

高等学校教材

热工测量及仪表

第二版

东南大学 吴永生 方可人 编



高等学校教材

热工测量及仪表

第二版

东南大学 吴永生 方可人 编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书讲述热工测量及仪表的基本知识；热力发电厂热工过程的各种参数，如温度、压力、流量、水位、炉烟成分的测量方法及测量仪表；还包括热力生产过程中的机械量（如位移、振动、转速）以及煤量等参数的测量及仪表。

本书可作为高等学校热动类“热工测量及仪表”课程的教材，亦可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

热工测量及仪表/吴永生编著. -2版. -北京：中国电力出版社，1995.5（1998重印）

高等学校教材

ISBN 978-7-80125-425-2

I. 热… II. 吴… III. ①热工测量-高等学校-教材②热工仪表-高等学校-教材 IV. TK3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（97）第 19185 号

中国电力出版社出版

（北京三里河路 6 号 邮政编码 100044）

北京市同江印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1981 年 3 月第一版

1995 年 5 月第二版 2007 年 1 月北京第十九次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21 印张 475 千字

印数 126111—129110 册 定价 19.30 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

（本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换）

第二版前言

本教材是1981年由水利电力出版社出版的《热工测量及仪表》教材的修订版，是根据1988年水利电力部热动类专业教学委员会的决定进行修订的。

近十多年来，我国热力发电厂的热力设备有了巨大的发展，随着机组不断向大容量、超高参数方向发展，新的测量方法和新的检测仪表不断出现。因此必须对第一版书中一些陈旧的或很少应用的内容删去，增添一些新颖的、使用较广的测量方法和新型的检测仪表。第二版对第一版教材中热工测量及仪表的基本理论部分仍加以保留并有所加强。

由于水利电力出版社另外出版了《热工测量及仪表习题集》（东北电力学院陈冀九主编，1993年出版）、《热工测量及仪表实验指导书》（东南大学钟继贵编，1991年出版），因此本教材中没有编写习题，实验内容相对较少。

本教材第二版仍由东南大学吴永生（第二至第七章、第八章部分、第十三章）、方可人（绪论、第一章、第八章部分、第九至第十二章）编写，并由浙江大学许冀森主审。在编写过程中得到许多兄弟院校和有关单位的热情支持，四川仪表七厂陶午年、上海自动化仪表三厂何业勋等同志为本教材提供了宝贵的资料，在此一并表示深切的谢意。

编者水平有限，缺乏实践经验，教材中难免有不足或错误之处，希望读者指正。

编者

1994年7月

第一版前言

本书是按照1978年4月原水利电力部专业教材会议审订的《热工测量及仪表》教材大纲编写的，可以作为高等学校热工类专业的“热工测量及仪表”课程的教学用书。

近十多年来，我国热力发电厂的热力设备日益向大容量、高参数的方向发展，热工测量的要求和热力系统自动控制的水平愈来愈高。随着电子技术的广泛应用，新的测量方法和新的仪表结构不断出现，热工测量领域的新技术有了很大的进展。本书内容除阐述热工测量及仪表的基本理论外，对热工测量的新技术也作了一定的介绍。

本书由南京工学院吴永生、方可人编写，并由浙江大学许冀森、王志勤等审阅。在编写过程中得到许多兄弟院校和有关单位的热情支持，在此表示深切的谢意。

编者水平有限，缺乏实践经验，书中不足或错误之处，希望读者指正。

编者

1980年7月

目 录 1B-315

第二版前言	实验: 液位测量 第8星期一 5~6节 (6节二班)
第一版前言	流量测量 第8星期四 5~6节 (6节二班)
概论	1
一、热工测量的意义; 二、测量方法; 三、热工仪表的组成; 四、仪表内信号传输过程; 五、仪表的质量指标; 六、仪表的检定	
第一章 测量误差的分析与处理	9
第一节 测量误差和不确定度	9
一、测量误差的分类; 二、测量的精密度、正确度和准确度; 三、不确定度	
第二节 随机误差的分布规律	11
一、随机误差的正态分布性质; 二、正态分布的概率运算	
第三节 直接测量值的误差分析与处理	13
一、真值的估算; 二、标准误差的估算; 三、算术平均值的标准误差; 四、测量结果的表示; 五、小子样误差分析	
第四节 间接测量误差的分析与处理	17
一、间接测量值的最佳估计值; 二、间接测量值的标准误差的估算; 三、微小误差取舍原则; 四、误差分配	
第五节 粗大误差的检验与坏值的剔除	19
一、拉依达准则; 二、格拉布斯准则	
第六节 系统误差	21
一、恒值系统误差; 二、变值系统误差; 三、变值系统误差存在与否的检验; 四、系统误差的估计; 五、间接测量中系统误差的传递	
第七节 误差的综合	24
一、随机误差的综合; 二、系统误差的综合; 三、测量结果的表示	
第二章 温度测量概述	26
第一节 国际温标	26
一、温度的单位; 二、ITS-90的温度范围; 三、 T_{90} 与 T_{60} 的差值; 四、温标的传递	
第二节 各种测温方法简介	32
一、膨胀式温度计; 二、压力式温度计	
第三章 热电偶温度计	39
第一节 热电现象和关于热电偶的基本定律	39
一、热电现象和热电偶温度计; 二、热电偶的基本定律	
第二节 标准化与非标准化热电偶	45
一、热电极材料及其热电性质; 二、标准化热电偶; 三、非标准化热电偶; 四、热电偶的构造	
第三节 热电偶冷端温度补偿问题	53
一、算法; 二、冰点槽法; 三、补偿电桥法(冷端补偿器); 四、多点冷端温度补偿法; 五、晶体管PN结温度补偿法	
第四节 热电偶的校验	56
第四章 电阻温度计	58
第一节 金属测温电阻	58
一、对金属测温电阻的要求; 二、标准化热电阻; 三、工业用热电阻的结构	

第二节	半导体热敏电阻	64
一、	半导体热敏电阻的材料和温度特性；二、半导体热敏电阻的结构及应用	
第三节	热电阻的校验	66
第五章	显示仪表	68
第一节	动圈式显示仪表	68
一、	动圈式显示仪表的工作原理；二、测量线路中电阻的温度补偿；三、测量线路；四、带前置放大器的动圈式显示仪表；五、动圈式显示仪表的型号	
第二节	自动平衡式显示仪表	74
一、	电位差计；二、电子电位差计；三、X-Y记录仪；四、电桥；五、电子差动仪；六、自动平衡显示仪表的型号	
第三节	数字式显示仪表	89
一、	数字式显示仪表的原理及组成；二、模数转换；三、电信号的标准化与标度变换；四、非线性输入特性的线性化	
第四节	带微处理器的数字模拟混合式记录仪	100
第六章	接触测温方法的讨论和热流测量	107
第一节	管内流体温度测量	107
第二节	壁面温度测量	110
一、	热电偶导热误差；二、热电偶的接点导热误差	
第三节	高温气体温度测量	111
第四节	热流测量	116
一、	导热式热流计；二、辐射式热流计；三、辐射-对流热流计	
第七章	非接触测温方法和仪表	122
第一节	辐射测温基本原理	122
第二节	单色辐射高温计	124
一、	光学高温计；二、光电高温计	
第三节	辐射温度计	128
第四节	比色高温计	130
第五节	红外温度计	133
一、	热敏探测器；二、光电探测器	
第六节	红外热像仪	136
一、	光学机械扫描成像；二、电荷耦合器件成像	
第八章	压力及差压测量	140
第一节	液柱式压力计	141
一、	U形管压力计；二、单管式压力计；三、斜管式微压计	
第二节	弹性式压力计	143
一、	弹性元件的特性；二、弹性元件的材料；三、金属膜片、膜盒；四、波纹管；五、弹簧管	
第三节	压力(差压)传感器和变送器	156
一、	电位器式压力传感器；二、电感式压力(差压)传感器；三、霍尔压力传感器；四、力平衡式压力(差压)变送器；五、电容式压力(差压)变送器；六、应变式压力变送器；七、振弦式压力变送器	
第四节	压力和差压测量仪表的校验和使用	177
一、	校验测压仪表用标准器；二、压力量值传递系统；三、测压仪表的使用	
第九章	流体流量的测量方法	182
第一节	容积式流量测量方法	182

第二节 速度式流量测量方法	185
一、涡轮流量计；二、漩涡流量计；三、电磁流量计；四、超声波流量计；五、热式流量计	
第三节 差压式流量测量方法	198
一、毕托管与均速管；二、节流变压降流量计；三、恒压降变截面流量计	
第四节 质量流量计	204
一、直接式质量流量计；二、推导式质量流量计；三、温度、压力补偿式质量流量计；四、多功能微电脑流量显示积算仪	
第五节 流量测量仪表的校验与分度	210
第十章 节流变压降流量计	213
第一节 标准节流装置	213
一、标准节流件及其取压装置；二、标准节流装置的管道条件	
第二节 标准节流装置的流量公式	218
一、流动情况和流量公式；二、标准节流装置的流出系数 C 值及其不确定度；三、标准节流装置的流束膨胀系数 ϵ 值及其不确定度；四、标准节流装置的压力损失	
第三节 标准节流装置的计算	224
一、计算命题；二、原始资料和辅助计算公式；三、计算举例；四、标准节流装置流量测量结果的不确定度	
第四节 非标准节流件及其应用	233
一、 $1/4$ 圆弧孔板；二、锥形入口孔板	
第五节 节流变压降流量计的显示仪表——差压计	235
一、差压计的开方装置与开方器；二、流量积算装置和积算器；三、差压计信号管路的安装	
第十一章 汽包水位测量	241
第一节 云母水位计与双色水位计	241
第二节 差压式水位计	242
一、平衡容器的改进；二、汽包水位信号的压力校正；三、带微处理机的锅炉汽包水位计	
第三节 电接点水位计	249
第四节 其他液位测量方法	250
一、浮力法；二、静压法；三、电容法；四、超声波法；五、同位素法；六、微波法	
第十二章 炉烟分析	254
第一节 氧量计	255
一、热磁式氧量计；二、氧化锆氧量计	
第二节 热导式二氧化碳分析仪	262
第三节 红外线气体分析仪	265
第四节 气相色谱分析仪	267
一、工作原理；二、分析流程	
第十三章 机械量测量仪表	271
第一节 位移测量	271
一、电感式位移传感器；二、涡流式位移传感器	
第二节 振动测量	287
一、磁电式传感器的结构及工作原理；二、测量线路	
第三节 转速测量	291
一、转速传感器；二、测量线路	
第四节 煤量测量	296
一、电子皮带秤；二、核子皮带秤；三、电子轨道衡	

附录 I	304
表 I-1 各种测温材料的物理性质	304
表 I-2 铂铑10-铂热电偶分度表	306
表 I-3 铂铑13-铂热电偶分度表	306
表 I-4 铂铑30-铂铑6热电偶分度表	307
表 I-5 镍铬-镍硅(镍铝)热电偶分度表	307
表 I-6 镍铬-康铜热电偶分度表	308
表 I-7 铁-康铜热电偶分度表	308
表 I-8 铜-康铜热电偶分度表	309
表 I-9 铂热电阻分度表	309
表 I-10 铜热电阻分度表	309
表 I-11 铜热电阻分度表	310
表 I-12 常用材料在 $0.66\mu\text{m}$ 波长下的光谱发射率的近似值	310
表 I-13 一些物质的发射率 ε 值	311
附录 II	312
表 II-1 水和水蒸气的动力粘度	312
表 II-2 水和水蒸气的密度	313
表 II-3 节流件和管道材料的线膨胀系数 λ	317
表 II-4 标准孔板开孔直径 d 的加工公差	317
表 II-5 各种管道的绝对粗糙度 K_s 值	317
表 II-6 角接取压标准孔板的流出系数 C 值	318
表 II-7 角接取压标准孔板的流束膨胀系数 ε 值	319
表 II-8 ISA1932喷嘴的流出系数 C 值	320
表 II-9 ISA1932喷嘴的流束膨胀系数 ε 值	321
表 II-10 节流装置不符合标准要求对流出系数的影响	322
表 II-11 节流装置不符合标准要求所产生的流量误差	322
表 II-12 $1/4$ 圆弧孔板所用的 r/D 值	323
表 II-13 差压计的基本参数	324
参考文献	326

概 论

一、热工测量的意义

测量是人们借助专门工具，通过试验和对试验数据的分析计算，将被测量 X_0 以测量单位 U 的倍数 μ 显示出来的过程，即

$$X_0 = \mu U \quad (0-1)$$

上式称为测量的基本方程式。式中，数值化后的比值 μ 称为被测量的真实数值，简称为真值。然而，测量方法不够完善，测量工具不够精确，观测者的主观性和周围环境的影响以及所取数值化后的比值位数有限等，都会引起测量误差，所以被测量的真值 μ 只能近似地等于其测量值 x ，即上式变为

$$X_0 \approx xU \quad (0-2)$$

由于测量中总是存在着测量误差，测量工作者的任务之一就是要尽量使之减小，因此，应选择合理的测量方法；所用的测量单位必须是稳定的，并且是国家法定或国际公认的，例如是国际单位制中所规定的单位；所用的测量工具必须足够准确，并事先经过检定等。测量方法、测量单位及测量工具就是测量过程的三要素。

热工测量是指压力、温度等热力状态参数的测量，通常还包括一些与热力生产过程密切相关的参数的测量，如测量流量、液位、振动、位移、转速和烟气成分等。

在热电厂中，通过热工参数的测量，可及时反映热力设备的运行工况，为运行人员提供操作依据；为热工自动化装置准确及时地提供信号；为运行的经济性计算提供数据。因此，热工测量是保证热力设备安全、经济运行及实现自动化的必要条件，亦是经济管理、环境保护、研究新型热力生产系统和设备的重要手段。

随着电厂热力设备日益向大容量、高参数发展和自动化水平的日益提高，对热工测量的准确性、可靠性等要求也越来越高，测点数量越来越多，采用新原理、新材料和新结构的热工仪表不断涌现。据统计，200MW机组的测点达600个左右，已不得不考虑使用数据采集系统和屏幕显示来处理 and 显示大量的测量数据。图0-1显示了热工测量在热力生产过程控制系统中的地位，图0-2示意地表示了火力发电厂机炉系统中主要热工量测点的布置。

二、测量方法

测量方法就是实现被测量与测量单位的比较，并给出比值的方法。按

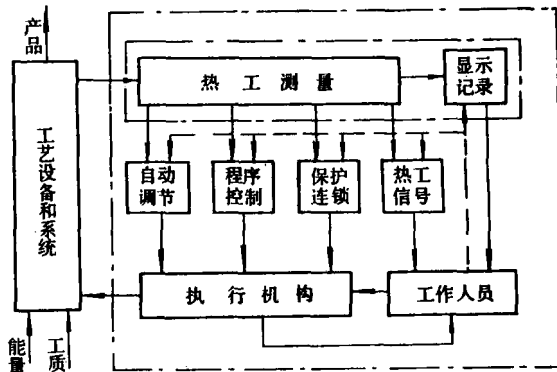


图 0-1 热力生产过程控制系统的组成框图

热工：压力、温度、流量、液位量。

测量结果的获取方式分，可分为直接测量法和间接测量法。这种分类方法对测量误差的分析很有意义。

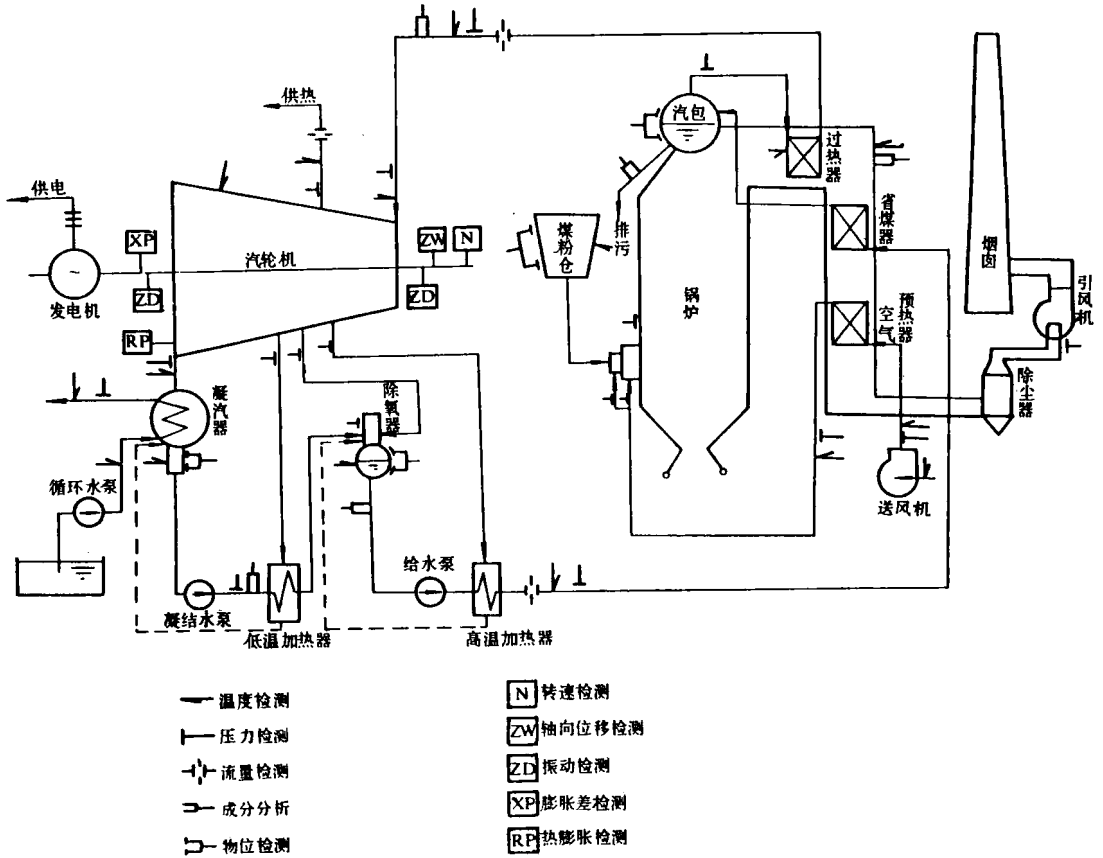


图 0-2 火力发电厂主要热工量测点布置示意

(1) 直接测量法：使被测量直接与测量单位进行比较，或者用预先标定好的测量仪器进行测量，从而得到被测量数值的测量方法，称直接测量法。例如：用直尺测量长度，用压力表测量容器内介质压力，用玻璃温度计测量介质温度等。

(2) 间接测量法：通过直接测量与被测量有某种确定函数关系的其他各变量，再按函数关系进行计算，从而求得被测量数值的方法，称为间接测量法。例如，直接测量过热蒸汽的温度、压力和标准节流装置输出的差压信号，通过计算得到过热蒸汽的质量流量。

按被测量与测量单位的比较方式来分，测量可分为偏差测量法、微差测量法和零差测量法。

(1) 偏差测量法：测量器具受被测量的作用，其工作参数产生与初始状态的偏离，由偏离量得到被测量值，称为偏差测量法。例如：单管压力计在压力作用下，管中水银柱偏离初始零刻度点，偏离量就显示了被测压力值。

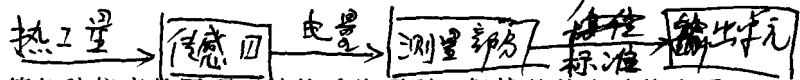
(2) 微差测量法：用准确已知的、与被测量同类的恒定量去平衡掉被测量的大部分，然后用偏差法测量余下的差值，测量结果是已知量值和偏差法测得值的代数和。例如用微差

法检定热电偶时，将同类型的标准热电偶与被校热电偶反向串接，两者的热端同置于检定炉中，冷端置于冰点瓶中，它们的负热电极并接在一起，冷端的正极则和电位差计的两输入端子相连接，用电位差计测量标准热电偶与被校热电偶热电势的差值。由于标准热电偶热电势的准确度很高，被校热电偶的热电势大部分为其所平衡，两者差值很小，再通过电位差计测量此差值，就可得到较高的测量准确度。

(3) 零差测量法：用作比较的量是准确已知并连续可调的，测量过程中使它随时等于被测量，也就是说，使已知量和被测量的差值为零，这时偏差测量仅起检零作用，因此，被测量就是已知的比较量。例如：用电位差计测量热电偶产生的热电势。零差测量法比微差测量法具有更高的测量准确度，但操作时间较长，更适合于稳定参数的测量。

按被测量在测量过程中的状态来分，测量又可分为静态测量方法和动态测量方法。被测量在测量过程中不随时间变化，或其变化速率相对于测量速率十分缓慢，对这类量的测量称为静态测量。若测量过程中，被测量随时间有明显变化，则称动态测量。一般来说，要得到较高的动态测量准确度很困难，这是由于被测量随时间变化的规律和测量仪器本身的动态特性对测量值有着较为复杂的影响，因此动态测量的数据处理有着与静态测量不同的原理和方法。

三、热工仪表的组成



热工仪表的种类繁多，尽管各种仪表的原理、结构千差万别，但就其基本功能来看，一般可以剖析为下列三个基本部分。

(1) 感受件：感受件直接与被测对象相联系，感受被测量的量值，并将感受到的被测量信号转换成相应的信号输出。例如：热电偶温度计中的热电偶，它把对象的被测温度转换成热电势。感受件亦称敏感元件、一次元件或发送器。对感受件的要求是：

- 1) 输出信号必须随被测量变化，它们之间的关系是稳定的，可复现的。
- 2) 输出信号只能随被测量变化而变化。如果其他参数的变化会影响感受件的输出，那么，测量过程中这些参数的变化就是测量误差的来源。在这种情况下，一般要使这些参数不变，或附加补偿装置，使这些参数的变化不影响（或很少影响）测量结果。
- 3) 输出信号与被测量之间必须是单值关系，最好是线性关系。

感受件按被测参数分类有温度感受件、压力感受件等；按输出信号能量的主要来源来分，可分为能量转换型（或称发生器型、有源型，如热电偶、压电式压力传感器等）和能量控制型（或称参数型、无源型，如热电阻、电容式差压变送器）。按输出信号形式分，有模拟式（其输出信号为连续变化的模拟量）和准数字式（如涡轮流量计、漩涡流量计等，其输出为频率式准数字信号）两种。

(2) 显示件：仪表最终是通过它的显示件向观察者反映被测量的变化的。按显示件的功能不同，仪表有以下几种：

- 1) 显示被测量瞬时值的，称为显示仪表。按显示方式不同又有模拟显示、数字显示和屏幕显示之分。
- 2) 记录被测量随时间变化的，称为记录仪表。在记录仪表中，除了以记录笔的运动来反映被测量变化外，还需要有一个等速运动的部件（一般为同步电动机）来带动记录纸。

记录纸形状有长方形的，也有圆形的。笔的类型有墨水型、热敏型和打印型等。

3) 显示被测量对时间的积分结果的，称为积算仪表或积算器。例如，在测量流量时，如果要测出某个时间间隔内流过的物质总量，就要采用流量积算仪表。

4) 反映被测量是否超过允许限值的，称信号式仪表。当被测量达到或超出所规定的限值时，仪表可发出声、光信号，引起操作人员注意或使设备停止运行。

5) 有些显示件可根据被测量与规定值的偏差情况，发出对被测对象进行调节的信号，其调节作用可使被测量保持在预定的数值，也就是说该显示件附加有调节功能。具有这种调节功能的显示仪表称为带调节的显示仪表。

(3) 传送件：传送件的作用是将感受件输出的信号，根据显示件的要求，传输给显示件。根据不同情况，传送件有下列功能：

1) 单纯起传输作用。当感受件输出的信号只送给显示件时，传送件只起传输作用，如信号导管和电缆。

2) 将感受件输出的信号放大，以满足远距离传输以及驱动显示、记录装置的需要。

3) 为了使各种感受件的输出信号便于与显示仪表和调节装置配接，要通过传送件把信号转换成标准化的统一信号。例如在单元组合仪表中，各种感受件的输出信号都被转换成统一数值范围的气、电信号，这时的传送件常称为变送器。这样，同一种类型的显示仪表常用来显示不同类型的被测量。

四、仪表内信号传输过程

测量过程，实质上是仪表内信号的转换和传输的过程，这过程中有时也包含着信号能量的转换与放大，因此，仅从信号传输过程来看，仪表中每一次信号转换和传输可作为一个环节，静态下每个环节的输出与输入之比，称为该环节的传递系数，也就是该环节的灵敏度。整个仪表是各环节的连接。这种表示方法给仪表的分析带来了方便。仪表各环节之间的连接方式主要有开环连接与闭环连接两种，相应地构成开环系统和闭环系统。

1. 开环系统

仪表中各环节开环串联，信号沿一个方向传输。这类仪表按偏差测量法工作，亦称直接变换式仪表。图0-3是直接变换式仪表的一个实例——电流表的框图。输入信号电流 I ，通过磁电系统转换为处于磁场中的可动线圈转动力矩 T ，转动力矩 T 通过与张丝反力矩平衡转换成动圈转角 θ ，转角 θ 通过线圈上的指针转换成指针对标尺的位移 X 。在稳定工况下，仪表输入信号 I 与输出信号 X 之间的关系（即仪表的静态特性）可由下式表示

$$X = K_1 K_2 K_3 I = K I \quad (0-3)$$

式中： $K = K_1 K_2 K_3$ ，为仪表的传递系数，即仪表的灵敏度； K_1 ， K_2 ， K_3 为各环节的传递系数，即各环节的灵敏度。

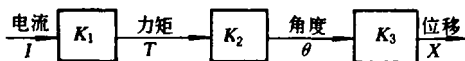


图 0-3 电流表方框图

由此可见，对直接变换式仪表，要保证仪表指示准确，必须保持每个环节的灵敏度不变，而由于环境等因素的影响，每个环节灵敏度或多或少总是有变化的，其变化将使仪表产生测量误差。

2. 闭环系统

仪表各环节中的一部分或全部构成负反馈式的闭环连接, 这类仪表在闭环部分是按零差测量法工作的, 称为平衡式仪表。图 0-4 为属于平衡式仪表的电子电位差计的方框图。输入信号为电势 e , 与电桥 (包括滑线电阻) 上产生的反馈电压 U 相减, 其差值 Δe 经放大器放大后推动伺服电动机 SM 旋转, SM 旋转带动滑线电阻上的滑动触点移动, 从而改变反馈电压 U , 直至 $U = e$ 时 $\Delta e = 0$, 电动机才停止转动, 伺服电动机旋转的角度为 θ , 由上述框图可写出该系统的传递函数为

$$\frac{\Theta(s)}{E(s)} = \frac{K_1 \frac{K_2}{s}}{1 + K_1 \frac{K_2}{s} K_3} = \frac{K_1 K_2}{s + K_1 K_2 K_3} \quad (0-4)$$

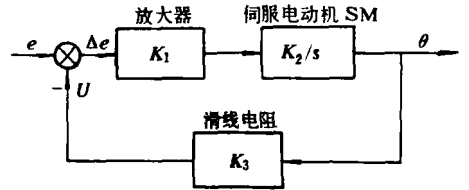


图 0-4 电子电位差计方框图

静态时输入输出关系为

$$\theta = \frac{K_1 K_2}{K_1 K_2 K_3} e = \frac{1}{K_3} e = K e \quad (0-5)$$

由此可见闭环系统中仪表的传递系数 K 只与反馈环节的传递系数 K_3 有关, 即 $K = \frac{1}{K_3}$, 而与闭环部分中正向环节的传递系数 K_1, K_2 无关。因此, 仪表对正向环节如放大器等部分的性能要求可降低。 K_3 (滑线电阻) 通常可做得比较准确与稳定, 这也就是采用闭环系统的模拟式仪表有较高准确度的原因。

五、仪表的质量指标

仪表的质量指标主要包括评价仪表计量性能、操作性能、可靠性和经济性等方面的指标。仪表的可靠性是对仪表, 特别是过程检测仪器的基本要求。目前常用有效性 (MTBF) 作为仪表的可靠性指标, 即

$$\text{有效性} = \frac{\text{平均无故障工作时间}}{\text{平均无故障工作时间} + \text{平均修复时间}} \quad (0-6)$$

此外, 选用仪表时, 首要的是了解仪表计量性能方面的指标, 其中包括以下这些。

1. 准确度

这是表征仪表指示值接近被测量真值程度的质量指标。

(1) 仪表的示值误差: 它表征仪表各个指示值的准确程度, 常用示值的绝对误差 δ 和示值的相对误差 r 表示。若仪表指示值为 x , 被测参数的真值为 μ , 则

$$\delta = x - \mu \quad (0-7)$$

$$r = \frac{x - \mu}{|\mu|} \times 100\% = \frac{\delta}{|\mu|} \times 100\% \approx \frac{\delta}{|x|} \times 100\% \quad (0-8)$$

示值绝对误差与被测量有一致的量纲, 并有正负值之分, 正值表示偏大, 负值表示偏小。绝对误差是表示误差的基本形式, 但相对误差更能说明示值的准确程度。例如用温度计测量一炉子温度, 温度计指示值为 1645°C , 炉子真实温度为 1650°C , 示值绝对误差为 -5°C , 示值相对误差为 $\frac{-5}{1650} \times 100\% = -0.3\%$; 如果测量 100°C 的水, 虽然同样有 -5°C 的示值

绝对误差，但其示值相对误差则为 -5% ，显然后者示值相对误差大得多，说明后者的测量准确度要低得多。

被测量的真值通常是不知道的，在校验仪表时，常用标准仪表的示值、理论值或定义值等所谓约定真值来代替真值。

(2) 仪表的基本误差：在规定的工作条件下，仪表量程范围内各示值误差中的绝对值最大者称为仪表的基本误差 δ_j ，即

$$\delta_j = \pm |\delta_{\max}|_A \quad (0-9)$$

式中： $|\delta_{\max}|_A$ 为具有量程 A 的仪表，其示值误差中的绝对值最大者，仪表量程 A 即仪表测量上限与测量下限之差。

超出正常工作条件引起的误差称为仪表的附加误差。

仪表的引用误差 r_y 定义为仪表示值的绝对误差 δ 与该仪表量程 A 之比，并以百分数表示之，即

$$r_y = \frac{\delta}{A} \times 100\% \quad (0-10)$$

仪表量程范围内，示值误差中绝对误差值最大者与量程之比（以百分数表示）称为最大引用误差， $r_{y\max}$ ，即

$$r_{y\max} = \frac{\pm |\delta_{\max}|_A}{A} \times 100\% \quad (0-11)$$

这样，按引用误差的形式，仪表的基本误差也可用最大引用误差来表示。

(3) 仪表的准确度等级：为了保证质量，对各类仪表规定了其基本误差不能超过的限值，此限值称为该类仪表的允许误差（或称基本误差限），用 δ_{yu} 或 r_{yu} 表示，因此允许误差也是一种极限误差。

仪表最大引用误差表示的允许误差 r_{yu} 去掉百分号后余下的数字称为该仪表的准确度等级。工业仪表准确度等级的国家标准系列有0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.5, 4等七个等级。仪表刻度盘上应标明该仪表的准确度等级。

例如：一测量范围为 $0 \sim 10\text{MPa}$ 的弹簧管压力计经校验，在其量程上各点处最大示值绝对误差 $\delta_{\max} = \pm 0.14\text{MPa}$ ，则该表的最大引用误差 $r_{y\max} = \frac{\pm 0.14}{10-0} 100\% = \pm 1.4\%$ 。若该仪表的准确度等级为1.5级，则该仪表的允许误差 $r_{yu} = \pm 1.5\%$ 。因该仪表的基本误差未超过允许误差，故认为该仪表的准确度合格。

值得注意，目前关于仪表准确度等级的规定尚未统一，例如我国流量计的允许误差是根据在流量计测量上限的 $20\% \sim 100\%$ 范围内，其示值相对误差 r 不超过某一限值来规定的，该示值相对误差的限值去掉百分号后，就是该流量计的准确度等级。一台涡轮流量计，其准确度等级为0.5级，测量上限为 $50\text{m}^3/\text{h}$ ，允许误差为 $\pm 0.5\%$ ，也就是说， $10 \sim 50\text{m}^3/\text{h}$ 测量范围内各点处的示值相对误差 r 不应超过 $\pm 0.5\%$ ，而允许的示值绝对误差却随着流量减小而减小，这是选用和校验仪表时必须注意的。

引起仪表指示值误差的因素很多，如线性度、回差、重复性、分辨率和漂移等。

2. 线性度 (或非线性误差)

对于理论上具有线性“输入-输出”特性曲线的仪表,由于各种原因,实际特性曲线往往偏离线性关系,它们之间最大偏差的绝对值与量程之比的百分数,称之为线性度。

3. 回差 (变差)

输入量上升和下降时,同一输入量相应的两输出量平均值之间的最大差值与量程之比的百分数称为仪表的回差,它通常是由于仪表运动系统的摩擦、间隙,弹性元件的弹性滞后等原因造成的。

4. 重复性和重复性误差

同一工作条件下,多次按同一方向输入信号作全量程变化时,对应于同一输入信号值,仪表输出值的一致程度称为重复性。对于全范围行程,在同一工作条件下从同方向对同一输入值进行多次连续测量所获得的输出两极限值之间的代数差或均方根误差称为重复性误差,它通常以量程的百分数表示。

5. 分辨率

引起仪表示值可察觉的最小变动所需的输入信号的变化,称仪表的分辨率,也称灵敏限或鉴别阈。输入信号变化不致引起示值可察觉的最小变动的有限区间与量程之比的百分数,称为仪表的不灵敏区或死区。为保证测量准确,一般规定不灵敏区不应大于允许误差的 $1/3 \sim 1/10$ 。

6. 灵敏度

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{dy}{dx}$$

仪表在到达稳态后,输出增量与输入增量之比,称为仪表的灵敏度,即仪表“输入-输出”特性的斜率。若仪表具有线性特性,则量程各处的灵敏度为常数。仪表灵敏度应与仪表准确度相适应,即灵敏度的高低只需保证仪表示值的最后一位比允许误差 $\delta_{允}$ 略小即可。灵敏度过低会降低仪表的准确度,过高会增大仪表的重复性误差。

7. 漂移

在保持工作条件和输入信号不变的条件下,经过规定的较长一段时间后输出的变化,称为漂移,它以仪表量程各点上输出的最大变化量与量程之比的百分数来表示。漂移通常是由于电子元件的老化,弹性元件的时效,节流件的磨损,热电偶或热电阻的污染变质等原因引起的。

此外,在被测量快速变化时,常常会由于仪表的输出信号跟不上被测量的变化而产生动态误差,动态误差的大小与仪表的动态特性及被测量的变化规律有关。常用感受件的时间常数与仪表的全行程时间来表征仪表的动态特性。有关动态特性的详细论述,将在调节原理课程中进行。

六、仪表的检定

检定是为了评定仪表的计量性能,并与规定的指标比较,以确定仪表是否合格。进行检定工作应遵循国家法定性技术文件:国家计量检定规程。规程详细规定了被检仪表的技术条件;检定用的标准测量器具和设备;检定项目、方法和步骤;检定结果处理;检定证书的格式和填写要求等。检定方法一般可分为定点法和示值比较法两类。定点法是,提供被检仪表测量所需的某种标准量值,例如已知的某种纯金属相变点温度,标准成分气样等,从

而确定仪表的示值误差。工业上常用的是示值比较法，就是使被检仪表与标准仪表同时去测量同一被测量，比较两者的指示值，从而确定被检仪表的基本误差、回程误差等质量指标。一般要求标准仪表的测量上限应等于或稍大于被检仪表的测量上限。标准仪表的允许误差为被检仪表误差的 $1/3 \sim 1/10$ 。在这种情况下，可以忽略标准仪表的误差。将标准仪表的指示值作为被测量的真值。检定点常常取在仪表标尺的整数分度值（包括上、下限）上和经常使用的标尺刻度附近，必要时可适当加密检定点。