

第2版

直流无刷电动机 原理及应用

张琛 编著

电气自动化
新技术丛书



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



● ISBN 7-111-05038-X/TM-633

封面设计 / 电脑制作 : 姚毅

ISBN 7-111-05038-X



9 787111 050384

定价: 17.00 元

地址: 北京市百万庄大街22号

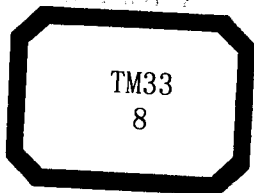
联系电话: (010) 68326294

邮政编码: 100037

网址: <http://www.cmpbook.com>

E-mail: online@cmpbook.com

电气自动化新技术丛书



直流无刷电动机原理及应用

第 2 版

张 琛 编著



机械工业出版社

直流无刷电动机是利用电子换相技术代替传统直流电动机的电刷换向的一种新型直流电动机,具有一般直流电动机的运行效率高、起动转矩大、调速范围广和机械特性为线性等优点,又具有交流电动机的结构简单、运行可靠、维修方便等特点。自20世纪70年代以来,随着高性能的电力电子器件和高性能的磁性材料的相继问世,大大提高了直流无刷电动机的性能,使其应用范围遍及各个学科领域,并日趋广泛。

本书第1版自1996出版以来,深受广大读者欢迎,已经多次重印。这次修订,保留了第1版中直流无刷电动机的基本原理、磁路结构、定子绕组特点、设计计算及控制方法等内容,仅作少量修改补充,并结合作者近年来的科研成果,新增了第6、7两章,重点介绍了直流无刷电动机在各个领域中的应用及其微型化。

本书是一本理论与实际紧密结合的新技术专著,可供有关中高级技术人员及高校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

直流无刷电动机原理及应用/张琛编著. —2版. —北京:机械工业出版社,2004(2006.3)

(电气自动化新技术丛书)

ISBN 7-111-05038-X

I. 直... II. 张... III. 直流电机:无刷电机 IV. TM33

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第094099号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:孙流芳 责任编辑:孙流芳 版式设计:张世琴
责任校对:韩晶 封面设计:姚毅 责任印制:李妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2006年3月第2版·第3次印刷

850mm×1168mm^{1/32}·8.625印张·228千字

18301—20300册

定价:17.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线:(010)88379768

封面无防伪标均为盗版

《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

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会成员

主任：王 炎

副主任：王兆安 王志良 赵相宾 牛新国

委员：王正元 王永骥 王兆安 王 旭
王志良 王 炎 牛新国 尹力明
刘宗富 许宏纲 孙流芳 阮 毅
李永东 李崇坚 陈伯时 陈敏逊
陈维均 周国兴 赵光宙 赵 杰
赵相宾 张 浩 张敬明 郑颖楠
涂 健 徐殿国 黄席樾 彭鸿才
霍勇进 戴先中

秘书：刘凤英

第4届《电气自动化新技术丛书》

编辑委员会的话

自1992年本丛书问世以来，在学会领导和广大作者、读者的支持下，至今已出版发行丛书38种33万余册，受到广大读者的欢迎，对促进我国电气传动自动化新技术的发展和传播起到了很大作用。

许多读者来信，表示这套丛书对他们的工作帮助很大，希望我们再接再厉，不断推出介绍电气传动自动化新技术的丛书。因此，本届编委会决定选择一些大家所关心的新选题，继续组织编写出版，同时对受读者欢迎的已出版的丛书，根据技术的发展，我们将组织一些作者进行修订再版，以满足广大读者的需要。

我们诚恳地希望广大读者来函，提出您的宝贵意见和建议，以使本丛书搞得更好。

在本丛书出版期间，为加快与支持丛书出版，成立了丛书出版基金，得到了中国电工技术学会、天津电气传动设计研究所等单位的支持，在此我们对所有资助单位再次表示感谢。

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会

第 2 版前言

本书自 1996 年出版以来，承蒙广大读者厚爱，已经多次重印，现重新增补、修订再版。第 2 版是在第 1 版的基础上编写而成的。保留了原书中直流无刷电动机的基本原理、磁路结构、定子绕组特点、设计计算及控制方法等内容，仅作了少量修改补充。如在原第 2 章中增加了钕铁硼高性能磁性材料及磁性薄膜等内容；将原第 5 章改为直流无刷电动机的控制，并增加了反电动势换相技术和直流无刷电动机专用控制芯片的应用等内容。

鉴于直流无刷电动机的应用日趋普及，再版中增加了第 6 章，专门介绍它在各个领域中的应用。

微型化是电机制造工业的主要发展方向之一，直流无刷电动机当然也不例外。随着 20 世纪 80 年代末的 MEMS (微电子机械系统) 学科的兴起，为电机微型化开辟了崭新的途径。在第 2 版的第 7 章中结合作者近年来在这方面的一个重要科研成果，专门讨论了应用微细加工工艺和精密装配技术研制的直径小于 3mm 微型电动机的结构特点、制造方法及应用实例。

在本书的修订过程中，机械工业出版社孙流芳编辑进行了十分细致的编审工作，我校李振波博士在文字编排中作了大量工作，在此一并致谢。

由于时间仓促，加上作者水平有限，书中难免存在错误和不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

于上海交通大学

第 1 版前言

一个多世纪以来，电动机作为机电能量转换装置，其应用范围已遍及国民经济的各个领域以及人们的日常生活之中。其主要类型有同步电动机、异步电动机与直流电动机三种。众所周知，由于传统的直流电动机均采用电刷以机械方法进行换向，因而存在相对的机械摩擦，由此带来了噪声、火花、无线电干扰以及寿命短等致命弱点，再加上制造成本高及维修困难等缺点，从而大大地限制了它的应用范围，致使目前工农业生产上大多数均采用三相异步电动机。

针对上述传统直流电动机的弊病，早在 20 世纪 30 年代就有人开始研制以电子换相代替电刷机械换向的直流无刷电动机。经过了几十年的努力，直至 60 年代初终于实现了这一愿望。

由于直流无刷电动机既具备交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等一系列优点，又具备直流电动机的运行效率高、无励磁损耗以及调速性能好等诸多特点，故在当今国民经济各个领域，如医疗器械、仪器仪表、化工、轻纺以及家用电器等方面的应用日益普及。如计算机硬盘驱动器和软盘驱动器里的主轴电动机、录像机中的伺服电动机，均数以百万计地运用直流无刷电动机。

70 年代以来，随着电力电子工业的飞速发展，许多新型的高性能半导体功率器件，如 GTR、MOSFET、IGBT 等相继出现，以及高性能永磁材料，如钕钴、钕铁硼等的问世，均为直流无刷电动机的广泛应用奠定了坚实的基础。特别是我国稀土材料的储量为世界第一，为高性能直流无刷电动机的发展创造了得天独厚的条件。

本书结合本人近年来在该领域中教学和科研实践的经验，从

应用角度出发，突出理论联系实际，由浅入深地阐述了直流无刷电动机的基本原理、运行性能与参数之间的关系、计算方法、典型主电路和控制电路及其在各领域中的应用，是一本理论与实践紧密结合的专著。全书共5章。第1章主要介绍直流无刷电动机的基本原理和结构。第2章重点介绍永磁磁钢的特性、磁路及其计算方法。第3章介绍了直流无刷电动机的绕组结构和特点。第4章论述了直流无刷电动机的基本设计方法。第5章论述了直流无刷电动机的具体应用。

由于本人水平所限以及编写时间紧迫，书中的缺点和错误在所难免，殷切希望广大读者批评指正。

作者
于上海交通大学
1995年7月5日

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

第4届《电气自动化新技术丛书》编辑委员会的话

第2版前言

第1版前言

第1章 绪论	1
1.1 左手定则与转矩常数	2
1.2 右手定则及反电动势常数	4
1.3 直流无刷电动机的基本组成环节及工作原理	5
1.3.1 基本组成环节	5
1.3.2 基本工作原理	7
1.4 位置传感器	10
1.4.1 电磁式位置传感器	10
1.4.2 光电式位置传感器	12
1.4.3 磁敏式位置传感器	13
1.5 运行特性和传递函数	18
第2章 永磁材料的基本特性及磁路计算	24
2.1 有关磁的基本知识	24
2.1.1 磁感应强度	24
2.1.2 磁通	25
2.1.3 电流的磁效应	25
2.1.4 磁场强度	27
2.2 永磁材料的磁滞回线和去磁曲线	28
2.3 描写永磁材料特性的主要参数	30
2.3.1 饱和磁场强度	30
2.3.2 剩余磁感应强度和矫顽力	30
2.3.3 磁导率和回复直线	32
2.3.4 磁能积和最大磁能积	33

2.3.5	凸度系数	35
2.4	等磁能积曲线	35
2.5	几种常用永磁材料的特性	37
2.5.1	铝镍钴合金	40
2.5.2	铁氧体永磁材料	42
2.5.3	稀土永磁材料	47
2.5.4	钕铁硼永磁材料	51
2.5.5	铂钴永磁材料	53
2.5.6	磁性薄膜	54
2.6	去磁现象及其防止措施	54
2.6.1	去磁含义	55
2.6.2	防止去磁的措施	56
2.7	磁路及其基本定律	57
2.7.1	磁路欧姆定律	57
2.7.2	磁路中的基尔霍夫定律	58
2.7.3	永磁磁路的等效磁路图	60
2.8	磁路计算	62
2.8.1	简单的磁路计算	62
2.8.2	简单磁路工作点的求法	65
2.8.3	带导磁体的永磁磁路的算法	67
2.8.4	气隙磁导	71
第3章	直流无刷电动机的绕组结构	74
3.1	直流无刷电动机磁场的简化	75
3.2	绕组的构成及基本要求	77
3.3	单层绕组	79
3.4	单层绕组的联接方式	85
3.4.1	链式绕组	86
3.4.2	交叉式绕组	87
3.4.3	同心式绕组	88
3.5	双层绕组	89
3.6	双层绕组的联接	92
3.6.1	双层绕组联接的基本步骤	92
3.6.2	单双层绕组	95

3.7 分数槽绕组	97
3.7.1 分数槽绕组的分相	98
3.7.2 分数槽绕组的分布因数及对称条件	100
3.7.3 举例	102
第4章 直流无刷电动机的设计	107
4.1 概述	107
4.1.1 额定值	107
4.1.2 技术要求	108
4.2 设计步骤	110
4.2.1 单个电动机设计的基本步骤	110
4.2.2 系列产品的设计步骤	111
4.3 主要尺寸与电磁负荷的关系	112
4.3.1 电磁负荷	112
4.3.2 主要尺寸与电磁负荷的关系	113
4.4 主要尺寸的选择	116
4.4.1 定子铁心内径 D_a 的选择	116
4.4.2 电磁负荷的选择	118
4.4.3 转子磁钢计算长度 L_a 的确定	121
4.4.4 转子长度与直径的比值 λ	121
4.5 极数的选择	124
4.6 定子绕组导线截面积的选择	125
第5章 直流无刷电动机的控制方法	128
5.1 三相绕组直流无刷电动机主电路基本类型	128
5.1.1 三相半控电路	128
5.1.2 三相Y联结全控电路	130
5.1.3 三相 Δ 联结全控电路	135
5.2 多相电动机控制举例	136
5.2.1 二三通电方式	137
5.2.2 五五通电方式	138
5.2.3 五四通电方式	139
5.3 直流无刷电动机转速的测量	143
5.4 数字积分器及锁定检测	151
5.5 锁相控制	157

5.6	直流无刷电动机的微机控制	161
5.6.1	换相的控制	162
5.6.2	起动电流的限制	163
5.6.3	转速的控制	163
5.6.4	PWM 控制的实现	163
5.6.5	正反转的控制	165
5.6.6	变结构控制的实现	165
5.7	专用集成电路	166
5.8	反电动势控制技术	172
5.8.1	反电动势的模拟测试方法	173
5.8.2	反电动势的数字测试方法	176
第 6 章	直流无刷电动机的应用	182
6.1	直流无刷电动机在计算机系统中的应用	183
6.1.1	在软盘驱动器中的应用	184
6.1.2	在硬盘驱动器中的应用	185
6.1.3	在光盘驱动器中的应用	190
6.1.4	在磁带备份装置中的应用	192
6.1.5	在计算机通风冷却装置中的应用	193
6.2	直流无刷电动机在家用电器中的应用	195
6.2.1	直流无刷电动机在空调器中的应用	196
6.2.2	直流无刷电动机在洗衣机中的应用	198
6.2.3	直流无刷电动机在 DVD 机中的应用	199
6.2.4	直流无刷电动机在其他家用电器中的应用	200
6.3	直流无刷电动机在工业中的应用	200
6.4	直流无刷电动机在汽车、摩托车、助动车等交通工具中的应用	204
6.4.1	直流无刷电动机在汽车中的应用	206
6.4.2	直流无刷电动机在助动车上的应用	207
6.5	直流无刷电动机在医疗器械中的应用	209
6.6	直流无刷电动机在其他领域中的应用	213
6.6.1	直流无刷电动机在机器人中的应用	214
6.6.2	直流无刷电动机在光开关中的应用	214
第 7 章	直流无刷电动机微型化	219

7.1 微型电动机的主要加工技术	221
7.1.1 体微加工技术	223
7.1.2 表面微加工技术	223
7.1.3 高深宽比微加工技术	224
7.1.4 组封装技术	228
7.2 微型直流无刷电动机的基本结构	229
7.2.1 微型直流无刷电动机定子绕组	230
7.2.2 微型直流无刷电动机转子	232
7.2.3 磁路设计	234
7.2.4 发热问题	235
7.3 微型直流无刷电动机的控制方法	235
7.3.1 作同步电动机运行	236
7.3.2 反电动势换相技术的应用	237
7.3.3 步进电动机运行方式	239
7.4 微型电动机在微型直升机中的应用	240
7.4.1 设计的指导思想和技术难点	242
7.4.2 机翼的研制	243
7.4.3 机身的研制	248
7.4.4 微型电动机的研制	248
7.4.5 控制电路的研制	251
7.4.6 微型直升机的实用化	251
7.5 电磁型微型电动机在医疗中的应用	253
7.5.1 系统整体构思	253
7.5.2 内窥镜检测导管前端结构的设计	254
7.5.3 电磁型微型电动机驱动电路的设计	254
7.5.4 微型电动机对物镜前方光路的遮挡	255
7.5.5 微型电动机与上位机的通信	256
参考文献	257

第 1 章 绪 论

一个多世纪以来，电动机作为机电能量转换装置，其应用范围已遍及国民经济的各个领域以及人们的日常生活之中。电动机主要类型有同步电动机、异步电动机与直流电动机三种，其容量小到几瓦，大至上万千瓦。众所周知，直流电动机具有运行效率高和调速性能好等诸多优点，但传统的直流电动机均采用电刷，以机械方法进行换向，因而存在机械摩擦，由此带来了噪声、火花、无线电干扰以及寿命短等致命弱点，再加上制造成本高及维修困难等缺点，从而大大地限制了它的应用范围，致使目前工农业生产上，大多数均采用三相异步电动机。

随着社会生产力的发展，人们生活水平的提高，需要不断地开发各种新型电动机。科学技术的进步，新技术新材料的不断涌现，更促进了电动机产品的不断推陈出新。针对上述传统直流电动机的弊病，早在 20 世纪 30 年代，就有人开始研制以电子换向来代替电刷机械换向的直流无刷电动机，并取得了一定成果。但由于当时大功率电力电子器件仅处于初级发展阶段，没能找到理想的电子换向的元器件。使得这种电动机只能停留在实验室研究阶段，而无法推广使用。1955 年，美国 D·哈利森等人首次申请了应用晶体管换向代替电动机机械换向器换向的专利，这就是现代直流无刷电动机的雏形。但由于该电动机尚无起动转矩而不能产品化。尔后又经过人们多年努力，借助于霍尔元件来实现换向的直流无刷电动机终于在 1962 年问世，从而开创了直流无刷电动机产品化的新纪元。20 世纪 70 年代以来，随着电力电子工业的飞速发展，许多新型的高性能大功率电力电子器件，如 GTR、MOSFET、IGBT 等相继出现，以及高性能永磁材料，如钕钴、钕铁硼等的问世，均为直流无刷电动机的广泛应用奠定了坚实的基

础。

由于直流无刷电动机既具备交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等一系列优点，又具备直流电动机的运行效率高、无励磁损耗以及调速性能好等诸多特点，故在当今国民经济各个领域，如医疗器械、仪器仪表、化工、轻纺以及家用电器等方面的应用日益普及。如计算机硬盘驱动器和软盘驱动器里的主轴电动机、录像机中的伺服电动机，均数以百万计地运用直流无刷电动机。

1.1 左手定则与转矩常数

直流无刷电动机作为机电能量转换的基本装置，其工作原理主要是借助于所谓电磁转矩原理，即位于磁场中的载流导体，该导体就要受到力的作用，力的方向可按左手定则确定。如图 1-1 所示，即伸开左手，使大拇指和其余四指垂直放在一个平面上，把手心面向 N 极，四指顺着电流的方向，那么大拇指所指的方向就是载流导体在磁场中的受力方向。力的大小可由下式求出：

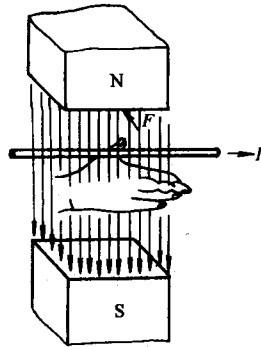


图 1-1 左手定则

$$F = BIL \quad (1-1)$$

式中 B ——磁感应强度(T)；

I ——电流(A)；

L ——导体有效长度(m)；

F ——力(N)。

如果磁感应强度 B 的方向和电流 I 的方向不相垂直，而是成一定夹角 θ ，则力的大小为

$$F = BIL\sin\theta \quad (1-2)$$

考虑到一个线圈往往有两个有效边，AB 与 CD，如图 1-2a 所示。在磁场中它们所受的力的方向正好相反，如图 1-2b 所示。