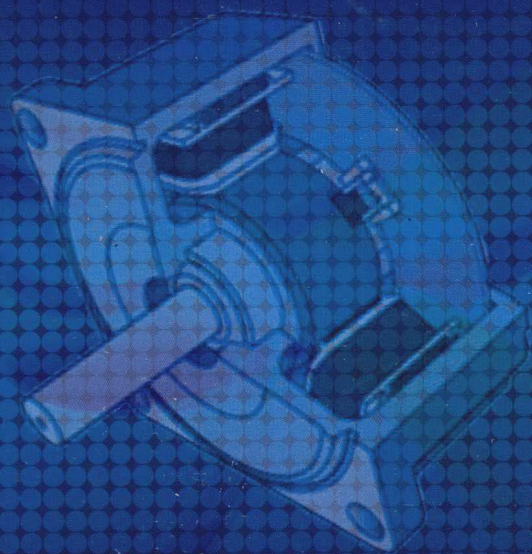




YONGCI WUSHUA ZHILIU DIANJI JISHU

# 永磁无刷直流电机 技术

谭建成 编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 永磁无刷直流电机技术

谭建成 编著



机械工业出版社

# 前 言

无刷直流电机被认为是 21 世纪最有发展前途和广泛应用前景的电子控制电机，在航天航空系统、国防军事装备、科学仪器、工业自动化装备、交通运输、医疗器械、计算机信息外围设备、办公自动化设备、家电民用消费产品中有越来越广泛应用。目前国内从事无刷直流电机开发、生产、控制、应用人员众多，许多高校研究生论文围绕无刷直流电机与控制的热点开展研究。国内外科技刊物和学术会议有大量相关论文发表。

本书着重对永磁无刷直流电机与控制技术的主要问题进行了较深入的研究分析和介绍，包括无刷直流电动机（BLDC）与永磁同步电动机（PMSM）的结构和性能比较；无刷直流电机数学模型、等效电路、特性与参数；分数槽集中绕组和多相绕组；不同相数绕组连接和导通方式的分析比较；气隙磁通密度的分析计算；反电动势波形和反电动势计算；霍尔传感器位置分布规律分析和确定方法；无刷直流电机设计要素的选择和主要尺寸的确定；整数槽和分数槽绕组无刷直流电机的电枢反应；转矩波动及其抑制方法；齿槽转矩及其削弱方法；无刷直流电机基本控制技术；无传感器控制技术；低成本正弦波控制技术；单相无刷直流电机与控制等。

本书作者是国内最早从事无刷直流电机与控制技术的首批科技工作者之一，本书是作者 30 多年从事无刷直流电机研究开发实践的体会与总结，其中也介绍了作者在无刷直流电机技术领域，例如简化数学模型和计及电感的数学模型、特性与参数计算方法、主要尺寸基本关系式考虑电感影响的修正、由粘性阻尼系数  $D$  确定电机主要尺寸的方法、分数槽集中绕组槽极数组合与选择应用、霍尔传感器位置确定方法、定子大小齿结构、绕组切换调速和直接驱动等方面的研究心得和成果。同时本书也综合介绍国内外无刷直流电机与控制技术最新进展动态和研究成果。每章后附有相关参考文献，便于读者跟踪和进一步深入研究。在此，对所参考引用的国内外文献资料的学者表示衷心的感谢。

本书遵循理论与实用技术相结合原则编写，预期对即将从事或正在从事无刷直流电机开发、生产、控制、应用人员的工作将有具体帮助。

本书编写面向已具有电机学与电子技术基础知识，对无刷直流电机技术有需求的读者。本书可供从事无刷直流电机研究开发、设计、生产、控制、应用的科技人员、管理人员、大专院校教师学生和研究生参考。

本书作者对曾经服务过的西安微电机研究所、中国电器科学研究院和一些企业公司所提供的研究实践机会和条件，有关领导和同事的支持和帮助表示诚挚的谢意；感谢孙流芳编审的鼓励和机械工业出版社在本书出版过程中给予的支持。

作者学识水平有限，错漏和不当之处敬请读者和同行给予批评指正。联系电子邮箱：tanjc04@sina.com。

谭建成

2010 年 10 月 于广州

# 目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 无刷直流电动机是最具发展前途的机电一体化电机	1
1.2 无刷直流电动机的技术优势	3
1.3 21 世纪是永磁无刷直流电动机广泛推广应用的世纪	5
1.4 推动无刷直流电动机技术和市场蓬勃发展的主要因素	8
1.5 无刷直流电动机技术发展动向	9
1.6 小结	11
参考文献	12
第 2 章 方波驱动与正弦波驱动的原理和比较	13
2.1 无刷直流电动机 (BLDC) 与永磁同步电动机 (PMSM)	13
2.2 方波驱动和正弦波驱动的转矩产生原理	13
2.3 无刷直流电动机与永磁同步电动机的结构和性能比较	15
2.4 小结	19
参考文献	20
第 3 章 无刷直流电动机的绕组连接与导通方式及其选择	21
3.1 常见绕组连接与导通方式	22
3.1.1 两相绕组电机连接与导通方式	22
3.1.2 四相绕组电机连接与导通方式	23
3.1.3 三相绕组电机连接与导通方式	25
3.1.4 五相星形绕组电机连接与导通方式	26
3.1.5 小结	28
3.2 两相、三相和四相不同绕组连接和导通方式的分析比较	28
3.3 绕组利用率和最佳导通角的分析	29
3.3.1 桥式电路封闭绕组与星形绕组	30
3.3.2 非桥式 $m$ 相无刷直流电动机最佳导通角的分析	30
3.3.3 小结	33
3.4 桥式换相的三相绕组 $\Delta$ 接法和 $Y$ 接法的分析与选用	33
3.4.1 三相无刷直流电动机 $Y$ 和 $\Delta$ 两种绕组接法及其转换关系	34
3.4.2 同一台电机采用三角形与星形接法的比较	35
3.4.3 3 次谐波环流和采用三角形接法条件	36
3.4.4 应用实例	37
3.4.5 小结	39
3.5 在相同铜损耗条件下几种不同相数、不同导通角电机转矩的比较	39
参考文献	40
第 4 章 无刷直流电动机数学模型、特性和参数	41
4.1 无刷直流电动机简化模型和基本特性	41
4.1.1 基本假设和简化模型基本等效电路	41
4.1.2 无刷直流电动机机械特性的统一表达式	42
4.1.3 理想空载点平均电流不等于零	44
4.1.4 无刷直流电机主要参数 $K_E$ 、 $K_T$ 、 $R_{eq}$ 和 $D$	45
4.1.5 重要参数——粘性阻尼系数 $D$	46
4.1.6 正弦波反电动势两相三相和四相绕组的系数 $K_E$ 、 $K_T$ 、 $K_D$ 计算	48
4.1.7 一个三相无刷直流电动机特性和系数计算例子	50
4.2 绕组电感对无刷直流电动机	

特性的影响 .....	52	绕组 $Z_0/p_0$ 组合条件 .....	80
4.3 非桥式 $120^\circ$ 导通三相无刷直流 电动机的非线性工作特性 分析 .....	53	5.2.4 三相分数槽绕组的绕组系数 计算 .....	87
4.4 计及绕组电感的三相无刷直流 电动机数学模型和基本特性 .....	55	5.2.5 成对出现的槽极数组合 .....	89
4.4.1 换相过程分析和瞬态三相电流 解析表达式 .....	56	5.2.6 小结 .....	91
4.4.2 平均电流和平均电磁转矩 表达式 .....	60	5.3 分数槽集中绕组槽极数组合的 选择与应用 .....	92
4.4.3 平均电流和平均电磁转矩的简洁 表达式和函数关系图 .....	61	5.3.1 单层绕组和双层绕组 .....	93
4.4.4 近似计算公式 .....	63	5.3.2 定子磁动势谐波与转子涡流 损耗 .....	96
4.4.5 转矩系数 $K_T$ 与反电动势 系数 $K_E$ .....	63	5.3.3 齿槽组合的 LCM 值与齿槽转矩的 关系 .....	97
4.4.6 计及绕组电感的无刷直流电动机 机械特性 .....	65	5.3.4 $Z$ 为奇数的齿槽组合与 UMP 问题 .....	101
4.4.7 图解法计算电机特性和实例 验证 .....	66	5.3.5 负载下的纹波转矩 .....	103
4.4.8 绕组电阻和电感值变化对电机 特性的影响 .....	68	5.3.6 成对槽极数组合、槽极数比的 选择 .....	104
4.4.9 小结 .....	69	5.3.7 大小齿结构的集中绕组电机 .....	106
4.5 无刷直流电动机单回路等效 电路与视在电阻 $R_s$ .....	70	5.3.8 小结 .....	108
4.6 功率和效率、铜损耗和电流 有效值计算 .....	71	5.4 分数槽绕组电动势相量图和 绕组展开图 .....	109
4.7 绕组电阻和电感的计算 .....	73	5.4.1 相量图和绕组电动势相量 星形图 .....	109
4.7.1 电阻的计算 .....	73	5.4.2 分数槽集中绕组电动势相量 星形图 .....	110
4.7.2 电感的计算 .....	73	5.4.3 三相分数槽集中绕组电机绕组 展开图画法步骤 .....	110
4.7.3 一个电感计算的例子 .....	74	5.5 多相绕组 .....	111
参考文献 .....	75	5.5.1 多相分数槽绕组的对称条件 .....	112
<b>第 5 章 无刷直流电动机分数槽绕组和 多相绕组 .....</b>	<b>77</b>	5.5.2 五相分数槽集中绕组槽极数 组合 $Z_0/(2p_0)$ 的分析 .....	113
5.1 无刷直流电动机定子与绕组 结构 .....	77	5.5.3 $Z$ 为奇数的槽极数组合与 UMP 问题 .....	116
5.2 无刷直流电动机的分数槽 绕组 .....	77	5.5.4 五相分数槽集中绕组电机的绕组 系数计算 .....	117
5.2.1 分数槽绕组的优点 .....	77	5.5.5 一个五相绕组连接和霍尔传感器 位置的例子 .....	119
5.2.2 分数槽绕组槽极数 $Z_0/p_0$ 组合 约束条件 .....	79	5.5.6 小结 .....	120
5.2.3 三相绕组节距 $y=1$ 的分数槽集中 绕组 .....	80	5.6 一种六相无刷直流电机绕组 结构分析 .....	121
		5.6.1 六相无刷直流电机系统主要 优点 .....	121



5.6.2 两种六相无刷直流电动机绕组结构方案 .....	121	的原理 .....	152
5.6.3 两种绕组结构方案比较 .....	123	7.5.1 锁存型霍尔集成电路输出特性与极性的约定 .....	152
5.7 定子铁心制造方法 .....	123	7.5.2 霍尔传感器位置与三相磁动势轴线对应关系 .....	153
参考文献 .....	124	7.6 分数槽集中绕组无刷电机霍尔传感器位置的分布规律和确定方法 .....	155
<b>第6章 磁路与反电动势</b> .....	126	7.6.1 分数槽集中绕组单元电机槽数 $Z_0$ 为偶数的分析 .....	155
6.1 转子磁路结构 .....	126	7.6.2 分数槽集中绕组单元电机槽数 $Z_0$ 为奇数的分析 .....	157
6.1.1 转子磁路基本结构形式 .....	126	7.6.3 霍尔传感器安放在齿顶中央 .....	158
6.1.2 Halbach 阵列结构 .....	128	7.6.4 一种电动自行车用 51/23 分数槽集中绕组的例子 .....	160
6.1.3 转子结构选择实例 .....	130	7.6.5 小结 .....	161
6.2 常用永磁材料及其在永磁无刷直流电动机中的应用 .....	131	7.7 一般分数槽绕组展开图和霍尔传感器位置确定方法 .....	161
6.2.1 常用永磁材料 .....	131	参考文献 .....	163
6.2.2 注塑、粘结、烧结永磁材料和磁环多极充磁 .....	134	<b>第8章 永磁无刷直流电动机的电枢反应</b> .....	164
6.3 气隙磁通密度的分析计算 .....	134	8.1 电枢反应磁动势分解为直轴和交轴分量的分析方法 .....	164
6.3.1 永磁无刷直流电动机磁路模型和等效磁路 .....	135	8.2 基于直轴和交轴分量分析的传统观点 .....	165
6.3.2 表贴式结构气隙磁通密度计算 .....	137	8.3 内置式转子结构电枢反应磁动势的影响 .....	166
6.3.3 考虑气隙半径曲率的表贴式结构气隙磁通密度计算 .....	138	8.4 基于电枢反应磁动势分布图的电枢反应磁场与永磁磁场叠加的分析方法 .....	166
6.3.4 埋入式结构气隙磁通密度计算 .....	140	8.5 电枢反应磁动势对最佳换相位置的影响和超前换相方法 .....	168
6.3.5 内置 V 形径向式气隙磁通密度计算 .....	140	8.6 电机设计时需考虑电枢反应的最大去磁作用 .....	170
6.3.6 内置切向式气隙磁通密度计算 .....	141	8.7 分数槽集中绕组电机的电枢反应 .....	171
6.4 反电动势波形和反电动势计算 .....	142	8.8 分数槽集中绕组电机转子永磁体内产生涡流损耗 .....	172
6.4.1 绕组形式对反电动势波形的影响 .....	142	8.9 小结 .....	175
6.4.2 反电动势的计算 .....	145	参考文献 .....	175
6.5 一个计算例子 .....	146		
参考文献 .....	147		
<b>第7章 转子位置传感器及其位置的确定</b> .....	148		
7.1 转子位置传感器的分类和特点 .....	148		
7.2 霍尔集成电路的选择与使用注意事项 .....	150		
7.3 位置传感器最少个数 .....	151		
7.4 位置传感器的安装方式 .....	151		
7.5 无刷电机霍尔传感器位置确定			

<b>第 9 章 无刷直流电动机的转矩波动</b> ...	177	11.4 定子裂比的选择	223
9.1 产生转矩波动的原因	177	11.5 由电磁负荷确定电机主要尺寸的方法	225
9.2 换相转矩波动分析	181	11.5.1 电磁负荷与主要尺寸关系式、电机利用系数	225
9.2.1 只考虑电感、忽略绕组电阻的换相转矩波动分析	181	11.5.2 定子绕组电流密度 $j$ 与热负荷 $A_j$	227
9.2.2 考虑绕组电阻和电感换相过程的换相转矩波动分析	183	11.5.3 一些设计参考数据	228
9.2.3 换相时间 $t_1$ 的计算与 $t_1/T=1$ 条件的分析	185	11.5.4 单位转子体积转矩 (TRV)	228
9.2.4 一个电机的计算例子	186	11.5.5 主要尺寸基本关系式在考虑电感影响时的修正和一个电机例子的验证	228
9.2.5 小结	187	11.5.6 由电磁负荷确定电机主要尺寸方法的不确定性	230
9.3 抑制换相转矩波动的控制方法	188	11.6 由粘性阻尼系数 $D$ 确定电机主要尺寸的方法	230
9.4 PWM 控制方式对换相转矩波动的影响	189	11.7 一个电机主要尺寸计算例子	231
参考文献	191	参考文献	234
<b>第 10 章 永磁无刷直流电动机的齿槽转矩及其削弱方法</b>	193	<b>第 12 章 无刷直流电动机基本控制技术</b>	235
10.1 永磁无刷直流电动机的齿槽转矩	193	12.1 无刷直流电动机控制概述	235
10.2 齿槽转矩的解析表达式	194	12.1.1 无刷直流电动机电子控制器基本组成	235
10.3 采用分数槽绕组	196	12.1.2 无刷直流电动机控制的发展	236
10.4 转子磁极极弧系数的选择	200	12.1.3 开环和闭环控制系统	237
10.5 不等厚永磁体和不均匀气隙方法	204	12.2 起停控制和软起动	238
10.6 定子斜槽、转子斜极或转子磁极分段错位方法	205	12.3 正反转方法和转向控制	239
10.7 磁极偏移方法	206	12.4 制动控制	241
10.8 定子铁心齿冠开辅助凹槽方法	207	12.5 转速反馈信号的简易检出方法	243
10.9 槽口宽度的优化	210	12.6 无刷直流测速发电机	243
10.10 降低齿槽转矩实例	212	12.7 几种电压调节方法与 PWM 脉宽调制	245
10.11 小结	213	12.8 保护电路和电流的采样	247
参考文献	214	12.9 电流波形与提前关断技术	249
<b>第 11 章 电机设计要素的选择与主要尺寸的确定</b>	216	12.10 无刷直流电动机逆变器拓扑结构	250
11.1 设计技术要求与典型设计过程	216	12.11 六开关三相逆变器拓扑结构和栅极驱动	253
11.2 无刷电机 CAD 软件简介	217	12.12 四开关三相逆变器的工作	
11.3 若干设计要素的选择	217		

原理与控制 .....	254	传感器的正弦波驱动 .....	283
12.13 以绕组切换方式扩展转速范围 .....	256	14.3 利用开关型霍尔集成电路作转子位置传感器的正弦波驱动 .....	283
12.14 几种无刷直流电机实用控制电路例 .....	259	14.3.1 基于低分辨率转子位置信息的高分辨率转子位置识别新思路 .....	283
12.14.1 基于 UCC3626 的速度控制电路 .....	259	14.3.2 Atmel 公司的 ATtiny261/461/861 系列正弦波微控制器 .....	285
12.14.2 高压 450V 三相无刷直流电动机驱动电路 .....	259	14.3.3 东芝公司正弦波控制器和驱动器专用芯片 .....	287
12.14.3 微控制器 MCU 与 L6235 组合的驱动控制电路 .....	265	14.4 无传感器技术在正弦波驱动中的应用 .....	290
参考文献 .....	266	参考文献 .....	292
<b>第 13 章 无刷直流电动机无位置传感器控制 .....</b>	<b>268</b>	<b>第 15 章 单相无刷直流电动机与控制 .....</b>	<b>293</b>
13.1 反电动势检测法 .....	268	15.1 单相无刷直流电动机的工作原理与结构 .....	293
13.1.1 反电动势过零法 .....	269	15.2 四种不对称气隙结构的转矩分析比较 .....	295
13.1.2 反电动势积分及参考电压比较法 .....	271	15.3 单相无刷直流电动机的超前换相与滞后换相分析 .....	297
13.1.3 反电动势积分及锁相环法 .....	271	15.4 单相无刷直流风机特性和基本换相电路 .....	298
13.1.4 续流二极管法 .....	272	15.5 无刷直流风机在计算机等电子设备中使用的若干问题 .....	301
13.2 3 次谐波反电动势检测法 .....	272	15.6 用于光盘驱动器主轴中的单相无刷直流电动机 .....	303
13.3 定子电感法 .....	275	参考文献 .....	305
13.4 $G(\theta)$ 函数法 .....	275	<b>附录 .....</b>	<b>306</b>
13.5 扩展卡尔曼滤波法 .....	276	附录 A 作者已发表的相关文献 .....	306
13.6 状态观测器法 .....	277	附录 B 几种霍尔集成电路数据表 .....	308
13.7 利用微控制器和数字信号处理器的无传感器控制 .....	277	附录 C 分数槽集中绕组系数表 .....	310
13.7.1 利用 ST7MC 微控制器的反电动势过零法无传感器控制的例子 .....	278	附录 D 平均电流比 $K_A$ 平均电磁转矩比 $K_T$ 和 $K_T/K_E$ 比的函数表 .....	312
13.7.2 利用 MC56F8013 微控制器的反电动势过零法无传感器控制的例子 .....	279	附录 E GB/T 21418—2008 永磁无刷电动机系统通用技术条件 .....	314
参考文献 .....	280		
<b>第 14 章 无刷直流电动机低成本正弦波驱动控制 .....</b>	<b>282</b>		
14.1 低成本正弦波驱动控制的需求 .....	282		
14.2 利用线性霍尔元件作转子位置			



# 第 1 章 绪 论

## 1.1 无刷直流电动机是最具发展前途的机电一体化电机

无刷直流电动机是随着半导体电子技术发展而出现的新型机电一体化电机，它是现代电子技术（包括电力电子、微电子技术）、控制理论和电机技术相结合的产物。

众所周知，直流电动机具有优越的调速性能，主要表现在控制性能好、调速范围宽、起动转矩大、低速性能好、运行平稳、效率高，应用场合从工业到民用极其广泛。在普通的直流电动机中，直流电的电能是通过电刷和换向器进入电枢绕组，与定子磁场相互作用产生转矩的。由于存在电接触部件——电刷和换向器，结果产生了一系列致命的缺陷：

- 1) 机械换向产生的换向火花引起换向器和电刷磨损、电磁干扰、噪声大，寿命短；
- 2) 结构复杂，可靠性差，故障多，需要经常维护；
- 3) 由于换向器存在，限制了转子转动惯量的进一步下降，影响了动态特性。

在许多应用场合下，它是系统不可靠的重要来源。虽然直流电动机是电机发展历史上最先出现的，但它的应用范围因此受到限制，使后来者且运行可靠的交流电机得到发展，取而代之广泛应用。

交流电机的历史超过百年。但是，无刷直流电动机历史只有几十年。1955 年美国 D. Harrison 等人首次申请了用晶体管换相电路代替机械电刷的专利，这是无刷直流电动机的雏形。在 1962 年，T. G. Wilson 和 P. H. Trickey 提出“固态换相直流电机”（DC Machine with Solid State Commutation）专利，这标志着现代无刷电动机的真正诞生。从 20 世纪 60 年代初开始，无刷直流电动机进入到应用阶段。因其较高的可靠性，无刷直流电动机最先在宇航技术中得到应用。1964 年，它被美国国家航空航天局（NASA）使用，用于卫星姿态控制、太阳能电池板的跟踪控制、卫星上泵的驱动等。在 1978 年当时的联邦德国 Mannesmann 公司的 Indramat 分部的 MAC 经典无刷直流电动机及其驱动器在汉诺威贸易展览会正式推出，是电子换相的无刷直流电动机真正进入实用阶段的标志。国际上对无刷直流电动机进行了深入的研究，从研制方波无刷电机基础上发展到正弦波无刷电机——新一代的永磁同步电动机（PMSM）。随着永磁新材料、微电子技术、自动控制技术以及电力电子技术特别是大功率开关器件的发展，无刷电动机得到了长足的发展。50 年来，它逐步推广到其他军事装备、工业、民用控制系统以及家庭电器领域中，现在已成为最具发展前途的电机产品。

据报道，2007 年在北美的消费类电动机总销量为 180 亿美元，比 2002 年的 140 亿美元有所上升，年增长率达 5%。电动机总销量在很大程度上受到汽车和其他消费类产品应用的影响。电动机总销量中大部分是有刷直流电动机（74 亿美元），其次是交流感应电动机（50 亿美元），第三位是无刷直流电动机（41 亿美元），其他类别包括交流/直流电动机、步进电机等。可见无刷直流电动机应用日益增长已占相当份额，参见图 1-1。

无刷直流电动机由电动机和电子驱动器两部分组成。图 1-2 是无刷直流电动机基本结构框图。电动机部分的结构和经典的交流永磁同步电动机相似，其定子上有多相绕组，转子上镶有永久磁铁。但由于运行原理的需要，还需要有转子位置传感器。转子位置传感器的作用是检测出转子磁场轴线和定子相绕组轴线的相对位置，决定每一时刻相绕组的通电状态，即决定电子驱动器的功率开关器件的通/断状态，接通/断开电动机相应的相绕组。因此，无刷直流电动机本质上是由电子逆变器驱动的有位置传感器反馈控制的交流同步电动机。图 1-3 和图 1-4 是小型内转子和外转子的无刷直流电动机典型结构，它们的电子驱动器与电动机分离。图 1-5 是一种内置转速传感器和控制电路板成一体的无刷直流电动机。

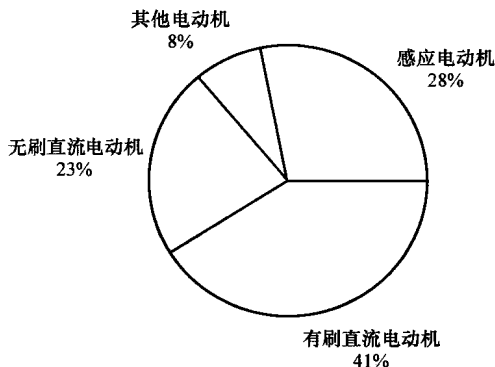


图 1-1 2007 年在北美销售各种消费类电动机的比例

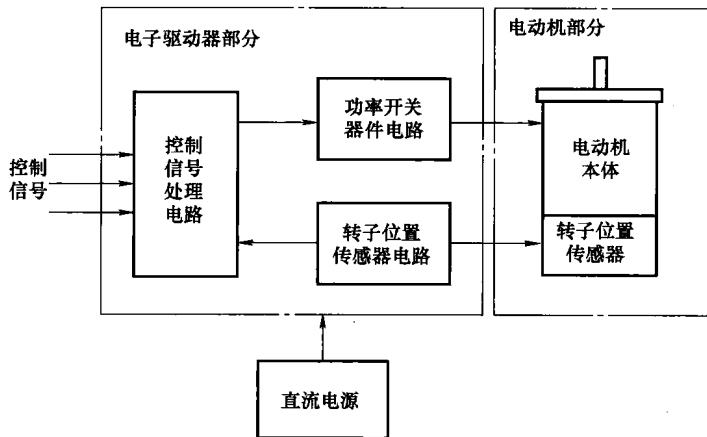


图 1-2 无刷直流电动机基本结构框图

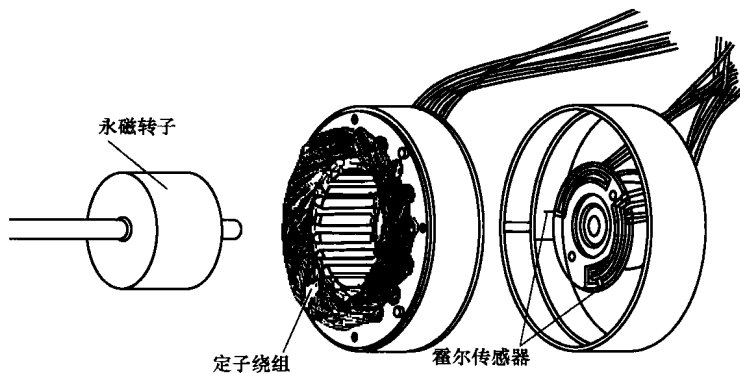


图 1-3 一种小型内转子的无刷直流电动机结构

从另一角度看,无刷直流电动机可看成是一个定转子倒置的直流电动机。普通直流电动机的电枢绕组在转子上,永磁体则在定子上。有刷直流电动机的所谓换向,实际上是其相绕组的换向过程,它是借助于电刷和换向器来完成的。而无刷直流电动机的相绕组的换相过程则是借助于位置传感器和电子逆变器的功率开关来完成的。无刷直流电动机以电子换相代替了普通直流电动机的机械换向,从而提高了可靠性。无刷直流电动机具有有刷直流电动机相似的线性机械特性和线性转矩-电流特性,因而被称为无刷直流电动机(Brushless DC Motor)或电子换相电动机(Electronically Commutated Motor, ECM)。

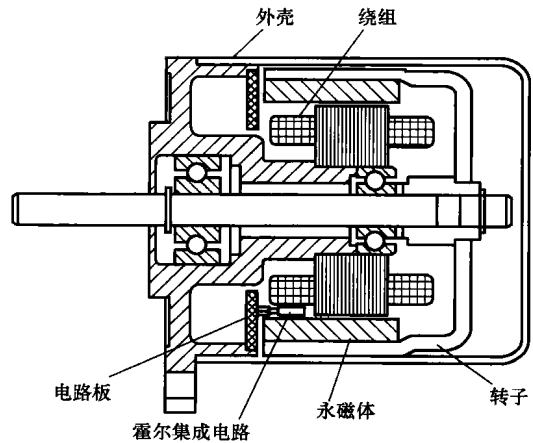


图 1-4 一种小型外转子的无刷直流电动机结构

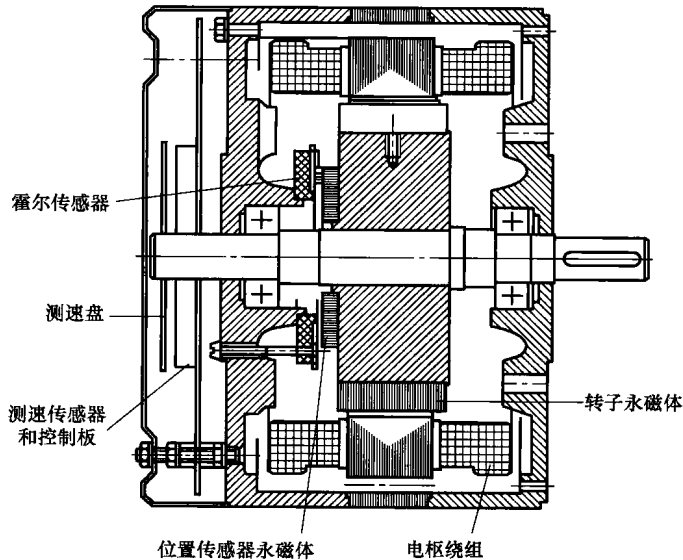


图 1-5 一种内置转速传感器和控制电路板的无刷直流电动机

作为机电一体化电机产品,无刷直流电动机与配套的控制器的一个有机的整体,两者应当同步设计,才能确保最佳的性能和最佳的成本。因此作为无刷直流电动机用户,最佳采购方式是电机供应商和控制器供应商是来自同一家公司。从制造商角度看,同时精通电机和电力电子控制两种技术的公司取得成功的机会要高得多。

## 1.2 无刷直流电动机的技术优势

与普通有刷直流电动机和感应(异步)电动机比较,无刷直流电动机的关键技术特征是:

#### 4 永磁无刷直流电机技术

- 1) 经电子控制换相获得类似直流电动机的运行特性，有较好的可控性、宽调速范围。
- 2) 需要转子位置反馈信息和电子多相逆变驱动器。
- 3) 本质上是交流电动机，由于没有电刷和换向器的火花、磨损问题，可工作于高速，可得到较高的可靠性，工作寿命长，无需经常维护。
- 4) 采用永磁产生气隙磁场，功率因数高，转子的损耗和发热低，有较高的效率；有资料对比，7.5kW 异步电动机效率为 86.4%，同容量的无刷直流电动机效率可达 92.4%。
- 5) 必须有电子控制部分，所以总成本比有刷直流电动机高。

尽管成本较高，但永磁无刷直流电动机性能有明显的优势，表 1-1 给出永磁无刷直流电动机与永磁有刷直流电动机和交流感应电动机的比较。近年，经业者的努力，随着永磁材料和电力半导体器件成本的降低，无刷直流电动机市场已不断扩展，在许多电机应用领域的竞争中，永磁无刷直流电动机已经并正在不断地取代永磁有刷直流电动机和交流感应电动机，获得越来越广泛的应用。

表 1-1 永磁无刷直流电动机与永磁有刷直流电动机和交流感应电动机的比较

	永磁无刷直流电动机	永磁有刷直流电动机	交流感应电动机
定子	多相绕组	永磁	多相绕组
转子	永磁	绕组	线绕组或笼型绕组
转子位置传感器	需要	不需要	不需要
电滑动接触火花	无,低 EMC 干扰	换向器与电刷,EMC 干扰	无,或可能有集电环
EMC 干扰	较低	高	低
可闻噪声	较低	高	低
电子控制器	必需	不是必需,调速时需要	不是必需,调速时需要
使用电源	DC	DC	AC
使用电压范围	高,受功率器件耐压限制	较低,受换向器耐压限制	高
机械特性	接近线性	线性	非线性
起动转矩倍数	较高	较高	较低
高速范围	高,受转子离心力限制,已有每分钟为数十万转的产品	低,受换向器离心力限制	高,受转子离心力限制
效率	高,转子几乎没有损耗	较低,换向器与电刷摩擦损耗,电刷压降损耗	低,转子有损耗
转子转动惯量	较小,响应快速	大	较小
功率密度	高,定子绕组容易散热	较低,转子绕组不容易散热	较低,转子有损耗发热
转矩波动	大	小	小
可控性	好	好	差
寿命和可靠性	较高,主要由轴承决定	低,电刷换向器脆弱环节	高
安全性	较高	低	高
维护	不必经常维护	需要定期清洁或更换电刷	不必经常维护
使用温度范围	较低,受到永磁材料限制	较低	较高
成本	高,必须有永磁材料和控制器	较高,必须有永磁材料和换向器	低

有刷直流电动机有优异的控制性能，但其换向器与电刷是致命的缺陷。无刷直流电动机以电子换相取代有刷直流电动机的机械换向又保留有刷直流电动机的基本特性。原来使用有刷直流电动机的许多应用场合，逐步被无刷直流电动机所取代，包括航空航天和军事装备中的控制系统、工业自动化系统、信息处理和计算机系统，医疗设备，以至民用的音响影像产品。

交流感应电动机在家用和工业驱动中占据的绝对地位正在受到无刷直流电动机的挑战。如新一代的空调器、洗衣机、电冰箱、吸尘器以至电风扇出现采用无刷直流电动机的趋势。工业变速驱动中变压变频（VVVF）控制的交流感应电动机逐渐被永磁无刷直流电动机矢量控制所取代，变频器被无刷控制器所取代。新一代电梯曳引机控制系统就是一个明显的例子。仪器设备中采用的小型交流风机大量被尺寸更小效率更高的无刷直流风机所取代。

在数字运动控制系统中，步进电动机由于可直接数字控制和开环控制曾经得到长足发展。今天它只能在一些要求不高的小功率系统中应用。而在要求高精度、高速度、高可靠性数控系统中，采用永磁无刷直流电动机的闭环交流伺服系统已经成为主流。

但应当指出，无刷直流电动机也有不足之处，主要是：

- 1) 需要电子控制器才能够工作，增加了技术复杂性和制作成本；
- 2) 需要位置传感器，增加了结构复杂性和成本，降低了可靠性；
- 3) 转子永磁材料限制了电机使用环境温度，不适用于高温场合；
- 4) 有较明显转矩波动，限制了电机在高性能伺服系统、低速度纹波系统中的应用。

无刷直流电动机的主要缺点是成本较高。这主要不是因为电机本身，其实与有刷直流电动机或感应电动机相比，无刷直流电动机的结构还是比较简单的。在某些应用中，无刷直流电动机成本较高是由于它需要驱动电路。对于那些电机只作动力源而不需要调节转速的应用场合，驱动电路成了额外的成本负担。对于单速应用，感应电动机是最合适的。但是无刷直流电动机有更高的效率和更小的尺寸、更快速的响应和可以软起动等优点，它为许多行业提供一种更具吸引力的选择，逐步被接受。

对于调速控制系统或位置控制系统来说，不管采用哪种电机，电子驱动器总是需要的，这时采用无刷直流电动机可能是性价比更高的解决方案。例如，与电子变频器驱动异步电机相比，改换以无刷直流电动机及其驱动器可提供更便宜、更精确、调速范围更宽的控制。因此，从磁盘驱动器到数控机床，已全部采用了无刷直流电动机技术。

随着相关技术和自身技术进步，无刷直流电动机这些存在的问题已得到重视，并正在获得改善。例如，新技术的采用，找到了许多抑制齿槽转矩和换相转矩波动的方法；开发了无位置传感器控制技术和转矩波动小的正弦波驱动技术；电子控制器成本大幅度降低等。本书对这些问题将有专门章节给予详细介绍。

### 1.3 21 世纪是永磁无刷直流电动机广泛推广应用的世纪

永磁无刷直流电动机按驱动电流方式可分为方波驱动和正弦波驱动，后者又称为同步型永磁交流伺服电动机，主要用于伺服控制。20 世纪 80 年代才进入实用阶段的同步型永磁交流伺服电动机是可与直流伺服电机性能匹敌的新型伺服电动机。据国际电机会议专家分析，交流伺服电动机正以每年 15% 的速度取代直流伺服电动机，交流伺服电动机将会占据首位，

其前景是极其美好的。因此，国际上有电机专家断言，21世纪是永磁无刷直流电动机广泛推广应用的世纪。特别是在小型电动机领域，无刷直流电动机将占据主导地位。

现在，由于市场需要的增长，面向3A（工业自动化、办公自动化、家居自动化），永磁无刷直流电动机的功率覆盖范围早已突破微电机功率界限，从毫瓦级到数十千瓦，主要应用领域包括：

### 1. 在计算机外围设备、办公自动化设备、数码电子消费品中的应用

从数量上说，这是无刷直流电动机应用最多的领域，已占据了无可取代的地位。例如在数字打印机、软盘驱动器、硬盘驱动器、CD-ROM和DVD-ROM等光盘驱动器、传真机、复印机、磁带记录仪、电影摄影机、高保真度录音机和电唱机的主轴和附属运动的控制等。

单相无刷直流风机也在计算机外围设备和办公自动化设备以及其他自动化仪器设备中获得广泛应用，大量挤占了原来交流风机的市场。

### 2. 在工业驱动，伺服控制中的应用

同步型永磁交流伺服电动机的伺服控制器部分，除开关器件脉宽调制（PWM）功率电路外，还包括专用集成电路或者微处理器对电机速度、电流环进行控制、进行各种失常情况的保护和故障自诊断。这种新型电机的典型应用，有火炮，雷达等军事装备控制，数控机床、组合机床的伺服控制，机器人关节伺服控制等。

20世纪90年代以来，在高精度的机床数控设备进给伺服控制中相当多地采用了同步型永磁交流伺服电机，取代宽调速的直流伺服电动机的势头强劲。近年来，在新一代数控机床的进给伺服控制中采用永磁交流直线伺服电动机，采用同步型永磁交流伺服电动机代替变频感应电动机作为机床的主轴直接驱动电动机，以提高数控机床快速性和加工效率，也已成为新的研究和应用热点。在军用和工业用机器人和机械手的驱动中，无刷直流电动机的应用相当广泛。目前全世界机器人的拥有量已经超过100万台，且每年以大于20%的速度增长，这已经成为无刷直流电动机的主要应用领域之一。大功率无刷直流电动机（一般采用晶闸管作为功率器件，习惯上称为无换向器电机）在低速、恶劣环境和有一定调速性能要求的场合有着广泛的应用前景，如钢厂的轧钢机、水泥窑传动设备、抽水蓄能机组等。

近年出现的最新一代电梯无齿轮曳引机，是以同步型永磁交流伺服电动机为动力，磁场定向矢量控制和快速电流跟踪控制的电梯驱动装置，它和有齿轮传动的直流曳引机、以感应电动机变频驱动的交流曳引机相比，有更优异控制性能，并具有高效率、低噪声、小体积、轻重量等优点，迅速被国际知名电梯公司重视，纷纷开发出自己的无齿轮曳引机电梯，推向高端市场。无齿轮直接驱动无刷曳引机引起电梯革命性的变革，出现了小机房和无机房电梯。

此外，同步型永磁交流伺服电动机在纺织机械、印刷机械、包装机械、冶金机械、邮政机械、自动化流水生产线、各种专用设备中均有广泛的应用。

### 3. 在汽车产业中的应用

据美国市场调查分析，在每辆豪华轿车中，需永磁电机59个，一般轿车中也需20~30个。另一方面，汽车节能日渐受到重视，现代汽车要求所使用的电机改善性能和提高效率，采用扁平盘式结构，以减小空间，提高出力，消除火花干扰，降低噪声，延长寿命，便于集中控制，这正是无刷直流电动机的特长。预计汽车用的有刷直流电动机将不断被永磁无刷直流电动机所替代。



在电动汽车、电动摩托车、电动自行车等交通工具中的无刷直流电动机将作为主动力的驱动电动机。以环保为目的的电动汽车中，其牵引驱动电动机以永磁无刷直流电动机最有发展前途。其中，内置式永磁无刷电动机也称为混合式永磁磁阻电动机，该电机在永磁转矩的基础上叠加了磁阻转矩，磁阻转矩的存在有助于提高电动机的过载能力和功率密度，而且易于弱磁调速，扩大恒功率范围运行，适合用作电动汽车高效、高密度、宽调速牵引驱动电动机。它们已在日本和美国大汽车公司的新车型设计中采用。

1998~2002年期间，美国国家自然科学基金会（NSF）资助美国国家电力电子中心研发车辆电子动力驱动系统、电子伺服控制系统。线控（X-by-wire）的汽车电子伺服系统在未来将是十分重要的技术，该技术可将车辆中各种独立的系统（如转向、制动、悬挂等系统）集成到一起由计算机调控，使汽车的操纵性、安全性以及总体结构大大改善。目前，电子动力转向盘和线控制动已经在一些欧洲车型上被采用。汽车电子伺服技术是具有革命性的技术，随着这个技术的使用，许多传统的机械部件将会在未来的汽车上消失，而越来越多的车用伺服电机将出现在未来的汽车上。

全球最大的汽车零部件企业——美国德尔福汽车系统公司预计，在未来的3~5年内，全世界的汽车将逐步采用电子伺服驱动系统，如电子动力转向盘和线控制动伺服驱动系统。目前，美国德尔福汽车系统公司正在全球范围内寻找年产300万台以上的电子动力转向盘的无刷伺服电动机合作伙伴。

长期以来，驾驶员一直是通过控制手中的转向盘来使汽车转向，该系统传统的是一个液压驱动的转向系统。电动转向控制系统是德尔福的新技术，电动转向系统（EPSS）是全电子的、独立于发动机的转向系统。该系统不同于传统液压泵转向系统，它由电子电动机（无刷电动机）驱动，革除了传统的液压泵、软管、驱动带或滑轮之类的附件，因此电动转向系统成为更加高效的环保系统。这一系统能使某些车型的燃油经济性提高5%。

#### 4. 在医疗设备领域中的应用

例如，高速离心机，牙科和手术用高速器具。红外激光调制器用作热像仪、测温仪器等中都采用无刷直流电动机。国外已有用于制作植入人体内的人工心脏驱动的小型血泵的无刷直流电动机。

#### 5. 在家用电器中的应用

目前，以变频空调器、变频冰箱、变频洗衣机为代表的变频家用电器逐步进入我国消费市场。而且变频家用电器正在由“交流变频”向俗称的“直流变频”转变，已是明显的发展趋势。这种转变实际上就是变频家电用变频空调压缩机、变频冰箱压缩机、空调用室内外风机、空气清新换气扇、变频洗衣机所用的电动机，过去是单相感应电动机或VVVF装置供电的感应电动机，现已被永磁无刷直流电动机及其控制器所取代。这种由“交流变频”向“直流变频”的转变使变频家用电器在节能高效、低噪声、舒适性、智能化等方面都有新的提高。1998年至今我国变频空调器发展迅速，我国空调器开始了直流化进程。直流无刷电动机在较大的转速范围内可以获得较高的效率，更适合家用电器的需要，日本的变频空调器的全直流化早已批量生产。我国的变频压缩机厂家已开始采用无刷直流电动机来代替三相交流感应电动机，将出现以永磁无刷直流电动机驱动压缩机和室内外风机的所谓全直流化空调器，它将更节能、更舒适。

此外，在特殊环境条件下，如潮湿、真空、有害物质的场所，为提高系统的可靠性，采

用无刷直流电动机。其中，军用和航天领域是无刷直流电动机最先得得到应用的领域。

### 1.4 推动无刷直流电动机技术和市场蓬勃发展的主要因素

(1) 永磁无刷直流电动机自身性能的明显优势，在许多竞争领域中，永磁无刷直流电动机已不断地取代有刷直流电动机和感应电动机，并获得越来越广泛的应用。

(2) 新型的高性能永磁材料技术的进步、电力半导体器件和专用控制集成电路的进展、新控制策略出现，促进永磁无刷直流电动机自身技术的进步。

#### 1) 高性能永磁材料技术进展的促进。

现代无刷直流电动机都是以永磁励磁的，因此，永磁材料的进步对电动机影响很大。过去的铝镍钴永磁材料已逐步被铁氧体永磁、稀土类永磁材料所取代。特别是20世纪80年代高磁能积的钕铁硼永磁材料的出现和改进，极大地推动永磁电机的发展。它具有高的性价比，随着其性能的提高和应用问题的解决，特别是价格的下降，迅速在无刷直流电动机得到大量应用。使无刷直流电动机在进一步减少了电机的用铜量、减小体积重量、提高功率密度、提高效率、改善性能方面有了明显的进展。钕铁硼永磁材料使无齿槽结构的无刷直流电动机能够实现，它具有消除齿槽效应、低转矩波动、低噪声、运行平稳、低电磁干扰等特点。近年粘结型、注塑型铁氧体永磁和钕铁硼永磁材料的出现，使无刷直流电动机在兼顾不同价格、性能层次有更多的选择。

#### 2) 电力半导体器件进展的促进。

无刷直流电动机的原理构思早已提出，但只有到了20世纪60年代电力半导体器件出现才使无刷直流电动机进入实用阶段。电力电子技术为电机控制驱动器主电路提供最重要的电力半导体开关器件。随着电力半导体器件的迅猛发展，从小功率晶体管，到大功率晶体管(GTR)、金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)等新型开关器件，以及对功率开关器件门极(或基极、栅极)驱动技术的进展，特别是近年崭新的功率模块、智能功率模块(IPM)的出现，完全改变了无刷直流电动机驱动器的面貌，减小了驱动器体积、重量，提高了运行可靠性和改善了可控性，更大大地扩大了无刷直流电动机的功率和速度范围。

#### 3) 专用控制集成电路进展的促进。

随着微电子技术的发展，各国半导体厂商不断地推出无刷直流电动机专用控制集成电路，解决了电动机和电子电路结合问题，也有利于控制器的小型化和可靠性的提高。特别是随着专用控制集成电路的批量生产，价格大幅度下降，解决了妨碍无刷直流电动机向民用领域发展的高价格问题，使无刷直流电动机的应用更方便、更容易推广普及。随着电动机应用技术越来越复杂，系统设计者正在通过利用电动机控制集成电路寻求开发工作的简化。使用电动机控制集成化的一个重要因素是使应用者容易获得最佳的硬件和软件解决方案，人们可用最少的开发时间，就能迅速地将其最终产品推向市场销售。各国电子元件制造商(如美国的国家半导体公司、摩托罗拉公司、德州仪器公司、飞兆公司、国际整流器公司，日本的东芝公司、三洋公司、松下公司、日立公司、三菱公司，还有德国、英国、法国、荷兰、意大利等国家的公司)瞄准无刷直流电动机这一巨大市场，十分重视无刷直流电动机专用控制集成电路芯片的开发和生产。

(3) 各行各业对节能、调速控制要求日益迫切,特别是在工业驱动和家用电器驱动领域,节能高效是环保要求,效能指标已逐步成为市场准入条件,甚至被接纳为国家标准、国际标准,致使整机设计者不得不采纳、应用有较高效率的无刷直流电动机。

## 1.5 无刷直流电动机技术发展动向

综观近年世界无刷直流电动机技术发展,呈现下列发展动向:

1) 产品向专用化、多样化方向发展。

几乎所有的无刷直流电动机产品都是为特定用途设计制造的。试图生产一种通用系列无刷直流电动机来适应千变万化的应用市场需求,是不可能的。各厂商设计制造各种特殊结构、特定用途的无刷直流电动机,在设计、结构和工艺新技术方面不断地革新,以适应不同整机市场的需求。例如:

适应不同性能参数永磁材料,瓦型、环型表面粘接结构和各种不同设计嵌入式内磁体结构等新的转子磁路结构出现。出现各种外转子、轴向气隙(平面电动机)、无齿槽结构电机、直线无刷直流电动机等。

无论是采用铁氧体永磁或稀土永磁材料的永磁无刷直流电动机,常见的永磁转子结构是表面粘贴式(以下简称为表贴式)永磁(SPM)结构。近年,日本各知名家电厂商在新一代变频空调压缩机的永磁无刷直流电动机中,分别采用了各自的专利转子结构,嵌入式永磁(IPM)转子结构已成为主流。IPM转子结构的电动机可得到较高的效率,增强转子抗高速离心力能力。

2) 通过结构和工艺革新,以生产自动化、规模化,使产品向低成本、低价格方向发展。

由于电子换相电路的成本高于机械换向器,因而使无刷直流电动机的成本及售价增加,无刷直流电动机的价格是限制其应用扩展到民用产品领域的主要因素。针对国内外汽车行业、家电行业及办公自动化领域对低成本无刷直流电动机需求量越来越大的现状,所研制的新型永磁无刷直流电动机目的,在于提供一种结构简单、制作容易、性能可靠、控制方便、成本低廉的无刷直流电动机,以便适用于工业控制,特别是各类民用产品的领域。

在结构和工艺上革新的例子:分割型定子铁心结构和连续绕线工艺方法的采用,对于节距 $y=1$ 分数槽设计、用专用绕线机直接绕制定子线圈,外转子结构的电机比较方便;但对于内转子结构的电机,特别是定子内径小的小功率电机,就要困难得多了。为此,一些分割型定子铁心结构的构思提出来了。这种分割型定子铁心结构工艺技术使永磁无刷直流电动机实现高效率、大批量、自动化生产,日本有多家厂商效法,推出自己专利的定子铁心分割方案。这一技术已开始引起国内个别厂商关注,并进行探索试验。

目前,在信息技术(IT)领域,例如软盘、硬盘、数字盘(DVD)和CD主轴驱动器使用的无刷直流电动机,由于市场竞争、大规模生产,价格已经相当低了。

3) 在电机设计方面,过去,无刷直流电动机大多采用整数槽设计。近年,分数槽技术在永磁无刷直流电动机的应用日益增多。

无刷直流电动机采用分数槽技术有如下一些好处:

① 对于多极的无刷直流电动机可采用较少的定子槽数,有利于槽满率的提高,进而提