

- 123030

TK31
2132

高等学校教材

热工参数测量及仪表

华北电力学院 何适生 主编

水利电力出版社

内 容 简 介

本书介绍生产过程检测技术的基本理论和知识，较详细地阐述了典型传感器、变换器和显示仪表的工作原理、特点及测量中的附加误差问题，以期读者提高认识和分析日益更新的仪器的能力，并能更好地理解有关规程、标准和产品说明书。

书中提供的一些计算公式和图表，例如常用热电偶的(测量端温度求热电势)的计算公式、设计节流装置的迭代计算等，可供实际工程应用参考，尤其当采用计算机计算时很有参考价值。

本书除可用作有关专业“热工检测技术”课程的教材外，也考虑到供现场人员参考和自学者的需要，增加了较多的插图。



前 言

原水电部热工仪表与自动控制教材编审小组扩大会议对《热工测量》一书进行了评议，决定该书重编出版，并建议改名为《热工参数测量及仪表》。

根据评议和读者意见，全书总的系统未变，增加了显示仪表一章（即第三章），重写了其余各章，全书插图有所增加。为便于自学，重编了练习题、参考资料，并按章列写。

本书第四章、第五章由上海电力学院潘绍基同志编写，其余各章仍由《热工测量》一书的原编者讨论编写。

东南大学龚家彪教授审阅了本书稿，对编写提出了全面的指导和详细的修改意见；国家技术监督局何开茂高级工程师对绪言和第一章，西安交通大学陈焕生副教授对第二章，浙江大学许冀森副教授对第七章分别提出了宝贵的改进意见；水电出版社顾希衍副编审为提高书稿质量付出了辛勤的劳动。我们在此一并表示感谢。

由于我们水平有限，实际经验不足，对审阅和编辑的意见考虑不周，还请读者对本书错误和不妥之处批评指正。

编 者

1989年6月

《热工测量》前言

本书是根据原水电部1978年4月召开的“热工测量与自动化专业教学计划和教材会议”的决定编写的，作为本专业“热工测量”课程的教材。全书着重阐述热工测量技术方面的理论和知识、传感器的原理与使用以及测量过程中的误差分析等。对于通用的显示仪表，则仅作简要介绍。

书中提供了某些传感器的计算方法和图表（例如根据国际建议规范和国标草案编写的节流装置计算用图表），便于读者查用，也可供实际工程设计计算时参考。为了帮助读者学习，书后附有一些习题。

全书由华北电力学院热自教研室何适生（主编）、胡茗显和谢积宝编写。书稿经南京工学院龚家彪副教授全面审阅，提出了建议和意见，并得到其他一些同志评阅，在此一并致谢。

由于编者水平所限，不妥及错误之处恳请读者批评指正。

编者

1980年5月

目 录

前言

《热工测量》前言

绪论	1
练习题	3
参考文献	3
第一章 测量技术概论	4
1.1 测量的基础知识	4
1.1.1 测量器具(4) 1.1.2 测量单位(5) 1.1.3 量值传递中测量器具的关系(6) 1.1.4 误差(6) 1.1.5 测量方法(7)	
1.2 仪器的组成和分类	9
1.2.1 仪器的组成(9) 1.2.2 热工测量仪器的分类(12)	
1.3 测量的误差和不确定度	14
1.3.1 测量误差的来源(14) 1.3.2 误差的性质(11) 1.3.3 精密性、正确度和准确度(15) 1.3.4 不确定度(16)	
1.4 随机误差的统计处理	16
1.4.1 随机误差的分布(17) 1.4.2 由样本估计真值和标准偏差(21)	
1.5 坏值的剔除	27
1.5.1 格拉布斯检验法(27) 1.5.2 狄克逊检验法(28) 1.5.3 检验方法的选择(29)	
1.6 系统误差	31
1.6.1 定值系统误差(31) 1.6.2 变值系统误差(31) 1.6.3 系统误差的消除(32)	
1.7 间接测量中量值的估计(误差的累积和分配)	33
1.7.1 间接测量中系统误差的估计(34) 1.7.2 间接测量中随机误差的估计(34) 1.7.3 误差的分配(35)	
1.8 测量不确定度的估计	35
1.8.1 不确定度的估算(36) 1.8.2 不确定度的合成(37)	
1.9 仪器的质量指标	40
1.9.1 仪器的性能(40) 1.9.2 仪器质量指标简介(41)	
1.10 测量器具的检定	46
1.10.1 示值比较检定法(46) 1.10.2 标准物质法(47)	
练习题	47
参考文献	48
第二章 温度测量	49
2.1 测温的物理基础	49
2.1.1 温度和测温(49) 2.1.2 温度计(49) 2.1.3 温标(54)	
2.2 热电偶测温的物理基础	56
2.2.1 热电现象(56) 2.2.2 热电偶测温回路的基本法则(59) 2.2.3 参比端温度的处理(66)	
2.3 热电偶温度传感器的种类及结构	71

2.3.1热电极材料和热电偶种类(71)	2.3.2标准化热电偶(74)	2.3.3尚未标准化的热电偶(77)	2.3.4普通工业热电偶的结构(79)	2.3.5铠装热电偶(83)	2.3.6热电偶的误差(86)	2.3.7热电偶测温的基本电路(86)	
2.4	电阻温度传感器						88
2.4.1	电阻测温的原理和基本参数(89)	2.4.2	电阻温度传感器的材料和结构(91)	2.4.3	热电阻测温的误差源(94)		
2.5	接触测温方法讨论						96
2.5.1	温度传感器的导热引起的测温误差(97)	2.5.2	温度传感器的辐射换热误差(99)	2.5.3	高温气体的温度测量(102)	2.5.4	表面温度测量(105)
2.5.5	高速气流温度测量(108)						
2.6	辐射测温仪表						109
2.6.1	辐射测温的物理基础(110)	2.6.2	辐射测温仪表分类(116)	2.6.3	光学高温计(116)	2.6.4	光电高温计(120)
2.6.5	全辐射高温计和部分辐射高温计(122)	2.6.6	比色高温计(125)				
2.7	测温仪器的检定						127
2.7.1	比较法检定(127)	2.7.2	定点法检定(127)	2.7.3	工业热电偶的校验(128)	2.7.4	工业热电阻的校验(130)
2.7.5	温度计检定的自动化问题(131)						
	练习题						132
	参考文献						134
附录	热电偶分度公式、分度表及热电阻分度表						135
	附表2-1 铂铑10-铂热电偶分度关系式(135)	附表2-2 铂铑13-铂热电偶分度关系式(136)	附表2-3 铂铑30-铂铑6热电偶分度关系式(136)	附表2-4 镍铬-镍硅热电偶分度关系式(137)	附表2-5 镍铬-铜镍热电偶分度关系式(137)	附表2-6 铁-铜镍热电偶分度关系式(138)	附表2-7 铜-铜镍热电偶分度关系式(139)
	附表2-8 铂铑10-铂热电偶分度表(140)	附表2-9 铂铑13-铂热电偶分度简表(143)	附表2-10 铂铑30-铂铑6热电偶分度简表(143)	附表2-11 镍铬-铜镍热电偶分度表(144)	附表2-12 铁-铜镍热电偶分度简表(146)	附表2-13 镍铬-镍硅热电偶分度表(146)	附表2-14 铜-铜镍热电偶分度简表(149)
	附表2-15 镍铬-考铜热电偶分度简表()	附表2-16 标准化热电阻分度简表					
第三章	显示仪表						151
3.1	动圈式显示仪表						151
3.1.1	动圈式仪表测量机构的工作原理(151)	3.1.2	表内电路(154)	3.1.3	动圈式仪表的特性(156)	3.1.4	动圈式仪表与传感器配用举例(158)
3.2	电桥						160
3.2.1	平衡电桥(161)	3.2.2	不平衡电桥(165)				
3.3	平衡式模拟仪表						169
3.3.1	电位差计(169)	3.3.2	自动平衡仪表(171)				
3.4	数字式显示仪表						177
3.4.1	数字仪表的原理框图和性能(178)	3.4.2	数字测量系统中的转换(181)	3.4.3	数/模转换(D/A转换)(183)	3.4.4	模/数转换(A/D转换)(185)
3.4.5	数字电压表举例(192)						
	练习题						194
	参考文献						195
第四章	压力测量						196
4.1	概述						196
4.1.1	机械式压力仪表(196)	4.1.2	电气式压力传感器(196)				
4.2	液柱式压力计						199

4.2.1液柱式压力计的工作原理和基本结构(199)	4.2.2一些变型的液柱式压力计(200)	4.2.3液柱式压力计的误差分析(201)
4.3 弹性压力表	204	
4.3.1弹性元件(204)	4.3.2弹簧管压力表(208)	4.3.3 波纹筒式压差计(211)
4.4 压力表的选择和安装	214	
4.4.1压力表的选择(212)	4.4.2测压系统的安装(214)	
4.5 弹性元件机械位移的远传方法	215	
4.5.1电感式位移变换器(215)	4.5.2电容式位移变换器(222)	4.5.3力平衡式位移变换器(329)
4.5.4振弦式位移变换器(230)	4.5.5应变式压力传感器(233)	
练习题	242	
参考文献	242	
第五章 液位测量	243	
5.1 概述	243	
5.2 连通器式液位计	244	
5.2.1双色水位计(246)	5.2.2电接点水位计(247)	
5.3 压差式水位计	249	
5.3.1简单平衡容器(250)	5.3.2平衡容器的改进(251)	5.3.3在“压差-水位”关系中引进密度校正 (255)
练习题	256	
参考文献	256	
第六章 流量测量	257	
6.1 概述	257	
6.1.1 流量和总量(257)	6.1.2 流量的测量标准(257)	6.1.3 流量测量方法(259)
6.1.4 常用流量计简介(260)		
6.2 测量流量的速度-面积法	262	
6.2.1平均流速(262)	6.2.2选点测速法(763)	6.2.3整流器(266)
6.3 动压测量管用于测量流量	267	
6.3.1动压测量管原理简述(267)	6.3.2基本型皮托管(268)	6.3.3动压平均管(又称为阿纽巴管、笛形管)(271)
6.3.4动压-文丘利管(275)		
6.4 节流流量计	279	
6.4.1概述(280)	6.4.2流量公式——节流装置输入-输出的关系式(282)	
6.5 节流装置的类型和结构	286	
6.5.1节流装置的类型和一般技术要求(286)	6.5.2孔板(或称同心圆孔板)(288)	6.5.3喷嘴(292)
6.5.4文丘利管(293)	6.5.5节流装置的性能(295)	6.5.6节流装置流量公式中的主要系数(296)
6.6 节流装置的计算	302	
6.6.1节流装置的设计计算(302)	6.6.2节流式流量计不确定度的计算(306)	6.6.3流体参数偏离节流装置设计值时的校正(310)
6.7 节流装置用显示仪表——压差计	313	
6.7.1节流式流量计的量程(313)	6.7.2压差信号的开方(313)	6.7.3由流量求总量——积算器(314)
6.7.4节流式流量计的安装(316)		
6.8 特殊节流装置	319	
6.8.1用于低雷诺数的节流件(319)	6.8.2用于脏污介质的节流件(314)	6.8.3进口流量喷嘴(326)
6.8.4临界流文丘利喷嘴(327)		

6.9 其他流量计简介	329
6.9.1 流体振动流量计(329) 6.9.2 涡轮流量计(330) 6.9.3 质量流量计举例(332)	
练习题	334
参考文献	335
附录 节流装置计算用表与图	336

附表6-1常用金属材料的线膨胀系数(336) 附表6-2水和水蒸气的动力粘度($\eta \times 10^4 \text{Pa} \cdot \text{s}$)(337) 附表6-3水和水蒸气密度(338) 附表6-4管道内壁绝对平均粗糙度的参考值(342) 附表6-5压差计的基本特性(342) 附表6-6角接取压孔板的流出系数 C (344) 附表6-7ISA1932喷嘴的流出系数 C (346) 附表6-8长径喷嘴的流出系数 C (347) 附表6-9文丘利喷嘴的流出系数 C 和流量系数 α (388) 附表6-10古典文丘利管的流出系数 C (348) 附表6-11标准孔板和喷嘴对管道粗糙度的原始校正系数 r_0 (348) 附表6-12喷嘴、文丘利喷嘴和古典文丘利管的流束膨胀系数 ϵ (349) 附表6-13孔板、喷嘴和文丘利喷嘴要求的上、下游最小直管段长度(350) 附表6-14古典文丘利管要求的上游最小直管段长度 l_1/D (352) 附表6-15在节流装置上游 $1D$ 处流速分布不符合标准要求时的修正倾向(352)

附图6-1角接取压标准孔板的流束膨胀系数 ϵ (353) 附图6-2ISA1932喷嘴、文丘利喷嘴和古典文丘利管的流束膨胀系数 ϵ (354) 附图6-3一些节流装置的压力损失(355) 附图6-4设计计算 β (或节流件孔径 d)时的步骤框图(356)

第七章 生产过程物质成分分析仪表	357
7.1 过程分析仪表概述	357
7.1.1 过程分析仪表的组成(357) 7.1.2 常用过程分析仪表分类(358)	
7.2 锅炉烟气成分分析	358
7.2.1 奥氏分析器(359) 7.2.2 热导式 CO_2 分析仪(359) 7.2.3 磁性氧量分析器(361) 7.2.4 氧化锆氧量分析器(365) 7.2.5 燃烧式 CO 分析器(372) 7.2.6 工业用红外线气体分析器(373) 7.2.7 烟气分析仪器的测点选择和取样处理(377)	
7.3 热导式氢分析仪	379
7.4 电导式分析仪	380
7.4.1 电解质溶液的电导(380) 7.4.2 电导式分析仪的传感器——电极室(382) 7.4.3 溶液电导的测量(384) 7.4.4 取样和样品的预处理(388)	
7.5 色谱仪	388
7.5.1 气相色谱仪的构成系统(389) 7.5.2 色谱仪的分离系统——色谱柱(390) 7.5.3 成分检测器(391) 7.5.4 色谱仪的定性和定量分析方法(392)	
7.6 水中溶氧表	395
练习题	396
参考文献	397
索引	398

绪 论

测量工作是对各种事物定量的技术工作。由此人们得到所需信息，并用来作为科技、生产等活动的依据。国民经济活动中，时刻在进行着大量测量。测量技术的水平，对科技工作和现代化生产以及贸易、环保、运输安全和医疗质量等，都有直接的影响。

各部门的科技工作和生产工艺虽然千差万别，但需要测量的量可以归纳为不多几种。比如：长度、时间、速度等属于空间和时间的量；质量、密度、压力、流量等是力学量；温度、热量、热容等是热学量；电流、电压、磁场强度、互感等则是电学和磁学量；还有周期及有关现象的量，光及有关电磁辐射的量，声学的量，物理化学和分子物理学的量，原子和核物理学的量等。这些量一般说并无行业的界限，以“温度”为例，在电力、冶金、化工、医疗、食品等行业中都经常遇到，需要测量，这体现了测量技术的“通用性”。但是在测量同一种量时，由于条件的不同，会使采用的测量方法、测量器具和测量系统等不完全一样，甚至差异很大，这是测量技术的“特殊性”。仍以测量“温度”为例，可能是物体表面、火焰或高速气流等不同对象的温度，还会有高温、中温或低温等不同范围，对测量准确度的要求也可能有区别，等等。总之，我们应注意测量技术的共性和个性两方面。

测量技术的发展，逐渐形成了测量技术工作的专业化分工。在我国大致可分为计量、仪器制造和应用三个方面。它们紧密依存、互相促进。

(1) 计量。 计量是一项极重要的基础技术。计量部门的主要任务是贯彻国家法定的计量单位制，研究建立、复制、保存基准器具和标准器具，并进行传递；研究精密测量方法、器具和误差理论；颁布计量法规，管理监督国内测量器具；研究确认标准物质；参与国际有关计量的工作（如统一量值等）。

(2) 仪器制造。 仪器制造行业生产供应各类定型仪器、量具和附件；研制新的器材和测量器具，为测量工作提供物质基础。

(3) 应用。 就是在生产和科技中具体组织测量活动，以获得所需的可靠数据和信号。在现代化企业中测量技术是推行全面质量管理的必备手段，提高测量技术的水平也是改善安全条件、增加经济效益的重要措施。随着企业的规模和技术密集度增高，生产中需要监督的参数和“测点”数目不断加多，因此测量工作本身的自动化水平也应提高。如巡检、自动检定和微机化仪表等的发展，就是测量自动化的例子。

计量和仪器制造两个部门更多注意测量技术的通用性，而应用部门则要在测量技术的特殊性方面多下功夫。应当注意，生产或科研中不断提出各种新的检测要求是测量技术发展的动力。同时，科技生产水平的提高，又为测量技术的发展准备了理论和物质基础。

热工测量技术（又称热工检测技术）原则上是指对压力、温度等热力状态参数的检测。但在伴有热力过程各类生产中，热工测量工作部门负责的测量工作，还常包括流量、料位、成分、振动和转速等参数的测量。

火力发电厂的生产是典型的热力过程之一。发电厂的连续、安全、经济生产和产品质量，靠监测和控制来保证。测量是控制系统的主要组成部分。图0-1的框图表示热力生产过程控制系统中热工测量的地位。可以看出，测量部分是控制系统的“感觉”环节，它的输出信号是自动调节、程序控制、热工信号和连锁保护的依据。热工测量也提供事故分

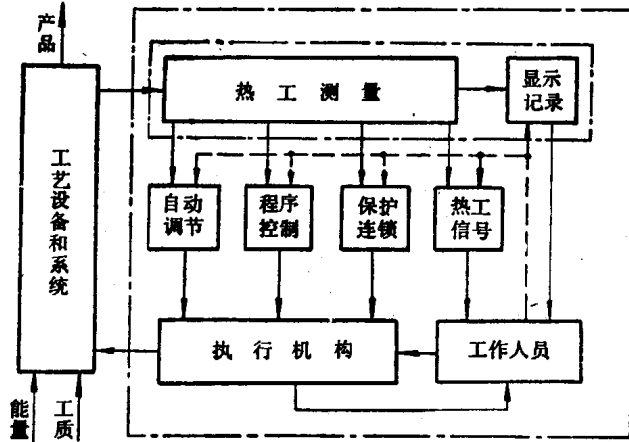


图 0-1 热力生产过程控制系统的组成框图

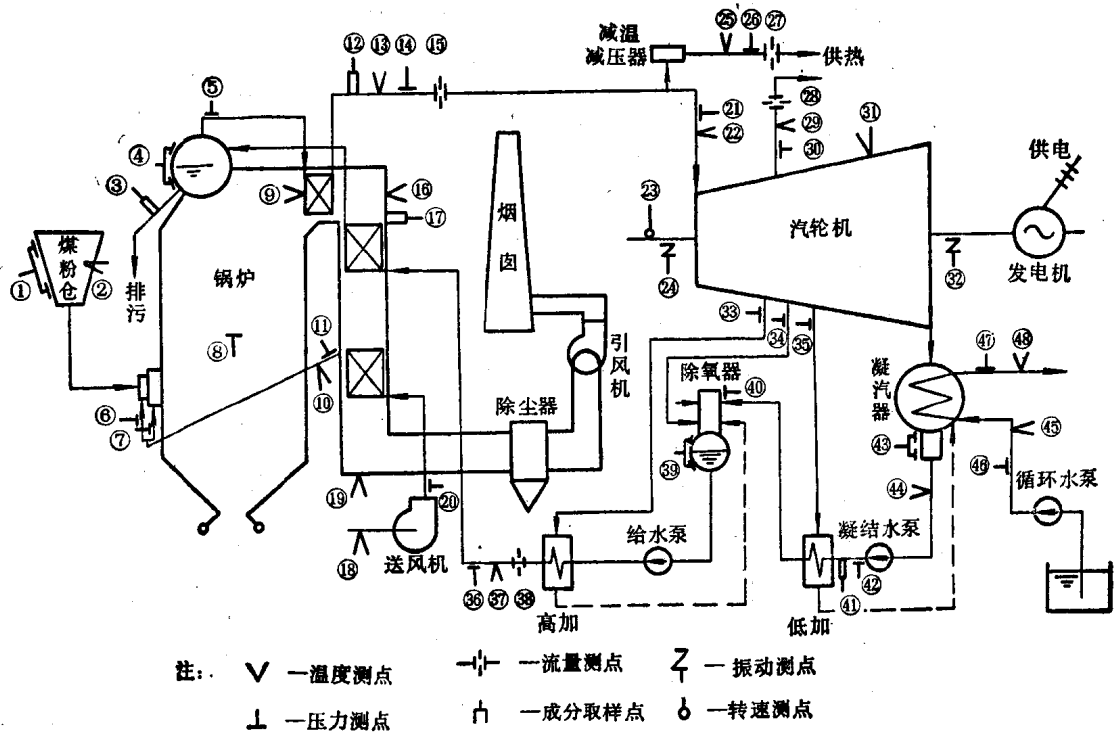


图 0-2 火力发电厂机炉系统示意和测点举例

①、④、⑭、⑮—料位测点；②、③、⑥、⑧、⑩、⑪、⑫、⑬、⑯、⑰、⑱、⑲、⑳、㉑、㉒、㉓、㉔、㉕、㉖、㉗、㉘、㉙、㉚、㉛、㉜、㉝—温度测点；⑨、⑫、⑰、⑳—成份分析取样点；⑤、⑥、⑦、⑧、⑩、⑪、⑬、⑭、⑮、⑯、⑰、⑱、⑲、⑳、㉑、㉒、㉓、㉔、㉕、㉖、㉗、㉘、㉙、㉚、㉛、㉜、㉝—压力测点；⑫、⑲、㉑、㉒—流量测点；㉑—转速测点；㉑、㉒—振动测点

析、经济核算和运行改进等技术管理工作所需的原始资料。测量工作的水平直接关系到控制质量，对劳动条件的改善、设备寿命的延长和劳动生产率的提高都有影响。

生产过程中，测量取样点遍布各设备上。图0-2以锅炉、汽轮机系统为例给出了测点概况。当然，实际测点要比图中所示的多得多，据统计，200MW机组的测点数约为600点。按照工艺过程的需要，采集的信号可作不同处理，以适应不同用途。例如，测量汽包水位（测点④），作为调节给水量的主信号，又是保证安全生产的重要信号；测量主蒸汽的含盐量、温度、压力和流量（测点⑫、⑬、⑭、⑮）是为监视中间产品的质量 and 数量；测量排烟温度（测点⑰）对了解经济性和尾部受热面是否结露有参考作用。

过程热工测量技术工作的内容主要是：设计测量系统（例如与工艺专家一起确定应监视的参数、测点数量和位置、要求的准确度；除显示外是否要记录、报警等）；按照要求选择成套仪表；设计监控盘台；安装测量器具；调试测量系统并投运；对热工测量设备、系统和方法等进行维修、检定和改进。

练 习 题

0-1 什么是热工测量？热工测量工作的意义是什么？热工测量工作的内容大致包括哪些方面？

0-2 按图0-1简述人们如何控制生产过程？

0-3 说明图0-2中各测点的监视内容、作用和要求。

0-4 请调查了解电力部门的设计院、安装公司、热电厂和科研单位中有关热工测量工作的内容和组织。

参 考 文 献

[0-1] 龚家彪，热工测量和仪表，中国工业出版社，1961年。

[0-2] 水利电力部生产司，火力发电厂技术管理参考手册 第八分册 热工仪表与自动装置的管理，水利电力出版社，1960年。

[0-3] 能源部电力规划设计院，火力发电厂热工自动化设计技术规定，NDGJ16-89，水利电力出版社，1989年。

第一章 测量技术概论

1.1 测量的基础知识

物质、现象和物体的可以定性区别并能定量确定的属性称为量。量可以泛指如质量、温度、压力、电阻等，也可能特指如一个容器内的压力、一段导线的电阻或某段铂丝的电阻。也常称量为参数。

测量是以确定量值为目的的一系列操作。关键步骤在于实现被测量与测量单位的比较，以获得比值（数值）。测量结果得到量值——数值和单位的乘积。我们把受到测量的量称为被测量，而被测量所属的现象、物体或物质叫做被测对象。设被测量为 X ，选取的单位为 U_x ，则

$$X = AU_x \quad (1-1)$$

式中 A ——纯数，当 X 一定时 A 的大小由单位决定，即 $A = X/U_x$ 。

绝对完善地确定的量值称为真值，即 AU_x 真正代表 X ，才有式（1-1）的恒等式，这是理想情况。因为实施测量时，涉及许多方面，如测量方法、原理、操作、设备和环境条件等，都不可能是完善的，所以量值只能或好或差地近似被测量，即测量结果 $x = aU_x$ 总带有误差 δ ，可表示为

$$X \approx aU_x \quad (X = x - \delta), \quad (1-2, a)$$

或
$$X = aU_x - \delta \quad (1-2, b)$$

式中 a ——纯数，含有测量误差， $a \approx X/U_x$ 。

被测量、单位和二者的比值等都是测量过程的信息。信息只有依托于物质才能在空间和时间上进行传递、比较和显示等处理。被测量作用到实物上，使其参数发生变化，我们就说被测量调制了这些参数，或者说参数承载了信息而成为信号。选择其中恰当的参数作为仪器的工作参数，就称为测量信号。（即确定了仪器的工作原理——仪器“转换”信息所依据的物理效应）。例如玻璃管液体温度计的工作参数是毛细管中的液柱长度。

测量过程就是仪器从被测对象提取被测量的信息，建立起测量信号，经过变换、传输、比较和显示等处理，从而获得被测量的量值。综上所述，任何测量都要确定单位，选择测量器具，研究测量方法，设计测量系统和进行正确操作，最后还要判断量值的可靠程度。

1.1.1 测量器具

测量器具是一些专门的技术装置，它能输入被测量，输入或预先存贮好单位信号，实现被测量与单位的比较，输出比值，以一定准确度给出量值。测量器具包括量具、仪器和附件。

（1）量具。量具是以固定形态复现单个或多个已知量值的测量器具，如砝码、尺、

标准电池、温度灯、标准信号发生器等。

(2) 仪器。仪器是将被测量转换成指示值或等值信号的测量器具。其关键功能是转换以及实现被测量与测量单位的比较方式和机构。它们对仪器性能有极大影响。测量仪器的例子，如天平、压力计、钟表、热电偶、电桥、电位差计等。

测量器具中还包含一些附件，被用来扩展量具和仪器的功能或提高其性能。例如，增加自动调节、发信号、累计等功能；或加放大器、分压器，以提高灵敏度、扩大量程等。这些附件可以是独立装置或仪器的附加元、部件。

测量器具在测量中不应造成信息损失。实际上，由于测量器具在测量方法、工作原理、结构和制造等方面的不完善，以及在传递信号中要消耗能量、受到各种干扰等原因，信号会自然解调或受到干扰量的调制，从而造成信号失真。所以，式(1-2)中 aU_x 只能近似等于 X 。

1.1.2 测量单位

某量的测量单位就是约定选取的一个固定的同类量，它有明确定义（以便复现）和名称，并令其数值为1。

由于单位是一种约定，所以规定时带有“任意”性。同一种量在不同时期、不同国家和地区，有着不同的单位。这就给生产、贸易和科技交往造成不便和困难。随着人类交往的增多，单位混乱导致的麻烦愈加突出。一百多年来，通过各界人士的努力，终于在世界范围内初步实现了统一单位的工作。由国际计量委员会（CIPM）建议的“国际单位制”得到世界范围的认可，各国普遍推广。我国于1984年2月27日发布了《关于在我国统一实行法定计量单位的命令》，正式确定我国法定计量单位以国际单位制为基础。

各种量之间按化学和物理定律互有联系，一些量的单位就可以由有关量的单位导出。因此，同一种量可能有不同的单位。为了防止出现这种情况，有必要建立单位制。建立单位制的方法有以下特点：

- ①合理选择彼此独立的量为基本量，规定它们的单位作为基本单位。基本单位的数目要尽可能少而又能构成最多的导出单位；
- ②由基本单位组合表示的单位叫导出单位，这种组合决定于导出量与基本量的函数关系；
- ③为了实用，应规定分数单位和倍数单位；
- ④单位制应该是一贯性的，即基本单位确定导出单位的所有函数式中，比例系数总是1。

国际单位制符合上述全部原则。国际单位制的构成体系为：

国际单位制(SI)	SI单位	SI基本单位(7个)	} 它们共同构成SI单位的一贯性体系
		SI辅助单位(2个)	
		SI导出单位(其中19个有专有名称)	
		SI单位的十进倍数和分数单位。由SI词头加SI单位构成。	

国际单位制继承了米制的合理部分，可以方便地应用于各行业和各个科技领域，从而

代替了历史上遗留的所有单位，具有简明、实用、合理和科学等特点。

1.1.3 量值传递中测量器具的关系

单位要能实际参与测量，就必须有体现单位定义的实物，这实物就是测量器具和标准物质^①，它们是在空间上和时间上保证测量统一的物质基础。因此要求单位的实物稳定不变、易于准确复现，能够“永久”保存和便于量值传递^②。测量器具按其在量值传递中的地位分为：

(1) 基准(器)。基准(器)是国家单位量值传递系统中准确度最高的测量器具，用来复现和保存计量单位，具有现代科学技术所能达到的最高准确度，经国家鉴定并批准，作为统一全国计量单位量值的最高依据。基准(器)不用来作一般意义的测量。

(2) 标准(器)。标准(器)是作为检定^③依据用的计量器具或物质，具有国家规定的准确度等级。

(3) 工作测量器具。这类测量器具用于日常测量。其中准确度高的(如0.01、0.1、0.2级)可用于精密测量，也可用来检定较低级的(如1.0、2.0级)测量器具。

基准有自然基准和人造基准。例如1 m曾定义为通过巴黎的子午线长度的四千万分之一。但因不易复现，后来用铂铱合金制的人造基准——米国际原器来代替。人造实物基准不易保存，传递准确性的提高也受到限制，于是人们又在探索新的自然基准，例如定义“米是光在真空中在 $1/299792458$ s的时间间隔内所行进的路程的长度。”这样，把长度单位的定义与复现该单位的方法分开，就可以在科技发展中改变复现的方法和手段，不断提高复现的准确性。

由于理论、工艺和方法等不可能很完善，使得单位的实物的定义值与实际值之间总有或大或小的差别。这也是 aU_x 近似等于X的原因。

1.1.4 误差

测量结果常作为决定下一步“行动”的依据之一，所以量值的可靠性至关重要。不同场合对测量结果可靠性的要求也不同。例如，为量值传递、经济核算、产品检验等目的，应保证量值有足够的准确度；而当测量结果用作控制信号时，则更注意其稳定性和重复性。

设法减小误差是测量技术的重要任务。在设计和制造仪器时，对于测量方法、仪器工作原理和结构、制造工艺等都要全面研究，甚至对使用者的生理和心理特点可能带来的影响也有所考虑(例如仪器的显示方式、指示器形式、刻度线粗细和间隔等)。因此，一般说来，正常使用的仪器都能较准确地显示所感受到的被测量的大小，但仪器感受到的被测量大小与其实际大小是否一致，往往是个问题。这是一种潜在的、可能是很严重的误差来

- ① “标准物质”是在规定条件下，具有高稳定的物理、化学或计量学特性，并经正式批准作为标准使用的物质或材料^[1-3]。
- ② “量值传递”是通过检定，把国家基准所复现的测量单位量值，逆过标准逐级传递到工作测量器具，以保证测量所得量值的准确和一致。通俗地说，量值传递是把单位量值由高准确度测量器具传给低准确度测量器具的一种接力，是保证实际工作中测量统一的手段。它需要有科学技术和国家立法的双重保障才能实现^[1-3]。
- ③ “检定”见本章1.10节。

源,使用者要注意和解决。仪器制造厂家无法保证这个一致性要求,因为被测对象特性是各式各样的,制造厂既不能一一预知,更不能一一适应。此外,测量过程中始终存在外界干扰,如环境温度、湿度等变化,机械振动、辐射、电磁场的作用等。对此,制造厂为仪器采取了一定的防护措施,但很难完全消除其影响,由此又引起所谓附加误差。

由此可见,影响测量质量的因素是多方面的,不要认为高级贵重的仪器就当然会给出好的测量结果。另外,测量结果的准确程度,应与测量的目的和要求相联系、相适应,那种不惜工本、不顾场合,一味追求越准越好的作法是不可取的,要有技术经济比较的意识。

1.1.5 测量方法

实现被测量与单位的比较并给出比值的方法,称为测量方法^①。

1.1.5.1 直接测量法和间接测量法

按得到测量结果的操作程序,有直接测量法和间接测量法。

(1) 直接测量法。不必对与被测量有函数关系的各量进行测量和计算,能直接进行被测量与单位比较,从而得出量值的测量方法叫作直接测量法。例如,用直尺测量长度,等臂天平测量质量等。

(2) 间接测量法。直接测量与被测量有已知函数关系的各个量,再按函数关系求得被测量的值,这种方法称为间接测量法。例如,直接测量物体的质量和体积来求其密度;直接测量某圆柱形导体的电阻 R 、长度 l 和直径 d ,再按关系式 $\rho = \frac{\pi d^2 R}{4l}$ 求出电阻率 ρ 。

1.1.5.2 偏位测量法、差值测量法和零差测量法

按被测量与单位的比较方式,测量方法分为偏位测量法、差值测量法和零差测量法。

(1) 偏位测量法。计量器具受到被测量的作用,工作参数发生变化(即有输出信号),当达到平衡时,工作参数偏离初始值(即未受被测量作用时的值)的大小可用来“模拟”被测量的量值。当然工作参数变化所代表的量值变化应是已知的,即应预先进行分度^②。这就是偏位测量法。例如,玻璃管液体温度计受热作用后感温包内的液体膨胀(工作参数变化),当达到热平衡时,液体体积的增加值(比初始值)即可表示温度。为了读出体积变化,使液体在毛细管中膨胀,则体积变化转换成液柱长度的增减。预先在已知的温度计下限温度值(例如冰水混合时的温度,即 0°C)定出初始刻度线,并确定液柱由此线的增高所对应的温度及该温度计的上限温度值,则温度计可按偏位法表示温度。又如U形管水银压力计,被测压力加上后水银柱长度(工作参数)变化,当水银柱产生的重力(反作用力)与被测压力产生的作用力达到平衡时,即可从水银柱偏离零位置的大小反映压力值。

(2) 差值测量法。差值法的测量过程是,向计量器具输入被测量和相应的已知量(该已知量也常常预先设置于计量器具中),并转换成同种信号,然后按偏位法测量两信号

① 测量方法与仪器的测量原理是有区别的,后者是指仪器“转换”信息(或信号)所依据的物理、化学等效应,例如用于测温的热电效应。

② “分度”是用标准来确定测量器具的量值刻线位置或分度特性(输出与输入关系)的全部工作。

的差值；测量结果是已知量值和偏位法测出的量值之代数和。如图1-1(a), $L_x = L_B + \Delta L$ 。

【例1-1】如图1-1(b)所示, E_x 与 E_B 对接, 电压表指示为 ΔE , 其误差为 Δe 。设 E_B 的误差可以忽略。求测量 E_x 的误差。

【解】 E_x 可表示为:

$$E_x = E_B + \Delta E \pm \Delta e = (E_B + \Delta E) \left(1 \pm \frac{\Delta e}{E_B + \Delta E} \right)$$

而测量 ΔE 的误差为:

$$\Delta E \pm \Delta e = \Delta E \left(1 + \frac{\Delta e}{\Delta E} \right)$$

因 $E_B \gg \Delta E$, 所以 $\frac{\Delta e}{E_B + \Delta E} \ll \frac{\Delta e}{\Delta E}$ 。差值越小, 效果越好。

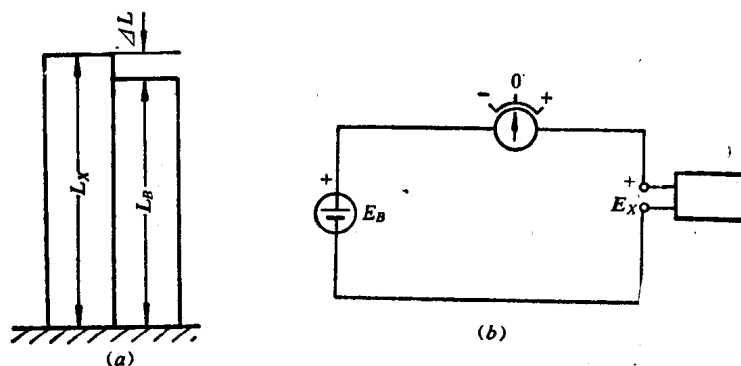


图 1-1 差值测量法举例

(a) 测量长度 L_x ; (b) 测量电压 E_x

L_B, E_B —已知量; $\Delta L = L_x - L_B, \Delta E = E_x - E_B$ —差值

(3) 零差测量法。该方法是使差值法中的差值最终为零, 测量结果就由已知量值得出。这时偏位测量仅起检零作用, 作比较用的已知量应连续可调。按零差测量法工作的仪器如天平、平衡电桥和电位差计。以等臂天平为例, 当增(减)砝码使杠杆指针系统的指针指零时, 则有 $m_x gl = mgl$ (m_x, m 分别为被测物质量和砝码质量, g 为重力加速度, l 为臂长)。由此可得出 $m_x = m$ 。

对以上三种方法作简单比较: 零差法可得到较高准确度, 差值法准确度也很高, 偏位法准确度较差。因为零差法和差值法中已知量的高准确度较易保证, 而检零装置的灵敏度容易作得很高; 实现零差法和差值法的测量器具一般较复杂, 按偏位法工作的仪器结构较简单, 零差法的测量过程操作较多、费时较长, 差值法操作较简单, 偏位法操作最少。

●“灵敏度”见本章1.9.2.1节。