

欧洲动态计量技术发展

杨军, 梁志国, 燕虎, 尹肖, 李博

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 从 20 世纪末开始, 在欧洲区域计量组织(EURAMET)的支持下, 欧洲各国以国家计量机构为主, 加大了对动态计量技术的研究力度, 尤其是可溯源动态力学量、高精度运动参数等机械量的动态计量技术研究, 以及不确定度评估、动态建模、动态测量放大器校准等共性技术研究, 成为国际动态计量技术研究的新的热点区域。通过深入的联合研究、广泛的国际学术交流、领导或参与各种国际计量组织并制定各种国际计量标准, 以 PTB, LNE, NPL 为首的欧洲计量研究机构在国际动态计量技术发展中展现出强大的影响力和领导力。相关技术方向和组织管理方式对于我国动态计量技术发展具有重要的借鉴作用。

关键词: 计量学; 欧洲; 动态校准; 发展特点; EURAMET; 机械量

中图分类号: TB93

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)03-0001-09

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.03.01

Development of Dynamic Metrology in Europe

YANG Jun, LIANG Zhiguo, YAN Hu, YIN Xiao, LI Bo

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

Abstract: Supported by European Association of National Metrology Institutes (EURAMET), the main European NMIs and other research institutes have strengthened the research extent in dynamic metrology since the end of the 20th century. The dynamic calibration of mechanical quantities and universal technologies are the main study object, such as traceable dynamic measurement of mechanical quantities, high-precision measurement of movement quantities, uncertainty estimation, dynamic modeling and amplifiers calibration, etc. The European region has been one research center of dynamic metrology research. By means of associated research, international academic exchange, participation in the international metrology associations, and drawing up international metrology standards, European NMIs, such as PTB, LNE and NPL, have demonstrated powerful influence and leadership in the development of dynamic metrology. These related technical research areas and management patterns can present significant inspiration and reference to the development of Chinese dynamic metrology.

Key words: metrology; Europe; dynamic calibration; development characteristics; EURAMET; mechanical quantities

0 引言

动态计量技术是在 20 世纪六七十年代开始发展起来的。在其发展的初期到上世纪末, 由于国防工业上的需求推动和科学技术的领先探索, 美国与前苏联在该技术领域一直处在发展的最前端, 特别是 20 世纪七八十年代, 两国研制了各种实验室标准和专用装置, 组织了多次全国性或国际性动态计量学术会议, 引领着动态计量技术的发展走向。但是, 伴随着技术发展

进入平稳期、冷战结束和苏联解体等原因, 前苏联(俄罗斯)动态计量技术进展比较缓慢, 而美国在这方面的公开报道也逐步减少。

从 20 世纪 90 年代开始, 欧洲各国开始重视动态计量, 在 EURAMET 的支持下, 借助于国防、汽车等工业需求推动, 欧洲各国国家计量研究机构以及相关高校、企业加大了对动态计量技术的研究力度, 技术发展非常迅速, 已经成为国际动态计量技术研究的新的热点区域, 以 PTB(德国联邦物理技术研究院)、LNE(法国国家计量院)、NPL(英国国家计量院)为首的欧洲计量研究机构在国际动态计量技术发展中展现出强大的影响力和领导力。

收稿日期: 2015-05-20

作者简介: 杨军(1979-), 男, 湖南邵阳人, 高级工程师, 主要从事动态测试与校准技术研究。

近年来,北京长城计量测试技术研究所(CIMM)在动态计量技术领域与 PTB, LNE 等欧洲国家计量机构以及西门子、Kistler 和 DHI 等传感器生产商进行了大量交流合作,了解了欧洲动态计量技术最新发展情况。本文在多次双边学术交流、现场考察、大量资料查阅等基础上,从技术发展重点、管理组织特点、推广与典型应用三个方面对欧洲(不含俄罗斯等前苏联国家,下同)近年来动态计量技术的发展进行梳理和分析,以期为我国动态计量技术的发展提供参考和借鉴。

1 欧洲动态计量技术发展重点

1.1 可溯源动态力学量测量方法

动态力、动态扭矩、动态压力等力学量并不能通过激光干涉等光学方法直接进行溯源,其可溯源问题一直是动态计量技术领域的难点。PTB 等欧洲国家计量机构近年来在该方向做了大量工作,主要研究围绕着通过激光干涉等方法把动态量值溯源到静态量或基本量,以及进一步完善扩展现有成熟方法进行。

PTB^[1-2], LNE, CEM(西班牙国家计量院)^[3-4]等先后进行了基于激光干涉法的正弦力校准技术研究,各自建立了相应的标准装置,如图 1 所示。三套装置均采用振动台激励惯性质量块的方式产生中频正弦惯性力,力值范围可达 10 kN;采用激光干涉仪直接进行加速度测量,使得惯性力直接溯源到质量、时间和长度这三个基本量。其中,PTB 等还对质量块的加速度分布不均与补偿问题进行了深入研究。

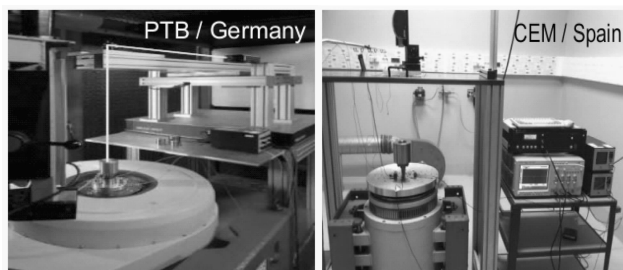


图 1 PTB 与 CEM 激光干涉法正弦力标准装置

另外,PTB 还进行了激光干涉法脉冲力校准技术研究,研制两套脉冲力校准装置^[5],最大瞬态脉冲力值分别为 20 kN 和 250 kN,其中,20 kN 装置如图 2 所示。两套装置均采用气炮激励横向惯性质量块冲击的方式产生脉冲力,并以激光干涉绝对法冲击加速度测量技术实现冲击加速度的直接复现,利用质量作为可靠的中间量,完成瞬态脉冲式动态力的绝对复现,根据测量模型,需要通过两台激光干涉仪分别测量碰撞

过程中两质量块的速度变化。

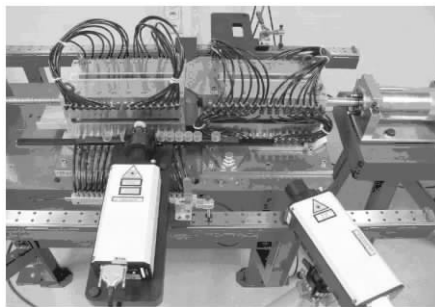


图 2 德国 PTB 激光干涉法脉冲力校准装置

气浮轴系在动态扭矩方面,PTB 进行了激光干涉法正弦扭矩校准技术研究^[6],初期实现最高频率达 100 Hz、幅度为 100 Nm 正弦激励的扭矩校准,首次实现了动态扭矩到基本物理量的溯源。通过不断研究改进,到 2012 年,该系统可以实现的正弦激励频率增高至 1 kHz,但此时扭矩幅值只能达到 20 Nm,装置如图 3 所示。该方法是通过激光干涉仪与光栅配合测量转动角加速度,再利用已知的转动惯量作为中间量实现动态扭矩的绝对复现。捷克 CMI、土耳其 UME 及德国传感器生产商 HBM 在 EMRP 项目中参与了相关技术研究。

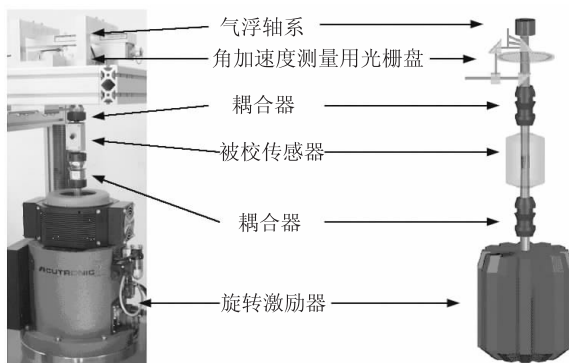


图 3 PTB 激光干涉法正弦扭矩标准装置

在动态压力方面,LNE, NPL^[7]的研究重点在溯源方法比较成熟的阶跃压力校准方向,主要技术包括基于激波理论与测速的激波管和直接溯源到静态压力的快开阀;PTB 主要研究方向为脉冲压力校准方法与溯源问题;意大利国家计量院(INRIM)、瑞典国家计量院(SP)、芬兰国家计量院(MIKES)等在两方面都有涉及。

法国国家计量院动态压力校准实验室 LNE-ENSAM 建立了一系列的阶跃压力标准装置,组成了法国的动态压力国家最高标准体系,包括多套激波管装置和多套快开阀装置^[8-9]。激波管主要用于动态压力高频校

准，包括 TCXX 系列和 TCR。TCR 为参考激波管，其它标准装置都可以与其进行比对。DORXX 系列为快开阀装置，主要用于动态压力低频校准。图 4 为主要标准装置覆盖的压力和频率范围。

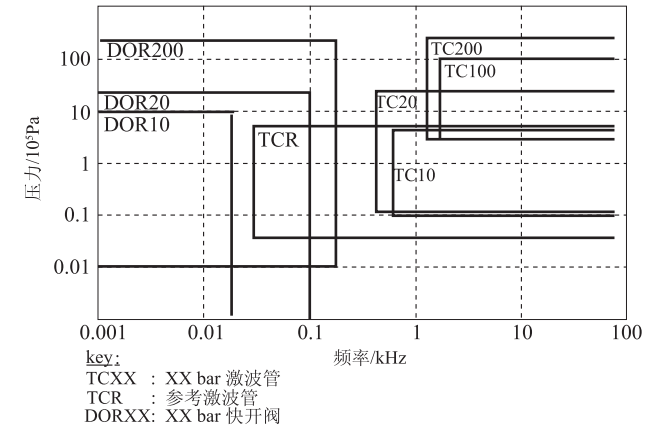


图 4 法国 LNE-ENSAM 动态压力标准体系组成

PTB 和 MIKES 目前正在研究基于激光干涉测量的脉冲压力校准装置。脉冲压力的产生是根据“落重”方法，在重物的冲击下压缩压力腔内介质，由此传递到被测传感器(DUT)上。但激光干涉测量的方法并不相同。MIKES 的方法是激光干涉测量重物落下的减速运动，与惯性质量、活塞横截面积等一起计算脉冲压力幅值^[10]，MIKES 研制了相应的校准装置，其原理如图 5 所示。目前正在改进优化方法，期望能从 100 MPa 到 500 MPa 达到 1% 的相对测量不确定度。

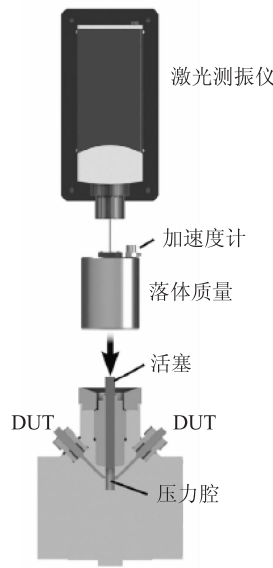


图 5 MIKES 脉冲压力校准装置示意图

PTB 前期提出通过激光干涉测量活塞的压缩位移

和介质体积弹性模量来计算脉冲压力^[11]，现在主要研究通过压力腔内压力介质受压折射率的改变导致激光光程变化来测量压力的方法^[12]，期望达到较小的测量不确定度，其原理如图 6 所示。

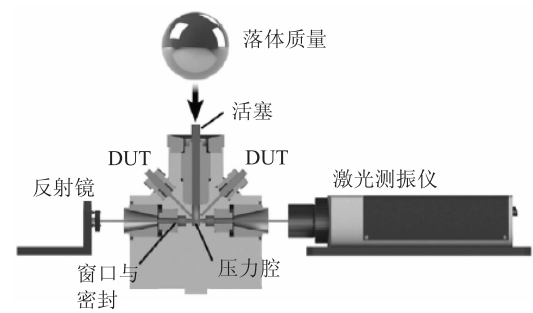


图 6 PTB 脉冲压力校准原理示意图

1.2 高精度运动参数动态校准技术

在高精度振动冲击校准方面，PTB 走在世界的前列。PTB 线振动标准覆盖 (0.1 Hz ~ 20 kHz)，线冲击加速度标准覆盖 50 m/s² - 100 km/s²，它们的测量不确定度均处于世界最高水平。另外，PTB 还在角振动校准、三轴振动校准、激光测振仪校准等方面开展了研究工作。

在角振动加速度校准技术研究方面^[13-14]，PTB 研制了标准装置，其频率范围为 0.3 Hz ~ 1 kHz。角振动台采用气浮式转动激励发生器，由信号发生器和功放进行驱动。激光干涉仪入射衍射光栅并由衍射光栅条数计算得到角加速度的幅值，根据角加速度传感器的输出，得到被校传感器的振动幅值灵敏度。图 7 为其装置实物照片。



图 7 PTB 角振动加速度校准装置

在三轴振动计量方面，PTB 研制了三轴振动国家计量标准，可对三轴加速度传感器的三个方向灵敏度和横向灵敏度进行同步校准。

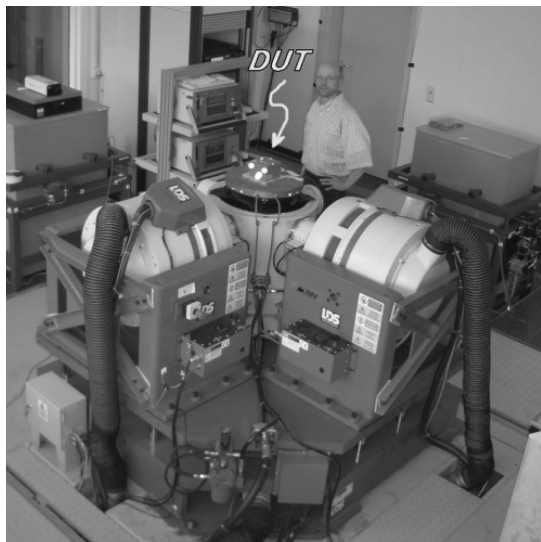


图 8 PTB 三轴振动标准装置

激光测振仪作为一种使用越来越广泛的非接触测振仪器,成为动态力学量溯源的主要技术手段,其高频校准尤其受到重视,除了传统的在标准振动台上与标准测振仪进行共点比对的方法外,PTB 等针对其高频相位校准问题,研究了单光源激光测振仪校准方法^[15],简化了装置光路调节,减小了测量不确定度。其光路的原理示意图如图 8。

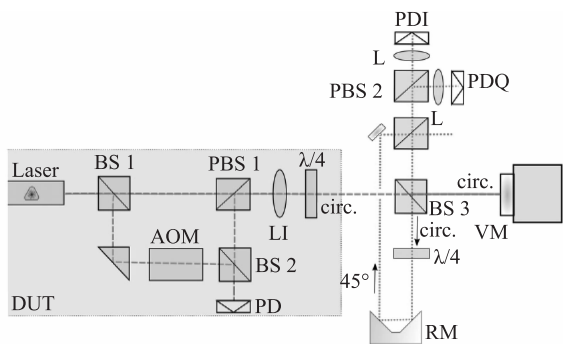
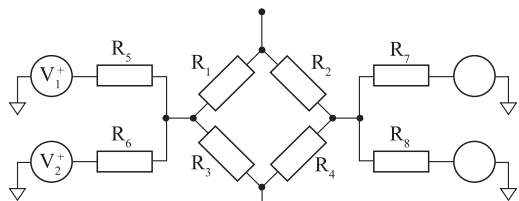


图 8 单光源激光测振仪绝对校准光路示意图

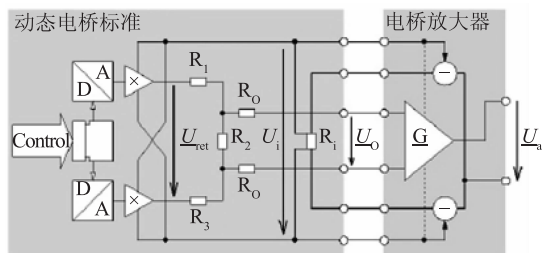
1.3 动态测量放大器的校准

应变、电压放大器和电荷放大器等作为动态测量中传感器的后端调理仪器,其动态性能直接影响到系统的性能。近年来,PTB 等对这类放大调理仪器的动态校准方法进行了深入研究,通过模型分析,细化系统误差,从而降低测量不确定度。

图 9(a)~9(c)分别为 NPL, PTB 与 LNE 应变放大器标准装置原理示意图^[16]。它们结构并不相同,但都能实现对应变放大器的幅频和相频特性校准,以及基于 D/A 转换的计算机自动控制。其中 PTB 的标准最高校准频率达 10 kHz。



(a) NPL



PTB 的 Elster^[22~23] 等同样针对线性时不变系统研究了补偿滤波器的设计方法,并能用于在线修正,但滤波器结构更为复杂。

PTB, NPL, SP 的研究人员对动态测量分析中针对 LTI 的数字反卷积算法进行了系统研究,包括最小相位全通分解法、基于精确逆滤波器的异步时间反演算法、无限冲激稳定响应法、基于频域最小二乘拟合的有限冲击响应逆滤波器等,并比较分析了它们各自适合的分析对象^[24]。

INRIM 的 Malengo 等研究了传感器动态模型参数辨识中的最小二乘拟合方法,包括总体最小二乘法^[25]和加权最小二乘法等。总体最小二乘法适合于当自变量本身的不确定度不可忽略时或自变量和因变量相关时,正适合于动态校准信号处理中的曲线拟合。

PTB 还研究了加速度计的建模方法,包括通过冲击激励和建模得到加速度计的幅频响应和相频响应^[26],通过绝对法宽频正弦校准数据和二阶系统的参数辨识得到传感器的动态模型^[27],并对两种方法进行了模型数据和实际校准结果的交叉比对研究^[28]。

PTB^[29], LNE^[30], CEM 等在动态力和动态扭矩校准方法研究中,针对力传感器和扭矩传感器在实际系统中的动态性能会受到负载、连接件等的直接影响问题,研究了通过对校准装置的系统动力学建模分析和校准试验的传感器模型本构方法。如在激光干涉法正弦力标准装置中,系统的模型可简化为图 11 所示。其中上端质量 m_H 包括加载质量块质量和传感器上部质量,下端质量 m_B 包括适配块质量和传感器下部质量。

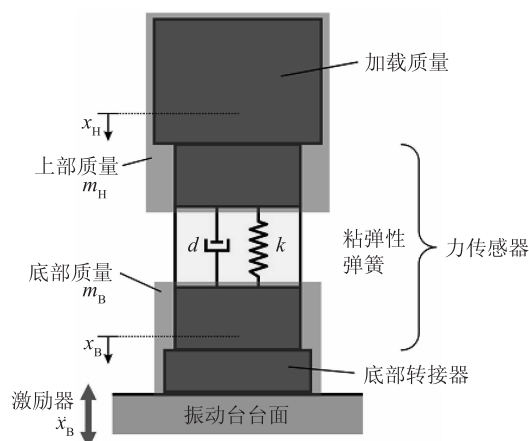


图 11 正弦力校准装置模型

激光干涉法脉冲力校准装置中可以根据需要将装置的各个部分的接触及碰撞简化成不同的质量弹簧系

统^[31],得到不同数量质量部分的简化模型,5 个质量部分的脉冲力校准装置模型如图 12 所示。

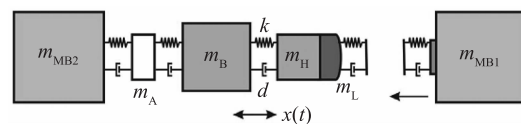


图 12 5 个质量部分的脉冲力校准装置模型

激光干涉法正弦扭矩校准装置也根据校准装置各部件的机械结构进行了建模^[32],得到的质量弹簧阻尼模型如图 13 所示。该校准装置模型中扭矩传感器简化成一个线性质量弹簧阻尼系统,由扭转弹簧和阻尼器耦合的两个惯性质量力矩单元构成。

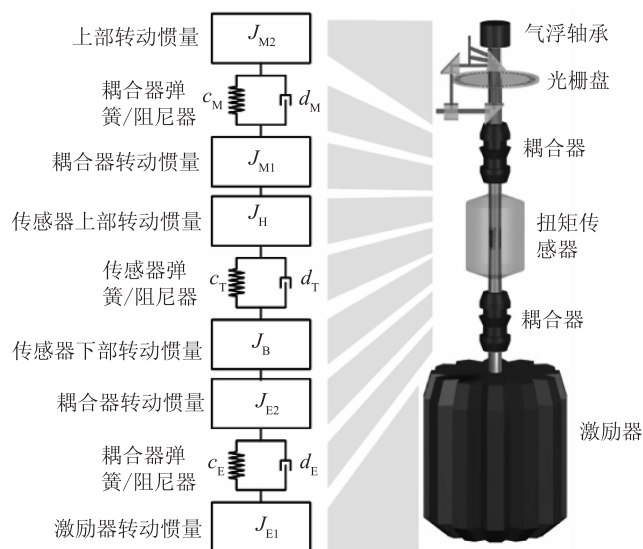


图 13 PTB 正弦扭矩校准装置模型

PTB^[33]与 SP 对使用比较法的中心加载正弦力校准装置进行了系统动力学建模分析,同时研究动态力传递路径和校准修正方法。

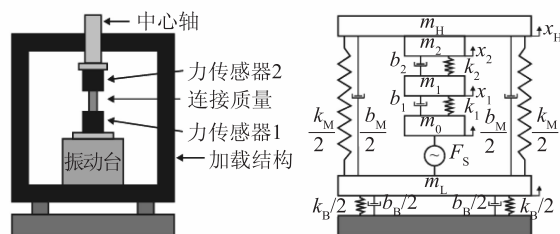


图 14 正弦力比较法校准示意图及模型

NPL, SP, INRIM, MIKES 等分别通过激波管动态压力校准和脉冲压力校准以及参数辨识的方法,对压力传感器的动态模型进行了分析和比较,并对典型参数进行了统计研究^[34]。

1.5 动态测量不确定度分析

近年来，欧洲有关动态校准不确定度的研究非常活跃，其基本思想大都脱胎于蒙特卡洛法。

蒙特卡洛法是一种已知系统传递模型情况下，利用对服从预计概率分布的输入信号激励进行随机抽样而进行分布传播的方法。其特点是不管测量模型本身是线性还是非线性的，不对输出量分布进行假设，不需要对灵敏度系数进行计算，可用于复杂测量模型。因此蒙特卡洛法在动态测量系统及其测量不确定度的分析方面具有独特的优势。

2006 年，SP 的 J P Hessling 从延迟误差、响应误差极限、渐进效应、频带效应、谱分布函数几个方面讨论动态测量误差的范围问题，给出了估计模型和过程方法^[35]。2009 年，又从动态测量系统模型出发，定义了模型估计误差，基于动态测量不确定度主要由激励信号的误差经过动态测量模型传播，而激励信号经由动态测量模型的误差也带来不确定度，两者的范围搜索、传播均使用蒙特卡洛方法进行估计，然后对其进行合成^[36]。2011 年又研究了动态不确定度的扩散传播规律^[37]。

而 S Eichstädt 则对于动态测量中如何有效运用蒙特卡洛方法进行了系统阐述，包括给出系统传递函数、系统误差函数、输入概率分布密度函数、不确定度传播关系、不确定度合成等^[38]。

欧洲各 NMIs 已经把蒙特卡洛方法成功应用于动态测量分析实践中。如 PTB 的 Barbora Arendacka 对于具体的振动加速度校准中紧固件带来的影响进行了专门研究，给出了包含随机误差、安装效应误差、安装位置误差、位置误差等几个方面的特征不确定度模型，丰富和发展了紧固件带来的不确定度的估计理论与实践。NPL 则把蒙特卡洛方法应用于锁定放大器的动态测量分析^[39]。

2 欧洲动态计量技术研究组织特点

2.1 各国广泛参与

欧洲各国开展动态计量技术研究的机构不仅包括 PTB, NPL, LNE 等世界知名国家计量机构，还包括 SP, MIKES, CEM, INRIM, CMI, TÜBITAK-UME 等其他国家计量机构以及一些高校和传感器生产商、防务研究机构。根据不完整统计，近年来欧洲各国家计量机构开展的动态计量技术(不包含已经普遍研究的线振动冲击计量技术)研究如表 1 所示。

表 1 欧洲各 NMIs 开展的动态计量技术研究

国家计量机构	动态计量技术研究					
	角振动	动态压力	动态力	动态扭矩	放大仪器校准	建模与不确定度分析
PTB	●	●	●	●	●	●
LNE		●	●		●	●
NPL		●	●		●	●
SP		●	●			●
MIKES		●				●
CEM			●			
INRIM		●				●
CMI				●		
UME		●		●		

注：●表示该 NMI 开展了相关研究。

在这些研究中，除了上述已经介绍的技术发展重点外，SP, INRIM, PTB 等机构还进行了动态真空校准技术研究，主要通过真空到大气压的阶跃压力激励来得到真空计的动态响应^[40-41]。

另外，HBM, Kistler 等传感器生产商根据自身需要研制了一些动态校准装置并形成了部分产品，同时积极参与 PTB 等国家计量机构领导的研究项目以及制定标准计划。

2.2 联合研究与 EUROMET 支持

近年来欧洲在动态计量技术发展方面做了大量工作，取得长足的技术进步和广泛的国际影响力，不仅得益于欧洲各国自身的支持，也离不开 EURAMET 对各国计量机构展开相关联合研究的大力支持，特别是 ERMP 项目支持，如：

1) 2008 年至 2011 年，PTB 协调，LNE, NPL 参与，实施了名为“Development of methods for the evaluation of uncertainty in dynamic measurements”^[42] 的 EURAMET 跨学科计量计划，旨在发展动态计量中的测量不确定度评估方法，并希望能与“Guide to the expression of uncertainty in measurement”对接。计划包含形成一些通过实例应用证明的动态测量分析的改进方法，并支持了“Workshop on The Analysis of Dynamic Measurements”系列学术交流会。

2) 上世纪末开始，LNE-ENSAM (France) 牵头在 EURAMET 支持下实施了“Dynamic pressure measurement in liquid and gas”^[43] 计划，参加单位还有 INRIM (Italy), PTB (Germany), SP (Sweden) 等，旨在协调促进欧洲各国动态压力校准测试技术研究和合作交流。

3) 2011 年至 2014 年，由德国 PTB 协调在 EU-

RAMET 支持下开展了 EMRP 项目 IND09: “Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities”^[44] 研究工作, 参与的国家计量研究机构包括 PTB, NPL, LNE, MIKES, CEM, SP, INRIM, CMI, TÜBITAK-UME 等9个, 而 HBM, SPEKTRA, VW, PORSCHE 等传感器生产商和工业应用机构作为项目合作者参与, 例外还包含一些短时参与的相关高校, 总支持经费达360万欧元。项目主要针对力、压力、扭矩等动态力学量的可溯源问题, 仪表放大器的校准问题, 数学、统计方法与建模问题等进行研究, 为欧洲建立动态计量标准基础设施建设提供技术支持。项目分为5个技术工作方向, 相互协作关系如图15所示。

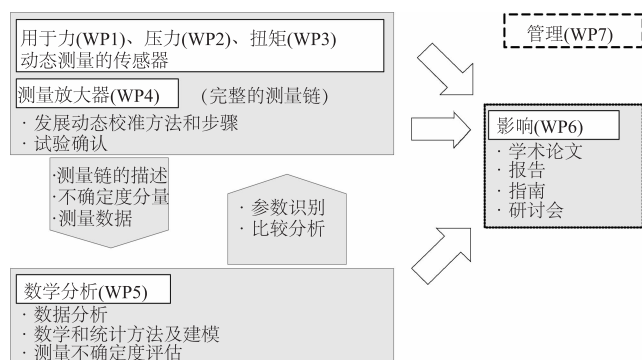


图15 ERMP: IND09 项目技术方向及相互关系

2.3 广泛的学术交流

在动态计量这一学科交叉领域, 欧洲各研究机构继承了计量领域开放的传统, 不仅有合作项目范围内定期与非定期的会议交流, 还有各种形式的国际会议交流和公开技术报告, 如:

1) 从2006年开始, “Workshop on The Analysis of Dynamic Measurements”^[45-47] 学术交流会在欧洲主要国家计量机构轮流承办, 主办过的机构包括 PTB, LNE, NPL, SP, INRIM 等, 至2014年已经成功主办了八届会议, 其中2009年的会议是作为在Lisbon召开IMEKO世界大会的一个重要主题。会议旨在通过交换思想和促进合作来改善动态测量中的分析方法, 研讨焦点在如何提取、精炼、转换和提出动态校准中最有用的合适信息。交流的范围包括动态测量分析方法可应用的各种专业参数及其测量系统, 机械的、电的或混合的系统。内容可以是科学与技术方面的, 也可以是应用需求、前景预测、推进合作、出版等非技术方面的。参加会议不仅包括国家计量机构的科学家和计量人员, 还包括相关高校科研人员以及相关工业领域的用户。该系列会议在促进动态测量技术交流和项目

合作(如“Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities”项目)等方面发挥了重要的作用。

2) 从2002年开始, 德国PTB与中国CIMM轮流承办动态测量技术双边学术研讨会, 到2014年已经举办了六届会议。研讨会旨在就双方在动态测量领域的最新技术进展进行广泛深入交流, 并探讨双方比对、技术合作。

3) 近十几年来, 欧洲各国家计量机构尤其是PTB在Metrologia, Measurement等行业学术杂志、IMEKO等国际会议以及官网上发表了大量学术论文、研究报告以及进展简报。如2002年, SP对当时的动态压力和动态力计量技术发展进行了完整的梳理和总结, 形成了两份非常有价值的专业报告, 在其官网上^[48-49]公开发表, 获得了非常好的反响。

2.4 参与国际组织制定国际计量标准

欧洲各国家计量机构尤其是PTB积极参与到动态计量相关的国际组织中, 拥有较大的发言权, 如BIPM/CCAUV(国际计量委员会声学、超声、振动咨询委员会)主席和ISO/TC108/SC3/WG6(Calibration of vibration and shock transducers)召集人近年来一直由PTB的科学家担任。

PTB等也在动态计量相关国际标准制定方面发挥巨大的作用, 尤其是振动冲击校准方面。PTB近年来负责起草完成的振动冲击相关ISO标准包括:

- 1) ISO 16063 - 11: primary vibration calibration;
- 2) ISO 16063 - 13: primary shock calibration;
- 3) ISO 16063 - 15: primary angular vibration calibration;
- 4) ISO 16063 - 21: vibration calibration;
- 5) ISO 16063 - 22: shock calibration;
- 6) ISO 16063 - 23: angular vibration calibration;
- 7) ISO 16063 - 41: Calibration of laser vibrometers.

同时PTB还负责正在起草新技术标准PWI 16063 - 43: 基于模型参数识别的加速度传感器校准。

另外PTB还在TC 108/SC 3/WG 6工作组和BIPM/CCM(质量及相关量咨询委员会)中倡导制定动态力和动态扭矩的国际标准。

3 欧洲动态计量技术典型应用

PTB、NPL、LNE等知名欧洲国家计量机构都是应其国家工业发展需求而生, 在其发展的历史中为他们的工业产品的质量保障起到了非常重要的作用。他们在动态计量技术的发展中也同样注重其在工业领域的

应用,如:

PTB 在汽车的性能测试方面应用动态力测量技术。如在汽车撞击试验中汽车高速撞向障碍物,这个障碍物是由四个力测量传感器和一个遮挡平面组成的一个测量平台,这个系统的动态特性通过校准和系统建模分析来确定。

PTB, SP 对材料疲劳试验机动态力校准技术进行了研究,建立相应的校准装置。该装置采用伺服液压激励加载,可以对疲劳试验循环力传感器进行比较法动态校准,并能研究疲劳试验机动态力传递路径和附加惯性力等系统误差修正方法。

PTB 动态压力校准技术研究主要面向轻武器试验中的动态压力测试,除落锤式液体脉冲压力校准装置外,他们还研制了 20 MPa 气体脉冲压力校准装置和液体高压快开阀等,都是针对这方面的应用需求。

NPL 针对小卫星轨道修正中的推力精确控制问题,研究了微小动态力的测量校准技术研究,研制了推力架,并通过建模和反卷积等方法实现了低频循环力的补偿^[50]。

另外,在“Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities”项目基础上,2015 年~2018 年,NPL, LNE, PTB 在 EURAMET 支持下又开展了 EMPIR 项目“Standards and software to maximize end user uptake of NMI calibrations of dynamic force, torque and pressure sensors”^[51]的研究工作,旨在通过制定标准和软件来加强动态测量传感器(力、扭矩、压力)最终用户对动态校准的理解,从而推广动态校准及其应用。

4 总结

近年来,欧洲在机械量动态计量、动态测量分析方法(建模与不确定度分析)等方面做了大量非常有特色的研究工作,具有参与广泛性、需求针对性、专业全面性、研究系统性、发展持续性等特点,并在项目联合研究、国际学术交流、动态计量标准制定等方面取得丰厚的成果,具有了较大的国际影响力。欧洲在动态计量技术方面的技术发展重点和相关组织管理、推广方法对于我国动态计量技术的发展具有非常有价值的借鉴作用。特别是我国在动态测量复杂分析方法方面的研究远落后于欧洲,其方法和研究成果对于我们的研究具有直接的指引作用。

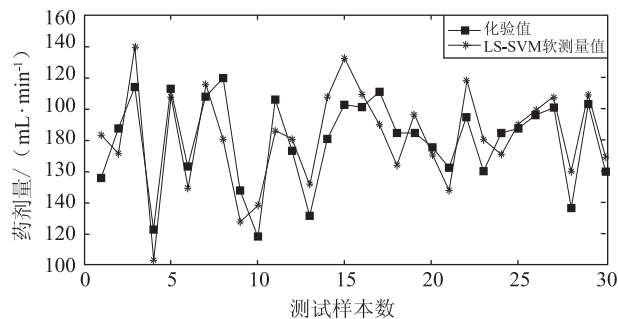
参 考 文 献

[1] Schlegel Ch, Kieckenap G, Glöckner B. A Buß and R Kümme. Traceable periodic force calibration [J] Metrologia,

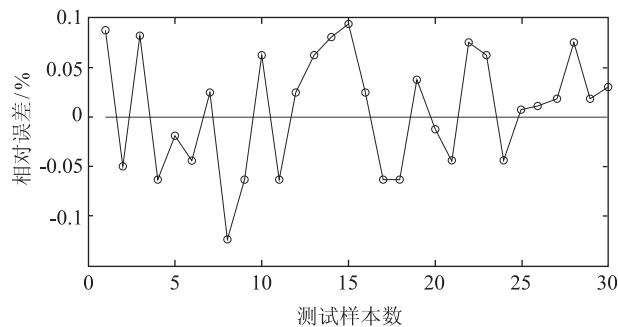
2012, 49: 224 - 235.

- [2] Schlege Christian, Kieckenap G, Kümme R. APPLICATION OF A SCANNING VIBROMETER FOR THE PERIODIC CALIBRATION OF FORCE TRANSDUCERS [C]//XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth. Busan, Republic of Korea; IMEKO, 2012.
- [3] MedinaM N, Robles J L. de Vicente J. REALIZATION OF SINUSOIDAL FORCES AT CEM [C]// IMEKO 22nd TC3, 12th TC5 and 3rd TC22 International Conferences. Cape Town; Republic of South Africa, 2014.
- [4] Medina Nieves, de Vicente Jesús. Force Sensor Characterization Under Sinusoidal Excitations [J]. Sensors, 2014, 14: 184 54 - 18473.
- [5] Kobusch M, Bruns Th. The New Impact Force Machine at PTB [C]// Proceedings of the XVII IMEKO World Congress. Dubrovnik, Croatia: IMEKO, 2003: 263 - 267.
- [6] Bruns T. Sinusoidal Torque Calibration: A Design for Traceability in Dynamic Torque Calibration [C]//XVII IMEKO world congress. Dubrovnik, Croatia: IMEKO, 2003.
- [7] Clare Matthews, Stephen D, et al. Lattice Boltzmann method applied to non-ideal diaphragm opening in shock tubes [C]// 7th Workshop on Analysis of Dynamic Measurements. LNE Paris, 2012.
- [8] Damion J P. Dynamic calibration of pressure sensors [R]. LNE REPORT, 2007.
- [9] SARRAF C, Damion J P. A Method for Dynamic Calibration of Pressure Transducers [C]//7th Workshop on Analysis of Dynamic Measurements. LNE Paris: INRIM, 2012.
- [10] Antti Lakka and Sari Saxholm. DROP-WEIGHT SYSTEM FOR DYNAMIC PRESSURE CALIBRATION [C]//7th Workshop on Analysis of Dynamic Measurements. LNE Paris: INRIM, 2012.
- [11] Division 1-Mechanics and Acoustics [R]. PTB Reports, 2009, 49 - 50.
- [12] Bruns Th, Franke E, Kobusch M. Linking dynamic pressure to static pressure by laser interferometry [J]. Metrologia, 2013, 50: 580 - 585.
- [13] Angelika Täubner, Hans-Jürgen von Martens. Measurement of angular accelerations, angular velocities and rotation angles by grating interferometry [J]. Measurement, 1988, 24: 21 - 32.
- [14] Michael Kobusch, Thomas Bruns, Ernst Franke. Challenges in Practical Dynamic Calibration [C]//AMCTM 2008. Paris: IMEKO, 2008.
- [15] Blume F, Täubner A, Göbel U et al. Primary phase calibration of laser-vibrometers with a single laser source [J]. Metrologia, 2009, 46: 489 - 495.
- [16] Claire Bartoli, Beug M Florian, Thomas Bruns. State of progress of dynamic calibration of force, torque and pressure sensors including conditioners [C]//EMRP IND, 2009.
- [17] Leonard Klaus, Thomas Bruns, Henrik Volkers. Calibration of

- bridge-, charge- and voltage amplifiers for dynamic measurement applications[J]. *Metrologia*, 2015, 52: 72 - 81.
- [18] Henrik Volkens, Thomas Bruns. The influence of source impedance on charge amplifiers [J]. *Acta IMEKO*, 2013, 2 (2): 56 - 60.
- [19] Esward T J, Elster C, Hessling J P. ANALYSIS OF DYNAMIC MEASUREMENTS: NEW CHALLENGES REQUIRE NEW SOLUTIONS[C]//XIX IMEKO World Congress. Lisbon, Portugal: IMEKO, 2009.
- [20] Hessling J P. Dynamic metrology - an approach to dynamic evaluation of linear time-invariant measurement systems [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19: 084008.
- [21] Hessling J P. A novel method of dynamic correction in the time domain [J]. *Measurement Science and Technology*, 2008, 19: 075101.
- [22] Elster C, Link A. Uncertainty evaluation for dynamic measurements modelled by a linear time-invariant system[J]. *Metrologia*, 2008, 45: 464 - 473.
- [23] Elster C, Link A. Analysis of dynamic measurements: compensation of dynamic error and evaluation of uncertainty [C]//Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology and Testing. Paris, France: ENS Cachan, 2008.
- [24] Eichstädt, Elster C, Esward T J, et al. Deconvolution filters for the analysis of dynamic measurement processes: a tutorial [J]. *Metrologia*, 2010, 47: 522 - 533.
- [25] Andrea Malengo and Francesca Pennecchi. A weighted total least-squares algorithm for any fitting model with correlated variables[J]. *Metrologia*, 2013, 50: 654 - 662
- [26] Link A, Täubner A, Wabinski W, et al. Calibration of accelerometers: determination of amplitude and phase response upon shock excitation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17: 1888 - 1894
- [27] Link A, Täubner A, Wabinski W, et al. Elster. Modelling accelerometers for transient signals using calibration measurements upon sinusoidal excitation [J]. *Measurement*, 2007, 40: 928 - 935.
- [28] Bruns Thomas, Link Alfred, Schmähling Franko, et al. Calibration of accelerometers using parameter identification - targeting a versatile new standard [C]// XIX IMEKO World Congress. Lisbon, Portugal: IMEKO, 2009.
- [29] Kobusch M, Link A, Buss A, et al. Comparison of Shock and Sine Force Calibration Methods [C]//XX IMEKO World Congress. Busan, Republic of Korea: IMEKO, 2012.
- [30] Coquelin L, Fischer N, Obaton A F. Parameter identification for dynamic calibration of force transducers using chirp excitations and assessment of the associated uncertainty [C]//8th International Workshop on Analysis of Dynamic Measurements. Turin, Italy: INRIM, 2014.
- [31] Kobusch M. Investigation for the model-based dynamic calibration of force transducers by using shock forces [C]// IMEKO TC3, TC5 and TC22 International Conference. Cape Town, South Africa: IMEKO, 2014.
- [32] Leonard Klaus, Thomas Bruns, Michael Kobusch. DETERMINATION OF MODEL PARAMETERS FOR A DYNAMIC TORQUE CALIBRATION DEVICE [C]//XX IMEKO World Congress. Busan, Republic of Korea: IMEKO, 2012.
- [33] Kumme, R. The dynamic calibration of force transducers by the comparison method [C]//14th IMEKO World Congress. Tampere, Finland IMEKO, 1997, 3: 114 - 119.
- [34] Matthews C, Pennecchi F, Eichstädt S, et al. Mathematical modelling to support traceable dynamic calibration of pressure sensors[J]. *Metrologia*, 2014, 51: 326 - 338.
- [35] Hessling J P. A novel method of estimating dynamic measurement errors[J]. *Meas. Sci. Technol*, 2006, 17: 2740 - 2750.
- [36] Hessling J P. A novel method of evaluating dynamic measurement uncertainty utilizing digital filters [J]. *Meas. Sci. Technol*, 2009, 20: 55 - 106.
- [37] Hessling J P. Propagation of dynamic measurement uncertainty [J]. *Meas. Sci. Technol*, 2011, 22: 105.
- [38] Eichstädt S, Link A, Harris P, et al. Efficient implementation of a Monte Carlo method for uncertainty evaluation in dynamic measurements[J]. *Metrologia*, 2012, 49: 401 - 410.
- [39] Clarkson P, Esward T J, Harris P M, et al. A software simulation tool to evaluate the uncertainties for a lock-in amplifier [C]// AMCTM 2008, Paris: IMEKO, 2008.
- [40] Jousten K, Pantazis S, Buthig J, et al. A standard to test the dynamics of vacuum gauges in the millisecond range [J]. *Vacuum*, 2014, 100: 14 - 17.
- [41] Fredrik Arrhén. STEP RESPONSE OF VACUUM SENSORS - A PRELIMINARY STUDY [C]//XX IMEKO World Congress Metrology for Green Growth. Busan, Republic of Korea: IMEKO, 2012.
- [42] Fischer N, Eichstädt S, Esward T. Development of methods for the evaluation of uncertainty in dynamic measurements [EB/OL]. [2015 - 03 - 16]. http://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?eurametCtp_project_show%5Bproject%5D=843.
- [43] Damion J P. Dynamic pressure measurement in liquid and gas [EB/OL]. [2015 - 05 - 20]. http://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?eurametCtp_project_show%5Bproject%5D=85.
- [44] EURAMET. Traceable Dynamic Measurement of Mechanical Quantities [EB/OL]. [2015 - 03 - 18]. <http://www.ptb.de/emrp/ind09-home.html>.
- [45] SP. 6th Workshop on The Analysis of Dynamic Measurements [EB/OL]. [2015 - 03 - 20]. <http://www.french-metrology.com/publications/6th-workshop-dynamic-measurements/conference-workshop-2011.asp>.



(a) LS-SVM模式和人工加药模式



(b) 相对误差曲线

图1 LS-SVM模型和人工加药模式对比及相对误差曲线

为了进一步检验本文方法的性能，分别采用标准SVM和BP神经网络模型实现药剂量优化设定。3种方法的对比结果如表1所示。由表1可见，本文方法的均方根误差RMSE为0.141，最大相对误差(MRE)为0.15%，比其他方法小，表明模型性能稳定，能较好地检测粗选精矿品位。

表1 浮选过程药剂量设定比较

误差	标准 SVM	神经网络	LS-SVM
RMSE	0.153	0.162	0.141
MRE/%	0.173	0.181	0.15

4 结论

浮选药剂量是泡沫浮选中一项非常重要的生产操作变量，能够控制浮选生产指标，在生产过程中控制药剂量显得尤为重要。由于最小二乘支持向量机求解线性方程收敛速度快，模型参数确定较为方便，因此本文将最小二乘支持向量机模型应用于药剂量优化设定，取得了十分有效的应用结果。

参 考 文 献

[1] 刘文礼, 路迈西, 王凡, 等. 煤泥浮选泡沫图像纹理特征的提取及泡沫状态的识别[J]. 化工学报, 2003, 54(6): 830-835.

[2] 孙振海, 罗成名, 宋风华. 浮选自动跟踪加药控制系统[J]. 煤炭技术, 2011, 30(4): 119-120.

[3] 林威. 基于数字图像识别的 PLC 智能程控加药系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.

[4] 王玉昆, 张勇, 王介生, 等. 基于 SVM 与图像处理技术的浮选加药控制方法研究[C]//第三十一届中国控制会议. 合肥: 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2012.

[5] 耿增显, 柴天佑. 基于案例推理的浮选过程智能优化设定[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009, 29(6): 112-116.

[6] Han M, Han B, Xi J, et al. Universal Learning Network and Its Application for Nonlinear System With Long Time Delay [J]. Computers and Chemical Engineering, 2006, 31(1): 13-20.

[7] Suykens J, Gestel V, Brabanter J D, et al. Least Squares Support Vector Machines[M]. Singapore: World Scientific, 2002.

[8] Guo X C, Yang J H, et al. A novel LS-SVMs hyper-parameter selection based on particle swarm optimization [J]. Neurocomputing, 2008, 71(16): 3211-3215.

(上接第 9 页)

[46] LNE. 7th Workshop on The Analysis of Dynamic Measurements [EB/OL]. [2015-03-20]. <http://www.french-metrology.com/workshop/dynamic-measurement-workshop.asp>.

[47] INRIM. 8th Workshop on The Analysis of Dynamic Measurements [EB/OL]. [2015-03-20]. www.inrim.it/ADM2014/.

[48] Jan Hjelmgren. Dynamic Measurement of pressure-A Literature Survey[R]. Borås: SP REPORT, 2002: 34.

[49] Jan Hjelmgren. Dynamic Measurement of force-A Literature Survey [R]. Borås: SP REPORT, 2002: 27.

[50] Trevor Esward, Clare Matthews, Ben Hughes. System identification and uncertainty evaluation for dynamic force measurements at the micronewton level for space satellite applications [C]//Workshop on Analysis of Dynamic Measurements. Paris: LNE, 2012.

[51] EURAMET. Standards and software to maximize end user uptake of NMI calibrations of dynamic force, torque and pressure sensors [EB/OL]. [2015-03-24]. http://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?euramet_Ctcp_project_show%5Bproject%5D=1339.