

内部资料 不得外传

2000 年的中国研究资料

第 25 集

中国计量科学技术的现状与展望

中国计量测试学会

中国科协 2000 年的中国研究办公室

1984.8

第 25 集

中国计量科学技术的
现状与展望

中国计量测试学会

中国科协 2000 年的中国研究办公室

1984. 8

建国后，我们早在五六十年代，即向现代化进军时起，就着手筹建了组织，开展了计量工作。虽然当时有人嫌麻烦，不愿管这件事，但我们还是坚持要抓好管好。因此，科技要发展，计量须先行。这个道理，我们祖先在两三千年前就已懂得，所谓“不以规矩，不能成方圆。”这是孟夫子的话。那时已讲究计量标准了。科学技术发展到今天，可以说，没有计量寸步难行。计量是现代化建设中一项必不可少的技术基础。

——引自聂荣臻副主席

1983年11月2日

致国防计量工作会议的信

前 言

根据中国科协关于开展“2000年的中国”研究的要求，和首先弄清70年代末、80年代初我国科技现状和差距的部署，中国计量测试学会组织了“2000年中国的计量测试工作研究小组”，在调查研究的基础上，集体编写出这份资料。全文共分四章：第一章简单分析了计量科学技术的性质、任务、工作内容和发展概况；第二章列举部分事实阐述了计量测试在国民经济中的作用；第三章分为若干专业学科介绍了我国计量科学技术的现状及其与国外先进水平的主要差距；第四章结合我国的工业技术改造和新技术革命的可能影响，初步展望了未来的趋势和今后的重点发展领域。

由于时间和我们水平的限制，资料中有些数据可能不够全面和确切，提出的观点和看法只是作为百家争鸣中的一种意见，供大家参考。错误的地方，希予指正。

这份资料由王江高级工程师主编。参加编写的有：于凤翹、王虹、乔石琼、沈乃激、李正东、李去靡、陈遐举、林鸿初、张钟华、贺春棠、席德熊、徐仁卿、诸维明、郭群芳、梁晋文、黄俊钦等同志。编写过程中参加讨论补充的还有马凤鸣、崔均哲、黄秉英、杨益森、李锦林、赵玉惠、时万春、王承武、刘绪民等同志。

本资料的责任编辑是韩立德、徐葆瑾同志。

在编写期间，得到了中国计量科学研究院、航空工业部304所、计量情报研究所和中国计量测试学会有关同志的热情支持和帮助，特此致谢。

编者

1984年6月29日

内 容 提 要

计量学属于“有关测量的知识领域”，它是通过统一量值，发展精密测试技术，以保证生产和交换的社会化，保证科学研究的可靠性和连续性的一门应用科学。

自从有商品交换以来，同时也就有了计量技术。到了近代，生产的社会化、科学技术的发展、国际贸易的扩大，都需要统一的计量单位和衡量标准，这就使得计量科学技术逐步形成一门独立的学科。

计量科学技术贯穿于各行各业，是面向全社会服务的横向技术基础。它具有准确性、一致性、量值可溯源性和法制性等特点，而以实验技术和开发研究为主要特色。

计量科学技术是人类认识自然、改造自然的重要手段之一，它在我国四化建设中所起的作用正如聂荣臻同志所指出那样：“科技要发展，计量须先行”，科学技术发展到今天，“没有计量，寸步难行”。早在公元前221年，秦始皇统一中国后，就颁布了统一度量衡的诏书。通过一系列措施，奠定了我国古典计量的基础。但在长期的封建社会中，计量技术一直处于古典的度量衡阶段。中华人民共和国成立后，才发展起现代计量科学技术，1966年前已建立起80多项计量基准、标准，组成全国的量值传递网，在工业生产、国防建设和科学技术、人民生活中发挥了一定的作用。十一届三中全会后，我国计量科学技术有了新的发展。现已建立起：长度、力学、热工、电磁、光学、声学、电子、时间频率、电离辐射、化学、微电子学、量子计量学等148项国家级的静态计量基准、标准和部分动态测试标准（美、苏等国家最多的为200项左右）。其中10余项已达到国际先进水平。部分项目达到国际一般水平。计量测试技术近年来也迅速发展，在各工业部门和国际贸易中，取得显著的经济效益。例如，我国计量部门1982年为葛洲坝工程检测了一台500吨材料试验机，用于测定钢材、混凝土力学性能，是保证大坝安全的关键性设备，用它证实了采用“水钙减水剂”新工艺的可行性，仅推广应用这项新工艺就可节约水泥8.4万吨，节约投资451万元。攀枝花钢铁公司1979~1980年配备计量测试仪表投资150万元后，提高了产品质量，节约了能源，仅1980年就节约2600万元。

计量测试技术不仅可以创造巨大的经济效益，而且可以创造多方面的社会效益和科学效益。例如，近年来标准物质不但用于检定标准测量仪器、评定分析方法、进行现场质量控制，而且应用于环境保护、商业贸易、临床医学等方面，正在起着有效的监控作用。三十五年来，我国计量科学技术的发展是相当快的，成绩是很大的。

但是，我国现代计量科学技术由于基础薄弱，又屡受干扰，迄今能够解决的问题只限于常规的、通用的、中间量程，而且绝大部分是静态测量，还远远不能适应现实生产的需要。有些计量基准、标准，精度不够，甚至尚未建立。和一些主要工业国家相比，缺乏工程量计量标准、采用新技术少、两端量程存在空白，动态检测技术和仪器设备的落后，是我国计量科学技术的主要差距。

近20年来,新技术的开发和应用,促进了工业生产和科学研究的迅猛发展,而对计量测试技术的需要也更加迫切。在新技术革命中,计量测试技术是重要的前沿阵地之一,准确一致的信息要靠计量检测来取得。例如,在大规模集成电路生产中,要对超纯水进行严格的检测,因为水中即使仅有一个细菌也将造成废品;超大规模集成电路线宽约1微米,要求测量精确度应优于0.05微米;而光刻掩膜板的对准精度要求控制在0.01微米以内。国外对大规模集成电路的生产设备中所需测试原理是保密的,所用的仪器一般是禁运的,而不解决这些高精度参数的测试,就不能保证产品的正常生产。计量若不先行一步,不但新兴产业和新兴科学无法发展,现有的工业技术改造,也不可能得到应有的效果。

随着新技术革命的逐步发展,目前的单项量值逐级传递方式将发生根本变革。以频率量为主要单位,从单项测试向系统测试发展,进行现场的实时自动测量,采用讯号发射、发放标准物质、便携式传递标准的巡回检定,高精度计量标准的直接应用等是可以预见到的趋势。对于计量科学技术的性质和任务范围的陈旧认识必将受到冲击。计量科学技术应该和电子技术,仪器仪表工业三者相互促进,同步发展。

展望2000年,为实现我国翻两番的战略目标,计量科学技术不但要以工业计量为主,而且要增强为科学技术服务的能力。新技术革命是一场智力竞赛,它要求更加精密的计量测试水平和检测能力。对于计量科学技术的开发,必须从现在起就给予一定的保证,否则各项事业将陷于被动,这是各级领导需要加以重视的问题。

目 录

内容提要.....	(I)
第一章 计量学的性质和任务.....	(1)
第一节 我国计量科学技术的发展概况.....	(1)
第二节 数量和质量.....	(4)
第三节 计量科学的特点.....	(5)
第四节 理论基础和实践意义.....	(6)
第五节 工作内容.....	(7)
第二章 计量测试在国民经济中的作用.....	(9)
第六节 经济效益和社会效益.....	(9)
第七节 科学技术效益.....	(14)
第三章 我国计量科学技术的现状和主要差距.....	(16)
第八节 长度计量.....	(16)
第九节 力学计量.....	(26)
第十节 热工计量.....	(41)
第十一节 电磁计量.....	(55)
第十二节 光学计量.....	(65)
第十三节 声学计量.....	(74)
第十四节 电子计量.....	(79)
第十五节 时间频率计量.....	(88)
第十六节 微电子学计量测试技术.....	(94)
第十七节 电离辐射计量.....	(103)
第十八节 化学计量.....	(113)
第十九节 激光在计量测试中的应用.....	(123)
第二十节 动态计量检测技术.....	(129)
第二十一节 小结.....	(137)
第四章 展望未来.....	(139)

第一章 计量学的性质和任务

计量学是统一量值和发展精密测试技术,以保证质量、实现生产社会化、保证科学研究的可靠性和连续性的一门应用科学。计量学的英文名称是Metrology,其语源来自希腊语,意为“量度的科学”。国际法制计量组织编写的《法制计量学基本名词》一书中对计量学所作的解释是“关于测量的知识领域”,其注释中提到:

“1、计量学的主要领域是

- ① 计量单位及其基准、标准(基准、标准的建立、复制、保存和传递);
- ② 测量(测量的方法、实行及准确度的估计等);
- ③ 测量器具(根据预定目的检查测量器具的特性);
- ④ 观测者(他们进行测量的能力,即对仪器示值读数的能力)。

2、计量学包括和测量有关的(不管其准确度如何)一切理论和实践问题。

3、根据观测的量计量学分为:长度计量学、时间计量学等;根据应用领域分为:工业计量学、技术计量学和医学计量学等。

4、计量学也包括物理常数和材料与物质特性的测定。”

自从商品交换开始以来,生产具有了社会意义,计量技术也相应而生。生产力的发展,促使生产过程实行分工与协作,要求商品具有通用性和互换性。随着科学技术的发展,对科学研究的大量数据要求有高度的准确性。学科间的交叉渗透需要各种参数的综合测量,要保持科学研究的连续性,不但需要高度的准确性,而且需要高度的一致性。现代化的生产和科学实验,不但要求有静态测量,还要求生产流程中和实验过程中进行动态测量。国内外贸易和学术交流,也需要有统一的计量单位和计量标准。计量科学技术正是适应这些需要而逐步发展成为一门独立的学科。计量学是一门应用科学。由于计量科学技术的主要特色是实验技术和开发研究,所以它又被认为是一门技术科学。

第一节 我国计量科学技术的发展概况

我国计量事业的产生和发展有悠久的历史。大约四千年前原始社会末期,随着私有制的形成和商品交换的出现,“度量衡”已开始诞生。据传黄帝“设五量”(大戴礼记·五帝德),舜“协时月正日,用律度量衡”(尚书·舜典)。公元前221年秦始皇统一中国后,立即采取“车同轨,书同文”等措施,颁布了统一度量衡的诏书,制发了大批度量衡标准器,奠定了我国古典计量的基础。这对于中央集权制的巩固和促进新兴封建主义经济的发展起了很大作用。以后世代相传,吸收了我国古代一些科技成果,计量技术得到进一步发展。如南北朝时,我国大数学家祖冲之求出当时世界上最精确的圆周率后,即用来对“栗氏量”和“新莽铜嘉量”进行了测算和校正。《汉书·律历志》还

记载了用累黍和音律管的长度作为标准尺的依据，这实际上就是现代计量科学上所采用的数理统计方法和用波长定义长度单位的原理和方法。可惜我国由于长期封建社会的束缚，计量科学技术一直得不到应有的发展。国民党统治时，在半封建半殖民地的经济中，不但我国古代的计量制度在使用，而且英制、公制甚至俄制等都在使用，国家的计量制度不统一，计量科学技术一直处于落后状态。1949年，中华人民共和国刚成立时，从国民党手中接收到的计量标准器，只有一根320毫米长的铂铱合金营造尺，两个不锈钢公斤砝码，和一些古代铜衡器、量器以及几架天平，几个标准电阻和电池。当时全国的计量工作，基本上处于度量衡阶段。这种落后状态严重地阻碍了我国工业和科学技术的发展。

新中国成立后，国家采取了一系列发展我国计量事业的措施。早在国民经济恢复时期，第一机械工业部于1953年成立了计量检定所，开展长度、力学、热工、电学计量工作，国防部门也开始了以兵器尺寸为主的计量工作，发展精密测量技术。1955年，在国务院下面正式成立国家计量局，负责主管全国的计量工作。其后，各工业部门、国防系统、省市自治区的大中型厂矿企业，相继建立了计量室或计量站。1956年，国家制订的十二年科学技术发展规划中，把研究、建立国家计量基准、发展计量技术作为一个重要项目列入了规划。1959年6月，周恩来总理亲自批发了“关于统一计量制度的命令”，确定以国际公制为我国的基本计量制度，废除旧杂制，限制英制的使用范围，并逐步改革市制。明确提出计量工作“以工业为主，为生产服务”的方针，要求建立和健全全国计量网，研究建立计量基准和各级标准，以统一各种计量单位的量值。自此以后，各省市自治区的计量机构，加快了向工业计量过渡的步伐。一些部门如一机部、二机部、三机部、冶金部、铁道部、交通部、电力部、中国科学院、中央气象局、国家测绘局等，在此前后成立了计量机构，并通过引进和自行研究，建立起若干计量标准，配备了测试设备。1965年，正式成立了中国计量科学研究院，下设长度、力学、热工、电磁、光学、无线电、时间频率、电离辐射和化学等九个实验室，当时侧重研究建立国家计量基准，制订检定规程，发展测试技术。这样，到1965年，全国的计量网基本形成，全国的计量队伍近10万人。而据1957年统计，各级政府的专业计量机构只有323个，计量人员仅1700多人。

粉碎四人帮后，在党的十一届三中全会的路线、方针、政策指引下，我国的计量工作又有了新的发展，到1983年底，我国已建立起长度、力学、热工、电磁、时间频率、电子、光学、声学、放射性、物理化学、量子计量学、微电子学等国家计量基准和原始标准共148项，在量限和精度上已能满足经济建设中的一般需要，通过国际比对和学术交流证明，有的基准复现精度如米、稳定激光、实用温标、发光强度单位坎德拉等，已达到了国际先进水平；其他基本单位如千克、电阻、电压等，达到了国际一般水平；一些导出单位如硬度、测力、重力、高频振动、高频电压、阻抗、噪声、功率、光辐射能量、光通量、放射性强度、交直流转换功率和一些标准物质、标准方法等，也分别达到国际先进水平或一般水平。近年来，计量测试技术也有相当快的发展，在各工业部门和国际贸易中，已经取得大量的经济效益。在环境监测、医疗卫生、交通安全、人民生活等方面，社会效益非常显著。在科学研究领域中，也起了一定的作用。

35年来,从中央到各级地方政府建立的计量管理机构和计量技术机构达到了2000多个,人员4万多人,其中科技人员占25%。各工业部门、国防系统、科技系统的企事业单位中,共有2万多个计量机构,20多万人。这支队伍,奠定了我国计量工作的必要基础。

1977年,国务院批准将中医用药的16两为一斤的市制改为米制,现已全部实现。又颁发了“中华人民共和国计量管理条例(试行)”,加强了生产和贸易中计量器具的管理。1981年,国务院颁发了“计量单位名称与符号方案”,正在全国试行。1984年3月,国务院又发布了“关于在我国统一实行法定计量单位的命令”,正式确定以国际单位制为基础的我国法定计量单位,要求于1990年底以前完成这一过渡。中央一系列的正确措施,迅速改变了建国初期我国计量工作的落后面貌,扭转了十年动乱造成的混乱局面,使计量科学技术有了飞速的发展,这对我国的四化建设必将带来深远的影响。

35年来,我国计量科学技术的发展是相当快的,我国在30多年里,走完了西方国家将近100年的发展路程,成绩是显著的。但是我国现代计量科学技术,由于基础薄弱,十年动乱中又破坏严重,迄今能够解决的问题只限于常规的、通用的中间量程,现代化生产和国防建设中急需的超高温、极低温、强辐射、弱磁场、大测力、大流量、微流量、长距离、微尺寸、宽频段、大功率等等两端量程,既缺乏测试手段,又没有计量标准。一些当前迫切需要的工程量标准,大部分处于空白状态。如电能的国家标准、微电子学测试标准、非金属硬度、动态密度、中子剂量标准、医用标准物质等,有的刚开始研究,有的尚未起步。我国已经建立的计量基准,有些项目精度不够,如时间频率基准比国外相差十倍以上,其它如表面光洁度、平面、形位误差、大容量、磁性材料、高频材料参数等等,测量准确度不但与国外差距很大,而且无法满足当前国内的实际需要。在动态检测技术方面,落后状态更加突出。生产过程中需要在线测量,要求随机自动检测,以便将信息输入电子计算机处理后进行反馈控制。科学实验和若干模拟试验中,要求及时测出动态压力、冲击力、瞬态变化,要求作出时域分析和频域分析。相控矩阵雷达,要同时测量几万个数据,必须有数据采集系统和网络分析系统。钢厂、电厂、港口、油田迫切需要能够连续称重的电子轨道衡、电子皮带秤、流量计量设备。国防尖端技术要求频率稳定度优于 1×10^{-12} 和精确的时间定位。超大规模集成电路生产中,线宽约1微米,测量精确度应优于0.05微米;光刻掩模板对准精度要求控制在0.01微米以内。高密度磁盘制造中,必须测出磁头和磁盘的间隙,测量精度要求达0.01微米;磁盘3600转/分运转时,轴向加速度的测量要求小于75米/秒²、轴向偏摆小于0.1微米,类似的重大测量技术有10多项,若不事先研究解决,生产不可能上去。

我国当前不但需要这些采用新技术的计量标准和测试技术,在一般企业的技术改造中,也有大量的测试问题亟待解决。这些测试技术如果不能解决,即使更新生产设备也无法保证和提高质量。目前计量测试水平不高、测试手段落后的情况相当普遍,不少的中小企业内,缺乏最基本的计量测试条件,这对提高产品质量、开发新产品、降低消耗等,将产生不利的影响。

我国的量值传递系统层次繁多,而且是单项量值传递,已经不能适应生产发展的需要,亟待改革。

这些差距的存在,影响了国民经济建设的发展,也使我国计量科学技术迄今仍然处于以静态计量为主的阶段。从总体上看,与国外相比存在相当大的差距,对于国内也无法满足现代工业、现代国防、现代科学技术已经提出的许多要求。由于计量科学技术是为各个领域服务的横向技术基础,故需先行一步,才能及时发挥作用。目前这种临时抱佛脚或者不得不向国外大量引进测量设备的情况,若不及早改变,将使我国经济建设遭受重大损失,并将影响四化建设的前进步伐。

因此,在较系统地分别介绍我国计量科学技术的现状和差距以前,作为一门独立的学科,先对计量学的特点、理论基础和工作内容等作些分析是必要的。

第二节 数量和质量

自古以来,人类就依靠各种信息去认识世界和改造世界。以数据表示的信息是最基本的信息形式,人们应用计量器具和测量技术去获得数据,并应用数学方法和计算设备进行数据的整理和解释,使之成为对生产和科学实验有用的信息。信息的接收、贮存和传输,也要通过各种技术装备去实现。测量方法的合理性、计量器具和各种技术装备的可靠性,是人类能否得到正确信息和能否正确利用信息的基础条件。

由于任何事物都有数量和质量的问题,通过测量,人们对事物存在和发展的规模、程度、速度、多少等等得到一个量的大小的概念,即通常所谓的“数量”,用数字和测量单位的乘积来表示。通过测量,对事物的品质特性也可以得到一个用数量表征好坏的概念,即通常所谓的“质量”。获取这两类信息,是人类认识客观世界的第一步。要认识事物的本质,还必须进行大量的测量活动,对测量结果进行由此及彼、由表及里的综合分析,才能找出事物的内在联系及其运动规律,马克思主义的辩证唯物论,指导我们对事物的认识方法,应按照量变到质变的规律去分析一切事物的变化和发展。

零件加工时,尺寸落在公差范围内是合格品;超出公差则变成次品或废品,说明质量好坏可由数量表述和决定。

锅炉加热时,用压力表指示蒸气压。仪表失准,压力不断增加,可能导致锅炉爆炸,这就由量变产生质变。

元素周期表的排列顺序,是根据原子核内正电荷的多少。惰性气体的主要特点,是其原子最外层的壳体内(除氦外)填满8个电子,因而最稳定。碱金属原子的外壳内只有一个电子,很容易失去而与外界其他物质化合,所以这类金属的特性非常活泼。这是事物内部由于量的不同而决定事物特性的实例。

用钴-60作放射性治癌,每次都要用一定的剂量,剂量过大会损伤身体,剂量不足会降低对癌细胞的控制率。只有用标准照射量计加以标定后,医生才能根据准确的剂量数据,在大量的临床实践中,得出放疗剂量允许偏差不得超过5%的结论。这个5%已经不是一般测量的数量概念,而是反映对事物变化的规律性认识。

上述四个实例说明了数量与质量的关系。要使这些信息具有普遍使用的价值,还必须满足一个共同的条件,即在不同地点、不同时间、不同人员对同一种量的测量结果,要有足够好的稳定性和复现性,从而保持同一量值的一致性。人们依据互相一致的数据

信息进行分析,才能得到统一的认识。在测量活动中,保持同一量值的符合一致,是计量工作的首要任务。从认识论的角度来看,计量科学虽然并不研究物质运动的内在规律(研究这些规律是物理学、化学等其它一些科学的任务),但它可以验证科学理论的正确性,推动新的科学原理和新的科学现象的发现。它能帮助人们正确判断数量多少、质量优劣以及量变到质变过程的情况,以便从中发现问题,找出原因,从而认识与掌握事物的内在规律,有效地利用这些规律。从这个意义上可以认为,计量科学是正确判断数量、质量及其相互关系的一门科学,有助于各方面人员应用这门科学去认识周围的事物,并能使这种认识具有普遍性和同一性。

第三节 计量科学的特点

计量是两种量直接或间接的比较过程,通过比较给出未知量的值。一般的测量多是反映事物的存在状态和变化程度,而计量的任务是保证同类测量以统一的尺度进行。一般的计量过程是用标准量与精度较低的同类量或可间接换算的其它量进行比较,只能使用规定的单位,且要保证同类测量结果的符合一致。因此计量的第一个特点是一致性。

要达到量值一致的目的,每次计量过程都必须保持一定范围的准确可靠,这就要求计量给出的量值能经得起时间和空间的考验,具有足够的稳定性和复现性。准确性是计量的第二特点,它的测量结果不但要给出明确的量值,而且要给出这个量值误差大小,以便应用时加以综合处理。

目前世界上公认的国际单位制(SI),基本上都是物理量单位,如何将各种物理量单位用完善的技术措施复现出来,是计量科学的重要研究内容。根据SI的规定有七个基本单位,即长度单位“米”、质量单位“千克”、时间单位“秒”、热力学温度单位“开尔文”、电流单位“安培”、发光强度单位“坎德拉”、物质的量单位“摩尔”。这七个单位都有独立的科学定义,并为国际所公认。其它则是由此七个基本单位导出的单位和辅助单位。我们把这七个基本单位的量值叫做基准量值,把复现这些量值的设备叫做计量基准器,简称计量基准。把复现导出单位和辅助单位的量值和设备叫做原始标准。研究的目的在于应用,物理量单位量值复现出来后,要通过精度较低的一级标准、二级标准等传递到生产中去,称为量值传递。在国内,每一级量值传递都规定一定的误差范围,以保证同类测量结果在全国的准确和一致,这个工作叫做“统一量值”。国际间量值的统一,主要是通过各国之间同类基准器或原始标准器的相互比对。有几项计量基准,如长度、质量、温度、电阻、电压等,可送到巴黎的国际计量局进行检定。时间单位“秒”则根据设在巴黎天文台的国际时间局统一发布的协调世界时由各国自行校正。这种为达到量值的统一而进行的逐级传递形式,导致出计量科学的第三个特点,即量值的可溯源性。计量结果要求严格地溯源于国家的计量基准。

另外,在一个政治上统一、经济上独立的国家里,只能采用一种计量单位制,复现各种物理量的基准或原始标准只能各有一套,据此进行量值传递,这是统一量值的需要。政出多头,将造成政策上的不统一;量出多源,必将导致经济与技术上的混乱。因此,统一量值的工作,不但要有技术手段,而且要有行政措施和法律上的保证,量值传递

能否顺利实现,不但要作大量的技术工作,而且要作大量的组织管理工作。特别是对国家经济命脉和人民消费利益以及社会安全、人身健康有关的计量工作,各国政府都有明确的立法和具体的管理条例。法制性是计量工作的主要特性,也是计量科学技术的特点之一。

综上所述,一致性、准确性、量值可溯源性和法制性是计量科学技术的基本特征。

第四节 理论基础和实践意义

从世界各国计量科学技术的发展历程来看,它的形成和发展是和物理学紧密地连系在一起的。十八世纪工业革命的出现是第一次技术革命的直接结果,这次技术革命的理论基础是牛顿力学和热力学理论,力值计量和温度计量就是在这个基础上发展起来的。当时机械工业的发展,促使几何量的计量技术有了进一步的发展。十九世纪以来,随着欧姆定律、法拉第电磁感应定律和其后麦克斯韦电磁波理论的确立,开始了大规模利用电磁现象的时代,电磁计量也从此开始。1900年普朗克提出了能量状态的量子化假说,指出最小能量子的能量 $\Delta E = h\nu$ (h 为普朗克常数, ν 为频率),以此说明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,从而能够从某一能级跃迁到另一能级状态。爱因斯坦接受了这个理论,于1905年提出光的本性不但具有波动性,而且具有粒子性,即光是一粒一粒的、以光速 C 运动的粒子流,其最小单元——光子的能量就是 $\Delta E = h\nu$,从而指出不同频率的光子具有不同的能量。这些理论的创立,不但奠定了热辐射计量学的基础,圆满地解释了光电效应,而且使计量科学从宏观领域进入微观领域。

二十世纪物理学的发展,打破了原子是绝对不可分和永远不变的古老观念,使人类对物质的认识从宏观世界向原子内部的微观世界不断深入。原子核物理学的建立导致电离辐射计量的出现。1923~1926年间,德布罗意、薛定谔等青年物理学家发现,电子和一切物质粒子都和光子一样,表现为波动性和粒子性的对立统一,建立了物质波理论,由此建立起完整的量子力学体系。量子力学与电子学相结合,使人类进入第三次技术革命时期。现代科学技术,如原子能、电子计算机、半导体、激光、超导、宇航等新技术的应用,不但使计量科学进入量子计量学的新阶段,而且大大提高了测试精度和扩大了计量范围,激光干涉技术的应用、原子频标的研制、光功率的绝对测量、电单位的复现、温度的客观测量,以及光电转换、力电转换、磁光效应、量子干涉器件等等的发展和微处理机的应用,不但推动了米、秒、坎德拉等基本单位的重新定义,而且促进了一系列新的检测手段的出现。在许多物理效应相继为人们认识后,计量科学迅速地加以应用。例如,应用多普勒效应,即运动物体发射或反射的波的频率变化与物体运动速度成正比这一物理现象,可以测量毫秒级以至微秒级的瞬时加速度。又如应用某些物质在低温下电阻“消失”的超导现象,人们选择其中某些物质的临界温度作为固定点测温。电子隧道效应和量子化霍尔效应的发现,为计量学家提供了有效的绝对测量电压和电阻的手段。

物理学与计量科学相结合,使许多物理常数的精密测量成为可能。在光频率精密测量的基础上获得光速 C 值,准确度提高了两个数量级,从而使相对论的验证有了可能。阿伏伽德罗常数 N_A 的测量,使计量基本单位摩尔的复现变成现实。玻耳兹曼常数 k 的测量,确定了气体动能与温度间的正比关系。吴健雄博士也正是通过精密测量,用实验

方法验证了李政道、杨振宁所提出的弱相互作用下的宇称不守恒理论。

大量事实说明, 计量科学随着物理学的发展而发展, 又反过来推动物理学和其他学科向前发展。

现代科学技术有两个重要的发展趋势: 一是研究的领域向宏观和微观世界两端延伸, 二是实验工具和理论方法的现代化, 这两者都需要精密的计量测试技术。由于物理学是一切自然科学和工业技术的基础之一, 所以物理量单位和各种物理参数已经成为工业技术的主要性能特征, 产品质量的优劣、科研成果的数据都以物理量来表达。化学和物理学的发展休戚相关, 化学有自己的单位和原理、公式, 但化学产品和研究数据最终仍要由物理参数来表示。计量学正是复现物理量单位、统一量值、发展物理参数测量方法的一门科学, 因此它成为物理学和工业技术、科学实验的纽带, 是一切自然科学、工业生产、内外贸易以至人民生活等各个领域的技术基础, 这是计量科学技术的主要实践意义。

第五节 工作内容

如前所述, 计量科学技术的根本任务是通过统一量值和发展精密测试技术, 以保证质量、实现生产的社会化和保证科学研究的可靠性和连续性。为了完成这个任务, 它的工作内容概括起来包括如下四个方面。

1. 不断完善计量单位制。计量单位的采用和单位制的形成是经历过漫长的过程的。CGS单位制和MKSA单位制是国际上最初采用的计量单位制。与此同时, 英制也广为流行, 许多国家还有自己的单位制。随着科学技术的进步, 特别是国际贸易的扩大, 一个统一的国际单位制和对单项物理量单位的科学定义, 已成为世界各国的共同要求。1875年, 十七个国家在巴黎签订了米制公约, 建立了国际计量委员会和国际计量局, 当时决定以铂铱合金米尺和铂铱合金砝码作为国际上公认的米原器和公斤原器, 以便统一长度单位和质量单位的量值。自此以后, 各国的计量科学家进行了大量的研究工作。一百多年来, 经过不断的补充和积累, 通过各国科学工作者的反复论证, 在科学研究的基础上, 不断地完善和修改某些单位的定义, 形成了今天的国际单位制(SI), 这是更加成熟的米制。在SI中, 明确规定了七个基本单位的科学定义。例如: 1960年第11届国际计量大会废除了铂铱合金米尺, 在各国研究的基础上, 改用氪-86原子在 $2P_{1/2}$ 和 $5d_5$ 能级跃迁时, 在真空中的辐射波长来定义米, 实现了从实物基准向自然基准的过渡, 并把“米”的复现精度从 $\pm 1 \times 10^{-7}$ 提高到 $\pm 4 \times 10^{-9}$, 满足了当时科学技术和工业生产的需要。随着稳定激光和光频测量研究工作的进展, 1983年第17届国际计量大会又通过了新的米定义: “1米是光在真空中于 $1/299792458$ 秒的时间间隔内行程的长度”。又如时间单位“秒”, 从前是用地球自转或公转的时间分度定义的, 称为天文时。随着量子计量学的发展, 1968年第13届国际计量大会决定, 改用铯-133的 F_3 与 F_4 能级跃迁所对应的频率来定义“秒”, 称为原子时, 从而使秒的复现精度从 10^{-9} 量级提高到 10^{-14} 量级。

现在, 参加米制公约的成员国有46个, 而宣布承认SI的国家则达到100多个。当然, 宣布承认是一回事, 如何在本国范围内把这个单位制推行下去则是另一回事。英美等国早已承认米制, 但迄今仍在大量使用英制。我国于1977年参加了米制公约, 1984年由国

务院发布命令,规定到1990年前,除农村土地丈量外,统一实行法定计量单位。为此,计量科技工作者有大量的技术工作要做,不但要在国内为推行法定计量单位方面作出努力,而且要对国际单位制的进一步完善和发展作出应有的贡献,进行许多长期性的研究工作。

2. 按照规定的定义,研究、建立复现物理量单位的计量基准和原始标准,并把基准量值传递下去,这是计量科学技术最基本的工作内容。在单位的定义中,规定了复现定义的技术条件,但未规定复现定义的误差大小,后者是各国根据自己的技术水平来决定的。例如用氪-86波长复现“米”的准确度,西德和美国是 $\pm 4 \times 10^{-9}$,其他各国一般为 $\pm 1 \times 10^{-8}$,我国也为 $\pm 1 \times 10^{-8}$ 。17届计量大会通过新的米定义后,同时推荐了五种稳频激光波长作为复现米定义的参考。各国对这五种激光的研究情况各不相同,有的国家正在研究新的谱线。复现“秒”定义的铯束频率基准,美国、西德均达到 10^{-14} 数量级,加拿大为 $\pm 1 \times 10^{-13}$,而我国仅达 $\pm 8 \times 10^{-13}$ 。关于“摩尔”的复现,美国NBS达到 10^{-7} 水平,其他几个国家正在研究,我国还未动手。但光度单位“坎德拉”的复现,我国已经走在前面,提出了按新定义的复现数据,有的国家正在进行。

3. 量值传递标准器具和专用测量装置的研制。如标准电阻、标准电池、渐开线样板、标准活塞压力计、标准加速度计、密封型小铯钟、微量热计等等标准器具,和各种比长仪、电桥、感应分压器、温度定点炉等测量装置,都是量值传递时必须具备的条件。至于大量应用的通用仪器仪表,包括一次检测元件和二次仪表,如各种数字电压表、频谱仪、分光光度计、力值传感器、光电二极管、万能工具显微镜、各种热电偶等等,更是生产和科研中不可缺少的工具。随着计量精度的不断提高和量程的扩大、项目的增多,不但通用仪器仪表要不断改进提高,新型测量设备的开发更加迫切,如网络分析系统、数据采集系统、各种智能仪器、宽频段的频率综合器、三坐标测量机、新型电阻温度计等等,是推动电子工业、仪器仪表工业不断发展的重要方面。有一些专用计量装置和标准器具,是市场上的通用产品无法满足的,必须由计量科技人员根据测量方法的不同,提出新的设计原理和技术方案加以研制。一旦试制成功,一项具有新技术特色的新产品就开发出来。这既有利于企业产品的更新换代,又有助于进一步满足人类的需要。

4. 研究推广正确的测量方法和制订检定规程,包括为获得准确量值必须遵守的操作方法、环境条件、数据处理方法等。由于在不同的应用条件下各物理参数的测量方法也不同,而且随着新技术的发展,检测方案和手段也在发展。例如不同材料的砝码在相互比较时,应进行空气浮力的修正。成象光学系统的象质,从前用星点法只能定性测量,现在应用传递函数法则不但可以定性,而且可以定量测量。如前所述,各种物理参数已成为工业产品的性能指标和科研成果的主要标志,所以,计量科学技术日常工作的大量内容是正确的测量方法的研究和应用。各国计量机构都在大力发展精密测试技术,并且进一步扩展到产品质量的直接检测中去,特别是生产自动化和电子计算机的发展,把生产流程中的自动控制和计量测试、质量检测融合到一起,构成了完整的质量管理体系和质量保证系统。

综上所述,不断地完善计量单位制、复现各种物理量单位、研制新的计量标准器和测量装置、制定检定规程进行量值传递、发展新的测量方法、研究专业理论和误差理论,这些是计量科学技术的主要工作内容。

第二章 计量测试在国民经济中的作用

第六节 经济效益和社会效益

计量工作是技术和管理的统一、作为科学技术的组成部分它属于生产力的范畴,但其法制性和相应的组织管理工作又有生产关系的属性。国际上米制公约的签订和国际单位制的推行,都需要各国政府的承诺和立法,因为它对国际贸易和学术交流的发展起着保障作用。我国历史上度量衡的统一,对国家的统一曾起过一定的推动作用。即使现在,管好商品交换中的计量器具,对于维护党和政府与人民群众的密切关系也具有重要作用。十年动乱期间,商业系统中短斤缺两、度量衡器具不准的情况,引起群众的极大不满。粉碎四人帮后,经过五查整顿,当发现商用衡器和量器严重失准时,不但通过报纸、广播进行批评,而且责成有关部门赔偿群众的损失,这在群众中引起强烈的反响,一致拥护党和政府的正确决定。在西方资本主义国家中,由于生产资料的私有制,其工业生产和科学研究中的量值统一,政府不作立法规定,而靠相互竞争来自动调节。但在国防系统,在和消费者利益有关的以及与社会安全有关的计量器具,则都由政府制订法令,进行严格的现场检查,他们称之为法制计量 (Legal Metrology)。这是计量工作具有生产关系属性的实例。

在工业生产和科研单位中,计量部门是以提供计量保证起作用的。所谓计量保证,是指在生产系统中,通过发展精密测试技术和制订标准技术文件、组织措施等,在保证量值统一的条件下达到必要的测量准确度,以此保证产品(包括工艺过程)质量的提高、数量的增加、成本的降低,从而创造出更大的经济效益。整个国家的建设,是一个错综复杂的巨大的系统工程,有人把国民经济比作一个大的网络,有纵有横,计量工作是贯穿各行各业面向全社会服务的横向基础网络之一,是社会经济活动赖以顺利进行的基本手段和纽带。计量管理的基础是计量科学技术,运用计量科学技术手段实施国家的有关法令政策。计量科学技术的最终产品是数据或者用数据表达的信息。现代生产活动和科学管理一切都需要科学的数据。在一个企业里,从原材料进厂、加工、性能试验,直到产品出厂,包括燃料、动力的消耗等,都有各种物理参数测量和化学分析的要求,如果没有计量科学技术来提供各个环节中准确一致的数据信息,就无法对企业实行全面质量管理、全面能源管理和全面经济核算,从而得不到应有的效益。这种实例是大量的。多方面的实践经验都说明了这个问题,因篇幅限制仅举一小部分例子如下。

(1) 武汉钢铁公司的硅钢片厂在试生产时,由于一个简单的压力计信号不准,造成连续七次停火。冶金部曾对武钢七十年代引进的三套轧机和国产三套轧机对比,发现

计量检测仪表的数量引进轧机是国产的10倍。对国产轧机的技术改造问题深入研究后，感到突出的问题是选择合适的计量测试仪表。可见，要实现钢铁生产现代化，实现钢铁工业技术改造，基础是计量检测仪表和检测技术的现代化，然后才是自动化和采用新的工艺技术。

陕西钢厂曾是一个长期的亏损单位，主要原因之一就是能源消耗不计量。几台冶金炉使用重油燃料时靠人工控制，工人担心油量不足火不旺，总是加到最大量，致使油燃烧不彻底，黑烟滚滚，既耗了油，又造成环境污染。后来安装上计量仪表，找到了加油量的最佳点，并改由仪表自动控制，既节了油，又提高了炼钢效率，减少了污染。该厂不久即出现了扭亏增盈的新局面。

包钢也有类似情况，其焦化厂仅进厂原煤一项，过去由于缺乏计量手段，一年损失即达120万元。

攀枝花钢铁公司1979~1980年直接用于计量工作的投资150万元，其结果是提高了产品质量、节约了能源，仅1980年就节约2600万元。

天津玛钢厂从计量测试入手，先后对13台主要设备进行了热平衡测试，取得了7000多个数据，按此算出能源利用率，找到了能源使用规律，为该厂制订能源规划、改进工艺设备提供了科学依据。1980年改用退火新工艺，安装上测温仪表，选择最佳控温部位，减少热损失，使窑温由原来的300°C降到100°C，退火时间由60小时减到35小时，热效率从8.6%提高到12.1%，1981年第四季度三个月内，即节煤457吨，节电6500多度，全年为国家多换取了220万美元的外汇。

(2) 在全面质量管理中，计量测试是个起始点，它起着反映质量好坏、控制工艺参数和通过反馈进行调节的作用。根据计量仪表检测出的信息，生产人员和科技人员可寻找出工艺最佳值，提出改进方法，然后反馈到控制点，这样才能在生产流程中提高质量、提高劳动生产率、减少损失。

沈阳电缆厂从1978年生产中使用圆铝锭，每年消耗4万根铝锭。起初由于管理不善，电缆铝护套大量漏气，半年就损失近100万元，几乎停产。后来研制成功两种铝熔液测温装置，严格控制浇铸温度，并设立超声探伤点，严格控制质量差的铝锭进入压铝机，又加强了定性和定量分析，使用标准物质进行检查，从而解决了护套漏气问题，合格率从(15~20)%提高到85%，漏气率从70%降到5%。

深圳计量所在砖厂土围窑和轮窑上安装热电高温计、风量风压计等，并使用光学高温计和快速测温枪控制窑温，经过几个月的实测，得到烧砖过程中的温度、压力、流量等数据9200多个，据此画出了正确的温度曲线，制订了烧砖工艺操作标准，使轮窑机砖的质量由原35号上升到150号，正品率由92%提高到98%以上，产量增加13%，能耗降低20%，并且，通过测试成功地利用低品位劣质煤掺加30%的煤矸石粉作燃料，节煤(20%~30%)，仅两座小型窑全年就增加收入16.7万元。

用我国研制成功的500吨力标准测力机，于1982年为葛州坝工程检测了一台500吨力材料试验机。通过测试，将该机精度调整提高了一倍。这台材料试验机用于测量钢材、混凝土力学性能，是保障大坝安全的关键设备，在推广应用新材料、新工艺中有重要作用。通过这台经过标定和调整的试验机证实了“水钙减水剂”新工艺的可行性，仅推广