

计 量 学 概 论

中国计量科学研究院编译

一九七六年

编 者 的 话

《计量学概论》(Введение в метрологию)是苏联敖德萨计量技术学校的教科书,于1973年出版。本书概述了计量单位、测量器具与方法,阐述了误差理论,探讨了影响测量准确度的一些因素及消除的基本途径,引述了测量仪表与装置的检定的基本原理。对苏联的计量工作情况及国际计量机构,作了简介。鉴于目前国内这类书籍较少,特译出供我国计量工作人员参考。本书虽经删节,仍难免有错误的观点,切望读者本着《洋为中用》的原则,批判地吸收。参加全书译、校工作的有:傅大智、成熙治、黄传源、邱百存、蒋作民、杭孟大、黄清渠、季惠心、王少刚、刘智敏、傅烈堂、袁先富、姜友陆、朱源宏等同志。全稿由我室朱源宏同志校订。限于水平,错误难免,如有发现,请予指正。

中国计量科学研究院情报室

1976年12月10日

目 录

第一章	计量学及其作用	1
第二章	计量学的基本概念和术语	11
第三章	物理量的单位	23
第四章	基准器	39
第五章	测量误差	58
第六章	系统误差	70
第七章	偶然误差	105
第八章	测量器具	149
第九章	测量器具的检定与试验	180
第十章	测量方法	206
第十一章	计量工作	227

第一章 计量学及其作用

1. 测量、测量技术、计量学

测量是人们将理论结合实际认识自然界的一种方法。测量是科学知识的基础，用来估计物质资源，保证所要求的产品质量，保证零件与部件的互换性，改进工艺过程，实现生产自动化、标准化，保障身体健康，保证劳动安全以及许多人类活动。测量是从数量上描述周围的物质世界，揭示自然界存在的规律。门捷列夫曾形象地指出：“科学从测量开始…”。英国汤姆逊曾说过类似的话：“每一件事物只有当可以测量时才能认识”。在一万多年以前形成的俄国雅可比的意见与此是相呼应的：“测量技术是人们智慧深入自然界规律，从而听从人们驾驭而建立的强大武器”。

所谓测量技术从字面上广义理解是指用以进行测量的所有技术工具和进行测量的技术。在全世界每天都在进行成千百亿次测量。对每一个国家说来，在国家与国家的相互关系中，无论在什么地方进行测量，必须使测量结果相互一致，换句话说，在不同地方，用不同的测量器具得到的同一量的测量结果能够在所要求的准确度内进行比较。

为此，首先必须统一被测量的单位和用实物复现单位的量具。保证高度的统一，即量具的统一，是保证测量结果能进行相互比较的一个条件。此外，必须创造一系列其他条件以保证测量结果的全部质量，而这是比较测量结果和正确使用所需要的。所有这些叫做测量的统一。

计量学就是研究保证测量统一的理论与实践问题。

广义的理解，计量学是关于测量的科学，是关于保证测量的统一，达到所需准确度的方法以及达到上述目的的方法和器具的一门科学。

计量学是测量技术的理论基础。

测量技术越发展，计量学就具有越来越大的意义——计量学要建立和完善测量的理论基础，综合测量方面的实际经验，指出测量技术的发展方向。

在很多制造测量器具的企业和更多（要多许多倍）的进行测量并利用测量结果的企业、组织和机构中，计量学建立和实现了全面保证量具与测量统一的系统。这个系统已形成国家机构，而以前在有限的测量技术范围内叫做权度机构。目前这个机构的工作范围已扩大了许多倍，叫做国家计量机构。

2. 测量的作用

测量的范围是很广泛的，从天河到构成原子的最小粒子，从太阳与热核反应的温度到低温装置的极低温，从人们制造与利用的电磁波到相距数千百万光年* 的看不到的光源射向地球的波。

测量用来认识自然界；测量准确度是发现、保存与利用实有知识的途径。

测量从很早以前就开始了。而测量的作用和意义一年一年地增大。

人们早就利用测量技术。科学家利用近代方法准确测量物质和现象的性质。这类测量就是征服自然，使其为人类服务的一种手段。

* 光年——光线在一年内通过的距离。一光年等于 9.46×10^{16} 米

老的测量器具被新的测量器具所代替。这些新的测量器具可以使我们接收到不可见光，感觉到磁力和我们不知的其他现象。

声波与电磁波可以用来测量海洋的深度、冰川的厚度、地球到月球和其他星球的长距离。声波经过海底的反射可以发出回音。由于声波在水中的传播速度可用回波探测仪测出，声波所经过的往返时间就为确定海洋的深度提供了可能性。

电磁波按一定方向自物体反射或按光速传播后仍以类似回波自星球返回，这就可用雷达测出距离。

经过多次准确测量可以达到基本发现。例如，迈克尔逊做过实验想要发现预料中的干涉图形小位移。按照当时的意见，这种位移是由光源与光接收器相互运动引起的。可是经过仔细测量发现并没有这种位移。爱因斯坦由于深刻理解这项研究成果推翻了早已存在的关于时间的概念，提出了相对论。

从罗蒙诺索夫和拉瓦锡时代就认为物质守恒定律是无可争辩的。按照这个定律，参与化学反应的物质的质量总量等于反应产物的质量。但是经过化学反应已分离或吸收了能量。根据相对论与质量、能量等价定律，化学反应产物的质量与参加反应的的质量的总量稍有不同。但是长期来要用实验证明这点还没有成功，因为测量技术还不完善。现在，当测量技术已大大前进的时候，可以通过分离出极大能量的核反应发现这种变化。

另一个例子是，1932年由于提高了水密度的测量准确度而发现了同位素重氢，在普通水中含有这种元素使水的密度稍为增加。

对自然界的研究及研究时所进行的测量，无论在实验室、天文台、火山口、海洋深处以及大气层的最高层或宇宙，都带有冒险性。但人们应当迎着风险去认识自然界。

3. 计量学与技术进步

目前，自然科学、技术、工、农业生产的发展，除了经济因素之外，还决定于对物理、化学、生物等各种现象和过程，以及对物质、材料和结构特性等的充分可靠的认识，而这些只有通过测量才能得到。

若不通过测量获得足够完整和可靠的数据，就不可能得到利用原子能，征服宇宙，按照既定的特性创造新的材料等重大科学实践成果。

只有在获得决定产品可靠性参数完整可靠的测量信息的基础上，才能解决提高国民经济各部门产品的可靠性问题。

在解决每一个重大问题时，在不同地方、不同时间，用不同仪器所进行的几百万次测量结果都结合运用在一起。多次测量结果的这种结合运用只有在这种结果能相互比较的情况下才有可能。计量学与测量技术进步的一个特点是要不断掌握表明新的物理、化学、生物等各种现象和作用的新的量的测量。

要进行定量测量的量和过去相比增加了许多倍。已出现了很多新的、有时是很复杂的测量器具，如红外光谱仪、色层分析仪、质谱仪等。

现代测量科学技术进步的另一个特点是任何量测量范围的扩大。如果10年前实际需要测量 $10,000$ 开的温度， 1×10^{-8} （约 0.77×10^{-10} 毫米汞柱）到 1×10^9 帕（约 10000 公斤力/厘米²）的压力，那么现在由于探索宇宙、等离子体，研制新的材料则需要测量几百万度的温度和 1×10^{-14} 到 1×10^{10}

帕以上的压力。

提高测量装置的效率和快动性，提高装置的通用性，简化其操作程序就可保证节约解决面临任务的时间与资金。科学中测量的基本任务就是发现有关物理、物理化学、化学、生物及医学等问题的规律性的联系。

高度发展的测量仪器制造业，具有高度计量学特性的测量方法和测量器具将促进与测量有关的科学研究的进步。测量技术的高水平为研究人员提供了集中精力解决主要问题的可能。科学问题的解决往往也为改进测量方法开辟新途径。

如火箭制造与宇宙航行中的这种相互作用大大地丰富了测量技术。

自动化的发展对计量学的飞速发展起着很大的作用。正是自动化对测量结果的准确度、可靠性与相容性提出了更高的要求。

第二次世界大战以后科学技术的总的发展进程表明：计量学几乎是所有科学、技术与经济部门进步的基本条件。科学问题越复杂、建立的工业装置越大，计量学的作用越大。

4. 计量学在国民经济中的职能

计量在国民经济中的职能主要有三个方面：

国民经济中产品按质量、长度、容量、流量、功率、能量的核算；

科学研究、产品试验与检验、医学、农业等各部门对物理量、技术参数、作用特性、物质成份与特性等的测量；

控制、调节工艺过程（特别在自动化生产中）保证运输与通信正常职能等进行测量。

在执行上述第一项职能中测量的计量学特性的影响最为

明显。

近代称量技术的状况是：在称量过程中约有百分之一的被测量的产品不能估计。液体、气体产品（如石油、气体、汽油等）的相当大一部分不能估计。目前生产的电表（平均有2%）由于有误差造成不能准确确定电能。如果把谷物、石油、气体、水泥、棉花、能量、钢铁、肥料等产品的百分比用绝对数表示，则很明显每年可造成许多亿卢布的损失。应当指出：在大多数情况下这种损失由于产品没有很好估计还会造成进一步加工过程中超过标准的消耗。

如果提高核算的准确度，例如仅提高一倍，则国民经济中将可清点出又一批极大量的产品与材料。

测量统一的破坏、测量不准确、计量工作组织的不周密对执行测量在国民经济中第二、第三项职能将会带来重大的损失。

在工业部门中，物质成分的相当大部分测量是通过定量或定性分析来进行的。上述分析的误差有时比各组份量的差值高几倍。由于这个差值，不同标号的金属和化学材料等按照规定的配方有很大的差别。结果机器质量下降甚至可能造成严重事故。

机床制造业中尺寸测量不够准确妨碍着高级精密机床的生产，而用不精密设备生产的轴承的寿命也大大降低。

国民经济的潜在力量应通过提高测量准确度，改进测量器具的使用予以充分发挥，但是在一般不进行测量的地方还有更大的潜力。

在提高产品质量方面测量的意义特别重大。这不仅表现在利用测量器具可以检查质量上，而且表现在借助主动检查器具在工艺过程中可以保证必要的质量指标上。

随着国民经济的发展应迅速发展各方面的测量技术。测量器具的极限技术特性和计量学特性应大大高于目前工业所提出的最高要求。制订每一种新的工艺过程，制作新的产品都应建立在经过探讨和鉴定的测量方法和测量器具的基础上。

随着工业企业复杂性的增加，「测量点」的数量已提高了许多倍。因此，用于控制各别工业装置的测量装置要求具备单独的房屋。从所有测量装置得到的信息量是很大的，以致处理这些信息需要大量人员。

要减少「测量点」往往是不可能的。因为很多测量参数与特性在正常稳定的工作情况下没有意义，而在非常情况下，即偏离工业装置正常的「平均」操作状态就具有特殊的意义。必须使大量测量结果的记录、选择、处理和评定最大限度地自动化。这种自动化的任务不仅在于减轻工作人员的劳动强度，而且在于加速选择和处理测量信息，消除和防止观察人员和计算人员的个人误差。

测量信息的收集和处理的任务一年比一年更广泛了。现代化的装置是在中心站集中与某台装置或车间，以至于整个企业有关的所有重要测量结果。这类信息经过适当处理将再现该对象上（装置、车间、企业）所发生的全部重要过程并能以最佳方式进行控制。

处理具有复杂的相互关系的大量测量信息要利用电子计算机。收集和处理信息的系统可以按各种方式来建立。有时整个测量信息可以送到一台中心电子计算机，有时可以用小型计算机在每一台装置附近直接进行收集和处理，然后将计算结果送到进行综合处理的中心。选择何种方案取决于面临的任务和经过的距离。技术与经济上的考虑都要注意到。通

信通路越长，出现干扰的可能性越大，而要消除干扰就需要辅助技术装置。

通信通路越长，通路价格越高，因为价格是和通路长度成正比。由于通信通路的价格是属于附加的费用，所以选择哪种方案经济上最合理应全面地衡量。

仪器的快速动作可以在短期内积累大量的测量结果。这些结果由于可以送到计算机上进行处理，就可以减少由偶然原因造成的测量误差。仪器的快速动作还可以减少由于不同时间工作的比较仪（如电位差计）在用量具进行两次比较过程中仪器特性不稳定所造成的系统误差。

目前正努力按照预制构件的原理研制测量装置，——用尽可能少的元件装配而成。每一种这类元件结合其他元件可得到不同的应用。借助一次测量变换器（传感器）变换的方法可以测量越来越多的不同量值。这种测量系统的测量变换器将被测的量变换成统一的电信号或气动信号。在变换器上接通二次测量装置和调节装置就可以接收统一的信号。这就可能按大量生产方式制造相同规格的二次测量装置与调节装置，从而大大减化生产，降低生产成本。

对这种变换器已提出很高的计量学要求：测量准确度尽可能高；灵敏度高而很少受环境温度的影响；对振动及其他干扰不敏感。同时还应满足调节技术的要求。这类系统中的测量装置，即敏感元件、测量变换器和信号传输通路连在调节器上就成为调节回路中自动调节装置的组成部分。因此，回路的时间特性应允许实现调节。

必须指出：许多现代测量装置，特别是利用附加的电动或气动耦合的装置本身就包括有调节回路，在研制和利用这种装置时必须利用调节理论与技术。

上述首先涉及到能量及材料加工工艺中的测量。

在机器制造方面（广义地说）还存在另外一些问题。在整个线值尺寸范围内，特别在小尺寸、大距离测量方面提高测量准确度的要求是越来越高了。但还有一些问题的解决还处于最初阶段。例如：确定形状误差的问题。产品形状的质量还不能以必要的准确程度进行测量，以使这种产品能完全无阻碍地执行其职能。

制造过程的自动化（特别在测量结果要输入电子计算机的时候）给测量装置提出了更高的计量学要求。

现代仪表制造业最重要的问题是提高测量器具使用的可靠性，特别是长期的计量学可靠性。如果普遍地拒绝采用成套的测量装置，就可能造成机床或某个装置报废，而破坏准确度、丧失灵敏度却是看不见的，但是可能成为生产不合标准的产品，在通信线路中造成信号失真，在运输方面出现事故，降低国防武器的效能等原因。

如上所述，计量不准在长时间内如不能发现，则终有一天在不利的情况下造成大的事故。

5. 医学上的计量

可以说，任何方面的知识水平，特别是医学与生物学，在很多方面均取决于相应的计量工作的发展。

在医学上使用测量技术的初期，测量准确度问题还不尖锐。那时测量器具还可以满足。但是随着测量技术在很多重要场合下应用的广泛程度，测量准确度和所用方法的可靠性等问题在很大程度上起了作用。

医学方面测量技术运用的广泛性从下面的事实可以看出：苏联已生产约5000种医疗仪器，其中包括800种电子测量仪器。现在很难说哪个医疗方面不使用测量仪器。人工血

液循环装置、人造肾脏、麻醉作用监控装置、连续观察患者处于危急状态的各器官功能的装置以及其他仪器装置就可以说明。由于使用了由测量仪器控制或进行初步调节的这些装置，才能拯救大量病人的生命。

医学计量可以分为诊断测量、治疗测量、卫生测量几种。

第二章 计量学的基本概念和术语

6. 概念和术语

术语与日常用语的词汇不同，它具有专门的、准确定义的科学意义。具体的自然现象或社会现象的准确知识需要准确地确定其名称。这里，术语“不仅要记录其概念，而且要准确规定它，并且把它与近似的概念区别开来。”科学将科学认识的成就固定于术语中，并且随着其准确意义的判明而向前发展。

术语经常是由具有很多意义的普通语言的词汇通过赋予术语的意义而形成。有时这个意义不脱离来源词的普通意义，而仅是限制它（例如，物理量的单位基准器），在另一些情况下则脱离其来源词的意义（例如，铁路的路基*）。

“术语——是准确地表示生产、技术、科学、艺术、社会生活等等某个专门的领域内的对象、现象、性能、关系、过程等等的词或词组。”

在这个定义中有一个初看起来不能引起任何复杂化的限制：“某个专门的领域内”。计量学是科学领域之一，因此，看起来，这个限制对于它与对其它科学领域一样有效力。但是，在计量学方面，情况要复杂得多。计量学的作用，在最近几十年中急骤增长，在人类生活和活动的各个领域，计量学已渗透进去，并且已夺得（或正在夺取）自己的阵地。由于这个情况，计量学术语紧密地与每一个“专门领域”的

*полотно 在俄語中做为日常用語的詞时，意思是“麻布”；做为专业术语时，具有引伸出来的意思，是“路基”。——譯注

术语发生关系。这时，时而在这里，时而在那里，出现某种不能并存的相似现象。某个科学或技术领域可以接受的术语，对于另一个领域就不一定合适，因为在另一个领域的习惯术语中这同一个词会表示出完全不同的概念。下文所述系采用ГОСТ 16263-70所推荐的术语和定义。在制定该标准过程中，产生过不少分歧意见，因此，可以预料，在已经批准了的术语和定义中，有一些将是不能令人满意的，或者是不正确的，甚至，这一些人习用这一些术语和定义，而另一些人则习用另一些术语和定义。不应忘记，术语所特有的带有简洁要求的某些条件。因此，建议根据相应的定义应用被批准的术语，而定义中规定的概念，则不能用任何其它术语命名。

本章讨论某些基本概念及与其有关并在计量学范围内外得到广泛应用的术语和定义。因此，不能认为其讨论是涉及任何一个计量学部分的。从另一方面讲，这些术语中有很大部分正是因为其广泛传播而被歪曲的解释，不正确的使用或者代之以不正确的术语。由于没有统一这类一般术语的概念和解释，实际上，不可能说明计量学的任何一部分。本章很注意分析术语性的流行错误和歪曲。

不具有普遍意义的概念、术语和定义则列入本书的相应章节中。

7. 物理量，物理量的单位

物理量——这是一种特性，对每个对象说来，在质量方面是很多对象（物理系统、其状态及其发生的过程）的共性，而在数量方面则是个性。

在数量方面的个性应理解为，一个对象的性质可能比其它的对象大或小一定的倍数。

照例，我们把术语「量」用于我们能从数量上估计，即能测量的性质或特性方面。还存在着我们不能从数量上估计的性质或特性。但是，我们力求找到估计其数量的方法，例如，气味、味道等等。我们现在还没有学会测量它，我们不称它们为量，而称之为性质。

按广义，「量」这个词——概念是多种的。我们举三个量的例子，来说明这种情况。第一例——价格，以货币单位表现的商品价值。从前，货币单位制是计量学书籍的必要组成部分。现在，有时也出版部分地讲到货币单位计量学的文章和书籍。

第二例，药物的生物活性可以称为量的变态。很多维生素、抗菌素、激素制剂等等的生物活性用国际生物活性单位表示，用字母 И. Е. 表示*。例如，药方中很多抗菌素、维生素的量是用这个单位指明（盘尼西林 30 万 И. Е.）。

第三例——物理量，就是物理对象（物理系统，它的状态及其发生的过程）具有的性质。现代计量学所最多研究的正是这些量，因此，本书就讲物理量的计量学。上述诸量，一般地说，也特别关系到物理量。

在标准中，仅有「物理量」这个术语，而「量」这个词是做为基本术语的简明形态给出，允许在不可能有各种解释的条件下采用。换句话说，如果不加形容词显然是指物理量的话，可以把物理量简称为量。本书下文中简语「量」仅在所指的意义上使用。

上面说的是作为多种概念的量。在计量学中，「量」这一词是用加上「物理的」这一形容词加以限制的方法，使之

* “国际单位”俄語是 Интернациональная единица 简写为 И. Е., 国际上采用英語, international unit 简写为 I. U. ——譯注

具有术语意义。人们往往用«量»这个词去表示具体的物理量的大小。比如说压力的量、速度的量、应力的量。这是不正确的，因为压力、速度、应力在正确的理解中，这些词就是量，说量的量是不行的。

在上述情况下，使用«量»这个词是多余的。实际上，当可以说大的或小的压力等等时，为什么还要说大的或小的压力«量»呢？

物理量的单位——是按定义给定的，值等于1个单位的物理量。也可以说，物理量的单位是在定量评定物理量时，作为基础用以与之进行比较的同类物理量的那样一个值。

8. 量的大小，量值

在需要着重指出关于该物理量对象的数量含量时，应采用«大小(размер)»这一词。有时，有人反对广泛使用这个词，断言«размер»仅表示长度。但这种狭隘的解释，没有任何根据。在ГОСТ 16263-70中，对这个问题给了明确的说明。

以该量的一些单位数的形式表示的具体物理量的定量评定，称为«物理量的值»。量的«值»所包含的抽象的数目称为数值。

量的大小和量值之间有原则的差别。量的大小是客观存在的，并且不取决于我们是否知道它。我们可以用给定的量的任何单位，换言之，用数值去表示量的大小。

数值的特点是，在采用其它单位时，它要改变，作为量的物理大小仍然是不变的。

如果用 Q 表示被测的量，用 U_1 表示量的单位，而用 n_1 表示其比值，则

$$Q = n_1 U_1。$$