

夏长亮 著

无刷直流电机 控制系统



科学出版社

www.sciencep.com

无刷直流电机控制系统

夏长亮 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书内容主要涵盖无刷直流电机原理分析及其控制系统的设计与应用,并对无刷直流电机速度控制、转矩波动抑制和无位置传感器控制等关键技术问题进行了详细论述。全书力求贯彻理论与实际相结合的原则,既阐明无刷直流电机控制系统的基本概念和基本原理,又给出其设计与分析的具体过程,并反映其新技术、新成就和实际应用动态。

本书可供从事无刷直流电机控制系统设计与开发的相关人员参考,既适合作为具有电机学、自动控制、电机控制、单片机、DSP等基础知识的高等学校本科生、研究生的参考教材,也可以作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无刷直流电机控制系统/夏长亮著. —北京:科学出版社, 2009

ISBN 978-7-03-023725-5

I. 无… II. 夏… III. 无刷电机-直流电机-控制系统 IV. TM33

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第199869号

责任编辑:张海娜/责任校对:曾茹

责任印制:赵博/封面设计:耕者设计工作室

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>

丽源印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009年2月第一版 开本:B5(720×1000)

2009年2月第一次印刷 印张:15 3/4

印数:1—3 000 字数:304 000

定价:46.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

前 言

无刷直流电机控制系统是集电机技术、电力电子技术、控制理论和计算机技术等现代科学技术于一身的机电一体化系统。无刷直流电机在保持传统直流电机优越的调速性能基础上,克服了原来机械换向和电刷引起的一系列问题,在现代社会的各个领域均有较好的应用。新型稀土永磁材料的开发和利用,将会使无刷直流电机具有更加广阔的应用前景。

全书共分八章。第一章介绍了无刷直流电机的发展历史、研究现状及其发展前景;第二章阐述了无刷直流电机的基本原理,并对无刷直流电机的数学模型、机械特性、调节特性和换相暂态过程进行了系统的分析和研究;第三章重点分析了无刷直流电机速度控制系统的相关问题,包括经典的双闭环调速系统和各种基于智能算法的调速控制以及电机内部参数对调速性能的影响等;第四章介绍了无刷直流电机控制系统中的一个重要研究方向——转矩波动分析与抑制,分析了产生转矩波动的原因和类型,主要研究了基于自抗扰、BP神经网络和模糊小生境遗传算法的转矩波动抑制问题;第五章研究了当前无刷直流电机控制系统的另一个热点——无位置传感器控制,分析了各类无刷直流电机位置检测方法和多种基于现代控制理论与智能算法的无位置传感器控制方法;第六章介绍了基于MATLAB的无刷直流电机仿真控制系统设计方法,并给出了典型实例及其分析过程;第七章论述了基于单片机和DSP的无刷直流电机控制系统的软硬件设计方法及其关键技术;第八章介绍了无刷直流电机在电梯门机、电梯曳引机、变频空调、电动汽车和电动自行车等场合中的应用。

本书是作者在无刷直流电机控制领域十多年研究工作的基础上完成的一部学术著作,是作者主持的多个国家级和省部级基金项目的成果汇总,其中包括作者所指导的多名博士研究生和硕士研究生的研究工作,尤其是方红伟博士、陈炜博士,以及宋鹏、李志强、王迎发、耿强等博士研究生参与了本书部分章节的编写工作。

沈阳工业大学的王凤翔教授对本书提出了很多宝贵意见,值此新书出版之际,向他表示衷心的感谢。

本书的完成离不开前人所作的贡献,在此对本书所参考的有关书籍、期刊、标准和专利等内容的原作者表示感谢。

因作者水平有限,对书中出现的疏漏和不当之处,恳请广大读者不吝指正。

作 者
2008.6

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 无刷直流电机发展历程	1
1.2 无刷直流电机应用场合	4
1.3 无刷直流电机研究现状	8
1.3.1 无位置传感器控制技术	9
1.3.2 转矩波动抑制研究	10
1.3.3 无刷直流电机控制器研究	12
1.4 无刷直流电机发展趋势	15
参考文献	20
第二章 无刷直流电机数学模型及特性分析	25
2.1 无刷直流电机结构类型及驱动方式	25
2.1.1 无刷直流电机本体结构	25
2.1.2 功率驱动方式	28
2.2 无刷直流电机数学模型	31
2.2.1 微分方程模型	31
2.2.2 传递函数模型	37
2.2.3 状态空间模型	42
2.3 无刷直流电机特性分析	44
2.3.1 无刷直流电机启动特性	44
2.3.2 无刷直流电机稳态运行特性	45
2.3.3 无刷直流电机动态性能分析	48
2.3.4 无刷直流电机换相暂态分析	53
参考文献	56
第三章 无刷直流电机速度控制系统	57
3.1 无刷直流电机双闭环调速	57
3.1.1 PID 调速原理	57
3.1.2 控制器设计	59
3.2 无刷直流电机速度智能控制技术	62
3.2.1 模糊控制	62

3.2.2	神经网络控制	67
3.2.3	遗传算法优化控制	73
3.2.4	滑模变结构控制	79
3.2.5	灰色控制	84
3.2.6	其他智能调速方法	88
3.3	电机参数对动态响应和调速范围的影响	89
3.3.1	电阻参数	90
3.3.2	电感参数	90
3.3.3	转动惯量参数	92
	参考文献	92
第四章	无刷直流电机换相转矩波动分析与抑制	95
4.1	分时换相策略抑制转矩波动	95
4.1.1	换相转矩波动分析	95
4.1.2	分时换相策略分析	102
4.1.3	最佳分时换相策略的研究	106
4.2	基于自抗扰技术的换相转矩波动抑制	108
4.2.1	抑制转矩波动的自抗扰策略	108
4.2.2	实验结果	111
4.3	基于BP神经网络的换相转矩波动抑制	113
4.3.1	BP神经网络	113
4.3.2	自校正调节器	115
4.3.3	实验结果	116
4.4	基于模糊小生境遗传算法的电机优化设计与转矩波动抑制	118
4.4.1	反电势波形平顶宽度的计算	118
4.4.2	模糊小生境遗传算法	121
4.4.3	无刷直流电机优化设计	123
	参考文献	126
第五章	无刷直流电机的无位置传感器控制	127
5.1	转子位置间接检测法	127
5.1.1	反电势法	127
5.1.2	磁链法	136
5.1.3	电感法	136
5.1.4	人工智能法	138
5.2	无位置传感器控制	138
5.2.1	基于扰动观测器的无位置传感器控制	138

5.2.2	基于 Kalman 滤波的无位置传感器控制	144
5.2.3	基于滑模观测器的无位置传感器控制	148
5.2.4	基于小波网络的无位置传感器控制	151
5.3	无位置传感器控制下的启动	156
5.3.1	静止状态下转子初始位置的确定	156
5.3.2	无位置传感器下的启动方法	157
	参考文献	161
第六章	无刷直流电机控制系统仿真	163
6.1	无刷直流电机 S 函数仿真	163
6.2	无刷直流电机图形化仿真	170
6.2.1	无刷直流电机双闭环调速系统仿真	171
6.2.2	无刷直流电机相电流超前导通运行仿真	177
	参考文献	180
第七章	无刷直流电机控制系统实现	182
7.1	系统主电路	182
7.2	驱动电路	185
7.2.1	MOSFET 驱动电路	185
7.2.2	IGBT 驱动电路	187
7.2.3	智能功率模块	188
7.3	转子位置信号检测电路	190
7.4	微处理器控制电路	191
7.4.1	微处理器选型	191
7.4.2	单片机控制电路	192
7.4.3	DSP 控制电路	196
7.5	保护电路	199
7.5.1	过压保护电路	199
7.5.2	过流保护电路	200
7.5.3	逻辑保护电路	201
7.5.4	其他保护电路	202
7.6	无位置传感器控制电路	204
7.6.1	电压检测电路	204
7.6.2	滤波移相电路	206
7.6.3	电流检测电路	207
7.7	无刷直流电机控制专用集成电路	209
7.7.1	MC33033 集成电路的应用	209

7.7.2	TB6537P 集成电路的应用	212
7.8	系统软件设计	215
7.8.1	带位置传感器无刷直流电机软件设计	215
7.8.2	无位置传感器无刷直流电机软件设计	217
7.8.3	软件可靠性设计	218
7.9	硬件系统电磁兼容性设计	219
7.9.1	强电部分电磁兼容性设计	220
7.9.2	弱电部分电磁兼容性设计	220
	参考文献	222
第八章	无刷直流电机控制系统应用实例	223
8.1	电梯门机系统	223
8.1.1	电梯门机系统介绍	223
8.1.2	电梯门机系统技术要求	225
8.1.3	电梯门机控制系统硬件设计	227
8.1.4	电梯门机控制系统软件设计	229
8.2	电梯曳引机系统	231
8.2.1	电梯曳引机系统介绍	231
8.2.2	无刷直流电机无齿轮电梯曳引机的特点	233
8.2.3	电梯曳引机的技术要求	233
8.2.4	电梯曳引机控制系统硬件设计	234
8.2.5	电梯曳引机控制系统软件设计	235
8.3	无刷直流电机在变频空调中的应用	236
8.4	无刷直流电机在电动汽车中的应用	238
8.5	无刷直流电机在电动自行车中的应用	239
8.6	无刷直流电机在其他领域的应用	240
8.6.1	在风机、水泵上的应用	240
8.6.2	在洗衣机上的应用	240
8.6.3	在医疗器械上的应用	241
	参考文献	241

第一章 绪 论

目前,国内外对无刷直流电机 (brushless DC motor, BLDCM) 的定义一般有两种:一种定义认为只有梯形波/方波无刷直流电机才可以被称为无刷直流电机,而正弦波无刷电机则被称为永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM)^[1,2];另一种定义认为梯形波/方波无刷电机和正弦波无刷电机都是无刷直流电机^[3]。ANSI/IEEE 国际标准 100-1984^[4] 只定义了“brushless rotary machinery”, NEMA 标准 MG7-1987^[5] 则将无刷直流电机定义为“一种转子为永磁体,带转子位置信号,通过电子换相控制的自同步旋转电机”,其换相电路可以是独立的也可以是集成于电机本体上的。但迄今为止,还没有一个公认的统一标准对无刷直流电机进行准确的分类或者定义。本书将采用第一种定义,把具有串励直流电机启动特性和并励直流电机调速特性的梯形波/方波无刷直流电机称为无刷直流电机。无刷直流电机由于其具有结构简单、出力大和效率高等特点,已在国防、航空航天、机器人、工业过程控制、精密机床、汽车电子、家用电器和办公自动化等领域中得到了较好的应用。本章将分别叙述无刷直流电机的发展历史、应用场合、研究现状及其相关技术的发展趋势。

1.1 无刷直流电机发展历程

现代社会中,电能是最常用且最为普遍的二次能源。而电机作为机电能量转换装置,经过一个多世纪的发展,其应用范围已遍及现代社会和国民经济的各个领域及环节。为了适应不同的实际应用,各种类型的电机应运而生,其中包括同步电机、异步电机、直流电机、开关磁阻电机和各种其他类型电机,其容量小到几毫瓦,大到百万千瓦。相比之下,同步电机具有转矩大、效率和精度高、机械特性硬等优点,但调速困难、容易“失步”等弱点大大限制了它的应用范围;异步电机结构简单、制造方便、运行可靠、价格便宜,但其机械特性软、启动困难、功率因数低、不能经济地实现范围较广的平滑调速,且必须从电网吸取滞后的励磁电流,从而降低电网功率因数;开关磁阻电机转子既无绕组也无永磁体,其结构简单、成本低廉,在低速时具有较大的转矩,控制换相时无上下桥直通等问题,但其噪声和转矩波动相对较大,这在某种程度上限制了该类型电机的推广应用;直流电机具有运行效率高和调速性能好等诸多优点,被广泛地应用于对启动和调速有较高要求的拖动系统,如电力牵引、轧钢机、起重设备等。目前,小

容量的直流电机在自动控制系统中仍然得到广泛应用。但是，传统直流电机均采用电刷以机械方式换向，因而存在机械摩擦，使得电机寿命缩短，并带来了噪声、火花以及无线电干扰等问题，再加上制造成本高及维修困难等缺点，从而限制了其在某些特殊场合的应用^[6~10]。因此，在一些对电机性能要求较高的中小型应用场合，亟须新型高性能电机的出现。

无刷直流电机是在有刷直流电机基础上发展起来的。1831年法拉第发现电磁感应现象，从此奠定了现代电机的理论基础。19世纪40年代，第1台直流电机研制成功。受电力电子器件和永磁体材料等发展的限制，无刷直流电机在一个多世纪后才面世。1915年，美国人Langmuir发明了控制栅极的水银整流器，并制成了直流变交流的逆变装置。针对传统直流电机的弊病，20世纪30年代，一些学者开始研制采用电子换相的无刷直流电机，为无刷直流电机的诞生提供了条件。但由于当时的大功率电子器件还处于初级发展阶段，没能找到理想的电子换相器件，使得这种可靠性差、效率低下的电机只能停留在实验室阶段，无法推广使用。1955年，美国的Harrison和Rye首次申请成功用晶体管换相线路代替电机机械电刷换向装置的专利，这就是现代无刷直流电机的雏形，如图1.1所示^[11]。其工作原理是，当转子旋转时，在信号绕组中感应出周期性的感应电势，此电势导致对应晶体管导通，这样就使相应功率绕组轮流馈电，实现了换流。但该电机的问题在于：首先，当转子静止时，信号绕组内不产生感应电势，晶体管无偏置，功率绕组也就无法馈电，所以这种无刷电机无启动转矩；其次，信号电势的前沿陡度不大，使得晶体管的功耗较大。为了克服这些弊端，人们采用了带离心装置的换相器，或在定子上放置辅助磁钢的方法来保证电机可靠的启动，但前者结构复杂，后者则需要附加的启动脉冲。其后，经过反复实验和不断实践，借助霍尔元件实现电子换相的无刷直流电机终于在1962年问世，从而开创了无刷直流电机产品化的新纪元。20世纪70年代初期，出现了比霍尔元件的灵敏度高千倍左右的磁敏二极管，借助磁敏二极管实现换相的无刷直流电机也试制成功。此后，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相继出现，再加上钕钴、钕铁硼等高性能永磁材料的问世，均为无刷直流电机的广泛应用奠定了坚实的基础。

1978年，联邦德国Mannesmann公司的Indramat分部在汉诺威贸易展览会上正式推出MAC无刷直流电机及其驱动系统，这标志着无刷直流电机真正进入实用阶段。之后，国际上对无刷直流电机开展了深入的研究，先后研制成梯形波/方波和正弦波无刷直流电机。正弦波无刷直流电机就是大家通常所说的永磁同步电机。一般来讲，它与梯形波/方波无刷直流电机均具有图1.2(a)所示的拓扑结构，可看做是采用转子位置反馈来进行换相控制，从而保证自同步运行且不需启动绕组的永磁电机。同时，它们每相等效电路图也是相同的，如图1.2(b)

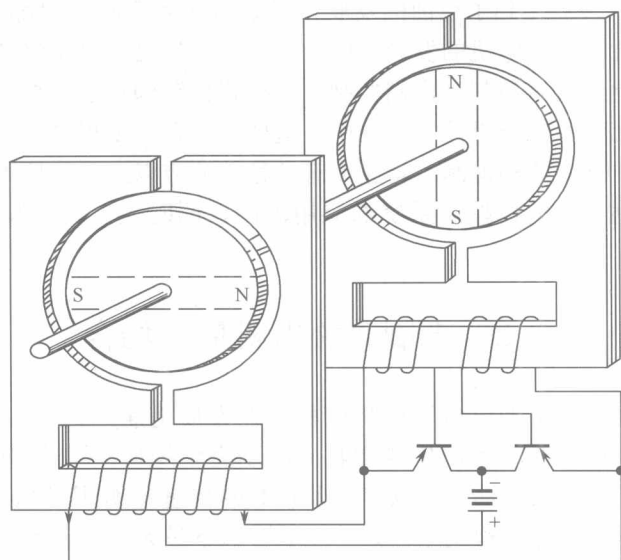


图 1.1 无换向器直流电机模型

所示，图中 $L-M$ 为每相等效电感。随着永磁材料、微电子技术、电力电子技术、检测技术以及自动控制技术特别是绝缘栅双极晶体管（IGBT）和集成门极换流晶闸管（IGCT）等大功率开关器件的发展，采用电子换相原理工作的无刷直流电机正朝着智能化、高频化和集成化方向迅猛发展。

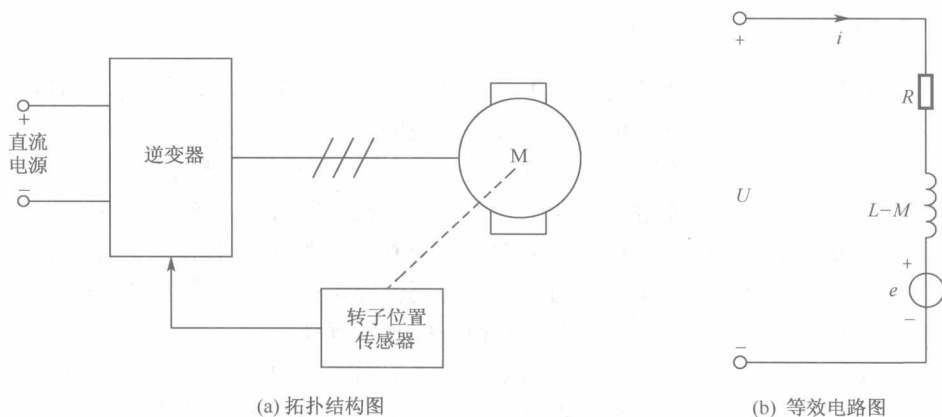


图 1.2 无刷直流电机拓扑与等效图

20 世纪 90 年代以后，计算机技术与控制理论发展十分迅速，单片机、数字信号处理器（DSP）、现场可编程门阵列（FPGA）、复杂可编程逻辑器件

(CPLD) 等微处理器得到了空前的发展, 指令速度和存储空间都有了质的飞跃, 进一步推动了无刷直流电机的发展。此外, 一些先进的控制策略和方法, 如滑模变结构控制、神经网络控制、模糊控制、自抗扰控制和自适应控制等^[6,12~20], 不断地被应用到无刷直流电机控制系统中。这些方法在一定程度上提高了无刷直流电机控制系统在转矩波动抑制、转速动态和稳态响应以及系统抗干扰等方面的性能, 扩大了无刷直流电机控制系统的应用范围, 同时还丰富了相关控制理论的内涵。

1.2 无刷直流电机应用场合

近年来, 我国中小型电机和微特电机行业发展迅速, 表 1.1 是 2002~2006 年我国中小型电机行业产品销售量和收入的不完全统计^[21]。其中, 由于无刷直流电机具有高效率、长寿命、低噪声以及较好的转速-转矩特性等优点, 在汽车、航空、家用电器等行业内得到了较好的发展。以下是无刷直流电机的一些典型应用场合。

表 1.1 2002~2006 年中小电机销售量和销售收入统计表

年份	2002	2003	2004	2005	2006
产品销售量/10 ⁴ kW	3562	6319	7847	9702	10950
产品收入/万元	698731	1085847	1560933	2182281	2686147

1. 汽车用无刷直流电机

汽车作为一种方便快捷的交通工具早已和人们的日常生活息息相关。在西方发达国家, 汽车在居民家庭中普及率较高。我国在“九五”期间制定的产业政策中也把汽车工业定为国家的支柱产业之一, 2007 年国内汽车产量已经达到八百多万辆。一辆汽车内部通常包括几十到上百台电机, 随着汽车向节能和环保方向的发展, 包括无刷直流电机在内的高效永磁电机在汽车中具有很好的应用前景。表 1.2 比较了目前电动汽车驱动用电机的常用性能指标, 可以看出属于永磁电机的无刷直流电机在电动汽车驱动上具有很好的技术优势^[22]。

电机除了可以作为汽车驱动的核心部件外, 还可以用在汽车空调、雨刮器、电动车门、安全气囊、电动座椅等驱动上。汽车空调是汽车众多配套产品中比较重要的一种, 汽车空调性能的好坏直接影响到乘客在乘车期间的舒适程度, 也会间接地影响乘客对整车性能的印象和评价。汽车空调风机用驱动电机一般为恒定负载运行, 对系统动态响应要求相对较低。风机电机及其控制系统和汽车空调性能的好坏有直接关系, 文献 [23]、[24] 研究了汽车空调风机驱动用无刷直流电

机控制系统的一些关键技术问题。汽车空调与家用空调的压缩机用电机驱动技术类似,以无刷直流电机驱动的空压机将朝着更节能、更舒适的全直流化变频方向发展。随着电力电子技术、自动控制技术和计算机技术的发展,无刷直流电机调速技术将日趋成熟,性价比也会越来越高。因此,它必将成为调速技术发展的一个主流方向,在汽车电机驱动各个环节获得越来越广泛的应用。

表 1.2 电动汽车驱动用电机性能比较

电机类型 性能指标	直流电机	感应电机	永磁电机	开关磁阻电机
功率密度	低	中	高	较高
峰值效率/%	<90	90~95	95~97	<90
负荷效率/%	80~87	90~92	85~97	78~86
可控性	控制简单	较复杂	弱磁难	较复杂
可靠性	一般	好	优	好
散热性	较差	较差	好	好
尺寸及质量	大,重	一般,一般	小,轻	小,轻
高速性能	差	优	较好	优
结构的坚固性	较差	好	较好	优
电机成本/(美元/kW)	10	8~10	10~15	6~10
控制器成本	低	高	高	一般
综合性能	较差	一般	最好	好

需要注意的是,位置传感器的安装与使用,一般会增加电机的成本,并影响无刷直流电机控制系统的可靠性和工作寿命;另外,传感器装入电机内部,还可能增大电机的体积,而汽车对电机体积有严格的要求和限制。因此,无位置传感器控制方式将是汽车用无刷直流电机控制系统的一个重要发展方向。

2. 航空航天用无刷直流电机

利用电机驱动设备代替气动和液压传动装置已成为航空航天工业发展中的一种趋势。航空航天电机由于其应用场合的特殊性,一般要求所用电机体积小、结构简单。无刷直流电机的特殊结构特点及其无位置传感器控制方式,使其在航空航天领域可望得到广泛的应用。航空航天用无刷直流电机的运行工况一般为变负载运行,要求其具有良好的高速控制精度和动态响应能力,典型应用有陀螺仪与机械臂控制等。它们通过半闭环或闭环速度反馈进行控制,相应系统一般采用先进控制算法。

部分航空航天用无刷直流电机,如高速离心泵和高速摄像枪所用电机的转速

能达到每分钟几万转,这时就需要考虑高速旋转时对电机机械和电气性能的特殊要求及其解决方法,如高速旋转电机的轴承问题,可以利用磁悬浮轴承或者无轴承设计来解决。另外,航空航天用电源的电压等级和频率大小也与通用电源区别较大,因此对应的无刷直流电机控制系统还必须考虑相应整流电路和变频驱动电路的特殊要求,可利用软开关技术解决高频开关中的噪声和损耗问题来提高系统的综合性能。同时,由于航空航天的高可靠性要求,航空航天用无刷直流电机控制系统一般还要求系统设计时采用“陷阱”技术、冗余技术等特殊手段,以防止软件陷入死循环等故障。

3. 无刷直流电机在家用电器中的应用

近年来,世界家用电器电子驱动电机以每年约 30% 的增幅发展,现代家用电器正朝着节能、低噪声、智能化和高可靠性方向发展。随着人们生活水平的提高和国家对节能减排的日益重视,许多家用电器的驱动电机开始选用无刷直流电机。

空调和冰箱作为日常生活的耐用消费品,目前我国城市中已基本普及,近几年我国的空调和冰箱产量一直位居世界第一。空调和冰箱中都有压缩机电机,传统的压缩机用电机通常为异步电机,其效率和功率因数较低,采用变频技术以后,情况有所改善。和异步电机相比,无刷直流电机具有明显的优点:①效率高;②转速不受电源频率限制,因此额定转速可以设计得较高,有利于压缩机提高容量、减小体积;③功率因数高,降低了对逆变器的容量要求。如果将无刷直流电机应用于压缩机中,将会满足现代社会节能和环保的要求,显著改善压缩机的整机性能。目前,日本 90% 以上的空调均已采用无刷直流电机替代异步电机。

由于压缩机电机一般是密封的,在高温和低温情况下,无刷直流电机的位置传感器会影响压缩机运行的可靠性。同时位置传感器占用了压缩机部分空间,其信号连线也会给系统带来不利影响。因此,压缩机中的无刷直流电机更宜采用无位置传感器控制方式。为了节约成本和提高变频空调压缩机控制系统的稳定性,文献 [25] 采用 DSP 和 IR2316 模块,利用反电势法获得系统电流换相信号,实现了变频压缩机控制系统的无位置传感器控制,电机效率达 86%。文献 [26] 采取无刷直流直线电机直接驱动压缩机方式,实现了系统的无位置传感器运行。该系统可使压缩机省去偏心轮传动机构,方便了压缩机的加工安装,有利于其体积结构的减小、传动能量损耗的降低以及工作效率的提高,适宜大行程直线运动系统应用。

VCD、DVD、CD 机等家用电器的主轴驱动电机也逐步开始使用无刷直流电机,这类电机一般采用盘式无铁心电机结构,现已大规模生产,价格适宜。盘式无刷直流电机根据转矩大小要求的不同,可分为单定子和双定子结构,如图 1.3

所示。其中，双定子结构盘式无刷直流电机适合大转矩驱动应用场合。图 1.4 为 SANYO 公司生产的无刷直流电机驱动的 DVD/CD 机产品。电动自行车用无刷直流电机大多采用多极、外转子结构，其技术已较为成熟。英国的 Olexi-Nano 电机公司已成功开发出基于纳米技术的电动自行车用无刷直流电机，其效率高、温升高、舒适度和稳定性好等特点使电动自行车的整体性能有了很大提高。吸尘器、搅拌机、电吹风机、摄像机和家用电风扇等其他家用电器也正在逐步采用无刷直流电机代替目前使用较多的直流电机、单相异步电机和变压变频（VVVF）驱动式异步电机。无刷直流电机不仅能克服传统家用电机的部分缺点，给人们的居家生活带来更高的舒适性，还能降低能源损耗，更好地实现能源的可持续利用。

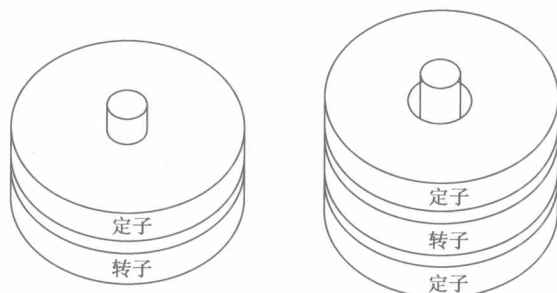


图 1.3 盘式无刷直流电机结构图

4. 无刷直流电机在办公自动化领域的应用

计算机外设和办公自动化设备用电机，绝大部分为先进制造技术和新兴微电子技术相结合的高档精密无刷直流电机，是技术密集化产品。这种高性能无刷直流电机伺服控制系统的采用能大大改善产品质量，提高产品的价值。如硬盘驱动器用的主轴无刷直流电机可以高速带动磁头盘片旋转，对盘片上的数据执行读写功能的磁头在离盘片表面只有 $0.1\sim 0.3\mu\text{m}$ 处做悬浮运动，以加快数据的读写速度。无刷直流电机也可作为光盘驱动器和软盘驱动器的主轴电机，该工作环境下，电机具有低噪声、耐低温、耐高温等特点，并能承受一定的振动和冲击，提高了系统的可靠性。计算机冷却用风扇驱动电机一般要求具有噪声低、结构紧凑、工作寿命长和转速高等优点，因此用于该场合的无刷直流电机一般采用外转子结构，转子的磁钢选用黏结钕铁硼，目前这类产品已经得到了很好的应用。无刷直流电机在数码相机上也得到了广泛应用，如日本 TOSHIBA 和 SANYO 公司均已生产出

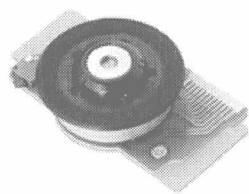


图 1.4 DVD/CD 机应用

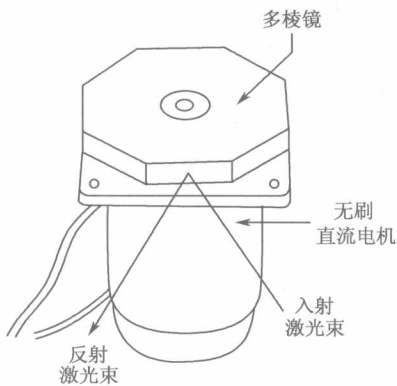


图 1.5 无刷直流电机驱动激光打印机多棱镜

无刷直流电机驱动的相机产品，并拥有各自的集成驱动芯片 TA8479F 和 LB8632V。无刷直流电机驱动的激光打印机产品也已经有了较长的历史，它的转速能在每分钟几千到几万转范围内精确可控，具有很好的技术和市场竞争力。图 1.5 即为用于打印机激光扫描的无刷直流电机及与其同轴相连的多棱镜连接示意图^[27]。另外，无刷直流电机在复印机、传真机、录音机和 LD 影碟机、碎纸机等办公设备产品也已有很好的应用。

5. 无刷直流电机在其他工业上的应用

无刷直流电机控制系统是集有刷直流电机和交流异步电机驱动控制系统优点于一身的机电一体化产品。随着稀土永磁材料及电力电子器件性能的提高和价格的降低，无刷直流电机驱动系统在工业中的应用越来越多，已成为工业驱动电机主要发展方向之一。国内外著名的电机制造厂商从提高产品性能和降低成本出发，对工业用无刷直流电机驱动系统进行了大量的研究开发。目前，在民用和军用的机器人和机械臂驱动电机应用中，无刷直流电机所占比例较大，已开始出现替代步进电机和传统直流伺服电机驱动机器人的发展趋势。大功率的无刷直流电机在低速、环境恶劣和有一定调速性能要求的场合也有着很好的应用前景，如无齿轮曳引机电梯驱动、抽水蓄能、钢厂轧机传动等，具有调速动态响应快、跟踪误差小、静差率小和调速范围宽等特点。除以上所涉及的应用场合，目前已经实用化的无刷直流电机应用领域还包括医疗器械、纺织机械、印刷机械和数控机床等行业。

1.3 无刷直流电机研究现状

目前，国内外无刷直流电机的一般控制技术已经比较成熟，我国已经制定了 GJB1863 无刷直流电机通用规范。国外发达国家对无刷直流电机的研究内容与中国大体相当，但美国和日本具有较先进的无刷直流电机制造与控制技术。特别是日本在民用方面比较突出，而美国则在军工方面更加先进。当前的研究热点主要集中在以下三个方面：①研究无位置传感器控制技术以提高系统可靠性，并进一步缩小电机尺寸与重量；②从电机设计和控制方法等方面出发，研究无刷直流电机转矩波动抑制方法，从而提高其伺服精度，扩大其应用范围；③设计可靠、小巧、通用性强的集成化无刷直流电机控制器。

1.3.1 无位置传感器控制技术

传统的无刷直流电机位置检测方法通过位置传感器来直接检测电机转子的位置，即直接位置检测法。无位置传感器控制技术主要通过电机内容易获取的电压或电流等信号，经过一定的算法处理，得到转子位置信号，也称为转子位置间接检测法。此概念始于 1966 年德国 Mieslinger 提出的电容移相换流位置估计法^[28]。常用的转子位置间接检测法如图 1.6 所示。

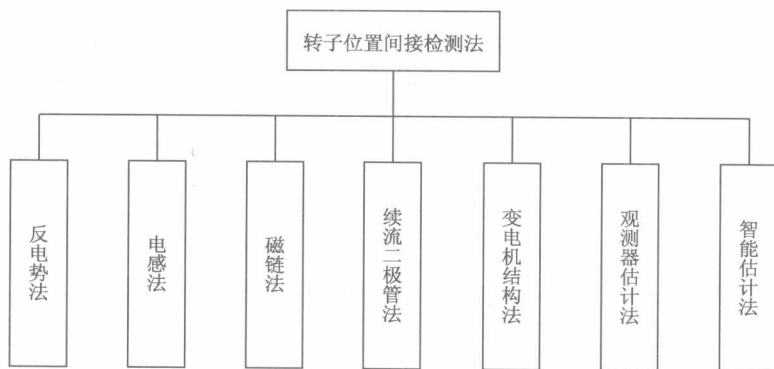


图 1.6 转子位置间接检测法

反电势法原理简单、实现方便、应用广泛。1985 年，Iizuka 等利用微机对无刷直流电机进行了无位置传感器控制，并对反电势法的软、硬件设计进行了较为全面的分析，将无刷直流电机控制提高到了一个新的水平^[29]。

20 世纪 80 年代末 90 年代初，电机转子位置间接检测法呈现多元化发展。1989 年，Lin 等利用相电流与定子磁链相位相同，相电流的变化能准确反映无刷直流电机转子位置的原理，提出了用相电流来检测转子位置的方法^[30]。1990 年，Ogasawara 提出了一种巧妙的位置检测方法——逆变器开关状态估计法，即图 1.6 中的续流二极管法^[31]。该方法通过检测反向并联在驱动三极管上的二极管的导通状态来得出转子的位置。续流二极管法的基本原理还是反电势法，但它是从电流角度来考虑反电势的，设计新颖巧妙。1992 年，Matsui 等提出了根据电流和电压瞬时方程来检测电机转子位置的方法^[32]。文献 [31]、[32] 中这两种方法的提出，使人们开始从本质上认识无刷直流电机转子位置的变化规律。1994 年，Ertugrul 等提出了基于定子磁链估计的位置检测方法，通过相电压、线电流信号计算出定子绕组各相的磁链，再根据磁链得到转子的位置信号^[33]。这种方法虽然计算稍复杂，但是误差较小、调速范围广。它不仅适用于无刷直流电机，还适用于永磁同步电机，是一种比较理想的检测方法，在国外已经开始应