



张 琛 编著

直流无刷 电动机原理 及应用

电气自动化
新技术
丛书

机械工业出版社

电气自动化新技术丛书

直流无刷电动机原理及应用

张 琛 编 著



机械工业出版社

DW 45/18

70年代以来,随着电力电子工业和新型磁性材料工业的飞速发展,许多新型元器件和材料(如GTR、MOSFET、IGBT以及稀土钴、钕铁硼等)相继出现,为直流无刷电动机的应用奠定了良好的基础,其应用范围已遍及各个领域,从普通家用录像机中的驱动电动机到人造卫星姿态控制系统中的伺服电动机均无例外地采用直流无刷电动机。今后,其应用领域还将日趋扩大。

本书结合作者多年来在教学和科研实践中的体会,由浅入深系统地介绍了直流无刷电动机的基本原理、磁路结构、定子绕组特点、设计计算及具体应用。这是一本理论与实践紧密结合的新技术专著,可供有关中高级科技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. —北京:机械工业出版社, 1996

ISBN 7-111-05038-X

出版人:马九荣(北京市百万庄南街2号 邮政编码 100037)
责任编辑:孙流芳 版式设计:李松山 责任校对:丁丽珂
封面设计:姚毅

三河永和印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

1996年4月第1版·1996年4月第1次印刷

850mm×1168mm¹/₃₂·5.75印张·155千字

0 001—4 800册

定价:9.00元

《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。

本丛书选题将随新技术发展不断扩充，凡属电气自动化领域

新技术均可作为专题撰写新书。我们也面向社会公开征稿，欢迎自列选题投稿。来稿或索取稿约请函寄 300180 天津市津塘路 174 号天津电气传动设计研究所转《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

《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 夏德钤 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 夏德钤 陈伯时

陈敏逊 李永东 李序葆

张 浩 张敬明 周国兴

涂 健 蒋静坪 舒迪前

喻士林 霍勇进 戴先中

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，早在本世纪 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、录象机中的伺服电动机，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
1995.7.5

目 录

《电气自动化新技术丛书》序言

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	19
第 2 章 永磁材料的基本特性及磁路计算	25
2.1 有关磁的基本知识	25
2.1.1 磁感应强度	25
2.1.2 磁通	26
2.1.3 电流的磁效应	26
2.1.4 磁场强度	28
2.2 永磁材料的磁滞回线和去磁曲线	29
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	31
2.3.2 剩余磁感应强度和矫顽力	31
2.3.3 磁导率和回复直线	32
2.3.4 磁能积和最大磁能积	34
2.3.5 凸度系数	35
2.4 等磁能积曲线	36

2.5 几种常用永磁材料的特性及磁路结构	38
2.5.1 铝镍钴合金	38
2.5.2 铁氧体永磁材料	41
2.5.3 稀土永磁材料	45
2.6 去磁现象及其防止措施	49
2.6.1 去磁含义	49
2.6.2 防止去磁的措施	50
2.7 磁路及其基本定律	51
2.7.1 磁路欧姆定律	52
2.7.2 磁路中的基尔霍夫定律	53
2.7.3 永磁磁路的等效磁路图	54
2.8 磁路计算	57
2.8.1 简单的磁路计算	57
2.8.2 简单磁路工作点的求法	59
2.8.3 带导磁体的永磁磁路的算法	62
2.8.4 气隙磁导	65
第3章 直流无刷电动机的绕组结构	69
3.1 直流无刷电动机磁场的简化	70
3.2 绕组的构成及基本要求	72
3.3 单层绕组	74
3.4 单层绕组的联接方式	81
3.4.1 链式绕组	81
3.4.2 交叉式绕组	83
3.4.3 同心式绕组	84
3.5 双层绕组	85
3.6 双层绕组的联接	88
3.6.1 双层绕组联接的基本步骤	88
3.6.2 单双层绕组	91
3.7 分数槽绕组	93
3.7.1 分数槽绕组的分相	94
3.7.2 分数槽绕组的分布系数及对称条件	96
3.7.3 举例	98
第4章 直流无刷电动机的设计	103

4.1	概述	103
4.1.1	额定值	103
4.1.2	技术要求	104
4.2	设计步骤	106
4.2.1	单个电动机设计的基本步骤	106
4.2.2	系列产品的设计步骤	107
4.3	主要尺寸与电磁负荷的关系	108
4.3.1	电磁负荷	108
4.3.2	主要尺寸与电磁负荷的关系	109
4.4	主要尺寸的选择	112
4.4.1	定子铁心内径 D_s 的选择	112
4.4.2	电磁负荷的选择	114
4.4.3	转子磁钢计算长度 L_m 的确定	117
4.4.4	转子长度与直径的比值 λ	118
4.5	极数的选择	120
4.6	定子绕组导线截面的选择	121
第5章	直流无刷电动机的应用	124
5.1	三相绕组直流无刷电动机主回路基本类型	124
5.1.1	三相半控电路	124
5.1.2	三相Y联结全控电路	126
5.1.3	三相 Δ 联结全控电路	131
5.2	多相电动机控制举例	132
5.2.1	二三通电方式	133
5.2.2	五五通电方式	134
5.2.3	五四通电方式	137
5.3	直流无刷电动机转速的测量	139
5.4	数字积分器及锁定检测	147
5.5	锁相控制	153
5.6	直流无刷电动机的微机控制	158
5.6.1	换相的控制	158
5.6.2	起动电流的限制	159
5.6.3	转速的控制	159
5.6.4	PWM控制的实现	160

5.6.5	正反转的控制	161
5.6.6	变结构控制的实现	162
5.7	应用实例	163
5.7.1	直流无刷电动机在录象机中的应用	163
5.7.2	直流无刷电动机在计算机外部存储器中的应用	168
	参考文献	170

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。

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,早在本世纪 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子器件仅处于初级发展阶段,没能找到理想的电子换相元器件。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相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。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。

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,在该导体上就要受到力的作用。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:

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

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。它所产生的转矩 T_D 是以旋转轴 O 为中心, 方向为顺时针, 其大小可由下式求出:

$$T_D = 2rF = 2rBIL \quad (1-3)$$

式中 T_D ——转矩 (N·m);

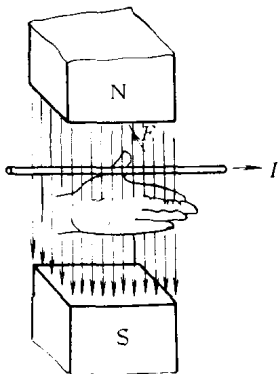


图 1-1 左手定则

r ——从中心到各导体的距离 (m)。

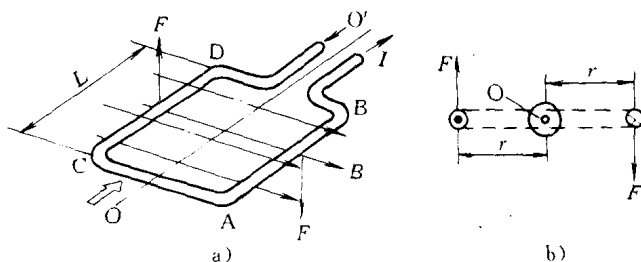


图 1-2 处于磁场中线圈的受力情况

同样，如果磁感应强度 B 和电流方向不相垂直，而是成一定夹角 θ ，则有

$$T_D = 2rBIL\sin\theta \quad (1-4)$$

图 1-3 示出了某两极直流电动机的横断面，并假设在对称轴 $O-O'$ 的右侧导体中，电流是以同一方向流动（例如从纸面流入），它们均处在 N 极下；左侧导体中电流以另一方向流动（从纸面流出），且它们均处在 S 极下。若此时电动机气隙中的磁感应强度保持均匀分布，其大小为 B 值，方向与导体相垂直，则导体上所受到的总转矩为

$$T_D = rBLIZ_D \quad (1-5)$$

式中 Z_D ——导体的总数；

I ——流过每个导体的电流，如果所有导体串联，即为电动机输入端的电流；

r ——电动机气隙半径；

L ——导体有效长度。

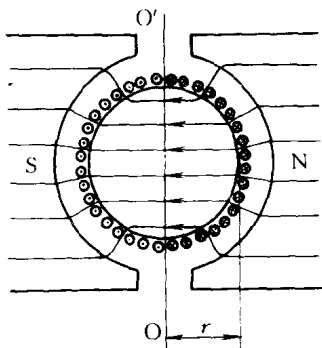


图 1-3 磁力线和转子内的电流分布

对于某一特定的电动机而言，其导体总数、每根导体的有效长度以及电动机气隙的半径均已确定，且磁感应强度 B 取决于永久磁钢的磁性材料及磁路结构，对某一具体电动机而言也是一个常数，故乘积 $(rBLZ_D)$ 为一常数，现将其定义为该电动机的转矩常数 K_T ，即

$$K_T = rBLZ_D (\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}) \quad (1-6)$$

则式 (1-5) 可改写成

$$T_D = K_T I \quad (1-7)$$

1.2 右手定则及反电动势常数

在磁场中运动的导体因切割磁力线会感生出电动势 E ，其大小为

$$E = vBL \quad (1-8)$$

式中 v ——导体运动的速度 (m/s)；

B ——磁感应强度 (T)；

L ——导体的长度 (m)。

同样，如果磁感应强度 B 和 L 不垂直，而是成一定夹角 θ ，则有

$$E = vBL\sin\theta \quad (1-9)$$

电动势 E 的方向按右手定则判断，如图 1-4 所示。即伸开右手，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，大拇指对着导体运动方向，那么四指所指的方向就是该导体在磁场中所产生的电动势的方向。

若电动机转子以角速度 ω (rad/s) 旋转，则速度 v 为

$$v = \omega r \quad (1-10)$$

式中 r ——导体所在位置至旋转中心

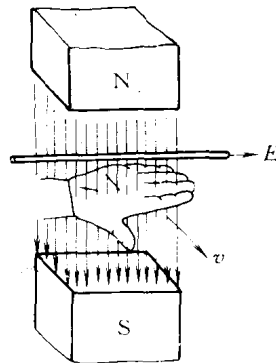


图 1-4 右手定则

的距离。

将式 (1-10) 代入式 (1-8), 得一根导体的反电动势为

$$E = \omega rBL \quad (1-11)$$

若导体总数为 Z_D , 且它们相互串联, 则总反电动势为

$$E = \omega rBLZ_D \quad (1-12)$$

同样对一个具体的电动机而言, 乘积 ($rBLZ_D$) 为一常数, 令电动势常数 $K_E = rBLZ_D$, 则有

$$E = K_E \omega \quad (1-13)$$

由此可见, 如采用统一的单位制, 在数值上有 $K_E = K_T$, 但它们代表不同的物理概念, 其量纲也不相同, 式 (1-7) 和式 (1-13) 分别反映了电动机内部机电能量相互转化过程中的数量关系。

1.3 直流无刷电动机的基本组成环节及工作原理

1.3.1 基本组成环节

直流无刷电动机的结构原理如图 1-5 所示。它主要由电动机

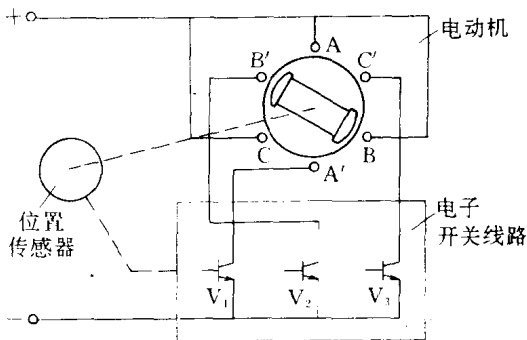


图 1-5 直流无刷电动机的结构原理图

本体、位置传感器和电子开关线路三部分组成。电动机本体在结构上与永磁同步电动机相似, 但没有笼型绕组和其他起动装置。其定子绕组一般制成多相 (三相、四相、五相不等), 转子由永久磁