



王季铁 曲家骐 编著

执行电动机

电气自动化
新技术
丛书

机械工业出版社

7M1383.4

W22

电气自动化新技术丛书

执 行 电 动 机

王季秩 曲家骥 编著



机械工业出版社

本书全面、系统地介绍了电气自动化技术中应用的各种执行电动机(包括直流电动机、同步电动机、永磁交流同步伺服电动机、步进电动机、开关磁阻电动机、异步电动机及特种电动机)的原理、性能、运行及应用。在内容上,突出近年来的新技术、新成果,力求物理概念清楚,论述简洁,重视应用,注意本学科与相关学科的结合。

本书可供从事电气传动自动化与电机技术的工程技术人员阅读,也可供大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

执行电动机/王季秩,曲家骥编著. -北京:机械工业出版社,1997.7

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-05606-X

I. 执… II. ①王… ②曲… III. 执行电动机 N. TM38
3.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 05743 号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码 100037)

责任编辑:孙流芳 版式设计:张世琴 责任校对:张莉娟

封面设计:姚毅 责任印制:王国光

三河市宏达印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行

1997年8月第1版第1次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂ · 8.625印张 · 216千字

印数 0 001-4 000 册

定价:16.50元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

《电气自动化新技术丛书》

序 言

科学技术的发展,对于改变社会的生产面貌,推动人类文明向前发展,具有极其重要的意义。电气自动化技术是多种学科的交叉综合,特别在电力电子、微电子及计算机技术迅速发展的今天,电气自动化技术更是日新月异。毫无疑问,电气自动化技术必将在建设“四化”、提高国民经济水平中发挥重要的作用。

为了帮助在经济建设第一线工作的工程技术人员能够及时熟悉和掌握电气自动化领域中的新技术,中国自动化学会电气自动化专业委员会和中国电工技术学会电控系统与装置专业委员会联合成立了《电气自动化新技术丛书》编辑委员会,负责组织编辑《电气自动化新技术丛书》。丛书将由机械工业出版社出版。

本丛书有如下特色:

一、本丛书是专题论著,选题内容新颖,反映电气自动化新技术的成就和应用经验,适应我国经济建设急需。

二、理论联系实际,重点在于指导如何正确运用理论解决实际问题。

三、内容深入浅出,条理清晰,语言通俗,文笔流畅,便于自学。

本丛书以工程技术人员为主要读者,也可供科研人员及大专院校师生参考。

编写出版《电气自动化新技术丛书》,对于我们是一种尝试,难免存在不少问题和缺点,希广大读者给予支持和帮助,并欢迎大家批评指正。

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会

《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任委员：陈伯时

副主任委员：喻士林 夏德铃 李永东

委员：(以姓氏笔划为序)

王 炎	王文瑞	王正元
刘宗富	孙 明	孙武贞
孙流芳	过孝瑚	许宏纲
朱稚清	夏德铃	陈伯时
陈敏逊	李永东	李序葆
张 浩	张敬民	周国兴
涂 健	蒋静坪	舒迪前
喻士林	霍勇进	戴先中

《电气自动化新技术丛书》

出版基金资助单位

机械工业部天津电气传动设计研究所

深圳华能电子有限公司

北京电力电子新技术研究开发中心

天津普辰电子工程有限公司

前 言

执行电动机是传动及控制系统中重要组成部分之一,起着相当关键的作用。执行电动机应用相当广泛,遍及国民经济、国防军事以及人们日常生活中各个方面。

随着科学技术的发展,各学科的互相渗透,新理论、新技术、新材料的出现,执行电动机也得到了迅速的发展。新原理、新结构以及适合各种需要的新型电动机不断出现,性能越来越好,功能越来越强。特别是电子技术与计算机技术的发展,对执行电动机发展产生巨大的影响。严格地说,目前执行电动机应该是机电一体化产品。因此,对于执行电动机的认识,必须既以传统理论为基础,又要和电子技术,计算机技术,以及控制理论相结合。

作者长期从事执行电动机及其驱动控制的研究和设计,并在工作中和从事传动及控制系统方面工作的工程技术人员和教学人员有着相当密切的合作和接触。结合多年来工作经验,翻阅大量文献、资料,从应用角度出发,理论联系实际编写了本书。在书的内容上,力求对执行电动机作一全面、综合、系统的介绍,包括所有机种,特别是在这个领域中的新技术、新成就、新发展。从执行电动机的基本原理入手,阐述各种电动机的工作原理、结构、性能特点、参数,并以相当篇幅介绍它们的驱动、控制及应用。这些内容都具有相当的实用性,使得读者对执行电动机既有一个全面、深入的认识,同时又能够应用于具体的工作实际中。

全书共分9章。第1章概述,介绍了执行电动机的分类、使用要求、特点和发展。第2章直流电动机,着重介绍永磁电动机。第3章无刷直流电动机,从直流电动机的基本原理出发,突出了无刷直流电动机的理论和分析方法;重点介绍无刷永磁直流电动机及其驱动控制。第4章同步电动机,全面地介绍了目前用于控制系统

中的各类同步电动机。第5章永磁交流同步伺服电动机,这是一种新型同步电动机,它的优良的伺服特性,使得它在伺服系统中得到广泛的应用。第6章步进电动机,除对步进电动机的原理、结构、特性、参数以及驱动控制作了全面介绍之外,还分析了振动和噪声的特殊问题,以便更好地应用步进电动机。第7章开关磁阻电动机,这是一种较新式的电动机。第8章异步电动机,这是一种应用相当广泛的电动机,其类型也相当多。原来多数用于一般的驱动场合,但是随着科学技术发展,异步电动机的驱动控制也有了巨大的变革,本章用了一定篇幅介绍这方面问题。第9章特种电动机,介绍了两种类型电动机:直线电动机和超声波电动机,这两种电动机都有着独特的优点,已引起广泛的重视,并用于各种系统中。

本书1、4、6~9章由王季秩教授级高级工程师执笔,2、3、5章由曲家骐高级工程师执笔。在选题、编写、审稿及出版过程中,喻士林教授级高级工程师以及许多同志都给予了热情的帮助和支持,在此表示真诚的谢意。

限于水平、肯定会有错误及不妥之处,诚恳地希望读者批评、指正。

作者

1996年11月

常用符号表

A ——电负荷,力系数	g ——气隙
a ——加速度,角加速度,绕组支路对数	H ——磁场强度,高度
B ——磁通密度(简称为磁密),阻尼系数	H_c ——矫顽磁场强度(矫顽磁力)
B_g ——气隙磁通密度	I ——电流
C ——电容	I_s ——定子电流
$C(t)$ ——输出响应函数	I_r ——转子电流
D ——直径、调速比	I_m ——最大电流,磁化电流
d ——直径	I_a ——电枢电流
E ——电动势,电场强度	I_d ——直轴电流
e ——电动势,偏心矩,压电常数	I_q ——交轴电流
F ——磁动势	i ——电流(瞬时值)
F_f ——摩擦力(摩擦阻力)	J ——转动惯量
$F(s)$ ——频率传递函数	j ——电流密度
$F(t)$ ——干扰信号函数	K ——换向器片数,弹簧常数
F_s, F_{sg} ——定子磁动势	K_B ——开环放大系数
F_r, F_{rg} ——转子磁动势	K_d ——阻尼系数
F_m, F_{mg} ——磁化磁动势	K_e ——电动势常数
F_d ——直轴磁动势	K_T ——转矩常数
F_q ——交轴磁动势	k ——常数
f ——力,频率	L ——电感,工作行程长度
f_0 ——自由振荡频率	L_s, L_{ss} ——定子电感
G_0 ——比磁导平均分量	L_r, L_{rr} ——转子电感
G_1 ——比磁导基波分量	L_{sr} ——定转子互电感
$G(s)$ ——传递函数	L_m ——主电感
	L_l ——励磁电感
	L_{dl} ——直轴与励磁的互电感

L_a ——电枢电感	t_s ——停止时间
L_o ——电感平均分量	U ——电压
L_1 ——电感基波分量	U_a ——电枢电压, 相电压
L_{aa} ——A 相绕组电感	U_d ——直轴电压
L_{bb} ——B 相绕组电感	U_q ——交轴电压
L_{cc} ——C 相绕组电感	U_f ——励磁电压
L_{dd} ——D 相绕组电感	U_s, U_{ts} ——定子电压
l ——长度	U_r, U_{tr} ——转子电压
m ——质量	u ——电压(瞬时值)
N ——导体数, 转速, 脉冲数,	V ——体积
匝数	v ——速度
$N(s)$ ——转速传递函数	W ——能量, 功, 重量, 能量密度
n ——转速, 次数	W_e ——输入电气能量
n_s ——同步转速, 定子转速	W_f ——磁场储能
n_r ——转子转速	W_m ——输出机械能量, 电磁能量
P ——功率, 损耗	w ——能量密度
p ——极对数	X ——电抗
R ——电阻, 磁阻	X_s ——定子电抗
R_s ——定子电阻	X_r ——转子电抗
R_r ——转子电阻	X_d ——直轴电抗
$R(l)$ ——输入响应函数	X_q ——交轴电抗
r ——半径	X_f ——励磁电抗
S ——电枢元件数, 静差率	X_m ——主电抗
s ——转差率	x ——线位移, 应变
T, T_s ——转矩, 周期, 时间	Z ——阻抗, 槽数
T_m, T_{em} ——电磁转矩, 最大转矩	Z_s ——定子槽数
T_L ——负载转矩	Z_r ——转子槽数
T_e ——电气时间常数	α, β ——角位移
T_M ——机械时间常数	γ ——磁滞角
T_P ——过渡过程时间	δ ——功角, 角位移
T_f ——干扰恢复时间	η ——效率
t ——时间	$\Theta_i(s)$ ——输入角传递函数
t_r ——上升时间	$\Theta_o(s)$ ——输出角传递函数
	θ ——相角, 失调角, 角位移
	λ ——磁链

μ_0 ——真空磁导率

μ_r ——相对磁导率

σ ——超调量

ρ ——电阻率

τ ——时间常数

Φ ——磁通量(磁通)

Φ_r ——剩余磁通

Ψ ——磁链

Ω ——转速,角速度,角频率

ω ——角频率,角速度

ω_0 ——自由振荡角频率

ω_m ——转子旋转角频率

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

前言

常用符号表

第 1 章 概述	1
1.1 对执行电动机的一般要求	2
1.1.1 对执行电动机的控制要求	2
1.1.2 稳态控制要求	2
1.1.3 动态控制要求	10
1.2 执行电动机的类型和特点	11
1.2.1 类型	11
1.2.2 特点和要求	14
1.3 执行电动机的发展概况	14
1.3.1 提高可控性、精度和快速性	14
1.3.2 适应数字化的发展	15
1.3.3 电机组合化	16
1.3.4 电机电子化	16
1.3.5 小型化、实用化、多功能	16
第 2 章 直流电动机	18
2.1 直流电动机的工作原理和结构	19
2.1.1 工作原理	19
2.1.2 基本结构	22
2.2 永磁直流电动机中的永磁体	24
2.2.1 永磁材料的特性	24
2.2.2 永磁材料的种类	26
2.2.3 永磁直流电动机的磁路结构	27
2.3 永磁直流电动机的工作特性和参数	32
2.3.1 有关的数学方程式	32

2.3.2	稳态工作特性	33
2.3.3	动态工作特性	35
2.3.4	永磁直流电动机的参数	37
2.4	各种直流执行电动机介绍	40
2.4.1	分类	40
2.4.2	无槽电枢直流电动机	41
2.4.3	动圈式转子直流电动机	43
2.4.4	永磁直流量矩电动机	49
2.5	直流电动机的应用	51
2.5.1	应用系统的分类	51
2.5.2	电动机选择的基本要求	53
2.5.3	应用电动机的选择	59
2.6	直流电动机的驱动	61
2.6.1	晶体管驱动电路	63
2.6.2	晶闸管驱动控制	68
第3章	无刷直流电动机	74
3.1	无刷直流电动机的工作原理和结构	74
3.1.1	基本工作原理	74
3.1.2	结构	77
3.2	无刷直流电动机的绕组	79
3.2.1	绕组联结方式	79
3.2.2	各种绕组联结方式的比较	82
3.3	无刷直流电动机的基本方程和主要参数	83
3.3.1	基本方程	83
3.3.2	主要参数	91
3.3.3	无刷直流电动机的电枢反应	91
3.4	无刷直流电动机的位置传感器	92
3.4.1	霍尔效应的磁敏式开关元件	93
3.4.2	光电变换开关元件	95
3.4.3	位置传感器的波形关系	96
3.5	无刷直流电动机的驱动电路	99
3.5.1	正、反转方法	99
3.5.2	由分立元件组成的三相全桥驱动	100

3.5.3 使用专用集成电路的驱动电路	102
3.5.4 利用本身位置传感信号作为速度反馈信号 的无刷直流电动机电路	105
第4章 同步电动机	108
4.1 同步电动机的工作原理、分类和结构	108
4.1.1 交流电动机的基本工作原理	108
4.1.2 同步电动机的工作原理	110
4.1.3 同步电动机的分类、结构和特点	111
4.2 同步电动机的等效电路、特性和参数	113
4.2.1 励磁式同步电动机的等效电路	113
4.2.2 永磁式同步电动机的等效电路	114
4.2.3 磁阻式同步电动机的等效电路	114
4.2.4 同步电动机的特性和参数	116
4.2.5 磁滞电动机的特性和参数	118
4.3 同步电动机的应用和驱动器	119
4.3.1 开环系统	120
4.3.2 闭环系统	121
第5章 永磁交流同步伺服电动机	123
5.1 永磁交流同步伺服电动机的基本工作原理和结构	124
5.1.1 基本工作原理	124
5.1.2 结构	131
5.2 永磁交流同步伺服电动机系统	132
5.2.1 主电路	133
5.2.2 传感器及传感信号	137
5.2.3 保护电路	143
5.3 永磁交流同步伺服电动机的参数	144
第6章 步进电动机	146
6.1 步进电动机的工作原理、分类、结构和特点	146
6.1.1 分类、原理和结构	146
6.1.2 特点	151
6.2 步进电动机的特性和参数	152
6.2.1 稳态特性和参数	152
6.2.2 动态特性和参数	154

6.3 步进电动机的振动和噪声	157
6.3.1 步进电动机的运动机理	157
6.3.2 步进电动机的振荡	158
6.3.3 降低步进电动机振动、噪声的措施	161
6.4 步进电动机的驱动和控制技术	162
6.4.1 脉冲发生器	162
6.4.2 脉冲分配器	163
6.4.3 驱动电路	166
6.4.4 直流功率电源	169
6.5 步进电动机的计算机控制	170
6.6 步进电动机的细分驱动技术	173
第7章 开关磁阻电动机	177
7.1 开关磁阻电动机的工作原理和基本组成	177
7.1.1 开关磁阻电动机与磁阻式同步电动机、步进电动机的比较	177
7.1.2 工作原理	178
7.1.3 基本组成	180
7.2 开关磁阻电动机的运行和基本方程式	181
7.3 开关磁阻电动机的驱动和控制技术	185
7.3.1 驱动电路	185
7.3.2 控制电路	187
7.4 开关磁阻电动机调速系统及其性能	189
第8章 异步电动机	193
8.1 异步电动机的工作原理、结构和分类	193
8.1.1 工作原理	193
8.1.2 结构	194
8.1.3 特点和分类	195
8.2 异步电动机的特性和参数	198
8.2.1 等效电路	198
8.2.2 基本参数和表达式	198
8.2.3 特性	201
8.3 异步电动机的应用和驱动控制	204
8.3.1 交流变频控制系统	204

8.3.2 交流变压控制系统	216
8.3.3 变频控制用异步电动机设计的特殊要求	218
第9章 特种电动机	221
9.1 直线电动机	221
9.1.1 直线直流电动机	222
9.1.2 直线异步电动机	224
9.1.3 直线同步电动机	227
9.1.4 直线步进电动机	228
9.1.5 平面式步进电动机	231
9.2 摆动式电动机	232
9.2.1 工作原理和结构	232
9.2.2 应用、线路和特性	233
9.3 超声波电动机	235
9.3.1 工作原理、分类和结构	235
9.3.2 机电转换和等效电路	241
9.3.3 特性和参数	246
9.3.4 超声波电动机与电磁电动机的比较	249
9.3.5 应用	251
参考文献	255

第1章 概 述

执行电动机是执行指令运动的电气机械或元件。通常，执行指令运动是根据电气或电子控制的要求，按设定的指令来完成控制系统的运动。最简单的例子是通过刀开关使电动机在恒定负载下运行。此时，有多种指令方法来控制刀开关，人的操作指令是常用的方法。在上例中，电动机便是执行电动机。

执行电动机是与电气、电子控制技术发展紧密联系。早期，军事工业需要精密、可靠的电气电子控制装备，开始采用伺服控制系统。在伺服控制系统中，伺服电动机是该系统的执行电动机，也是其主要组成部分。随着军事电子装备的发展，以及民用电气控制的需要，伺服控制、数字控制、运动控制就不断地兴起，执行电动机作为新类型的电动机或控制元件迅速地成长和发展。当前，科技迅猛发展、国民经济高速增长以及数字控制、运动控制、伺服控制等技术在国民经济及国防建设中所起作用越显重要的时候，执行电动机技术迅速地发展，出现不少新型执行电动机以及电气电子控制方法与产品，上述电动机和电气电子产品的广泛应用于国民经济、国防建设各个领域。

在控制技术，常用的执行电动机，按电动机的原理来分，主要有直流电动机、交流同步电动机、步进电动机、开关磁阻电动机、交流异步电动机等五大类。

从功率大小来看，小功率控制系统（输出100W以下）所用执行电动机称为执行元件，而大功率控制系统中则称它为执行电动机。

在控制领域中，传感器、驱动器和控制器是紧密地与执行电动机联系在一起的，经常是相互结合、互相渗透的。因此，执行电动机已从单一伺服控制的电动机、元件转变成多功能的执行电