



高等学校“十二五”重点规划教材
信息与自动化系列

过程控制系统

主 编 杨 松

HEUP 哈尔滨工程大学出版社
Harbin Engineering University Press

内 容 简 介

过程控制系统作为工业自动化技术的重要组成部分,其发展迅猛,并已广泛应用于石油、化工、电力、冶金、轻工、建材以及制药等许多国民经济的重要领域。

本书主要介绍了自动化仪表与过程控制系统的设计等基本知识,重点突出了工业过程控制系统的设计。主要侧重于自动化仪表的基本介绍,即测量变送器、控制器(调节器)以及执行器(调节阀)等相关设备的基本介绍,还包括简单过程控制系统与复杂过程控制系统的设计等。

本书内容通俗易懂,是工业自动化及其相关专业的规划教材,亦可作为相关专业老师及研究生的教学参考,同时还可供从事工业生产过程自动化的工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

过程控制系统/杨松主编. —哈尔滨:哈尔滨
工程大学出版社, 2012. 9

ISBN 978 - 7 - 5661 - 0439 - 7

I. ①过… II. ①杨… III. ①过程控制·
自动控制系统 - 高等学校 - 教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 232476 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心
开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 7.5
字 数 186 千字
版 次 2012 年 9 月第 1 版
印 次 2012 年 9 月第 1 次印刷
定 价 18.00 元
<http://press.hrbeu.edu.cn>
E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前 言

随着科学技术的进步,尤其是随着微电子、计算机技术以及通信技术的飞速发展,自 20 世纪 40 年代后期开始,以生产过程自动化为主要特征,采用电子控制的自动化机器和生产线,使工业领域发生了彻底地改变。本书正是在这样的背景下,并严格按照其发展需要编写而成的。

为了避免与其他教学内容重复,本书在以往规划教材的基础上,精选了相关内容并对结构作了重要调整,其特点是:

1. 知识结构合理,章节编排一目了然,便于学习与掌握。从总体上介绍过程控制系统的三部分内容,即自动化仪表(测量变送器、控制器及执行器)、简单过程控制系统的设计以及复杂过程控制系统的设计。

2. 内容通俗易懂,便于相关专业老师及学生的教学及参考,同时还便于从事工业生产过程自动化的工程技术人员自学、培训及参考。

3. 突出工程设计与实际工程应用,并且着重介绍如何应用合适的控制策略解决相关工程问题。

本书第一章和第二章由东北林业大学机电工程学院自动化教研室杨松编写,第三章及附录由黑龙江科技学院电气与信息工程学院赵为光编写,第四章由东北石油大学电气信息工程学院自动化系杨莉编写,全书由杨松统稿。

在本书的编写过程中,得到了哈尔滨工程大学出版社的诚挚帮助,同时,在编写过程中,参考或引用了一些专家学者的论著,在这里一并向关心和支持本书出版的所有单位和个人表示最诚挚地感谢。

编 者
2012 年 5 月

目 录

第一章 绪论	1
第一节 概述	1
第二节 过程控制系统的组成	2
第三节 过程控制系统的特点	4
第四节 过程控制的发展概况	5
第五节 课程的性质和任务	7
习题	7
第二章 自动化仪表	8
第一节 测量变送器	8
第二节 执行器(调节阀)	27
第三节 控制器(调节器)	39
习题	40
第三章 简单过程控制系统设计	42
第一节 概述	42
第二节 过程建模	45
第三节 控制方案设计	55
第四节 自动化仪表的选择	59
第五节 过程控制系统投运及控制器参数整定	63
第六节 简单过程控制系统设计实例分析	69
习题	72
第四章 复杂过程控制系统设计	74
第一节 串级控制系统	74
第二节 前馈控制系统	85
第三节 比值控制系统	91
第四节 分程与选择性控制系统	95
第五节 大迟延(大滞后)系统	102
习题	108
附录	110
参考文献	113

第一章 绪 论

第一节 概 述

随着科学技术的进步,从 19 世纪末到 20 世纪初,我们进入了现代工业的发展阶段。自 20 世纪 40 年代后期开始,工业生产以生产过程自动化为主要特征,采用电子控制自动化机器和生产线,工业领域发生了彻底的改变。

过程通常是指石油、化工、电力、冶金、轻工、建材以及制药等工业部门的生产过程,是原材料到产品所经过的一系列工序。我们知道,实木复合地板是现代家庭装修所用的必需材料,它是由不同树种的板材交错层压而成,克服了实木地板单向同性的缺点,干缩湿胀率小,具有较好的尺寸稳定性,并保留了实木地板的自然木纹和舒适的触感。实木复合地板兼具强化地板的稳定性与实木地板的美观性,而且具有环保优势,因而被广泛使用。

下面以实木复合地板的制作工序为例,来进一步理解过程的含义。

一般来说,实木复合地板要经过以下制作工序。

第一步:原木选材。

好的木材才能做出好的地板,原木质量对地板质量的影响至关重要。质量控制是从原木选材开始把关的,好木材是生产出优质地板的基础。

第二步:原木旋切干燥。

这道工序用于加工制作多层实木复合地板基材的实木芯板,基材实木芯板质量与成品地板的质量密不可分。旋转切割出的实木芯板厚约 1.5 毫米,旋切后还需要一段时间进行干燥。

第三步:实木芯板分选。

为了保证每一片地板的质量,生产厂家通常只选薄厚均匀、厚度适中且无缺陷、无断裂的实木芯板作为地板基材,由专职分选员对地板基材进行挑选。

第四步:芯板涂胶排版。

用专业的涂胶设备进行操作,可以保证涂胶量均匀,提高涂胶工作效率。将 8~10 层涂过胶的薄实木芯板有序地纵横交错分层排列,黏合在一起,可以改变木材纤维原有的伸展方向。正是这一步操作,彻底改变了实木木材的湿胀干缩的局限性。

第五步:芯板热压胶合。

热压是实木复合地板生产过程中的一道重要工序,它直接关系到地板成品的质量。大工厂采用的热压设备比较先进,生产管理人员全程监控,因此产品质量比较稳定。

第六步:基材定厚砂光。

采用大型定厚砂光机对地板基材的面、底进行定厚砂光,可确保板面的平整度和光洁度,从而提高产品的精度,为珍贵树种木皮的装饰面层压贴提供可靠保证。

第七步:基材分选养生。

地板基材在初步加工完成后,还要经过专人精心分选,去掉不合格的产品。经过高温高压,基材内部存在较大的内应力,需要静置平衡 15 天到 20 天左右释放这种内应力,使得

基材平衡稳定,这个过程叫做养生。

第八步:实木面皮挑选。

多层实木复合地板多用于北方干燥的环境中,因此尺寸的稳定性尤为关键。为了防止在干燥的采暖季节出现开裂等现象,优质实木复合地板表面的珍贵木种木皮全部由专业质检人员一片一片挑选,含水率控制极为严格。

第九步:地板板坯成型。

将挑选好的木皮单片涂上环保胶贴在地板基材上,再送入热压机里进行热压,即制成多层实木复合地板板坯。

第十步:地板板坯养生。

由于地板基材在贴上装饰表皮后又经过热压,板坯内部又产生了较大的内应力,这样的地板板坯需要在恒温恒湿的平衡养生仓里静置养生 20 天左右,从而保证地板质量更加稳定。

第十一步:地板切割开槽。

经过了养生,板坯将通过切割设备开槽成形。开槽的好坏对成品地板的拼接意义重大,因此国内的大企业多引入德国进口切割设备以确保质量。

第十二步:淋漆干燥定形。

开完槽的地板要进行淋漆处理,在经过八道底漆、四道面漆的淋涂后,成品地板的漆面会润泽而富有韧性。

最后,需分拣包装,就完成了生产全过程。

以上就是实木复合地板的制作过程,即从原材料(原木)到产品(实木复合地板)所经过的一系列工序。

过程控制自动化通常是指石油、化工、电力、冶金、轻工、建材以及制药等工业部门生产过程的自动化,即通过应用自动控制理论并结合通信以及计算机技术,使得生产过程彻底实现自动化。而过程控制系统(Processing Control System,以下简称为 PCS)通常是指上述工业生产过程中自动控制系统的被控量,主要是温度(Temperature)、压力(Pressure)、流量(Flow)以及液位(Liquid Level)等这样一些过程变量的控制系统。

第二节 过程控制系统的组成

下面以两个典型的工业过程控制系统为例,来介绍过程控制系统的组成。

(一)发电厂锅炉过热蒸汽温度控制系统

锅炉是电力、冶金、石油以及化工等工业部门不可缺少的动力设备,其产品是蒸汽。发电厂从锅炉汽鼓中排出来的饱和蒸汽经过过热器继续加热成为过热蒸汽。过热蒸汽的温度是火力发电厂生产工艺过程控制的重要参数。过热蒸汽温度控制是保证汽轮机组(发电设备)正常运行的一个重要条件。通常过热蒸汽的温度应达到 460 ℃ 左右,再去推动汽轮机组做功。每种锅炉与汽轮机组都有一个规定的运行温度,在这个温度下运行,汽轮机组的运行效率最高。如果过热蒸汽的温度过高,会使汽轮机组的寿命大大缩短;如果过热蒸汽的温度过低,当过热蒸汽带动汽轮机组做功时,会使部分过热蒸汽液化变成小水滴,而小水滴会冲击汽轮机组叶片,从而造成生产事故。因此,如图 1-1 所示的温度控制系统,就是用来对过热蒸汽的温度进行自动控制。在图 1-1 所示过热蒸汽温度控制系统中的过热器

之前或其中间部分串接一个减温器,通过控制减温器中水流量的大小来控制过热蒸汽的温度。控制系统中的过热蒸汽温度采用热电阻温度计 1 来测量,然后经过温度变送器 2 (Temperature Transfer, 以下简称 TT) 将温度测量信号送至温度控制器 3 (Temperature Controller, 以下简称 TC) 的输入端,与过热蒸汽的给定值进行比较得到其偏差信号,控制器按此输入偏差信号以某种控制律进行运算后输出控制信号,来控制执行器 4 的开度,从而改变减温器中水流量的大小,来达到自动控制过热蒸汽温度的目的。

(二) 炼钢厂转炉供氧量控制系统

转炉是炼钢工业生产过程中的一种重要设备。熔融的铁水装入转炉中后,可以通过氧枪供给转炉一定的氧气量,在氧气的作用下,铁水中的碳逐渐氧化燃烧,从而使铁水中的含碳量不断降低。因此,控制吹氧量以及吹氧时间就可以控制冶炼钢水的含碳量,从而可以获得不同品种的钢。为了冶炼各种不同品种的钢材,设计了图 1-2 所示的转炉供氧量控制系统,对氧枪供给的氧气量进行自动控制。系统中采用带有开方器 3 的流量变送器 2 (Flow Transfer, 以下简称 FT) 与差压流量计 1 配合来测量氧气流量。首先,采用差压流量计来测量氧气流量,并送至流量变送器 (FT),再经过开方器后将流量测量信号送至流量控制器 4 (Flow Controller, 以下简称 FC) 的输入端,与供氧量的给定值进行比较得到其偏差信号,控制器按此输入偏差信号以某种控制律进行运算后输出控制信号,来控制执行器 5 的开度,从而改变供氧量的大小,来达到自动控制氧枪供给的氧气量的目的。

为了便于应用自动控制理论分析过程控制系统,根据系统的工作过程,可利用系统的控制流程图 1-1、图 1-2 分别画出其对应的系统方框图 1-3 和图 1-4。

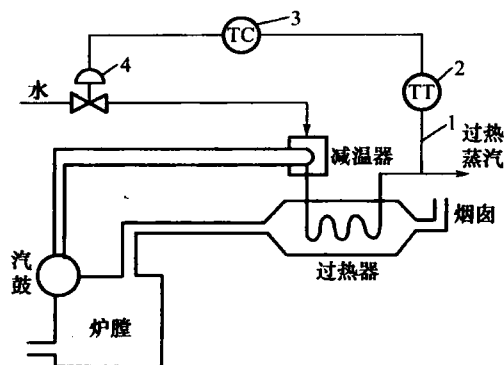


图 1-1 过热蒸汽温度控制系统控制流程图

1—热电阻温度计;2—温度变送器;
3—温度控制器;4—执行器

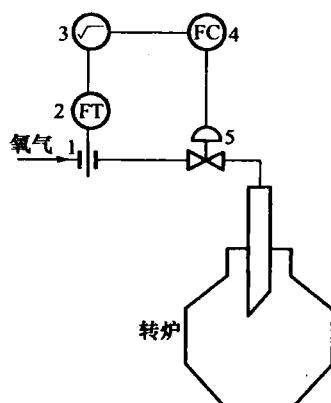


图 1-2 转炉供氧量控制系统控制流程图

1—差压流量计;2—流量变送器;
3—开方器;4—流量控制器

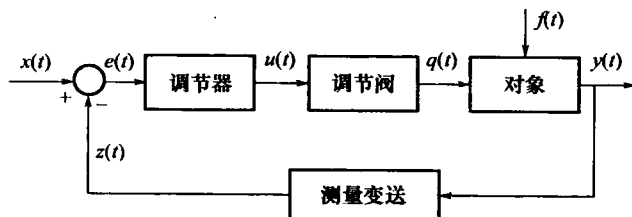


图 1-3 过热蒸汽温度控制系统控制框图

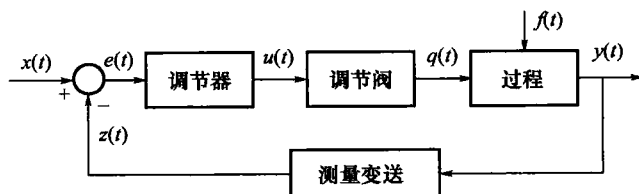


图 1-4 转炉供氧量控制系统控制框图

现以图 1-3 为例,来介绍系统方框图中各元素所表示的含义。

在图 1-3 中的过程方框指某些被控制的装置或设备,在本例中表示测量温度的热电阻温度计到调节阀之间的管道设备,包括过热器、减温器及到调节阀间的一段管道。 $y(t)$ 表示过热蒸汽的温度,是过热蒸汽温度控制系统中的被控参量,是过程的输出信号。在本例中进入过热器的烟道气温的高低以及环境温度的变化情况都是会引起被控参量波动的外来因素,它是过程的输入信号,称其为扰动量,可用 $f(t)$ 来表示。减温器中水流量的改变是由执行器(调节阀)开度控制的,它也是影响被控参量变化的因素,作为执行器(调节阀)的输出信号,同时也是过程的输入信号,称其为控制参量,可用 $q(t)$ 来表示。控制器(调节器)的输出 $u(t)$ 称为系统的控制规律,它是执行器的输入信号。测量变送器的作用是把通过温度测量元件(热电阻温度计)测量过热蒸汽的温度并成比例地转换为标准测量信号 $z(t)$,它是控制器(调节器)的输入信号。控制器(调节器)根据 $z(t)$ 与给定值 $x(t)$ 进行比较得出的偏差值以某种控制规律对被控过程进行自动控制。过程的输出信号,即温度控制系统的输出通过温度测量元件(热电阻温度计)与变送器的作用,将输出信号反馈到输入端,就构成了传统的经典单闭环负反馈控制系统。

在实际的生产过程中,如果扰动因素使过热蒸汽的温度降低,温度测量元件(热电阻温度计)将温度的变化值测量出来,经变送器送至控制器(调节器)的输入端,并与其给定值进行比较得到偏差,控制器(调节器)按此偏差并以某种控制律发出控制信号,去关小执行器(调节阀)的开度,使减温器中的水流量减小,从而使过热蒸汽的温度逐渐升高,并趋向于给定值,最终达到控制系统的自动运行。反之亦然。

从以上两个典型工业生产过程控制的实例可知,一个典型的过程控制系统均由测量元件、变送器、控制器(调节器)、执行器(调节阀)和被控过程等环节构成。如果把测量元件、变送器、控制器(调节器)、执行器(调节阀)统称为过程检测控制仪表(以下简称自动化仪表),则一个典型的过程控制系统是由自动化仪表和被控过程两部分构成的。

第三节 过程控制系统的特点

过程控制系统的特点是与其他自动控制系统相比较而言的,大致可归纳为如下几点。

一、过程控制是连续生产过程的自动控制

过程控制系统中的被控参量需定量控制,而且应是连续可调的。

二、过程控制系统由自动化仪表和被控过程组成

过程控制是通过各种自动化仪表对整个生产过程进行自动监测和自动控制。自动化

仪表包括检测元件、变送器、控制器(调节器)及执行器(调节阀)等。过程控制系统的设计是根据被控过程的特性和工艺要求,通过选用合适的自动化仪表,再通过 PID 参数整定,实现对工业生产过程的最优控制。

三、过程控制系统的控制过程多属慢过程,且被控参量主要以温度、压力、流量以及液位为主

由于被控过程具有大迟延(大滞后)等特性,因此决定了过程控制的控制过程多属慢过程。另外,在石油、化工、电力、冶金、轻工、建材以及制药等工业生产部门的生产过程中,往往采用一些物理量,如温度、压力、流量以及液位来表征其生产过程是否正常,因此需要对上述被控参量进行自动监测和自动控制。

四、过程控制系统的控制方案十分丰富

在现代工业生产过程中,由于生产规模大小不同,工艺要求各异,产品品种多种多样,因此过程控制系统中的被控过程是多种多样的。如发电过程中的锅炉,冶金过程中的转炉、平炉以及石油化工过程中的精馏塔、化学反应器、流体传输设备等。

由于过程控制系统的设计是以被控过程的特性为依据的,因此被控过程的多种多样就决定了过程控制系统的控制方案十分丰富。本书将要介绍简单的单回路控制、串级控制、前馈控制、比值控制、分程与选择性控制以及大迟延(大滞后)控制等过程控制方案。

五、定值控制是过程控制系统中应用最多的一种控制形式

在石油、化工、电力、冶金、轻工、建材以及制药等工业生产部门的生产过程中,过程控制的主要目的在于消除或减小外界干扰对被控参数的影响,使被控参量能稳定控制在给定值上,进而使工业生产能够实现优质、高产、低能耗以及环保的目标。

第四节 过程控制的发展概况

在现代科学技术发展的过程中,发展最快、取得成果最多的就是工业自动化技术。自 20 世纪 40 年代起,从简单的单表、单机控制到今天大规模且智能化的现场总线控制系统(Fieldbus Control System,以下简称 FCS),工业自动化技术经历了翻天覆地的变化,而作为工业重要组成部分的流程工业同样经历了翻天覆地的变化。流程工业的代表行业,就是我们所熟悉的石油、化工、电力、冶金、轻工、建材以及制药等。下面对其发展历程进行分析和介绍。

20 世纪 50 年代以前,出现了 0.02 ~ 0.1 MPa 的标准气动信号体制,由于当时的生产规模不大,自动化仪表尚处于发展阶段,所采用的仅仅是安装在生产现场,只具备简单测控功能的基地式仪表,其信号仅在本仪表内起作用,一般不能传送给别的仪表或系统。各测控点为封闭状态,不能与外界进行信息沟通。操作人员只能通过对现场的巡视,了解生产过程的情况。我们把基于基地式气动仪表的控制系统称为基地式气动仪表控制系统。

20 世纪 60 年代,随着生产规模的日益扩大,操作人员需要综合掌握多点的运行参数和信息,需要同时按多点的信息对生产过程进行操作控制。这个时期出现了 4 ~ 20 mA 的标

准直流电流信号以及 1~5 V 的标准直流电压信号体制,于是出现了模拟式电子仪表与电动单元组合的自动控制系统,即电动单元组合式模拟仪表控制系统。生产现场的所有标准信号都送往集中控制室,在大型的控制盘上连接。操作人员可以在控制室观测生产流程的状况,并可以把各单元仪表信号按需要组合,连接成不同的控制系统。

由于模拟信号的传递需要一对一的物理连接,信号变化缓慢,而当时提高计算速度和精度的花费、难度都较大,信号传输的抗干扰能力也较差,所以为了解决这个难题,就出现了直接数字控制系统,人们也开始寻求用数字信号取代模拟信号。在这些控制系统中也出现了多回路控制和 CRT(Cathode Ray Tube)显示。由于当时计算机价格昂贵,人们试图用一台计算机取代尽可能多的控制室仪表,于是出现了集中式数字控制系统。该系统的优点是易于根据全局情况进行控制、计算和判断,在控制方式和控制时机的选择上可以统一调度和安排。但它也有自身不能克服的缺点,该类系统对控制器本身要求很高,由于当时计算机的可靠性和处理能力还较差,一旦计算机出现某种故障,就会造成所有相关回路瘫痪,给企业带来巨大的损失。

到了 20 世纪 70 年代中后期,随着计算机价格的大幅度下降和可靠性的提高,出现了由多个计算机构成的集散控制系统(Distribute Control System,以下简称 DCS)。DCS 在 20 世纪八九十年代占据着主导地位,其核心思想是集中管理、分散控制,即管理与控制相分离。上位机用于集中监视和管理功能,若干台下位机实现分布式控制,各上、下位机之间通过控制网络互联实现相互之间的信息交换和传递。这种分布式的体系结构克服了集中式控制系统中对控制器处理能力和可靠性要求高的缺陷。在 DCS 中,网络技术的发展和应用得到了很好的体现。但是在 DCS 形成和发展的过程中,由于受利益的驱动和计算机系统早期存在的系统封闭性缺陷的影响,不同的 DCS 厂家对其通信控制网络采用各自专用的封闭形式,各厂家的产品自成系统,不同厂家的设备不能互连,不具备互操作性和互换性,从而造成自动化过程中“信息孤岛”问题的出现,所以用户对网络控制系统提出了开放性、标准统一和降低成本的迫切要求。

20 世纪 60 年代末、70 年代初出现并得到迅猛发展的可编程控制器(Programmable Logic Controller,以下简称 PLC)为工业自动化领域带来了深刻的变革,PLC 以其高可靠性、低价位迅速占领了中低端控制系统的市场。从简单的逻辑顺序控制系统到现在复杂的过程控制、运动控制系统,PLC 都扮演了非常重要和不可替代的角色,从而使其成为工业自动化领域的三大技术支柱之一。在高端应用领域,由 PLC 为主组成的 DCS 也成为了控制系统的主角,传统的 DCS 和 PLC 相互融合、取长补短,在工业控制领域得到了广泛地应用。

随着 3C 技术的迅猛发展,使得解决自动化过程中的“信息孤岛”问题成为可能。采用开放化、标准化的解决方案,把不同厂家遵守同一协议规范的自动化设备联结成控制网络并组成系统,成为网络集成式控制系统的必由之路。20 世纪 80 年代后期,FCS 的开发和研究也如火如荼地进行着,到了 20 世纪 90 年代,FCS 已在工业自动化的许多场合得到了成功的应用。FCS 突破了 DCS 从上到下的树状结构,在某种程度上可以说它是把 DCS 和 PLC 结合起来,采用总线通信的拓扑结构,整个系统处在全开放、全数字、全分散的机制平台上。从某种意义上说,现场总线技术给自动控制领域所带来的变化是革命性的,到今天,现场总线技术已走向成熟和实用化。

第五节 课程的性质和任务

工业自动化的范围很广,门类很多,包含的专业内容也非常丰富,是国家高科技的重要组成部分和坚实的理论基础。“过程控制系统”是工业自动化专业的一门必修课。自动化仪表是过程控制的重要自动化技术工具,是实现工业生产过程自动化的重要装置,也是实现过程控制的前提。

现代工业生产过程往往流程复杂、规模庞大,同时又具有高温、高压、易燃、易爆等特点。为了保证生产安全、稳定并且可靠地运行,对过程参数的检测和自动控制提出了更严、更高的要求。实现工业生产过程自动化,不仅能够把生产过程控制在最佳的工况下运行,减少原材料和动力的消耗,降低成本,实现优质、高产、低能耗以及环保的目标,而且能够保证安全生产,防止意外事故发生,延长设备使用寿命,提高设备利用率,减轻劳动强度,改善劳动条件,保护环境卫生,维护生态平衡等。

过程控制是自动控制理论、生产工艺和自动化仪表知识等相结合并用于工业生产过程的控制系统分析、设计、整定的一门综合性应用学科。过程控制的任务是在了解、熟悉、掌握生产工艺流程与生产过程的静态和动态特性的基础上,根据工业要求,应用自动控制理论,分析、设计、整定过程控制系统。同时,必须注意工程应用中的有关问题。过程控制的任务是由过程控制系统的工程设计与工程实现来完成的。

“过程控制系统”课程是在学生学完电子技术基础与自动控制理论等课程之后开设的。课程着重研究根据连续工业生产过程的生特点与要求,应用自动控制理论和自动化仪表来设计过程控制系统,以及解决在实际工程应用中的有关问题。通过学习,不仅能解决简单过程控制工程中的一般问题,并具有分析和设计较复杂的过程控制系统的能力。

习 题

1. 试简述过程控制的发展概况及各个阶段的主要特点。
2. 过程控制系统的特点有哪些?
3. 什么是过程、过程控制、过程控制系统?
4. 在过程控制系统中,为什么要由系统控制流程图画出其框图?
5. 试分析图 1-1 及图 1-2 所示系统的运行机理。

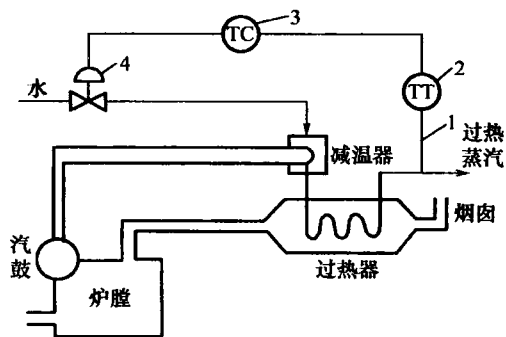


图 1-1

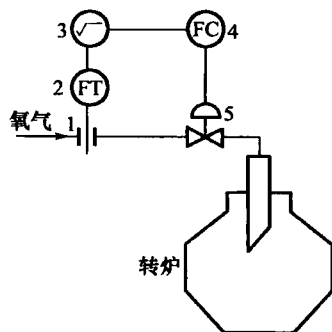


图 1-2

第二章 自动化仪表

第一节 测量变送器

一、概述

测量变送器是由测量元件(或称传感器)和变送器两部分构成的,其中测量元件(或称传感器)主要用于检测过程控制系统中的过程变量(或称被控参量)。

过程变量(或称被控参量)检测主要是指连续生产过程中的温度、压力、流量以及液位等参数的测量。

所谓测量就是利用一个已知的单位量(即标准量)与被测的同类量进行比较,通过比较可知被测量是已知单位量若干倍的过程。

过程变量的检测和变送是实现过程变量显示和过程控制的前提,是过程控制系统的主要组成部分。通过过程变量的准确测量,可以及时了解工艺设备的运行情况,为操作人员提供操作依据,为自动化装置提供测量信号。这对于确保生产安全,提高产品的产量与质量,对于节约能源、保护环境卫生,提高经济效益等都是十分重要的,是实现工业生产过程自动化的必要条件。

目前,在工业生产过程自动化的诸多问题中,过程变量准确检测是最困难的问题之一。在进行过程变量检测时,一般由一测量体与被测介质相接触,测量体将被测参数成比例地转换为另一便于计量的物理量,然后再用仪表加以显示。为了在过程控制工程中能正确选用合适的检测仪表,下面就检测的基本概念、检测方法及常用仪表进行简要介绍。

(一)测量误差

所谓测量误差是指测量结果与被测变量的真值(即实际值)之差,测量误差反映了测量结果的可靠程度。

测量误差可分为如下几种。

1. 绝对误差与相对误差

(1)绝对误差

绝对误差是指仪表指示值与被测变量的真值之差。在工程上,通常把高一等级的标准仪器测量的量值作为真值(即实际值),此时,绝对误差是指用标准仪表(准确度较高)与测量仪表(准确度较低)同时对同一量进行测量所得两个测量结果之差。

(2)相对误差

相对误差是指绝对误差与被测变量的真值(即实际值)之比的百分数,它比绝对误差更能说明测量结果的准确程度。常见有如下三种表示方式:

①实际相对误差,是指绝对误差与被测变量的真值之比的百分数;

②标称相对误差,是指绝对误差与仪表指示值之比的百分数;

③引用相对误差,是指绝对误差与仪表量程之比的百分数,即

$$\delta = \frac{\text{绝对误差}}{\text{仪表量程}} \times 100\% = \frac{x - x_0}{a - b} \times 100\%$$

式中 x ——仪表的测量值;

x_0 ——被测变量的真值(即实际值);

a ——仪表测量范围的上限值;

b ——仪表测量范围的下限值。

2. 系统误差、随机误差和疏忽误差

(1) 系统误差

系统误差是指测量仪表本身或其他原因(如零点未调整好等)引起的有规律的误差。

(2) 随机误差

随机误差是指在测量中所出现的没有一定规律的误差。

(3) 疏忽误差

疏忽误差是指观察人员误读或不正确使用仪器与测量方法等人为因素所引起的误差。

3. 基本误差、附加误差和允许误差

(1) 基本误差

基本误差是指仪表在规定的正常工作条件下所具有的误差。

(2) 附加误差

附加误差是指仪表超出规定的正常工作条件时所增加的误差,比如仪表超过规定的工作温度时所引起的附加误差。

(3) 允许误差

允许误差是指在国家规定标准条件下使用时,仪表的示值或性能不允许超过某个误差范围,这是一个许可的误差界限。

(二) 自动化仪表的性能指标

1. 精度等级

任何自动化仪表均有一定误差。使用仪表时首先必须知道仪表的精确程度,以便估计测量结果与真实值的差距(即测量值的误差大小)。自动化仪表的精度等级是按照国家统一规定的允许误差大小来划分的。例如某台仪表的允许误差为 $\pm 1.5\%$,则该仪表的精度等级为1.5级。自动化仪表的精度等级常以一定符号形式表示在仪表的面板上。例如1级精度的自动化仪表就用①表示。我国自动化仪表的精度等级有0.005,0.02,0.05,0.1,0.2,0.35,0.4,0.5,1.0,1.5,2.0,4.0等,级数越小,则精度越高。一般工业用表为0.5~4.0级精度。在选用自动化仪表的精度等级时,应根据实际需要来定,不能盲目追求高精度等级。一般自动化仪表的精度等级以测量范围中最大的绝对误差与该仪表的测量范围(即仪表量程)之比的百分数来衡量,即

$$\text{仪表精度} = \frac{\text{绝对误差的最大值}}{\text{仪表量程}} \times 100\% = \frac{(x - x_0)_{\max}}{a - b} \times 100\%$$

例如,一台仪表的测温范围为50~550℃,绝对误差的最大值为6℃,则这台仪表的仪表精度为

$$\text{仪表精度} = \frac{6}{550 - 50} \times 100\% = 1.2\%$$

由于 $1.2\% < 1.5\%$,表明该仪表检验结果达到1.5级精度。

2. 灵敏度与灵敏限

(1) 灵敏度

仪表指针的线位移或角位移 $\Delta\alpha$ 与引起此位移的被测变量 Δx 之比即为仪表的灵敏度,即

$$\text{灵敏度} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta x}$$

(2) 灵敏限

灵敏限是指仪表能感受并发生动作的输入量的最小值,通常其值应不大于仪表允许误差的一半。

(三) 自动化仪表的选用

实现生产过程自动化,不但要有正确的控制方案,而且还需要正确合理地选用自动化仪表。一般应从工程实际需要出发,结合生产过程特点,满足用户要求,根据工艺过程的实际需要来选用仪表的控制、报警、记录、指示以及计算等功能。对于工艺过程影响较大,需随时进行监控的变量,宜选控制型仪表;对可能影响生产或安全的变量宜选用报警型仪表;对需要经常了解其变化趋势的变量宜选用记录型仪表;对于工艺过程影响不大,但需要经常监视的变量宜选用指示型仪表;对要求计量或经济核算的变量宜选用具有计算功能的仪表。

自动化仪表的精度等级应根据工艺要求、产品质量指标、变量的重要程度等要求来合理选用。因为仪表精度越高,其误差就越小,但是仪表的使用维护要求亦越高,价格亦越贵,所以不能片面追求高精度。一般应该在满足上述要求的前提下,同时考虑经济性原则(即性价比)来合理选取。通常,构成控制回路的各种仪表的精度要相配。记录仪表的精度等级一般不应低于 1.0 级,指示仪表的精度等级一般不应低于 1.5 级。

二、温度检测及变送

(一) 概述

温度是工业生产中最常见、最基本的过程变量(或称被控参量)之一。任何化学反应和物理变化都与温度有关,它约占生产过程中全部过程参数的 50% 左右,所以,温度的检测与控制是过程控制工程的重要任务之一。测量温度的方法有很多,从测量体与被测介质接触与否来分,一般有接触式测温和非接触式测温两类。

接触式测温是通过测量体与被测介质的接触来测量物体温度的。在测量温度时,测量体与被测介质接触,被测介质与测量体之间进行热交换,最后达到热平衡,此时测量体的温度就是被测介质的温度。接触式测温的主要特点是:方法简单、可靠,测量精度高。但是,由于测温元件要与被测介质接触进行热交换才能达到热平衡,因而产生了滞后现象。同时,测量体可能与被测介质产生化学反应,此外测量体还受到耐高温材料的限制,不能应用于很高温度的测量。

非接触式测温是通过接收被测介质发出的辐射热来判断温度的。非接触式测温的主要特点是:测温上限原则上不受限制;测温速度较快,可以对运动体进行测量。但是,受到物体的辐射率、距离、烟尘和水汽等因素的影响,测温误差较大。

目前,工业生产过程中常用的温度计及其测温原理、使用场合等见表 2-1 所示。在表中所列的各种温度仪器中,机械式大多用于就地指示;辐射式的精度较差,只有电的测温仪器精度较高且信号便于传送,所以,热电偶温度计和热电阻温度计在工业生产和科学研究

领域得到了广泛地应用。从工程应用出发,下面就这两种测温仪表进行较深入的讨论。

表 2-1 测温仪表分类及其常用温度计

测温方法	测温原理		温度计名称	测温范围/℃	主要特点
接触式	体积变化	固体热膨胀	双金属温度计	-200 ~ 700	结构简单,价格便宜,适用于就地测量,传差距离不是很远
		液体热膨胀	玻璃液体温度计、压力式温度计		
		气体热膨胀	压力式温度计	-200 ~ 600	
	电阻变化	利用导体或半导体的电阻值随温度变化的性质	铂、铜、镍、铑、铁热敏电阻	-270 ~ 900	准确度高,能远传,适用于低、中温测量
			锗、碳、金属氧化物热敏电阻		
	热电效应	利用金属的热电效应	普通金属热电偶、贵金属热电偶、难熔金属热电偶、非金属热电偶	-200 ~ 1 800	测温范围广,精度高,能远传,适用于中、高温测量
非接触式	辐射测温	亮度法	光学高温计	600 ~ 3 200	适用于不能直接接触测温场合,测温范围广。测量精度受环境条件影响,误差较大
		全辐射法	辐射高温计		
		比色法	比色温度计		

(二) 热电偶温度计

热电偶温度计在工业生产过程中使用极为广泛。它具有测温精度高,在小范围内热电动势与温度基本呈单值、线性关系,稳定性和复现性较好,测温范围宽,响应时间较快等特点。

1. 测温原理

热电偶的测温原理是以热电效应为基础。将两种不同材料的导体 A、B 组成一个闭合回路(如图 2-1 所示)。只要其连接点 1、2 温度不同,在回路中就产生热电动势,这种现象称为热电效应,这两种不同导体的组合元件称之为热电偶。

热电偶回路产生的热电动势主要是由接触电动势组成。当两种不同材料导体 A、B 接触时,由于导体两边的自由电子密度不同,在交界面上便产生电子的互相扩散。若导体 A 中自由电子密度大于导体 B 中自由电子密度,在开始接触的瞬间,导体 A 向导体 B 扩散的电子数将比导体 B 向导体 A 扩散的电子数多,因而使导体 A 失去较多的电子而带正电荷,导体 B 带负电荷,致使在导体 A、B 接触处产生电场,以阻碍电子在导体 B 中的进一步积累,最后达到平衡。平衡时,在 A、B 两个导体间的电位差称为接触电动势,其值取决于两种导体的材料种类和接触点的温度。

在图 2-1 所示的热电偶回路中,当接触点 1、2 的温度不同时,便产生两个不同的接触电动势,这时回路中的总电动势为

$$E(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0) \quad (2-1)$$

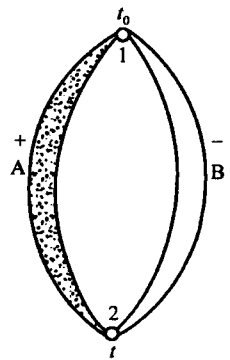


图 2-1 热电偶回路

式中 E 的下标字母表示电动势的方向,如 E_{AB} 表示电动势的方向从导体 A 到 B。

工程应用时,在热电偶回路中总要接入测量仪表及导线,如图 2-2 所示。

由两种不同材料的导体或半导体焊接而成的热电偶,焊接的一端称为热端(工作端),与导线连接的一端称为冷端(自由端)。热端与被测介质接触,冷端置于设备之外。

由图 2-2 测温回路所示,设导体 A、B 接点温度为 t , A、C 与 B、C 两接点的温度为 t_0 ,则回路中的总电动势为

$$E(t, t_0) = E_{AB}(t) + E_{BC}(t_0) + E_{CA}(t_0) \quad (2-2)$$

若回路中各接点温度相同,即 $t = t_0$,则回路总电动势必为零,即

$$E(t, t_0) = E_{AB}(t_0) + E_{BC}(t_0) + E_{CA}(t_0) = 0 \quad (2-3)$$

将式(2-3)代入式(2-2),可得

$$E(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0) \quad (2-4)$$

可见,式(2-1)和(2-4)完全相同。所以在热电偶测温回路中接入第三种导体时,只要接入第三种导体的两个接点的温度相同,回路中总电动势值就不变。热电偶的这种性质在工业应用中有着重要的意义,可以方便地在热电偶中接入所需的测量仪器和导线来测量温度。应该指出,若图 2-2 中导体 B、C 和导体 C、A 接点处温度不同时,回路中总电动势会发生变化。所以在使用热电偶测温时,冷端温度应该使之相等。

2. 补偿导线

由热电偶测温原理可知,只有当热电偶冷端温度不变时,热电动势才是被测温度的单值函数。所以在测温过程中必须保持冷端温度恒定。可是,热电偶的长度有限,其冷端会受到环境温度的影响而不断变化,为了使热电偶冷端温度保持恒定,在工程上常使用一些所谓补偿导线,使之与热电偶冷端相连接,如图 2-3 所示。补偿导线是两根不同的金属丝,它在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 温度范围和所连接的热电偶具有相同的热电性能,其材料是廉价金属,用它将热电偶的冷端延伸出来。在工程上使用补偿导线时要注意型号和极性,尤其是补偿导线与热电偶连接的两个接点温度应相等,以免造成误差。

3. 冷端温度补偿

热电偶的热电动势 E 大小不仅与热端温度 t 有关,而且还与冷端温度 t_0 有关。只有 t_0 恒定,热电动势才是 t 的单值函数关系,才能正确反映 t 的数值。在工程应用时,热电偶冷端暴露在大气中,受环境温度波动的影响较大,使用补偿导线只是将其冷端延伸到温度比较稳定的地方。由国家标准规定的分度表(热电动势与温度 t 的关系)是规定冷端温度 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ 时制定的,因此,若 $t_0 \neq 0^\circ\text{C}$,则仍将产生测量误差。为了消除冷端温度变化对测量精度的影响,可采用冷端温度补偿,其补偿方法很多,下面仅介绍补偿电桥法和计算校正法。

(1) 补偿电桥法

如图 2-4 所示,在热电偶测量回路中串联一个不平衡电桥,其中 R_1 、 R_2 、 R_3 为锰铜电阻,其值为 $1\ \Omega$, R_{Cu} 为铜电阻, R 为限流电阻, E ($=4\ \text{V}$) 是桥路的主流电源,电桥(桥臂电阻

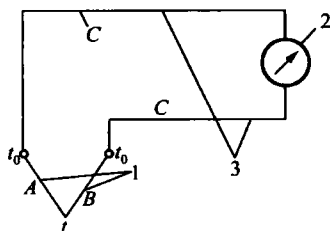


图 2-2 热电偶测温示意图

1—热电偶;2—测量仪表
(如电位差计);3—连接导线

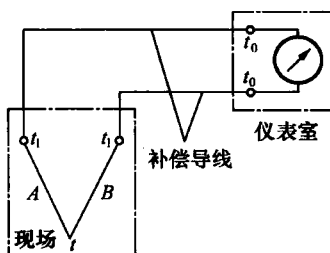


图 2-3 补偿导线连接图

为 $R_1、R_2、R_3、R_{Cu}$) 与热电偶冷端感受相同的环境温度,通过选择阻值可使电桥在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时处于平衡状态,即 $R_{Cu0} = 1\text{ }\Omega$,此时桥路输出 $u_{ac} = 0$ 。当冷端温度升高时, R_{Cu} 随之增大, u_{ac} 也增大,热电偶的热电势却随冷端温度增大而减小,若 u_{ac} 的增加量等于 E_x 的减少量时,则显示仪表便正确指示被测温度值 t 。在工程上,各类热电偶的热电特性不同,因此需选用不同型号的补偿电桥,即可实现冷端温度的自动补偿。

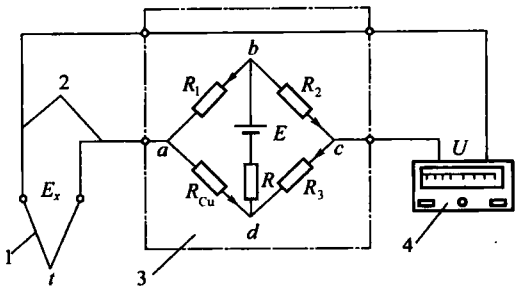


图 2-4 补偿电桥法原理图

1—热电偶;2—补偿导线;3—补偿电桥;4—显示仪表

(2) 计算校正法

在热电偶的分度表中,国家标准规定了冷端温度 $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时热电动势 $E_{AB}(t, 0)$ 与被测温度 t 的关系。如果 $t_0 \neq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$,则不能根据热电动势从分度表中查得被测温度 t 。由式 (2-4) 知

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_0)$$

则

$$E_{AB}(t, t_n) = E_{AB}(t) - E_{AB}(t_n)$$

上两式相减得

$$E_{AB}(t, t_0) - E_{AB}(t, t_n) = E_{AB}(t_n) - E_{AB}(t_0) = E_{AB}(t_n, t_0)$$

或

$$E_{AB}(t, t_0) = E_{AB}(t, t_n) + E_{AB}(t_n, t_0)$$

由于 $t_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 则

$$E_{AB}(t, 0) = E_{AB}(t, t_n) + E_{AB}(t_n, 0)$$

式中, $E_{AB}(t, t_n)$ 是测得的热电动势, $E_{AB}(t_n, 0)$ 可由相应分度表查得,所以 $E_{AB}(t, 0)$ 即可通过计算求得,再由分度表查得被测温度 t 值。在使用计算机测温时,多用此法进行热电偶冷端温度补偿。

我国使用的热电偶可达数十种。国际电工委员会(IEC)对其中已被国际公认的 7 种热电偶制定了国际标准,或称为标准热电偶,其主要技术性能如表 2-2 所示,其中最常用的有 S, B, K 三种,其分度表见附表一、二、三。

表 2-2 标准热电偶的主要特性

热电偶名称	分度号	适用场合	等级	测温范围/ $^{\circ}\text{C}$	允许误差
铂铑 10-铂	S	适用于氧化性气体中的测温,长期测 $1\text{ }300\text{ }^{\circ}\text{C}$,短期测 $1\text{ }600\text{ }^{\circ}\text{C}$,短期可用于真空中测温	I	$0 \sim 1\text{ }100$ $1\text{ }100 \sim 1\text{ }600$	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm [1 + (t - 1\text{ }100) \times 0.003]\text{ }^{\circ}\text{C}$
			II	$0 \sim 00$ $600 \sim 1\text{ }600$	$\pm 1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.25\% t$
铂铑 30-铂铑 6	B	适用于氧化性气体中的测温,长期测 $1\text{ }600\text{ }^{\circ}\text{C}$,短期测 $1\text{ }800\text{ }^{\circ}\text{C}$,冷端在 $0 \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可不用补偿导线,测温精度高,短期内可用于真空中测温	II	$600 \sim 1\text{ }700$	$\pm 0.25\% t$
			III	$600 \sim 800$ $800 \sim 1\text{ }700$	$\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 0.5\% t$