

高等职业技术学院教材

自动控制

及 仪表

李高斗 主编

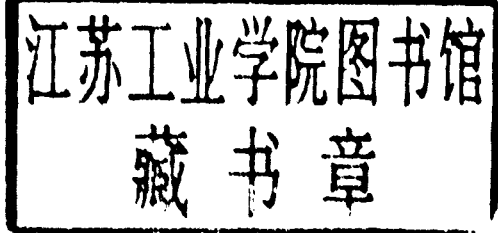
Zidongkongzhi Ji Yibiao



武汉理工大学出版社

自动控制及仪表

李高斗 主编



武汉理工大学出版社
武汉

图书在版编目(CIP)数据

自动控制及仪表/李高斗主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2000.6

ISBN 7-5629-1590-3

I. 自… II. 李… III. 自动控制-热工仪表 VI. TH81

内容提要

本书从应用的角度出发,介绍了工业企业(侧重建材工业)生产过程自动控制及其仪表,它适用于中等职业学校,也可作为其他类型教育的补充教材或参考资料。

本书重点介绍了基本检测理论、基本检测仪表(包括模拟仪表及数字仪表)、自动控制系统基本理论、模拟调节仪表、可程序控制器和计算机集散控制系统等内容。书中穿插了大量应用实例和设计方法,可帮助读者增强实践能力和动手能力。

本书既可作为高等职业技术学院工业自动化及其相关专业的教材,亦可供广大工程技术人员和仪表操作人员阅读。

武汉理工大学出版社出版发行

(武昌路狮路122号 邮政编码430070)

武汉市科普教育印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:450千字

2000年6月第1版 2000年6月第1次印刷

印数:1—3000册 定价:24.50元

前 言

本书是根据 1997 年 7 月国家建材局教材办公室在秦皇岛召开的“九·五”教材编审会的精神编写的。

随着现代工业生产的迅速发展,自动控制仪表在生产过程自动化中得到越来越广泛的应用。同时,随着以电子计算机为代表的数字控制技术的飞速发展,又为自动化仪表的更新换代创造了先决条件。为了适应生产过程的需要和人才培养的要求,我们在原有众多教材的基础上,重新编写了这本《自动控制及仪表》教材。在编写过程中,我们力求做到把国内生产实际和国内外先进技术相结合,在介绍各种理论和设备的同时,着重从实用和操作的角度出发,努力做到深入浅出、理论和实际相结合。

本书重新编写后,包括以下内容:

绪论,着重从整体出发介绍了自动控制及仪表的概况和发展过程;

第一章介绍基本测量理论、基本检测仪表;

第二章介绍模拟型、数字型显示仪表;

第三章介绍自动控制的基本理论和基本分析方法;

第四章介绍目前在工业生产过程中广泛使用的 DDZ—Ⅰ、DDZ—Ⅲ 型仪表的主要性能、组合和工作原理;

第五章介绍自动控制仪表在工业生产过程中的实用实例;

第六章介绍可编程序控制器和计算机集散控制的原理和应用;

第七章介绍自动控制系统的初步设计方法、仪表的选型。

本书由李高斗主编,戴毅任副主编,参加编写的有段波、于昆仑和何小何。

全书由北京科技大学徐正光教授(博士)担任主审。

最后,由于编者水平有限,加之时间仓促,书中不足甚至错误之处在所难免,恳请各位读者予以批评指正。

编者

1999 年元月

自动控制及仪表教学安排建议

本书共计七章内容。第一、二章为基本检测理论,基本检测和显示仪表;第三章为控制理论;第四、五章为模拟调节仪表的原理及应用;第六章为数字调节仪表(可编程序控制器和计算机控制系统);第七章为自动控制系统的基本设计方法。

本教材可满足 60~90 学时(含实验)的教学需要。建议学时安排如下:

学 时 数 课 类	章 节	绪 论	一	二	三	四	五	六	七	小 计
理论授课		2	14	8	12	10	4	14	6	70
实 验			2	2		4	2	6		16
机 动									4	4
总 计										90

另外,各专业可根据实际需要压缩或扩展教学内容,单列可编程序控制器课程的学校及专业可删去第六章第一节。

目 录

绪论	(1)
第一节 自动控制及仪表的重要意义	(1)
第二节 自动控制仪表的作用	(1)
第三节 自动控制仪表的分类	(2)
第四节 建材工业自动化发展概况	(4)
第一章 测量仪表	(6)
第一节 基本检测理论	(6)
第二节 温度测量仪表	(12)
第三节 压力检测仪表	(23)
第四节 流量检测仪表	(30)
第五节 成分分析仪表	(37)
第六节 物位测量仪表	(44)
第二章 显示及记录仪表	(49)
第一节 动图式显示仪表	(49)
第二节 自动平衡显示仪表	(54)
第三节 数字显示仪表	(62)
第四节 图形显示器	(70)
第三章 自动控制系统基本理论	(80)
第一节 自动控制系统概述	(80)
第二节 自动控制系统的过渡过程和品质指标	(84)
第三节 自动控制系统中各环节的特性	(87)
第四节 简单控制系统与复杂控制系统	(94)
第五节 调节器参数的工程整定	(100)
第四章 常规工业控制仪表	(104)
第一节 电动单元组合仪表概况	(104)
第二节 DDZ—Ⅰ型电动单元组合仪表	(107)
第三节 DDZ—Ⅲ型电动单元组合仪表	(125)
第四节 电动控制系统中的执行设备	(157)
第五节 基地式调节仪表	(165)
第五章 常规仪表控制系统应用举例	(171)
第一节 定值控制系统	(171)
第二节 串级控制系统	(173)
第三节 随动控制系统	(176)
第四节 其他自动控制系统应用举例	(176)
第六章 计算机过程自动控制系统	(179)
第一节 可编程序控制器	(179)
第二节 计算机控制系统	(209)
第三节 应用举例	(230)
第七章 自动控制系统设计初步	(243)

第一节 设计概述	(243)
第二节 有关设计规定的说明	(244)
第三节 自动控制系统的设计过程	(250)
第四节 控制盘(台)与控制室的设计	(254)
第五节 自动控制仪表及自动控制系统设计举例	(259)
参考文献	(268)
附录 热电偶分度表.....	(269)

绪 论

自动控制仪表及装置是自动化技术在生产过程中的具体应用和体现,反过来它又推动自动化技术的进步和发展。随着自动控制仪表及装置的不断改进和发展,保证了现代化生产过程的高效优质进行,为企业提高经济效益和劳动生产率、提高产品的产量和质量、节约能源、改善工人的工作条件、促进企业增强环境保护意识,发挥着越来越重要的作用。

21 世纪即将来临,知识经济初见端倪,以计算机为代表的电子信息技术将得到迅猛发展和广泛应用。作为计算机重点支持领域的自动化技术也得以快速发展,并取得了卓越的成就,在我国已被列为重点科技领域之一。

第一节 自动控制及仪表的重要意义

自动控制及仪表作为工业生产部门的中枢指挥系统和神经系统,在生产过程中起着举足轻重的作用,业已成为企业现代化的重要标志。

近几十年来,随着微电子技术和电子计算机技术的飞速发展,各种新型仪表和新型控制系统不断产生,并进行了多次的升级换代。随着自动化仪表在设计、制造、使用上的经验越来越成熟,各种性能稳定、品种多样的仪表装置越来越多的应用于所有的工业领域,成为企业走向现代化的必不可少的工具。

在我国,随着国家“八六三”高科技计划的进一步发展,作为自动化领域的重要内容——工业 CIMS 系统(Computer Integrating Manufactured Systems, 计算机集成制造系统)的研究,已获得重要成果,并在若干企业试用获得巨大成功,作为工业 CIMS 系统重要分支的自动控制仪表技术,也迎来了新时代的曙光,必将借此机遇更进一步地参与到生产过程现代化的洪流中去。

另外,结合我国工业生产部门的具体国情,即小、散、差的企业居于绝大多数的实际情况,国家有关部门提出了“利用电子信息技术改造传统产业”的设想,作为电子信息技术的一个最基本的重要环节——自动控制仪表也同样面临着新的发展机遇和参与着企业现代化的进程,并且作为其中一个必不可少的重要环节,担负着重要的历史使命。

第二节 自动控制仪表的作用

自动控制仪表作为生产过程自动化的主要手段,其参与生产过程的基本作用有如下几个方面。

一、自动检测

所谓自动检测,就是要将生产过程中各重要环节的重要参数适时、实时的检测出来,并经过一定的信号调理,送交有关的环节(显示、记录、调节等)进行使用。

二、自动讯号

所谓自动讯号,就是将检测环节送出的信号经调理后,进行显示、记录、计算、积算,并将结果向上一级工作站反映。

三、自动操作

所谓自动操作,就是将检测环节送出的信号或经过一定调理(转换、计算、积算等)的信号与自动控制系统事先给定值进行比较,得到一定的偏差信号后,再按照事先约定的方式(又称调节方式,详细内容将在有关章节中介绍)对偏差信号进行一定的运算,并依此结果去控制执行环节改变生产参数。

四、自动保护

所谓自动保护,就是当生产过程中的参数由于受到外界干扰或人为操作不当而发生剧烈变动,有可能对人员和生产设备造成损害时仪表系统能够迅速、自动的切断危害源(如电源、燃料、压力设备等),尽可能的减少损失。

五、自动报警

所谓自动报警,就是在生产过程参数达到所允许的极限值时,仪表系统应自动的发出声、光信号,提醒操作人员注意;同时还要发出信号通知自动保护环节作好动作准备。

另外,一个完善的自动化仪表系统,还应具备有一定的扩充能力,即不但能完成本职工作,还应具有与计算机或其他类型系统配合的接口,当生产规模扩大或技术水平提高时仍能够满足需要。

第三节 自动控制仪表的分类

自动控制仪表问世以来,历经了几次重大的转变,产生了众多的形式,并形成了各自的体系和优势,根据自动控制仪表的不同形式,介绍一下其分类情况。

一、按信号类型分类

自动化仪表按信号类型分类可以分为模拟式仪表和数字式仪表。

模拟式仪表,就是采用连续信号(模拟实际参数的信号)去进行信号的显示、调理和控制的仪表。长期以来,这类仪表广泛应用于工业生产的各个领域,形成了完整的设计、制造、使用体系。模拟仪表的主要优点是信号转换简便,结构简单,品种配套,易于操作,维护便利,价格便宜等;它的主要缺点是信号易于受到外界干扰,与计算机配合需要一定的转换环节等。

数字式仪表,就是采用离散信号(又称数字信号)进行传送和使用的仪表。这种仪表是近几年来随着计算机技术的发展而逐渐兴起的一种新型仪表。它的主要优点是抗干扰能力强、信号显示明确、精度高、功能完善、性能优越、可方便的与计算机配合形成智能型仪表,它的缺点是价格较高、维护维修不方便、对环境要求较高等。

二、按使用的能源分类

依据各种自动控制所使用的能源不同,自动控制仪表又可分为以下几种类型。

1. 电动仪表

以电能作为动力源的仪表,是目前工业生产过程中使用最为普遍的仪表。它包括模拟式电动仪表和数字式电动仪表。

电动调节仪表的主要特点是信号的传输、放大、转换、调理比较容易实现,而且还具备结构简单、性能稳定、可靠性强,操作方便等优势,又便于远距离监视和操作以及可方便的与计算机联用,因此,使用的范围也越来越广泛。另外,由于采用了安全火花防爆措施,其防爆问题也得到了很好的解决。

2. 气动仪表

以压缩空气为动力源的调节仪表。气动调节仪表的使用和发展已有数十年的历史,它的主要特点是:动作平稳,防爆性能强可靠性高,结构简单,价格便宜,目前仍广泛应用于要求动作平稳和石油、化工、煤炭等有爆炸危险的场所。但是,气动调节仪表也有其弱点:信号传输慢,不利于远距离操作,信号传输过程损失较大,需单独设置气源,信号转换不方便,特别是和计算机联用不方便等。由于这些因素,限制了气动仪表的使用范围。

3. 液动仪表

以液体(如油、水等)为介质进行信号传递的一类仪表。由于液动仪表体积庞大、信号传递慢,所以在工业生产中,除特殊场合(如水压机、液压传动、液压调速等场合)使用外,一般情况下不使用。

4. 自力式仪表

顾名思义,自力式调节仪表就是依靠调节对象(如流动的液体或气体)提供动力源,而不需要外加动力的一种调节仪表。如常见的水塔、油罐等的液位调节系统等。这类仪表一般用于比较偏僻、人员不易到达而又具备特定条件的一些场合。这类仪表系统由于不用外加设备,所以若想对其施加影响反而不易实现。

三、按结构类型分类

按结构类型分类主要是针对电动调节仪表而言的。电动调节仪表按结构类型分类可以分为单元组合式仪表、基地式仪表、组件组装式仪表和集散型控制系统。

1. 单元组合式仪表

单元组合式仪表是根据自动化系统中各个组成环节的不同功能和使用要求,将整套仪表划分成能独立实现某种功能的若干单元,各单元之间用统一的标准信号进行联系。使用时,可根据生产过程的需要,将这些单元进行组合,构成多种多样、复杂程度各异的自动控制系统。

电动单元组合仪表不仅可以方便的组成各种控制系统,还可以和气动调节仪表或其他系列的自控仪表及电子计算机方便的配合使用,加之制造、使用、维护、维修等工作也非常便利,因此,在建材、石油、化工、冶金等工业部门获得广泛的使用。

2. 基地式控制仪表

基地式控制仪表是以指示、记录仪表为主体,附加控制机构而组成的。它不仅能对参数进行指示或记录,而且还具有控制作用等辅助功能,由于各种环节依托在一起,形成一个整体,故

称为基地式控制仪表。

基地式仪表一般结构比较简单,故常用于单机自动化系统。例如,目前普遍使用的 XCT 系列动圈控制仪表和 TA 系列简易式电子调节器等,就属于这类仪表。

3. 组件组装式仪表

组件组装式仪表是在单元组合仪表的基础上发展起来的一种功能分离、结构组件化的成套仪表装置。它以模拟器件为主,兼用了模拟技术和数字技术,能与工业计算机、程序控制器、屏幕显示器等新型设备相配合,因此,这类仪表特别适用于大型复杂的自动化生产系统。

第四节 建材工业自动化发展概况

建材工业自动化,以水泥工业为例,就是对水泥生产过程实现自动化控制。对原料的开采、破碎及预均化;生料的粉磨、预热及分解;熟料的烧成、冷却;水泥的粉磨、包装和发送等生产环节进行自动控制,既可提高产量质量,节能降耗,保障安全,又可实现生产过程的统一管理和指挥。

一、水泥工业自动化仪表的发展过程

我国生产的电动单元组合仪表(拼音字母缩写为 DDZ)作为水泥工业自动化的重要组成仪表,经历了三个发展阶段:DDZ—I 型、DDZ—II 型和 DDZ—III 型。

50 年代研制开发了 DDZ—I 型仪表。它采用电子管作为主要元器件,体积大、耗能高、防爆能力差;随着半导体器件和电子技术的发展,70 年代初我国又研制出了 DDZ—II 型仪表。DDZ—II 仪表以晶体管元件为主,体积小、重量轻,很快在工业生产中广泛应用。但是,由于它信号制为 0~10mA 直流电流,所以在与计算机及其他仪表配合时不够方便,显示出了一定的局限性;70 年代中期,随着数字技术和半导体集成技术的发展,我国又研制出 DDZ—III 型仪表。III 型仪表采用线性集成电路作为主要核心器件,采用了安全火花防爆技术和国际标准信号制 4~20mA 直流信号,因而精度较高、稳定性和可靠性也很好。进入 80 年代后,我国又结合国外先进经验,研制出第四代 DDZ—S 型电动单元组合仪表。DDZ—S 型仪表是将模拟技术与数字技术相结合,并以数字技术为主,在性能上和组合方式上都要优于 II、III 型仪表。DDZ—S 型仪表的主要特点是数字化、智能化、微位移(固态)化,因而是一种先进的控制仪表,预计在今后若干年内将成为我国工业自动化仪表的主导产品。

二、水泥生产过程自动化发展过程

水泥工业自动化,经过几十年的不断变化,已由最初落后的人工操作发展到以微型计算机为基础的分布式控制系统(DCS)。

1. 人工操作控制

生产过程完全由人工凭经验进行观测控制。如看火工判断烧成带温度,看磨工判断磨机负荷,人工调整操作。

2. 手动操作控制

用高温计监测烧成带温度,“电耳”监测磨机负荷,操作工手动控制。

3. 常规仪表自动控制

生产过程的参数检测,数据传送和设备遥控由仪表完成,通过仪表对部分或全部生产环节实现自动控制。山西太原水泥厂3号窑(狮头集团),安徽白马山水泥厂1号窑(海螺集团)采用国产DDD—Ⅱ型仪表实现自动控制。

4. 计算机集中控制

70年代,随着计算机技术的应用,水泥生产自动化水平有了较大提高。用计算机取代常规仪表,组成直接数字控制系统(DDC),对全厂生产过程用一台计算机进行集中控制,具有运算速度快,控制精度高的特点。冀东水泥厂、宁国水泥厂均采用成套引进的直接模拟控制系统(DDAC)。

5. 计算机集散控制系统(DCS)

70年代后期,以微型计算机为基础的分布式控制系统得以应用。它是一种控制功能分散化,监视操作集中化的控制系统,即所谓的集散控制系统。集散型控制系统(DCS)是集4C技术——计算机技术、控制技术、通讯技术和图形显示技术(CRT)为一体的装置。这种系统在结构上是分散的,就是将计算机分布到车间或生产环节。它不仅使系统的危险分散,消除了全局性的故障点,提高了系统的可靠性,同时能方便的实现各种新型的控制规律与算法。这种系统由于是分级的、模块化的管理,因此是目前最为先进的一种控制模式,所以集散式控制系统标志着工业生产过程的自动化进入了一个新的时代。山西水泥厂(晋牌集团)引进美国L.N公司MAX1自动控制系统,河北邯郸水泥厂(太行集团)采用北京贝利有限公司INFI—90系统等均属于集散控制系统。

第一章 测量仪表

在自动控制系统中,目前广泛采用电信号作为联络信号,而反映生产过程或设备运行状态的参数如:温度、压力、物位、流量、成分却是非电量,因此,通过测量仪表(传感器)把以上参数转换成电量信号是实现过程控制的基础。18世纪发明了蒸汽机,于是机器代替了体力劳动,相应的检测多采用机械手段,所检测的物理量主要是机械量和热工量。本世纪60年代以来,应用半导体和微电子技术开发了物性型传感器,逐步取代了结构型传感器,使传感技术在短短几十年内取得了突飞猛进的发展。传感技术与电子技术相结合,形成了非电量电测技术,称为检测技术的第一次变革。到70年代中期,由于微型计算机的问世并应用于检测领域,从根本上打破了检测的传统概念和结构模式,使检测技术又一次发生了根本变革,进入了智能化时代。为此,本章将对测量仪表基本概念以及温度、压力、物位、流量、成分等非电量的电测方法进行介绍,同时为兼顾目前工业现场上大量使用就地监视仪表,也将对它们作一些介绍。

第一节 基本检测理论

一、检测概述及检测系统组成

在工业生产中,为了正确地指导生产操作,保证生产安全,保证产品质量和实现生产过程的自动化,一项必不可少的工作是准确而及时地检测出生产过程中各个有关参数。目前,在化工、建材等生产中,对于压力、流量、温度及气体成分等参数实现了自动化测量,并与调节器、执行机构等相配合实现了对生产过程的控制。

检测就是利用传感器把被测信息检取出来,并转换成测量仪表或仪器所能接受的信号,再进行测量以确定量值的过程,或转换成执行器所能接受的信号,实现对被测物理量的控制。所以检测系统由下列功能环节组成。

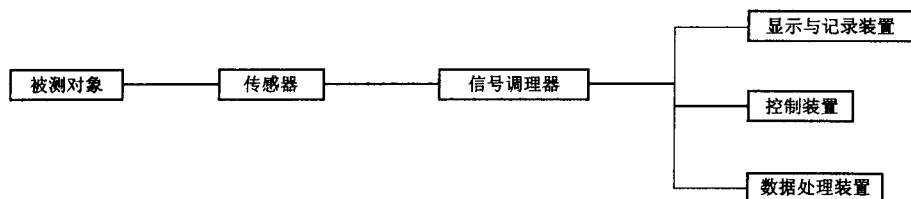


图 1-1 检测系统的组成

传感器是一种能将各种被测非电量变换为电学量的装置,处于被测对象与检测系统的接口位置,是系统获得信息的重要手段。它所获得的信息是整个系统工作的基础。因而在非电量检测系统中占有重要地位。

信号调理器又称中间转换器,其作用是将传感器的输出信号进行传输、放大和转换等,使其适合于显示、记录、数据处理或控制。例如,电桥电路、放大器、调制与解调器及模数转换器

等。

输出环节包含显示与打印记录装置、数据处理和控制装置等,它们不仅可以实时检测,而且可以实现对被测对象的控制。

二、测量误差分析

1. 测量过程

在工业生产中,虽然所应用的测量方法及仪表种类很多,但从测量过程中的实质来看,却都有相同之处。例如:弹簧管压力表测量压力,就是由于弹簧管受压后的弹性变形,把被测压力变换为弹性位移,然后再通过机械传动放大,变成压力表指针的偏转,并与压力刻度标尺上的测量单位相比较而显示出被测压力的数值,又如热电偶测量温度,是通过热电偶将温度变换成直流毫伏信号,然后变成毫伏测量仪表上的指针位移,并与温度标尺相比较而显示出被测温度数值,等等。由此可见,测量过程实质上就是被测参数信号能量形式的一次或多次不断变换和传送,并将被测量参数与其相应的测量单位进行比较的过程,而测量仪表就是实现变换、比较的工具。

2. 测量误差

根据最终测量结果获得方式的不同,可将测量分为直接测量和间接测量两种。直接测量就是将被测量参数直接与一定的标准量比较出来。而间接测量是将直接测量得到的数据代入一定的公式,计算出所要求的被测参数值。

不论采用什么样的测量方式和方法,也不论采用什么样的测量仪表,由于测量仪表本身不够准确,测量方法不够完善,以及测量者本人经验不足等原因,都会使测量结果与被测量的真值之间存在着差异,这个差异就是测量误差。随着科技水平的提高和人们的经验、技巧、专门知识的丰富,测量误差可以控制得越来越小,但不能使之为零。在实际测量中,对一个具体的测量任务,只需达到相应的精度就可以了,绝不是精度高一些比低一些好。因为提高精度是以付出人力、物力以及降低可靠性为代价的。

3. 测量误差分类

根据误差本身的性质,可将测量误差分为下列三类:

(1)系统误差 指对同一被测参数进行多次重复测量时所出现的数值大小或符号都相同的误差,或者虽不相同,但却按一定规律变化的误差。它是由于在测量中仪表使用不当或测量时外界条件变化等原因所引起的。要减小系统误差,应找出产生误差的原因,从原因入手,通过改善测量条件,改进测量方法或对测量结果引入适当的修正值而减小或消除系统误差。

(2)粗大误差 是由于测量人员操作不当、疏忽大意或测量条件突变所造成的,明显偏离真值的误差。这类误差的数值很难估计,结果也无意义。在测量中,大于极限误差 3σ (均方根误差)的误差即为粗大误差。

(3)随机误差 在相同条件下多次重复测量同一量时,误差时大时小,时正时负,其大小和符号无规律变化的误差。它是由于测量过程中许多独立的,微小的偶然因素所引起的综合结果,又称偶然误差。它既不能用实验方法消除,也不能修正,就一次测量来说,随机误差的数值大小和符号难以预测,但在多次的重复测量时,其总体服从统计规律。理论和实践都证明,随机误差在大多数情况下接近于正态分布(见图 1-2)。

4. 测量误差的计算方法

(1) 真实值与算术平均值

通常一个参数的真实值是不知道的, 需要去测定它。但由于测量方法、测量仪器、人的观察能力等等都不能做到完美无缺, 故真实值是无法得到的, 故可这样定义测量中的真实值: 设在测量中, 观测次数无限多, 且无系统误差存在时, 各测量值的算术平均值就是被测参数的真实值。平常观测的次数都是有限次的, 因此有限次的测量值求得的算术平均值只能是近似真实值或称最佳值。

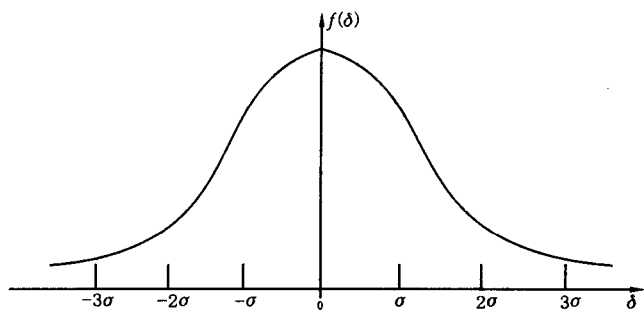


图 1-2 随机误差的正态分布曲线

设 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 代表各测量值, n 代表测量次数, 则算术平均值为 $\bar{x}$:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \sum \frac{x_i}{n} \quad (1-1)$$

(2) 标准误差 又称均方根误差, 由于随机误差的正态分布规律可用数学式表示为:

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

式中: δ ——测量值 x_i 与被测真值 x_0 之差, $\delta_i = x_i - x_0 (i=1, 2, \dots, n)$ 是个随机变量;

$f(\delta)$ ——随机变量的概率密度;

σ ——均方根误差或标准误差, 是概率密度分布曲线的重要特征量;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\Delta x_1^2 + \Delta x_2^2 + \dots + \Delta x_n^2}{n}} \quad (1-3)$$

$$\Delta x_i = x_i - x_0$$

n ——测量次数。

从公式可以算出, 误差在 $-\sigma \sim +\sigma$ 之间, 曲线所包围面积为 68.3%, 这个事实说明当对某一参数进行了 n 次(无穷次)测量后, 偶然误差的数值在 $0 \sim \pm\sigma$ 范围的测量值有 68.3%。这就是均方根误差的物理意义。同样也可以计算出误差在 $-2\sigma \sim +2\sigma$ 之间时曲线所包围的面积为 95.4%, 误差在 $-3\sigma \sim +3\sigma$ 之间时, 曲线所包围的面积为 99.7%, 因此可近似认为, 对某一参数进行测量时, 所可能产生的最大偶然误差等于 3σ , 一般将 3σ 取为极限误差。

在实际测量中, 不可能对被测量参数进行无限次的重复测量, 而只能进行有限次的重复测量, 另外也只能用一组测量数据的算术平均去代替被测参数的真实值, 因此有限次测量的均方根误差多按下式计算:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (1-4)$$

式中: $\bar{x}$ ——该组测量数据的算术平均值;

x_i ——某一次测量值;

n ——测量次数, n 为有限值, 一般取 20 以上。

因此, 如果求得了均方根误差 σ 就不难估计出测量值的最大可能误差数值为 3σ 。但在工业上应用时, 是以测量仪表本身的精度等级为准, 即认为在正常情况下测量的最大可能误差不会超过该仪表规定的允许误差。

(3) 间接测量误差

① 系统误差的计算 设有函数为:

$$y = f(x_1, x_2 \cdots x_n) \quad (1-5)$$

若令 $\Delta x_1, \Delta x_2 \cdots \Delta x_n$ 别代表直接测量 $x_1, x_2, \cdots x_n$ 时所产生的误差, Δy 代表由 $\Delta x_1, \Delta x_2 \cdots \Delta x_n$ 引起的 y 的误差, 则有:

$$y + \Delta y = f(x_1 + \Delta x_1, x_2 + \Delta x_2, \cdots x_n + \Delta x_n) \quad (1-6)$$

将上式右边按泰勒级数展开并略去高次项后, 得函数 y 的绝对测量误差 Δy 为:

$$\Delta y = \left(\frac{f}{x_1}\right)\Delta x_1 + \left(\frac{f}{x_2}\right)\Delta x_2 + \cdots + \left(\frac{f}{x_n}\right)\Delta x_n \quad (1-7)$$

函数 y 的相对测量误差为 δ_y :

$$\delta_y = \frac{\Delta y}{y} = \left(\frac{f}{x_1}\right)\left(\frac{\Delta x_1}{y}\right) + \left(\frac{f}{x_2}\right)\left(\frac{\Delta x_2}{y}\right) + \cdots + \left(\frac{f}{x_n}\right)\left(\frac{\Delta x_n}{y}\right) \quad (1-8)$$

② 偶然误差的计算 如果对 $x_1, x_2, \cdots x_n$ 分别进行 n 次测量, 对应的均方根误差为 $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \cdots \sigma_{x_n}$ 。则函数 y 的均方根误差 σ_y 可按式计算:

$$\sigma_y = \sqrt{\left(\frac{y}{x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{y}{x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \cdots + \left(\frac{y}{x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2} \quad (1-9)$$

三、测量仪表的技术性能

1. 精度

在静态测量中, 由于任何检测装置和测量结果都含有一定大小的误差, 所以人们感兴趣的往往是用误差来说明精度。

(1) 绝对误差

是测量仪表的示值 x 与被测量真实值 x_0 之间的代数差值, 即:

$$\delta = x - x_0 \quad (1-10)$$

实际上, 真实值是未知的, 通常只能用所谓约定值来代替真值, 它是由高一级的计量标准所复现或高精度仪表所测得的被测量值。绝对误差 δ 越小, 说明示值越接近于真值, 测量精度就越高。但这一结论只适用于被测量值相同的情况, 而不能说明不同值的测量精度。在校验和检定仪表时, 常采用比较法, 即对同一被测量, 将标准表的值 x_0 (真值) 与被校表的示值 x 进行比较, 则它们的差值就是被校表示值的绝对误差。如果它是一恒定值, 则是系统误差, 此时仪表的示值应加以修正, 才可得到被测量的实际值 x_0 , 即:

$$x_0 = x - \delta = x + C \quad (1-11)$$

式中 C 称为修正值或校正值, 它与绝对误差数值相等, 但符号相反。

(2) 示值相对误差 γ (简称相对误差)

示值相对误差是测量仪表示值绝对误差 δ 与真实值 x_0 的比值。

$$\gamma = \frac{\delta}{x_0} \times 100\% = \frac{x - x_0}{x_0} \times 100\% \quad (1-12)$$

当测量误差很小时,示值相对误差可近似用下式计算:

$$\gamma = \frac{\delta}{x} \times 100\% \quad (1-13)$$

示值相对误差只能说明不同的测量结果的准确度,而不能用来评价测量仪表的质量。因为同一台仪表在整个测量范围内的相对误差不是定值,而是随着被测量的减小,相对误差就增大。当被测量接近于量程的起始零点,相对误差就趋于无限大,故一般不应测量过小的量,而多用在测量接近上限的量,如 $\frac{2}{3}$ 量程处。

(3)最大引用误差 $q_{\max}$

为了合理评价测量仪表的质量,采取了最大引用误差的概念。测量仪表的绝对误差 δ 与仪表量程 L 之比,称为仪表示值的引用误差 q ,引用误差常用百分数表示。最大引用误差是测量仪表示值的最大绝对误差绝对值与仪表量程 L 之比值的百分数即:

$$q_{\max} = \frac{|\delta_{\max}|}{L} = \frac{|x - x_0|_{\max}}{L} \times 100\% \quad (1-14)$$

(4)精度等级

仪表在出厂检验时,其示值的最大引用误差 $q_{\max}$ 不能超过其允许误差 Q ,即 $q_{\max} \leq Q$ 。工业检测仪表常以允许误差 Q 作为判断精度等级的尺度。规定:取其误差百分数的分子作为精度等级的标志,也即用最大引用误差 $q_{\max}$ 去掉百分号(%)后的数字来表示精度等级,其符号是 G ,工业仪表常见的精度等级如表 1-1。

表 1-1 工业仪表常见精度等级

精度等级(G)	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	5.0
允许误差(Q)	0.1%	0.2%	0.5%	1%	1.5%	2%	2.5%	5%

一般情况下,1.0 级精度仪表,其允许误差 $Q=1\%$,即允许误差的变化范围可以从 -1% 至 $+1\%$ 。应当注意的是:精度等级说明了引用误差允许值的大小,它绝不是意味着该仪表实际测量中出现的误差,如果以为 1.0 级仪表所提供的测量结果一定包含着 $\pm 1\%$ 的误差,那就错了。只能说在规定条件下使用时,其绝对误差的最大值的范围是在量程的 $\pm 1\%$ 内,即

$$\delta_{\max} = \pm G\% \times L = \pm 1\% \times L \quad (1-15)$$

2. 灵敏度 S

灵敏度是指检测装置在静态测量时,输出量的增量 Δy 与输入量的增量 Δx 之比的极限值,即:

$$S = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta y}{\Delta x} \right) = \frac{dy}{dx} \quad (1-16)$$

对于线性检测装置其灵敏度为一常数,非线性检测装置其灵敏度是变化的。灵敏度越高,系统就越容易受外界干扰,即系统稳定性越差。

3. 线性度

具有线性特性的检测装置最受使用者欢迎。但是由于各种原因,其输出量与输入量之间的关系并不是完全线性的,通常用检测装置的标定曲线与某种拟合直线的之间的偏差程度作为