

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.06.01

从“工业 4.0”看工业计量的未来

李少壮, 张泽光, 李洪波, 张学涛, 李伟

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 工业技术的应用发展推动着计量测试技术的持续进步。本文就“工业 4.0”时代的计量测试技术发展特点进行分析, 从计量标准量值复现与测量的数字化、产品的智能化设计制造与使用、产品的计量性设计以及云计量必将成为“工业 4.0”的技术支撑等不同方面进行解读, 对工业计量技术的发展趋势做出预判。

关键词: 计量测试; 工业计量; 工业 4.0; 云计量

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)06-0001-05

Looking at the Future of Industry Measurement from Industry 4.0

LI Shaozhuang, ZHANG Zeguang, LI Hongbo, ZHANG Xuetao, LI Wei

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The development of industrial technology is driving the improvement of measurement & testing technology. This paper analyzes the new requirement of intelligent manufacture on measurement and test with the coming of industrial 4.0 era from different aspects, such as the emersion of measurement standard value, the guarantee of the on-site test, the measurement of intelligent products, the control of manufacturing process and new sensor technology. Based on these, predictions on the development trend of industrial measurement technology are made.

Key words: measurement & testing technology; industry measurement; industry 4.0; cloud measurement

0 引言

我国工业技术发展正处在快速上升的阶段, 为了实现制造业向智能高端制造的转型、由制造业大国向工业强国转变, 《中国制造 2025》给出了具体的发展要求和模式^[1], 为我国工业技术发展指引了方向。分析计量测试技术发展趋势, 准确把握工业计量技术发展方向, 适时开展先进计量测试技术与装备的研发, 是计量工作者的历史责任。本文试图从“工业 4.0”着手, 对工业计量的发展做概要分析。

1 步入“工业 4.0”时代

18 世纪 60 年代至 19 世纪中期, 随着机械生产代替手工劳动, 社会生产组织模式由个体作坊式生产演进到专业分工协作基础上的工厂化、规模化、社会化生产, 经济社会结构从以农业、手工业为基础转型发展为以工业生产为基础, 经济发展模式具有了明显的

规模化效应。与之相适应, 关于量值的定义与测量需求日益显性化, 既往基于人类感官、直觉、模糊的信息有了规范量化表达的要求。基于以自然界易于得到的实物为参照样板的量值表述, 逐渐转为人工制造的、规范一致的实物标准来表述。在贸易活动的推动下, 国际计量技术组织诞生并直接引导了近代计量标准技术的发展进步。1875 年 5 月 20 日, 20 个国家的政府代表在法国巴黎签署《米制公约》, 确认国际间共同使用以“米”为基础的计量单位制度。这一时期, 在今天被称为是“工业 1.0”时代。

19 世纪后半期至 20 世纪中期, 社会劳动的专业化分工进一步发展普及, 产品的大规模生产组织方式日渐成熟。以工业生产流水线为标志, 产品大批量生产模式使得社会生产效率得以大幅度提高, 社会生产力得以空前解放。专业化、标准化的生产需求, 推动了计量技术进步与精密仪器技术的发展, 以精密机械、光学仪器仪表为代表的量仪技术和计量基础理论得到了深入的研究和广泛的应用, 特别是第二次世界大战及二战后期, 计量技术得到空前发展。这一时期在今天被称为是“工业 2.0”时代。

20 世纪 70 年代以来, 随着计算机技术的普及应用

收稿日期: 2015-11-18

作者简介: 李少壮(1967-), 男, 高级工程师, 从事计量管理与测试技术研发工作; 张泽光(1962-), 男, 高级工程师, 主要从事力学计量及测试技术研究。

和个人计算机的小型化,自动控制技术在工业生产中得到了广泛应用,推动了生产过程的自动化。在社会生产活动专业分工进一步细化的基础上,伴随着高新技术的进步和世界贸易的发展,基于对过程信息的认知和固化,计量测试技术日渐融入工业生产流程;与此同时,在对生产环节的量值保证活动中,依据标准量值的使用与管理,生产过程管理实现了可靠的基于单参数的量值统一;同时依赖质量管理理论与技术手段的发展完善,工业制造技术体系进一步完善。计量工作的重点逐步由传统的保证计量标准器量值一致转向保证工业现场数据的准确,以激光技术、新型传感技术、数字仪表和计算机的结合为标志,计量检测已成为生产过程中无所不在的一种工业基础能力。这一阶段的技术发展也被称为第三次工业革命,或被称为“工业 3.0”时代。

进入 21 世纪以来,在计算机信息技术与互联网技术的推动下,在系统论的指导下,使得基于大数据积累的智能工程成为工业生产活动的主要形式,并日益展现出一种高度灵活、能够支持个性化需求的全新业态。依托信息物理网络(Cyber-Physical System, CPS),通过产品模型化定义和数字化描述,计量测试工作与工业生产活动进一步融合,对产品设计 with 生产流程的过程管理正逐步被植入于产品的计量性设计保障所替代或补充完善,因而极大提高了产品的科学性和可靠性,使得产品制造和使用过程的智能化成为可能,产品全生命周期和全制造流程的数字化推动了基于系统模型的实时测量、智能检测。2013 年 9 月,德国联邦教育研究部正式发布《把握德国制造业的未来——实施“工业 4.0”攻略的建议》,把德国学术界和产业界关于“人类社会发展中的第四次工业革命”的共识推向全社会。这就是今天人们热议的“工业 4.0”。

2 “工业 4.0”的核心思想

世界各地的人们正在使用各种各样的名词来描述“工业 4.0”这种工业技术发展的趋势和相关表现。其核心思想可归纳为三个方面。

2.1 制造与使用过程的智能化是“工业 4.0”的核心

在自动化、信息化、智能化的渐进发展的过程中,工业机器人、智能制造单元等应用日渐普及,智能制造模式已经成为工业生产制造方式发展进步的主要方向。

智能制造生产模式,是一种使产品设计制造过程与产品应用过程高度融合的一种生产方式。对产品设

计、制造与应用保障活动进行系统化的规划设计,挖掘产品生产制造和使用消费过程中的信息,用以改进产品设计与制造过程,目的是使得产品能更经济、高效地满足消费需求。产品的生产与服务过程本身就是信息消费与再生产过程,产品的使用消费过程同时成为产品改进改型的生产活动过程。这是一种由个性化定制设计与智能化生产制造支撑起来的、基于对历史数据积累和大数据深度挖掘的社会化服务保障模式,是基于信息网络和数字模型的社会生产组织模式。

智能制造已经呈现出的特征包括:支持个性化需求而实行个性化设计、定制生产;生产制造功能单元与流水线可以适应生产任务需求而动态重组;基于物流的资源配置;可支撑产品设计、资源配置、订货、计划、生产、物流等生产活动过程统一协调、一体化组织的信息物理平台。为了追求更高的生产效率、实现更具时效性的生产,即时响应市场客户需求,智能制造生产模式将更加注重过程控制。以提高产品的全生命周期综合效费比为核心,产品制造活动终端的质量评价将更多的被制造过程中技术装备和技术方法的可靠性所替代,生产活动过程的管理与服务保障将占据越来越重要的位置,过程的不同将直接决定产品或服务的差异。

2.2 信息是智能化的基础

来源于主体和过程的信息,是智能化的基础。系统论的发展完善,使得人们广泛接受了关于社会的整体性原则、结构功能原则、相互联系原则、有序性原则、目的性原则、动态性原则等基本概念。基于系统论的认识,“在任意的一个时刻,全世界的每一个角落、每一个事件都是处在同一个系统中;在地球上的任意一个角落,其过去、现在与未来因时间的连续性而不可分割。”

信息物理系统网络,就是将物理设备连接到互联网上,让物理设备具有计算、通信、精确控制、远程协调和自我管理等五大功能,进而实现虚拟网络世界与现实物理世界的融合。它可以将信息、设备、人员以及各类资源紧密联系在一起,从而创造新的有形产品及相关服务,并将产品生产过程转变为智能制造过程^[2]。系统论原则是现代工业产品设计制造使用要遵循的基本原则,随着模型的数字化,产品的设计制造将更加科学化,测量技术的融入将极大提高产品的可靠性,特别是传感技术的发展,促进了测量技术的融入,信息技术不断推动着产品技术进入智能时代。

在全球的信息网络、物流网络、市场服务网络等

等日益一体化的现实面前,通过信息网络与产品制造系统的融合来改变当前的工业生产与服务模式,已经成为企业提高产品附加值、增强市场竞争力的重要手段^[2]。依托信息物理系统网络,不同的生产设备之间,工厂内部纵向之间甚至工厂与工厂横向之间,正在通过数据交互,以前所未有的速度连接到一起并成为一个整体,产品与生产设备之间,通过信息平台、物流平台联络构建成为一个高速运转的产品制造和技术服务体系。信息物理系统网络的标志性的技术已经逐渐获得应用,智能装备^[3]、智能制造、个性化定制、高效率生产正在越来越多地进入工业制造现场。

2.3 计量性设计将计量融入全过程

计量性设计^[4]是指将产品使用过程中所有的计量需求,按照系统论的要求,在产品的设计、生产、试验、使用阶段全面规划与融入,以保证产品全寿命过程各环节的量值准确,确保量值溯源链完整和使用过程中的随行保障。

首先伴随着产品的数字化设计和数字化制造工艺手段的发展,产品检测数据从二维信息向三维信息转变。一方面在产品的设计时力求能并行确立基于三维空间表述的检测规划,依据产品的三维数字模型,自动生成检测规程并通过仿真分析优化测量方案和实施过程;另一方面,对产品质量控制的实物对象正从制造完成后的实物产品向制造与装配全过程中量值的测量、协调、控制、管理转变,并通过设计、制造、测量、验证的闭环“数字脉络”的建设,实现全流程数字量值的统一。

其次,生产活动现场测量方式的变化,要求计量校准技术保障的服务对象从只针对少量关键零部件的特定环境离线检测活动向制造全过程便携式或植入式在线测量转变,测量设备运行模式从单一系统独立向多系统综合集成转变,测量手段从人工干预测量向自动化检测转变。

在飞机等航空产品的生产制造过程中,计量检测活动正在逐渐由相对独立的一个工作环节,日渐融入于制造活动的全流程中。计量测试正逐渐成为与产品生产制造过程各个环节融为一体的一种基本要求和能力^[5]。

3 “工业 4.0”时代的工业计量

测量是科学的基础,正如绘制出世界上第一份元素周期表的俄罗斯科学家门捷列夫所言“没有测量就没有科学”。计量测试技术伴随着科学实验的发展而发

展,是科学研究和工业制造的基础性学科,体现了人们认知世界的科学性——如果对科学研究缺乏预见性,那么就需要通过大量的实验,进行数据分析从而不断演化和迭代,找到科学的规律或结论。正是以计量测试技术的发展为先导,现代科学技术与工业技术获得了快速的发展。

计量测试技术理论的发展伴随着科学技术的发展和工业化大生产的发展而不断进步完善,随着飞机、卫星等大型复杂系统工程研发与应用,计量测试技术贯穿于系统研制的全过程,随着系统的不断完善而日渐融入系统本身成为系统的一部分。

传统的计量工作任务主要是提高量值复现能力,以传递量值基准为目的,借助计量标准器具为社会提供可靠的量值服务。在国家法制计量的框架内,量值传递是将国家测量标准所复现的计量单位通过各等级测量标准传递到工作计量器具,这是国家政府对社会组织、企业以及个人参与社会经济活动提供的基本保障以及技术要求。工业计量工作的任务则是为工程实践活动提供数据获取方法与技术装备,保证数据的可靠,通过连续的比较链,使产品性能参数量值溯源到国家测量标准,它是企业自身的要求,是企业生产过程中的自主行为,是对社会的一种承诺或保证。

在基本物理量的量值复现能力不断提升基础上,工业现场检测能力与实验室内的标准量值复现能力快速趋近,计量测试技术的应用推广与工业生产活动深度融合;在信息化应用服务不断扩展的同时,信息网络技术支撑对计量检测与校准活动的大数据挖掘与应用已成为产品与工程服务的重要内容;计量检测服务模式在技术方法与手段标准化、模块化发展的基础上,借助数字化技术的支撑,正逐步向模型化、虚拟化的数字计量、云计量模式发展^[6]。

3.1 计量基本量与计量标准的归一化

传统的计量,其量值传递是依托物化的具有一定的实体特性的标准物质、标准器具,按照标准化的程序或方法,进行核验性质的量值确认。标准原器作为确认量值的基准,其物化形式与量值的定义密切相关。现代科学技术的发展,特别是量子技术的发展,使得标准量具的量值直接向自然基准溯源。随着量值传递用标准计量器具和传递环节的减少以及工程应用数据的积累,人工物化的量值载体正逐渐淡出日常的工程领域,借助于数字化的精密仪器而使量值单位直接向自然基准量溯源已成为计量技术发展与应用的大趋势。新技术的发展不断提升了标准量值的复现能力,并推

动着基本量的定义和溯源向自然基准靠拢,呈现出国际单位制中基本量逐渐归一化的趋势。在计量科学技术发展的前沿,标准量值的复现技术因量值传递方式的变化而出现新的发展需求。当前科学家们正在努力尝试对当前唯一的一个依据实物标准原器实施量值传递的量值基准“千克”进行重新定义,以期实现质量单位量值向硅原子数量(普朗克常数)进行溯源^[7]。在数字化与信息化技术的支撑下,通过标准化定义,从自然基准向产品量值的传递将以数字串的方式实现“云”计量。

3.2 工程测试技术手段的数字化

以汽车、船舶、飞机的生产制造活动为代表,针对大批量、复杂工业产品的生产实践过程,模型化、数字化的技术手段与装备的应用,降低了成本消耗,提升了产品质量控制能力,极大地提升了生产作业效率。波音公司在 787 客机中采用了室内 GPS 组合测量网的装配模式,飞机的部件定位测量通过固定安装在厂房墙壁及天花板上的室内 GPS 测量系统构建的测量网来完成,这种基于多站和固定参考点的组合测量模式作为一种典型的数字化检测技术手段,正在越来越多的获得应用^[5,8]。

在系统论的指导下,建立输入/输出关系明确的数字化测量模型,明确界定影响输入/输出量关系的各种因素,实现系统的数字化测量,为各系统的联通与整合提供基础支撑。

3.2.1 计量测试设备的数字化改造

传统的机械、光学等基于模拟量表述的计量测试手段向数字化方式发展,以标准化、模块化的传感器、数据接口、数据分析与处理计算机软件等为基础,计量检测技术装备的数字控制、自动执行、网络数据传输等功能日益完备,检测与数据处理过程中人工作业量不断减少,检测、校准数据的记录与使用由人工判读、手工记录读数的方式,向计算机自动采集数据、数据结构标准化基础上的数据库管理方式转变,人员主观因素可能带来的不确定因素在检测活动中日益降低,数据更加准确可靠。

3.2.2 复杂系统计量测试数字化

针对复杂系统的测量是多参数多子系统的综合,是多传感器、多测量系统的系统集成,需要按照系统模型的输入/输出关系,将各传感器和测量系统基于数字模型的量值溯源链之间的关系,进行系统模型的数字化集成。这是实现系统数字化测量的前提,也是智能化的基础。

3.3 融入工业流程

随着工业技术的发展,设计与制造的一体化,计量测试技术全面融入产品制造和使用,从产品设计过程的计量性确认到生产制造过程现场数据的获取与评估,正如同水与空气融于生物体生命过程一样,计量测试已日渐融入于工业产品的全寿命过程。

随着对系统认知的不断深入,计量测试与设计制造日渐一体化发展,计量测试从产品设计之初融入产品,计量测试功能植入于产品,成为产品的一部分,使得产品性能参数的实时校准成为可能。

工业计量的根本任务是保证工业现场的数据准确。一方面,随着信息处理技术的发展进步,数据源在可能影响数据准确性的众多因素中扮演的角色越加突出,传感器件的性能及其分析评价能力正逐步成为决定工业计量发展水平与应用能力的核心技术能力。随着传感器的小型化和智能化,先进传感技术已成为工业计量的核心技术。无线、网络化的传感器件,智能传感器件、传感系统,以及新型无源传感技术的发展,将使得测量系统与传感器更加紧密的结合在一起,而传感技术与信息处理技术的结合使得测量系统与传感器一体化成为可能,这将大大地减少测量环节,提高测量的可靠性。另一方面,随着自然科学的发展进步,人类对自然界的认知不断拓展,从微观世界到宏观宇宙,可感知的空间在延伸,基本量的单一化趋势已经不可逆转。实物计量标准器具随着基本量的量子化而归一化,标准量值传递用计量标准器具的形式、种类、数量将大幅度缩减,工程量的检测手段与技术装备更趋丰富的同时,量值溯源中间环节将大大减少,由于中间环节的减少,工业生产活动中的量值溯源过程更直接、可靠性更高、量值的准确度与量值基准更加趋近。

在我国政府发布的《计量发展规划(2013-2020)》中,明确提出“要加强实用型、新型和专用计量测试技术研究,把加快新型传感器技术、功能安全技术等新型计量测试技术和测试方法研究做为发展目标之一^[9]”,提出“将计量测试嵌入到产品研发、制造、质量提升、全过程工艺控制中,实现关键量准确测量与实时校准,并加强仪器仪表核心零部件、核心控制技术研究,培育具有核心技术和核心竞争力的仪器仪表品牌产品。”^[9]

3.4 云计量和虚拟计量

“云计量”是基于互联网“云”计算的一种虚拟计量技术^[10]。通过标准化定义,实现以标准数据串为虚拟

标准、通过“云”平台实时向产品提供计量标准数据。

通过互联网应用服务与计量工作的紧密结合,使得计量工作相关的各个环节,集成在同一信息物理平台上,实现技术服务与与市场需求的高度融合,为用户提供更便捷、高效的服务体验。同时,也为计量科学技术的研究活动提供最优质的资源和最广大的应用市场,推动工业计量技术水平的不断提升。由于信息网络技术应用的迅猛增长,人类活动形成的各种信息作为网络信息的重要组成部分,将构成以信息网络为基础平台的网络大数据,一方面这些数据信息的积累使得网络愈加的智慧和聪明,另一方面对大数据的挖掘应用也使得数据成为了新的生产要素,支撑数字化、量化的人工智能决策。量值溯源可通过数字量值比较,减少各等级计量标准传递环节,提高溯源准确性。

在对产品、过程进行数学模型构建、数值模拟的基础上,以计算机对产品及其生产过程进行数字化表述和再现,是实现工业技术数字化、网络化进程中重要而不可或缺的环节。由先进测量软件支撑的测量数据分析处理技术、产品检测模型和工艺模型的分析构建技术,已经成为工业计量技术发展中日渐重要的内容。同时,信息物理网络的建设发展,必将进一步推动海量数据管理及远程服务、云端数据实时修正与应用,并极大地拓展在线专家系统和知识系统的应用与服务空间,网络自学习能力也将得到进一步的发展。这些可以预期的技术发展,以及已经广泛应用的网络化感知、信息无线传输技术等,将使远程计量从虚拟快速转变为现实,正在为云计量的运用和普及创造条件。

在计量测试过程标准化、模型化技术不断发展的基础上,基于数字模型的数据评价与验证和测量过程的模拟仿真技术正在得到快速发展^[11],具有一定程度人工智能的计量检测技术装备正在逐步走向现实应用。传统的以人工作业方式实施的数据采集活动,工作效率难以提高,更难以满足过程可控、可追溯的要求。随着工业制造技术的发展进步,依赖智能测控部件或装置——工业机器人、传感器件、数据传输总线、精密仪器与传动部件等,构建智能化的测量活动执行系统与数据管理系统,实现测量结果的及时反馈、数据挖掘基础上的预先保障性数据获取与评估,正在显现出越来越清晰的现实可行性。

依托信息物理系统网络,计量检测技术保障与服务可以摆脱对特定技术装备、操作人员的依赖,一方面可借助专家在线指导而组织更贴近应用现场的技术装备、人员开展服务,另一方面可组织调动云端资源

开展远程保障,实现云端、虚拟的计量服务。2013年,德国 Zeiss 集团利用所研制的一套名为 PiWeb 的系统实现了跨国公司内部不同地区、工厂机器测量数据的网络共享,实现了全球不同工厂数据的同步监测,这从一个侧面也展示了对远程计量的现实需求。

4 结束语

随着测量技术与产品的高度融合,产品的智能化程度不断提高,“工业 4.0”时代的计量已经并将更紧密地与系统论、数字化、模型化、设计制造一体化、传感器、智能化、标准化定义、数据串、数据链、云计量等名词概念联系在一起,新时代工业计量测试技术的发展已日益凸现出以下特征:

1)伴随着计量科学技术的发展,实物计量标准因基本量的量子化而归一化,将大大减少量值溯源环节,提高量值溯源精度;

2)随着系统化研究的深入,对系统的预见性大大增强,系统的科学性和工程化不断提高,在产品全寿命周期内以传统方式实施的计量测试保障活动日益减少,以至不用计量或很少计量,最终实时云计量将成为未来工业产品和民生计量的主流;

3)随着对系统认知精细化水平的提高,计量测试与产品设计制造工程一体化发展,计量测试从设计之初融入产品,成为产品的一部分,实现产品的实时主动校准成为“工业 4.0”的特点;

4)随着标准化水平的提高和数字化测量的发展,使得远程计量、虚拟计量从理想走进现实,正在为云计量的运用和普及创造条件,目前时间量已经实现了远程实时的云计量;

5)随着传感器的数字化、标准化和智能化,执行机构与测量系统的一体化,使得中间环节不断减少,将大大提高系统测量和执行的可靠性,为系统的模块化和高度集成化提供了支撑。

伴随着工业 4.0 时代的到来,以云计量为典型特征的计量服务新模式必将成为计量测试服务的主流。可以预见在不远的将来,只要是在有无线电信号的地方,人们就能得到标准定义的有关各种参量的标准数据串,系统将根据需要自主进行系统参量的外部校准,那时我们将真正的步进智能时代。云计量作为未来“工业 4.0”的重要支撑,必将得到快速的发展应用。愿我国的工业计量测试技术在“工业 4.0”时代能实现“弯道超车”式的快速发展,助力中国制造早日跻身国际先进行列。

(下转第 53 页)

3.2.2 转台测角系统输出角度 θ' 误差引入的不确定度

采用多面体棱镜法测量得到转台自身输出角度存在误差^[11], 由其引入的不确定度为

$$u_{\theta'} = \frac{1}{2}(\sigma_{\max} + \sigma_{\min}) = 3.93'' \quad (10)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$ 分别为用多面体棱镜法测得的最大和最小偏差。实验所用多面体棱镜为二十三面体^[12], 自由度为 $\nu_6 = m - 1 = 22$ 。

3.2.3 合成标准不确定度及扩展不确定度

将 u_{φ} , $u_{\theta'}$ 的值代入公式(8), 可得系统的合成标准不确定度为

$$u_{\Delta\theta} = \sqrt{c_{\varphi}^2 u_{\varphi}^2 + c_{\theta'}^2 u_{\theta'}^2} = 4.36''$$

有效自由度^[13]为

$$\nu_{\text{eff}} = \frac{u_{\Delta\theta}^4}{\frac{u_1^4}{\nu_1} + \frac{u_2^4}{\nu_2} + \frac{u_3^4}{\nu_3} + \frac{u_4^4}{\nu_4} + \frac{u_5^4}{\nu_5} + \frac{u_{\theta'}^4}{\nu_6}} = 32$$

取置信概率为95%, 查 t 分布表得 $t_{95}(32) = 2.04$, 则扩展不确定度为

$$U = t_{95}(32) \cdot u_{\Delta\theta} = 8.9'' \quad (11)$$

4 结 论

本文介绍了一种利用自准直经纬仪快速测量转台转角误差的方法——自准直经纬仪对准法, 通过深入分析该方法所采用的空间反射模型, 给出了精确表达式, 为以后进一步提高该方法精度提供了理论依据。对测量装置的不确定度评定结果表明, 扩展不确定度在 $10''$ 以内, 能够满足转台小角度范围测量误差的精度要求。该方法与传统方法相比具有操作简便、成本低、抗环境干扰强的优点, 具有工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 曾鸣, 王锦贺, 张健, 等. 转台测角系统标定方法的研究[J]. 中国惯性技术学报, 1998, 6(4): 84-88.
- [2] 黄仙锦, 卜雄洙, 杨波, 等. 自准直经纬仪测角系统及不确定度分析[J]. 计量技术, 2013(8): 13-16.
- [3] 孙安斌, 马骊群, 曹铁泽, 等. 室内 GPS 发射器角度校准装置的设计与分析[J]. 计测技术, 2013, 33(6): 35-39.
- [4] 刘凯. 新型光电自准直经纬仪关键技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [5] 樊春丽, 崔莹. 六面体转鼓分度和塔差的检测方法 & 测量结果不确定度的评定[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(增刊): 337-339.
- [6] 韩素超, 高雪, 李红菊, 等. 专用分度头校准方法探讨[J]. 计测技术, 2015, 35(S0): 32-33.
- [7] 杨双燕. 光束的矢量性表征及其应用[D]. 上海: 上海大学, 2014.
- [8] 马峰, 周骏. 角度块角度偏差测量值的不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2015(1): 44-45.
- [9] 何海霞. 基于光电自准直的二维小角度测量技术研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2009.
- [10] 国家质量监督检验检疫总局. JJF 1210-2008 低转速转台校准规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 2008.
- [11] Liang W Y, Dong J W, Wang H Z. Directional emitter and beam splitter based on self-collimation effect[J]. OPTICS EXPRESS, 2007, 15(3): 1234-1239.
- [12] Cheng Fang, Fan Kuangchao. Linear diffraction grating interferometer with high alignment tolerance and high accuracy[J]. APPLIED OPTICS, 2011, 50(22): 4551-4556.
- [13] Zhao Lirong, Zhu Wei, Zhang Yaoyu, et al. The Method of the System Error Modification of Photoelectric Theodolite of T Type[C]//2012 International Conference on Optoelectronics and Microelectronics. Changchun, Jilin: IEEE, 2012: 384-387.

(上接第5页)

参 考 文 献

- [1] 国务院. 中国制造 2025[EB/OL]. [2015-08-20].
http://www.agri.cn/V20/sc/jjps/201505/t20150520_4605792.htm.
- [2] 罗文. 德国工业 4.0 战略对我国推进工业转型升级的启示[J]. 工业经济论坛, 2014, 1(4): 52-59.
- [3] 傅建中. 智能制造装备的发展现状与趋势[J]. 机电工程, 2014, 31(8): 959-962.
- [4] 董锁利, 丁颖, 张建安, 等. 机载设备计量性分析与设计讨论[J]. 计测技术, 2011, 31(3): 46-48.
- [5] 张伦彦. 基于模型定义和智能设备的新一代航空工厂[J]. 航空制造技术, 2013(8): 44-48.
- [6] 李洪波, 李伟, 张泽光, 等. “互联网+”时代的计量产业平台[J]. 计测技术, 2015, 35(5): 1-9.
- [7] 段宇宁. 计量新趋势(续)[J]. 中国计量, 2013(3): 17-21.
- [8] 于勇, 陶剑, 范玉青. 大型飞机数字化设计制造技术应用综述[J]. 航空制造技术, 2009(11): 56-60.
- [9] 国务院. 计量发展规划(2013-2020年)[EB/OL]. [2015-08-20].
http://legal.china.com.cn/2013-03/08/content_28170090.htm.
- [10] 张泽光, 李少壮, 李伟. 智能制造时代的计量——云计量[J]. 计测技术, 2015, 35(4): 1-5.
- [11] 杨军, 梁志国, 燕虎, 等. 欧洲动态计量技术发展[J]. 计测技术, 2015, 35(3): 1-9.