



西安交通大学

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



“十五”规划教材

机械控制理论基础

董霞 陈康宁 李天石 编著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

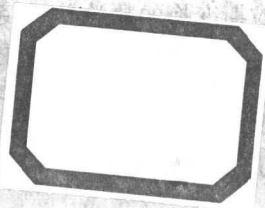


西安交通大学



“十五”规划教材

XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY



张健(CIP)目录编委会

机械控制理论基础

董霞 陈康宁 李天石 编著

西安交通大学出版社

西安

内容简介

本书介绍控制理论的基本原理与基本知识及其在机械工程中的应用。内容包括:拉普拉斯变换的数学方法,系统的数学模型,系统的瞬态响应与误差分析,系统的频率特性,系统的稳定性,控制系统的校正与设计,以及离散系统分析基础等。每章后附有复习思考题和习题。

本书适于机械类包括机电一体化工程、机械制造及自动化和机械电子工程等专业大学本科生的教材,也可供有关专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

机械控制理论基础/董霞等编. —西安:西安交通大学出版社,2005.9
(西安交通大学“十五”规划教材)
ISBN 7-5605-2041-3

I. 机… II. 董… III. 机械工程-控制系统-高等学校-教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 060957 号

书 名:机械控制理论基础
编 著:董 霞 陈康宁 李天石
出版发行:西安交通大学出版社
地 址:西安市兴庆南路 25 号(邮编:710049)
电 话:(029)82668315 82669096(总编办)
(029)82668357 82667874(发行部)
印 刷:陕西江源印刷科技有限公司
字 数:440 千字
开 本:727 mm×960 mm 1/16
印 张:23.75
版 次:2005 年 9 月第 1 版 2005 年 9 月第 1 次印刷
印 数:0 001~3 000
书 号:ISBN 7-5605-2041-3/TH·69
定 价:26.00 元

版权所有 侵权必究

前言

随着现代科学和计算机技术的迅速发展,控制工程科学在机电系统中的应用越来越广泛。“机械控制理论基础”作为一门技术基础课,已被许多高等学校列入机械工程学科的培养计划,为培养适于现代化技术要求的高级工程技术人才,发挥了重要作用。本书在西安交通大学的“十五”规划教材建设中,获得立项和资助。

本书作为一门技术基础课教材,力求在阐明机械程控制理论的基本概念、基本知识和基本方法的基础上,密切结合机械工程实际,注意机、电、液结合,注重数理基础知识和专业知识之间的联系,加强计算机仿真技术在控制系统中的应用,为将控制理论应用于工程实际中打下了良好的基础。

全书共8章,第1章绪论,是对本门学科作概要介绍;第2章拉普拉斯变换的数学方法,是本书必需的数学基础;第3章系统的数学模型,介绍运用力学、电学基础对系统建模的方法以及传递函数、方块图、信号流图等重要概念;第4章至第6章分别为系统的瞬态响应与误差分析、频率特性和稳定性,它们是在已知系统数学模型的前提下分别从不同角度对系统进行分析;第7章机械程控制系统的校正与设计,介绍各种校正方式和方法,使系统满足性能指标的要求;第8章离散系统分析基础,介绍连续信号转换为离散信号的基础知识,以及分析离散系统的初步方法。附录1介绍了MATLAB基本知识和有关的程序指令。附录2给出了相应习题的参考答案。

本书是在陈康宁、王馨、李天石、简林柯、刘明远主编的《机械程控制基础》一书的基础上,参考了其他院校的同类教材,并结合多年来的教学和科研成果,作了很多修改和补充,重新编撰而成的。本书第1章,第2章,第3章由陈康宁编写;第4章,第5章由李天石编写,第7章,第8章和附录由董霞编写,第6章由李天石和董霞合编。

限于编者的水平,书中的缺点和错误在所难免,恳切希望读者和专家批评指正。

编者

2005年7月

主要符号一览表

m	质量	R	电阻常数
J	转动惯量	C	电容常数
B	粘性阻尼系数	L	电感常数
k	弹簧常数	ζ	阻尼比
K	系统增益	j	虚单位($j = \sqrt{-1}$)
e	自然对数的底	s	复数变量($s = \sigma + j\omega$)
e_{ss}	稳态误差	t	时间变量
M_p	超调量	t_r	上升时间
t_p	峰值时间	t_s	调整时间
T	时间常数	ω	频率(rad/s)
ω_n	无阻尼固有频率	ω_d	有阻尼固有频率
ω_T	转折频率	ω_r	谐振频率
M_r	谐振峰值	ω_b	截止频率
ω_c	幅值穿越频率	γ	相位裕量
ω_g	相位穿越频率	K_g	幅值裕量
$L[\]$	拉普拉斯变换	$L^{-1}[\]$	拉普拉斯反变换
$e(t)$	时域误差函数	$E(s)$	时域误差函数的拉普拉斯变换
$x(t) \left\{ \right.$	一般表示系统的时域输入函	$X(s) \left\{ \right.$	一般表示系统输入的拉普
$r(t) \left\{ \right.$	数	$R(s) \left\{ \right.$	拉斯变换
$y(t) \left\{ \right.$	一般表示系统时域的输出函	$Y(s) \left\{ \right.$	一般表示系统输出的拉普
$c(t) \left\{ \right.$	数	$C(s) \left\{ \right.$	拉斯变换
$n(t)$	干扰信号	$N(s)$	干扰信号的拉普拉斯变换
$u_i(t)$	输入电压信号	$U_i(s)$	输入电压的拉普拉斯变换
$u_o(t)$	输出电压信号	$U_o(s)$	输出电压的拉普拉斯变换
$i(t)$	电流信号	$I(s)$	电流的拉普拉斯变换
$g(t)$	单位脉冲响应函数(或权函	$G(s)$	传递函数
	数)		

$H(s)$ 反馈传递函数

$\varphi(\omega)$ 相频特性

$\arctan(\)$ 反正切函数

$\delta(t)$ 单位脉冲函数

$L(\omega)$ 对数幅频特性

$\tan(\)$ 正切函数

$1(t)$ 单位阶跃函数

目 录

第 1 章 绪论

1.1 机械工程控制论的研究对象	(1)
1.2 机械工程系统中的信息传递、反馈以及反馈控制的概念	(2)
1.3 机械控制的应用实例	(7)
1.4 本课程特点及内容简介	(10)
复习思考题	(11)

第 2 章 拉普拉斯变换的数学方法

2.1 复数和复变函数	(12)
2.2 拉氏变换与拉氏反变换的定义	(14)
2.3 典型时间函数的拉氏变换	(15)
2.4 拉氏变换的性质	(19)
2.5 拉氏反变换的数学方法	(26)
2.6 用拉氏变换解常微分方程	(32)
复习思考题	(35)
习题	(36)

第 3 章 系统的数学模型

3.1 概述	(38)
3.2 系统微分方程的建立	(40)
3.3 传递函数	(51)
3.4 方块图及动态系统的构成	(62)
3.5 信号流图与梅逊公式	(74)
3.6 机、电系统的传递函数 ¹	(77)
复习思考题	(91)
习题	(91)

第 4 章 控制系统的时域分析

4.1 时间响应	(97)
----------------	------

4.2 一阶系统的时间响应	(101)
4.3 二阶系统的时间响应	(104)
4.4 高阶系统的时间响应	(108)
4.5 瞬态响应的性能指标	(111)
4.6 系统误差分析	(122)
复习思考题	(131)
习题	(131)

第5章 系统的频率特性

5.1 频率特性	(135)
5.2 频率特性的对数坐标图(伯德图)	(143)
5.3 频率特性的极坐标图(奈奎斯特图)	(155)
5.4 对数幅-相图(尼柯尔斯图)	(166)
5.5 最小相位系统的概念	(168)
5.6 闭环频率特性与频域性能指标	(170)
5.7 系统辨识	(183)
复习思考题	(192)
习题	(192)

第6章 系统的稳定性

6.1 稳定性	(196)
6.2 劳斯-胡尔维茨稳定性判据	(199)
6.3 奈奎斯特稳定性判据	(206)
6.4 系统的相对稳定性	(219)
6.5 根轨迹法	(224)
复习思考题	(241)
习题	(242)

第7章 控制系统的校正与设计

7.1 控制系统的性能指标与校正方式	(246)
7.2 控制系统的串联校正	(251)
7.3 并联校正	(267)
7.4 PID校正器的设计	(274)
复习思考题	(292)
习题	(292)

第8章 离散系统分析基础

8.1 概述	(296)
8.2 脉冲采样与采样定理	(298)
8.3 保持器	(300)
8.4 z 变换与 z 反变换	(303)
8.5 离散系统的差分方程	(309)
8.6 线性定常离散系统的 z 传递函数	(313)
8.7 离散系统的 z 域分析	(318)
8.8 离散系统的校正与设计	(324)
复习思考题	(331)
习题	(331)

附录1 MATLAB 应用的基础知识

A.1 如何应用 MATLAB	(336)
A.2 线性系统的数学模型	(338)
A.3 计算矩阵函数	(341)
A.4 绘图	(346)
A.5 本书所用 MATLAB 命令	(348)

附录2 各章习题参考答案

参考文献	(370)
------------	-------

第 1 章 绪论

本书主要阐述“机械工程控制论”中的基础理论及其在机械工程中的应用。“机械工程控制论”是一门技术科学,它是研究“控制论”在“机械工程”中应用的科学。当前机械制造技术正向着高度自动化的方向发展,各种先进的自动控制加工系统不断出现,过去那种只侧重于局部和静态的研究方法已不能符合要求,应将机械加工过程各个环节的组合看作是一个动力系统,从控制论的角度来研究和解决加工中所出现的各种技术问题。由于机械工程控制论是一门新兴学科,大量的问题,从概念到方法,从定义到公式,从理论的应用到经验的总结,都需要进一步的探讨。本章着重介绍机械工程控制论的基本含义及有关的几个重要概念;列举机械工程控制论的一些应用实例;并对本课程的学习特点及内容作简要说明。

1.1 机械工程控制论的研究对象

机械工程控制论是研究以机械工程技术为对象的控制论问题。具体地讲,是研究在这一工程领域中广义系统的动力学问题,即研究系统在一定的外界条件(即输入与干扰)作用下,系统从某一初始状态出发,所经历的整个动态历程,也就是研究系统及其输入、输出三者之间的动态关系。例如,机床数控技术中,调整到一定状态的数控机床就是系统,数控指令就是输入,而数控机床的运动就是输出。

因为输入的结果是改变系统的状态,并使系统的状态不断改变,这就是力学中所讲的强迫运动;而当系统的初始状态不为零时,即使没有输入,系统的状态也会不断改变,这也就是力学中所讲的自由运动。因此从使系统的状态不断发生改变这点来看,将系统的初始状态看作为一种特殊的输入,即“初始输入”或“初始激励”也是十分合理的。

机械工程控制论所研究的系统是极为广泛的,这个系统可大可小,可繁可简,完全由研究的需要而定。例如,当研究机床在切削加工过程中的动力学问题时,切削加工本身可作为一个系统;当研究此台机床所加工工件的某些质量指标时,这一工件本身又可作为一个系统。

机械工程控制论主要研究并解决两方面的问题:

(1) 研究系统的动态特性、内部信息传递的规律及其受到外加作用后的反应,从而决定采用哪种控制策略以求实现对系统的最优控制——即系统的最优控制。

(2) 对于某些机械工程中的问题,例如机械振动、噪声、加工质量和灵敏度等,应用控制论的观点和思想方法揭示出它们的本质,从而找到有效的解决方法——即系统分析。

1.2 机械工程系统中的信息传递、反馈以及反馈控制的概念

控制论的一个极其重要的概念就是信息的传递、反馈以及利用反馈进行控制的概念。无论是机械工程系统或过程,生物系统或社会经济系统都存在有信息的传递与反馈,并可利用反馈进行控制使系统按一定的“目的”进行运动。

1. 信息及信息的传递

在科学史上控制论与信息论第一次把所有能表达一定含义的信号、密码、情报和消息概括为信息概念,并把它列为与能量、质量相当的重要科学概念。

“机械工程”是所有技术科学中发展最早、最古老的一门科学,然而引用“信息”这个概念还是比较迟的,如果不把 20 世纪 50 年代初建立“工程控制论”时期所涉及的航天、火箭等机械系统算在内的话,正式引用这个概念来分析研究问题的时间不会早于 50 年代末或 60 年代初,而这在其它技术科学领域中,例如电子科学、计算机科学等早已是古典的概念了。机械工程科学领域早期所涉及的问题主要是纯几何的、静力学的或者是到达平衡状态的稳定运动,然而,随着工业生产以及科学技术不断的发展,机械工程科学面临着许多高精度、高速度、高压、高温的复杂问题,这就必然要涉及系统或过程的动态特性(或动力特性)、瞬态过程以及具有随机过程性质的统计动力学特性等等,这就显示出机械工程科学与控制论所研究的问题的相似性。事实上,机械系统中的应力、变形、温升、几何尺寸与形状精度、表面粗糙度以及流量、压力等等,与电子系统用以表达其状态的电压、电流、频率一样,也是表达机械系统或过程某一状态的信号、密码、情报或消息,只不过是信息的运载介质不同罢了。我们观察图 1-1(a)是某一液压系统的流体压力变化记录,图 1-1(b)是某一机械加工一批零件按顺序排列的工件尺寸点图。它们分别与电子系统的电压信息以及电脉冲序列或时间序列等没有什么不同,它们同样都是包含了系统或过程的某些特性的信息。

所谓信息传递,是指信息在系统及过程中以某种关系动态地传递(或称转换)的过程。如图 1-2 所示为机床加工工艺系统,它将工件尺寸作为信息,通过工艺过程的转换,使得加工前后工件尺寸分布有所变化,这样,研究机床加工精

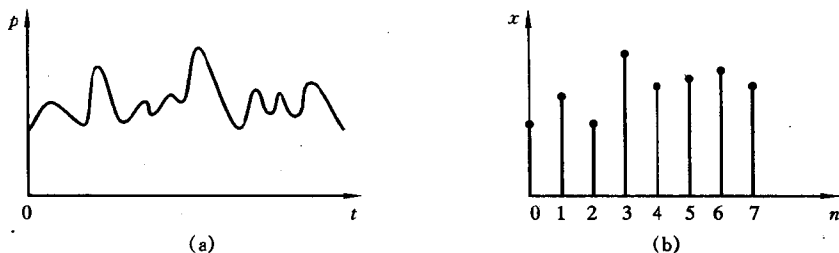


图 1-1 液体压力及工件尺寸点图

(a) 液体压力; (b) 工件尺寸点图

度问题,便可通过运用信息处理的理论和方法来进行。

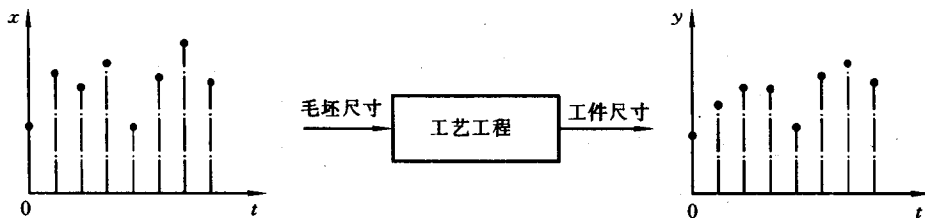


图 1-2 工艺过程中信息的传递

同样,采用控制论和信息论处理信息的概念和方法,如传递函数、频率特性以及系统识别、状态估计与预测、故障诊断等等,可研究机械工程系统及过程中信息的传递关系并揭示其本质,这也说明机械控制工程有其广阔的应用和发展前景。

2. 系统及控制系统

系统的定义,一般指的是能完成一定任务的一些部件的组合。控制工程中所指的系统是广义的,广义系统不限于上面所指的物理系统(如一台机器),它也可以是一个过程(如切削过程,生产过程);同时,它还可以是一些抽象的动态现象(如在人-机系统中研究人的思维及动态行为),可把它们视为广义系统去进行研究。

(1) 控制系统

系统的可变输出,如果能按照要求由参考输入或控制输入进行调节的,即称作控制系统。若不加说明,本书中所提到的系统都是指控制系统。控制系统的分类方式很多,这里仅按系统是否存在反馈,将系统分为开环控制系统和闭环控制系统。

(2) 开环系统

系统的输出量对系统无控制作用,或者说系统中没有一个环节的输入受到系统输出的反馈作用,则称开环系统。例如自动洗衣机,当它按洗衣、漂洗、脱水、干衣的顺序进行工作时,无需对输出信号即衣服的清洁程度进行测量,它就是一个开环系统。又如简易数控机床的进给控制,输入指令通过控制装置和驱动装置推动工作台运动到指定位置,该位置信号不再反馈,这也是典型的开环系统。图 1-3 表示开环系统的方框图。



图 1-3 开环系统

(3) 闭环系统

系统的输出量对系统有控制作用,或者说,系统中存在反馈回路的,称闭环系统。对自动控制系统,任何一个环节的输入都可以受到系统输出的反馈作用。如果控制装置的输入受到输出的反馈作用时,该系统就称为全闭环系统,或简称为闭环系统。如有恒温控制的空调系统、机器人、大多数 CNC 机床的驱动系统等都属于闭环系统。采用闭环控制的 CNC 机床的进给系统中,工作台的位置作为系统输出,通过检测装置测量运动位置,并将该信号反馈,进而控制运动位置本身。图 1-4 为闭环系统的方框图。

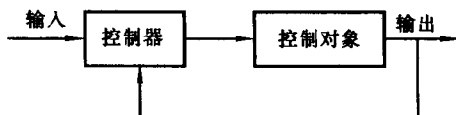


图 1-4 闭环系统

3. 反馈及反馈控制

所谓信息的反馈,就是把一个系统的输出信号不断直接地或经过中间变换后全部或部分地返回到输入端,再输入到系统中去。如果反馈回去的信号(或作用)与原系统的输入信号(或作用)的方向相反(或相位相差 180°),则称为“负反馈”;如果方向或相位相同,则称之为“正反馈”。

人类最简单的活动,如走路或取物都利用了反馈的原理以保持正常的动作。人抬起腿每走一步路,腿的位置和速度的信息不断通过人眼及腿部皮肤及神经感觉反馈到大脑,而保持正常的步法;人用手取物时,手的位置与速度信息不断反馈到人脑以保证准确而适当地抓住待取之物。人若失去上述这类反馈控制作

用或者反馈不正常,就会手足颤动显示病态。其他动物也是一样,并且在一切生物系统、社会及经济系统中,也都存在或利用上述反馈控制的作用以维持正常的机能。

人们早就知道利用反馈控制原理设计和制造机器、仪表或其他工程系统。我国早在北宋时代(1086~1089年)就发明了具有反馈控制原理的自动调节系统——水运仪象台。通常我们都把具有反馈的系统称之为闭环系统。例如,我们日常用的最古老又最简单的贮槽液面自动调节器(如图1-5)就是一个简单的闭环系统。浮子测出液面实际高度 h 与要求液面高 H_0 之差,推动杠杆控制进水阀门放水,一直到实际液面高 h 与要求液面高 H_0 相等时关闭进水阀。它们间的信息作用、传递关系可由图1-6表示。在这里反馈信息为实际液面高 h ,经与期望液面高 H_0 相比较形成一个闭环系统。

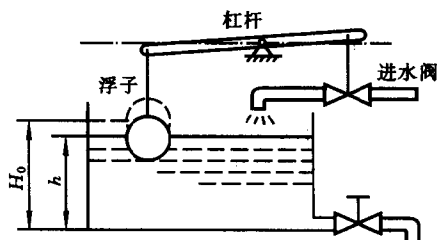


图 1-5 液面自动调节系统

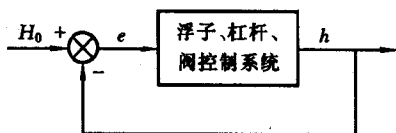


图 1-6 液面控制信息传递

应当特别指出,人们往往把带反馈的闭环系统局限于自动控制系统,或者仅从表面现象来判定某些系统为开环(即无反馈)或闭环系统,这就大大限制了控制论的应用范围。我们知道,人们往往利用反馈控制原理在机械系统或过程中加上一个“人为的”反馈,从而构成一个自动控制系统。例如上述液面自动调节系统以及其它所谓“自动控制系统”都人为地外加反馈。但是,在许多机械系统或过程中,往往存在内在的相互耦合作用构成非人为的“内在的”反馈,从而形成一个闭环系统。例如,机械系统中作用力与反作用力的相互耦合从而形成内在反馈。又如在机械系统或过程(如切削过程)中自激振动的产生,也必定存在有内在的反馈使能量在内部循环,促使振动持续进行。这样的例子举不胜数。很

多机械系统或过程从表面上看是开环系统,但经过分析可以发现它们实质上都是闭环系统。但是,必须注意从动力学的而不是静力学的观点,从系统而不是孤立的观点进行分析才能揭示系统或过程的本质。

为了说明内在反馈的情形,观察图 1-7 所示的具有二个自由度的机械系统。从表面上看虽然是一个开环系统,但是,当我们把它的动态微分方程列出后可知:

当质量 m_2 有一小位移 x_2 使质量 m_1 产生相应的位移 x_1 ,其动力方程为

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 = k_2 x_2 \quad (1-1)$$

而 x_1 又反过来影响质量 m_2 的运动,其动力方程为

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 = k_2 x_1 \quad (1-2)$$

信息量 x_1 与 x_2 的传递关系式(1-1)和式(1-2)可以表示为如图 1-8 所示的闭环系统。

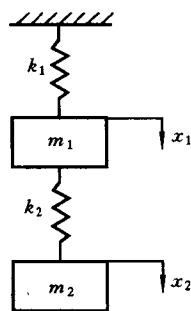


图 1-7 两自由度机械系统

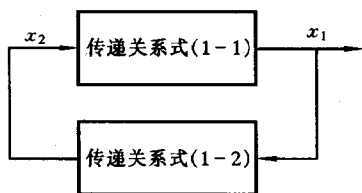


图 1-8 信息传递关系

从这个简单的实例可以看到,机械工程系统及过程中广泛存在着内在的或外加的反馈。有关实例我们将在下一节及本书其他有关章节中详细介绍。

4. 对控制系统的基本要求

评价一个控制系统的好坏,其指标是多种多样的。但对控制系统的基本要求(即控制系统所需的基本性能)一般可归纳为稳定性、快速性和准确性。

(1) 系统的稳定性

是指系统在受到外界扰动作用时,系统的输出将偏离平衡位置,当这个扰动作用去除后,系统恢复到原来的平衡状态或者趋于一个新的平衡状态的能力。由于系统存在着惯性,当系统的各个参数分配不恰当时,将会引起系统的振荡而失去工作能力。稳定性的要求是系统正常工作的首要条件。

(2) 响应的快速性

是指当系统实际输出量与期望的输出量之间产生偏差时,消除这种偏差的快速程度。这是在系统稳定的前提下提出的。

(3)响应的准确性

是指在调整过程结束后输出量与期望的输出量之间的偏差,或称为静态精度,这也是衡量系统工作性能的重要指标。例如,数控机床精度越高,加工精度也越高。

由于被控对象的具体情况不同,不同的系统对稳、快、准的要求各有侧重。例如,随动系统对响应快速性要求较高,而调速系统对稳定性提出较严格的要求。而对同一系统稳、快、准三方面的要求又是相互制约的。如提高了系统的快速性,可能导致系统不稳定;改善了系统的稳定性,又可能使系统的稳态精度降低。如何分析和解决这三者之间的矛盾,是本书的重要内容,我们将在后面章节中加以详细讨论。

1.3 机械控制的应用实例

如同其他技术科学一样,机械工程科学的主要任务之一就是要掌握和了解机械工程系统或过程的内部动态规律,也就是系统或状态的动态特性,要研究其内部信息传递、变换规律以及受到外加作用时的反应,从而决定控制它们的手段和策略,以便使之达到人们所预计的最佳状态。这也正是“机械控制工程”或“机械工程控制论”的主要内容。大多数自动控制系统、自动调节系统以及伺服机构都是应用反馈控制原理控制某一个机械刚体(例如机床工作台、振动台、火炮或火箭体等等),或是一个机械生产过程(例如切削过程、锻压过程、冶炼过程等等)的机械控制工程实例。

例 1.1 液压压下钢板轧机

图 1-9 是一台反馈控制的液压压下钢板轧机原理图。由于钢板轧制速度

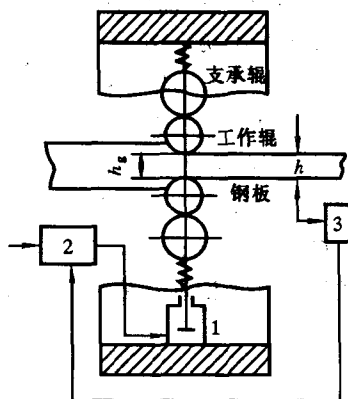


图 1-9 液压压下钢板轧机原理图

及精度要求愈来愈高,现代化轧钢机已经用电液伺服系统代替了旧式的机械式压下机构。图中工作辊的辊缝信息 h_g 或钢板出口厚度信息 h (或者 h_g 与 h 两者同时)由检测元件3测出并反馈到电液伺服系统2中,发出控制信号驱动油缸1,以调节轧制辊缝 h_g ,从而使钢板出口厚度 h 保持在要求的公差范围内。为了使上述钢板轧机伺服系统能发挥其高灵敏度、高精度的优良特性,必须应用机械控制工程有关理论进行分析、综合。

例 1.2 数控机床工作台的驱动系统

图 1-10 是数控机床工作台驱动系统。由检测装置随时测定工作台的实际位置(即输出信号)与控制指令比较,得到工作台实际位置与目标位置之间的差值,考虑驱动系统的动力学特性,按一定的规律设计相应的控制策略,使系统按输入指令的要求进行动作。

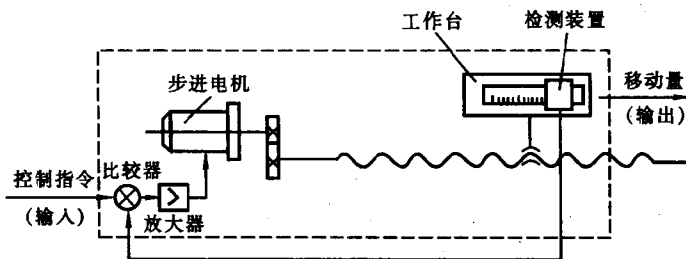


图 1-10 数控机床工作台驱动系统

例 1.3 车削过程分析

图 1-11 所示的车削过程,往往会产生自激振动,这种现象的产生就和切削过程本身存在内部反馈作用有关。当刀具以名义进给 x 切入工件时,由切削过程特性产生切削力 P_y ,在 P_y 的作用下,又使机床-工件系统发生变形退让 y ,从而减少了刀具的进给量,这时刀具实际进给量为 $a = x - y$ 。上述信息传递关系可用图 1-12 的闭环系统来表示。这样,对于切削过程的动态特性,切削自激振动的研究,完全可以应用控制理论有关稳定性理论进行分析,从而提出控制切削过程、抑制切削振动的有效途径。

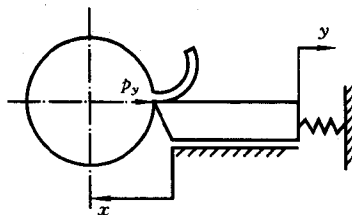


图 1-11 车削过程

例 1.4 静压轴承

图 1-13 是一个薄膜反馈式径向静压轴承。当主轴受到负荷 W 后产生偏移 e ,因而使下油腔压力 P_2 增加 ΔP ,上油腔压力 P_1 减少 ΔP 。这样,与之相通