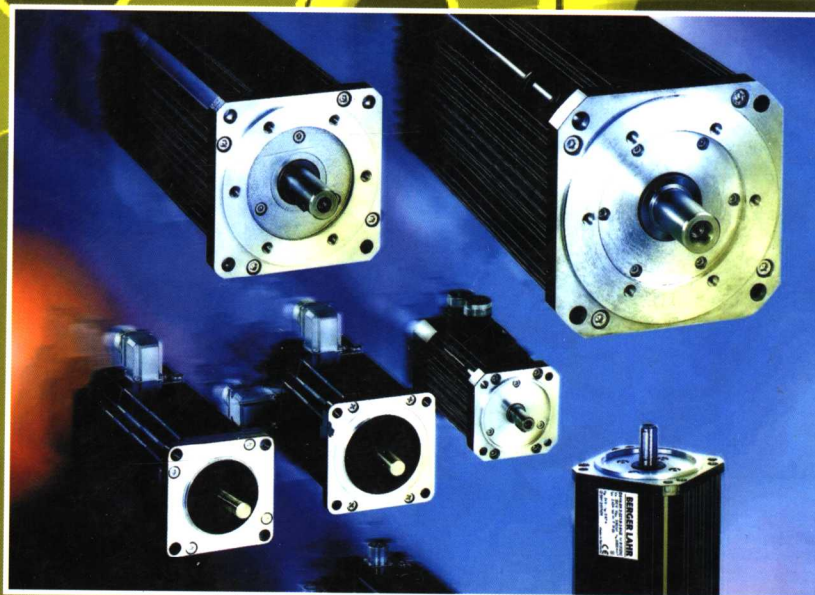


● 现代工业自动化技术应用丛书

直流无刷电动机 原理与技术应用

郭庆鼎 赵希梅 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

TM33/10

2007

现代工业自动控制技术应用丛书

TM33

10

直流无刷电动机 原理与技术应用

郭庆鼎 赵希梅 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



内 容 提 要

本书详细介绍了直流无刷电动机的基本结构组成、工作原理、控制方法和典型应用。作为直流无刷电动机的本体,着重讲述了电动机转子永磁材料特性和定子绕组,并对如何设计电动机作了整体上的概括性介绍。特别针对直流无刷电动机的特有结构、磁极位置传感器和电力电子开关换相器进行了细致的讨论,并对典型的高性能控制形式——矢量控制与其应用也作了介绍。

本书可供工矿企业中从事直流无刷电动机的使用、维护的工程技术人员阅读,也可供制造和研发电动机的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

直流无刷电动机原理与技术应用 / 郭庆鼎, 赵希梅编著. —北京: 中国电力出版社, 2008

(现代工业自动化技术应用丛书)

ISBN 978-7-5083-5939-7

I. 直… II. ①郭…②赵… III. 直流电机: 无刷电机
IV. TM33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 112377 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 1 月第一版 2008 年 1 月北京第一次印刷

1000 毫米×1400 毫米 B5 开本 12.875 印张 258 千字

印数 0001—3000 册 定价 21.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

序 言



现代工业自动化技术是信息社会中的关键技术和核心技术之一。自动化技术促进了人类文明的发展。实现工业生产自动化可以提高系统性能、改善劳动条件、减轻劳动强度、大幅提高生产率、节约能源、提高产品质量和经济效益。自动化设备可以代替人完成各类高危作业。

现代工业自动化系统已呈现开放性、智能化、信息化与网络化的特点，它融合了自动化技术、信息技术、现代控制技术、网络技术、通信技术、先进制造技术及现代管理学等诸多学科的先进技术，需要各学科的专家及工程技术人员通力合作，从而实现多学科专业知识与系统集成、形成实现现代工业自动化发展的手段或模式。

为了推广现代工业自动化技术的应用，总结、发展和提高我国工业自动化技术的应用水平，培养高水平的工程技术人员，帮助工作在生产第一线的工程技术人员能够及时拓展知识结构，较全面地了解和掌握现代工业自动化领域中的最新技术和应用，中国电力出版社组织编写了《现代工业自动化技术应用丛书》。

一、丛书的编写宗旨

团结组织工业自动化领域的专家、学者、科技工作者、工程技术人员和团体，共谋策划与编写，促进我国工业自动化技术的繁荣和发展。

二、丛书的编写原则

1. 以技术应用为主。理论与实践密切结合，通过剖析工程实例，介绍最新技术和产品的应用，以适应工业现场的需要。可操作性强。

2. 丛书各分册均以现场应用实际或范围划分。各分册之间既相互联系又自成体系。

3. 编委会特邀请该领域有扎实理论基础并富有实践经验的专家、学者和工程技术人员来承担编写工作。

三、丛书读者对象

以工程技术人员为主要读者对象，也适宜科研人员和大中专院校师生参考。

我们相信《现代工业自动化技术应用丛书》的出版必将对我国工业自动化技术的应用起到积极作用。编写出版《现代工业自动化技术应用丛书》对于我

们是一种全新的尝试，难免存在一些问题，希望广大读者给予支持和帮助，我们的联系方式是 mo_bingying@cepp.com.cn。同时，热忱希望各行业从事工业自动化及相关技术的专家、学者、工程技术人员借此机会积极参与，将您在工作实践中获得的丰富经验总结出来，共同为提高我国工业自动化技术的应用水平作出贡献。

《现代工业自动化技术应用丛书》

编委会

前 言



直流无刷电动机最本质的特征就是没有机械换向器（换向器通常也称为整流子）和电刷所构成的在运动中机械接触式换流机构，而代之以永磁转子磁极位置传感器——电子逻辑电路和功率开关线路共同组成的电子换相器，实现了直流电动机由直流电源供电逆变成电动机绕组内部的交变电流，从而实现机电能量转换，把电能变成了机械能。直流无刷电动机保持了直流有刷电动机优良的调速性能，克服了旋转运动机械换向器和静止电刷构成的换流机构所带来的一系列缺点，成为当代在机电能量转换和运动控制中主要形式的动力元件。

19 世纪 40 年代，第一台直流电动机研制成功，经过 70 多年的发展，直流电动机进入了成熟阶段，实现了广泛应用。随着调速手段的提高，对直流电动机本身的要求也愈来愈高，机械换向机构在某些高性能应用场合显得难以胜任。为了取代传统的换向器结构，人们对此作了长期研究。1915 年，美国人兰格米尔（Lang-mill）发明了带控制极的水银整流器，制成了由直流变交流的逆变装置。20 世纪 30 年代，有人提出用离子装置实现电动机的定子绕组按转子位置换接的所谓整流子电动机。但此种电动机由于可靠性差、效率低、装置庞大笨重而又复杂，只停留在实验室里，没有实用意义。

半导体技术的发展，使开关型晶体管问世，为直流无刷电动机的诞生创造了新的生机。1955 年，美国哈利森（Harrison）等人首先申请了用晶体管换向代替电动机电刷接触换向的专利，形成直流无刷电动机的雏形，但这种电动机没有起动转矩。其后，人们经过不断地试验研究，在 20 世纪 60 年代初期，终于找到了用霍尔元件等位置传感器和电子换向线路来代替直流有刷电动机的机械换向装置，使真正的直流无刷电动机问世。随着对新型位置传感器研究的深入、电力电子器件的发展、永磁材料的进步，各种新型的直流无刷电动机不断涌现出来，满足了各个不同领域的需要。70 年代初期，由德国人 Blaschke 提出所谓的矢量控制理论，把直流无刷电动机的性能控制水平提高到一个新高度，极大地推动了其在高性能领域里的应用。

在有些场合下，希望能缩短电动机的轴向尺寸，人们试图研发一种没有附加转子磁极位置传感器的直流无刷电动机。德国人米斯林格（Mieslinger）提出了采用电容移相实现换流的方法。在此基础上，德国人哈尼特司（Hanitsch）等人借助于数字环形分配器和过零鉴别器的组合来实现换流，而没有应用附加的位置传感器。

由于直流无刷电动机既具有交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等一系列优点，又具备直流电动机运行效率高、噪声低、调速性能好等诸多特点，故在

国民经济各部门、军工行业、航天、家用电器等方面都得到了广泛应用。直流无刷电动机本身涉及到多方面传统的机电技术，也包含着许多新技术，而且目前还在不断地有新技术融入其中。随着新型大功率器件的发展、永磁材料性能的改善、价格的降低、控制技术的应用，直流无刷电动机必将得到更大的发展。

本书以书后所列的参考文献为基础，结合了作者在教学和科研工作中的经验与学习心得编写而成，目的在于为工矿企业中的有关科技人员和初学者提供一本入门的参考读物。本书从直流电动机与直流无刷电动机的比较简介开始，着重介绍了直流无刷电动机的整体结构特点、工作原理、绕组构造、磁性材料，指出了直流电动机的“机械换向器”与直流无刷电动机的“电子换相器”的区别。文中对直流无刷电动机的矢量控制原理与应用也作了简要介绍。

由于作者水平有限及编写时间仓促，书中难免存在不妥和不足之处，恳请各位专家与广大读者批评指正。

编著者

2007 年 7 月

目 录



前言

第1章 直流有刷电动机与直流无刷电动机简介 1

- 1.1 直流电动机的工作原理与基本结构 2
 - 1.1.1 工作原理 2
 - 1.1.2 基本结构 3
- 1.2 直流无刷电动机的基本组成环节与工作原理 4
 - 1.2.1 基本组成环节 4
 - 1.2.2 基本工作原理 5
- 1.3 直流有刷电动机与直流无刷电动机的比较 7
 - 1.3.1 左手定则与转矩常数 7
 - 1.3.2 右手定则及反电动势常数 9
 - 1.3.3 换向与换相 10
 - 1.3.4 机械电刷与电子电刷的作用 11
- 1.4 直流无刷电动机的位置传感器 12
 - 1.4.1 电磁感应式位置传感器 12
 - 1.4.2 光电式位置传感器 13
 - 1.4.3 磁敏式位置传感器 14
 - 1.4.4 光电编码器式位置传感器 18
 - 1.4.5 旋转变压器 22
- 1.5 直流无刷电动机的运行特性和传递函数 27

第2章 直流无刷电动机转子磁极的永磁材料基本特性及磁路计算 32

- 2.1 有关磁的基本知识 32
 - 2.1.1 磁的基本现象 32
 - 2.1.2 磁场与磁感应强度 33
 - 2.1.3 磁通 34
 - 2.1.4 电流的磁效应 34
 - 2.1.5 磁场强度 36
- 2.2 磁滞回线和起始磁化曲线与去磁曲线 36
- 2.3 描述永磁材料特性的主要参数 37
 - 2.3.1 饱和磁场强度 H_s 38
 - 2.3.2 剩余磁感应强度 B_r 和矫顽力 H_c 38
 - 2.3.3 磁导率和回复直线 39
 - 2.3.4 磁能积 (BH) 和最大磁能积 (BH)_{max} 41
 - 2.3.5 凸度系数 γ 41
- 2.4 等磁能积曲线 42
- 2.5 几种常用永磁材料的特性及磁路结构 43
 - 2.5.1 铝镍钴合金永磁材料 43
 - 2.5.2 铁氧体永磁材料 44
 - 2.5.3 稀土永磁材料 46
- 2.6 去磁现象及其防止措施 48
 - 2.6.1 转子磁极磁性能调试中的去磁调整 48
 - 2.6.2 故障性去磁现象及其防

止措施	49
2.7 磁路及其基本定律	50
2.7.1 磁路的基本概念	50
2.7.2 磁路欧姆定律	52
2.7.3 磁路中的基尔霍夫定律	52
2.7.4 永磁磁路的等效磁路图	53
2.8 磁路计算	55
2.8.1 简单的磁路计算	55
2.8.2 简单磁路工作点的求法	57
2.8.3 带导磁体的永磁磁路的计算法	59
2.8.4 气隙磁导	62
第3章 直流无刷电动机绕组的结构和连接	64
3.1 直流无刷电动机磁场的简化	65
3.1.1 直流无刷电动机的磁路	65
3.1.2 电动机磁路的铁心磁滞损耗和涡流损耗	65
3.1.3 直流无刷电动机磁场的简化	66
3.2 定子绕组的构成原则、分类和相关基本知识	68
3.3 单层绕组	69
3.3.1 单层集中绕组与分布绕组	70
3.3.2 单层绕组的连接方式	75
3.4 双层绕组	78
3.4.1 双层绕组的特点与节距的选择	78

3.4.2 双层绕组的连接	80
3.4.3 单双层绕组	83
3.5 分数槽绕组	84
第4章 直流无刷电动机本体的设计	89
4.1 概述	89
4.1.1 额定值	89
4.1.2 技术要求	90
4.2 设计步骤	92
4.2.1 单个电动机设计的基本步骤	92
4.2.2 系列产品的设计步骤	92
4.3 主要尺寸与电磁负荷的关系	93
4.3.1 电磁负荷	93
4.3.2 主要尺寸与电磁负荷的关系	94
4.4 主要尺寸的选择	96
4.4.1 定子铁心内径 D_a 的选择	96
4.4.2 电磁负荷的选择	97
4.4.3 转子磁铁计算长度 L_a 的确定	99
4.4.4 转子长度与直径的比值 λ	100
4.5 极数的选择	101
4.6 定子绕组导线截面的选择	102
第5章 PWM 技术及电力半导体器件	105
5.1 脉冲宽度调制 (PWM) 技术	105
5.1.1 PWM 技术原理	105

5.1.2 正弦波脉宽调制 (SPWM)	106	7.3 PMSM 矢量变换控制	139
5.2 功率半导体器件	109	7.3.1 矢量控制原理	139
5.2.1 大功率晶体管	110	7.3.2 PMSM 矢量控制的稳态 分析	140
5.2.2 功率场效应晶体管	111	7.3.3 PMSM 矢量控制的动态 分析	142
5.2.3 绝缘门极晶体管	113	7.4 方波电流驱动的直流无刷电动 机数学模型及其矢量控制	144
5.2.4 GTR、P-MOSFET 和 IGBT 的特性比较	117	7.4.1 定子电压方程	144
5.2.5 智能功率模块	119	7.4.2 转矩方程	145
第6章 直流无刷电动机的电子换 相器	121	7.4.3 状态方程和等效电路	146
6.1 三相绕组直流无刷电动机主 回路的基本类型	121	7.4.4 方波电流驱动的直流无刷 电动机矢量控制	146
6.1.1 何谓电子换相器	121	7.5 直流无刷电动机矢量控制 系统简介	147
6.1.2 三相半控电路	122	7.5.1 正弦电流型 PMSM 矢量 控制系统	147
6.1.3 三相Y联结全控电路	123	7.5.2 方波电流型直流无刷电动 机矢量控制系统	148
6.1.4 三相△联结全控电路	126	7.6 直流无刷电动机的无位置 传感器控制	149
6.2 多相电动机换相举例	128	7.6.1 反电动势的模拟测 试法	150
6.2.1 二三通电方式	129	7.6.2 反电动势的数字测 试方法	153
6.2.2 五五通电方式	129	第8章 直流无刷电动机的应用 ...	157
6.2.3 五四通电方式	130	8.1 引言	157
第7章 直流无刷电动机的矢量控制 与无传感器控制	133	8.2 在肿瘤放射治疗中的应用	159
7.1 方波电流驱动和正弦波电流 驱动	133	8.2.1 适形调强放射治疗 ...	159
7.2 正弦波电流驱动的三相永磁 同步电动机数学模型	134	8.2.2 MLC (多叶电动光栅) 动 态调强叶片的运动模型	160
7.2.1 坐标变换或矢量变换	135		
7.2.2 定子电压方程	136		
7.2.3 转矩方程	137		
7.2.4 运动方程	139		

8.2.3	动态叶片调强的运动 控制策略	162
8.2.4	MLC 叶片的驱动技术	165
8.3	在数控机床上的应用	167
8.3.1	数控机床对伺服系统 的要求	167
8.3.2	增量型光电编码器 ...	169
8.3.3	直流无刷电动机磁极位置 的检出	172
8.3.4	直流无刷电动机伺服系统 工作原理	172
8.3.5	直流无刷电动机的矢量 控制	174
8.3.6	关于直流无刷电动机的 初始定向问题	176
8.4	在机器人驱动中的应用 ...	177
8.4.1	非伺服机器人与伺服控制 机器人	177

8.4.2	对机器人控制与驱动的 基本要求	179
8.4.3	机器人驱动技术	180
8.5	在家用电器中的应用	185
8.5.1	直流无刷电动机在空调器 中的应用	186
8.5.2	直流无刷电动机在电冰箱 上的应用	187
8.5.3	直流无刷电动机在洗衣机 中的应用	187
8.5.4	直流无刷电动机在吸尘器 中的应用	189
8.5.5	直流无刷电动机在其他 设备中的应用	189

附录	有关磁性材料磁特性表	190
----	------------------	-----

参考文献		195
------	-------	-----

第1章 直流有刷电动机与 直流无刷电动机简介

本书介绍的直流无刷电动机是直流有刷电动机的改进与发展。为了能更深入地理解直流无刷电动机的工作原理及特性,这里首先介绍直流有刷电动机的工作原理。在此基础上,找出二者之间的异同,就比较容易理解直流无刷电动机了。

常规的直流电动机(Conventional DC motor)就是有刷的直流电动机,简称为直流电动机。直流电动机是最早出现的电动机,在所有的执行电动机中,直流电动机的工作特性最好。与其他各类电动机相比,直流电动机的体积小、效率高、出力大、起动转矩大、过载能力强、动态特性好、控制容易、灵活、方便,因此广泛用在要求高的调速与位置控制系统中,在这一领域占有主导地位近百年之久。

随着科学技术的进步,直流电动机本身也得到了很快发展,出现了应用在不同领域中的众多品种,成为发展最快、变化最多的一种电动机。直流电动机的发展具有以下特点:

1. 采用永久磁铁代替励磁绕组

长期以来,直流电动机的励磁是由励磁绕组的电励磁实现的,但在20世纪60年代,特别是80年代以来,永磁材料发展十分迅速,性能大大提高,价格降低,在中小型的执行直流电动机中永磁式励磁得到了广泛地应用。永久磁铁取代电励磁绕组之后,除了具有电励磁式直流电动机良好特性之外,还具有省电、省铜、无励磁损耗、效率高、体积小、结构简单等优点。

2. 新结构、新品种的直流电动机

为适应不同领域内的技术要求,新型式的直流电动机不断地被开发出来,品种繁多,特性各异。例如快速响应的印刷绕组电枢电动机、线绕电枢电动机、无槽电枢电动机、杯形电枢电动机、盘式电动机、适宜做伺服驱动的大惯性直流电动机、适应于直接驱动并去掉减速齿轮的力矩电动机,还有产生直线运动的直流电动机等。

所有这些品种的电动机,都在不同的应用场合下发挥了独特的作用。

3. 无刷化

直流电动机由于具有优良的性能,所以在各个领域获得了广泛应用,在电力拖动领域,不论是作为功率变换还是执行运动命令的应用中,都获得了无可争辩的优势地位。直流电动机之所以具有优良的工作性能,主要原因是由于它存在电刷和整流子构成的换向器,实现了电动机电刷内外电流间的平滑变换与调控,即把外部电路的直流电通过换向器转换逆变成电枢绕组上的交流电,从而完成电能向机械能

的转换过程。也正是由于电刷和换向器之间在高速滑动接触中导电,才导致了直流电动机有着一系列致命的缺点。包括:接触不可靠、故障多、寿命短、需要经常保养维护、换向时的火花也会对邻近无线电设备造成干扰等。但是,直流电动机的优良性能,使它有着不可取代的地位。人们试图既要保持直流电动机的优良性能,又要去掉电刷和换向器所引发的一系列缺点,于是发展了直流无刷化的电动机。正是由于控制理论的突破,电力电子器件和电子技术的发展,使得直流电动机无刷化才得以实现。20世纪80年代中期以来,在工业先进国家,在执行电动机领域,已经出现了与有刷直流电动机一样优良性能的无刷电动机,并有代替有刷直流电动机的趋势。应该说明,这里所说的无刷化仅对电动机而言。



1.1 直流电动机的工作原理与基本结构

前面谈到,直流电动机品种很多,但其工作原理都是基于电磁相互作用,其特性也大致相同,只是结构形式因应用不同而异,但其基本组成结构也大致相同。以下以一个普通的直流电动机为例,来简要介绍其工作原理、结构组成及工作特性。

1.1.1 工作原理

所谓直流电动机,实际上是指直流电动机的电枢供电电源是直流电,而在电枢绕组中流过的电流却是交流的。它是利用换向器和电刷将直流电源的电流引入电枢绕组,并实现换向。

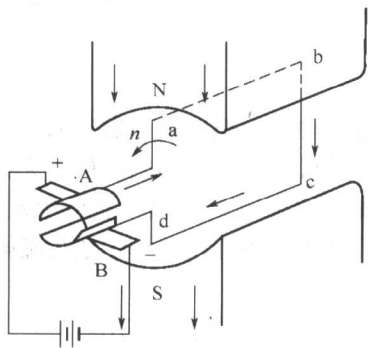


图 1-1 直流电动机的工作原理图

如图 1-1 所示为直流电动机的工作原理。线圈 ab—cd 的末端分别连在各自的换向片上,换向片又通过静止的电刷 A 与 B 和直流电源的两个电极相连。

当电动机转到如图 1-1 所示位置时,导体 ab 刚好在 N 极下方,导体 cd 在 S 极下方。直流电源正极经电刷 A 流入电枢线圈,在线圈内部电流方向是由 a 到 b,由 c 到 d,然后经电刷 B 返回到电源负极。如果导体所在处的磁通密度为 B ,导体长度为 l ,电流为 i ,根据磁力定律,这时导体受力为 $F = Bli$ 。受力方向

由左手定则判定,判定的结果为导体 ab 和 cd 受力产生的转矩均为逆时针方向。当电动机转子电枢,即线圈由上述位置转过 180° 时,这时导体 cd 便在 N 极下,导体 ab 在 S 极下。电流经电刷 A 由 d 端流入线圈,在线圈内部方向是由 d 到 c,由 b 到 a,经电刷 B 回到电源负极。根据左手定则,仍可判定导体 ab 和 cd 受力所产生转

矩为逆时针方向。由此可见,虽然导体内部的电流方向变了,但受力所产生的转矩方向不变,因此,转子受力,能连续旋转。

通过以上分析可以看出,在外电路中的电流方向保持不变,依照一个方向自电刷 A 流向电刷 B,但在线圈内部电流却是交变的。这在实质上是换向器将直流电逆变成交流电,将电能转变成机械能驱动负载做功的过程,即直流电动机的工作过程。

1.1.2 基本结构

直流电动机与其他电动机一样,由 3 个主要电磁部分组成:① 感应部分,用于产生励磁磁通;② 被感应部分,在这里产生能量变换,在电动机里是将电能变为机械能;③ 空气隙,位于电动机固定部分与旋转部分之间的空间。其他部分为结构附属部分,如电刷、机壳、转轴、端盖、轴承等。

直流电动机的感应部分就是磁极,产生励磁磁场。在电励磁的直流电动机里,励磁绕组绕在以软磁材料构成的磁极上。为了改善换向情况,在大容量电动机中,还设有两种附加磁极。位于主磁极之间的称为换向极;位于主极之中的称为补偿极,上面有补偿绕组。永磁直流电动机的励磁磁场是由永久磁铁建立起来的。图1-2所示是永磁直流电动机的结构示意图。

永久磁铁固定在磁极上,磁轭是磁通的外路径,因此磁轭必须是良好的导磁材料。磁轭可以是机座的一部分,也可以是单独的一个部件,然后与机座连接在一起。

直流电动机里被感应的部分包括电枢的换向器,属于转动部分。电枢是由电枢铁心和电枢绕组两部分组成。电枢铁心由电工钢片叠成,钢片上冲有齿槽。电枢铁心起着两个作用:① 形成主磁通磁路;② 安放电枢绕组。电枢绕组安放在叠好的铁心槽中。电工钢片的厚度一般为 0.2、0.35、0.5mm,片间彼此绝缘,以减小电枢磁路在磁场中旋转时感应涡流产生的损耗。涡流损耗和铁心中磁滞损耗将影响电动机效率,并引起电枢发热。

电枢绕组由许多完全相同的绕组元件所组成,绕组元件数和铁心上的槽数有关,绕组元件之间按一定规律连接起来。每个绕组元件可能是多匝线圈,也可能是单匝的,它的两个末端分别连到换向器的两个换向片上,各个元件是在换向片上互

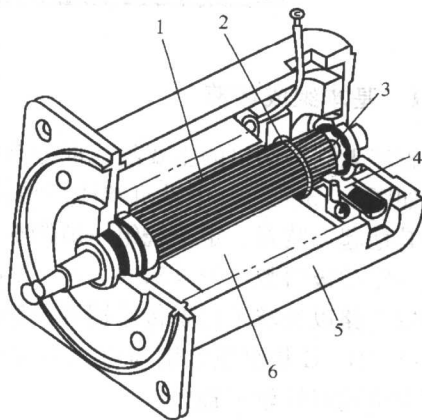


图 1-2 直流电动机结构示意图

- 1—转子（电枢）；2—电刷（负极）；3—换向器；
4—电刷（正极）；5—机壳；6—定子
（磁场用的永久磁铁）

相连接起来的。

换向器是使外加的直流电源引向电枢绕组，并使各绕组元件在不同的磁极下产生不同方向电流的部件，这个过程称之为换向。电刷使电枢由换向器和外电路接通。电刷的位置非常重要，它应该放在物理中心线上，使得绕组被分成的支路中线圈边总是在同一极性下。亦即在一个极下的导体总是流过同一方向的电流，从而总是产生同一方向的电磁转矩。电动机中发生的主要电磁过程，就是通过气隙进入电枢的主磁通和电枢电流完成的。没有进入电枢铁心的磁通部分，称为漏磁通。漏磁通应该尽量减小。

1.2 直流无刷电动机的基本组成环节与工作原理

1.2.1 基本组成环节

直流无刷电动机的主要组成部分有电动机本体、位置传感器与电子开关等3部分，如图1-3所示。电动机本体在结构上与永磁同步电动机相似，但没有笼形绕组和其他起动装置。定子绕组一般制成多相（三、四、五相等），转子由永久磁铁按一定的极对数（ $2p=2, 4, \dots$ ）组成，电子开关一般是由功率电子器件和它的控制电路以及转子位置传感器等组成。图1-3所示的电动机本体为2极三相。定子A、B、C相绕组分别与电力开关元件 V_1 、 V_2 、 V_3 相接。位置传感器的跟踪转子与电动机转轴相连接。

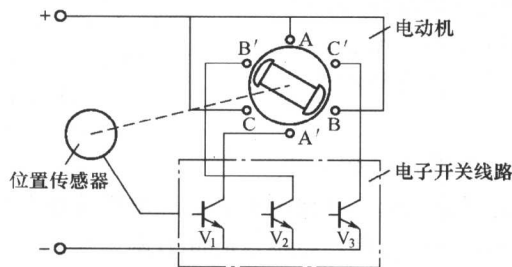


图 1-3 直流无刷电动机的组成原理图

定子绕组的某一相通电时，该电流与转子永久磁铁的磁极产生的磁场相互作用，从而产生转矩，驱动转子旋转；再由位置传感器将转子磁极位置信号变换成电信号，去控制电子开关线路，从而使定子各相绕组按一定顺序导通，定子相电流随转子位置的变化而按一定的顺序换相。由于电子开关线路的导通次序是与转子转角

同步的，因而起到了机械换向器的换向作用。

因此，所谓的直流无刷电动机，就其基本结构而言，可以认为是一台由电子开关线路、永磁同步电动机本体以及转子磁极位置传感器三者共同组成的“电子电动机系统”。其原理框图如图1-4所示。

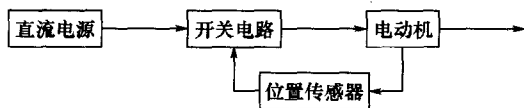


图 1-4 直流无刷电动机的原理框图

直流无刷电动机中的电子开关线路是用来控制电动机定子各相绕组的通电顺序和时间的，主要由功率逻辑开关单元和位置传感器信号处理单元两部分组成。功率逻辑开关单元是控制电路的核心，其功能是将电源的功率以一定的逻辑关系分配给电动机定子的各相绕组，以使电动机产生持续不断的转矩。而各相绕组的导通顺序和时间主要取决于来自转子位置传感器的信号。但位置传感器产生的信号要经过一定的逻辑处理后去控制功率开关。综上所述，组成直流无刷电动机的主要部件如图1-5所示。

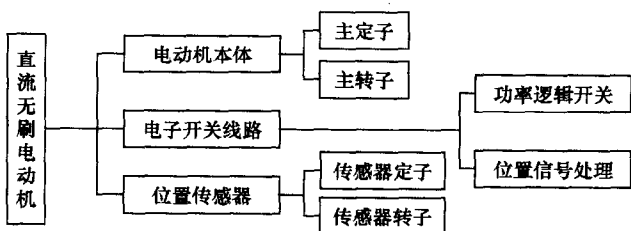


图 1-5 直流无刷电动机的组成框图

1.2.2 基本工作原理

直流电动机的结构历来都是电枢为转子，磁铁为定子，在气隙中产生励磁磁场，其电枢通电后产生感应磁场。由于电刷的换向作用，在直流电动机的运行过程中，这两个磁场的方向始终保持垂直，从而产生最大电磁转矩，驱动电动机不停运转。同时，由于这两个磁场间互为正交，理论上没有耦合作用，可以独立对电枢电流进行控制来调节电动机的运动速度，这是十分方便的。

在直流无刷电动机的情况下，为了实现无电刷换向，首先要做的是把一般直流电动机的电枢绕组安放在定子上，把永久磁铁放在转子上，这恰好与传统的直流电动机结构相反。但是，仅仅这样做还是不行，因为用一般的直流电源给定子上的各相绕组供电，只能产生固定磁场，它不能与运动中的转子磁铁所产生的永久磁场

相互作用,以产生单一方向的转矩驱动转子转动。所以,直流无刷电动机除了由定子和转子组成的电动机本体之外,还要有位置传感器、控制电路以及功率逻辑开关共同组成的换相装置,使得直流无刷电动机在运行过程中,定子绕组所产生的磁场和在转动中转子磁铁所产生的永磁磁场,在空间始终保持在 90° 左右的电角度。

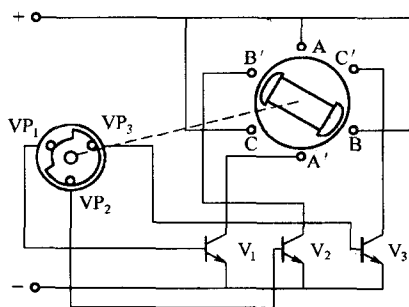


图 1-6 三相绕组直流无刷电动机原理
(半控桥型)

为了清晰地说明其工作原理,下面以电枢三相星接绕组半控桥电路为例来说明。图 1-6 所示为三相直流无刷电动机半控桥电路原理图。此处采用光电器件作为位置传感器,以 3 只功率晶体管 V_1 、 V_2 和 V_3 构成功率逻辑单元。

如图 1-6 所示,3 只光电器件 VP_1 、 VP_2 、 VP_3 的安装位置各相差 120° , 均匀分布在电动机一端。借助安装在电动机轴上的旋转遮光板(亦称截光器)的作用,使得从光源射来的光线依次照在各个光电器件上,并依照某一光电器件是否被照射到光线来判断转子的磁极位置。图 1-6 所示的转子位置和图 1-7a 所示的位置相对应。

由于此时光电器件 VP_1 被光照射,从而使功率晶体管 V_1 呈导通状态,电流流入绕组 $A-A'$, 该绕组电流同转子磁极作用后所产生的转矩使转子磁极按图中所示的顺时针方向运动。当转子磁极转到图 1-7b 所示的位置时,直接装在转子旋转轴上的旋转遮光板亦跟着同步旋转,并遮住 VP_1 而使 VP_2 受光照射,从而使晶体管 V_1 截止, V_2 导通,电流从绕组 $A-A'$ 断开而流入绕组 $B-B'$, 使得转子磁极继续朝箭头的方向转动,并带动遮光板同时朝顺时针方向旋转。当转子磁极转到图 1-7c 所示的位置时,此时旋转遮光板已经遮住 VP_2 , 使 VP_3 被光照射,导致晶体管 V_2 截止, V_3 导通,因而电流流入绕组 $C-C'$, 于是驱动转子磁极继续朝顺时针方向旋转,并重新回到图 1-7a 所示的位置。

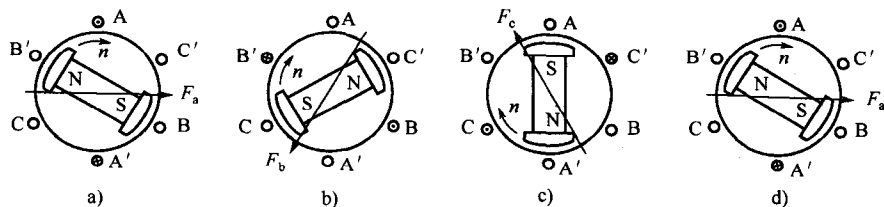


图 1-7 开关顺序及定子磁场旋转示意图

这样,随着位置传感器扇形片的转动,定子绕组在位置传感器 VP_1 、 VP_2 、 VP_3 的控制下,便一相一相地依次供电,实现各相绕组电流的换相。不难看出,在