

TM313

2

2006

永磁无刷直流电动机 转速控制系统的优化设计

主 编 龙 驹

副主编 舒欣梅

主 审 王 军

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

序 言

永磁无刷直流电动机不仅具有结构简单、维护方便、运行可靠等诸多优点，而且具有优良的转速控制性能，故在当今国民经济各个领域受到高度重视并得到广泛应用。

本书是以永磁无刷直流电动机所构成的转速控制系统为主线，着重论述了笔者所研究的“改进混合遗传算法”和“改进 BP 神经网络算法”及其在转速控制器参数优化设计中的应用。

全书共分四个部分：第一部分（第 1~2 章）简叙了永磁无刷直流电动机转速控制系统的工作原理和常规工程设计方法。第二部分（第 3~4 章）是本书的论述重点，以较大篇幅集中阐述了上述两种算法及其在有位置传感器转速优化控制中的应用。第三部分（第 5 章）着重论述了笔者所研究的“改进卡尔曼滤波算法”在无位置传感器转速控制中的应用。第四部分（第 6 章）对笔者所研究的“改进算法”进行了 MATLAB 仿真实验分析，从而证实了这些方法的有效性和可行性。

本书适合于从事电气传动自动化领域工作的科研和工程技术人员阅读和参考，亦可作为自动化专业研究生和高年级本科学生学习相关内容的参考教材。

本书由西华大学电气信息学院龙驹、舒欣梅编著，并承蒙西华大学电气信息学院副院长王军（教授，博士）审稿，王军老师仔细审读了全部书稿，并对整个书稿提出了很好的修改意见，在此特向王军老师深表谢意；在整个书稿的编写过程中，笔者还参考了大量的中英文文献，在此向这些作者也表示感谢；同时在整个书稿的出版过程中得到了西南交通大学出版社的大力支持，在此也向出版社的领导和编辑表示感谢。因编者水平有限，疏漏难免，恳望读者批评指正。

编著者

2006 年 11 月

前 言

1. 对永磁无刷直流电动机进行研究的目的是和意义

永磁无刷直流电动机 (BLDCM: Brushless Direct Current Motor) 是指无机械电刷和换向器的永磁直流电动机,它以电子换向器代替机械电刷和换向器,实现直流电机的换相,是一种高性能、高可靠性的机电一体化产品。对永磁无刷直流电动机转速控制系统的研究主要包括电动机转子位置的检测和估算方法研究、控制及驱动电路研究、先进控制算法的研究等内容。因此,对它进行研究的目的是为了提高其调速性能,进一步改善其性能指标,以更好地满足负载的调速要求。永磁无刷直流电动机既具备交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等一系列优点,又具备有刷直流电动机的运行效率高、无励磁损耗以及调速性能好等诸多优点,同时克服了有刷直流电动机由于机械电刷和换向器的存在所带来的噪声、火花、无线电干扰以及寿命短等弊病,且降低了制造成本,简化了电动机的维修。故永磁无刷直流电动机在当今国民经济各个领域,如医疗器械、仪器仪表、化工、轻纺、计算机驱动器以及家用电器等方面得到了广泛的应用。由于永磁无刷直流电动机具有明显的优越性能,它将在许多应用场合逐步取代其他种类的电动机。所以,对永磁无刷直流电动机进行更进一步的研究已成为电机工程界的一个热点,对我国国民经济的发展具有十分重要的意义。

2. 永磁无刷直流电动机国内外研究的发展历程、现状和趋势

1) 国内研究的发展历程、现状和趋势

我国永磁无刷直流电动机的研制工作始于 20 世纪 70 年代初期,主要集中在一些科研院所和高等院校。经过 30 多年的发展,目前我国已有几种系列产品生产,如 ST 系列、1FTS 系列、ASM 系列等等,但到目前为止仍没有制定出国家标准。限于我国元器件水平及相关理论与实践相结合的程度还比较低,尤其是制造工艺和加工设备较国际先进水准差距较大,所以目前我国永磁无刷直流电动机的综合研制水平仍低于国际先进水平,大约相当于国外 20 世纪 70 年代末或 80 年代初的水准,故有待进一步研究和开发。目前,国内研发和生产的永磁无刷直流电动机主要应用于军工设备,而在空调器、电冰箱、洗衣机、电动自行车及微型风机等方面应用的微型与特种永磁无刷直流电动机的研制基本上还属空白,更有待大力研究和开发。近年来,人工神经网络、遗传算法等智能控制算法开始引入永磁无刷直流电动机的转速控制系统,并成为一个新的研究和发展方向。

2) 国外研究的发展历程、现状和趋势

早在 20 世纪 30 年代,美国就有科学家开始研制以电子换向来代替电刷机械换向的无刷直流电动机,并取得了一定成果。由于当时大功率电子器件仅处于初级发展阶段,没能找到理想的电子换相元器件,使得这种电动机只能停留在实验室研究阶段而无法推广使用。1955 年,美国 D·哈

利森等人首次申请了应用晶体管换向代替电动机机械换向器换向的专利,这就是现代无刷直流电动机的雏形,但由于该电动机尚无起动转矩而不能产品化。后来又经过人们多年努力,借助于霍尔元件来实现换相的无刷直流电动机终于在1962年问世,从而开创了无刷直流电动机产品化的新纪元。70年代以来,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(如GTR, MOSFET, IGBT等)相继出现,以及高性能永磁材料(如钕钴、钕铁硼等)的问世,均为无刷直流电动机及其调速系统的广泛应用奠定了坚实的基础。又经过30多年的发展,目前无刷直流电动机在技术上已比较成熟,在大量应用中已显示出优良特性,应用范围几乎覆盖所有电动机的驱动领域,并可起到其他类电动机所不能达到的功能。国际上一些专家指出,21世纪是无刷直流电动机广泛应用的大发展时期,将为所有新一代的机电一体化产品设计师所采用。现代的永磁无刷直流电动机转速控制系统在硬件上有着朝总线化发展的趋势,而在软件上则有着朝嵌入式操作系统平台发展的趋势,从而可以使得控制系统自身就具有局域网甚至互联网的上网功能,这样就为远程监控提供了方便。

3. 永磁无刷直流电动机中有待深入研究的主要内容

1) 无位置传感器的转子位置检测和估算

较为成熟的无位置传感器位置信号检测方法主要有4种:反电动势法、续流二极管法、电感法和状态观测法。其中“反电动势法”是最常见和应用最为广泛的一种。但这种方法的基本原理是建立在忽略电枢反应影响的前提下的,这在原理上就存在一定误差。尤其是对于大功率永磁无刷直流电动机,电枢反应对气隙合成磁场的影响更明显,使得反电动势过零点与总的感生电动势过零点不重合,误差更大,导致检测出的转子位置误差增大。当电机静止或转速较低时,反电动势为零或很小,很难通过反电动势过零点检测来得到正确的位置信号,使电机起动困难,且严重影响了电机的调速范围。因此,研究如何在无位置传感器永磁无刷直流电动机中更精确地检测转子位置信号就成为十分重要的课题。近年,随着单片机技术的发展,特别是数字信号处理器的应用和推广,使得位置检测可以通过IC芯片配合适当算法的软件而实现。采用DSP以实现无位置传感器的位置检测和估算已成为研究的热点和趋势。

2) 先进控制算法的研究

采用数字信号处理器(DSP)的数字控制电路将是永磁无刷直流电动机转速控制系统设计的发展方向。以DSP芯片为核心的控制系统并不是一个纯硬件的控制电路,它还必须配合软件系统才能控制无刷直流电动机正常工作。这也为控制系统的设计带来更大的灵活性。软件设计必然涉及控制算法的研究和应用。永磁无刷直流电动机的转速、电流控制必须由硬件系统配合具有正确控制算法的软件系统才能得到良好的闭环控制效果。而不同的控制算法将会直接影响控制效果的好坏。过去难以在运算较慢的微处理器上实现的复杂的控制算法,现在则可以借助DSP实时高速的运算处理能力得以实现。因此,研究先进的控制算法就成为设计永磁无刷直流电动机转速控制系统的一个重要方面。本书就主要围绕采用先进控制算法这一主题展开,着重研究了遗传算法和人工神经网络算法在速度PID控制器参数优化中的应用。

目 录

第一章 永磁无刷直流电动机转速控制系统的组成、工作原理和数学模型	1
第一节 永磁无刷直流电动机转速控制系统的组成	1
第二节 永磁无刷直流电动机的工作原理	8
第三节 永磁无刷直流电动机转速控制系统的数学模型	14
第二章 永磁无刷直流电动机转速控制系统的常规工程设计	21
第一节 永磁无刷直流电动机转速控制系统的控制框图	21
第二节 永磁无刷直流电动机转速控制系统的常规工程设计方法	22
第三章 应用遗传算法对永磁无刷直流电动机转速控制系统进行优化设计	33
第一节 应用遗传算法进行优化设计的算法概述	33
第二节 应用标准遗传算法对转速调节器进行优化设计	35
第三节 标准遗传算法用于转速调节器优化设计的缺陷及其改进方案	43
第四节 应用改进遗传算法对转速调节器的 PI 参数进行优化设计	45
第四章 应用神经网络算法对永磁无刷直流电动机转速控制系统进行优化设计	71
第一节 应用神经网络算法进行优化设计的算法概述	71
第二节 单神经元 PID 转速控制器	74
第三节 BP 神经网络算法设计	80
第四节 应用 BP 神经网络算法优化设计 PID 转速控制器	89
第五章 应用卡尔曼滤波算法对无传感器永磁无刷直流电动机转速控制系统进行优化设计	93
第一节 卡尔曼滤波算法概述	93
第二节 常规卡尔曼滤波算法的数学模型	95
第三节 改进的卡尔曼滤波算法数学模型的建立	98
第四节 基于卡尔曼滤波算法的 BLDCM 转子位置和转速的估算设计	102
第五节 用卡尔曼滤波算法对 BLDCM 的转子位置和转速进行估算时的优缺点对比分析	106

第六章 永磁无刷直流电动机转速控制系统 MATLAB 仿真	107
第一节 永磁无刷直流电动机转速控制系统仿真模型的建立	107
第二节 基于遗传算法的转速调节器 PI 参数优化设计的仿真实验	109
第三节 基于卡尔曼滤波算法的转子位置和转速的估算仿真实验	113
参考文献	117

第一章 永磁无刷直流电动机转速控制系统的组成、工作原理和数学模型

第一节 永磁无刷直流电动机转速控制系统的组成

图 1.1 给出了永磁无刷直流电动机转速控制系统的组成原理框图。整个转速控制系统由

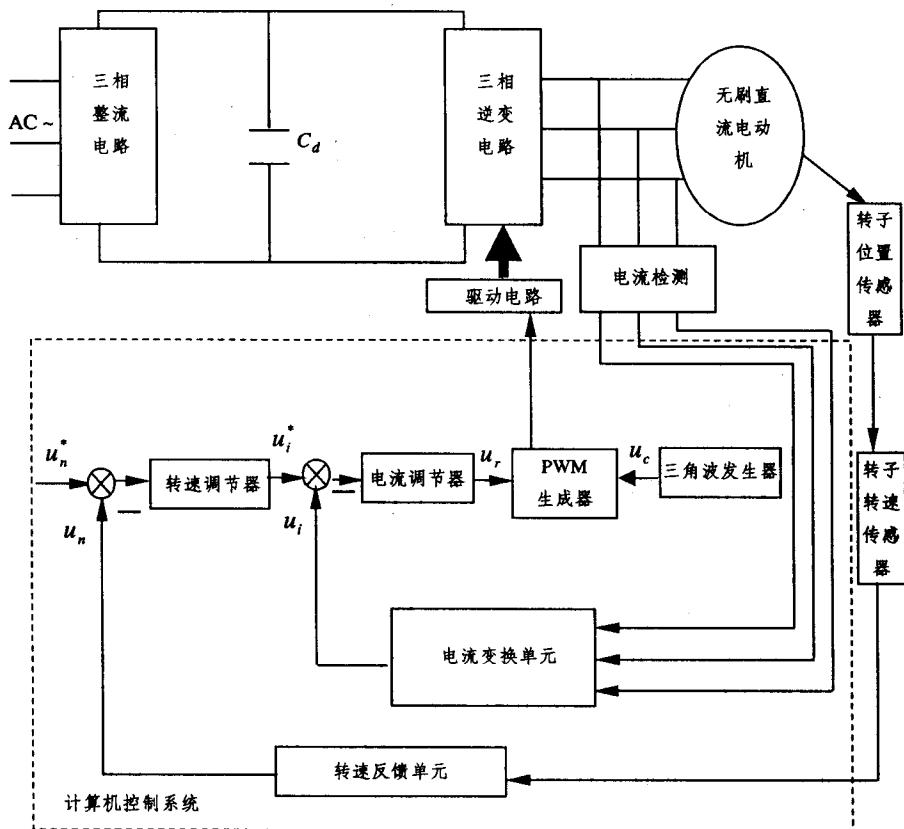


图 1.1 永磁无刷直流电动机转速控制系统组成原理框图

主回路，永磁无刷直流电动机本体（内置位置传感器、安装在转轴上的转速传感器）及计算机（单片机、DSP、RISC 或者工业控制计算机）控制系统组成，其中计算机控制系统包括典型的转速、电流双闭环调节环节，PWM 生成器等。

1. 主回路

主回路采用交—直—交电压型 PWM 变频器，电力电子器件可根据需要选用 BJT，功率 MOSFET 或 IGBT，MCT。主回路的作用是在 PWM 的作用下产生所需要的三相互差 120° 电角度的方波电流。

2. 永磁无刷直流电动机本体

永磁无刷直流电动机的基本结构如图 1.2 所示^[6]。

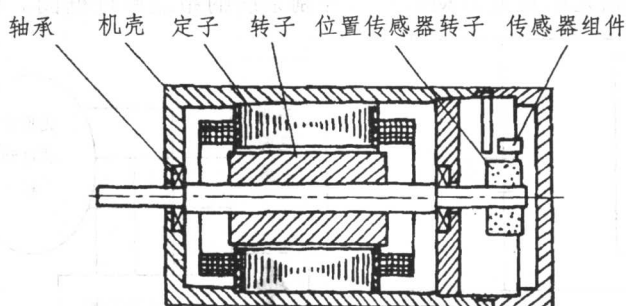


图 1.2 永磁无刷直流电动机基本结构示意图

从图中我们可以看到，就其基本结构而言，永磁无刷直流电动机是由电动机本体、内置的转子位置传感器和外加在转轴上的转速传感器三部分组成。

(1) 电动机本体

电动机本体在结构上与永磁同步电动机相似，仍由定子和转子两大部分组成。定子部分作为电动机的电枢，在其上开有齿槽，齿槽数与转子极数和相数有关，是它们的整数倍；同时在定子铁芯中安放对称的多相绕组（绕组的相数有二、三、四、五相，但应用最多的是三相和四相），这些绕组可接成星形或封闭形（角形），各相绕组分别与逆变器中各开关管相连接。转子部分是由永磁材料制成的具有一定磁极对数的永磁体，其主要作用是在电动机的气隙中建立足够强度的磁场。永磁转子主要有两种结构形式，如图 1.3 所示。第一种结构是将扇形的永磁体贴在转子外表面，称为外装式（凸极式），该种结构的转子具有电枢电感小，齿槽效应转矩小的优点，但同时具有磁通不集中、气隙磁通密度低且容易受到电枢反应影响的缺点，所以该种结构的转子适用于小容量的低速电机；第二种结构是将矩形的永磁体内嵌到转子铁芯中，称为内装式（内嵌式），该种结构的转子具有磁通很集中、气隙磁通密度大且

不易受到电枢反应影响的优点，但同时具有电枢电感大，齿槽效应转矩大的缺点，所以该种结构的转子适用于大容量的高速电机。

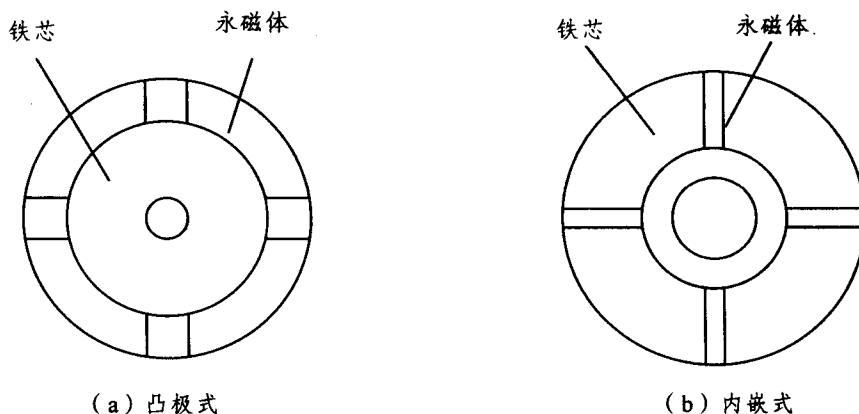


图 1.3 永磁转子结构形式示意图

(2) 转子位置传感器

转子位置传感器是永磁无刷直流电动机的关键部分，其作用是检测转子磁极相对于定子电枢绕组轴线的相对位置，为逆变电路提供正确的换相信息，即将转子磁钢磁极的位置信号转换成电信号，然后去控制定子绕组换相，使电动机定子绕组中的电流随着转子位置的变化按次序换相，从而形成气隙中步进式的旋转磁场，驱动永磁转子连续不断地旋转。目前在永磁无刷直流电动机中常用的位置传感器主要有四种：磁敏式位置传感器、电磁式位置传感器、光电式位置传感器和霍尔式位置传感器。它们各具特点，然而由于霍尔式位置传感器具有结构简单、价格便宜、体积小、安装灵活方便、易于机电一体化等优点，目前得到越来越广泛的应用。

(3) 转子转速传感器

一般将增量式光电脉冲编码器安装在转子上来检测永磁无刷直流电动机的转子转速，同时常采用 M 法、T 法、M/T 法以及锁相法来测转速。

3. 转速、电流双闭环调节环节^{[7][10][14]}

1) 使用转速、电流双闭环转速控制系统的必要性

使用转速、电流双闭环转速控制系统较好地解决了使用单闭环转速控制系统出现的不足。它使得永磁无刷直流电动机在起动时可以充分利用电动机的允许过载能力，从而让电动机在起动过程中，电流调节器的给定电压为恒定最大值，维持了 $I_d = I_{dm}$ ，在恒定励磁和恒转矩负载下，电动机以最大恒加速度起动。达到了起动过程尽可能快的要求。在起动过程中，只有很短的起动初始阶段不是 $I_d = I_{dm}$ ，所以起动过程可以称为“准时间最优控制”过程。内环

前向通道的扰动可以及时得到调节，大大减少了被控制量的动态速降。使用转速—电流两个调节器，可以分别根据转速、电流的动态性能指标确定调节器参数，所以，比较容易设计调节器参数。

2) 从转速调节器输出是否饱和看两个环的工作效能

当转速给定电压有较大变化或负载转矩增加很多时，转速调节器输出饱和，内环具有恒值负反馈调节功能，转速的变化对系统不再产生影响，没有调节作用，相当于转速环“开环”。当转速给定电压变化很小或负载转矩增加不大时，转速调节器输出不饱和，这时，内环是一个随动系统，电流跟随给定电压变化。外环具有转速负反馈调节功能。

3) 从双环系统工作来看对两个环的要求

电动机起动时，电流按照给定阶跃变化，要求电流很快上升，为抑制电流环中前向通道的扰动，要求电流环及时调节，所以，对电流环来说，主要强调要有良好的跟随性。对转速环来说，起动时不调节，相当于“开环”。系统运行中主要看其克服负载扰动的能力，要求动态速降小，恢复时间短，所以，对转速环主要强调要有良好的抗扰性。

4) 电流和转速调节器的作用分析

(1) 电流调节器的作用

① 启动时，由于转速调节器的饱和作用，让电流调节器调节允许的最大电流，从而加快了过渡过程，实现了电动机的快速启动；

② 当电网电压波动时，依靠电流调节器的调节作用而使电流维持不变，从而使电网电压的波动几乎不对转速产生影响；

③ 当电动机过载甚至堵转时，可以限制过大的电流，起到快速保护的作用，同时可以使转速迅速下降到安全值。

(2) 转速调节器的作用

① 稳定转速，使转速跟随参考转速变化，从而实现稳定运行时无静差；

② 在负载变化（或各环节产生扰动）而使转速出现偏差时，则可以依靠转速调节器的调节作用来消除转速偏差，保持转速恒定。

4. PWM 生成器^[2]

1) PWM 信号的产生

从后面工作原理的分析我们可以知道，永磁无刷直流电动机的电磁转矩只与方波电流的幅值成正比，而电流的频率和相位则取决于转子旋转过程中所处的位置。因此，对由它组成的控制系统进行控制的关键就是控制电流的大小。考虑到本系统的相电流波形为方波，控制的目标是电流幅值，因此只设置一个电流幅值调节器即可，作用相当于直流双环系统中的电

流调节器。逆变器的控制采用三角波与直流信号相比较的 PWM 方法，即电流调节器输出的电压信号 u_r 与载频三角波 u_c 信号相比较，产生等幅、等宽、等距的 PWM 信号，控制逆变器中的各功率开关。如图 1.4 所示，PWM 信号的宽度由 u_r 控制， u_r 幅值高，PWM 波的占空比大，逆变器输出的电压幅值就高，流过定子绕组的电流就大，反之则小。电流幅值闭环调节后，逆变器输出的电流幅值就能跟随给定电流变化，且稳态运行时无静差。

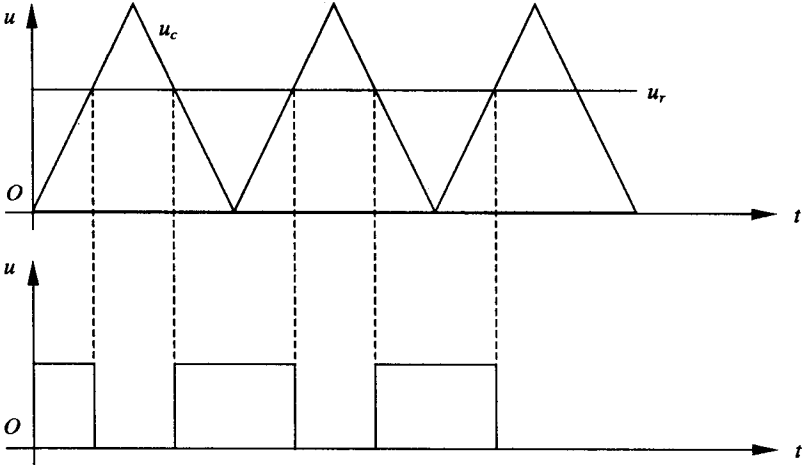
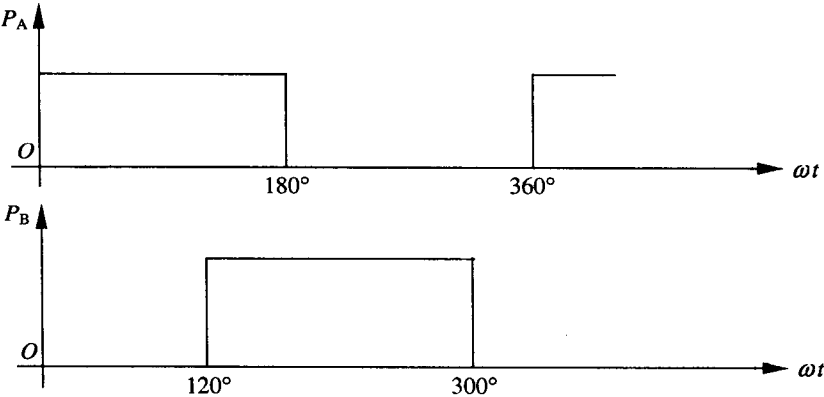


图 1.4 PWM 信号产生原理波形图

2) PWM 信号的使用

从后面工作原理的分析我们可以知道，永磁无刷直流电动机的方波电流与永磁转子的空间位置有严格的对应关系，受转子磁钢磁极位置检测信号的控制。此系统采用霍尔式转子位置传感器，其输出为三个互差 120° 电角度、宽 180° 电角度的矩形波，如图 1.5 所示。 P_A 、 P_B 、 P_C 为三路位置信号，经位置信号处理单元后，就可以得到逆变器功率开关的使能（OE）信号，



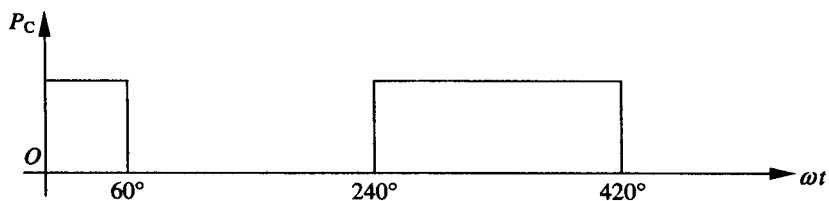
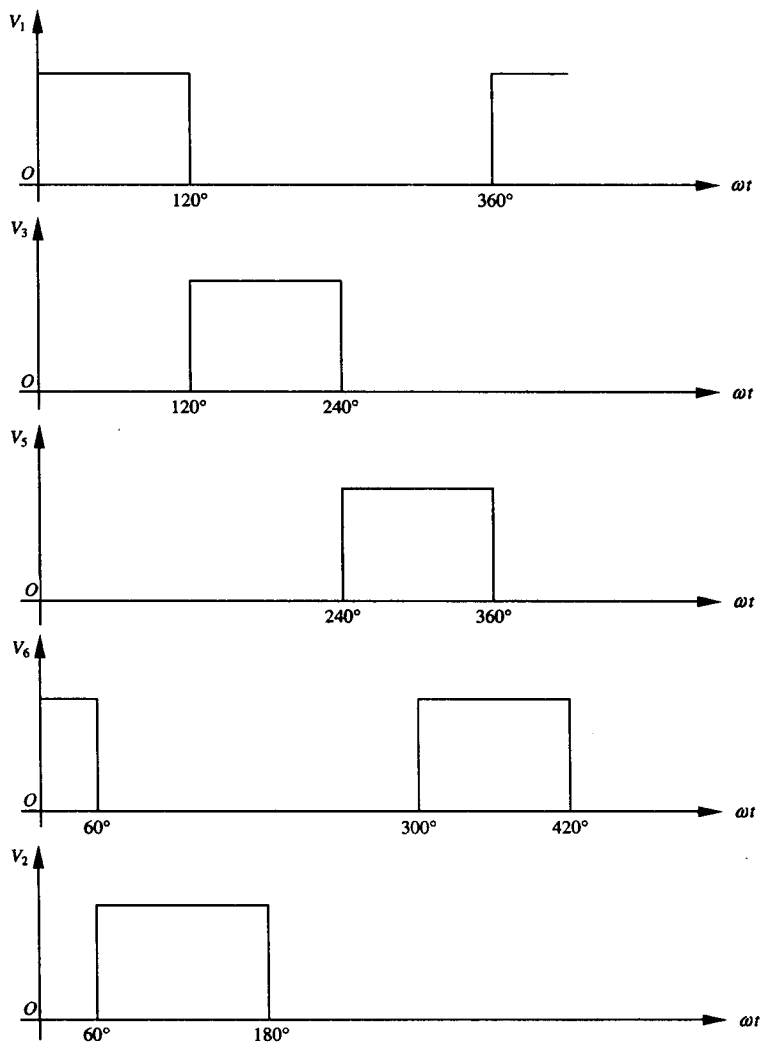


图 1.5 转子位置传感器输出波形图

如图 1.6 所示。使能信号与 PWM 信号相“与”后，输出到驱动电路，控制相应功率管的导通与关断。图 1.7 为正转电动时的电动机三相电流波形。



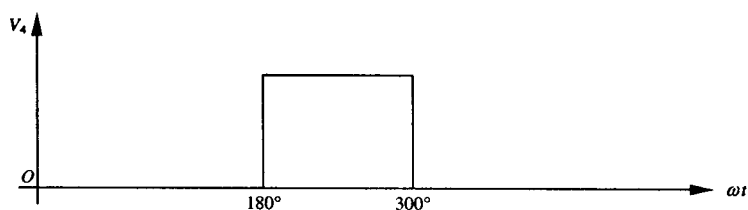


图 1.6 逆变器功率开关管的导通信号波形图

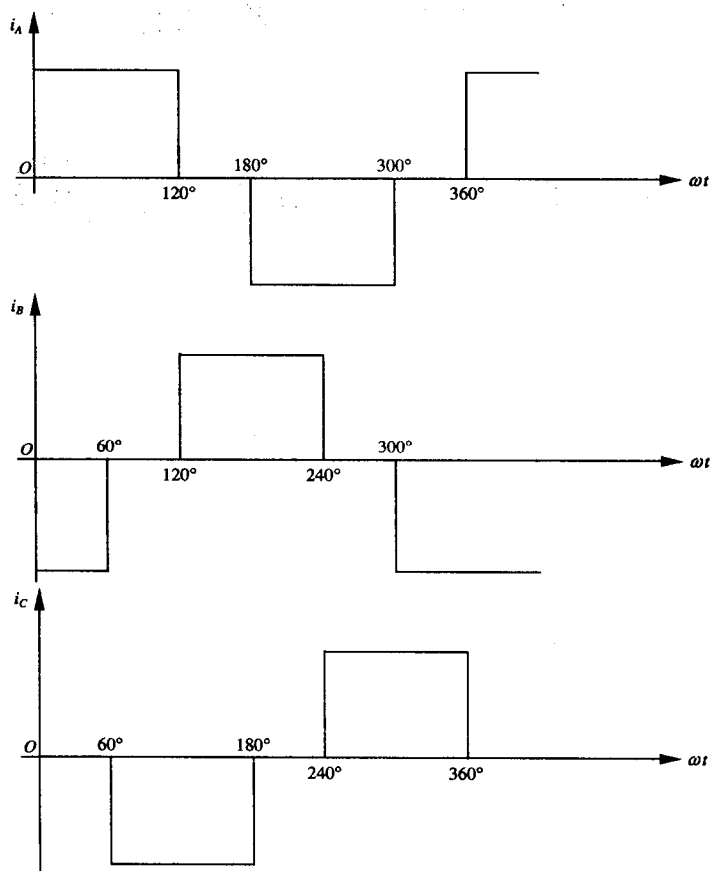


图 1.7 三相方波电流波形图

3) 永磁无刷直流电动机转速控制系统的特点

① 永磁无刷直流电动机转速控制原理和普通直流电动机相同,组成的转速控制系统也相类似,并且可以借鉴传统的直流电动机调速系统的设计经验。

② 永磁无刷直流电动机比正弦波永磁同步电动机控制简单,逆变器产生方波比正弦波容

易, 转子只需要带有 A, B, C 三个磁极位置检测器即可, 因此会大大降低其控制系统的成本。

③ 由永磁无刷直流电动机组成的转速控制系统, 具有转矩平滑、响应快、控制精度高等特点, 可适用于数控机床和机器人的驱动以及对动、静态性能要求较高的电气传动领域。

第二节 永磁无刷直流电动机的工作原理

1. 三相半桥驱动方式的工作原理^[6]

为了简明、清晰起见, 下面以装有位置传感器的永磁无刷直流电动机为例来详细说明无刷直流电动机的工作原理, 如图 1.8 所示。该无刷直流电动机的电动机本体为三相两极的永磁方波电动机本体, 而其逆变器电路为星形三相三状态连接方式的非桥式开关线路。

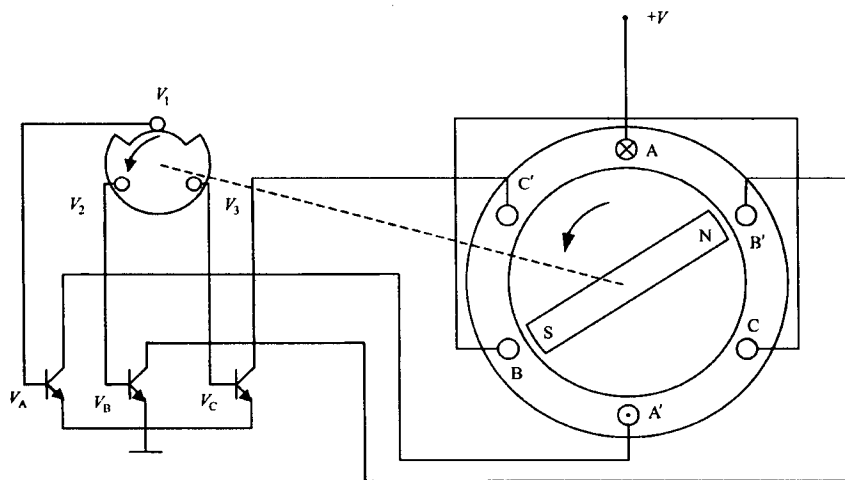


图 1.8 三相永磁无刷直流电动机工作原理示意图

该系统采用光电式位置传感器, 电动机的定子绕组分别为 A 相、B 相、C 相, 因此, 光电式位置传感器上也有三个光敏接收元件 V_1 , V_2 , V_3 与之对应。这三个光敏接收元件在空间上间隔 120° , 分别控制三个开关管 V_A , V_B , V_C (本例为半桥驱动, 只用三个开关管), 与此同时这三个开关管则控制对应定子相绕组的通电与断电。遮光板安装在转子上, 安装的位置与图中转子的位置相对应。同时为了简化, 转子只有一对磁极。

当转子处于图 1.9 (a) 所示的位置时, 遮光板遮住光敏接收元件 V_2 , V_3 , 只有 V_1 可以透光。因此 V_1 输出高电平使开关管 V_A 导通, 此时 A 相定子绕组通电, 而 B, C 两相定子绕组处于断电状态。A 相绕组通电使定子绕组产生的磁场与转子的永磁磁场相互作用, 产生

的转矩推动转子逆时针转动。当转子转到图 1.9 (b) 所示的位置时, 遮光板遮住 V_1 , 并使 V_2 透光, 因此, V_1 输出低电平使开关管 V_A 截止, A 相定子绕组断电; 同时, V_2 输出高电平使开关管 V_B 导通, B 相定子绕组通电, C 相状态不变。这样由于通电相发生了变化, 使定子磁场方向也发生了变化, 与转子永磁磁场相互作用, 仍然会产生与前面过程同样大的转矩, 推动转子继续逆时针转动。当转子转到图 1.9 (c) 的位置时, 遮光板遮住 V_2 , 同时使 V_3 透光, 因此, B 相定子绕组断电, C 相定子绕组通电, 定子磁场方向又发生变化, 继续推动转子转到图 1.9 (d) 的位置, 使转子转过一周又回到原来位置。如此循环下去, 电动机就转动起来了。

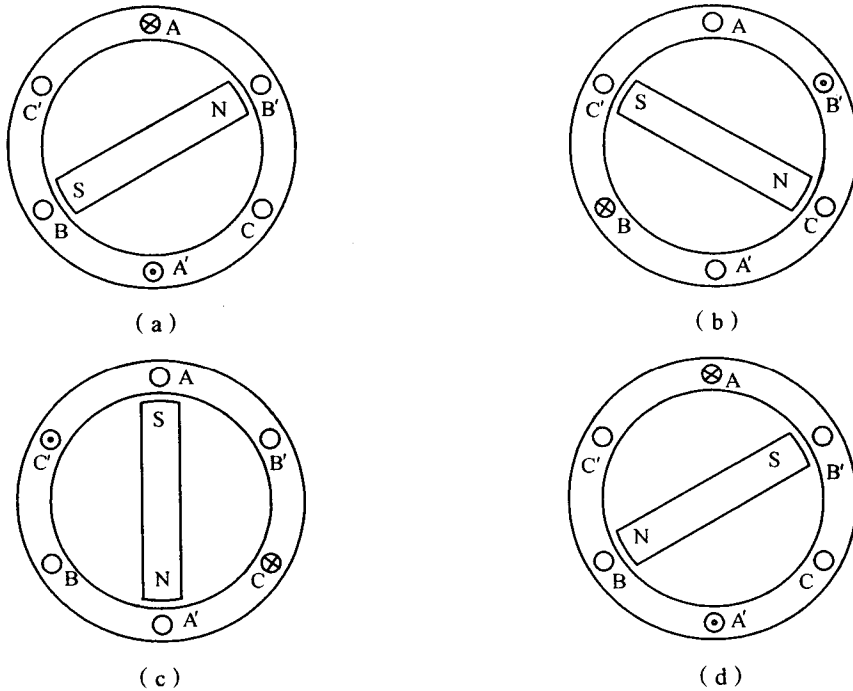


图 1.9 永磁无刷直流电动机定子通电绕组与转子位置关系的示意图

图 1.10 给出了各相导通的顺序。上述过程可以看成按一定顺序换相通电的过程, 或者说磁场旋转的过程。在换相的过程中, 定子各相绕组在工作气隙中所形成的旋转磁场是跳跃式运动的。这种旋转磁场在一周内内有 3 种状态, 每种磁状态持续 120° 。它们跟踪转子, 并与转子的磁场相互作用, 产生推动转子继续转动的转矩。

以上例子属于三相半桥驱动方式, 这种方式虽然具有结构简单的优点, 但由图 1.10 可以看出, 这种连接方式每相定子绕组每转通电时间只有 $1/3$, 即 120° , 其绕组利用率很低; 另外, 它的输出转矩如图 1.11 所示, 可见波动较大, 因此, 这种方式只在要求较低的场合中应用。

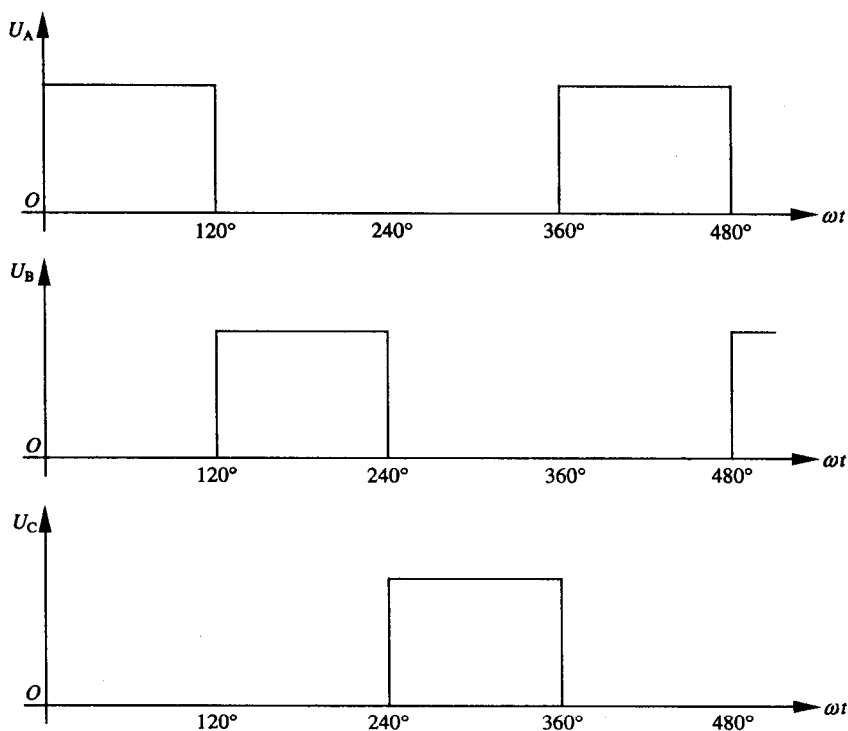


图 1.10 无刷直流电动机各相电压波形

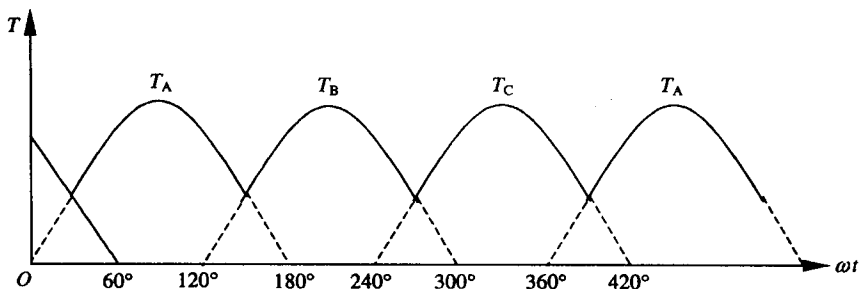


图 1.11 三相半桥式驱动的转矩波形图

2. 三相全桥驱动方式的工作原理^{[9][6]}

针对上述三相半桥驱动方式存在的不足，本系统所采用的则是三相星形联结全桥驱动电路，其工作方式为一二导通方式，现将其工作原理分析如下。

首先给出该逆变电路的连接方式示意图，如图 1.12 所示。图中，开关管 V_1, V_3, V_5 处于上半桥，而开关管 V_2, V_4, V_6 处于下半桥；位置传感器的三个输出是通过驱动电路控制这

些开关管的导通和截止，其控制方式采用二二导通方式。根据图 1.9 所示的开关管命名关系，开关管的导通顺序为： $V_1, V_2 \rightarrow V_2, V_3 \rightarrow V_3, V_4 \rightarrow V_4, V_5 \rightarrow V_5, V_6 \rightarrow V_6, V_1$ ，可见，共有 6 种导通状态。因此，在一个电气周期内，每隔 60° 改变一次导通状态，每改变一次状态更换一个开关管，每个开关管导通 120° 。

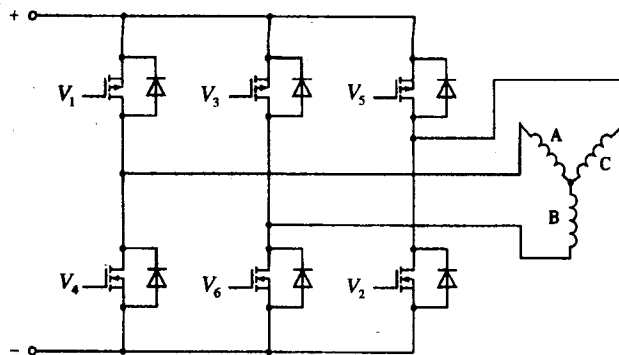


图 1.12 三相星形连接桥式逆变电路

为了更加直观的分析二二导通方式下的工作原理，现在给出三相永磁无刷直流电动机定子绕组的结构示意图，如图 1.13 所示。图中直线 A—X 表示与 A 相定子绕组轴线相正交的位置，直线 B—Y 表示与 B 相定子绕组轴线相正交的位置，直线 C—Z 表示与 C 相定子绕组轴线相正交的位置，显然由 A—X, B—Y, C—Z 交叉形成了 6 个 60° 的扇区，所以也把图 1.13 叫做“定子空间的扇区图”。“定子空间的扇区图”中共有 6 个扇区，每个扇区占 60° 。电动机转子位置传感器的输出信号顺序地给出了 6 个代码，这 6 个代码和 6 个扇区是一一对应的。也就是说，当电动机的永磁转子位于每一个扇区内时，转子位置传感器发出来的代码是保持不变的，而一旦电动机转子转出了这个扇区，转子位置传感器就发出新的代码，这一新代码和电动机转子所处的新扇区相对应。

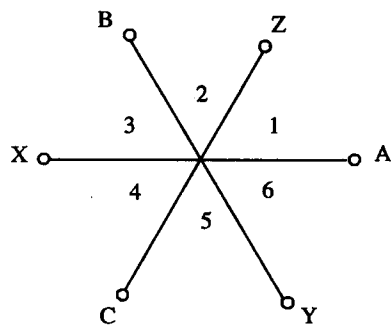


图 1.13 三相永磁无刷直流电动机定子空间的扇区图

如图 1.14 (a) 所示，假定电动机正处于 1 号扇区，电动机转向也如图示为顺时针，为了使电动机转子能获得连续的转矩，定子磁场应当与转子垂直，这时，定子的磁场必然位于与 B—Y 线重合的位置（B 端为 N 极，Y 端为 S 极）。而定子磁场是由定子电流产生的，定子电流的流向应当是：A 相绕组的电流由 A 端流入，由 X 端流出；C 相绕组的电流由 Z 端流入，由 C 端流出；B 相绕组不通电。根据上面的分析，从图 1.12 所示的三相永磁无刷直流电动机