

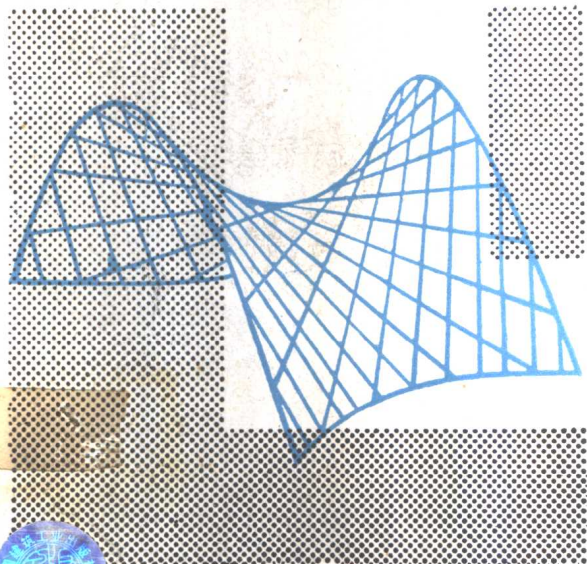
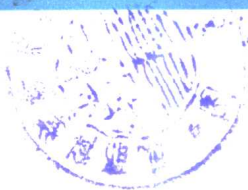
高等专科学校试用教材

983595

热工仪表 与自动调节

赵恒侠 李玉云 编
王昌贵 主审

● 中国建筑工业出版社



86
92

高等专科学校试用教材

热工仪表与自动调节

赵恒侠 李玉云 编
王昌贵 主审

中国建筑工业出版社

(京)新登字035号

本书讨论了供热通风与空调生产过程自动化中常用的各种检测仪表、调节仪表、执行器的工作原理和使用方法,自动调节系统的组成、设计和整定方法。

全书分上下两篇,上篇为测量技术基础与热工仪表,介绍了误差理论,本专业常用的热工参数检测仪表的工作原理、特点及使用方法;下篇侧重介绍了国内外新型的空调专用的功能模块式调节仪表、锅炉节能仪表和执行器的工作原理及特点,结合本专业,系统地介绍自动调节的基本理论,被调对象的特性,调节器及其它环节的特性,调节系统的设计及整定方法,各种调节系统在本专业中的应用举例,计算机技术在空调生产过程中的应用举例。

本书可作为高等专科学校“供热通风与空气调节工程”专业的教材,也可供从事供热通风与空调工程及自动化等方面的工程技术人员参考。

高等专科学校试用教材

热工仪表与自动调节

赵恒侠 李玉云 编

王昌贵 主审

中国建筑工程出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店总店科技发行所发行

北京顺义燕华印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 13 字数: 310千字

1995年11月第一版 1995年11月第一次印刷

印数: 1—9,100册 定价: 10.20元

ISBN 7-112-02560-5

TU·1964 (7645)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

本书是高等专科“供热通风与空气调节工程”专业《热工仪表与自动调节》课程的教材。它是根据全国供热通风空调及燃气工程学科专业指导委员会通过的高等工程专科的课程教学基本要求，对原有的讲义作了修改和补充编写的。

教材的深度与范围是以“培养目标和毕业生基本要求”为依据，并考虑到高等工程专科的数学基础与电工基础，从培养应用型人才的角度出发，力求做到重点突出，层次分明，既紧密结合专业，又保证本课程的严谨性和逻辑性。

全书分上下两篇，参考学时数约为66学时，其中上篇由赵恒侠教授编写，下篇由李玉云同志编写，全书由李玉云同志统稿。

本书由王昌贵副教授主审，他对编写的内容和文稿都提出了许多宝贵的意见和建议。本书在编写过程中得到了谭天祐教授、孙利生副教授和沈时伦高级工程师的热情指导。王秋庭副教授参与了全书的审校与誊写工作。在此向他们表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限，缺点和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

目 录

上篇 热 工 仪 表

第一章 绪论	1
1-1 概述	1
1-2 热工仪表的发展概况	1
1-3 热工仪表的组成与分类	2
第二章 测量的基本知识	5
2-1 测量的概念与基本测量方法	5
2-2 测量系统	7
2-3 测量误差	8
2-4 测量仪表的基本特性	13
第三章 温度测量及仪表	17
3-1 温度的测量方法	17
3-2 膨胀式温度计	19
3-3 热电偶温度计	23
3-4 热电阻温度计	35
3-5 温度计的选择及安装	40
第四章 湿度测量及仪表	42
4-1 概述	42
4-2 湿度测量仪表	42
4-3 湿度计的选择与使用	47
第五章 压力、压差测量及仪表	49
5-1 压力及压差的测量	49
5-2 液柱式压力表	49
5-3 弹性压力表	51
5-4 电信号压力表	54
5-5 常用压力表的校验、选择与安装	56
第六章 流速测量及仪表	57
6-1 流速及流速的测量方法	57
6-2 利用气压法测量流速	57
6-3 热线风速仪	59
第七章 流量测量及仪表	62
7-1 流量的测量	62
7-2 差压式流量计	63
7-3 转子流量计	66

7-4 流速式流量计	68
7-5 椭圆齿轮流量计	69
第八章 液位测量及仪表	71
8-1 概述	71
8-2 静压式液位计	72
8-3 浮力式液位计	74
8-4 电测式液位计	75
第九章 热流量测量及仪表	78
9-1 热流量测量	78
9-2 热电堆热流计	80
9-3 传导热流计的误差来源	81

下篇 自 动 调 节

第十章 自动调节的基本理论	83
10-1 自动调节系统的基本形式、组成和术语	83
10-2 反馈调节系统的分类	86
10-3 调节系统的过渡过程与性能指标	87
第十一章 调节对象的动态特性	90
11-1 概述	90
11-2 单容对象的动态特性	91
11-3 多容对象的动态特性	98
11-4 求取对象动态特性的实验方法	101
第十二章 调节器、传感器与执行器的特性	103
12-1 调节器的特性	103
12-2 执行器的特性	107
12-3 传感器和变送器的特性	108
第十三章 调节器与执行器	110
13-1 调节规律的实现方法	110
13-2 调节器	112
13-3 执行器	118
13-4 直通调节阀的流量特性	124
13-5 调节风门的流量特性	129
第十四章 调节系统的设计及其整定	131
14-1 概述	131
14-2 广义调节对象动态特性对调节质量的影响	132
14-3 基本调节规律对调节质量的影响	134
14-4 调节器调节规律的选择	140
14-5 单回路反馈调节系统的整定	141
14-6 串级调节系统	144
14-7 前馈调节系统	146
14-8 分程调节系统	148

14-9 选择性调节系统	150
第十五章 自动调节系统在暖通空调与锅炉生产过程中的应用举例	152
15-1 空调生产过程的自动调节系统	152
15-2 冷冻机与水输送系统的调节系统	158
15-3 工业锅炉的自动调节系统	160
15-4 工业锅炉热工检测与调节系统实例	164
第十六章 计算机技术在空调生产过程中的应用	169
16-1 计算机控制系统的基本概念	169
16-2 计算机技术在空调生产过程中的应用举例	175
思考题	177
习题	181
附表	185
参考文献	199

上篇 热 工 仪 表

第一章 绪 论

1-1 概 述

《热工仪表与自动调节》是本专业必修的课程之一，为本专业学生在今后工作中选择与使用热工仪表，设计与改进自动调节系统，提供必须的基本知识。

热工测量仪表是测量热工参数的工业仪表，是为热力设备试验和运行而设计的，用以测试与监测热能利用中的各种参数，这些参数有温度、湿度、压力、流速、流量、液位与热流量等；热工自动调节是对锅炉、采暖、供热、通风、制冷与空气调节等生产过程进行监测与控制，用以代替操作、管理及科研人员的直接劳动，使热力工程、热能利用、空气调节等生产运行过程在不同程度上自动进行。

学习掌握《供热通风与空调工程》的热工测试与自动化，配合本专业其它课程的知识，可为合理利用能源，开发新产品，设计新的工艺流程奠定良好的基础。这对提高产品质量和劳动生产率、改善操作条件、保障人员健康及热力设备的安全均十分必要。努力提高测量与控制质量，是现代化科学技术发展与生产过程必不可少的手段。

热工测量仪表与热工自动调节是密不可分的，测量是调节的依据，调节则是测量的目的之一。调节需要测量数据。认识事物的基本方法是观察与实验，获得数据的基本手段是测量，比较是最基本的测量方法，测量与调节的有关概念也需用数据、单位（比较量）及其误差来描述与统一。

为了测量与感受、观察这些数据，还应知晓获取、传输（递）、变换、显示数据的方法，为此，本课程上篇主要介绍与数据有关的信息、信号知识及其关系；误差理论；数据处理及热工测量仪表的原理、特性、基本结构、安装方面的知识及注意事项。下篇介绍自动调节的基本理论；调节器与执行器的结构及特性；被调对象的特性；以及它们组成自动调节系统的特性；设计和使用自动调节系统的方法。

1-2 热工仪表的发展概况

从简单的物理仪器到专为热工测试与自动调节使用的专用仪表，从实验室到现场使用

的仪器仪表,从初期的将测量与在线监测指示、记录、调节组装在一起的基地式单参数调节的自动化仪表,到60年代随着大型工矿企业使用的综合自动化和集中控制的单元组合仪表、组装仪表以及计算机在热工自动化中的应用,大体经历了三个阶段。

首先,人工与仪表结合调节阶段,用一些测量仪表,来监测过程的主要环节与重要参数,通过显示读出数据,据此,工艺和调节要求相结合,操作人员作出判断,合理、正确地实施操作调节,以保证符合安全和生产的需要。这种调节方式,不仅劳动强度大,且与生产发展中变化迅速、多个参数控制、工作条件严峻的现代化大型生产过程不能相适应。

后来,随着生产要求和科学技术的发展,测量技术的提高,自动调节仪表与调节机构开始应用于生产过程,代替了人工操作。传感器元件代替了人的眼、耳、肌肤等感官,调节器代替了人的大脑,执行器代替了人的手足,这样就可使被调参数以一定的精度,自动地稳定在某预设定值的附近,无需人员参加,可用来代替人们繁重的劳动,并可实现人的感官无法适应的工作条件,大脑反应不能及时处理的现场调节等。

第三阶段,随着大规模集成块与电子计算机的出现、发展及广泛应用,使生产过程自动化日趋完善,并朝着多参数、最优控制、智能化发展,许多感觉量也开始能测量与控制,新型的测量方法的开发,仿生传感器的应用,都展示出热工及其它许多行业仪表与自动控制的灿烂前景。

1-3 热工仪表的组成与分类

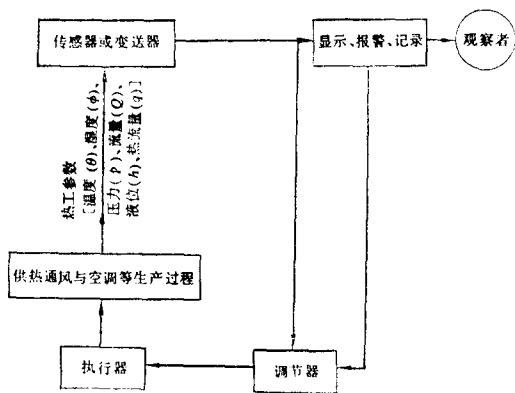


图 1-1 热工自动化仪表的功能关系图

热工仪表从功能与学习方便出发,可将它分为热工测量仪表与自动化仪表两大类,测量仪表如不是单独存在,常包含在自动化仪表中作监测用。本书上篇着重介绍热工测量仪表,又可称为检测仪表。热工测量仪表与调节器、执行器组合称作热工自动化仪表。它们的关系如图1-1所示。

热工测量仪表能将所测量的参数(信息)进行变换,成为人们所感知的信号,或变为可驱动控制的电、液、气与机械等信号。

热工测量仪表,无论是作为现场检测用还是作为实验室测试用,常将它们划分为传

感器、变换器、显示记录三部分,其联系以非电量电测仪表为例,如图1-2所示。

热工测量仪表的分类方法很多,除将用于研究与单项测量的仪表称作测试仪表或称为仪器,用于生产过程检测与控制热工参数的仪表称作热工仪表外,还可按其被测参数种类来划分(多为使用者采用),按显示功能分,按传感器变换原理分(便于学习与理解),按仪表的结构与构造原理划分,或按其能源划分为气动仪表、电动仪表和液动仪表。仪表最终要通过现场使用及主要技术条件来选择,单凭分类及名称,有时会不得要领,商业名称及做广告而自誉的高精度、超高精度等则更不足凭。

目前,仪表名称最多的命名方式,多采用传感器变换原理及所测参数而命名,有时强

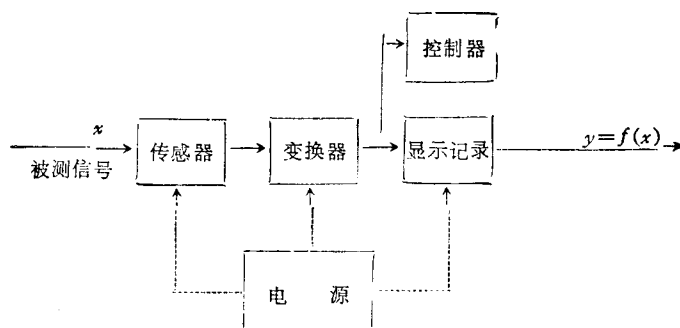


图 1-2 热工测量仪表组成方框图

调其显示方法而加上数字式或记录式等来命名仪表，如数字式温度显示仪表，膜盒式微压记录仪等。

按被测参数分类，热工测量仪表有压力测量仪表、温度测量仪表、湿度测量仪表、流量测量仪表、液位测量仪表、热流量测量仪表等。

按仪表的结构可分为数字式显示仪表、模拟式显示仪表、自动记录式仪表和积算式仪表等。还有巡回式检测仪表，这种仪表能接受多个传感器（多点测量）的信号，具有循环显示、记录、报警等功能。

热工测量仪表与自动化仪表还可按其组成不同而分为基地式仪表、单元组合式仪表和组装式仪表。基地式仪表是将传感器、调节、显示、记录及其辅助功能组装在一个表壳里，形成能独立完成某种自动显示、调节功能的仪表。基地式调节仪表成套性强，调节范围窄，通用性差，故使用受到很大的局限，但它具有结构简单、可靠、经济性好等优点，目前已较少生产，而被单元组合式仪表所代替。

单元组合式仪表是将它各功能分成若干个独立单元仪表，各单元之间采用统一的输入和输出信号，例如，我国生产的电动单元组合式仪表 DDZ-Ⅰ型，采用 $0\sim 10\text{mA}$ ；DDZ-Ⅲ型采用 $4\sim 20\text{mA}$ ；气动单元组合仪表采用 $20\sim 100\text{kPa}$ 气压统一信号。使用中 将所需单元进行不同的组合，可得到所需的各种测量与调节系统。由于这种系统具有组成与改装方便、灵活、通用性强的特点，给生产、维修、管理等带来很大的方便，广泛应用于现代工业生产过程中。

组装式仪表是将各个单元划分成更小的功能块，它比单元仪表灵活，功能也多，能适应较复杂的模拟和逻辑规律相结合的调节系统的需要。例如，暖通空调专用的 WSZ-2 系列仪表。

气动仪表是以压缩空气为能源进行工作，具有价廉、易维护、安全、防爆等特点。

液压仪表是以高压油或水进行工作的，多用于大功率场合。

电动仪表具有快速响应，易于远距离测量与控制，易于与各种电子装置、计算机等配合，可完成各种复杂的综合控制系统，发展十分迅速，已成为工业自动化的主要仪表。

仪表按防爆性能可分为普通型、隔爆型、安全防爆型。仪表还可按是否能防腐蚀等用途分类，在此就不一一赘叙。

由于电子技术突飞猛进的发展，半导体技术与电子计算机的应用，使许多热工中的非电量常变换成电量进行测量，这样可将十分成熟的通用电子仪表组合到测量——调节系统

中加以利用，以提高测量与调节的精度，响应的速度，并能将取得的信号很方便地输入到电子计算机进行处理。“电测”成为许多热工非电量测量的一种很有前景的应用手段，但传统的测量方法，如水银温度计，弹簧管压力计，以及气、液、甚至机械方式，由于它们简单、可靠、精度也有一定保证，受环境干扰小等优点，不可能完全摒弃。将传统的测量方法与现代技术很好的结合起来，必将开创出更新的热工测量及自动调节仪表。而且，传统的测量仪表本身也在不断的更新，重新赋予了新的概念与生命，这就是介绍新的测量仪表的同时，对老的、还具有生命力的传统仪表也不惜笔墨予以介绍的理由。

随着科学技术的不断发展，工艺要求日趋复杂，在很多方面，如提高产品质量和劳动生产率、节能降耗、安全生产、生产现场和生活、办公、居室条件的改善等都对测量与自动化提出了愈来愈高的要求。因而也产生了新的测量方法和测量仪表，更先进的控制方法，如多变量控制、数字控制、最优控制、自适应控制及其它特殊规律的控制的使用也在开发之中。所有这些，都将促进热工仪表与自动控制技术体系的不断完善，更待有志者不断地学习与进取。

第二章 测量的基本知识

2-1 测量的概念与基本测量方法

一、测量的概念

测量是从客观事物中提取有关信息的认识过程，经整理后成为数据。数据的三要素是比值、单位与误差（范围与可信程度）。测量也就是为确定被测对象的量值而进行的实验过程。它要选择实验的方法和专门的装置（仪器），按一定的程序，取得与定义为“一”的同类参数（测量单位）的比值。即

$$X_0 \approx ax \quad (2-1)$$

式中 X_0 ——被测量的真值；

a ——测量单位（标准量）；

x ——二者的比值。

式（2-1）称为测量的基本方程式。从上式可知，测量过程有三要素：一是测量单位，它是由人定义的，起初规定时带有“任意”性，因此，同种量曾经有过许多单位，给生产和科学技术带来许多不便。现在，采用国际单位制（SI），单位的统一初步得到实现；二是测量方法（实验方法），它是将被测量与其单位进行比较的方法；三是测量仪器与设备，它是测量过程的具体体现与实施者，是为了求取比值而实际使用的一些仪器与设备。有些测量仪器输入的是被测量，而输出的就是被测量与其单位的比值。例如，压力表和温度计。

无论采用任何精确的方法和设备，由测量所得到的被测量值，即测量结果不可能尽善尽美，测量结果 ax 等于真值 X_0 而没有误差是不可能的。式（2-1）不用等号就是考虑 ax 有误差，即误差是无法避免的。虽然，随着实践经验的积累，科学技术的积累，可以使测量结果与真值愈来愈近，但绝不可能使二者完全相等。由于在测量过程中，始终存在着各种影响的误差，但在工程上，只要误差范围在允许精度内，我们认为测量工作完成了，不可能也不需要去求得真值。

二、测量方法

测量方法很多。按照测量仪表的特点，测量的基本方法有非零法、零位法与微差法，接触法与非接触法等；按照被测对象的特点分，又有静态测量与动态测量，点参数测量与场参数测量等；按照获取测量结果的程序又可分为直接测量和间接测量等。下面分别叙述之。

（一）非零测量法、零位测量法与微差法

非零位测量法是通过仪表的测量机构，直接或间接测量被测量所产生的输出信号的大小，该输出信号不为零，其相应的数值就是被测量的测量值，由显示部分显示。例如，弹

簧管测压时弹簧管自由端位移值（压力），水银温度计液柱高（温度），不平衡电桥等。零位测量法是通过仪表的测量机构，比较被测量与已知标准量两者差值信号的大小与相位，调节已知标准量的大小，使两者完全平衡或全部抵消，此时测量系统对差值信号的指示为零，则已知标准量的数值就是被测量的测量值。例如，用天平称物质的质量，用平衡电桥测电阻，用电位差计测电势等。非零位法简单、迅速、直观，零位测量法的测量精度较高，消除干扰能力强，是精密仪表的发展方向，但仪表结构复杂，价格较贵。微差法是通过仪表的测量机构，用被测值取代另一已知标准值（接近测量值）后，读出其剩余差值及方向，从而得到被测量值。它是零位测量法与非零测量法的结合，测量较迅速，无需经常调整量程，所测的读数范围小，因而可提高测量精度。例如，测量压力的U型管等。

（二）接触式测量法与非接触式测量法

接触式测量法是测量仪表的传感器与被测对象直接接触，承受被测参数的作用，感受其变化，并输出其信号大小。例如，弹簧管压力表，体温表等。非接触式测量法是测量仪表的传感器不直接与被测对象接触，而是间接承受被测参数的作用，感受其变化，从而获得信息，达到测量的目的。例如，辐射温度计。非接触式测量法有它独特的优点，它不干扰被测量对象，不消耗被测对象的能源，既可对被测对象的局部“点”进行检测，又可对被测对象进行扫描，得到二维、三维和四维的信息，特别是在一些接触法测量不能胜任的场合。例如，测量腐蚀性介质的参数，则发挥出它的方便、安全和准确的特点。

（三）静态测量法与动态测量法

静态测量是指被测对象处于稳定情况下的测量，此时，被测参数不随时间变化，故也称稳态测量。动态测量是在对象处于不稳定的情况下进行测量，此时，被测参数随时间变化，因此，这种测量是瞬间完成，只有这样才能得到动态参数的结果。一般情况下，被测参数多数是随时间变化的，生产过程的被测量尤其如此。如果被测参数随时间变化很缓慢，而测量所需时间又相对很短时，被测对象可近似为稳态，相应的测量也可认为是稳态测量。测量某点的被测量值为点参数测量，测量某个场的被测量值（多点）为场参数测量。本书所讨论的测量，若无特殊说明，均为稳态测量和点参数测量。

（四）直接测量法与间接测量法

直接测量是指无需对被测的量与其它实测的量进行函数关系的辅助计算，而直接得到被测量值的测量。例如，用米尺量一根钢管的长度，用温度计去测量温度等。直接测量多用来测量基本单位量，它简捷、迅速、明了，易保证测量精度。间接测量是指直接测量的量与被测的量之间有已知函数关系，从而得到该被测量值的测量。例如，用测压管测出管道中流体的动压值，以计算出流体的流速与流量。

由于非电量电测的应用，现在电子仪表能利用运算线路使测量者方便地读出间接测量值，但在研究与处理其误差值时，还需逐项分析。

多次测量同一参数时，按照精度是否相同，每次测量又可分等精度测量与不等精度测量。不等精度测量及计算，处理误差较麻烦，但可据此提高测量精度与经济性，在选择测量方法时应予以考虑。

2-2 测 量 系 统

一、测量系统

系统是指一些部件(单元)组合,完成一定的指定任务。测量系统是指为完成测量任务而组合在一起的总体,研究时必须将整个测量系统(包括测量中所有环节,被测对象与观察操作者)作为整体来研究。常见测量与自动调节系统方框图可见图1-1。作为仪表研究常狭义的指测量设备,构成方框图可见图1-2。

所谓测量设备,是指测量中使用的一切设备,包括各种量具、仪表、仪器、测量装置系统及在测量过程中所需的各种元件、器件、附属设备、辅助设备、试验设备等。随着科学的发展,工业现代化的需要,各种精密、综合、快速、多参数巡回检测设备应运而生,在试验室与生产现场中得到了应用。在供热通风与空调工程中,所测参数种类繁多、范围广,测量要求、方法、精度与安装位置不同,测量设备的原理、外形、结构、价格及自动化程度差别十分大,它可以是一个价格便宜的简单量具,也可以是一套价格昂贵、高精密、高度自动化的复杂测量系统,但就其测量过程所具有的功能可分为三部分,即传感器、中间变换器和显示装置,它们之间用信号线路或信号管路联系起来。各部分可分成许多环节,也可组合在一整体中,对于简单量具与仪表,这三部分界线也不可能划分得很明确。例如,水银温度计,弹簧管压力表。

二、传感器

传感器是测量系统与被测对象直接发生联系的部分。它的作用是感受被测量的大小后,输出一个相应的信号,把被测量转换为易于传送和显示的物理量。因为传感器是从对象提取被测量的信息,向以后各环节提供原始信号,所以它的性能直接关系着测试工作的可靠性,人们将它比作人的感觉器官或感觉器官的延伸,作为一个良好的传感器,应具备下列条件。

(1) 准确性和稳定性。输出信息与输入信息有准确的、稳定的单值函数关系,并且最好是线性的。非被测量对传感器的影响很小,可以忽略不计,若不能忽略,则应采取修正或补偿措施。线性关系易于校正与标定,动态测量时易于处理,且测量精度也高。

(2) 灵敏性。即要求较小的输入量便可得到较大的输出量。

(3) 负载效应小。传感器对原系统的被测参数影响愈小愈好,即能耗小。

(4) 其它。经济性、耐腐蚀性等。

传感器也称为一次元件或发送器等。

三、中间变换器

由于传感器的输出能量很小,一般不能直接驱动显示和控制仪表,必须经过放大或再一次的能量转换,才能将传感器的微弱信号变换为能远距离输送的统一信号(对于单元仪表应该是标准信号)。所以中间变换器的作用是将传感器的输出信号进行远距离的发送、放大、线性化或转换成统一信号,供显示仪器用。例如,压力表中的杠杆齿轮机构就是将弹性元件的小变形转换成指针在标尺上的移动,DDZ-Ⅰ型电动单元仪表可将热电势或热电阻值转换成0~10mA的信号。变换器还可以将模拟信号转换为数字信号(A/D)。对中间变换器的要求是准确地传输、放大和转换信号,并且使信号损失最小,也就是使误差最

小。变换器可以是一套复杂的电子系统，也可以是简单的导线、机械结构等。

四、显示装置

显示装置也称为测量终端。它的作用是向观察者显示被测参数的数值和量值。显示可以是瞬时量指示、累积量指示、越限和极限报警等，也可以是相应的记录显示。显示的方式有指示式、数字式和屏幕式。数字显示便于防止观察者的读数和主观误差，但结构复杂；模拟显示结构简单、价格低廉、易产生读数误差和估读误差；屏幕显示具有数字显示和模拟显示的优点，即易于读数和形象性，并能同时在屏幕上显示大量数据。显示装置有时还有各种接口，以便同计算机或其它数字化装置联系，也可以与各种显性、隐性记录仪、自动化调节器、执行器联系。

自动化调节仪表，除包括上面三个部分外，还有调节器与执行器。调节器的作用是将人们预置的设定值与测量值比较后，按一定的调节规律输出控制信号，去控制执行器的动作。执行器的作用是接受调节器的信号，人工操作时，接受操作人员发出的信号，操作有关闭、开关等来改变操作量（调节量），以达到控制被调量的目的。

2-3 测 量 误 差

一、测量误差

测量误差是测量结果与被测量的真值之间的差。测量误差可以用绝对误差来表示，也可以用相对误差来表示。

绝对误差的数学表达式为

$$\Delta = x_i - X_0 \quad (2-2)$$

式中 Δ ——绝对误差，

x_i ——测量结果。

相对误差的数学表达式为

$$\delta = \frac{\Delta}{X_0} \times 100\% \quad (2-3)$$

式中 δ ——相对误差。

由于真值 X_0 无法测量，上式也无法列出，若知道误差范围 $\Delta_{\max}$ 后 ($\Delta_{\max} \geq \Delta$)，据此可将 X_0 的范围写作

$$X_0' = x_i \pm \Delta_{\max}$$

X_0' 亦为一不确定值， X_0 的实际值在此区间内。只有当给出了测量结果、误差范围 $\pm \Delta_{\max}$ 及其单位，测量才算完成。

误差来源十分多，研究的方法与目的也不一，故有各式各样的误差分类方法。按误差产生的原因及其性质的不同，将误差分为系统误差、随机误差和粗大误差。

(一) 系统误差

系统误差是在偏离规定条件时或由于测量方法所引入的因素，按某确定规律所引起的误差。当偏离规定的测量条件下多次测量同一量时，误差的绝对值和符号保持恒定，当测量条件改变时，按某一确定规律变化。例如，由于指示仪表刻度是印制或机械刻制的，生产的每台仪表由于多种原因，使输出产生定值的系统误差。指针旋转中心 O 与仪表刻度盘

中心 O' 不重叠, 指针偏转误差 Δ 作周期性变化, 产生的周期性变化的规律为

$$\Delta = OO' \sin \beta \quad (2-4)$$

式中符号如图2-1所示。

由于系统误差具有规律性, 可通过引入补偿值或规定其最大范围加以修正, 以提高测量的精度与可靠性。

系统误差的主要来源是测量仪器和使用中产生的。

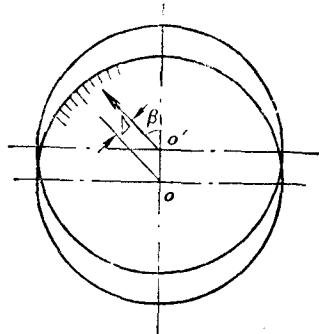


图 2-1 周期变化的系统误差

(1) 校验仪表时标准仪表误差过大, 刻度不准, 使读数值产生读数误差。

(2) 选择测点不当, 被测参数不能反映实际参数值, 或有一定差值。

(3) 仪器测量方法不甚合理, 引起的静态、动态及负载效应误差。

(4) 仪表使用不当, 测试人员未能按操作程序调整、安装、读数。

(5) 未能满足仪表的使用环境条件, 如温度、湿度、电场、磁场等。环境条件改变产生的系统误差又称附加误差, 它是仪表确定的基本误差之外的误差。

按对系统误差掌握的程度、使用上的便利, 将它分为已定系统误差(方向和绝对值均已知)与未定系统误差(未定值可划定其变化范围)。

(二) 随机误差

随机误差是在测量条件下, 多次测量同一量时, 误差的绝对值和符号以不可预定方式变化的误差。随机误差又称偶然误差, 它可通过统计学与概率论来进行研究, 虽不能确定, 但可知其区间与出现的概率。

随机误差的产生原因可以认为是大量微小同批无规律作用的因素或系统误差无规律作用的结果, 它的数值大小与符号(方向)均是随机的, 这种误差始终存在, 愈是精密测量, 愈难以消除, 就如人们无法消除与控制许多随机因素一样。它产生的原因主要是下面几种情况。

(1) 仪表本身的设计、制造、材料、间隙与摩擦等原因, 无规律变化与出现的结果。

(2) 测试人员虽认真, 但最后一位估计读数不准。数字显示仪表, 虽可消除读数的估计误差, 但由于计数脉冲与门脉冲不完全同步而产生一个字的误差。

(3) 使用条件与环境的变化。如产生的误差较大, 可通过实验方法加以校正, 属系统误差。如仅是微量的随机变化, 使被测量参数在数值尾数上随机波动, 仪器愈精密, 分辨的微量愈小, 此值在读数上读出, 即产生了随机误差。

在工程中, 包括热工测量, 如无特殊作用影响, 均可用正态分布规律处理, 数学家已为我们作出了许多论证, 可将其结果用于随机误差处理上。

测量结果中, 随机误差的大小用“精密度”来表示, 精密度是指在一定条件下进行多次测量时, 所得测量结果彼此之间符合的程度; 系统误差的大小用“正确度”来表示, 正确度是指在规定的条件下, 在测量中所有系统误差的综合; 随机误差与系统误差的综合用“准确度”来表示, 它表示测量结果与真值的一致程度。例如, 测量的相对误差为0.01%, 若为随机误差引起, 则说精密度为 10^{-4} ; 如果由系统误差引起, 则说正确度为 10^{-4} ; 如果

由系统误差和随机误差共同引起，则可说准确度为 10^{-4} ，所以，通常所说的测量精度，泛指精密度、正确度和准确度。

(三) 粗大误差

粗大误差是指超过在规定条件下预期的误差。粗大误差简称粗差。它产生的原因主要是错误读取示值，使用有缺陷的测量仪器，测量仪器不正确等。

含有粗大误差的测得值（从测量仪器直接反映或经过必要的计算而得出的量值）明显歪曲了客观现象，因此称含有粗大误差的测得值为坏值或异常值，测量结果中不应含有粗大误差，应当从测得值中剔除坏值。所以，在作误差分析时，要估计的误差通常只有系统误差和随机误差。

以上三种误差，可以从射击弹落点图，帮助读者判别与认识记忆。

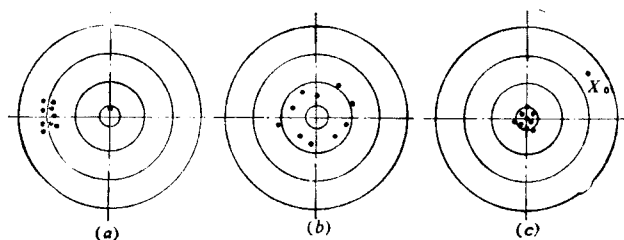


图 2-2 三种射击弹落点情况图

图2-2 (a) 中随机误差（枪支性能好）小，而系统误差（瞄准差）大；(b) 中随机误差大，而系统误差小；(c) 中随机误差与系统误差均较小。 X_0 为坏值，应予以剔除。从图中可看出，精密度高的正确度不一定高，正确度高的精密度也不一定高，但准确度高，则正确度与精密度都高。

前已叙述，通过测量可以得到被测参数的测得值，但测量的目的还未全部达到，为了准确获取表征对象特征的定量信息，还要对测得值进行数据处理与误差分析，即在给定条件下（测量方法、仪器精度、参数）找出最接近真值的最佳值（又称最优概值）和可靠性高、误差区间（不确定度）小的 $\Delta_{\max}$ 。

如在测得值中消除了系统误差，余下的误差就可当随机误差处理，随机误差的处理通常用统计法。

二、随机误差的特性与处理

(一) 随机误差的特性

由概率中极限理论可知，当系统误差消除后，在对一量值进行无数次测量中，用同一方法、同一仪表、同一参数，即等精度测量得出的一系列不同的测量值 x_i （常称为测量列），当测量次数 i 趋向于无穷大时，它的算术平均值 $\bar{X}$ 就是被测参数的真值。

在工程中，观测的次数都是有限的。用有限次 n 的测量值得到的算术平均值，只能近似等于真值 X_0 ，称为在 n 次测量后的最佳值或最优概值。用公式表达为

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2-5)$$