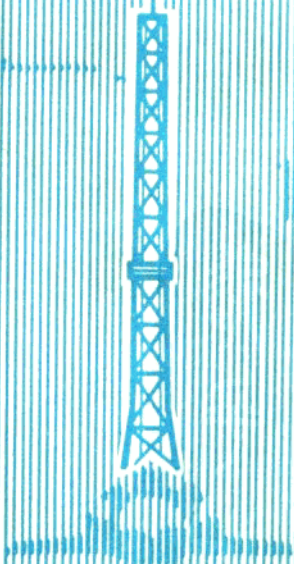


高等学校教材

电子机械运动 控制技术

叶济忠 余胜生



华中理工大学出版社

电子机械运动控制技术

叶济忠 余胜生

华中理工大学出版社

内 容 简 介

本书重点阐述电子机械增量运动控制系统的组成、工作原理、分析和设计方法，对于采用步进电机的控制系统引入了相平面分析法，同时，对微处理机控制系统也作了较简炼的分析。书中还扼要地介绍了机械参数对控制系统性能的影响以及检测元件、伺服电机的工作原理和选用原则。

该书将机、电融合成一体，内容新颖、具有启发性。是高等工科院校电子精密机械及相近专业用教材，亦可供从事电子机械、自动控制、计算机及其外部设备工作的工程技术人员参考。

电子机械运动控制技术

叶济忠 余胜生

责任编辑 戴以铭

*

华中理工大学出版社出版发行

(武昌雄家山)

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

*

开本：850×1168毫米 1/32 印张：11.25 字数：276 000

1989年2月第一版 1993年9月第二次印刷

印数：4 001-6 000

ISBN 7-5609-0229-4/TH·26

定价：5.60元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材系按电子工业部的工科电子类专业教材1986-1990年编审出版规划,由电子机械教材编审委员会无线电专用机械设备教材编审小组征稿,推荐出版,责任编委张江陵。

本教材由华中理工大学担任主编,华中理工大学彭纪纲担任主审。

本课程的参考学时数为60学时,其主要内容为电子机械中直流伺服电机、步进电机组成的增量运动控制系统及微处理机控制系统。全书共八章,第一章绪论,简略介绍电子机械这一新兴技术领域的基本概念及其控制系统的特点,为以后各章的有关内容建立初步概念;第二章扼要讨论了机械参数对控制系统性能的影响,使读者明确机电结合的重要意义及有关问题;第三章检测元件,它涉及的面很广,这里只介绍主要的检测元件的基本原理及其应用,以便能对它们有个基本了解,并会初步选用;第四、五章着重讨论直流伺服电机及其控制系统,其中包括伺服电机基本工作原理、特性和驱动方式、伺服系统及最佳控制系统的设计、主要部件选择法等;第六章为步进电机及其控制系统,以较多的篇幅讨论了步进电机的闭环控制问题,并介绍了步进电机运行性能的相平面分析法;第七章讨论曲线运动控制的基本问题;第八章介绍微处理机控制系统及其实现,这是当前电子机械运动控制系统的主流。本教材应在自动控制原理课之后讲授。

本教材由余胜生编写第六、七两章,叶济忠编写其余各章并统编全篇。参加审阅工作的还有武汉工业大学王明阳同志。参加审稿会议的有电子机械教材编委会成员及西北电讯工程学院、成都电讯工程学院、桂林电子工业学院、杭州电子工业学院、南京通讯工程学院、南京工学院、北京邮电学院、上海工业大学、上

• 1 •

海科技大学、武汉大学、武汉工业大学、华中理工大学等院校和
有关出版社的代表，他们都为本书提了许多宝贵意见，这里表示
诚挚的感谢。由于编者水平有限，书中难免还存在一些缺点和错
误，殷切希望广大读者批评指正。

— 编 者 —

目 录

第一章 概 论

- 1.1 电子机械及其发展 (1)
- 1.2 电子机械的运动控制 (2)
- 1.3 增量运动控制 (3)

第二章 机械参数及其对伺服系统的影响

- 2.1 摩 擦 (7)
 - 2.1.1 摩擦对系统误差的影响 (8)
 - 2.1.2 摩擦引起低速爬行 (11)
 - 2.1.3 摩擦引起系统的失动 (13)
- 2.2 间 隙 (13)
- 2.3 刚度与扭转谐振 (16)
 - 2.3.1 伺服系统中的扭转谐振 (17)
 - 2.3.2 减少谐振效应的方法 (21)
- 2.4 质量与惯量 (23)
- 2.5 传动系统轴际参数的换算 (24)

第三章 伺服系统的检测元件及其应用

- 3.1 旋转变压器 (29)
 - 3.1.1 基本结构和工作原理 (29)
 - 3.1.2 旋转变压器的应用 (30)
 - 3.1.3 磁阻式多极旋转变压器 (30)
- 3.2 感应同步器 (31)
 - 3.2.1 结构和工作原理 (31)
 - 3.2.2 感应同步器的应用 (33)
- 3.3 光栅及光敏元件 (35)

3.3.1	光栅的种类及工作原理	(35)
3.3.2	莫尔条纹式光栅	(36)
3.3.3	数字化原理及电路	(37)
3.3.4	透射直线式光栅	(39)
3.3.5	光敏元件	(40)
3.4	增量码盘和绝对值码盘	(42)
3.4.1	增量码盘	(42)
3.4.2	绝对值码盘	(44)
3.5	伺服盘位置传感器	(45)
3.5.1	伺服盘位置传感器基本原理	(46)
3.5.2	伺服信息和位置信号	(47)
3.6	磁尺	(50)
3.7	激光测量	(54)
3.8	速度检测元件	(56)
3.8.1	直流测速发电机	(57)
3.8.2	感应式速度传感器	(60)
3.8.3	电子测速器	(62)
第四章	伺服电动机及其驱动	
4.1	直流伺服电动机	(66)
4.1.1	工作原理	(66)
4.1.2	电磁转矩和电枢反电势	(68)
4.1.3	传递函数、机械特性和传递特性	(69)
4.1.4	工作状态和功率损耗	(73)
4.1.5	直流电动机的热模型	(76)
4.2	直流伺服电机的线性直流放大器驱动	(79)
4.2.1	单向功率放大器	(79)
4.2.2	双向功率放大器	(81)
4.2.3	功率放大器的设计原则	(81)
4.2.4	线性双极放大器设计举例	(85)

4.3	直流伺服电机的脉宽调制放大器驱动.....	(91)
4.3.1	运行方式	(91)
4.3.2	双向式PWM放大器	(94)
4.3.3	单向式PWM放大器	(97)
4.3.4	有限单向式PWM放大器	(98)
4.3.5	PWM放大器设计计算的有关问题	(102)
4.4	直流伺服电机的晶闸管驱动.....	(103)
4.5	交流伺服驱动.....	(107)
4.5.1	磁场矢量变换控制	(107)
4.5.2	同步型交流伺服电动机驱动系统.....	(111)
4.6	其它型式的直流电动机.....	(113)
4.6.1	无刷直流电动机	(113)
4.6.2	低惯量直流伺服电动机	(115)
4.6.3	直线电动机.....	(117)
4.7	直流电动机及传动部件的选择标准.....	(122)
4.7.1	对电动机主要性能的考虑	(122)
4.7.2	增量运动系统的最佳设计	(125)
4.7.3	按最小能量损耗选择部件	(132)

第五章 电子机械的伺服系统

5.1	对电子机械伺服系统的要求.....	(140)
5.1.1	静态(稳态)参数	(140)
5.1.2	动态参数	(146)
5.1.3	控制系统设计考虑的问题	(147)
5.1.4	时间最佳控制的基本原理	(148)
5.2	速度控制系统.....	(152)
5.2.1	速度控制系统性能分析	(153)
5.2.2	速度控制系统举例	(157)
5.3	位置控制系统.....	(159)

5.3.1	使用速度反馈的位置控制系统	(159)
5.3.2	不用速度反馈的位置控制系统	(162)
5.3.3	双模式控制系统	(163)
5.3.4	初始条件不为零时的系统分析	(169)
5.4	锁相伺服系统	(170)
5.4.1	系统模型	(171)
5.4.2	系统稳定性分析	(177)
5.4.3	系统设计	(179)
5.4.4	锁相伺服系统举例	(183)

第六章 步进电动机及其驱动

6.1	步进电动机的工作原理和结构	(187)
6.1.1	工作原理	(187)
6.1.2	类型及结构	(190)
6.2	步进电动机的主要特性	(194)
6.3	步进电动机的选择	(202)
6.3.1	步距角	(202)
6.3.2	转矩	(203)
6.3.3	启动(牵入)惯频特性	(204)
6.3.4	步距误差	(205)
6.4	步进电动机的驱动	(206)
6.4.1	步进电动机的运行方式	(206)
6.4.2	环形分配器	(207)
6.4.3	功率放大器	(210)
6.4.4	对驱动电路的要求和分类	(210)
6.4.5	提高驱动电路性能的措施	(211)
6.4.6	功率放大器典型电路	(215)
6.5	进一步改善步进电动机控制性能的方法	(221)
6.5.1	自动升降速电路	(222)

6.5.2	步距角的微步与平滑控制	(224)
6.6	开环步进系统的精度	(230)
6.6.1	位移精度的分析	(230)
6.6.2	提高精度的方法	(230)
6.7	步进电动机的闭环控制	(232)
6.7.1	转换角和超前角	(234)
6.7.2	超前角及注入脉冲对闭环响 应的影响	(235)
6.7.3	采用编码器反馈的闭环点-位控制器	(237)
6.7.4	可变延时闭环转速控制	(239)
6.8	步进电动机驱动系统的相平面分析法	(241)
6.8.1	系统数学模型的建立	(241)
6.8.2	相平面分析法	(249)
6.8.3	步进电动机失步的相平面分析法	(253)
 第七章 电子机械的曲线运动控制		
7.1	脉冲分配算法和插补器	(259)
7.1.1	数字积分法	(259)
7.1.2	逐点比较法	(269)
7.1.3	比较积分法	(272)
7.2	曲线运动控制	(280)
7.2.1	数控伺服系统简介	(280)
7.2.2	相位伺服系统	(283)
7.2.3	幅值伺服系统	(293)
 第八章 电子机械的微处理机控制		
8.1	微处理机控制的特点	(302)
8.2	直流电动机的微处理机间接控制系统	(303)
8.3	直流电动机的微处理机直接控制系统	(310)

8.3.1	系统的基本结构	(310)
8.3.2	位置给定与位置误差的计算	(314)
8.4	步进电动机的微处理机开环控制	(319)
8.4.1	步进电动机与微处理机的接口	(320)
8.4.2	步进电动机运行方式的控制	(321)
8.4.3	步进电动机速度的控制	(324)
8.5	步进电动机的微处理机闭环控制	(327)
8.5.1	位置编码器同微处理机的接口	(327)
8.5.2	核步法闭环控制	(329)
8.5.3	固定超前角选择法闭环控制	(333)
8.5.4	采用时间延迟法选择超前角	(337)
8.5.5	超前角算法	(337)
8.6	微步法	(343)
参考文献		(348)

第一章 概 论

1.1 电子机械及其发展

传统的机器设备与产品，都是以机械为主，是电气（液压、气动）控制的机械设备。电子技术特别是微电子技术的发展，为机器的革新创造了条件，带来了新的活力。机械工业的传统技术和电子工业的新技术相结合，使生产技术和产品构成提到了一个新的高度，出现了机械与电子技术密切结合的新产品，开拓了新的工业领域。这些产品与传统的机械产品及普通的电子产品均不相同，它们是微电子技术、计算机技术、信息技术、控制技术与机械技术的结合，人们把这种结合称为机电一体化，把这些产品称为机电一体化产品或称电子机械。关于电子机械，目前尚无统一的定义或名称，一般倾向认为：电子机械是指在机构的主功能、信息处理功能和控制功能等方面引进了电子技术，并把机械装置、执行部件、电子设备以及软件等有机结合而构成的系统的总体，即机械、执行、信息处理、接口和软件等部分在电子技术的支配下，以系统的观点进行组合而形成的新型机械。人们认为，这种趋势已促使形成“机械电子学”这一新的边缘学科。电子机械总的发展趋势是机械与微电子技术结合、软硬结合，朝自动化、柔性化、多功能化、智能化程度更高的方向发展。

电子机械涉及的面很广，各种计算机外部设备、办公室自动化设备、细微加工设备、数控机床、机器人、射压成型系统，乃至家用电子机械、电子玩具等，都可归于电子机械范畴。这些设备的控制问题，有共性，也各具特点。本书将以计算机外部设备及精密机械设备为重点进行讨论。

1.2 电子机械的运动控制

按控制系统的被控变量不同有：

速度控制 被控变量为负载的速度；

位置控制 被控变量为负载的位移；

力矩或力的控制 被控变量为力矩或力；

混合变量控制 被控变量有多个。例如磁盘驱动器的磁头定位系统，先进行速度控制，使系统快速运动，最后进行位置控制，实现精确定位，故又称多方式（多模）控制。

从控制形式来看，可分开环控制和闭环控制两种类型。开环系统的输出量不影响输入量，一个输入量就有一个对应的输出量，当输出量的数值受外界扰动或系统内部元部件参数变化的影响而变化时，系统本身无法产生校正作用。但由于其结构简单、成本低，且不存在闭环系统的稳定性问题，只要精度满足要求，仍是很可取的，特别是近年来小步距、高精度步进电机的出现，

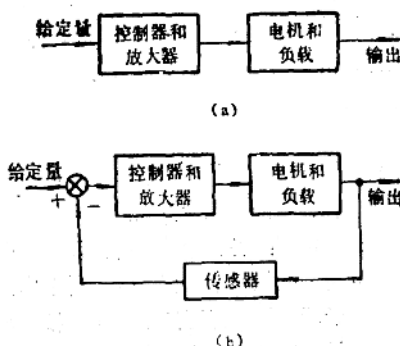


图1.1 典型的框图

(a)开环系统框图 (b)闭环系统框图

使开环系统在很多场合均有应用。开环系统的框图见图1.1 (a)。图 (b) 为闭环系统框图, 其输出量反馈至输入端, 使之与给定输入量相比较, 从而获得所预期的性能。图1.1 的控制器往往是微处理器或数字逻辑装置, 这时给定量为数字形式。

1.3 增量运动控制

电子机械中最重要的一类伺服控制系统是增量运动系统, 或称为间歇运动系统。这是一种启停十分频繁的系统, 此种系统一般要求以某种频率反复地启停一个负载(多是低惯量负载), 启、停频率可以是固定的, 也可以是可编程程序的随机启、停频率。与这种运动系统不同的系统称为连续运动系统, 这是按控制方式的分类法。典型的增量运动系统如前面提到的磁头定位系统, 磁头从一条磁道定位到另一条磁道, 其经过的磁道数(定位距离)及启、停频率均依计算机的读写要求而定, 是随机的, 寻道频率可达到每秒数十次; 再如打印机, 它应用多个增量型控制系统, 其字车系统按步进-打印-步进的方式反复运动, 才能把一行字打印出来, 典型的打印速率为每秒80~160 个字符, 每行打印过后, 则由馈纸系统使纸张垂直移过一行的距离, 资料复印机以固定的速率每启、停一次, 完成一次资料复印。这些都属增量型运动。

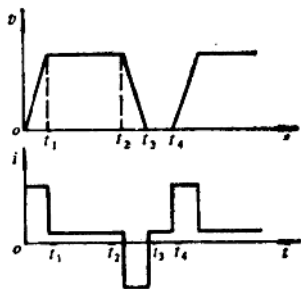


图1.2 速度和电流的变化规律

这种时启时停的增量运动, 一般要求作为执行元件的电机的速度和电流具有如图1.2所示的变化规律, 加速、减速时流过很大的启动、制动电流, 恒速时只需流过克服摩擦力矩所需的微小电流, 启、停之间有一个静态间歇。这种运动特点对电

机的性能及控制系统的设计提出了如下一些要求：

1. 因要经常频繁地启、停及正反走，故要求电机的动态特性好，即时间常数小，启、停加速度大，即控制系统要有大的带宽。

2. 电机中频繁地流过脉冲式启、制动电流，以克服外加力矩，输入功率大部分变成热能消耗掉，故电机要有一定的承受热冲击的能力且散热要好。设计时要对电机的发热情况进行计算，保证其温升不超过允许值。有些设备，机体温度变化会引起控制误差，需对发热加以限制。

3. 电机的电枢和转轴经常受到力和力矩的冲击，将会产生扭转谐振和挠性振动，因此要求电机和系统中的运动部件有一定的刚度，其谐振频率应远大于系统的带宽。

下面研究反馈控制系统在增量运动下的响应特性，它可说明典型增量运动的某些重要特性。设此系统的框图如图1.3 所示。由图可得

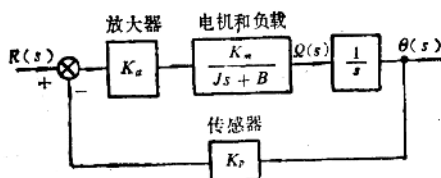


图1.3 反馈控制系统框图

$$\frac{\Theta(s)}{R(s)} = \frac{K_a K_m}{Js^2 + Bs + K_a K_m K_f}$$

式中 J 为电机和负载的总惯量， B 为电机和负载的粘滞摩擦系数， K_m 为电机的力矩系数， K_a 和 K_f 分别为放大器及传感器的放大系数。可知此系统的阻尼系数为 $\xi = B/2\sqrt{JK_a K_m K_f}$ ，自然谐振频率为 $\omega_n = \sqrt{K_a K_m K_f/J}$ 。当输入为单位阶跃函数时，输出波形可由 ξ 和 ω_n 的值决定。从理论上讲，虽然稳态时输出位

移是无静差的，但暂态过程的完全消失需要一定时间，尤其是对于负荷惯性大的系统更是如此。所以若要设计负荷需要时启、时停的增量运动控制系统时，应使暂态过程尽快消失。该类系统若输入信息如图1.4 (a) 所示，则对应的典型输出将如图 (b) 所示，(c) 为电机电流波形。图示波形是假设后一阶跃输入时，前一输出已达到稳态波形。

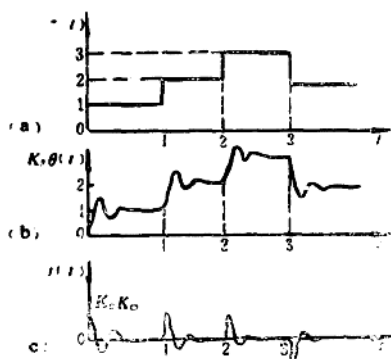


图1.4 波形图

(a)输入波形 (b)输出波形 (c)电流波形

增量运动控制并不是一个新课题，过去它多已应用于一定负荷下需要步进和点位控制的系统，但当时缺乏高性能（低电感和低惯量）的电动机，缺乏快速电子开关器件及高精度高分辨率的位置传感器，使传统的增量运动控制系统的速度和总性能的提高受到很大限制。

按历史情况看，用于控制系统的原动机有电动机、液压传动装置、制动离合机组。近年永磁技术进展很快，使永磁直流电动机成为各种控制系统重要的原动机，且出现了直线式电动机。随着微处理机的出现，引起了步进电动机新的应用和普及。这些都影响到控制系统的设计。