

3

普通高等教育机电类规划教材

# 控制仪表与装置

天津大学 向婉成 主编

(北京)

43

机械工业出版社

本书由国内几所大学自动化仪表专业的教师合作编写，是教师们多年教学的总结。

全书对模拟及数字控制仪表和装置进行了全面介绍，以模拟调节器为基础，而以数字控制仪表和装置为重点。书中系统地阐述了典型控制仪表和装置的结构、原理、设计及使用方面的内容。书中包括了已广泛使用及正在日益推广的产品，也包括了教师们的部分科研成果，力图反映控制仪表和装置的最新发展。智能变送器、智能执行器、数字调节器、可编程调节器、可编程控制器及分散控制系统等在书中都占了相当的分量。

本书可作为高等院校自动控制类和仪表类有关专业教材，并可供有关科技人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

控制仪表与装置/向熹成主编. —北京: 机械工业出版社, 1999. 10  
普通高等教育机电类规划教材  
ISBN 7-111-07094-1

I. 控… II. 向… III. ①模拟控制-自动化仪表-高等教育-教材②数字控制-自动化仪表-高等教育-教材 N. TH86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 45922 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王小东 版式设计: 霍永明 责任校对: 李秋荣

封面设计: 姚毅 责任印制: 路琳

北京机工印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1999 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

787mm×1092mm<sup>1/16</sup>·12.25 印张·296 千字

0 001—3 000 册

定价: 16.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、68326677-2527

## 前 言

“控制仪表与装置”是与生产自动化关系十分密切的课程。自动化技术的发展对控制仪表与装置提出了更高的要求，前者又推动着后者的发展。控制仪表及装置是发展十分迅速的部门，新技术应用非常活跃，产品更新日新月异，产品种类更加繁杂。

为满足工业仪表及自动化专业教学的要求，迫切需要一本能反映现代控制仪表与装置的教材，它应比“过程控制调节装置”包含内容更全面，不仅有对连续生产过程进行调节的仪表装置，还应有对断续生产过程及间歇过程进行控制的装置，并要考虑到控制仪表与装置的最新发展。本书正是为适应这种情况编写的。

本书共分九章，由四所大学的五位教师共同编写，由天津大学向婉成主编。参加编写的有上海理工大学冯兴华（第二章）、哈尔滨工业大学徐文辉（第四章）、天津大学黄晓玲（第六、八章）、哈尔滨理工大学孙大平（第七、九章），其它章节由向婉成编写。清华大学王家楨教授仔细地审阅了全部书稿，提出了详细的修改意见，在此向他表示诚挚的感谢。

本书可作为高等院校工业自动化仪表专业及其它自动化专业的教材或教学参考书，也可供有关工程技术人员参考。

由于编者水平有限，错误或不当之处在所难免，望读者提出批评指正。

编者

1999.1 于天津

# 目 录

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 前言                    |     |
| 第一章 概论                | 1   |
| 第一节 控制仪表与装置的分类        | 1   |
| 第二节 控制仪表与装置的发展        | 4   |
| 一、发展概况                | 4   |
| 二、发展趋势                | 5   |
| 第三节 模拟信号制及供电方式        | 5   |
| 一、信号制                 | 6   |
| 二、变送器信号传输方式           | 8   |
| 三、供电方式                | 9   |
| 第四节 全数字控制仪表装置间的通信方式   | 9   |
| 第二章 变送器               | 12  |
| 第一节 概述                | 12  |
| 第二节 差压及压力变送器          | 12  |
| 一、差动电容式压力变送器          | 13  |
| 二、扩散硅压力变送器            | 17  |
| 第三节 DDZ-Ⅲ型温度变送器       | 20  |
| 一、热电偶温度变送器的工作原理       | 20  |
| 二、一体化温度变送器            | 25  |
| 第四节 二线制变送器的电路分析与设计    | 26  |
| 第五节 智能压力变送器           | 30  |
| 一、ST3000 智能压力变送器      | 31  |
| 二、3051C 智能压力(差压)变送器   | 32  |
| 三、通用智能变送器             | 32  |
| 第三章 防爆安全栅             | 38  |
| 第一节 防爆安全的基本概念         | 38  |
| 一、危险场所的划分             | 38  |
| 二、爆炸性物质的分类、分级与分组      | 38  |
| 三、防爆仪表的分类、分级与分组       | 39  |
| 第二节 本质安全型防爆仪表的设计要点    | 41  |
| 一、降低本质安全电路的能量         | 41  |
| 二、本安电路元件的结构和选取        | 42  |
| 第三节 防爆安全栅原理           | 42  |
| 一、齐纳安全栅               | 42  |
| 二、变压器隔离式安全栅           | 45  |
| 第四章 模拟式调节器            | 47  |
| 第一节 PID 调节规律及实现方法     | 47  |
| 一、调节规律                | 47  |
| 二、PID 运算电路的构成         | 57  |
| 第二节 基型 PID 调节器        | 60  |
| 一、PID 调节器的组成原理        | 60  |
| 二、DDZ-Ⅲ型调节器的原理和特性     | 62  |
| 第三节 特种调节器             | 77  |
| 一、输出限幅抗积分饱和调节器        | 77  |
| 二、非线性调节器              | 79  |
| 第五章 数字式调节器            | 82  |
| 第一节 概述                | 82  |
| 一、数字调节器的硬件构成          | 82  |
| 二、数字调节器的软件构成          | 83  |
| 第二节 模拟量输入/输出通道        | 83  |
| 一、模拟量输入通道             | 83  |
| 二、模拟量输出通道             | 85  |
| 第三节 数字式 PID 调节器       | 87  |
| 一、数字调节器的两种设计方法        | 87  |
| 二、PID 控制算式            | 88  |
| 三、PID 控制程序            | 93  |
| 四、多通道数字 PID 调节器       | 97  |
| 第四节 PID 参数自整定调节器      | 101 |
| 一、改进型临界比例度法(继电器幅自整定法) | 102 |
| 二、迭代自整定控制算法           | 104 |
| 三、专家法 PID 参数自整定       | 106 |
| 第六章 可编程数字调节器          | 111 |
| 第一节 概述                | 111 |
| 第二节 可编程数字调节器的结构组成及性能  | 111 |
| 一、显示操作面板              | 111 |
| 二、编程设定                | 112 |
| 三、I/O 接口与通信           | 113 |
| 四、后备硬手操               | 113 |
| 第三节 可编程数字调节器的系统组态     | 113 |

|                       |     |                          |     |
|-----------------------|-----|--------------------------|-----|
| 一、输入组态字方式进行组态·····    | 113 | 三、数字量输入/输出模件·····        | 142 |
| 二、填写模块代码方式进行组态·····   | 114 | 四、模拟量输入/输出模件·····        | 147 |
| 三、利用组态语言进行组态·····     | 117 | 第三节 可编程序控制器的编程语言·····    | 151 |
| 第七章 执行器·····          | 123 | 一、基本逻辑功能·····            | 151 |
| 第一节 概述·····           | 123 | 二、PLC 梯形逻辑图及其基本组成元素····· | 152 |
| 第二节 普通执行器及手操器·····    | 123 | 三、梯形逻辑图格式·····           | 153 |
| 一、气动执行器·····          | 123 | 四、PLC 指令类型·····          | 155 |
| 二、电动执行器·····          | 125 | 第四节 典型控制环节编程举例·····      | 168 |
| 三、手操作器·····           | 126 | 应用实例 1: 电动机联锁控制·····     | 168 |
| 第三节 智能执行器·····        | 126 | 应用实例 2: 连续的灌瓶控制·····     | 169 |
| 一、智能电动执行器·····        | 127 | 第九章 小型分散控制系统·····        | 172 |
| 二、智能调节阀·····          | 128 | 第一节 概述·····              | 172 |
| 第四节 电/气转换器及阀门定位器····· | 130 | 第二节 基本控制器·····           | 174 |
| 一、电/气转换器·····         | 130 | 第三节 监控系统与通信网络·····       | 176 |
| 二、阀门定位器·····          | 130 | 一、监控系统·····              | 176 |
| 第八章 可编程序控制器·····      | 133 | 二、通信网络·····              | 177 |
| 第一节 概述·····           | 133 | 第四节 软件编程及应用·····         | 179 |
| 一、可编程序控制器的发展概况·····   | 133 | 一、软件编程·····              | 179 |
| 二、可编程序控制器的特点·····     | 134 | 二、小型 DCS 系统应用·····       | 183 |
| 第二节 可编程序控制器的硬件系统····· | 136 | 参考文献·····                | 190 |
| 一、系统结构及功能·····        | 136 |                          |     |
| 二、内存及 I/O 地址·····     | 139 |                          |     |

# 第一章 概 论

控制仪表与装置是实现生产自动化的重要工具。在自动控制系统中，由检测仪表将生产工艺参数变为电信号或气压信号后，不仅要由显示仪表显示或记录，让人们了解生产过程的情况，还需将信号传送给控制仪表和装置，对生产过程进行自动控制，使工艺参数符合预期要求。

## 第一节 控制仪表与装置的分类

按控制仪表与装置所用能源的不同，可以将其分为电动、气动、液动和混合式等几大类。其中，气动和液动控制仪表和装置发展最早，但电动控制仪表与装置发展异常迅速，现在已经占绝对统治地位。

气动控制仪表的特点是：性能稳定，可靠性高，具有本质安全防爆性能，不受电磁场干扰、结构简单、维护方便。在电子技术和计算机技术高度发展的今天，气动控制仪表所占领地虽然已十分狭小，但在一些大型装置的主体设备周围，仍有采用基地式气动控制仪表对单一的工艺参数进行就地单回路调节。尤其是气动执行器，具有安全、可靠及工作平稳等优点，应用仍十分广阔，在许多由电动控制仪表和装置构成的系统中，执行器仍采用气动式的。因此，我国及世界上一些大型自动控制仪表装置生产公司仍在生产气动控制仪表。

随着生产过程自动化的发展，远距离集中控制日益增多，控制系统规模和复杂程度不断增加，气动和液动控制仪表在许多场合已不能满足要求，而电动控制仪表与装置则得到越来越广泛的应用和飞速的发展。尤其是随着微电子技术的发展，过去被认为影响电动控制仪表发展的一些技术问题已经得到解决，品种规格更趋完善，质量不断提高。如过去认为影响电动控制仪表广泛使用的防爆问题，现在采用防爆结构、直流低电压、小电流的本质安全型防爆电路及防爆栅等措施，得到了很好地解决。电动控制仪表与装置也因此能应用到石油、化工等工业部门的自动化系统中。

电动控制仪表与装置都采用了电子技术，故称其为电子控制仪表与装置更为确切。本书只涉及电子控制仪表与装置。

从原理上分，电子控制仪表与装置又可分为两大类：模拟式控制仪表与装置和数字式控制仪表与装置。

模拟式控制仪表与装置按结构形式可分为基地式、单元组合式、组件组装式三大类。

1) 基地式控制仪表的结构特点是：以指示仪表及记录仪表为中心，附加一些线路或器件来完成控制任务。这些指示和记录仪表是电子电位差计、电子式平衡电桥以及动圈仪表等。基地式控制仪表一般结构比较简单，价格低廉，它不仅能够进行控制，同时还可指示、记录。因此适用于小型企业的单机自动控制系统。

2) 单元组合式控制仪表的结构特点是：根据自动检测与控制系统中各组成环节的不同功能和使用要求，将整套仪表划分为能独立实现一定功能的若干单元。各单元之间的联系采用

统一标准信号。由这些少量的单元经过不同的组合，就可构成多种多样的、复杂程度不同的自动检测和控制系統。

单元组合式控制仪表应用灵活、通用性强，便于控制仪表的生产、维护及备品库存等。

3) 组件组装式控制装置是在单元组合式仪表基础上发展起来的成套仪表装置，它的基本组成是一块块功能分离的组件。

由于现代化的大型企业要求各种复杂的控制系统及集中的显示操作，这就需要将控制功能及显示、操作功能分离开来。因此，组件组装式控制装置在结构上可分为控制柜和显示操作盘两大部分。控制柜内插入若干个组件箱，而若干块组件板又插入组件箱中。显示操作盘则只需占用很小的地方，更可用一台电子显示屏幕（图像显示）集中显示操作，从而大大改善了人-机联系。在控制柜中各个组件之间的信息联系，采用矩阵端子接线方式，接线工作都集中在矩阵端子接线箱里进行。

基于上述结构特点，组件组装式装置可由仪表制造厂预先根据用户要求，组装好整套自控系統，再以成套装置形式提供给用户，从而可使自控系統的现场施工、系統安装和调试工作量大大减小，也使维护、检修和系統改组工作大大简化。

数字控制仪表与装置是指以微处理器或微型计算机为核心，实现工业自动化的装置。根据工业生产过程的特点，数字控制装置可分为以下三大类：

#### 1. 连续生产过程的控制装置

连续生产过程的特征是以稳定运行为正常工况。即使设定值可能根据工艺要求而变化，其变化也是相当缓慢的，而且两次停车的时间间隔是很长的。连续生产过程自动化是生产过程自动化的重要部分，如温度、压力、流量、液位及成分等连续量的闭环自动控制，在各个工业部门都随处可见。

连续生产过程的控制由过去以模拟控制装置为主，逐步过渡为以数字控制装置为主。后者完全可以取代多种模拟调节仪表和运算仪表，并增加了许多新功能，只是由于价格和使用习惯等因素，两者还是同时并存的。但是，数字控制装置的发展十分迅速，应用领域已越来越宽，现已占有统治地位。

#### 2. 断续生产过程的控制装置

断续生产过程的特点是生产过程周期短，一般以小时或天计，甚至以分、秒计，基本为单件生产；由一个状态变化到另一个状态为快速过程，常以毫秒计，且停止、启动频繁。如机械零件加工、设备的装配、搬运、检验、包装、入库等都是典型的断续过程，它们是按照一定的时间顺序或逻辑条件一步一步对电气设备实现一系列通断控制（二值控制），即实现的是逻辑控制、顺序控制和条件控制。

自70年代中期出现了以微处理器为核心的可编程逻辑控制器（PLC）以来，发展十分迅速，现在已完全取代了继电器逻辑控制装置。

#### 3. 批量生产过程控制装置

批量生产过程的特征是在每个生产周期同时兼备连续和断续两种生产过程。在批量生产中，原料（或被加工件）或是一次投入或是分批投入，有时也依工艺条件连续投入，但成品或半成品都一定是分批生产出来的。这类生产过程要求典型的顺序控制或逻辑控制，工序间的转换是按时间条件或逻辑条件或这两种条件的组合进行的。但在某一个或某几个工序中，又有连续生产过程的特点，要求实现回路闭环控制，有的是对一个或几个参数进行控制，有的

则是进行时间程序给定控制。在机械行业中的各种热处理及冶金、石油、化工、制药、轻工等工业中都存在大量典型的批量生产过程。对批量生产过程进行控制的装置既不同于连续生产控制装置，也不同于断续生产控制装置，因而形成了一种批量生产控制装置。

批量控制装置可由 PLC 中加入 PID 等控制功能来实现，也可由连续生产控制装置中加入逻辑控制功能来实现。前者已不单纯实现逻辑和顺序控制，还能实现回路闭环控制。PLC 这一名称已不能代表其所具有的功能，故已改称 PC（可编程控制器），但习惯上仍称其为 PLC。

实际上，一个典型的生产过程往往包括连续过程、断续过程和批量过程这三种过程。过去是用不同的装置分别实施控制，不仅使得控制系统复杂化，并且将一些相关过程分隔开来，不能达到高效的要求。随着微电子技术、计算机技术、通信技术及控制技术的高速发展，各类控制装置都正向着相互渗透的方向发展。如原主要用于连续过程控制的分散控制系统（DCS），扩充了 PLC 功能和批量控制功能，而 PLC 也由单纯进行逻辑和顺序控制增加了回路控制功能和批量控制功能。

主要用于进行连续生产过程回路控制的数字控制装置可以分为以下几大类。

### 1. 数字调节器

虽然也有几个数据量采集及开关量输入/输出功能，但主要用于实现一个或几个回路的连续控制。

数字调节器按控制回路数目分为：

1) 单回路调节器——可用以构成一个简单的控制回路，或一个串级控制回路，或一个比值控制回路等。

2) 多回路调节器——可以对多个回路（2 个、4 个或 8 个）进行分时控制。

数字调节器按控制规律分为：

PID 调节器；PID 参数自整定调节器；自适应调节器；模糊控制器；智能调节器等。

数字调节器按组成控制系统的灵活性分为：

1) 可编程调节器——调节器提供多种软件功能模块，由用户通过组态功能实现各种控制系统，具有很大的应用灵活性，软件系统较复杂。

2) 固定程序调节器——不能由用户组态，但有的也可通过简单的设定在控制器给定的几种控制结构中进行选择。

### 2. 工业控制机

用于对多个（达几个到几十个）回路进行闭环连续控制及断续控制。

目前我国应用最广泛的有 STD 总线工业控制机及工业 PC（IPC）机。它们都采用模块化结构，由主机板和系统支持板组成。支持板种类很多，如 A/D 转换板、内存扩展板、开关量输入输出板、CRT 接口板、打印机接口板、串并行通信板等几百种功能模板。这些模板通过标准总线相互连接进行信息交换。总线中包括电源线、数据线、地址线及控制线，每根线都有严格的定义。实现使用时，所选用的功能模板都插在一个专用机架的总线插槽内，选择所需模板即可组成各种不同的数据处理及控制系统。

由于这种总线结构的工业控制机具有模板种类多、组合灵活、使用方便、可靠性高、抗干扰能力强及价格低廉等特点，并有丰富的应用软件及良好的开发环境，因此在中小规模的控制系统中得到广泛的应用。尤其是 IPC 是利用了普通 PC 机的一系列优点，采取了适应工业现场环境的一系列加强措施而构成的，发展十分迅速，形成了 90 年代国际上工业控制机系统



的新潮流。

### 3. 分散控制系统 (DCS)

这是将数字技术、微电子技术、通信技术、CRT 显示技术与控制技术紧密结合产生的一种综合控制系统,它采用控制分散、显示操作及管理集中的策略,具有控制算法丰富、回路组态灵活、监控操作方便、系统安装简便、增扩修改容易、高可靠性及高可维护性等特点。20 多年来,DCS 日益得到广泛的应用,已在工业控制中占主导地位。

## 第二节 控制仪表与装置的发展

### 一、发展概况

70 年代前,生产过程自动化所用的大多是模拟式的控制仪表和装置。

随着生产规模的扩大、生产水平的提高而形成的生产过程的强化、参数间相互关联性的增加,要求控制仪表与装置具有多样的、复杂的控制功能,具有更高的控制精度和可靠性,进而对大系统进行综合自动化,使企业管理与过程控制相结合,便于利用过程信息较快地作出有利于企业的决策,以适应变化发展的市场要求。显然,模拟控制仪表与装置已不能满足这种要求。数字控制仪表与装置正是适应这种要求而产生与发展的。

到 70 年代中期,随着多种微处理器及微型计算机的问世,以微处理器为核心的数字调节器及可编程序逻辑控制器都达到了实用阶段。由于微处理器价格的下降及 4C (Computer、Control、Communication、CRT) 技术的进一步发展,产生了分散控制系统 (DCS)。1975 年美国霍尼威尔公司正式向市场推出了型号为 TDC-2000 的分散控制系统。DCS 的控制功能分散,且功能非常丰富,除可实现常规 PID 控制外,还可实现多种复杂的控制及优化控制等,并有集中的监视、操作及综合管理功能。因此,在生产上取得了极大的经济效益,受到仪表制造企业和使用单位的重视。到目前为止,欧、美、日等许多发达国家有几百家企业都在制造和不断开发新的 DCS,我国也开发了自己的一些 DCS 系统。石油、化工、电力、冶金、建材和食品等工业部门也都在采用 DCS,并有更迅速普及应用的趋势,DCS 已成为控制仪表与装置的主导产品。

可编程序控制器 (PLC) 与分散控制系统 (DCS) 是控制装置的两大主流产品,它们的发展是并列进行而又相互渗透的。70 年代中期,PLC 在逻辑运算功能的基础上增加了数值计算、过程控制功能。运算速度提高、输入输出规模扩大,并开始与小型机相连,构成了以 PLC 为基础的初级分散控制系统,在冶金、轻工等行业中得到广泛的应用。

70 年代末期,PLC 向大规模、高性能等方向发展,形成了多种多样的系列化产品,出现了结构紧凑、价格低廉的新一代产品和多种不同性能的分布网络系统,并开发出多种便于工程技术人员使用的编程语言,特别是适用于工艺人员使用的图形语言,大大方便了 PLC 的使用。

80 年代中期,PLC 已开始拓展其应用领域,主要是要求电气控制与过程控制密切结合的场所(如钢铁工业中的炼铁、炼钢、连铸等)及批量过程控制中。这就从根本上改变了过去电控由 PLC 承担而过程控制由 DCS 承担的状况,做到了电控和过程控制采用一套 PLC 系统统一控制。

考虑到 PLC 的优点,DCS 生产企业也在 DCS 中结合进 PLC 的功能,使 DCS 也能承担工业生产中的各种控制任务。

介于DCS与PLC之间的一类小规模工业控制机及数字调节器，可进行少回路的可编程回路控制及少点数的可编程逻辑控制，并具有参数自整定及自校正等多种控制功能，也可与CRT显示操作站连接实现监控。这类数字控制装置由于价格便宜、系统配置灵活、功能较强，很适用于中小企业的技术改造，因而也有很强的生命力。

## 二、发展趋势

控制仪表与装置涉及的面十分广泛，如DCS、PLC、新型控制仪表、变送器及执行器等都有自己的发展轨迹，但它们的发展都围绕着实现工厂整体自动化（FA）这个总目标，即将自动控制装置用于生产流程的整个操作过程，从开机到停机的全程控制及将控制、生产计划安排和工厂全面管理有机的结合起来，实现工厂整体的自动化、综合化、最佳化。控制仪表与装置的发展趋势有：

1) 逐步实现全数字式、开放式的DCS系统：由于计算机网络技术的迅速发展，推动着DCS体系结构发生重大变革。数字通信将一直延伸到现场，传统的4~20mA直流模拟信号制将逐步被双向数字通信的现场总线所取代。发展智能变送器和智能执行器、扩展量程、改善精度、提高可用性和可靠性，使现有的DCS系统换代为全数字、全分散、全开放的新一代控制系统——现场控制系统（FCS）。

2) 发展小型DCS系统，扩展应用覆盖面：许多主流的DCS系统功能强、质量好、可靠性高，而价格则相当昂贵，中小型企业无力选用。针对这种情况，近年来一些DCS生产企业相继推出了小型DCS系统。由于中小型企业所占比例很大，因而提高小型DCS系统的性能和功能、降低价格必将极大地拓展DCS系统的应用覆盖面，提高整个工业生产的自动化水平和经济效益。

3) 开发先进的过程控制软件：以往DCS生产企业大多数只提供基本控制软件，即PID、比值、串级、前馈等控制软件，更高层次的先进控制软件须由用户自行开发。随着先进控制算法因广泛的应用和经验的积累而日趋成熟，一些DCS生产企业近年来也陆续推出一些先进的过程控制模块，如预测控制、自适应控制、模糊控制、参数自整定控制及智能控制等软件模块，使一些复杂的生产过程自动控制难题得以解决。今后还会有更多的先进控制（如多变量预测控制、鲁棒控制和神经网络控制等）引入到数字调节器、工业控制机及DCS系统中，以满足各工业部门的需求，并将带来巨大的经济效益。

4) 人工智能、专家系统在工业控制中的应用将逐步深入：近年来，人工智能、专家系统在工业生产自动控制中的应用已引起人们普遍的关注，现已开始用于管理、在线设备诊断、计划调度、生产工况判断、操作指导以及直接用于生产过程的优化控制。一方面这些应用还需要完善和推广，另一方面人工智能、专家系统还将向更高阶段发展，将继续把人的感知、分析、推理、判断、决策及自学习等功能用于控制和管理，产生众多的新一代专家系统。

5) 人-机接口界面不断更新、完善，方便工作人员的监视与操作：如运用语音输入技术，使操作人员可以用讲话的方式与控制系统进行对话；在图像显示上将能给出更多的信息和更清晰的图像，以使操作人员更方便地全面了解生产状况。

## 第三节 模拟信号制及供电方式

一个过程控制系统由许多仪表（或装置）组成，这些仪表一般包括以下几类：变送器；显

示及记录仪表；控制仪表及执行器等。

大部分变送器及执行器等都是直接安装在工业设备和工业流程的管路上，这些现场仪表常暴露在露天或有爆炸危险的场所。

显示及记录仪表及控制仪表或装置，还有一部分变送器（如温度变送器）是安装在无爆炸危险的控制室内。现场仪表相互间大多互不连接，而只和控制室内仪表相连。控制室内的仪表则以多种方式相互连接。

由于在系统中仪表之间的输入和输出相互连接，所以需要统一的标准联络信号，才能方便地把各个仪表组合起来，构成各种系统。因此，信号制是一个重要的问题。在这里我们将对各种模拟信号制进行分析比较，并简要介绍与信号制有关的变送器信号传输问题及电动调节仪表的供电方式问题。

### 一、信号制

信号制是指在成套系列仪表中，各个仪表的输入、输出信号采用何种统一的联络信号问题。只有采用统一信号才使各个仪表间的任意连接成为可能。

气动调节仪表的输入、输出信号，过去统一使用  $0.2 \sim 1 \text{kgf/cm}^2$ ，据当前国标改为  $0.02 \sim 0.1 \text{MPa}$  的模拟气压信号。电的信号种类较多，主要有模拟信号、数字信号、频率信号和脉宽信号等四大类。因为模拟式仪表及装置的结构简单、历史长，目前也应用得最多，尤其是大部分变送器和执行器是模拟式的，因此在工业控制系统中，不论是远距离传输或是控制室内部各仪表间，用得最多的仍然是电模拟信号。

电模拟信号的种类有直流电流、直流电压、交流电流和交流电压四种。从信号范围看，下限可以从零开始，也可以不从零开始（即有一个活零点），上限也可高可低。如何确定统一信号的种类和范围，对整套仪表的技术性和经济性有着直接的影响。下面对几种电信号进行分析比较。

#### （一）直流信号与交流信号比较具有的优点

- 1) 在信号传输线中，直流不受交流感应影响，易于解决仪表的抗干扰问题。
- 2) 直流不受传输线路的电感、电容及负荷性质的影响，不存在相位移问题，使接线简化。
- 3) 用直流信号便于进行模数转换，统一信号采用直流信号便于现场仪表与数字控制仪表及装置配用。

#### 4) 直流信号容易获得基准电压。

因此，世界各国都以直流电流和直流电压作为统一信号。

#### （二）直流电流信号

应用电流作为统一信号时，如一个发送仪表的输出电流要同时输送给几个接收仪表，那末所有这些仪表必须串联连接，如图 1-1 所示。

图中  $r_o$  为变送器的输出电阻， $R_{cm}$  和  $r_i$  分别为连接导线的电阻和接收仪表的输入电阻，由它们组成为变送器的负载电阻。在实际使用中，导线长度和接收仪表的个数是可以在一定范围内变化的，因此负载电阻也不是定值。由于发送仪表的输出阻抗  $r_o$  不可能无限大，负载电阻在一定范围内变化时，输出电流的变化应小于允许值，这就是所谓的“恒流性能”。

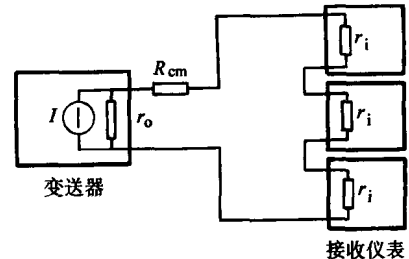


图 1-1 应用电流信号时，  
仪表之间的连接

电流信号的传输误差可用公式表示为

$$\epsilon = \frac{I - \frac{r_o}{r_o + (R_{cm} + nr_i)} I}{I} = \frac{R_{cm} + nr_i}{r_o + R_{cm} + nr_i} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中  $n$  为接收仪表个数。由式 (1-1) 可见, 为保证传输误差在允许范围内, 要求  $r_o \geq R_{cm} + nr_i$ , 此时有

$$\epsilon \approx \frac{R_{cm} + nr_i}{r_o} \times 100\% \quad (1-2)$$

可根据允许误差和技术经济指标确定  $r_o$  及  $r_i$ 。一般为保证信号在 3~5km 内传输不受影响, 同时考虑到一个发送仪表的输出电流能同时送给几个接收仪表, 要求它的输出电阻  $r_o$  足够大, 而接收仪表如调节器等的输入电阻  $r_i$  应很小。

从上述分析可以看出, 当以电流信号传输时, 发送仪表的输出阻抗很高, 相当于一个恒流源, 当接收仪表输入电阻足够小时, 传输导线长度在一定范围内变化仍能保证精度, 而小输入电阻的接收仪表具有较高的抗干扰能力。因此直流电流信号适于远距离传输。

用电流作为传输信号时, 几台接收仪表是相互串联的, 这种串联制有以下缺点:

- 1) 一台仪表损坏或需增减接收仪表时, 将影响其它仪表工作。
- 2) 由于串联工作, 所以调节器、变送器等的输出端均处于高电位工作, 输出功率管易损坏, 降低了仪表的可靠性。
- 3) 几台仪表串联工作时, 由于每两台仪表相接的端子电位相同, 因此在串联时需检查每台表的电路电位是否正确, 这就对设计者和使用者在技术上提出了较高的要求。为使连接简单, 可使各台表浮空。若各台表要根据需要选择自己的接地点, 则需采用输入输出端有直流隔离的电路。

### (三) 直流电压信号

应用电压信号作为联络信号时, 如一个发送仪表的输出电压要同时输送给几个接收仪表, 则几台接收仪表应并联连接, 如图 1-2 所示。

在并联连接时, 由于并联仪表的输入阻抗  $r_i$  不是无限大, 信号电压  $V_o$  将在发送仪表内阻  $r_o$  及导线电阻  $R_{cm}$  上降掉一部分  $\Delta V$ , 而造成信号传输误差  $\epsilon$

$$\epsilon = \frac{\Delta V}{V_o} = \frac{V_o - V_i}{V_o} = \frac{r_o + R_{cm}}{r_o + R_{cm} + \frac{r_i}{n}} \quad (1-3)$$

为减小此误差, 一般要满足条件  $\frac{r_i}{n} \geq r_o + R_{cm}$ , 此时式 (1-3) 变为

$$\epsilon = \frac{\Delta V_o}{V_o} \approx n \frac{r_o + R_{cm}}{r_i} \quad (1-4)$$

由式 (1-4) 可见:

- 1) 为减小传输误差, 要求发送仪表内阻  $r_o$  及导线电阻  $R_{cm}$  足够小。若远距离传输电压信号, 则增大了的  $R_{cm}$  势必对接收仪表电阻  $r_i$  提出过高的要求, 而输入阻抗高将易于引入干扰, 因此电压信号不适于作远距离传输的信号。

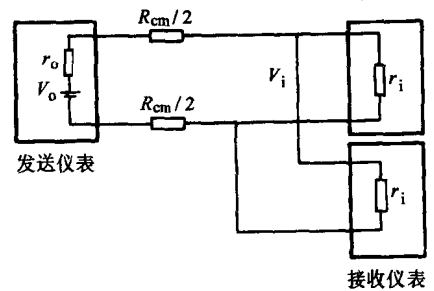


图 1-2 应用电压信号时, 仪表之间的连接

2) 接收仪表输入阻抗越高, 误差越小。当并接的仪表较多时, 相当于总的输入阻抗减小, 误差增大, 因此并接的仪表越多, 要求每个仪表的输入阻抗就越大。

用电压作为联络信号时, 由于仪表是并联连接, 它的主要优点是: 在设计安装上比较简单; 增加或取消某个仪表不会影响其它仪表工作; 对仪表输出级的耐压要求可以降低, 从而提高了仪表的可靠性。

由以上分析可见, 电流信号传输与电压信号传输各有特点, 电流信号适于远距离传输, 电压信号使仪表可采用“并联制”连接。因此在国内外的电动仪表系统以及我国的 DDZ—Ⅲ型仪表中进出控制室的传输信号采用电流信号, 控制室内部各仪表间联络信号采用电压信号, 即连线的特点是电流传输、电压接收、并联接收电压信号的方式。

#### (四) 信号上下限大小的比较

电流信号上限大, 产生的电磁平衡力大, 有利于力平衡变送器的设计制造。从减小直流电流信号在传输线中的功率损失和减小仪表体积, 以及提高仪表的防爆性能等方面看, 希望电流信号上限小些好。

信号下限从零开始, 便于进行模拟量的加、减、乘、除、开方等数学运算和使用通用刻度的指示、记录仪表。信号下限不从零开始, 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有否断线及仪表是否断电; 使半导体器件工作在较好的工作段; 使制作具有本质安全防爆性能和节约传输线的两线制变送器成为可能。

由于集成运算放大器的应用已经普及, 电动模拟仪表都已采用集成运算放大器, 电压信号的上限值的选取对它的性能指标要求有很大的影响, 因而对仪表的技术经济指标也有影响。上限值高些, 可以降低对集成运算放大器失调参数的要求, 有利于仪表的生产和降低成本, 但是上限值高了对运算放大器的输出幅度和共模电压范围的要求也相应增加。

1973年4月国际电工委员会(IEC)第65次技术委员会通过的标准规定了国际统一信号, 过程控制系统的模拟直流电流信号为 $4\sim 20\text{mA DC}$ , 模拟直流电压信号为 $1\sim 5\text{V DC}$ , 我国的 DDZ—Ⅲ型电动单元组合仪表已采用了国际统一信号标准。由于我国仍有部分以 $0\sim 10\text{mA DC}$ 为联络信号的 DDZ—Ⅰ型仪表在使用, 因此有些控制装置除有 $4\sim 20\text{mA DC}$ 输入/输出信号外, 还配有 $0\sim 10\text{mA DC}$ 输入/输出信号。

## 二、变送器信号传输方式

变送器是现场仪表, 它的电源从控制室中送来, 而输出信号需送到控制室中去。信号与电源的传输方式有两种:

(1) 四线制传输 供电电源与输出信号分别各用两根导线传输, 这样的变送器称为四线制变送器, 如图 1-3 所示。由于电源与信号分别传送, 因此对电流信号的零点及元件的功耗没有严格的要求。

(2) 二线制传输 二线制变送器是用两根导线作为电源和输出信号的公用传输线, 如图 1-4 所示。二线制变送器相当于一个可变电阻, 其阻值由被测参数控制, 电源、变送器和负载是串联的; 当被测参数改变时, 变送器的等效电阻随之变化, 因此流过负载的电流也变化。

要实现二线制变送器必须具备有以下条件:

1) 采用有活零点的电流信号。因为在变送器输出电流的下限值时, 半导体器件必须有正常的工作点, 需要由电源供给正常工作的功率, 由于电源线与信号线公用, 电源供给线路的功率是通过信号电流提供的, 因此信号电流必须有活零点。国际统一电流信号采用 $4\sim 20\text{mA}$

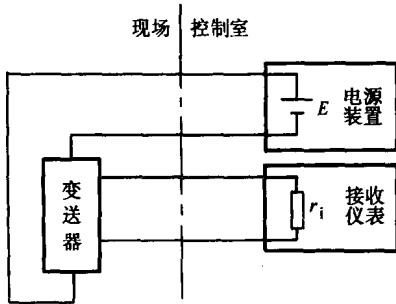


图 1-3 四线制变送器

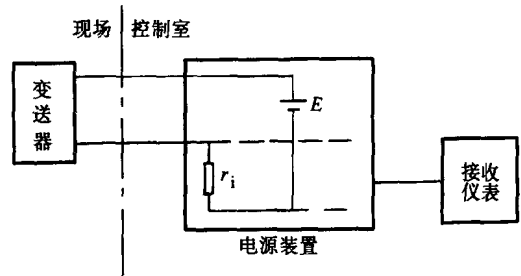


图 1-4 二线制变送器

DC，为制作二线制变送器创造了条件。

2) 必须是单电源供电。所谓单电源是指以零电位为起始点的电源，而不是与零电压对称的正负电源。

二线制变送器的优点很多，可大大减少装置的安装费用，有利于安全防爆等。因此，目前世界各国大都采用二线制变送器。制作二线制变送器的主要关键是要有性能良好的低功耗集成运算放大器和稳压管。

### 三、供电方式

电动仪表都需要电源供给能量，供电方式在电动仪表中也是一个重要问题。现在的电动仪表大致有两种供电方式：交流供电和直流集中供电。

(1) 交流供电 在各个仪表中分别引入工频 220V 交流电压，再用变压器降压，然后进行整流、滤波及稳压作为各自的电源，在早期的电动仪表系统中多用这种供电方式。缺点是：这种供电方式需要在每块表中附加电源变压器、整流器及稳压器线路，因此增加了仪表的体积和重量；变压器的发热增加了仪表的温升；220V 交流直接引入仪表中，降低了仪表的安全性。

(2) 直流集中供电 直流集中供电是各个仪表统一由直流低电压电源箱供电。工频 220V 交流电压在电源箱中进行变压、整流、滤波以及稳压后供给各仪表电源。集中供电的好处很多：

1) 每块表省去了电源变压器、整流及稳压部分，从而缩小了仪表的体积，减轻了仪表的重量，并减少了发热元部件，使仪表温升降低。

2) 由于采用直流低电压集中供电，可以采取防停电措施，所以当工业用 220V 交流电断电时，能直接投入直流低电压（如 24V）备用电源，从而构成无停电装置。

3) 没有工业用 220V 交流电进入仪表，为仪表的防爆提供了有利条件。

## 第四节 全数字控制仪表装置间的通信方式

在数字控制仪表与装置发展的初期及传统的 DCS 系统中，虽然在控制装置之间及它们与上位计算机之间采用了数字通信技术，但在现场仪表与控制室装置之间的通信仍采用模拟信号。在数字控制仪表装置内部的运算处理为数字信号，但输入输出仍为 4~20mA 标准模拟信号，即为数字模拟混合系统。80 年代微电子技术发展到使微处理器的功能、体积、功耗等都足以适应现场仪表的要求，出现了智能现场仪表，为将双向数字通信一直延伸到现场仪表创造了条件。

数字通信比模拟信号通信方式有以下优点：

1) 简化了控制仪表与装置的硬件结构，提高了装置精度。由于省去了输入输出通道中的模/数及数/模转换器，所以不但减少了装置的结构复杂性、减小了体积，还可大大降低成本及提高装置精度。在输入输出通道较多时，效果尤为明显。

2) 提高了信号传输精度。数字信号抗干扰能力强，它能传输分辨率高的信息，并能对被传输数据的正确性进行检验、纠错，传输中基本不降低精度。

3) 传输的信息更加丰富。不但能传输测量值，还能传输状态信息和控制信息。

4) 大大减少了布线的复杂性和费用。模拟信号传输时，一对电缆上只能传输单一信息，构成较复杂的系统时现场布线复杂、使用的电缆量大。数字通信可使许多现场仪表和控制室装置间在同一总线上进行双向多信息的串行数字通信。

安装在制造区域或过程区域的现场装置与控制室内的控制装置间的数字、串行、双向、多点通信的数据总线称为现场总线。现场总线是一种通信标准，它应具有开放性和可互操作性，使各生产厂商提供的各种产品如智能变送器、智能执行器和控制器等，可由用户自由选择，通过现场总线相互连接即可构成所需的自动化系统。随着智能现场仪表功能的不断加强和标准统一进程的加快，可以看出现场总线技术最终将导致出现一个比传统 DCS 有质的提高的全数字、全分散、全开放的新一代控制系统 FCS (Field Control System)。

传统的 DCS 与 FCS 的区别如图 1-5 所示。

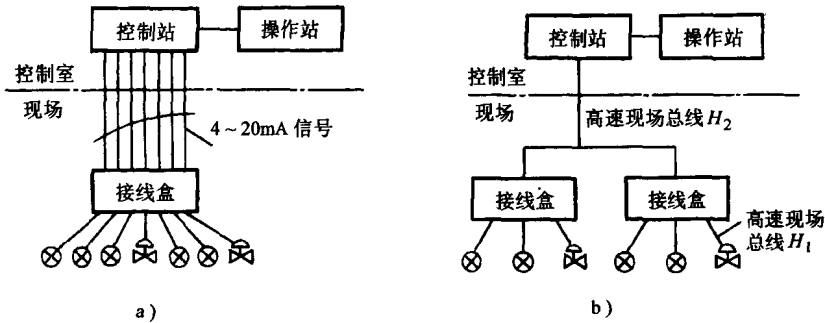


图 1-5 传统 DCS 与 FCS 的区别

a) 传统 DCS, b) FCS

在传统的 DCS 系统中，每个现场仪表到控制室的通信都需要一对专用的双绞线，以传递 4~20mA 模拟信号。在 FCS 中，每个现场仪表到接线盒仍各用一对双绞线，低速传送数字信号，但从现场接线盒到控制室则仅用一对双绞线完成数字通信。传统的现场仪表和控制室仪表装置不能与 FCS 兼容，必须使用符合现场总线要求的智能现场仪表和控制室仪表装置，并要允许不同生产企业提供的仪表装置间能实现相互通信，以使用户有可能从不同企业的产品中，选择他们认为最好、最合适的仪表，通过现场总线构成所需的控制系统。这种对 FCS 具有全开放性和可互操作性的要求，只有制定出各企业共同遵守的现场总线标准才能实现。

现场总线标准即其网络协议是按照国际标准化组织 (ISO) 制定的开放系统互连 (OSI) 参考模型建立的。OSI 参考模型共分七层，即物理层、链路层、网络层、传送层、会话层、表示层和应用层。该标准规定了每一层的功能以及对上一层所提供的服务。现场总线采用了 OSI 的第一层物理层、第二层数据链路层、第七层应用层，考虑到现场装置控制功能和具体应用增加了第八层应用层。

为了对总线通信有一个轮廓的概念，在此简要说明它们通信的过程。一台仪表装置按组态时设定的程序运行，当需要通过总线进行信息交换时，命令或数据按应用层规定产生，再按数据链路层的规定进行“包装”，经过包装后的信息在物理层内进行再次加工后转换为符合标准的电信号，在传输媒体上被另一仪表装置接收。接收信息的仪表装置对信息进行相反的“开包”，去掉物理层所加信息，得到命令或数据。信息在不同层之间的处理方法是按照规定的“协议”进行的，所以能相互理解。

由于现场总线是实现统一的数字信号制，它的标准化工作相当复杂。国际上几个主要的标准化组织都在制定现场总线标准，其中两个重要的标准分别为：国际电工委员会（IEC）国际标准和现场总线基金会（FF）标准。整个标准化工作从1988年开始，经过多年的努力，两个标准在体系结构、物理层规范和链路层规范方面已取得一致，在应用层和用户层上还有一些技术上的分歧。在市场强有力的推动下，现场总线国际标准将加快制定的步伐。

在从4~20mA DC模拟信号制标准向现场总线标准过渡的时期内，各大仪表生产企业也纷纷推出一些自己制定的标准，它们都有各自的用户群。其中HART (Highway Addressable Remote Transducer 可寻址远程传感器高速公路)协议具有较大影响。它由美国Rosemount公司于1985年提出，目前已有近百家大仪表生产公司参加这一通信协议。

HART协议采用频移键控FSK (Frequency Shift Keying)原理，它基于Bell 202通信标准，数字信号用两个频率表示：1200Hz代表逻辑“1”，2200Hz代表逻辑“0”。由于在通信时频率信号的平均分量为零，不会影响模拟信号的传输，因此可将这两个频率的正弦波叠加在4~20mA DC模拟信号上同时传输。这样不仅可以利用4~20mA DC模拟信号，同时可以利用同一电缆用数字信号实现双向多信息传输，从而具有诸如修改量程、阻尼时间、PID参数等功能，可提高系统的运行质量和管理效率。

当控制系统采用HART协议时，所有使用的现场装置及与其通信的控制室装置都必须具有遵守HART协议的串行通信接口。



## 第二章 变 送 器

变送器是自动控制系统中的一个重要组成部分，在各种工业过程自动控制系统中，变送器对温度、压力、液位、流量、成分等物理量进行测量，并转换成统一的标准信号。

### 第一节 概 述

变送器无论在 DDZ 电动单元组合仪表组成的过程控制系统中，还是在 DCS 集散控制系统中，都占有独特的地位。变送器将各种物理量转换成统一的标准信号。信号标准其实是仪表之间的通信协议，几十年来一直在演变。信号标准的变化代表了过程控制仪表的发展进程，每一次变化对变送器都带来了新成果。目前带有 4~20mA 的 HART 协议已成为事实上的信号标准。今后相当一段时间内，变送器的设计生产使用将按此标准展开。同时我们已看到变送器最终将纳入现场总线 (Fieldbus) 标准。现场总线会彻底取代 4~20mA 模拟信号，它是一种完全数字化双向通信技术，目前国际上已出现了多种现场总线的变送器，因此从信号的演变看，带有微处理器的智能化现场变送器是发展的必然趋势。

随着工业技术的更新，特别是半导体技术，微电子技术的发展，使变送器制造技术出现了巨大的变化，由此使变送器不断升级换代。特别值得注意的是，智能传感器的普及又加速了智能变送器的进程。从以往观点看，传感器与变送器是两种不同功能的模块。传感器是借助于敏感元件，接受物理量形式的信息，并按一定规律将其转换成同种或另一种物理量形式信息的仪表。而变送器为输出标准信号的传感器。近几年来，采用微机械加工技术 (MEMS) 和微电子技术，从传统的结构设计转向微机械加工工艺结构设计，使敏感元件与信号调理电路一体化，传感与变送功能合一，并出现了多参数变送器，这是今后智能变送器的又一发展趋势。

在过程控制系统中使用的变送器种类较多，本章以常见的电容式差压、压力变送器及 DDZ-Ⅲ 型温度变送器为例进行讨论。之后对二线制变送器及智能变送器进行较为深入的剖析。

### 第二节 差压及压力变送器

在生产过程中，压力、差压是出现最频繁的测控参数之一。例如，高压聚乙烯要在 150MPa 的高压下聚合，氢气和氮气要在 32MPa 的压力下合成为氨，炼油厂的减压蒸馏要在低于大气压几百 mmHg (1mmHg=133.3Pa) 的真空下进行，特别是在化学反应比较强烈的场合，压力既影响物料平衡关系，也影响化学反应速度。差压的测量则常常跟流量测量联系在一起。例如在空气焓差法空调器性能测试装置中，要用高精度微差压变送器测量空气流量，借助于空气焓值的变化计算空调器的制冷量。总而言之，压力及差压的测量与工业、农业、国防、航空、航天、环保、交通等领域密切相关。