

面向 **21** 世纪

高等学校系列教材

测试与计量技术基础

周渭 于建国 刘海霞 编著

XDUP



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪高等学校系列教材

测试与计量技术基础

周 渭 于建国 刘海霞 编著

西安电子科技大学出版社

2004

内 容 简 介

本书系统地介绍了测试与计量技术的理论和基础知识。全书共分 11 章, 主要内容包括: 计量; 量和基本计量单位; 计量误差与数据处理; 计量器具; 测试与计量方法; 量值传递与检定测试; 基本物理常数; 各种物理量的测试方法, 包括几何量计量、温度计量、力学计量、光学计量、声学计量、化学计量、电磁计量、电子计量、时间频率计量以及电离辐射计量; 计量管理等。

本书内容广泛, 注重对学生基本测量方法和能力的培养, 以使他们在掌握共性知识的基础上解决更广泛的检测问题。

本书适合作为仪器科学与技术、电子科学与技术等学科的本科生和硕士生的教材或教学参考书, 对于从事电子工程的技术人员也是一本有价值的参考书。根据教学要求, 可以适当调整部分内容。

* 本书配有电子教案, 需要者可与西安电子科技大学出版社联系, 免费索取。

图书在版编目(CIP)数据

测试与计量技术基础/周渭等编著.

—西安: 西安电子科技大学出版社, 2004 4

(面向 21 世纪高等学校系列教材)

ISBN 7-5606-1368-3

I. 测… II. 周… III. ①测试技术-高等学校-教材 ②计量学-高等学校-教材 IV TB9

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 013509 号

责任编辑 王素娟 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com

E mail. xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西画报社印刷厂

版 次 2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 17.125

字 数 405 千字

印 数 1~4000 册

定 价 19.00 元

ISBN 7-5606-1368-3/TN·0262(课)

XDUP 1639001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

前 言

本书是按照原电子工业部的《1996~2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由电子仪器与检测技术专业教学指导委员会编审、推荐出版的。本书由西安电子科技大学周渭教授担任主编，杨吉祥担任主审和责任编委。

本书参考学时为60~80学时。主要内容包括：计量；量和基本计量单位；计量误差与数据处理；计量器具；测试与计量方法；量值传递与检定测试；基本物理常数；各种物理量的测试方法；计量管理等。本书涵盖了计量学所涉及的大部分领域，包括几何量计量、温度计量、力学计量、光学计量、声学计量、化学计量、电磁计量、电子计量、时间频率计量以及电离辐射计量等领域。

本书在广泛介绍计量学各方面内容和知识的基础上，注重对学生基本能力的培养及各种量在测试计量技术中共性知识的系统教学。因此它不但能够拓宽学生的知识面，使他们能够举一反三，而且能使学生适应多方面的工作并更好地在工作中发挥各自的特长。计量学及适合大专院校教学的测试计量技术有着相当广的应用范围，可用于电子技术、通讯、邮电、导航、工业生产、国防建设及各种科研活动中，因此，不仅是从事本专业人员应该掌握的，也希望从事工科专业学习的学生能够掌握这方面的知识。

本书由周渭主编并编写了第1、2、5、6章以及8.1节的内容，于建国负责全书的统稿，刘海霞负责编写了第3、4、7、9、10、11章以及8.2节、8.3节的内容和各章的习题。本书从与本专业更宽知识面的联系出发，较多地参考了王立吉所著的《计量学基础》和鲁绍曾主编的《现代计量学概论》，在此，特向两位前辈致谢。

由于编者水平有限，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者
2004年3月

目 录

第 1 章 概论	1	3.1.6 微小误差准则	53
1.1 计量学及其分类	1	3.1.7 计量结果的精密度、正确度和准确度	55
1.2 计量学的发展	2	3.1.8 测量不确定度	55
1.3 计量的特点、作用与意义	3	3.2 数据处理	56
1.3.1 计量的特点	3	3.2.1 有效数字	56
1.3.2 计量的作用与意义	3	3.2.2 粗大误差处理	61
1.4 近年来仪器与测量技术的发展	7	3.2.3 计量所得结果的简单处理	71
1.4.1 测量技术与仪器的技术内涵及发展重点	7	3.2.4 最小二乘法	77
1.4.2 近年来传感器技术的发展	9	习题	88
1.4.3 IEEE 1451 智能转换器接口标准简介	11	第 4 章 计量器具	93
1.4.4 在测量和仪器中的信号处理技术	12	4.1 计量器具及其分类	93
1.5 学习方法	13	4.1.1 计量基准	94
第 2 章 量和单位制	14	4.1.2 计量标准	96
2.1 量	14	4.1.3 工作用计量器具	96
2.1.1 量的种类	14	4.2 计量器具的主要特征	96
2.1.2 量值的概念	15	4.2.1 有关工作范围的特性	97
2.2 单位和单位制	15	4.2.2 有关响应方面的特性	97
2.2.1 单位的概念	15	4.2.3 有关性能方面的特性	98
2.2.2 基本单位和导出单位	16	4.2.4 有关准确度方面的特性	98
2.2.3 倍数单位和分数单位	17	4.3 计量器具的结构和组成	99
2.2.4 量纲	17	4.3.1 计量器具的总体构成及其计量链	99
2.3 国际单位制及其使用方法	18	4.3.2 计量器具的输入部分	100
2.3.1 国际单位制的特点	18	4.3.3 计量器具的中间变换部分	101
2.3.2 国际单位制的构成	18	4.3.4 计量器具的输出部分	101
2.3.3 国际单位制的使用	26	4.3.5 计量器具的智能化	103
2.4 我国的法定计量单位	27	习题	103
习题	28	第 5 章 测试与计量方法	105
第 3 章 计量误差与数据处理	29	5.1 测试计量方法及其分类	105
3.1 计量误差	29	5.2 直接计量法和间接计量法	106
3.1.1 计量误差的定义	29	5.3 基本计量法和定义计量法	108
3.1.2 计量误差的表示方法	30	5.4 直接比较计量法和替代计量法	108
3.1.3 计量误差的分类	33	5.5 微差计量法和符合计量法	111
3.1.4 间接测量的误差	49	5.6 补偿计量法和调换计量法	115
3.1.5 计量误差的合成	52	5.7 中介源测试计量法	116
		5.8 静态计量和动态计量	120

5.9 其他计量方法	121	8.3 电子计量测试	175
5.10 通过被测量的重建进行测量的 方法	121	8.3.1 概述	175
习题	122	8.3.2 电子计量的主要内容	176
第6章 量值传递与检定测试	123	习题	192
6.1 概述	123	第9章 各种物理量的测试计量(中)	195
6.1.1 量值传递的概念	123	9.1 几何量计量	195
6.1.2 量值传递与保证量值准确 一致的基础	123	9.1.1 几何量计量技术的发展概况	195
6.2 检定测试	124	9.1.2 几何量计量的基本原则	196
6.2.1 计量检定规程	124	9.1.3 几何量计量标准器	197
6.2.2 检定测试的基本条件	125	9.1.4 几何量量具和计量仪器	201
6.2.3 检定测试的主要方法	126	9.1.5 长度尺寸的计量	203
6.2.4 检定测试中器具合格的判断	126	9.1.6 角度和锥度的计量	203
习题	128	9.1.7 形状和位置误差的计量	204
第7章 基本物理常数	130	9.1.8 表面粗糙度的计量	206
7.1 宏观物理常数	130	9.1.9 螺纹的计量	206
7.1.1 牛顿引力常数 G	130	9.1.10 齿轮的计量	207
7.1.2 阿伏加德罗常数 N_A 、摩尔气体 常数 R 和摩尔体积 V_m	131	9.2 温度计量	207
7.1.3 真空中的光速 c 、磁常数 μ_0 、电常 数 ϵ_0 和真空中的特征阻抗 Z_0	131	9.2.1 温度的概念	207
7.1.4 法拉第常数 F	132	9.2.2 温标	208
7.2 微观物理常数	133	9.2.3 常用温度计	209
7.2.1 普朗克常数 h	133	9.2.4 温度计量	214
7.2.2 基本电荷	133	9.3 力学计量	215
7.2.3 微观粒子的静止质量	133	9.3.1 质量计量	216
7.2.4 里德伯常数 R_∞	134	9.3.2 容量计量	219
习题	135	9.3.3 密度计量	220
第8章 各种物理量的测试计量(上)	136	9.3.4 力值计量	222
8.1 时间频率计量测试	136	9.3.5 硬度计量	223
8.1.1 基本概念	136	9.3.6 压力计量	225
8.1.2 时间频率标准	137	9.3.7 真空计量	226
8.1.3 原子时标	151	9.3.8 流量计量	227
8.1.4 时间频率的计量	152	9.3.9 振动与冲击计量	228
8.1.5 频率稳定度及其计量	155	习题	228
8.1.6 时间频率量值的传递	157	第10章 各种物理量的测试计量(下)	230
8.2 电磁学计量测试	162	10.1 光学计量	230
8.2.1 电学计量单位及标准	162	10.1.1 光度计量	230
8.2.2 直流量计	165	10.1.2 辐射度计量	234
8.2.3 交流计量	168	10.1.3 激光计量	236
8.2.4 磁学计量	172	10.1.4 色度计量	238
		10.2 声学计量	240
		10.2.1 声学计量的基本参量	240
		10.2.2 空气声声压计量	241
		10.2.3 水声计量	243

10.2.4	超声计量	243	11.1	管理的概念	259
10.2.5	听力计量	245	11.1.1	管理的定义	259
10.2.6	噪声计量	245	11.1.2	管理的基本原则	260
10.3	化学计量	247	11.1.3	管理的作用和意义	260
10.3.1	化学计量的基本单位——摩尔	248	11.2	计量管理的基本任务	261
10.3.2	标准物质	248	11.2.1	计量管理的基本任务	261
10.3.3	化学计量的主要项目	249	11.2.2	计量管理体系	261
10.4	电离辐射计量	253	11.3	计量管理的主要方式	262
10.4.1	电离辐射的基本概念	253	11.3.1	计量的行政管理	262
10.4.2	放射性核素活度计量	255	11.3.2	计量的科技管理	262
10.4.3	常用剂量计	257	11.3.3	计量的法制管理	262
	习题	258		习题	264
第 11 章	计量管理	259	参考文献		265

第 1 章 概 论

1.1 计量学及其分类

计量学是关于计量理论与实践的知识领域，是一门综合性的学科，是现代科学的重要组成部分。计量工作在国民经济的发展中起着技术基础保证的作用，它所涉及的专业知识面相当广泛，所影响的领域也相当普遍。随着现代化生产和科学技术的不断发展，计量所包含的内容早就远远超出古老的“度量衡”的范畴，在科技、生产、研究的各个领域发挥着相当重要的作用。

根据国际计量局、国际电工委员会、国际标准化组织及国际法制计量组织制定的《国际通用计量学基本名词》，计量学被定义为“有关计量的知识领域”，它包括“有关计量的所有理论与实践的各个方面，而不论计量的准确度如何以及它在什么科学技术领域内进行”。计量学的具体内容包括：

- 研究计量单位及其基准、标准的建立、复制、保存和使用。要求对相关的物理现象进行持续和深入的研究，以此为基础探讨计量单位及其基准、标准的建立和精度的进一步提高。

- 研究计量方法和计量器具的计量特性。
- 研究计量的不确定度。
- 研究计量人员进行计量的能力。
- 研究计量法制和管理。
- 研究有关计量的一切理论和实际问题。

此外，还有如基本物理常数、标准物质及材料特性等的准确测定等，也是现代计量学研究的重要内容。随着生产和科学技术的发展，计量学的内容会更加丰富。

计量学所涉及的专业范围及其应用面都是相当广泛的。我国目前按计量专业将计量学划分为几何量、温度、力学、电磁学、电子、时间频率、电离辐射、光学、声学、标准物质等 10 大类。每一类中又分若干项。

根据任务的性质，计量学又分为法制计量学、普通计量学、应用计量学、技术计量学、质量计量学和理论计量学。

法制计量学：是研究以立法形式或颁布法制性文件规定计量单位、计量方法和计量不确定度的计量学。如许多国家为了保证公平交易和人民的健康、安全，对商业贸易、医药卫生、环境保护、生产安全等方面的计量器具采取立法的形式实行强制管理，经常进行监督检查和定期检定，以保证计量的准确度。

普通计量学：是研究计量学中带有共同性问题的部分，如单位制的结构和计量单位的换算问题、计量的误差问题以及计量器具的计量学特性问题等。

应用计量学：是研究计量学在特定领域中应用的部分，如天文计量、工业计量、气象计量、海洋计量、医疗计量等。

技术计量学：是涉及工艺过程中测试检验的计量学，常常是指几何量计量。

质量计量学：是有关质量检验问题的计量学，如原料、材料、样品器件和整机设备的质量检验，前者统称材料试验，后者属于例行试验范畴。

理论计量学：是关于计量理论问题的计量学，如关于量和计量单位的理论、计量误差理论、计量信息论等。

国际法制计量组织则根据计量学的应用领域，分为工业计量学、商业计量学、天文计量学、医用计量学等。

1.2 计量学的发展

米制是 18 世纪末由法国创立的一种计量单位制。它以经过巴黎的地球子午线的四千万分之一作为长度单位，定名为“米突”(米)；以米的十分之一长度作为容量单位，定名为“立特”(升)；以一立方分米的纯水在 4℃ 时的重量(质量)作为重量单位，定名为“千克”(公斤)。这种制度是十进制，完全以“米”为基础，因此得名为“米制”。法国政府根据科学家们实地测定敦刻尔克到巴塞罗那之间的地球子午线的弧长和给定体积纯水的重量，制成铂基准米尺和铂基准千克，保存在法国巴黎档案局，并从法律上分别赋予这两个基准以“1 米”和“1 千克”的值。但是不久就发现“档案米”比经过巴黎的子午线弧长的四千万分之一的长度约短 0.2 毫米，而“档案千克”不是准确等于一立方分米的纯水在 4℃ 时的质量。

米制逐渐被许多国家采用。1875 年“米制公约”签定，米制成为国际通用的计量单位制。

米制虽然有许多优点，但是存在局限性。当时规定的计量单位，只涉及生产和商品交换中的一些常用量的单位。仅仅长度、质量、容量等单位远远满足不了物理学和技术科学研究工作的需要。随着生产和科学技术的发展，米制发生了很大的变化，出现了许多单位制，如厘米·克·秒制、米·千克力·秒制、米·吨·秒制等，还出现了一些不属于任何一种单位制的制外专用单位，如“马力”、“毫米汞柱”、“克拉”等。这样一来，单位制的数量便增加了，特别是许多国家还有本国历史上遗留下来的单位制。由于多种单位制在一个国家内并用，互相之间又缺乏科学联系，因此实际应用时不得不进行复杂的换算。这样不仅造成人力、物力和时间上的巨大浪费，而且也严重妨碍了生产和科学技术的发展以及国际经济技术的交流。因此，进一步改进和统一计量单位制，又成为人们十分关心的问题。于是，在国际计量委员会的组织下，科学家们在原有米制的基础上，建立了更为科学、更为简单、更为适用的一种新的单位制，即 1960 年第十一届国际计量大会正式通过的国际单位制。

1.3 计量的特点、作用与意义

1.3.1 计量的特点

概括起来,计量应具有准确性、一致性、溯源性和法制性等基本特点。

1. 准确性

准确性是计量的基本特点,它表征的是计量结果与被计量量的真值的接近程度。只有量值而没有准确程度的结果,不是计量结果。计量不仅应该明确给出被计量量的值,而且还应该给出该量值的误差范围(不确定度),即准确性;否则,量值不会具备明确的实用价值。所谓量值的统一,是指在一定范围内的统一。

2. 一致性

计量单位的统一是量值统一的重要前提。无论在何时、何地,利用何种方法、器具,以及何人进行计量,只要符合有关计量所要求的条件,计量结果就应该在给定的误差范围内一致,否则,计量就失去了其社会意义。计量的一致性,不仅适合于国内,也同样适合于国际。

3. 溯源性

在实际计量工作中,由于目的和条件不同,对计量结果的要求也各不相同。但是,为了使计量结果准确一致,所有的量值都必须由相同的基准(或标准)传递而来。也就是说,任何一个计量结果,都能通过连续的比较链与原始的标准器具联系起来,这就是溯源性。“溯源性”是“准确性”和“一致性”的技术归宗。因为,任何准确、一致都是相对的,是与当时的科技水平和人们的认识能力密切相关的。也就是说,“溯源”可以使计量科技与人们的认识相对统一,从而使计量的“准确”与“一致”得到基本保证。就一国而论,所有的量值都应该能溯源到国家基准(或标准);就国际上而论,则应该溯源到国际基准(或标准)或相应的约定标准。否则,量出多源,不仅无准确一致可言,而且会造成技术上和应用中的混乱,其后果不堪设想。

4. 法制性

计量本身的社会性就要求有一定的法制保障。也就是说,量值的准确统一,不仅要有一定的技术手段,而且还要有相应的法律和行政管理。特别是那些对国计民生有明显影响的计量,更必须有法制保障。否则,量值的统一就不能实现,计量的作用也无法发挥。

严格地说,计量是量值准确统一的测量;计量源于测量,而又严于一般的测量。它们在测量的精度、同时测量参数的多少、测量的范围、测量的速度等方面是有一定差异的。过去,所谓的狭义计量,主要是指计量单位及其基准、标准与量值传递等;现在,广义计量则包括了所有的测量。因而在实际工作或文献资料中,往往没有必要去严格区分“计量”与“测量”。

1.3.2 计量的作用与意义

随着科技的进步、生产的发展,计量的作用和意义已日益明显。下面是计量与不同领

域的联系以及其在不同领域的作用及意义。

1. 计量与科学技术

任何科学技术都是为了探讨、分析、研究、掌握和利用事物的客观规律；而所有事物的基础都是“量”，体现形式仍然是“量”。为了准确地获得量值，只有通过计量。比如，哥白尼关于天体运行的学说，是在伽利略发明了望远镜并进行了实际观测之后才得以确立的；著名的万有引力定律，尽管早已被牛顿所揭示，但直到百年之后，经过实际计量的验证，才被确认；爱因斯坦的相对论也是在频率精密计量的基础上才得到了比较明确的验证，而且其中的许多内容随着检测手段的进步至今还在进一步的验证和探讨。总之，各种定律、定理都是经过实际验证才得以确立或被承认的。计量正是所有验证的技术基础与重要手段。

历史上三次大的技术革命都充分地依靠了计量，同时也促进了计量的发展。以蒸汽机的广泛应用为主要标志的第一次技术革命，导致以机器为主的工厂取代了以手工为基础的作坊，使生产力得以迅速提高，从而确立了资本主义的生产方式。当时，经典力学和热力学是社会科技发展的重要理论基础。在蒸汽机的研究和应用的过程中，都需要对蒸汽压力、热膨胀系数、燃料的燃烧效率、能量的转换等进行大量的计量测试。力学和热工计量就是在这种情况下发展起来的。另外，机械工业的兴起使几何量的计量得到了进一步的发展。

以电的产生和应用为基本标志的第二次技术革命，更加推动了社会生产的发展。欧姆定律、法拉第电磁感应定律以及麦克斯韦电磁波理论等，为电磁现象的深入研究和广泛应用、电磁计量和无线电计量的开展，提供了重要的理论基础。例如，1821年西贝克发现的热电效应，为热电偶的诞生奠定了物理基础；而各种热电偶的研制成功，则对温度计量、电工计量以及无线电计量等提供了一种重要手段，促进了相应科技的发展。为了实际计量地球运动的相对速度，迈克尔逊等人利用物理学的成就，研究出了迈克尔逊干涉仪，从而为长度计量提供了一重要方法。1892年，迈克尔逊用镉光(单色红光)作为干涉仪的光源，计量了保存于巴黎的铂铱合金标准米尺的长度，获得了相当精确的结果(等于1 553 163.5个红光波长)。普朗克关于能量状态的量子化假说指出，物体在辐射和吸收能量时，其带电的线性谐振子可以和周围的电磁场交换能量，以致于能从一个能级跃迁到另一个能级状态，并且最小量子的能量为 $\Delta E = h\nu$ (h 为普朗克常量， ν 为频率)。爱因斯坦在普朗克假说的基础上，提出了光不仅具有波动性，而且还具有粒子性，即光是以速度 c 运动的粒子(光子)流。其最小单元(光子)的能量为 $\Delta E = h\nu$ ，从而说明了不同频率的光子具有不同的能量。上述理论成功地解释了光电效应，是热辐射计量的基础，同时也使计量开始从宏观领域进入了微观领域。

随着量子力学、核物理学的创立和发展，电离辐射计量逐渐形成。核能及化工等的开发与应用导致了第三次技术革命。在这个时期，科学技术和社会生产的发展更加迅速。原子能、化工、半导体、电子计算机、超导、激光、遥感、宇航等新技术的广泛应用使计量日趋现代化，由经典计量进入量子计量的新阶段，计量的宏观实物基准逐步向自然(量子)基准过渡。新的米定义和原子频标的建立有着相当重要的意义。长度和频率的精密测定促进了科技的发展。比如光速的测定、原子光谱的超精细结构的探测、航海、航天、遥感、激光等许多科技领域都是以长度和频率的精密计量为重要基础的。

第四次技术革命将会引起科技和社会的重大变革,人类已经进入“信息社会”。传统的产业部门将被电子工业、宇航工程、海洋工程、遗传工程等新兴工业所取代。这场技术革命的先导是微电子学和计算机,而集成电路的研制又是先导的核心。集成电路的研制没有相应的计量保证是不可想像的。比如,单晶的物理特性和几何参数,超纯水、超纯气的纯度,化学试剂、光刻胶的性能,膜层厚度、层错位错,离子注入深度、浓度、均匀度以及工艺监控测试图形等的测定,都是精密计量。另外,就时间频率量的作用来说,没有星载钟、各种原子频标和晶体振荡器、各种精密的频率和时间的比对和测量技术与设备、先进的时间传递方法,就不可能有今天的GPS,高科技的发展也难以达到今天的前进速度,通讯、导航、航空航天的测控也难以达到所要求的高精度。

科学技术的发展,特别是物理学的成就,为计量的发展创造了重要的前提,同时也对计量提出了更高的要求;而计量学的成就又促进了科技的发展。正如门捷列夫所说,没有计量,就没有科学。计量测试技术和仪器在科技发展中表现出周期更长的需求牵引和不间断的发展要求。关于仪器科学技术的地位和影响可以从其中的时间频率量的发展和影响得到很好的说明。因为在所有的物理量中,时间和频率量具有最高的精度和稳定度,所以其作用在高新技术的发展中也最显著。时频标准器的精度在不断提高,无论是借助于天体运动构成的世界时或历书时标准,或者是借助于原子能级跃迁构成的量子频标,以及目前国际上所致力于发展的光学频标,其本质上都是利用了自然界稳定的周期性运动现象来作为时间或频率标准构成的基础。围绕着频率基准精度的提高,对一系列物理现象的研究所获得的成果在国际上引起了轰动。近10多年来,有四项这方面的成果获得了诺贝尔物理奖,如1989年Dehmelt等人的离子阱和Remsey的分离场技术,1993年Taylor的脉冲星稳定周期,1997年朱隶文等人的激光冷却和捕陷原子,2001年美国科学家的玻色-爱因斯坦凝聚。这些发现和研究成果通过对自然现象的揭示为频率基准精度的一步提高奠定了基础。从进一步的发展来看,光频标在精度上具有明显的潜力。它会比当今的微波量子频标在准确度的 1×10^{-15} 基础上高出3个数量级。它的最终实现将包含激光稳频技术、从射频-微波到光频的精密比对和测量技术,以及在此基础上的频率合成和控制技术等。可以说,测试计量技术与仪器科学的突破性发展都离不开对自然界中所存在的特有的规律性的稳定现象等的探索,也离不开整体科技、加工业发展水平的提高所提供的知识背景和加工工艺背景的进步。

2. 计量与工农业生产

计量对工业生产的作用和意义是很明显的,它是科学生产的技术基础,从原材料的筛选到定额投料,从工艺流程监控到产品的质量检验,都离不开计量。比如,一辆载重汽车有9000多个零件,由上百个工厂生产,如果没有一定的计量保证,就无法装配成功。在工业生产中,这样的例子还很多。

现代化的农业生产也必须有计量作为保证。其中涉及到盐分、水分、有机质,以及氮、磷、钾的含量和温度等。在盐水选种、温汤或药剂浸种、适温催芽和离心脱水等过程中,也都要有一定的计量保证。在田间管理上,也离不开计量,如常常要对植物光合作用的照度等进行计量。

事实说明,科学生产和技术革新,都离不开计量测试。

3. 计量与国防

计量对国防,特别是尖端技术的重要性尤为突出。国防尖端系统庞大复杂,涉及的科学技术领域广、技术难度高,要求计量的参数多、精度高、量程大、频带宽。例如,通讯同步卫星距地面 35 800 km,用无线电信号作为空间与地面的联络手段,就必须有大功率的发射机和高灵敏度的接收机。因此必须对大功率、低噪声温度、大衰减和小电压等主要参数进行计量测试。这不但要研究测试方法和设备,而且要建立相应的计量标准。当前,地面设备的发射平均功率已可达几十千瓦,接收机的噪声温度已能低于 15 K。为提高对飞行器的控制能力,对跟踪、定位、测速、测距、测角等电子参数的精度要求越来越高,而且对设备加工和伺服控制元件也提出了更严格的要求。在连续波计量系统中,为保证测速精度达到几厘米每秒,地面频标的短期稳定度应在 $10^{-12}/s$ 以上。

国防尖端技术系统的工作环境比较特殊,还常常要在现场动态情况下进行有效的计量,难度较大。例如,飞行器在运输、发射、运行、回收等过程中,要经历一系列诸如振动、冲击、高温、低温、高湿度、强辐射等恶劣环境。当弹头进入大气层时,要经受几千摄氏度以上的超高温;提高接收机灵敏度的关键部件一般要在液氮的超低温下工作;发动机的推力可达几兆牛顿到几十兆牛顿,而姿态控制发动机的推力则只有几厘牛顿(cN),等等。原子弹、氢弹等核武器的研制与爆炸威力的实验,都对计量有特殊的要求。因此,必须进行动态压力、动态温度、脉动流量、振荡、冲击、超高温、超低温、大推力、小推力以及核辐射等一系列计量测试。

计量测试提供了所需的数据,保证了各种部件、分系统和整个系统的可靠性,同时,还可以缩短研制周期,节约大量人力、物力和时间。例如,美国航空喷气发动机公司在研制一种新型发动机的过程中,需要进行大量的计量测试。当计量仪器的误差为 0.75σ 时,需要进行 200 次实验,耗资 2000 万美元;仪器的误差减小到 0.5σ 时,只需要进行 28 次实验就可以了。也就是说,仪器的误差每减小 0.25σ ,每台发动机的成本即可降低约 120 万美元。

在国防建设中,计量测试是极其重要的技术基础,具有明显的技术保障作用,不仅可以节约资金、争取时间,而且还能为指挥员的判断与决策提供可靠的依据。

4. 计量与人民生活

计量对人民生活的意义也是相当明显的。商品生产和交换的全过程都包含着计量的作用。生活中的电、水、煤气计量装置的精度都涉及到用户的切身利益。各种公共交通工具的时刻准确与否也会影响到我们的正常活动。在医疗卫生方面,计量测试的作用也越来越明显。常见的计量测试有体温、血压、心电图和脑电图测试,各种化验等。

对环境的保护越来越受到世界各国的关注。其中,有效的环节是进行有效的监测,如对大气、水质以及噪声的监测等,需使用大量的计量设备。

5. 计量与贸易

下面重点介绍一下计量与国际贸易的关系。

外贸中需要计量的事例是很多的。计量的不准确,不但会造成不应有的经济损失,而且还会影响国家的信誉。

具体到计量学的知识在我们通常的检测工作和仪器设计方面的应用,就更能体现出这

方面的知识和思想方法的重要性。仪器设计的三个要素为测量方法、物理原理和工艺实现。这里对于第三项,通过前期基础课和技术基础课的学习,已经有了基础。如学生们大都掌握了各种电路、电信号处理技术,计算机的软、硬件,数学,普通物理等基础知识。而前两项是大家从事测量和仪器工作所缺乏的,这正是本课程的主要内容。计量学的学习可以使学生从专业掌握方面了解本专业共性的、对仪器设计和解决测量问题所必须具备的系统知识。

美国 HP 公司就仪器发展问题提出了 MC² 的模式。其中, M(measurement)表示测量或计量, C(computer)表示计算机, C(communication)表示通信信息。这一方面说明了在仪器的设计和发展中,测量技术和信息处理是必不可少的,另一方面说明了把计算机软、硬件用于测量控制、数据处理、显示等已经是一条发展的途径。

计量学所涉及的专业面很宽,包含长度、力、热、电、无线电、放射性、时间频率、化学、光学、声学等 10 个大类。对它们的学习一方面应注意知识的广度,即能对各方面的情况有所了解,另一方面也要以测量技术的目的和对共性知识的学习为主,这样才能取得事半功倍的效果。

1.4 近年来仪器与测量技术的发展

仪器是实施计量的最重要的物质基础,因此,从广义的角度来看,仪器与测量技术的内容及其发展和计量学之间有着密切的联系。为了更全面地掌握和应用计量学的知识,深入了解仪器技术的状况是很有必要的。虽然仪器与测量所涉及的对象和范围较之计量工作的测量对象可能更广,但是以后者作为支持来认识计量技术的发展会获得更多的资源并且也可为自己开拓出更广泛的服务空间。

1.4.1 测量技术与仪器的技术内涵及发展重点

测量技术与仪器是一个专业面很宽的多学科相结合的行业。它在科技和工业等不同的领域起到了技术基础保证的作用。从这方面的技术发展情况来看,总是热门行业的发展需求激发了相应方面的测量技术与仪器的发展,并为后者提供了广阔的应用市场。同时,测量技术与仪器又与科学技术和工业生产的发展互为支持和制约。不但许多新技术的发展为测量技术与仪器提供了新的原理和软、硬件技术的支持,而且也因为测量技术与仪器的进步才促使了科学技术的进一步发展。根据 IEEE 仪器与测量技术大会(IMTC)多年来的统计和研究文章在数量上的分布,与仪器构成及发展关系最密切的有以下几方面的内容:

- 传感器和变换器;
- 信号和图像处理;
- 系统 ID(识别);
- 计算机虚拟系统;
- ADC 与数据采集;
- 神经网络和模糊处理;
- 光学检测技术;

- 电源；
- 标准；
- 微波与 EMI 通讯；
- 生物医学。

图 1.4.1 给出了近 5 年来在美国 IMTC 会议上的文章分布情况(为了在黑白图像上显示方便,从上到下的图块次序与右边的标注次序是相同的)。

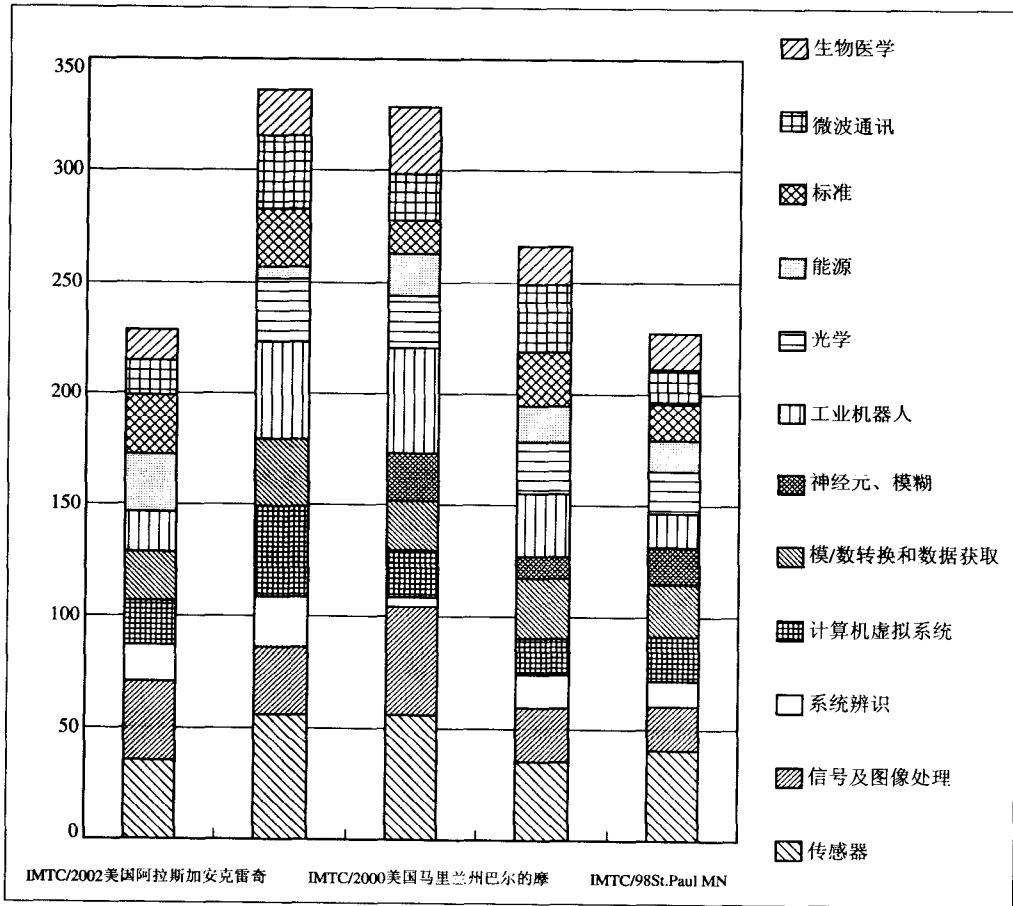


图 1.4.1 1998~2002 年 IMTC 会议上的文章分布情况

从每年文章的侧重情况以及科技和产业的发展来看,某一方面的研究工作和论文的增减都有对应的行业发展作为背景。这说明仪器与测量工作对当代工业和科技的发展有明显的依附特点。脱离目前面向市场发展的大趋势来计划仪器与测量的研究方向是会出问题的。每年各种有代表性的大型国际会议的发起者和组织者往往根据这样的背景并结合实际发展的大趋势进行会议的征文和组织。这方面的动态会为确定仪器及测量学科的发展方向及研究课题的定位提供很有用的信息。

应该说明的是,针对广泛的被测量,传感器和变换器的研究论文数量始终是最多的。所以传感器在测量与仪器领域处于一个很重要的位置。

1999年,微波与通讯被排在第二位,是由于移动电话的发展,这方面的研究集中于800 MHz~1.2 GHz的微波测量。

1999年,ADC与数据采集被排在第四位,由于数字示波器的需要而发展了折返式和插入式的ADC。这类ADC用于数字示波器和数字电视,具有非常高的速度和分辨率。同期发展的过采样的ADC具有更高的分辨率,但是速度要慢一些。

2000年,信号/图像处理被排在第二位,主要是由于数字相机的发展。CMOS的图像传感器被作为研究的热点,它也被用于移动电话中。同时,CCD也被广泛应用。

2000年,生物医学测量排在第四位,因为世纪之交提出了21世纪是生命科学与健康的世纪的口号,因此受到了各国的重视。

2000年,光测量方面的文章主要集中于光纤传感器的研究。采用这种结构可以构成低成本的温度、压力和空气流的传感器。

另外,关于智能传感器接口的标准IEEE 1451.2于2002年被发布。该接口是与互联网连接的,引起了国际上的普遍关注,所以关于标准的文章数量有所集中。

1.4.2 近年来传感器技术的发展

从这几年仪器和测量技术发展的总的趋势来看,传感器的研究和发展总是被排在首位。这是因为,现代测量的模式大多还是针对广泛的非电被测量的。首先将非电被测量转换为电量或者数字量,再采用电和数字信号处理的方法来获得对被测量的准确表达,或用于控制和其他目的。传感器是测量系统的入口,因此,传感器的精度和性能成了测量系统中对精度影响最显著的因素。测量用的传感系统主要针对非电量测量和环境的评估。经全面统计,传感器与转换器方面最具代表性的关键技术是微电机的硅膜片的压力传感器、用于差动压力和角度检测的差动式电容转换器、混合式或单片热装置传感器、电位计气体传感器(如二氧化锆传感器、限制电流的陶瓷传感器、有机薄膜传感器等)等。而在相应的接口方面是,开关电容器线路技术、过采样的 $\Delta-\Sigma$ 调制与解调技术、通用的传感器接口结构、基于电流传送器和开关电流存储器单元的电流模式信号处理等。在相应的网络方面是,智能转换器接口标准IEEE 1451、由美国NIST的Kang Lee主持的TC-9等。通用接口所需要的是,高精度(如12位分辨率)、数字编码、线性化功能、交互参数的补偿、补偿和增益的独立调节、自诊断和校正功能、与微传感器兼容处理的片上可实现、通讯装置等。

传感器的研究和应用所涉及的专业面是相当广泛的,大量物理、化学、机械甚至生物学的知识背景都能够用于传感器的构成。在传感器的发展方面,利用石英晶体和声表面波器件的谐振式的物理和化学传感器与转换器尤其引人注目。由于这个原因,美国的IEEE国际频率控制年会近年来专门把谐振式的物理和化学传感器与转换器列为会议中的一个重要部分。在几乎目前所有的电子元器件中,石英晶体谐振器是稳定性和精度最高的。因此,一方面利用石英晶体稳定的一面可以构成稳定的时钟和频率源;而另一方面,则可以利用它们对某些外界影响,如温度、压力、振动和加速度等的敏感性来构成不同高精度的传感器。所以传感功能是晶体谐振器和声表面波器件除稳频功能以外的第二大用途。这样的传感器可以把被测量直接转换成频率、时间等很容易数字化的量值,极易处理,而且精度和

检测的灵敏度也很高。如在特定介质中的颗粒的检测中的灵敏度可以达到 10^{-15} g/mm^2 。这方面的传感器已经广泛用于温度, 力值, 加速度, 转矩, 角速度, 振动, 空气与水或其他介质中的颗粒, 气体和液体混合物, 可卡因等药品的微量以及生物化学分析中的测量中。

传感器的发展, 尤其是化学传感器的发展是很不容易的。一个实用传感器的完成和完善往往需要 10 年左右的时间。其困难常常表现为灵敏度、选择性和长期稳定度这样一些指标之间的冲突。另外, 严酷的和噪声的环境会降低信噪比, 这也是必须关注的。上述问题也是国际上关注, 并在近几年重点研究的。对于传感器发展有前途的途径之一就是学习人的传感器机构。传感器与人工神经网络融合是这种途径的典型例子。为了使这些信号的处理途径有效, 传感器本身应该仿效为一个接收器。比如日本开发的一种气味传感器中带有 PVC(聚氯乙烯)混合油脂薄膜涂层的 AT 切晶体就仿效了人的嗅觉细胞。

大多数商用的气体传感器都是基于 SnO_2 和 Fe_2O_3 填充材料的。这些传导率传感器特性是高灵敏度的, 但是它们的选择性较差。使用了电位差计类型的传感器可以得到很高的选择性。这些固态的电化学传感器基本上是集中单元并且需要氧气参考。英国开发出了电化学的泵组件作为氧气参考。因为氧气的浓度能够由泵流控制, 这样, 传感器便可以用于废气中氧气的闭路检测。

在选择开放性应用的传感器(如湿度传感器)时的最重要的因素是长期稳定性而不是灵敏度。这类电容性的传感器使用了疏水性的膜作为传感元件, 现在被认为是最稳定的传感器之一。用线性化和交叉参数补偿所派生的样本能够被用来设计对电容性传感器更好的接口。

从微电机的硅传感器得到的信号通常是很小的。为了防止因恶劣的环境使得信噪比变坏, 信号处理线路应该和传感器线路集成在一起。比如一个开关电容器(SC)弛豫振荡器施加于热耦合的信号处理中。一个基于电荷平衡原理的 SC 振荡器是最简单的模/数(A/D)转换器。SC 技术现在已经是成熟的技术并被广泛地用于混合模拟和数字 ASIC 的 CMOS 实现。

过采样的调制解调技术具有这样的特性, 即它们很有希望被使用在可以很好地承受元件失配的模拟接口中, 这种失配可能发生在微机电过程中。采用这种技术的通用接口已经被计划用于减小开发成本。这方面的一个典型构造就是二次的过采样调制回路。这个回路包含了模拟和数字的积分电路, 能从本质上改进接口电路的抗噪声度。

采用开关电流(SI)技术的传感器接口也是近年来所关注的。使用 SI 技术实现的模拟电路和标准的数字 CMOS 方法是完全兼容的。在 SI 线路中, 支配信噪比的一个误差源是节拍耦合(CFT)。这个现象对于 SC 线路是共同的, 但是 SI 线路中的 CFT 的很大成分取决于信号电平和非线性。为了减小非线性 CFT 误差, 已经发展了 2 级的 SI 单元。这个创新性的元件可以用来建立递增型的 A/D 转换器。

传感器的灵敏度和其长期稳定度不兼容, 常常是灵敏度越高, 长期稳定度就越差。克服这个困难的一个有前途的途径就是在一个传感器芯片上集成信号处理电路以改进传感器的灵敏度和可靠性。这样的传感器也被称做“智能传感器”。用该途径开发的第一个实用传感器是一个压力传感器, 它是由扩散在一个微机械图形上的压敏电阻器和用双极方法生产的弛豫振荡器所构成的。在此以后, 许多其他智能传感器都被开发出来。

能够不用微机械或薄膜方法生产的典型的智能传感器是一种温度传感器。采用双极的