



TC-3
MEASUREMENT
OF
FORCE AND MASS

国际计量联合会
测力与称重技术论文选

施昌彦 朱鼎铭 陈贻管 等译
潘子铸 葛楚鑫 等校

计 量 出 版 社

内 容 提 要

本书辑入了1980年9月召开的国际计量联合会 (IMEKO) 力与质量计量技术委员会 (TC-3) 第八届会议的主要论文 25 篇。这些论文介绍了测力与称重技术的发展动向、标准测力机或标定装置的性能和比对、力传感器和称重装置的检验、应变式传感器的性能和结构、新型称重装置的性能和结构、电子秤的应用、测力仪器的应用、动态条件下的测力与称重方法, 具有一定的理论意义和实用价值, 反映了国际上测力与称重计量的新成就和新动向。另外, 本书还收集了历届 TC-3 会议的讨论主题、概况及题录。

本书可供力学计量与测试人员, 特别是从事传感器、测力仪器与机器、轨道衡与汽车衡、电子秤与新型称重仪的研究、设计、制造及检定的科技人员阅读, 也可供大专院校师生和研究生参考。

WEIGHING TECHNOLOGY

8th Conference of the IMEKO Technical Committee TC-3 on

Measurement of Force and Mass

Polish Federation of Engineering Associations, Kraków, Sept. 1980

国际计量联合会

测力与称重技术论文选

施昌彦 朱鼎铭 陈貽管 等译

潘子琦 葛楚鑫 等校

责任编辑 汤永厚

—*

计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

北京计量印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

—*

开本 850 × 1168 1/32 印张 9 7/8

字数 256千字 印数 1—5 000

1982年8月第一版 1982年8月第一次印刷

统一书号 15210·155

定价 1.50 元

科技新书目: 24—147

出版说明

国际计量联合会 (IMEKO) 下设的第三技术委员会 (TC-3) 成立于1967年,专门从事力值与质量计量工作,现有17个成员国,召开过8次专业会议和3次圆桌讨论会。第8届国际会议于1980年9月在波兰召开,共有21个国家参加,发表了论文48篇。按论文内容来分,反映测力与称重技术发展动向的综述性文章2篇,有关砝码和测力机专用砝码的文章5篇,有关标准测力机性能和比对的文章4篇,有关力传感器检定和称重装置检定的文章5篇,有关力传感器性能和结构的文章7篇,有关称重装置结构的文章7篇,有关称重装置应用的文章8篇,有关测力仪器应用的文章4篇,有关动态条件下测力与称重的文章6篇。

我国国家计量总局和中国计量测试学会派往出席此次会议的施昌彦同志,带回了上述48篇论文。国内力学界,特别是从事力传感器、电子秤、轨道衡、汽车衡、测力计及测力机的研究、设计、制造及检定的广大科技工作者,都迫切要求我们尽快将这些论文介绍出来。为此,我们组织力量,将其中水平较高、实用意义较大的25篇论文加以翻译,辑成本书。

文稿的分类编排与原版雷同,只是将“砝码和测力机专用砝码”与“标准测力机”两个部分合并成为“标准测力机的性能和比对”。为使读者了解会议概况和学科动向,在译文之前增加了一篇《IMEKO/TC-3第八届会议概况及从会议看到的发展动向》的综述性文章;在译文之后增加了一篇附录,介绍历届TC-3会议的讨论主题、概况及题录,以供读者据此检索。

在翻译及编辑时,对原版的一些印刷错误、笔误作了改正,对章节的目次作了统一,对原意不清或不妥之处也作了修正或注释(在文中用*标出)。

对于本书的选编译校工作，中国计量科学研究院曾给予大力支持和具体帮助，在此谨致谢意。

尽管译校者和有关方面都做出了很大努力，但限于编辑的水平 and 见识，以致对文章的选取、编排，对译稿的审读、整理，都会存在缺点，恳请读者指正。

计量出版社编辑部

1981年10月

目 录

综 述

- IMEKO/TC-3第八届会议概况及从会议看到的发展动向
..... 施昌彦 写(3)

测力与称重技术述评

1. 称重技术的最新动向
..... 匈牙利 T. Kemény 等著, 施昌彦 译, 潘子铸 校(25)
2. 应变式力传感器的误差
..... 美国 J. Dorsey 著, 朱鼎铭 译, 潘子铸 校(41)

标准测力机的性能和比对

3. 影响静重砝码的材料质量稳定性的因素
..... 意大利 M. Plassa 等著, 陈贻管 译, 葛楚鑫 校(59)
4. 波兰标准化、计量与质量管理委员会静重式标准
测力机的改进
..... 波兰 A. Morecki 等著, 施昌彦 译, 黄鸿添 校(66)
5. 500千牛静重式标准测力机
..... 波兰 A. Oledzki 著, 孙维民 译, 施昌彦 校(72)
6. 确定液压式标准测力机传递比的一种新方法
..... 西德 M. Peters 著, 施昌彦 译, 林鸿初 校(82)
7. 法国三台250~300千牛标准测力机的互比
..... 法国 M. Dubois 等著,
尚小黔 译, 张克敏 译图, 张克敏 校(89)

力传感器和称重装置的检定

8. 用计算机自动在线控制力传感器的逐级标定
..... 瑞典 R. P. Häggström 著,
王志正 译, 陈友泉 校, 施昌彦 复校(105)

9. 贯彻力和质量传感器试验标准的试验方法

.....西德 R. Liefland 著, 陆志方 译, 施昌彦 校(110)

10. 受检机电秤的试验

..... 西德 M. Kochsiek 等著,
汪桂琛 译, 马彦冰、施昌彦 校(116)

11. 匈牙利车轮负荷秤及车轴负荷秤检定的最新进展

.....匈牙利 G. Kovács 等著, 王志正 译, 施昌彦 校(126)

应变式传感器的性能和结构

12. 应变式受弯测力计的蠕变、滞后及老化

.....瑞典 B. M. Bergqvist 著, 马彦冰 译, 葛楚鑫 校(139)

13. 弹性材料的蠕变及绝热温度效应

.....西德 K. Bethe 等著, 马彦冰 译, 葛楚鑫 校(157)

14. 高精度力传感器的线性误差和加荷误差

.....英国 F. Abdullah 等著,
王健、王志正 译, 施昌彦 译图表, 施昌彦 校(166)

15. 标准测力机之间比对用的精密应变式力传感器的研制

.....民德 M. Dietrich 著, 施昌彦 译, 邢元庆 校(187)

16. 作为传递标准器的简单六分量测力传感器

.....波兰 J. Moskalew 著, 李香生 译, 施昌彦 校(197)

新型称重装置的性能和结构

17. 机电秤的计量性能

.....波兰 J. Bek 等著, 施昌彦 译, 潘子琦 校(205)

18. TRAPPER 地面安装式轨道衡

.....英国 P. G. Widgren 著, 朱鼎铭 译, 施昌彦 校(210)

19. 新型吊车秤

.....瑞典 K. Nordström 著, 朱鼎铭 译, 施昌彦 校(219)

电子秤的应用

20. 对运行中的卡车和铁路货车的称重

.....瑞典 L. Strömbäck 著, 朱鼎铭 译, 施昌彦 校(231)

21. 用于铁路维护工作的基于微处理机的电子秤

..... 匈牙利 L. Mallár 等著, 朱鼎铭 译, 施昌彦 校(240)

测力仪器的应用

22. 承受若干个力和力矩分量的应变式力传感器的实例

..... 瑞典 K. Fristedt 著, 施汉谦 译, 朱鼎铭 校(249)

23. 摩擦力的测量

..... 波兰 W. Walczak 等著, 陈工 译, 王志正、周学铭 校(261)

动态条件下的测力与称重方法

24. 应用微处理机的动态称重方法

..... 日本 T. Ono(小野敏郎)著, 陈贻管 译, 朱鼎铭 校(271)

25. 利用计算机分析动态力测量用的压电式传感器的灵敏度

..... 南斯拉夫 J. H. Gacaferi 等著,

施汉谦 译, 施昌彦 校(283)

附 录

IMEKO/TC-3 历届会议的讨论主题及概况

..... 施昌彦 写(291)

综 述

IMEKO/TC-3第八届会议概况及 从会议看到的发展动向

施 昌 彦

1. IMEKO/TC-3 第八届会议概况

(1) 大会概况

国际计量联合会(IMEKO)力与质量计量技术委员会(TC-3)第八届会议于1980年9月9日至11日在波兰的克拉科夫(Kraków)召开。

这次会议的主题是称重计量,包括称重与测力传感器的性能、结构及检定方法,称重装置的性能、结构及检定方法,标准测力机的性能改进和比对,电子秤与测力计的应用,动态测量等方面的专题论文和专业讨论。

会议由荷兰全国应用科学研究院计量中心的科学家、TC-3主席 H. Wieringa 主持,由波兰计量与自动化委员会、工程学会联合会等具体组织。参加会议的除了美国、苏联、中国、日本、英国、法国、西德、东德、瑞典、意大利、丹麦、荷兰、比利时、波兰、捷克、匈牙利、南斯拉夫这17个成员国中的16个外(比利时没有派人),还有奥地利、保加利亚、罗马尼亚、芬兰和瑞士,共计21个国家。外国代表99名,波兰本国代表若干人。

会议分两组同时进行,在12个单元的报告会中共计发表论文48篇(波兰占11篇),是历届会议中数量最多的一次。我国发表了王志正、金世增、邹家祥、唐俊武合写的《剪辐型力传感器应力和应变的分析》一文*。

除了本书选译的25篇外,尚有以下各篇:

* 详见《北京钢铁学院学报》1980年第3期。

快速而精确测定实验室砝码密度的方法(美国 R.M.Schoonover 等著)；

根据比重计原理用固体作为标准来测定液体与固体密度的方法(南斯拉夫 D.Prokic 著)；

当静重砝码密度未知时关于空气浮力的实验修正方法(波兰 J.W.Szamotoulski 著, 摘要)；

在不同维护环境中制造砝码用的材料的稳定性(意大利 W.Bich 等著)；

工业秤静态标定用的标准测量装置(民德 R.Hahnewald 等著)；

当温度周期变化时电阻应变式力传感器零点输出的动态性能(罗马尼亚 T.Schulz 著)；

具有三个弹性支承和一个位移控制传感器的顶盘弹性天平(西德 Th.Gast 等著)；

测定质量用的线性机械链(保加利亚 B.P.Troyanov 著)；

测定净重变化量用的精密吊车秤的研制(日本 T.Akuta 芥田友彦著)；

大负荷净重型配料秤的新种类(匈牙利 S.Gallyas 等著, 摘要)；

近代力值与质量计量在医学上的应用(匈牙利 J.Markos 等著)；

借助于微处理机实现匈牙利装料工业的自动化(匈牙利 K.Rapp 等著)；

玻璃厂中基于微处理机的称重系统(匈牙利 A.Meskó 等著)；

基于微处理机而具有湿度修正的配料系统(匈牙利 J.Markos 等著)；

自动装煤系统(波兰 M.Mierzwinski 等著)；

对重量随机变化的预包装物品实现自动打标签(西德 H.D.Schulz-Methke 著)；

捕捞装置试验过程中的分力测量系统(波兰 A.Czajkowski

等著)；

在试验台上内燃机发动力矩的测定(匈牙利 I. Ballon 著, 摘要)；

应变式整体型测力板系统的动态性能(波兰 M. Piatkowski 著)；

用石英晶体传感器测量力值(民德 E. Nier 著, 摘要)；

用空气运载煤粉的固体质量流量计(波兰 Cz. Graczyk 等著)；

在土豆联合收割机上作物的动态称重(波兰 M. Bartnik 著)。

在报告会期间, 还插入一个题为“测力与称重传感器的通用特性和差异”的讨论会, 目的是搜集各 IMEKO 成员国对力传感器标准化问题的意见, 引起了代表们对力传感器评定方法的关注。

目前国际法制计量组织(OIML)正在通过其下属的PS7/RS8 工作小组, 制定一个关于力传感器的国际性推荐标准。由于这个提议中的推荐标准对于测力传感器和称重传感器均适用, 所以想通过这个讨论会来说明这两种类型力传感器的通用特性及其差异。

A. Bray 从物理学的观点阐述了力和质量这两个量之间的差异。法国国家航空空间研究院的 M. Dubois 说明了这两种传感器结构上的差异、机械上的互作用以及热效应。西德联邦技术物理研究院的 M. Peters 说明了在检定方面的不同。最后, 民德计量、标准及产品检验局的 K. Hasche 从误差方面比较了这两种传感器的异同点。

(2) 成员国会议概况

其间由 TC-3 主席 H. Wieringa 主持召开了技术委员会成员国的工作会议, 笔者代表我国成员蔡正平同志出席了该会, 讨论的要点可归纳为:

a. IMEKO 总务委员会(GC)已定于1982年5月在西柏林召开 IMEKO 第九届大会, TC-3 将在此次大会期间举办一个圆桌讨论会, 论题是“有关电阻应变式测力传感器作为传递标准器的使

用问题和生产问题”。

b. 下一届TC-3专业会议预计于1983至1984年间在法国或日本召开，其具体时间和内容在西柏林会上再研究。

c. TC-3主席报告了1979年5月25~30日在美国波士顿召开的“国际实验力学会议”的情况，该会由实验应力分析学会主办，TC-3参与合作。主席认为会议开得很活跃，TC-3成员中有6篇文章在那里发表，今后准备加强与实验应力分析学会之间的合作。

d. 认为1979年在英国布莱顿(Brighton)举办的“第一届国际工业称重与测力展览会(Weigtech'79)”是有成效的，有23个国家参加了展览会。在展览会期间召开了“称重与测力会议”并出版了会议录，为了解这一领域的新动向提供了好机会。预定于1981年1月初在西德的韦斯巴登(Weisbadan)举办第二届国际展览会(Weigtech'81)并召开类似的学术讨论会，原打算与TC-3合作举办，但鉴于IMEKO是科学性质的学术组织以及由于英国与西德间观点不同而未予同意(该展览会因此而未如期办成)。

2. 从会议看到的发展动向

从这次会议所看到的测力与称重技术的发展动向，可归纳为七个方面。

(1) 称重装置向电子化方向过渡，其应用范围不断扩大

a. 六十年代末、七十年代初工业的发展要求使用电子式的轨道衡，于是同近代技术相适应的力传感器(loadcell, “负荷传感器”或“力传感器”，也可以是“称重传感器”，视应用场合而异；最近有人用weighcell来专指称重传感器)就倍受重视并投入使用。但当时力传感器有很多缺点(如侧向灵敏度、温漂等)，使秤的精度受到很大限制；后来出现了突破，剪切梁型传感器研制成功，不仅抗侧向性能好，而且具有可控的、可重复的温度特征，这对工业秤的设计产生了很大的影响。

传统的机械秤正在被日益增多的机电秤和电子秤所补充和替

代，称重设备的量限可由毫克级直到 500 吨（铸钢钢包称重），它已由单纯的商业、贸易用途而发展到生产过程控制或工艺流程控制的重要元件。利用电子秤而实现的工业自动称重的最主要优点是：消除了人为误差，节省了时间，改善了操作条件，特别是能在充满尘埃或有害环境中进行操作而无损于人体健康。

例如，瑞典 Telub 公司制造了矿井下使用的铁路斗车动态秤，在车速为 20 公里/小时时具有 150 吨 \pm 100 公斤的称重精度。模数转换器以逐级逼近的方式工作，能快速给出结果，左右轨两秤的信号转换只占用 20 微秒，每通道积分时间为 15 微秒。该公司还制造由七台秤组成的总长 50 余米的斗车加料全自动称重系统，每台秤长 8 米（台长 6 米），由四个力传感器支承。前六台用于加料控制，第七台用于称重记录。对每节斗车（车厢）的加料分成三个步骤：第一步加 60 吨，第二步加到 95 吨，第三步精确加到 100 吨 \pm 100 公斤。有六个料斗以此方式一前一后地同时工作。当斗车通过第七个秤时就自动记录下所称得的总重量，并会从内存中自动去皮而获得净重。车速可达 8 公里/小时，精度满足国际法制计量组织第三级的要求，由瑞典当局每年检定一次。

该公司制造的汽车衡（秤台为 2.5×3 米）用三只力传感器支承，以便获得低成本的静态稳定系统。车速为 5 公里/小时，该秤无人管理，利用微处理机作出重量分析，司机可自动取得一张关于总重和净重的卡片。

b. 电子秤的应用范围还扩展到公路保护。最近全世界都在关注公路运输量的增长比例，显然在建设新公路的同时，保护现有公路也是同样重要的。

拿匈牙利来说，按吨-公里数计的运输量十年内增加 3.2 倍，而新公路仅增加 38%。为了防止路面的损坏，他们在道路上设置车轮秤或车轴秤来检查载重车辆的负荷量。对于申报的超重车辆要付超重费，对于未经批准而超重行驶，则要罚款十倍。按部长会议颁布的“公路超重车辆交通管制法”，现场的车轴秤和车轮秤须经计量部门根据 HSZ11-78 号暂行规程进行检定。为此国家计

量局研究了一种非实重(无砝码)的检定装置(精度为 1×10^{-3}),利用机械加压螺旋或液压千斤顶,将标准传感器与车辆秤串联起来进行周期检定,第一次隔半年,若合格就每隔一年检定一次。每年要检定 18 台装在过境站的轴负荷秤和 240 台便携式车轮负荷秤。

c. 测力设备的量限可达数千吨力。自从钢铁工业首先应用力传感器作为过程控制元件以来,目前其它工业很多也纷纷利用了力传感器的诱人性能,它实际上已成为工艺流程中不可缺少的一种控制装置,对产品质量和生产效率的提高、对能源的节约作出了显著的贡献。当然这在十年前是不可能的,因为当时力传感器的精度还不高,而目前使用的力传感器的综合误差(包括非线性、滞后、热效应和蠕变)可达 0.02%,使用这种传感器的测量装置可具 0.03% 的最大误差。力传感器的这种性能,使得系统工程师能从新的观点来解决传统的难题。至于微小力值测量仪器的应用,则已经扩展到生物界与医学界。

顺便指出的是,实验室天平也由经典的双盘等臂天平向单盘替换天平、又向电子天平的方向演化,现代电子天平利用磁场中电流所产生的力来平衡作用于被称质量的重力。自 1971 年出现第一台无梁天平后,发展很快,最近装入微处理机的电子天平已具有多种用途,例如称活的动物、以多种单位制表示重量等等。

(2) 力传感器与微处理机的结合酝酿着一场重大的变革,微处理机在秤中的应用愈来愈广

a. 由于现代秤已由杠杆、刀刃的机械测量系统进入到传感器、电子学、微处理机和计算机的领域,所以对传感元件的性能要求愈来愈高。目前已认清有两个基本的却又相互矛盾的研制传感器的方向:第一个方向是通过精益求精的机械设计和令人厌倦的补偿技术(目前我国正在下苦功夫)来改善传感器的性能参数,直到它们满足国际法制计量组织或其它标准的要求;第二个方向是利用计算技术来处理传感器在补偿和调整中许多困难而花

钱的工作，所获得的结果甚至比调整传感器本身还要好，由于微处理机可以用数学上任何可定义的函数来修正传感器的输出，这就使它有能力和目前附加于传感器的、只是近似逼近的修正网络。

应当说明的是，当前称重方面最好的力传感器仍是按照第一个方向制造出来的，但是可以预见第二个方向更有生气。

b. 微处理机自七十年代中期以来，已从研制阶段、实用化阶段而进入大量普及阶段，由于体积缩小、容量增大、价格下跌、接口灵活、适应性广、能实时处理各种测量数据，它已逐渐作为称重装置的一个构成部分，使称重与数据处理、称重与过程控制合并到一个电子单元中，从而促使称重与测力系统向小型化、积木化、数字化、灵巧化和标准化的方向变革，大大提高了效率。

例如，匈牙利 Metripod 衡器厂与计量仪表研究所于1979年制成基于微处理机的机车电子秤，效率比原来提高一倍。此秤的每个秤桥由四只5吨传感器支承，可称重15吨，共用成对的八个秤桥，总称量为120吨。在这次会议上，许多国家（如英国、西德、瑞典、匈牙利、波兰、日本等）的论文中均涉及了微处理机的应用。

有人认为，称重方面的最新技术突破就是微处理机的应用，称重装置有变为电子仪器的倾向，它可以适应几乎各种材料处理和过程控制的需要。这是因为微处理机中的工作内容是由写入存储器中的程序决定的，因而可以根据各种需要来改变程序，这就是使硬件走向软件化。从发展趋势来看，称重装置采用微处理机后，硬件方面的类似性增强了，设计的重点会转移到软件上来，即可以从软件上下功夫，找出特征，形成设计思想，来改进产品。

c. 应用微处理机后可对动态称重、动态力参数进行实时分析，如数字滤波、快速傅氏分析、机械阻抗分析等。

日本大阪府立大学的工程学院，利用微处理机来解决缩短称重时间的动态补偿问题，改进了一般机电秤的动态性能。如果秤的瞬时性能可用与重量有关的线性微分方程表示，就可用卡尔曼

滤波理论来进行线性动态补偿；但是实际上并非线性（尤其当重量较大时）。事实上一台秤可看成是以传感器为主要元件的观测器以及实现动态补偿的估算器所组成，而观测器的动态特性可以用微分方程表示，也可以用积分方程表示。当用后者时则与重量无关，并发现速度型算法的瞬态响应较好。应用微处理机的动态称重方法，使机电秤的称重时间降为0.2秒，这相当于秤自然周期的70%。

总之，力传感器与微处理机的结合提供了美好的前景，有可能使测力与称重系统实现智能化，酝酿着一场重大的变革即将来临。

(3) 不仅要求有基本的计量性能，对可靠性和商品价值也提出了新的要求

对计量仪器的要求可以认为经历了三个阶段。

a. 第一阶段，要求仪器具有基本的计量性能，主要指测力仪器或称重装置的测量范围、精确度、灵敏度、线性、滞后、示值重复性、分辨力以及反应速度或响应时间等。这一点是理所当然的，已为人们所熟知。

b. 第二阶段，要求仪器具有优良的可靠性与长期稳定性，特别是当测力与称重传感器用于生产过程的控制元件时更要求它的环境适应性强、可靠性高、故障率低，这主要是指力传感器承受一定循环负荷后的疲劳性能，经受长期时间考验而变化甚小的老化因素，环境温度、湿度、压力等的影响（气候因素），外界电磁场或电磁辐射的干扰（电磁因素），盐水、化学腐蚀性气体、核辐射等的影响（特殊介质因素），以及承受超荷的性能、承受侧向非正常负荷的性能、承受三向冲击的性能等等。

例如，西德对于申请样机批准的新型称重装置，要求对零件可能的耐磨性、老化及对干扰的敏感性进行试验和计算，这就是说称重的计量性能要不受“磁场、静电力、振动、气候条件、机械磨损等”干扰量的影响，也即要保证秤在电磁干扰下的示值的正确性、与长期影响因素有关的稳定性、与电子器件工作故障有