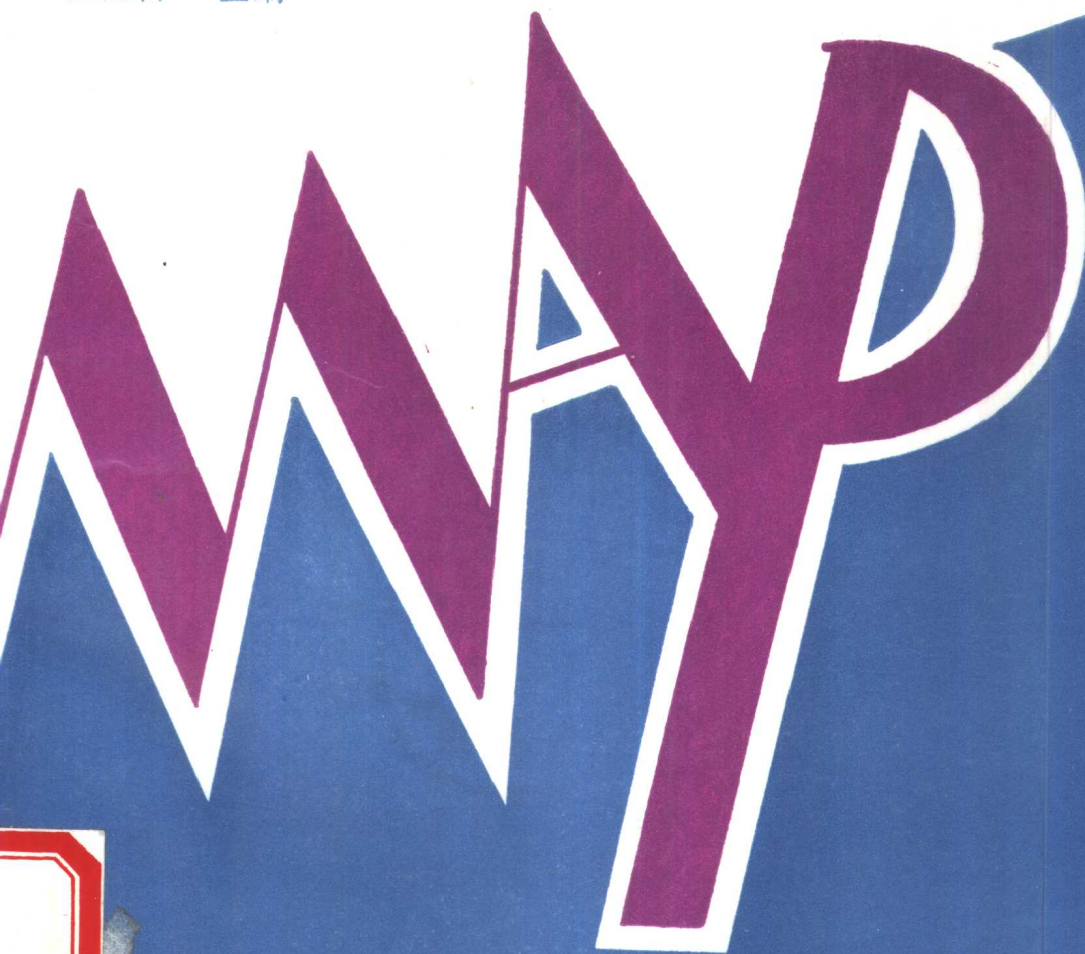


计量质量保证方案

王立吉 主编



中国计量出版社

计量质量保证方案

王立吉 主编

中国计量出版社

新登(京)字 024 号

内 容 提 要

本书对计量测试的质量保证方案进行了全面的阐述与探讨,包括美国推行的“计量保证方案”的原理和方法;计量测试的数理统计方法,以及我国量值传递改革和计量质量保证方案的研究、试点及其实施举例。是学习和研究新型量值传递方案的普及读物。可供从事计量测试的科技工作者、管理人员阅读,亦可供大专院校相关专业的师生参考。

计量质量保证方案

王立吉 主编

责任编辑 李绍贵

*

中国计量出版社出版

北京和平里西街2号

煤炭工业出版社印刷厂激光照排

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 850×1168/32 印张 7.75 字数 200 千字

1992 年 12 月第 1 版 1992 年 12 月第 1 次印刷

印数 1—5 000

ISBN 7-5026-0565-7/TB·416

定价 6.70 元

计量质量保证方案

主 编
副主编
编 委

王立吉

王轼铮

(以姓氏笔划为序)

杜铭心

肖明耀

罗振之

席德熊

李绍贵

张福刚

赵灼文

宋延渭

陈传家

倪伟清

前 言

随着科技、经济和社会的发展，计量的作用和意义越来越明显。如今，可以毫不夸张地说，任何科学、任何领域、任何行业以至任何活动，都直接或间接地需要计量。计量已成为社会发展的重要技术基础。计量水平的高低，已成为衡量一个国家的科技、经济和社会发展程度的重要标志之一。

计量对于发展经济，特别是市场经济，有着不可忽视的作用。比如，降低产品成本、提高产品质量、消除贸易壁垒，都离不开计量；同时也对计量提出了更高的要求，如何保证计量准确度，包括减少量值传递过程中的准确度损失和确保检测数据的可靠性，便成了人们关注的中心课题。

早在 50 年代末，美国便针对上述问题开始了探索；1967 年，美国国家标准局（现国家标准技术研究院）正式发表了有关计量保证方案的第一篇论文；70 年代末，已形成了比较完整和可行的“计量保证方案”，并先后在质量、量块、直流电压、电容、电阻、电能、温度和激光功率与能量等参数的量值传递中开展了计量保证方案服务；1984 年，美国标准局出版了专刊 S. P. 676- I、II，全面总结和介绍了新的量值传递方案——“计量保证方案”，引起了世界各国的普遍关注。

为适应形势的发展，特别是市场经济的发展，改革传统的量值传递方式，已势在必行。我国计量主管部门，原国家计量局、现国家技术监督局，对此相当重视和关心。从 80 年代中期开始，我国的一些计量单位，在比较深入地分析和研究了美国计量保证方案的基础上，结合我国的实际情况，进行了量值传递改革的试点，并取得了可喜的成绩，为介绍我国量值传递改革的经验和推动我

国量值传递工作的发展，由国家技术监督局科技司、计量司、中国计量科学研究院、中国计量出版社共同组织编写了该书。

本书从计量基础知识、美国推行的“计量保证方案”、数理统计方法，到我国量值传递改革的必要性与试点情况等，进行了全面的阐述和介绍，旨在进一步推动我国量值传递改革的进展，使计量测试在统一全国量值并与国际量值保持一致，面向国民经济主战场，为科技、经济和社会发展提供可靠的计量保证与测试服务，为振兴中华做出更大的贡献。

全书共四章，按章序，作者分别为：王立吉教授（第一章）、赵灼文副研究员（第二章）、肖明耀副研究员（第三章）、杜铭心高级工程师和席德熊高级工程师（第四章，其中附录一和二，分别由王承刚高级工程师和阴天晓高级工程师提供）。

由于水平和时间所限，不妥之处在所难免，请予指正。

本书的编著和出版，得到了国家技术监督局科技司、计量司、中国计量出版社等单位的领导和同志们的关心与支持，谨此一并致谢。

王立吉

1992年6月

目 录

第一章 概论	(1)
第一节 计量的基本概念	(1)
一、计量的发展阶段	(1)
二、计量的特点	(3)
三、计量的作用和意义	(5)
四、常见的计量名词	(12)
第二节 测量误差	(18)
一、测量误差的定义	(19)
二、误差的分类	(20)
三、间接测量的误差	(29)
四、误差的合成	(31)
五、测量不确定度	(33)
第三节 计量器具	(34)
一、计量基准	(35)
二、计量标准	(36)
三、普通计量器具	(36)
四、计量的辅助设备	(38)
五、计量的环境条件	(38)
第四节 量值传递与溯源	(40)
一、量值传递	(40)
二、溯源	(41)
三、量值传递与溯源的基本方式	(42)
四、新型量值传递与溯源方案——计量质量保证方案	(44)
第二章 美国计量保证方案简介	(50)
第一节 美国计量保证方案	(50)
一、绪	(50)
二、美国标准技术研究院 (NIST) 实施的计量保证方案服务	(51)
三、美国计量保证方案中使用的各类标准	(57)

四、美国计量保证方案误差估计特点	(66)
五、核查标准在计量保证方案中的作用	(72)
六、美国计量保证方案实施举例	(84)
第二节 美国计量保证方案实施情况及国际动态	(89)
一、美国已实施 MAP 的各类参数	(89)
二、美国的地区计量保证方案	(90)
三、美国计量保证方案的简化应用	(97)
四、动态	(101)
第三章 计量学中的统计概念	(108)
第一节 测量过程的统计概念	(108)
一、测量读数及估计	(108)
二、算术数值和测量数值	(109)
三、测量数值的性质	(110)
四、置信区间和置信界限的计算和解释	(117)
五、精密度和准确度	(121)
第二节 测量数据的统计分析	(124)
一、极限平均值和方差的代数计算	(125)
二、平均值和方差的比较	(131)
三、保持稳定度和精密度的控制图技术	(136)
四、线性关系和最小二乘法拟合常数	(141)
第三节 实验中的测量	(143)
一、测量实例	(143)
二、压缩数据	(147)
三、用概率定律理解	(149)
四、偏移——一个主要考虑	(151)
五、测量的数学	(152)
六、数据的表示	(163)
七、回归技术	(166)
第四章 我国量值传递改革的研究	(171)
第一节 我国量值改革的必要性	(171)
一、我国现行量值传递的基本方式	(171)
二、量值传递改革的必要性	(172)
第二节 我国量值传递改革研究工作的进展	(174)
一、课题的提出	(174)
二、研究工作进展情况	(175)

第三节 研究成果的推广应用	(185)
一、计量质量保证方案和现行量值传递方式的关系	(185)
二、采用计量质量保证方案进行量值传递的一般要求	(186)
三、计量质量保证方案的推广应用	(188)
附录：计量质量保证方案实例	(196)

第一章 概 论

第一节 计量的基本概念

一、计量的发展阶段

计量，过去在我国称为“度量衡”，其原始含义是关于长度、容积和质量的测量，其主要器具是尺、斗和秤。从学科的发展来看，计量原本是物理学的一部分，或者说是物理学的一个分支。随着科技、生产和社会的发展，计量的概念和内容也在不断地扩展和充实，并逐渐形成了一门研究测量理论和实践的综合性学科——计量学。

就学科而论，计量学又可分为理论计量学、通用计量学、应用计量学、法制计量学，等等，当然，这种划分不是绝对的，而是突出了某一方面的计量问题。在实际研究和具体计量中，往往并不、也没有必要去严格区分。

计量的对象，在相当长的历史时期内，主要是各种物理量。随着科技的进步、生产和社会的发展，计量的对象已突破了传统物理量的范畴，逐步地扩展到化学量、工程量以及生理、心理量等。可以说，一切可测量的量，皆属于计量的对象，计量所涉及的科学领域，已从自然科学扩展到了社会科学。

计量的发展，大体上可分为三个阶段。

（一）古典阶段

古典阶段是以经验为主的初级阶段，没有或者没有充分的科学依据。作为最高依据的计量基准，多用人体的某一部分、动物的丝毛或某种能力、植物果实、乐器以及物品等。例如，我国古代的“布手知尺”、“掬手为升”、“十发为程”、“十程为分”；英国的“码”，是英王亨利一世将其手臂向前平伸，从其鼻尖到指尖的距离；英亩是二牛同轭一日翻耕土地之面积；等等。

在该历史阶段中，主要是封建、教会势力统治着社会，影响了科技和生产的发展，影响了计量的进步。例如，由于确信并宣传哥白尼的天体运行学说，意大利的天文学家布鲁诺被活活烧死在十字架上。著名科学家伽俐略发明了天文望远镜，并对天体运行进行了实际观测，进一步证实了哥白尼学说的正确性，结果竟被教会于1633年判处无限期监禁而含冤离开了人世。直到1979年，罗马教皇才不得不宣布，当年对伽俐略的判决是不公正的。三百多年的沉冤终于得以昭雪。这说明，科学真理必定会战胜强权。

（二）经典阶段

从世界范围看，1875年“米制公约”的签定，可认为是经典阶段的开始。随着科学技术的进步和社会生产力的发展，已开始摆脱利用人体、自然物体等作为计量基准的原始状态，进入了以科学为基础的发展时期。由于科技水平的限制，这个时期的计量基准都是在经典理论指导下的宏观器具。例如，根据地球子午线的长度的四分之一的一千万分之一，用铂铱合金制造的长度基准米原器；根据一立方分米的水在其密度最大时的温度下的质量，用铂铱合金制造的质量单位基准千克原器；根据地球围绕太阳的转动周期而确定的时间单位秒；根据两通电导线之间产生的作用力而定义的电流单位安培；等等。

这类实物基准，随着时间的推移，由于物理的、化学的以及使用中的磨损等原因，难免发生微小的变化。另外，由于原理和技术的限制，该类基准的准确度亦难以大幅度提高，以致不能满足日益发展的社会需要。于是便不可避免地提出了建立更稳定、更

准确的新型计量基准的要求。

（三）现代阶段

现代计量的基本标志是由经典理论为基础转为以量子理论为基础，由宏观物体转入微观世界。

建立在量子理论基础上的微观自然基准，亦称量子基准，比宏观实物基准要准确和稳定可靠得多。因为，根据量子理论，微观世界的量，只能是跃进式的改变，而不能发生任意的微小变化；同时，同一类物质的原子和分子都是严格一致的，不随时间和地点而改变。这就是所谓的稳定性和齐一性。量子基准就是利用了微观世界所固有的这种稳定性和齐一性而建立的。

迄今为止，国际上已正式确立的量子基准有长度单位米基准、时间单位秒基准、电压单位伏特基准和电阻单位欧姆基准。

计量学研究的基本内容有：

计量单位与单位制；

复现计量单位的基准、标准的建立、复制和保存，以及普通计量器具；

量值传递与检定测试，为社会各个领域提供计量保证；

测量误差（不确定度）与数据处理，以及计量人员的计量技能；

物理常数和材料与物质特性的测定；

计量管理等。

计量科技的主要领域，当前比较成熟和普遍开展的有几何量（亦称长度）、热工、力学、电磁、无线电、时间频率、声学、光学、化学和电离辐射计量，即所谓的十大计量。

另外，随着现代科技的发展，一些新的计量领域正在逐渐形成，如生理量及心理量的计量等。

二、计量的特点

从概念上说，计量学是关于测量理论与实践的综合性学科，而不论测量的准确度如何以及用于何种科学技术领域；测量是为确

定被测对象的量值而进行的全部操作；而测试，则是具有一定试验（探索）性的测量。近年来，往往将不是严格按照约定规程或成熟方案进行的测量统称为测试，甚至有时也可以将测试理解为测量和试验的综合。

概括起来，计量应具有下列特点。

（一）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测量的真值的接近程度。严格地说，只有量值，而无准确程度的结果，不是计量结果。也就是说，计量不仅应明确给出被测量的值，而且还应给出该量值的误差范围（不确定度），即准确性。否则，量值便不具备明确的社会实用价值。所谓量值的统一，也是指在一定准确程度内的统一。

（二）一致性

计量单位的统一，是量值一致的重要前提，无论在任何时间、地点，利用任何方法、器具，以及任何人进行计量，只要符合有关计量所要求的条件，计量结果就应在给定的误差范围内一致。否则，计量将失去其社会意义。计量的一致性，不仅限于国内，而且也适于国际。

（三）溯源性

在实际工作中，由于目的和条件的不同，对计量结果的要求亦各不相同。但是，为使计量结果准确一致，所有的量值都必须由同一个基准（或原始标准）传递而来。换句话说，任何一个计量结果，都能通过连续的比较链与计量基准联系起来。这就是溯源性。可以说，“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，是与当代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，所有的量值都应溯源于国家基准；就世界而论，则应溯源于国际基准或相应的约定标准。否则，量值出于多源，不仅无准确一致可言，而且势必造成技术和应用上的混乱，

以致酿成严重的后果。

（四）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，量值的准确一致，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，量值的准确一致便不能实现，计量的作用也就无法发挥。

可见，计量源于测量，而又严于一般测量。可以说，计量是量值准确统一的测量。过去，所谓狭义计量，主要是指计量单位及其基准、标准与量值传递等；如今，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，一般没有必要去严格区分“计量”与“测量”。国内如此，国际亦如此。顺便提一下，在翻译外文资料时，比如英文 measurement，可译为“测量”，也可译为“计量”，视具体情况和惯例而定。

三、计量的作用和意义

随着科技和生产的发展、社会的进步，计量的作用和意义已日益明显。下面略举几例，便可见一斑。

（一）计量与科学技术

众所周知，科学技术是人类生存和发展的一个重要基础。没有科学技术，便不可能有人类的今天。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，是在反复观察的基础上提出的，并在伽俐略用天文望远镜进行了进一步观测之后而确立的；著名的万有引力定律，被牛顿的敏锐观察所揭示，并在百余年之后进一步得到了实测验证而被确认；爱因斯坦的相对论，也是在频率精密测量的基础上才得到了一定的验证；李政道和杨振宁关于弱相互作用下宇称不守恒的理论，也是吴健雄等人在美国标准局（今标准技术研究院）进行了专门的测试才验证的。

总之，从经典的牛顿力学到现代的量子力学，各种定律、定理，都是经过观察、分析、研究、推理和实际验证才被揭示、承认和确立的。计量正是上述所有过程的重要技术基础。

历史上三次大的技术革命，都充分地依靠了计量，同时也促进了计量本身的发展。

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，使生产力得以迅速的提高，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。在蒸汽机的研制和应用的过程中，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理论基础；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。为了实际测量地球运动的相对速率，迈克尔逊等人利用物理学的成就，研制出了迈克尔逊干涉仪，从而为长度计量提供了一个重要方法。1892年，迈克尔逊用镉光（单色红光）作为干涉仪的光源，测量了保存于巴黎的铂铱合金基准米尺的长度，获得了相当准确的结果（等于1 553 163.5个红光波长）。直至近百年后的今天，利用各种干涉仪精密测量长度，仍然是几何量计量的一种重要方法。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，以致能从一个能级跃迁到另一个能级状态，并且最小能量子的能量为 $\Delta E = h\nu$ (h ——普朗克常数， ν ——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，成了热辐射计量的基础，同时也使计量开始从宏观进入微观领域。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量子（自然）基准过渡。米的新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量，促进了现代科技的发展。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，都是以频率和长度的精密测量为重要基础的。

至于当前人们广泛谈论和关注的所谓第四次技术革命，将引起科技、生产和社会的重大变革，人类将进入“超工业社会”或“信息社会”。那时，不可再生的石化燃料能源将转换成可再生的太阳能、海潮发电等新能源，钢铁、机械、橡胶等传统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，等等。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可以说是先导的核心。集成电路的研制，没有相应的计量保证是不可想象的。比如，硅单晶的物理特性、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，都是精密测量。当前，我国集成电路的研制尚比较落后，计量工作跟不上是其中的原因之一。

总之，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，推动了计量的发展；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”。聂荣臻同志也明确指出：“科技要发展，计量须先行”；“没有计量，寸步难行”。

（二）计量与工农业生产

计量对工业生产的作用和意義是很明显的。社会化大生产的本身就要求有高度的计量保证。生产的发展，大体上可分为三个阶段，即以经验为主阶段，半经验、半科学阶段和科学阶段。计量则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，一辆普通的载重汽车有 9 000 多个零件，由上百个工厂生产，若没有一定的计量保证，就无法装配成功。营口地方中型钢铁厂轧钢板的耗油量，原来是每吨 300 余公斤，后来由于对废气、空气量、燃烧供热量以及温度等进行了计量监控，结果使能耗下降到每吨 40 公斤。原先，陕西钢厂冶金炉，所用的重油燃料靠人工经验控制，根本不计量，为了火旺，总是多投料，结果燃烧不彻底，黑烟滚滚，既多耗了油，又污染了环境，以致连年亏损。后来，安装了计量仪表，对燃料进行了监控，使加油量保持在最佳值，既节约了油料，又减少了污染，同时还提高了炼钢效率，结果很快就出现了扭亏为盈的新局面。天津玛钢厂是我国生产玛钢制品的第一大厂。过去，能耗一直十分严重，是天津市耗能的重点户，为摸清原因，厂里对 13 种主要设备进行了热平衡测试，取得了近 7000 个数据，从而计算出了设备热平衡和能耗的关系，初步摸到了能源使用的规律。通过计量测试，找出了原因并安装了相应的监测仪表，使热效率由 7%~8.6% 提高到 12.1%，三个月就节煤 457 吨，节电 6 500 千瓦小时（度）。

农业生产，特别是现代化的农业生产，亦必须有计量保证。比如，为了科学种田，就必须通过计量来掌握土壤的酸碱度、盐分、水分、有机质和氮、磷、钾的含量以及温度等。在盐水选种、温汤药剂浸种、适温催芽和离心脱水等过程中，亦都要靠一定的计量保证。电离辐射育种，是近年发展起来的一项重要增产措施。我国已用该法培育出了许多农作物新品种，其中鲁棉一号使棉花