

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>

天时彩色印刷有限公司 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〈科印〉)

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)

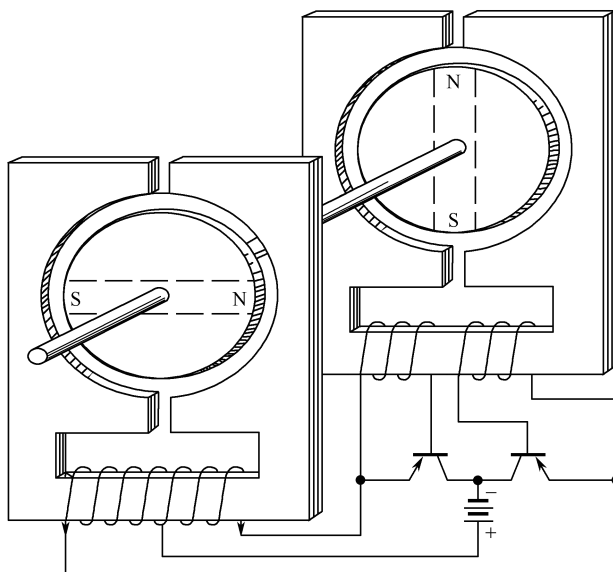


图 1.1 无换向器直流电机模型

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。

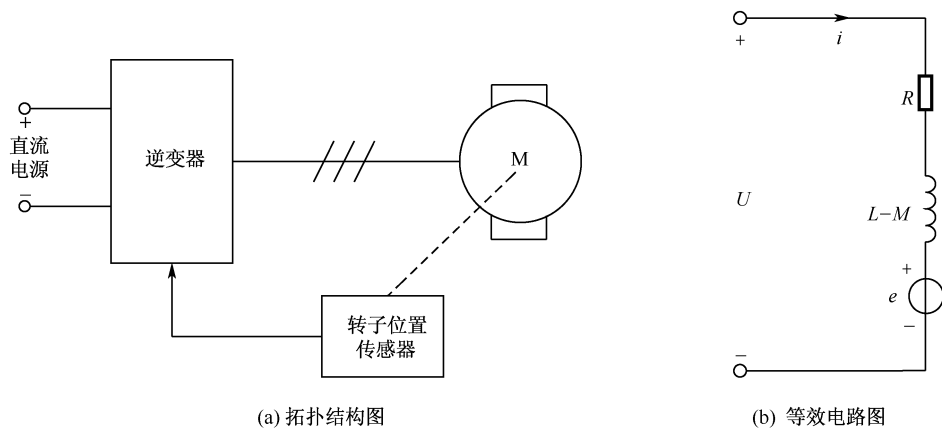


图 1.2 无刷直流电机拓扑与等效图

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将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调压缩机将朝着更节能、更舒适的全直流变频方向发展。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，还可能会增大电机的体积，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。

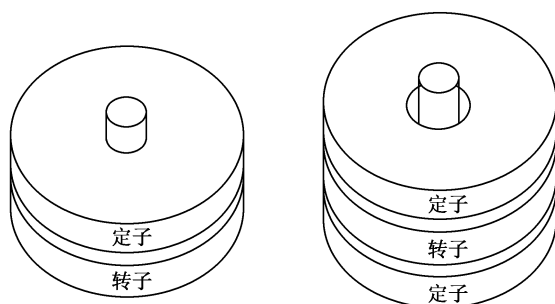


图 1.3 盘式无刷直流电机结构图

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

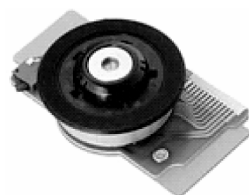


图 1.4 DVD/CD 机应用

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

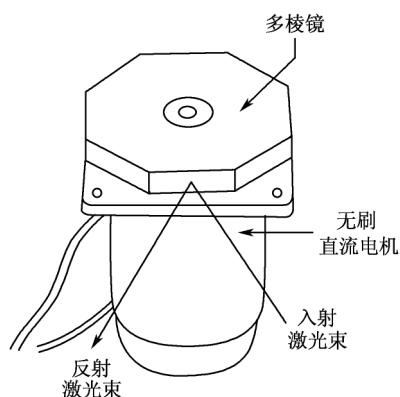


图 1.5 无刷直流电机驱动激光打印机多棱镜

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。

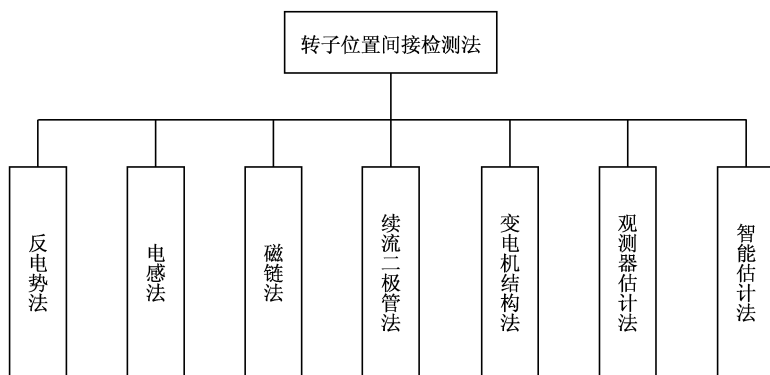


图 1.6 转子位置间接检测法

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

用于生产实践。同期,利用状态观测器和卡尔曼滤波法来检测电机转子位置的方法被提出^[34]。由于这种方法需要大量的计算,受当时条件所限,没能引起人们足够的重视。近十年来,随着单片机性能的提高和 DSP 产品的更新换代,这种方法已获得了突飞猛进的发展,并被应用到实际无刷直流电机控制系统^[35~37]。

间接检测转子位置“端电压法”,实际上是反电势法的一种变化形式,它只是检测各相端电压,通过端电压的变化得到转子的位置,而端电压的变化实际还是绕组中反电势随转子位置变化的反映。不过“端电压法”进一步简化了接口电路,使反电势法更加实用^[9,18]。

变电机结构法,是指从转子结构或定子结构上作适当改动来实现电机的无位置传感器控制。如在表面粘贴式转子无刷直流电机中添加一个辅助短路转子绕组获取电机转子位置信号^[38],或在转子表面安装非磁性材料,通过检测该材料涡流反应造成的断开相电压变化来获得转子位置信号^[39]。Matsuse 等则从电机定子侧出发设计闭口槽形式电机来获取转子位置信号^[40]。

智能控制的发展促进了电机控制水平的提高,利用模糊控制和神经网络控制等智能算法来建立电机的电压、电流信号和转子位置信号之间的相互关系是一种新的无位置传感器检测思路,其控制精度较高^[41~43]。但是相对传统无位置传感器控制方法而言,其算法复杂程度和计算时间较大,因此控制成本也相应增加。

采用无位置传感器控制的无刷直流电机一般较难直接启动,因此其启动方式始终是研究的热点和难点。利用反电势法检测转子位置的无刷直流电机三段式启动方法已较为成熟,该方法从电机启动到稳定运行可分为三个阶段,分别为:转子定位、加速和切换。其他无位置传感器控制下的电机启动方法,如预定位启动法、升频升压同步启动法和短时检测脉冲转子定位启动法等也都有了一定的应用。

1.3.2 转矩波动抑制研究

转矩波动抑制是无刷直流电机控制系统中的重要课题。同其他电机一样,无刷直流电机设计不可能完全避免齿槽效应、涡流效应等现象,因此齿槽转矩在无刷直流电机转矩波动抑制中需要考虑,通常可采用斜槽和分数槽的方法对其进行抑制,效果较好。

另外,无刷直流电机通常采取电子换相控制,电机绕组电感的存在使电机相电流不可能为理想的方波电流,这也不可避免地给系统带来换相转矩波动。因此,抑制换相转矩波动也是无刷直流电机研究领域的一项重要内容,许多学者在这方面进行了大量的研究工作。

文献 [44] 详细分析了无刷直流电机转矩产生的原理及转矩波动存在的必然性。文献 [45]、[46] 对电机的相电压和相电流进行 Fourier 级数分解,推导出

具有基波和高次谐波分量形式的转矩模型,并通过调节绕组的导通相位对转矩谐波作相应补偿,达到消除转矩谐波的目的。这种方法虽然计算量比较大,但是控制精度较高。文献[47]提出采用重叠换相的方法,即针对换相时总电流下降的事实,采用提前导通待换相绕组的方法,在换相的开始时刻可能三相同时导通,从而保证回路中总电流的幅值不变。文献[48]分析了换相转矩波动中的转矩波动幅值、换相时间间隔与电流、速度之间的关系。文献[49]利用定子谐波电流的最优权重法,通过电流调节器等装置有效减小了电磁转矩及齿槽转矩引起的转矩波动。1997年, Lim等提出通过调节电压型逆变器关断角来抑制无刷直流电机控制系统转矩波动的方法,该方法不仅适用于恒压恒频系统,还适合变压变频系统^[50]。文献[51]从换相时刻的角度出发,对换相时刻、反电势与转矩波动,以及换相时刻与电机转速之间的关系进行了分析。文献[52]利用直接转矩法对无刷直流电机进行控制,有效地抑制了换相转矩波动。文献[53]通过动态改变输入电压的方法实现了转矩波动的抑制。

国内相关学者也对无刷直流电机的转矩波动进行了大量的研究。文献[54]对电枢反应引起的转矩波动进行了分析,并从磁路设计和换相控制两个方面提出抑制这种影响的方法。文献[55]提出利用转矩观测器间接测量转矩的方法,利用反电势、相电流、电机转速作为输入信号,转矩作为输出信号构成转矩观测器,实现在线估计转矩的大小与变化,针对不同工况下的转矩波动作相应的补偿,这种方法虽然计算复杂,但能在线控制转矩,对各种因素引起的转矩波动都有抑制作用,且不需直接测量电机的瞬时转矩。文献[16]提出基于人工神经网络的无刷直流电机换相转矩波动抑制方法,该方法对两个三层前馈式人工神经网络进行离线和在线训练,采用误差反传算法修正各神经元间的连接权值。其中一个网络用于在线估计电机换相参数,另一个网络利用估计出的参数对换相过程中端电压瞬时调节,形成一个电压自校正调节器。该调节器通过调节端电压使换相过程中相电流下降和上升的速率近似相等,保持回路中总电流幅值不变,实现对换相转矩波动的抑制。该方法不需预知系统的精确参数,且对环境变化有自适应调节功能。文献[56]将电机等效为两个非线性系统(转矩子系统和转速子系统)构成的串联对象,利用自抗扰控制(ADC)技术设计了两个一阶自抗扰控制器实现对电机的内外环控制,采用扩张状态观测器(ESO)来观测电机转矩,从而结合跟踪微分器(TD)和非线性状态误差反馈控制律(NLSEF)实现对电机转矩波动的抑制^[57]。以上这些技术都推动了人们对无刷直流电机转矩波动的研究力度,并提高了无刷直流电机控制系统的性能。

总而言之,引起无刷直流电机转矩波动的原因很复杂,针对不同的情况可采用相应的控制方法,各种方法都有自己的优缺点和适用场合。同时,现有的转矩波动研究方法均是针对电机结构及控制方案提出的一些改善或补偿方法,并没有

从根本上消除转矩波动，因而对于转矩波动抑制的研究还有待于进一步深入。

1.3.3 无刷直流电机控制器研究

无刷直流电机控制器的发展同电器元件类似，经历了从分立元件控制方式到数字可编程集成电路控制方式的发展历程。图 1.7 是采用门电路组成的换相逻辑信号发生电路。

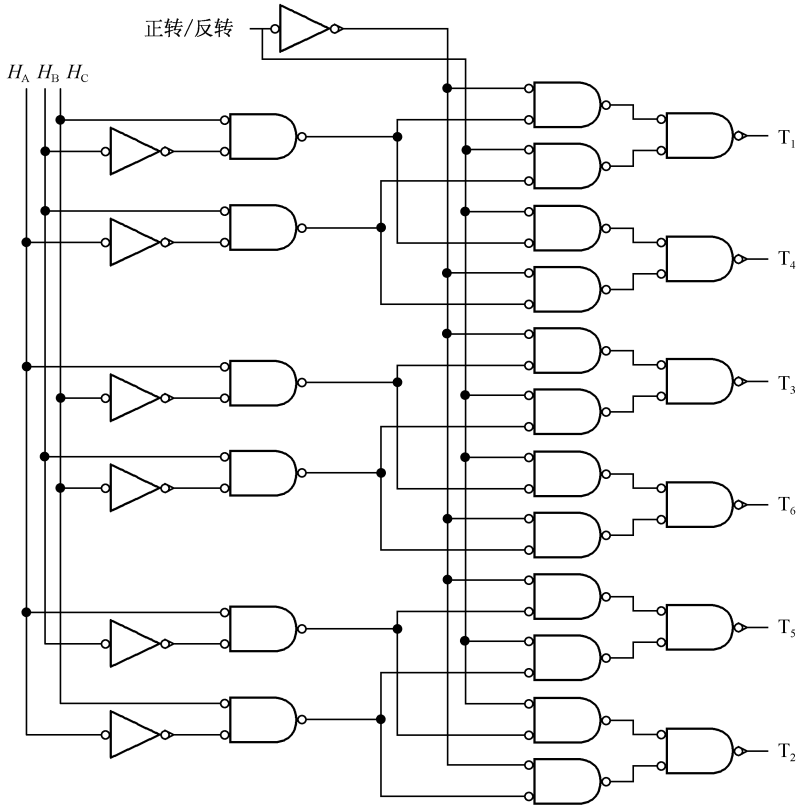


图 1.7 换相逻辑发生电路

一般，采用分立电子元器件设计的无刷直流电机控制器结构复杂、体积较大，相应的可靠性和通用性也较差，不利于批量生产。因此，对无刷直流电机的控制，当前主要采用专用集成电路（ASIC）控制器、FPGA、单片机和 DSP 控制器等方式。

目前，很多先进工业国家的半导体厂商，都能提供自己开发的电机控制专用集成电路，如美国 ON Semiconductor 和 Motorola 等公司开发的 MC33035、MC33039 无刷直流电机控制芯片和 MicroLinear 公司的 ML4425/4428 无位置传

传感器控制芯片。专用集成电路控制器结构简单、性价比高、外围器件比分立式控制器少，但在使用时也会受到一定的限制，功能扩展性不好，不易进行产品的功能变化和升级等操作。因此，如果考虑控制器今后的软硬件设计等功能，可使用 FPGA、单片机或 DSP 等对无刷直流电机进行控制，该类控制器具有功能完善和控制灵活等特点，当然相应的成本可能会比专用集成电路控制器高。FPGA 可以用 VHDL、Verilog 或 C 语言来编程，灵活性强，具有静态可重复编程和动态在线系统重构的特性，使得硬件的功能可以像软件一样通过编程来修改，并能按照用户需求来定义接口功能。单片机和 DSP 具有丰富的外围接口，单片机一般用于简单的电机控制系统，而 DSP 由于具有强大的计算和数据处理能力，通常应用于电机的智能控制系统中。典型的单片机或 DSP 控制的无刷直流电机控制系统如图 1.8 所示。

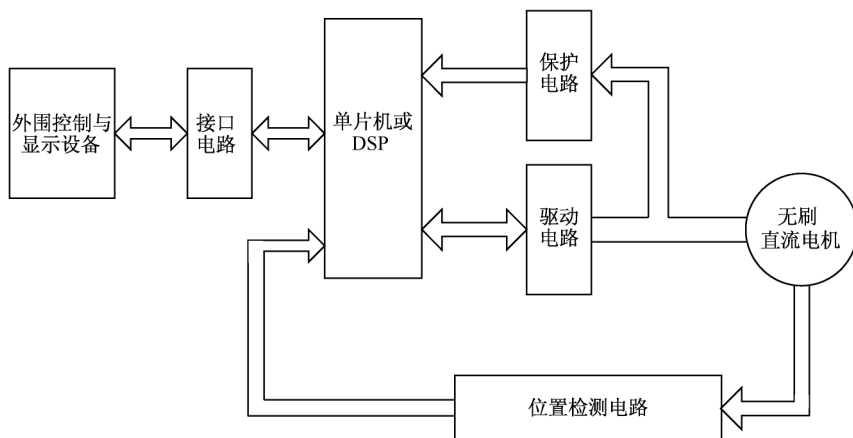


图 1.8 典型无刷直流电机控制系统

经济实用型的无刷直流电机控制器可采用多种单片机来实现，起初应用较多的是 MCS-51/96 系列产品，现在已经扩展到 PIC16F877A、MSP430F149、MC68HC908MR16 和 LPC2101 等不同公司生产的多种单片机。而且，不少公司已推出了面向无刷直流电机控制的专用单片机。ST 公司的 ST72141 芯片就是专门用在无刷直流电机控制的单片机，内部包含 ST 公司自有的反电势检测专利技术。SIEMENS 等公司生产的 C50X 系列单片机也是专门面向无刷直流电机控制的。C504 芯片内部带有硬件换相电路，当三相转子位置传感器检测到位置信号变化并将此信息传递给 C504 后，C504 对主回路的换相控制信号进行切换，不需要用软件处理，这样可大大降低系统的开发难度，并提高换相的可靠性。C508 芯片则能同时驱动两台无刷直流电机。单片机虽然价格相对便宜，但其处理能力有限，特别是当需要处理的数据量大、系统实时性和精度要求高时，单片机往往

不能满足运算速度要求。特别是在要求多台电机协同工作的一些工业应用场合，使用单片机及各种接口电路来控制电机会使硬件较为复杂，难以实现转速和电流的数字化控制。此时，一般可利用 DSP 芯片和 FPGA 芯片或“DSP+FPGA”组合等方案来实现无刷直流电机控制系统的设计。图 1.9 即是由 DSP 子系统、FPGA 子系统和信号调理比较子系统等复合组成的一个无刷直流电机控制系统^[58]。信号调理比较子系统将电压、电流传感器信号整形调理后供 DSP 子系统 A/D 采样，同时将各相电流信号与 DSP 子系统 D/A 送出的斩波电流上下限进行模拟比较，并将比较结果（高低电平信号）送入 FPGA 子系统。FPGA 子系统负责将转速信号合成（数字量）送至 DSP，根据 DSP 发出的电机状态指令信号、位置信号、斩波比较信号进行逻辑合成，产生所有功率器件的控制信号。常用的功率器件有 MOSFET、IGBT 和智能功率模块（IPM）等。DSP 控制子系统接受转速指令、开机指令、电压电流反馈、转速指令信号，决定电机状态和斩波上下限，负责数据、报警与状态显示、反馈转速信号输出等功能。

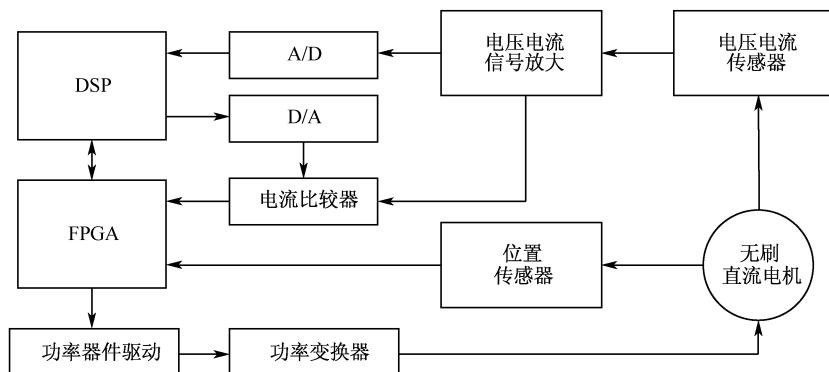


图 1.9 基于 DSP 和 FPGA 的无刷直流电机控制系统框图

目前 DSP 已经发展到了第 6 代产品，其型号规格相当丰富，价格也较便宜。由于 DSP 采用改进的哈佛结构和流水线等机制，其指令处理速度远远高于单片机，特别是 DSP 器件还提供了高度专业化的指令集，提高了数字滤波器的运算速度，这使得它在控制器的规则实施、矢量控制和矩阵变换方面具有得天独厚的优势。另外，DSP 还有很多专用芯片，它们以 CPU 为核心，将不同的外围器件集成在一个芯片上，可以实现很多复杂的控制功能，降低了系统对外围器件的要求和整个系统的成本，提高了可靠性，有利于专利技术的保密。其中，美国 TI 公司推出的 TMS320LF2407 就是一款价格便宜、功能强大的电机控制专用 DSP 芯片。它的两个事件管理器、6 路 CAPTURE 单元、多达 14 路的 PWM 信号输出、丰富的 I/O 口等都使得电机的控制大大简化。TMS320F2812 则进一步提高了运算的精度（32 位）和系统的处理能力（工作频率最高达到 150MIPS）。该系

列数字信号处理器还集成了 128KB 的 Flash 存储器、4KB 的引导 ROM、数学运算表以及 2KB 的 OTP ROM，从而大大提高了应用的灵活性。其代码和指令与 F240x 系列数字信号处理器完全兼容，从而保证了项目或产品设计的可延续性。

DSP 强大的计算能力使许多智能控制算法在无刷直流电机控制中得以实现^[14~19,59,60]，这大大提高了电机的控制精度和稳定性，因此近年来无刷直流电机的全数字化智能控制成为业界相关人员的研究热点。尽管目前各种基于 DSP 的无刷直流电机先进控制算法应用并不太成熟，但随着 DSP 处理速度和存储容量的进一步提高与扩大，其应用将更为广泛。

1.4 无刷直流电机发展趋势

无刷直流电机主要由电机本体、功率驱动电路和位置传感器三部分组成，其控制涉及电机技术、电力电子技术、检测与传感器技术和控制理论技术。因此，新电子技术、新器件、新材料及新控制方法的出现都将进一步推动无刷直流电机的发展和应用。

1. 电力电子及微处理器技术对无刷直流电机发展的影响

1) 小型化与集成化

微机电系统 (MEMS) 技术的发展将使电机控制系统朝控制电路和传感器高度集成化的方向发展，如将电流、电压、速度等信号融合后再进行反馈，可使无刷直流电机控制系统更加简单而可靠。另外，由于无刷直流电机采用稀土永磁材料制作转子，转子侧无热源，故电机内部温升值较传统直流电机小很多，使无刷直流电机逆变器控制电路装入电机内部成为可能。例如，法国 Alsthom 公司开发的 100kW 无刷直流电机，在电枢线圈端装入逆变器，总质量只有 28kg。逆变器与电机二者融为一体，使无刷直流电机与电子技术结合得更紧密，产品的附加值更高，整个控制系统也将朝小型化、集成化方向发展。需要注意的是，到目前为止，由于技术上的限制，电机与控制器一体化产品主要还是应用在磁盘驱动器的主轴驱动和仪器用风扇驱动等特殊结构的小功率无刷直流电机控制系统中。对于一般的工业用无刷直流电机控制系统，是否将电子电路控制器装入电机内部，还需要综合考虑现场工作条件、系统成本、电路工作可靠性及维修方便性等因素。

2) 控制器全数字化

无刷直流电机性能的改善和提高，除了与电机转子永磁材料及电子驱动电路密切相关外，更与其控制器密切相关。因此，也可以从提高电机控制器的性能着手来提高无刷直流电机控制系统的整体性能。高速微处理器及高密度可编程逻辑

器件技术的出现,为此提供了可行的方案和可靠的保证。例如,在一些对控制成本和空间要求严格的应用中,增加位置传感器不太实用或无法接受,而 DSP 等芯片固有的高速计算能力正可被用来实现无刷直流电机的无位置传感器控制。许多硬件工作,如传统的 PID 模拟电路、信号处理电路和逻辑判断电路等都可以由软件来完成,从而进一步减少了系统硬件电路的体积、提高了系统的可靠性和效率。另外一些相对复杂的控制算法也可以通过 DSP、CPLD 或者 FPGA 等芯片来实现,这不但可以提高无刷直流电机控制系统的可靠性,也为其朝接口的通用化和控制的全数字化方向发展提供了坚实的基础。控制器的全数字化将使系统的硬件结构更加简化,促进柔性控制算法在电机控制中的应用,同时还易与上层和远程控制系统进行数据传输通信,便于系统故障的监视与诊断。图 1.10 为典型的无刷直流电机远程网络控制系统结构框图,图中除了通过速度和电流调节器实现无刷直流电机的远程速度控制,还能通过监测系统完成整个控制系统的网络监视与诊断等功能。

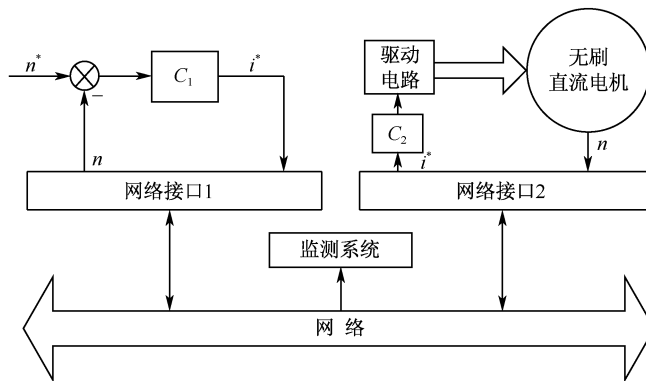


图 1.10 无刷直流电机网络控制系统框图

3) 绿色 PWM 控制及其高效化

在无刷直流电机控制系统中,当逆变器采用三相六状态 120° 两两导通方式时,每个电周期共有六个扇区,每个扇区各占 60° 电角度,每个功率器件在一个电周期内导通 120° 电角度。根据功率器件在导通周期内调制方式的不同,无刷直流电机 PWM 控制方式可以分为半桥调制和全桥调制两种模式。半桥调制又分为 H-PWM-L-ON、H-ON-L-PWM、ON-PWM 和 PWM-ON 四种,其特点是在每个 60° 区间内总是一个功率器件保持常开,另外一个功率器件采用 PWM 控制。H-PWM-L-PWM 全桥调制模式则是在任意一个 60° 区间内,上下桥臂的功率器件同时进行斩波。其中 H-PWM-L-ON 和 H-ON-L-PWM 为单边调制方式,其他三种调制方式则为双边调制方式。每种调制模式都有自己的优缺点,实

际应用时应根据用户对转矩波动、系统效率和无位置传感器控制方式等要求进行合理的选择。无刷直流电机控制系统采用双极性功率晶体管（BPT）驱动时，驱动电路的开关频率一般在 $2\sim 5\text{kHz}$ ，该频率范围内引起的噪声在人耳声频范围之内，不利于人的身体健康。同时，在绕组电感不够大时，绕组电流波形不太平滑、波动较大。采用 MOSFET 和 IGBT 之后，开关频率可达几十千赫兹以上。这样，不论是电磁噪声还是电流波形都能得到改善。因此，在利用软开关等新技术来降低开关损耗、增加开关寿命，并保证系统效率不变或提高的前提下，提高驱动电路的开关频率可实现无刷直流电机控制系统的绿色化 PWM 控制。而在器件开关频率极限受限条件下，则可采用新的调制模式来提高 PWM 调制的工作频率，从而达到降低无刷直流电机转矩波动、提高系统效率的目的。另外，电机驱动功率管，尤其是 MOSFET，在大电流下管压降大，功率管的损耗也大。因此，在允许范围内，控制时宜选用高电压、低电流功率管或采用高电压、低电流供电方式，则功率管压降占母线电压的比例会较小，这样可进一步提高系统的效率。

2. 永磁材料对无刷直流电机发展的影响

电机的小型化、轻量化及高效化与磁性材料的发展息息相关。较早的磁性材料是 20 世纪 30 年代研制成功的铝镍钴，这种磁性材料剩余磁感应强度（剩余磁通密度）较高，磁感应矫顽力低，合金中含钴，价格贵，但温度特性好，至今仍被广泛应用于仪器仪表类要求温度稳定性高的永磁电机中。后来开发出的铁氧体磁性材料，以钡铁氧体和锶铁氧体两种永磁材料在电机中最为常见。这类磁性材料剩余磁感应强度较低，但磁感应矫顽力高，价格便宜，因此在很长时间内占据了主导地位。稀土钕钴永磁材料是 20 世纪 60 年代中期兴起的第二代稀土永磁材料，它具有较高的剩余磁感应强度和磁感应矫顽力，大大提高了传统磁能积数值，其居里温度达到 $710\sim 800^{\circ}\text{C}$ ，磁稳定性好。但是钕钴永磁合金价格昂贵，通常应用在不考虑价格因素的航空和军工等产品上，大大限制了这种高性能磁性材料的推广与应用。1983 年，日本人发现了第三代高性能稀土永磁材料钕铁硼，引发了磁性材料的一场大革命。钕铁硼磁性材料磁能积高，不含价格昂贵的合金元素，钕和钐同为稀土元素，但钕的价格较为便宜且储藏量是钐的十几倍。因此自问世以来，钕铁硼在工业和民用永磁电机中迅速得到了推广与应用^[61]。

与传统电励磁电机相比，由钕铁硼制造的永磁电机具有加工简单、体积和质量小等特点。同等条件下，电机的电枢绕组的匝数也由于磁性材料性能的提高而大大减少。荷兰的 PHILIPS 公司以 70W 微电机作过比较，稀土永磁电机体积仅为电励磁电机的 $1/4$ ，为铁氧体励磁电机的 $1/2$ 。我国是稀土元素矿藏大国，有着丰富的资源优势，近年来稀土产品的产量占世界稀土产品的 90% 以上。特别是第 3 代稀土永磁材料钕铁硼的磁钢性能不断提高，为我国无刷直流电机等永磁

电机的大规模生产提供了可靠的基础。我国钕铁硼矿产资源丰富,但是在钕铁硼的生产加工和技术管理等方面还明显落后于日本等发达国家。可喜的是,北京大学、中科院金属所、钢铁研究总院等单位在新型稀土永磁材料的研发上已经取得了不错的成绩,相信不久的将来中国不但会是稀土材料的生产大国,也将成为其加工和应用的强国。而近年来出现的纳米复合永磁材料是由具有高磁感应矫顽力的硬磁相与具有高饱和磁矩的软磁相复合组成,纳米晶永磁材料理论磁能积能达到 $800\text{kJ}/\text{m}^3$ 以上,远高于钕铁硼的理论磁能积。

纵观电机发展史,每当出现一种新的永磁材料,就会使电机的结构和功能出现新的变革,促进电机的设计理论、计算方法和结构工艺研制水平提高到一个新的台阶。今后,随着新的永磁材料的继续出现及其性能的进一步提高,无刷直流电机的理论研究和产品开发将会得到深层次的发展,电机性能会更好,功能将更完善,其在工业和民用产品中的应用将会更加广泛。采用新型导电和绝缘材料,从本体上提高无刷直流电机的性能也是今后发展的一个重要方向。同时,与材料科学密不可分的黏结永磁、永磁材料定向和充磁等加工工艺技术也亟须发展。

3. 新型无刷直流电机的开发

在无刷直流电机控制系统中,速度和转矩波动一直是需要进一步解决的问题,尤其是用于视听设备、航空电气、计算机中的无刷直流电机,更要求其具有运行平稳、精度高、噪声小等特点。在这些应用场合中的电机,大多为小功率、小尺寸的电机,它们结构紧凑,改动较为困难。为了改进电机性能,可以利用遗传算法(GA)、小生境算法(Niche)等对电机进行优化设计,通过计算机进行模拟、分析和比较,研究气隙磁场形状和磁极结构,选择合适的极对数、齿数和槽形尺寸,从而满足功率、转速和效率等特定要求。目前,已经涌现出多种新型无刷直流电机。①无槽式与无铁心式无刷直流电机:无槽式无刷直流电机取消了传统无刷直流电机定子铁心的齿槽部分,将定子绕组直接放在定子铁心轭上,气隙大,其铁耗只有轭部损耗。无铁心式无刷直流电机则彻底消除了铁耗,具有更好的性能,适用于超高速应用场合。这两类结构无刷直流电机虽然大大降低了损耗,但是其加工工艺较为复杂,定子绕组的嵌线、成型等加工工艺方法还有待提高。MicroMo Electronics 公司推出的 2057 系列无铁心无刷直流电机可持续输出转矩达 $0.018\text{N}\cdot\text{m}$,速度可达 $58000\text{r}/\text{min}$,适用于外科、牙科等手持医疗设备中。②轴向磁场盘式无刷直流电机:在小容量的情况下,这种电机容易做到低噪声、低振动、低转矩波动、高效率和高功率密度。③其他类型无刷直流电机:和有刷直流电机相对应,新型无刷直流电机还应包括无刷直流量矩电机、无刷直流直线电机、无刷直流量限转角电机、低惯量无刷直流电机、无刷直流平面电机和无刷直流球形电机等^[62,63]。文献[64]即将电机设计方案的优化归结为多目标

函数的非线性规划问题，利用模糊小生境遗传算法对无刷直流电机进行了优化设计，设计得到的电机具有电磁转矩提升速度快和换相转矩波动小等特点。图 1.11 是对应的具体优化流程图。总之，从结构上去研究和开发新型电机必然是今后无刷直流电机发展的方向之一。

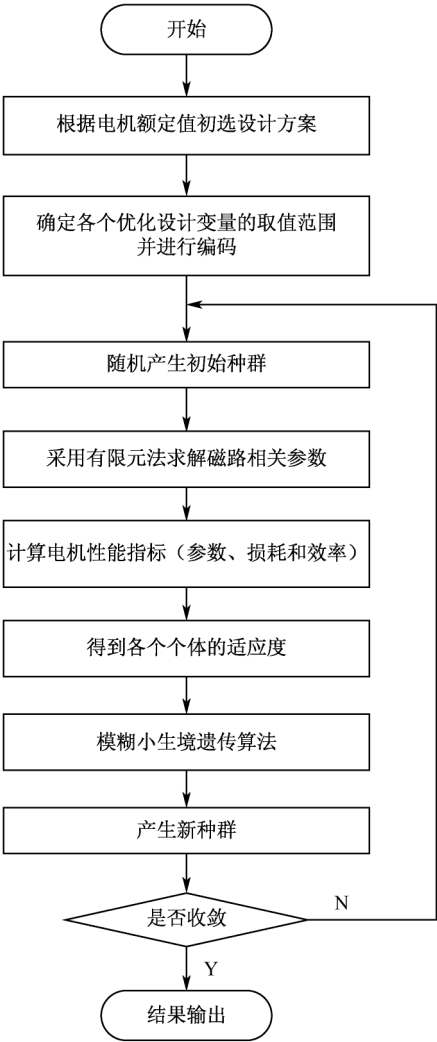


图 1.11 基于模糊小生境遗传算法的电机优化设计流程

4. 先进控制策略的应用

现代工业中对电机性能的要求越来越高，无刷直流电机性能的改善可以通过

电机本体优化设计及电力电子装置的控制来实现,也可利用各种先进的控制策略来完成。无刷直流电机控制系统是典型的非线性、多变量耦合系统,传统的 PID 控制算法简单、易于实现,但不易满足高精度伺服控制系统的控制要求,很难实现电机的高精度运行。基于现代控制理论和智能控制理论的非线性控制方法为实现被控系统高质量的动态和稳态性能奠定了基础,在无刷直流电机控制上得到了充分的应用。模糊控制、神经网络控制、变结构控制、鲁棒控制、参数自适应控制等多种先进控制策略已被用于无刷直流电机的控制^[58, 59, 65~80]。这些控制方法存在的问题是控制相对复杂,实现较困难,但随着数字控制技术的发展和 DSP 处理速度的加快,各种先进控制策略将会被更多地用在无刷直流电机控制系统中,使控制系统的性能大幅提高。同时在 DSP 处理速度一定的情况下,应着力于控制算法的实用化研究,从而全面推进无刷直流电机控制系统朝小型化、轻量化、智能化和高效节能的方向发展。

参 考 文 献

- [1] Pillay P, Krishnan R. Application characteristics of permanent magnet synchronous and brushless DC motors for servo drives. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1991, 27(5): 986-996.
- [2] Pillay P, Krishnan R. Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, part II: The brushless DC motor drive. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1989, 25(2): 274-279.
- [3] Hemati N, Leu M C. A complete model characterization of brushless DC motors. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1992, 28(1): 172-180.
- [4] IEEE. IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms., ANSI/IEEE Standard 100—1984. USA: John Wiley & Sons Inc., 1984.
- [5] NEMA. Motion/Position Control Motors and Controller, MG7—1987. USA: National Electric Manufacturers Association, 1987.
- [6] Inoue K, Nakaoka M. Autotuning gain parameter implementation with fuzzy learning control scheme for DC brushless servo system. *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 1998, 145(5): 419-427.
- [7] 叶金虎. 无刷直流电动机. 北京: 科学出版社, 1982.
- [8] 张琛. 直流无刷电动机原理及应用. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [9] 郭庆鼎, 赵希梅. 直流无刷电动机原理与技术应用. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [10] 刘刚, 王志强, 房建成. 永磁无刷直流电机控制技术与应用. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [11] Harrison D B, Rye N Y. Commutatorless direct current motor. United States Patent Office, 1955: 719-944.
- [12] 王成元, 夏加宽, 杨俊友等. 电机现代控制技术. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [13] Xia C L, Guo P J, Shi T N, et al. Speed control of brushless DC motor using genetic algorithm based fuzzy controller. *IEEE International Conference on Intelligent Mechatronics and Automation*, Japan, 2004: 460-464.
- [14] 王娟. 基于 RBF 的无刷直流电机直接电流控制与转矩分析. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2003.
- [15] 夏长亮, 刘均华, 俞卫等. 基于扩张状态观测器的永磁无刷直流电机滑模变结构控制. *中国电机工程学报*, 2006, 26(20): 139-143.

- [16] 夏长亮,文德,王娟.基于自适应人工神经网络的无刷直流电机换相转矩波动抑制新方法.中国电机工程学报,2002,22(1):54-58.
- [17] 夏长亮,王娟,史婷娜等.基于自适应径向基函数神经网络的无刷直流电机直接电流控制.中国电机工程学报,2003,23(6):123-127.
- [18] 文德.基于 ANN 的无刷直流电机无位置传感器控制及转矩波动研究.天津:天津大学硕士学位论文,2002.
- [19] 夏长亮,郭培健,史婷娜等.基于模糊遗传算法的无刷直流电机自适应控制.中国电机工程学报,2005,25(11):129-133.
- [20] Kuo J L, Chang Z S. Intelligent sensorless control of two-phase linear brushless DC motor based on a recurrent fuzzy neural network. Control and Intelligent Systems, 2008, 36(2): 161-168.
- [21] 中国机械工业年鉴编辑委员会.中国电器工业年鉴.北京:机械工业出版社,2002~2006.
- [22] 郭建龙,陈世元.电动汽车驱动用电机的选择.汽车电器,2007, 1: 9-12.
- [23] 夏长亮,薛向党.汽车空调无刷直流电动机设计研究.微电机,1999, 3: 7-8.
- [24] 夏长亮,史婷娜.汽车空调用非桥式无刷直流电机仿真研究.微电机,2001, 3: 7-9.
- [25] 程琼,陈红兵.永磁无刷直流电机在变频空调压缩机中的应用.湖北工业大学学报,2005, 20(1): 41-43.
- [26] 马瑞卿,刘卫国,刘景林.压缩机用稀土永磁无刷直流直线电动机.微电机,2004, 37(6): 42-46.
- [27] Kenjo T, Nagamori S. Permanent Magnet and Brushless DC Motors. New York: Oxford University Press, 1985.
- [28] Mieslinger W. Control circuit for a commutatorless D.C. motor. United States Patent Office,1969;3, 475,668.
- [29] Iizuka K, Uzuhashi H, Kano M, et al. Microcomputer control for sensorless brushless motor. IEEE Transactions on Industry Applications, 1985, 1A-21:595-601.
- [30] Lin R L, Hu M T, Chen S C, et al. Using phase-current sensing circuit as the position sensor for brushless DC motors without shaft position sensor. The 15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, USA, 1989, 1:215-218.
- [31] Ogasawara S, Akagi H. An approach to position sensorless drives for brushless DC motors. Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, USA, 1990, 1: 443-447.
- [32] Matsui N, Takeshita T, Yasuda K. A new sensorless drive of brushless DC motor. Proceedings of the 1992 International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation. Power Electronics and Motion Control, USA, 1992, 1: 430-435.
- [33] Ertugrul N, Acarnley P. A new algorithm for sensorless operation of permanent magnet motors. IEEE Transactions on Industry Application, 1994, 30(1): 126-133.
- [34] Dhaouadi R, Mohan N, Nourum L. Design and Implementation of an extended Kalman filter for the state estimation of a permanent magnet synchronous motor. IEEE Transactions on Power Electronics, 1991, 6(3): 491-497.
- [35] Terzic B, Jadric M. Design and implementation of the extended Kalman filter for the speed and rotor position estimation of brushless DC motor. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2001, 48(6): 1065-1073.
- [36] Bolognani S, Tubiana L, Zigliotto M. Extended Kalman filter tuning in sensorless PMSM drives. IEEE Transactions on Industry Application, 2003, 39(6): 1741-1747.

- [37] 陈伟. 无刷直流电机卡尔曼法转子位置检测及模型参考自适应控制. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2003.
- [38] Nondahl T A, Ray C, Schmidt P B, et al. A permanent-magnet rotor containing an electrical winding to improve detection of rotor angular position. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1999, 35(4): 819-824.
- [39] Tomita M, Doki S, Okuma S, et al. Sensorless rotor position estimation at standstill of cylindrical brushless DC motors using opened phase voltage change caused by eddy currents. *Electrical Engineering in Japan*, 1999, 126(1): 52-60.
- [40] Matsuse K, Baba T, Masukane I, et al. Position sensorless starting method and driving characteristics of closed-slot small permanent-magnet motor. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2003, 39(2): 451-456.
- [41] 史婷娜, 田洋, 夏长亮. 基于小波网络的永磁无刷直流电机无位置传感器控制. *天津大学学报*, 2007, 40(2): 190-194.
- [42] 杨晓军. 无刷直流电机无位置传感器控制. 天津: 天津大学硕士学位论文, 2002.
- [43] 方卫中, 贺益康. 无刷直流电机反电势的人工神经网络预测. *微电机*, 1998, 31(2): 7-11, 24.
- [44] Jahns T M. Torque production in permanent-magnet synchronous motor drives with rectangular current excitation. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1984, IA-20(4): 803-813.
- [45] Hoang L H, Robert P, Feuillet R. Minimization of torque ripple in brushless DC motor drives. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1986, IA-22(4): 748-755.
- [46] Pillay P, Krishnan R. An investigation into the torque behavior of a brushless DC motor drive. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, USA*, 1988, 1: 201-208.
- [47] Murai Y, Kawase Y, Ohashi K, et al. Torque ripple improvement for brushless DC miniature motors. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, USA*, 1987, 21-26.
- [48] Carlson R, Lajoie-Mazenc M, Fagundes J C S. Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless DC machines. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1992, 28(3): 632-638.
- [49] Hung J Y, Ding Z. Design of currents to reduce torque ripple in brushless permanent magnet motors. *IEEE Proceedings-B, Electric Power Applications*, 1993, 140(4): 260-266.
- [50] Lim Y H, Kook Y S, Ko Y. A new technique of reducing torque ripples for BDCM drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997, 44(5): 735-739.
- [51] Kang B H, Kim C J, Mok H S. Analysis of torque ripple in BLDC motor with commutation time. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings, Korea*, 2001, 1044-1048.
- [52] Liu Y, Zhu Z Q, Howe D. Direct torque control of brushless DC drives with reduced torque ripple. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2005, 41(2): 599-608.
- [53] Nam K Y, Lee W T, Lee C M, et al. Reducing torque ripple of brushless DC motor by varying input voltage. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2006, 42(4): 1307-1310.
- [54] 张一鸣, 夏平畴. 无刷直流电机的电枢反应及其削弱方法. *微电机*, 1999, 32(1): 10-12.
- [55] 张志忠. 无刷直流电机系统的波动力矩仿真研究. *微电机*, 1999, 32(5): 3-5.
- [56] 夏长亮, 俞卫, 李志强. 永磁无刷直流电机转矩波动的自抗扰控制. *中国电机工程学报*, 2006, 26(24): 137-142.
- [57] 夏长亮, 李正军, 杨荣等. 基于自抗扰控制器的无刷直流电机控制系统. *中国电机工程学报*, 2005, 25(2): 82-86.