

计算机控制技术



类目：计算机类

书名：计算机控制技术

主编：任维正 李爱锋 李娜

出版社：中国建设科技出版社

开本：大 16 开

书号：978-7-5160-4357-8

使用层次：通用

出版时间：2025 年 2 月

定价：48.00 元

印刷方式：双色

是否有资源：有

项目统筹:李亚博
责任编辑:汪永涛
封面设计:旗语书装

计算机控制技术

计算机控制技术



计算机控制技术

主编 © 任维正 李爱锋 李娜



主编 © 任维正 李爱锋 李娜
中国建设科技出版社有限责任公司

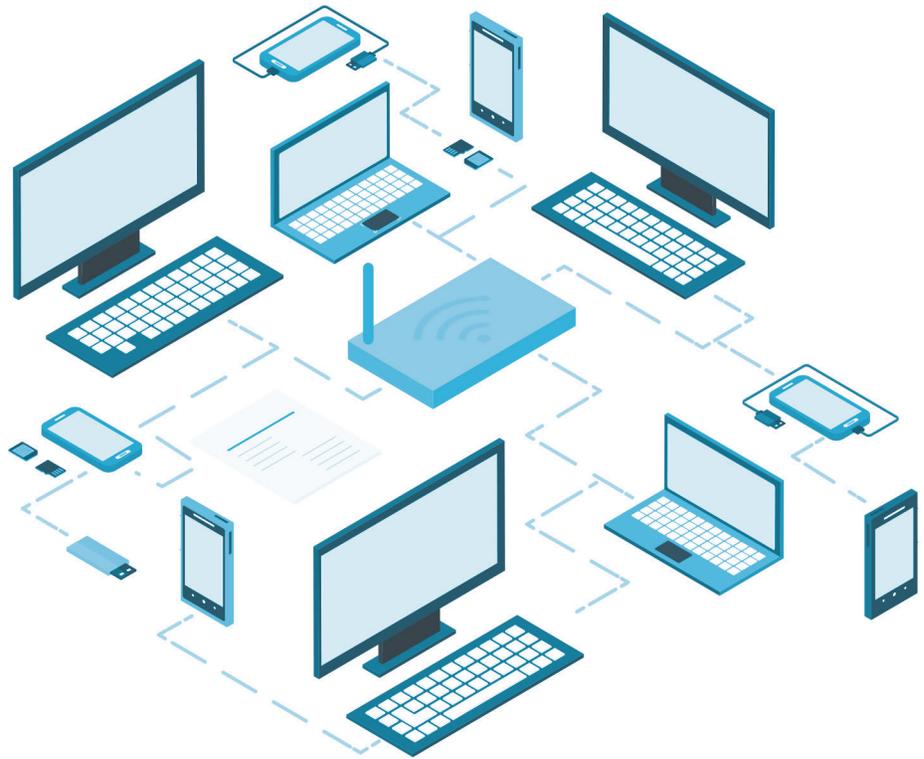
专·精·志·远
为您提供专业服务
编辑部: 010-63567684
事业发展中心: 010-63567692
网上书店: www.cjktbs.com



中国建设科技出版社有限责任公司
China Construction Science and Technology Press Co., Ltd.



计算机类创新融合精品规划教材
“互联网+”教育改革创新理念教材



计算机控制技术

主 编 © 任维正 李爱锋 李 娜

中国建设科技出版社有限责任公司
China Construction Science and Technology Press Co., Ltd.

北 京

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制技术 / 任维正, 李爱锋, 李娜主编.
北京: 中国建设科技出版社有限责任公司, 2025. 2.
(计算机类创新融合精品规划教材“互联网+”教育改革新理念教材). -- ISBN 978-7-5160-4357-8
I. TP273
中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2024D52V50 号

计算机控制技术

JISUANJI KONGZHI JISHU

任维正 李爱锋 李娜 主编

出版发行: 中国建设科技出版社 有限责任公司

地址: 北京市西城区白纸坊东街 2 号院 6 号楼

邮编: 100054

经销: 全国各地新华书店

印刷: 唐山唐文印刷有限公司

开本: 880mm×1230mm 1/16

印张: 11

字数: 250 千字

版次: 2025 年 2 月第 1 版

印次: 2025 年 2 月第 1 次

定价: 48.00 元

本社网址: www.jskjcbs.com, 微信公众号: [zgjskjcbs](https://www.weixin.com/qz/zgjskjcbs)

请选用正版图书, 采购、销售盗版图书属违法行为

版权专有, 盗版必究。本社法律顾问: 北京天驰君泰律师事务所, 张杰律师

举报信箱: zhangjie@tiantailaw.com 举报电话: (010) 63567684

编 委 会

主 编 任维正 李爱锋 李 娜
主 审 张一平
副主编 陶玉森 富文军 周 洁
蔡志福 王 静

前 言

计算机控制技术是一门以电子技术、自动控制技术、计算机应用技术为基础，以计算机控制为核心，综合可编程控制技术、单片机技术、计算机网络技术，从而实现生产技术的精密化、生产设备的信息化、生产过程的自动化及机电控制系统最佳化的综合性学科。计算机控制技术在电子信息与电气信息类专业本科生的一门核心课程。近年来，企业对计算机控制技术应用能力的专门人才需求越发旺盛。通过计算机控制技术课程培养的专门人才，可服务于小型测控系统的设计、开发、运行、维护、检测、调试，大型计算机控制系统的运行、维护，智能仪器仪表的设计、开发、检测、调试等。

本书从工程实际出发，系统地介绍了计算机控制系统中各种软、硬件的应用技术。全书共九章：第一章介绍计算机控制系统的产生及原理、计算机控制系统的构成和分类、计算机控制的典型应用；第二章介绍过程通道设计需要注意的一些问题；第三章介绍如何分析计算机控制系统是否达到性能指标；第四章介绍数字 PID 控制器设计；第五章介绍数字控制器的几种直接设计方法；第六章介绍复杂数字控制器设计的几种方法；第七章介绍集散控制系统；第八章介绍典型的现场总线的体系结构和智能仪表等；第九章介绍计算机控制技术的几种典型案例。

本书可供自动化专业、电气自动化专业、电子信息类专业、机械电子类专业的学生作为教材使用。

本书参考了相关文献，在此向这些文献的作者表示感谢。由于编者水平有限，书中难免存在疏漏或不妥之处，敬请广大读者批评指正。

编 者

2024 年 4 月

目 录

 第一章 计算机控制系统概述	1
第一节 计算机控制系统的产生及原理	2
第二节 计算机控制系统的构成	4
第三节 计算机控制系统的分类	7
第四节 计算机控制系统举例	11
本章习题	12
 第二章 过程通道配置与数字信号处理	13
第一节 信号变换	14
第二节 过程通道的硬件选型	17
第三节 过程通道抗干扰技术	23
第四节 过程通道数字滤波技术	28
第五节 线性化处理技术	31
第六节 标度变换技术	35
本章习题	36
 第三章 计算机控制系统的常规控制策略	37
第一节 计算机控制系统的数学模型	38
第二节 计算机控制系统的稳定性分析	43
第三节 离散控制系统的稳态特性分析	45
第四节 离散控制系统的动态特性分析	47
第五节 计算机控制系统的频率特性分析	49
本章习题	50
 第四章 数字 PID 控制器设计	51
第一节 标准数字 PID 控制算法	52
第二节 改进的 PID 算法	55
第三节 数字 PID 控制工程实现的一些问题	61
第四节 PID 参数整定方法	65
本章习题	68

	第五章 数字控制器的直接设计	69
	第一节 系统性能指标与 Z 域极、零点的关系	70
	第二节 Z 平面上的根轨迹法	75
	第三节 用解析法进行数字控制器设计	80
	第四节 最少拍控制系统的设计	82
	第五节 最少拍无波纹控制系统的设计	85
	第六节 惯性因子法	87
	本章习题	88
	第六章 复杂数字控制器设计	89
	第一节 串级控制	90
	第二节 前馈控制	94
	第三节 史密斯(Smith)预估控制	97
	第四节 比值控制	98
	本章习题	100
	第七章 集散控制系统	101
	第一节 数据通信与工业网	102
	第二节 集散控制系统的产生	112
	第三节 集散控制系统的基本构成	113
	第四节 集散控制系统的主要特点	116
	第五节 集散控制系统设计	117
	第六节 SCADA 系统简介	120
	第七节 计算机集成制造系统(CIMS)简介	123
	本章习题	126
	第八章 现场总线控制系统	127
	第一节 现场总线控制系统的基本概念	128
	第二节 现场总线的体系结构	129
	第三节 现场总线智能仪表	130
	第四节 现场总线控制系统的特点与优势	132
	第五节 几种典型的现场总线	134
	第六节 工业以太网与实时以太网简介	140
	第七节 现场总线的主要产品	146
	本章习题	146
	第九章 计算机控制技术应用	147
	第一节 钢筋卷绕控制系统	148
	第二节 锅炉计算机控制系统	156
	第三节 智能家居控制系统	161
	本章习题	164
	附录 拉普拉斯变换及反变换	165
	参考文献	168

第一章

计算机控制系统概述



本章导读

随着计算机应用的普及、高可靠性和低成本化,人们越来越多地用计算机来实现工业生产过程的自动控制。在计算机控制系统中,用计算机代替自动控制系统中的常规控制设备,对动态系统进行调节和控制,这是对自动控制系统所使用的技术装备的一种革新。这一革新,改变了自动控制系统的结构,也导致对这类系统的分析和设计较经典的时间连续系统控制产生较多的变化。由于计算机控制的优越性及其良好的发展前景,掌握分析、设计这一类系统的理论和方法,实现对实际对象或过程的控制就成为高等学校有关专业学生的必备知识。

本章主要介绍计算机控制系统的产生及原理、计算机控制系统的构成和分类、计算机控制的典型应用和计算机控制系统的发展趋势。

第一节 计算机控制系统的产生及原理

一、模拟控制向计算机控制的发展



计算机控制系统

在传统自动控制系统中,信号一般为时间连续信号,这样的系统称为模拟控制系统(或连续控制系统)。典型的模拟控制系统闭环结构如图 1-1 所示。

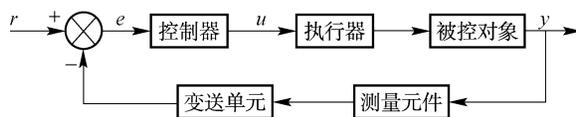


图 1-1 模拟控制系统闭环结构图

测量元件(也叫传感器)对被控对象的输出 y (如温度、压力、流量、转速、位移等)进行测量得到电信号,变送单元将该信号变成可与给定信号 r 相比较的电压或电流信号,反馈给控制器。比较单元将给定信号 r 与反馈信号比较得到偏差 e ,控制器根据偏差 e 产生控制信号 u 去修正执行器的动作,使得被控对象的输出 y 达到预定的要求。模拟控制系统中的控制器是由硬件电路构成的,如果控制器不能较好地控制被控量,必须改变控制器的硬件结构。

如果把图 1-1 中的比较单元和控制器用计算机来代替,就可构成典型的计算机控制系统,如图 1-2 所示。

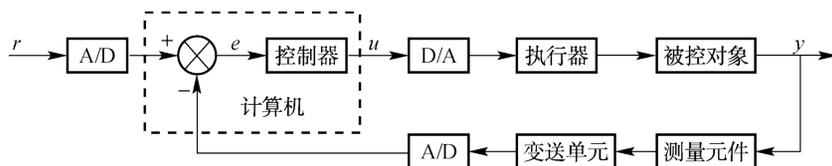


图 1-2 计算机控制系统基本框图

在控制系统中引进计算机，可以充分利用计算机的运算、逻辑判断和记忆等功能。被控对象的输出 y 经测量元件和变送单元转换成统一的标准信号送到 A/D 转换器进行模拟量/数字量的转换，转换后的数字量通过接口送入计算机，经计算机软件处理后得到反馈数字信号。计算机通过 A/D 接口电路采集给定信号 r 得到给定数字信号，并将该信号与反馈数字信号比较得到偏差 e ，然后计算机可以对偏差 e 用一定的控制规律(如 PID 算法)进行运算，得到控制信号 u 。再经 D/A 转换器将数字信号 u 转换成模拟控制信号输出到执行器，执行器动作使得被控对象的输出 y 达到预定的要求。显然，计算机控制系统要改变控制规律只需要修改计算机程序即可，而不用像模拟控制系统那样改变硬件结构。

计算机控制系统中的计算机是广义的，可以是工业控制计算机、嵌入式计算机、可编程控制器、单片机系统、数字信号处理器等。

二、计算机控制系统的基本工作原理

计算机控制就是对被控对象的有关输出参数进行采样并转换成统一的标准信号，通过输入通道将模拟量和数字量表示的各种参数信息传送给计算机，计算机将这些信息和期望的给定信息比较，按照预先规定的控制规律进行运算和处理，并通过输出通道输出运算结果，使运算结果以模拟量或数字量的形式去控制被控对象，进而使被控的参数达到预期的目标。

从本质上来看，计算机控制系统的工作过程可以归纳为以下三个方面。

(1)实时数据采集：对被控对象的瞬时输出值及时进行检测和采集，并经计算机软件处理后得到反映被控对象状态的反馈信息。

(2)实时控制决策：首先，必要时计算机会根据实时采集的数据判断是否要进行越限报警和事故预告报警；其次，计算机将采集到的给定信号与实时采集的反馈信号进行比较得到偏差，然后按照一定的控制规律产生控制信号，及时作出控制决策。

(3)实时控制输出：根据控制决策，对执行机构发出控制信号，完成控制任务。

系统中的计算机要按顺序连续不断地重复以上几个步骤的操作，才能保证整个系统能按预定的性能指标要求正常运行。

上述过程中的实时概念是指信号的输入、计算决策和输出都要在一定的时间内完成，控制系统应能在采样周期内及时地检测偏差、纠正偏差，达到规定的要求，超出了这个采样周期时间，系统就会失去控制的时机。但是，“实时”不等于“同时”，因为从被控参数的采集到控制输出作出反应，是需要经历一段时间的，即存在一个实时控制的延迟时间，该时间的长短反映实时控制的速度，被称为采样周期。只要该时间足够短，不至于错过控制的时机，便可认为该系统具有实时性。不同的控制过程对实时控制速度的要求是不同的。例如，控制运动中的电机转速和移动部件位移的暂态过程很短，一般要求采样周期较短，这类控制常被称为快过程的实时控制；而热工、化工类的温度、流量等过程变化较缓慢，对它们的控制采样周期可延长。

采样周期在正常情况下包含数据采集、控制决策和控制输出三个步骤所需时间之和，其中控制决策部分所花时间占的比例一般最大，因此要合理选择控制算法、优化控制程序结构和选用运算速度较高的计算机。

在计算机硬件选型方面，一般应配备有实时时钟和优先级中断处理电路的微型计算机；在软件编程方面，中断处理程序、实时时钟、中断优先级管理是保证微机控制系统实时性的常用手段。

第二节 计算机控制系统的构成

一、计算机控制系统硬件的基本构成

由于被控对象千差万别，计算机完成的控制任务不同，对控制要求和使用设备会有不同的需求。各个计算机控制系统的组成是千差万别的，有的是多机网络结构，但从原理上说，与单机计算机控制系统类似，都具有共同的结构特点。

典型的计算机控制系统的硬件结构如图 1-3 和图 1-4 所示。图 1-3 所示的 I/O 通道(AO 板、DO 板、AI 板和 DI 板)是插在计算机主机扩展槽之中的，图 1-4 所示的 I/O 通道(AO 单元、DO 单元、AI 单元和 DI 单元)是通过外部串行总线与计算机主机相连的，两者其他结构基本没有差别。计算机控制系统一般由计算机主机单元、人机接口单元、被控对象和输入/输出通道组成。

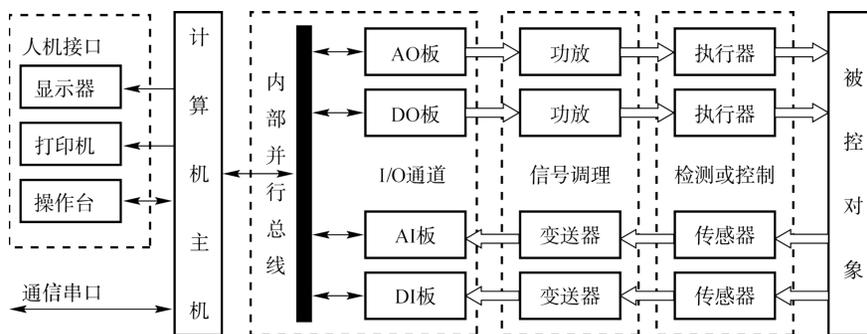


图 1-3 基于内部总线计算机控制系统硬件组成基本结构图

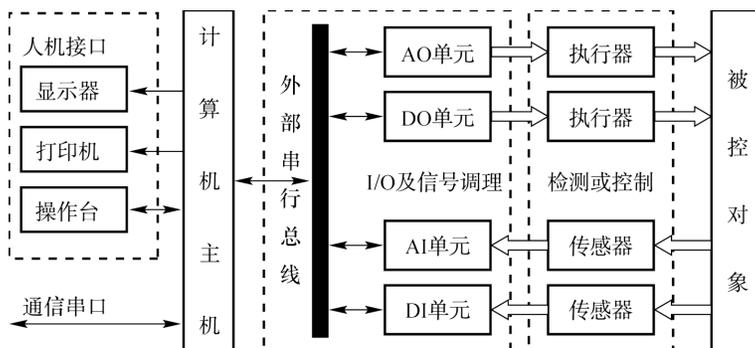


图 1-4 基于外部总线计算机控制系统硬件组成基本结构图

1. 主机单元

主机单元由中央处理器(CPU)、内存储器(RAM、ROM)和接口电路等组成，有的主机单元还会带外部存储器(如硬盘)。主机单元是整个系统的指挥部，通过接口和软件可以向系统的各个部分发出命令。根据输入通道送来的被控对象的状态参数，进行巡回检测、信息处理、分析、计算，按照某种控制规律作出控制决策，通过输出通道发出控制命令等。

2. 输入/输出通道

输入/输出通道是位于计算机和被控对象之间的过程通道，用来实现控制计算机与被控对象之间的信息传送与转换。按照信号传送的形式，输入/输出通道(过程通道)可以分为模拟量通道和数字量通道；按照传送信号的方向，过程通道可以分为输入通道和输出通道。因此，过程通道有模拟量输入通道、数字量输入通道、模拟量输出通道和数字量输出通道。

被控对象的被控参数一般为连续变化的非电物理量，在模拟量输入通道中先通过传感器把被控参数转换成连续变化的模拟电量信号，再通过变送器将传感器输出的电信号转换成标准的电信号送入 AI 板进行 A/D 转换，把模拟信号转换成计算机能够接收的数字量送入计算机，该数字量经计算机软件处理后即可作为被控对象的输出反馈信号。计算机通过接口电路采集给定信号(操作台信号或通信串口等信号)，并将该信号与反馈数字信号进行比较，得到偏差信号，然后用一定的控制规律计算得到数字控制信号，经模拟量输出通道控制被控参数。模拟量输出通道首先通过 AO 板的 D/A 转换器将数字控制信号转换成连续的模拟量控制信号，再经模拟量功放接口电路对信号功率放大去控制可连续动作的执行器动作，进而控制被控对象的参数变化。

如果计算机控制系统中有多个被控参数，那么在硬件结构图中就对应有多路模拟量输入通道和模拟量输出通道。在模拟量输入通道中 AI 一般有多路 A/D 转换开关，用于选择哪路信号送入 A/D 转换器进行转换。和模拟量输入通道类似，模拟量输出通道 AO 也可能加入反多路开关，用来选择从 D/A 转换器输出的信号中哪一路驱动功放和执行器动作。

数字量通道主要用来传送数字量信号，它的作用是，除了完成编码数字输入/输出，还可将各种继电器、限位开关等的状态通过数字输入通道传送给计算机，或将计算机发出的开关动作逻辑信号经由数字输出通道传送给运行装置中的各个电子开关或电磁开关等。

3. 人机接口单元

人机接口单元主要包括显示器、打印机和操作台等。

显示器和打印机等输出设备可以把各种信息和数据以曲线、字符、数字等形式提供给操作人员，以便及时了解控制过程。

操作台是操作人员与计算机控制系统进行联系的平台，通过它可以向计算机输入程序，修改内存数据，显示被测参数和发出各种操作命令等。操作台一般至少包含下面三种装置。

- (1)显示器：显示系统的运行状态。
- (2)功能按钮：操作人员可利用它输入或修改控制参数或发出命令。
- (3)数字键盘：其作用与“功能按钮”相同。

二、计算机控制系统软件的基本组成

计算机控制系统除了上面所述的硬件以外，软件也是必不可少的。软件是指计算机中使用程序的总称。软件通常可分为系统软件和应用软件。

1. 系统软件

系统软件一般由计算机厂家提供，是专门为维护和管理计算机设计的一类程序，它具有一定的统一性。系统软件包括操作系统、语言加工系统和诊断系统。

- (1)操作系统。操作系统就是对计算机本身进行管理和控制的一种软件。

计算机自身系统中的所有硬件和软件统称为资源。从功能上讲，可把操作系统看成资源的管理系统，实现对 CPU、内存、设备以及信息的管理。例如，对上述资源的分配、控制、调度

和回收等。

(2)语言加工系统。语言加工系统就是将用户编写的源程序转换成计算机可以执行的机器代码(目标程序)。它主要由编辑程序、编译程序、连接装配程序、调试程序及子程序库组成。

(3)诊断系统。诊断系统是用于测试计算机硬件是否出现故障以及维修计算机的一套软件。

2. 应用软件

应用软件是用户为了完成特定的任务而编写的各种程序的总称。计算机控制系统的应用软件一般包括控制程序、数据采集及处理程序、巡回检测程序和数据管理程序等。

(1)控制程序：主要实现对系统的调节和控制。它根据各种控制算法和被控对象的具体情况来编写，控制程序的主要目标是使系统满足预定的性能指标。

(2)数据采集及处理程序：包括数据可靠性检查程序(检查是可靠输入数据还是故障数据)、A/D转换及采样程序(完成模拟量到数字量的采样及转换功能)、数字滤波程序(滤除干扰造成的错误，得到真正的实际数据)和线性化处理程序(对检测元件或变送器的非线性进行线性补偿)等。

(3)巡回检测程序：包括数据采集程序(完成数据的采集与处理)、越限报警程序(用于在生产中某些物理量超过限定值时报警)、事故预告程序(根据限定值，检查被控量的变化趋势，若有可能超过限定值则发出事故预告信号)和画面显示程序(用图、表在显示器上形象地反映被控对象的状况)等。

(4)数据管理程序：用于生产管理，主要包括统计报表程序、生产调度程序、产品销售程序、库存管理程序、产值利润预测程序等。

三、控制用计算机的主要特点

计算机是计算机控制系统的核心部件，应用于工业控制的计算机主要有工业控制计算机、可编程控制器(PLC)和单片微型处理器等类型。根据计算机控制系统规模的大小和控制参数的复杂程度，可以选择不同的控制用计算机。一般小型系统选择单片机，中型或大型系统选择工业控制计算机、可编程控制器。

单片机大多应用于嵌入式系统或用于开发专用仪表。计算机控制工程应用较多的是工业控制计算机和可编程控制器，且都形成了系列产品，用户可根据需要进行模块选配，组成不同的计算机控制系统。

下面我们以工业控制计算机为例介绍控制用计算机的主要特点。那么，科学计算或办公室自动化所用的计算机与工业控制计算机主要有什么区别呢？

任何一台可用的计算机都是由硬件和一些软件构成的，这是所有计算机的共性，控制用计算机主要有如下特点。

1. 较高的可靠性

控制用计算机通常用于控制不间断的生产过程，在运行期间不允许停机检修，一旦发生故障将会导致质量事故，甚至生产事故。因此，控制用计算机必须具有很高的可靠性，也就是说要有许多确保、提高安全可靠性的措施，以确保平均无故障工作时间达到几万小时，同时尽量缩短故障修复时间，以达到很高的运行效率。

在可靠性要求更高的场合，控制用计算机要有双机工作及冗余系统，包括双控制站、双操作站、双网通信、双供电系统、双电源等；具有双机切换功能、双机监视软件等，以确保系统

长期不间断地运行。

为使程序跑飞系统也能自动恢复正常，看门狗电路已成为控制用计算机设计中不可或缺的一部分。它能在系统出现故障时迅速报警，并在无人干预的情况下，使系统自动恢复运行。

2. 较多的扩展插槽

对于使用图 1-3 结构的计算机控制系统来说，控制用计算机要能够安装多种功能的过程输入和输出配套模板，如模拟量、开关量、脉冲量、频率量等输入/输出模板。由于计算机控制系统具有多种类型的信号调理功能[如隔离型和非隔离型信号调理；各类热电偶、热电阻信号输入调理，电压(V)和电流(mA)信号输入和输出信号的调理等]，因此要求控制用计算机具有灵活的扩展性，具有较多的扩展插槽，可插入相关模板。

3. 较好的恶劣工作环境下的适应性

工业现场环境恶劣，电磁干扰严重，供电系统也常受大负荷设备启停的干扰，其接地系统复杂，共模及串模干扰大。因此，要求控制用计算机具有很强的环境适应能力，如对温度、湿度变化范围要求高；要有防尘、防腐蚀、防振动冲击的能力；要具有较好的电磁兼容性和高抗干扰能力以及高共模抑制的能力。

4. 较高的实时配置要求

控制用计算机对生产过程进行实时控制与监测，因此要求它必须实时地响应控制对象各种参数的变化。当过程参数出现偏差或故障时，控制用计算机能及时响应，并能实时地进行报警和处理。为保证计算机控制系统的实时性，控制用计算机常配备有实时时钟和优先级中断处理电路。

5. 较丰富的软件配置

控制用计算机往往配置专用性很强的控制算法和控制策略软件对被控的生产过程进行控制，这些程序大部分写在 Eprom(可擦除可编程只读存储器)中，并周而复始地工作。其控制软件包的功能一般较强，要具备人机交互方便、界面丰富、实时性好等性能；具有系统组态和系统生成功能；具有实时及历史的趋势记录与显示功能；具有实时报警及事故追忆功能等。此外，应具有丰富的控制算法。除了常规 PID 控制算法外，还应具有一些高级控制算法，如模糊控制、神经网络、最优化、自适应、自整定等算法，并具有在线自诊断功能。目前，一个优秀的控制软件包往往将连续控制功能与断续控制功能相结合。

目前，制造业自动化生产线上广泛使用的可编程控制器(PLC)和工业控制用计算机都具有较丰富的软件配置，可供用户选用。

6. 较好的开放性

要求控制用计算机具有开放性体系结构，也就是说在主机接口、网络通信、软件兼容及升级等方面遵守开放性原则，以便于系统扩展、异机种连接、软件要可移植和互换。

第三节

计算机控制系统的分类

计算机控制系统所采用的结构与它所控制的生产过程的复杂程度密切相关，不同的被控对象和不同的控制要求，应有不同的控制方案。根据计算机在控制系统中的功能和结构特点，可

以将计算机控制系统分为操作指导控制系统、直接数字控制系统、计算机监督控制系统、集散型控制系统和现场总线控制系统。

一、操作指导控制系统

操作指导控制系统(Operational Guidance System, OGS)如图 1-5 所示,其属于开环型结构。计算机的输出与生产过程的各个控制单元不直接发生联系,控制动作实际上由操作人员按计算机指示去完成。这类系统不仅具有数据采集和处理功能,而且能够为操作人员提供反映生产过程工况的各种数据,并给出相应的操作指导信息,供操作人员参考。

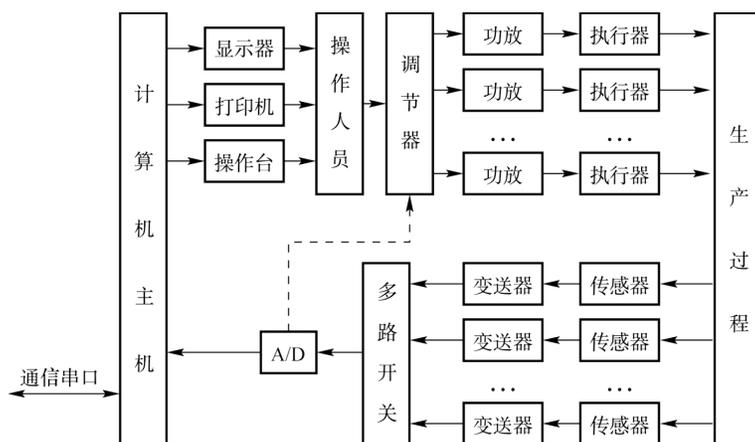


图 1-5 操作指导控制系统

计算机通过输入通道对生产过程的参数进行检测并采集,然后对数据进行处理,并根据一定的控制算法,计算出供操作人员选择的最优操作条件及操作方案。操作人员根据计算机的输出信息(如显示器输出、打印机输出、报警等),去改变调节器的给定值或直接操作执行机构。

操作指导控制的优点是结构简单,控制灵活、安全;缺点是要由人工操作,速度受到限制,不适合较多路数的被控系统。

二、直接数字控制系统

直接数字控制(Direct Digital Control, DDC)系统如图 1-6 所示,它是计算机用于工业过程最普遍的一种形式,属于闭环型控制结构。计算机通过输入通道对一个或多个生产过程的参数进行巡回检测和采集,并对数据进行处理得到控制反馈值,然后与给定值进行比较得到偏差,并根据规定的控制算法计算出控制信号,通过过程输出通道直接去控制执行器机构,使被控制量达到预定的要求。

DDC 系统的计算机参加闭环控制过程,它不仅能完全取代模拟调节器,实现多回路的控制,而且由于其控制算法是软件实现的,因此改变控制算法及其结构非常方便,可以实现非常复杂的控制算法,如前馈控制、非线性控制、自适应控制和最优控制等。

由于 DDC 系统中的计算机直接承担控制任务,因此要求系统的实时性、可靠性和适应性等能得到保证。为了充分发挥计算机的利用率,一台计算机通常要控制几个或几十个回路,所以要合理地设计计算机控制应用软件才能保证其实时性。

在 DDC 系统中使用的计算机常常被称为数字控制器。

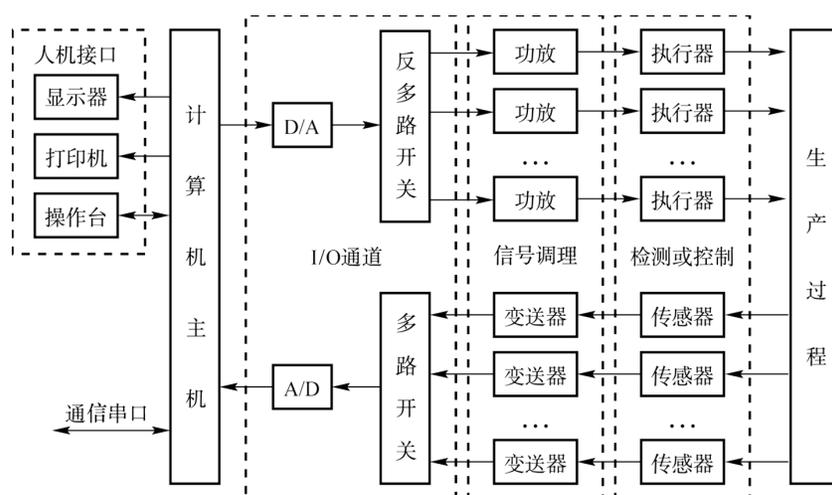


图 1-6 直接数字控制系统

三、计算机监督控制系统

计算机监督控制(Supervisory Computer Control, SCC)系统如图 1-7 所示。监督控制计算机一方面通过人机接口或其他途径接收或存储工艺数据,另一方面通过直接测量或接收 DDC 计算机和模拟仪表送来生产过程中工作情况的数据。经过各种运算,并与存储的工艺数据进行比较,从而确定应向 DDC 计算机或控制仪表发送的各种设定值和控制参数,保证生产过程满足预定的工艺要求,达到稳定、高产的目的。

图 1-7 中模拟调节器只有在早期的计算机监督控制系统中才会出现,现在的监督控制系统往往是全数字化系统,底层一律使用 DDC 系统。

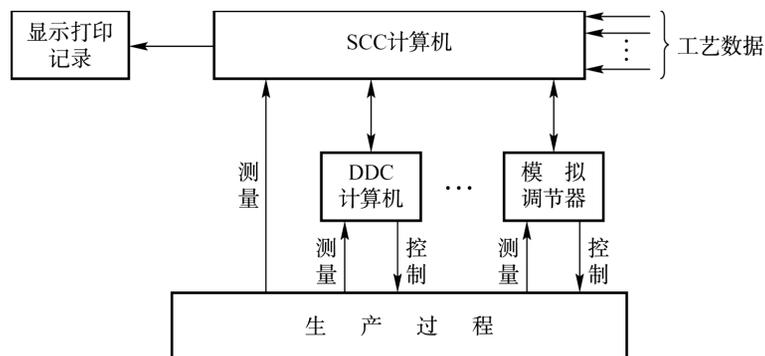


图 1-7 计算机监督控制系统

监督控制系统中,保持被控量稳定的工作是由 DDC 计算机或控制仪表来完成的。监督控制计算机则着眼于整个生产过程的全局,进行高级的控制和管理。它往往根据预定的数学模型和各种控制算法(如最优控制算法、自适应控制算法等),在满足工艺要求的条件下,算出应向 DDC 计算机或模拟调节器发出的控制信息,并随时检查这些计算机和仪表的工作情况。由于要求 SCC 计算机能输入、输出和存储大量数据,进行复杂的运算,并且有一定的管理功能,因此 SCC 计算机往往选用工业控制计算机。

四、集散控制系统

集散型控制系统(Distributed Control System, DCS)亦叫分散型控制系统,如图 1-8 所示。该类系统是集计算机、控制、通信和显示等技术于一体的综合性高技术控制装置,它以多台微处理机分散应用于过程控制(现场控制站、PLC 控制器等),通过通信网络连接上位机(操作员工作站、工程师站等)。上位机配有高分辨率大屏幕显示器、键盘、打印机等设备以实现高度集中的操作、显示和报警管理。

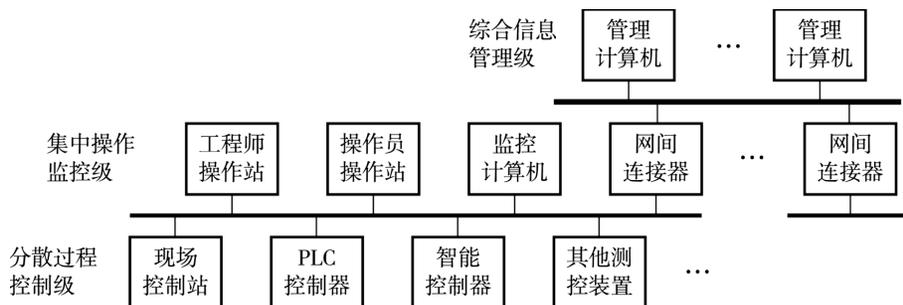


图 1-8 集散型控制系统

集散型控制系统由分散执行控制功能的现场控制站、高速实时通信总线和进行集中监视、操作功能的操作站以及完成其他管理工作的计算机等组成。一般把集散型控制系统分为三层,每一层有 1 台或多台计算机,同一层次的计算机以及不同层次的计算机都可通过网络通信,相互协调,构成一个严密的整体。每一层的大致功能如下。

(1)第一层:分散过程控制级(亦叫装置控制级)。这一层上有很多台计算机或 PLC 或专用控制器,它们分散在生产现场,被称为现场控制站。每个现场控制站可从事 DDC 系统的部分工作,如某几个物理量的数据采集、顺序控制或闭环控制。由于控制任务由各个现场控制站来完成,因此局部的故障不会影响整个系统的工作,从而避免了集中控制系统中“危险集中”的缺陷。

(2)第二层:集中操作监控级。这一层主要有监控计算机、操作员站、工程师站。它们的任务是直接监视各个现场控制站的所有信息,集中显示,集中操作,集中数据管理,并且实现各个回路的组态、参数的设定和修改以及实现优化控制等。

(3)第三层:综合信息管理级。这一层上工作的是管理计算机,它们主要针对车间和工厂的生产向决策者提供各种信息,以便做出有关生产计划、调度和管理的方案,使部门协调,使生产管理处于最佳状态。

五、现场总线控制系统

现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS)如图 1-9 所示。它是以现场总线为纽带,连接分散的现场仪表或设备,使之成为可以相互沟通信息、共同完成自动控制任务的网络多机协调控制系统。

现场总线是用于现场设备仪表与控制室控制器之间的一种开放、全数字化、双向、多站的通信系统,可使系统成为具有测量、控制、执行和过程诊断等综合能力的控制网络。它实际上融合了智能化现场设备、计算机网络和开放系统互连(OSI)等技术的精髓。

简单地说，现场总线就是以数字通信替代了传统 4~20 mA 模拟信号及普通开关量信号的传输，是连接智能现场设备仪表和自动化系统的全数字、双向、多站的通信系统。主要解决工业现场的智能化仪器仪表、控制器、执行机构等现场设备间的数字通信以及这些现场控制设备和高级控制系统之间的信息传递问题。

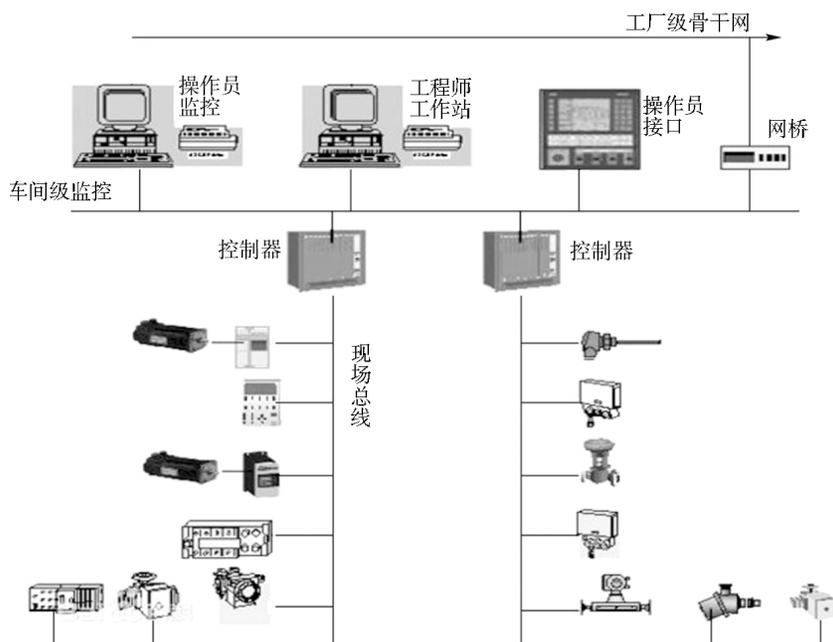


图 1-9 现场总线控制系统

第四节 计算机控制系统举例

随着计算机控制技术的发展，计算机控制系统已经广泛应用于工业过程中，下面介绍典型的计算机控制系统。

一、工业炉燃料和空气比率控制系统(生产过程控制)

图 1-10 所示为一个工业炉燃料和空气比率的生产过程计算机控制系统。为了保证燃料在炉膛内正常燃烧，必须保持燃料和空气的比值恒定。当空气太多时，过剩的空气将带走大量热量；当空气太少时，由于燃料燃烧不充分而产生大量一氧化碳和炭黑。为了保持所需的炉温，将测得的炉温送入计算机计算，进而控制燃料和空气阀门的开度。为了保持炉膛压力恒定，避免在炉膛压力过低时从炉墙的缝隙吸入大量过剩空气，或在压力过高时大量燃料通过缝隙溢出炉外，必须采用压力控制回路。将测得的炉膛压力送入计算机，进而控制烟道出口挡板的开度。此外，为保证燃料、空气供应管道没有出现堵塞，需要测量燃料、空气进入管道的压力。为了提高炉子的热效率，还必须对炉子排出的废气进行分析，一般是用氧化锆传感器测量烟气中的微量氧，通过计算得出其热效率，并用于指导燃烧控制。

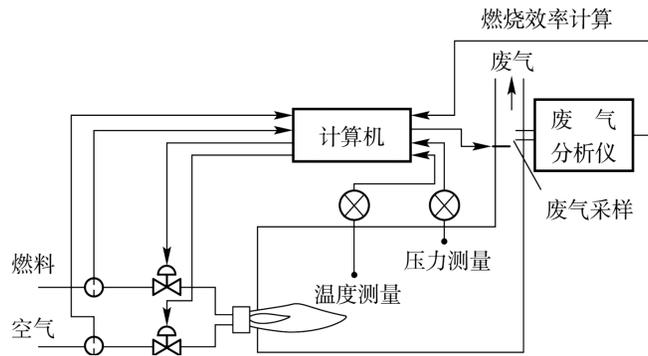


图 1-10 工业炉燃料和空气比率控制系统

二、原料混合和加热控制系统(顺序控制)

图 1-11 为一个原料混合和加热的计算机控制系统。

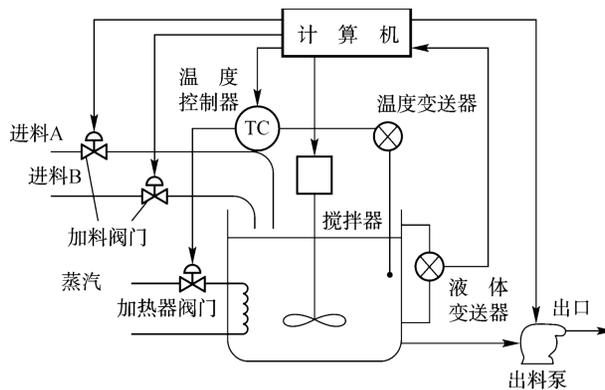


图 1-11 原料混合和加热控制系统

该装置的任务是：

- (1) 装入原料 A，使液面达到储槽的一半；
- (2) 装入原料 B，使液面进一步升到储槽的 75%；
- (3) 开始搅拌并加热至 95℃，在此恒定温度上维持 20 min；
- (4) 停止搅拌和加热，开动出料泵排料，一直到液位低于储槽的 5% 为止。

上述过程由计算机自动控制，按照一定的顺序重复进行，完成原料混合和加热控制。

本章习题

1. 什么是计算机控制系统？它主要由哪几部分组成？
2. 什么是计算机控制系统的实时性？
3. 控制用计算机和普通计算机主要有哪些区别？
4. 从功能和结构方面可以将计算机控制系统分为哪几类？其各有什么主要特点？
5. 什么是 DDC 系统？请简述其工作原理。
6. 本章所列举的计算机控制系统的例子，从原理和结构上看主要有什么共性？

第二章

过程通道配置与数字信号处理



本章导读

计算机控制系统要实现控制的目的和要求，首先要解决控制系统的信息来源和经控制器处理后的信息输出问题，也就是要解决控制系统的输入/输出通道的问题。本章简单介绍过程通道设计需要注意的一些问题。

第一节 信号变换

一、计算机控制系统中信号的分类

计算机控制系统中的信号具有不同的分类方式。如图 2-1 所示，计算机控制系统中的信号可从时间上和幅值上进行分类。

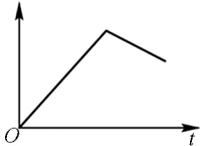
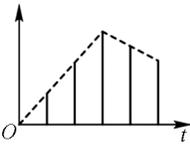
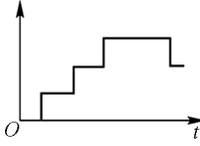
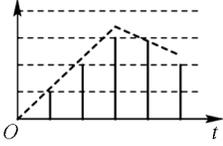
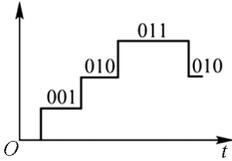
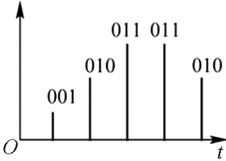
幅值	时间	
	连续	离散
连续		
离散		
数字 二进制		

图 2-1 计算机控制系统信号分类示意图

从时间上可将计算机控制系统中的信号分为连续时间信号和离散时间信号。在任何时刻都有值的信号为连续时间信号；仅在离散断续时刻出现的信号为离散时间信号。

从幅值上可将计算机控制系统中的信号分为模拟(连续)信号、离散信号和数字信号。信号幅值可取任意值的信号为模拟信号；信号幅值具有最小分层单位的模拟量为离散信号；信号幅值用一定位数的二进制编码形式表示的信号为数字信号。

二、计算机控制系统中信号的变换

图 2-2 所示为计算机控制系统的基本原理。被控信号 r 经输入通道的 A/D 转换进入计算机，将模拟信号转换为数字信号；控制信号 u 经输出通道的 D/A 转换送出，将数字信号变换到模拟信号，都涉及信号变换。下面分别讨论模拟量到数字量的转换和数字量到模拟量的转换。

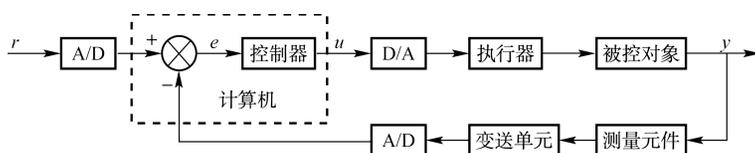


图 2-2 计算机控制系统基本原理框图

1. 模拟量到数字量的转换

从连续对象测得的模拟量需转换成数字量后才能送到计算机进行处理。如图 2-3 所示，模拟量到数字量的转换需要经过采样(S/H)、量化和编码三个步骤。采样就是将连续的模拟输入信号以一定的时间间隔 T (称为采样周期) 进行采样，变成时间离散(断续)、幅值等于采样时刻输入信号值的序列信号；量化就是将采样时刻的信号幅值按 A/D 的最小量化单位取整，变成整量化分层信号；编码就是将整量化的分层信号变换为二进制数码形式，用计算机的数字量表示。

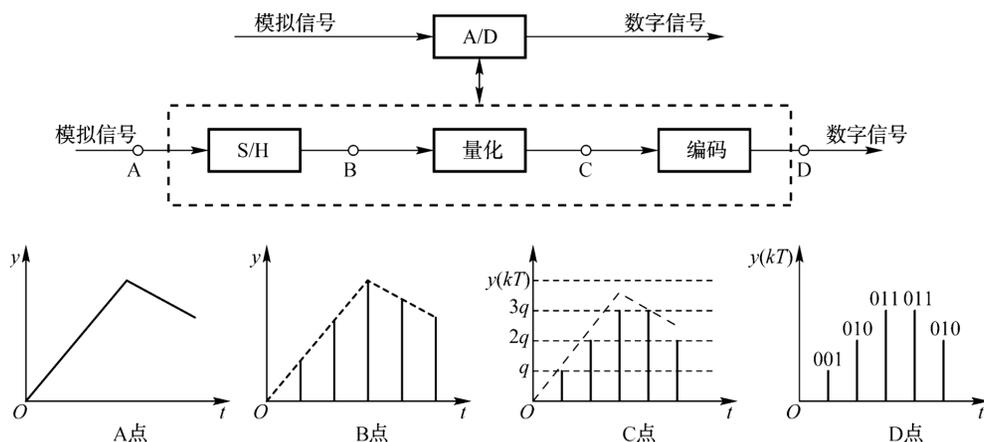


图 2-3 A/D 转换过程示意图

由于编码仅是信号形式的改变，其变换过程可看作无误差的等效变换。A/D 转换中的误差可看成来自采样和量化过程。量化误差取决于 A/D 转换器的位数，采样误差则涉及较多因素。

由于信号采样不是取全部时间上的信号值，而是取某些时刻的值，这样处理会不会造成信号的丢失呢？下面，我们不加证明直接给出采样定理。

香农(Shannon)采样定理指出：对于一个具有有限频谱 $|\omega| < \omega_{\max}$ 的连续信号进行采样时，采样信号 $y^*(t)$ 唯一地复现原信号 $y(t)$ 所需的最低采样角频率必须满足 $\omega_s \geq 2\omega_{\max}$ 或

$T \leq 2\pi/\omega_{\max}$ 的条件。其中, ω_{\max} 是原信号的最高角频率。

采样角频率与采样频率、采样周期的关系为式(2-1):

$$\omega_s = 2\pi f_s = \frac{2\pi}{T} \quad (2-1)$$

采样定理给出了合理选择采样周期的理论指导原则, 在计算机控制系统中采样周期的选择通常取 $f_s = (5 \sim 10)f_{\max}$, 或者更高。其中, f_{\max} 是原信号的最高频率。

尽管 A/D 转换采样必定带来误差, 但在采样周期 T 满足香农采样定理、采样脉冲宽度远远小于 T 和 A/D 转换精度能够得到保证的前提下, 人们一般把 A/D 采样看成理想的采样。

理想采样相当于 A/D 有一个理想的脉冲幅度调制器, 如图 2-4 所示。

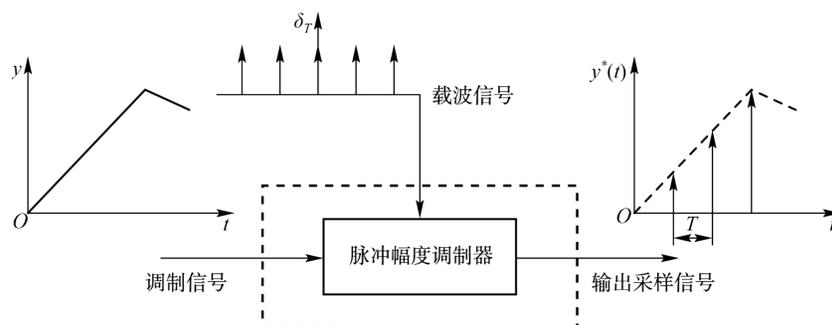


图 2-4 理想开关采样示意图

理想采样将连续信号 $y(t)$ 经理想脉冲幅度调制器变换成理想采样信号 $y^*(t)$, 式(2-2)为采样公式:

$$y^*(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} y(kT)\delta(t-kT) = \sum_{k=0}^{\infty} y(kT)\delta(t-kT) \quad (2-2)$$

$y^*(t)$ 是离散的模拟信号, 再经过 A/D 转换的量化和编码作用即可将其转换成计算机可接收的离散数字量。因此, 在计算机控制系统等效结构图中, 人们常常将 A/D 转换看成一个理想开关, 其功能是以一定间隔采样周期 T , 按照公式(2-2)将模拟量转换成数字量。

2. 数字量到模拟量的转换

在许多计算机控制系统中, 计算机要通过输出通道将计算出的控制值转换成模拟量形式去控制被控对象。如图 2-5 所示, 数字量到模拟量的转换需要经过解码和保持两个步骤。解码就是将数字量转换为幅值等于该数字量的模拟脉冲信号; 保持就是将解码后的模拟脉冲信号变为随时间连续变化的信号。

由于解码仅是信号形式的改变, 其变换过程可看作无误差的等效变换, 因此 D/A 转换的关键在于保持器, 常用的保持器为零阶保持器, 偶尔也会使用一阶保持器。

零阶保持器是计算机控制系统常用的一种保持器, 它恢复信号的方法是将某一采样时刻的信号原封不动地保存到下一个时刻。零阶保持器信号恢复如图 2-6 所示, 零阶保持器的输出为式(2-3):

$$u(t) = u(kT) \quad \text{当 } kT \leq t < (k+1)T \text{ 时, } k = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2-3)$$

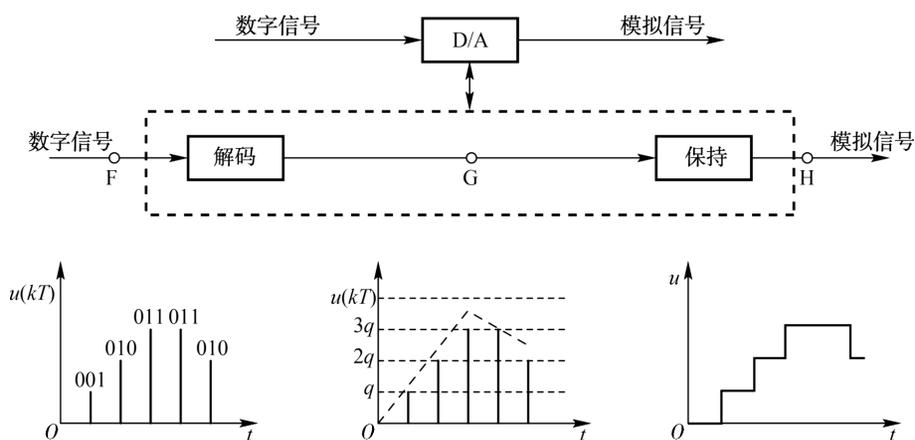


图 2-5 D/A 转换过程示意图

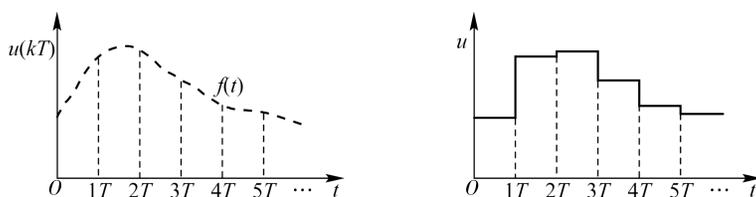


图 2-6 零阶保持器信号恢复

零阶保持器的传递函数为式(2-4)：

$$G(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s} \quad (2-4)$$

在计算机控制系统等效结构图中人们常常将 D/A 转换看成一个理想开关加零阶保持器，其功能是以一定间隔采样周期 T 按照公式(2-3)将数字量解码成模拟脉冲量，零阶保持器的功能是将模拟脉冲量变为随时间连续变化的模拟量。

第二节 过程通道的硬件选型

由第一章的计算机控制系统硬件组成基本结构图(图 1-3 和图 1-4)可知，过程通道可分为模拟量输入通道、数字量输入通道、模拟量输出通道和数字量输出通道。模拟量是指温度、压力、流量、速度、位移等时间上和大小上都连续变化的物理量；数字量是指开关闭合和断开、串行脉冲编码等时间上和大小上不连续变化的物理量。由于图 1-3 和图 1-4 结构基本类似，以下仅以图 1-3 所示结构进行说明。

一、传感器与变送器的选型

传感器可以将非电的被控物理量变换成与之相对应的电信号。变送器就是



传感器的类型

把非标准电信号转换成标准电压或电流信号送入 AI 板或 DI 板。由于 AI 板或 DI 板一般只能接收标准电信号，选用时应注意传感器、变送器、AI 板和传感器、变送器、DI 板的匹配。

传感器一般有两种分类方式：一种是按照被测对象的参数划分，可分为温度、压力、位移、流量、液位、力、力矩、加速度、流速和振动等传感器；另一种是按照变换的原理划分，可分为电阻式、电容式、电感式、压电式、光电式、光栅式、热电式、红外、光纤、超声波和激光等传感器。常用的传感器见表 2-1。

表 2-1 常用的传感器

大类	小类	传感器特性
温度传感器	热电偶	低内阻，电压输出，测量精度高，测量范围广，需温度冷端补偿，用于中、高温范围测量，测量范围 400~1800 ℃
	热电阻	测量精度高，性能稳定，用于低温范围测量，测量范围 -200~800 ℃，典型的是铂热电阻
	热敏电阻	分为负温度系数和正温度系数，灵敏度高，工作温度范围广，非线性
压力传感器	应变式	电阻变化或电压输出，灵敏度低
	压电式	电荷输出，只响应交流信号和瞬态信号
	可变电阻	输出电阻或电阻比值，灵敏度高，需要激励电压或电流
流量传感器	差压式	性能稳定可靠，使用寿命长，应用范围广，测量精度较低，现场安装条件要求高
	浮子式	在小、微流量方面应用多，适用于小管径和低流速，压力损失较低
	容积式	计量精度高，应用范围广，可用于高黏度液体测量
	涡轮	高精度，重复性好，无零点漂移，抗干扰能力强，应用范围宽
液位传感器	电容式	精度 0.5%，测量范围在 0.2~20 m
	浮球式	精度不高，测量范围一般在 4 m 以下
	雷达式	短距离测量精度较低，测量范围大，非接触测量，使用寿命长

传感器选择的主要注意事项如下。

(1)测量的对象、目的和要求：测量要求包括测量范围、频带宽度、测试精度、测量所需要的时间等。

(2)传感器特性：包括静态和动态特性指标、输出量类型、校正周期、过载信号保护、配套仪器等。

(3)测试条件：包括传感器的设置场所、环境温度、环境湿度、振动情况、与其他设备的连接距离、所需功率等。

(4)购买和维护有关事项：包括性价比、零配件的储备、售后服务与维修制度、保养时间、交货日期等。

虽然选择传感器时要考虑的事项很多，但无须满足所有事项要求，应根据实际使用的目的、指标、环境、维护要求、价格等，有不同的侧重点。例如，长时间使用的传感器，就必须重视经得起时间考验等长期稳定性问题；而对机械加工或化学分析等时间比较短的工序过程，则需要灵敏度和动态特性较好的传感器。为提高测量精度，平常使用时测量范围的显示值最好

选择在满刻度的 50% 左右。传感器的速度应适应输入信号的频带宽度。应合理选择设置场所，注意安装方法，了解传感器的外形尺寸、质量等。如果应用要求较高，环境复杂，选择传感器时还需要从传感器的工作原理入手分析其特性，以确定选择哪一款传感器最适合。选择传感器的具体原则如下。

(1) 传感器类型的确定。根据测量对象与测量环境确定传感器的类型。首先要考虑采用何种原理的传感器，这需要分析多方面的因素之后才能确定。这是因为，即使是测量同一物理量，也有多种原理的传感器可供选用，哪一种原理的传感器更为合适，则需要根据被测量的特点和传感器的使用条件考虑，包括以下一些具体问题：量程的大小；被测位置对传感器体积的要求；测量方式为接触式还是非接触式；信号的引出方法为有线还是无线。在考虑上述问题之后就能确定选用何种类型的传感器，然后再考虑传感器的具体性能指标。

(2) 传感器灵敏度的选择。通常，在传感器的线性范围内，希望传感器的灵敏度越高越好。这是因为，灵敏度高时，与被测量变化对应的输出信号的值比较大，有利于信号处理。但应注意的是，如果传感器的灵敏度高，与被测量无关的外界噪声也容易混入，也会被放大系统放大，影响测量精度。

(3) 频率响应特性的选择。传感器的频率响应特性决定了被测量的频率范围，必须在允许频率范围内保持不失真的测量条件。实际上传感器的响应总有一定的延迟，因为人们希望延迟时间越短越好。传感器的频率响应高，可测的信号频率范围就宽。在动态测量中，应根据信号的特点(稳态、瞬态、随机等)来选择传感器的频率响应特性，以免产生过大的误差。

(4) 线性范围的确定。传感器的线性范围是指输出与输入成正比的范围。理论上讲，在此范围内，灵敏度保持定值。传感器的线性范围越宽，则其量程越大，并且能保证一定的测量精度。在选择传感器时，当传感器的种类确定以后，首先要看其量程是否满足线性要求。实际上，任何传感器都不能保证绝对的线性，其线性度也是相对的。当所要求测量精度比较低时，在一定的范围内，可将非线性误差较小的传感器视为近似线性的，这会给测量带来极大的方便。

(5) 精度的确定。精度是传感器的一个重要的性能指标，它是关系到整个测量系统测量精度的一个重要环节。传感器的精度越高，其价格越昂贵。因此，传感器的精度只要满足整个测量系统的精度要求就可以，不必过高，这样就可以在满足同一测量目的的诸多传感器中选择比较便宜和简单的传感器。如果测量是为了定性分析，选用重复精度高的传感器即可，不宜选用绝对量值精度高的；如果是为了定量分析，必须获得精确的测量值，就需选用绝对量值精度高的。对某些特殊使用场合，若无法选到合适的传感器，则需自行设计制造传感器。自制传感器的性能应满足使用要求。

(6) 稳定性的考虑。传感器使用一段时间后，其性能保持稳定的能力称为稳定性。影响传感器长期稳定性的因素除传感器本身结构外，主要是传感器的使用环境。因此，要使传感器具有良好的稳定性，则传感器必须要有较强的环境适应能力。在选择传感器之前，应对其使用环境进行调查，并根据具体的使用环境选择合适的传感器，或采取适当的措施，减小环境对它的影响。传感器的稳定性有定量指标，超过使用期后，在使用前应重新进行标定，以确定传感器

的性能是否发生变化。在某些要求传感器长期使用、不能轻易更换或标定的场合，所选用的传感器稳定性要求更严格，要能够经受住长时间的考验。

线性变送器的选择相对简单，主要考虑其所适合的环境(如防火防爆、温度、湿度、振动、抗干扰等)以及输出形式(如电流、电压)是否适合 AI 板或 DI 板等。选用时应特别注意与 I/O 通道相匹配。变送器的输入来自传感器，因此其输入要与传感器的输出相匹配；变送器的输出送 AI 板或 DI 板，因此其输出要与 AI 板或 DI 板的输入相匹配。

因为执行器和被控对象的综合特性有可能不近似为线性，为了弥补执行器和被控对象的非线性以及传感器的非线性，有时要选择非线性变送器。非线性变送器选型除要考虑线性变送器选型时所要考虑的因素外，主要应考虑变送器如何使被控系统总的特性接近线性，否则就要在控制器设计中想办法。

除此以外，传感器与变送器、变送器与 AI 板、变送器与 DI 板之间可能存在长距离布线，因此还要求变送器具有相应的长线抗干扰能力。

二、执行器与功放接口电路的选型

功放接口电路与执行器配合把计算机发出的控制信号转换成机械动作，对生产过程实施控制。执行器在自动控制系统中相当于人的四肢，它接收控制器及功放电路送出的控制信号，改变操纵变量，使生产过程按预定要求进行执行。执行器是过程控制系统的一个重要组成部分，其特性好坏对控制质量的影响很大。

执行器由执行机构和调节机构组成，执行机构是根据控制信号产生推力或位移的装置，调节机构是根据执行机构输出信号去改变能量或物料传送量的装置。最常见的就是调节阀，如图 2-7 所示。

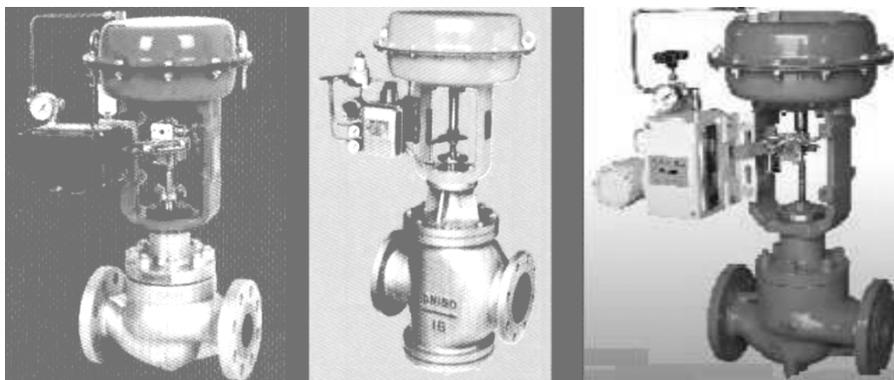


图 2-7 常用的调节阀示意图

执行器一般可分成气动、电动和液动三大类。

气动执行器就是以压缩空气为动力能源的一种自动调节阀。其结构简单，工作可靠，价格便宜，维护方便，有防火、防爆功能。大多数工控场合所用执行器都是气动机构。从维护观点来看，气动执行机构比其他类型的执行机构易于操作，在现场也可以很容易实现正反、左右的互换。由于气动调节阀动作时有防火防爆功能，因此适合易燃易爆环境。虽然现在电动调节阀

的应用范围越来越广，但是在化工领域，气动调节阀还是占据着绝对的优势。

电动执行器是利用电动机进行操作的。其具有能源取源方便、信号传递迅速、操作稳定和推力比较恒定的优点，但是结构复杂，防火、防爆能力差。电动执行机构的抗偏离能力是很好的，输出的推力或力矩基本上是恒定的，可以很好地克服介质的不平衡力，达到对生产过程的高质量控制，其控制精度一般比气动执行机器要高。如果配用伺服放大器，可以很容易地实现正反作用切换，也可以轻松地控制其阀位(保持、全开、全关)，而出现故障时一定停留在原位，这是一般气动执行元件做不到的。但电动机结构复杂，对现场维护人员的技术要求较高；电机运行产生热，如果调节太频繁，容易造成电机过热，产生热保护，同时也会加大减速齿轮的磨损，另外，调节动作速度较慢，比气动、液动逊色不少。

液动执行器就是利用液压原理推动的执行机构。其推力大且比较恒定，但是设备较笨重。因为液体的不可压缩性，当需要异常的抗偏离能力、较高的推力以及较快的动作时，往往选择液动执行器。电液动执行机构是将电机、油泵、电液伺服阀集于一体，只要接入电源和控制信号即可工作，而液动执行器需要配备液压站和输油装置，相比之下电液执行器更方便一些。

综上所述，在生产过程的控制系统中，气动执行器使用最普遍，电动执行器使用较普遍，液动执行器很少使用。执行器选型主要考虑如下因素。

- (1)被控对象特性：被控目的和要求、调节范围、频带宽度、系统精度等。
- (2)使用条件：如执行器安装场所、工作温度、工作压力等，特别是介质类型、黏度、毒性、状态纯净程度等。
- (3)执行器特性：如执行器类别、执行器的静态性能指标和动态性能指标等。
- (4)系统要求：如可调比、噪声、泄漏量等。
- (5)购买和维护有关事项：包括性价比、零配件的储备、售后服务与维修制度、保养时间、交货日期等。

执行器最常见的就是调节阀门，实践证明，在过程控制系统设计中，若调节阀特性选择不当，阀门动作不灵活，阀门口径大小不合适，都会严重影响控制质量。所以，应根据生产过程的特点、被控介质的情况和安全运行需要，并从系统设计的总体考虑，选用合适的执行器。

在过程控制系统设计中，调节阀的公称直径和阀座直径必须根据计算所得的流通能力来选择。调节阀口径选得过小，当系统受到较大扰动时，调节阀可能运行在全开或接近全开的非线性饱和工作状态，使系统暂时失控。调节阀口径选得过大，系统运行中阀门会经常处于小开度的工作状态，不但调节不灵活，而且易造成流体对阀芯、阀座的严重冲蚀，在不平衡力作用下产生振荡，甚至引起调节阀失灵。在正常工况下要求调节阀开度为15%~85%。

调节阀流量特性对控制质量的影响是很大的。调节阀流量特性分为理想流量特性和工作流量特性。产品出厂时制造商提供的流量特性是理想流量特性，实际应用需要的是工作流量特性。调节阀流量特性的选择一般分两步进行。首先根据过程控制系统的要求，确定工作流量特性；然后根据流量特性曲线的畸变程度，确定理想流量特性，以此作为向生产厂家订货的内容。

选择调节阀工作流量特性的依据是控制系统稳定运行准则。根据控制系统稳定运行准则,扰动或设定变化时,控制系统静态稳定运行的条件是控制系统各开环增益之积基本恒定;控制系统动态稳定运行的条件是控制系统中开环传递函数的模基本恒定(即总开环幅频特性和相频特性基本保持不变)。在选择执行器时,应考虑通过调节阀调节机构的增益来补偿因对象增益变化而造成开环总增益变化的影响。这样,当被控对象增益随负荷或设定变化时,相应调节阀流量特性的调节阀增益可与对象增益之积基本保持不变。

流量特性的选择用于补偿广义被控对象的非线性特性,应尽量使调节阀流量特性与广义被控对象的特性之积成线性。但有时被控对象的非线性并不能够用选择调节阀的流量特性来补偿,这时可以选择检测变送器或控制器的特性来满足补偿要求。

功放接口电路实质上是一种换能器,用于驱动执行器。选用时应主要考虑环境(如防火、防爆、温度、湿度、振动、抗干扰等)以及输入/输出形式(如电流、电压)是否适合执行器、AO板、DO板等。选用时应特别注意与I/O通道匹配。功放接口电路的输入来自AO板或DO板,因此其输入要与AO板或DO板的输出相匹配;功放接口电路的输出送执行器,因此其输出要与执行器的输入相匹配。除此以外,功放接口电路与AO板或DO板之间,以及与执行器之间也可能存在长距离布线,还要考虑是否可以克服长线干扰所造成的危害。现在,很多AO板和DO板已经带功放接口电路,可以直接驱动执行器,因此功放接口电路是否需要配置还要看执行器、AO板和DO板的选型情况才能决定。

三、输入/输出通道接口板的选型

输入/输出通道接口板一般插在系统内部总线扩展槽内,如PCI总线扩展槽、STD总线扩展槽和ISA总线扩展槽等。工业控制计算机一般有较多的扩展槽,很多PLC也有相应的扩展接口装置。

AI板一般由硬件滤波电路、多路切换开关、采样器、A/D转换电路和光电隔离电路构成,高速数据采集板可能含有多个A/D转换芯片。随着单片机技术的发展,现在很多AI板已经含有智能芯片,它可将转换数据存入板中自带的存储区供计算机主机读取。

AO板一般由光电隔离电路、D/A转换电路、反多路切换开关、输出驱动电路构成,有的AO板驱动电路相当于功放可直接驱动某些执行器。高速输出板可能含有多个D/A转换芯片,此时一般没有反多路切换开关。随着单片机技术的发展,现在很多AO板已经含有智能芯片,它可接收计算机主机数据,自行完成D/A转换。

DI板或DO板比较简单,主要由光电隔离电路、信号电平标准变换等电路组成。

输入/输出接口板一般应选择工控类型的模板。选择接口板时可根据测量点数的分布情况和技术要求确定模拟量输入板AI和数字量输入板DI的块数,可根据控制点数的分布情况和技术要求确定模拟量输出板AO和数字量输出板DO的块数。在选择模板时要考虑布线、维护和检修等是否方便,还要考虑留有一定通道余量,便于工业现场临时增加控制点数或测量点数。

AI模板输入信号等级: $0 \sim \pm 5 \text{ V}$, $1 \sim 5 \text{ V}$, $0 \sim 10 \text{ mA}$, $4 \sim 20 \text{ mA}$, 热电耦(TC), 热电

阻(RTD)等。一块 AI 模板的输入路数一般为 4 路、6 路、8 路、12 路或 16 路。

AO 模板输出信号等级：0~5 V，1~5 V，0~10 mA，4~20 mA，-5~5 V 等。一块 AO 模板的输出路数一般为 2 路、4 路、6 路、8 路、12 路或 16 路。

DI 模板输入等级：有源接点有 TTL、CMOS 等，无源接点有 24 V、48 V 等。一块 DI 模板的输入路数一般为 8 路、12 路、16 路、32 路，甚至高达 64 路。

DO 模板输出等级：TTL、CMOS、24 V、48 V 等。一块 DO 模板的输出路数一般为 8 路、12 路、16 路、32 路，甚至高达 64 路。

第三节 过程通道抗干扰技术

由于生产现场往往有各种强电设备，如大功率电机、大功率高频炉，这些设备的启动、停止、工作能产生较强的磁场，形成很强的噪声源，而生产过程控制系统的计算机和被控对象又距离较远，因此过程通道设备或导线势必受到这些噪声源的干扰。干扰信号除了通过过程通道传导到计算机，还可直接辐射计算机。干扰会给计算机控制系统带来严重的影响，轻则使系统中的被测信息增加误差，不可信赖，重则使控制失误，造成事故。所以，必须采取适当的措施对干扰进行抑制，以保证计算机控制系统的可靠运行。

一、干扰信号的分类

计算机控制系统中的干扰种类可按下列几种方式划分。

1. 按产生的原因分类

(1) 放电干扰。放电干扰主要是雷电、静电、电动机的电刷跳动、大功率开关通断等放电产生的干扰。

(2) 高频振荡干扰。高频振荡干扰主要是中频电弧炉、感应电炉、开关电源、直流-交流变换器等在高频振荡时产生的噪声。

(3) 浪涌干扰。浪涌干扰主要是电动机的启动电流、电炉的合闸电流、开关调节器的导通电流以及晶闸管交流器等设备产生的干扰。

2. 按照来源分类

(1) 外部干扰。外部干扰指那些与系统结构无关，由外部环境因素决定的干扰，如电气设备的干扰、天线干扰和天体干扰等。

(2) 内部干扰。内部干扰指那些由系统结构、制造工艺所决定的干扰，主要是分布电容、分布电感引起的耦合感应，电磁场辐射感应，长线传输的波反射，多点接地造成的电位差以及寄生振荡引起的干扰，元器件产生的噪声也属于内部干扰。

3. 按照作用方式分类

(1) 串模干扰。串模干扰是指叠加在被测信号上的干扰噪声，即干扰串联在信号源回路中。其表现形式与产生原因如图 2-8 所示。图中， u_s 为信号源电压， u_n 为串模干扰电压，邻近导线（干扰线）有交变电流 I_a 流过， I_a 产生的电磁干扰信号会通过分布电容 C_1 和 C_2 的耦合引至计算机控制系统的输入端。

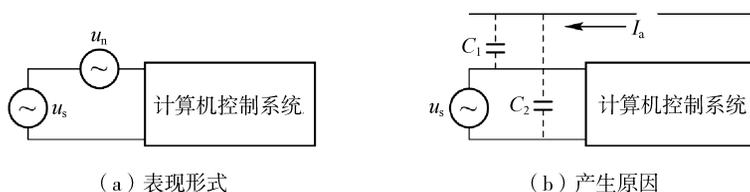


图 2-8 串模干扰示意图

串模干扰造成的后果是输入到 A/D 的信号为实际信号和干扰信号之和。当实际信号本来就是弱信号时，干扰将对有用信号造成极大危害。

(2) 共模干扰。在计算机控制系统中一般都用较长的导线把现场的传感器或执行器引入计算机系统的输入通道或输出通道中，这类信号传输线通常长达几十米至上百米，这样，现场信号的参考接地点与计算机系统输入或输出通道的参考接地点之间存在一个电位差 u_{cm} ，如图 2-9 所示。这个 u_{cm} 是加在放大器输入端上共有的干扰电压，故称为共模干扰。

共模干扰也称为对地干扰、横向干扰或不平衡干扰，可以是直流电压，也可以是交流电压，其幅值达几十伏甚至更高（取决于现场产生干扰的环境条件和计算机等设备的接地情况）。

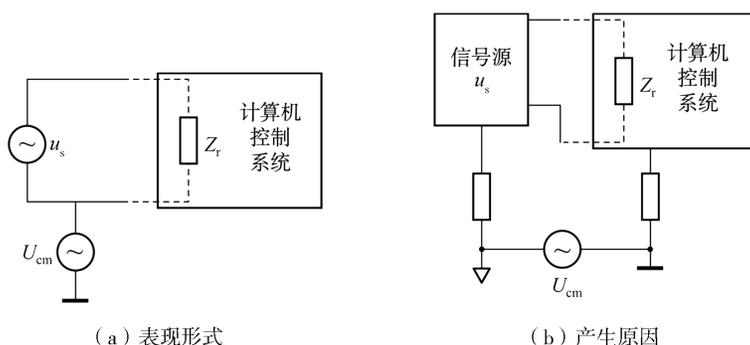


图 2-9 共模干扰示意图

二、串模干扰的抑制

1. 用双绞线作信号线

采用双绞线的目的是减少电磁感应，并且使各个小环路的感应电势互相呈反向抵消。用这种方法可使干扰抑制比达到几十分贝，具体见表 2-2。为了从根本上消除串模干扰，一方面应对测量仪表进行良好的电磁屏蔽，另一方面应选用带有屏蔽层的双绞线作信号线，并应有良好的接地。

表 2-2 不同的双绞线串模干扰抑制效果

节距/mm	干扰衰减比	屏蔽效果/dB
100	14 : 1	23
75	71 : 1	37
50	112 : 1	41
25	141 : 1	43
平行线	1 : 1	0

2. 引入滤波电路

采用硬件滤波器抑制串模干扰是一种常用的方法。根据串模干扰频率与被测信号频率的分布特性，可以选用低通、高通、带通、带阻滤波器。

- (1)低通滤波器：允许低频信号通过，但阻止高频信号通过。
- (2)高通滤波器：允许高频信号通过，但阻止低频信号通过。
- (3)带通滤波器：允许规定的某一频段信号通过，但阻止高于和低于该频段的信号通过。
- (4)带阻滤波器：只阻止规定的某一频段信号通过，但允许高于和低于该频段的信号通过。

在抗干扰技术中，由于串模干扰都比被测信号变化快，因此使用最多的是低通滤波器，一般采用电阻、电容和电感等无源元件构成无源滤波器，如图 2-10 所示，其缺点是信号有较大的衰减。为了把增益和频率特性结合起来，可以采用以反馈放大器为基础的有源滤波器，如图 2-11 所示，这对于小信号尤其重要。它不仅可提高增益，而且可提供频率特性，其缺点是线路复杂。

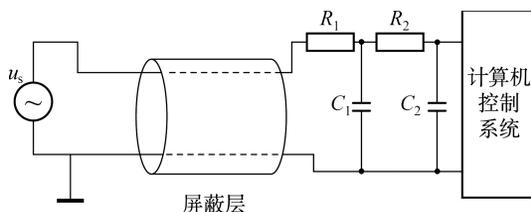


图 2-10 无源低通滤波器

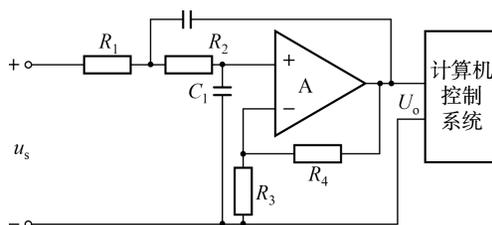


图 2-11 有源低通滤波器

3. 对长线进行阻抗匹配

信号在长线传输中除了会受到外界干扰和引起信号延迟，还可能产生波反射现象。当信号

在长线中传输时，由于传输线的分布电容和分布电感的影响，信号会在传输线内部产生正向前进的电压波和电流波，称为入射波。如果传输线的终端阻抗与传输线的阻抗不匹配，入射波到达终端时会引起反射。同样，反射波到达传输线始端时，如果始端阻抗不匹配，也会引起新的反射，从而使信号波形严重畸变。

采用终端阻抗匹配或始端阻抗匹配的方法，可以消除长线传输中的波反射或者把它抑制到最低限度。

4. 采用数字滤波技术

数字滤波就是用软件算法对计算机采集的信号进行处理，将某个频段的干扰信号进行滤除，得到新的信号。常常采用平均值法、中值法、一阶滤波等数字滤波方法抑制串模干扰。

三、共模干扰的抑制

1. 变压器隔离

利用变压器把现场信号源的地与计算机的地隔离开来，也就是把“模拟地”与“数字地”断开，如图 2-12 所示。被测信号通过变压器耦合获得通路，而共模干扰电压由于不形成回路而得到有效的抑制。

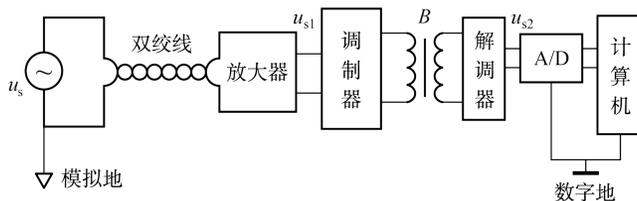


图 2-12 变压器隔离示意图

2. 光电隔离

光电隔离是目前计算机控制系统中最常用的一种抗干扰方法。它使用光电耦合器来完成隔离任务。光电耦合器是将发光二极管和光敏三极管封装在一个管壳内组成的，发光二极管两端为信号输入端，光敏三极管的集电极和发射极分别作为光电耦合器的输出端，它们之间的信号传递是靠发光二极管在信号电压的控制下发光再传给光敏三极管来完成的。

光电耦合器的特点如下。

- (1) 由于是密封在一个管壳内，不会受到外界光的干扰。
- (2) 由于是靠光传送信号，切断了各部件电路之间地线的联系。
- (3) 发光二极管动态电阻非常小，而干扰源的内阻一般很大，故能够传送到光电耦合器输入端的干扰信号就变得很小。
- (4) 光电耦合器的传输比和晶体管的放大倍数相比一般很小，远不如晶体管对干扰信号那样灵敏，且光电耦合器的发光二极管只有在通过一定的电流时才会发光。因此，即使在干扰电压幅值较高的情况下，由于没有足够的能量，发光二极管也不会发光，从而可以有效地抑制干扰信号。
- (5) 光电耦合器提供了较高的带宽，较低的输入失调漂移和增益温度系数。因此，能够较

好地满足信号传输速度的要求。

具体分为如下两种隔离。

(1) 数字信号隔离。如图 2-13 所示, 利用光电耦合器的开关特性, 可传送数字信号而隔离电磁干扰。

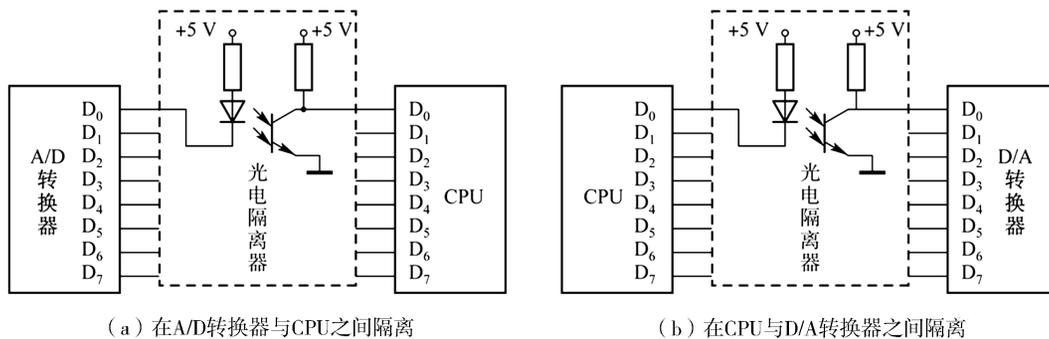


图 2-13 光电数字信号隔离示意图

(2) 模拟信号隔离。如图 2-14 所示, 利用光电耦合隔离器的线性放大区, 传送模拟信号而隔离电磁干扰, 在模拟信号通道中进行隔离。

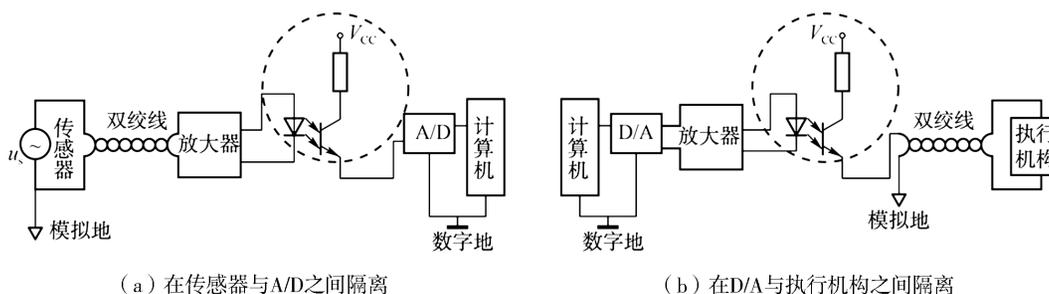


图 2-14 光电模拟信号隔离示意图

3. 浮地屏蔽

如图 2-15 所示, Z_{s1} 、 Z_{s2} 为信号源内阻及信号引线电阻, 一般较小; Z_{s3} 为信号线的屏蔽电阻, 至多只有十几欧姆。 Z_{c1} 、 Z_{c2} 为放大器输入端对内屏蔽的漏阻抗, Z_{c3} 为内屏蔽与外屏蔽之间的漏阻抗。

浮地屏蔽的计算机部分采用内外两层屏蔽, 且内屏蔽对外屏蔽层(机壳层)是浮地的, 内层与信号源及信号线屏蔽层在信号端单点接地; 被测信号到控制系统中的放大器采用双端差动输入方式。

工程设计中 Z_{c1} 、 Z_{c2} 、 Z_{c3} 应在数十兆欧姆以上, 这样模拟地与数字地之间的共模电压 U_{cm} 在进入放大器以前将会被衰减到很小。这是因为首先在 U_{cm} 、 Z_{s3} 、 Z_{c3} 构成的回路中, $Z_{c3} \gg Z_{s3}$, 因此干扰电流 I_3 在 Z_{s3} 上的分压 U_{s3} 就小得多; 同理, U_{s3} 在 Z_{s2} 与 Z_{s1} 上的分压 U_{s2} 与 U_{s1} 也衰减较多, 而且由于是同时进入计算机放大器的差动输入端, 因此两次衰减得很小的干扰信号再次相减, 余下的进入计算机系统内, 这时的共模电压在理论上几乎为零。因此, 这种浮地屏蔽系统对抑制共模干扰是很有效的。

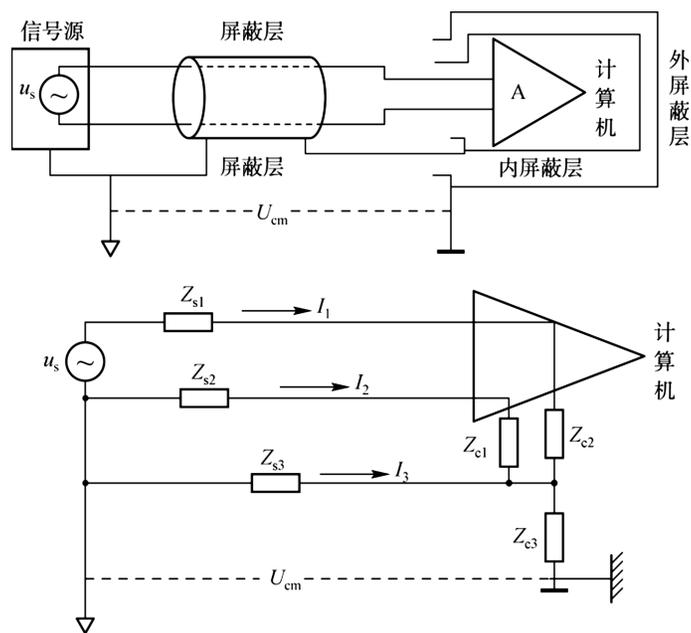


图 2-15 浮地屏蔽示意图

第四节 过程通道数字滤波技术

计算机控制系统的模拟输入信号中，一般均含有各种噪声和干扰。为了进行准确测量和控制，必须消除被测信号中的噪声和干扰。噪声一般分为两大类：一类为周期性的规则信号，其典型代表为 50 Hz 的工频干扰，采用积分时间等于 20 ms 整倍数的双积分 A/D 转换器可有效地消除其影响；另一类为非周期的不规则随机信号，可以用数字滤波方法予以削弱或滤除。

数字滤波就是用软件通过一定的算法对计算机采集的信号进行处理，将某个频段的干扰信号进行滤除，得到新的信号。

数字滤波算法可以分为经典滤波算法和现代滤波算法。经典滤波算法就是假定采样信号 $y(k)$ 中的有用成分和希望滤除成分分别位于不同的频带，因而通过一个线性系统就可以对噪声进行滤除。如果噪声和信号的频谱相互混叠，则经典滤波算法得不到想要的滤波结果。经典滤波算法通常有低通滤波、高通滤波、带通滤波和带阻滤波算法。现代滤波算法是从含有噪声的信号中估计出有用的信号和噪声信号。这种方法把信号和噪声本身都视为随机信号，利用其统计特征，如自相关函数、互相关函数、自功率谱、互功率谱等引导出信号的估计算法，然后利用软件实现，目前主要有维纳滤波、卡尔曼滤波、自适应滤波等算法。

数字滤波器与模拟滤波器相比，具有如下优点。

(1) 数字滤波器用软件实现，不需要硬件设备，不存在阻抗匹配问题，系统可靠性高。

(2)模拟滤波器通常是各通道专用，而数字滤波器可以多通道共享，从而降低了成本。

(3)模拟滤波器往往受电容容量的限制，对低频信号的滤波受到一定限制，而数字滤波可以对信号进行极低频率的滤波。

(4)由于数字滤波用软件实现，改变滤波器结构和参数非常方便，灵活性比模拟滤波器要强很多。

1. 限幅滤波法

在生产过程控制中，许多被控物理量变化都较慢，相邻两次采样值之间的变化不可能很大，因此可以由经验确定一个两次采样值之间变化的最大允许值 Δy_{\max} ，限幅滤波法的过程是在每次检测到新值时判断：如果本次值与上次值之差小于等于 Δy_{\max} ，则本次值有效；如果本次值与上次值之差大于 Δy_{\max} ，则本次值无效，放弃本次值，用上次值代替本次值。其计算公式为式(2-5)：

$$y^*(k) = \begin{cases} y(k) & \text{当 } |y(k) - y(k-1)| \leq \Delta y_{\max} \\ y(k-1) & \text{当 } |y(k) - y(k-1)| > \Delta y_{\max} \end{cases} \quad (2-5)$$

式中， $y(k)$ ， $y(k-1)$ 分别为本次、上次采样值； $y^*(k)$ 为本次处理后作为采样的输出值。

该算法适合变化比较缓慢的参数，如温度、液位等测量系统，使用时，关键问题是如何选择 Δy_{\max} ，若 Δy_{\max} 太大，则有些小干扰将有机可乘进入系统，使系统误差变大；若 Δy_{\max} 太小，则某些有用的信号将被屏蔽掉，使计算机采样效率变低。

该算法的优点是能有效克服因偶然因素引起的脉冲干扰；缺点是无法抑制周期性的干扰，算法的平滑度较差。

2. 中值滤波法

中值滤波就是每个采样周期内连续采样 N 次(N 取奇数)，把 N 次采样值按大小排列，取中间值作为本采样周期的有效采样值。

中值滤波能有效克服因偶然因素引起的波动干扰(如脉冲干扰)或克服 A/D 转换器本身采样误差对系统采样精度的影响。对温度、液位这类变化缓慢的被测参数比较适合而且具有良好的滤波效果，但对流量、速度等快速变化的参数则一般不适宜。不过，如果 A/D 转换速度很高，则为了克服 A/D 转换器本身采样误差对系统采样精度的影响，也可使用该方法。

3. 算术平均滤波法

算术平均滤波就是每个采样周期内连续采样 N 个值进行算术平均，结果作为本采样周期的采样值。其计算公式为式(2-6)：

$$y^*(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_k(i) \quad (2-6)$$

式中， $y_k(1)$ ， $y_k(2)$ ， \dots ， $y_k(N)$ 分别为本次的 N 个采样值； $y^*(k)$ 为本次处理后作为采样的输出值。

算术平均滤波主要用于对压力、流量等周期脉冲参数的采样值进行平滑加工，但是对脉冲

性干扰的平滑作用尚不理想，因而它不适合脉冲性干扰比较严重的场合。采样次数 N 的选取，取决于系统对参数平滑度的要求和 A/D 转换速度。 N 值较大时，信号平滑度较高； N 值较小时，信号平滑度较低。通常对流量滤波时 $N=12$ ；对压力滤波时 $N=4$ ；对于温度，若无噪声干扰则可不均匀。

4. 中值平均滤波法

中值平均滤波法相当于“中值滤波法+算术平均滤波法”，它是一种复合数字滤波方法。

中值平均滤波每个采样周期内连续采样 N 个数据，去掉两个最大值和两个最小值，然后计算 $N-4$ 个数据的算术平均值，结果作为本采样周期的采样值。

中值平均滤波法的优点是融合了中值滤波法和算术平均滤波法的优点，可消除偶然出现的脉冲性干扰所引起的采样值偏差，缺点是算法比较复杂。 N 值一般选取 $6\sim 14$ 。

5. 滑动平均滤波法

算术平均滤波是每个采样周期内连续采样 N 个值进行算术平均运算，而滑动平均滤波则是每个采样周期采样一个值并利用最近采样的 N 个值进行算术平均运算，因此其实质上是利用了 N 个采样周期的数据进行算术平均运算。也就是把连续取 N 个采样值看成一个队列，队列的长度固定为 N ，每次采样到一个新数据放入队尾，并扔掉原来队首的一个数据（先进先出原则），然后把队列中的 N 个数据进行算术平均运算，就可获得新的滤波结果。其计算公式为式(2-7)：

$$y^*(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y(k-i) \quad (2-7)$$

式中， $y(k)$ ， $y(k-1)$ ， \dots ， $y(k-N+1)$ 为最近的 N 个周期采样值； $y^*(k)$ 为本次处理后采样的输出值。

滑动平均滤波的优点是对周期性干扰有良好的抑制作用，平滑度高；缺点是使反馈灵敏度变低，对偶然出现的脉冲性干扰的抑制作用较差，不易消除由于脉冲干扰所引起的采样值偏差，不适用于脉冲性干扰比较严重的场合。

6. 限幅平均滤波法

限幅平均滤波法相当于“限幅滤波法+滑动平均滤波法”，它也是一种复合数字滤波方法。

限幅平均滤波法每个采样周期采样到新数据时先进行限幅处理，再送入队列进行滑动平均滤波处理。

限幅平均滤波法的优点是融合了限幅滤波法和滑动平均滤波法的优点，可消除偶然出现的脉冲性干扰所引起的采样值偏差；缺点是算法比较复杂。

7. 加权递推平均滤波法

加权递推平均滤波法是对滑动平均滤波法的改进，即不同时刻的数据加以不同的权。通常是越接近现时刻的数据，权取得越大。其计算公式为式(2-8)：

$$y^*(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} c_i y(k-i) \quad (2-8)$$

式中, $y(k)$, $y(k-1)$, \dots , $y(k-N-1)$ 为最近的 N 个周期采样值; c_i 为加权系数; $y^*(k)$ 为本次处理后采样的输出值。

c_i 要满足式(2-9):

$$c_i > 0 \text{ 且 } \sum_{i=0}^{N-1} c_i = 1 \quad (2-9)$$

加权递推平均滤波法中, 若新采样值的权系数越大, 则灵敏度越高, 但信号的平滑度越低。其优点是适用于有较大纯滞后时间常数的对象和采样周期较短的系统; 缺点是对于纯滞后时间常数较小, 采样周期较长, 变化缓慢的信号不能迅速反映系统当前所受干扰的严重程度, 此时滤波效果较差。

8. 低通数字滤波法

由于生产过程的许多物理量表现为低频变化, 如温度、液位等, 而干扰往往是高频信号, 因此在计算机控制系统 A/D 转换电路的设计中, 很多人喜欢在 A/D 转换的前置电路中加入硬件 RC 滤波, 如图 2-16 所示。

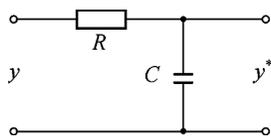


图 2-16 RC 滤波电路

其传递函数为式(2-10):

$$\frac{Y^*(s)}{Y(s)} = \frac{1}{RCs + 1} \quad (2-10)$$

考虑到带负载能力和电容 C 不可能设计得很大, 要想实现极低频率的低通滤波必须用计算机软件来实现。若定义计算机控制系统的采样周期为 T , 则式(2-10)的数字化计算公式为式(2-11):

$$y^*(k) = (1-\alpha)y^*(k-1) + \alpha y(k) \quad (2-11)$$

式中, $y(k)$ 为实际采样值; $y^*(k)$ 为本次处理后采样的输出值; $y^*(k-1)$ 为存储在计算机内存中的上次处理后的采样的输出值, 为平滑滤波系数。

该算法的优点是对周期性干扰具有良好的抑制作用, 适用于波动频率较高的场合; 缺点是相位滞后, 灵敏度低, 滞后程度取决于 α 值的大小, 不能消除滤波频率高于采样频率 $1/2$ 的干扰信号。

第五节 线性化处理技术

计算机从模拟量输入通道采集到的有关现场数字信号与该信号所代表的物理量不一定呈线性关系。例如, 从差压变送器送来的信号 X 与实际流量 Y 呈平方根关系, 即 $Y = k\sqrt{X}$; 又如, 铂电阻或热电偶与温度的关系也是非线性的。为了提高变换精度, 必须利用软件进行补偿, 即

线性化处理。通过软件实现非线性补偿的方法有算法、查表法和插值逼近法。

一、算法

在工程实际中，有许多非线性参数的关系是可以由数学方程来表示的，对非线性补偿就可按照实际公式进行计算。假定测量值和实际值之间的非线性关系为式(2-12)：

$$y = f(x) \quad (2-12)$$

式中， f 为非线性函数。

算法就是将 A/D 转换及数字滤波后的数据作为 x 代入式(2-12)进行计算，计算结果 y 就作为线性化处理后的被测值。

(1) 在温度测量中大量使用热电偶作为测温元件，但其被测温度 T_m 与输出热电势 E 之间呈现非线性关系，而且不同种类的热电偶非线性程度不一样。一般情况下，常见的温度与热电势的关系为式(2-13)：

$$T_m = \alpha_4 E^4 + \alpha_3 E^3 + \alpha_2 E^2 + \alpha_1 E + \alpha_0 \quad (2-13)$$

式中， $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_4$ 为热电偶系数，与热电偶的类型及其测量温度范围有关。

(2) 在流量测量中常用差压变送器，其输出差压信号 X 和实际流量 Y 呈平方根信号关系，即式(2-14)：

$$Y = k \sqrt{X} \quad (2-14)$$

计算机必须把差压信号 X 开平方根后才和流量呈线性关系。式中， k 是和孔板及被测流体的温度、压力有关的系数。

二、查表法

在计算机控制系统中，有些参数的计算非常复杂，如果直接用计算机在线计算不仅程序长，需要耗费大量 CPU 用时，还会涉及指数、对数、三角函数、积分、微分等运算。这些程序编写一般也比较复杂，因此可将数据对应表离线计算好，作为表格存入计算机内存，当采集到相应数据时，计算机自动查找表格中对应的数据作为其线性补偿值，以节省 CPU 用时并省去复杂的计算编程。查表是一种非数值的计算方法，利用这种方法可以完成数据补偿、计算、转换等工作，它具有程序简单、执行速度快等优点。

常用的查表法有顺序查表法、计算查表法和二分搜索法。顺序查表法适用于无序排列表格的查找。计算查表法适用于数据按一定的规律排列，并且搜索内容和表格数据地址之间的关系能用公式表示的有序表格。在实际应用中，很多表格尽管按一定顺序排列，但表格比较长，难以用计算查表法查找，如热电偶的热电势与温度对应表，流量测量中的差压和流量对照表等，这些表可用二分搜索法。

设一个表格字节长度为 N ，若采用顺序查表法，平均查找次数为 $N/2$ ；二分查表法的最多查找次数约为 $\log_2(N-1)+1$ 次。所以，当 N 较大时，和顺序查表法相比，二分法可以大大减少查表次数，提高检索效率。二分查表法的流程如图 2-17 所示。