

IMEKO



10th
International
Conference of
the IMEKO
Technical Committee
TC-3 on
Measurement of
Force and Mass

电子称重技术与测力计量的最新进展

—第十届国际计量技术联合会
力与质量计量会议论文选



中国计量出版社

电子称重技术与测力计量的最新进展

——第十届国际计量技术联合会

力与质量计量会议论文选

蔡正平 邹炳易 施昌彦 等译

中国计量出版社

内 容 提 要

本书选译了1984年9月在日本神户召开的第十届国际计量技术联合会 (IMEKO) 力与质量计量 (TC-3) 会议上发表的论文36篇。这些论文着重反映了当前国际上电子称重技术与测力计量的最新进展与动向。内容分为: 专题报告, 测力计和传感器, 称重技术——现状和未来, 力标准的实现, 用于质量比对的质量标准与装置, 测力的应用, 称重的应用, 标准测力机, 试验机及先进的称重仪器等十个方面, 并将未选译的30篇论文题目及摘要译出作为附录, 以便读者了解全貌。本届论文的特点是内容新、范围广、实用性强, 它对我国在称重技术与测力计量中的研究和开发, 具有一定的参考价值。

本书可供从事力、负荷传感器、各种电子秤、电子天平与新型先进的称重仪器、各种标准测力机等的研究、设计、制造及使用的科技人员阅读; 对于从事力学计量及测试的科技人员尤为需要; 此外还可供从事钢铁厂、公路中称重研究的科技人员及有关大专院校师生和研究生参考。

RECENT ADVANCES IN WEIGHING TECHNOLOGY AND

FORCE MEASUREMENT

10th International Conference of the IMEKO
Technical Committee TC-3 on Measurement
of Force and Mass

Kobe, Japan, September 11—14, 1984

电子称重技术与测力计量的最新进展

——第十届国际计量技术联合会 力与质量计量会议论文选

蔡正平 邹炳易 施昌彦 等译

中国计量出版社出版

(北京和平里11区7号)

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16

印张 18 3/4

字数 460 千字

印数 1—7000

1986年11月第一版

1986年11月第一次印刷

统一书号 15210·607

定价 4.30 元

前 言

1984年9月下旬,我刚从日本神户回来,很多同志就急于要第十届 IMEKO TC-3 论文集,因为这本文集,集中反映了称重技术和测力计量的最新进展。

从称重技术来看,发展非常迅速,这是由于:(1)微电子学的进展,使用于传感器的电信号处理仪表及显示仪表获得很快的进展,从1960年到1980年的20年中,其最高准确度已由0.05%提高到0.0005%,即提高了二个数量级。(2)传感器本身的进展,使准确度大大提高,成本反而下降。高精度传感器的准确度已达 2×10^{-5} ,至于用于国际之间力值比对的超高精度传感器,则可达 10^{-6} 数量级的准确度。目前,传感器尽管仍以电阻应变式为主,从外观看,尽管没有多大变化,但在改进箔式应变计、补偿回路、弹性体材料、热处理方法、蠕变补偿方面以及加工方面,却进行了大量细致的工作;有限单元法的应用,有助于找出应变计粘贴的最佳位置,从而便于获得最大输出信号,因此使传感器的准确度大大提高。由于对应变计进行有效的稳定化处理和对弹性体能做到细致地消除残余应力,从而使传感器的长期稳定性大大改善,可以做到使用几年,准确度仍维持不变。另外由于传感器系列产品的产量增加,除了密封型传感器外,开放型传感器也大量使用。采用了新的材料和新的工艺及生产自动化等措施,使传感器的成本不断下降。例如近年来,弹性体的加工,国外已广泛采用由计算机控制的、带集成处理系统的“易适应”机床。这类机床具有10~30种不同刀具,可使形状复杂的整体式弹性体,在机床上一次加工成型。这样不仅效率高、加工费下降,而且机械公差减少,使制成的传感器具有更为一致的电信号数据。此外,对传感器进行性能试验的测试设备,已朝自动的、程序控制的、多个传感器同时试验的、多参数的方向发展,也朝抽样试验方向发展。抽样试验的前提是:通过使由原材料、应变计及粘接剂所组成的综合系统,具有可重复性。上述这些因素,使传感器获得迅速进展。(3)近代计算机的发展,不仅为传感器的改进作出了进一步的贡献,而且为衡器工业带来崭新的面貌。例如由于应用了单芯片微处理器和常规设计的集成电路,减小体积和能耗的可能性正在增长;对负荷传感器来说,费钱的调整工作和温度补偿程序,正在向电子部分的功能转移;由于微处理器既能对内部电路、也能对外接单元进行检查,故对带检定标记的衡器的计量保证正在加强。这样,错误的称重概率就越来越小;在显示方面,阴极射线管的使用,越来越普及,这是因为阴极射线管能向用户提供数据、图表、说明和信息等程序的编制可以变动的一种“弹性”系统;在打印方面,常用点阵印字式和热敏印字式两种打印机,字母记录主要由前者产生,而票据和包含条码的标签则通常用后者打出。

由于上述三方面的发展,已使衡器工业成了计量领域中领先的工业分支之一。电子秤与计算机相结合,已经使它的功能大大发展,其应用范围也大大扩展。举例来说:(1)过去衡器一直是用来称质量,而现在利用称重方法计数的电子计数秤,正在以显眼的速度持续发展;用于银行点钞票的高档计数秤也正在研究中。(2)可使商业中零售工作全部自动化,即超级市场从进货到向顾客开票,其全过程均由主管办公室的计算机操纵。能使商场网络中的各群秤都与一台主计算机相连,将商品的单价及其它数据存进去,将贸易有关的数据也存

进去,由计算机集中和处理。这对于商场管理来说,好处在于:能在包括出售开票在内的每一个贸易阶段,获得有关库存最佳控制和如何增加劳动生产率的最新信息。(3)在工业上的应用已极为广泛,例如日本神户钢厂建成铁合金称重系统,该系统拥有对所存贮物料的数据处理单元以确保加料数量、加入时间及合金品级。又如对生产线上的工业衡器,要求称量精度高、速度快,随着计算机的迅速发展,产生了一个能同时满足这两个相互矛盾要求的新方法,即通过一套计算机软件来实现,日本已研制成功一台位移和速度检测式质量动态测量装置。(4)在交通运输方面,例如日本已研制成功“动态轴重称重仪”,可对公路运行中的车辆进行高精度称重的“位移积分法”,从而可以得到公路承载条件的指示并强制规定负荷极限。此外,又研制成“紧凑轻巧的车辆称重装置”,这种装置可以防止过份超负荷的车辆在公路上行驶,以免引起环境破坏,公路寿命缩短和交通事故的增加。(5)在医学领域中,已研制成用于分析人体新陈代谢和热调节机能的称重装置,该装置可以获得人体因出汗和因心脏脉动反应而引起体重减少的两种连续曲线。另外,为了研究人在行走时膝盖的生物力学,也研制成功了利用两个六分量测力平台、两台电视摄象机以及计算机评定法来研究膝关节的情况。该测量系统已成功地用于基础研究、创新研究及临床诊断中。

测力计量方面的进展也是很快的。据不完善的统计,世界上20个国家级计量部门拥有的各种类型的标准测力机,到1978年时为64台,而从1978—1984年,增长了43台,所以五年来增长率约为67%,这43台按工作原理分为:

- 静重式测力机 21 台,最大力值从 500N 到 2MN;
- 液压式测力机 4 台,最大力值从 1MN 到 20MN;
- 杠杆式测力机 10 台,最大力值从 2kN 到 2.4MN;
- 杠杆式兼静重式测力机 3 台,最大力值从 2.45kN 到 2.5MN;
- 组合式测力机 5 台,最大力值从 100kN 到 6MN。

而且标准测力机的准确度均在提高,以适应高精度传感器校准的需要。从理论上说,静重式标准测力机的最高准确度为 1×10^{-5} ; 液压式测力机为 1×10^{-4} ; 杠杆式测力机为 1×10^{-4} ; 组合式测力机为 5×10^{-4} 。

但理论上能达到的准确度与实际上能达到的毕竟有差距。为了使各国标准测力机具有可比性,或找出测力机内在的问题,国际力值比对工作已经进行或正在进行中。供比对用的超高精度的力传感器(包括六分量传感器)也在进一步开发中。比对工作中的寄生效应、旋转效应以及比对程序的研究,均有了进一步的发展。

目前,几乎所有技术领域均在使用力传感器。力的测量范围从几个 N 到几十个 MN。已经研制成功小型应变式力传感器,其测量力从几个 N 到 10^4 N,直径为 4—14mm,高度为 1—20mm,准确度等级为 0.1—0.5; 测量 10N 的小型力传感器体积可小到 $3 \times 10\text{mm}^3$; 弹性元件的厚度可小到 0.05mm。由此可见,在缩小体积方面,获得了很大的进展,这使力传感器的应用范围大大扩展。

力传感器还朝多用途、抗弯、抗振、密封防潮等方向发展,也就是说能在恶劣的环境中应用。随着最近金属对金属焊接密封技术的突破,例如采用激光点焊新技术,以及材料选用的改进,使能经受极端恶劣环境的不锈钢负荷传感器现已问世。此外,传感器也朝多分量方向发展,例如日本使用六分量力传感器,制成了完全由计算机控制的轮胎试验机,这种传感器满足了动态测量所需的高响应,能测出旋转着的轮胎在触地点上受到的反作用力,随着

负荷、滑行角、外倾角等等变化，从而为研究保证高速行驶安全、舒适的高性能轮胎作出贡献。

上面讲到的，只是本论文集集中一部分的内容。本论文集共有 66 篇论文（注：其中 8 篇没有文章，只有题目或摘要，实际只有 58 篇），其内容十分丰富，共分十个方面（注：详见本书“内容提要”）。为了满足广大读者的需要，我们选译了普遍感兴趣的、内容集中在传感器、称重技术及测力机方面的论文共 36 篇。

本书由邹炳易、施昌彦、蔡正平、朱鼎铭、易本忠、马彦冰、李庆忠、潘子铸、林鸿初、王志正、王大充、于渤等 12 位从事该专业的同志进行翻译，由于我们水平有限，对译文中不当之处，请读者指正。

蔡正平

1985 年 5 月

目 录

前言

国际计量技术联合会第三技术委员会 (IMEKO TC-3) 活动简介

(1)

专 题 报 告

1 (0-2)* 小型应变计式力传感器

C. Rohrbach et al. (5)

测力计和传感器

2 (1-1) 直接安装式大秤量负荷传感器的新设计

R. Sommer (17)

3 (1-2) 新型的高精度测力称重用磁弹性传感器

J. O. Nordvall (20)

4 (1-3) 六分量力传感器及其应用

T. Yoshida (26)

5 (1-4) 精密机械谐振器式力传感器

T. Ueda et al. (33)

6 (1-6) 传感器弹性体材料杨氏模量的温度关系

H. Imai et al. (41)

7 (1-7) 应变计式称重传感器蠕变特性的测定

Y. Yamaguchi et al. (45)

8 (2-1) 方环形力传感器中应变计位置影响的分析

G. Barbato et al. (51)

9 (2-2) 具有稳定秤盘的双梁式力传感器秤的静力学和动力学分析

K. Kameoka et al. (58)

10 (2-3) 称重传感器与力传感器之间的差别

J. Paetow (66)

称重技术——现状和未来

11 (3-1) 关于用应变式传感器测量力和质量的评述和展望

F. E. Sennhenn (73)

* 括号内为原书编号。——译者注

- 12 (3-2) 在提高负荷传感器准确度中出现的若干问题
.....M. Kawai (79)
- 13 (3-3) 欧洲称重和测力的最新成果
.....T. Kemény (85)

力标准的实现

- 14 (4-1) 国家计量科学研究机构力值的复现
.....W. W. Weiler (103)
- 15 (4-2) 美国国家标准局测力计量的进展
.....R. A. Mitchell (107)
- 16 (4-3) 国际上 1 MN 以下力值的复现
.....M. Peters (113)

用于质量比对的质量标准与装置

- 17 (5-4) 大质量高精度电子比较仪
.....R. M. Schoonover (121)
- 18 (5-6) 平衡式液体密度计
.....R. M. Schoonover (126)

测力的应用

- 19 (6-6) 用有限单元法 (FEM) 研究轧机力传感器的准确度
.....H. Amano et al. (133)
- 20 (11-1) 用微型计算机测量机械开关的驱动力和电气特性
.....H. Ikeda et al. (139)
- 21 (11-3) 一种用于实时测量道路倾斜角的传感器
.....K. Shimizu et al. (148)

称重的应用

- 22 (7-1) 炼钢厂中铁合金称重系统
.....S. Kawachi et al. (159)
- 23 (7-3) 高精度钢管称重机
.....T. Karaoka et al. (167)
- 24 (8-1) 位移和速度检测式质量动态测量装置
.....T. Ono et al. (174)
- 25 (8-3) 动态轴重称重仪
.....H. Yoshikawa (182)

- 26 (8-4) . 紧凑轻巧的车辆称重装置
.....M. Fujii et al. (187)
- 27 (8-5) 使用应变计的机电型船用秤
.....C. Maeda et al. (195)

标准测力机

- 28 (9-2) . 新研制的复合杠杆式 360kN 标准测力机的结构和性能
.....T. Tojo et al. (205)
- 29 (9-4) . 新研制的 20MN 液压式标准测力机的性能
.....N. Hide et al. (212)
- 30 (9-6) . 测量静重式标准测力机的寄生负荷分量的一种六分量测力计
.....C. Ferrero et al. (221)
- 31 (9-7) . 根据“组合”法设计的 1.65MN 和 4.95MN 力传递标准器
.....H. Wieringa (229)

先进的称重仪器

- 32 (12-1) . 磁悬天平的进展
.....T. Gast (239)
- 33 (12-2) . 测量很小的负荷变化的新装置
.....T. Akuta et al. (249)
- 34 (12-3) . 利用光电图像传感器制造的一种静止点自动读数装置
.....T. Chyo et al. (255)
- 35 (12-5) . 具有最小计数误差的 ECS-LK 系列新型电子计数秤
.....T. Muraoka et al. (265)
- 36 (12-6) 采用混合法的电子分析天平
.....S. Yano et al. (271)

附 录

- 未译论文的目录及摘要
..... (277)
- 第十届国际计量技术联合会力与质量计量 (IMEKO TC-3) 会议纪要
..... (282)

国际计量技术联合会第三技术 委员会 (IMEKO TC-3) 活动简介

国际计量技术联合会(IMEKO)“力与质量计量”技术委员会是在1967年7月波兰华沙召开的第四届IMEKO大会期间提议和建立的。在大会期间,举行了题为“在称重工业中的应变计技术”圆桌讨论会,会议由美国亚利桑那州 Peter Stein 教授和匈牙利布达佩斯 Tamás Kemény 先生主持,与会者决定在力与质量计量领域中继续交流经验。该项建议经IMEKO秘书处讨论后,由IMEKO总务委员会(GC)批准。

因而建立了TC-3“力与质量计量”技术委员会,其任务为:

- 对未发表过的实验结果和实际经验组织专题讨论会;
- 召开不同论题的圆桌讨论会;
- 促进IMEKO成员组织之间的经验交流。

到目前为止,已经举办过下列会议:

1. 1969年在联邦德国不伦瑞克(Braunschweig)“用应变计技术来精密测量力和称重”
2. 1971年在荷兰海牙(The Hague)“测力装置和电子-机械称重机的特性”
3. 1972年在捷克俄斯特拉发(Ostrava)“控制系统中力和质量的测量”
4. 1974年在意大利乌迪内(Udine)“测力装置的最新进展”
5. 1974年在匈牙利塞格德(Szeged)“最新的可检验的称重机械”
6. 1977年在苏联奥得萨(Odessa)“工业称重”
7. 1979年在联邦德国不伦瑞克(Braunschweig)“力与质量计量”
8. 1980年在波兰克拉科夫(Kraków)“称重技术”
9. 1983年在英国伦敦(London)“商业和工业中的称重与测力”

在IMEKO大会期间,TC-3组织了下列的圆桌讨论会:

1973年在民主德国德累斯顿(Dresden)IMEKO第六届大会
“力值向测力装置的传递”

1976年在英国伦敦(London)IMEKO第七届大会
“力与质量计量”

1979年在苏联莫斯科(Moscow)IMEKO第八届大会
“关于测力装置的实际问题”

1982年在联邦德国柏林(Berlin)IMEKO第九届大会
“关于作为传递标准的力传感器的电阻应变计的生产和使用问题”

TC-3已经建立了“力传感器的术语和标定程序”工作组,该组由Anthos Bray教授领导,并与国际法制计量组织(OIML)合作。

TC-3的第一位主席是Kurt Hild博士,现在已经退休。目前由19个国家的力与质量计

量专家担任技术委员会的成员，即：

H. Wieringa (荷兰) ——主席

T. Kemény (匈牙利) ——秘书

A. Brag (意大利)

T. Ono (日本)

M. Dubois (法国)

D. Prokić (南斯拉夫)

A. Gizmajer (波兰)

A. Pusa (芬兰)

R. F. Jenkins (英国)

V. M. Sitnichenko (苏联)

K. Hasche (民主德国)

P. K. Stein (美国)

G. Iordachescu (罗马尼亚)

J. Thomas (丹麦)

Å. Larsson (瑞典)

蔡正平 (中国)

R. A. Mitchell (美国)

J. C. Vanderschueren (比利时)

J. Lukas (捷克斯洛伐克)

W. W. Weiler (联邦德国)

TC-3 第十届会议的计划，由 N. Hida, T. Kemény, I. Morishita, P. K. Stein, H. Wieringa 和 T. Ono 等先生所制订。

它包括下列的圆桌讨论会：

“衡器工业的重要性和发展中国家的经济中称重的作用”，由 Tamás Kemény 博士协调；

“标准测力机的寄生分量”，由 Anthos Bray 教授主持。

预定在 1984 年底或 1985 年初，会议将继续出版，包括圆桌讨论会的报告。

蔡正平 译

专 题 报 告



小型应变计式力传感器

联邦德国材料试验研究院 (BAM) (联邦德国)

C. Rohrbach, J. Lexow

【摘 要】小型应变计式力传感器 (MFT) 直径为几个mm到20mm, 高度为1mm到20mm, 应用于各个技术领域。MFT在计量技术方面的根本问题是弹性元件薄、应变计对弹性元件的影响相当大, 因而增大了测量误差。

通过对弹性元件和MFT的计算及实验, 探讨了温度、相对湿度、几何形状与零漂的关系, 以及蠕变、内外压力、供电电压对测量误差的影响, 并讨论了MFT的特征频率和加速度灵敏度。对各种造型技术和装配技术, 以及某些补偿上述影响的方法作了说明。

当弹性元件厚度小于0.3mm时, 应变计对测量误差影响很大。如果曲率半径小或者曲率半径有变化, 相对湿度应当低而且恒定。文中图了几种MFT。MFT在许多技术领域都用得很成功。

【关键词】小型力传感器、应变计、性质、制造。

1. 引言

现在几乎所有的技术领域都在使用着应变计式力传感器。如果空间很小, 或者被测的力很小, 就可使用小型力传感器 (MFT)。参看图1。一般用于测量10000N力的力传感器, 体积约为 $3 \times 10^5 \text{ mm}^3$ 。而测量10N力的MFT, 体积只有 $3 \times 10^1 \text{ mm}^3$ 。一个可靠的测量系统就挤在这么小的体积里。

我们用一个弯曲梁弹性元件来说明MFT的一些根本性的问题。

弹性元件的厚度可以小到0.05mm, 而应变计的厚度却不变, 如市场售品为0.02mm。

因此, 弹性元件的特性非常依赖于应变计的基底材料。基底是合成树脂的, 如环氧树脂, 其物理性质与温度密切相关。例如其杨氏模量随温度升高而急剧减小, 使MFT的灵敏度增大。再如其蠕变很大, 并且传递影响到弹性元件。温度和湿度的综合变化引起弹性元件变形, 造成MFT零点漂移。

下面来研究上述效应的影响。

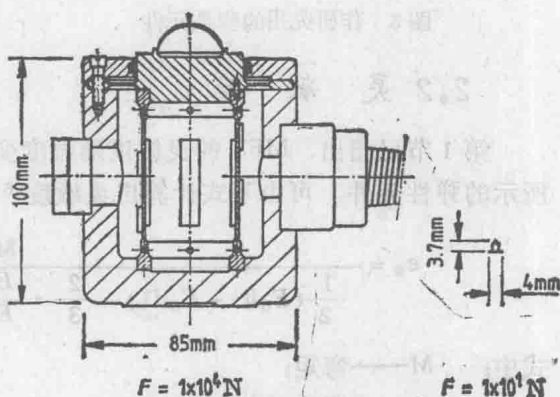


图1 普通的力传感器同MFT的比较

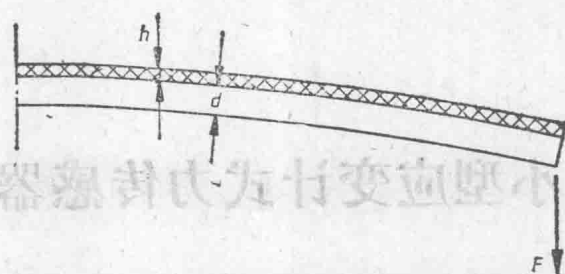


图2 贴有一个应变计的MFT的弯曲弹性元件

2. 特性

2.1 试验的安排

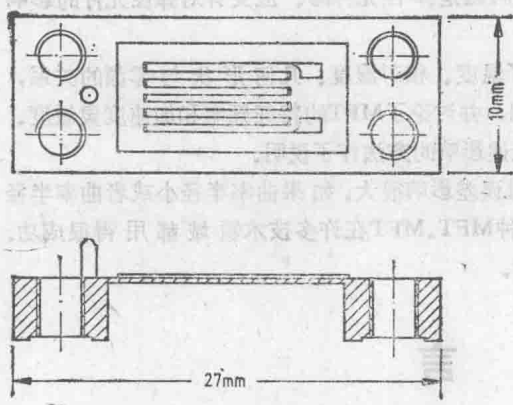


图3 作研究用的弹性元件

2.2 灵敏度

第1节已指出, MFT的灵敏度随温度变化, 因为温度上升时, 杨氏模量下降。对于图3所示的弹性元件, 可由下式计算出灵敏度^[6]:

$$\varepsilon_0 = \frac{M/b}{\frac{1}{2}(E_0 h^2 - E_s d^2) - \frac{2}{3} \cdot \frac{E_0 h^3 + E_s d^3}{E_0 h^2 - E_s d^2} \cdot (E_0 h + E_s d)} \quad (1)$$

式中: M ——弯矩;

b ——弹性元件的宽度;

E_0 ——应变计的杨氏模量;

E_s ——弹性元件的杨氏模量;

h ——应变计的厚度;

d ——弹性元件的厚度。

在弹性元件表面的上方, 高度为 $h \cdot \xi$ ($0 \leq \xi \leq 1$) 处的应变 ε_A 由下式给出:

$$\varepsilon_A = \varepsilon_0 \left(1 - 2 \cdot h \cdot \xi \cdot \frac{E_0 h + E_s d}{E_0 h^2 - E_s d^2} \right) \quad (2)$$

考虑到应变计不是完全地覆盖弹性元件，而且应变计是栅状的，估计 ξ 为0.5。

以灵敏度为温度的函数，图4表示了三个弹性元件的灵敏度计算值与温度的关系曲线。这三个弹性元件，一个是17-4PH钢的，另两个都是CuBe²铜合金的，但厚度不同。17-4PH钢在20℃时的杨氏模量为 $20.9 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ （根据冶炼厂的说明），CuBe²则为 $11.1 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ [7]。

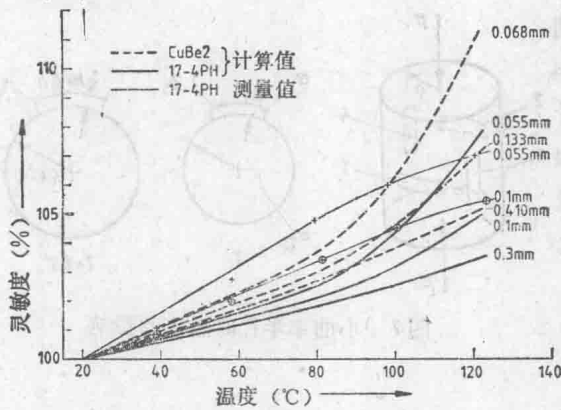


图4 弯曲弹性元件的灵敏度温度变化

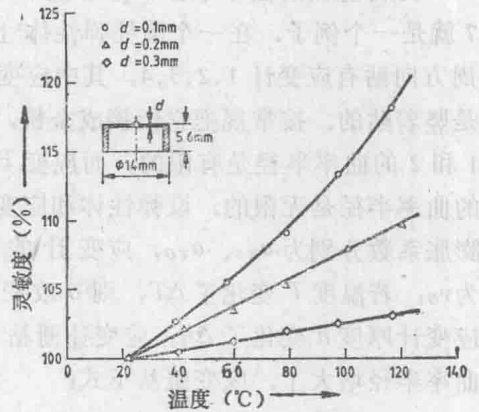


图5 MFT的灵敏度温度变化

杨氏模量的变化率叙述如下，钢： $-21 \times 10^{-5}/\text{K}$ ，CuBe²： $-35 \times 10^{-5}/\text{K}$ ，基底：在20—60℃内为 $-0.20\%/K$ 。基底在20℃时的杨氏模量为 $0.37 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ，而80、100、120℃时则分别为20℃时的86%，66%，26% [8]。CuBe²弹性元件的厚度经过了选择，使其20℃时的灵敏度同钢弹性元件20℃时的灵敏度一样。由于铜合金杨氏模量较小，自然地，CuBe²弹性元件要比钢弹性元件厚些。从图4可以看出，17-4PH弹性元件灵敏度对温度的依赖性小于CuBe²弹性元件，尽管后者还厚一些。不过制造薄的弹性元件时仍可选用CuBe²，因为CuBe²弹性元件在制造过程中，厚度的相对误差能够控制得较小（参看3.2节）。

0.05mm和0.1mm厚的弹性元件，测量值同计算值是相符的。不过要记得，计算值来自于简化了的假设，例如没考虑应变栅所起的增强作用。

图5示出了一个MFT的简化横截面，以及三种厚度(d)弹性元件的灵敏度温度曲线。试验中还用了另外形状的应变计，但试验结果的趋势仍然与图4一致。从这些结果看，MFT在高温时偏差相当大。但是我们可以用热敏电阻进行补偿。

2.3 蠕变

蠕变^[1]主要取决于基底材料、应变栅材料和栅的形状。我们研究了图5所示的MFT在卸荷后的蠕变。这个MFT的两个应变计的有效栅长只有0.46mm，而图3的应变计有效栅长为6.2mm。试验结果示于图6。卸荷后发生了蠕变，因为弹性元件受到了蠕变着的基底和应变计胶的作用。 $d=0.3\text{mm}$ 时的蠕变小，这大概是因为应变计栅有恢复蠕变的作用。 $d=0.2\text{mm}$ 时蠕变开始增加， $d \leq 0.1\text{mm}$ 时蠕变就

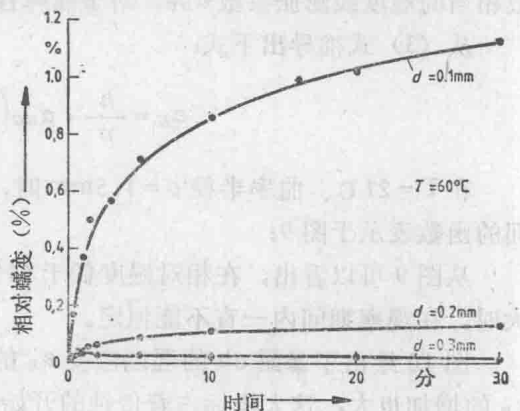


图6 MFT的蠕变

大得不能容许了。对应变计进行特别的设计可以补偿小的蠕变^[2]。

2.4 零漂

2.4.1 小曲率半径时的温度影响

力传感器的曲率半径 ρ 常常很不一致。图 7 就是一个例子。在一个圆柱弹性体上, 沿圆周方向贴有应变计 1, 2, 3, 4, 其中应变计 3 和 4 是竖着贴的。按常规把它们接成全桥。应变计 1 和 2 的曲率半径是有限的, 而应变计 3 和 4 的曲率半径是无限的。设弹性体和应变计的线膨胀系数分别为 α_{TS} 、 α_{TG} , 应变计的泊松比为 ν_G ; 若温度 T 变化了 ΔT , 则 ρ 改变了 $\Delta\rho$, 应变计厚度 h 变化了 Δh , 应变计栅粘贴处的曲率半径增大了。应变服从下式:

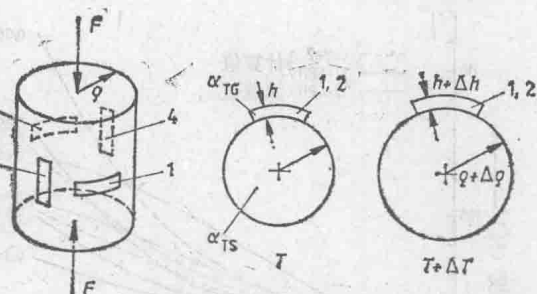


图 7 小曲率半径时温度的影响

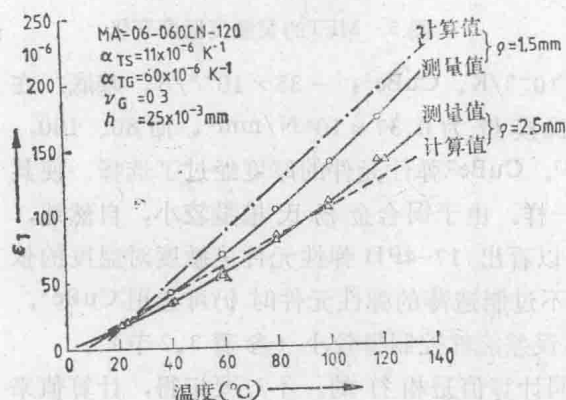


图 8 小曲率半径时的温度影响

$$\varepsilon_T = \frac{h}{\rho} \left(\alpha_{TG} - 2\nu_G \frac{1+\nu_G}{1-\nu_G} \cdot (\alpha_{TG} - \alpha_{TS}) \right) \cdot \Delta T \quad (3)$$

图 7 中的应变计 1 和 2 的曲率半径是有限的, 而 3 和 4 的曲率半径是无限的; 因而 1 和 2 的零漂比 3 和 4 大, 引起全桥失谐。MFT 的曲率半径小到几个 mm, 零点偏差自然相当大。图 8 是一个与图 7 相当的半桥的例子。图中标明的是假设的参数, 由这些参数按式 (3) 算出应变。计算出的应变同测量值是相符的。

2.4.2 小曲率半径时相对湿度的影响

用相对湿度的变化代替温度 T 的变化, 也观察到了图 7 所解释的效应。与温度线膨胀系数相当的湿度线膨胀系数 α_{HG} , 对金属弹性体而言是零, 但是塑料的 α_{HG} 却相当大。

从 (3) 式推导出下式:

$$\varepsilon_H = \frac{h}{\rho} \cdot \alpha_{HG} \left(1 - 2\nu_G \cdot \frac{1+\nu_G}{1-\nu_G^2} \right) \Delta H_R \quad (4)$$

在 $T = 21^\circ\text{C}$ 、曲率半径 $\rho = 1.5\text{mm}$ 时, 各种相对湿度 H_R 下的湿度应变 ε_H , 作为暴露时间的函数表示于图 9。

从图 9 可以看出, 在相对湿度低于 61% 时, ε_H 在几个小时以后就非常恒定了。湿度较大时, 在观察期间内一直不能恒定。

图 10 绘出了暴露 6h 的湿度应变 ε_H 的曲线。从图中看出, α_{HG} 不是常数。相对湿度大, ε_H 的增加也大, 这大概标志着侵蚀的开始。我们在使用 MFT 时, 必须注意使相对湿度保持在小的恒定值。