

# 现代无刷直流永磁电动机的 原理和设计

叶金虎 编著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书以基本理论分析为依据,从工程设计和应用的观点出发,比较详尽地论述了无刷直流永磁电动机和自控式永磁同步电动机的结构特点、工作原理、基本概念和设计要点。在第1章中着重分析了电子换向(相)和电枢绕组的导通顺序、分数槽绕组、霍尔传感器件的应用、无转子位置传感器的无刷直流永磁电动机、电枢反应的去磁作用和以磁铁工作图为基础的电磁计算,并附有设计例题;在第2章中着重分析了永磁同步电动机的稳态运行、交流技术、正弦波脉宽调制(SPWM)、空间矢量脉宽调制(SVPWM)、无接触式旋转变压器的应用、磁场取向控制(FOC)、电枢反应的去磁作用和以相对单位坐标系内的磁铁工作图为基础的电磁计算,并附有设计例题;在第3章中着重分析了不同运动形式下的负载惯量和负载力矩的计算和归算方法、几种典型功率传输机构中的电动机估算实例和不同电动机特性的综合分析和比较。

本书可供从事无刷直流永磁电动机和自控式永磁同步电动机的科研、开发、设计、制造、测试和应用等领域的科技人员参考,也可作为高等学校电机和自动控制等专业的本科生、研究生和教师的自学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代无刷直流永磁电动机的原理和设计/叶金虎编著. —北京:科学出版社, 2007

ISBN 978-7-03-019444-2

I. 现… II. ①叶… III. IV.

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第000000号

责任编辑:鞠丽娜 / 责任校对:刘彦妮

责任印制:吕春珉 / 封面设计:三函设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2007年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2007年8月第一次印刷 印张:20 1/2

印数:1—4 000 字数:489 000

定价:48.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62138978-8002 (BT08)

# 前 言

本书所述的现代无刷直流永磁电动机是指由直流电源供电的，或由交流电源经过整流后的直流电源供电的，并具有传统直流电动机运行性能无刷直流永磁电动机（BLDCM）和自控式永磁同步电动机（PMSM）。近 30 年来，随着永磁材料、微电子器件、电力电子器件、变流技术、电机技术、计算机技术及其控制理论的进步，现代无刷直流永磁电动机得到了很大的发展，使之被广泛地用于机床、制纸机械、纺织机械、汽车、机器人、视听设备、信息情报机械、计算机外部设备、医疗器械和家用电器等领域，尤其在兵器、航海、航空和航天等高科技领域内，现代直流无刷永磁电动机已成为完成各种特殊功能的伺服驱动机构的核心部件。

本书共分 3 章。第 1 章：无刷直流永磁电动机（BLDCM）。本章比较系统地描述了无刷直流电动机的工作原理、转子位置传感器和霍尔元件的配置、分数槽电枢绕组、含有永磁体的磁路计算、等效磁路图、永磁体的最佳工作点和磁铁工作图、电枢反应和电路系统的计算，对不同气隙磁场波形下的参数计算公式进行了推导和说明，并附有两个设计例题，以供参考。本章是在《无刷直流电动机》一书的基础上编写的。该书是由张颀明、施民生、徐思海、崔海大和作者一起，在总结多年从事永磁电机和无刷直流电动机的科研工作的基础上，于 1982 年编写而成，该书是我国第一本论述无刷直流永磁电动机的专著（科学出版社出版）。在过去的二十余年里，该书深受教育、科研和生产等企事业部门的科技人员的欢迎，实用效果显著，起到了先导作用。现根据当前新材料、新工艺、新结构和新技术的具体发展情况，作者在《无刷直流电动机》一书的基础上重新整理编写，其目的是：一方面使内容更为贴切，满足读者的要求；另一方面是对往年一起工作的同志的回忆和纪念。第 2 章：自控式永磁同步电动机（PMSM）。本章着重描述了永磁同步电动机的典型结构和运行机制、三相整流/逆变器和脉宽调制、坐标变换和磁场取向控制、主要尺寸的确定、等效磁路图、相对单位坐标系内的磁铁工作图和主要参数计算，并附有两个设计例题，以供参考。第 3 章：电动机的应用。本章着重描述了驱动系统的基本运动方程式、惯量计算、负载惯量和负载力矩的归算、几种典型的功率传输机构和负载运动方式、电动机的估算、各类电动机的比较和选用，以使用户能合理地选用不同的电动机；同时，希望电动机和控制器设计人员能更正确地理解用户提出的技术要求，从而更合理地设计和制造不同的电动机，以便更好地满足用户的需求。本书附录有：物理单位换算、永磁材料的特性曲线和参数、常用软磁材料的特性曲线和参数、电枢绕组的导线规格、常用三角函数公式和平面几何定理等，以供有关工程技术人员参考和选用。

五六十多年前，电机、电子、电力传动和自动控制等专业基本上是各自独立的学科，每一门学科都有自己的专业理论、产品、实验室、工厂和产业。随着科学技术的进步和社会的发展，各门学科内部不断地分化，各门学科之间又不断地相互渗透和融合，于是便产生了诸多新的学科、新的产品和新的产业。当然，新学科、新产品和新产业的产生

又进一步推动了科学技术的进步和社会的发展。现代直流无刷永磁电动机就是这种典型的新产品之一，是电机、电子、计算技术和控制技术的有机结合，它们在形式上虽由电动机本体和控制器（含智能化软件）两部分所组成，实则两者是相互依存、不可分割的统一体。目前，在国内大多数从事研发和生产无刷直流永磁电动机（BLDCM）和自控式永磁同步电动机（PMSM）的企事业单位里，技术人员的分工不甚合理，往往出现这样的情况：分管电动机本体的人员，对控制器的工作原理不甚了解；而分管控制器的人员，对电动机本体的运行机制不甚了解。这种机构设置、人员状态和工作理念严重阻碍了产品性能的提高、新产品的开发和新产业的发展。本人愿年轻的工程技术人员，勤学勤思，顺应现代科技和经济社会的发展，突破旧的界限，建立新的体系，在科学实验和生产活动中创造成绩，为社会发展作出贡献。

近 10 年来，中国电子科技集团公司第二十一研究所前任所长袁海林十分重视无刷直流永磁电动机和自控式永磁同步电动机的发展，具体领导和组织了多项研究开发工作，取得了显著的成绩，从而为本书的撰写创造了良好的理论和实践的基础。在撰写本书过程中，我们还得到了现任所长施进浩博士的关怀和有力支持；在技术上，得到了王家祥、陆国林、高兰香、李定华、何澄元、张东宁、查斌、徐刚等高级工程师的帮助。在具体编辑过程中，得到了解渊、暴杰、杨雅军和姚琼等工程师的热情相助，在此一并致谢。

在本书的撰写过程中，除依据作者从事科研工作的收获和经验外，还参考了不少相关的书籍和论文。现将这些书籍和论文编入本书最后所附的参考文献中，以便读者了解本书的传承和深入研究某些感兴趣的问题，同时也表示本人对这些书籍和论文作者的真诚感谢。

本书由上海交通大学金如麟教授仔细审阅，并提出了许多宝贵的意见。哈尔滨工业大学陆永平教授对书稿的一些基本概念、总体结构、内容把握等方面提出了不少宝贵的见解，在此表示衷心的感谢。

由于作者知识水平和实践所限，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。

作 者

2006 年 10 月

于中国电子科技集团公司第二十一研究所

# 目 录

绪论	1
第 1 章 无刷直流永磁电动机	4
1.1 无刷直流永磁电动机的工作原理	4
1.2 无刷直流永磁电动机的结构	5
1.3 电枢绕组的连接方式和电子换向（相）	7
1.3.1 电枢绕组的连接方式	7
1.3.2 电子换向（相）	8
1.4 分数槽电枢绕组	14
1.4.1 分数槽绕组的基本概念	15
1.4.2 分数槽绕组的对称条件	16
1.4.3 分数槽电枢绕组的连接方法	16
1.5 转子位置传感器（霍尔磁敏传感器）	22
1.5.1 霍尔器件的工作原理	22
1.5.2 霍尔器件的分类	24
1.5.3 霍尔器件的空间配置	27
1.5.4 霍尔转子位置传感器的制作	28
1.5.5 霍尔转子位置传感器在无刷直流永磁电动机中的工作情况	33
1.6 无刷直流永磁电动机的电枢反应	37
1.7 无刷直流永磁电动机的正反转	38
1.7.1 无刷直流永磁电动机正反转的原理	39
1.7.2 无刷直流永磁电动机实现正反转的方法	41
1.8 无刷直流永磁电动机的驱动控制实施例	43
1.9 无转子位置传感器的无刷直流永磁电动机	47
1.9.1 基本数学方程式	47
1.9.2 利用反电动势的过零点来测转子位置	49
1.9.3 自启动问题	54
1.9.4 无转子位置传感的无刷直流永磁电动机的基本框图	56
1.9.5 控制软件的基本结构	56
1.10 永磁体磁路系统的设计	57
1.10.1 永磁材料的基本特性	58
1.10.2 无刷直流永磁电动机的磁路结构与等效磁路图	64
1.10.3 磁铁工作图	73
1.10.4 含有永磁体的磁路计算的特点	75

1.11	电路系统的计算	78
1.11.1	电枢绕组和电子换相(向)电路形式的选择	78
1.11.2	基本计算公式的推导	79
1.11.3	电路参数 $w_\phi$ 、 $r_\phi$ 和 $q_{CU}$ 的计算	94
1.12	设计举例	96
<b>第2章</b>	<b>自控式永磁同步电动机(PMSM)</b>	<b>122</b>
2.1	永磁同步电动机的典型结构	123
2.2	永磁同步电动机的典型等效磁路图	124
2.3	永磁同步电动机的电压平衡方程式和向量图	126
2.4	稳态电磁参数	128
2.5	永磁同步电动机的稳态运行性能	135
2.5.1	永磁同步电动机稳态运行时的主要技术经济指标	135
2.5.2	电动机运行状态与发电机运行状态之间的可逆转换	138
2.5.3	损耗和效率	139
2.6	自控式永磁同步电动机	141
2.6.1	基本工作原理	142
2.6.2	变流技术	144
2.6.3	正弦脉宽调制(SPWM)	167
2.6.4	空间矢量脉宽调制(SVPWM)	174
2.6.5	转子位置传感器(无接触式旋转变压器)	189
2.6.6	自控式永磁同步电动机的磁场取向控制	198
2.7	自控式永磁同步电动机的设计	211
2.7.1	定转子铁心结构的选择	211
2.7.2	主要材料的选用	214
2.7.3	不同充磁方法的考虑	215
2.7.4	主要尺寸的决定	216
2.7.5	永磁同步电动机经受到的最大去磁作用	216
2.7.6	相对单位坐标系内的永磁同步电动机的磁铁工作图	221
2.7.7	校验转子永磁体的尺寸	228
2.8	设计例题	232
<b>第3章</b>	<b>电动机的选用</b>	<b>255</b>
3.1	驱动系统的稳态运行特性	255
3.1.1	电动机稳态运行时的基本电气方程式	255
3.1.2	电动机稳态运行时的机械特性	256
3.1.3	驱动系统的基本机械运动方程式	257
3.2	驱动系统的分析计算	257
3.2.1	惯量的计算	257
3.2.2	负载力矩和负载惯量的归算	259
3.2.3	五种典型的功率传输机构	260

3.2.4	负载惯量 $J_L$ 和电动机惯量 $J_M$ 的匹配	265
3.2.5	无刷直流永磁电动机和自控式永磁同步电动机的技术规格	268
3.2.6	电动机的估算实例	270
3.3	综合分析和比较	279
3.3.1	整体式电动机与分装式电动机的比较	280
3.3.2	内转子结构与外转子结构的比较	280
3.3.3	整体式控制器与分装式控制器的比较	281
3.3.4	不同逆变器的比较	282
3.3.5	不同控制方法(模式)的比较	283
3.3.6	开环控制与闭环控制的比较	286
3.3.7	二象限控制与四象限控制的比较	287
3.3.8	8-线无刷直流永磁电动机与2-线无刷直流永磁电动机的比较	288
3.3.9	无刷直流永磁电动机(BLDCM)与自控式永磁同步电动机(PMSM)的比较	289
3.3.10	无刷直流永磁电动机与有刷直流永磁电动机的比较	290
附录 I	常用物理单位换算	292
附录 II	常用软磁材料的特性曲线和参数	296
附录 III	永磁材料的特性曲线和参数	304
III.1	铝镍钴永磁	304
III.2	钕铁硼永磁体	305
III.3	钕铁硼永磁材料	306
附录 IV	电枢绕组的导线规格	310
附录 V	常用三角函数公式和平面几何定理	312
V.1	三角函数公式	312
V.2	平面几何定理	314
	主要参考文献	320

## 绪 论

众所周知，交流同步电动机具有良好的运行性能，但其启动性能差；交流感应电动机具有结构简单、运行可靠的特点，但其调节性能差；直流电动机因其具有良好的调节性能和启动性能而被产业界广泛地应用。但是，对于有刷直流电动机而言，由于存在电刷/换向器的机械接触机构，导致造价高，并产生了换向火花、电磁干扰、寿命短和可靠性等问题，从而又限制了它的使用范围。

长期以来，人们希望能够在保持有刷直流电动机良好调节性能和启动性能的前提下，消除其不足之处。20世纪五六十年代，微电子器件和电力电子器件方面的进步和成果为实现这种理想创造了必要的条件。经过较长时间的摸索，人们终于用电子换向代替了机械换向；把原先处于电动机内部的旋转电枢转变成处于外部的静止电枢；把原先处于电动机外部的静止磁场转变成处于内部的旋转磁场，从而使有刷直流电动机转变成了无刷直流永磁电动机（BLDCM）。

无刷直流永磁电动机（BLDCM）是在有刷直流电动机基础上发展起来的。宏观而言，无刷直流永磁电动机和有刷直流电动机基本上具有相同的运行机理：施加在电动机上的电压都是恒定不变的直流电压，输入电动机的电流都是直流电流，作用在电枢线圈（又可称元件）上的电压极性和通过电枢线圈的电流方向都是交变的，电枢线圈内的感应电动势的波形基本上是相似的，方向都是交变的。因此，我们对两者持有的设计思路和设计方法基本上是一致的，只是某些具体的计算公式略有不同。

无刷直流永磁电动机（BLDCM）和有刷直流电动机虽然具有相同的运行机理，但在运行性能方面存在着一定的差异：有刷直流电动机电枢绕组的元件数和换向器的换向片数多于无刷直流电动机电枢绕组的相数；在运行过程中，有刷直流电动机的磁极磁场与电枢磁场始终处于正交状态，而无刷直流电动机的磁极磁场与电枢磁场在某一角度位置范围内变动，正交状态仅只是其中的一个瞬时位置。因此，在其他条件相同的情况下，在运行过程中，无刷直流电动机的力矩脉动要大于有刷直流电动机的力矩脉动；无刷直流电动机的电磁力矩要小于有刷直流电动机的电磁力矩。

交流永磁同步电动机内部存在着两个磁场：一个是电枢磁场，另一个是由转子永磁体产生的磁极磁场。当三相电枢绕组内通入三相电流时，便在定子内腔的气隙内产生一个旋转的电枢磁场。电枢磁场的旋转速度  $n_c$  (r/min) 取决于电动机的磁极数  $2p$  和通入电流的频率  $f$  (Hz)，它们之间有如下的关系式：

$$f = \frac{pn_c}{60}$$

当定子电枢磁场以速度  $n_c$  朝某一方向旋转时，转子磁极磁场在一定条件下就跟着以速度  $n$  旋转。我们把转速  $n_c$  称为同步速度，把转子磁极磁场的转速  $n = n_c$  时的运行状态称为同步运行状态。所谓“同步”就是转子磁极磁场的旋转转速与定子电枢磁场的旋转速度同步，亦即是电动机的旋转速度与供电电压的频率同步。如果交流电网通过整流器/逆变器环节给交流永磁同步电动机供电，同时在交流永磁同步电动机的转轴上安装一个

能够检测出转子磁极位置的传感器,利用其输出信号来控制给电动机三相电枢绕组供电的逆变器的输出电压的频率,当电动机的转速变化时,逆变器的输出电压的频率也跟着变化。这意味着:在此情况下,电动机的供电电压的频率与转子的旋转速度实现了“同步”。可以把这种“同步”称为自控式同步或自同步,把这种类型的交流永磁同步电动机称为自控式永磁同步电动机或自同步永磁同步电动机(PMSM)。

1972年德国工程师针对交流电动机运行特性的调节和控制,提出了坐标变换和磁场取向控制(或称矢量控制)的方法,从而为提高交流电动机的调控性能和拓展应用范围创造了新天地。就交流无刷永磁同步电动机而言,矢量控制的本质是:把定子 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 静止坐标系中的电枢电流向量 $\dot{i}_s$ (或磁势向量 $\dot{F}_a$ 和磁通向量 $\dot{\phi}_a$ ),通过坐标变换的方法,将其转换到以转子磁极为参考的 $d$ 、 $q$ 旋转坐标系中的两个分量 $\dot{i}_{sd}$ 和 $\dot{i}_{sq}$ 。变换后的定子电枢电流的两个分量相对转子磁极磁场是静止不动的,它们之间没有相对运动。变换后的定子电枢电流的直轴分量 $\dot{i}_{sd}$ 对转子磁极磁场起到增磁或去磁的作用;变换后的定子电枢电流的交轴分量 $\dot{i}_{sq}$ 和转子磁极磁场相互作用产生旋转电磁力矩。因此,可以把 $\dot{i}_{sd}$ 称为磁场分量,而把 $\dot{i}_{sq}$ 称为力矩分量。这时,实际上已经把原本静止坐标系中的交流永磁同步电动机转变成了旋转坐标系中的“直流永磁电动机”。我们只需根据系统对 $\dot{i}_{sd}$ 和 $\dot{i}_{sq}$ 的大小需求,采用正弦脉宽调制(SPWM)技术或空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术来调节定子电枢电流向量 $\dot{i}_s$ 幅值和相位,就可以达到调控自控式永磁同步电动机的力矩和转速的目的。

一般交流永磁同步电动机是在微电子器件、电力电子器件、变流技术、计算技术和现代控制技术的支持下,实现无刷自同步,即把一般交流永磁同步电动机转变成为自控式永磁同步电动机,获得与传统直流电动机一样良好的调节和启动性能;但是,电动机本体内部的电磁关系和运行机理基本上没有变化。因此,一般交流永磁同步电动机的设计理念 and 计算方法基本上适用于自控式永磁同步电动机,只是设计人员必须根据不同的技术要求,采取不同的实施策略和方案。

自控式永磁同步电动机(PMSM)与无刷直流永磁电动机(BLDCM),就电动机本体而言,基本上具有一样的结构:三相电枢绕组设置在定子上,永磁体磁极设置在转子上。在一般情况下,我们把采用非桥式逆变电路或 $120^\circ$ 导通型的三相半桥逆变电路作为驱动电源,给电动机提供矩形波直流驱动电压;一般情况下,电动机运行时,三相电枢绕组中一相一相轮流接通或两相两相轮流接通,在工作气隙内产生“跳跃式”旋转磁场的永磁电动机称为无刷直流永磁电动机,简称无刷直流电动机。在无刷直流永磁电动机中,希望能够获得近似于梯形波的气隙磁场,以便减小电动机运行时出现的力矩脉动;把采用 $180^\circ$ 导通型的三相半桥逆变电路作为驱动电源,借助正弦调制和空间矢量调制技术,给电动机提供脉宽调制的交流驱动电压;电动机运行时,三相电枢绕组同时接通,在电枢绕组内流过接近正弦波的交流电流,在工作气隙内产生“连续式”旋转磁场的永磁电动机称为自控式永磁同步电动机。在自控式永磁同步电动机中,希望能够获得近似于正弦波的气隙磁场,以便减小电动机运行时出现的力矩脉动。

目前,各种类型的永磁电动机在国民经济的各个领域,例如在家用电器、情报信息

---

机械、汽车工业、造纸工业、纺织工业、精密机床工业和军事工业等制造领域内得到了广泛的应用，并正处于大力发展的阶段。本书将着重分析和深入研讨无刷直流永磁电动机和自控式永磁同步电动机的基本理论、设计方法和它们的选用，希望对在此领域内从事设计、制造和应用的工程技术人员有所帮助，并从中有所受益。

# 第 1 章 无刷直流永磁电动机

随着永磁材料和功率电子元器件的不断进步，无刷直流永磁电动机得到了快速的发展，它们被广泛地用于工业、农业、国防、航空航天、现代科技和日常生活的各个领域。因此，在电机技术领域内，合理正确地设计无刷直流永磁电动机就成为一个越来越重要的课题。

## 1.1 无刷直流永磁电动机的工作原理

在有刷直流永磁电动机中，电枢绕组设置在转子上，定子永磁体在气隙内形成激磁磁场。根据物理学定理，在此情况下，如果迫使电流在电枢绕组的某一根导体中流动，就会产生一个作用于该导体的电磁力，其表达式为

$$F = k_1 B l i \quad (1.1)$$

式中， $F$  为力 (N)； $k_1$  为一个常数； $B$  为气隙磁通密度 (T)； $l$  为导体的长度 (m)； $i$  为导体内的电流 (A)。

电枢绕组由多个线圈（或称为元件）所组成，每个线圈又由若干线匝所组成。如果电枢绕组的总串联导体数为  $N$ ，且  $N > 1$ ，并携带同样的电流，则电磁力的量值为

$$F = k_2 B N l i \quad (1.2)$$

式中， $k_2$  为一个常数。

在电动机内，作用在导体上的电动力对转子中心轴线形成一个力矩，迫使转子围绕中心轴线旋转。旋转电磁力矩的量值为

$$M = k_3 R B N l i \quad (1.3)$$

式中， $M$  为电磁力矩 (N·m)； $k_3$  为一个常数； $R$  为导线所处位置相对转子中心轴线的半径 (m)。

在有刷直流永磁电动机中，定子主要由永磁体磁极、导磁轭和电刷构件所组成，转子主要由电枢绕组和换向器所组成。电枢绕组按一定的规律与换向器相连接，两个相邻线圈之间存在一定的角位移。假说，处在 N 极下的某一线圈从  $0^\circ$  电角度位置开始通电，转子便开始旋转，该线圈内的电流在气隙磁场内产生的旋转电磁力矩从 0 值开始由小到大，再由大变小，当转子转至  $180^\circ$  电角度时，该线圈产生的旋转电磁力矩又回到 0 值。这时，该线圈离开了 N 极，进入 S 极下面，该线圈内的电流方向被自动地切换（开关）成相反的方向。开关动作是借助若干个电刷和一个换向器的机械结构来实现的，这种电枢线圈内电流方向的变换被称之为机械换向。这样，在有刷直流电动机的某一磁极下，虽然线圈导体在不断地更替，但只要外加电压的极性不变，线圈导体中流过的电流方向始终不变，作用在电枢上的电磁转矩的方向始终不变，电动机的旋转方向也将始终不变，这就是有刷直流电动机的机械换向过程的本质。

在无刷直流永磁电动机中，电枢绕组被设置在定子上，永磁体磁极被设置在转子上。

定子各相电枢绕组相对转子永磁体磁场的位置，由转子位置传感器通过电子方式或电磁方式所感知；并利用其输出信号，通过电子换向电路，按照一定的逻辑程序去驱动与电枢绕组相连接的相应的功率开关晶体管，把电流开关或换向到相应的电枢绕组。随着转子的转动，转子位置传感器不断地发送出信号，致使电枢绕组不断地依次通电，不断地改变通电状态，从而使得在某一磁极下的线圈导体中流过的电流方向始终不变，这就是无刷直流永磁电动机的无接触式电子换向过程的实质。

我们可以设想：在有刷直流永磁电动机中，如果把原先处于电动机内部的旋转电枢翻出来变成定子，把所有被连接在机械换向器上面的电枢绕组的引线头抽出来，并且给每一个引线头提供一个功率晶体管开关；而把原先处于外部的静止永磁体移入电动机的内腔变成转子，就可以把一台有刷型直流永磁电动机变换成一台无刷型直流永磁电动机。但是，这种实施方法必须包含大量的功率晶体管开关元件和与之相适应的转子位置传感器，就目前科技水平而论，这种方法很难实施，或者说还没有实用价值。因此，在当前的无刷直流永磁电动机中，定子电枢采用类似于一般交流电动机中的三相绕组，借助转子位置传感器检测出转子永磁体磁场与定子电枢绕组三相轴线之间的相对空间位置，通过逻辑信号处理和控制在，来实现定子电枢三相绕组的电子换向。

## 1.2 无刷直流永磁电动机的结构

首先，无刷直流永磁电动机可以制作成整体式或分装式两种类型的结构。整体式电动机提供了包括轴承、转轴、壳体和固定装置等在内的全套电动机装置。另外，电动机制造公司能够根据用户的具体要求，提供特殊的壳体。例如，可以把电动机的安装法兰铸造成特殊的结构形状。整体式结构电动机除了便于用户安装和维修外，还可以为用户节省入厂登记管理、存储和装配调试等劳力和费用。

分装式结构为无壳体的或无框架的电动机。电动机制造公司根据用户的具体要求，只提供电动机的有关零部件。电动机的有关零部件全部由用户直接把它们封装入最终产品内。这样，可以消除联轴节和某些机械构件，避免引入不希望的机械谐振，以便使最终产品具有结构紧凑、系统的伺服频带更宽和刚度更高等优点。

无刷直流永磁电动机又可以制作成内转子式、外转子式和双定转子式等类型的结构，分别介绍如下：

### (1) 内转子式结构

一般而言，电动机的定子在外面，转子在里面。在传统的有刷直流永磁电动机中，定子磁场在外面，转子电枢在里面。无刷直流永磁电动机出现后，使电枢从里面走到外面，由转子变成了定子。这种结构称之为“内转子结构”，如图 1.1 所示。

### (2) 外转子式结构

在实际使用中，有时为了满足某些电子机械的特殊技术要求，把无刷直流永磁电动机的定子电枢做在里面，而把带永磁体的转子做在外面，我们把这种结构称之为“外转子结构”，或称之为“内定子结构”，如图 1.2 所示。

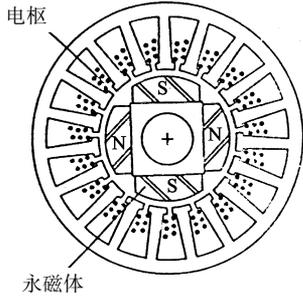


图 1.1 内转子结构

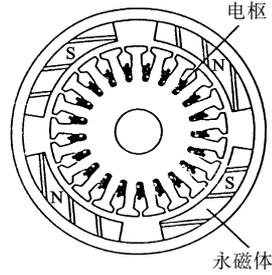


图 1.2 外转子结构

### (3) 双定转子式结构

双定转子式结构实际上是在内部被相互套配的两台电动机，它具有两个转子、两个定子和两个工作气隙，外面的一台电动机是外转子式结构，里面的一台电动机是内转子式结构。根据内外转子上永磁体的不同配置，又有 N-N 型和 N-S 型两种结构，分别如图 1.3 和图 1.4 所示。

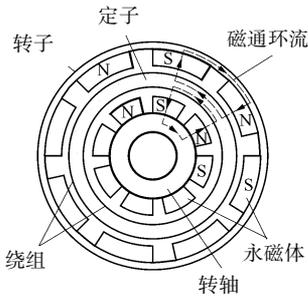


图 1.3 N-N 型双定转子式结构

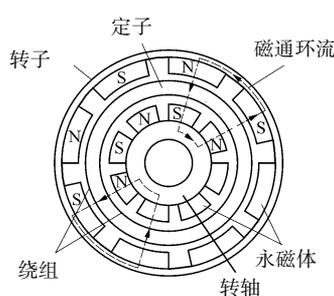


图 1.4 N-S 型双定转子式结构

在 N-N 型结构中，电枢绕组为背对背绕制的环形线圈，具有一个公共的定子磁轭。内外永磁体的 N 极发出的径向磁通，各自通过内外气隙，各自穿过环形电枢线圈，进入公共的定子磁轭，再各自穿出背对背绕制的环形电枢线圈，各自通过内外气隙，各自到达内外永磁体的 S 极，然后内外径向磁通经过内外转子磁轭，分别与内外起始永磁体的 N 极闭合。在这种结构类型的电动机中，由于相对内部气隙表面的电枢电流和磁通方向和相对外部气隙表面的电枢电流和磁通方向是相反的，所以由电枢线圈内流过的电流和永磁体产生的磁通之间的相互作用在内外气隙中所产生的内外电磁切向力的方向是一致的。这意味着：电动机的总电磁力矩等于内部电动机的电磁力矩和外部电动机的电磁力矩之和。因此，这种具有双定转子、径向磁通和环形电枢线圈结构形式的无刷直流永磁电动机，能够获得较高的力矩密度和功率密度，在许多驱动系统中，尤其在宇航技术领域内，必将得到广泛的重视和应用。

在 N-S 型结构中，外部永磁体的 N 极发出的径向磁通，通过外部气隙，穿过电枢线圈，进入内部气隙，到达内部永磁体的 S 极，经过内转子磁轭，到达内部永磁体的 N 极；内部永磁体的 N 极发出的径向磁通，通过内部气隙，穿过电枢线圈，进入外部气隙，到达外部永磁体的 S 极，再经过外转子磁轭，然后与外部起始永磁体的 N 极闭合。因此，

在 N-S 型结构中，不需要定子磁轭。有时采用非磁性支架，也仅是为了增加电枢的机械强度。在 N-S 型结构中，电枢绕组不能采用背对背绕制的环形线圈，而应采用一套一般形式的叠绕组或波绕组。

### 1.3 电枢绕组的连接方式和电子换向（相）

无刷直流永磁电动机的电枢绕组与一般交流电动机的定子绕组相类似，基本上有星形连接绕组和封闭式连接绕组两类。电子换向（相）电路一般有桥式（双极性：bipolar）和非桥式（单极性：unipolar）两类。不同连接方式的电枢绕组与不同电子换向（相）电路的组合是多种多样的。

#### 1.3.1 电枢绕组的连接方式

##### (1) 星形连接绕组

星形连接绕组是把所有相绕组线圈的首端或尾端连接在一起；与之相配合的电子换向（相）电路可以是桥式线路，也可以是非桥式线路。图 1.5 (a) 和 (b) 为星形绕组与桥式线路的组合，图 1.5 (c) 和 (d) 为星形绕组与非桥式线路的组合。

##### (2) 封闭式连接绕组

封闭式连接绕组是由各相绕组线圈组成封闭的形式，即把第一相绕组线圈的尾端与第二相绕组线圈的首端相连接，再把第二相绕组线圈的尾端与第三相绕组线圈的首端相连接，依次类推，直至最后一相绕组线圈的尾端又与第一相绕组线圈的首端相连接。图 1.5 (e) 为三相封闭式连接绕组与桥式线路的组合，图 1.5 (f) 为四相封闭式连接绕组与桥式线路的组合。

##### (3) 特殊连接的绕组

图 1.5 (g) 和 (h) 为两种特殊的电枢绕组与电子换向（相）电路组合的例子。

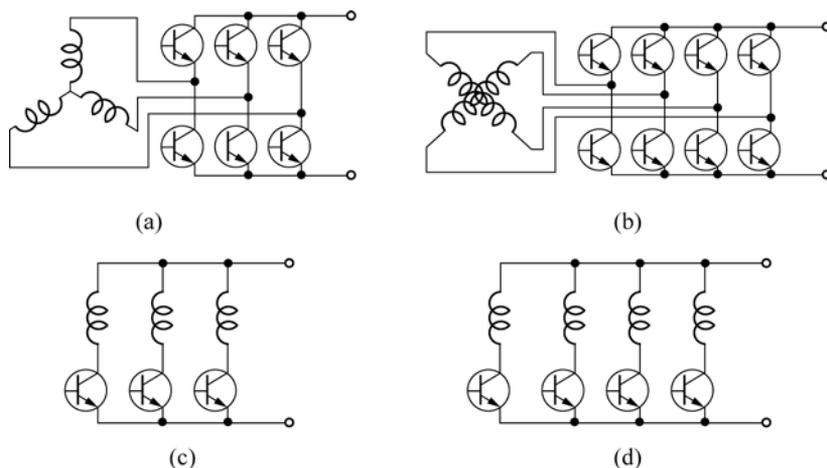


图 1.5 绕组的连接方式

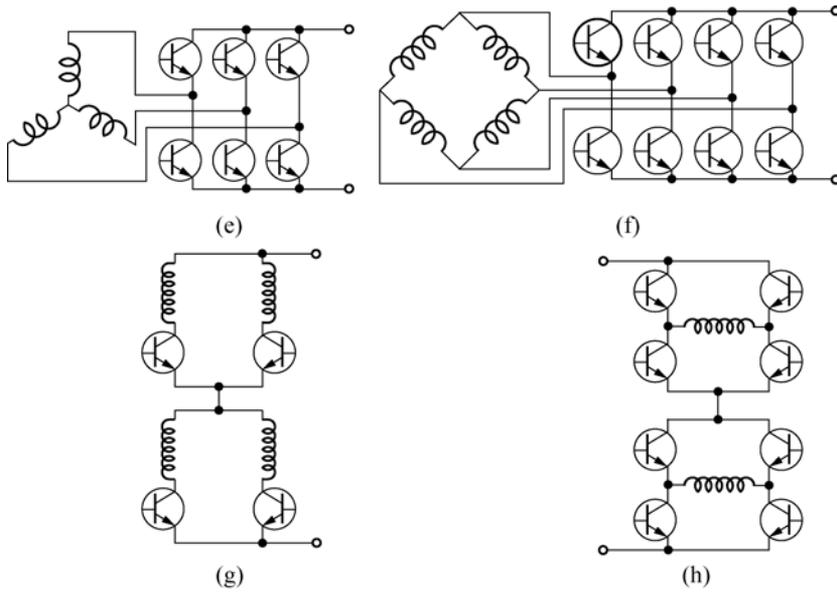


图 1.5 绕组的连接方式 (续)

### 1.3.2 电子换向 (相)

换向 (相) 又可以称之为“换流”。在无刷直流永磁电动机中，来自转子位置传感器的信号，经处理后按照一定的逻辑程序，驱使某些与电枢绕组相连接的功率开关晶体管在某一瞬间导通或截止，迫使某些原来没有电流的电枢绕组内开始流通电流，某些原来有电流的电枢绕组内开始关断电流或改变电流的流通方向，从而迫使定子磁状态产生变化。我们把这种利用电子电路来实现电枢绕组内电流变化的物理过程称为电子换向 (相) 或“换流”。每“换流”一次，定子磁状态就改变一次，连续不断地“换流”，就会在工作气隙内产生一个跳跃式的旋转磁场。

电子换向 (相) 或“换流”是无刷直流永磁电动机的关键技术之一，只有正确地进行“换流”，才能保证无刷直流永磁电动机可靠地运行。下面以电磁式转子位置传感器为例来比较详细地分析无刷直流永磁电动机几种典型的电枢绕组的电子换向 (相) 或“换流”过程。

#### 1. 星形电枢绕组的电子换向 (相) 过程

这里，我们把星形电枢绕组的电子换向 (相) 过程分成非桥式电子换向 (相) 电路和桥式电子换向 (相) 电路两种情况来分析。

##### (1) “三相星形非桥式”连接的电子换向 (相) 过程

图 1.6 是“三相星形非桥式”连接的电子换向 (相) 电路的原理图。图中左边是电磁式转子位置传感器的示意图，它的固定部分由高频铁氧体磁心和六个线圈所组成。六个线圈中，有三个线圈串联作为原边激磁线圈，另外三个线圈  $x_U$ 、 $x_V$  和  $x_W$  作为副边输出线圈。三个副边输出线圈  $x_U$ 、 $x_V$  和  $x_W$  分别与  $U$  相、 $V$  相和  $W$  相三个电枢绕组相对应。转子位置传感器的旋转部分是由略大于  $120^\circ$  电角的扇形高频铁氧体磁心 (图中涂黑部分) 和非导磁体 (图中未涂黑部分) 所组成的一个圆环，并与电动机的主转

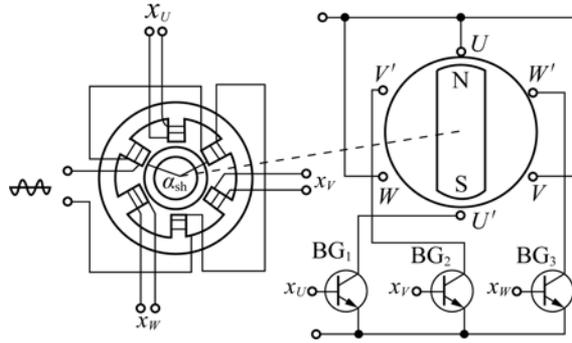


图 1.6 “三相星形非桥式”连接电子换向（相）电路

子同轴安装。

在转子位置传感器的原边激磁线圈通以几百千赫的高频激磁电流的情况下，当旋转部分的高频铁氧体磁心（图中涂黑部分）扇形片使副边输出线圈  $x_U$  与原边激磁线圈耦合时，副边输出线圈  $x_U$  就有输出信号；而其他两个副边输出线圈  $x_V$  和  $x_W$  没有与原边激磁线圈相耦合，所以没有输出信号。这时，利用副边输出线圈  $x_U$  的输出信号经整流处理后去触发与  $U$  相电枢绕组相连接的功率开关晶体管  $BG_1$ ，并使之导通，功率开关晶体管  $BG_2$  和  $BG_3$  因没有触发信号而保持截止状态，电源给  $U$  相电枢绕组馈电。当转子位置传感器的转子扇形片转过  $120^\circ$  电角度时，转子扇形片使副边输出线圈  $x_V$  与原边激磁线圈相耦合，副边输出线圈  $x_V$  就有输出信号；而其他两个副边输出线圈  $x_U$  和  $x_W$  没有与原边激磁线圈相耦合，所以没有输出信号。这时，利用副边输出线圈  $x_V$  的输出信号经整流处理后去触发与  $V$  相电枢绕组相连接的功率开关晶体管  $BG_2$ ，功率开关晶体管  $BG_2$  由截止变成导通，而功率开关晶体管  $BG_1$  由导通变成截止，电源给  $V$  相电枢绕组馈电。当转子位置传感器的转子扇形片再转过  $120^\circ$  电角度时，扇形片使副边输出线圈  $x_W$  与原边激磁线圈相耦合，副边输出线圈  $x_W$  就有输出信号；而其他两个副边输出线圈  $x_U$  和  $x_V$  没有与原边激磁线圈相耦合，所以没有输出信号。这时，利用副边输出线圈  $x_W$  的输出信号经整流处理后去触发与  $W$  相电枢绕组相连接的功率开关晶体管  $BG_3$ ，功率开关晶体管  $BG_3$  由截止变成导通，而功率开关晶体管  $BG_2$  由导通变成截止，电源给  $W$  相电枢绕组馈电。这样，随着转子位置传感器旋转部分的扇形高频铁氧体磁心的转动，电枢绕组便被一相一相地依次馈电，从而实现了电枢绕组各相之间的电子换向（相）或“换流”。

在换向（相）或“换流”过程中，工作气隙内会形成跳跃式的旋转磁场，这种旋转磁场在  $360^\circ$  电角度范围内有三个磁状态，每个磁状态持续  $120^\circ$  电角度。所以，我们称之为“一相导通星形三相三状态”。在此情况下，永磁体磁场和电枢磁场之间的相互关系如图 1.7 所示。图 1.7 (a) 为第一磁状态， $F_a$  为电枢绕组被馈电后所产生的磁势。显然，电枢磁场与永磁体磁场的相互作用迫使电动机转子沿着顺时针方向旋转；当转子转过  $120^\circ$  电角度后，便进入第二磁状态，如图 1.7 (b) 所示，电动机转子继续沿着顺时针方向旋转；当转子再转过  $120^\circ$  电角度后，便进入第三磁状态，如图 1.7 (c) 所示，电动机转子继续沿着顺时针方向旋转；当转子再沿着顺时针方向转过  $120^\circ$  电角度后，电动机便回复到起始状态。这样周而复始，电动机便连续不断地旋转。这里，我们把一

一个功率开关晶体管保持持续导通的电角度称之为该功率开关晶体管的导通角  $\alpha_t$ ；把一个磁状态所持续的电角度称之为状态角  $\alpha_z$ 。

为了成功地实现无刷直流电动机电枢绕组的换向（相）或“换流”，转子位置传感器旋转部分的扇形片的张角  $\alpha_{sh}$  必须满足由下式决定的条件

$$\alpha_{sh} = \frac{2\pi}{pm} \tag{1.4}$$

式中， $p$  为磁极对数； $m$  为绕组相数。

为了避免启动时出现死点，保证无刷直流电动机的可靠运行，扇形片的张角  $\alpha_{sh}$  应稍大于  $\frac{2\pi}{pm}$  的数值。

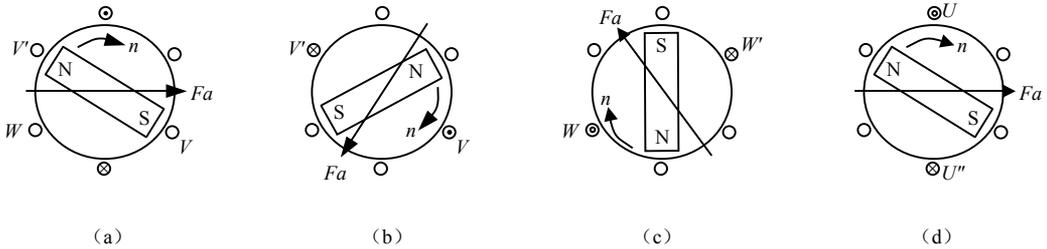


图 1.7 永磁体磁场和电枢磁场之间的相互关系

图 1.8 是各相电枢绕组的导通示意图。“一相导通星形三相三状态”的电枢绕组导通顺序列于表 1.1。

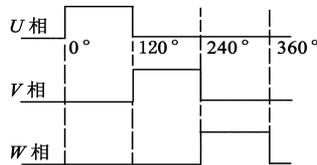


图 1.8 各相绕组的导通示意图

表 1.1 “一相导通星形三相三状态”情况下电枢绕组与功率开关晶体管的导通顺序

时间（电角度）	0°	120°	240°	360°
导通顺序	U	V	W	U
BG <sub>1</sub>				
BG <sub>2</sub>				
BG <sub>3</sub>				

(2) “三相星形桥式连接”的电子换向（相）过程

图 1.9 是“三相星形桥式连接”的电子换向（相）电路的原理图。下面分三种情况来进行分析：

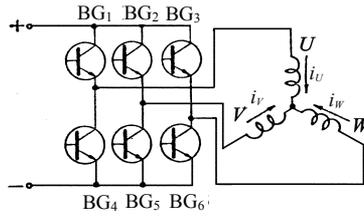


图 1.9 “三相星形桥式连接”的换向（相）电路

1) “二相导通星形三相六状态”。“二相导通星形三相六状态”的电子换向（相）过程如下：

第一步：当  $t=0^{0+}$  时，图 1.9 中的功率开关晶体管  $BG_1, BG_5$  导通，即有电源正端  $\rightarrow BG_1 \rightarrow U \rightarrow V \rightarrow BG_5 \rightarrow$  电源负端；

第二步：当  $t=60^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_1, BG_6$  导通，即有电源正端  $\rightarrow BG_1 \rightarrow U \rightarrow W \rightarrow BG_6 \rightarrow$  电源负端；

第三步：当  $t=120^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_2, BG_6$  导通，即有电源正端  $\rightarrow BG_2 \rightarrow V \rightarrow W \rightarrow BG_6 \rightarrow$  电源负端；

第四步：当  $t=180^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_2, BG_4$  导通，即有电源正端  $\rightarrow BG_2 \rightarrow V \rightarrow U \rightarrow BG_4 \rightarrow$  电源负端；

第五步：当  $t=240^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_3, BG_4$  导通，即有电源正端  $\rightarrow BG_3 \rightarrow W \rightarrow U \rightarrow BG_4 \rightarrow$  电源负端；

第六步：当  $t=300^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_3, BG_5$  导通，即有电源正端  $\rightarrow BG_3 \rightarrow W \rightarrow V \rightarrow BG_5 \rightarrow$  电源负端；

第七步：当  $t=360^{0+}$  时，又重复  $t=0^{0+}$  时的状态。

在此情况下，电枢绕组的导通顺序与功率开关晶体管的导通顺序之间的关系列于表 1.2。

表 1.2 “二相导通星形三相六状态”情况下电枢绕组与功率开关晶体管的导通顺序

时间（电角度）	$0^\circ$	$60^\circ$	$120^\circ$	$180^\circ$	$240^\circ$	$300^\circ$	$360^\circ$
导通顺序	U		V		W		
	V	W	U	V	U	V	
$BG_1$							
$BG_2$							
$BG_3$							
$BG_4$							
$BG_5$							
$BG_6$							

2) “三相导通星形三相六状态”。“三相导通的星形三相六状态”的电子换向（相）过程如下：

第一步：当  $t=0^{0+}$  时，图 1.9 中的功率开关晶体管  $BG_3, BG_1$  和  $BG_5$  导通，即有电源正端  $\rightarrow BG_3 \rightarrow W \rightarrow V \rightarrow BG_5 \rightarrow$  电源负端；  
 $BG_1 \rightarrow U$

第二步：当  $t=60^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_1$  和  $BG_5$  仍然导通， $BG_3$  截止， $BG_6$  开始导通，即有电源正端  $\rightarrow BG_1 \rightarrow U \rightarrow \begin{matrix} V \rightarrow BG_5 \\ W \rightarrow BG_6 \end{matrix} \rightarrow$  电源负端；

第三步：当  $t=120^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_1$  和  $BG_6$  仍然导通， $BG_5$  截止， $BG_2$  开始导通，即有电源正端  $\rightarrow \begin{matrix} BG_1 \rightarrow U \\ BG_2 \rightarrow V \end{matrix} \rightarrow W \rightarrow BG_6 \rightarrow$  电源负端；

第四步：当  $t=180^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_2$  和  $BG_6$  仍然导通， $BG_1$  截止， $BG_4$  开始导通，即有电源正端  $\rightarrow BG_2 \rightarrow V \rightarrow \begin{matrix} W \rightarrow BG_6 \\ U \rightarrow BG_4 \end{matrix} \rightarrow$  电源负端；

第五步：当  $t=240^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_2$  和  $BG_4$  仍然导通， $BG_6$  截止， $BG_3$  开始导通，即有电源正端  $\rightarrow \begin{matrix} BG_2 \rightarrow V \\ BG_3 \rightarrow W \end{matrix} \rightarrow U \rightarrow BG_4 \rightarrow$  电源负端；

第六步：当  $t=300^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_3$  和  $BG_4$  仍然导通， $BG_2$  截止， $BG_5$  开始导通，即有电源正端  $\rightarrow BG_3 \rightarrow W \rightarrow \begin{matrix} U \rightarrow BG_4 \\ V \rightarrow BG_5 \end{matrix} \rightarrow$  电源负端；

第七步：当  $t=360^{0+}$  时，又重复  $t=0^{0+}$  时的状态。

3) “二相三相轮流导通星形三相十二状态”。无刷直流电动机在“二相三相轮流导通星形三相十二状态”运行时，其电枢绕组有时为二相导通，有时为三相导通，依次轮流进行，如图 1.10 (a) 和 (b) 所示。

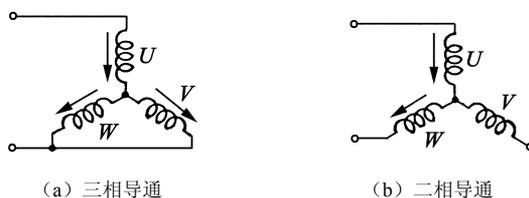


图 1.10 电枢绕组二相三相轮流导通的状态

“二相三相轮流导通星形三相十二状态”的电子换向（相）过程如下：

第一步：当  $t=0^{0+}$  时，图 1.9 中的功率开关晶体管  $BG_5$ 、 $BG_1$  和  $BG_6$  导通，即有电源正端  $\rightarrow BG_1 \rightarrow U \rightarrow \begin{matrix} V \rightarrow BG_5 \\ W \rightarrow BG_6 \end{matrix} \rightarrow$  电源负端；

第二步：当  $t=30^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_1$  和  $BG_6$  继续导通， $BG_5$  截止，即有电源正端  $\rightarrow BG_1 \rightarrow U \rightarrow W \rightarrow BG_6 \rightarrow$  电源负端；

第三步：当  $t=60^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_1$  和  $BG_6$  继续导通， $BG_2$  开始导通，即有电源正端  $\rightarrow \begin{matrix} BG_1 \rightarrow U \\ BG_2 \rightarrow V \end{matrix} \rightarrow W \rightarrow BG_6 \rightarrow$  电源负端；

第四步：当  $t=90^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_2$  和  $BG_6$  继续导通， $BG_1$  截止，即有电源正端  $\rightarrow BG_2 \rightarrow V \rightarrow W \rightarrow BG_6 \rightarrow$  电源负端；

第五步：当  $t=120^{0+}$  时，功率开关晶体管  $BG_2$  和  $BG_6$  继续导通， $BG_4$  开始导通，即

有电源正端  $\rightarrow$  BG<sub>2</sub>  $\rightarrow$  V  $\rightarrow$   $\begin{matrix} W \rightarrow \text{BG}_6 \\ U \rightarrow \text{BG}_4 \end{matrix}$   $\rightarrow$  电源负端;

第六步: 当  $t=150^{0+}$  时, 功率开关晶体管 BG<sub>2</sub> 和 BG<sub>4</sub> 继续导通, BG<sub>6</sub> 截止, 即有电源正端  $\rightarrow$  BG<sub>2</sub>  $\rightarrow$  V  $\rightarrow$  U  $\rightarrow$  BG<sub>4</sub>  $\rightarrow$  电源负端;

第七步: 当  $t=180^{0+}$  时, 功率开关晶体管 BG<sub>2</sub> 和 BG<sub>4</sub> 继续导通, BG<sub>3</sub> 开始导通, 即有电源正端  $\rightarrow$   $\begin{matrix} \text{BG}_2 \rightarrow V \\ \text{BG}_3 \rightarrow W \end{matrix}$   $\rightarrow$  U  $\rightarrow$  BG<sub>4</sub>  $\rightarrow$  电源负端;

第八步: 当  $t=210^{0+}$  时, 功率开关晶体管 BG<sub>3</sub> 和 BG<sub>4</sub> 继续导通, BG<sub>2</sub> 截止, 即有电源正端  $\rightarrow$  BG<sub>3</sub>  $\rightarrow$  W  $\rightarrow$  U  $\rightarrow$  BG<sub>4</sub>  $\rightarrow$  电源负端;

第九步: 当  $t=240^{0+}$  时, 功率开关晶体管 BG<sub>3</sub> 和 BG<sub>4</sub> 继续导通, BG<sub>5</sub> 开始导通, 即有电源正端  $\rightarrow$  BG<sub>3</sub>  $\rightarrow$  W  $\rightarrow$   $\begin{matrix} U \rightarrow \text{BG}_4 \\ V \rightarrow \text{BG}_5 \end{matrix}$   $\rightarrow$  电源负端;

第十步: 当  $t=270^{0+}$  时, 功率开关晶体管 BG<sub>3</sub> 和 BG<sub>5</sub> 继续导通, BG<sub>4</sub> 截止, 即有电源正端  $\rightarrow$  BG<sub>3</sub>  $\rightarrow$  W  $\rightarrow$  V  $\rightarrow$  BG<sub>5</sub>  $\rightarrow$  电源负端;

第十一步: 当  $t=300^{0+}$  时, 功率开关晶体管 BG<sub>3</sub> 和 BG<sub>5</sub> 继续导通, BG<sub>1</sub> 开始导通, 即有电源正端  $\rightarrow$   $\begin{matrix} \text{BG}_3 \rightarrow W \\ \text{BG}_1 \rightarrow U \end{matrix}$   $\rightarrow$  V  $\rightarrow$  BG<sub>5</sub>  $\rightarrow$  电源负端;

第十二步: 当  $t=330^{0+}$  时, 功率开关晶体管 BG<sub>1</sub> 和 BG<sub>5</sub> 继续导通, BG<sub>3</sub> 截止, 即有电源正端  $\rightarrow$  BG<sub>1</sub>  $\rightarrow$  U  $\rightarrow$  V  $\rightarrow$  BG<sub>5</sub>  $\rightarrow$  电源负端;

第十三步: 当  $t=360^{0+}$  时, 又重复  $t=0^{0+}$  时的状态。

在此情况下, 电枢绕组的导通顺序与功率开关晶体管的导通顺序之间的关系列于表 1.3。

表 1.3 “二相三相轮流导通星形三相十二状态” 情况下电枢绕组与功率开关晶体管的导通顺序

时间 (电角度)	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
导通顺序	$\begin{matrix} U \rightarrow V \\ U \rightarrow W \end{matrix}$	$U \rightarrow W$	$\begin{matrix} U \rightarrow W \\ V \rightarrow W \end{matrix}$	$V \rightarrow W$	$\begin{matrix} V \rightarrow W \\ V \rightarrow U \end{matrix}$	$V \rightarrow U$	$\begin{matrix} V \rightarrow U \\ W \rightarrow U \end{matrix}$	$W \rightarrow U$	$W \rightarrow U$	$\begin{matrix} W \rightarrow U \\ W \rightarrow V \end{matrix}$	$W \rightarrow V$	$\begin{matrix} W \rightarrow V \\ U \rightarrow V \end{matrix}$	$U \rightarrow V$
BG <sub>1</sub>													
BG <sub>2</sub>													
BG <sub>3</sub>													
BG <sub>4</sub>													
BG <sub>5</sub>													
BG <sub>6</sub>													

## 2. 封闭式电枢绕组的电子换向 (相) 过程

无刷直流永磁电动机的封闭式电枢绕组可以是三相、四相、五相等。这里, 仅借助图 1.11 和表 1.4 来说明三相三角形电枢绕组与桥式电子换向 (相) 电路组合的, 状态角  $\alpha_z = 60^\circ$  电角度的, “封闭式三相六状态” 的电子换向 (相) 过程。

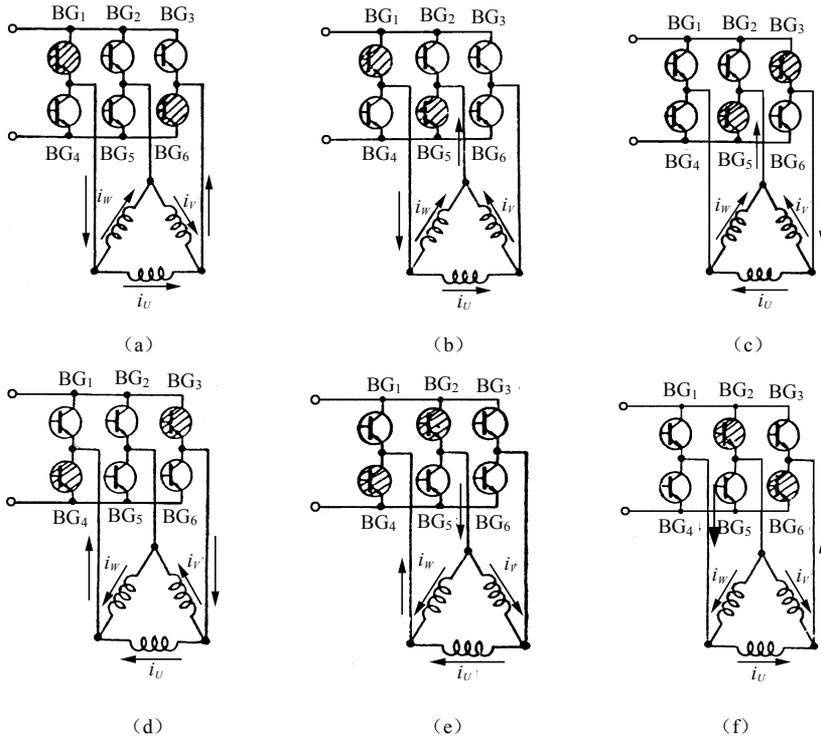


图 1.11 “封闭式三相六状态”的换向（相）过程

表 1.4 “封闭式三相六状态”情况下电枢绕组与功率开关晶体的导通顺序

时间(电角度)	0°	60°	120°	180°	240°	300°	360°
导通顺序	<i>U</i>	<i>W</i>	<i>V</i>	<i>U</i>	<i>W</i>	<i>V</i>	
	<i>W</i> → <i>V</i>	<i>U</i> → <i>V</i>	<i>U</i> → <i>W</i>	<i>V</i> → <i>W</i>	<i>V</i> → <i>U</i>	<i>W</i> → <i>U</i>	
BG <sub>1</sub>							
BG <sub>2</sub>							
BG <sub>3</sub>							
BG <sub>4</sub>							
BG <sub>5</sub>							
BG <sub>6</sub>							

### 1.4 分数槽电枢绕组

近年来，无刷直流永磁电动机被广泛地用于视听设备、计算机外部设备和情报信息机械等领域。在这些领域内，无刷直流永磁电动机大多采取多极薄饼式外转子结构，其电枢绕组大多采用分数槽型式的绕组。多极薄饼式结构能使电动机的结构紧凑，性能提高，满足用户的高精度要求；而采用分数槽绕组的主要优点在于：

- 1) 电枢冲片的齿槽数减少，在一定程度上可以减少槽绝缘所占的空间，提高铜铁

等有效材料的利用率，并便于电枢冲片和铁心的制作；

2) 一般情况下，电枢绕组的第一节距  $y=1$ ，即每个齿上绕制一个集中线圈，从而可采用自动绕线机绕制，可以显著地提高劳动生产率，降低电动机的制造成本；

3) 能显著地缩短电枢线圈的端部长度，节省铜材；并可以减小电枢的漏抗，增加电动机的出力，提高灵敏度和效率；

4) 减小齿槽效应引起的力矩脉动 (cogging)。

#### 1.4.1 分数槽绕组的基本概念

$q$  为每极每相槽数，当  $q$  为整数时，电机每个极距内的槽数也是整数。在三相电机中，每个极距被分成三个相互间隔  $60^\circ$  电角度的相带，每个相带内的槽数也是整数。在此情况下，后一对磁极下齿槽的空间几何位置是前一对磁极下齿槽的空间几何位置的重复，若把各对磁极依次重叠起来，则它们的齿槽位置将一一对应重合。因此，在整数槽绕组的电机中，每一磁极对的电磁关系和电磁参数是一样的，各个磁极对下的相应的绕组导体中的感应电动势，或者由该绕组导体中的电流所产生的磁动势也都是同相位的。每相总的感应电动势是每对磁极下每相感应电动势的标量代数相加之和，也可以描述为，每相总的感应电动势是每对磁极下的每相感应电动势与磁极对数  $p$  的乘积。因此，一台整数槽绕组的电机中，其电磁关系或电磁参数是以一个磁极对，亦即以相当于一个  $360^\circ$  电角度的相平面为一个周期，重复  $p$  次。有时为分析方便起见，可以把一个磁极对所对应的部分称为单元电机，每相总的感应电动势就是单元电机的每相感应电动势与磁极对数  $p$  的乘积。单元电机，及其对应的感应电动势向量星形图和磁动势向量星形图是分析计算整数槽电机的基础。

在电机中，当每极每相槽数  $q$  不是整数，而是分数时的绕组称为分数槽绕组。采用分数槽绕组时，每极每相槽数  $q$  可以写成

$$q = \frac{Z}{2pm} = b + \frac{c}{d} \quad (1.5)$$

式中， $m$  为相数； $Z$  为槽数； $p$  为磁极对数； $b$  为整数； $\frac{c}{d}$  为不可约的真分数。

在三相电机中，当  $q = \frac{Z}{2pm}$  为分数时，则每个极距内和每个相带内的槽数就不是整数。一般情况下，分数槽电机的  $Z$  和  $p$  有一个最大的公约数，即

$$\frac{Z}{p} = \frac{Z_0}{P_0} \quad (1.6)$$

式中， $Z = Z_0 t$ ， $p = p_0 t$ ， $t$  为最大的公约数，因此  $q$  可写成

$$q = \frac{Z_0}{2mp_0} \quad (1.7)$$

公式 (1.7) 意味着：在分数槽绕组的电机中，每  $2p_0$  个磁极下每相占有  $Z_0/m$  个槽。电机的齿槽分布、感应电动势向量图和磁动势向量图，以  $2p_0$  个磁极为一个周期，重复  $t$  次。在同一个  $2p_0$  个磁极范围内，后一磁极下齿槽的空间几何位置不是前一磁极下齿槽

的空间几何位置的重复,每一磁极对的电磁关系和电磁参数也不是一样的;若把各对磁极依次重叠起来,即把 $p_0$ 个相平面重叠起来,则不同磁极对下面的齿槽就不会一一对应重合,各个磁极对下面的绕组导体中的感应电动势向量,或由该绕组导体内的电流所产生的磁动势向量也不是同相位的。因此,在 $2p_0$ 个磁极范围内,每相总的感应电动势不是每对磁极下每相感应电动势的标量代数相加,而是向量几何相加。由此可见,相对短矩绕组实现了层与层之间的分布和分布绕组实现了槽与槽之间的分布而言,分数槽绕组则进而实现了磁极对与磁极对之间的分布。为分析起见,可以把由 $p_0$ 个相平面重叠在一起后得到的感应电动势向量星形图或磁动势向量星形图,看作为一个虚拟相平面上的感应电动势向量星形图或磁动势向量星形图;把由 $p_0$ 个磁极对所对应的部分看作具有一对虚拟磁极的电机,并称之为分数槽电机的虚拟单元电机。虚拟单元电机的槽数为 $Z_0$ ,磁极对数为1。因此,一台分数槽电机由 $t$ 个虚拟单元电机所组成,其每相总的感应电动势就是虚拟单元电机的每相感应电动势与 $t$ 的乘积。虚拟单元电机,及其对应的感应电动势向量星形图和磁动势向量星形图是分析计算分数槽电机的基础。

#### 1.4.2 分数槽绕组的对称条件

在电机中,为了获得对称的电动势和磁动势,首先要求其具有对称的电枢绕组。对三相电机而言,所谓对称的电动势和磁动势,就要求 $U$ 、 $V$ 和 $W$ 三相电枢绕组的电动势和磁动势在数值上相等,相互间相位相差 $120^\circ$ 电角度。

在分数槽电机中,不是任何槽数 $Z$ 和任何磁极对数 $P$ 相配合就能获得对称的电枢绕组的。为了获得对称的电枢绕组,参数 $Z$ 、 $P$ 和 $m$ 必须满足:

$$\textcircled{1} \frac{Z}{m} = \text{整数}, \textcircled{2} \frac{Z_0}{m} = \text{整数}, \text{其中 } Z = Z_0 t, p = p_0 t. \text{ 这种关系式被称做分数槽绕组的对称条件。}$$

在槽数 $Z$ 和磁极对数 $p$ 满足上述对称条件的前提下,设计电机时应尽可能地减小 $t$ 值,直至 $t=1$ ,以便减小虚拟单元电机的数目,达到减小电动机电磁力矩脉动的目的。

#### 1.4.3 分数槽电枢绕组的连接方法

下面,我们将通过一些实例,着重讨论有关分数槽电枢绕组的连接方法。

**例 1.1** 三相 $m=3$ ,电枢槽数 $Z=12$ ,转子永磁体的磁极数 $2p=8$ ( $Z_0=3$ , $p_0=1$ , $t=4$ )。

(1) 相邻两齿槽间的夹角

$$\text{相邻两齿槽间的机械夹角 } \alpha_m = \frac{360^\circ}{Z} = 360^\circ / 12 = 30^\circ ;$$

$$\text{相邻两齿槽间的电气夹角 } \alpha_e = p \times \alpha_m = 4 \times 30^\circ = 120^\circ .$$

(2) 电枢线圈的磁势星形图

由于电枢绕组的第一节距 $y_1=1$ ,在电枢的每个齿上绕有一个集中线圈,因此每一个齿上的电枢线圈的磁势轴线与齿的中心线相一致,所以两相邻电枢线圈的磁势轴线间的电气夹角 $\alpha_{mf}$ 也是 $120^\circ$ ,即 $\alpha_{mf}=\alpha_e=120^\circ$ ,与此电枢相对应的磁势星形图如图1.12所示。

(3) 电枢绕组的连接方法

由图 1.12 可见, 本电动机由  $t=4$  个虚拟单元电机所组成。第 1、第 4、第 7 和第 10 个齿上的第 1、第 4、第 7 和第 10 个线圈依次头尾相连组成  $U$  相; 第 2、第 5、第 8 和第 11 个齿上的第 2、第 5、第 8 和第 11 个线圈依次头尾相连组成  $V$  相; 第 3、第 6、第 9 和第 12 个齿上的第 3、第 6、第 9 和第 12 个线圈依次头尾相连组成  $W$  相。电枢绕组的连接如表 1.5 所列。

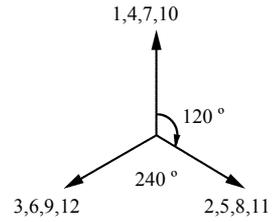


图 1.12 电枢线圈的磁势星形图  
( $m=3, Z=12, 2P=8$ )

(4) 计算绕组系数

绕组系数  $k_w$  为

$$k_w = k_y k_p = 0.866$$

其中, 短距系数  $k_y = \cos \frac{\beta}{2} = \cos 30^\circ = 0.866$ ;  $\beta = 60^\circ$ ; 分布系数  $k_p = 1$ 。

表 1.5 电枢绕组的连接 ( $m=3, Z=12, 2p=8$ )

相序	电枢线圈的编号				备注
$U$ 相	(头) 1 (尾)	(头) 4 (尾)	(头) 7 (尾)	(头) 10 (尾)	头尾相连
$V$ 相	(头) 2 (尾)	(头) 5 (尾)	(头) 8 (尾)	(头) 11 (尾)	头尾相连
$W$ 相	(头) 3 (尾)	(头) 6 (尾)	(头) 9 (尾)	(头) 12 (尾)	头尾相连

例 1.2 三相  $m=3$ , 电枢槽数  $Z=9$ , 转子永磁体的磁极数  $2p=8$  ( $Z_0=9, p_0=4, t=1$ )。

(1) 相邻两齿槽间的夹角

相邻两齿槽间的机械夹角  $\alpha_m = \frac{360^\circ}{Z} = 360^\circ / 9 = 40^\circ$ ;

相邻两齿槽间的电气夹角  $\alpha_e = p \times \alpha_m = 4 \times 40^\circ = 160^\circ$ 。

(2) 电枢线圈的磁势星形图

电枢绕组的第一节距  $y_1=1$ , 在电枢的每个齿上绕有一个集中线圈, 两相邻电枢线圈的磁势轴线间的电气夹角  $\alpha_{mf}$  也是  $160^\circ$ , 即  $\alpha_{mf} = \alpha_e = 160^\circ$ , 其电枢线圈的磁势星形图由  $p_0=4$  个相平面重叠而成, 与此电枢相对应的电枢线圈的磁势星形图如图 1.13 所示。

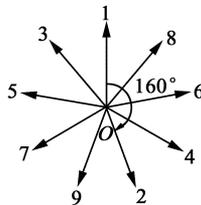


图 1.13 电枢线圈的磁势星形图  
( $m=3, Z=9, 2p=8$ )

(3) 电枢绕组的连接方法

由图 1.13 可见, 第 1、第 2 和第 9 个齿上的第 1、第 2 和第 9 个线圈组成  $U$  相, 第 4、第 5 和第 3 个齿上的第 4、第 5 和第 3 个线圈组成  $V$  相, 第 7、第 8 和第 6 个齿上的

第 7、第 8 和第 6 个线圈组成  $W$  相。电枢绕组的连接如表 1.6 所列。本电动机由  $t=1$  个虚拟单元电机所组成，这种齿槽数  $Z$  和磁极对数  $p$  的配合使电枢铁心槽内的导体相对气隙磁场而言处在不同的空间位置上，任何两个向量不是同相位的，从而有利于电磁力矩脉动的减小。

表 1.6 电枢绕组的连接 ( $m=3, Z=9, 2p=8$ )

相序	电枢线圈的编号			备注
$U$ 相	(头) 1 (尾)	(尾) 2 (头)	(尾) 9 (头)	1 号线圈的头为 A 相的头 9 号线圈的头为 A 相的尾
$V$ 相	(头) 4 (尾)	(尾) 5 (头)	(尾) 3 (头)	4 号线圈的头为 B 相的头 3 号线圈的头为 B 相的尾
$W$ 相	(头) 7 (尾)	(尾) 8 (头)	(尾) 6 (头)	7 号线圈的头为 C 相的头 6 号线圈的头为 C 相的尾

(4) 计算绕组系数

绕组系数  $k_w$  为

$$k_w = k_y k_p = 0.98 \times 0.96 = 0.94$$

其中，短距系数  $k_y$  可由下式求出

$$k_y = \cos \frac{\beta}{2} = \cos 10^\circ = 0.98; \quad \beta = 20^\circ$$

分布系数  $k_p$  可由下式求出

$$k_p = \frac{\sin q_0 \frac{\alpha_0}{2}}{q_0 \sin \frac{\alpha_0}{2}} = \frac{\sin \frac{3 \times 20^\circ}{2}}{3 \times \sin \frac{20^\circ}{2}} = \frac{0.5}{0.52} = 0.96$$

例 1.3 三相  $m=3$ ，电枢槽数  $Z=24$ ，转子永磁体的磁极数  $2p=10$  ( $Z_0=24, p_0=5, t=1$ )。

(1) 相邻两齿槽间的夹角

$$\text{相邻两齿槽间的机械夹角 } \alpha_m = \frac{360^\circ}{Z} = 360^\circ / 24 = 15^\circ$$

$$\text{相邻两齿槽间的电气夹角 } \alpha_e = p \times \alpha_m = 5 \times 15^\circ = 75^\circ$$

(2) 电枢线圈的磁势星形图

两相邻槽之间的电气夹角为  $\alpha_e = 75^\circ$ ，我们以第一个槽的位置作为起始  $0^\circ$  电角度，这样第二个槽将对第一个槽位移  $75^\circ$  电角度，第三个槽将对第一个槽位移  $150^\circ$  电角度，以此类推。这样，24 个槽在气隙磁场中所处的位置如表 1.7 所列，与此电枢相对应的电枢槽内线圈圈边的磁势星形图如图 1.14 所示。

表 1.7 槽在气隙磁场中所处的位置

槽号	1	2	3	4	5	第一极对
槽的位置(电角度)	$0^\circ$	$75^\circ$	$150^\circ$	$225^\circ$	$300^\circ$	
槽号	6	7	8	9	10	第二极对
槽的位置(电角度)	$15^\circ$	$90^\circ$	$165^\circ$	$240^\circ$	$315^\circ$	

续表

槽号	11	12	13	14	15	第三极对
槽的位置(电角度)	30°	105°	180°	255°	660°	
槽号	16	17	18	19	20	第四极对
槽的位置(电角度)	45°	120°	195°	270°	345°	
槽号	21	22	23	24	1	第五极对
槽的位置(电角度)	60°	135°	210°	285°	360°	

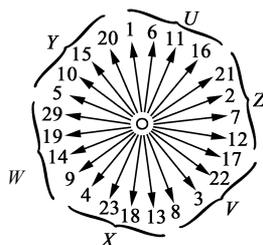


图 1.14 电枢槽内线圈圈边的磁势星形图

(  $m=3, Z=24, 2p=10$  )

### (3) 电枢绕组的连接方法

由图 1.14 可见, 本电动机由 5 个磁极对组成  $t=1$  个虚拟单元电机 ( $Z_0=24, p_0=5, t=1$ )。在虚拟单元电机中, 24 个槽以电角  $60^\circ$  相带划分, 每一相应是 8 个槽, 其中 4 个槽应该处于同一极性下, 而另外 4 个槽则处于另一极性下。因此, 第 1—6—11—16 槽组和第 13—18—23—4 槽组为  $U(X)$  相; 第 17—22—3—8 槽组和第 5—10—15—20 槽组为  $V(Y)$  相; 第 9—14—19—24 槽组和第 21—2—7—12 槽组为  $W(Z)$  相。

由图 1.14 的磁势星形图看出, 第 1 槽内电枢线圈圈边的磁势与第 13 槽内电枢线圈圈边的磁势相差  $180^\circ$  电角度, 第 6 槽内电枢线圈圈边的磁势与第 18 槽内电枢线圈圈边的磁势相差  $180^\circ$  电角度, 以此类推。因此, 在图 1.14 中, 由字母  $U$  标注的槽内圈边 1、6、11 和 16 能与由字母  $X$  标注的槽内圈边 13、18、23 和 4 连接成整距绕组; 由字母  $V$  标注的槽内圈边 17、22、3 和 8 能与由字母  $Y$  标注的槽内圈边 5、10、15 和 20 连接成整距绕组; 由字母  $W$  标注的槽内圈边 9、14、19 和 24 能与由字母  $Z$  标注的槽内圈边 21、2、7 和 12 连接成整距绕组。在以  $U$  标注的槽与以  $X$  标注的槽, 以  $V$  标注的槽与以  $Y$  标注的槽, 以  $W$  标注的槽与以  $Z$  标注的槽的连接过程中, 以  $U$  (或  $V$ , 或  $W$ ) 标注的任意一个槽号内的圈边可以与以  $X$  (或  $Y$ , 或  $Z$ ) 标注的任意一个槽号内的圈边相连接, 其相电势或相磁势的数值保持不变, 与连接的次序无关; 从节省铜材和绕组绕制的方便来考虑, 被连接线圈的首末引出线应尽可能地彼此靠近。例如, 我们可以把  $U(X)$  相的绕组连接成下面的式样:  $U-(1-23)-(16-18)-(11-13)-(6-4)-X$ 。

### (4) 计算绕组系数

在此情况下, 绕组系数  $k_w$  为

$$k_w = k_y k_p = 0.96$$

其中, 短距系数  $k_y=1$ ; 分布系数为

$$k_p = \frac{\sin q_0 \frac{\alpha_0}{2}}{q_0 \sin \frac{\alpha_0}{2}} = \frac{\sin \frac{4 \times 15^\circ}{2}}{4 \times \sin \frac{15^\circ}{2}} = 0.96$$

式中，对虚拟单元电机而言， $\alpha_0 = 15^\circ$ ； $q_0 = 4$ 。

例 1.4 三相  $m=3$ ，电枢槽数  $Z=12$ ，转子永磁体的磁极数  $2p=16$  ( $Z_0=3$ ， $p_0=2$ ， $t=4$ )。

(1) 相邻两齿槽间的夹角

相邻两齿槽间的机械夹角  $\alpha_m = 360^\circ / Z = 360^\circ / 12 = 30^\circ$

相邻两齿槽间的电气夹角  $\alpha_e = p \times \alpha_m = 8 \times 30^\circ = 240^\circ$

(2) 电枢线圈的磁势星形图

两相邻电枢线圈轴线间的电气夹角为  $\alpha_e = 240^\circ$ ，与此电枢相对应的电枢线圈的磁势星形图如图 1.15 所示。

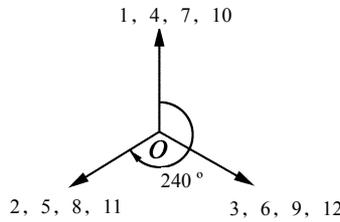


图 1.15 电枢线圈的磁势星形图

( $m=3$ ， $Z=12$ ， $2p=16$ )

(3) 电枢绕组的连接方法

由图 1.15 可见，本电动机由  $t=4$  个虚拟单元电机所组成，第 1、第 4、第 7 和第 10 个齿上的第 1、第 4、第 7 和第 10 个线圈依次头尾相连组成  $U$  相，第 3、第 6、第 9 和第 12 个齿上的第 3、第 6、第 9 和第 12 个线圈依次头尾相连组成  $V$  相，第 2、第 5、第 8 和第 11 个齿上的第 2、第 5、第 8 和第 11 个线圈依次头尾相连组成  $W$  相。电枢绕组的连接如表 1.8 所列。

表 1.8 电枢绕组的连接

相序	电枢线圈的编号				备注
$U$ 相	(头)1(尾)	(头)4(尾)	(头)7(尾)	(头)10(尾)	尾相连
$V$ 相	(头)3(尾)	(头)6(尾)	(头)9(尾)	(头)12(尾)	尾相连
$W$ 相	(头)2(尾)	(头)5(尾)	(头)8(尾)	(头)11(尾)	尾相连

(4) 计算绕组系数

绕组系数  $k_w$  为

$$k_w = k_y k_p = 0.866$$

其中，短距系数  $k_y = \cos \frac{\beta}{2} = \cos 30^\circ = 0.866$ ； $\beta = 60^\circ$ ；分布系数  $k_p = 1$ 。

例 1.5 三相  $m=3$ , 电枢槽数  $Z=15$ , 转子永磁体的磁极数  $2p=16$  ( $Z_0=15$ ,  $p_0=8$ ,  $t=1$ )。

例 1.4 中,  $t=4$ , 意味着一台电动机由四台重复的虚拟电动机所组成。 $t$  越大, 就越不利于减小力矩脉动。因此, 把例 1.4 中的电枢槽数由  $Z=12$  改变成  $Z=15$ , 其他参数不变。

(1) 相邻两齿槽间的夹角

$$\text{相邻两齿槽间的机械夹角 } \alpha_m = \frac{360^\circ}{Z} = 360^\circ / 15 = 24^\circ$$

$$\text{相邻两齿槽间的电气夹角 } \alpha_e = p \times \alpha_m = 8 \times 24^\circ = 192^\circ$$

(2) 电枢线圈的磁势星形图

两相邻电枢线圈轴线间的电气夹角为  $\alpha_e=192^\circ$ , 与此电枢相对应的电枢线圈的磁势星形图如图 1.16 所示。

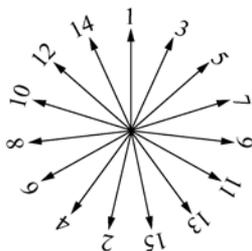


图 1.16 电枢线圈的磁势星形图

$$(m=3, Z=15, 2P=16)$$

(3) 电枢绕组的连接方法

由图 1.16 可见, 本电动机由  $t=1$  个虚拟单元电机所组成, 第 1、第 3、第 14、第 2 和第 15 个齿上的第 1、第 3、第 14、第 2 和第 15 个线圈组成  $U$  相, 第 11、第 13、第 9、第 12 和第 10 个齿上的第 11、第 13、第 9、第 12 和第 10 个线圈组成  $V$  相, 第 6、第 8、第 4、第 7 和第 5 个齿上的第 6、第 8、第 4、第 7 和第 5 个线圈组成  $W$  相。电枢绕组的连接如表 1.9 所列。在连接过程中,  $U$ 、 $V$  和  $W$  各相内的 5 个线圈的连接顺序变动时, 其相电势或相磁势的数值仍保持不变, 与连接的先后次序无关; 制造者只需考虑: 节省铜材、绕制方便和 (头) (尾) 引出线应尽可能地彼此靠近。

表 1.9 电枢绕组的连接

相序	电枢线圈的编号				
	$U$ 相	(头)1(尾)	(头)3(尾)	(头)14(尾)	(尾)2(头)
$V$ 相	(头)11(尾)	(头)13(尾)	(头)9(尾)	(尾)12(头)	(尾)10(头)
$W$ 相	(头)6(尾)	(头)8(尾)	(头)4(尾)	(尾)7(头)	(尾)5(头)

(4) 计算绕组系数

绕组系数  $k_w$  为

$$k_w = k_y k_p = 0.9945 \times 0.95675 = 0.95$$

其中，短距系数为

$$k_y = \cos \frac{\beta}{2} = \cos 6^\circ = 0.9945, \quad \beta = 12^\circ$$

分布系数为

$$k_p = \frac{\sin q_0 \frac{\alpha_0}{2}}{q_0 \sin \frac{\alpha_0}{2}} = \frac{\sin \frac{5 \times 12^\circ}{2}}{5 \times \sin \frac{12^\circ}{2}} = \frac{0.5}{0.5226} = 0.95675$$

式中， $q_0=5$ ； $\alpha_0=12^\circ$ 。

## 1.5 转子位置传感器（霍尔磁敏传感器）

转子位置传感器在无刷直流永磁电动机中，主要起两个作用，一是通过它检测出转子永磁体磁极相对定子电枢绕组所处的位置，以便确定电子换向（相）驱动电路中功率晶体管的导通顺序；二是确定电子换向（相）电路驱动电路中功率晶体管的导通角，从而确定电枢磁场的磁状态。为了实现这两个目的，工程上可以采用无接触式旋转变压器、光电式传感器、高频耦合式传感器、磁阻元件传感器和霍尔磁敏传感器等。不同的传感器，有不同的特点和不同的应用场合。现将它们各自的优缺点列于表 1.10，供选用时参考。

表 1.10 不同类型的转子位置传感器的比较

项目 形式	结构	体积	安装 定位	输出 信号	精度	功耗	可靠性	环境 要求	温度 范围
旋转变压器	复杂	大	方便	大	高	小	高	不严	宽
光电式	较复杂	较大	较方便	较大	较高	较小	较差	较严	一般
磁阻元件	简单	小	难	小	低	小	较差	较严	较窄
霍尔磁敏	简单	小	难	小	低	大	差	严	窄
高频耦合式	简单	较小	方便	小	较低	小	高	不严	宽

无接触式旋转变压器和霍尔磁敏传感器是目前被广泛采用的两种转子位置传感器。无接触式旋转变压器除了结构复杂、体积较大和制造成本较高等缺点外，它具有安装定位方便、输出信号大、精度高、对环境条件要求不严、温度适应范围宽、工作稳定可靠，以及容易与电子换向电路的输入阻抗实现阻抗匹配等一系列优点。因此，旋转变压器被广泛地用于精密数控机床、军事装备和宇航技术领域之中。霍尔磁敏传感器在具有质量轻、尺寸小、制造成本低和便于大规模生产等优点的同时，存在着对环境条件要求严、温度适应范围窄和可靠性差等缺点。因此，霍尔磁敏传感器被广泛地用于计算机的软硬盘驱动器、激光打印机、视听设备和家用电器等民用电动机产品中。

### 1.5.1 霍尔器件的工作原理

导体或半导体中的任何带电粒子，在磁场中沿着与磁力线垂直的方向运动时，将会受到一个作用力，该作用力被称为洛伦兹力，其大小可以表达为

$$F = qvB \quad (\text{N}) \quad (1.8)$$

式中,  $q$  是带电粒子的电荷量 (C);  $v$  是带电粒子的运动速度 (m/s);  $B$  是带电粒子所处磁场的磁感应强度 ( $\text{Wb/m}^2$ )。

如果我们把导体或半导体制作成厚度为  $d$ 、截面呈长方形的薄片, 如图 1.17 所示。在其前后两端面上施加一个电场  $E_x$ , 在没有外加磁场的情况下, 电子沿着外加电场  $E_x$  的相反方向运动, 形成一股沿着电场方向流动的电流  $I$ , 如图 1.17 (a) 所示。当外加一个垂直于长方形截面的磁场  $B$  时, 运动着的带电粒子将受到洛伦兹力的作用而向左边偏移, 并逐渐在左右两侧面堆积电荷, 如图 1.17 (b) 所示。堆积的电荷将产生新的电场, 从而使带电粒子在受到洛伦兹力作用的同时, 还将受到一个与洛伦兹力方向相反的电场力的作用。随着在左右两侧面上堆积电荷的不断增多, 这个新电场力也不断增大。当这个新电场力等于洛伦兹力时, 达到新的稳定状态, 带电粒子便不再发生偏移, 又恢复到在原先的方向上无偏移地运动, 如图 1.17 (c) 所示。然而, 外加磁场后的情况不同于无磁场时的情况, 这时在左右两侧面间出现了一个新电场  $E_H$ , 这个新电场  $E_H$  在左右两侧区间内沿着图 1.17 (d) 所示的  $Y$  方向的线积分值就是出现在左右两侧面上的一个新电压  $\varepsilon_H$ 。这个现象是美国霍普金斯大学的霍尔 (E.H.Hall) 教授在 1879 年发现的。因此, 这个新的电场被称之为霍尔电场, 这个新的电压被称之为霍尔电压或霍尔电动势, 导体或半导体在电磁场中出现的这种现象被称之为霍尔效应。

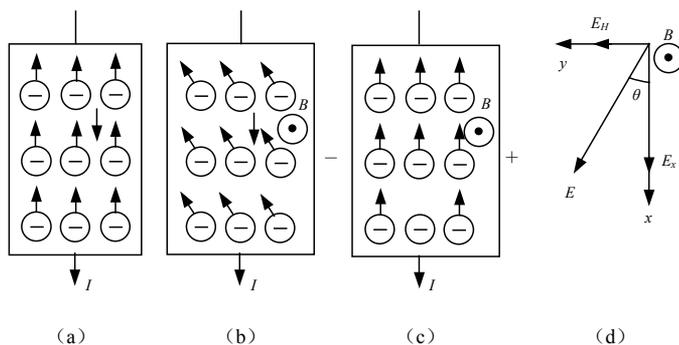


图 1.17 长方形半导体薄片中带电粒子的运动状态示意图

一般而言, 在外加电场  $E_x$  和外加磁场  $B$  等条件相同的情况下, 半导体内产生的霍尔效应要显著地大于导体内产生的霍尔效应。因此, 我们采用半导体材料来制作成薄片状的霍尔元件。对于图 1.18 所示的霍尔元件而言, 其霍尔电动势  $\varepsilon_H$  可以用下式表示

$$\varepsilon_H = \zeta_H \frac{IB}{d} \quad (1.9)$$

$\zeta_H$  可由下式求出:

$$\zeta_H = \frac{3\pi}{8} \rho v \quad (1.10)$$

式中,  $\zeta_H$  是霍尔系数 ( $\text{m}^3/\text{C}$ );  $I$  是控制电流 (A);  $B$  是磁感应强度 (T);  $d$  是霍尔薄片的厚度 (m);  $\rho$  是霍尔元件所用材料的电阻率 ( $\Omega \cdot \text{m}$ );  $v$  是霍尔元件所用材料的迁移率 [ $\text{m}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ]。