

控制仪表及系统

(第2版)

刘希民 编著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

控制仪表及系统 (第2版)

刘希民 编著

国防工业出版社

北京·225015228-0101

内 容 简 介

本书是高等院校自动化专业的专业教材。全书共分两篇九章。第一篇“控制仪表”，内容包括控制仪表概述、控制器、变送器和转换器、运算器和执行器等四章内容，讲述了工业生产中常用的常规仪器仪表和近年来广泛应用的智能型仪表；第二篇“过程控制系统”，内容包括过程控制系统概述、过程建模、单回路控制系统、串级控制系统、其它控制系统（包括比值控制系统、前馈控制系统、分程控制系统、选择性控制系统、大滞后补偿控制系统和多变量解耦控制系统）等五章内容，讲述了过程建模方法和一些典型过程控制系统的设计、运行问题。为了便于读者学习，各章均附有习题。

本书除可用作高等院校自动化专业教材外，亦可作为相关专业科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

控制仪表及系统/刘希民编著. —2版. —北京:国防工业出版社, 2015.1

ISBN 978-7-118-09846-4

I. ①控... II ①刘... III. ①过程控制—工业仪表
②过程控制—自动控制系统 IV. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 312203 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市鼎鑫印务有限公司

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18½ 字数 464 千字

2015 年 1 月第 2 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 40.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

第1版前言

多年以来,编者一直从事“自动化仪表”和“过程控制系统”两门课的教学工作。随着科学技术的发展,许多普通高等学校把这两门课程整合成一门,授课内容和课时都作了一些调整,因为没有合适的教材,所以许多学校还是延用原来的教材。一门课程,两本教材,给教师教学和学生学学习都带来诸多不便,也给学生带来经济上的浪费。因此,有一本合二为一的教材是十分必要的。为此,我们编写了这本《控制仪表及系统》,经过两年的试用,受到学生的欢迎。

为使教材更适合普通高等学校大众化教学的特点,本书在内容安排上只保留了常用的仪表和控制系统,内容叙述上尽量简单易懂,重点突出。在编写过程中,力求内容贴近实际,从工程实践的角度去分析问题和解决问题,在一些重点知识的论述上力求简单明了,循序渐进,把知识点一一点明,以便于学生学习和理解,使学生在学学习本课程的知识后,能从工程实践的角度,较细致、全面地建立起自动控制系统的基本知识结构,为以后从事专业工作打下良好的基础。这也是编者多年来的愿望和编写本教材的初衷。本教材也可作为从事自动化专业的科技工程人员的参考书。

本书在编写过程中参考了吴勤勤主编的《控制仪表及装置》、涂植英主编的《生产过程控制系统》、邵裕森主编的《过程控制工程》、金以慧主编的《过程控制》、吴国熙编著的《调节阀使用与维修》、陆德民主编的《石油化工自动控制设计手册》、王树青编著的《工业过程控制工程》等教材和书籍。在此表示深深的感谢。

由于编者水平有限,编写时间比较仓促,书中不足之处,敬请读者批评指正。

编者

第2版前言

《控制仪表及系统》一书自2009年出版以来,被许多院校所采用。为使教材更好地适应普通高等学校教学特点和满足专业人才培养的实际需要,在总结近几年实际使用情况的基础上,对本书作了修订。在内容安排上保留了第一版的结构形式,全书共分两篇,第一篇为“控制仪表”,第二篇为“过程控制系统”,第一篇包括概论、基型控制器、变送器和转换器、运算器和执行器等四章内容,讲述了工业生产中最常用的仪器仪表,第二篇包括绪论、过程建模、单回路控制系统、串级控制系统、其他控制系统(包括比值控制系统、前馈控制系统、分程控制系统、选择性控制系统、大滞后补偿控制系统和多变量解耦控制系统)等五章内容,讲述了过程建模方法和典型过程控制系统的设计、运行问题,为了适应企业发展的需要,增加了近年来广泛应用的智能仪器的内容。内容叙述简单易懂,重点突出,在编写修订过程中,力求从工程实践的角度去分析问题,在一些重点知识的论述上力求简单明了,循序渐进,把知识点一一点明,以便于学生学习和理解,使学生在学完本课程的知识后,能从工程实践的角度,较细致、全面地建立起过程控制系统的基本知识结构,为以后从事专业工作打下良好的基础。这也是编者多年来从事专业教学的愿望和本教材编写的初衷。本教材也可作为从事自动化专业的科技工程人员的参考书。

本书在修订过程中得到了上海仪表集团有限公司、厦门宇电自动化科技有限公司和虹润精密仪器有限公司等科技人员的支持,在此表示深深的感谢。

由于编者水平有限,书中不足之处,敬请读者批评指正。

编者

2014年9月

目 录

第一篇 控制仪表

第一章 控制仪表概述.....	1
第一节 控制仪表与控制系统.....	1
第二节 控制仪表及装置的分类.....	2
第三节 联络信号和传输方式.....	4
第四节 安全防爆的基本知识和防爆措施.....	7
第二章 控制器	15
第一节 基型控制器	15
第二节 智能型控制器	28
第三章 变送器和转换器	33
第一节 变送器的构成	33
第二节 矢量式差压(压力)变送器	35
第三节 电容式差压(压力)变送器	44
第四节 温度变送器	57
第五节 电/气转换器.....	74
第四章 运算器和执行器	78
第一节 运算器	78
第二节 执行器	95
第三节 模拟式控制仪表的应用	112

第二篇 过程控制系统

第五章 过程控制系统概述.....	116
第一节 过程控制的特点	116
第二节 过程控制系统发展概况.....	117
第三节 过程控制系统的组成.....	118
第四节 过程控制系统的类别.....	121
第五节 过程控制系统的品质指标.....	122
第六章 过程建模.....	124
第一节 概述.....	124
第二节 自衡过程的机理分析法建模.....	126
第三节 无自衡过程的机理分析法建模.....	135

第四节 时域法过程建模	137
第五节 频域法过程建模	152
第七章 单回路控制系统	154
第一节 概述	154
第二节 被控量和操纵量的选择	155
第三节 控制阀流量特性的选择及口径计算	164
第四节 控制器的选型	184
第五节 控制器的参数整定	190
第八章 串级控制系统	203
第一节 概述	203
第二节 串级控制系统的特点	206
第三节 串级控制系统的应用范围	214
第四节 串级控制系统的设计	217
第五节 串级控制系统的运行	222
第九章 其他控制系统	229
第一节 比值控制系统	229
第二节 前馈控制系统	240
第三节 分程控制系统	251
第四节 选择性控制系统	255
第五节 大滞后补偿控制系统	259
第六节 多变量解耦控制系统	267
习题	284
参考文献	290

第一篇 控制仪表

第一章 控制仪表概述

第一节 控制仪表与控制系统

控制仪表是实现生产过程自动化的重要工具。在自动控制系统中,检测仪表将被控变量转换成测量信号后,还需送控制仪表,以便控制生产过程的正常进行,使被控变量达到预期的要求。这里所指的控制仪表包括在自动控制系统中广泛使用的控制器、变送器、运算器、执行器等,以及各种新型控制系统及装置。

图 1-1(a)表示由控制仪表与控制过程组成的简单控制系统框图。控制过程代表生产过程中的某个环节,控制过程输出的是被控变量,如压力、流量、温度等工艺变量。这些被控变量首先由检测元件变换为易于传递的物理量,再经变送器转换成统一的电信号。该信号送到控制器中与给定值相比较。控制器按照比较后得出的偏差,以一定的控制规律发出控制信号,控制执行器的动作,改变被控介质物料量或能量的大小,直至被控变量与给定值相等。

图 1-1(b)为由加热炉、温度变送器、控制器和执行器构成的一个单回路温度控制系统。温度变送器将温度信号转换为电信号,在控制器的作用下,通过执行器将加热炉的出口温度控制在规定的范围内。

一个控制系统除了图 1-1 中表示的几类控制仪表外,还可以根据需要设置转换器、运算器、操作器、显示装置和各种仪表系统,以完成复杂的控制任务。

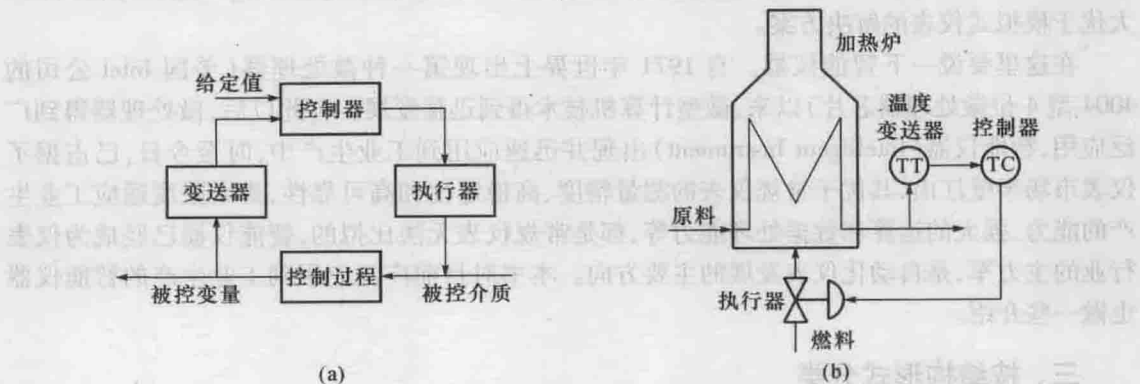


图 1-1 控制系统简图

(a) 简单控制系统框图;(b) 单回路温度控制系统。

第二节 控制仪表及装置的分类

控制仪表及装置可按能源形式、信号类型和结构类型进行分类。

一、按能源形式分类

控制仪表按能源形式可分为气动、电动、液动等几类。工业上通常使用电动控制仪表和气动控制仪表。

气动控制仪表的发展和应用已有数十年历史,20 世纪 40 年代起就已广泛应用于工业生产。其特点是结构简单、性能稳定、可靠性高、价格便宜,且为本质安全防爆,特别适用于石油、化工等有爆炸危险的场所。

电动控制仪表的出现要晚些,但由于其能源获取、信号传输及放大、变换处理比气动仪表容易得多,又便于实现远距离监视和操作,因而这类仪表的应用更为广泛。近年来大量出现的各种智能型控制仪表和综合控制装置,为快速发展的工业生产提供了更多的选择。由于采取了本质安全防爆措施,电动控制仪表的防爆问题也得到了很好的解决,使它同样能应用于易燃易爆的危险场所。鉴于电动控制仪表及装置的迅速发展与大量使用,本书予以重点介绍。

二、按信号类型分类

控制仪表按信号类型可分为模拟式和数字式两大类。

模拟式控制仪表的传输信号通常为连续变化的模拟量。这类仪表线路较简单,操作方便,价格较低,在设计、制造、使用上均有较成熟的经验。长期以来,它广泛应用于各工业部门。

数字式控制仪表的传输信号通常为断续变化的数字量。自 20 世纪中叶到现在,随着微电子技术、计算机技术和网络通信技术的迅速发展,各种数字式控制仪表、智能型控制仪表、新型计算机控制装置和基于网络的控制系统相继问世并日趋成熟,越来越多地应用于生产过程自动化中。这些仪表和装置以微处理器为核心,功能完善,性能优越,越来越多地采用人工智能的方法和策略,再加之新测量技术和测量方法的应用,测量精度和控制精度都得到了很大的提高,解决了模拟式仪表难以解决的问题,为现代化生产过程的大信息量 and 高质量控制提供了大大优于模拟式仪表的解决方案。

在这里要说一下智能仪器。自 1971 年世界上出现第一种微处理器(美国 Intel 公司的 4004 型 4 位微处理器芯片)以来,微型计算机技术得到迅猛发展。自此以后,微处理器得到广泛应用,智能仪器(Intelligent Instrument)出现并迅速应用到工业生产中,时至今日,已占据了仪表市场半壁江山,其优于常规仪表的测量精度、高稳定性和高可靠性、最大限度适应工业生产的能力、强大的运算和数据处理能力等,都是常规仪表无法比拟的,智能仪器已经成为仪表行业的主力军,是自动化仪表发展的主要方向。本书对目前广泛应用到工业生产的智能仪器也做一些介绍。

三、按结构形式分类

控制仪表按结构形式可分为基地式控制仪表、单元组合式控制仪表、集散控制系统以及现场总线控制系统。

1. 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,可实现单体设备就地分散的局部自动化。各单体设备之间互不联系或联系很少。最早的基地式模拟仪表产生于20世纪三四十年代,处于生产过程自动化发展过程的最早阶段,它尺寸大、结构简单,不仅能对温度、压力、流量、液位等参数进行指示或记录,还具有控制功能,使被控参数维持在一定值上,保证生产正常运行。

2. 单元组合式控制仪表

单元组合式控制仪表是根据控制系统中各个组成环节的不同功能和使用要求,将仪表做成能实现某种功能的独立单元,各单元之间用统一的标准信号来联系。将这些单元进行不同的组合,可以构成多种多样、复杂程度各异的自动检测 and 控制系统。

单元组合仪表可分为变送单元、转换单元、控制单元、运算单元、显示单元、执行单元、给定单元和辅助单元八大类。

自20世纪40年代起,我国生产的电动单元组合仪表(DDZ)和气动单元组合仪表(QDZ)经历了I型、II型、III型三个发展阶段,这些仪表是计划经济年代我国组织全国的专家和工程技术人员统一设计的,代表着当时的最高科技水平。以后许多企业又推出了较为先进的模拟技术和数字技术相结合的DDZ-S型系列仪表和组装式综合控制装置。这类仪表使用灵活,通用性强,适用于中、小型企业的自动化系统。过去的数十年,它们在实现我国工业生产过程自动化中发挥了重要作用。当今,随着计算机技术的迅速发展,众多企业研制生产出功能更强、精度更高的各种型号的智能仪器并被大量应用于工业生产,电动单元组合仪表被逐步替代,有些已停产(如DDZ-II型及部分III型仪表),有些采用新技术做了改进或直接用新技术、新方法、新方案做了全新的设计,大大提高了测量精度和控制精度,许多参数的测量精度由原来的1%提高到0.05%,控制精度也大大提高,这是科学技术发展的必然结果。

3. 集散控制系统

集散控制系统(Distributed Control System, DCS)是以微型计算机为核心,在控制技术(Control)、计算机技术(Computer)、通信技术(Communication)、屏幕显示技术(CRT)四“C”技术迅速发展的基础上研制成功的一种计算机控制装置。它的特点是分散控制、集中管理。

“分散”指的是由多台专用微机(例如DCS中的基本控制器或其他现场级数字式控制仪表)分散地控制各个回路,这可使系统运行安全可靠。将各台专用微机或现场级控制仪表用通信电缆同上一级计算机和显示、操作装置相连,便组成分散控制系统。“集中”则是指集中监视、集中操作和管理整个生产过程。这些功能由上一级的监控、管理计算机和显示操作站来完成。

工业上使用较多的数字式控制类仪表如智能型控制器和可编程控制器,可与DCS配合使用。智能型控制器的外形结构、面板布置保留了模拟式仪表的部分特征,但其功能更为丰富,通过组态可完成各种运算处理和复杂控制。可编程控制器(PLC)以开关量控制为主,也可实现对模拟量的控制,并具备反馈控制功能和数据处理能力。它具有多种功能模块,配接方便。这两类控制仪表均有通信接口,能方便地与计算机装置联用,构成不同规模的分级控制系统。

4. 现场总线控制系统

现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS)是20世纪90年代发展起来的新一代工业控制系统。它是计算机网络技术、通信技术、控制技术和现代仪器仪表技术的最新发展成果。现场总线的出现改变了传统控制系统的结构,它将具有数字通信能力的现场智能仪表连

成工厂底层网络系统,并同上一层监控级、管理级联系起来成为全分布式的新型控制网络。

现场总线控制系统的基本特征是其结构的网络化和全分散性、系统的开放性、现场仪表的互操作性和功能自治性以及对环境适应性。FCS 无论在性能上或功能上均比传统控制系统更优越。随着现场总线技术的不断发展与完善,FCS 已越来越多地应用于工业自动化系统中。

与此同时,广泛应用的互联网(Internet)技术也进入了工业控制领域。许多著名的工业控制系统都利用互联网实现企业的自动化监控和管理,并与现场总线系统对接,进一步向现场控制和远程控制延伸,控制生产过程的自动化生产,实现系统的远程组态、设定、监测和自动控制,并对生产过程进行远程管理。

再好的控制仪表也是应生产需求而生的,随着科学技术的发展,新的测量方法和手段、功能更强的仪表会源源不断地出现,以满足生产更高的需求,推动人类文明更快地向前发展。

本篇主要介绍 DDZ-III 型电动单元组合仪表和常用的智能型仪表。

第三节 联络信号和传输方式

一、联络信号

仪表之间应由统一的联络信号来进行信号传输,以便使同一系列或不同系列的各类仪表连接起来,组成系统,共同实现控制功能。

1. 联络信号的类型

控制仪表和装置常使用以下几种联络信号。

对于气动控制仪表,国际上已统一使用 $20 \sim 100\text{kPa}$ 气压信号作为仪表之间的联络信号。

对于电动控制仪表,其联络信号常见的有模拟信号、数字信号、频率信号等。

模拟信号和数字信号是自动化仪表及装置所采用的主要联络信号。本书着重讨论电模拟信号。

2. 电模拟信号制的确定

电模拟信号有交流和直流两种。由于直流信号具有不受线路中电感、电容及负载性质的影响,不存在相移问题等优点,故世界各国都以直流电流或直流电压作为统一联络信号。

从信号取值范围看,下限值可以从零开始,也可以从某一确定的数值开始;上限值可以较低,也可以较高。取值范围的确定,应从仪表的性能和经济性作全面考虑。

不同的仪表系列,所取信号的上、下限值是不同的。例如 DDZ-II 型仪表采用 $0 \sim 10\text{mA}$ 直流电流和 $0 \sim 2\text{V}$ 直流电压作为统一联络信号;DDZ-III 型仪表采用 $4 \sim 20\text{mA}$ 直流电流和 $1 \sim 5\text{V}$ 直流电压作为统一联络信号;有些仪表则采用 $0 \sim 5\text{V}$ 或 $0 \sim 10\text{V}$ 直流电压作为联络信号,并在装置中考虑了电压信号与电流信号的相互转换问题。

信号下限从零开始,便于模拟量的加、减、乘、除、开方等数学运算和使用通用刻度的指示、记录仪表;信号下限从某一确定值开始,即有一个活零点,电气零点与机械零点分开,便于检验信号传输线是否断线及仪表是否断电,并为现场变送器实现两线制提供了可能性。

电流信号上限大,产生的电磁平衡力大,有利于力平衡式变送器的设计制造。但从减小直流电流信号在传输线中的功率损耗和缩小仪表体积,以及提高仪表的防爆性能来看,希望电流信号上限小些。

在对各种电模拟信号做了综合比较之后,国际电工委员会(IEC)将 $4 \sim 20\text{mA}$ (DC) 电流信

号和1~5V(DC)电压信号,确定为过程控制系统电模拟信号的统一标准。

二、电信号传输方式

1. 模拟信号的传输

信号传输指的是电流信号和电压信号的传输。电流信号传输时,仪表是串联连接的;而电压信号传输时,仪表是并联连接的。

1) 电流信号传输

如图1-2所示,一台发送仪表的输出电流同时传输给几台接收仪表,所有这些仪表应当串接。DDZ-II型仪表即属于这种传输方式(电流传送—电流接收的串联制方式)。图中, R_o 为发送仪表的输出电阻。 R_{cm} 和 R_i 分别为连接导线的电阻和接收仪表的输入电阻(假设接收仪表的输入电阻均为 R_i),由 R_{cm} 和 R_i 组成发送仪表的负载电阻。

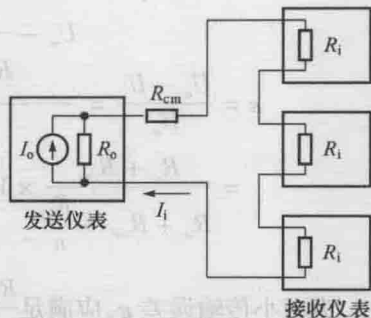


图1-2 电流信号传输时
仪表之间的连接

由于发送仪表的输出电阻 R_o 不可能是无限大,在负载电阻变化时输出电流也将发生变化,从而引起传输误差。

电流信号的传输误差可用公式表示为

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \frac{I_o - I_i}{I_o} = \frac{I_o - \frac{R_o}{R_o + (R_{cm} + nR_i)} I_o}{I_o} \\ &= \frac{R_{cm} + nR_i}{R_o + R_{cm} + nR_i} \times 100\% \quad (1-1)\end{aligned}$$

式中: n 为接收仪表的个数。

为保证传输误差 ε 在允许范围之内,应要求 $R_o \gg R_{cm} + nR_i$,故有

$$\varepsilon \approx \frac{R_{cm} + nR_i}{R_o} \times 100\% \quad (1-2)$$

由式(1-2)可见,为减小传输误差,要求发送仪表的 R_o 足够大,而接收仪表的 R_i 及导线电阻 R_{cm} 应比较小。

实际上,发送仪表的输出电阻均很大,相当于一个恒流源,连接导线的长度在一定范围内变化时,仍能保证信号的传输精度,因此电流信号适于远距离传输。此外,对于要求电压输入的仪表,可在电流回路中串入一个电阻,从电阻两端引出电压,供给接收仪表,所以电流信号应用比较灵活。

电流传输也有其不足之处。由于接收仪表是串联工作的,当一台仪表出故障时,将影响其他仪表的工作。而且各台接收仪表一般皆应浮空工作。若要使各台仪表皆有自己的接地点,则应在仪表的输入、输出之间采取直流隔离措施。这就对仪表的设计和应用在技术上提出了更高的要求。

2) 电压信号传输

一台发送仪表的输出电压要同时传输给几台接收仪表时,这些接收仪表应当并联(电压传送—电压接收的并联制方式),如图1-3所示。DDZ-III型仪表中的控制室使用仪表即属于这种传输方式。由于接收仪表的输入电阻 R_i 不是无限大,信号电压 U_o 将在发送仪表内阻

R_o 及导线电阻 R_{cm} 上产生一部分电压降,从而造成传输误差。

电压信号的传输误差可用如下公式表示,即

$$\varepsilon = \frac{U_o - U_i}{U_o} = \frac{U_o - \frac{R_i}{n} U_o}{U_o} = \frac{R_o + R_{cm} + \frac{R_i}{n}}{U_o} \times 100\% \quad (1-3)$$

为减小传输误差 ε ,应满足 $\frac{R_i}{n} \gg R_o + R_{cm}$,故有

$$\varepsilon \approx n \frac{R_o + R_{cm}}{R_i} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中: n 为接收仪表的个数。

由式(1-4)可见,为减小传输误差,应使发送仪表内阻 R_o 及导线电阻 R_{cm} 尽量小,同时要求接收仪表的输入电阻 R_i 大些。

因接收仪表是并联连接的,增加或取消某个仪表不会影响其他仪表的工作,而且这些仪表也可设置公共接地点,因此设计安装比较简单。但并联连接的各接收仪表,输入电阻皆较高,易于引入干扰,故电压信号不适于作远距离传输。

2. 变送器与控制室仪表间的信号传输

变送器是现场仪表,其输出信号送至控制室中,而它的供电又来自控制室。变送器的信号传送和供电方式通常有如下两种。

1) 四线制传输

供电电源和输出信号分别用两根导线传输,如图1-4所示。图中的变送器称为四线制变送器,目前使用的大多数变送器均是这种形式。由于电源与信号分别传送,因此对电流信号的零点及元器件的功耗无严格要求。

2) 两线制传输

变送器与控制室之间仅用两根导线传输。这两根导线既是电源线,又是信号线,如图1-5所示。图中的变送器称为两线制变送器。



图 1-4 四线制传输

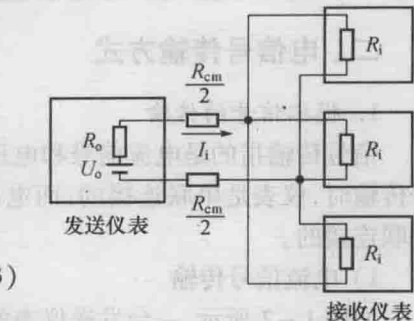


图 1-3 电压信号传输时
仪表之间的连接



图 1-5 两线制传输

采用两线制变送器不仅可节省大量电缆线和安装费用,而且有利于安全防爆。因此这种变送器得到了较快的发展。

要实现两线制变送器,必须采用活零点的电流信号。由于电源线和信号线公用,电源供给变送器的功率是通过信号电流提供的。在变送器输出电流为下限值时,应保证它内部的半导体器件仍能正常工作。因此,信号电流的下限值不能过低。国际统一电流信号采用 $4 \sim 20\text{mA}$ (DC),为制作两线制变送器创造了条件。

第四节 安全防爆的基本知识和防爆措施

一、安全防爆的基本知识

在石油、化工等工业部门中,某些生产场所存在着易燃易爆的气体、蒸气或固体粉尘,它们与空气混合成为具有火灾或爆炸危险的混合物,使其周围空间成为具有不同程度爆炸危险的场所。安装在这些场所的监测仪表和执行器如果产生的火花或热效应能量能点燃危险混合物,则会引起火灾或爆炸。因此,用于危险环境的控制仪表必须具有防爆的性能。

1. 爆炸危险场所的分区

爆炸危险场所按爆炸性物质的物态,分为爆炸性气体环境和爆炸性粉尘环境。

1) 爆炸性气体环境的分区

根据爆炸性气体环境出现的频率和持续时间把爆炸性气体环境分为以下三个区域。

(1) 0 区:爆炸性气体环境连续出现或长时间存在的场所。

(2) 1 区:在正常运行时,可能出现爆炸性气体环境的场所。

(3) 2 区:在正常运行时,不可能出现爆炸性气体环境,如果出现也是偶尔发生并且仅是短时间出现的场所。

2) 爆炸性粉尘环境的分区

根据爆炸性粉尘环境出现的频率和持续时间,把爆炸性粉尘环境分为以下三个区域。

(1) 20 区:以空气中可燃性粉尘云形式持续地或长期地或频繁地短时存在于爆炸性环境中的场所。

(2) 21 区:正常运行时,很可能偶尔地以空气中可燃性粉尘云形式存在于爆炸性环境中的场所。

(3) 22 区:正常运行时不太可能以空气中可燃性粉尘云形式存在于爆炸性环境中的场所,如果存在仅是短暂的。

不同区域对电气设备选型有不同的要求,例如 0 区(或 20 区)要求选用本质安全型电气设备;1 区选用隔爆型、增安型等电气设备。

2. 爆炸性物质的分级、分组

1) 爆炸性气体、蒸气的分级

(1) 按最大试验安全间隙分级:在规定的标准试验条件下,火焰不能传播的最大间隙称为最大试验安全间隙(Maximum Experimental Safety Gap, MESG)。按爆炸性气体、蒸气的最大试验安全间隙可分为以下几级:

MESG = 1.14mm, 为甲烷,作为起始点,无级;

$0.9\text{mm} < \text{MESG} < 1.14\text{mm}$, 为 A 级;

$0.5\text{mm} \leq \text{MESG} \leq 0.9\text{mm}$, 为 B 级;

MESG < 0.5mm, 为 C 级。

(2) 按最小点燃电流比分级:在规定的标准试验条件下,调节最小点燃电流,以甲烷的最小点燃电流为标准,定为 1.0,其他物质的最小点燃电流与之比较,得出最小点燃电流比(Minimum Ignition Current Ratio, MICR)为

某物质的最小点燃电流比 = 某物质的最小点燃电流/甲烷最小点燃电流

按爆炸性气体、蒸气的最小点燃电流比,可分为以下几级:

MICR = 1.0, 为甲烷,作为起始点,无级;

$0.8 < \text{MICR} < 1.0$, 为 A 级;

$0.45 \leq \text{MICR} \leq 0.8$, 为 B 级;

$\text{MICR} < 0.45$, 为 C 级。

由上可见,爆炸性气体、蒸气的最大试验安全间隙越小,最小点燃电流也越小。按最小点燃电流比分级与按最大试验安全间隙分级,两者结果是相似的。对于隔爆外壳电气设备采用最大安全试验间隙(MESG)分级,对于本质安全型电气设备采用最小点燃电流比(MICR)分级。

2) 爆炸性粉尘的分级

和爆炸性气体一样,爆炸性粉尘也按试验结果进行分级,只是目前试验数据较少,暂时将其分为二级,划分到Ⅲ类电气设备。爆炸性粉尘的分级是按粉尘的物理性质划分的。其方法是:把非导电性的可燃粉尘与非导电性的可燃纤维列为 A 级;把导电性的爆炸性粉尘与火药、炸药粉尘列为 B 级。

3) 爆炸性物质的分组

爆炸性物质按引燃温度分组。对于爆炸性气体、蒸气,在没有明火源的条件下,不同物质加热引燃所需的温度是不同的,因为自燃点各不相同,按引燃温度可分为 6 组,见表 1-1。对于爆炸性粉尘及纤维,按其自燃温度分为 T1-1、T1-2、T1-3 三组,见表 1-3。

用于不同组别的防爆电气设备,其表面允许最高温度各不相同,不可随便混用。例如适用于 T5 的防爆电气设备可以适用于 T1~T4 各组,但是不适用于 T6,因为 T6 的引燃温度比 T5 低,可能被 T5 适用的防爆电气设备的表面温度所引燃。

表 1-1 爆炸性气体、蒸气引燃温度与组别划分

组别	T1	T2	T3	T4	T5	T6
引燃温度 $t/^\circ\text{C}$	>450	$450 \geq t > 300$	$300 \geq t > 200$	$200 \geq t > 135$	$135 \geq t > 100$	$100 \geq t > 85$

3. 防爆电气设备的分类、分组和防爆标志

1) 防爆电气设备的分类、分组

按照国家标准 GB3836.1—2010 规定,爆炸性环境用电气设备分为 I、II、III 三大类,与 GB3836.1—2000 相比增加了 III 类电气设备。

(1) I 类电气设备:用于煤矿瓦斯气体环境。

(2) II 类电气设备:用于除煤矿甲烷气体之外的其他爆炸性气体环境。

(3) III 类电气设备:用于除煤矿以外的爆炸性粉尘环境。

对于 II 类电气设备,当用于爆炸性气体环境时,按气体特性及最大试验安全间隙或最小点燃电流比的分级,可进一步分为 II A(代表性气体是丙烷)、II B(代表性气体是乙烯)、II C(代表性气体是氢气)三类,部分爆炸性气体的分类分组见表 1-2。对于 III 类电气设备,按照拟使

用的爆炸性粉尘环境导电特性分级可进一步再分为ⅢA(可燃性飞絮)、ⅢB(非导电性粉尘)、ⅢC(导电性粉尘)三类(目前暂时分为两类),部分爆炸性粉尘、纤维的分类分组见表1-3。

工厂用电气设备的防爆形式共有8种:隔爆型(d)、本质安全型(i)、增安型(e)、正压型(p)、充油型(o)、充砂型(q)、浇封型(m)和无火花型(n)。本质安全型设备按其使用场所的安全程度又可分为ia和ib两个等级。

与爆炸性气体引燃温度的分组相对应,Ⅱ类电气设备可按最高表面温度分为T1~T6六组,如表1-4所示。

表 1-2 部分爆炸性气体的分类分组

类别	最大试验间隙 MESG/mm	最小点燃电流比 MICR	引燃温度组别 t/℃					
			T1	T2	T3	T4	T5	T6
			>450	450≥ t>300	300≥ t>200	200≥ t>135	135≥ t>100	100≥ t>85
I	MESG = 1.14	MICR = 1.0	甲烷					
ⅡA	0.9 < MESG < 1.14	0.8 < MICR < 1.0	丙烷、乙烷、丙酮、苯乙烯、氯乙烯、氨苯、甲苯、苯胺、甲醇、一氧化碳	丁烷、乙醇、丁醇、丙烯	汽油、环乙烷、己烷、硫化氢	乙醚、乙醛		亚硝酸乙酯
ⅡB	0.5 ≤ MESG ≤ 0.9	0.45 ≤ MICR ≤ 0.8	二甲醚、环丙烷、民用煤气	乙烯、环氧乙烷、环氧丙烷、丁二烯	异戊二烯	二乙醚		
ⅡC	MESG < 0.5	MICR < 0.45	氢气、水煤气、焦炉煤气	乙炔、乙烷			二硫化碳	硝酸乙酯

表 1-3 部分爆炸性粉尘、纤维的分类分组

类别	组别	T1-1	T1-2	T1-3
	引燃温度 t/℃	t>270	270≥t>200	200≥t>140
ⅢA	非导电性的可燃纤维	木棉纤维、烟草纤维、纸纤维、亚麻酸盐纤维、亚麻、人造毛短纤维	木质纤维	
	非导电性的可燃粉尘	小麦、玉米、砂糖、橡胶、染料、聚乙烯、苯酚树脂	可可、米糖	
ⅢB	导电性的爆炸性粉尘	铝、镁、铝青铜、锌、钛、焦炭、炭黑	铅(含油)、铁、煤	
	火药、炸药粉尘		黑火药、TNT	硝化棉、吸收药、黑索金、特屈儿、泰安

表 1-4 Ⅱ类电气设备的最高表面温度分组

温度组别	T1	T2	T3	T4	T5	T6
最高表面温度 t/℃	450	300	200	135	100	85

2) 设备保护级别(EPL)

GB3836.1—2010采用“设备保护级别”的方法对防爆设备进行危险评定,各保护级别如下。

(1) I类——煤矿瓦斯气体环境。

EPL Ma:安装在煤矿甲烷爆炸性环境中的设备,具有“很高”的保护级别,该等级具有足够的安全性,使设备在正常运行、出现预期故障或罕见故障,甚至在瓦斯突出时设备带电的情况下均不可能成为点燃源。

EPL Mb:安装在煤矿甲烷爆炸性环境中的设备,具有“高”的保护级别,该等级具有足够的安全性,使设备在正常运行中或在瓦斯突出和设备断电之间的时间内出现预期故障条件下不可能成为点燃源。

(2) II类——爆炸性气体环境。

EPL Ga:爆炸性气体环境用设备,具有“很高”的保护级别,在正常运行、出现预期故障或罕见故障时不是点燃源。

EPL Gb:爆炸性气体环境用设备,具有“高”的保护级别,在正常运行或预期故障条件下不是点燃源。

EPL Gc:爆炸性气体环境用设备,具有“一般”的保护级别,在正常运行中不是点燃源,也可采取一些附加保护措施,保证在点燃源预期经常出现的情况下(例如灯具的故障)不会形成有效点燃。

(3) III类——爆炸性粉尘环境。

EPL Da:爆炸性粉尘环境用设备,具有“很高”的保护级别,在正常运行或预期故障或罕见故障条件下不是点燃源。

EPL Db:爆炸性粉尘环境用设备,具有“高”的保护级别,在正常运行或出现预期故障条件下不是点燃源。

EPL Dc:爆炸性粉尘环境用设备,具有“一般”的保护级别,在正常运行过程中不是点燃源,也可采取一些附加保护措施,保证在点燃源预期经常出现的情况下(例如灯具的故障)不会形成有效点燃。

设备保护级别(EPL)与区的对应关系见表1-5(对煤矿瓦斯环境不直接适用,因为区的概念通常不适用于煤矿)。

不同的设备保护级别提供的防点燃危险描述见表1-6。

3) 防爆标志

(1) 爆炸性气体环境防爆标志一般形式为

Ex 防爆形式 类 气体成分 温度组别 设备保护级别

防爆形式有

d:隔爆外壳(对于 EPL Gb 或 Mb)

e:增安型(对于 EPL Gb 或 Mb)

ia:本质安全型(对于 EPL Ga 或 Ma)

ib:本质安全型(对于 EPL Gb 或 Mb)