



人力资源和社会保障部“十一五”规划课题成果

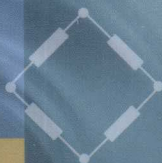
21世纪 | 规划教材
高等职业教育 | 双证系列

热工测量及控制

主编 \ 李 洁



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



21 世纪高等职业教育规划教材
双证系列

热工测量及控制

李 洁 主编

上海交通大学出版社

内 容 提 要

本书将热工测量与控制合并为一门课程,分为热工测量与仪表、自动控制原理和 PLC 原理及应用技术三大部分,内容包括热工测量基本知识、温度测量及仪表、压力测量及仪表、流量测量及仪表、物位测量及仪表、湿度测量及仪表、自动控制基础、自动控制系统的应用、计算机控制技术、可编程控制器应用基础、三菱 FX₂ 系列 PLC、PLC 程序设计。适用供热通风与空调工程、制冷与冷藏技术工程、热能与热能设备工程、建筑设备工程及给排水工程技术、环境监测及治理技术专业。可作为高等院校及高职高专非电类专业的教材,也可供相关工程技术人员及自学者参考和学习。

图书在版编目(CIP)数据

热工测量及控制/李洁主编. —上海:上海交通大学出版社,2010

21 世纪高等职业教育规划教材. 人力资源和社会保障部“十一五”规划课题成果

ISBN 978 - 7 - 313 - 06567 - 4

I. ①热… II. ①李… III. ①热工测量 - 高等学校: 技术学校 - 教材②热力工程 - 自动控制 - 高等学校: 技术学校 - 教材 IV. ①TK3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 110111 号

热工测量及控制

李 洁 主编

上海交通大学 出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

上海交大印务有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm × 960mm 1/16 印张: 17.25 字数: 322 千字

2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

印数: 1 ~ 3030

ISBN 978 - 7 - 313 - 06567 - 4/TK 定价: 34.00 元

前 言

自动化技术在通风空调、制冷工程、建筑设备、热能工程及环境工程等领域有广泛应用,这些工程系统对于充分利用系统各项功能、实现安全节能运行、达到最佳经济效益目标有着重要的作用。自动化技术的应用主要表现在利用自动化仪表进行参数检测、自动控制系统的设计及运行维护、自动控制装置尤其是工业控制计算机的应用三个方面。本教材将这三个方面的知识有机地结合在一起进行讲解,希望能够使非电类、非控制类专业的学生系统性地认识到自动化技术在工程方面的应用及其重要性。使这些专业的学生具备较为全面的职业能力以便更好地胜任相关职业岗位。

本教材参考教学时数 60 学时,每部分约占 20 学时。其主要内容是:第一部分为热工测量仪表,介绍了常用的温度、压力、流量、液位、湿度测量仪表的基本结构、工作原理和使用。第二部分为自动控制基础应用,介绍了自动控制系统及其基本组成,计算机控制系统的基本组成及结构分类,并结合工程实例讲解了自动控制系统在空调工程、制冷工程、供热工程方面的实际应用。第三部分介绍了工业控制计算机可编程控制器的结构原理,基本指令和典型程序的编写,通过典型逻辑控制系统的讲解说明了工业控制系统的分析设计过程。

本教材具有的特点如下:

(1) 注意对基本概念的讲解,理论知识以实际够用和必需为度,简明实用;编排上力争做到纲目清晰、条理分明。

(2) 注重知识间的相互联系,能将基础理论知识的讲解与典型工程实际应用相结合。

(3) 充分体现“能力本位”教育目标,注意发挥图例在能力本位教育中的作用,侧重培养学生具备直接应用理论方法分析工程实例的能力。

本书由西安航空技术高等专科学校李洁负责统稿并担任主编,吴奇、赵霞担任副主编。本书编写的具体分工如下:第 2,3,4 章及第 10 章由李洁编写,第 5,6 章及第 11 章由赵霞编写,第 1 章,第 7,8,9 章由吴奇编写,第 12 章由孙科峰编写。全书图表由孙科峰校对,并编写思考与练习题。全书由西安航空技术高等专科学校杨勇教授审阅。

本书在编写过程中,参阅了大量书籍和文献,在此向相关作者致敬并表示诚挚的感谢。

尽管在编写这本教材的过程中我们做了一些努力,但由于编者水平有限,难免存在不足之处。恳请广大读者批评指正。

编 者

2010年6月

目 录

第 1 章 热工测量基本知识	1
1.1 测量的概念与方法	1
1.1.1 测量的概念	1
1.1.2 测量方法	2
1.2 测量误差	3
1.2.1 误差分类	3
1.2.2 测量的精度、正确度和准确度	7
1.3 热工仪表的组成与分类	8
1.3.1 仪表组成	8
1.3.2 仪表分类	9
1.4 仪表的质量指标及校验	10
1.4.1 仪表的质量指标	10
1.4.2 仪表的校验	13
第 2 章 温度测量及仪表	14
2.1 温度测量概述	14
2.1.1 温标	14
2.1.2 测温方法与测温仪表的分类	15
2.2 膨胀式温度计	16
2.2.1 电接点式水银温度计	16
2.2.2 双金属温度计	18
2.3 热电偶温度计	19
2.3.1 热电偶测温原理	19
2.3.2 热电偶的基本定律	22
2.3.3 热电偶的基本结构及类型	23
2.3.4 补偿导线	27
2.3.5 热电偶的冷端温度补偿	28

2.3.6 热电偶实用测温线路	30
2.4 热电阻温度计	35
2.4.1 常用金属及半导体热电阻	36
2.4.2 热电阻基本结构及类型	38
第3章 压力测量及仪表	40
3.1 液柱式压力计	41
3.1.1 U形管压力计	41
3.1.2 单管压力计	42
3.1.3 多管压力计	43
3.1.4 斜管压力计	43
3.2 弹性式压力计	44
3.2.1 弹性元件工作原理	44
3.2.2 弹簧管压力表	45
3.3 压力变送器	49
3.3.1 电位器式压力变送器	49
3.3.2 电感式压力变送器	50
3.3.3 电容式压力变送器	51
3.3.4 霍尔式压力变送器	52
3.4 常用压力表的校验及使用	53
3.4.1 压力表的校验	53
3.4.2 压力表的选择与安装	55
第4章 流量测量及仪表	58
4.1 流量测量概述	58
4.1.1 流量的定义与单位	58
4.1.2 流量检测方法 with 测量仪表的分类	59
4.2 压差式流量计	59
4.3 转子式流量计	64
4.4 动压测量管	67
4.4.1 皮托管	67
4.4.2 均速管	68
4.5 涡轮流量计	69
4.6 电磁流量计	71

4.7 超声波流量计	74
4.8 椭圆齿轮流量计	77
第5章 物位测量及仪表	80
5.1 概述	80
5.2 静压式液位计	81
5.2.1 静压式液位计的工作原理	81
5.2.2 压力表测量液位计	82
5.2.3 差压式液位计	83
5.3 浮力式液位计	83
5.3.1 浮子式液位计	84
5.3.2 浮筒式液位计	84
5.4 电气式液位计	85
5.4.1 电接点式液位计	85
5.4.2 电容式液位计	86
5.5 超声波液位计	87
第6章 湿度测量及仪表	89
6.1 湿度概述	89
6.2 干湿球湿度计	91
6.2.1 干湿球法湿度测量	91
6.2.2 普通干湿球湿度计	91
6.2.3 自动干湿球湿度计	92
6.3 氯化锂电阻式湿度计	93
第7章 自动控制基础	95
7.1 自动控制系统及其分类	95
7.1.1 自动控制系统	95
7.1.2 自动控制的基本组成	98
7.1.3 自动控制系统中常用术语	99
7.2 自动控制系统的分类	100
7.2.1 按给定量的运动规律分类	100
7.2.2 按照控制系统结构进行分类	102
7.3 自动控制系统的过渡过程	104

7.3.1 静态与动态	104
7.3.2 过渡过程	105
7.3.3 过渡过程的性能指标	107
7.4 控制系统的特性分析	110
7.4.1 静态特性	111
7.4.2 动态特性	111
7.5 控制对象特性	116
7.5.1 调节对象的负荷	116
7.5.2 对象的容量及容量系数	117
7.5.3 对象的自平衡	118
7.5.4 对象的反应曲线	119
7.5.5 对象的特征参数	120
7.6 控制器及其基本的控制规律	122
7.6.1 双位控制器	122
7.6.2 比例控制器	123
7.6.3 比例积分控制器	125
7.6.4 比例微分控制器	126
7.6.5 比例积分微分控制器	127
7.7 执行器	127
7.7.1 执行机构	128
7.7.2 调节阀	130
第8章 自动控制系统的應用	133
8.1 简单控制系统	133
8.2 空调系统的自动控制	136
8.2.1 空调系统应用补偿调节的实例	136
8.2.2 新风机组的自动控制系统	138
8.3 制冷自动控制	139
8.3.1 简单控制系统举例	139
8.3.2 制冷过程自动控制	142
8.4 集中供热系统的自动控制	146
第9章 计算机控制系统	148
9.1 计算机控制系统的组成	148

9.2 计算机控制系统的分类	151
9.3 计算机控制系统的结构形式及其分类	152
第 10 章 可编程控制器应用基础	155
10.1 可编程控制器概述	155
10.1.1 PLC 的产生及定义	155
10.1.2 PLC 的分类	157
10.1.3 PLC 的主要功能	160
10.1.4 PLC 的特点	161
10.1.5 PLC 的主要技术指标	163
10.1.6 PLC 的应用范围	164
10.1.7 PLC 的发展趋势	165
10.1.8 学习 PLC 的关键	166
10.2 可编程控制器的工作原理	167
10.2.1 PLC 的硬件组成	167
10.2.2 PLC 的工作过程	174
10.2.3 PLC 的输出滞后时间	177
10.2.4 PLC 控制系统及其控制原理	179
10.3 可编程控制器的软件及编程语言	180
10.3.1 系统程序	180
10.3.2 用户程序	181
10.3.3 可编程控制器的程序结构	185
10.4 PLC 的等效电路	185
10.5 PLC 安装与接线	187
第 11 章 三菱 FX₂ 系列 PLC	193
11.1 FX ₂ 系列可编程控制器及其性能	193
11.1.1 FX ₂ 系列 PLC 的型号及性能	193
11.1.2 FX ₂ 系列 PLC 的编程元件	195
11.2 FX ₂ 系列 PLC 的基本指令	205
11.3 FX ₂ 系列 PLC 的功能指令	214
11.3.1 功能指令的基本格式	214
11.3.2 应用指令	217

第 12 章 PLC 程序设计	220
12.1 梯形图的绘制规则	220
12.1.1 编程规则	220
12.1.2 编程方法	221
12.1.3 线圈输出的使用问题	223
12.2 常用梯形图程序	225
12.3 梯形图经验设计方法	231
12.3.1 运料小车自动控制系统的梯形图设计	231
12.3.2 两处卸料的小车控制系统的梯形图设计	234
12.4 应用实例	237
12.4.1 交通信号灯控制	237
12.4.2 物料自动混合控制	239
12.4.3 三相异步电动机正反转控制电路	241
思考与练习	242
附录	246
参考文献	263

第 1 章 热工测量基本知识

1.1 测量的概念与方法

测量是从客观事物中提取有关信息的认识过程,是获得各种事物之间定量关系的必要手段,通过测量人们可以获得有价值的信息。测量在科学研究、工程技术以及其他一切生产活动中都占有非常重要的地位。测量技术是研究测量原理、测量方法和测量工具的一门学科。不同的科技领域有不同的测量项目及测量特点,热工测量是指对热力过程中各种热工参数或物理量的测量如温度、压力、流量、物位等。测量不仅可以了解生产过程是否符合工艺规程的规定,是否达到了预定的质量、安全及技术指标,而且能根据测量结果,通过控制系统,对生产过程予以正确的调整。测量与自动控制的关系是测量为过程控制提供必要的参数依据,控制则是测量的目的之一。

1.1.1 测量的概念

测量就是采用测量工具(或仪表),通过实验的方法将被测量与同性质的标准量(即测量单位)进行比较,以确定被测量是标准量多少倍数的过程。其所得倍数就是被测量值,即

$$L = \frac{x}{b} \quad (1-1)$$

式中: x ——被测量;

b ——标准量(测量单位);

L ——所得被测量值。

由式(1-1)可知,被测量是由测量值及测量单位两部分组成,即 $x = Lb$ 。在测量的过程中,须具备 3 个要素,即测量单位、测量方法和测量工具。测量单位可以人为规定,为了避免采用不同单位制时带来的繁琐,现在随着科学技术的发展,经济交往的加强,人们要求有统一的测量单位,即采用国际单位制。国际单位制规定了 7 个基本单位,它是经过多数国家和几十年的使用实践证明具有科学、合理、精确、实用简明等优点,能给生产建设和科技发展带来很大的方便。测量方法是将被

测量与所选用的测量单位比较的方法,我们希望所选择的测量方法是合理的。测量工具是一些具体的仪器和设备,对测量工具的要求是准确。

在测量过程中,无论采用哪种方法与设备,测量误差则总是存在的,测量结果总会和真实值之间存在差异。因此,测量结束后,还需估计测量误差的大小。尽可能减小测量误差是测量的主要任务之一。

1.1.2 测量方法

测量是一项实验工作,为了获得准确可靠的数据,必须合理地选择测量方法。测量方法很多,下面按照不同的依据对测量方法分类。

1) 按照获得测量参数最后结果的程序不同测量可分为

(1) 直接测量 就是将被测量直接与同性质的标准量(测量单位)进行比较,其测量结果可以直接从测量仪表上读得的方法。例如用尺测量长度,用玻璃管水位计测量水位等,都是直接测量的例子。

(2) 间接测量 就是已知被测量与某一个或若干个其他量具有一定的函数关系,通过直接测量这些量值,再用函数关系式计算出被测量值的测量方法。例如,通过测量长度、宽度求面积,测量导线电阻、长度及直径求电阻率,这里对面积、电阻率的测量都是间接测量的结果。

2) 根据检测装置的动作原理不同可分为

(1) 直读法 被测量作用于仪表的比较装置,使比较装置的某种参数按已知关系随被测量发生变化,由于这种变化关系已在仪表上直接刻度,故可直接由仪表刻度尺读出测量结果。例如,用玻璃水银温度计测量温度时,可直接由水银柱高度读出温度数值。

(2) 零值法 又称平衡法。就是将被测量与一个已知量进行比较,当两者达到平衡时,仪表平衡指示器指零,这时已知量就是被测量值。例如,用天平测量物体重量,用电子电位差计测量电势都是零值法的测量方法。

(3) 微差法 当被测量尚未完全与已知量平衡时,读取它们之间的差值,由已知量和差值可求出被测量值。用不平衡电桥测量电阻就是微差法测量的例子。

3) 根据仪表是否与被测对象接触可分为

(1) 接触测量法 仪表的一部分与被测对象接触,受到被测对象的作用才能得出测量结果的测量方法。如用玻璃管水银温度计测温度时,温度计的温包应置于被测介质之中,以感受被测温度信号的高低。

(2) 非接触测量法 仪表的任何部分都不与被测对象直接接触就能得到测量结果的测量方法。如光学高温计测温,是利用测温对象所产生的热辐射对仪表的作用实现测温,因此仪表不必与对象直接接触。

需要指出的是上述测量方法,并没有明确界限,只是划分的根据不同而已。如用玻璃水银温度计测温度的方法既属于直读法也是接触法。直读法和零值法或微差法都属于直接测量法,只不过前者是直接从测量仪表上读得测量数值,而后者有一个用已知量与被测量相比较的过程,按比较法的不同又被划分为零值法或微差法。

1.2 测量误差

在实际测量的过程中,无论是仪表、被测对象、测量方法还是测量者本身,都会不同程度地受到本身和周围各种因素的影响。当这些因素变化时,就必然会影响到被测量的指示值的大小,使被测量的指示值与被测量的真值之间造成差异,这个差异就是测量误差。研究误差,就是要正确处理误差和分析测量误差产生的原因及误差的性质,为消除或减少测量误差提供一定的方法和处理措施。

1.2.1 误差分类

1.2.1.1 按误差本身的因次(单位)分类

误差可分为绝对误差和相对误差。

1) 绝对误差

$$\delta = x - \mu \quad (1-2)$$

式中: δ ——绝对误差;

μ ——真值;

x ——测量值,即仪表测量的指示值。

绝对误差不能作为仪表测量精度的比较尺度。例如一台仪表测量范围为100kPa,出现 $\delta_{\max} = 1\text{kPa}$,而另一台仪表,测量范围为10kPa,出现的 $\delta_{\max} = 1\text{kPa}$,就不能说两台仪表精确度相同。

2) 相对误差

相对误差有3种表示方法,即相对百分误差(引用相对误差)、实际相对误差和标称相对误差。

相对百分误差

$$\delta_1 = \frac{\delta}{\text{标尺上限} - \text{标尺下限}} \times 100\% = \frac{x - \mu}{\text{仪表的测量范围}} \times 100\% \quad (1-3)$$

实际相对误差

$$\delta_2 = \frac{\delta}{\mu} \times 100\% \quad (1-4)$$

标称相对误差

$$\delta_3 = \frac{\delta}{x} \times 100\% \quad (1-5)$$

对于大小数值不同的测量值,相对误差更能比较出测量的准确度,即相对误差越小,准确程度越高。通常以最大相对百分误差来定义仪表的精度等级。

1.2.1.2 按误差规律分类

按照误差出现的规律即产生的原因和性质的不同,可将误差分为:系统误差、随机误差和粗大误差。

1) 系统误差

在相同测量条件下(亦称等精度测量)多次重复测量同一量时,如果每次测量值的误差基本恒定不变,或者按某一规律变化,这种误差称为系统误差。误差值基本恒定的称为恒值系统误差(恒系差),变化的称为变值系统误差(变系差)。

变值系统误差按其变化规律又可分为累进性的、周期性的及按复杂规律变化的系统误差等几种。

系统误差的主要来源及改善:

(1) 仪表误差 它是由于测量仪表本身不完善而产生的误差,因此,仪表准确度不管多高,其误差总是存在的,我们只能根据测量误差的要求,选择适当的准确度的仪表使误差在允许范围内。

(2) 装置误差 它是由于测量设备和电路的安装、布置或调整不当而造成的误差,因此在安装仪表时应严格按照说明书的规定进行安装和调试,以便把装置误差降低到最低限度。

(3) 人为误差 这是由于在使用仪表的过程中,因测量人员操作不熟练、读数不准或技术水平低而引起的,故在测量过程中必须细心操作、避免失误。

(4) 环境误差 它是由于外界环境(如温度、电磁场等条件)与使用说明书规定的条件不相符而引起的附加误差。因此,如果一定要在偏离规定的条件下使用测量仪表,则应对测量结果加适当的修正以消除环境误差。

(5) 方法误差 也称理论误差。它是由于测量方法的不完善,或者由于测量所依据的理论本身不完善而导致的误差,故应尽量选用比较完善的测量方法。

系统误差的出现是有规律的,它的产生原因也往往是可知、能掌握的。系统误差的消除或减小通常是引入补偿值或规定其最大范围加以修正,从而提高测量的精确度和可靠性。

2) 随机误差

当设法消除了系统误差之后,在同一条件下反复测量同一量时,每次的测量值仍会出现或大或小、或正或负的微小误差,这种误差成为随机误差。由于表面上看

毫无规律,似纯属偶然原因产生,故亦称随机误差。

随机误差的出现完全是随机的,我们无法估计每个因素对测量结果所产生的影响,但却可以运用数学统计的方法来处理测量的结果,从而可以了解总的随机误差对测量结果的影响情况,进而找到削弱随机误差影响的方法。随机误差不能通过校正的方法加以消除。

从大量的实际统计中,已经总结出一个关于随机误差进行数学统计处理后的结论:随机误差的出现遵循正态分布。图1-1就是描述连续性随机变量出现规律的正态分布曲线。横坐标表示随机变量,即每次测量值的随机误差(绝对误差),纵坐标表示随机变量(即随机误差)的概率分布密度。所谓概率是指某一范围内随机变量出现的次数与随机变量总个数之比值。正态曲线与横坐标所围的面积代表所有随机变量出现的概率,应为100%(或者说为1)。

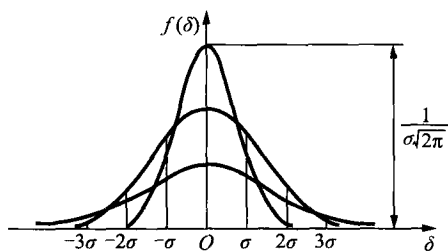


图1-1 随机误差的正态分布曲线

概率分布密度函数可用下式表示:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\delta^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1-6)$$

或

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1-7)$$

式中: x ——测量值;

δ ——随机误差;

μ ——真值,即概率论中的数学期望;

σ ——标准误差或均方根误差。

由图1-1可以看出随机误差有如下规律:

(1) 有界性 绝对值很大的误差出现的概率接近于零,也就是说,在实际测量中随机误差的绝对值不会大于一定的界限。这在图1-1中也表现为误差越小,出现的次数越多;而误差越大,出现的次数越少。

(2) 单峰性 当且仅当 $\delta=0$ 时,出现次数最多。

(3) 对称性 出现正负误差的次数几乎相等,对同一个值的正负误差出现的次数几乎相等(如果重复测量的次数越多,则图形对称性越好)。

(4) 抵偿性 在同样条件下,对同一量的测量,各次随机误差 δ 的算术平均值将随测量次数的增多而趋于零。即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu) = 0 \quad (1-8)$$

在工程测量中,当一组测得值呈正态分布时,算术平均值 $\bar{x}$ 与真值 μ 的误差最小,所以通常用一组测量的算术平均值代替组中的测量值 x_i ,或用算术平均值代替实际测量中测量的真值。

算术平均值可表示为:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1-9)$$

式中: x_i ——第 i 次的测量值;

n ——总测量次数。

每次测得到的测量值与算术平均值都有一个分散,这个分散度用标准偏差 σ 评定。 σ 不是一个具体的误差,它的数值大小反映一组等精度测量随机误差的分散程度。在用算术平均值代替真值后,标准偏差用下式求得:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (1-10)$$

式中: x_i ——第 i 次的测量值;

μ ——被测参数的真值;

n ——测量次数。

σ 值愈小,测量值接近真值的概率愈大,正态分布曲线愈尖锐,峰值愈大,说明测量值的集中程度愈好。测量的次数一般要求达 60 次以上,以便有足够的精确性。

可以算出,如果正态分布曲线下的面积为 1,则在 $-\sigma \sim +\sigma$ 之间下的面积为 0.683; $-2\sigma \sim +2\sigma$ 之间为 0.954; $-3\sigma \sim +3\sigma$ 之间为 0.997。也就是说,在进行多次重复测量时,随机误差落在 $\pm\sigma$ 、 $\pm 2\sigma$ 、 $\pm 3\sigma$ 范围内的概率分别为 68.3%、95.4% 及 99.7%。因此一般可以认为,在进行测量时,其随机误差的最大值不会超过值 $\pm 3\sigma$, 3σ 称为极限误差或最大误差。

3) 粗大误差

粗大误差又称为疏忽误差。是一种显然与事实不符的误差,没有任何规律可循。引起粗大误差的原因主要是由于操作人员的粗枝大叶、过度疲劳及疏忽大意所造成的,其测量结果毫无意义,应尽量避免。

由随机误差的统计规律可以看到,在一组等精度测量中,大的随机误差出现的概率是极小的,超过 $|3\sigma|$ 的误差,其出现的概率仅为 0.3%,因此如遇到误差大于 $|3\sigma|$ 的数据就值得怀疑,一般将其剔除,以得到比较符合实际情况的测量结果,这