

普通高等教育“九五”部级重点教材

普通高等教育机电类规划教材

计算机过程控制系统

天津大学 刘宝坤 主编



机械工业出版社
China Machine Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

普通高等教育电气工程及其自动化专业教材

计算机过程控制系统

王耀球 王耀南 王耀武 主编



普通高等教育“九五”部级重点教材
普通高等教育机电类规划教材

计算机过程控制系统

主编 刘宝坤
参编 石红瑞 李铁桥
杨天怡 阳宪惠
主审 王永初



机械工业出版社

本书为原机械工业部“九五”重点教材，按照测控技术与仪器专业教学指导小组制定的专业培养方案和审定的课程大纲编写的。

本书对计算机过程控制系统的原理、技术及设计方法进行了较全面的介绍。内容包括计算机常规控制系统、计算机现代控制系统、计算机控制系统设计、分散控制系统、现场总线及现场总线系统等。

本书可作为高等院校自动控制类、仪表类相关专业的本科生教材，也可供研究生、工程技术人员和科研工作者自学与参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机过程控制系统/刘宝坤主编. —北京: 机械工业出版社, 2000.10

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-07916-7

I. 计… II. 刘… III. 计算机控制: 过程控制—控制系统—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 69776 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: 樊钟英

封面设计: 李雨桥 责任印制: 郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·10.5 印张·407 千字

0 001—3 000 册

定价: 24.00 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

本书按照原机械工业部机电类测控技术与仪器专业教学指导委员会审定的编写大纲进行编写。第一章绪论，概括地介绍了计算机过程控制系统的特点、组成与分类。第二章计算机常规控制系统，介绍了单回路、串级、纯迟延补偿、前馈、均匀、比值、多变量解耦、最小拍无纹波等常规控制系统。第三章计算机现代控制系统，在讲述基于状态空间模型和基于输入输出模型设计的基础上，介绍了最优、自适应、预测、模糊、智能等控制系统。第四章计算机控制系统设计，介绍了计算机控制系统设计原则、系统设计技术、硬件结构、软件技术及系统测试。第五章分散控制系统，以 Network-90 为典型介绍了分散控制系统的过程控制单元、操作接口、通信网络、系统组态及应用设计，并介绍了可编程控制器的组成原理、选择及应用举例。第六章现场总线技术及现场总线系统，在简介现场总线的特点、通信模型与几种典型现场总线的基础上，重点介绍了基金会现场总线的通信模型、通信协议及现场总线系统。

本书由四所大学的五位教师共同编写，由天津大学刘宝坤主编。参加编写的有天津大学石红瑞（第二章）、哈尔滨工业大学李铁桥（第三章）、重庆大学杨天怡（第五章）、清华大学阳宪惠（第六章），其它章节由刘宝坤编写。华侨大学王永初教授担任主审，对全部书稿进行了细致的审阅，提出了许多宝贵意见。在此，编者向他表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中难免有不当或疏漏之处，望读者提出批评指正。

编者

2000.1 于天津

目 录

前言

第一章 绪论	1
第一节 计算机过程控制系统及其组成	1
一、计算机过程控制系统简介	1
二、计算机过程控制系统的组成	2
第二节 计算机过程控制系统的类型	4
一、按控制装置结构类型分	4
二、按被控对象的特点和要求分	8
三、按控制功能类型分	10
第二章 计算机常规控制系统	13
第一节 单回路控制系统	13
一、过程的数学模型	13
二、控制系统的性能指标	15
三、数字 PID 控制系统的整定	16
第二节 串级控制系统	20
一、串级控制系统的概念	20
二、串级控制系统的特点	22
三、串级控制系统的设计	25
四、串级控制系统的整定	26
第三节 纯延迟补偿系统	28
一、纯延迟过程的常规控制	28
二、采用补偿原理克服大延迟的影响	30
三、纯延迟补偿控制器的计算机实现（数字式 Smith 预估器）	32
四、大林算法	35
第四节 前馈控制系统	39
一、基本概念	39
二、静态前馈控制	41
三、动态前馈控制	42
四、前馈 - 反馈控制系统	44
第五节 均匀控制系统与比值控制系统	45
一、均匀控制系统	45
二、比值控制系统	48
第六节 多变量解耦控制系统	52

一、系统的关联和耦合	52
二、关联（耦合）程度分析	53
三、耦合性质	55
四、解耦控制系统的设计	59
第七节 最少拍无纹波系统设计	63
一、最少拍设计概述	63
二、最少拍无纹波随动系统设计	69
第三章 计算机现代控制系统	75
第一节 基于状态空间模型的设计	75
一、问题分析	75
二、系数矩阵 F 、 G 的计算	76
三、控制规律设计	77
四、观测器设计	80
五、控制器设计的进一步讨论	84
第二节 基于输入输出模型的设计	87
一、设计分析	88
二、丢番图方程及其最小阶解	90
三、控制器设计	91
四、进一步讨论	96
第三节 最优控制设计	99
一、最优控制原理与最优控制规律设计	99
二、最优状态估计器设计	103
第四节 自适应控制系统	106
一、模型参考自适应控制	106
二、参数自适应控制系统	111
第五节 预测控制系统	117
一、预测模型	117
二、参考轨迹模型	120
三、控制算法	120
四、应用举例	122
第六节 模糊控制系统	124
一、模糊控制基本原理	124
二、模糊控制器设计	125
三、模糊控制器性能改进	133
第七节 智能控制系统	137
一、分级递阶智能控制系统	138
二、专家控制系统	138
三、基于神经网络的控制系统	140

第四章 计算机控制系统设计	146
第一节 概述	146
一、计算机控制系统的类型	146
二、计算机控制系统设计工作的类别	146
三、系统设计原则	146
四、系统开发周期	147
第二节 系统设计技术	148
一、规范化设计技术	148
二、结构化设计技术	149
三、系统的功能规范	149
四、系统的总体设计方案	151
第三节 硬件体系结构	154
一、实时工业控制计算机系统结构类型	154
二、总线结构型工业控制计算机系统的组成	154
三、总线的分类	155
四、内部总线	156
第四节 计算机控制系统软件技术	170
一、操作系统	170
二、数据库	178
三、系统组态	192
第五节 软件调试与系统测试	210
第五章 分散控制系统	212
第一节 分散控制系统及发展	212
一、分散控制系统的基本概念	212
二、分散控制系统的基本结构	214
三、典型分散控制系统	216
四、分散控制系统的发展趋势	217
第二节 分散控制系统的过程控制单元	218
一、过程控制单元的硬件系统	218
二、过程控制单元的软件系统	224
三、Network-90 的过程控制单元	224
第三节 分散控制系统的操作接口	228
一、概述	228
二、Network-90 的操作接口	231
第四节 分散控制系统的通信网络	233
一、概述	233
二、Network-90 的通信系统	234
第五节 分散控制系统的组态	235

一、概述	235
二、Network-90 组态语言（功能块语言）	236
三、组态举例	237
第六节 分散控制系统的设计与应用	240
一、分散控制系统设计的步骤	240
二、分散控制系统在电炉冶炼控制中的应用	243
三、用 Network-90 系统实现双交叉限幅燃烧控制	246
四、Network-90 在电厂的应用	252
第七节 可编程控制器	256
一、可编程控制器的组成原理及选择	256
二、OMRON C200H	262
三、可编程控制器的应用	266
第六章 现场总线技术及现场总线系统	271
第一节 现场总线简介	271
一、什么是现场总线	271
二、现场总线的特点与优点	272
三、以现场总线为纽带的网络集成式全分布控制系统	274
第二节 几种现场总线的通信模型与技术特色	277
一、OSI 参考模型	277
二、OSI 与现场总线通信模型	279
三、基金会现场总线（Foundation Fieldbus 简称 FF）	280
四、LonWorks 技术	281
五、Profibus 技术	282
六、CAN 总线	282
七、HART 通信协议	283
第三节 基金会现场总线的通信模型与部分通信协议	283
一、基金会现场总线通信模型的主要组成	283
二、协议数据的构成与层次	285
三、基金会现场总线的物理层及其网络连接	286
四、数据链路层与链路活动调度	290
五、应用层与虚拟通信关系	293
六、用户层与功能块应用	296
第四节 现场总线系统	299
一、现场总线网络系统	299
二、现场总线控制系统	305
附录	310
附录 A EISA 各排引脚分配与信号一览表	310
附录 B VESA 插槽引脚、连接器引脚统计	313

附录 C PCI 连接器引脚分配	316
附录 D Network-90 的功能块及其功能码	319
附录 E C200H PC 的指令与功能表	321
参考文献	325

第一章 绪 论

第一节 计算机过程控制系统及其组成

一、计算机过程控制系统简介

(一) 过程控制系统

工业生产过程的自动控制与电力拖动、电机运转的自动控制分属两个范畴。本书讲述工业生产过程的自动控制，即石油、化工、冶金、电力、轻工、纺织等连续生产过程的自动控制，称之为过程控制系统。其被控量主要是温度、压力、流量、料位和成分等。

实现生产过程的自动控制需要充分考虑被控过程的特点及控制系统的需求。过程控制系统通常要求保持被控参数为某一确定值或按照某一定规律而变化。然而，生产过程中的某一个被控参数，往往受外界环境条件的影响，而且还会与过程中的其它参数存在着相互影响。这样对某些参数进行自动控制，就造成一定的困难。

生产过程的工艺设备大多较庞大，当流入或流出对象的物质或能量发生变化时，由于存在容量、惯性和阻力，被控参数不可能立即反映出来，生产设备规模愈大，物质传递距离愈远，传递阻力愈大，则造成的滞后愈大，实现生产过程的自动控制愈困难。

被控对象往往存在非线性特性，若仅以理想的线性特性为系统的设计依据，则难以达到较理想的控制指标。

对象若具有惯性环节的特性，它有自动趋向平衡的能力。对象若具有积分特性，它不具备自动趋向平衡的能力。一旦被控参数发生变化，前者本身能使被控参数稳定下来，后者的参数则一直变化。

过程控制系统的设计工作，其实质便是依据不同的对象特性及控制系统的性能指标，确定控制方案，并设计控制器。为获得实用的过程控制系统，在理论分析与计算工作的基础上，尚需对现场系统调整工作予以足够的重视。

过程控制系统已有六十多年的历史。利用常规模拟仪表实现自动控制功能，称其为常规过程控制系统。常规模拟仪表历经了自力式、基地式、气动单元组合式、电动单元组合式、组件组装式等不同类型仪表装置的推出与应用。在常规模拟仪表不断更新换代的过程中，常规过程控制系统的功能也在不断完善与提高。

近二十年来,随着计算机技术的发展,已将计算机用于过程控制系统,称之为计算机过程控制系统。

(二) 计算机过程控制系统

计算机过程控制系统由被控对象、传感变送器、计算机装置和执行机构组成,如图 1-1 所示。其中控制器的核心可以是微处理器、单片计算机或微型计算机。

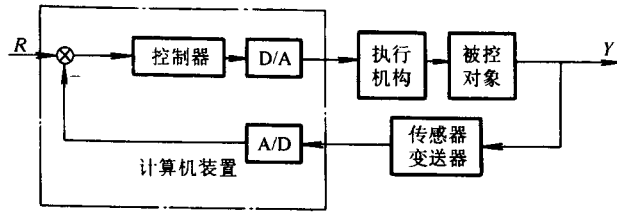


图 1-1 计算机过程控制系统基本结构

计算机过程控制综合了

计算机、生产过程和自动控制理论等方面的知识。自动控制理论是计算机控制的理论支柱,计算机技术的发展又促进了自动控制理论的应用与发展。

计算机过程控制系统与常规过程控制系统相比而言,其主要特点体现在三个方面:控制器的核心器件;控制规律的实现方法;控制功能的灵活性与先进性。

常规过程控制系统的控制器为模拟调节器,其核心器件是模拟电子器件构成的模拟电路。它由相关的模拟器件实现所需的控制规律。控制器的参数借助可调阻、容器件进行调整。若需要改变控制方案,则必须更换模拟调节器的模拟电路。

由于计算机过程控制系统的控制器其核心是微处理器、单片计算机或微型计算机,它们不是用模拟器件实现控制规律,而是由计算机的软件实施。改变系统控制方案不必更换硬件,只是对软件进行选择、组合或补充即可。软件愈丰富系统控制功能愈灵活。

二、计算机过程控制系统的组成

计算机过程控制系统的基本结构如图 1-1 所示,传感器、变送器和执行机构均为自动化仪表。计算机装置在各种控制系统中可以是多种多样的,但概括起来均由硬件和软件两部分组成。

(一) 硬件

计算机过程控制系统的硬件组成框图如图 1-2 所示。其中计算机装置的主要组成部分是主机、过程输入输出通道和人机联系装置。

1. 主机

计算机过程控制系统的核心——主机由中央处理器 CPU 和内存存储器 RAM、ROM 组成。

中央处理器由运算器、控制器等部分组成,它承担逐条取出程序指令、译码及执行指令等任务。

内存存储器用于存放数据采集、数据处理、控制运算等任务的程序与数据。

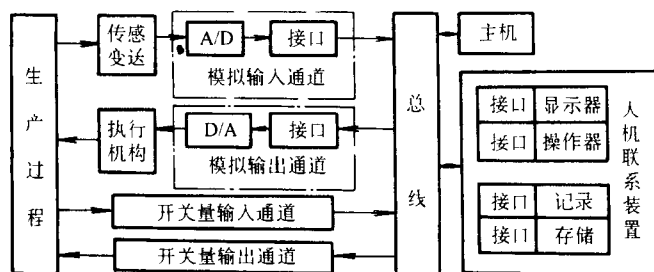


图 1-2 计算机过程控制系统硬件组成框图

2. 过程输入输出通道

计算机处理的是数字信息，而生产过程的被控参数是各种连续的物理量（温度、压力、流量、料位、成分）。物理量经传感器、变送器转换成连续的模拟电信号，这些信号与主计算机之间需通过模拟量过程输入通道进行信息传输。

主机由模拟量过程输入通道获得生产过程的实时信息后，通过执行程序，完成数据处理与控制运算，并输出控制信息。主机输出的控制信息是数字量，它需通过模拟量过程输出通道提供执行机构所需的模拟信息。

开关量过程输入通道用于输入开关量信号或数字量信号。开关量过程输出通道用于输出开关量信号或数字量信号。

总之，过程输入输出通道是主机与生产过程之间进行信息传输的桥梁。各种输入输出通道均需设置合理的接口电路方可通过总线与主机连接。

3. 人机联系装置

计算机过程控制系统用于对生产过程进行自动控制，系统投入运行之前的系统组态、参数设定、系统启动过程，以及系统运行过程中监视、调整等工作均要有操作人员参与。操作员与计算机装置之间的信息交换是通过人机联系装置进行的。

计算机过程控制系统的操作员分为系统操作员和生产操作员两种。前者负责编制程序和系统组态等建立控制系统的工作；后者负责保证生产过程正常运行的监视与操作。

人机联系装置包括：显示、操作、记录与存储等设备。显示、操作设备是必须的，可以采用 CRT 显示器与键盘，或者采用含有 LED（或 LCD）显示器与按键的显示面板等形式。其作用是显示生产过程的实时运行参数与运行状态，供操作员操作，显示操作结果等。记录与存储设备视不同计算机装置而定。记录设备可选用不同类型的打印机，用于打印生产数据表格、曲线等。存储设备通常是计算机的外存储器，如磁盘或磁带，它们兼有输入和输出两种功能。操作员可用来输入程序、存放生产过程的各种运行数据文件等。

（二）软件

计算机过程控制系统的硬件只是控制系统的躯体，系统的大脑和灵魂是各种软件。计算机控制装置配置了必要的软件，才能针对生产过程的运行状态，按照人的思维和知识进行自动控制，完成预定控制功能。计算机控制装置的软件通常分为两大类：系统软件和应用软件。

1. 系统软件

系统软件是主机基本配置的软件，一般包括操作系统、监视程序、诊断程序、程序设计系统、数据库系统、通信网络软件等。系统软件由计算机装置设计者和制造厂提供。控制系统设计人员要了解并学会使用系统软件，利用系统软件提供的环境，针对某一控制系统的具体任务，为达到控制目的进行应用软件的设计工作。

2. 应用软件

应用软件是针对某一生产过程，依照控制系统设计人员的设计思想，为达到控制目的而设计的程序。应用软件一般包括基本运算、逻辑运算、数据采集、数据处理、控制运算、控制输出、打印输出、数据存储、操作处理、显示管理等程序。

数据采集、数据处理程序服务于过程输入通道。控制输出程序服务于过程输出通道。控制运算程序是应用软件的核心、是实施系统控制方案的关键。

随着计算机硬件技术的日臻完善，软件工作的重要性日益突出。同样的硬件，配置高性能软件，可取得良好控制效果。反之，可能达不到预定控制目的。

由于应用软件是由控制系统设计者为实现本系统的特定功能而开发的软件，所以控制系统设计人员需对应用软件的设计工作量予以足够重视。

第二节 计算机过程控制系统的类型

计算机过程控制系统可按不同方式进行分类。

按被控参数分类，有温度控制系统、压力控制系统、流量控制系统、液位控制系统等。

按设定值的形式分类，要求被控制参量保持在规定小范围不变，取设定值为固定值，称为定值控制系统。要求被控参数跟随某一无规律变化的参量而变化，设定值为无规律变化值，称为随动控制系统。若要求被控参数依照工艺需要按一定规律变化，则设定值应是有规律变化的，称之为程序控制系统。

计算机过程控制系统还可以按控制系统中控制装置结构类型分类，或按被控对象的特点和要求分类，或按控制功能分类。

一、按控制装置结构类型分

随着计算机技术、自动控制技术、通信技术的发展，计算机过程控制系统的

计算机装置涌现了多种类型的体系结构，由它们分别实施的计算机过程控制系统各有其特点。包括已广泛应用、正在推广应用和将推广应用的控制系统有如下几类：仪表装置型控制系统、分散控制型控制系统、工业控制机型控制系统、远程 I/O 型控制系统、现场总线型控制系统和现场总线分散控制型系统。

（一）仪表装置型控制系统

常规控制系统是由模拟式自动化仪表装置承担自动控制任务。仪表装置型计算机过程控制系统则由微机化的自动化仪表装置承担自动控制任务。微机化的仪表装置虽然其外型结构与常规模拟仪表装置很相似，但其内部含有单片计算机，控制规律由软件实现，应属计算机控制装置。

由于单片机技术的迅速普及与推广，国内外许多厂商推出了品类繁多的含有单片机的变送器、调节器与执行器，并已被广泛应用于工业生产过程的自动控制系统。与常规过程控制系统相比，仪表装置型计算机过程控制系统具有功能丰富、可靠性高等优点。

（二）分散控制型控制系统

20 世纪 60 年代，自动控制领域将一台电子计算机用于直接控制一个车间的集中控制，由于当时计算机的可靠性不高，未能推广。20 世纪 70 年代问世的分散型控制系统 DCS（Distributed Control System）用于生产过程的自动控制，已有二十余年的历程。分散是指工艺设备地理位置分散，控制设备相应分散，危险也随之分散。

分散控制系统一般分为三级如图 1-3 所示。第一级为现场控制级，它承担分散控制任务并与过程及操作站联系。第二级为操作站，包括控制信息的集中操作管理。第三级为全系统信息综合管理级。

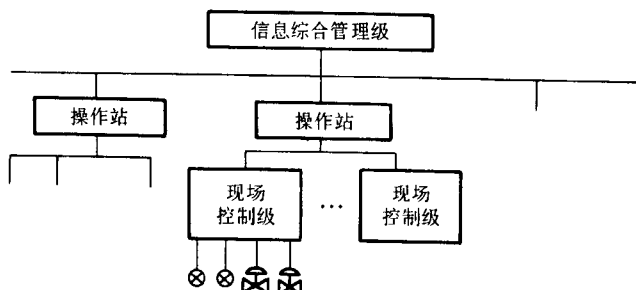


图 1-3 分散控制系统

分散控制系统的五个组成部分是现场控制单元、操作站、通信网络、网间连接器和主计算机系统。

将复杂对象分解为几个子对象，由现场控制级进行局部控制。主计算机实施最优控制策略，协调若干个现场控制单元，使系统整体运行最佳。

分散控制系统具有高度集中的显示操作功能,操作灵活、方便可靠;具有完善的控制功能,可实现多种多样的高级控制方案。

分散控制系统采用数据通信技术构成工业局部网络,传输工业生产实时控制信息,并进行信息综合管理。

可靠性是分散控制系统的生命线。平均无故障时间 MTBF 可达 5×10^4 h。平均故障修复时间 MTTR 一般只有 5min。保证高可靠性的关键是采用冗余技术和容错技术。

分散控制系统的模块结构使系统的配置与系统的扩展十分方便,具有良好的可扩性。

(三) 工业控制机型控制系统

随着计算机技术的发展,其可靠性得以大幅度提高,平均无故障时间 MTBF 已达 10 年以上。于是在 80 年代中期又出现了一种应用于工业自动控制系统中的工业控制机 IPC。

工业控制机 IPC 由主机、各种接口板、显示器、键盘、外存组成。结构上分为一体式和分体式两种。分体式将显示器和键盘作为两个单体,主机箱内根据控制系统需要而配置接口板和外存。

工业控制机型控制系统中除工业控制机之外,还包括传感器、变送器、执行机构等。

据 90 年代国外文献综述报导,使用 DCS 与使用 IPC,其投资比为 4:1 (含软件)。而且,在计算机的功能迅速提高的同时,其价格却在不断降低,该势头有增无减。

IPC 型控制系统的可靠性、性能价格比具有强大优势。值得指出,IPC 不仅具有连续参量的控制功能,还具有 PLC 控制功能。

(四) 远程 I/O 型控制系统

DCS 和 IPC 均需解决微型机与工业现场仪表之间的信息传输问题。DCS 利用现场控制单元 FCU 上的输入/输出端子板接受检测信息,送出操作信息,实现与现场仪表装置的联系。IPC 利用机内插装的 I/O 板及外部端子排与现场仪表装置联系。这些传输信息以 (4~20)mA.DC 模拟信号为主,辅以开关信号。DCS 或 IPC 与现场仪表联系愈多,则连接线也愈多。

随着数字通信技术的发展,为 DCS 或 IPC 采用数字通信方式获取工业现场信息创造了良好环境。该方案具有双向传输信息、节省布线投资等优点。

远程 I/O 型控制系统结构框图如图 1-4 所示。图 1-4a 由插入主机内槽的网络接口卡经通信总线与各个前端测量模块进行数据通信。不同的前端模块可以完成不同现场信息的预处理、信息传输等任务。每个前端模块可连接若干个现场仪表。图 1-4b 与 a 的区别在于:由单独设置的网络接口模块实现主机和各个前

端模块之间的数据通信。图 1-4 所示远程 I/O 型控制系统，其上位机与现场仪表（变送器或执行器）之间的信息传输是由数字通信方式取代了(4~20)mA 模拟信号。前端模块通常安装在现场。

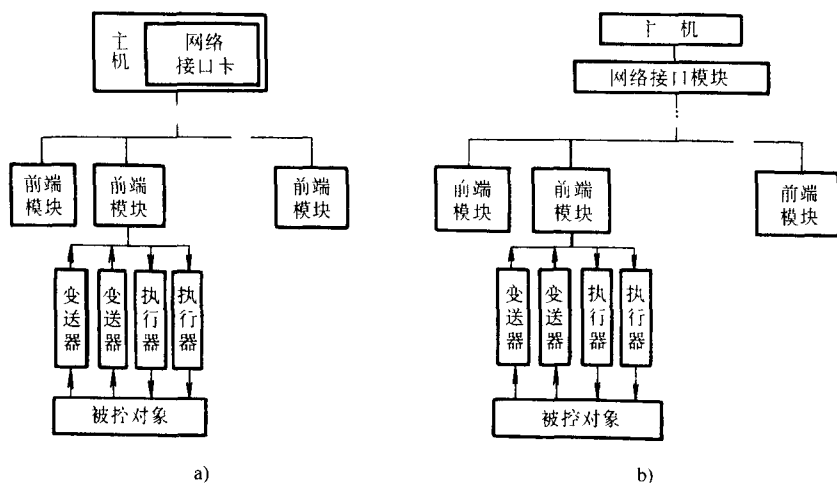


图 1-4 远程 I/O 型控制系统

前端模块是一种智能前端，其主要功能为：由软件命令指定每一通道的输入或输出功能、量程范围及工作方式；实现量程自动变换、数字滤波及工程单位换算；对放大器进行零漂校正；对热电偶信号进行自动冷端温度补偿和非线性处理等。

前端模块具有高精度、高智能、高抗干扰能力、高可靠性、低功耗等优点。通常还具有良好的防尘、防潮、防震性能，适宜现场安装。

前端模块的结构分两种：普通单体型和单板型。前者有金属外壳封装；后者无单独外壳，可安装在专用机箱内，适用于测点较多相对集中且现场条件较好的场合。在一个系统中两种结构的前端模块允许混合应用。

若每个网络接口模块可连接 30 个智能前端，且每个智能前端模块有 20 个测点，则网络的同一通信线路可远距传输 600 个测点信息。

（五）现场总线型控制系统

远程 I/O 型控制系统中主计算机以数字通信方式和诸前端模块进行数据交换，现场自动化仪表（变送器、执行器）的模拟信号经过前端模块与主机联系。

随着数字通信技术的发展，推进着现场级信息网络技术的发展，在国际上出现了现场总线技术。近几年现场总线技术一直是国际自动化领域的热点。

现场总线的概念包含两方面内容。首先，现场总线是一种通信标准，是全数字化、双向、多信息、多主站通信规程的可应用之技术。把控制功能分散到现场装置中，并能实现以数字形式宽范围的通信。其次现场总线的通信标准是开放的，控制系统中的现场仪表装置，用户可自由选择不同厂商的符合标准的产品，