



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DIANLI XITONG ZIDONG  
ZHUANGZHI YUANLI

# 电力系统自动 装置原理

(第四版)

杨冠城 主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

TM76

5=4

2007

DIANLI XITONG ZIDONG  
ZHUANGZHI YUANLI

# 电力系统自动 装置原理

( 第四版 )

主 编 杨冠城  
编 写 解 大  
主 审 盛寿麟  
于继来



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

全书共分为6章, 主要内容包括自动装置及其数据的采集、同步发电机的自动并列、同步发电机励磁自动控制系统、励磁自动控制系统的动态特性、电力系统频率及有功功率的自动调节、电力系统自动低频减载及其他安全自动控制装置。书后附有思考题, 便于自学。

本书主要作为高等院校电气工程及其自动化专业的本科教材, 也可作为函授和高职高专相关专业教材, 同时可供工程技术人员参考使用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统自动装置原理/杨冠城主编. —4版. —北京:  
中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-5191-9

I. 电... II. 杨... III. 电力系统—自动装置—  
理论—高等学校—教材 IV. TM76

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 011879 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

1986年11月第一版

2007年3月第四版 2007年3月北京第二十三次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 12印张 292千字

印数 126761—131760册 定价 21.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换)

# 前 言

信息技术飞跃发展,计算机数字控制技术已十分成熟并广为应用。电力系统自动装置原理(第二版)教材中所列举的布线逻辑模拟技术装置已很难适应当前的教学要求。

电力系统自动装置原理(第二版)的教学大纲是由原能源部高等学校电力工程专业教学委员会制订并经其所属的自动远动教学组审定。它凝聚了几乎全国高校同行长期的教学经验。因此编者认为该教材主体仍可沿用。

电力系统自动装置原理(第三版)在该书第二版的基础上修改编写,新增加一章计算机数字控制技术基础(第一章),原有五章的顺序不变,内容和所列举的装置改为存储逻辑数字控制,使之适应自动控制技术的发展方向,以满足教学要求。

本书(第四版)仍保持原有章节顺序不变,将第三章中的励磁调节装置原理内容加以调整和补充,并在书后加入相应的思考题,更便于教学使用。

电力系统自动装置原理(第四版)由上海交通大学杨冠城和解大编写。全书共六章,其中第二、五、六章由杨冠城执笔;第一、四章及第三章第一~四节由解大执笔;第三章的第五节由杨冠城、解大共同编撰。本书由杨冠城任主编并统稿。全书承西安交通大学盛寿麟教授、哈尔滨工业大学于继来博士生导师审阅,并对本书的编写提出许多宝贵意见,为提高本教材质量做出了贡献,在此表示衷心的感谢。

在编写本书的过程中,得到了华东电网有限公司电力调度中心、上海市电力公司的调度通信中心、市南供电公司、电网建设公司和上海发电设备成套设计研究所等单位热情的支持和帮助,许多同志还提供了相关资料。在此一并深表感谢。

由于编者水平有限,对于书中的不足与错误之处,敬请读者批评指正。

编者

## 目 录

前言	
绪论	1
<b>第一章 自动装置及其数据的采集处理</b>	<b>4</b>
第一节 自动装置的组成	4
第二节 采样、量化与编码技术	9
第三节 交流采样的电量计算和前置算法	12
<b>第二章 同步发电机的自动并列</b>	<b>17</b>
第一节 概述	17
第二节 准同期并列的基本原理	22
第三节 自动并列装置的工作原理	27
第四节 频率差与电压差的调整	37
第五节 微机型(数字型)并列装置的组成	38
<b>第三章 同步发电机励磁自动控制系统</b>	<b>43</b>
第一节 概述	43
第二节 同步发电机励磁系统	51
第三节 励磁系统中的整流电路	55
第四节 励磁控制系统调节特性和并联机组间的无功分配	65
第五节 励磁调节装置原理	73
<b>第四章 励磁自动控制系统的动态特性</b>	<b>96</b>
第一节 概述	96
第二节 励磁控制系统的传递函数	97
第三节 励磁自动控制系统的稳定性	104
第四节 励磁自动控制系统对电力系统稳定的影响	108
<b>第五章 电力系统频率及有功功率的自动调节</b>	<b>124</b>
第一节 电力系统的频率特性	124
第二节 调速器原理	132
第三节 电力系统的频率调节系统及其特性	139
第四节 电力系统自动调频	151
第五节 电力系统的经济调度与自动调频	160
<b>第六章 电力系统自动低频减载及其他安全自动控制装置</b>	<b>166</b>
第一节 概述	166
第二节 自动低频减载	167
第三节 其他安全自动控制装置	178
附录: 电力系统自动装置原理思考题	182
参考文献	186

## 绪 论

### 一、电力系统及其运行

我国电力行业经过 50 多年的建设,无论在生产运行、设计、安装和制造方面都有了很大的发展,取得了举世瞩目的成就。解放前,我国发电设备容量只有 185 万 kW;到 2000 年,我国装机容量已达到 2.5 亿 kW。“七五”期间,地处长江天险的葛洲坝水电厂以  $\pm 500\text{kV}$  直流输电至上海,输送容量达 120 万 kW。“八五”期间,大亚湾核电厂发电机组的单机容量达 90 万 kW。“九五”期间,上海外高桥火电厂装机容量达 320 万 kW,最大单机容量 90 万 kW。随着大容量机组的出现,我国交流输电最高电压等级已达 500kV。“九五”期间,我国已建成七个装机容量达 1500 万 kW 以上规模的 500kV 电网。

电力系统的高速发展,发电厂和变电所相应实现了自动化,应用远动通信技术和计算机技术,对电力系统进行自动监视、控制和调度。为了更好地保证安全、经济运行并保证电能质量,对电力系统自动化提出了更高的要求,从而促进了电力系统自动控制技术的不断发展,我国广大电力科技工作者和工程技术人员在这方面进行了卓有成效的工作,取得了可喜的成绩。

电能在生产、传输和分配过程中遵循着功率平衡的原则。所以由发电厂、变电所、输电网、配电和用电等设备所组成的电力系统,在运行中是一个有机的整体。电力系统分布在广阔的地区,其组成如图 0-1 所示。调度控制中心对所管辖的电力系统进行监视和控制,其主要任务是合理地调度所属各发电厂的出力,制定运行方式,及时处理电力系统运行中所发生的问题,确保系统的安全经济运行。

发电厂转换生产电能,按一次能源的不同又分为火电厂、水电厂、核电厂等不同类型的电厂。各类电厂的生产过程各不相同,控制规律各异,它们在电力系统运行中的任务也有所侧重,但是,安全经济地完成给予的发电任务是对各类电厂共同的要求。

配电网是直接向用户供电的地区电网。随着城乡经济建设的发展、人们生活的改善和电气化程度的提高,人们生活离不开电力正常供应,对供电可靠性也提出了更高的要求。

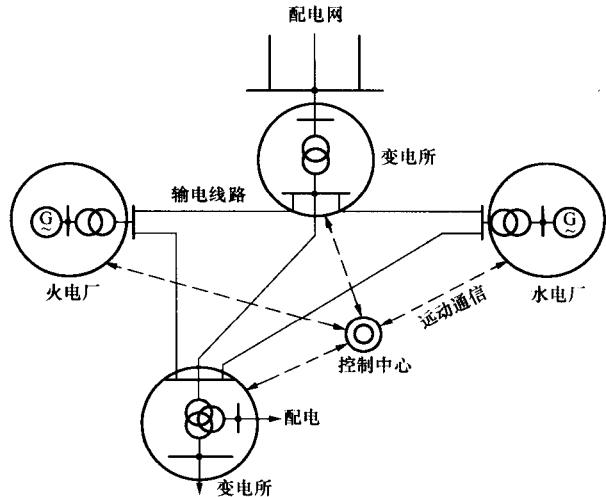


图 0-1 电力系统的组成

## 二、电力系统自动控制的划分

任何一个自动控制系统都可用图 0-2 所示的框图表示。控制对象的运行状态信息传送给自动控制装置；自动控制装置对送来的信息进行综合分析，按控制要求发出控制信息即控制指令，以实现其预定的控制目标。

根据电力系统的组成和运行特点，电力系统中的自动控制大致划分为如下几个不同内容的控制系统。

### 1. 电力系统自动监视和控制

电力系统自动监视和控制，其主要任务是提高电力系统的安全、经济运行水平。电力系统中各发电厂、变电所把反映电力系统运行状态的实时信息，由远动终端装置送至调度控制中心的计算机系统，由计算机及时地对电力系统的运行进行分析进而提供控制方案并通过人机联系系统显示出来，供运行人员监控决策参考。这样不仅为运行人员集中精力指挥电网运行创造条件，而且由于经安全分析后所及时采取的预防性控制，可极大地提高电网运行的安全性。在计算机的经济运行软件支持下，还把电力系统的经济运行提高到一个新的水平。

### 2. 电厂动力机械自动控制

电厂的动力机械随电厂类型不同而有很大差别，如水电厂、火电厂、核电厂等，它们的动力设备截然不同，其控制要求和控制规律相差很大。火电厂中锅炉和汽轮机的自动控制系统与水电厂中水力机械的自动控制系统分属各自的专业对这一领域进行的研究。

电厂动力机械的自动控制是电厂自动控制的主要组成部分。现在 200MW 以上的汽轮发电机组，需配置专用计算机进行监控。

### 3. 电力系统自动装置

发电厂、变电所电气主接线设备运行的控制与操作的自动装置，是直接为电力系统安全、经济和保证电能质量服务的基础自动化设备。

同步发电机是转换产生电能的机械，如图 0-3 所示。它有两个可控输入量——动力元素和励磁电流，其输出量为有功功率和无功功率，它们还分别与电网的频率和发电机端电压的电能质量有关。图 0-3 中所示的  $P-f$  控制器和  $Q-U$  控制器，是电力系统维持电能质量的自动装置。

电气设备的操作分正常操作和反事故操作两种类型。例如按运行计划将发电机并网运行的操作为正常操作。电网突然发生事故，为防止事故扩大的紧急操作为反事故操作。防止电力系统的

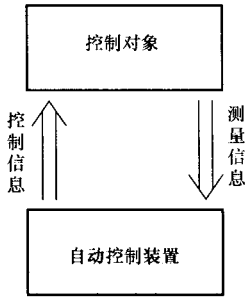


图 0-2 典型自动控制系统

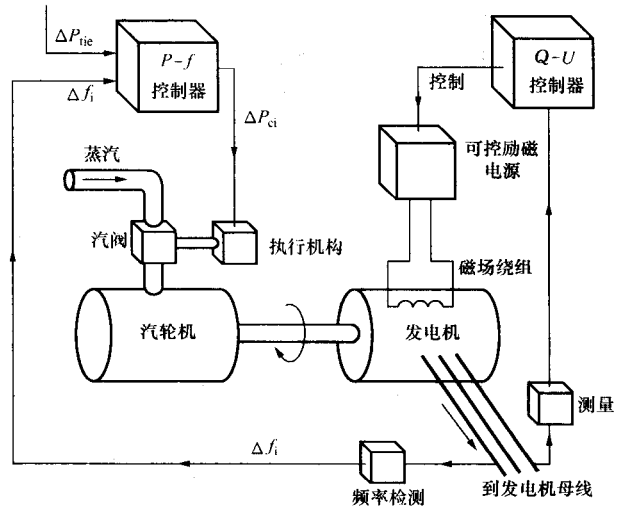


图 0-3 发电自动控制示意图

系统性事故采取相应对策的自动操作装置称为电力系统安全自动控制装置。电气设备操作的自动化是电力系统自动化的基础。

#### 4. 电力安全装置

发电厂、变电所等电力系统运行操作的安全装置,是为了保障电力系统运行人员的人身安全的监护装置。由于电力操作是一项具有一定危险性的工作,每年都有许多惨痛的教训,因此安全装置成为人们长期努力力图攻克的目标,其功能是保障操作人员的生命安全。这类自动装置还在发展中,暂不列入本课程的教学内容。

### 三、本课程的主要内容

电压和频率是电能质量的两个主要指标。本书对同步发电机励磁自动控制和频率—有功功率自动控制进行较为深入的讨论;同步发电机并网运行操作是电气设备正常运行操作的重要内容,对此作了较系统的介绍。

电力系统发生事故时,需要采取各种自动控制措施以确保系统的安全运行。自动控制措施中所用自动装置原则上都属于本课程的研究内容,但由于继电保护已自成体系则另设课程专门讲授,而涉及电力系统安全运行的自动装置则列为本课程的讲述内容。

由此可见,电力系统自动装置有两种类型:自动调节装置和自动操作装置。自动调节的基本理论在自动控制理论课程中讲授。涉及电力系统运行的基础知识在电力系统稳态分析、暂态分析等专业课程中讲授。本课程侧重于根据电力系统运行特点,在实施其自动控制时所遵循的规律和自动装置的组成及运行要求等方面进行阐述。

近年来,大规模、超大规模集成电子器件不断推出;计算机技术和数据通信技术的发展,使自动控制技术也日新月异不断更新;计算机控制技术在电力系统自动装置中已广泛应用,有微机控制系统、集散控制系统、以及分布式控制系统等。

鉴于数字式自动装置在电力系统中的广泛应用,本书重点将介绍数字化技术在本领域的应用原理,以及典型数字式自动装置的结构和特点。

根据教学大纲的要求,本书分六章讲授。

(1) 第一章自动装置及其数据的采集处理:阐述电力系统数字式自动装置组成模式和数据处理方面的基础知识。

(2) 第二章同步发电机的自动并列:这是电厂运行中发电机组的一项重要操作,是电气自动控制装置较为典型的例子。

(3) 第三、四章同步发电机励磁自动控制系统及其动态特性:这是发电机自动调节系统的一个典型应用。在此作了较为深入的讨论。

(4) 第五章电力系统频率和有功功率自动控制:频率是电能质量的重要指标。有功功率潮流是电力系统经济运行和系统运行方式中的重要问题。本章就电力系统的频率特性和调频的有关问题展开讨论,侧重于阐述控制系统特性及功率分配等问题。

(5) 第六章电力系统自动低频减载及其他安全自动控制装置:重点介绍按频率自动减载装置,这是电力系统在事故情况下较为典型防止系统性事故的安全自动控制装置。



# 第一章 自动装置及其数据的采集处理

## 第一节 自动装置的组成

随着计算机技术的飞速发展,利用微机构成电力系统自动装置已非常成熟并广为应用。电力系统运行的主要参数是连续的模拟量,而计算机内部参与运算的信号是离散的二进制数字信号,所以,自动装置的首要任务是将连续的模拟信号采集并转换成离散的数字信号后进入计算机,即数据采集和模拟信号的数字化。

本章重点介绍电力系统自动装置硬件的基本结构形式及数据采集和处理的工作原理。

### 一、硬件组成形式

从硬件方面看,目前电力系统自动装置的结构形式主要有三种,即微型计算机系统、工业控制计算机系统、集散控制系统(Distributed Control System—DCS)和现场总线系统(Fieldbus Control System—FCS)。在电力系统中,对于控制功能单一的自动装置所需采集的电气量不是很多,微型计算机系统就可满足运行要求,例如同步发电机自动并列装置;对于控制功能要求较高、软件开发任务较为繁重的系统,例如发电机励磁自动调节系统,大多采用工业控制计算机系统;而对于分散的多对象的成套监测控制装置则采用DCS或FCS,例如发电厂、变电所一些远动装置以及热电厂机炉集控系统等。

#### (一) 微型计算机系统

当前微型计算机的概念非常广泛,也很难恰当定义。有功能极强的计算机也属于微型计算机系统。这里把较简单的、借助于特定开发平台才能编程的系统称为微型计算机系统。其实随着科技的发展,上述定义并非固定不变。

电力系统自动装置常用的微型计算机系统一般由传感器、采样保持器、模拟多路开关、A/D转换器、存储器、通信单元、中央处理单元(CPU)及外设等部分组成,如图1-1所示。

#### 1. 传感器

传感器的作用是把压力、温度、转速等非电量或电压、电流、功率等电量转换为对应的电压或电流量的弱电信号,即转换

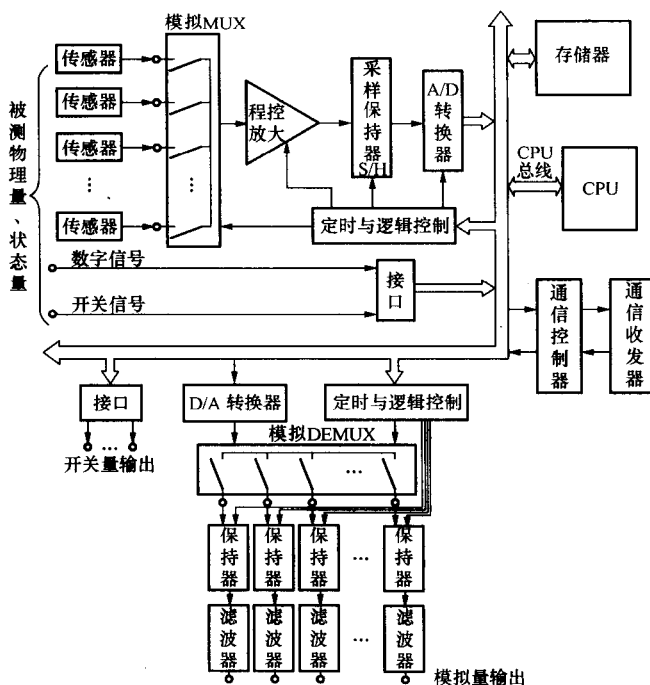


图 1-1 微型计算机系统框图

成能输入计算机的电信号。

在电力系统中目前用得比较多的为模拟变送器。它的输入量为被测参数，输出量为与其输入量成正比（可供微机采样）的直流电压或电流；也有交流接口，就是把电流互感器二次侧电流、电压互感器二次侧电压经过中间变流器或中间变压器转换成与其成比例的、幅值较低的交流电压。

## 2. 模拟多路开关 (MUX)

数据采集装置要对多路模拟量进行采集。在速度要求不高的场合，一般采用公共的A/D转换器，分时对各路模拟量进行模/数转换，即用模拟多路开关来轮流切换各路模拟量与A/D转换器间的通道，使得在一个特定的时间内，只允许一路模拟信号输入到A/D转换器，目的是简化电路、降低成本。

## 3. 采样/保持器 (S/H)

A/D转换器完成一路转换需要一定时间，在这段时间内希望A/D转换器输入端的模拟信号电压保持不变，这可以由S/H来实现。

采样/保持器的基本电路如图1-2所示，它一般由模拟开关、保持电容器和缓冲放大器组成。其工作原理如下。

采样期间，在控制信号为高电平时，模拟开关S闭合，输入信号 $u_{in}$ 经高增益放大器A1后的输出通道通过模拟开关向电容器C快速充电，使电容器电压迅速达到输入电平值。

保持期间，使控制信号为低电平，模拟开关S断开，由于运算放大器A2输入阻抗很高，理想情况下，电容器将保持充电时的最终值，即在电容器C上保持采样信号。A2输出的 $u_{ou}$ 送到A/D转换器。要使电容器上电压保持时间长，需要电容量足够大，A2输入阻抗足够高。

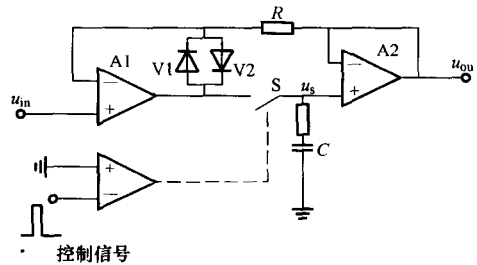


图 1-2 采样/保持器基本电路及波形

目前采样/保持电路大多集成在单一芯片中，芯片内不含保持电容器，保持电容器由用户根据需要选择。

## 4. A/D 转换器

因为计算机只能处理数字信号，所以需要把模拟信号转换为数字信号，完成这一功能的元件就是A/D转换器。A/D转换器是影响数据采集速率和精度的主要因素之一。

## 5. 存储器

存储器用于数据缓存，提供进一步数据处理。

## 6. 通信单元

根据需要可设置通信单元与上位计算机通信。通信单元包括通信控制器和通信收发器两个部分：通信控制器用来控制通信过程，确定通信的数据、地址以及建立/拆除通信的数据链路；通信收发器用来处理通信的物理层功能，包括物理引线的排列、机械特性和物理电平等。

## 7. CPU 及外部设备

这是自动装置的核心部件,对系统的工作进行控制和管理,对采集到的数据作必要处理,然后根据要求做出判断和发出指令等。

微型计算机系统结构简单,容易实现,能够满足中、小规模自动装置的要求,对环境的要求不是很高,能够在比较恶劣的环境下工作,且价格低廉,可降低系统的投资。

### (二) 工业控制计算机系统

工业控制计算机系统一般由稳压电源、机箱和不同功能的总线模板,以及键盘等外设接口组成。

工业控制计算机系统中内部总线种类繁多,如 STD、PC104 等,发展很快,而早期的工业控制计算机较多采用 STD 总线,即工业控制标准总线,广泛应用于冶金、化工和电力等领域。STD 总线机内对 56 根线做了合理的安排,信号之间的隔离消除了大部分总线上的干扰,单元为小模板结构,每块模板功能具有相当的独立性,实现了板级功能的分散,图 1-3 为 STD 总线工业控制计算机的结构示意图。其他工控机都具有相似的结构。

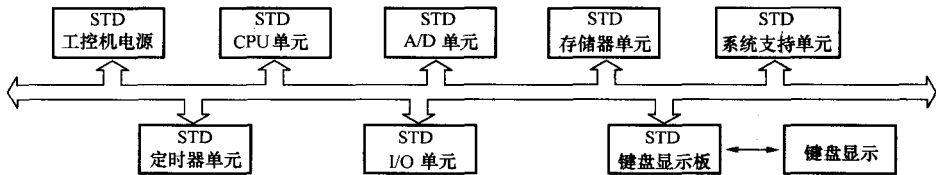


图 1-3 STD 总线工业控制计算机结构示意图

#### 1. CPU 单元

CPU 单元的主要功能是作为 STD 总线的主处理单元,处理 STD 总线上的数据、地址和各种控制功能,并且控制其他 STD 功能单元的工作,以及进行整个工控系统的计算、数据处理、控制等工作。STD 总线的 CPU 单元一般含有高速的 CPU 和协处理器,能够与计算机 PC/XT 总线兼容。

#### 2. A/D 单元

A/D 单元主要提供模数转换的接口。模数转换和数据读取的时刻可由 CPU 单元控制,也可由外部触发来决定。

#### 3. 存储器单元

存储器单元的主要功能是作为通用存储器的扩展卡,卡上含有 STD 接口、译码、存储器、后备电池等,可防止失电后数据丢失。

#### 4. 系统支持单元

系统支持单元是为 STD-PC 提供系统支持的功能单元。它包括设置开关、后备电池、实时时钟、看门狗 WATCHDOG 定时器、上电复位电路、交流掉电非屏蔽 NMI 电路、总线终端网络及通信口。

#### 5. 定时器单元

定时器是 STD 总线的独立外设,具有可编程逻辑电路、选通电路和输出信号,可完成定时、记数以及实现“看门狗”功能等。

#### 6. I/O 单元

I/O 单元是实现开关量的输入输出的功能单元,可以提供电平输出,也可以提供功率输

出, 各种信号输出均可具有锁存功能。

### 7. 键盘显示板

该系统主要有键盘输入、显示输出、打印机接口等部分。

此外, 工控机的电源在技术性能上也有一些要求, 主要是对输入电压、输出电压、输出电流等要求输入侧带交流滤波、输出侧具备过压与过流保护、较高的工作可靠性和抗干扰能力、低功耗等。

工业控制计算机系统功能较微型计算机系统完善, 可靠性和实时性通常也较微型计算机系统大为提高, 已实现板级的分散, 配有实时操作系统、过程中断系统等, 具有丰富的过程输入/输出功能和软件系统, 有众多的选配件和组态软件支持。

## (三) 集散控制系统 (DCS) 和现场总线系统 (FCS)

### 1. 集散控制系统的结构

集散控制系统结构框图如图 1-4 所示。集散系统是计算机网络技术在工业控制系统发展的产物, 整个系统由若干个“数据采集测控站”和上位机及通信线路组成。

(1) 数据采集测控站。数据采集测控站一般是由单片机数据采集控制装置组成, 位于生产设备附近, 可独立完成数据采集和预处理任务, 可以将信号通过通信线路传送至上位机, 并能够接收上位机通过通信线路下达的控制指令进行现场控制。

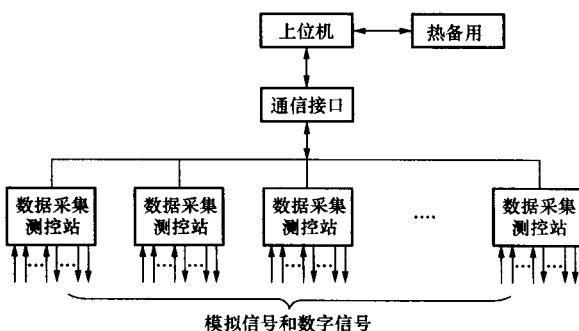


图 1-4 集散控制系统结构框图

### (2) 上位机。上位机一般采用

工业控制机或工作站, 配置打印机和其他外设。上位机一般采用双机热备用方式, 以确保系统的可靠性。上位机的工作是将各个站上传的数据进行分析处理, 以及进行数据的存储和整个系统的协调, 集中显示或打印各种报表。此外, 上位机最重要的功能是根据数据处理的结果, 确定控制的参数和方法, 并将这些结果通过通信线路下达给相应的站。

上位机和工作站之间通常采用串行通信方式进行通信。介质访问方式一般为令牌形式, 由上位机确定与哪一个工作站进行通信。

DCS 系统的系统适应性强, 系统的规模可以根据实际情况建设, 由于系统具有分散性, 单一站的故障不会影响到整个系统, 可靠性得到了提高, 且因为系统的各个站为并行结构, 可解决大型、高速、动态系统的需要, 实时性能较好, 但因为要进行集中数据处理, 对于上位机应具有一定的技术要求。

### 2. 现场总线系统

现场总线系统是 20 世纪 80 年代中期计算机技术、通信技术和自动控制技术融合发展的结果, 它将分散在现场的测量控制设备变成网络上的节点, 以现场总线为纽带, 连接成为可相互沟通信息、共同完成自控任务的网络型控制系统。现场总线的技术种类和标准很多, 同一类现场总线系统具有统一标准的通信协议, 并形成了相应的国际或行业标准, 因此它是一个开放的数字化系统。一般的现场总线系统结构框图如图 1-5 所示。

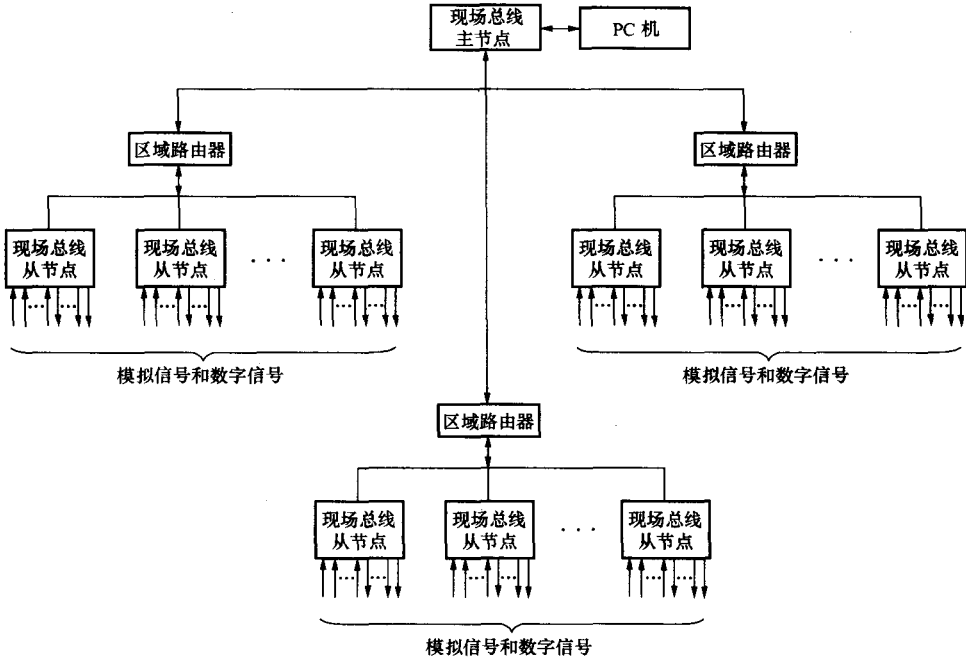


图 1-5 现场总线系统结构框图

(1) 现场总线主节点。现场总线主节点也称为主设备、主站，是整个现场总线系统运行的协调者。对于现场总线系统来说，它在总线上完成信息发起的功能。通常还可以通过一些接入设备与计算机的局域网相连。主节点也可以通过接入设备到外设，完成显示、输出、打印、数据存储等功能。图 1-5 表示了一个单主节点结构的现场总线系统，在不同种类的总线技术中，也存在多主结构的现场总线系统。

(2) 现场总线从节点。现场总线的从节点又称为从设备、从站，是现场总线系统终端设备运行的执行者。对于现场总线系统来说，它不能在总线上主动发起通信，但可以完成接收、查询等功能。对于测控的目标而言，所有测控的工作都可以下放到从节点中，这样使得现场总线成为完全的分布控制系统。

(3) 路由器。路由器的功能主要起到路由、中继、数据交换等功能，因为现场总线系统的分散性，上述功能对于现场总线测控系统来说是必不可少的。

FCS 系统是一个全数字化开放系统，即同类总线具有相同的协议和行业标准，具有可互操作性和可互用性，即同类总线不同厂家的产品具有可替代性。它是全分布控制系统，故可形成更大的控制系统，其现场设备具有高智能化和自治性，即现场的设备具有很强的控制能力。

## 二、软件

自动装置的正常工作，除了必须要有硬件外，还需要软件支持。但软件随着具体应用的不同，其规模、功能及所采用的技术也不相同，因此，这里只提一下最基本的内容。

### 1. 信号采集与处理程序

采集的信息有数字信号和模拟信号两种，数字信号采集后可直接进入计算机存储，而模拟信号须经处理。模拟信号采集与处理程序的主要功能是对模拟输入信号进行采集、标度变换、滤波处理及二次数据计算，并将数据存入相应地址的存储单元。

## 2. 运行参数设置程序

运行参数设置程序的主要功能是对系统的运行参数进行设置。运行参数有：采样通道号、采样点数、采样周期、信号量程范围和工程单位等。

## 3. 系统管理（主控制）程序

系统管理程序首先是用来将各个功能模块组织成一个程序系统，并管理和调用各个功能模块程序，其次是用来管理数据文件的存储和输出。

## 4. 通信程序

通信程序用来完成上位机与各个站之间的数据传递工作，或用来完成主节点与从节点之间的数据传递，主要的功能包括设置数据传输的波特率、数据发送的发起、数据发送发起的响应、数据接收的响应和数据传输的校验、数据传输成功的标志等等。一般通信程序为DCS或FCS所有。

以上介绍了系统软件的功能模块划分。它的划分并非是一成不变的，不同的系统常常有不同的划分。例如，在工业控制机、集散系统和现场总线系统中，还需显示软件、键盘扫描与分析程序、实时监控程序等软件功能模块。在最简单的微型计算机系统（单片机系统）中可能就不具备用菜单技术编程的系统管理程序。

## 第二节 采样、量化与编码技术

### 一、采样

#### 1. 采样过程

对连续的模拟信号  $x(t)$ ，按一定的时间间隔  $T_s$ ，抽取相应的瞬时值，这个过程称为采样。采样过程就是一个在时间和幅值上连续的模拟信号  $x(t)$ ，通过一个周期性开闭（周期为  $T_s$ ，开关闭合时间为  $\tau$ ）采样开关  $S$  后，在开关输出端输出一串在时间上离散的脉冲信号  $x_s(nT_s)$ 。

采样后的脉冲信号  $x_s(nT_s)$  为采样信号。0,  $T_s$ ,  $2T_s$ , ..., 各点为采样时刻， $\tau$  为采样时间， $T_s$  称为采样周期，其倒数  $f_s = 1/T_s$ ，称为采样频率。在实际应用中， $\tau \ll T_s$ 。

采样过程可以看作是脉冲调制过程，采样开关可以看作是调制器。输入信号与输出信号之间的关系可以表达为

$$x_s(nT_s) = x(t)\delta_T(t) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_s) \quad (1-1)$$

式中， $\delta_T(t)$  为采样开关控制信号。

因为  $\tau \ll T_s$ ，所以可以假设采样脉冲为理想脉冲， $x(t)$  在脉冲出现瞬间  $nT_s$  取值为  $x(nT_s)$ ，故式 (1-1) 可以改写为

$$x_s(nT_s) = x(t)\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT_s)\delta(t - nT_s) \quad (1-2)$$

考虑到时间为负值无物理意义，式 (1-2) 可以改写成

$$x_s(nT_s) = \sum_{n=0}^{+\infty} x(nT_s)\delta(t - nT_s) \quad (1-3)$$

式 (1-3) 表明，采样开关输出的采样信号  $x_s(nT_s)$  是一系列脉冲组成的，其数学表达式是

两个乘积的和式。

## 2. 采样定理

采样周期  $T_s$  决定了采样信号的质量和数量:  $T_s$  太小, 会使  $x_s(nT_s)$  的数据剧增, 占用大量的内存单元;  $T_s$  太大, 会使模拟信号的某些信息丢失, 当将采样后的信号恢复成原来的信号时, 就会出现信号失真现象, 而失去应有的精度。因此, 选择采样周期  $T_s$  必须有一个依据, 以保证  $x_s(nT_s)$  能不失真地恢复原信号  $x(t)$ 。这个依据就是采样定理。

采样定理是采样过程中所遵循的基本定律, 它指出了重新恢复连续信号所必需的最低采样频率, 下面详细解释。

设理想采样后的信号如式 (1-2) 所示, 其中, 脉冲信号序列  $\delta_T(t)$  是以采样间隔  $T_s$  (为了方便起见, 在下面的叙述中,  $T_s$  用  $T$  代替) 为周期的周期性函数, 所以可以用傅立叶级数展开

$$\delta_T(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) = \sum_{m=-\infty}^{+\infty} c_m e^{jm\frac{2\pi}{T}t} \quad (1-4)$$

其中

$$c_m = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) e^{-jm\frac{2\pi}{T}t} dt$$

式中, 级数的基频即采样频率  $f_s = \frac{1}{T}$ ; 采样角频率为  $\Omega_s = \frac{2\pi}{T}$ 。

在积分区间  $[-\frac{T}{2}, \frac{T}{2}]$  内, 只有一个采样脉冲  $\delta(t)$ , 因此

$$c_m = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \delta(t) e^{-jm\frac{2\pi}{T}t} dt = \frac{1}{T} \quad (1-5)$$

由此可得

$$\delta_T(t) = \sum_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} e^{jm\frac{2\pi}{T}t} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 表明, 脉冲序列的各次谐波的幅值都等于  $\frac{1}{T}$ , 其梳状谱结构如图 1-6 (b) 所示。

采样信号  $x_s(nT_s)$  [为了方便起见, 在下面的叙述中,  $x_s(nT_s)$  用  $x_s(t)$  代替] 的频谱为

$$\hat{X}(j\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_s(t) e^{-j\Omega t} dt = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \delta_T(t) e^{-j\Omega t} dt \quad (1-7)$$

将式 (1-6) 代入式 (1-7) 得

$$\hat{X}(j\Omega) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j(\Omega - m\Omega_s)t} dt \quad (1-8)$$

原连续时间信号  $x(t)$  的频谱为

$$X(j\Omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j\Omega t} dt \quad (1-9)$$

设  $x(t)$  的频谱如图 1-6 (a) 所示, 比较式 (1-8) 和式 (1-9), 可得

$$\hat{X}(j\Omega) = \frac{1}{T} \sum_{m=-\infty}^{+\infty} X[j(\Omega - m\Omega_s)] \quad (1-10)$$

由此可见, 一个连续的时间信号经过理想采样后频谱发生了两个变化: 一是乘以  $\frac{1}{T}$  因子; 另外一个出现了无穷多个分别以  $\pm\Omega_s, \pm 2\Omega_s, \dots$  为中心的和  $\frac{1}{T}X(j\Omega)$  形状完全一

样的频谱,即频谱产生了周期延拓,如图 1-6 (c) 所示。因为频谱是复数,这里只画了其幅度。这种频谱周期延拓的现象可以从脉冲调制角度解释。根据频域卷积定理,时间上相乘的信号,其频谱相当于原来两个时间函数频谱的卷积。由于脉冲函数序列具有如图 1-6 (b) 所示的梳状谱,因而  $X(j\Omega)$  与  $\delta_T(t)$  的梳状谱的卷积就是简单地将  $X(j\Omega)$  在  $\delta_T(t)$  各次谐波坐标位置上重新构图,因此出现了频谱  $X(j\Omega)$  的周期延拓。由此可以得到一个结论:在时域的采样,形成频域的周期函数,其周期等于采样角频率  $\Omega_s$ 。

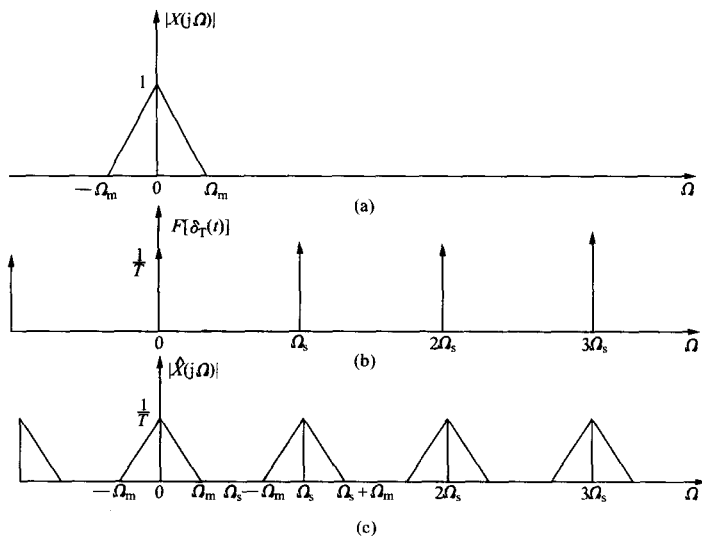


图 1-6 理想采样信号的频谱

(a)  $x(t)$  的频谱; (b) 理想采样; (c) 理想采样后  $x(t)$  的频谱周期延拓

设  $x(t)$  是带限信号,其频谱限制在  $0 \leq \Omega \leq \Omega_m$  的范围之内,  $\Omega_m$  是可能的最高频率,如图 1-6 (a) 所示,其频谱称为基带频谱。当  $\Omega_s \geq 2\Omega_m$  时,理想采样信号频谱中,基带频谱以及各次谐波调制频谱彼此不重叠,如图 1-6 (c) 所示。这样就得到一个重要不等式

$$\Omega_s \geq 2\Omega_m \quad (1-11)$$

这就是著名的香农 (Shannon) 采样定理。它指出采样频率必须大于原模拟信号频谱中最高频率的两倍,则模拟信号可由采样信号来唯一表示。

## 二、量化与编码

### 1. 量化

连续模拟信号经过采样后,成为时间上离散的采样值,其幅值在采样时间  $\tau$  内依然是连续的。采样幅值仍然是模拟量。如用模拟表计,其读数理论上可以十分精确,实际上受精度的制约,一般有效值不过 3~4 位。为了能用计算机处理数据,采样值需转化成数字量,也就是将采样信号的幅值用二进制代码表示。由于二进制代码的位数是有限的,只能代表有限个信号的电平,故在编码之前,首先要对采样信号进行“量化”。

量化就是把采样信号的幅值与某个最小数量单位的一系列整数倍比较,以最接近于采样信号幅值的最小数量单位倍数来表示该幅值。设  $N$  为数字量的二进制代码位数,量化单位定义为量化器满量程电压值  $U_{FSR}$  (Full Scale Range) 与  $2^N$  的比值,用  $q$  表示,即

$$q = \frac{U_{FSR}}{2^N} \quad (1-12)$$

量化方法可以采用“有舍有入”的量化方法。其量化过程如图 1-7 所示,即将信号幅值分为若干层,各层的间隔相等,且等于量化单位  $q$ 。当信号幅值小于量化单位  $q/2$  时,舍



去；当信号幅值大于量化单位  $q/2$  但小于量化单位  $q$  时，进一个量化单位。这种量化方法引起的误差可控制在较小的范围，通常精度不低于模拟表计，因此目前大部分 A/D 转换器均采用这种量化方法。

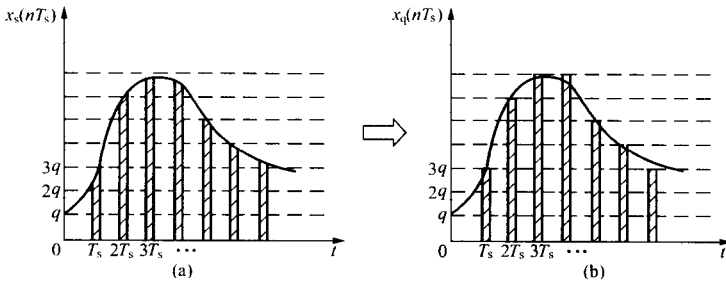


图 1-7 “有舍有入”的量化过程  
(a) 采样示意；(b) “有舍有入”的量化

### 2. 编码

把量化信号的数值用二进制代码表示，这里就称为编码。

二进制的数码由多个码位组成，数码最左端的码位叫最高有效位，用符号 MSB 表示；数码最右端的码位叫最低有效位，用符号 LSB 表示。每个码位有“0”、“1”两个

状态，量化引入的最大误差为  $\pm \frac{1}{2} \text{LSB}$ 。

量化和编码都是由 A/D 转换器完成的。

逐次逼近式 ADC：逐次逼近式 A/D 转换器原理电路示意图如图 1-8 所示。它由逐次逼近寄存器 SAR、D/A 转换器、比较器、时序及控制逻辑等组成。其工作过程如下：

当发出“转换命令” SAR 寄存器清零后，控制电路先设定 SAR 中的最高位为“1”，其余为“0”，此预测数据被送至 D/A 转换器，转换成电压  $U_f$ ，然后将  $U_f$  与输入的模拟电压  $U_A$  在比较器中进行比较（比较器为高增益运算放大器，输出逻辑为 0 或 1）。如果比较结果  $U_A \geq U_f$ ，则保留 SAR 最高位为“1”；若  $U_A < U_f$ ，则最高位“1”清为“0”。然后对次高位进行转换、比较和判断，决定次高位应取“1”还是“0”。重复上述过程，直至确定 SAR 最低位是“0”还是“1”为止。这个过程完成后，状态线就改变状态，表示已完成一次完整的转换。最后 SAR 中的内容就是与输入的模拟电压对应的二进制数字代码。SAR 的位数越多，越能精确地逼近模拟信号，在确定的转换节拍下，其转换时间也越长。

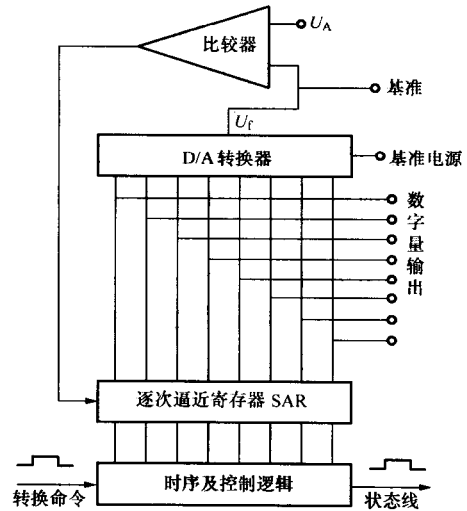


图 1-8 逐次逼近式 A/D 转换器原理电路图

## 第三节 交流采样的电量计算和前置算法

当采用变送器时，其输出直流量与输入量相对应，通过 A/D 转换后可直接运用。当交