

111922

计 量

——特殊的眼晴



计量—特殊的眼睛

目 录

测量和计量	张世英(1)
计量——特殊的“眼睛”	许世德(19)
从宏观计量向微观计量发展	刘汉其(23)
访现代化科学实验基地——上海市测试中心	
.....许世德 顾洁波 王福康	(26)
从测量的故事谈起	李去靡(32)
什么尺子最精确	李殿奎(35)
黄钟律管与长度标准	丘光明(38)
谈谈温标	高鸿春(42)
形形色色的温度计	何水校(46)
我国古代的衡重计量	邱 隆(51)
最准确的质量标准	杨如杰(55)
天平的演进	由正明(58)
计量压强的单位——帕斯卡	仲跻良(65)
谈流量计量	张云鹏(67)
软与硬	杨 迪(73)
非电量的电测量	夏国泰(78)
磁和磁场计量	陈竹年(82)

时间趣谈·····	刘天仁(86)
原子钟的妙用·····	杨益森(1)
能考古的时钟·····	鲍云樵(97)
秒·····	仲跻良(102)
在川流不息的时间长河里·····	漆贯荣(103)
谈谈测光与人体健康·····	李在清(113)
颜色是什么·····	董太和(118)
摩尔——化学计量的基本单位·····	王晋堂(124)
大气湿度的测量·····	郭锡钦(127)
助听器的选配和听力计量·····	章句才(130)
噪声与声级计·····	章句才(135)
集成电路工业生产中的计量测试技术·····	王承武(139)
石英晶体在计量上的妙用·····	刘汉其(144)
计量仪器的计算机化·····	张钟华(148)

测量和计量

张世箕

测量学和计量学

什么是测量？虽然并非每一个人都能对测量给出一个明确的科学定义，但是，关于测量的基本概念却是我们大家都有所认识的。

首先，就在我们的日常生活中，随时随地都离不开测量。买东西，要称一称重量；做衣服，要量一量长短；生病了，要试一试体温；做事情，要看一看时间；……。这些都是测量。而测量重量的秤、测量长度的尺子、测量体温的温度计、测量时间的钟表、……，这些就是测量仪器或量具。很明显，没有测量及其所需的仪器、量具，即使是日常生活，也是不堪设想的。

测量是人类认识世界的一种重要手段。我们辽阔广大的社会主义祖国有九百六十万平方公里的土地，珠穆朗玛峰海拔八千八百二十米，长江奔流五百八十公里，不经过测量，你怎么知道？长江两岸距离多宽，河底多深，水量多大，流速多快？不经过测量，能掌握吗？

测量又是人类改造世界的一种重要手段。在“一桥飞架

南北，天堑变通途”的宏图壮举中，除了事先要通过测量来掌握长江本身及其两岸的详细情况之外，就在架桥的过程中，也仍然要依靠各式各样的测量，才能保证桥墩和桥梁的高度、大小、垂直度、强度等等符合设计的要求，从而确保大桥工程的成功、保证百年大计的质量。

因此，如果说连日常生活都处处离不开测量，那么在科学技术里，尤其是在现代化的先进科学技术和大规模生产里，就更加离不开测量了。

测量就是拿一个未知的量(物体的长度)去和一个同类的已知量(尺子的长度)相比较，拿这个已知量作为测量的单位，定出被测之量为这个单位的若干倍或几分之几。

具体体现测量单位的物体(例如尺子)，就叫做量具。不过，并非任何量具都可以拿来直接与被测之量相比较的。例如，砝码这种量具，要通过天平才能与被测之量相比较。象天平这类东西，就叫做测量仪器，或简称为仪器。

然而，你的尺子、你的砝码和天平，是不是同我的尺子、我的砝码和天平相同呢？如果你的量具和仪器，同我的量具和仪器不完全一样，那么测量同一个对象，你得到的测量结果是一尺或一斤，而我得到的却是九寸或一斤二两。这又怎么办呢？

显而易见，测量单位必须准确地统一，不应互有短长，这是不言而喻的。

怎样才能保证这种准确的统一性呢？这就属于计量学的范畴了。

实际上，我们想办法设立一个公认的单位基准，大家都向它看齐。例如，我们大家约定好，承认把氪灯发出的橙黄

色光线的光波波长1,650,763.73倍的长度叫做1米。或者，大家公认，国际计量局所保存的那个铂铱合金圆柱体（千克原器）的质量叫做1千克（公斤）。你的砝码准不准，就看它的质量同千克基准有多大差别。这个差别就叫做误差。误差愈小，精确度就愈高。照理，基准本身是应当具有当代科学技术水平所能达到的最高精确度和稳定性的。

然而，科学技术及日常工作中所用的千千万万的仪器或量具，都一一拿去同国际或国家基准相比对来确定它们的误差或精确度，这根本是办不到的。何况，即使办得到，也不容许这样做。因为基准器本身是不容许经常动用的，否则就会由于使用频繁而致磨损，从而丧失了它原来所保持的量值的精确度。为此，还要设立许多中间环节，即是设立不同等级的各级标准。拿一级标准去同国家基准相比对，又拿二级标准同一级标准相对比，再拿三级标准同二级标准相比对，……，最后拿日常工作仪器、量具同最低一级的工作标准相比对。显然，下一级的标准器的精确度比上一级标准器差一些；而下一级标准器设置的数目却可以比上一级标准器多好几倍或几十倍。这样，通过金字塔式的逐级比对，把基准的量值逐级传递下去，一直传递到每一个日常工作的仪器或量具中去。

把仪器、量具或下一级标准器去同比它高一级的标准相比对，以确定前者的误差大小（或误差范围），并确定它是否符合国家有关法令、法规、规范、规程或其他有关标准化文件对它提出的各种要求，这种工作就称为检定。

有关基准和各级标准的建立和保存以及量值的传递和统一工作（包括检定工作），就称为计量，以别于一般的测量。

由此观之，计量是测量的一个特殊的组成部分，它的主要任务是保证量值的准确和统一。计量学是测量学的一个重要分支。计量技术一般属于精密测量技术的特殊运用。以及特殊的精密测量仪器设备(标准仪器和量具)的研究、制造、保养、维修等工作的范围。除此以外，计量工作还涉及到法律上的问题。因为，为了统一全国的量值单位，凡是使用未经按照有关规程检定过的仪器、量具来进行的测量，其所得的结果是不可凭信的，或不合法的。在国际贸易中，常会出现因计量单位有出入而致双方涉讼的情况。

测 量 与 科 学

人类通过测量对自然现象取得定量的观念，才能对自然有深刻的认识，从而进一步掌握自然规律。

英国的开尔文勋爵汤姆逊在 1883 年写道：“当你能测量你所讲的事物，并用数字表示出来，那么你就知道有关此事物的若干情况；而当你不能测量它，不能测量出它的数值时，你的认识只不过是一种贫乏而不能令人满意的知识。它可能是认识的苗头，但无论如何你在思想上几乎并未提高到科学的阶段。”在十九世纪末，元素周期表的发明者门德列也夫也说过：“从开始有测量的时候起，才开始有科学。没有量度，精密科学就没有意义”。本世纪六十年代中期，美国的梅孙则把测量称为“打开名为‘未知’的宝库的钥匙”。而德国的西门子则干脆说：“去测量，就是去认识。”

古今中外，人们对于测量与科学的发生和发展的关系，其认识如出一辙，这不是偶然的。没有测量及其所用的仪器、量具，人类认识世界和改造世界的能力就会受到极其严

重的限制。测量技术的水平，测量结果的可靠，测量工作的全部价值，全在于测量结果的精确度和统一性，因而也就取决于计量工作的水平和质量。测量的精确度愈高，则揭露自然规律的可能性也就愈大，而利用由此得到的对世界的认识来改造世界的能力也愈强。

在科学上，从大量测量数据总结出具有一般性的规律，从而建立了各种定理、定律、理论和学说，这是科学发展的必由之路。随着测量精确度的不断提高，往往可以发现过去科学结论的谬误或缺陷；由此出发，往往导致极其重大的、带根本性的科学革命或创新。

我们知道，近代力学的基础是由牛顿奠定的。关于牛顿发明万有引力的经过，并非象传说中那样是从一个苹果树上掉下来而悟出了地心引力。事实上，万有引力是牛顿在前人无数观测和研究的基础上，穷二十年之功进行总结所得出的结果。特别是开普勒的行星三大定律和伽里略的力学基本原理，是牛顿理论的基石。伽里略是从大量测量结果总结出了力学的基本原理，而使力学成为了一种近代科学的。而开普勒的三大定律的发明，则依赖于第谷及其助手在 1576 至 1596 年二十年间所积累的大量精密天文测量数据。开普勒费了四年功夫进行了艰苦烦冗的计算，发现了火星运行的数据与传统的圆周运动理论之间有 8 弧分的差异（相当于月亮视直径的 $\frac{1}{4}$ ）。开普勒十分了解，第谷的测量精确度是远远超过前人的成就的，他的测量误差不会超过 2 弧分。这多出了的 6 弧分之差意味着什么？从这一点出发，开普勒发现了火星的轨道绝不可能是一个圆，而是一个椭圆。他进一步研究了其他几个行星（包括地球），发现它们的轨道都是椭圆；而且行星在

轨道上运行的速度也不是象传统学说中所说那样是均匀不变的。而是不均匀的，有一定规律的。开普勒从精密测量数据归纳出了行星运动的三大定律，一举推翻了沿袭了二千年的天体圆周运动学说，创立了新的椭圆轨道论。牛顿一方面根据开普勒三大定律和伽里略的力学原理，另一方面根据天文精密测量数据，通过理论计算证明了地球施于月球的引力，就是使月球在其椭圆轨道上维持运动的力，并进一步证明了太阳也以同样的力施于行星，以维持其椭圆轨道上的运转。这就是牛顿引力理论的发明简史。显而易见，没有第谷等人几十年坚持不懈的进行精密测量，就发现不了上述6弧分之差，也就不会有椭圆轨道理论。没有伽里略及其前人和后人的大量精密测量，就不可能有近代力学。没有这一切，就更谈不上什么万有引力的发明了。

1781年从望远镜发现了天王星之后，精密的测量结果表明，这颗行星的轨道与牛顿理论不完全符合。勒韦里耶认为这是由于在更远处有一颗尚未发现的行星对天王星产生摄动而致的结果。他在1846年，根据牛顿理论，算出了这颗未知行星在天空的位置。柏林天文台用望远镜果然在那个位置上找到了这颗行星，这就是海王星。海王星的发现，被认为是牛顿理论最光辉的证明之一。

然而，关于水星的摄动恰好揭示了牛顿理论的缺陷，而证明了后来爱因斯坦相对论的正确性。在1859年和1895年的精密测量，都发现了水星轨道近日点的移动与牛顿理论不相符。考虑到一切行星对水星的全部摄动效应之后，仍然遗留下一个无法解释的近日点转动，其值为每百年43秒（角度）。后来，当爱因斯坦建立了广义相对论之后，根据这个

新理论，上述的每百年43秒的移动就是必然的了。对于其他行星，也同样存在轨道近日点的移动，不过由于距离太阳较远，移动量很小，以致当时测量不出来。现代的天文测量技术已经证实了其他行星的这种轨道近日点移动效应。

真理有待于实践的检验。新理论的创立有待于实验测量的验证。广义相对论的确立，还有两个脍炙人口的验证测量。经典理论认为光是沿直线传播的。广义相对论却指出，光在引力场中的路径会发生弯曲。例如，恒星的光经过太阳附近时，将会被太阳的引力场偏转一个很小的角度 $\alpha = 1.7 \text{秒} \Delta$ ，这里 Δ 是星光与太阳中心的距离，以太阳半径为单位。1919年5月29日发生日全蚀时（因为只有在日全食时才能看见并拍摄下经过太阳边沿的星光），在巴西和西非摄影测量的结果，完满地证实了相对论的正确性。星光的偏转，相当于照片上约几十微米的差异。

另一个实验验证是恒星光谱的红移。根据广义相对论，原子在质量大的天体表面发射或吸收光谱线频率，比在质量小的天体（例如地球）表面上的略低一点，即是光谱向低频端（红光方向）略有移动。对于太阳与地球而言，频率红移的相对量约为百万分之二。在1920年前后的测量水平，很难测量出来。1924年对天狼星伴星进行的测量，再次证实了相对论的正确性。天狼伴星的密度很大，它产生的红移效应比太阳约大30倍。

上面讲的是关于相对论的验证性测量，这些测量都要求很高的精确度。致于促使相对论建立的一个最直接的原因，则是多年来对光速的精密测量所揭示出来的与经典理论的矛盾。此外还有许多原因。

现代物理学使人类的认识深入到微观世界中，其意义之重大，难以用笔墨来形容。仅仅就原子能的释放和利用这方面来说，就已经给人非常深刻的印象了。在本世纪开始的时候，居里在研究镭时，通过非常细致和复杂的测量，发现了一克镭的分裂可以产生比一克普通燃料大几百万倍的热能。在居里逝世的那一年，即 1906 年，爱因斯坦和 郎之万 同时而各自独立地确定了相对论中的一个基本关系，即质能相当性。郎之万在 1913 年物理学会上就指出：“每一克物质，不管其性质如何，都包含有相当于燃烧 9×10^{20} 尔格的内能。也就是说，这个能量相当于 3×10^9 克或三百万公斤的煤所发生的热量。”原子能的释放，不但给后来原子能的利用开辟了广阔的前途，而且对于“物质消灭了”的唯心主义思潮给予有力的打击。

随着高能物理的发展，通过测量陆续发现了许多新的基本粒子。例如，一九三一年约里奥——居里夫妇通过研究 α 粒子轰击铍原子时所产生的辐射，并测量了被击碎的氢原子核的飞裂距离，从而发现了一种非常重要的新的基本粒子，即中子。中子的质量很大，和质子相近，但不带电荷，因而具有高度的穿透能力。中子现在已获得了实际应用，如治疗癌症、中子弹、中子通信等。此外，中子的发现已成为重要的理论和结论的出发点。中子现在普遍被用作为轰击原子核的重型炮弹。约里奥——居里夫妇在研究中子过程中，发现了新的微粒——阳电子。进一步的研究，发现了人工放射性和同位素。

上面，我们仅就物理学的发展过程中摘取了少数几个例子，从这些例子不难看出测量(尤其是精密测量)在物理科学

发展中所起的重要作用。不仅在物理学中，在其他科学的发展中也是如此。下面，我们再举一个化学的例子。

1894 年，瑞利曾经对来源不同的氮气测量了它们的密度。对于用化学方法制备的氮所测得的平均密度及其或然误差 ($\gamma = 0.6745\sigma \approx \frac{2}{3}\sigma$, σ 为标准偏差) 之值为 2.29971 ± 0.00028 ；对于从大气中提取的氮，则测得为 2.31022 ± 0.00013 。二个平均值之差为 $D = 2.31022 - 2.29971 = 0.01051$ 。差值 D 的或然误差为 $\gamma = \sqrt{0.00013^2 + 0.00028^2} = 0.00031$ 。即是 $D/\gamma = 34 \gg 4$ 。这就是说，二者之差远远超过了测量的随机误差。由于操作技术引起的系统误差是很小的。总之，这二个密度值相差甚巨，不可能是由于测量误差而产生的，显然是另有原因。瑞利强调了这一点，并估计可能是化学氮与天然大气中的氮二者之间存在某种差别。沿着这一个方向前进，后来终于导致了兰姆塞发现了大气中含有微量的前所未有的惰性气体，由于惰性气体与氮混在一起而增大了其平均密度。还可以举出一个类似的例子，1932 年，由于提高了对水密度测量的精确度，从而发现了氢的同位素氘（重氢）。因为在普通水中含有氘和氧化合而成的重水，使水的密度略有所增加。重水后来在原子反应堆中起了很大的作用。

应该指出，如果说测量对科学的发展起着非常重要的作用的话，那么，反过来，其他科学的发展对于测量和计量的发展也同样起着非常重要的作用。二者是互为因果，相辅相成的。

其他科学对测量和计量的发展所起的重大作用，其事例同样也是不胜枚举的。在这里仅指出两点就可以窥见一斑。

从数学来说，概率论对于测量误差就作出了无可估量的贡献。从物理学来说，电磁学、光学和原子物理给测量和计量技术开辟了广阔的新途径，提供了有力的新手段。今日所能达到的最高测量精确度，具体体现在原子频率基准(原子钟)上，其误差为 10^{-13} 量级(一百万年才差几秒钟)。这完全是出于物理学之所赐。

测量与工业技术

没有测量和计量，就不可能有现代化的工业和先进的技术，拿普通的汽车来说，每一辆汽车都是由成千上万个零件组成的。这些零件又都是分别成批生产的。在生产任何一个零件时，在其各个尺寸中只要有一个尺寸测量得不够准确，往往只要有一根头发丝之差，就会装配不起来。或者勉强装配起来了，但这样的汽车，其性能、质量、寿命等都会大大降低，在其使用过程中会经常发生故障、产生事故，造成难以估量的损失。至于飞机、导弹那样复杂的产品，就更不待言了。

在现代工业中，由于测量不准确而致产品大量报废的现象，是屡见不鲜的。例如，苏联敖德萨中央铸钢厂，在1971年头六个月内生产了847吨废铸锭，后来查出原因是由于该厂的矿石熔剂剂量测量不准确。另一个工厂，克林斯基温度计厂，由于校准方法不对头，每年出了50万支以上的废品。其后改进了测量方法，才使废品率减少30倍。据苏联标准委员会主席波靠错夫估计，只在俄罗斯苏维埃社会主义共和国的工、企业中采用2万2千台新的测量设备，就可以节约资金1亿卢布以上。

在现代先进的工业产品的设计制造中，往往由于测量得不够准确，设计时不得不留有一定的余量。这也会导致十分重大的经济损失。例如，美国曾有过一种天线设计，由于测量电磁场强度不够准确，不得不使天线的增益量加大，以便留有适当余量。而那种天线，每增加1分贝增益，要付出代价5万美元。也就是说，每1分贝的测量误差对每一台天线索取代价5万美元。如果天线是安装在飞机、导弹或航天器上的，那么无谓地增大增益，使天线体积重量增大，由此而招致的经济损失就更大了。象这类情况，即使在较普通的产品中，也常会产生难以估量的损失。例如，在手扶拖拉机的制造中，由于对钢材的强度测量不够准确，不得不把钢制零件造得稍为大一些，以免因强度不够而发生破裂损坏。每一台拖拉机有那么多个钢制零件，而全国又有那么多拖拉机，这样白白浪费了多少宝贵的钢材？而事情还不只这样。由于零件加大了，重量也就相应增加。为了克服这多余的重量，发动机的马力就不得不增大。而为了增大发动机的马力，发动机的体积和重量也必然要相应加大，发动机的燃油量也相应增加。这样一来，就必须加大油箱的容积，而油箱的重量也就随之增大。而这些增加了发动机、燃油和油箱的重量，又要求有额外的马来拖动。这就形成了一种恶性循环，终于不知白白浪费了多少钢材和燃料。

问题在于，不仅仅是浪费材料和资金而已。尤有甚者，由于测量不准确，甚至可能导致耗资亿万的工程完全失败，不但使巨大的资金和无数的人力穷年累月之功付诸东流，有时还会因之产生毁灭性的灾难。试设想一下，一座巨坝，假如由于测量不准确，以致建造起来之后，抗不住暴发洪水的

压力而崩塌，……，灾难是不堪设想的。由于测量不准确而致重大工程的失败，这是不乏先例的。例如，美国某项航天工程，曾经四次发射失败，最后查明是由于高频电压测量不准所致。经过改正之后，第五次发射才上了天。此外，在资本主义国家中，由于测量不准确，而致巨型客机失事坠毁、死亡数百人的事故，也是时有所闻的。至于测量不准确、甚至根本缺乏测量，而使有害工业废弃物扩散，污染环境，造成严重的公害，则更会危及亿万人民的健康和生命。

反过来，如果在测量和计量上多下工夫，则会收到意想不到的效果和得益。例如，美国航空喷气发动机公司在 5 年中共进行了 2000 次发动机及其部件的测试，测试费用的支出占加工总费用的 70%，要使洲际导弹固体燃料发动机总推力静态复现性达到误差 $\sigma = \pm 1\%$ (置信概率 95%)，相对制造误差为 $\pm 0.75\sigma$ ，仪器误差为 0.75σ ，则需进行 200 次试验，试验总费用高达 2000 万美元。如果相对制造误差减小为 $\pm 0.5\sigma$ ，则必要的试验可以降低到 50 次就足够了；如果仪器误差也降低到 $\pm 0.5\sigma$ ，那么只需要试验 28 次就足够了；如果仪器误差进一步降低到 $\pm 0.25\sigma$ ，那么就只需要进行 16 次试验。这样，测量仪器误差每减小 0.25σ ，则每台发动机成本就可节约 120 万美元。当测量系统的误差为 1% 时，研制一台新的发动机（其性能比当时最佳的火箭发动机提高 1%），需要投资 600 万美元。若测量系统的误差降低为 0.5%，则投资就可以降到 300 万美元以下。

总而言之，测量和计量技术已经成为现代化工业技术的重要基础，直接影响到产品的质量和工程的成败。每一个元、部、组件都必须通过精密测量和计量来检查它们是否能

全面满足严格的技术指标。这些测量都应该是严格一致的，也就是说应该能以相当高的精确度追溯到同一计量标准或基准。否则各元、部、组件就不可能组合成为所需的系统；或者，组成系统之后，系统的总性能将会与设计的预期性能大不相同。这类测量和计量，不仅施行于产品，而且在整个制造和施工过程中必须进行经常的或不断的监测。在尔后产品的使用或工程的运行过程中，也还需要加以测量和计量，以便保证其工作可靠。

在各资本主义国家以及厂家之间，测量和计量技术水平已逐渐成为产品竞争能力的决定性因素之一。在经济发达的资本主义国家中，近年来不仅大大提高了对测量技术重要性的认识，而且也大大提高了对计量学的认识，并大力从事于建立计量机构以及以当代科学技术所能达到的最高精确度来建立国家计量基准。有关计量学的种种问题，已引起了国外科学家、经济学家、企业主以及军事、贸易、运输等部门和政府当局的注意。计量学已被列入国家技术计划和发展规划之中。

计量的主要内容

测量的内容包罗万象，不可胜数。测量要准确，就必需计量。因此计量的内容也同样是包罗万象，不可胜数的。人的精力毕竟有限，以有限的精力来对付无穷无尽的测量和计量的需要，怎么办呢？

经典物理学把一切的量归纳为三个基本量，即长度、质量和时间。以这三个基本量，可以根据一些基本关系公式，导出其他一切的物理量来。例如，面积是一个长度乘上另一

个长度，即是长度的自乘，或长度的平方；体积是长度的立方；速度是单位时间内走过的距离，即是长度除以时间；加速度是单位时间内的速度变化量，也就是长度除以时间再除以时间，……。这样一来，就可以把许多物理量的测量和计量归结为长度、质量和时间的测量和计量。

恩格斯在《反杜林论》中曾经正确地指出过：“和其他一切科学一样，数学是从人的需要中产生的：是从丈量土地和测量容积，从计算时间和制造器皿产生的。”因此，自远古以来，除了时间之外，就对长度、容积和重量的计量〔即所谓度、量、衡（亦称为权）〕特别予以重视。二千多年前的《吕氏春秋》中就记载了：“黄帝使伶伦取竹于昆仑之靡谷，为黄钟之律，而造权衡度量。”据传说，距今四千六百年前的黄帝，就建立了计量制度，以竹节间的长度为1尺，并以一节竹筒的容量作为容积单位，等于1200颗谷粒的体积；而1200颗谷粒的重量则作为重量单位。有信史可稽的，则是在战国时期，商鞅在秦国实行变法的重要措施之一就是“平斗桶、权衡、丈尺”，首先在秦国范围内统一了计量单位。到了公元前256年，秦始皇统一天下，就更进一步统一全中国的计量单位制度：“一法度衡石丈尺，车同轨，书同文字。”并铸造了秦权和秦量作为计量基准，至今尚有存者。

在西方，1790年法国资产阶级大革命后的法国国民议会组织了专门委员会来制订新的计量单位制。到了1799年，建立了米和千克基准。1875年成立了第一个常设国际计量机构，即取名为国际权度局(BIPM)，这个名称沿用至今，近几年来，我国为统一起见，改称它为国际计量局。

最初以长度、质量、时间三个单位为基础的单位制，后