

第2版

永磁无刷 直流电机技术

PERMANENT MAGNET
BRUSHLESS DC MOTOR
TECHNOLOGY



谭建成 邵晓强 编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

永磁无刷直流电机技术

第 2 版

谭建成 邵晓强 编著



机械工业出版社

永磁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。

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与永磁同步电动机的结构和性能比较;无刷直流电机数学模型;计及绕组电感的特性与参数计算方法;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与比较;气隙磁通密度的计算;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;主要尺寸基本关系式考虑电感影响的修正;由黏性阻尼系数确定电机主要尺寸的方法;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。本书同时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。

本书遵循理论与实用技术相结合的编写原则,可供即将从事或正在从事与无刷直流电机有关的研究开发、设计、生产、控制和应用的科技人员、管理人员,以及大专院校教师、学生和研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

永磁无刷直流电机技术/谭建成,邵晓强编著. —2 版. —北京:机械工业出版社, 2018. 6

ISBN 978-7-111-59986-9

I. ①永… II. ①谭… ②邵… III. ①永磁式电机-无刷电机-直流电机 IV. ①TM351

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 104849 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:罗莉 责任编辑:罗莉 责任校对:刘志文 佟瑞鑫

封面设计:鞠杨 责任印制:常天培

北京京丰印刷厂印刷

2018 年 7 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·24.5 印张·599 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-59986-9

定价:99.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88361066

读者购书热线:010-68326294

010-88379203

封面无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

金书网:www.golden-book.com

教育服务网:www.cmpedu.com

第2版前言

本书自2011年出版以来，承蒙广大读者厚爱，先后重印了7次。在此，编者对各位读者的认可表示由衷感谢。由机械工业出版社提议，现修订再版。

本次修订，除了将个别排印有误之处更正外，增补了一些内容。例如，在第5章和第7章增补了多相绕组连接方式拓扑结构探讨；多相封闭形绕组不足的分析；九相封闭形绕组与九相三Y两种连接方式机械特性的比较；多相封闭形绕组无环流条件；三相电机改换为三角形接法的霍尔传感器定位；适用于各类无刷直流电机确定霍尔传感器安放位置的通用方法；从单相到11相几种绕组拓扑结构的霍尔传感器安放位置实例等。

本次修订，特邀西安微电机研究所副总工程师、西安伺服电机有限公司总经理邵晓强研究员级高级工程师为第11章增补了两个永磁无刷直流电机电磁设计计算实例，供读者参考，希望对读者的电机设计工作有所帮助。

在本次修订工作中，机械工业出版社罗莉副编审对编者给予了鼓励和支持，进行了十分细致的编辑工作，在此深表谢意。

编者学识有限，不一定能完全满足读者的期望，有错漏和不当之处，敬请读者和同行给予批评指正。谢谢。

编者
2018年3月

第1版前言

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，在航空航天系统、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的应用。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、由黏性阻尼系数 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、应用的科技人员及管理人员，大专院校教师、本科生和研究生参考。

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
于广州

目 录

第 2 版前言	
第 1 版前言	
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	9
1.5 无刷直流电动机技术发展动向	10
1.6 小结	13
参考文献	13
第 2 章 方波驱动与正弦波驱动的原理和比较	15
2.1 无刷直流电动机 (BLDC) 与永磁同步电动机 (PMSM)	15
2.2 方波驱动和正弦波驱动的转矩产生原理	15
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	17
2.4 小结	21
参考文献	22
第 3 章 无刷直流电动机的绕组连接与导通方式及其选择	23
3.1 常见绕组连接与导通方式	24
3.1.1 两相绕组电机连接与导通方式	24
3.1.2 四相绕组电机连接与导通方式	25
3.1.3 三相绕组电机连接与导通方式	27
3.1.4 五相星形绕组电机连接与导通方式	28
3.1.5 小结	30
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	30
3.3 绕组利用率和最佳导通角的分析	31
3.3.1 桥式电路封闭绕组与星形绕组	32
3.3.2 非桥式 m 相无刷直流电动机最佳导通角的分析	32
3.3.3 小结	35
3.4 桥式换相的三相绕组 Δ 接法和 Y 接法的分析与选用	35
3.4.1 三相无刷直流电动机 Y 和 Δ 两种绕组接法及其转换关系	36
3.4.2 同一台电机采用三角形与星形接法的比较	37
3.4.3 3 次谐波环流和采用三角形接法条件	38
3.4.4 应用实例	39
3.4.5 小结	41
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	41
参考文献	42
第 4 章 无刷直流电动机数学模型、特性和参数	43
4.1 无刷直流电动机简化模型和基本特性	43
4.1.1 基本假设和简化模型基本等效电路	43
4.1.2 无刷直流电动机机械特性的统一表达式	44
4.1.3 理想空载点平均电流不等于零	46
4.1.4 无刷直流电机主要参数 K_E 、 K_T 、 R_{eq} 和 D	48
4.1.5 重要参数——黏性阻尼系数 D	48
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	50
4.1.7 一个三相无刷直流电动机特性和系数计算例子	53
4.2 绕组电感对无刷直流电动机特性的影响	55
4.3 非桥式 120° 导通三相无刷直流电动机的非线性工作特性分析	55
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	58	损耗	98
4.4.1 换相过程分析和瞬态三相电 流解析表达式	58	5.3.3 齿槽组合的 LCM 值与齿槽转 矩的关系	99
4.4.2 平均电流和平均电磁转矩 表达式	62	5.3.4 Z 为奇数的齿槽组合与 UMP 问题	102
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	64	5.3.5 负载下的纹波转矩	104
4.4.4 近似计算公式	65	5.3.6 成对槽极数组组合、槽极数比 的选择	105
4.4.5 转矩系数 K_T 与反电动势系 数 K_E	66	5.3.7 大小齿结构的集中绕组电机	107
4.4.6 计及绕组电感的无刷直流电机 机械特性	68	5.3.8 小结	108
4.4.7 图解法计算电机特性和实例 验证	68	5.4 分数槽绕组电动势相量图和绕组 展开图	110
4.4.8 绕组电阻和电感值变化对电机 特性的影响	71	5.4.1 相量图和绕组电动势相量 星形图	110
4.4.9 小结	72	5.4.2 分数槽集中绕组电动势相量 星形图	111
4.5 无刷直流电动机单回路等效电路 与视在电阻 R_s	72	5.4.3 三相分数槽集中绕组电机绕组 展开图画法步骤	111
4.6 功率和效率、铜损耗和电流有效 值计算	73	5.5 多相绕组	112
4.7 绕组电阻和电感的计算	75	5.5.1 多相分数槽绕组的对称条件	113
4.7.1 电阻的计算	75	5.5.2 五相分数槽集中绕组槽极组 合 $Z_0/(2p_0)$ 的分析	114
4.7.2 电感的计算	75	5.5.3 Z 为奇数的槽极组组合与 UMP 问题	117
4.7.3 一个电感计算的例子	77	5.5.4 五相分数槽集中绕组电机的绕 组系数计算	117
参考文献	78	5.5.5 一个五相绕组连接和霍尔传感 器位置的例子	119
第 5 章 无刷直流电动机分数槽绕组 和多相绕组	79	5.5.6 小结	120
5.1 无刷直流电动机定子与绕组结构	79	5.6 一种六相无刷直流电机绕组结构 分析	121
5.2 无刷直流电动机的分数槽绕组	80	5.6.1 六相无刷直流电机系统主要 优点	121
5.2.1 分数槽绕组的优点	80	5.6.2 两种六相无刷直流电动机绕组 结构方案	122
5.2.2 分数槽绕组槽极数 Z_0/p_0 组约束条件	82	5.6.3 两种绕组结构方案比较	123
5.2.3 三相绕组节距 $y=1$ 的分数槽 集中绕组 Z_0/p_0 组约束条件	83	5.7 多相绕组连接拓扑结构的探讨	123
5.2.4 三相分数槽绕组的绕组系 数计算	88	5.7.1 多相绕组连接拓扑结构的分 析	124
5.2.5 成对出现的槽极数组组合	91	5.7.2 九相电机绕组不同接法的机 械特性分析	128
5.2.6 小结	93	5.7.3 多相无刷直流电机封闭形绕 组无环流条件的分析	132
5.3 分数槽集中绕组槽极数组组合 的选择与应用	94	5.8 定子铁心制造方法	142
5.3.1 单层绕组和双层绕组	95		
5.3.2 定子磁动势谐波与转子涡 流			

参考文献	143	7.6.1 分数槽集中绕组单元电机槽数 Z_0 为偶数的分析	174
第6章 磁路与反电动势	145	7.6.2 分数槽集中绕组单元电机槽数 Z_0 为奇数的分析	176
6.1 转子磁路结构	145	7.6.3 霍尔传感器安放在齿顶中央	177
6.1.1 转子磁路基本结构形式	145	7.6.4 一种电动自行车用 51/23 分数槽集中绕组的例子	179
6.1.2 Halbach 阵列结构	147	7.6.5 小结	180
6.1.3 转子结构选择实例	149	7.7 三相无刷直流电机分离型霍尔传感器位置的整定方法	180
6.2 常用永磁材料及其在永磁无刷直流电动机中的应用	150	7.7.1 多极电机霍尔传感器排列顺序	180
6.2.1 常用永磁材料	150	7.7.2 霍尔传感器位置整定的几种方法	182
6.2.2 注塑、黏结、烧结永磁材料和磁环多极充磁	153	7.8 适用于各类无刷直流电机确定霍尔传感器位置的通用方法	184
6.3 气隙磁通密度的分析计算	153	7.8.1 确定霍尔传感器安放位置的通用方法	184
6.3.1 永磁无刷直流电动机磁路模型和等效磁路	154	7.8.2 单相无刷直流电机的例子	186
6.3.2 表贴式结构气隙磁通密度计算	155	7.8.3 两相(四相)无刷直流电机绕组星形连接的例子	186
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	157	7.8.4 三相无刷直流电机绕组星形连接的几个例子	187
6.3.4 埋入式结构气隙磁通密度计算	158	7.8.5 三相无刷直流电机绕组三角形连接的例子	190
6.3.5 内置 V 形径向式气隙磁通密度计算	159	7.8.6 五相无刷直流电机绕组星形连接的例子	192
6.3.6 内置切向式气隙磁通密度计算	160	7.8.7 九相无刷直流电机绕组封闭形连接的例子	192
6.4 反电动势波形和反电动势计算	161	7.8.8 11 相无刷直流电机绕组封闭形连接的例子	192
6.4.1 绕组形式对反电动势波形的影响	161	7.8.9 小结	193
6.4.2 反电动势的计算	164	参考文献	193
6.5 一个计算例子	165	第8章 永磁无刷直流电动机的电枢反应	194
参考文献	166	8.1 电枢反应磁动势分解为直轴和交轴分量的分析方法	194
第7章 转子位置传感器及其位置的确定	167	8.2 基于直轴和交轴分量分析的传统观点	195
7.1 转子位置传感器的分类和特点	167	8.3 内置式转子结构电枢反应磁动势的影响	196
7.2 霍尔集成电路的选择与使用注意事项	169	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	196
7.3 位置传感器最少个数	170		
7.4 位置传感器的安装方式	170		
7.5 无刷电机霍尔传感器位置确定的原理	171		
7.5.1 锁存型霍尔集成电路输出特性与极性的约定	171		
7.5.2 霍尔传感器位置与三相磁动势轴线对应关系	172		
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	174		

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	198	11.1	设计技术要求与典型设计过程	246
8.6	电机设计时需考虑电枢反应的最大去磁作用	200	11.2	无刷电机 CAD 软件简介	247
8.7	分数槽集中绕组电机的电枢反应	201	11.3	若干设计要素的选择	248
8.8	分数槽集中绕组电机转子永磁体内产生涡流损耗	202	11.4	定子裂比的选择	253
8.9	小结	205	11.5	由电磁负荷确定电机主要尺寸的方法	255
	参考文献	205	11.5.1	电磁负荷与主要尺寸关系式、电机利用系数	255
第 9 章 无刷直流电动机的转矩波动			11.5.2	定子绕组电流密度 j 与热负荷 A_j	257
9.1	产生转矩波动的原因	207	11.5.3	一些设计参考数据	258
9.2	换相转矩波动分析	211	11.5.4	单位转子体积转矩 (TRV)	258
9.2.1	只考虑电感、忽略绕组电阻的换相转矩波动分析	211	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	258
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	213	11.5.6	由电磁负荷确定电机主要尺寸方法的不确定性	260
9.2.3	换相时间 t_1 的计算与 $t_1/T=1$ 条件的分析	215	11.6	由黏性阻尼系数 D 确定电机主要尺寸的方法	260
9.2.4	一个电机的计算例子	216	11.7	一个电机主要尺寸计算例子	261
9.2.5	小结	217	11.8	一个无刷直流伺服电机电磁设计实例	264
9.3	抑制换相转矩波动的控制方法	218	11.9	一个基于 Ansoft 的无刷直流电机设计实例	272
9.4	PWM 控制方式对换相转矩波动的影响	219		参考文献	281
	参考文献	221	第 12 章 无刷直流电动机基本控制技术		
第 10 章 永磁无刷直流电动机的齿槽转矩及其削弱方法			12.1	无刷直流电动机控制概述	282
10.1	永磁无刷直流电动机的齿槽转矩	223	12.1.1	无刷直流电动机电子控制器基本组成	282
10.2	齿槽转矩的解析表达式	224	12.1.2	无刷直流电动机控制的发展	283
10.3	采用分数槽绕组	226	12.1.3	开环和闭环控制系统	284
10.4	转子磁极极弧系数的选择	230	12.2	起停控制和软启动	285
10.5	不等厚永磁体和均匀气隙方法	234	12.3	正反转方法和转向控制	286
10.6	定子斜槽、转子斜极或转子磁极分段错位方法	234	12.4	制动控制	288
10.7	磁极偏移方法	236	12.5	转速反馈信号的简易检出方法	290
10.8	定子铁心齿冠开辅助凹槽方法	237	12.6	无刷直流测速发电机	290
10.9	槽口宽度的优化	240	12.7	几种电压调节方法与 PWM 脉宽调制	292
10.10	降低齿槽转矩实例	242	12.8	保护电路和电流的采样	294
10.11	小结	243	12.9	电流波形与提前关断技术	296
	参考文献	244	12.10	无刷直流电动机逆变器拓扑结构	297
第 11 章 电机设计要素的选择与主要尺寸的确定			12.11	六开关三相逆变器拓扑结构和栅极	

驱动	301	14.2 利用线性霍尔元件作转子位置传感器的正弦波驱动	331
12.12 四开关三相逆变器的工作原理与控制	302	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	331
12.13 以绕组切换方式扩展转速范围	303	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	331
12.14 几种无刷直流电机实用控制电路例	307	14.3.2 Atmel 公司的 ATtiny261/461/861 系列正弦波微控制器	333
12.14.1 基于 UCC3626 的速度控制电路	307	14.3.3 东芝公司正弦波控制器和驱动器专用芯片	335
12.14.2 高压 450V 三相无刷直流电动机驱动电路	307	14.4 无传感器技术在正弦波驱动中的应用	338
12.14.3 微控制器 MCU 与 L6235 组合的驱动控制电路	313	参考文献	340
参考文献	314	第 15 章 单相无刷直流电动机与控制	341
第 13 章 无刷直流电动机无位置传感器控制	316	15.1 单相无刷直流电动机的工作原理与结构	341
13.1 反电动势检测法	316	15.2 四种不对称气隙结构的转矩分析比较	343
13.1.1 反电动势过零法	317	15.3 单相无刷直流电动机的超前换相与滞后换相分析	345
13.1.2 反电动势积分及参考电压比较法	319	15.4 单相无刷直流风机特性和基本换相电路	346
13.1.3 反电动势积分及锁相环法	319	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	349
13.1.4 续流二极管法	320	15.6 用于光盘驱动器主轴中的单相无刷直流电动机	351
13.2 3 次谐波反电动势检测法	320	参考文献	353
13.3 定子电感法	323	附录	354
13.4 $G(\theta)$ 函数法	323	附录 A 作者已发表的相关文献	354
13.5 扩展卡尔曼滤波法	324	附录 B 几种霍尔集成电路数据表	357
13.6 状态观测器法	325	附录 C 分数槽集中绕组系数表	359
13.7 利用微控制器和数字信号处理器的无传感器控制	325	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	361
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	326	附录 E GB/T21418—2008 永磁无刷电动机系统通用技术条件	362
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	327		
参考文献	328		
第 14 章 无刷直流电动机低成本正弦波驱动控制	330		
14.1 低成本正弦波驱动控制的需求	330		

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 余年来，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、步进电动机等。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。

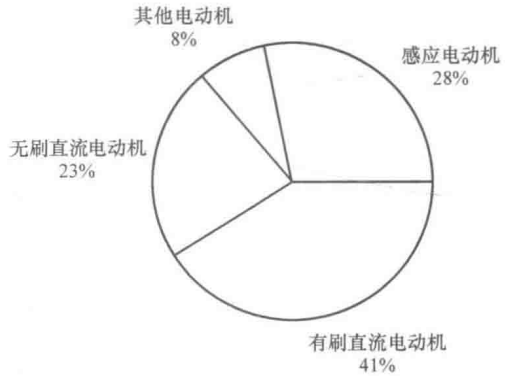


图 1-1 2007 年在北美销售各种消费类电动机的比例

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

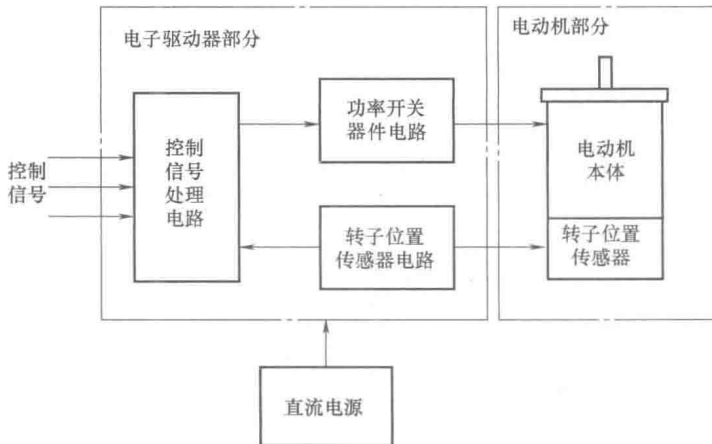


图 1-2 无刷直流电动机基本结构框图

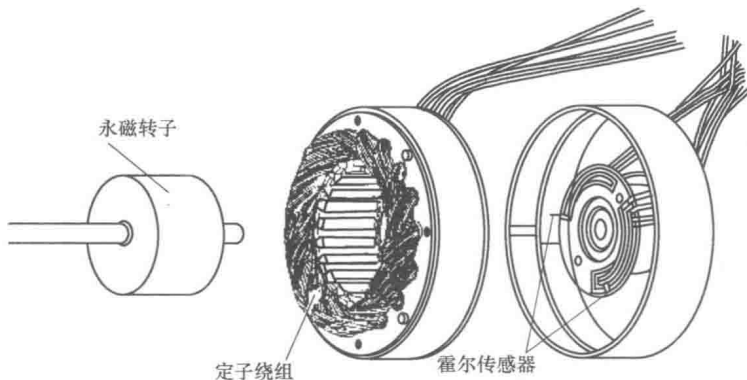


图 1-3 一种小型内转子的无刷直流电动机结构

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。

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)。

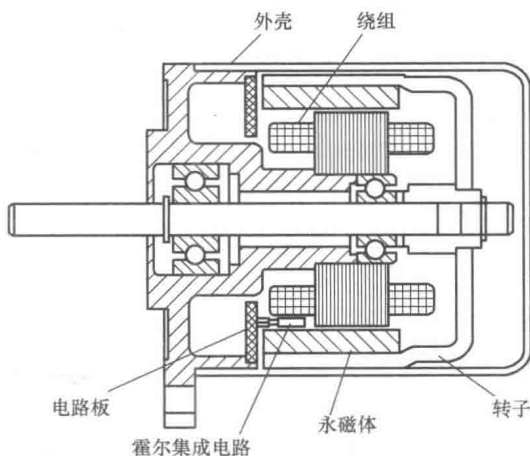


图 1-4 一种小型外转子的无刷直流电动机结构

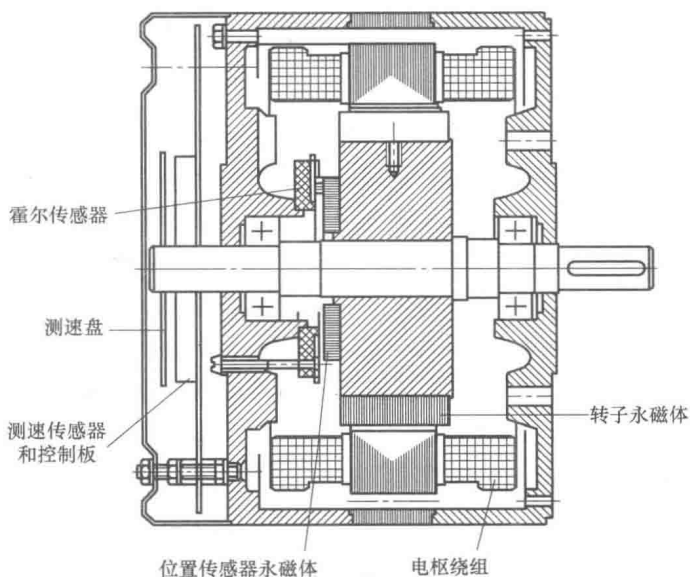


图 1-5 一种内置转速传感器和控制电路板的无刷直流电动机

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:

- 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, 无须经常维护。
- 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	有, 换向器与电刷	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启动等优点，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% 的增速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。据国际机器人联盟（IFR）估计，截至2015年全球约有150万以上的工业机器人用于工业流水线作业，未来三年将会超过230万台，服务领域用机器人将达到15000万台。机器人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。

随着技术的不断提高，新能源电动汽车的未来前景十分广阔。新能源汽车替代燃油汽车已经是世界各国的普遍共识，世界各国政府对于新能源汽车的支持，是出于对环境和能源问题的终极考虑。据统计，2016年中国新能源汽车产销量超过50万辆，保有量突破100万辆，这两者在全球的占比均达到了50%，标志着中国新能源汽车已进入成长期。预计再过5年左右时间，中国新能源汽车产业将会进入高速成长期。根据《电动汽车充电基础设施发展指南（2015-2020年）》以及《十三五国家战略性新兴产业发展规划》提出的到2020年实现新能源汽车当年产销200万辆以上，累计产销超过500万辆的目标来看，未来新能源车整体市场有望实现年均50%的增速。

驱动电机系统是新能源车三大核心部件之一。电机驱动控制系统是新能源汽车车辆行驶中的主要执行结构，其驱动特性决定了汽车行驶的主要性能指标，它是电动汽车的重要部件。从电机类型看，2016年我国新能源汽车驱动电机的装机量中，永磁同步电机依旧是主流，装机量超过45万台，占比76%；交流异步电机装机量超过14万台，占比23%。

永磁同步电机体积小、质量小、功率密度大、可靠性高、调速精度高、响应速度快，但最大功率较低，且成本较高。由于永磁同步电机具有高的功率密度，其工作效率最高可达97%，能够为车辆输出最大的动力及加速度，因此主要用在对能量体积比要求最高的新能源乘用车上。交流异步电机价格低、运行可靠，但其功率密度低、控制复杂、调速范围小是固有限制，但价格优势使得其在新能源客车中使用较为广泛。

全球著名的新能源汽车巨头特斯拉（TESLA）一直采用感应电机驱动。但是，异步感应电机产生单位转矩需要的电流较多，因此耗电较大，而且高效区窄，恒转矩区功率低，进而制约了汽车的性能。和特斯拉的驱动系统不同，以比亚迪为代表的中国电动汽车厂商一直采用稀土永磁同步电机。虽然这种电机结构较复杂、控制系统更复杂且成本高。但是它具备高效区宽、节能性、小体积、轻量化等方面的优点。而随着比亚迪、精进电动等国内电动汽车企业这种电机的技术进步和量产，稀土永磁同步电机的造价将降低到和三相感应电机相接近的价位区间。最近有报道，特斯拉开始在中国采购钕铁硼磁体，目的是用于其电动汽车的驱动电机。这意味着特斯拉开始放弃原先的高速异步感应电机加减速器的驱动系统方案，开始采用目前新能源汽车领域许多国家公司最广泛应用的稀土永磁直驱电机技术路线。

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