

全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

机械工程控制基础

主 编 陈小异 孔晓红



高等教育出版社

全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

机械控制基础

Jixie Gongcheng Kongzhi Jichu

主编 陈小异 孔晓红



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容简介

本书以经典控制理论为基本内容,重点介绍其基本原理、工程分析、设计方法及其在机械工程自动控制系统中的应用。全书共分8章,第1章是绪论,第2章至第6章以线性时不变系统为对象,介绍控制系统的数学模型、控制系统的时域分析、根轨迹法、系统的频率特性分析、系统的性能指标与校正设计等内容,并将系统的稳定性分析、误差分析穿插于时、频域分析的章节中;第7章介绍非线性系统,着重介绍非线性系统中的相平面分析;第8章介绍系统辨识,包含系统辨识的定义及线性模型的最小二乘参数估计。由于MATLAB已经广泛应用于工程技术各领域,尤其在控制系统的分析、仿真及设计中,因此在本书各章中都有一定的篇幅介绍MATLAB/Simulink基础及在系统分析中的应用实例,以方便读者对MATLAB这个重要工具的熟悉及使用。

本书主要面向普通高等学校机械类专业的本科学生。对于高职高专或其他少学时专业的学生,也可以根据其教学要求,在对书中的章节进行必要调整的基础上加以选用。也可以作为一般工程技术人员学习控制技术时参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械工程控制基础/陈小异,孔晓红主编. —北京:
高等教育出版社,2010.5
ISBN 978-7-04-029157-5

I. ①机… II. ①陈… ②孔… III. ①机械工程-控
制系统-高等学校-教材 IV. ①TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第055437号

策划编辑 卢广 责任编辑 查成东 封面设计 于涛
责任绘图 尹莉 版式设计 余杨 责任校对 王雨
责任印制 张泽业

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100120	网址	http://www.hep.edu.cn
总机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landracom.com
印刷	北京市卫顺印刷厂		http://www.landracom.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开本	787×960 1/16	版次	2010年5月第1版
印张	16	印次	2010年5月第1次印刷
字数	260 000	定价	23.70元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 29157-00

前 言

随着机械加工设备向高速、大功率方向发展，对它的稳定性、精度及可靠性的要求不断提高，其动态特性变得日益突出，将控制理论应用于工程实际，解决机械工程中的实际问题显得更加重要。机械工程控制理论和方法正成为广大师生和工程技术人员分析和解决问题的有效手段，它也是普通高等学校机械类专业的重要技术基础课之一。

本书作为一门技术基础课教材，以经典控制理论为主要内容，力求在阐明机械工程控制理论的基本概念、基本知识 with 基本方法的基础上紧密结合机械工程实际，特别是结合机械制造工程实际，解决其中的实际控制问题。为了紧跟时代的发展，本书在讲清基本控制原理和概念的同时，介绍了目前流行的 MATLAB 软件在系统建模、时域分析、频域分析、系统稳定性以及系统的校正设计等方面的应用及实现，体现了理论性与实用性相结合的特色。本书紧密结合机械工程实际，运用控制理论以及 MATLAB 软件，对系统进行分析与设计，这不仅有利于加强工程控制基础与专业课之间的联系，而且为学生今后将控制理论应用于机械工程实际，解决工程实际问题打下坚实的基础。

由于经典控制理论的内容相对固定，在保证基本内容充实、完整的同时，力求做到结构紧凑、概念清晰、由浅入深、循序渐进。全书共分 8 章，第 1 章绪论，主要对机械工程控制理论及本课程的特点、要求进行概要介绍；第 2 章控制系统的数学模型，首先以拉普拉斯变换（简称拉氏变换）为出发点，在此基础上引申出传递函数的定义及典型环节的传递函数，然后介绍了传递函数的图形化工具：方块图、信号流图及梅逊公式，最后讲述了 MATLAB 在系统数学建模中的应用；第 3 章控制系统的时域分析，主要讨论了一阶、二阶系统在典型输入信号作用下的时间响应，并定义了二阶系统的性能指标，介绍了在时域内，系统的误差分析、稳定性分析的原理、方法及计算，最后讲述了系统时域分析的 MATLAB 实现；第 4 章根轨迹法，介绍了系统根轨迹的基本概念，绘制根轨迹的基本规则，特殊根轨迹的绘制及利用根轨迹对系统的动态特性进行分析，最后仍是利用 MATLAB 来绘制系统的根轨迹；第 5 章系统的频率特性分析，主要介绍了频率特性的基本概念、物理意义，详细讨论了各典型环节的极坐标图（Nyquist 图，又称奈奎斯特图）及对数坐标图（Bode 图，又称伯德）的绘制，并介绍了系统闭环频率特性的概念和闭环系统性能分析，最后是 MATLAB 在频域分析中的应用及实现；第 6 章系统的性能指标与校正设计，介绍了系统的性能指标、校正的概念及校正的方式，并对串联校正、反馈校

II 前言

正、反馈校正、PID 校正等作了较详细的介绍，并给出了 MATLAB 在校正设计中的应用；第 7 章非线性系统，介绍了典型非线性特性，详细给出了非线性系统的描述函数分析法及相平面分析法；第 8 章系统辨识，对系统辨识的定义、基本内容、研究目的作了介绍，讨论了线性静态、线性动态模型的最小二乘参数估计。

本书适合作为普通高等院校机械类专业的教材或教学参考书，也适合相关专业的高职学生参考使用，还可作为从事自动控制领域技术人员的参考书。

全书由湖南工程学院陈小异、河南科技学院孔晓红主编。教材编写的具体分工为：第 1、4 章由罗艳芬编写，第 2、3 章由陈小异编写，第 5 章和第 7 章的 7.1、7.2 节由孔晓红编写，第 6 章由苗青林编写，第 7 章的 7.3 节和第 8 章由王超编写。全书由陈小异统稿。另外，在本书的编写过程中还得到了伍新、吴晨曦两位老师的支持和帮助。

东南大学王积伟教授对本书进行了认真审阅，提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

限于作者水平和能力，以及时间仓促，书中难免有不足之处，恳请广大读者、同行批评指正。

编者

2009 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 控制技术发展综述	1
1.2 自动控制的基本原理及系统构成	3
1.2.1 开环控制系统	5
1.2.2 闭环控制系统	6
1.3 控制系统的分类	7
1.4 对控制系统的基本要求	8
习 题	9
第 2 章 控制系统的数学模型	11
2.1 拉普拉斯变换	11
2.1.1 拉普拉斯变换及逆变换	11
2.1.2 常用函数的拉普拉斯变换	12
2.1.3 拉普拉斯变换的主要定理	13
2.1.4 拉普拉斯变换的应用	16
2.2 传递函数	19
2.2.1 传递函数的定义	19
2.2.2 典型环节的传递函数	20
2.3 传递函数的方块图表示及运算	23
2.3.1 方块图的定义及组成	23
2.3.2 闭环控制系统的方块图	24
2.3.3 系统方块图的绘制	27
2.3.4 方块图的等效变换及运算法则	28
2.4 信号流图及梅逊公式	30
2.4.1 信号流图的概念及术语	31
2.4.2 信号流图的性质及化简	32
2.4.3 梅逊公式	33
2.5 系统数学模型的 MATLAB 表示	34
2.5.1 连续系统数学模型的 MATLAB 表示	35
2.5.2 基于 Simulink 的系统建模	37
习 题	40
第 3 章 控制系统的时域分析	44

II 目录

3.1	典型输入信号	44
3.2	一阶系统的时间响应	46
3.2.1	一阶系统的数学模型	46
3.2.2	一阶系统的单位阶跃响应	46
3.2.3	一阶系统的单位脉冲响应	47
3.2.4	线性定常系统的重要特性	48
3.3	二阶系统的时间响应	49
3.3.1	二阶系统的数学模型	49
3.3.2	二阶系统的单位阶跃响应	51
3.3.3	二阶系统的瞬态响应指标	53
3.4	控制系统的误差分析	57
3.4.1	控制系统的分类	57
3.4.2	误差与偏差	58
3.4.3	偏差传递函数	58
3.4.4	稳态偏差的计算	59
3.4.5	干扰作用下的稳态偏差	61
3.4.6	动态误差	62
3.5	控制系统的稳定性分析	64
3.5.1	稳定性的基本概念	64
3.5.2	系统稳定的条件	65
3.5.3	劳斯 (Routh) 稳定判据	67
3.6	基于 MATLAB 的时域分析	70
3.6.1	线性系统的 MATLAB 表示	70
3.6.2	时域分析中 MATLAB 相关函数及应用	70
3.6.3	MATLAB 在稳定性分析中的应用	72
	习题	73
第 4 章	根轨迹法	77
4.1	根轨迹的基本概念	77
4.2	根轨迹的幅值条件和相角条件	78
4.3	绘制根轨迹的基本规则	79
4.4	参数根轨迹	86
4.5	控制系统的根轨迹分析	87
4.6	利用 MATLAB 绘制根轨迹图	90
	习题	92
第 5 章	系统的频率特性分析	95

5.1	频率特性	95
5.1.1	频率特性的概念	95
5.1.2	频率特性的图示方法	98
5.2	典型环节的频率特性	100
5.2.1	比例环节	100
5.2.2	积分环节	101
5.2.3	微分环节	102
5.2.4	惯性环节	103
5.2.5	一阶微分环节	106
5.2.6	振荡环节	107
5.2.7	二阶微分环节	110
5.2.8	延迟环节	112
5.3	系统的开环频率特性	112
5.3.1	开环幅相曲线的绘制	113
5.3.2	开环对数频率特性曲线的绘制	116
5.3.3	最小相位系统与非最小相位系统	119
5.4	频域稳定判据与稳定裕量	122
5.4.1	奈氏判据的数学原理	122
5.4.2	奈奎斯特稳定判据	125
5.4.3	稳定裕量	128
5.5	闭环频率特性的性能指标	134
5.5.1	闭环频率特性图	134
5.5.2	闭环频率特性的特征量	135
5.5.3	闭环频域指标与时域指标的关系	136
5.6	利用 MATLAB 分析频率特性	139
5.6.1	用 MATLAB 绘制奈奎斯特图	140
5.6.2	用 MATLAB 绘制伯德图	142
5.6.3	用 MATLAB 求稳定裕量	145
	习题	146
第 6 章	系统的性能指标与校正设计	150
6.1	系统的性能指标	150
6.1.1	概述	150
6.1.2	综合性能指标	152
6.2	系统的校正	154
6.2.1	校正的概念	154

IV 目录

6.2.2	校正的方式	155
6.3	串联校正设计	156
6.3.1	相位超前校正	156
6.3.2	相位滞后校正	161
6.3.3	相位滞后-超前校正	164
6.4	PID 校正设计	166
6.4.1	P 控制器	166
6.4.2	PD 控制器	167
6.4.3	PI 控制器	169
6.4.4	PID 控制器	172
6.4.5	常用无源校正网络与有源校正网络	175
6.5	反馈校正设计	178
6.5.1	反馈校正的原理	178
6.5.2	反馈校正的功能	178
6.5.3	反馈校正装置的设计	178
6.6	顺馈校正设计	181
6.7	利用 MATLAB 校正系统	183
	习题	187
第 7 章	非线性系统	189
7.1	概述	189
7.1.1	典型非线性特性	189
7.1.2	非线性控制系统的特性	192
7.1.3	非线性系统的分析方法	193
7.2	非线性系统的描述函数分析法	194
7.2.1	描述函数的概念	194
7.2.2	典型非线性特性的描述函数	196
7.2.3	用描述函数分析非线性系统	201
7.3	非线性系统的相平面分析	207
7.3.1	相平面法的概念	207
7.3.2	相轨迹的性质	208
7.3.3	相平面图的绘制方法	209
7.3.4	奇点和奇线	211
7.3.5	两个非线性系统的相平面分析	216
	习题	223
第 8 章	系统辨识	226

8.1 概述	226
8.1.1 系统辨识的定义	226
8.1.2 系统辨识的基本内容	227
8.1.3 系统辨识的研究目的	228
8.2 线性静态模型的最小二乘参数估计	229
8.2.1 最小二乘法的基本原理和算法	230
8.2.2 最小二乘法的性质	233
8.3 线性动态模型的最小二乘参数估计	236
习 题	237
附录 I 拉普拉斯变换表	239
附录 II 拉普拉斯变换的主要性质	241
参考文献	242

第 1 章 绪论

随着科学的发展,社会的进步,自动控制技术正发挥着越来越大的作用。它已经渗透到社会生产、生活的方方面面,在国民经济和国防建设的各个领域得到了广泛的应用。自动控制技术的应用,不仅实现了生产过程的自动化,极大提高了劳动生产率,而且减轻了人们的劳动强度。随着控制理论和实践的不断发 展,控制精度的不断提高,产品的种类、数量和质量得到很大提高,物质得到了极大的丰富,人们生活水平得到了质的飞跃和提高。

机械制造行业是自动控制技术应用的重要领域,从最初的单机加工自动化到自动生产线,再到当今的集成制造系统,直至达到工厂自动化的最高形式——无人化工厂等,可以说现代制造的各个环节无不存在控制技术的烙印。因此,今天的机械工程师们不仅应具有机械结构现代设计方法和制造技术方面的知识,同时也应当具有机械工程自动控制方面的知识,以适应科学技术发展对人才的需求。

所谓自动控制就是在无人直接参与的情况下,利用控制装置使被控制对象和过程自动地按预定规律运动或变化的控制过程。这种能对被控对象的工作状态进行控制的系统称为自动控制系统,它一般由控制装置和被控对象组成。例如,自动机床能够按照预先排定好的工艺顺序,自动地进行切削,并加工出符合精度要求的工件。

1.1 控制技术发展综述

人类祖先很早就开始制造、使用工具,后来又逐渐进化到发明、制造机器,并用于生产活动中,以取代人力或畜力,使人类自身从繁重的体力劳动中解放出来。在这个过程中,人类就已经产生了自动控制的思想及意识,并付诸于实践,通过实现机器控制的自动化,以进一步减轻人类的劳动强度,提高生产的效率。可以说提高机器自动化的水平及程度一直是人类追求的目标。

18 世纪,英国科学家 James Watt 为控制蒸汽机的速度而设计的飞锤调速器可以认为是最早的反馈控制系统的工程应用。由于当时应用的调速器出现振荡现象,所以产生了 Maxwell 对微分方程系统的稳定性

的理论研究,后来又出现了 Routh 和 Hurwitz 等人的稳定性研究成果,控制器的设计问题是由 Minorsky 等人在 1922 年开始研究的,其研究成果可以看成是现在广泛应用的 PID 控制器的前身。而在 1942 年,Ziegler 和 Nichols 提出了调节 PID 控制器参数的方法,该方法对当今的 PID 整定仍有影响。

虽然人类在生产中运用自动控制的初步原理已有几百年,但作为一种理论的形成应该是在 20 世纪 40 年代。二次世界大战前,控制系统的设计因缺乏系统的理论指导而多采用试凑法。二次世界大战期间,建造飞机自动驾驶仪、雷达跟踪系统、火炮瞄准系统等军事装备的需要推动了控制理论的飞速发展。1948 年, Norbert Wiener 发表了著名的《控制论》(Cybernetics),使控制技术有了坚实的理论支撑。而经典控制理论中的频域分析技术是在 Nyquist、Bode 等早期关于通信学科的频域研究工作的基础上建立起来的。Harris 于 1942 年提出了传递函数的概念,首先将通信学科的频域技术移植到了控制领域,构成了控制系统频域分析技术的理论基础。Evans 等在 1946 年提出的线性反馈系统的根轨迹分析技术是那个时代的另一个里程碑。至此,控制理论发展的第一阶段——自动调节阶段基本完成。建立在频域法和根轨迹法基础上的理论通常称为经典控制理论。

20 世纪 60 年代以后,控制理论又出现了一个迅猛发展时期,这个时期由于导弹制导、数控加工、空间技术的发展需要和计算机技术的成熟,控制理论发展到了一个新阶段。苏联学者 Pontryagin 于 1956 年提出的极大值原理、Bellman 的动态规划和 Kalman 的状态空间分析技术开创了控制理论研究的新时代,它是以状态空间法为基础,主要分析和研究多输入-多输出、时变、非线性等系统的最优控制问题。近年来,在计算机技术和现代应用数学高速发展的推动下,现代控制理论在最优滤波、系统辨识、自适应控制、智能控制等方面又有重大进展,并逐渐形成一套完整的理论,这就是有别于“经典”的“现代控制理论”。

本书以经典控制理论的内容为主,在介绍经典控制理论分析和设计的同时,还将介绍计算机仿真技术在控制系统的分析与设计中的应用。控制系统计算机辅助分析与设计的早期应用在 Jones 和 Melsa 1970 年出版的专著中已反映出来,该书中给出了大量的 FORTRAN 源程序,可以直接用于控制系统的分析与设计。这也被认为是第一代控制系统计算机辅助分析与设计软件。

第二代的系统分析与设计软件的一个显著的特点是其人机交互性。

这类软件中最典型且最有代表性的就是 Cleveland Moler 在 1980 开发的 MATLAB。它的第一个商业版本是 1984 由 Mathworks 公司推出的 MATLAB1.0 版 (DOS 版)。经过 20 多年的发展, MATLAB 现已成为一个功能强大、使用方便、编程效率高、应用范围广的工程应用软件。进入 21 世纪后, 其更新、升级的速度明显加快。现在几乎每年有两次升级, 上、下半年各一次, 其最新版本是 MATLAB 7.8 (R2009a)。

当今的控制系统计算机辅助分析与设计软件的特点是其面向对象的程序设计结构, 这种新的概念在 MATLAB 的语言和其支持工具 Simulink 中反映出来。

1.2 自动控制的基本原理及系统构成

在各种生产过程以及生产设备中, 常常需要使某些物理量, 如温度、位置、轨迹、速度、压力等保持恒定, 或者让它们按照一定规律变化。要达到这个目的, 就应对生产机械或设备及时进行控制或调整, 以随时抵消外界对这些设备的干扰或影响。那么, 控制系统是怎样实现对这些物理量的自动控制呢?

首先, 来看一下水位控制系统如何实现对水箱水位的控制, 如图 1-1 所示。水位自动控制的目的是保持水箱内水位的恒定。当水的流入量与流出量平衡时, 水箱的水位维持在预定高度上。预定高度或希望高度由控制器刻度盘上的指针标定。当水流出量增大或流入量减小时, 平衡被打破, 水箱水位下降, 出现偏差, 这个偏差由浮子 (或其他水位传感器) 检测出, 自动控制器在偏差的作用下, 将入水口阀门开大, 加大水的流入量, 力求维持水位不变。反之, 当水的流出量减小或流入端水压升高时, 水位上升, 反向偏差则使进水阀门开口减小, 减少水的流入量, 从而达到控制水箱水位不变的目的。

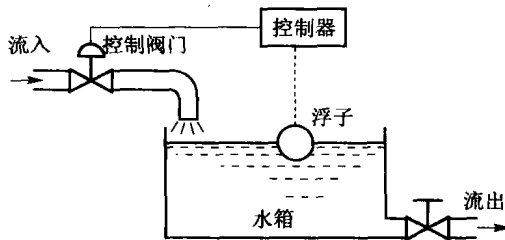


图 1-1 水箱水位的自动控制

如果是人工控制的话，其控制的过程也大致类似。首先是人眼观察水箱水位的实际高度，然后判断此高度是否是希望值，如果不是，则用手旋转进水阀门，以控制进水量的多少。在这里眼睛、大脑、手就起到了传感器、控制器、执行机构的作用。这两种控制的系统框图如图 1-2 所示。

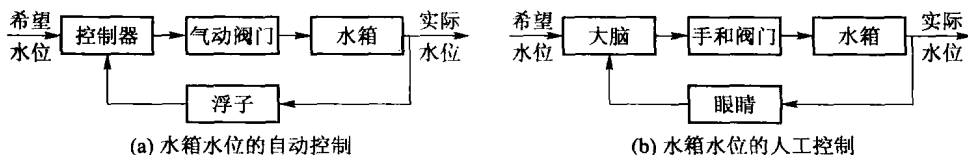


图 1-2 水箱水位控制系统框图

图 1-3 为一个汽车客舱内温度控制系统。同样也是要求客舱内的温度基本恒定，这个要求的温度被转变为电信号，并且作为控制器的输入量。客舱内的实际温度通过传感器也转变为电信号，并反馈到控制器与输入量进行比较。汽车行驶过程中，周围环境温度的变化和太阳辐射的热量（可看成扰动量）使得客舱温度发生变化，控制器接收输入信号、输出信号以及来自扰动源的传感器信号，并将最佳控制信号传送到空调器或加热器，以控制冷风或暖风的量，从而使客舱内的温度基本维持在要求的温度上。

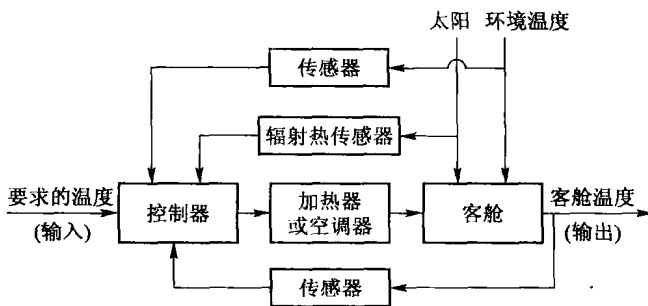


图 1-3 汽车客舱内的温度控制系统框图

从以上两个例子可以看出自动控制系统自动调节的基本原理。它们的共同特点：一是系统有检测装置（各种传感器），二是利用检测到的偏差通过控制器去纠正偏差。可见，没有偏差便没有调节过程。控制系统通常可以看做是控制器和被控对象的总和，这两者组合在一起共同完成一定的任务。图 1-4 表示了两者的关系。

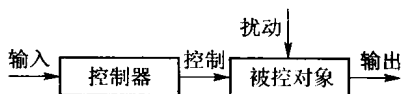


图 1-4 控制器与被控对象之间的关系图

通常，在自动控制系统中，给定量称为控制系统的输入量，被控制量称为系统的输出量。反馈就是指通过适当的测量装置，将输出量的全部或一部分返回系统的输入端，使之与输入量进行比较。比较的结果称为偏差，控制系统的任务就是根据这一偏差的大小和方向进行调节，以消除或减小偏差，从而使系统的输出复现输入。

自动控制系统有各种各样的形式，但总的来说可以归结为两种基本形式：开环控制系统和闭环（反馈）控制系统。

1.2.1 开环控制系统

开环控制系统是一种最简单的控制方式，在控制器和被控对象间只有正向控制作用，系统的输出不会对控制器产生任何影响。当给定一个输入，系统便有一个输出，但是输出可能是不准确的值，尤其是当外界有扰动时，变化更大。此时系统的精度仅仅取决于元器件的精度和执行机构的调整精度。如图 1-5 所示为数控机床工作台进给系统，采用的就是开环控制系统。控制装置发出一定频率和数量的指令脉冲，驱动步进电动机，以控制工作台或刀架的移动量。由于不对工作台的实际移动量进行检测，因此从驱动电路到工作台这整个“传动链”中任一环节的误差都会对其移动精度或定位精度产生影响。

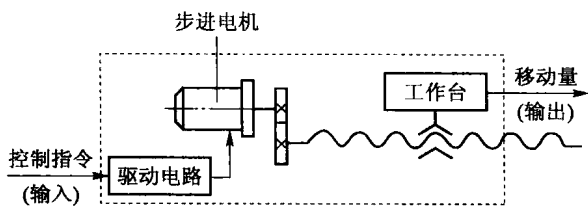


图 1-5 数控机床工作台进给系统开环控制系统框图

开环控制系统结构简单、成本低、容易控制，但是控制精度较低。当系统的输入量预先知道，且其内部参数或外部扰动变化都较小，或这些扰动因素可以事先确定并能给予补偿，则采用开环控制还是合适的。

1.2.2 闭环控制系统

凡是系统的输出端与输入端之间存在反馈回路，即输出量对控制作用有直接影响的系统，称之为闭环系统。显然在闭环系统中不仅存在正向作用，还存在着反向作用，系统将检测到的输出量送回输入端，与输入信号进行比较，再将差值送入控制器以对被控对象实施控制，这样的过程称为反馈。因此，闭环系统也称反馈系统。前面所说的水箱水位自动控制系统就属闭环控制系统。

图 1-6 为采用闭环控制的数控机床伺服系统示意图。为提高控制精度，增加了一套位置检测装置，以测定工作台的实际位置（即系统的输出），然后反馈回系统的输入端，与控制指令进行比较，根据工作台实际位置与目的位置之间的差值，决定下一步的控制动作，达到消除误差的目的。

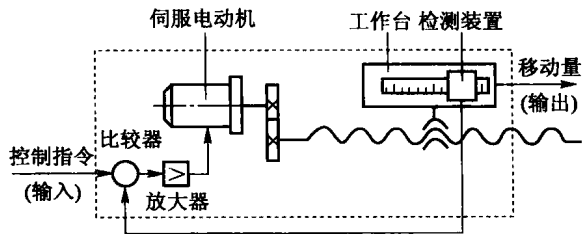


图 1-6 采用闭环控制的数控机床伺服系统示意图

闭环系统的优点是采用了反馈，因而不管什么干扰，只要被控量的实际值偏离给定值时，闭环系统就会产生控制作用来减少这一偏差。对于给定的控制对象，就有可能采用不太精密且成本较低的元器件构成精密的系统。但是另一方面，由于实际系统一般都有质量、惯性和延迟，它是一个动态系统，因此对于一定的输入，系统的输出或响应往往是振荡的。采用反馈有可能使系统的振荡加剧，甚至不能工作。反馈改变了控制系统的动态性能，增加了系统的复杂性。因此，稳定性对于闭环系统来说，始终是一个重要问题。

现实生产过程中，被控对象可能会对控制系统提出很高的控制要求，单独采用开环控制或者闭环控制均难以满足，这时，可以设计一种开环控制和闭环控制相结合的所谓复合控制系统。前面图 1-3 所示的汽车客舱温度的控制实例，实际上就是一个复合控制系统，该系统

既采用了反馈控制，又采用了前馈控制（前馈控制在扰动量影响到输出量之前产生校正作用）。要求的客舱温度首先被转变为电信号，并作为控制器的输入量。而客舱的实际温度通过传感器也转变成电信号，反馈到控制器。控制器接收输入信号、输出信号以及来自扰动源的传感器信号。控制器将最佳控制信号传送给空调器，以控制其输出的冷风或暖风量，从而控制汽车客舱内的温度与要求的温度相趋近。此时，周围环境温度和太阳的辐射可以看做是扰动量。

1.3 控制系统的分类

控制系统种类很多，应用范围也很广，它们的结构、性能和完成的任务也各不一样，加上研究的角度不同，因此控制系统的分类方法也很多，主要有以下几种。

1. 按系统有无反馈环节分类

上面已经提到，如果将检测出的输出量反馈到输入端，参与控制运算，这样的系统称为闭环控制系统。如果在控制系统的输出端与输入端之间没有反馈通道，则称此系统为开环控制系统。由于一般开环控制系统很难实现高精度控制，因此控制理论主要研究闭环控制系统的性能分析及系统设计问题。

2. 按控制系统内信号的类型不同分类

如果控制系统各部分的信号均为时间的连续函数，如电流、电压、位置、速度及温度等，则称其为连续量控制系统，也称为模拟量控制系统；如果控制系统中有离散信号，则为离散控制系统；计算机处理的是数字信号（也是离散量），称为数字控制系统。

3. 按控制变量的多少分类

如果系统的输入、输出变量都是单个的，则称为单变量控制系统。前面所介绍的例子中都属于单变量控制系统；如果系统有多个输入、输出变量，则称此系统为多变量控制系统。多变量控制系统是现代控制理论研究的对象。

4. 按系统控制量的变化规律分类

如果系统调节目标是使控制量为常量，则称之为恒值调节系统。如前面提到的水箱水位控制系统及客车车厢内的温度控制系统；如果系统输入量不为常量，但其变化规律预先知道或确定，可以预先将其变化规律编成程序，由程序发出指令，在输入装置中将控制指令转换