



普通高等教育“十二五”规划教材  
电气工程、自动化专业规划教材

# 控制电机及其应用 (修订版)

王 耕 王晓雷 主 编

刘宪林 主 审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

电气工程、自动化专业规划教材

# 控制电机及其应用

(修订版)

王 耕 王晓雷 主编

刘宪林 主审

電子工業出版社·

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

随着电子技术的发展,控制电机在实际工程中的应用愈加广泛,本书在汲取传统的控制电机教材对原理讲述清楚的基础上增加了控制等内容。将新的控制技术与控制芯片相结合,以适应宽口径复合型人才培养的需要。全书共分七章,第1章主要介绍直流伺服电动机、直流力矩电动机和无刷直流电动机的原理、结构、运行特性及控制;第2章主要介绍永磁同步伺服电动机的原理、结构及运行特性,重点讲述永磁同步伺服电动机的控制技术;第3章重点介绍步进电动机的原理、结构及运行特性和单片机控制技术;第4、5两章主要介绍旋转变压器和自整角机的原理、结构及应用;第6章的内容为开关磁阻电动机,重点介绍开关磁阻电动机系统的组成、原理、结构、运行特性及DSP控制技术和C语言例程;第7章的内容为直线电机,主要介绍直线电机的原理、结构及应用。同时,在各章的后面附有一定数量的思考与练习题,供复习与练习使用。

该教材可作为电气工程及其自动化、自动化、仪表及检测技术、机电一体化等本科专业的教材和参考书,也可供从事相关行业的技术人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

控制电机及其应用 / 王耕, 王晓雷主编. —修订本. —北京: 电子工业出版社, 2012. 8  
电气工程、自动化专业规划教材  
ISBN 978-7-121-17757-6

I. ①控… II. ①王… ②王… III. ①微型控制电机—高等学校—教材 IV. ①TM383

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 172963 号

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 涿州市京南印刷厂  
装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15 字数: 384 千字

印 次: 2012 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 33.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010)88258888。

# 前 言

科学技术的迅猛发展,特别是自动化技术、计算机技术和航空航天技术的发展,对电机的性能提出了许多新的更高的要求。一方面传统的控制电机和新的控制技术与控制芯片的结合,使传统电机如伺服电机、步进电机等的应用更为广泛。另一方面随着新材料的涌现,特别是高性能稀土永磁材料的问世和电力电子器件的发展,又出现了性能优越的新型电机如开关磁阻电动机、无刷直流电动机和永磁伺服电动机等。传统控制电机和新的控制技术结合、以及性能优越的新型电机出现,为满足控制系统的要求提供了可能。为使读者能够及时掌握和了解这一新的发展动态,是我们编写本书的初衷。

在第一版出版应用的基础上,作者结合新技术的发展及读者的反馈意见,对部分内容进行了修订,重新编写了本书。主要为原书第1、2、6章中部分内容采用新型控制芯片进行介绍,第2章删去了两相伺服电动机部分内容,变更为永磁同步伺服电动机,突出其控制及应用,第6章开关磁阻电动机的DSP控制,增加了C语言例程。

控制电机及控制的特点为在精讲原理的同时,增加专用控制芯片、单片机和DSP控制的应用。将新的控制技术与控制芯片相结合,使读者对控制电机的原理、结构、运行特性以及控制方法和控制技术有一个全面的了解。以适应宽口径复合型人才培养的需要。

全书共分7章,第1章的内容为直流伺服电机,本章主要介绍直流伺服电动机、直流力矩电动机和无刷直流电动机的原理、结构及运行特性,在控制部分重点讲述了直流伺服电动机和无刷直流电动机的控制技术;第2章的内容为永磁同步伺服电动机,本章主要介绍永磁同步伺服电动机的原理、结构及运行特性,在控制部分重点讲述了永磁同步伺服电动机的控制技术;第3章的内容为步进电动机,本章重点介绍步进电动机的原理、结构及运行特性和单片机控制技术;第4、第5两章的内容为旋转变压器和自整角机,这两章主要介绍旋转变压器和自整角机的原理、结构及应用;第6章的内容为开关磁阻电动机,本章重点介绍开关磁阻电动机系统的组成、原理、结构及运行特性和DSP控制技术;第7章的内容为直线电机,本章主要介绍直线电机的原理、结构及应用。同时,在各章的后面附有一定数量的思考与练习,供复习与练习使用。本书控制部分基本上都涉及到了位置、速度、电压电流的检测,在软件方面都用到了PID控制方法,为避免重复讲述,将这两部分内容列为附录,供参考使用。

本书在编写中,既分析了控制电机和特种电机的基本原理和基本概念,又介绍了相关的控制系统与专用芯片。删除了传统控制电机中测速发电机的内容,压缩了应用较少的旋转变压器、自整角机的内容。增加了应用较广无刷直流电动机、开关磁阻电动机、永磁同步伺服电动

机和直线电机等部分。本书的内容相对较多。在教学的过程中教师可根据不同本专业的特点及学时的多少适当宣讲,例如无刷直流电动机、永磁伺服电动机与开关磁阻的控制技术有相似之处,可重点讲一部分,其他部分留给学生自学,另外可将部分内容与课程设计、毕业设计等实践环节相结合,放在课程设计或毕业设计中进行。

本书第1章主要由裴素萍编写;第2章主要由王晓雷编写;第3章主要由刘丽萍编写;第4、5章主要由许京雷编写;第6、7章主要由王耕编写;付邦胜和彭圣编写了第1、3、6章的控制部分及应用实例;蒋珍、刘鹏程参与编写了第4、5章的部分内容并完成了部分图例的输入工作,本书最后由王耕和王晓雷负责统稿。

本书的主审刘宪林教授,他在百忙之中认真地阅读了本书,提出了许多建设性的意见,在此衷心的感谢。同时感谢巫付专、李健等老师为本书编写提供的大力帮助。

由于编写者水平所限,经验不足,书中的缺点和错误在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者  
2012年6月

# 目 录

<b>第 1 章 直流伺服电动机</b> .....	1
1.1 直流伺服电动机 .....	1
1.1.1 结构和分类 .....	1
1.1.2 运行原理 .....	3
1.1.3 直流伺服电动机的应用 .....	7
1.2 无刷直流电动机 .....	23
1.2.1 无刷直流电动机的结构与组成 .....	23
1.2.2 无刷直流电动机的控制方法 .....	26
1.2.3 无刷直流电动机的运行特性 .....	32
1.2.4 无刷直流电动机的应用 .....	40
1.3 直流力矩电动机 .....	54
1.3.1 直流力矩电动机的结构与特点 .....	54
1.3.2 运行原理与特性 .....	55
1.3.3 直流力矩电动机性能特点 .....	57
思考与练习一 .....	58
<b>第 2 章 永磁伺服电动机</b> .....	60
2.1 永磁同步伺服电动机 .....	60
2.1.1 结构与分类 .....	60
2.1.2 运行原理及分析 .....	63
2.2 永磁同步伺服电动机的控制 .....	66
2.2.1 三相永磁同步伺服电动机在静止 ABC 坐标系中的参数 .....	66
2.2.2 逆变器机电能量变换装置的坐标变换 .....	67
2.2.3 逆变器机电能量变换装置电压方程的坐标变换 .....	68
2.2.4 无转子阻尼绕组的三相永磁同步伺服电动机的电磁转矩 .....	70
2.2.5 基于统一模型电动机方法的三相永磁同步伺服电动机动态方程 .....	70
2.3 三相永磁同步伺服电动机的基本控制方法 .....	72
2.3.1 位置环的控制策略 .....	72
2.3.2 速度环的控制策略 .....	73
2.3.3 电流环的控制模型 .....	73
2.3.4 电流环的 PID 控制 .....	74
2.3.5 三相永磁同步伺服电动机的三闭环控制系统 .....	75
2.4 三相永磁同步伺服逆变器的空间正弦 SVPWM 技术 .....	76
2.4.1 直角坐标系二电平广义逆变器空间电压矢量 SVPWM 波 .....	76
2.4.2 直角坐标系的 SVPWM 的基本概念 .....	77
2.4.3 电压幅值的归一化 .....	79
2.4.4 电压矢量的分区 .....	80
2.4.5 基于 LF2812DSP 的 SVPWM 波的产生 .....	81

2.5 三相永磁同步伺服电动机的 DSP 控制电路 .....	82
2.5.1 控制器的硬件组成 .....	82
2.5.2 电磁兼容设计 .....	85
思考与练习二 .....	86
<b>第 3 章 步进电动机</b> .....	<b>87</b>
3.1 步进电动机的工作原理 .....	87
3.1.1 反应式步进电动机的工作原理 .....	87
3.1.2 运行方式 .....	88
3.1.3 小步距角步进电动机 .....	90
3.1.4 反应式步进电动机的结构 .....	91
3.1.5 其他形式的步进电动机 .....	91
3.2 反应式步进电动机的运行特性 .....	93
3.2.1 反应式步进电动机的静态特性 .....	93
3.2.2 反应式步进电动机的动态特性 .....	96
3.2.3 连续脉冲运行 .....	99
3.3 步进电动机主要性能指标 .....	102
3.4 驱动电源 .....	104
3.4.1 驱动电源组成及作用 .....	104
3.4.2 驱动电源的分类 .....	104
3.5 步进电动机的微处理器控制 .....	108
3.5.1 并行控制 .....	109
3.5.2 串行控制 .....	112
3.5.3 步进电动机转速控制 .....	113
3.5.4 加减速定位控制 .....	114
3.5.5 步进电动机的其他控制 .....	117
思考与练习三 .....	121
<b>第 4 章 旋转变压器</b> .....	<b>122</b>
4.1 旋转变压器的结构和工作原理 .....	122
4.1.1 旋转变压器的结构 .....	123
4.1.2 旋转变压器的工作原理 .....	124
4.1.3 旋转变压器的负载运行 .....	125
4.1.4 一次侧补偿的旋转变压器 .....	126
4.1.5 二次侧补偿的旋转变压器 .....	127
4.1.6 旋转变压器的技术指标 .....	127
4.2 线性旋转变压器 .....	128
4.2.1 一次侧补偿的线性旋转变压器 .....	128
4.2.2 二次侧补偿的线性旋转变压器 .....	130
4.2.3 比例式旋转变压器 .....	131
4.3 数字式旋转变压器 .....	131
4.3.1 数字式旋转变压器简介 .....	131
4.3.2 AD2S83 芯片简介 .....	132
4.3.3 AD2S83 芯片外围电路 .....	133
4.3.4 AD2S83 工作过程 .....	135
4.4 旋转变压器的应用 .....	135

4.4.1	4.4.2	4.4.3	4.4.4	思考与练习四	136
					136
					137
					138
					138
<b>第5章</b>	<b>自整角机</b>				139
5.1	力矩式自整角机的结构和工作原理				139
5.1.1	力矩式自整角机的结构				140
5.1.2	力矩式自整角机的工作原理				140
5.1.3	力矩式自整角机的磁势特点				144
5.1.4	力矩式自整角机的转矩分析				145
5.1.5	力矩式自整角机的主要技术指标				146
5.2	控制式自整角机的结构和工作原理				147
5.2.1	控制式自整角机的结构				147
5.2.2	控制式自整角机的工作原理				148
5.2.3	差动式自整角机				150
5.2.4	控制式自整角机的主要技术指标				151
5.3	数字式自整角机				151
5.3.1	SDC1740 芯片简介				152
5.3.2	SDC1740 芯片工作原理				153
5.4	自整角机的应用				153
5.4.1	液面位置指示器				153
5.4.2	舰船雷达方位指示				154
	思考与练习五				154
<b>第6章</b>	<b>开关磁阻电动机及其控制</b>				155
6.1	开关磁阻电动机传动系统				155
6.1.1	开关磁阻电动机传动系统的组成				155
6.1.2	开关磁阻电动机的工作原理				159
6.1.3	开关磁阻电动机传动系统的特点				161
6.2	开关磁阻电动机的基本电磁关系				162
6.2.1	理想开关磁阻电动机的基本电磁关系				162
6.2.2	实际开关磁阻电动机的物理状态				167
6.2.3	开关磁阻电动机的数学模型				169
6.3	开关磁阻电动机的运行状态及控制方式				171
6.3.1	开关磁阻电动机的运行特性				171
6.3.2	开关磁阻电动机的启动运行				171
6.3.3	开关磁阻电动机的稳态运行				172
6.3.4	开关磁阻电动机的制动运行				174
6.3.5	开关磁阻电动机运行时的转矩脉动与噪声				174
6.4	开关磁阻电动机传动系统的控制				175
6.4.1	SRD 控制系统结构及算法				176
6.4.2	功率变换器				177
6.4.3	信号检测				181
6.5	开关磁阻电动机的 DSP 控制				186



思考与练习六 .....	196
<b>第 7 章 直线电动机</b> .....	197
7.1 直线感应电动机的结构与原理 .....	198
7.1.1 直线电动机的原理 .....	198
7.1.2 直线电动机的结构与分类 .....	199
7.2 直线感应电动机的分析 .....	200
7.2.1 直线感应电动机纵向边缘效应 .....	200
7.2.2 直线感应电动机的横向边缘效应 .....	201
7.3 其他直线电动机 .....	202
7.3.1 直线直流电动机 .....	202
7.3.2 直线自整角机 .....	204
7.3.3 直线和平面步进电动机 .....	204
7.4 直线感应电动机的应用 .....	208
7.4.1 直线感应电动机的应用原则 .....	208
7.4.2 直线感应电动机的应用情况 .....	209
思考与练习七 .....	211
<b>附录 A 信号检测与转换</b> .....	212
A.1 电流和电压的检测 .....	212
A.1.1 电流的检测 .....	212
A.1.2 电压的检测 .....	213
A.2 位置检测 .....	213
A.2.1 绝对式旋转编码器 .....	214
A.2.2 增量式旋转编码器 .....	216
A.2.3 光电编码盘与单片机的接口 .....	217
A.2.4 增量式旋转编码器与 TMS320F2812 的接口 .....	218
A.3 速度检测 .....	219
A.3.1 用测速发电机测速 .....	219
A.3.2 用光电旋转编码器测速 .....	219
<b>附录 B 数字 PID 控制算法与数字滤波技术</b> .....	222
B.1 数字 PID 控制算法 .....	222
B.1.1 模拟 PID 控制原理 .....	222
B.1.2 数字 PID 控制算法 .....	223
B.1.3 数字 PID 的改进算法 .....	225
B.1.4 数字 PID 控制器的参数选择和采样周期的选择 .....	227
B.2 数字滤波技术 .....	229
B.2.1 算数平均值法 .....	229
B.2.2 移动平均滤波法 .....	230
B.2.3 防脉冲干扰平均值法 .....	230
B.2.4 数字低通滤波法 .....	231
<b>参考文献</b> .....	232

# 第 1 章 直流伺服电动机

**本章介绍直流伺服电动机、无刷直流电动机和直流力矩电动机。**

## **主要内容**

- 直流伺服电动机的原理、结构及运行特性
- 直流伺服电动机常用控制芯片及微处理器控制的原理与方法
- 直流无刷电动机的原理、结构及运行特性
- 直流无刷电动机常用控制芯片及微处理器控制的原理与方法
- 直流力矩电动机简介

## **知识重点**

本章重点为直流伺服电动机和直流无刷电动机的结构与原理;机械特性、调节特性和动态特性;应掌握这两种电动机的常用控制芯片及微处理器控制的原理与方法。

伺服电动机是一种执行电动机,在自动控制系统中作为执行元件。伺服电动机将输入的电压信号转换成转轴的角度位移或角速度而输出。输入的电压信号又称为控制信号或控制电压。改变控制电压可以改变伺服电动机的转速及转向。伺服电动机按其使用的电源性质不同,可分为直流伺服电动机和交流伺服电动机两大类。

随着自动控制技术的发展,伺服电动机的应用范围日益广泛,对其性能的要求也在不断提高;另外新技术、新材料的出现也为伺服电动机的发展提供了可能,促使它有了很大发展,涌现出许多新型的结构。如快速响应低惯量的盘形电枢直流电动机、空心杯形电枢直流电动机和无槽电枢直流伺服电动机;取消了传统直流电动机上的电刷和换向器采用电子器件换向的无刷直流伺服电动机;为了适应高精度低速伺服系统的需要取消了减速机构而直接驱动负载的直流力矩电动机等。

本章主要就直流伺服电动机、无刷直流伺服电动机及直流力矩电动机的结构、原理、运行特性及其应用进行分析,有关交流伺服电动机的内容将在第 2 章中讲述。

## **1.1 直流伺服电动机**

### **1.1.1 结构和分类**

直流伺服电动机是指使用直流电源驱动的伺服电动机,它实质上就是一台他励式直流电动机。直流伺服电动机的结构可分为传统型和低惯量型两大类。

#### **1. 传统型直流伺服电动机**

传统型直流伺服电动机的结构形式和普通直流电动机基本相同,也是由定子、转子两大部分所组成,只是它的容量与体积较小。按励磁方式的不同,传统型直流伺服电动机可以再分为永磁式和电磁式两种。永磁式直流伺服电动机的定子磁极由永久磁钢组成。电磁式直流伺服电动机的定子磁极通常由硅钢片铁芯和励磁绕组组成。这两种电动机的转子结构与普通直流

电动机的结构相同,其铁芯均由硅钢片冲制叠压而成,在转子冲片的外圆周上开有均匀布置的齿槽,在转子槽中放置电枢绕组,并通过换向器和电刷与外电路连接。

## 2. 低惯量型直流伺服电动机

与传统型的直流伺服电动机相比,低惯量型直流伺服电动机具有时间常数小响应快速的特点。目前低惯量型直流伺服电动机主要有:盘形直流伺服电动机、空心杯形直流伺服电动机和无槽电枢直流伺服电动机。

### (1) 盘形直流伺服电动机

盘形直流伺服电动机主要是盘式永磁直流电动机。图 1-1 为盘形永磁直流伺服电动机的结构示意图。电动机结构呈扁平状,其定子是由永久磁钢和前后磁轭所组成,磁钢若放置于圆盘的一侧称为单边结构,若同时放置在两侧则称为双边结构。电动机的气隙位于圆盘的两面。不论哪种结构,永磁体都为轴向磁化,在气隙中产生多极轴向磁场。电枢通常无铁芯,仅由导体以适当的方式制成圆盘状,其形式可分为印制绕组和绕线式绕组两种形式。印制绕组采用与制造印制电路板相类似的工艺制成,它可以是单片双面的,也可以采用多片重叠的结构,但一般最多不超过 8 层。印刷绕组电枢制造精度高,成本也高,但转动惯量小。绕线式绕组则是先绕制成单个线圈,然后将绕好的全部线圈沿径向圆周排列起来,再用环氧树脂浇注成圆盘形。盘形电枢上电枢绕组中的电流沿径向流过圆盘表面,并与永磁体产生的多极轴向磁场相互作用而产生转矩。因此,绕组的径向段为有效部分,弯曲段为端接部分。在这种电动机中也常用电枢绕组有效部分的裸导体表面兼作换向器与电刷直接接触实现与外电路的相连,从而可以省去换向器。

### (2) 空心杯形转子直流伺服电动机

图 1-2 为空心杯转子直流伺服电动机的结构简图。空心杯转子上的绕组同盘式永磁直流伺服电动机的一样,其形式也可分为印制绕组和绕线式绕组两种形式,不同之处是空心杯转子上的绕组沿圆周的轴向排列成空心杯形。其定子由一个外定子和一个内定子组成。通常外定子是由两个半圆形的永久磁钢所组成,而内定子则用圆柱形的软磁材料做成,仅作为磁路的一部分,以减小磁路磁阻。但也有内定子采用永久磁钢、外定子采用软磁材料的结构形式。空心杯电枢直接装在电动机轴上,在内、外定子间的气隙中旋转。电枢绕组通过换向器和电刷与外电路相连。

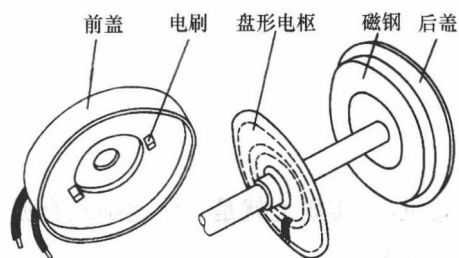


图 1-1 盘形永磁直流伺服电动机结构示意图

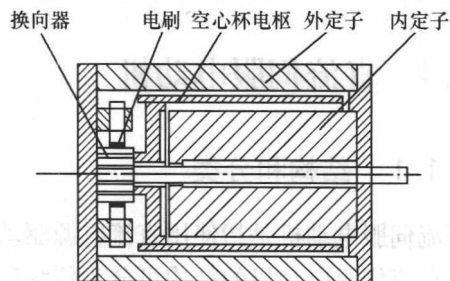


图 1-2 空心杯电枢永磁式直流伺服电动机结构简图

### (3) 无槽电枢直流伺服电动机

无槽电枢直流伺服电动机的结构与传统的直流伺服电动机类似,不同之处是在其电枢铁芯上并不开槽,其电枢绕组直接排列在铁芯表面,再用环氧树脂把它与电枢铁芯固化成一个整

体,如图 1-3 所示。定子磁极可以用永久磁钢做成,也可以采用电磁式结构。这种电动机的转动惯量和电枢绕组的电感比前面介绍的两种无铁芯转子的电动机要大些,因而其动态性能也较差。

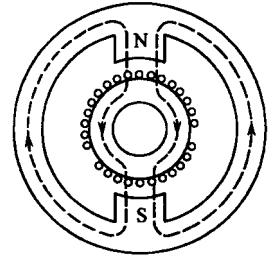


图 1-3 无槽电枢直流伺服电动机结构简图

## 1.1.2 运行原理

### 1. 控制方式

如前所述,直流伺服电动机实质上就是一台他励式直流电动机,故其控制方式同他励式直流电动机一样,可分为两类:对磁通进行控制的励磁控制法和对电枢电压控制的电枢控制法。其中励磁控制法在低速时受磁饱和的限制,在高速时受换向火花和换向结构强度的限制,并且励磁线圈电感较大,动态响应较差,所以这种方法应用较少。电枢控制法是以电枢绕组为控制绕组,是在负载转矩一定时,保持励磁电压  $U_f$  为恒定,通过改变电枢电压  $U_a$  来改变电动机的转速;即  $U_a$  增加转速增大, $U_a$  减小转速降低,若电枢电压为零,则电动机停转。当电枢电压的极性改变后,电动机的旋转方向也随之改变。因此,把电枢电压作为控制信号就可以实现对电动机的转速控制。对于电磁式直流伺服电动机采用电枢控制时,其励磁绕组须由外施恒压的直流电源励磁,而永磁式直流伺服电动机则由永磁磁极励磁。

### 2. 静态特性

直流伺服电动机的静态特性主要指机械特性与调节特性。电枢控制时直流伺服电动机的工作原理如图 1-4 所示。为了分析简便,先做如下假设:①电动机磁路不饱和;②电刷位于几何中性线。根据此两项假设,可认为负载时电枢反应磁势的影响可以略去,电动机的每个电枢气隙磁通将保持恒定。

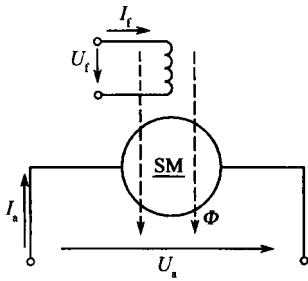


图 1-4 电枢控制时直流伺服电动机的工作原理图

这样,直流电动机电枢回路的电压平衡方程式为:

$$U_a = E_a + I_a R_a \quad (1-1)$$

式中, $U_a$  为电动机电枢绕组两端的电压; $E_a$  为电动机电枢回路电动势; $I_a$  为电动机电枢回路的电流; $R_a$  为电动机电枢回路的总电阻(包括电刷的接触电阻)。

当磁通  $\Phi$  恒定时,电枢绕组的感应电势将正比于转速,则

$$E_a = C_e \Phi n = K_e n \quad (1-2)$$

式中, $K_e$  为电动势常数,表示单位转速时所产生的电动势; $n$  为电动机转速。

另外,电动机的电磁转矩为:

$$T_{em} = C_t \Phi I_a = K_t I_a \quad (1-3)$$

式中, $K_t$  为转矩常数,表示单位电枢电流所产生的转矩。

若忽略电动机的空载损耗和转轴机械损耗等,则电磁转矩等于负载转矩。

将式(1-1)、式(1-2)和式(1-3)联立求解得:

$$n = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_t K_e} T_{em} \quad (1-4)$$

根据式(1-4)可画出直流伺服电动机的机械特性和调节特性。

#### (1) 机械特性

机械特性是指控制电压恒定时,电动机的转速与转矩的关系,即  $U_a = C$  为常数时, $n$

$$= f(T_{em}) |_{U_a=c}$$

根据式(1-4)得:

$$n = \frac{U_a}{K_e} - \frac{R_a}{K_t K_e} T_{em} = n_0 - k T_{em} \quad (1-5)$$

由式(1-5)可得出直流伺服电动机的机械特性如图 1-5 所示。从图中可以看出,机械特性是以  $U_a$  为参变量的一簇平行直线。这些特性曲线与纵轴的交点为电磁转矩等于零时电动机的理想空载转速  $n_0$ , 即

$$n_0 = \frac{U_a}{k_e} \quad (1-6)$$

由于直流伺服电动机本身存在空载损耗和转轴的机械损耗等,即使负载转矩为零,电磁转矩也并不为零。只有在理想的情况下  $T_{em}$  才可能为零,为此,转速  $n_0$  是指在理想空载(即  $T_{em} = 0$ ) 时的电动机转速,故称理想空载转速。

当  $n = 0$  时机械特性曲线与横轴的交点对应的转矩称为电动机堵转时的转矩  $T_k$ 。

$$T_k = \frac{U_a K_t}{R_a} \quad (1-7)$$

在图 1-7 中机械特性曲线的斜率为:

$$k = \frac{n_0}{T_k} = \frac{R_a}{K_t K_e} \quad (1-8)$$

式中,  $k$  为机械特性的斜率,它表示了电动机机械特性的硬度,即电动机的转速随转矩  $T_{em}$  的改变而变化的程度。

由式(1-5)或图 1-5 中都可以看出,随着电枢控制电压  $U_a$  的增大,空载转速  $n_0$  与堵转转矩  $T_k$  同时增大,但曲线的斜率保持不变,电动机的机械特性曲线平行地向转速和转矩增加的方向移动。斜率  $k$  的大小只与电枢电阻  $R_a$  成正比而与  $U_a$  无关。电枢电阻越大,斜率  $k$  越大,机械特性就变软;反之,电枢电阻  $R_a$  小,斜率  $k$  也小,机械特性就越硬。

在实际应用中,电动机的电枢电压  $U_a$  通常由系统中的放大器提供,所以还要考虑放大器的内阻,此时式(1-8)中的  $R_a$  应为电动机电枢电阻与放大器内阻之和。

## (2) 调节特性

调节特性是指在电磁转矩恒定时,电动机的转速与控制电压的关系,即  $n = f(U_a) |_{T_{em}=c}$ 。调节特性曲线如图 1-6 所示,它们是以  $T_{em}$  为参变量的一簇平行直线。

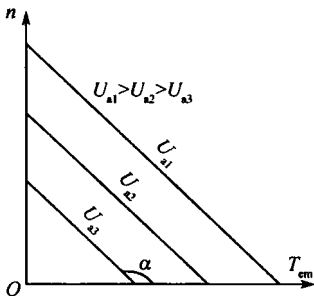


图 1-5 电枢控制直流伺服电动机的机械特性

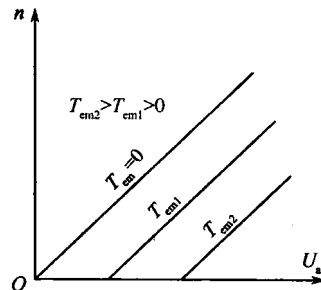


图 1-6 电枢控制直流伺服电动机的调节特性

当  $n = 0$  时调节特性曲线与横轴的交点,就表示在某一电磁转矩(若略去电动机的空载损耗和机械损耗等,则为负载转矩值)时电动机的始动电压  $U_{a0}$ 。

$$U_{a0} = \frac{R_a}{K_t} T_{em} \quad (1-9)$$

当电磁转矩一定时,只有电动机的控制电压大于相应的始动电压,电动机才能启动起来并达到某一需要的转速;反之,当控制电压小于相应的始动电压时,电动机所能产生的最大电磁

转矩仍小于所要求的负载转矩值,电动机就不能启动。所以,在调节特性曲线上从原点到始动电压点的这一段横坐标所示的范围,称为在某一电磁转矩值时伺服电动机的失灵区(有的资料也称其为“死区”)。显然,失灵区的大小与负载转矩的大小成正比,负载转矩越大,要想使直流伺服电动机运动起来,电枢绕组需要加的控制电压也要相应地增大。

由以上分析可知,电枢控制时直流伺服电动机的机械特性和调节特性都是一簇平行的直线,这是直流伺服电动机很可贵的优点,也是两相交流伺服电动机所不及的。需要注意的是,上述结论,是在开始时所作的两条假设的前提下才得到的,若考虑实际因素的影响,直流伺服电动机的特性曲线仅是一组接近直线的曲线。

### 3. 动态特性

伺服电动机在自动控制系统通常作为执行元件使用,对控制系统性能的影响很大,因此它应具备如下功能:

① 宽广的调速范围。要求伺服电动机的转速随着控制电压的改变能在宽广的范围内连续调节。

② 机械特性和调节特性均为线性。线性的机械特性和调节特性有利于提高自动控制系统的控制精度。

③ 无“自转”现象。即伺服电动机在控制电压为零时能立即自行停转。

④ 响应快速。即过渡过程持续的时间要短,电动机的机电时间常数要小。

通过 1.1.1 节的分析我们知道直流伺服电动机能很好地满足前三项的要求,现在分析直流伺服电动机的动态特性。

直流伺服电动机的动态特性是指电动机的电枢上外施电压突变时,电动机从一种稳定转速过渡到另一稳定转速的过程,即  $n = f(t)$  或  $\Omega = f(t)$ 。

自动控制系统要求直流伺服电动机的机电过渡过程应尽可能短,即电动机转速的变化能迅速跟上控制信号的改变。假设电动机在电枢外施控制电压前处于停转状态。当电枢外施阶跃电压后,由于电枢绕组电感储存的磁场能不能跃变,致使电枢电流  $I_a$  不能跃变,因此存在一个电磁过渡过程,相应电磁转矩的增长也有一个过程。在电磁转矩的作用下,由于转子有一定的转动惯量,机械转动的动能不能跃变,致使转速不能跃变,电动机从一种稳定转速过渡到另一种稳定转速也需要一定的时间,该过程称为机械过渡过程。电磁和机械的过渡过程交叠在一起,形成了伺服电动机的机电过渡过程。在整个机电过渡过程中,电磁的和机械的过渡过程相互影响。一方面由于电动机的转速从一种稳定转速过渡到另一种稳定转速由电磁转矩(或电枢电流)所决定;另一方面电磁转矩或电枢电流又随转速而变化。一般情况下,电磁过渡过程要比机械过渡过程短得多,因此常予以忽略电磁过渡过程。

通常研究直流伺服电动机动态特性的方法是,列出直流伺服电动机的动态方程,经拉普拉斯变换,求出伺服电动机的传递函数。再经拉普拉斯反变换得到在电枢电压发生跃变时,转速或角速度随时间变化的时域关系。

#### (1) 直流伺服电动机的动态方程

直流伺服电动机的动态方程可根据直流伺服电动机的等效电路列出,假设电枢绕组的电感为  $L_a$ ,电阻为  $R_a$ ,直流伺服电动机的等效电路如图 1-7 所示。

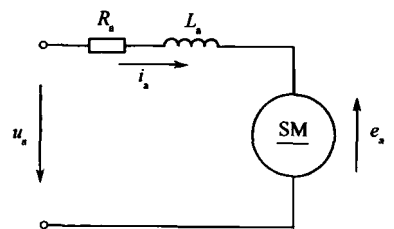


图 1-7 直流伺服电动机的等效电路

在过渡过程中,对应于电枢回路的电压平衡方程式为:

$$u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a$$

假设转子的机械角速度为  $\Omega$ , 负载和电动机的总转动惯量为  $J$ 。当负载转矩为零, 并略去电动机的铁芯损耗和机械损耗等后, 则电动机的电磁转矩全部用来使转子加速, 即

$$T_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (1-10)$$

将式(1-2)、式(1-3)和式(1-10)代入式(1-9)及  $n = \frac{60}{2\pi} \Omega$  可得:

$$u_a = \frac{L_a J}{k_t} \frac{d^2 \Omega}{dt^2} + \frac{R_a J}{k_t} \frac{d\Omega}{dt} + \frac{60}{2\pi} K_e \Omega \quad (1-11)$$

将式(1-11)两边同乘以  $\frac{2\pi}{60K_e}$  得:

$$\frac{2\pi}{60K_e} u_a = \tau_m \tau_e \frac{d^2 \Omega}{dt^2} + \tau_m \frac{d\Omega}{dt} + \Omega \quad (1-12)$$

式中,  $\tau_m = \frac{2\pi R_a J}{60K_t K_e}$  为机械时间常数;  $\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$  为电磁时间常数。

### (2) 直流伺服电动机的传递函数

分别以  $U_a$  和  $n$  为输入变量和输出变量, 将式(1-12)进行拉普拉斯变换可得传递函数为:

$$F(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{\frac{2\pi}{60K_e}}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1} \quad (1-13)$$

因电枢绕组的电感很小, 电磁时间常数和机械时间常数相比小得多, 近似认为  $\tau_e = 0$ , 则式(1-13)可简化为:

$$F(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{\frac{2\pi}{60K_e}}{\tau_m s + 1} \quad (1-14)$$

### (3) 直流伺服电动机的时间常数

如果不考虑直流伺服电动机的电磁过渡过程, 同时假设电压  $U_a$  为阶跃电压, 其象函数  $U_a(s)$  为:

$$U_a(s) = \frac{U_a}{s}$$

代入式(1-14)可得:

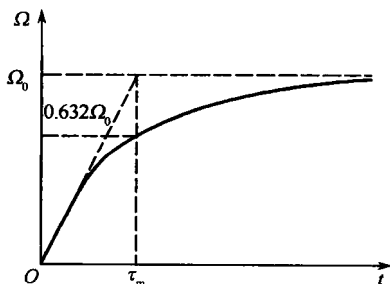


图 1-8 直流伺服电动机角速度的变化曲线

$$\Omega(s) = \frac{2\pi}{60K_e} U_a \left[ \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \frac{1}{\tau_m}} \right]$$

将上式进行拉普拉斯反变换即得电动机角速度随时间变化的规律为:

$$\Omega(s) = \frac{2\pi}{60K_e} U_a (1 - e^{-\frac{t}{\tau_m}}) = \Omega_0 (1 - e^{-\frac{t}{\tau_m}}) \quad (1-15)$$

式中,  $\Omega_0 = \frac{2\pi n_0}{60}$  为伺服电动机理想空载角速度, 单位

为 rad/s。

电动机的角速度随时间的变化关系如图 1-8 所示。从式(1-15)可以看出,当时间  $t = \tau_m$  时,则电动机的角速度上升到稳定角速度的 0.632 倍;当时间  $t = 4\tau_m$  时,则电动机的角速度为  $\Omega = 0.985\Omega_0$ ,一般可认为这时过渡过程已经结束。所以将  $t = 4\tau_m$  作为过渡过程的时间。

将机械时间常数  $\tau_m$  进行变换得:

$$\tau_m = \frac{2\pi R_a J}{60 K_e K_t} = J \frac{\frac{2\pi U_a}{60 K_e}}{\frac{U_a K_t}{R_a}} = J \frac{\Omega_0}{T_k} \quad (1-16)$$

式中,  $\Omega_0$  为电动机理想空载角速度,单位为 rad/s;  $T_k$  为堵转转矩,单位为  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ,机械时间常数  $\tau_m$  的单位为 s。

还可将式(1-16)变换为:

$$\tau_m = \frac{2\pi R_a J}{60 K_e K_t} = \frac{2\pi}{60} \frac{R_a J}{C_e C_t \Phi^2} \quad (1-17)$$

根据式(1-17)可以看出影响机械时间常数的因素有:

①  $\tau_m$  与电枢电阻  $R_a$  的大小成正比。为了减小电动机的机械时间常数,应尽可能减小电枢电阻,当伺服电动机用于自动控制系统并由放大器供给控制电压时,其机械时间常数还受到系统放大器的内阻  $R_i$  的影响,相应式(1-17)中的电阻  $R_a$  应改写为  $R_a + R_i$ 。

②  $\tau_m$  与电动机电枢的转动惯量  $J$  的大小成正比。为了减小电动机的机械时间常数,宜采用细长形的电枢或采用空心杯电枢、盘形电枢,以获得尽量小的  $J$  值。

③  $\tau_m$  与电动机的每极气隙磁通的平方成反比。为了减小电动机的机械时间常数,应增加每个电极气隙的磁通,即提高气隙的磁密。

最后需要说明的是,上述的分析是在忽略电磁过渡过程的基础上得出的,由于电动机的过渡过程是电磁和机械过渡过程交叠在一起的复杂过程。因此电动机空载时外施阶跃电压,若计及电磁过渡过程,情况将略微复杂,对电枢控制直流伺服电动机,一般总有  $\tau_e \ll \tau_m$ ,此时其角速度阶跃响应曲线与图 1-8 类似,只是转速从零升至稳定转速的 63.2% 所需的时间实际上要略大于机械时间常数,应由电动机的电磁时间常数和机械时间常数两者所确定,称之为机电时间常数  $\tau_{em}$ 。当  $\tau_e \ll \tau_m$  时,可取机电时间常数近似等于机械时间常数  $\tau_m$ 。

我国目前生产的 SY 系列永磁式直流伺服电动机的机电时间常数一般也不超过 30ms。SZ 系列直流伺服电动机的机电时间常数不超过 30ms。在低惯量直流伺服电动机中,机电时间常数通常在 10ms 以下。其中空心杯电枢永磁式直流伺服电动机的机电时间常数可小到 2 ~ 3ms。

### 1.1.3 直流伺服电动机的应用

#### 1. 直流伺服控制技术简介

近年来,直流伺服电动机的结构和控制方式都发生了很大变化。随着计算机技术的发展以及新型的电力电子功率器件的不断出现,采用全控型开关功率元件进行脉宽调制(PWM)的控制方式已经成为主流。

##### (1) PWM 调速原理

前面已经介绍,直流伺服电动机的转速控制方法可以分为两类:即对磁通  $\Phi$  进行控制的励磁控制,和对电枢电压  $U_a$  进行控制的电枢电压控制。



绝大多数直流伺服电动机采用开关驱动方式,现以电枢控制方式,直流伺服电动机为分析对象,介绍通过脉宽调制(PWM)来控制电枢电压实现调速的方法。

图 1-9 是利用开关管对直流电动机进行 PWM 调速控制的原理图和输入/输出电压波形。在图 1-9(a) 中,当开关管 MOSFET 的栅极输入信号  $U_p$  为高电平时,开关管导通,直流电动机的电枢绕组两端电压  $U_a = U_s$ , 经历  $t_1$  时间后,栅极输入信号  $U_p$  变为低电平,开关管截止,电动机电枢两端电压为零。经历  $t_2$  时间后,栅极输入重新变为高电平,开关管的动作重复上面的过程。这样,在一个周期时间  $T = t_1 + t_2$  内,直流电动机电枢绕组两端的电压平均值  $U_a$  为

$$U_a = \frac{t_1 U_s + 0}{t_1 + t_2} = \frac{t_1}{T} U_s = \alpha U_s$$

式中,占空比  $\alpha = t_1/T$ 。

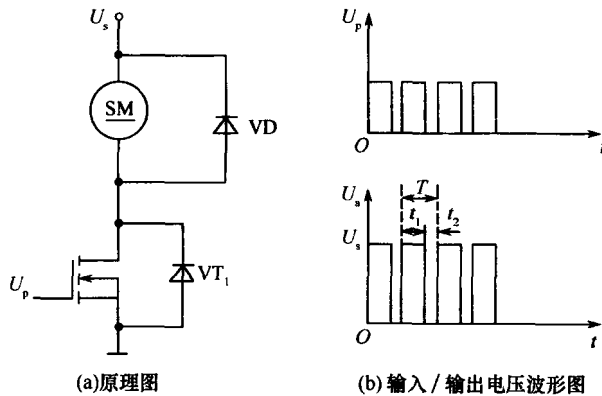


图 1-9 PWM 调速控制原理和电压波形图

$\alpha$  表示了在一个周期  $T$  里,功率开关管导通的时间与周期的比值。 $\alpha$  的变化范围在 0 到 1 之间。由上式可知,当电源电压不变的情况下,电枢的端电压平均值  $U_a$  取决于占空比  $\alpha$  的大小,改变  $\alpha$  的值,就可以改变  $U_a$  的平均值,从而达到调速的目的,这就是 PWM 的调速原理。

在 PWM 调速中,占空比是一个重要的参数。改变占空比有以下三种方法:

- ① 定宽调频法。该方法保持  $t_1$  不变,只改变  $t_2$ ,这时斩波频率(或周期  $T$ )也随之改变。
- ② 调宽调频法。该方法与方法 ① 相反,保持  $t_2$  不变,只改变  $t_1$ ,此时,斩波频率(或周期  $T$ )也随之改变。
- ③ 定频调宽法。该方法同时改变  $t_1$  和  $t_2$ ,而保持斩波频率(或周期  $T$ )不变。

由于前两种方法中在调速过程中改变了斩波频率,当斩波频率的频率与系统固有频率接近时,会引起振荡,因此,这两种方法应用较少。在现阶段,一般采用调速方法 ③,即定频调宽法。

在直流电动机要求工作在正反转的场合,需要使用可逆 PWM 系统。可逆 PWM 系统可以分为单极性驱动和双极性驱动两种类型。

## (2) 单极性可调速系统

单极性驱动是指在一个 PWM 周期里,电动机电枢的电压极性呈单一性变化。

单极性驱动电路有两种。一种称为 T 形,它由两个开关管组成,需要采用正负电源,相当于两个不可逆系统的组合,因其电路形状像“T”字,故称为 T 形。由于 T 型单极性驱动系统的电流不能反向,并且两个开关管正反转切换的工作条件是电枢电流为 0,因此,电动机动态性能较差。这种驱动电路很少采用。

另一种单极性驱动电路称作 H 形,也即桥式电路。这种电路中电动机动态性能较好,因此