

高等学校教学用书

# 计算机控制技术

冯培悌 编著

浙江大学出版社

高等学校教学用书

# 计算机控制技术

冯培悌 编著

浙江大学出版社

## 内 容 简 介

本书从工程应用角度较系统地介绍了计算机控制的基本理论与应用技术。全书共六章：第一章计算机控制系统的基本概念和一般设计过程，第二章通道与接口的设计，第三章计算机控制系统的描述与分析，第四章数字控制器的综合与设计，第五章自校正控制系统，第六章多级分布式计算机控制系统概述。以上内容的介绍由浅入深，并不断通过实例分析予以说明，因此便于读者理解掌握。每章末附有习题供练习用。

本书既可作为高等院校自动化类专业的教材，也可供其它有关专业师生与工程技术人员参考。

### 计算机控制技术

冯培悌 编著

责任编辑 龚建勋

浙江大学出版社出版

浙江良渚印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

开本850×1168 1/32 10.1875印张 255.5千字

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数：0001~3000

ISBN 7-308-00541-0

---

TP·038 定价：2.65 元

## 前 言

近年来，由于微电子技术的飞跃发展，使得计算机控制的实现变得方便、可靠而价廉。在许多工业生产过程中，由于采用了微机控制而获得明显的社会效益。微型计算机的诸多应用中，尤以工业控制中的应用所取得的效益为显著。

面对这一形势，不仅是自动化类专业的学生，许多工程技术人员也急需掌握计算机控制技术，用于旧设备技术改造或新设备、新产品研制开发。本书是针对这一需要而编著的。编者力图把控制系统的综合设计与计算机的实现结合起来，从工程应用角度介绍计算机控制技术，希望此书对欲从事计算机控制而在控制理论与微机技术方面有些基础的学生与科技人员有所帮助。

本书共分六章。第一章介绍计算机控制系统的基本概念和一般设计过程。第二章讨论有关通道与接口的原理和设计。第三章介绍计算机控制系统的描述与分析，作为讨论综合设计的基础。第四章讨论从两种途径设计数字控制器的方法。从连续化途径设计，主要讨论连续控制器的离散化方法及PID控制的数字化。从离散化途径设计，主要讨论基于 $Z$ 传递函数描述的解析设计以及基于状态空间描述的输出反馈与状态反馈的综合设计。该章最后还介绍数字控制器的程序实现方法，并对实现中的误差进行了分析。第五章介绍目前应用较为广泛的自校正控制系统，包括原理及应用实例。第六章概略介绍了多级分布式计算机控制系统。六章中，前四章的内容是属基本性的，后两章的内容带有发展性。

以上内容的论述由浅入深，不断通过列举的例子来说明基本理论与应用技术，以便于读者理解掌握。每章末附有习题或思考题，供读者练习用。

编者多年来一直在浙江大学讲授“计算机控制技术”和从事计算机控制方面的科研工作。本书是在自编教材基础上，结合近年来的科研实践充实改编而成的。它既可作为高等学校自动化类专业的教材，也可供其它有关专业师生及工程技术人员参考。讲授全书主要内容约需54学时，使用时可根据学时数对内容作取舍。

在本书编写出版过程中曾得到王懋鋈、胡中楫、何志均三位教授的热情支持和帮助，王懋鋈教授仔细审阅了书稿，提出了许多宝贵意见，谨向他们表示衷心感谢。

编者学识有限，错误与不妥之处敬请读者批评指正。

编者

一九九〇年三月

# 目 录

<b>第一章 计算机控制系统概述</b> .....	( 1 )
§ 1-1 引言 .....	( 1 )
§ 1-2 计算机控制系统的组成 .....	( 5 )
§ 1-3 计算机参与控制的典型方式 .....	( 11 )
§ 1-4 计算机控制系统的设计过程 .....	( 15 )
§ 1-5 小结 .....	( 17 )
习题与思考题 .....	( 18 )
<b>第二章 通道与接口</b> .....	( 19 )
§ 2-1 引言 .....	( 19 )
§ 2-2 模拟信号的离散及其重构 .....	( 21 )
§ 2-3 离散模拟信号的量化 .....	( 32 )
§ 2-4 通道与接口设计 .....	( 51 )
§ 2-5 实例分析 .....	( 81 )
§ 2-6 小结 .....	( 98 )
习题与思考题 .....	( 99 )
<b>第三章 离散系统的数学描述与分析</b> .....	( 101 )
§ 3-1 引言 .....	( 101 )
§ 3-2 离散系统的差分方程描述 .....	( 102 )
§ 3-3 线性离散系统的 Z 传递函数描述 .....	( 108 )
§ 3-4 离散系统的状态方程描述 .....	( 126 )
§ 3-5 线性离散系统的稳定性分析 .....	( 138 )
§ 3-6 性能准则与稳态误差分析 .....	( 149 )

§ 3-7 可达性、可控性和可观性 .....	( 155 )
§ 3-8 小结 .....	( 159 )
习题与思考题 .....	( 159 )
<b>第四章 数字控制器的设计</b> .....	( 162 )
§ 4-1 引言 .....	( 162 )
§ 4-2 模拟控制器的离散化方法 .....	( 163 )
§ 4-3 PID 调节数字化 .....	( 170 )
§ 4-4 基于 Z 传递函数描述的解析设计方法 .....	( 177 )
§ 4-5 基于状态方程描述的设计方法 .....	( 197 )
§ 4-6 数字控制器的程序实现 .....	( 214 )
§ 4-7 设计实例 .....	( 229 )
§ 4-8 小结 .....	( 237 )
习题与思考题 .....	( 238 )
<b>第五章 自校正控制系统</b> .....	( 241 )
§ 5-1 引言 .....	( 241 )
§ 5-2 系统辨识与参数估计 .....	( 242 )
§ 5-3 自校正控制器的设计 .....	( 263 )
§ 5-4 应用实例分析 .....	( 277 )
§ 5-5 小结 .....	( 293 )
习题与思考题 .....	( 294 )
<b>第六章 多级分布式计算机控制系统概述</b> .....	( 295 )
§ 6-1 引言 .....	( 295 )
§ 6-2 递阶控制原理 .....	( 296 )
§ 6-3 多级分布式计算机控制系统的通信问题 .....	( 305 )
§ 6-4 实例分析 .....	( 310 )
§ 6-5 小结 .....	( 314 )
习题与思考题 .....	( 315 )
<b>参考文献</b> .....	( 316 )

# 第一章 计算机控制系统概述

## § 1-1 引言

本章将对计算机控制的发展过程进行回顾和展望，并分析计算机控制系统的基本组成和介绍计算机参与控制的几种典型方式，藉以了解实现计算机控制在理论上和技术上要解决的问题。

在回顾计算机控制的发展历史前，让我们先初步了解一下什么是计算机控制。

### 一、何谓计算机控制

按控制论的观点，控制系统是由控制部分和被控对象两部分组成的，见图1-1。闭环控制时，控制部分将由检测装置、控制器和执行装置组成，并和被控对象连接构成闭合环路。如图所示，控制部分通过检测装置获得有关被控对象运动过程的信息，经过控制器处理决策，由执行装置输出控制信息去影响被控对象，使被控对象的运动过程满足特定的要求。

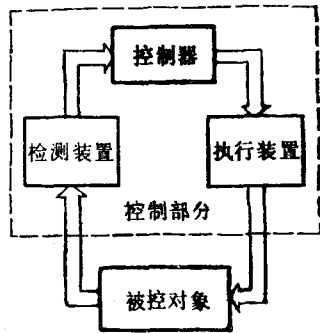


图1-1 控制系统的组成

当闭合环路被断开时，由于控制部分与被控对象间信息交换的通道被断开，上述的反馈控制过程就不能自动进行。如开断在控制器输出端，控制器作出的控



制决策，不能直接通过执行装置去控制被控对象，而需要通过操作人员的干预才能完成控制。如开断在控制器输入端，控制器将不依赖取自检测装置的反馈信息作出决策去指挥执行装置。这两种情况都被称为开环控制。

无论是开环或闭环的控制系统，如果用数字计算机作控制器时，即构成计算机控制系统。这样，以计算机为控制工具的控制，被称为计算机控制。

显然，计算机控制的出现、发展，必将和计算机技术及控制理论的发展紧密联系在一起，让历史回顾来证实这一点。

## 二、回顾历史和展望未来

20世纪40年代，电子数字计算机一出现即引起各方面的重视。电子数字计算机所显示出来的强大的运算能力和丰富的逻辑判断功能，使它很快从单纯的高速计算手段的概念中解放出来，成为控制部件进入自动控制系统。

将数字计算机作为控制系统部件的思想萌生于20世纪50年代初。最早想在导弹与飞机的控制中应用计算机。但是，早期的通用计算机体积大、耗能多、可靠性低，无法用于控制系统，因此早期的航空应用中使用了专用的计算机——数字微分分析器。

此后，计算机控制的主要进展在工业过程方面。50年代初，美国首先用计算机来自动完成过程巡检与数据搜集。后来，在获得成功的基础上试验用计算机构成开环和闭环控制系统。美国TRW航空公司和Texaco公司合作，投入三十人年的工作量，在经过了一系列可行性研究后，设计出了聚合装置计算机控制系统，并于1959年3月在得克萨斯州的一家炼油厂投入在线运行。该控制系统控制26个流量、72个温度、3个压力和3个成分。控制系统的基本功能是从反应器的压力最小出发，确定五个反应器供料的最佳分配，并根据催化剂活性测量结果来控制热水流入量以及确定最佳循环。

此项开创性的工作，引起从事计算机制造与自动控制研究者的极大兴趣，前者看到了计算机应用的新的巨大市场，后者则发现了提高自动化具有很大潜力的工具。他们纷纷投入了进一步的试验研究。

由于当时所使用的计算机运算速度慢（加法时间典型值为1ms，乘法时间典型值为20ms），可靠性低（中央处理单元CPU的平均无故障时间MTBF为50—100小时），且价格昂贵，使技术经济效益受到很大影响。在控制时，计算机或从打印机给出操作指导，或去改变模拟控制器的设定值，模拟控制器仍然是不可缺少的。系统中计算机的主要任务是寻求最佳运行条件。如果把此任务看作是静态最优化问题，就需要建立过程的数学模型。正因为如此，这一阶段计算机控制的发展常因缺乏过程知识而受到阻碍。显然，把控制问题局限于静态最优化是不够的，常需建立动态模型。于是，这段时间的研究工作引导人们探索有效的建立数学模型方法，导致系统辨识方面的发展。

与此同时，过程控制也向计算机性能提出了特殊要求。主要是要求计算机能对外部请求作出迅速响应。这促使计算机技术发展，研制出了具有中断系统的计算机。

总的说来，在开创时期计算机控制作为新技术引进，遇到了一系列困难，经历了曲折，不过仍在发展。到60年代，计算机控制系统的应用已开始推广到化工、钢铁、电力等不同工业领域。

1962年英国帝国化学工业公司制造出一套新的计算机控制系统，开创了直接数字控制时期。这套系统与以往系统完全不同的是计算机不是用作操作指导或设定值控制，而是直接替代常规的模拟控制装置。而这些模拟装置在原来的计算机控制系统中是不可少的。这意味着过程控制将由原来的模拟控制改变为数字控制。直接数字控制是在计算机速度获得提高（加法时间为 $100\mu\text{s}$ ）、可靠性获得提高（MTBF为1000小时）的基础上实现的。

计算机贵是价格昂促使直接数字控制技术发展的一个原因，因为计算机控制系统必须控制更多的回路并取代模拟控制装置，在经济性上才能被人们所接受，计算机控制才能显示出灵活、易于扩展和操作管理方便等长处。

60年代末，由于小型计算机的出现，计算机的速度、可靠性有所提高，价格有所下降。小型计算机的采用，加速了计算机控制系统的发展。不过，计算机的价格还是比较高。为了能与常规仪表竞争，不得不使一台计算机控制尽可能多的调节回路，使控制与管理任务高度集中。高度集中不仅对计算机的可靠性要求极高，也使建立数学模型变得十分困难，60年代发展起来的现代控制理论因此不能得到很好的应用。

70年代微型计算机的诞生，使计算机的发展和应用进入了一个新阶段。由于集成电路的使用，使数字计算机的体积进一步缩小，性能价格比获得明显提高。微型计算机开始在自动控制领域成为非常有效的实现手段，而有力地推动自动控制技术的发展。到80年代，超大规模集成技术的发展，使微型计算机不断获得更新换代，性能价格比不断获得提高。它们的普遍应用对控制设备产生了巨大影响。

微处理器、微型计算机的诞生与发展为实现分散型计算机控制创造了良好的条件。由于价格低廉，所以可把计算机分散到各个生产装置中去实现小范围局部控制。功能分散后，技术上比较容易实现，不仅使危险得到分散，也给建立数学模型带来了方便。

现代工业为追求高经济效益，需要从上述的分散控制走向新的集中控制。因为一些现代工业具有持续化与大型化的特点，如大型钢铁厂、炼油厂等，工厂企业中的各装置和设备之间联系密切。为了降低能耗提高经济效益，仅实现局部范围内孤立控制难以获得显著效果。必须在上述分散型控制的基础上考虑它们之间

的通讯和协调，这就产生了计算机分级分布式控制系统。美国 Honeywell公司于1975年研制成第一套集散型控制系统 TDC-2000并投入使用。到80年代，世界上已推出许多集散系统作为商品投放市场，其中有几万套已投入运行，并取得了较明显的经济效益。可以说，按大系统递阶控制原理设计的多级分布式计算机控制系统，是80年代计算机工业过程控制的一个重要发展方向。

多年来，过程控制一直被认为是计算机控制系统主要的、传统的应用领域，随着微型机控制技术的发展，情况已发生了变化。在机电控制方面，特别在航天技术、军事装备以及机器人技术中也得到了极其广泛的应用。尤其在机器人技术方面，计算机控制已成为必不可少的因素。

目前，由于使用了计算机这个有力工具，自动控制技术正向着深度和广度发展。在广度方面，向着大系统或系统工程的方向发展，从单一过程、单一对象的局部控制，发展到对整个工厂、整个企业、甚至对社会经济、国土利用、生态平衡等大规模复杂对象进行控制。在深度方面，则向着智能化方向发展。人们逐步引入了自适应、自学习等控制方法，并且模拟生物的视觉、听觉、触觉，识别文字、图象、语言、物体，进一步根据感知的信息进行推理分析、直观判断、自行学习与自行解决问题。计算机在完成这些工作的过程中，被用来收集、处理信息，并进行分析、判断与决策。

回顾历史，展望未来，不难理解为什么计算机控制技术会成为从事自动控制工作的技术人员所必须掌握的技术。

## § 1-2 计算机控制系统的组成

本节先介绍几个常用的术语，然后从控制与信息观点来分析计算机控制系统的组成。

## 一、离线、在线与实时

术语“离线”、“在线”和“实时”都用来说明计算机与受控对象或设备的关系。

说一个设备“在线”，就是指这个设备与计算机的中央处理单元CPU连接在一起，计算机可直接从设备获得有关其工作状态的各种数据，设备的工作也可以直接受CPU控制。“在线”（on-line）又称“联机”，两者含义完全相同。

说一个设备“离线”，就是说这个设备没有和CPU连在一起，它的工作也不受计算机控制。与设备有关的数据如需要用计算机进行处理，就需要通过键盘、磁盘或磁带等介质送入计算机。“离线”（off-line）又称“脱机”。

当计算机进入控制系统，成为控制系统的—个部件时，计算机与被控对象或设备间的关系必然是“在线”的。然而，当计算机用于控制系统辅助设计、数字仿真时，计算机并没有和被控对象直接连接，有关数据是通过上述介质进入计算机的。此时，计算机与被控对象或设备的关系是“离线”的。通常用作数值计算的计算机都离线工作。

“实时”（Real-time）的含义是“立刻”或“及时”。在计算机控制系统中，计算机完成信息输入、处理和输出必须在允许的时间范围内，才能避免失去控制时机。因此，计算机控制系统必须是一个实时控制系统。一个实时控制系统必然是在线系统，但在线系统并不一定是实时控制系统。这是因为在线系统中，计算机可以仅有数据采集功能而无实时控制功能。

本书主要研究计算机实时控制系统的分析、设计和实现。

## 二、计算机控制系统中的信息流通

在计算机控制系统中，以数字计算机为核心构成控制部分来控制被控对象。由数字计算机本身特点所决定，系统控制过程在时间上可分解为以下三个步骤的不断循环：

1. 数据搜集:对表征被控对象运动状态的各物理量进行巡检和采集。

2. 决策:对采集来的数据进行计算、推理,按已定的控制规律决定下一步的控制。

3. 实时控制:根据决策,适时地对各执行机构发出控制信号。

就控制功能来说,以模拟控制器构成的控制系统,其控制过程也包含这三个步骤。所区别的是它们在时间上连续并行地进行,因此无法分解。对计算机控制系统来说,情况完全不同,因为控制的每一步骤都需要计算机通过执行程序来完成。对一个CPU来说,某一时刻只能执行某一指令,因此上述三步是依次循环进行的。

从信息角度来观察上述三个步骤,可知控制过程实质上是信息获取、加工和输出的过程。由于数字计算机只能接收、处理、输出数码序列,即数字信号,而表征被控对象运动状态的物理量,大多数是模拟信号,因此为了保证信息能在以计算机为核心的控制环路中流通,还必须进行必要的信号变换。

可见,要构成计算机控制系统,一方面要利用设备(硬件)组成信息流通的渠道,另一方面还要考虑采用何种控制律来满足控制要求,并把它编成程序(软件)来支持系统运行。也就是说,计算机的特点决定了计算机控制系统必须由硬件与软件两大部分组成,而不同于由模拟装置构成的控制系统仅有硬件组成。

### 三、计算机控制系统的组成

由于控制对象与要求不同,所组成的计算机控制系统可有种种不同的具体结构,不过它们之间也存在着一些共同的特点。这里先讨论单计算机系统在结构上的共同点,多机系统在第六章介绍。

图1-2给出单计算机构成的控制系统基本组成。如图所示,数

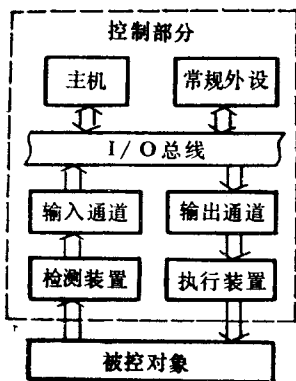


图1-2 计算机控制系统的基本组成

字计算机是控制部分的核心。正如前面所分析的，计算机的特点决定了该系统的控制部分将由硬件、软件两部分组成：

### (一) 硬件

硬件部分包括主机、外部设备和自动化仪表等。

#### 1. 主机

主机包括中央处理单元（CPU）和内存贮器（RAM + ROM），它是整个系统的核心部分。控制系统通过主机执行程序来实现控制所必需的数据采集、处理与输出，系统中的其它设备都在它的指挥下工作。主机的总体结构、指令系统不同，性能上会有很大差别，而主机的性能将直接影响控制系统的性能，所以合理选用主机是计算机控制系统设计中的一项重要工作。

#### 2. 外部设备

外部设备主要指常规外部设备和输入、输出通道等。

常规外部设备按功能可分为三类：输入设备、输出设备和外存贮器。输入设备中最常用的是键盘，它主要用来输入程序、数据和操作命令。输出设备中常用的有打印机、显示器（CRT显示器或数码管显示器）与记录仪等。它们主要用来把有关信息按人们易于接受的形式如数码、字符、曲线等提供给操作人员，以便了解受控对象的工作状况。可见，输入与输出设备是用于人机通讯的，故又称人机通讯设备。外存贮器，如常用的磁盘装置、磁带装置等均兼有输入、输出功能，主要用于存贮程序和数据。

输入、输出通道指的是模拟量输入、输出通道与数字量输入、输出通道。通道的作用在于构成计算机与被控对象间信息流通的

构渠道,所以它是成计算机实时控制系统所必不可少的部分。

计算机控制系统在运行过程中,现场操作人员常需要和系统进行“对话”,以了解生产过程状况或修改某些控制参数,特别在发生故障时必须对自动控制过程作人工干预。“对话”可以通过键盘和CRT进行,但有时为了提高系统的可靠性和方便运行人员操作,另外再配备专用的运行操作台。在操作台上设置显示、报警装置及操作按键。区别于常规外设,运行操作台是控制系统专用的外设。

上述各种外部设备都通过各自的接口电路与输入/输出(I/O)总线相连接,它们可以方便地按控制需要进行配置。为了构成闭环控制系统,至少有用于和被控对象交换信息的输入、输出各一通道,以及用于人机通讯的输入、输出各一设备。视被控对象的需要配置外部设备,特别是通道及其接口,是计算机控制系统硬件设计中必不可少的工作,它将在第二章进行讨论。

### 3. 自动化仪表

主要指检测与执行装置。检测装置包括传感器和变送器,用于测量表征被控对象运动状态的各种物理量,如温度、压力、流量、液位、转速、位移等,并把它们转化为电量。有些数字式检测装置,直接把测得的物理量转化为数字量。在计算机控制系统的设计中,一般均利用现有的技术来解决检测装置和执行装置问题,本书中将不专门讨论。

#### (二) 软件

在计算机控制系统进行控制的过程中,主机能够自动地接收检测装置从现场送来的反映被控对象运动状态的各种信息,并自动地对这些信息进行加工作出相应的控制决策,再以信号形式将此决策送至现场,由现场执行装置完成控制调节,使被控对象的运动维持某一特定状态或按工艺流程顺序推进。主机的这种自动工作能力除了有硬件作物质基础外,乃是软件所赋予的。人们事



先通过编制程序使主机按预定的要求工作。可见，程序系统即软件是支持计算机控制系统能够工作所必不可少的支柱，它和硬件一样是构成系统必不可少的组成部分。

控制系统软件可分为系统软件和应用软件两类：

1. 系统软件，一般包括操作系统、语言加工程序和服务性程序等。操作系统是对计算机本身资源进行管理和调度的程序。语言加工程序，如汇编程序、编译程序及解释程序等。服务性程序有编辑程序、调试程序、连接程序及故障诊断程序等。系统软件通常由计算机制造厂为用户配套，带有一定的通用性。

2. 应用软件，是为实现控制而编制的专用程序，如数据采集程序、PID控制程序、事故处理与越限报警程序等。它广泛涉及到生产工艺、设备与控制方法等方面，通常是由使用单位或配套厂自行编制的。

实时控制程序可以用不同语言来编写，如汇编语言、扩展的高级语言以及专用语言等。目前在微机控制系统中，应用程序编制大部分采用汇编语言。主要原因是汇编程序具有占用内存省，执行速度快，可直接使用计算机全部资源的特点。另外的原因是不少微型计算机尚不能用高级语言来实现外部中断管理与数据输入、输出控制，而这些功能又恰是完成实时控制所必需的。现在有许多微机已开发了扩展的高级语言，允许用户在汇编程序中调用高级语言编写的子程序，或者在高级语言编写的主程序中调用汇编子程序。这种方法兼顾两种语言的特点，既便于处理较复杂的数学运算，又便于解决中断管理与输入输出问题，因此工程技术人员乐意使用。后面将通过实例分析介绍这种编程方法。

综上所述，可以看出：

(1) 在计算机控制系统中，数字计算机是控制部分的核心。所以，计算机控制系统的产生与发展，不仅有赖于控制理论的发展，也有赖于计算机技术的发展。