织(SIM)分别成立 M4D 和 M4DT 计量数字化转型工作组, 致力于实验室流程自动化、计量云和数字校准证书(DCC)的研究<sup>[7]</sup>。

国际计量组织把 2022 年世界计量日的主题确定为“数字时代的计量”, 倡议建立 SI 数字框架。该框架以 SI 的核心为基础, 涵盖基于 SI 手册基本数据元素, 以便各国家计量院、BIPM 以及相关组织开发基于 SI 核心表示的开放数据格式、软件工具及服务, 促进计量大数据分析、质量、透明度的提升。该框架将以新的数字应用的形式落地, 并期待在计量界和相关研究领域得到衍生应用<sup>[4]</sup>。

已有一些国家开展了计量数字化的研究应用。德国联邦物理技术研究院(PTB)推出数字计量证书, 提出虚拟测量仪器概念, 研究虚拟测量与真实测量的差异性, 对接数字世界与真实世界, 从而服务于智能化<sup>[8]</sup>。与此前应用的信息化计量电子证书(又称“电子计量证书”)相比, 数字计量证书更适合数字世界的测量校准。数字计量证书是经过定义的字符串, 代表着不同参数的不同量值, 其采用更严谨的语法规则, 提供更高效的信息交换解析效率。数字计量证书可以按照一定的程序购置或调用, 通过虚拟仪器的端口可自动实施远程计量校准服务<sup>[9]</sup>。因此, 必须以标准化数据元定义为基础, 建立数字世界定义参数与真实世界参数的量值关系模型, 即研究虚拟测量仪器。通过软件(模型)将数字证书的量值转换为所需的物理量所对应的数字输出, 虚拟测量仪器服务于数字世界与真实世界所关联的数字化或智能化仪器设备<sup>[10]</sup>。可以预见, 未来可以利用互联网将数字证书和虚拟测量仪器存储在网络平台上, 提供快捷的校准服务。美国国家标准与技术研究院(NIST)利用量子技术和数字技术, 将多个参数的计量标

准集成在芯片级器件上, 满足被测参数的实时校准需求<sup>[11]</sup>。同时, NIST 每年投入大量资金, 大力发展信息物理系统。此外, PTB 正在开发名为“欧洲计量云”的数字质量基础设施, 链接现有的基础设施和数据库来支持和简化监管过程<sup>[12]</sup>。俄罗斯建立了数字质量基础设施平台(ARSHIN), 并通过立法赋予其法律效力, 支撑计量及其他质量基础设施的数字化转型<sup>[13]</sup>。

可见, 国际上正在尝试建立 SI 数字框架、数字校准证书、虚拟测量仪器等数字化转型工作, 探索将数字原理和实践纳入标准文件和技术法规。

### 3 我国计量数字化研究和实践现状

通过文献调研, 查询“计量数字化”等相关关键词, 获得我国目前对“计量数字化”的研究情况。目前我国计量数字化的工作可以归纳为三个方面: 1) 概念及理论研究; 2) 技术研究; 3) 成果应用。

#### 3.1 概念及理论研究

计量数字化概念尚未形成权威定义。崔伟群<sup>[4]</sup>提出数字计量的内涵包括两个方面: 一方面为计量数字化, 指传统计量采用信息化手段, 实现计量工作的网络化、自动化、远程化, 包括计量电子证书和数字证书、测量不确定度在线云评定等 15 个领域; 另一方面为数字的计量化, 是数字世界中引出的计量工作, 包括算法溯源、数字图像等 15 个领域。

关于计量数字化理论的研究目前不多。慕慧娟<sup>[14]</sup>从计量数字化助力计量大数据体系构建和计量大数据促进计量数字化两个视角入手, 讨论计量数字化与计量大数据的关系。一方面, 计量数字化保证计量数据的准确统一、全周期计量数据安全可信、可靠、可追溯。另一方面, 计量大数据为计量数字化服务提供技术基础, 促进数字化智能化转型升级。李昂<sup>[15]</sup>等结合数字计量发展现状, 提出顺应计量数字化变革应聚焦的关键技术, 包括数字国际单位制(D-SI)、DCC 等。

宏观层面的研究已有一定进展。秦宜智<sup>[16]</sup>提出要加快计量数字化转型、要加强计量数据建设与应用、要服务数字中国和智慧社会建设等要求和期望, 指明计量工作的数字化转型方向。窦晨等<sup>[17]</sup>研究和探讨数字计量对国民经济的重要作用, 并通过研究数字世界计量标准及虚拟测量仪器, 分析实时远程计量校准计量方式, 研判新时期计量发展趋势。周自力等<sup>[18]</sup>结合计量数字化转变的趋势要求,

提出应提升计量科学技术水平、增强计量服务保障能力、完善计量监管体系,实现全社会共建、共治、共享的法制计量工作建议。针对产业计量发展,姚和军<sup>[19]</sup>提出数字经济下发展产业计量的思考。万鹏等<sup>[20]</sup>以数字化计量体系的研究现状及国内数字化计量标准需求为基础,研究提出智能变电站领域的数字化计量标准体系框架及配套的数字化计量标准计划和重点标准。

### 3.2 技术研究

中国计量科学研究院围绕建设数据中心、制定计量数字化框架、建设中国标准参考数据库和“基于 D-SI 的数字质量基础设施关键技术研究及体系建立”项目等开展研究工作,涉及 D-SI 框架、DCC、基于可信时间戳的数字校准证书系统等关键技术<sup>[15]</sup>。

计量器具的数字化方面,已有实践涉及,例如全数字化高压电能计量系统<sup>[21]</sup>、质量流量计<sup>[22]</sup>等。在这一领域,已存在不少专利,比如:一种高精度数字计量泵、一种数字计量表箱结构、一种煤粉数字计量装置等。

计量数据是指使用计量器具经检测而出具的数据。计量与数据在大数据背景下的深度融合,使得大而全、高质量的计量数据出具更为便利。汤杨<sup>[23]</sup>认为现今大数据时代下,计量数据的应用探索将深化我国计量行业对大数据的理解和应用,并展望未来发展趋势。舒艳荣等<sup>[24]</sup>对计量数据使用提出建议。计量数据不仅用于判定测试设备的“合格合用”,还为测试设备的采购、验收、借用、使用、维修、封存、报废等全生命周期管理提供精准有效的支撑。在数据处理方面,许方平等<sup>[25]</sup>以安规类计量器具为例,介绍基于 .NET 设计的计量器具数据采集可视化系统,实现计量器具所采集数据的可视化,显著提升计量器具数据采集的效率。王典泽<sup>[26]</sup>结合机械产品几何特征,提出基于 Linux 的嵌入式 GPS 几何误差数字化计量系统思路、关键基础、设计总框架及子功能模块,并结合系统运行的实际案例证实其可行性。王爽<sup>[27]</sup>、李廷<sup>[28]</sup>、管宇旻<sup>[29]</sup>、潘寿虎等<sup>[30]</sup>以智能化管理为目标,设计计量检测系统的架构、配套数据库及后台。在电网领域,计量数据使用的文献较为丰富。赵云斌<sup>[31]</sup>以电网、客户的互动关系为实例,提出建立在基于计量信息全覆盖的智能化和多样化供用电互动服务平台上的计量自动化数据,为客户提供信息查询、业务受理、缴费等多元化服务。李舜等<sup>[32]</sup>通过 DBSCAN 聚类算法实现电能

计量数据的可视化计算。张永旺等<sup>[33]</sup>在智能电能计量设备的计量检定数据大数据分析的基础上,数据化衡量各厂家的电表质量,实现计量检定数据的信息共享。

数字孪生模型是实现信息物理系统的必要基础,也是更加直观和有效的数字化手段,在计量领域已有探索。杨博耀等<sup>[34]</sup>研究船用柴油机蓄压式电控喷油器计量特性的数字孪生模型,并建立快速原型样机在线试验验证。

### 3.3 成果应用

在计量管理系统方面,数字化计量管控平台在炼化企业中<sup>[35]</sup>、在计量检测机构<sup>[36]</sup>中都有应用,例如,杨眉<sup>[37]</sup>介绍浙江省计量科学研究院前瞻性布局数字化转型的探索,黄万明<sup>[38]</sup>分析南京市计量监督检测院探索在数字化的前沿应用,实现计量检测与数字化转型相互融合共同发展的实践,以及阮育娇等<sup>[39]</sup>总结厦门市计量检定测试院建设信息化、智能化、数字化平台的经验。张亮<sup>[40]</sup>对防伪环保数字计量封印管理系统利用软件工程理论系统分析,给出设计方案并实现和测试。对计量检测原始记录、电学计量检测架构、基于唯一识别码的计量智能化管理平台构架也有报道<sup>[41-42]</sup>。刘仁<sup>[43]</sup>介绍兰州石化计量远程电子化交接系统,该系统以 CA 证书、加密密钥和 Ukey 等电子签章技术,实现系统管理、计量数据远程电子化交接、在线提取等功能。

计量服务以大数据作为背景进行,推动互联网、人工智能的融合,为计量服务提供新的增长点<sup>[44-45]</sup>。黄曼琴<sup>[46]</sup>在梳理现场计量校准的主要问题的基础上,分析计量校准在大数据时代的发展趋势。杭雪莲等<sup>[9]</sup>分析大数据时代下计量业务管理软件的结构和特点,并提出计量业务管理软件在大数据时代的发展趋势。全凤慧等<sup>[47]</sup>基于计量数字化转型,创建“一站式”计量服务大厅,以计量业务管理系统和“互联网+计量公共服务平台”为基础,整合网上预约、现场送检、进度查询、缴费、取件等各个环节,实现客户计量器具的全过程管理。国内已有多家计量技术机构探索实施“互联网+”计量服务<sup>[48-49]</sup>。

## 4 总结和建议

### 4.1 总结

对计量数字化的概念、国际探索和我国研究实践现状进行了梳理。国际上在计量数字化转型方面,已尝试数字校准证书、虚拟测量仪器等技术,并

依托国际单位制数字框架提出实现计量数字化的两步路径。我国计量数字化转型正处在理论研究和实践探索的起步阶段。

思维转变方面,以国际单位制数字框架为基础,利用实物实现的计量技术与服务的传统运行方式已发生了巨大变化。国际计量组织和部分国家正在利用数字技术扩展计量的数字化应用场景,利用数字化的科学和质量基础设施为企业、政府等利益相关方提供便利。

政策制定方面,国内对计量数字化背景下的政策宏观制定的研究已有一定积累,已颁布部分宏观政策,但就计量数字化的进一步应用和发展方面还需细化。

法规建设方面,对法律法规相关制度对计量数字化的支撑的研究还很少,如计量数据安全、使用、产权、监管等。在计量数据治理方面,计量数据安全技术治理体系的研究还不充分,计量数据安全治理缺乏系统化建设框架,计量数据安全动态保护能力不足。

组织管理方面,尽管国家市场监督管理总局已经提出,在计量技术委员会中加强包括计量数字化转型方面的前瞻研究,但对计量数字化发展的组织保障(如高级别协调组、专业组等)尚未系统建立。在数字化驱动的计量管理变革中,已有智慧计量、仪器设备检定校准“一站式”服务信息化等新型管理模式的探索实践,实现送检流程信息化,提高仪器设备管理效率,可为国内其他机构提供借鉴。

技术研究方面,已在构建数字化量值传递溯源、计量器具数字化信息化改造、计量数据资源获得与利用等领域取得了一定进展。但总体来看,数字技术的利用还有很大发展空间,如在区块链、物联网等方面。在国际单位制数字框架下的工作尚待全面开展,在数字化模拟测量技术,远程和在线计量技术,高精度、集成化、微型化、智能化新型传感技术、数字孪生、检定校准规程机器可读等方面期待实现新突破。

成果应用方面,计量数字化在一定范围内已经得到应用,尤其是能源、检测校准等方面。其他领域仍有巨大发展空间,计量技术规范、标准等方面也需要研究布局。

## 4.2 建议

### 4.2.1 持续完善计量数字化顶层设计

持续完善法律法规、政策支持和组织保障,大力推进计量数字化转型。在国家层面建立组织协调机构和研究团队,对计量数字化发展进行战略布局,

为各行业各地开展计量数字化转型提供指南。建立数字质量基础设施云平台及配套规范。对各领域、各区域精准施策,规范计量数据开放,保障数据安全,促进数据共享,进行计量数字化高质量管理和公开透明监督。加强相关国际技术交流,吸收国际实践中的有益经验。

### 4.2.2 建立计量数字化研发应用体系

以 SI 数字框架为基础,建立计量数字化研发应用体系,不断提升计量数字化能力,提高计量数字化的质量,为深度融合产业、赋能产业转型升级提供支撑。开展计量数字化基础性研究,加大计量数字化关键技术研究投入。推进计量数字化成果在各行业广泛转化应用,探索更多数字技术在计量数字化中的应用。

### 4.2.3 培养计量数字化复合型人才

以数字化转变为契机,加快计量技术专业人员数字化培训,推动高层次、复合型人才培养。在注册计量师考核、高等教育计量人才培养中加入计量数字化内容。设置国际交流和培训项目,培养国际化计量数字化人才。鼓励数字技术企业 and 专业人员在计量数字化领域开展交流合作。

可以预见,在我国政府的大力支持下,计量数字化将助力破解数字时代中的诸多测量技术难题,支撑数字经济的发展,为建设数字中国、推动经济社会高质量发展做出新的贡献。

## 参考文献

- [1] 马丁·米尔顿, 安东尼·唐纳伦. 数字时代的计量——2022 年世界计量日致辞 [J]. 铁道技术监督, 2022(5): 1.
- [2] 孙新波, 孙浩博, 钱雨. 数字化与数据化——概念界定与辨析 [J]. 创新科技, 2022, 22(6): 12-30.
- [3] THIEL F. Digital Transformation in Legal Metrology[J]. OIML Bulletin, 2021, 62(3): 3.
- [4] OIML. Digital Transformation in Legal Metrology[EB/OL]. [2023-01-15]. <https://www.oiml.org/en/news-meetings/oiml-seminars/digital-transformation>.
- [5] OIML. Digitalization Task Group[EB/OL]. [2023-01-15]. <https://www.oiml.org/en/structure/digitalisation-task-group>.
- [6] OIML. Joint-declarations[EB/OL]. [2023-01-15]. <https://www.oiml.org/en/about/joint-declarations/joint-declarations>.
- [7] 崔伟群. 数字计量——数字时代、数字中国、数字质量的先行者 [J]. 中国计量, 2022(5): 7-10.
- [8] 高蔚, 蔡娟. 国际计量体系及 SI 重新定义后的新格局 [J]. 计量技术, 2019(5): 72-80.
- [9] 杭雪莲, 顾杰, 傅晓雯. 浅谈大数据时代计量业务管理软件发展趋势 [J]. 中国设备工程, 2019(8): 232-233.

- [10] 段宇宁, 刘旭红. 漫谈国际单位制变革 [J]. 计量技术, 2019(5): 3-7.
- [11] BIACCHI A J, BUI T Q, DENNIS C L, *et al.* Design and engineering colloidal magnetic particles for nanoscale thermometry[J]. International Journal on Magnetic Particle Imaging, 2020, 6(2): 1-3.
- [12] NORDHOLZ J, DOHLUS M, GRÄFLICH J, *et al.* Evolution of the European Metrology Cloud[J]. OIML Bulletin, 2021, 62(3): 27-34.
- [13] GOLUBEV S, KUZIN A. National Metrology Law as a Driver for Digital Transformation[J]. OIML Bulletin, 2021, 62(3): 21-26.
- [14] 慕慧娟. 计量大数据与产业计量数字化发展关系探究 [J]. 计量技术, 2022(9): 184-186.
- [15] 李昂, 何巍. 数字计量发展现状及关键技术研究 [J]. 宇航计量技术, 2022(5): 8-12.
- [16] 秦宜智. 拥抱数字时代 加快计量发展 [J]. 中国计量, 2022(6): 15-17.
- [17] 窦晨, 周自力. 数字世界计量重要性及计量的发展方向探析 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(9): 70-73.
- [18] 周自力, 窦晨. 聚焦数字化 规划计量的未来发展 [J]. 中国市场监管研究, 2022(5): 16-19.
- [19] 姚和军. 数字经济下发展产业计量的思考 [J]. 中国计量, 2018(5): 25-26.
- [20] 万鹏, 周峰, 胡浩亮, 等. 面向智能变电站的数字化计量标准进展与分析 [J]. 供用电, 2021, 38(7): 34-39.
- [21] 王鹏, 杨志良, 钟永泰, 等. 一种全数字化高压电能计量系统 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 70-76.
- [22] 高鸿博. 利用数字化计量方式开启船舶低硫燃油计量新时代 [J]. 中国远洋海运, 2019(5): 76-77.
- [23] 汤杨. 探析大数据时代计量数据的应用 [J]. 现代营销, 2019(4): 90.
- [24] 舒艳荣, 万雪梅, 裴圣旺. 大数据时代计量数据的应用 [J]. 中国设备工程, 2018(3): 189-191.
- [25] 许方平, 曹剑秋, 梁庆凡. 计量器具数据采集可视化系统设计与实现 [J]. 计量技术, 2019(1): 24-25.
- [26] 王典泽. 基于 Linux 的嵌入式 GPS 几何误差数字化计量系统设计 [J]. 中国设备工程, 2020(8): 110-113.
- [27] 王爽, 王猛. 智能化管理视域下计量检测数据分析 [J]. 信息记录材料, 2021, 22(8): 97-98.
- [28] 李廷. 计算机信息技术在计量检测工作中的应用分析 [J]. 电脑知识与技术, 2017, 13(29): 237-238.
- [29] 管宇旻, 汤亚杰, 徐剑桥. 计量检测数据采集与智能化管理 [J]. 上海计量测试, 2017, 44(4): 58-63.
- [30] 潘寿虎, 申东滨, 邓时虎, 等. 计量检测行业数字化方向的探究 [J]. 衡器, 2021, 50(7): 30-32, 51.
- [31] 赵云斌. 计量自动化数据的高级应用 [J]. 贵州电力技术, 2015, 19(3): 69-71.
- [32] 李舜, 汪金荣. 基于数字化计量资产供应链管理研究 [J]. 电气自动化, 2022(3): 64-67, 71.
- [33] 张永旺, 纪伊琳, 左右宇, 等. 关于计量检定数据数字化应用的分析与研究 [J]. 电力系统装备, 2019(16): 226-227.
- [34] 杨博耀, 金江善, 秦慈伟, 等. 船用柴油机蓄压式电控喷油器计量特性数字孪生模型研究 [J]. 柴油机, 2021, 43(2): 18-24.
- [35] 刘胜军. 数字化计量管控平台在炼化企业的建设与应用 [J]. 石油工业技术监督, 2022, 38(6): 24-27.
- [36] 胡慧勇. 计量检测机构智能化计量管理系统 [J]. 工程技术研究, 2018(8): 182-183.
- [37] 杨眉. 数化万物 度量未来——浙江省计量院数字化转型之路 [J]. 中国计量, 2020(12): 40-42.
- [38] 黄万明, 陆璐, 程飞, 等. 数字化转型: 计量检测机构发展的“新基建”[J]. 计量与测试技术, 2022, 49(1): 101-104.
- [39] 阮育娇, 郑伟峰, 李鹭虹, 等. 推进“智慧计量”建设 数字赋能产业发展 [J]. 福建市场监督管理, 2022(2): 26-27.
- [40] 张亮. 防伪环保数字计量封印管理系统的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [41] 胡敏, 李娜, 陈敏雪. 计量检测原始记录管理工作的智能化探讨 [J]. 轻工标准与质量, 2019(1): 66-67.
- [42] 钟辉, 杨邓丽. 基于唯一识别码的计量智能化管理平台构架探讨 [J]. 计量与测试技术, 2020, 47(12): 67-69.
- [43] 刘仁, 高飞青, 王宏建, 等. 兰州石化计量数字化转型探索与实践 [J]. 化工自动化及仪表, 2021(2): 180-184.
- [44] 姚欢, 余丹璐. 探究大数据时代的计量服务 [J]. 信息系统, 2019(2): 172-173.
- [45] 史敏. 探究大数据时代的计量服务 [J]. 中国标准化, 2018(20): 223-224.
- [46] 黄曼琴. 大数据时代计量校准理论与技术的发展展望 [J]. 建筑工程技术与设计, 2017(5): 5944-5945.
- [47] 全凤慧, 刘银锋, 毛敏, 等. 如何基于“计量数字化转型”打造“一站式”计量服务大厅 [J]. 计量与测试技术, 2021, 48(11): 102-103.
- [48] 杨虎. “互联网+”计量的智能计量系统及工业 4.0 的应用探究 [J]. 信息记录材料, 2019, 20(8): 160-162.
- [49] 张潇, 胡畅, 吴亚男, 等. 基于“互联网+”的计量技术规范数字化服务平台建设 [J]. 中国计量, 2022(11): 48-50.

本文编辑: 石亚楠