

• 高等专科学学校教学用书 •

微型计算机 控制技术

孙德辉 杨 宁 主编



G AODENG
— ZHUANKE —
XUEXIAO
JIAOXUE
YONGSHU

冶金工业出版社

3585/44
高等专科学校教学用书

微型计算机控制技术

吉林电气化高等专科学校

孙德辉	杨 宁	编著
孙和平	郑士富	
李正熙	白 晶	主审

北 京
冶金工业出版社
1998

内 容 提 要

全书共分八章,从应用角度系统地介绍了微型计算机控制技术的基本概念、基础理论,人机联系接口,I/O 通道配置、典型应用系统设计及抗干扰措施。

本书是作者在从事多年教学手稿和科研成果的基础上编著而成。它吸取了近年来单片机应用开发系统的最新成果,突出了系统性、针对性和实用性。本书可作为大专院校工业自动化、电气工程、供用电和计算机应用等专业教材,也可供科研部门或企事业工程技术人员学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

微型计算机控制技术/孙德辉,杨宁主编. —北京:冶金工业出版社,1998.12
高等专科学校教学用书
ISBN 7-5024-2277-3

I. 微… II. ①孙… ②杨… III. 微型计算机-计算机控制-高等学校:专业学校-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 33438 号

出版人 卿启云(北京沙滩嵩祝院北巷 39 号,邮编 100009)
梨园彩印厂印刷;冶金工业出版社发行;各地新华书店经销
1998 年 12 月第 1 版,1998 年 12 月第 1 次印刷
787mm×1092mm 1/16; 15.25 印张; 357 千字; 235 页; 1-3500 册
20.80 元

(本社图书如有印装质量问题,本社发行部负责退换)

前 言

随着高等工程专科学校教育教学改革的深化,以培养应用型、岗位型和技能型学生为目标的教材建设问题显得尤为重要。为此,冶金和有色系统的部分高等专科学校,于1997年1月在吉林电气化高等专科学校召开了电类教材编审会议。根据会议精神和当前改革的需要,本书力求通俗易懂和简便实用。本书从应用角度出发,系统全面地介绍了微型计算机控制技术的基本概念、基础理论、人机联系接口、I/O通道配置、典型系统工程设计方法和抗干扰技术等。它取材于近几年来微型计算机应用系统设计的最新成果,突出了实用性、针对性和系统性。

本书是作者在多年教学手稿和科研成果的基础上编著而成的。可作为大专院校工业自动化、电气工程、供用电和计算机应用等专业教材,也可供科研部门或企事业单位工程技术人员学习参考。

全书共分八章。第三、四章,第七章二、四节及附录由吉林电气化高等专科学校孙德辉执笔,第一、八章由杨宁执笔,第五、六章由郑士富执笔,第二章、第七章一、三节由孙和平执笔。全书由孙德辉副教授规划并统一书稿,由李正熙教授、白晶副教授主审。

在本书的编写过程中,吉林电气化高等专科学校自动化教研室、仪表教研室的老师们给予了许多帮助并提出了很多建设性意见,同时参考了大量同行们的论著,在此表示由衷的谢意。

限于编者水平,书中一定有错误或不当之处,殷切期望读者给予指正。

编著者

1998年7月于吉林电气化高等专科学校

第一章 计算机控制系统概述

目前,计算机控制系统已发展成为工业控制的主流系统,广泛应用于各种生产过程和生产机械,并深入到各个领域。计算机控制系统是以电子数字计算机(主要是微型计算机)为自动化工具,用以取代常规的模拟检测、调节、显示、记录等仪器设备,使得受控对象的动态过程按规定方式和技术要求运行,以完成既定工作任务的自动控制系统。

微型计算机控制技术是计算机技术与自动化技术这两个当今科技领域中发展最快的分支相结合的产物。工业控制微型计算机的人机接口技术、过程输入/输出技术、工控总线技术、抗干扰技术、可靠性技术、数据通信技术以及控制器设计等,均属于微型计算机控制技术范畴。

第一节 计算机控制系统的基本概念

一、计算机控制系统的发展概况

自从1946年世界上第一台电子计算机在美国问世以来,50年代便应用于军事领域导弹和飞机的控制。用于工业过程控制是1956年,当时首先由TRW(Thomson Ramo Woolrige)航空公司与德克萨克(Texaco)公司提出方案,设计出一个炼油厂的聚合装置计算机控制系统。1959年第一台过程控制计算机系统在美国德克萨斯州的Port Arthur炼油厂正式投入运行,由一台RW-300计算机数据采集和操作指导,实现26个流量,72个温度,3个压力和3个成分的控制,基本功能是保持反应器压力为最小,确定五个反应器之间的进料的优化分配,通过测量催化剂的活性来控制热水流量。这项有意义的工作标志着计算机过程控制的开始。随后,IBM公司推出一种专门用于过程控制的数字计算机——IBM1700,1961年先后安装于印第安那美国石油公司,加利福尼亚标准石油公司和杜邦公司。1962年英国帝国化学工业公司(ICI)用一台计算机代替所有用于过程控制的模拟仪表,实现了244个数据采集量,129个控制阀门的直接数字控制系统(DDC),创立了计算机控制系统的新纪元。计算机平均无故障时间从早期的50~100小时提高到1000小时左右。1972年诞生的微型计算机,以其速度快,体积小,可靠性高和价格便宜等优点被广泛应用于过程控制,使得计算机控制技术取得了突飞猛进的发展。计算机控制系统的数量猛增而成本急剧下降。过程控制计算机的台数从1970年的约5000台上升到1975年的约50000台。在1980年一台功能相当于1975年小型计算机性能的微型计算机价格从一万美元下降到500美元。

与此同时,计算机控制理论也与计算机技术同步发展,为计算机控制系统提供了分析设计的理论基础。香农(Shannon)在1949年完成的采样定理,解决了采样值复现信号的理论问题。1952年被定义的Z变换经改进,在50年代末成熟并引出脉冲传递函数的概念,提供了分析与设计采样系统的有效数学工具。当时,可用差分方程描述离散系统,用差分方程的特征根来定义系统稳定性。对于现代工业日趋复杂的问题,1962年庞特里亚金确定了最优控制的极大值原理,Kalman建立了控制系统的状态空间表示法,奠定了现代控制理论发展的基础。由于现代控制理论应用于航天工业取得辉煌成果,60年代初到70年代末掀起了现代控制理论向过程控制领域推广应用的热潮。除线性多变量系统和最优控制理论

外, 随机控制、自适应控制、大系统控制等理论逐步成熟起来。

正是上述情况, 70 年代中期到 80 年代初计算机控制系统的应用普及程度达到了前所未有的高潮。世界上几个主要计算机和仪表制造厂于 1975 年几乎同时生产出分散控制系统 (DCS)。例如, 美国 Honeywell 公司的 TDCS-2000, 日本横河公司的 CENTUM 等。80 年代末又推出具有计算机辅助设计 (CAD)、专家系统、控制和管理融为一体的新型分散型控制系统。国内在 70 年代末和 80 年代初开始引进和研究计算机控制系统, 各类工厂纷纷上马了大量的计算机控制方面的项目, 也研制一些有一定影响的计算机控制系统。如国产 DJK7500, 友力-2000 等。近年来, 微型计算机控制系统的技术发展和应用程度迅猛异常, 国家八五和九五期间在控制方面新上项目和老厂改造项目大部分是微机控制系统。

作为微型计算机另一个发展方向的单片微型计算机, 更以其小巧、多功能、价廉等优点, 在控制领域中得到极其广泛的应用。直到现在 MCS-51 仍不失为单片机中的主流机型。目前, 国内 51 单片机的价格不到十元人民币, 不足十年前的 1/10。十几年应用的事实证明, 单片机性能稳定可靠, 适于控制。单片机的微控技术较好实现了以软件取代模拟或数字电路硬件, 并能提高系统性能的功效, 改变了传统的控制系统设计思想和设计方法, 有着无可取代的实用价值。

二、计算机控制系统的组成

计算机控制系统由计算机和工业对象组成, 如图 1-1 所示。计算机由硬件和软件两部分组成, 硬件是指计算机本身及其外围设备实体, 软件是指管理计算机的程序以及过程控制应用程序。

1. 硬件

硬件包括计算机、过程输入输出通道、人机联系设备、外部存贮器等。

计算机是计算机控制系统的核心, 其关键部件是 CPU。由 CPU 通过接口向系统各部分发出各种命令, 同时对工业对象的参数进行巡回检测、数据处理以及控制计算、逻辑判断等工作。

过程输入和输出通道分为模拟输入、输出通道及数字量和开关量输入、输出通道。它们负责计算机与工业对象的信息传递和变换。过程输入通道把工业对象的参数转换成计算机可以接受的数字代码。过程输出通道把计算机处理结果转换成可以对被控对象进行控制的信号。

外部存贮器 (外存) 包括磁盘、光盘、磁带, 主要用于存贮系统大量的程序和数据。它是内存容量的扩充, 要根据控制要求决定外存的选用。

人机联系设备包括显示操作控制台、屏幕显示器 (CRT)、打印机、记录仪等, 它们是计算机和操作人员联系的工具。

有时, 把过程通道、外存、人机联系设备统称为外部设备。

2. 软件

软件由系统软件和应用软件组成。系统软件通常包括程序设计系统、操作系统、语言

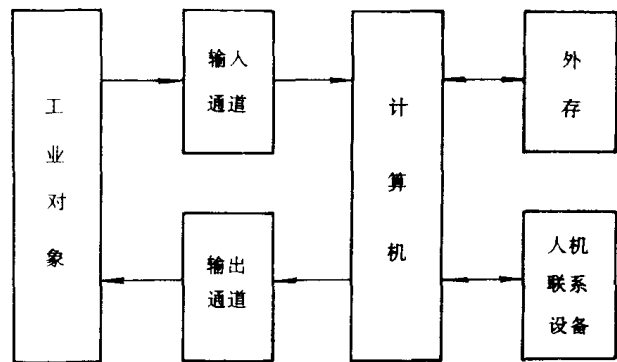


图 1-1 计算机控制系统的组成

处理程序（编译程序）。系统软件具有一定的通用性，一般由计算机生产厂家提供。应用软件通常指根据用户要解决的实际问题所配置的各种程序，在计算机控制系统中则是指完成系统内各种控制任务的程序。

三、计算机控制系统的结构原理

对于按偏差进行调节的常规模拟闭环负反馈控制系统，如果把控制器用微型计算机来代替，就可以构成微型计算机控制系统，如图 1-2 所示。

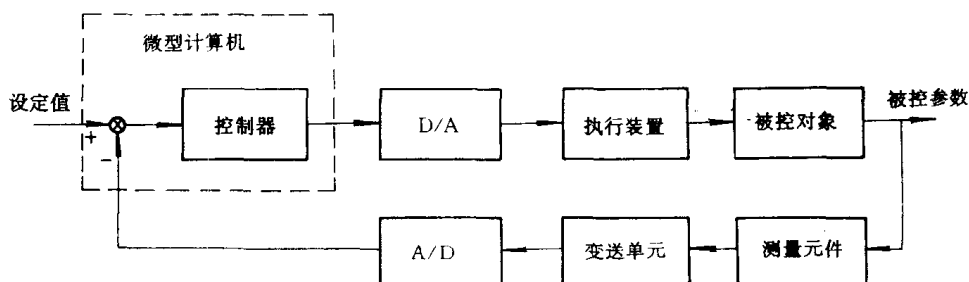


图 1-2 微型计算机闭环控制系统 (DDC) 结构图

计算机把通过测量元件、变送单元和 A/D 转换送来的数字信号直接反馈到输入端与设定值进行比较，然后，对其偏差按某种控制算法进行计算，所得数字量输出信号经 D/A 转换直接驱动执行装置，对控制对象进行调节，使其保持在设定值上。这种控制结构一般称为闭环控制结构。

从本质上讲，计算机闭环控制系统可以归纳为以下三个方面：

- 1) 实时数据采集 即对被控量的瞬时值进行检测和输入。
- 2) 实时数据处理 对实时的给定值与被控量的数值进行已定的控制规律运算，决定控制过程。
- 3) 实时控制 根据决策，适时地对执行装置发出控制信号。

所谓“实时”是指信号的输入、运算处理和输出能在一定的时间内完成，即要求微机对输入信号要以足够快的速度进行测量与处理，并在一定的时间内作出反应或产生相应的控制。超过这个时间，就会失去控制时机。“实时”概念不能脱离具体过程，如炼钢的炉温控制，由于时间惯性很大，输出延迟几秒仍然是“实时”的；而轧钢机的拖动电机控制，一般需在几毫秒或更短的时间内完成对电流的调节，否则，电流失控将造成事故。

不同的生产过程所需要的控制结构形式是不同的，有的场合使用开环控制能够满足要求。象计算机巡回检测及数据处理系统、顺序控制等均属于开环控制。其特点是，对控制对象的状态参数不进行检测，或检测后不直接参与控制。这类系统的结构如图 1-3 和下节中

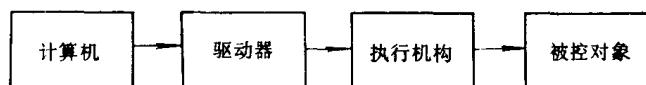


图 1-3 计算机顺序控制系统结构图

图 1-4 所示。

计算机数据采集及处理系统，只对被控对象的各物理量经计算机处理后进行显示和打印，给操作者提供一个参考值，而不是直接驱动执行器去参与控制。

计算机顺序控制则根据事先设计的逻辑关系，按某种规律去顺序驱动执行机构，完成一定的工序。两者不形成回路，所以称开环控制。

控制系统中引入微型计算机以后，控制规律便程序化了，微型计算机执行相应的程序，就能实现被控参数的控制。在常规模拟控制系统中，系统的控制规律是用硬件电路实现的，改变控制规律就要改变硬件；而在微型计算机控制系统中，控制规律用程序实现，改变控制规律只需改变程序就可以了。

四、计算机控制系统的特点

计算机控制系统和一般常规模拟控制系统相比有如下特点：

(1) 由于计算机的运算速度快，精度高，有丰富的逻辑判断功能和大容量的存贮单元，因此能实现复杂的控制规律，从而达到较高的控制质量。计算机控制实现了常规系统难以实现的多变量控制、最优控制、自适应控制、参数自整定等。

(2) 由于计算机具有分时操作的功能，所以一台计算机能代替多台控制仪器，实现群控。对于连续控制系统，控制回路越多或控制规律越复杂，所需硬件也就越多越复杂，成本也越高。对于计算机控制系统来说，增加一个控制回路的费用很少，控制规律的改变和复杂程度的提高由编制程序实现，不需改变硬件而增加成本，有很高的性能价格比。

(3) 由于软件功能丰富，编程方便和硬件体积小，重量轻以及结构设计上的模块化、标准化，使计算机控制系统有很强的灵活性。如一些工控机有操作简易的结构化、组态化控制软件。硬件配置上可装配性、可扩充性好。

(4) 由于没有漂移和采取有效的抗干扰、抗噪声办法，采用各种冗余、容错等技术，使计算机控制系统有很高的可靠性。

(5) 由于计算机有监控、报警、自诊断功能，使计算机控制系统有很强的可维护性。如有的工控机一旦出现故障，能迅速指出故障点和处理办法，便于立即修复。

另外，技术更新快，信息综合性强，内涵丰富，操作便利等也都是计算机控制系统的一些特点。

第二节 微型计算机控制系统的分类

目前，微型计算机控制系统种类繁多，命名方法也各不同。根据应用特点、控制功能和系统结构，微型计算机控制系统大致上可分为六种类型：计算机数据采集与处理系统、计算机操作指导控制系统、直接数字控制系统、监督计算机控制系统、分级控制系统及分散型控制系统。

一、计算机数据采集与处理系统

计算机数据采集与处理系统的结构如图 1-4 所示。该系统将生产过程需要收集的参数，经多路模拟量输入、多路开关量输入送进微型计算机内，进行数据采集和分析处

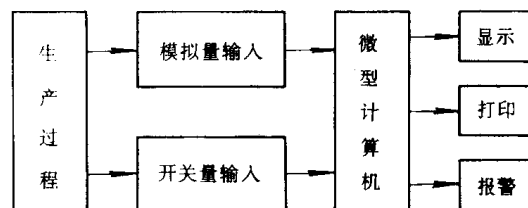


图 1-4 计算机数据采集与处理系统结构图

理，并将采集处理的数据以一定的形式显示或打印出来，可以在存储器中保存，当出现异常时发出声光报警。这种系统中的微机不直接参与生产过程控制，不会对生产过程产生直接影响。

二、计算机操作指导控制系统

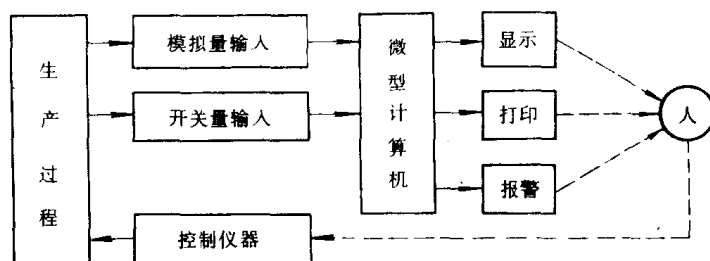


图 1-5 计算机操作指导控制系统结构图

计算机操作指导控制系统的结构如图 1-5 所示。该系统也属于计算机数据采集与处理系统，能够为操作人员提供反映生产过程工况的各种数据，并相应地给出操作指导信息，供操作人员参考。操作人员根据计算机的指导通过控制仪器对生产过程进行控制。

三、直接数字控制系统 (DDC)

直接数字控制 (Direct Digital Control, 简称 DDC) 系统的结构如图 1-6 所示。微机通过模拟量输入通道 (AI)、开关量输入通道 (DI) 进行实时数据采集，然后按已定的控制规律进行实时决策，最后通过模拟量输出通道 (AO)、开关量输出通道 (DO) 输出控制信号，实现对生产过程的直接控制。DDC 是微机在工业生产中最普遍的一种应用方式。

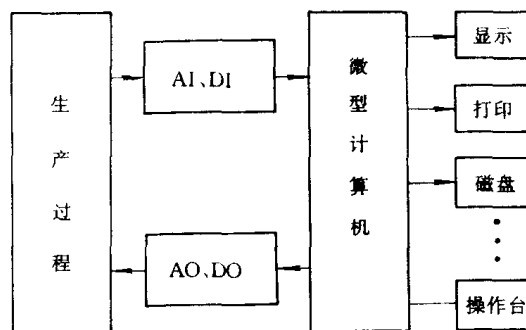


图 1-6 直接数字控制系统结构图

由于 DDC 系统中的微机直接参与生产过程的控制，所以要求实时性好，可靠性高和环境适应性强。

四、监督计算机控制系统 (SCC)

监督计算机控制 (Supervisory Computer Control, 简称 SCC) 系统结构如图 1-7 所示。SCC 系统是一种两级微型计算机控制系统，其中 DDC 级微机完成生产过程的直接数字控制；SCC 级微机则根据生产过程的工况和已定的数学模型，进行最优化分析计算，产生最优给定值，交由 DDC 级执行。

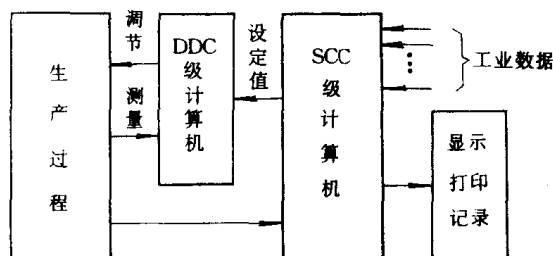


图 1-7 监督计算机控制系统结构图

SCC 级微机承担高级控制与管理任务，要求数据处理功能强，存储容量大

等，一般用高档微机。

五、分级控制系统

对于除了完成过程控制任务外，还需完成生产调度、生产计划、材料消耗、成本核算、检修和维护等任务的系统，往往需要更高档的微型计算机进行较高层次的管理工作，构成分级控制系统。DDC 系统置于分级控制的最底层，管理用计算机置于上层。各级各类计算机之间使用高速通信线路互相连接，传递信息，协调工作。

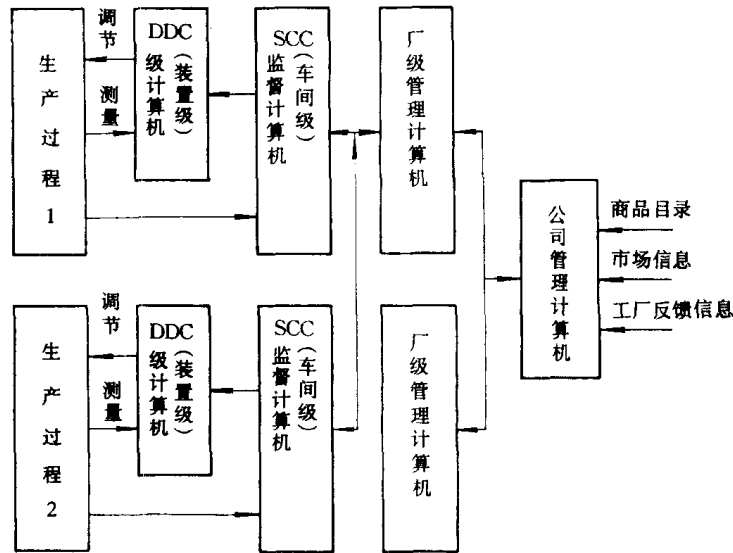


图 1-8 分级控制系统结构图

分级控制系统的结构如图 1-8 所示。其中装置控制级即 DDC 级直接用于控制生产过程，包括数据采集、监督报警等工作。车间监督级即 SCC 级既要实现一些高级控制又要向上级反馈信息，以便上一级的管理工作。

厂级的主要功能是：根据公司下达任务和本厂实际情况以及下一级计算的信息优化制定厂级的计划安排，向车间下达任务。

公司级的主要任务是制定长期发展规划、生产规划、销售计划，并向下一级下达任务。同时根据下一级计算机系统汇报上来的实际生产情况，定期修订本公司的生产计划，下达实施。

六、分散型控制系统 (DCS)

随着微型计算机技术的发展，工业生产过程规模的扩大和综合控制与

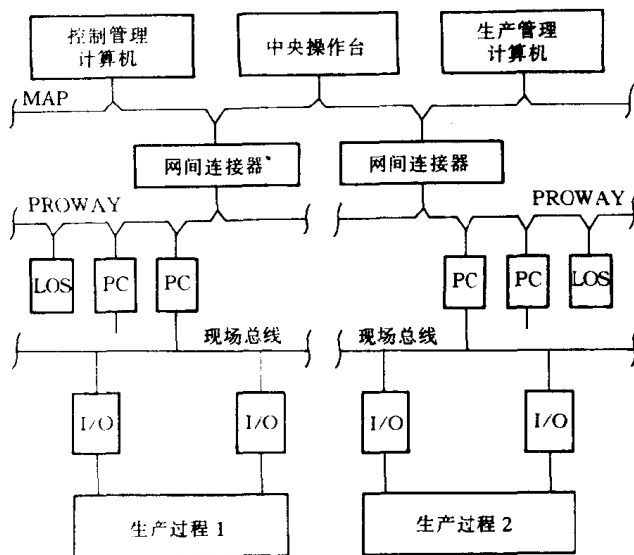


图 1-9 DCS 的组成结构图

管理要求的提高,人们研制出以多台微机为基础的分散型控制系统 (*Distributed Control System*, 简称 DCS)。DCS 采用分散控制、集中操作、分级管理、分而自治和综合协调的设计原则,把系统从上而下分为过程控制级、控制管理级、生产管理级等若干级,形成分级分布式控制,其结构如图 1-9 所示。

以微处理器为核心的过程控制器 *PC* 完成过程的控制任务。控制管理计算机通过协调各过程控制器的工作,达到生产过程的动态最优控制。生产管理计算机完成制定生产计划和工艺流程、产品、财务、人员等管理功能,以实现生产过程静态最优化。中央操作站是系统全局的显示操作装置,完成人机接口任务。LOS 是局部操作台。

第二章 计算机控制系统的理论基础

由数字计算机构成的控制系统，在本质上是一个离散时间系统。因此，要研究一个离散时间系统，首先应建立该系统的数学模型，然后解决数学描述方法和分析工具问题。

离散系统与连续系统之间的根本区别在于：在连续系统中，各职能环节的控制信号、反馈信号和偏差信号都是连续型的时间信号；而微机控制系统的信号是离散型的时间函数，所以取自系统输出端的反馈信号及数字控制器的输出信号，都是离散型的时间信号或二进制数字量。在工程上实际应用的离散系统，通常是连续信号与数字信号混合在一起，通过微机完成控制任务，因此需要对混合在同一系统中的两种不同类型的信号进行采样、信息变换、处理和恢复。本章着重介绍离散系统的经典理论、基本概念和方法，信息变换原理，数学工具以及离散时间控制系统分析和综合的某些方法，这是设计一个计算机控制系统的重要理论基础。

第一节 信息变换原理

数字计算机只能接收和处理二进制代码“0, 1”的组合，这组二进制数可以表示为某一种物理量的大小，某个数据或某些事物，称为离散量或数字信号。在实际系统中的被控参数大多是在时间上的连续信号，称为连续量或模拟量。因此，微机控制系统也可以称为数字控制系统、离散控制系统或采样控制系统。

下面对常用名词说明一下，便于后面论述。

模拟信号：是指在时间和幅值上都是连续的信号。在数学上用连续函数 $f(t)$ 表示。

离散模拟信号：是指在时间上是离散的，而在幅值上表示连续量信号的大小。

数字信号：它表示在时间上是离散的，在幅值上也是离散的信号。

采样：将模拟信号利用采样开关，按照一定的时间间隔重复开闭抽样变成离散模拟信号的过程。采样开关重复开闭的时间间隔 T 称为采样周期。

量化：采用一组二进制代码，用来逼近离散模拟信号的幅值并将其转换成数字信号。用 A/D 转换器完成。

一、离散控制系统结构图

在直接数字控制系统中，微机主要起到数字控制器作用，它和被控对象的关系如图 2-1 所示。

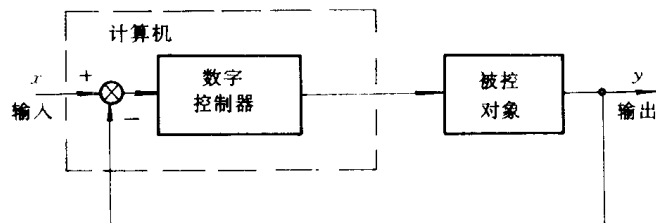


图 2-1 DDC 系统方框图

在图 2-1 中,将被控对象的模拟量和微机所能处理的数字量组合在同一系统中,必须有相应的信息变换装置。这样的系统属于数字与模拟混合系统,习惯上也称为数字控制系统。系统各点变换关系如图 2-2 所示。

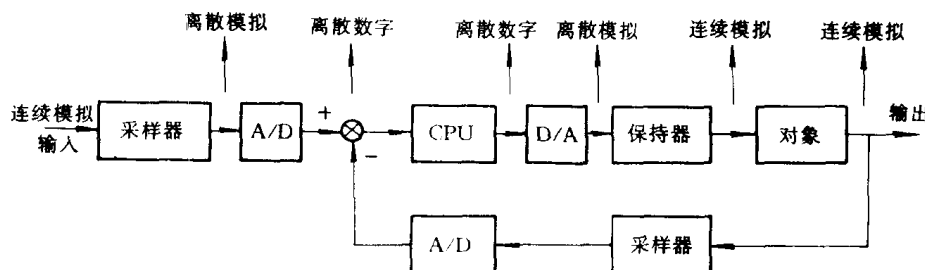


图 2-2 计算机控制系统信息变换关系

一个原来在时间上是连续的,幅值上是模拟的信号,经过按一定采样周期闭合的采样开关,把连续信号变成离散模拟信号,经过 A/D 转换(同时完成量化与编码),就变成了数字计算机可以接受,在时间上离散、在幅值上也是离散的二进制数字信号。CPU 对输入信息进行运算处理,输出离散数字信号,经过 D/A 转换和保持器就可以变成控制对象可以接受的信息,它在时间上是连续的,幅值上是模拟的。这就是计算机获取信号的过程。

图 2-2 所示的各个环节中,采样器、保持器和作为控制器功能的微机,它们的结构形式和控制规律决定系统动态特性,是研究的主要对象。A/D 转换在给定和反馈通道上,数字控制系统的稳态控制精度由 A/D 转换器的分辨率决定。这说明 A/D 和 D/A 转换器只影响系统稳态控制精度,不影响动态指标。为了突出重点,只讨论影响系统动态特性的基本问题。今后假定, A/D、D/A 转换器都具有足够的分辨率,可在系统中将它们略去,图 2-2 可进一步简化为如图 2-3 形式。

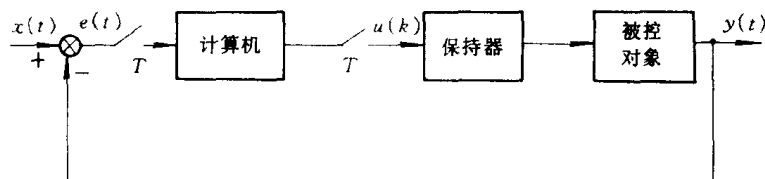


图 2-3 数字控制系统简化框图

二、脉冲采样器和采样过程

计算机对某个随时间变化的模拟量进行采样,是利用定时器控制的开关,每隔一定时间使开关闭合而完成一次采样。开关重复闭合的时间间隔 T 为采样周期。所谓采样过程是指:将一个连续的输入信号,经开关采样后,转变为发生在采样开关闭合瞬时 $0、T、2T \cdots nT$ 的一连串脉冲输出信号。

1. 实际采样器

实际采样器就是一个模拟电子开关,将输入的连续量 $f(t)$ 变换成脉冲数值序列

$f(kT)$,也就是模拟离散量。采样器和信号的输入、输出关系如图 2-4 所示。

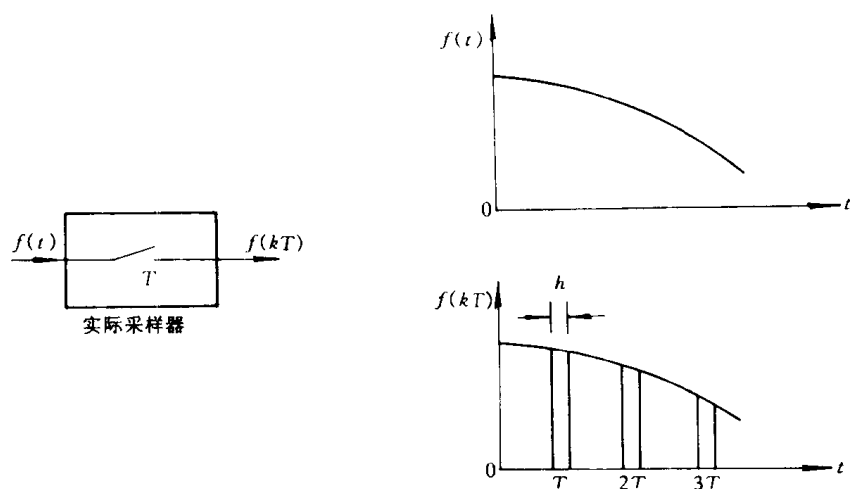


图 2-4 实际采样器和采样的数值序列

图中 T 为采样周期; h 为采样开关闭合时间, 这时采样开关的输出是由一系列的矩形波的离散量所组成, h 决定了数值序列 $f(kT)$ 的宽度, h 应远远小于采样周期 T 。

2. 脉冲采样器

在数字控制系统中, 为了便于应用 Z 变换、脉冲传递函数和差分方程等数学工具进行描述、分析和研究, 引入理想脉冲采样器的概念, 即在实际采样器的输出端增加一个理想脉冲调制器。在输入端加一个时间函数 $f(t)$, 则其输出将是一个脉冲序列 $f^*(t)$ 。其数学表达式为

$$f^*(t) = \sum_{k=0}^{\infty} f(kT) \delta(t - kT) \quad (2-1)$$

式中 $f^*(t)$ —— 输出脉冲序列;

$f(kT)$ —— 输出脉冲数值序列;

$\delta(t - kT)$ —— 发生在 $t = kT$ 时刻上的单位脉冲。

脉冲采样器结构及波形如图 2-5 所示。

单位脉冲函数的定义为:

$$\delta(t - kT) = \begin{cases} \infty, & t = kt \\ 0, & t \neq kt \end{cases} \quad (2-2)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t - kT) dt = 1$$

需要指出, 具有无穷大幅值和持续时间为零的理想单位脉冲纯属数学上的假设, 是不会在实际物理系统中发生。因此, 在实际应用中, 只有讲它的面积或强度才有意义。另外, 将采样开关当做理想单位脉冲发生器是近似的, 有条件的, 也就是说, 采样持续时间 h 应远远小于采样周期 T 及系统不可变部分的时间常数。上述条件在实际离散系统中通常总是满足的。

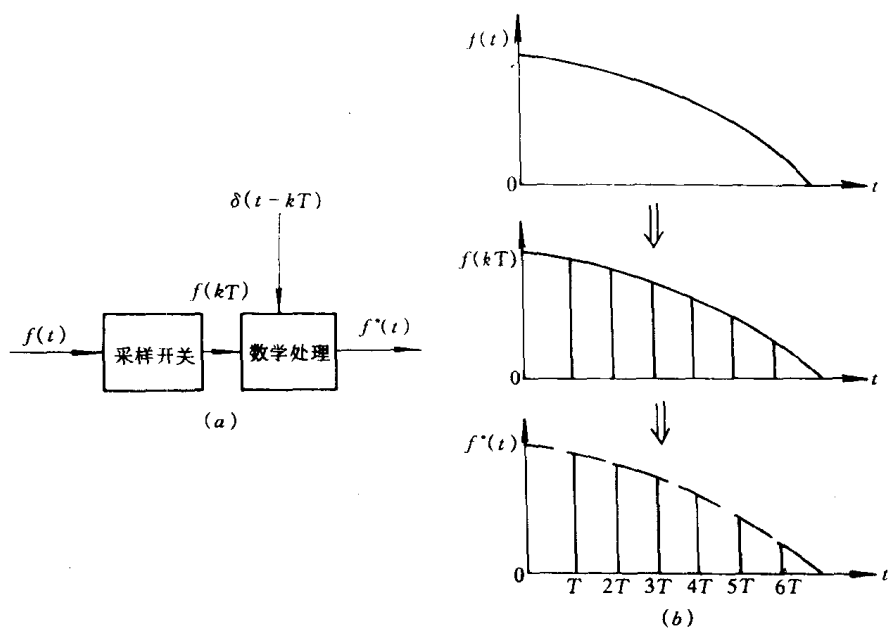


图 2-5 脉冲采样器及波形

$f^*(t)$ 的物理意义为：在每个采样时刻，脉冲采样器输出一个脉冲，这个脉冲的高度为无限大，但它的强度是有限的，为 $f(kT)$ ，因为 Z 变换和脉冲函数在数学上只能处理脉冲序列，为了应用这些数学工具分析数字控制系统，把采样开关抽象成一个理想的脉冲采样器是为了数学上的需要，在物理上是无法实现的。

考虑到式 (2-2) 根据理想单位脉冲函数的定义，在采样开关闭合时， $f(kT)$ 与 $f(t)$ 的瞬时值相等，式 (2-1) 还可改写成如下形式：

$$f^*(t) = f(t) \sum_{k=0}^{\infty} \delta(t - kT) \quad (2-3)$$

式 (2-3) 说明，数字控制系统中的采样过程可以理解为脉冲调制过程。在这里，采样开关只起着理想脉冲发生器的作用，通过它将连续信号 $f(t)$ 调制成脉冲序列 $f^*(t)$ 。

三、采样定理和采样周期 T 的选择

由图 2-2 可见，一个数字控制系统的信息变换过程是先将连续模拟信息 $f(t)$ 通过采样开关变成离散的脉冲序列 $f^*(t)$ ，再经过 A/D 转换器变成二进制数字代码，输入到 CPU 处理后，再将离散模拟量还原成连续模拟量去驱动执行机构。

信息经过两种形式的一系列变换是由脉冲采样器、A/D 和 D/A 转换器与保持器完成的。那么在信息变换过程中就存在一个信息在采样过程中能否完整地保留下来，而在输出控制时又能不失真地恢复连续信号的问题。香农采样定理给出了从采样的离散信号恢复到原连续信号所需要的最低采样频率，这个定理解决了计算机控制系统采样周期 T 选择的理论根据，它是任何数字控制系统信息变换的基本定理之一。

1. 香农 (Shannon) 采样定理

一个连续时间信号 $f(t)$ ，设其频带宽度是有限的，其最高频率为 $\omega_{\max}$ (或 $f_{\max}$)，如果

在等间隔点上对该信号 $f(t)$ 进行连续采样, 为了使采样后的离散信号 $f^*(t)$ 能包含原信号 $f(t)$ 的全部信息量, 则采样角频率只有满足下面的关系:

$$\omega_s \geq 2\omega_{\max} \quad (2-4)$$

采样后的离散信号 $f^*(t)$ 才能够无失真地复现 $f(t)$ 。

式中 $\omega_s = 2\pi f_s = \frac{2\pi}{T_s}$ —— 采样角频率;

$\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$ —— $f(t)$ 最高角频率。

由式 (2-4) 可知, 相邻两个采样点的周期为

$$T_s \leq \frac{1}{2f_{\max}} \quad (2-5)$$

采样定理实际上表达了这样一种思想, 对于连续模拟信号 $f(t)$, 我们并不需要无限多个连续的时间点上的瞬时值来决定其变化规律, 而只需要有各个等间隔点上的离散抽样值就够了。这就如同作一条直线只需要知道两点的道理是类似的。

2. 采样周期 T_s 的选择方法

采样定理只是作为微机控制系统确定采样周期 T_s 的理论指导原则, 若将采样定理直接用于数字控制系统中还存在一些问题。主要因为模拟系统 $f(t)$ 的最高角频率 $\omega_{\max}$ 不好确定, 所以采样定理在计算机控制系统中的应用还不能从理论上得出确定各种类型系统采样周期 T_s 的统一公式。目前应用都是根据设计者的实践与经验公式, 由系统实际运行实验最后确定。

显然, 采样周期 T_s 取值越小, 那么复现精度就越高, 也就是说“越真”。当 $T_s \rightarrow 0$ 时, 则数字控制系统就变成连续控制系统了。若采样周期 T_s 太长, 计算机控制系统受到的干扰就得不到及时克服而带来很大误差, 使系统动态品质恶化, 甚至导致微机控制系统的不稳定。

在工程应用的实践中, 一般根据系统被控对象的惯性大小和加在该对象上的预期干扰程度和性质来选择采样周期 T_s 。例如温度控制系统的热惯性大, 反应慢, 调节不宜过于频繁, 采样周期 T_s 选的要长一些。对于一些快速系统, 如交直流可逆调速系统, 随动系统, 要求动态响应速度快, 抗干扰能力强, 采样周期 T_s 要短些。总之, 根据理论指导原则, 结合实际被控对象性质或参数, 可以得出采样周期 T_s 选择的实用公式。表 2-1 列出了不同被控参数物理量的采样周期 T_s 选择的参考数值。

表 2-1 采样周期 T_s 选择数据参考值

被控物理量	采样周期 T_s
流 量	1~5 (s)
压 力	3~10 (s)
液 面	6~8 (s)
温 度	15~20 (s)
位 置	10~50 (ms)
电 流 环	1~5 (ms)
速 度 环	5~20 (ms)

对于随动系统, 采样周期 T_s 的选择根据系统预期开环频率特性的截止频率 (也称零分贝频率) ω_c 来确定。认为通过该系统频谱最高分量为 ω_c , 高于 ω_c 的分量被系统连续部分的低通滤波特性大大地衰减掉了。根据经验, 模拟调节器的功能用计算机程序实现时, 采样频率选为

$$\omega_s = 10\omega_c$$

按上式可导出选择系统的采样周期为

$$T_s = \frac{2\pi}{\omega_s} = \frac{\pi}{5\omega_c} \quad (2-6)$$

结论: 在对计算机控制系统进行动态校正时, 可以用线性连续控制理论的频率特性法来进行系统校正, 先画出连续控制系统的开环频率特性图, 再根据控制系统的预期频率特性导出校正环节的对数频率特性, 按照 (2-6) 式计算出系统所需采样周期 T_s , 最后用计算机实现校正环节的功能。用这种计算采样周期 T_s 的方法, 对系统的动态品质指标可以得到比较满意的结果。

也可根据采样定理导出的经验公式来确定采样周期。若已知系统被控对象的传递函数为

$$G(s) = \frac{N(s)}{S^m(T_1s + 1)(T_2s + 1)\cdots[(s + \alpha_1)^2 + \beta_1^2]\cdots}$$

上式的系统包含的分量为: e^{-t/T_1} , e^{-t/T_2} , $\cdots e^{\alpha_1 t} \sin \beta_1 t$, $e^{\alpha_2 t} \sin \beta_2 t \cdots$ 。其中 T_1 、 $T_2 \cdots$ α_1 、 α_2 代表系统的时间常数, β_1 、 β_2 代表系统振荡环节的固有角频率, 对应的振荡周期 $t_1 = 2\pi/\beta_1$, $t_2 = 2\pi/\beta_2$ 。按照采样定理式 (2-5) 来选择采样周期的最大值为

$$T_{\max} = \frac{1}{2} \left[T_1, T_2, \cdots, \frac{1}{\alpha_1}, \frac{1}{\alpha_2}, \cdots, t_1, t_2, \cdots \right]_{\min}$$

一般取采样周期为

$$T_s = \frac{1}{2} T_{\max} = \frac{1}{4} \left[T_1, T_2, \cdots, \frac{1}{\alpha_1}, \frac{1}{\alpha_2}, \cdots, t_1, t_2, \cdots \right]_{\min} \quad (2-7)$$

在工程上应用式 (2-7) 时, 只要把被控对象的最小时间常数计算出来代入上式即可。

3. 采样周期 T_s 的变化对数字控制系统特性的影响

采样周期 T_s 的大小变化对数字控制系统的动态特性、抗扰动能力以及计算机软件程序的运行都有很大影响。连续时间信号 $f(t)$ 通过采样开关、A/D 转换器进入计算机, 由 CPU 执行程序处理后输出控制, 在时间上具有“滞后”效应, 所以从某种意义上来说, 计算机通过采样调节, 实际上是一种“滞后”调节, 因此采样周期过大, 将加重这种滞后效果, 使系统的扰动输入得不到及时的调节而带来很大误差。同时还会使数字控制系统恢复新的平衡状态所需时间较长, 严重时 (T_s 很大时) 能导致系统动态品质恶化, 甚至使控制系统不稳定。但是 T_s 大可以减轻计算机的负担, 使 CPU 有更多的时间去执行其它程序。

T_s 过小, 将有利于数字控制系统的动态特性指标的提高, 干扰输入也能及时得到调节, 这都是有利的方面。但 T_s 过小使控制系统调节过于频繁, 某些执行机构不能及时响应, 同时也使计算机的负担加重。当计算机用于多回路控制时, 因为每个回路都有一定的程序计算量, CPU 执行完每个回路算法程序都需要时间, T_s 小, 使计算机工作显得紧张, 在这种情况下, 也要求采样周期 T_s 大些。

综上所述, 采样周期 T_s 的选择要兼顾系统的动态特性指标、抗扰动的能力以及计算机