



工业和信息化普通高等教育“十二五”规划教材立项项目



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材

21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

**C**ontrol Instrument and Device

# 控制仪表 及装置

李正强 李艇 主编

宋晓晶 杨海亮 副主编

陈会庆 参编



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项



21 世纪高等院校电气工程与自动化规划教材  
21 century institutions of higher learning materials of Electrical Engineering and Automation Planning

**C**ontrol Instrument and Device

# 控制仪表 及装置

李正强 李艇 主编

宋晓晶 杨海亮 副主编

陈会庆 参编

人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目(CIP)数据

控制仪表及装置 / 李正强, 李艇主编. — 北京 :  
人民邮电出版社, 2014. 1  
21世纪高等院校电气工程与自动化规划教材  
ISBN 978-7-115-33206-6

I. ①控… II. ①李… ②李… III. ①过程控制—检  
测仪表—高等学校—教材 IV. ①TP216

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第242019号

## 内 容 提 要

本书将知识点和技能点紧密结合在一起, 突出应用型本科教育的应用特色。全书内容共分为8章, 主要内容包括生产现场的变送器、控制器、执行器、辅助仪表、集散控制系统、现场总线控制系统和相应的实训指导书。通过本书的学习, 读者可以掌握控制仪表与装置的构成原理、使用方法、安装和调试技术。

读者对象: 本书适合应用型本科院校和高职高专院校自动化类专业、机电一体化专业学生使用, 也可供相关技术人员参考学习。



- 
- ◆ 主 编 李正强 李 艇
  - 副 主 编 宋晓晶 杨海亮
  - 参 编 陈会庆
  - 责任编辑 刘 博
  - 责任印制 彭志环 杨林杰
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号  
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 16.25 2014年1月第1版  
字数: 405千字 2014年1月河北第1次印刷
- 

定价: 35.00 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316  
反盗版热线: (010)81055315

目前,控制仪表及装置是实现生产过程自动化必不可少的工具,是生产过程高效运行的保障,有助于提高生产效率,保证产品质量,减少生产过程的原材料和能源损耗。高等院校开设“控制仪表及装置”课程的目的,就是让学生在这个重要的领域掌握新的技能以拓展自己的发展空间。

本教材立足应用型本科教育人才培养目标,遵循主动适应社会发展需要、突出应用性和针对性、加强实践能力培养的原则,将教材的先进性、实用性和可读性融为一体。力求尝试从理论到实践、从实训到技能的统一,使学生看得懂、可操作、可实现,以强化学生自主学习和职业能力的培养。

近年来,由于微电子技术、计算机技术和网络技术的发展,控制仪表及装置已经进入以 FCS 和智能仪表为主要的时代,因此,本教材努力使课程内容体现该领域的先进技术,加强目前工业控制的主流控制装置 FCS 的介绍,引入具有发展潜力的智能式现场仪表,设置过程控制仪表应用系统案例等,以提高应用型教育的针对性和适应性。

本书共 8 章,第 1 章绪论由李艇编写,第 2 章变送器、第 4 章执行器由宋晓晶编写,第 3 章控制器,第 5 章辅助控制仪表由李正强编写,第 8 章实训指导书由李正强、陈会庆共同编写,第 6 章集散控制系统、第 7 章现场总线控制系统由杨海亮编写。全书由李正强、李艇统稿。

本书得到了中环天仪股份有限公司流量事业部陈会庆先生的指导并提供支持与帮助,在此谨表示衷心的感谢。

限于编者水平有限,书中错漏在所难免,敬请广大读者批评指正。

编 者  
2013 年 8 月

# 目 录

第 1 章 绪论.....	1	2.6 习 题.....	59
1.1 控制仪表及装置基本知识.....	1	第 3 章 控制器.....	60
1.1.1 控制仪表及装置总体概述.....	1	3.1 控制规律.....	60
1.1.2 控制仪表及装置的 分类及特点.....	2	3.1.1 控制规律的表示方法.....	60
1.2 控制仪表防爆的基本知识.....	3	3.1.2 控制器的基本控制规律.....	63
1.2.1 防爆仪表的标准.....	4	3.2 模拟控制器.....	70
1.2.2 控制仪表的防爆措施.....	5	3.2.1 控制的功能.....	70
1.2.3 控制系统的防爆措施.....	6	3.2.2 基本构成原理及部件.....	71
1.3 控制仪表的分析方法.....	6	3.2.3 DDZ-III型控制器.....	71
1.3.1 控制仪表总体分析思路.....	7	3.3 可编程控制器.....	76
1.3.2 采用单个放大器的分析方法.....	7	3.3.1 概述.....	76
1.3.3 采用运算放大器的分析方法.....	8	3.3.2 可编程控制器基本结构 和工作原理.....	80
1.4 本课程的性质、内容和任务.....	10	3.3.3 S7-300PLC 及指令系统.....	86
1.5 小结.....	11	3.4 实例分析.....	101
1.6 习题.....	11	3.5 小结.....	114
第 2 章 变送器.....	12	3.6 习题.....	114
2.1 概述.....	12	第 4 章 执行器.....	115
2.1.1 变送器的构成.....	12	4.1 概述.....	115
2.1.2 变送器的共性问题.....	14	4.1.1 执行器的种类及特点.....	115
2.2 差压变送器.....	16	4.1.2 执行器的构成.....	116
2.2.1 力矩平衡式差压变送器.....	16	4.1.3 执行器的作用方式.....	116
2.2.2 电容式差压变送器.....	24	4.2 执行机构.....	117
2.2.3 扩散硅式差压变送器.....	32	4.2.1 气动执行机构.....	117
2.2.4 智能式差压变送器.....	33	4.2.2 电动执行机构.....	118
2.3 温度变送器.....	35	4.2.3 智能执行机构.....	121
2.3.1 热电偶温度变送器.....	36	4.3 调节机构.....	122
2.3.2 一体化热电偶温度变送器.....	42	4.3.1 调节机构的结构和特点.....	122
2.3.3 热电阻温度变送器.....	46	4.3.2 调节机构的工作原理.....	125
2.3.4 一体化热电阻温度变送器.....	48	4.3.3 调节阀的流量系数.....	126
2.3.5 智能式温度变送器.....	49	4.3.4 调节阀的可调比.....	128
2.4 实例分析.....	51	4.3.5 调节阀的流量特性.....	130
2.5 小 结.....	58	4.4 执行器的选择.....	132

4.4.1 执行器结构形式选择.....	133	6.3.3 操作员站软件.....	175
4.4.2 调节阀流量特性的选择.....	134	6.3.4 工程师站软件.....	175
4.4.3 调节阀的口径选择.....	135	6.3.5 集散控制系统的组态.....	176
4.5 阀门定位器.....	137	6.4 集散控制系统的应用举例.....	177
4.5.1 气动阀门定位器.....	137	6.4.1 水箱液位装置流程及控制要求.....	178
4.5.2 电/气阀门定位器.....	139	6.4.2 系统控制方案.....	179
4.6 应用实例.....	141	6.4.3 系统组态.....	179
4.7 小结.....	143	6.5 小结.....	186
4.8 习题.....	143	6.6 习题.....	186
<b>第5章 辅助控制仪表.....</b>	<b>144</b>	<b>第7章 现场总线控制系统.....</b>	<b>187</b>
5.1 开方器.....	144	7.1 概述.....	187
5.1.1 开方器的应用.....	144	7.1.1 现场总线发展背景.....	187
5.1.2 单元组合仪表开方器的构成原理.....	145	7.1.2 现场总线的结构特点.....	188
5.1.3 DDZ-III开方器的构成及工作原理.....	148	7.1.3 现场总线的技术特点.....	189
5.2 积算器.....	155	7.1.4 现场总线的国际标准.....	190
5.2.1 积算的基本概念与原理.....	155	7.2 几种流行的现场总线.....	194
5.2.2 比例积算器.....	157	7.2.1 基金会现场总线.....	194
5.2.3 开方积算器.....	161	7.2.2 PROFIBUS 现场总线.....	197
5.3 辅助单元仪表.....	161	7.2.3 PROFINET 现场总线.....	204
5.3.1 安全栅.....	161	7.3 现场总线控制系统.....	211
5.3.2 操作器.....	163	7.3.1 现场总线控制系统组成.....	211
5.3.3 电源箱.....	164	7.3.2 现场总线控制系统实例.....	213
5.3.4 电源分配器.....	164	7.4 小结.....	216
5.3.5 信号分配器.....	165	7.5 习题.....	216
5.4 小结.....	165	<b>第8章 实训指导书.....</b>	<b>217</b>
5.5 习题.....	165	8.1 实时工业网络实训系统介绍.....	217
<b>第6章 集散控制系统.....</b>	<b>166</b>	8.2 电磁流量计标定控制子系统实训.....	218
6.1 概述.....	166	8.2.1 实训目的.....	218
6.1.1 集散控制的基本概念.....	166	8.2.2 实训仪器和设备.....	219
6.1.2 集散控制的特点.....	167	8.2.3 实训基本原理.....	219
6.1.3 集散控制系统的发展趋势.....	168	8.2.4 实训内容与步骤.....	221
6.2 集散控制的硬件体系结构.....	169	8.2.5 实训考核内容.....	231
6.2.1 概述.....	169	8.3 基型控制器的认识与使用方法实训.....	231
6.2.2 DCS 的基本构成.....	171	8.3.1 实训目的.....	231
6.3 集散控制的软件系统.....	174	8.3.2 实训仪器和设备.....	232
6.3.1 概述.....	174	8.3.3 实训基本原理.....	232
6.3.2 现场控制站软件.....	174		

8.3.4 实训内容与步骤.....	232	8.7.2 实训仪器和设备.....	244
8.3.5 实训考核内容.....	234	8.7.3 实训基本原理.....	244
8.4 流量计流量测量实训.....	234	8.7.4 实训内容与步骤.....	245
8.4.1 实训目的.....	234	8.7.5 实训考核内容.....	246
8.4.2 实训仪器和设备.....	234	8.8 实时以太网气动调节阀	
8.4.3 实训基本原理.....	235	控制实训.....	247
8.4.4 实训内容与步骤.....	237	8.8.1 实训目的.....	247
8.4.5 实训考核内容.....	239	8.8.2 实训仪器和设备.....	247
8.5 加热罐液位控制实训.....	239	8.8.3 实训基本原理.....	247
8.5.1 实训目的.....	239	8.8.4 实训内容与步骤.....	248
8.5.2 实训仪器和设备.....	239	8.8.5 实训考核内容.....	249
8.5.3 实训基本原理.....	239	8.9 有线 HART 气动调节阀	
8.5.4 实训内容与步骤.....	240	控制实训.....	250
8.5.5 实训考核内容.....	242	8.9.1 实训目的.....	250
8.6 加热罐加热控制实训.....	242	8.9.2 实训仪器和设备.....	250
8.6.1 实训目的.....	242	8.9.3 实训基本原理.....	250
8.6.2 实训仪器和设备.....	242	8.9.4 实训内容与步骤.....	251
8.6.3 实训基本原理.....	242	8.9.5 实训考核内容.....	252
8.6.4 实训内容与步骤.....	243		
8.6.5 实训考核内容.....	244		
8.7 水温调节控制实训.....	244		
8.7.1 实训目的.....	244		

## 1.1 控制仪表及装置基本知识

### 1.1.1 控制仪表及装置总体概述

自动控制技术是生产过程高效运行的技术保障，对企业生产过程起着明显的提升作用，有助于提高生产效率，保证产品质量，减少生产过程的原材料、能源损耗，提高生产过程的安全性。控制系统是实现生产过程自动化的平台，而过程控制仪表与装置是过程控制系统不可缺少的重要组成部分。其重要性可由图 1-1 和图 1-2 所示。

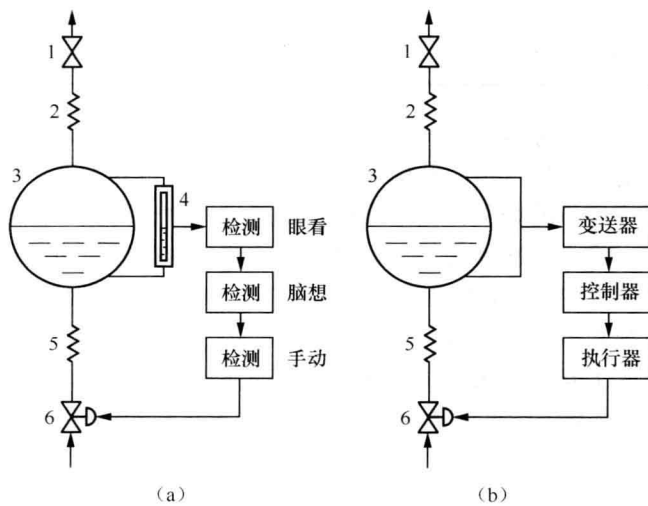


图 1-1 锅炉水位控制原理

为了提高控制系统功能，还可增加一些仪表，如手操器、显示器等，这将需要更多的仪表。这些仪表可以是电动仪表、气动仪表等各种系列的仪表，也可以是各种控制装置，所有这些仪表或装置都属于控制仪表与装置的范畴。如果没有这些仪表或装置，就不可能实现自动控制。

控制仪表是自动控制被控变量的仪表。它将测量信号与给定值比较后，对偏差信号按一



定的控制规律进行运算，并将运行结果以规定的信号输出。工程上将构成一个过程控制系统的各个仪表统称为控制仪表。各种控制仪表是实现工业自动化必不可少的工具，这部分内容将系统地、把电动、数字式和气动控制仪表结合在一起。本书涉及的控制仪表包括在自动控制系统中广泛使用的变送器、控制器、执行器等，以及新型控制仪表及装置。

### 1.1.2 控制仪表及装置的分类及特点

控制仪表及装置可按能源形式、信号类型和结构形式来分类。

#### 1. 按能源形式分类

控制仪表及装置可分为气动、电动、液动等几类。工业上通常使用气动控制仪表和电动控制仪表。

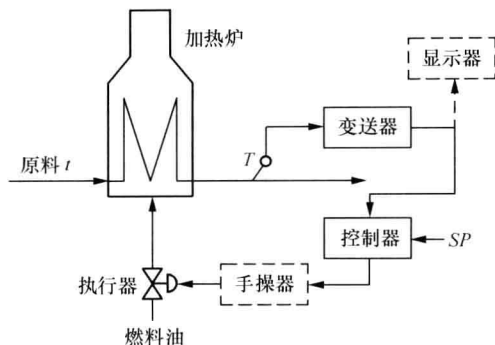


图 1-2 加热炉控制原理

表 1-1 电动控制仪表和气动控制仪表的比较

	电控控制仪表	气动控制仪表
能源	电源 220VAC 或 24VDC	气源(140kPa)
传输信号	电信号	气压信号
构成	电子元器件（电阻、电容、运放、集成电路等）	启动元件（起租、气容、气动放大器等）
接线	导线、印制电路板	导管、管路板

气动控制仪表的工作能源是气源，全部仪表均用统一气信号进行联系。该类仪表的应用与发展已有数十年历史，其特点是：结构简单、性能稳定、可靠性高、本质安全，特别适用于石油、化工等有爆炸危险的场所。在冶金行业制氧过程中也得到广泛应用，但随电动仪表防爆性能的日臻完善，除去特殊场合外，目前气动控制仪表应用较少。

电动控制仪表的出现要晚些，但由于其信号传输、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，还易于与计算机等现代化技术工具联用，因而这类仪表的应用更为广泛。由于采取了安全火花防爆措施，电动控制仪表的防爆问题，也得到了很好地解决，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，本书重点予以介绍。

#### 2. 按信号类型分类

控制仪表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，在中国已经历多次升级换代，在设计、制造、使用上均有较成熟的经验。长期以来，它广泛地应用于各工业部门。

数字式控制仪表的传输信号通常为断续变化的数字量。近 20 年来，随着微电子技术、计算机技术和网路通信技术的迅速发展，数字式控制仪表和新型计算机控制装置相继问世，并

越来越多地应用于生产过程自动化中。这些仪表和装置是以微型计算机为核心,其功能完善,性能优越,它能解决模拟式仪表难以解决的问题,满足现代化生产过程的高质量控制要求。

### 3. 按结构形式分类

控制仪表可分基地式控制仪表、单元组合式控制仪表、组装式综合控制装置、数字化控制仪表、集散控制系统以及现场总线控制系统。

(1) 基地式控制仪表是以指示、记录为主体,附加控制机构而组成。它不仅能对某变量进行指示或记录,还具有控制功能。由于基地式仪表结构比较简单,价格便宜,又能一机多用,常用于单机自动化系统。我国生产的 XCT 系列控制仪表和 TA 系列电子控制器均属于基地式控制仪表。

(2) 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,将系统划分成能独立地完成某种功能的若干单元,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,可构成多种多样的、复杂程度各异的自动检测和控制系统。

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 3 个发展阶段,以后又推出了较为先进的数字化的 DDZ-S 系列仪表。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,单元组合仪表在实现中国中、小型企业的生产过程自动化中发挥了重要作用。

(3) 组装式控制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。该装置以模拟器件为主,兼用了模拟技术和数字技术,它包括控制机柜和显示操作盘两部分,控制机柜的组件箱内插有若干功能件板,且采用高密度安装,结构十分紧凑。工作人员利用显示屏幕、操作装置实现对生产过程的集中显示和操作。目前组装式仪表在工程实际中已很少使用。

(4) 数字式控制仪表是以数字计算机为核心的数字控制仪表。其外形结构、面板布置保留了模拟式仪表的一些特征,但其运算、控制功能更为丰富,通过组态可完成各种运算处理和复杂控制,可以和计算机配合使用,以构成不同规模的分级控制系统。

(5) 集散型控制系统是将集中一台计算机完成的任务分派给各个微型过程控制计算机,再配上数字总线以及上一级过程控制计算机,组成各种各样的、能适应于不同过程的积木式分级分布计算机控制系统。它将生产过程分成许多小系统,以专用微型计算机进行现场或设备的各种有效控制,实现了“控制分散”或“危险分散”,但整个控制系统的管理高度集中,因此称集中分散型控制系统,简称集散型控制系统(DCS)。

(6) 现场总线控制系统是 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。现场总线的出现引起了传统控制系统结构和设备的根本性变革,它将具有数字通信能力的现场智能仪表连成网络系统,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。

## 1.2 控制仪表防爆的基本知识

爆炸是物质从一种状态经过物理或化学变化,突然变成另一种状态,并放出巨大的能力。急剧速度释放的能量,将使周围的物体遭受到猛烈的冲击和破坏。爆炸必须具备的 3 个条件。

①爆炸性物质:能与氧气(空气)反应的物质,包括气体、液体和固体(气体:氢气,乙炔,甲烷等;液体:酒精,汽油等;固体:粉尘,纤维粉尘等)。②氧气:空气。③点燃源:包括

明火、电气火花、静电火花、高温、化学反应、光能等。

很多生产场所都会产生某些可燃性物质。煤矿井下约有 2/3 的场所存在爆炸性物质；化学工业中，约有 80% 以上的生产车间区域存在爆炸性物质。氧气：空气中的氧气是无处不在的。点燃源：在生产过程中大量使用电气仪表，各种摩擦的电火花，机械摩擦火花。静电火花、高温等不可避免，尤其当仪表、电气发生故障时更为严重。

客观上很多工业现场满足爆炸条件。当爆炸性物质与氧气的混合浓度处于爆炸极限范围内时，若存在爆炸源，将会发生爆炸。因此在这些场所使用的仪表和控制系统必须具有防爆性能。

### 1.2.1 防爆仪表的标准

防爆仪表必须符合国家标准 GB 3836.1《爆炸性环境用防爆电气设备通用要求》的规定。

#### 1. 防爆仪表的分类

按照国标 GB 3836.1 规定，防爆电气设备分为两大类。

I 类：煤矿井下用电气设备。

II 类：工厂用电气设备。

II 类（工厂用）电气设备又分为 8 种类型。这 8 种类型及其标志如表 1-2 所示。

表 1-2 电气设备类型及其标志

隔爆型	d	增安型	e
本质安全型	i	正压型	p
充油型	o	充沙型	q
无火花型	n	特殊型	s

电动仪表主要有隔爆型（d）和本质安全型（i）两种。本质安全型又分为两个等级： $i_a$  和  $i_b$ 。

#### 2. 防爆仪表的分级和分组

在爆炸性气体或蒸气中使用的仪表，有两方面原因可能引起爆炸：①仪表产生能量过高的电火花或仪表内部因故障产生的火焰通过表壳的缝隙引燃仪表外的气体或蒸气；②仪表过高的表面温度。因此，根据上述两个方面对 II 类防爆仪表进行了分级和分组，规定其适用范围。

根据标准试验装置测得的最大试验安全间隙  $\delta_{\max}$  或按 IEC79-3 方法测得的最小点燃电流与甲烷测得的最小点燃电流的比值 MICR，II 类（工厂用）防爆仪表分为 A、B、C 三级如表 1-3 所示。

根据最高表面温度，工厂用防爆仪表分为 T1~T6 六组如表 1-4 所示。

仪表的最高表面温度=实测最高表面温度-实测时环境温度+规定最高环境温度。

防爆仪表的分级和分组，是与易燃易爆气体或蒸气的分级和分组相对应的。易燃易爆气体或蒸气的分级和分组如表 1-5 所示。仪表的防爆级别和组别，就是仪表能适应的某种爆炸性气体混合物的级别和组别，即对于表 1-5 中相应级、组之上方和左方的气体或蒸气的混合物均可以防爆。

表 1-3 防爆仪表的分级

级别	$\delta_{\max}/\text{mm}$	MICR
II A	$\delta_{\max} \geq 0.9$	MICR > 0.8
II B	$0.9 > \delta_{\max} > 0.5$	$0.8 \geq \text{MICR} \geq 0.45$
II C	$0.5 \geq \delta_{\max}$	$0.45 > \text{MICR}$

表 1-4 防爆仪表的分组

温度组别	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>
最高表面温度/ ℃	450	300	200	135	100	85

表 1-5 易爆性气体或蒸气的级别和组别

组别 级别	T <sub>1</sub> >450℃	T <sub>2</sub> 300~400℃	T <sub>3</sub> 200~300℃	T <sub>4</sub> 135~200℃	T <sub>5</sub> 100~135℃	T <sub>6</sub> 85~100℃
II A	甲烷、氨、乙烷、丙烷、丙酮、苯、甲苯、一氧化碳、丙烯酸、甲酯、苯乙烯、醋酸乙酯、醋酸、氯苯、醋酸甲酯	乙醇、丁醇、丁烷、醋酸丁酯、醋酸戊酯、环戊烷、丙烯、乙苯、甲醇、丙醇	环乙烷、戊烷、己烷、庚烷、辛烷、汽油、煤油、柴油、戊醇、己醇、环乙醇	乙醛、三甲胺		亚硝酸乙酯
II B	丙烯酯、二甲醚、环丙烷、市用煤气	环氧丙烷、丁二烯、乙烯	二甲醚、丙烯醛、碳化氢	乙醚、二乙醚		
II C	氢、水煤气	乙炔		二硫化碳	硝酸乙酯	

### 3. 防爆仪表的标志

防爆仪表的防爆标志为“Ex”，仪表的防爆等级标志的顺序为：防爆型式、类别、级别、温度组别。

控制仪表常见的防爆等级有 i<sub>a</sub>IICT5 和 dIIBT3 两种。前者表示 II 类本质安全型 i<sub>a</sub> 等级 C 级 T5 组，由表 1-3 可见，它适用于 II 温度组别及其左边的所有爆炸性气体或蒸气的场合；后者表示 II 类隔爆型 B 级 T3 组，由表 1-3 可见，它适用于级别和组别为 IIAT1、IIAT2、IIAT3、IIBT1、IIBT2，和 IIBT3 的爆炸性气体或蒸气的场合。

#### 1.2.2 控制仪表的防爆措施

控制仪表防爆措施主要有隔爆型和本质安全型。

##### 1. 隔爆型防爆仪表

采用隔爆型防爆措施的仪表称隔爆型防爆仪表，其特点是仪表的电路和接线端子全部置于防爆壳体内，其表壳强度足够大，接合面间隙足够深，最大的间隙宽度又足够窄。这样，即使仪表因事故在表壳内部产生燃烧或爆炸时，火焰穿过缝隙过程中，受缝隙壁吸热及阻滞作用，将大大降低其外传能量和温度，从而不会引起仪表外部规定的易爆性气体混合物的爆炸。

隔爆型防爆结构的具体防爆措施是采用耐压  $80\sim 100\text{N}/\text{cm}^2$  以上的表壳,表壳外部的温升不得超过由易爆性气体或蒸气的引燃温度所规定的数值。表壳接合面的缝隙宽度及深度,应根据它的容积和易爆性气体的级别采用规定的数值等。

隔爆型防爆仪表安装及维护正常时,它能达到规定的防爆要求,但是揭开仪表表壳后,它就失去了防爆性能,因此不能在通电运行的情况下打开表壳进行检修或调整。此外,这种防爆结构长期使用后,由于表壳接合面的磨损,缝隙宽度将会增大,因而长期使用会逐渐降低防爆性能。

## 2. 本质安全型防爆仪表

采用本质安全型防爆措施的仪表称本质安全型防爆仪表(简称本安仪表),也称安全火花型防爆仪表。所谓“安全火花”就是指这种火花的能量很低,它不能使爆炸性混合物发生爆炸。这种防爆结构的仪表,在正常状态下或规定的故障状态下产生的电火花和热效应均不会引起规定的易爆性气体混合物爆炸。正常状态是指在设计规定条件下的工作状态,故障状态是指电路中非保护性元件损坏或产生短路、断路、接地及电源故障等情况。本质安全型防爆仪表有两个  $i_a$  和  $i_b$  两个等级,  $i_a$  级在正常工作、一个和两个故障状态时均不能点燃爆炸性气体混合物;  $i_b$  级在正常工作和一个故障状态时不能点燃爆炸性气体混合物。

本质安全型防爆仪表在电路设计上采用低工作电压和小工作电流。通常采用不大于  $24\text{VDC}$  工作电压和不大于  $20\text{mA}$  的工作电流。对处于危险场所的电路,适当选择电阻、电容和电感的参数值,用来限制火花能量,使其只产生安全火花;在较大电容和电感回路中并联双重化二极管,以消除不安全火花。

常用本安型仪表有电Ⅲ型的差压变送器、温度变送器、电/气阀门定位器以及安全栅等。

必须指出,将本质安全型防爆仪表在其所适用的危险场所中使用,还必须考虑与其配合的仪表及信号线可能对危险场所的影响,应使整个测量或控制系统具有安全火花防爆性能。

### 1.2.3 控制系统的防爆措施

整个测量或控制系统的防爆性能要符合安全火花防爆要求,必须满足以下几点。

(1) 在危险场所使用安全火花型防爆仪表。

(2) 在控制室仪表与危险场所仪表之间设置安全栅,如图 1-3 所示。

如果上述系统中不采用安全栅,而由分电盘代替,分电盘只能起信号隔离作用,不能限压、限流,故该系统就不再是本质安全防爆系统了。同样,有了安全栅,但若某个现场仪表不是本安仪表,则该系统也不能保证本质安全的防爆要求。

(3) 按照安全火花防爆的要求进行系统的安装和维护。

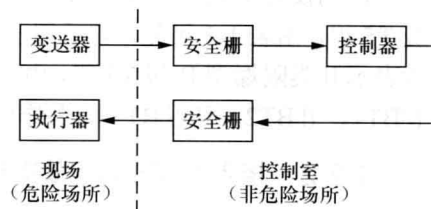


图 1-3 安全火花型防爆系统

## 1.3 控制仪表的分析方法

过程控制仪表品种繁多,如何在学习几种典型仪表之后,自行对其他仪表进行分析,关键在于掌握过程控制仪表的分析方法。

### 1.3.1 控制仪表总体分析思路

模拟仪表先用框图的形式分析其结构功能，掌握仪表的外部特性，内部电路要根据功能的要求分析其“核”；数字仪表要熟悉其硬件和软件资源，掌握其编程方法和操作方法，通过工程案例分析，掌握工程方案实现和功能分配方法。本节主要介绍模拟仪表的分析方法。

从仪表整体结构上看，模拟式控制仪表有两种构成形式。

① 仪表整机采用单个放大器，其放大器可由若干级放大电路或不同的放大器串联而成。如 DDZ-II 型仪表、大部分的变送器以及气动仪表等。

② 整机由数目不等的运算放大器电路以不同形式组装而成。如 DDZ-III 型系列、A 系列和 EK 系列仪表等。

### 1.3.2 采用单个放大器的分析方法

#### 1. 采用单个放大器的仪表特点

这一类仪表一般具有如图 1-4 所示的典型结构，即整个仪表可以划分为 3 部分：输入转换部分、放大部分和反馈部分。

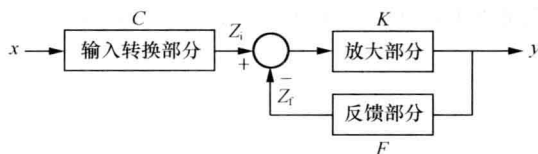


图 1-4 单个放大器的仪表结构

输入转换部分把输入信号  $x$  转化为某一中间变量  $Z_i$ ，可以是电压、电流、位移、力和力矩等物理量；反馈部分把仪表的输出信号转换为反馈信号  $Z_f$ ， $Z_i$  和  $Z_f$  是同一类型的物理量。放大部分把  $Z_i$  和  $Z_f$  的差值放大，并转换成标准输出信号  $y$ 。由图 1-4 可以求得整个仪表的输出与输入关系为

$$y = \frac{K}{1 + KF} Cx \quad (1-1)$$

式中， $C$  为测量部分的转换系数； $K$  为放大系数； $F$  为反馈部分的反馈系数。

当  $K$  足够大，且满足  $KF \gg 1$  时，上式变为

$$y = \frac{1}{F} Cx \quad (1-2)$$

由于实际仪表一般能满足  $KF \gg 1$ ，故仪表的输出与输入关系只取决于输入部分和反馈部分的特性。同时仪表输入部分的输出信号  $Z_i$  与整机输出信号经反馈部分反馈到放大部分的输入端的反馈信号  $Z_f$  基本相等，放大部分的净输入接近零。

#### 2. 采用单个放大器分析方法

对于这类仪表的分析，首先要将仪表分为输入、放大和反馈 3 个部分。然后对各个部分进行分析，尤其是输入部分和反馈部分，最后根据式 (1-1) 或式 (1-2) 求得仪表的输出和输入之间关系。

实际仪表划分出输入、放大和反馈这 3 个部分的关键在于找出比较环节和引出负反馈的

取样环节。对于气动仪表一般依据力或力矩平衡原理可以很直观地找出这两个环节，比较环节一般是膜片或杠杆，取样是仪表输出。电动仪表的比较环节一般从放大器的输入端去找，取样环节从仪表的输出端去找。

电动仪表的比较方式有两种：串联比较和并联比较。

串联比较是输入部分的电压  $U_i$  和反馈部分的输出电压  $U_f$  串联，其差值为放大器的净输入  $\varepsilon$ ，如图 1-5 所示；并联比较是输入部分的电压  $U_i$  和反馈部分的输出电压  $U_f$  分别通过电阻并联加到放大器的输入端，如图 1-6 所示。

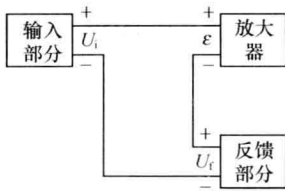


图 1-5 电压串联比较结构

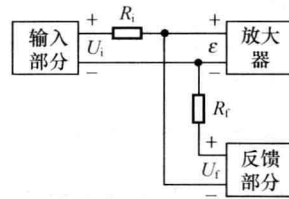


图 1-6 电压通过电阻并联比较结构

电动仪表的取样方式有两种：电流取样和电压取样。电流取样方式如图 1-7 所示，取样元件电阻串联在输出信号回路中；电压流取样方式如图 1-8 所示，取样电压是输出电压的全部或一部分。

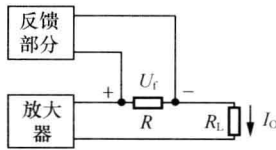


图 1-7 电流取样结构

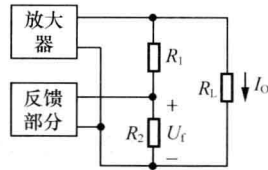


图 1-8 电压取样结构

### 1.3.3 采用运算放大器的分析方法

#### 1. 集成运算放大器基本特征

在对仪表中的某一级运算放大器电路进行分析时，运算放大器本身可以用图 1-9 所示的模型来表示。对前一级运算放大器电路输出来讲，它相当于一个等效电阻  $R_i$ ，称为输入电阻；对后一级运算放大器电路输入来讲，它可以看作一个由电压源（其大小受输入电压控制）和内阻  $R_o$  串联起来的等效电源，其中  $R_o$  称为输出电阻。在分析仪表线路时，往往把运算放大器理想化。

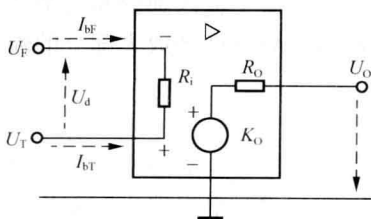


图 1-9 运算放大器等效模型

理想运算放大器具有如下特点：①输入电阻  $R_i = \infty$ ；②输出电阻  $R_o = 0$ ；③开环电压增益  $K_o = \infty$ ；④失调及其漂移为零。

由上述特点，可以得出如下两条重要的结论。

(1) “虚短”：差模输入电压为零，即  $U'_d = 0$ 。

(2) “虚断”：输入端输入电流为零，即  $i_i = 0$ 。

实际的运算放大器不可能如此，但与此结论非常接近。

## 2. 集成运算放大器典型电路

通常, 运算放大器电路都是带有负反馈的闭环电路, 即信号从输入端加入, 经放大后输出, 输出电压又通过反馈电路引回到输入端。这时, 整个运算放大器电路的特性主要取决于反馈电路的形式和参数。仪表中常用的 4 种电路形式及其特性如下。

(1) 反相端输入。反相端输入运算放大器电路如图 1-10 所示。

$$u_o = -\frac{R_2}{R_1}u_i \quad (1-3)$$

(2) 同相端输入。同相端输入运算放大器电路如图 1-11 所示。

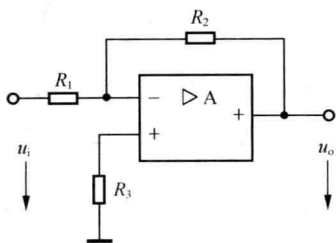


图 1-10 反相输入运算放大器电路

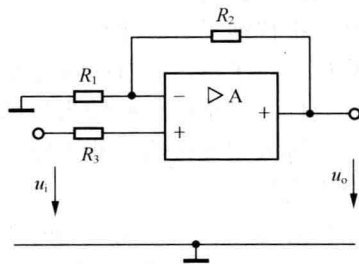


图 1-11 同相输入运算放大器电路

$$u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)u_i \quad (1-4)$$

(3) 差动输入。差动输入运算放大器电路如图 1-12 所示。

当  $R_3=R_1$ ,  $R_4=R_2$  时, 有:

$$u_o = -\frac{R_2}{R_1}(u_{iF} - u_{iT}) \quad (1-5)$$

(4) 电压跟随器。电压跟随器电路如图 1-13 所示。

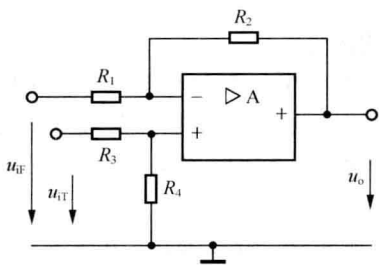


图 1-12 差动输入运算放大器电路

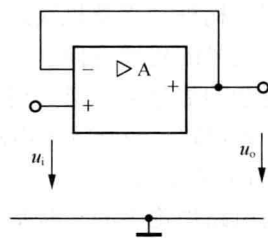


图 1-13 电压跟随器电路

$$u_o = u_i \quad (1-6)$$

在式 (1-6) 中, 输出电压与输入电压相等, 即电压跟随器实际上是一个 1:1 同相输入运算放大器。其主要的优点是输入电阻高、输出电阻低。因此, 在仪表电路应用中, 将它置于需要隔离的两个电路之间, 从前级电路索取的电流很小, 对后级电路相当一个电压源, 从而起着良好的隔离作用, 使得前、后级电路不会相互影响, 而信号传送又不致损失。

## 3. 单电源供电的运算放大器电路

运算放大器通常都是由正、负电源供电。但过程控制仪表出于总体设计的需要, 便于仪



表的安装以及变送器采用二线制等原因，在仪表线路中，一般都采用单电源供电，即由一组24VDC电源供电。运算放大器采用单电源供电，实质改变的是电位基准，由于电位基准发生了改变，因此运算放大器的允许工作条件将跟着改变。为了保证运算放大器正常工作，常采用电平移动的办法，这并不影响运算放大器电路的运算关系和特性。

#### 4. 采用运算放大器的仪表分析方法

采用运算放大器的仪表分析方法，是把整个仪表线路分成一个个运算放大器电路单独地进行分析，最后再综合得到整机的特性，故仪表线路的分析的基础是单个运算放大器电路的分析。具体方法有如下两种。

(1) 熟练灵活掌握基本运算放大器电路的关系式，就能很容易地看出运算放大器电路的运算关系，并能很快地了解整个仪表的特性。当然，仪表中的实际电路，很多时候并不像基本运算电路那样一目了然，它有时可能是两种基本电路的合成，或者输入回路电阻包含有电容等非纯阻性元件，甚至由一些较为简单的无源电阻网络构成，只要了解仪表的作用和结构框图，结合一些等效定理可将这些比较复子电路转化为基本电路。有关这一方面的技巧，将在后面的章节中进行介绍。

(2) 利用理想运算放大器输入端的两个特征：①差模输入电压等于零；②输入端输入电流等于零。这两个特征是分析运算器放大电路输出与输入关系的出发点：实际上，前面所述的4个基本运算放大器电路的关系式也是依据这两个特征求得的。根据电路具体结构，找出输入、输出信号与 $U_T$ 、 $U_F$ 之间的关系，然后依据 $U_T=U_F$ ，求出输出与输入之间的关系。

利用上述两个特征进行分析时，采用“保证等效，断开反馈”的办法，把原电路转化为一个没有反馈的开环等效电路，往往可以使问题变得简单明了，有利于分析。

#### (3) 仪表的分析步骤。

现将仪表的分析步骤小结如下。对于一块仪表，可以采用由整体到局部的分析方法，即首先对仪表作总体概貌了解，然后将仪表划分成几个部分，再对各部分逐一进行分析，最后综合出整机的特性。其具体步骤可以如下操作。

- ① 了解仪表作用和结构框图。
- ② 按照结构框图将整机线路划分成相应的部分。
- ③ 根据信号的传递方向，对各部分逐一进行分析，在分析中注意应用以下几种方法。
  - 对复杂的部分可画出其构成框图，作进一步划分，直到划分为最基本的构成部件为止。
  - 画等效电路。在画等效电路时，可以忽略一些次要元件，以便突出主要部分，也可以把电路画成习惯的形式。
  - 应用电路理论中的一些基本定律，如欧姆定律、分流公式、分压公式、等效电源定理、叠加定理、阻抗变换等，以便把复杂的电路转化为简单的形式。
  - 综合仪表的整机特性。

## 1.4 本课程的性质、内容和任务

控制仪表与装置是自动控制专业的一门专业课。其任务是将生产过程控制中常用仪表的结构、工作原理、选用方法、安装使用方法、校验方法传授给学生。使学生从中学到利用过程控制仪表构成控制系统的方法和实现手段，理解各控制仪表的原理结构，获得控制仪表安装使用、校验、维护方面的基本知识和技能。