

电气与控制实验科学技术

王科俊 主编

运动控制实验技术

YUN DONG KONG ZHI SHI YAN JI SHU

彭秀艳 王显峰 孙 蓉 编著

黑龙江人民出版社

· 电气与控制实验科学技术 · 王科俊 主编

江南大学图书馆



91142438

运动控制实验技术

彭秀艳 王显峰 孙 蓉 编著



黑龙江人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

电气与控制实验科学技术/王科俊 主编. —哈尔滨:黑龙江人民出版社,2008.7
ISBN 978-7-207-07885-8

I. 电… II. 王… III. 电气控制—实验—研究 IV. TM921.5

中国版本图书馆 CIP 数据字(2008)第 110906 号

责任编辑:李荣焕

装帧设计:李若聃

运动控制实验技术

彭秀艳 王显峰 孙 蓉 编著

出版发行 黑龙江人民出版社
通讯地址 哈尔滨市南岗区宣庆小区 1 号楼
邮 编 150008
网 址 www.longpress.com
电子邮箱 hljrmcbs@yeah.net
印 刷 哈尔滨太平洋彩印有限公司
开 本 16 开
印 张 135 印张
字 数 355 万字
印 数 2000 套
版 次 2008 年 8 月第 1 版 2008 年 8 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-207-07885-8/TP·14
定 价 350.00 元(全套 14 本)

(如发现本书有印制质量问题,印刷厂负责调换)

本社常年法律顾问:北京市大成律师事务所哈尔滨分所律师赵学利、赵景波

前言

自动控制系统主要分为运动控制系统和过程控制系统两大类。运动控制作为自动化专业的一个专业方向,在教学中占有重要地位。运动控制课程具有很强的实践性,运动控制实验作为这门课程的重要一环,直接影响着教学效果,编者根据多年从事控制理论实践教学经验和成果,以及借鉴了一些国内外实验技术,编写了本书。

全书分为基础篇和实验篇两部分。基础篇包括3章,第1章在介绍运动控制系统一般构成的基础上,详细介绍了组成运动控制系统的各种元件的结构和特性;第2章介绍了运动控制系统数学模型的建立方法,重点介绍了实验法辨识系统数学模型的原理和方法;第3章介绍了几种常用的控制算法。实验篇包括5章,各种典型运动控制系统的结构及原理,实验内容,实验方法,实验思考题等。具体典型运动控制系统有:自整角机随动系统、基本PC数字随动系统、基于DSP的随动系统、球杆系统、直线式倒立摆、旋转式倒立摆等。本书设置了26个实验项目,实验类型包括验证、演示、综合、设计等类型,以适应不同层次的学生需求。

本书适用于本科院校和高职高专院校自动化、电机、机电一体化、数控等专业的高年级本科生作为实验教材使用,同时可供有关技术人员参考使用。

本书编写得到了哈尔滨工程大学和哈尔滨工程大学自动化学院的大力资助,王科俊教授、吕淑萍教授给予了大力支持和帮助,于占东副教授提出了很多宝贵意见,在此谨致衷心的感谢!

本书由袁秀艳教授主编,并统稿。彭秀艳教授编写了本书的第1、2章,王显峰编写了本书的第3、4、5章,孙蓉编写了本书的第6、7、8章。控制工程实验教学中心的其他师生也为本书的完成做了大量的工作,在此表示感谢。

由于编者水平有限,时间仓促,错误不当之处在所难免,殷切期望读者批评指正。

编者

2008年7月

内容简介

运动控制系统实验技术是以电动机为执行机构,以电力电子功率变换装置为驱动装置,在自动控制理论的指导下组成的控制系统的实验技术。这类系统的实验技术主要目标是利用控制理论控制电动机的转角、转速、运动轨迹等,将电能转换为机械能,实现运动机械的运动要求。本书分为基础篇和实验篇,在基础篇中介绍运动控制系统的一般构成、数学模型的建立方法、控制算法的设计,以及与实验相关的基础知识。在实验篇中,介绍各种典型运动控制系统的结构、原理、实验内容,实验方法,实验思考题等,具体典型运动控制系统有:自整角机随动系统、基于PC数字随动系统、基于DSP随动系统、球杆系统、直线式倒立摆、旋转式倒立摆、电梯模型、二维转台以及综合运动控制系统等。本书适用于本科院校和高职高专院校自动化、电机、机电一体化、数控等专业的高年级本科生作为实验教材使用,同时可供有关技术人员参考使用。

前言

2005年8月

目 录

基础篇

第1章 运动控制系统基本构成	1
1.1 运动控制系统的基本结构	1
1.2 运动控制系统的执行电机及驱动	2
1.2.1 直流电机	2
1.2.2 交流电机	6
1.2.3 无刷直流电机	9
1.2.4 步进电机	10
1.2.5 电机性能比较	13
1.3 运动控制中的传感器	14
1.3.1 电位器	14
1.3.2 光电编码器	15
1.3.3 测速发电机	16
1.3.4 旋转变压器	17
1.3.5 自整角机	17
第2章 运动控制系统数学模型的建立	19
2.1 运动控制系统数学模型概述	19
2.1.1 运动控制系统数学模型的表达形式	19
2.1.2 运动系统系统数学模型建立的方法	19
2.2 实验法辨识系统的数学模型	20
2.2.1 阶跃响应的获取	20
2.2.2 系统参数的计算	21
2.2.3 脉冲响应的获取	25
第3章 运动控制系统控制算法	26
3.1 PID 控制算法	26
3.1.1 模拟 PID 控制规律	26
3.1.2 数字 PID 控制规律	27
3.1.3 PID 控制器参数的选择	28
3.2 最少拍控制算法	29
3.2.1 数字控制器的脉冲传递函数	29
3.2.2 最少拍控制器设计	30
3.3 线性二次型最优控制(LQR)	33
3.3.1 有限时间状态调节器	33

3.3.2 无限时间状态调节器	35
-----------------------	----

实 验 篇

第4章 位置随动系统	37
4.1 基于PC机的数字随动系统	37
4.1.1 系统组成及工作原理	37
4.1.2 系统各个环节的电路构成	38
4.1.3 实验箱面板说明	40
4.1.4 系统的初始设置	41
实验一 数字随动系统数学模型的建立	42
实验二 数字随动系统PID综合校正与调试	44
实验三 数字随动系统的参数整定	46
实验四 数字随动系统Matlab仿真研究	47
4.2 自整角机随动系统	48
4.2.1 系统组成及工作原理	48
4.2.2 系统各个环节的电路构成	49
4.2.3 实验箱面板说明	53
实验五 自整角机随动系统数学模型的建立	55
实验六 自整角机随动系统综合校正与调试	56
4.3 基于DSP的随动系统	59
4.3.1 系统组成及工作原理	59
4.3.2 系统各个环节的电路构成	59
4.3.3 系统操作方法与注意事项	60
实验七 基于DSP的随动系统的数字PID综合校正与调试	61
实验八 基于DSP的随动系统最少拍算法设计	61
第5章 球杆系统	63
5.1 球杆系统组成	63
5.1.1 机械部分	63
5.1.2 智能伺服驱动	64
5.1.3 基于PC的控制软件	64
5.2 球杆系统数学模型的建立与分析	64
5.2.1 球杆系统的动力学模型	64
5.2.2 动力学模型仿真与分析	65
5.2.3 球杆系统的电气模型	69
5.2.4 球杆系统的控制结构	70
实验十 球杆系统的PID控制仿真与综合调试	71
实验十一 球杆系统的根轨迹控制仿真与综合调试	79
实验十二 球杆系统的频率响应法校正仿真与综合调试	84
第6章 倒立摆系统	89

6.1 一级直线式倒立摆数学模型的建立与分析	89
6.1.1 牛顿力学方法	89
6.1.2 拉格朗日方法	92
6.1.3 实际系统模型	94
6.1.4 系统可控性分析	95
6.1.5 系统阶跃响应分析	95
实验十三 一级直线式倒立摆根轨迹控制	95
实验十四 一级直线式倒立摆频率响应控制	98
实验十五 一级直线式倒立摆 PID 控制	100
实验十六 一级直线式倒立摆状态空间极点配制控制	102
实验十七 一级直线式倒立摆 LQR 控制	105
6.2 二级直线式倒立摆数学模型建立与分析	107
6.2.1 拉格朗日法	107
6.2.2 系统可控制分析	110
6.2.3 系统稳定性分析	111
实验十八 二级直线式倒立摆 LQR 控制仿真与实现	111
6.3 一级旋转式倒立摆的系统组成与工作原理	113
6.3.1 系统组成	113
6.3.2 系统工作原理	114
6.3.3 软件使用说明	114
实验十九 一级旋转式倒立摆数学模型的建立与仿真	116
实验二十 一级旋转式倒立摆状态反馈的控制算法设计与实现	119
第 7 章 综合运动控制系统	121
7.1 综合运动控制系统组成及工作原理	121
7.1.1 系统组成	121
7.1.2 系统各个组成部分的技术参数	121
实验二十一 步进伺服	122
实验二十二 交流伺服	124
实验二十三 变频调速	126
实验二十四 综合运动控制	128
第 8 章 其他运动控制系统	131
8.1 基于变频调速的电梯模型系统	131
实验二十五 基于变频调速的电梯模型实验	134
8.2 二维转台系统	135
实验二十六 二给转台演示实验	135

第1章 运动控制系统基本构成

控制理论是构造控制系统的理论基础。自动化技术工具是构造控制系统的物资保证,控制系统实验是开发和研究控制和研究性能不可少的手段。

从设计的这个角度上说,控制系统这门学科是既强调理论基础,又重视实验技术。控制系统的设计离不开实验。一般控制系统设计的基本思路:

(1) 观察系统开环性能是否能够达到所要求的精度。如果不满足,则要考虑加入反馈及串联校正环节对系统进行闭环控制。

(2) 了解被控对象的工作原理,建立被控对象的数学模型。

(3) 对模型进行分析,利用系统的频率特性,根轨迹,零极点分布等分析系统的稳定性、能控性、能观性等。

(4) 确定系统的被控输出量,并对被控变量取反馈。

(5) 设计系统闭环控制规律(如古典控制中的PID方法、现代控制理论中的极点配置方法),这一步称为系统综合问题。

(6) 进行仿真实验。

(7) 对控制律进行校核,即系统的实际调试。

为了设计,我们需要分析与综合;为了分析与综合,我们需要数学模型。上述的这七个步骤不是截然分开、一成不变的,而是相互交叉组成统一整体。

§1.1 运动控制系统的基本结构

运动控制系统是以电动机为执行机构,以电力电子功率变换装置为驱动装置,利用控制器在自动控制理论的指导下实现运动要求的控制系统。这类系统主要目标是利用控制理论来控制电动机的转角、转速、运动轨迹等,将电能转换为机械能,实现运动机械的运动要求。运动控制系统的种类繁多,用途各异。

(1) 按被控物理量分:以转速为被控量的系统叫调速系统;以角位移或直线位移为被控量的系统叫位置随动系统,有时也叫伺服系统。

(2) 按执行电机的类型分:用直流电机带动机械的为直流传动系统;用交流电机带动机械的为交流传动系统。

(3) 按控制器的类型分:以模拟电路构成的控制器叫模拟控制系统;以数字电路构成的控制器叫数字控制系统。

另外,按照控制系统中闭环的多少,也可分单环控制系统、双环控制系统和多环控制系统;按控制原理的不同也可分很多种。对于某一运动控制系统可能是这些分类方法的交叉,如用DSP实现的三环数字直流伺服系统。

根据上述分析,运动控制系统种类繁多、五花八门。但从基本结构上看,主要由组成:控制器、功率驱动装置、执行电机以及测量反馈装置构成,如图1.1所示。控制器是整个控制系统的精髓所在,主要进行各种控制算法的计算及其实现,控制算法可以从简单的PID控制算法到相当高深的控制算法,总的一个目的就是要实现控制系统的性能指标要求;由于控制器的输出只是控制信号,不具备功率和能量,在驱动执行电机动作时必须进行功率放大,功率驱动装置主要完成这部分工作;执行电机将获得的能量和控制信号转换为机械运动,从而带动负载完成预定动作,测量反馈装置是构成闭环系统必不可少的组成部分,它决定了整个系统的控制精度和控制效果,因此,这部分环节在整个运动

控制系统中具有非常重要的作用。

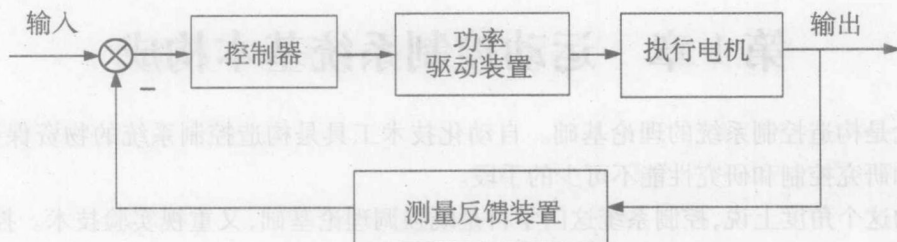


图 1.1 运动控制系统的基本结构

图中的四个主要组成部分是构成运动控制系统所必需的,而且也是变化多样的。任何一部分微小的变化都可构成不同的运动控制系统。组合成完整的运动控制系统以后,有哪些新的控制要求,如何分析系统的性能。如何设计控制器使系统达到较成的性能指标。在实际应用中存在哪些具体问题,以从如何解决等等,这些是本课程研究的主要内容。下面我们来分析电动机及其驱动、测量装置、控制算法的种类、原理和特性。

§ 1.2 运动控制系统的执行电机及驱动

电机是一种将电能转换为机械能的装置,运动控制中最常用的电机类型有:直流电机、交流电机和步进电机。

1.2.1 直流电机

在所有执行电机中,直流电机的工作特性最好。因此,在要求高的调速装置的控制系统中,都选用直流电机。和其他电机相比,直流电机体积小、效率高、启动转矩大、过载能力强、动态特性好、控制方便。

直流电机是由磁极、电枢绕组、电刷和换向器组成的。其中,磁极在工作中固定不动,故又称定子,定子磁极用于产生磁通的磁场。根据磁极的结构,可分为永磁式直流电机和电磁式直流电机两种。在永磁式直流电机中,磁极采用永磁材料制成,充磁后可产生恒定磁场。在电磁式直流电机中,磁极由硅钢片叠成,外绕线圈,靠外加激磁电流才能产生磁场。电枢绕组是直流电机中的转动部分,故又称转子,它由硅钢片叠成,表面嵌有线圈,通过电刷和换向器与外加电源相连。当电枢绕组中通过直流电时,在定子磁场的作用下就会在电枢绕组的导体上产生电磁力,并形成带动负载旋转的电磁转矩,驱动转子旋转。所以简单而言,直流电机的结构由定子、电枢转子和换向器等组成。图 1.2 所示给出了直流电机工作原理图。

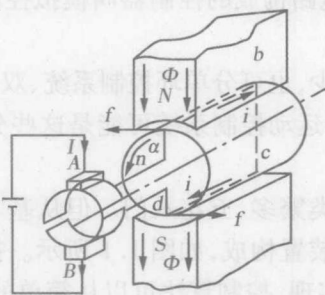


图 1.2 直流电机工作原理图

在电枢绕组中通过施加直流电压,并在磁场的作用下使电枢绕组的导体产生电磁力,形成带动负载旋转的电磁转矩,从而驱动转子旋转。通过控制电枢绕组中电流的方向和大小,就可以控制直流电

机的旋转方向和速度。采用电枢电压控制时的直流电机等效电路如图 1.3 所示。

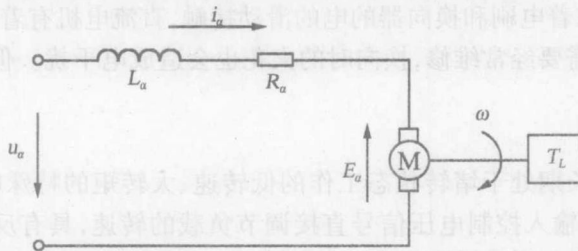


图 1.3 电枢控制时的直流电动机等效电路

图 1.3 中, L_a 和 R_a 分别是电枢绕组的电感和电阻, T_L 为负载转矩。当电枢绕组流过直流电流 i_a 时, 一方面在电枢导体中产生电磁力, 使转子旋转; 另一方面, 电枢导体在定子磁场中以转速 ω 旋转切割磁力线, 产生感应电动势 E_a 。感应电动势 E_a 的方向与电枢电流 i_a 方向相反, 称为反电势。

为了获得正确的直流电机数学模型, 由图 1.3 电枢控制时的直流电动机等效电路, 根据电磁学原理和物理学原理对直流电机写出如下几个方程式:

$$\text{电压平衡方程} \quad u_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + E_a(t) \quad (1.1)$$

$$\text{感应电动势方程} \quad U_a(t) = C_e \omega(t) \quad (1.2)$$

$$\text{电磁转矩方程} \quad T = C_m i_a(t) \quad (1.3)$$

$$\text{转矩平衡方程} \quad T_e = J_m \frac{d\omega(t)}{dt} + f_m \omega(t) + T_d(t) \quad (1.4)$$

其中, J_m 和 f_m 分别为等效到电机轴上的转动惯量和阻尼系数, C_e 和 C_m 分别为感应电动势系数和电磁转矩系数, T_d 为电机空载转矩和负载等效到电机轴上的转矩之和。

消除中间变量后, 可得直流电机的输入输出微分方程:

$$\begin{aligned} L_a J_m \frac{d^2 \omega(t)}{dt^2} + (L_a f_m + R_a J_m) \frac{d\omega(t)}{dt} + (R_a f_m + C_e C_m) \omega(t) \\ = C_m u_a(t) - L_a \frac{dT_d(t)}{dt} + R_a T_d(t) \end{aligned} \quad (1.5)$$

若负载转矩 T_L 为零时, 忽略电机空载转矩, 即 T_d 为零时, 式(1.5)可化为:

$$\frac{L_a J_m}{(R_a f_m + C_e C_m)} \frac{d^2 \omega(t)}{dt^2} + \frac{(L_a f_m + R_a J_m)}{(R_a f_m + C_e C_m)} \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = \frac{C_m}{(R_a f_m + C_e C_m)} u_a(t) \quad (1.6)$$

由于电枢电路电感 L_a 较小, 通常忽略不计。此时, 式(1.6)可化为:

$$T_m \frac{d\omega(t)}{dt} + \omega(t) = K_m u_a(t) \quad (1.7)$$

其中, $T_m = R_a J_m / (R_a f_m + C_m C_e)$ 为机电时间常数。

对式(1.7)进行拉普拉斯变换, 即可得到直流电机的近似数学模型:

$$\frac{\omega(s)}{u_a(s)} = \frac{K_m}{T_m s + 1} \quad (1.8)$$

直流电机是最早出现的电机, 然后才发明交流电机。随着科学技术的发展, 随着材料和工艺的发展和完善, 以及工程技术的需要, 直流电机也是发展最快、品种变化最多的一种电机。直流电机的目前发展有以下几个特点:

(1) 采用永久磁铁代替励磁绕组。20 世纪 80 年代以来, 永磁材料发展异常迅速, 以永久磁铁作为磁极的电机, 性能大大提高。目前在执行电机中, 中小功率(几十千瓦以下)的电机中得到了广泛的应用。

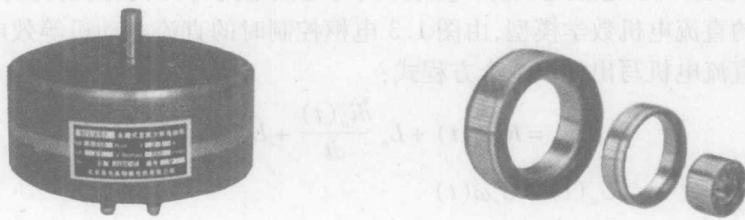
(2) 新结构、新品种直流电机。为了适应不同要求, 新型式的直流电机不断地被开发出来。例如: 快速响应的印制绕组电枢电机, 线绕电枢电机, 无槽电枢电机, 杯形电枢电机, 盘式电机, 适应于直接

驱动并去掉齿轮减速的力矩电机,以及产生直线推力的直线电机,等等。

(3)无刷化。由于存在着电刷和换向器的电的滑动接触,直流电机有着一系列致命的缺点。接触不可靠造成故障,寿命短,需要经常维修,换向时的火花也会造成电干扰。但是,直流电机的优良性能使它有着不可取代的地位。

1. 力矩电机

力矩电机是一种能够长期处于堵转状态工作的低转速、大转矩的特殊电机。它可以不需要齿轮减速而直接驱动负载,并由输入控制电压信号直接调节负载的转速,具有反应速度快、转矩大和转速波动小、特性线性度好、能在很低转速下稳定运行等优点。因此,力矩电机特别适用于位置和速度伺服系统中作为执行元件。在位置控制方式的伺服系统中,它可以工作在堵转状态;而在速度控制的伺服系统中,又可以工作在低转速状态,且输出较大的转矩。所以,力矩电机是一种直接驱动负载的执行元件。直流力矩电机如图 1.4 所示。



(a) 组装式直流力矩电机

(b) 分装式直流力矩电动机

图 1.4 直流力矩电机

直流力矩电机是从一般的直流电机发展而来的,因此工作原理和基本结构仍和普通的永磁式直流电机一样。为了能在相同的体积和电枢电压下产生比较大的转矩和较低的转速,直流力矩电机一般做成扁圆形,电枢长度和直径之比为 0.2:1 左右。从结构合理性来考虑,常用的力矩电机都做成永磁多极的。为减少转矩和转速的脉动,直流力矩电机采用较多的槽数、换向片数和串联导体数。

直流力矩电机的机械特性线性度比普通直流电机要求高,影响特性线性度的主要因素是电枢反应,力矩电机长期处于堵转或低速状态运行,负载电流大,电枢反应也随之增强,从而使磁通发生变化。为此,直流力矩电机磁路设计成高度饱和,以便尽量减弱电枢反应的去磁作用。

2. 直流伺服电机

直流伺服电机在运动控制中作为执行电机得到广泛的应用。这是因为直流伺服电机的性能与普通直流电机的性能有所不同,它具有以下优点:

- (1)良好的可控性,即直流伺服电机的启动、停转、转向可控;
- (2)其转速随控制信号改变时,具有良好的调速性;
- (3)调速范围宽、线性度好;
- (4)启动转矩大,电机本身惯量小,启动迅速;
- (5)机械特性和调节特性好。

直流伺服电机的缺点是:有换向器和电刷之间的滑动接触,接触电阻的变化使工作性能的稳定性受到影响;电刷下的火花使换向器需要经常维护,使其不能在易爆炸的地方使用,且产生无线电干扰,又因控制电源是直流,使得放大元件变得复杂。

与交流伺服电机相比,直流伺服电机在控制方便、工作特性的线性度好等方面有着突出的优点。因此,目前在要求较高调速装置的运动控制系统中,都选用直流电机与整流型(或直流斩波型)调速装置组合使用。图 1.5 所示为不同型号的直流伺服电机产品。

3. 直流电机的驱动技术

现代电机的驱动放大技术与电子技术的发展有着密切的关系。电子技术、电子器件的成就,极大



图 1.5 不同型号的直流伺服电机产品

地推动了电机驱动放大技术的进步。可以说,电机功率的驱动放大是伺服系统的核心,它用来转换电功率并驱动伺服电机运动。

现代直流电机的驱动放大都是采用晶体管功率放大器来实现的。晶体管放大器系统可以分为两种类型:线性放大器和开关型放大器。线性放大器几乎毫无例外地采用晶体管,而开关型放大器可采用晶体管,也可采用普通晶闸管。

开关型放大器通常可分为三种:脉宽调制(PWM),脉冲频率调制(PFM)和可控硅整流(SCR)。在开关型放大器中,输出级的功率器件工作在迅速地从非导通状态到完全导通状态。当处于非导通状态时,功率器件不消耗能量;而完全导通时功率器件上的压降很小,这样避开了工作在线性放大区域,因此功率输出级的损耗就很小。目前,线性放大器一般仅在小功率的场合有所应用,而大量采用的是开关型放大器。它们的电压波形如图 1.6 所示。

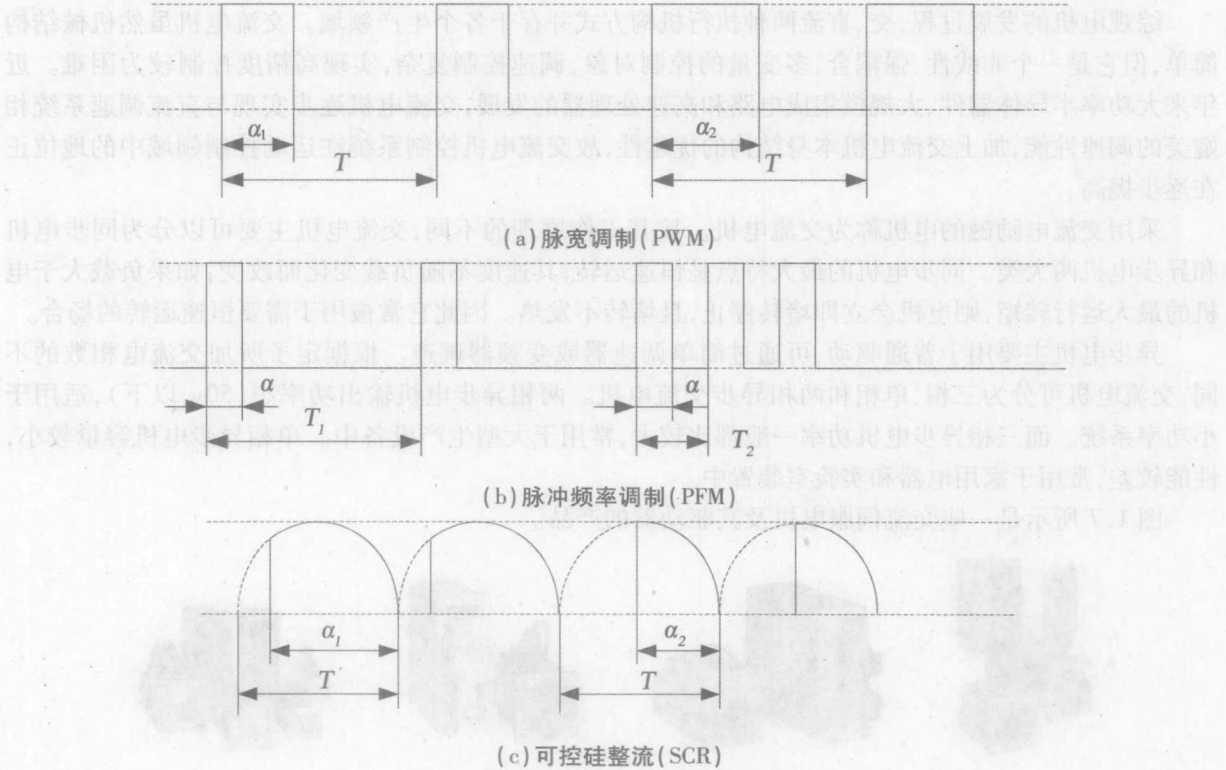


图 1.6 开关型驱动放大器的电压波形

脉宽调制(pulse width modulation,PWM)通常称为 PWM 伺服放大技术,它是利用半导体开关器件的导通和关断,把直流电压变成电压脉冲序列,控制电压脉冲宽度或周期,以达到变压的目的的一种控制技术。

PWM 从最初采用模拟电路完成三角波和参考电压比较,产生脉宽调制(PWM)信号以伺服功率放大器件的开关开始,到目前采用全数字化方案,完成优化的实时在线的 PWM 信号输出。可以说到目前

前为止, PWM 在各种应用场合仍占主导地位, 并一直是人们首选的伺服放大技术和驱动技术。PWM 系统采用直流电源, 放大器以一个固定频率, 通过改变导通角 α 的大小来改变加在负载上的平均电压值, 见图 1.6(a)。

PFM 技术是固定导通角而变化重复频率, 见图 1.6(b)。这种系统在频率高时引起能量损耗过大, 因此一般在电机控制中不予采用。

用于直流电机驱动放大的晶闸管(又称 SCR)技术, 通常都是采用整流交流电源电压的形式。图 1.6(c)所示为某一固定频率时全波整流电源电压的波形。导通角可在半波的 $0^\circ \sim 180^\circ$ 电角度内变化, 但其平均电压并不正比于导通角。线性、开关型、晶闸管型三种功率放大器性能和应用比较如表 1.1 所示。

表 1.1 三种功率放大器性能和应用比

放大器类型	放大元器件	优点	缺点	应用范围
线性直流功率放大器	晶体管	线路简单, 电磁干扰(EMI)小, 调速范围宽	功率元件工作在线性状态, 效率低	小功率电机和要求电磁干扰小系统中
PWM 功率放大器	晶体管	调速范围宽, 功率元件工作在开关状态, 效率高	电磁干扰大	应用于几百瓦至几十千瓦系统中
晶闸管型功率放大器	晶闸管	能工作在很高的额定电压和电流状态下, 电路简单, 价格低廉	调速范围较窄(20:1)	容量非常大的调速系统中, 且是有限范围调速系统

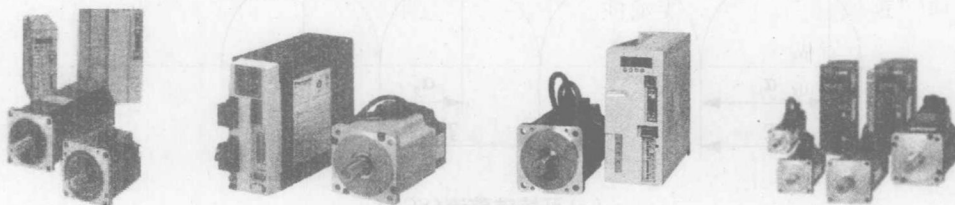
1.2.2 交流电机

综观电机的发展过程, 交、直流两种执行机构方式并存于各个生产领域。交流电机虽然机械结构简单, 但它是一个非线性、强耦合、多变量的控制对象, 调速控制复杂, 实现高精度控制较为困难。近年来大功率半导体器件、大规模集成电路和高速处理器的发展, 交流电机逐步实现与直流调速系统相媲美的调速性能, 加上交流电机本身结构的优越性, 故交流电机控制系统在运动控制领域中的地位正在逐步提高。

采用交流电励磁的电机称为交流电机。按其工作原理的不同, 交流电机主要可以分为同步电机和异步电机两大类。同步电机的最大特点是恒速运转, 其速度不随负载变化而改变, 如果负载大于电机的最大运行转矩, 则电机将立即堵转停止, 且堵转不发热。因此它常被用于需要恒速运转的场合。

异步电机主要用于普通驱动, 可通过简单调速器或变频器调速。根据定子所加交流电相数的不同, 交流电机可分为三相、单相和两相异步交流电机。两相异步电机输出功率小(50W 以下), 适用于小功率系统。而三相异步电机功率一般都比较大, 常用于大型生产设备中。单相异步电机容量较小, 性能较差, 常用于家用电器和实验室装置中。

图 1.7 所示是一些交流伺服电机及其驱动器的产品。



安川 Σ -II 系列

松下 Minas A4 系列

三菱 MR 系列

日立 AD 系列

图 1.7 交流伺服电机产品

1. 两相交流伺服电机

两相交流伺服电机实际上是一种小型的两相交流异步电机, 主要用做小功率系统、遥测和遥控系统中的执行元件, 将输入的电信号转换成输出的机械运动信号。

两相交流异步伺服电机的结构是在定子上装有空间相差 90° 的两相分布绕组, 一相为激磁绕组 j ,

一相为控制绕组 k , 转子多采用鼠笼型转子。当给两相绕组通以两相电流 i_j 和 i_k , 并且 i_j 和 i_k 的时间相位差为 90° , 就会在定子气隙中产生旋转磁场, 而转子实际上就是一个笼形的闭合回路, 此时定子旋转磁场与转子回路有相对运动, 转子导体切割磁力线, 并产生转矩, 使转子旋转起来。图 1.8 所示是两相伺服交流电机的结构原理图。在图 1.8 中, $u(t)$ 为输入控制电压, $\theta(t)$ 为输出转角, $M(t)$ 为电机转矩, J 为电机及负载折算到电机轴上的转动惯量, f 为电机及负载折算到电机轴上的粘性阻尼系数。

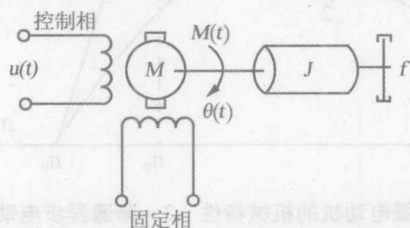


图 1.8 两相伺服交流电机结构原理图

在实际运行的过程中, 为了控制交流伺服电机, 在大多数情况下是靠改变控制电压的大小或改变它与励磁电压间的相位角来实现的, 也就是说通入两相绕组中的电流是幅值不相等, 相位上也不总是互差 90° 电角度的两相不对称电流。它的控制方式有以下几种。

(1) 幅值控制

这种控制方式通过调节控制电压的大小来改变电机的转速, 而在此期间控制电压之间的相位角始终保持 90° 电角度。

(2) 相位控制

在保持控制电压和励磁电压幅值相等的条件下, 通过改变两者之间的相位来改变电机的转速。若负载转矩不变, 则当相位差为 90° 时, 电机转速最大; 当相位差为 0° 和 180° 时, 电机转速为零。

(3) 幅相控制

这是一种幅值和相位的复合控制。这种方法就是同时改变控制电压的幅值和相位来控制转速。这种方法较前面两种方法输出功率大, 且不用移相装置, 成本较低, 多被采用。

(4) 双相控制

双相控制就是始终保持励磁电压和控制电压的相位差为 90° 电角度前提下, 在改变控制电压调速的同时, 同步的改变励磁电压, 使两者幅值也始终相等, 以获得最大的输出功率和效率。两相交流伺服电机与普通异步(感应)电机的特性不同, 如图 1.9 所示。它的机械特性较软, 但速度调节范围宽, 从零到 n_0 ; 而普通异步(感应)电机的机械特性较硬, 速度调节范围窄, 从 n_m 到 n_0 , 其中 n_m 是最大转矩时的转速, n_0 是空载转速。这是因为两相交流伺服电机的转子电阻做得较大, 改变了机械特性, 并使两相交流伺服电机在单项激磁下, 能产生制动转矩, 消除了其他电机在停电由于转子惯性而不能立即停转的“自转”现象, 提高系统的准确性。当然, 转子电阻增大, 则电机效率降低。所以, 两相交流伺服电机的功率等级不宜做大, 以免不经济。

2. 交流伺服电机的驱动技术

交流调速的基本方法有很多种, 但它们都是来源于交流电机的转速公式。异步电机定子的三相绕组中通入对称的三相交流电, 在电机气隙内会产生一个旋转磁场, 其速度为同步转速:

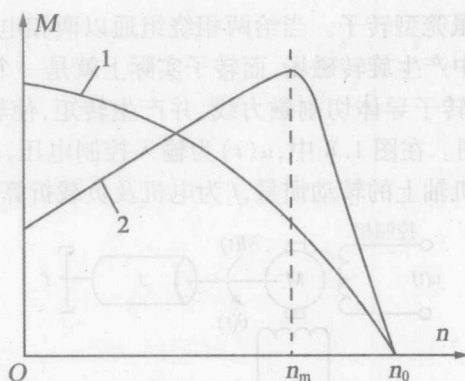
$$n_0 = \frac{60f_1}{p} \quad (1.9)$$

其中, f_1 为定子供电频率, p 为电机磁极对数。

异步电机转差率为

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (1.10)$$

则异步电机的转速公式为



1 - 两相交流伺服电动机的机械特性 2 - 普通异步电动机的机械特性

图 1.9 交流异步伺服电机的机械特性

$$n = n_0(1 - s) = \frac{60f_1}{p}(1 - s) \quad (1.11)$$

由式(1.11)可知,改变式中三个量定子供电频率 f_1 、电机磁极对数 p 和转差率 s 中的任何一个都可以达到改变转速的目的。故异步电机的调速方法可由此而分为变频调速、变极调速和变转差率调速三种,而变转差率的方法又可以通过调节定子电压、转子串电阻、电磁转差离合器调速以及串级调速来实现。异步电机的基本调速方法总结如表 1.2 所示。

表 1.2 异步电机的基本调速方法

基本调速方法		适用场合
变转差率调速	定子调压调速	仅适合绕线式异步电机
	转子串电阻调速	
	电磁转差离合器调速	仅适合绕线式异步电机
	串级调速	
变极调速		仅适合鼠笼型转子
变频调速	交-交变频调速	
	交-直-交变频调速	

由于变转差率调速需要改变 s ,必然会有附加的转差功率损耗,效率很低,称为低效型交流调速。在变极调速中由于极对数 p 是正整数,所以用这种方法只能得到极差较大的有级调速。而在变频调速中由于 f 可以连续改变,所以用这一方法可以得到平滑的无级调速,改变 n_0 调速,并没有人为地加大 s ,不产生附加的转差功率损耗,所以效率很高,称为高效型交流调速。

以上三种调速方案中,变极对数调速是有级的,转速不能连续调节;变转差率调速时,不调同步速,低速时转差损耗较大,效率较低;只有串级调速情况下转差损耗才得以利用,效率很高。变频调速方案与变转差率调速方案有着本质的不同:由于调节同步转速,故可以由高速到低速保持有限的转差率,效率高,调速范围大,精度高,是交流电机一种比较理想的调速方案。变频调速系统全称是变压变频调速系统,它是近年来随着半导体变流技术、计算机技术、控制技术等技术的发展而形成的一种调速方法。由于变频调速在改变频率 f 时转差率 s 不变,也就是不同转速时的 s 不变,因而转差损耗小,机械特性硬,调速范围宽,调速精度高,适用于调速性能要求较高的场合。但另一方面,变频调速装置的成本较高。

变频器驱动异步电机的各种控制策略虽然能够提供很好的稳态性能,但由于异步电机是强耦合的多变量系统,数学模型是非线性的,异步电机为高阶系统,导致在动态中很难准确控制异步电机的转矩。图 1.10 所示是交流变频驱动器产品示例。

变频器性能的优劣,一要看其输出交流电压的谐波对电机的影响:谐波造成电机发热,能耗增加,

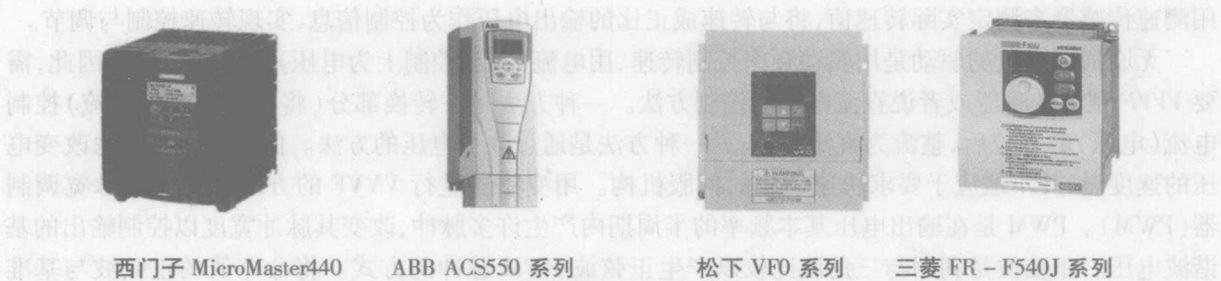


图 1.10 交流变频驱动器产品示例

引起电磁和机械噪声；二要看对电网的谐波污染和输入功率因数。这两方面,对于在量大面广的家用电器中的应用尤为重要,它直接关系到能量的节省、噪音对环境的影响和对电网的污染。由高开关频率自关断器件组成的 PWM 交 - 直 - 交变频器再加上合理的控制可以达到较高的性能。

1.2.3 无刷直流伺服电机

无刷直流电机是在有刷直流电机基础上发展起来的,而且它的电枢线圈是经由电子“换向器”接到直流电源上的,因此可把它归为直流电机的一种。但是无刷直流电机转速变化以及电枢绕组中的电流变化是和变频器的频率一致的,它又可属于交流同步电机的一种。

无刷直流电机电枢绕组中流过的电流以方波形式变化。永磁无刷电机,它的结构形式和无刷直流电机一样,但在绕组中流过的电流是按正弦规律变化的,其性能也和直流电机一样。

因为无刷直流电机和永磁无刷电机都用永久磁铁的转子形成励磁磁场,电枢绕组安放在定子上,且大多用于伺服系统中,因此从应用的角度,将它们分别称为方波电流永磁交流伺服电机和正弦波电流永磁交流伺服电机。但是它们和传统的交流伺服电机已有很大差别。

无刷直流电机通常是由电机本体、转子位置传感器和电子开关电路三部分组成,如图 1.11 所示。无刷直流的电枢在定子上,永磁磁极在转子上,与同步电机相似。无刷直流电机中位置传感器的作用,是检测转子磁场相对于定子绕组的位置,并在确定的相对位置上发出信号,控制功率放大元件,使定子绕组中的电流进行切换。从原理上说,与转子安装在同一个轴上的任何一种角位移传感器,都可以做无刷电机的位置传感器用,如光电位置传感器、电磁式位置传感器和磁敏式传感器。无刷直流电机在通电后,电枢绕组在位置传感器的信号控制下,根据转子的位置不断使定子绕组换流,使定子绕组产生一个步进式的旋转磁场,在该旋转磁场的作用下,永磁转子就连续不断地旋转起来。

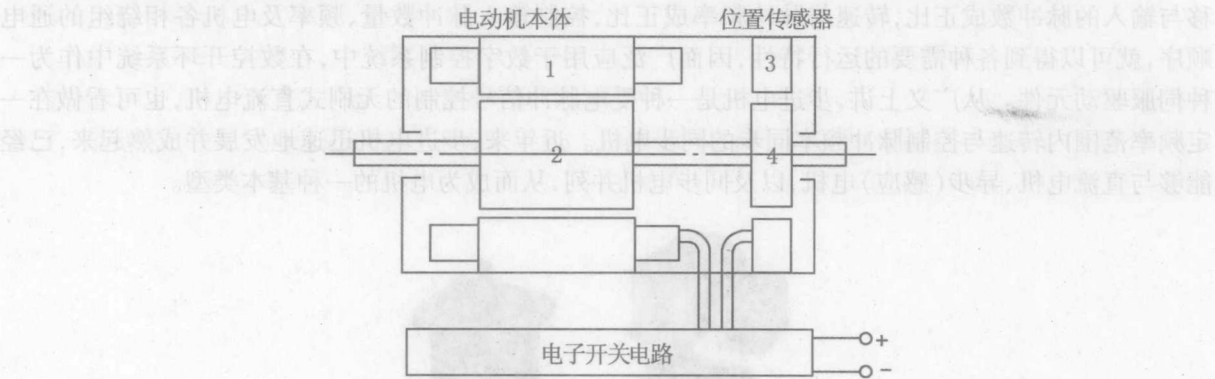


图 1.11 无刷直流电机的基本结构

无刷直流电机具有两个特点：

- (1) 具有直流电机线性调节的优良特性；
- (2) 由直流电源供电,没有电刷和换向器,它的绕组里电流的通、断和方向的变化,是通过电子换向电路实现的。

与传统的直流电机一样,无刷直流电机一般也用电枢电压作为转速调节的手段。传统的方法是