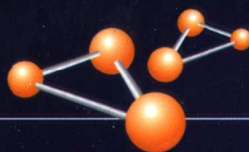


高等学校自动化专业教材



计算机控制技术

熊静琪 主编

43



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

第2版



计算机控制技术

第2版



清华大学出版社

ISBN 7-302-11111-1

高等学校自动化专业教材

计算机控制技术

熊静琪 主编

徐俊 刘民珉 熊世和 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是作者在《机电系统的计算机控制工程》的基础上,综合近年来在教学、科研上的一些经验和成果,吸收了国内外的先进理论、方法和技术而编写的。本书除了保留了原教材的特点和优点外,增加了系统辨识及智能控制系统(第8章)、计算机网络控制技术(第9章)、控制系统计算机辅助设计、计算及仿真(第10章)等章节,并对其他章节做了修改和充实。本书在阐述基本原理和设计方法时,尽量避免运用高深的数学理论,更加重视工程实际应用,同时还注意保持技术、方法的先进性和实用性及全书内容的系统性。书中安排了许多例题、仿真实验结果和习题,以帮助读者理解。

本书可作为机械设计制造及自动化专业大学本科和研究生教材,可作为工业自动化、计算机应用等专业的教学参考书,也适合于从事计算机应用的工程技术人员阅读。

图书在版编目(CIP)

计算机控制技术/熊静琪主编.——北京:电子工业出版社,2003.6

高等学校自动化专业教材

ISBN 7-5053-8706-5

I. 计... II. 熊... III. 计算机控制—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 037880 号

责任编辑:凌 毅

印 刷:北京大中印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×980 1/16 印张:20.25 字数:450 千字

版 次:2003 年 6 月第 1 版 2003 年 6 月第 1 次印刷

印 数:6 000 册 定价:26.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换;若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010) 68279077

前 言

本书是作者在《机械系统的计算机控制工程》的基础上,综合了近年来在教学、科研上的一些经验和成果,吸收了国内外的先进理论、方法和技术,反复修改、总结、编著定稿的。

《机电系统的计算机控制工程》出版后,被许多兄弟院校选为机械设计、制造及自动化专业的本科生和研究生教材或教学参考书,也被广大科技工作者选做科技参考书。本书除了保留了原教材的特点和优点外,结合当今科学技术的发展,增加了系统辨识及智能控制系统(第8章)、计算机网络控制技术(第9章)、控制系统计算机辅助设计、计算及仿真(第10章)等章节,并对其他章节做了修改、充实和提高,在各章末都附有练习题。

本书的另一个主要特点是大量使用了计算工具 MATLAB 和 Simulink,并从根本上修改了教学方法。所有主要的结果都直接采用计算工具来表述,这样容易处理复杂问题,而且有可能解决本课程的许多实际设计问题。在使用计算工具的同时,也强调原理和概念的重要性,书中最关键的结果采用笔算和书面计算的方法表示,以便帮助学生理解计算工具的作用。

本书在编著过程中注意保持技术、方法的先进性和实用性及全书内容的系统性,书中安排了许多例题、仿真实验结果和习题,以帮助读者理解。

本书第1,8,11章由熊世和编写;第2~4章由徐俊编写;第9章由刘民珉编写;第6,7,10章由熊静琪编写。全书最后由熊静琪统稿。

由于编者水平有限,书中定有不当之处和错误的地方,欢迎读者批评指正。

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 机电系统的概念及其研究价值	1
1.2 机电系统计算机控制的概念及组成	1
1.3 计算机控制技术的发展	3
1.4 计算机控制理论	4
1.5 计算机控制系统的分类	7
小结	12
习题	12
第 2 章 机电系统的数学模型及传递函数	14
2.1 常用的传感器和执行器	14
2.1.1 传感器	14
2.1.2 执行器	16
2.2 机电系统数学模型的建立	19
2.3 用拉普拉斯变换求解线性微分方程	24
2.3.1 拉普拉斯变换的定义	24
2.3.2 常用函数的拉氏变换	24
2.3.3 拉氏变换的基本定理	25
2.3.4 拉氏反变换	25
2.3.5 用拉普拉斯变换求解线性微分方程	26
2.4 传递函数和方框图	27
2.4.1 传递函数的定义	28
2.4.2 简单方框图的传递函数	30
2.5 状态空间分析法	36
2.5.1 状态空间分析法的基本概念	36
2.5.2 线性系统的状态空间表达式	37
2.5.3 状态空间表达式的建立	39
2.5.4 状态空间分析的 MATLAB 实现	43
2.6 机电系统未建动力学模型	45
小结	49
习题	50

第3章 连续时间信号和数字信号之间的转换	52
3.1 概述	52
3.2 信号的采样	53
3.3 采样定理及采样周期的选择	54
3.4 采样信号的复现和采样保持器	56
3.5 D/A转换器(DAC)原理及应用	58
3.6 A/D转换器(ADC)原理及应用	62
小结	67
习题	67
第4章 线性离散控制系统的数学描述方法	68
4.1 Z 变换的定义	68
4.2 Z 变换的基本定理	71
4.3 Z 反变换	73
4.4 差分方程	78
4.5 用 Z 变换求解差分方程	79
4.6 脉冲传递函数	80
4.6.1 脉冲传递函数的概念	80
4.6.2 开环脉冲传递函数	82
4.6.3 闭环脉冲传递函数	85
4.7 Z 平面	88
小结	90
习题	90
第5章 控制系统的性能指标描述	92
5.1 计算机控制系统的性能及其指标	92
5.1.1 计算机控制系统的稳定性	92
5.1.2 计算机控制系统的能控性和能观测性	93
5.1.3 动态指标	93
5.1.4 稳态指标	94
5.1.5 综合指标	94
5.2 线性离散系统的稳定性分析	95
5.2.1 Z 平面的稳定性条件	96
5.2.2 朱里(Jury)稳定判据	97
5.2.3 双线性变换的劳斯(Routh)稳定判据	98
5.3 线性离散系统的稳态误差分析	100
5.4 线性离散系统的动态响应分析	103
5.5 线性离散系统的根轨迹分析法	107

5.5.1 根轨迹图	107
5.5.2 Z 平面上的等阻尼线	110
5.6 线性离散系统的频率特性分析法	111
5.6.1 对数频率特性	111
5.6.2 极坐标频率特性	112
小结	114
习题	114
第 6 章 计算机控制系统的经典控制理论设计	115
6.1 概述	115
6.2 数字控制器的等价离散化设计	116
6.2.1 各种离散化方法	116
6.2.2 各种离散方法的比较	121
6.3 对数频率特性法校正	126
6.4 数字 PID 控制	129
6.4.1 模拟 PID 控制规律的离散化	129
6.4.2 PID 控制器的脉冲传递函数	130
6.4.3 PID 控制器参数对控制系统性能的影响	131
6.4.4 PID 控制规律的选择	135
6.4.5 PID 控制算法的改进	135
6.4.6 PID 控制参数的确定	137
6.5 数字控制器的离散化设计法	139
6.5.1 数字控制器的解析设计法	139
6.5.2 时间最优控制系统	143
6.5.3 有限拍无纹波系统的设计	149
6.5.4 有限拍无纹波设计的改进	152
6.5.5 扰动系统的有限拍设计	155
6.5.6 时间最优控制系统设计的小结	157
6.6 纯滞后对象的控制	157
6.6.1 大林算法	158
6.6.2 纯滞后补偿(Smith 预估)控制	161
6.7 复合计算机控制系统	163
6.8 串级控制系统的设计	165
6.9 采样频率的选择	166
小结	168
习题	169

第 7 章 计算机控制系统的现代控制理论设计	170
7.1 线性离散系统的离散状态空间表达式	170
7.1.1 离散状态空间表达式的建立	170
7.1.2 线性离散系统的 Z 特征方程及 Z 传递矩阵	175
7.1.3 线性离散系统离散状态方程的求解	177
7.2 线性离散系统的可控性及可观测性	177
7.2.1 离散系统的可控性	178
7.2.2 离散系统的可观测性	180
7.3 离散状态空间设计法	181
7.4 极点配置设计法	187
7.5 状态观测器设计	189
7.6 降阶观测器	192
7.7 线性定常离散系统二次型最优控制	193
7.7.1 最优控制的基本概念	193
7.7.2 线性二次型最优控制	195
小结	199
习题	200
第 8 章 辨识及智能控制系统	201
8.1 系统辨识的基本问题	201
8.2 被控对象或过程的辨识	202
8.3 智能控制系统	212
8.4 仿人智能控制	214
小结	223
习题	223
第 9 章 计算机网络控制技术	225
9.1 概述	225
9.1.1 控制网络和信息网络的区别	225
9.1.2 控制网络的类型及其相互关系	225
9.2 现场总线控制技术	227
9.2.1 现场总线技术简介	227
9.2.2 现场总线系统的结构和特点	227
9.2.3 几种有影响的现场总线	228
9.3 分布式控制网络技术	231
9.3.1 分布式控制系统概述	231
9.3.2 分布式控制系统控制方案	231
9.3.3 分布式控制网络的结构	233

9.4 集散型控制系统	236
9.5 控制网络与信息网络的集成技术简介	239
9.6 网络控制系统实例	240
小结	243
习题	243
第 10 章 控制系统计算机辅助设计、分析及仿真	244
10.1 CACSD 软件环境及新技术简介	244
10.2 MATLAB 简介	245
10.2.1 MATLAB 的历史	245
10.2.2 MATLAB 的组成	245
10.2.3 MATLAB 的桌面	247
10.2.4 MATLAB 的基本语法	248
10.3 控制系统的数学描述与建模	250
10.3.1 控制系统的数学模型	250
10.3.2 数学模型的转换	251
10.3.3 第四种系统数学模型	253
10.3.4 控制系统模型的典型连接	253
10.4 连续系统模型的离散化	254
10.5 控制系统的分析方法	255
10.5.1 控制系统的稳定性分析	255
10.5.2 控制系统的时域分析	256
10.5.3 控制系统的频域分析	258
10.5.4 根轨迹图	260
10.6 控制系统的设计与仿真	261
10.6.1 经典控制理论设计	262
10.6.2 现代控制理论设计	266
10.7 Simulink 仿真	268
10.7.1 Simulink 简介	268
10.7.2 Simulink 的环境与建模	268
小结	270
习题	271
第 11 章 计算机控制系统的设计与工程实现	273
11.1 组建计算机控制系统	273
11.2 计算机控制系统对环境的适应性	273
11.3 计算机控制系统数字控制器的实现方法	282
11.4 数字控制器的程序设计	291

11.5 机械手的一个终端执行器的微机控制·····	291
11.6 磁盘驱动器的磁头臂的微机控制·····	300
小结·····	305
习题·····	305
附录 A 控制系统工具箱(Toolbox \ Control)函数清单 ·····	308
参考文献·····	312

第 1 章 概 论

1.1 机电系统的概念及其研究价值

一般来说,机电系统是机械和电的组合系统,它的动力部分是电气的,经过电气系统与工艺过程或被控现象相联系的是机械设备。机械设备与电气动力相结合的系统称为机电系统。机电系统是运动控制系统的基本环节。

机械设备(亦称为被控对象)包括机械和机械传动两部分内容。电气动力包括能量放大和执行器两部分内容。能量放大一般是电压放大、电流放大和功率放大,这些统称为驱动器。执行器一般是指伺服电机、步进电机、电磁阀和电磁铁等,根据输出信号的类型,它常分为线性执行器和数字式执行器两类,因而与之相匹配的是线性驱动器和脉冲驱动器。

机电系统的物理结构框图如图 1.1 所示。图中 $u(t)$ 为连续时间控制信号, $u(nT)$ 为离散时间控制信号, T 是采样周期(或控制周期), n 为整数。

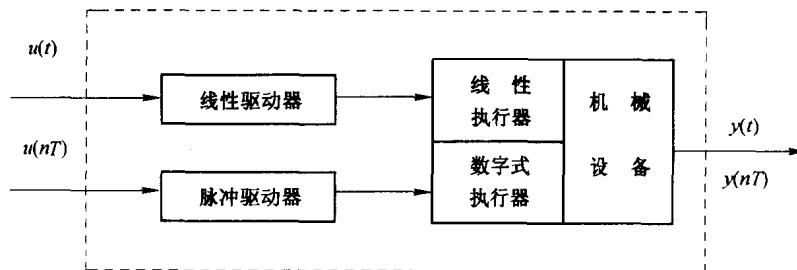


图 1.1 机电系统的物理结构框图

机电系统在国防军事装备、航空航天设备、民用设备、机电产品和生产过程自动化中均大量地存在;又因为力学系统中的位置、速度、转角,电力系统中的电流、电压、电感和电容;化学热力学中的克分子数、温度、压力、流量等和机电系统的状态函数是相似的。所以机电系统的研究分析具有一般性、代表性、先进性和实用性的价值。

1.2 机电系统计算机控制的概念及组成

随着计算机和微电子技术的迅速发展,计算机不仅用于单个控制回路的调节器或控制器中,代替常规的模拟调节器或控制器,而且还经常被用于高度现代化的工业生产控制系统中。可以这样说,目前所有的控制系统都是基于计算机控制来实现的,而所有开发的控制系

统都是以计算机控制为基础的,其发展方向是“智能”和“柔性”。所谓“智能”和“柔性”就是不改变系统的硬件,而能根据客观的情况灵活地完成要求的多种功能,这正是计算机的特长所在。

因此,机电系统计算机控制的含义是机电系统、被控现象(或过程)、信息获取和处理(测量技术)、计算机接口等部分,在计算机的支持下,以系统的性能指标为准则,用计算机系统集成观点进行有效的组合而形成的计算机控制系统。机电系统计算机控制系统的基本物理结构如图 1.2 所示,它又被称为直接数字控制系统(DDC)。

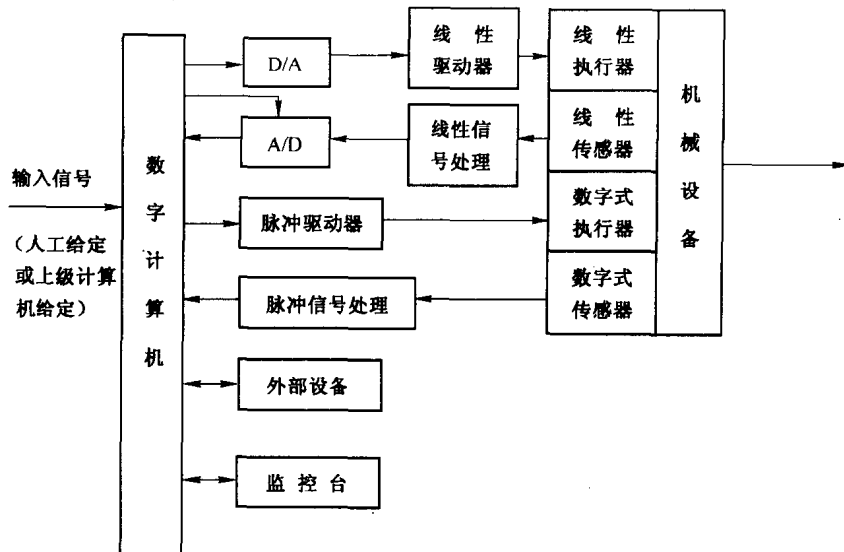


图 1.2 机电系统计算机控制系统的基本物理结构框图

图 1.2 中传感器检测与机械状态有关的物理量,它的输出必须转换为电信号。机械状态的物理量是指位置、速度、加速度、力和力矩等,至于检测什么物理量视系统的要求而定。

执行器是对机械设备作用的工作部分,主要产生力学运动,由此改变机械状态。执行器按动力源可分为电气式、液压式、气动式以及其他方式。电气执行器中,一般有伺服电机、步进电机、电磁线圈等。

线性信号处理包括线性连续时间信号放大及滤波等。

A/D 称为模拟数字转换器,它包括采样保持和量化,其输出为数字形式,何时采样由计算机控制。

D/A 称为数字模拟转换器,它是将数字信号转换成模拟信号形成控制量。

外部设备包括显示器和打印机等,监控台主要包括监视、控制按钮和指示灯等,被控对象是机械机构或过程。

有计算机参加的控制系统称为计算机控制系统,有时也称为数字控制系统,这是计算机在控制系统中的在线应用。计算机还可以帮助工程设计人员对控制系统进行分析、设计、仿

真和建模等工作,这方面的内容称为计算机辅助设计或控制系统 CAD,这是计算机在控制系统方面的离线应用。

1.3 计算机控制技术的发展

控制理论与计算机技术相结合,产生了计算机控制理论与技术。

控制理论发展的初期,是以反馈控制理论为基础的自动调节原理。随着科学技术和生产的发展,已成为一门独立的学科,称为控制论。控制论包括工程控制论、生物控制论和经济控制论。本书所涉及的只是工程控制论中的问题,主要研究控制系统分析和设计的一般理论与实现。

20 世纪 40 年代,自动化技术、通信技术和计算机技术在工业上得到了应用和发展,1948 年维纳的著作《控制论》,研究了不同控制系统控制过程的共同规律。这篇著作的发表,标志着一个新的学科——《控制论》的诞生。

在第二次世界大战前后,由于军事和生产发展的需要,自动控制理论和技术迅速发展,在雷达跟踪、船舶自动驾驶、工业生产等方面都得到了广泛的应用。20 世纪 50 年代末期,自动控制理论已经形成了比较完整的体系,并在实践中得到了广泛的应用。这个时期的自动控制理论称为经典控制理论。它的主要数学方法是傅里叶变换和拉普拉斯变换,将系统从时域变换到频域,便于进行系统的稳定性等性能的分析。频域法把描述系统动态行为的微分方程,变换为简单的代数方程,即描述系统输入与输出关系的传递函数。

20 世纪 50 年代末,航天技术、微电子技术和计算机等学科技术得到了高速发展,从而对控制技术提出了更高的要求,经典控制理论已经不能满足要求。计算机的发展,在客观上又提供了技术手段,使自动控制理论出现了新的飞跃。20 世纪 60 年代初期,出现了现代控制理论,简称现代控制论。

现代控制论主要研究多输入、多输出系统的状态控制。它的数学工具是向量微分方程、矩阵理论和近代的一些代数理论。主要研究方法是状态空间法。主要是在时域内研究最优控制、随机控制、系统辨识及自适应控制等。

现代控制理论的发展,解决了经典控制理论所不能解决的许多理论问题和工程问题,但是这并不意味着经典控制理论已经过时。相反,由于经典控制理论便于工程应用,今后还将继续发挥理论指导作用,而现代控制理论可以弥补其不足,两者相辅相成,才能推动控制理论及应用向前发展。

近年来,由于科学技术进一步发展,现代控制理论又在大系统理论和智能控制理论方面继续向前深入,显示出自动控制理论和自动控制技术无可估量的发展前景和巨大的潜力。

计算机控制系统的发展,是与控制理论与计算机技术相伴发展的,它也是包含在控制理论与技术的大框架下,向前发展的。

数字计算机作为控制系统的部件开始于 20 世纪 50 年代,具有代表性的是一个采用 RW-300 计算机的聚合装置的计算机控制系统。该系统控制 26 个流量、72 个温度、3 个压

力和 3 个成分。主要目的是使反应器压力最小, 5 个反应器供料的最佳分配, 根据催化剂活性测量的数据来控制热水的流量, 确定最佳循环。它是按照监督操作方式进行的。

20 世纪 60 年代, 计算机直接控制生产过程, 这种控制模式也称为直接数字控制 (DDC) 模式。例如, 1962 年英国的帝国化学公司利用计算机完全代替了原来的模拟控制设备, 通过 A/D 转换器直接测量 224 个变量和控制 129 个阀门。DDC 控制系统中, 传统的模拟控制技术直接被数字控制技术代替, 系统的整个功能保持不变。

20 世纪 70 年代, 由于前期计算机控制的研究和应用, 人们获得了更多的计算机控制过程的知识; 又由于小型计算机的出现, 对于一些小型工程项目和课题都可使用计算机控制。因此, 在 20 世纪 80 年代数字控制技术得到了普遍应用。

20 世纪 60 年代至 90 年代, 由于微型计算机及微处理器的发展、计算机容量的增大和运算速度的提高、计算机接口的标准化和通信能力的增强、人机界面好等情况, 对计算机控制技术的应用产生了深远的影响, 计算机控制系统的结构形式发生了根本的变化。用数字技术实现新的控制系统成为了一般技术, 几乎应用到所有控制领域。

从 20 世纪 90 年代开始, 随着微处理技术和其他高新技术的发展, 使集散型控制、全厂监督和控制、智能控制得到了进一步的研究和应用, 计算机控制系统朝着网络化、智能化的方向飞速发展。

随着超大规模集成技术的发展, 计算机技术还会有惊人的发展。计算机将具有更强的计算功能, 在显示技术和通信方面还会有更重大改进, 性能价格比会显著提高。因此为计算机控制技术向高阶阶段智能化发展奠定了坚实的基础。

1.4 计算机控制理论

计算机控制是以自动控制理论与计算机技术为基础的。随着计算机控制的应用, 人们不断地进行总结, 认识也不断提高, 逐步形成了计算机控制理论——一门新兴的学科。学习、研究和开发计算机控制系统就必须了解、掌握计算机控制系统的基本控制理论。

1. 采样控制系统

例如, 在如图 1.3 所示的机床闭环控制系统中, 由于由位移传感器提供的模拟信号必须经过 A/D 转换器转换成数字信号, 才能被数字控制器所接受; 而数字控制器发出的数字信号也必须通过 D/A 转换器转换为模拟信号, 才能被直流电动机所接受。A/D 转换器和 D/A 转换器成为数字控制器和连续时间函数环节的接口; 数字控制器是根据系统性能指标和抗干扰的要求设计的。这样的系统称为采样控制系统。对于采样控制系统, 除了要掌握机电系统的数学描述外, 还必须掌握连续时间系统和离散时间系统的转换理论; 对 A/D 和 D/A 转换器进行正确的选择; 合理的设计数字控制器。这里的关键技术问题是采样定理及其应用。因为计算机控制系统是按离散时间上的过变量值来工作的, 所以要知道在什么条件下, 才能只根据它在离散点上的值重现出来才有意义, 因而理解香农 (Shannon) 定理是十分必要的。

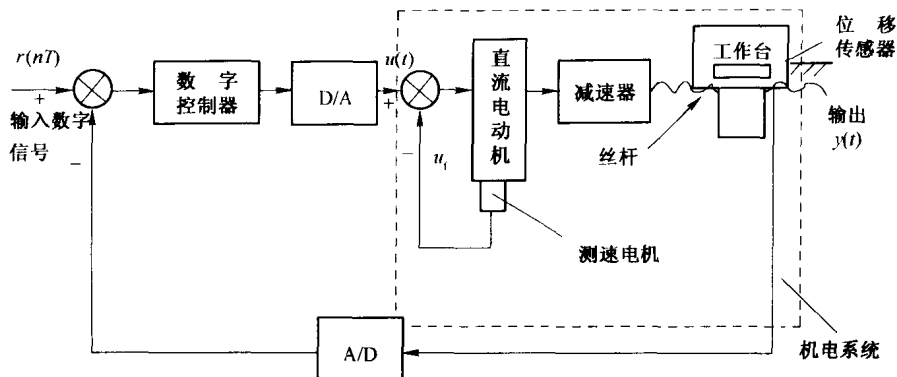


图 1.3 机床闭环控制系统

采样控制系统的特点是既有连续时间信号又有数字信号（离散时间信号）。设计的基本思路是用数字控制器代替常规的模拟控制器，并使用计算机作为控制器，能增加多种需要的功能。为了在离散空间内设计采样控制系统，则要求将连续时间函数离散化为离散时间函数，此时需要用差分方程来代替连续时间理论中的微分方程，积分可用数值求和来近似计算等基本数学方法。

2. 离散时间控制系统

例如，在如图 1.4 所示的机械手计算机控制系统中，机械手各关节的运动采用步进电机进行驱动。接口采用环形分配器及驱动部分合成一体的装置。系统内部各环节信号的交流都是数字式的，这种系统称为离散时间控制系统。对于金融行业基本上是属于离散时间系统，例如存款等。对于采样控制系统如果全用离散时间函数描述，亦称为离散时间控制系统。

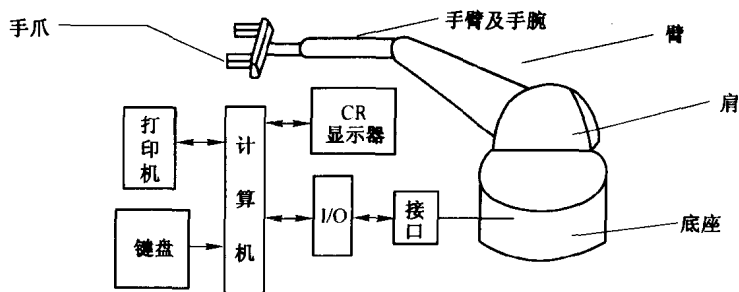


图 1.4 机械手计算机控制系统的基本结构图

3. 经典控制理论

在连续时间系统的经典控制理论中，采用了傅里叶变换和拉普拉斯变换，将系统从时域变换到频域，以进行系统的稳定性等性能的分析。

在离散时间系统中,则借助了 Z 变换(亦称为离散拉氏变换)来分析和设计系统。 Z 变换是分析和设计计算机控制系统的数学工具,它只是描述了各采样时刻上信号的情况。如果要描述采样点之间的信号特性,则可用延迟 Z 变换法,亦称为修正 Z 变换法。

Z 变换的定义为

$$Z[f(nT)] = F(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f(nT)z^{-n}$$

式中, $n=0, 1, 2, \dots$ 。

修正 Z 变换定义为

$$F(z, m) = \sum_{n=0}^{\infty} z^{-n} f(nT - T + mT)$$

式中, $0 \leq m \leq 1$ 。

4. 状态空间理论

假定连续时间控制系统是带有前置和反馈控制器的闭环控制系统,如图1.5所示。状态空间是用状态变量法深入系统内部,描述了控制向量 $u(t)$ 、状态向量 $x(t)$ 和测量向量(或称输出向量) $y(t)$ 之间的关系。如果这些向量都用离散时间函数来描述则称为离散状态空间,其系统就为采样控制系统或离散时间控制系统。

从图1.5可以看出,输入信号 r 、 γ 和 e 与 y 、 u 和 x 之间的差异,表明了这些输入信号如何影响要求的输出信号 $y(t)$ 。对于控制问题一般可分为调节问题和伺服问题。所谓调节问题是指怎样消除或减少负载扰动和测量噪声对系统输出 $y(t)$ 的影响;伺服问题则是指输出信号 $y(t)$ 要跟踪指令信号 $r(t)$ 的变化。

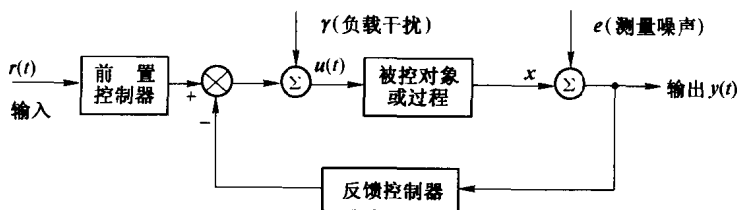


图 1.5 带有前置和反馈控制器的闭环系统

离散状态空间分析法在设计计算机控制系统时有两个重要的概念,即可控性和可观测性。它们揭示了控制系统构成的基本问题,从而可实现系统的最优控制。对于伺服和调节控制问题的设计,离散状态空间分析设计法亦是较为有效的;同时离散状态空间分析法还可适用于多变量、非线性和时变系统等。

5. 最优控制

最优控制是以目标函数为依据,以系统的观点来设计计算机控制系统,使系统性能达到最优化。最优化设计方法,一般来说,包括最优控制和最优估计两个方面,通称为 LQG