



普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

液压系统 微机控制

◎ 魏列江 编 著



▶ 流体传动与控制（液压技术）
不仅是一种传动技术，同时也是一
种重要的运动控制技术，已成为现
代运动控制的重要分支

▶ 本书以解决问题为目的，淡化
理论内容，强调实用性和针对性，在
一定程度上反映了国内外电液控制领域比
较成熟的新技术和新成果

▶ 创建专业教师交流平台，探讨问
题、研究教学方法、共享教学资源



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

液压系统微机控制

魏列江 编 著

李少年 强 彦 岳大灵 参 编

冀 宏 主 审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书详细介绍了液压系统微机控制的组成、结构、功能和典型方式,重点介绍了常用低压电器及继电器-接触器控制回路,通用数字控制器,液压系统微机控制中的专用控制器、检测元件,以及液压系统微机控制的常用方式和控制算法。

本书强调实用性和针对性,以解决实际问题为目的,淡化理论内容。在一定程度上反映了国内外电液控制领域比较成熟的新技术和新成果。

本书可以作为具有液压传动技术背景的机械电子工程、机械制造及其自动化、控制工程、动力工程等专业的高年级本科生和研究生的“计算机控制”课程教材,也可以作为流体传动与控制、运动控制等相关领域的工程技术人员培训教材和参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

液压系统微机控制/魏列江编著. —北京:电子工业出版社, 2014.6

普通高等教育机械类应用型人才及卓越工程师培养规划教材

ISBN 978-7-121-22639-7

I. ①液… II. ①魏… III. ①液压系统—微机控制—高等学校—教材 IV. ①TH137-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第048909号

策划编辑:李洁(ljje@phei.com.cn)

责任编辑:周宏敏 文字编辑:张迪

印刷:北京中新伟业印刷有限公司

装订:北京中新伟业印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:15 字数:384千字

版次:2014年6月第1版

印次:2014年6月第1次印刷

定价:35.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前言

流体传动与控制（液压技术）不仅是一种传动技术，同时也是一种重要的运动控制技术，特别是电液比例和电液伺服控制系统，更是充当了连接现代微电子技术和大功率被控对象的桥梁，已成为现代运动控制的重要分支。现代液压元件与微电子技术、传感器技术高度融合，内置了电子线路，具有模拟或数字接口，成为名副其实的机械电子产品。现代液压控制系统与计算机控制技术紧密结合，不仅可将各种复杂的控制策略应用于系统实现最优控制，还可实现系统状态的在线监测，实时诊断液压系统故障，真正实现了机电液一体化的高度集成。

但是，一般的读者均会对计算机在液压控制系统中的应用产生畏惧感，究其原因，主要是液压系统微机控制技术涉及液压技术、控制理论和计算机技术等互成“伙伴技术”的三门技术，这三门技术相互交叉和高度综合，特别是机械类的学生认为电气部分不是自己的专业，反之电气类的学生认为液压系统不是自己的专业，造成相互对自己的关联技术不甚了解，不能更好地进行系统的分析和设计。为满足具有液压技术基础的机械类专业本科生对计算机控制技术及其应用于液压系统的知识的学习，我们将液压系统中涉及的有关低压电器知识、电气控制知识和微机控制的知识抽取出来，编写了本书。

本书以控制系统构成中的控制器、广义被控对象和反馈检测元件三个要素为对象，以微机在液压控制系统中的功能为主线，首先对液压系统微机控制中涉及的低压电器及低压电气控制系统的基础知识做了较详细的介绍，然后重点讲述以可编程控制器（PLC）、工控机（IPC）和 xPC 目标为核心的通用数字控制器、以嵌入式微处理器为核心的专用电液数字控制器，以及实际液压控制系统现场仍在广泛使用的模拟控制器，简单介绍了液压系统微机控制中常用的检测元件。在此基础上，对液压系统微机控制的典型构成方式进行了较详细的阐述，最后介绍了 PID 控制算法及其在液压系统中的应用。

本书的读者对象为具有液压技术基础的机械类专业，机械电子工程、控制工程、动力工程等专业的低年级本科生和研究生，以及流体传动与控制、运动控制等相关领域的工程技术人员。

读者需具有一定的微机原理、自动控制原理和液压传动系统的基本知识，但由于本书主要以实际液压控制系统工程为背景，讲述方式也主要以对实际问题的理解和解决为目的，没有数学关系的深入推演，所以并不需要读者具有上述基础理论方面非常精深的知识。

本书的特色是：

理论教学注重工程背景的讲述，以对实际问题的理解为目的，没有数学关系的深入推演，强调实用性和针对性，在一定程度上反映了国内外电液控制领域比较成熟的新技术和新成果。

每章引入一个与该章内容相关的、来自编著者亲自设计的工程实际项目的训练实例,甚至有些实例的图纸和程序稍做改进即可用于实际工程项目中,使读者可以更好地理解该章所讲述的内容。

涉及的通用数字控制器、专用数字控制器和传感器等器件,均以工程现场实际使用的最新和典型产品为例讲解,主要介绍实际使用中关心的产品性能、功能、在系统中的地位和作用,以及实际接线和注意事项等,以提高读者的实际工程能力。

液压系统微机控制的方式等章节中的系统构成方式、数字控制阀、轴控制阀和总线型控制系统等,均为行业中比较新的概念,使读者能掌握实际行业发展的最新动态。

全书共7章。第1章概述了微机控制的电液轴的基本概念,计算机控制系统的结构、组成和分类,以及液压系统微机控制的基本概念;第2章介绍了常用低压电器及继电器-接触器控制回路;第3章和第4章详细讲述了以PLC、工控机IPC和xPC目标为核心的通用数字控制器,以及专用电液数字控制器和模拟控制器;第5章介绍了液压系统微机控制中常用的检测反馈元件;第6章介绍了液压系统微机控制的常用构成方式;第7章介绍了PID控制算法及其在液压系统微机控制中的应用。

本书由兰州理工大学魏列江编著,李少年、强彦和岳大灵参编,兰州理工大学冀宏主审。其中第1、4、6、7章由魏列江编写,第2章由李少年编写,第3章由强彦编写,第5章由岳大灵编写。

杭州电子科技大学的邹洪波对书稿的内容提出了许多宝贵建议;兰州理工大学硕士研究生李旭方、董万玉、冯志清、李娜娜、王霖、魏小玲、张晶、刘文广、马斌和韩啸参与了本书的资料收集、整理、文字校核和部分绘图工作,在此为他们对本书的贡献表示诚挚的感谢!

电子工业出版社的李洁编辑对本书的出版给予了极大帮助,也在此表示衷心感谢!

由于水平和经验所限,尽管我们尽了极大的努力,书中难免还有错误和欠妥之处,敬请读者批评指正。

本书受兰州理工大学研究生重点学位课程建设和兰州理工大学规划教材项目资助。

编著者

2013年12月

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 绪论	1	2.2.1 低压电器的分类	19
1.1 引言	1	2.2.2 低压电器的电磁机构	19
1.1.1 机器	1	2.2.3 低压电器的执行部件	20
1.1.2 传动	1	2.2.4 低压电器的结构特点	22
1.1.3 轴	2	2.3 常用低压电器	23
1.1.4 机械轴	2	2.3.1 接触器	23
1.1.5 液压轴	2	2.3.2 继电器	28
1.1.6 微机控制的电液轴	2	2.3.3 开关电器	35
1.1.7 液压系统的微机控制	3	2.3.4 主令电器	38
1.2 计算机控制系统发展简述	4	2.3.5 熔断器	40
1.3 计算机控制系统的结构和组成	5	2.4 电气控制图的绘制	41
1.3.1 自动控制理论回顾	5	2.4.1 常用的电气图形符号及 文字符号	42
1.3.2 连续控制系统的结构	7	2.4.2 电气原理图	42
1.3.3 计算机控制系统的结构	8	2.4.3 电气元件布置图	44
1.3.4 计算机控制系统的组成	8	2.4.4 电气接线图	44
1.4 计算机控制系统的分类	10	2.5 电气原理图的读图分析方法	45
1.4.1 数据采集系统	11	2.6 液压系统中的典型继电器-接触 器控制回路	46
1.4.2 操作指导系统	11	2.6.1 液压泵驱动电动机的选型 计算	46
1.4.3 直接数字控制系统	12	2.6.2 液压泵驱动电动机的直接 启动和降压启动	47
1.4.4 监督计算机控制系统	12	2.7 循序渐进实例: 电液伺服系统 微机控制中用到的低压电器及 电气控制系统设计	50
1.4.5 计算机分散控制系统	13	习题	52
1.4.6 现场总线控制系统	14		
1.5 计算机控制系统的发展趋势	15		
1.6 循序渐进实例: 电液伺服系统 微机控制实例	16		
习题	17		
第 2 章 常用低压电器及继电器-接触器 控制回路	18	第 3 章 通用数字控制器	54
2.1 引言	18	3.1 工业现场数字控制器概述	54
2.2 低压电器概述	19	3.2 可编程控制器 (PLC)	55
		3.2.1 可编程控制器概述	55

3.2.2 PLC 的硬件组成	60	第 4 章 液压系统微机控制中的专用	
3.2.3 PLC 输入输出接口电路	63	控制器	117
3.2.4 PLC 的工作原理	70	4.1 专用控制器概述	117
3.2.5 CPlH-XA 型 PLC 指令		4.2 专用控制器的分类	118
系统简介	77	4.3 模拟比例控制器	119
3.3 IPC 作为数字控制器	88	4.3.1 概述	119
3.3.1 概述	88	4.3.2 典型构成	120
3.3.2 IPC 的硬件组成	89	4.3.3 分类	121
3.3.3 IPC 的软件组成	91	4.3.4 模拟比例控制器的调整	
3.3.4 IPC 的系统总线	91	与使用	122
3.3.5 工控机输入/输出 (I/O)		4.3.5 模拟比例控制器的参数	
板卡	92	调节	123
3.3.6 其他板卡	94	4.3.6 模拟比例控制器产品	
3.3.7 IPC +I/O 板卡构成测控		举例	126
系统	94	4.4 模拟伺服控制器	130
3.3.8 IPC +远程 I/O 模块构成		4.4.1 概述	130
测控系统	95	4.4.2 与模拟比例控制器的	
3.3.9 PCI-1712 多功能数据采		异同点	130
集卡	96	4.4.3 模拟伺服控制器的特点	
3.4 xPC 目标方案	102	和使用	131
3.4.1 什么是 xPC 目标	102	4.5 专用数字控制器	136
3.4.2 xPC 目标的软件环境	103	4.5.1 概述	136
3.4.3 xPC 目标的硬件环境	104	4.5.2 MOOG 公司 MSC 数字	
3.4.4 xPC 目标输入/输出设备		伺服控制器	137
驱动程序支持	105	4.6 循序渐进实例: 电液伺服系统	
3.4.5 基于 xPC 目标的半物理		微机控制中的专用控制器	143
仿真实现过程	106	习题	145
3.5 嵌入式控制器作为数字控制器		第 5 章 检测元件	146
的用法	107	5.1 传感器的基本特性	146
3.5.1 Labview 及 NI 嵌入式控		5.2 接近开关	147
制系统的应用	108	5.3 光电编码器	151
3.5.2 Labview 及 NI 嵌入式控		5.3.1 增量式光电编码器	151
制器在液压实验台测试		5.3.2 绝对值编码器	155
系统中的应用	109	5.3.3 混合式光电编码器	158
3.5.3 NI CompactRIO 为核心		5.3.4 旋转变压器	160
构成的电液伺服微机控		5.4 位置传感器	162
制系统	111	5.4.1 直线位置传感器	162
3.6 循序渐进实例: 电液伺服系统		5.4.2 角位移传感器	163
微机控制中的通用控制器及		5.5 速度传感器	165
接口电路	113	5.5.1 直线速度传感器	165
习题	115	5.5.2 转速传感器	165

5.6 力/扭矩传感器	168	6.4.4 电液伺服系统的 微机控制	198
5.6.1 力传感器	168	6.4.5 机电液一体化控制阀的 微机控制系统	201
5.6.2 扭矩传感器	171	6.4.6 高速开关阀系统的微机 控制	204
5.7 其他传感器	173	6.5 循序渐进实例：高速开关阀在 车辆转向系统中的应用	208
5.7.1 压力传感器	173	习题	210
5.7.2 流量传感器	174		
5.7.3 温度传感器	175		
5.8 循序渐进实例：电液伺服系统 微机控制中的检测反馈元件	177		
5.8.1 位移和速度反馈检测—— 磁致伸缩位移（速度） 传感器	177		
5.8.2 负载角度检测反馈—— 光电编码器	179		
习题	180		
第6章 液压系统微机控制的常用方式	181	第7章 控制算法	211
6.1 引言	181	7.1 控制算法概述	211
6.2 液压控制系统中的常用阀	181	7.2 模拟 PID 控制器	211
6.3 液压控制阀的电-机械转换 元件	182	7.2.1 什么是 PID 控制器	211
6.3.1 开关型电磁铁	182	7.2.2 PID 控制结构	212
6.3.2 比例电磁铁	183	7.2.3 PID 模拟表达式	212
6.3.3 力矩（力）电动机	186	7.2.4 为什么要用 PID 控制器	212
6.4 液压系统微机控制的 典型方式	189	7.2.5 P、I、D 控制作用	212
6.4.1 液压系统开环和闭环 控制	189	7.3 数字 PID 控制器——PID 算法的 计算机实现	215
6.4.2 开关电磁阀定位系统的 微机控制	190	7.3.1 积分离散化	215
6.4.3 电液比例系统的 微机控制	196	7.3.2 微分离散化	215
		7.3.3 数字 PID 控制算法的 两种形式	216
		7.4 PID 算法在液压控制系统中的 应用	218
		7.5 循序渐进实例：电液伺服系统 中的控制算法	220
		7.5.1 系统设计要求	220
		7.5.2 系统频率特性仿真 分析	223
		参考文献	230

第 1 章 绪 论

【本章提要】

本章介绍本书的主要内容，讲述了电液轴控制系统的基本概念和计算机控制系统的结构、组成和分类，并回顾了自动控制原理的基本内容及计算机控制技术的发展历史和应用背景。

【预期收获】

完成本章的学习后，学生应该：

- 理解电液轴微机控制的基本概念。
- 掌握计算机控制系统的结构、组成和分类，理解计算机作为控制器构成的采样控制系统与模拟电路作为控制器构成的模拟控制系统的异同点和优缺点。
- 能够简要复述计算机控制系统的发展历史及其在工业控制系统中的重要作用。
- 能够按照技术进步的趋势，讨论计算机控制系统的未来发展趋势。
- 能够理解控制理论的基本概念

1.1 引言

1.1.1 机器

一部机器通常由原动机、工作机、传动装置和控制装置四部分组成，如图 1.1 所示。原动机的作用是把某种形态的能量转换为机械能，给机器提供动力，如电动机、内燃机等；工作机是利用机械能来改变材料或工件的性质、状态、形状或位置，以进行生产或达到其他的预定目的；传动装置设于原动机和工作机之间，将原动机产生的能量（或动力）按工作机的要求进行变换和传递，起着传递、转换和控制能量的作用；而控制装置的作用是根据工作机的要求给传动装置给出控制信号，从而调节（改变方向、接通或切断、增大或减小）由原动机传递来的能量（或动力）。

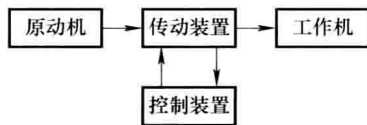


图 1.1 机器的构成

1.1.2 传动

按照传动装置所采用工作介质的不同，可将其分为机械传动、电气传动和流体传动。其中，流体传动是以流体（液体、气体）为工作介质进行能量传递和控制的一种传动方式；以液体为工作介质的为液体传动；以气体为工作介质的为气压传动。液压传动属于流体传动。

1.1.3 轴

广义地讲，将运动控制系统中执行元件上每个独立的受控机械参数（位置、速度或力）称为一个“轴”。例如，一个伺服电机转速的控制，或者一个液压缸活塞杆位置的控制，均可称为一个“轴”。由于运动控制一般多是闭环系统，且各运动参数需要相互协调联动，所以轴的个数也是系统中相互协调工作的闭环系统的个数。数控机床行业常说的“几轴联动”即是指这个概念。

1.1.4 机械轴

杠杆是最简单的机械传动轴，如图 1.2 所示，它可以简单地通过调节支点的位置来调节从原动机传递到工作机的力的大小，所以支点可以看作是杠杆传动的控制装置。

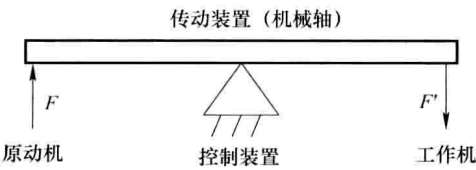


图 1.2 一种简单的机械轴——杠杆传动

1.1.5 液压轴

在液压系统中，带有压力的液体可以像杠杆一样传递动力，如图 1.3 所示。电动机驱动液压泵从而驱动液压缸的活塞杆，活塞杆推动工作机部分的负载运动，动力从原动机通过液压系统传递至工作机部分，可称为液压轴。动力传递的大小、快慢、通断等由控制装置通过调节液压阀或/和液压泵（液压马达）来获得。

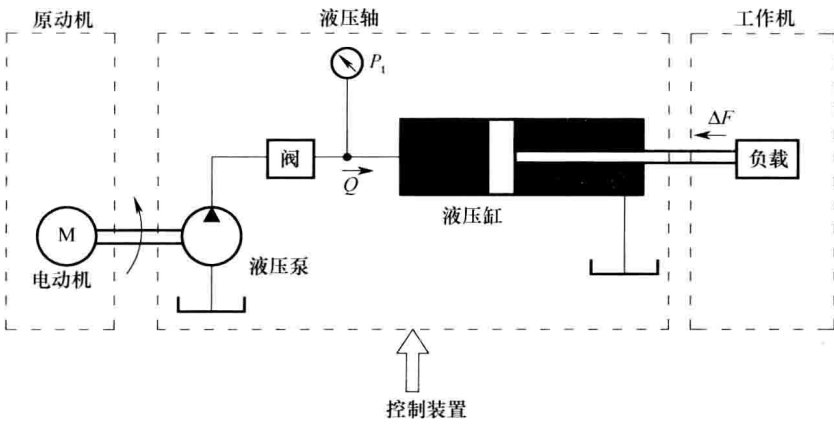


图 1.3 液压轴传递动力

1.1.6 微机控制的电液轴

液压轴控制装置的控制作用可以通过某种调节动作完成，如通过人工或其他机械量调节手动阀的通断或开口大小，从而调节动力传递的通断或快慢；也可以通过电信号控制电动阀（如

电磁换向阀、电液比例阀或电液伺服阀等)实现,甚至可以将被控量反馈至控制装置部分构成闭环控制的电液轴,如图1.4所示。由于控制装置部分的核心往往是微机,故可称为微机控制的电液轴。本书所述微机是广义的以微处理器为核心的微型计算机,如PLC(可编程控制器)、工控机、各种嵌入式计算机等通用数字计算机,以及专为控制液压阀开发的专用数字控制器。由于PLC的广泛应用,本书控制主机部分主要讲述PLC的基础知识及其在液压控制系统中的应用。作为PLC控制系统的预备知识,本书的前几章主要介绍流体系统中常用的低压电器和电气控制回路的基础知识。

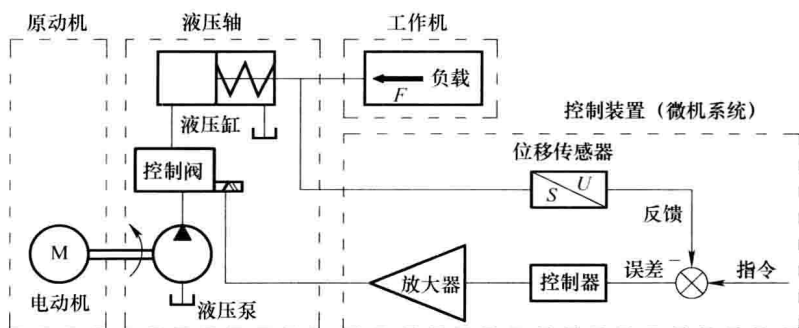


图 1.4 微机控制的电液轴

1.1.7 液压系统的微机控制

液压传动从本质上可以看作是利用带有压力的液体介质传递动力的柔性液压轴,由于液压管路几乎可以任意弯曲,所以布置灵活。传动的主要问题在于有效调节所传递动力的大小、快慢和通断。对于液压传动来说,可以通过调节液压阀(通断或开口大小)、液压泵(排量或转速)或液压马达(排量)实现,总体上都是通过调节进入液压执行机构(液压缸或液压马达)的介质流量 Q 实现控制的,这种控制在液压系统中往往涉及对某种阀的控制,对液压泵或液压马达的变量机构的控制,或对原动机转速的控制,而采用微机控制往往是最有效的,如图1.5所示。本书主要讲述液压传动过程中由微机实现控制的过程,包括液压系统微机控制的构成方法、工作过程、控制算法,以及涉及的元器件。

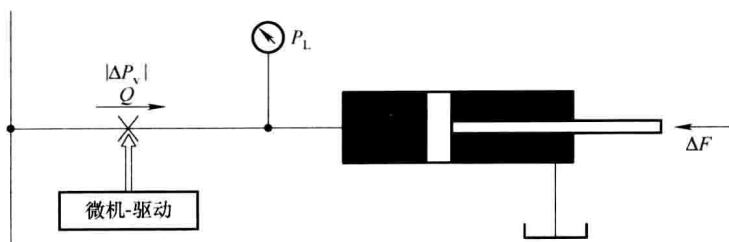


图 1.5 液压系统的微机控制

【小知识链接】

液压系统中,进入执行机构流量 Q 的调节可以通过液压泵转速的调节、液压控制阀口的调节,以及对液压泵或马达排量的调节等三种方式实现。液压泵转速的调节一般通过原动机的转速调节实

现,如原动机是三相交流异步电动机时,可以用微机(如可编程控制器)控制的变频调速实现调速;液阀阀可以是开关型电磁阀、电液比例阀、电液伺服阀或高速开关阀(脉冲阀)等,其调节装置可以用微机实现;变量液压泵或变量液压马达的排量调节也是通过对其控制阀的调节实现的。

1.2 计算机控制系统发展简述

电子计算机是 20 世纪 40 年代中期发展起来的新技术之一,它的出现使科学技术产生了一场深刻的革命。计算机出现不久,人们就试图将其应用于工业现场,如 1952 年,计算机开始应用于化工生产过程的自动检测 and 数据处理,并打印出生产管理用的过程参数。1954 年,开始利用计算机构成开环系统,操作人员根据计算结果及时准确地调节生产过程的控制参数。

直到 1959 年,世界上第一台过程控制计算机在美国德克萨斯州的一个炼油厂正式投入运行,实现了“实时”、“在线”控制。该系统控制了 26 个流量、72 个温度、3 个压力和 3 种成分,其基本功能是控制反应器的压力,确定反应器进料量的最优分配,根据催化作用控制。

早期的数字控制系统使用单片处理器完成许多路甚至几百路的运算。如果中央处理器出现故障可能造成控制全部失灵,因此保护生产装置免遭因控制失灵而带来的损失是非常必要的。许多系统都采用冗余处理器,让它跟踪主处理器工作,当主处理器出现故障时,自动接替主处理器的工作。一旦处理器出现故障,备用的模拟控制器可投入运行;但是这样投资较大,因为需要许多模拟控制器做备份。因此,不太关键的回路可以设置备用的手动操作单元,以节约一些开支。一个更有效的解决办法是,利用与计算机串联的形式设置模拟控制器的设定值。这么做就把可靠性与较好的控制性能结合起来,而且所有的控制器一直处于运行状态。这种控制方法被称作计算机监督控制(SCC),而用计算机直接操作执行机构的控制方法被称作直接数字控制(DDC)。所以在随后的几年里,随着半导体技术的发展,处理器的可靠性进一步提高,运算速度进一步加快和其成本下降,尺寸变小,使得它们可以比较容易地分布在整个生产装置的底层。这样不仅可以节省现场连线,而且每个处理器所担负的回路数减少到 8~32 回路。这种“分布式”系统一般不需要配置备用的模拟控制器。

1960 年左右,开始在生产过程中采用计算机监督控制(SCC),由监督计算机给出控制系统的设定值等参数,控制过程由现场控制器完成,如英国的帝国化学工业(ICI)实现了一个 SCC 系统,其中数据采集为 244 个,它控制 129 个阀门。20 世纪 60 年代后期,计算机开始侧重生产过程的最优控制,并向分级控制和网络控制方向发展,已出现了专用于工业生产过程控制的小型计算机。

20 世纪 70 年代初,随着大规模集成电路的发展,出现了微型计算机,使得计算机控制技术进入了一个崭新的阶段。微型计算机运算速度快,可靠性高,方便灵活,通用性强,价格便宜,体积小。在 20 世纪 70 年代中期,传统的集中控制系统发展为分散控制系统(DCS)。20 世纪 80 年代,随着超大规模集成电路(VLSI)技术的发展,使得计算机向着超小型化、软件固化和控制智能化方向发展。20 世纪 90 年代初又推出具有专家系统、模糊控制、计算机辅助设计(CAD)等把控制与管理融为一体的新型分散控制系统。

目前,微型计算机的应用已经渗透到科学技术的各个领域及生产和社会生活的各个部门,除了在工业生产过程控制方面计算机控制日趋成熟外,在机电控制、航天技术和各种军事装备中,计算机控制也日趋成熟,得到广泛应用。例如,通信卫星的姿态控制、卫星跟踪天线的控制、电气传动装备的计算机控制、计算机数控机床、工业机器人的姿态控制、射电望远镜天线控制、飞行器自动驾驶仪等。

计算机控制是以自动控制理论为基础的。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发展与应用。微电子技术和计算机技术的发展，为计算机控制技术和应用奠定了坚实的基础。可以预言，随着超大规模集成电路技术、软件智能化技术和自动控制理论的发展，计算机控制技术将会出现惊人的飞跃。

【小知识链接】

(1) 过程控制：Process Control

过程控制是以表征生产过程的参量为被控制量，使之接近给定值或保持在给定范围内的自动控制系统。这里的“过程”是指在生产装置或设备中进行的物质和能量的相互作用及转换过程。表征过程的主要参量有温度、压力、流量、液位、成分、浓度等。

(2) 运动控制：Motion Control

运动控制就是对机械运动部件的位置、速度和力（力矩）等进行实时的控制管理，使其按照预期的运动轨迹和规定的运动参数进行运动。

(3) 实时：On time

实时性是指工业控制计算机系统应该具有的能够在限定时间内对被控对象的微小变动做出及时反应的特性，即及时采集、及时处理、及时输出。

(4) 在线：on-line

在线是指计算机作为控制器完成信号采集和运算，并且计算机直接将结果输出给被控对象（执行机构）。在线方式是生产过程和计算机直接相连，并受计算机控制的方式。

(5) 离线：off-line

离线一般指信号采集（反馈）和/或输出不是由计算机直接完成而是由人工完成。离线方式是计算机计算控制量，但生产过程（的输入和/或输出）不和计算机相连，并不受计算机直接控制，而是靠人进行联系并做相应操作的方式。

1.3 计算机控制系统的结构和组成

1.3.1 自动控制理论回顾

要深入理解计算机控制系统，必须对自动控制理论有较好的理解。下面剖析一个人手取书的过程。按照自动控制原理，人手取书的过程可以用如图 1.6 所示的方块图表示，这是一个典型的自动控制过程：系统的输入量是希望手达到的位置（即书的实际位置），系统的输出量是手的实际位置，眼睛将输出量反馈至输入端，（在大脑中）与输入量进行比较（即希望手达到位置与手的实际位置相减）获得偏差，大脑再根据该偏差计算出需要输出给胳膊的操作量，推动胳膊和手运动，直至手的实际位置达到书的位置（偏差被消除）。

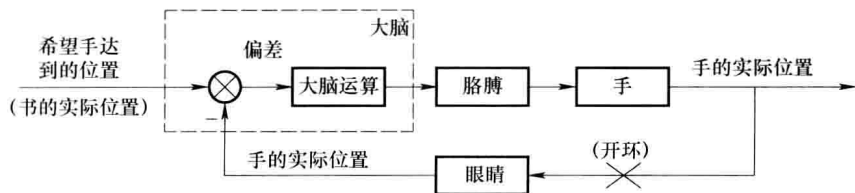


图 1.6 手取书的控制过程方块图

人手取书这个简单的例子包含了自动控制理论几乎所有的重要概念。

(1) 负反馈：将输出信号（手的实际位置）测量后，与输入信号（书的实际位置）进行比较（相减）。

(2) 闭环：将输出信号测量后反馈至输入端，形成信号的闭合回路。闭环的优缺点如下

优点：被控量对外部干扰和元件内部参数变化引起的干扰不敏感，所以可以由不太精密的元件构成控制品质较高的系统。

缺点：结构复杂，存在稳定性问题。

(2) 开环：没有将输出信号反馈至输入端。如在手取书的例子中，如果闭着眼睛取书，则过程是告诉他书的实际位置（输入量）在手的左下方一尺处，那么他的大脑将直接输出一个操作量给胳膊，推动手向左下方一尺处运动。如果胳膊和手的运动足够精确，则几乎“立刻”就拿到了书。开环系统的优缺点如下。

优点：结构简单，无稳定性问题。

缺点：控制精度依靠各元件精度和参数稳定性，对干扰敏感。

(4) 以偏纠偏：调节器（如大脑）利用输入信号与输出信号的偏差值计算控制量，控制执行机构（如胳膊）推动被控对象（如手）向书的实际位置运动，以减小偏差。上述过程不断进行，最终将该偏差消除。

(5) 稳定性：如果一个人的手比较“笨”（被控对象“惯性”很大），则可能发生的情况是当控制过程已经使得手的实际位置达到了书的位置，眼睛也及时地将手的实际位置反馈到了大脑，大脑也及时地将偏差计算出来（偏差为0），则此时大脑输出给胳膊的操作量是零，手应该停止下来。但是由于手有运动惯性，仍然按照原来的方向运动，超过了书的位置而产生了另一个方向的偏差，则按照上述以偏纠偏的过程，大脑就会产生一个反向的操作量来纠正这个偏差，该过程会反复进行。可以想到，如果产生的反向偏差越来越小，则手最终会拿到书，这样，则说系统的响应是收敛的，是稳定系统；反之，如果偏差越来越大，则系统是发散的，是不稳定的系统。（注意：准确的系统稳定性定义指的是在有界输入作用下，输出响应也是有界的动态系统；对稳定的线性系统，传递函数的极点都在复平面左半平面内。）

(6) 绝对稳定性：只描述系统稳定与否，不涉及诸如稳定程度等其他系统特征的概念。如上述稳定性描述即是指绝对稳定性。

(7) 相对稳定性：系统稳定的程度。对单输入单输出线性系统，频域中最著名的指标是幅值裕度和相位裕度；用传递函数特征方程的实根或共轭复根的实部（离虚轴的距离）来度量系统的稳定程度。

(8) 稳态误差（准确性）：系统过渡过程结束后，输出量与最终的稳态值之间的差值。

(9) 响应速度（快速性）：输入变化时（如书的实际位置有突然的变化），输出跟踪的速度（对输入的响应）；或系统受到扰动时（如被控对象（即手）受到扰动偏离了书的位置），恢复的速度（对扰动的响应）。

(10) 大脑的作用：比较偏差，对偏差运算产生控制量。

其他相关概念，如线性系统、一阶系统、二阶系统、典型信号（阶跃信号、斜坡信号、加速度信号、正弦信号），阶跃响应、频率特性（幅频特性、相频特性）、串联校正、滞后-超前校正等，可以查看自动控制理论相关书籍。

1.3.2 连续控制系统的结构

连续控制系统是我们在自动控制原理中研究最多的系统。连续控制系统中的信号均为时间的连续函数。连续控制系统的典型结构如图 1.7 所示,它是由广义被控对象(包括执行机构和被控对象)、检测元件、比较元件和控制器(校正元件)构成的负反馈控制系统。

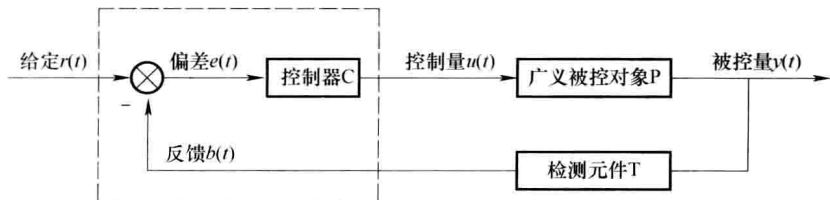


图 1.7 连续控制系统的典型结构

控制器：C-Controller 根据误差信号产生控制信号的“元件”，是控制系统的核心，其灵魂就是算法（尤其是控制算法）。控制器产生控制信号的方法就是控制算法。如图 1.7 所示的控制器在自动控制原理中称为串联校正环节，工业现场更多的称为控制器或调节器，如滞后-超前校正环节，工业现场常称为 PID 控制器。

当控制器（包含比较元件）的功能是：

- (1) 由大脑完成的时候，则为人工控制。人的大脑是迄今为止最高级和智能的控制器。
- (2) 由模拟电路（或机械、液压和气动机构）完成时，则为模拟控制系统（模拟控制器）。
- (3) 由计算机（硬件和软件）完成时，则为计算机控制系统（数字控制器）。

广义被控对象：P-Plant，将执行机构和被控对象合起来称作广义被控对象。例如，在液压控制系统中，液压阀控制液压缸驱动负载一起可以看作为广义被控对象。

检测元件：T-Transducer，检测被控制物理量的反馈传感器。例如，在液压系统中主要为位置、速度和力（压力）传感器，以及定位（或定压）控制时的开关型传感器（接近开关、行程开关或压力继电器等）。

【小知识链接】

模拟控制器与数字控制器的优缺点。

1) 模拟控制系统（模拟控制器）

- (a) 控制工程师比较熟悉。
- (b) 就简单算法，模拟控制器速度比较快。
- (c) 控制器参数调节不灵活，调节范围有限。
- (d) 元件精度影响控制器精度。元器件参数易受老化和环境温度影响，易发生漂移。
- (e) 实现复杂控制算法困难。

2) 计算机控制系统（数字控制器）

- (a) 控制器算法由软件实现，参数调节灵活，范围几乎不受限制。
- (b) 精度只受字长限制。元件参数漂移不影响控制器精度。
- (c) 可实现复杂算法。
- (d) 输入/输出的计算与逻辑判断能力强，而且可在线重构回路，并具备自适应控制性能。
- (e) 响应速度较慢。由于计算时延——A/D、D/A 通道时间及程序运行时间等会引入相位滞后，计算机控制系统较模拟控制系统响应慢。如果操作系统不是实时操作系统，则更慢。但在

多回路、复杂控制时，由于计算机强大的数据处理和逻辑判断能力，计算机控制系统中断响应优先级可排序，综合响应能力好。

1.3.3 计算机控制系统的结构

计算机控制系统的结构与连续系统十分相似，只是控制器由数字计算机（通常是微机）实现。工业现场多为模拟信号（时间的连续函数），而数字计算机只能处理离散的数字信号。为了信号的匹配，在输入/输出两侧分别设有模-数转换器（A/D）和数-模转换器（D/A），如图 1.8 所示。可见，计算机控制系统是离散系统和连续系统的混合系统，称为采样控制系统。

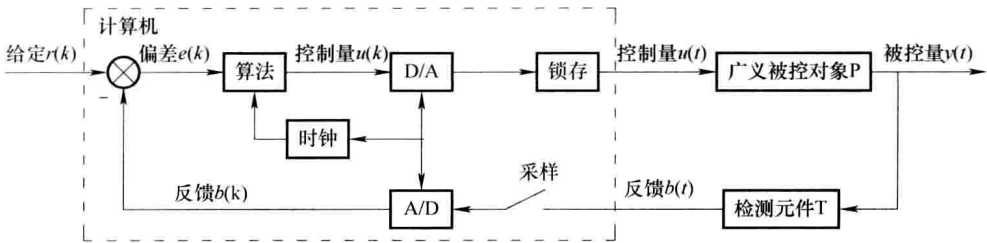


图 1.8 计算机控制系统的典型结构

1.3.4 计算机控制系统的组成

由于计算机控制系统的用途或目的不同，它们的规模、结构和功能等可以有很大的差别，但是它们都有两个共同的基本组成部分，即硬件和软件。硬件是指计算机本身及其外围设备；软件是指管理计算机的程序及控制应用程序。下面对计算机控制系统的各部分功能进行介绍。

1. 硬件组成

计算机控制系统的硬件主要由主机、外部设备、过程输入/输出设备（接口电路、测量变送器、功率驱动）及广义被控对象等组成，如图 1.9 所示。现分述如下。

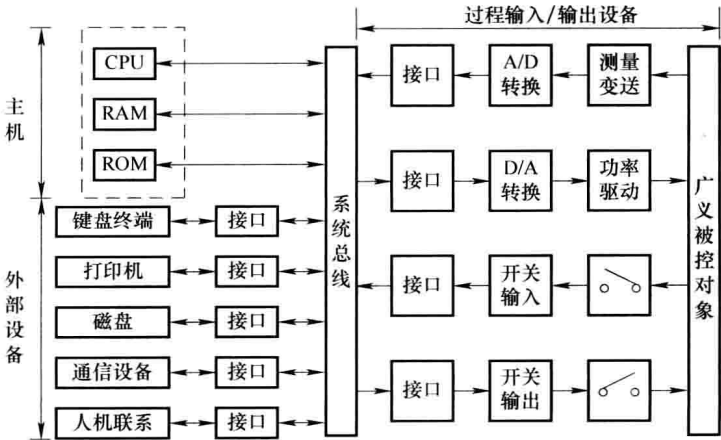


图 1.9 计算机控制系统的硬件组成框图