

龙 驹 曾永忠 编著
刘小兵 审定

水泵用无刷直流电动机 智能控制系统的 MATLAB建模与仿真

SHUIBENG YONG WUSHUA ZHILIU DIANDONGJI
ZHINENG KONGZHI XITONG DE
MATLAB JIANMO YU FANGZHEN

西华大学流体及动力机械教育部重点实验室资助

水泵用无刷直流电动机 智能控制系统的 MATLAB建模与仿真

龙 驹 曾永忠◎编著
刘小兵◎审定

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

水泵用无刷直流电动机智能控制系统的 MATLAB 建模与仿真 / 龙驹, 曾永忠编著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2016.12

ISBN 978-7-5643-5138-0

I. ①水… II. ①龙… ②曾… III. ①永磁直流电机—无刷电机—转速—智能控制—计算机仿真—Matlab 软件 IV. ①TM345.012

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 283898 号

水泵用无刷直流电动机智能控制系统的 MATLAB 建模与仿真

龙驹 曾永忠 编著

责任编辑

李伟

封面设计

何东琳设计工作室

出版发行

西南交通大学出版社
(四川省成都市二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

发行部电话

028-87600564 028-87600533

邮政编码

610031

网址

<http://www.xnjdcbs.com>

印刷

四川煤田地质制图印刷厂

成品尺寸

170 mm × 230 mm

印张

13.5

字数

215 千

版次

2016 年 12 月第 1 版

印次

2016 年 12 月第 1 次

书号

ISBN 978-7-5643-5138-0

定价

48.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

与传统的有刷直流电动机相比,无刷直流电动机(BLDCM)具有结构简单、运行可靠、体积小、质量轻、损耗小、效率高等显著优点。近年来,随着永磁材料技术和性能的不不断提高,以及永磁电动机控制技术的不断成熟,BLDCM已经在民用、航天和军事等领域得到了广泛应用。然而,BLDCM是一个多变量、强耦合、非线性和变参数的复杂对象,为了获得较好的控制性能,需要对其采用一定的控制算法。随着现代控制理论不断发展,近年来有关BLDCM控制算法的研究已经成为研究热点,并已有大量文献发表在国内外学术期刊和专著上。因此,为了使广大工程技术人员能够充分了解、掌握和应用这一领域的最新技术,学会用MATLAB仿真软件进行相关BLDCM控制算法的设计与研究,作者编写了本书,以抛砖引玉,供广大读者参考。

本书是在总结作者多年研究成果的基础上,基于目前成熟使用的MATLAB 2010b仿真软件,以三相和多相永磁无刷直流电动机所构成的转速控制系统为主线,在总体上按照由浅入深、由易到难的原则编写而成的。本书具有如下特点:

(1)每一种BLDCM控制算法都给出了完整的MATLAB仿真建模过程与方法,同时给出了仿真结果的详细分析,为读者提供了有益的借鉴。

(2)各种BLDCM控制算法描述完整,仿真模型设计采用模块化方法,便于读者研读和二次开发。

(3)各章节内容相对独立,便于读者根据自身研究方向进行深入研究。

本书以水泵用永磁无刷直流电动机为研究对象,分别论述了作者在三相以及多相(六、九、十二相)永磁无刷直流电动机转速智能控制系统中的最新研究成果,并详细论述了每种智能调速系统MATLAB建模与仿真的过程。全书共分为11章:第1~2章简述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 3~6 章是本书的重点,详细分析了永磁三相无刷直流电动机的普通 PI 转速控制系统、分数阶转速控制系统、模糊转速控制系统、混沌控制系统的 MATLAB 建模与仿真过程,并对仿真结果进行了详细分析;第 7~11 章是本书的亮点,着重论述了作者在多相永磁无刷直流电动机上的研究成果,详细分析了六、九、十二相永磁无刷直流电动机的普通 PI 转速控制系统、分数阶转速控制系统、模糊转速控制系统 MATLAB 建模与仿真的过程,并对仿真结果进行了详细分析。本书力求反映近年来国内外智能控制技术在水泵用三相以及多相永磁无刷直流电动机转速控制系统中取得的理论成果和技术进展。

本书由西华大学能源与动力工程学院流体及动力机械教育部重点实验室龙驹、曾永忠编著,并承蒙西华大学研究生部部长、能源与动力工程学院院长刘小兵教授审定。刘小兵教授仔细审读了全部书稿,并对整个书稿内容提出了很好的修改建议,在此特向刘小兵教授表示感谢;西华大学 2015 级机械工程学院研究生何垂柯、姜曾两位同学参与了本书九相无刷直流电机部分的 MATLAB 建模与仿真以及配套内容的编写工作,在此特向这两位同学表示感谢;在整个书稿的编写过程中,作者还参考了大量中英文文献,在此向这些作者表示感谢;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,在此向出版社的领导和编辑老师为本书付出的辛勤劳动表示感谢。

本书可作为从事电气传动自动化领域工作的科研及工程技术人员的阅读和参考书,也可作为高等院校相关专业教师、研究生和高年级本科生学习相关内容的参考书。

因作者水平有限,书中难免存在疏漏之处,恳请广大读者批评指正。如您对控制算法和仿真模型有疑问,请通过 E-mail 与作者联系, E-mail 地址: xianfeng603@126.com。

龙 驹

2016 年 11 月

目 录

1	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
1.1	永磁无刷直流电动机转速控制系统的组成	1
1.2	永磁无刷直流电动机转速控制系统的工作原理	9
1.3	永磁无刷直流电动机转速控制系统的数学模型	17
2	永磁无刷直流电动机转速控制系统的常规工程设计	25
2.1	永磁无刷直流电动机转速控制系统的控制框图	25
2.2	永磁无刷直流电动机转速控制系统的常规工程设计方法	26
3	三相无刷直流电动机 PI 调速系统的建模与仿真	40
3.1	引 言	40
3.2	调速系统结构	40
3.3	无刷直流电动机本体建模	42
3.4	逆变电路建模	58
3.5	控制电路建模	61
3.6	中点电压模块	64
3.7	仿真实验	65
4	三相无刷直流电动机分数阶转速控制系统的建模与仿真	69
4.1	分数阶微积分定义	69
4.2	分数阶转速 PI 控制器	71
4.3	分数阶 PID 的逼近公式	73
4.4	分数阶转速 PID 控制器仿真模型	74
4.5	系统仿真	75
4.6	结 论	88
5	三相无刷直流电动机模糊转速控制系统的建模与仿真	90
5.1	模糊控制原理	90
5.2	模糊 PID 转速控制器的设计与建模	91
5.3	系统仿真	97
5.4	结 论	102

6	三相无刷直流电动机的混沌建模与仿真	103
6.1	无刷直流电动机混沌模型的建模	103
6.2	无刷直流电动机混沌模型的仿真	104
7	六相无刷直流电动机 PID 转速控制系统的建模与仿真	110
7.1	无刷直流电动机的基本架构	110
7.2	六相无刷直流电动机的结构、工作原理和数学模型	111
7.3	六相无刷直流电动机 PID 转速控制系统的建模	116
7.4	系统仿真及结果分析	125
7.5	结 论	131
8	六相无刷直流电动机模糊转速控制系统的建模与仿真	132
8.1	模糊控制原理	132
8.2	模糊控制器的组成	133
8.3	模糊 PID 控制原理	135
8.4	六相普通 PI 与模糊 PI 转速控制系统的仿真比较	137
8.5	结 论	141
9	九相无刷直流电动机 PI 转速控制系统的建模与仿真	142
9.1	九相无刷直流电动机的结构、工作原理和数学模型	142
9.2	九相无刷直流电动机的 PI 控制系统仿真模型	148
9.3	系统仿真及结果分析	157
10	九相无刷直流电动机分数阶转速控制系统的建模与仿真	163
10.1	分数阶 PI^λ 控制器的原理与建模	163
10.2	九相无刷直流电动机分数阶 PI^λ 转速控制系统的建模	166
10.3	系统仿真及结果分析	168
10.4	结 论	174
11	十二相无刷直流电动机 PI 转速控制系统的建模与仿真	176
11.1	十二相无刷直流电动机的结构、工作原理和数学模型	176
11.2	十二相无刷直流电动机的 PI 控制系统仿真模型	181
11.3	系统仿真及结果分析	191
	参考文献	198

1 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

1.1 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。

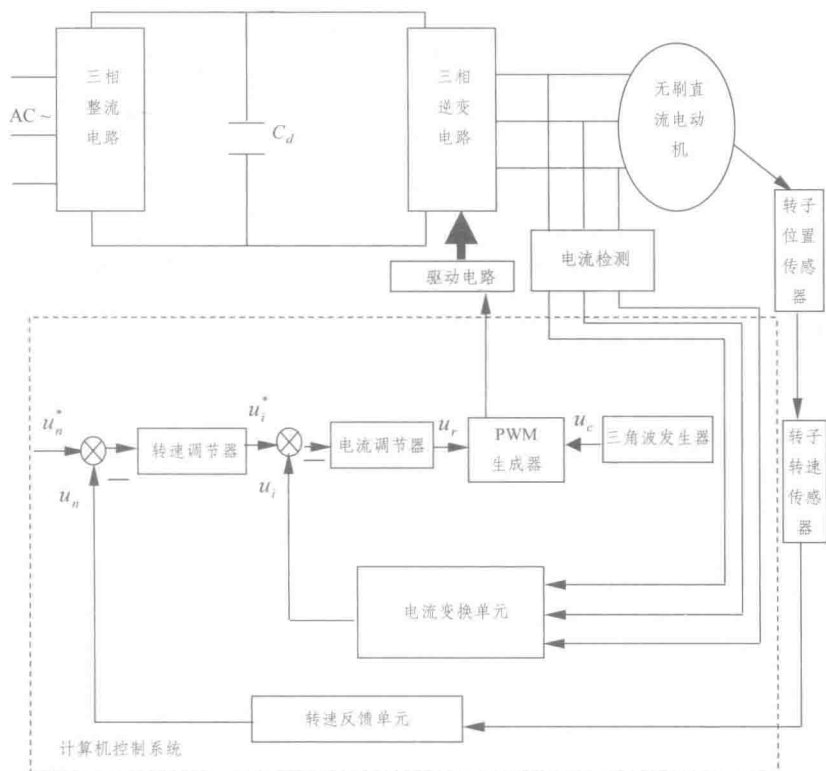


图 1.1 永磁无刷直流电动机转速控制系统组成原理框图

整个转速控制系统由主回路、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。

1.1.1 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、IGBT 或 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。

1.1.2 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。

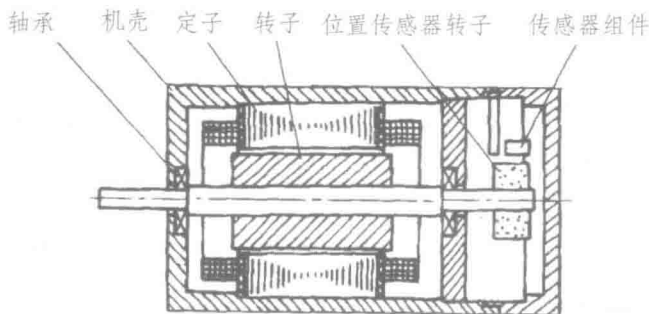


图 1.2 永磁无刷直流电动机基本结构示意图

从图 1.2 中可以看到,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,在定子铁心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，但同时又具有磁通不集中、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心中，称为内装式（内嵌式），该种结构的转子具有磁通集中、气隙磁通密度大且不易受到电枢反应影响的优点，但同时又具有电枢电感大、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。

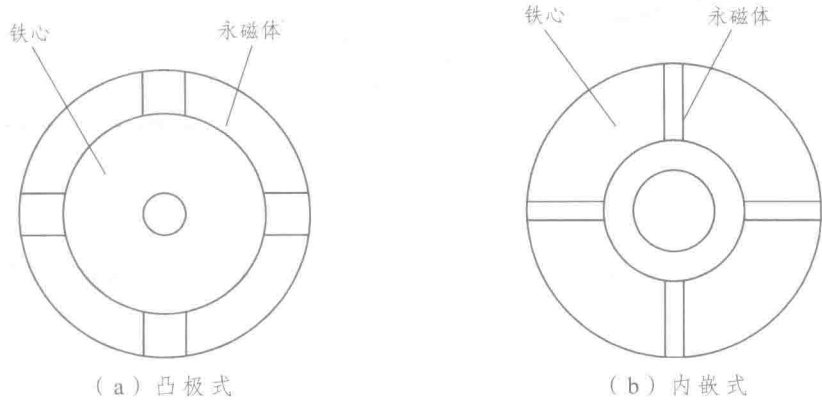


图 1.3 永磁转子结构形式示意图

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 4 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，因此霍尔式位置传感器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。

1.1.3 转速、电流双闭环调节环节

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启动时可以充分利用电动机的允许过载能力，从而让电动机在启动过程中，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启动，达到了启动过程尽可能快的要求。在启动过程中，只有很短的启动初始阶段不是 $I_d = I_{dm}$ ，所以启动过程可以称为“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

电动机启动时，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，启动时不调节，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。

1.1.4 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。

1.1.5 PWM 生成器

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。

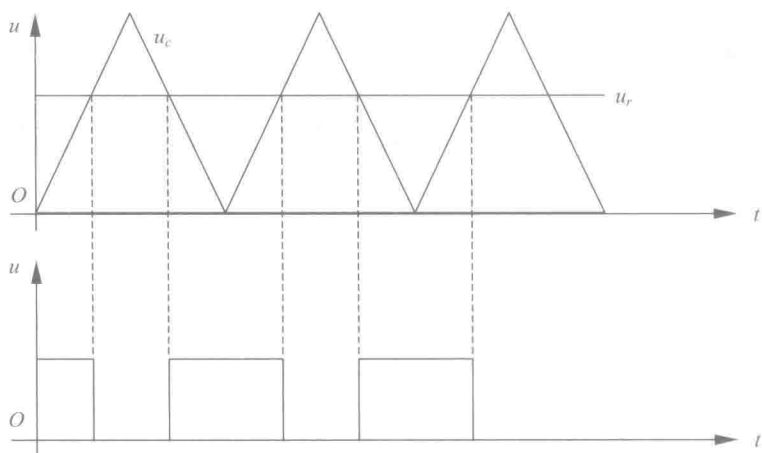
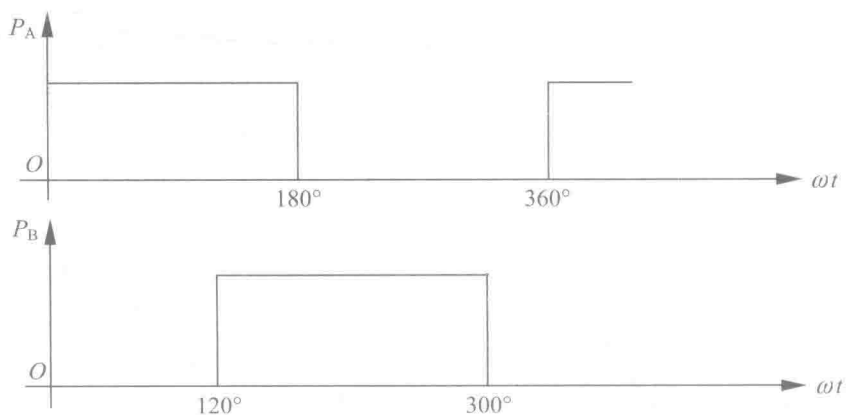


图 1.4 PWM 信号产生原理波形图

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,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 为正转运行时的电动机三相电流波形。



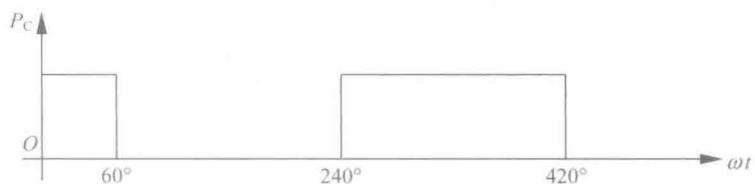
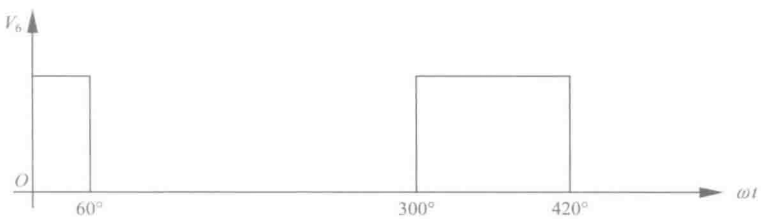
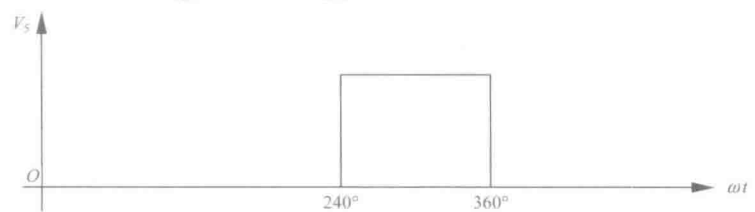
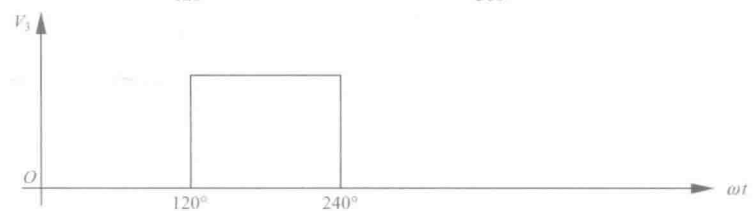


图 1.5 转子位置传感器输出波形图



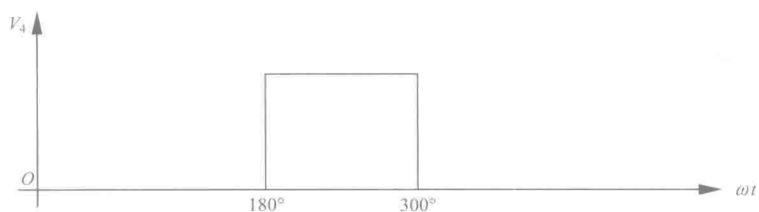


图 1.6 逆变器功率开关管的导通信号波形图

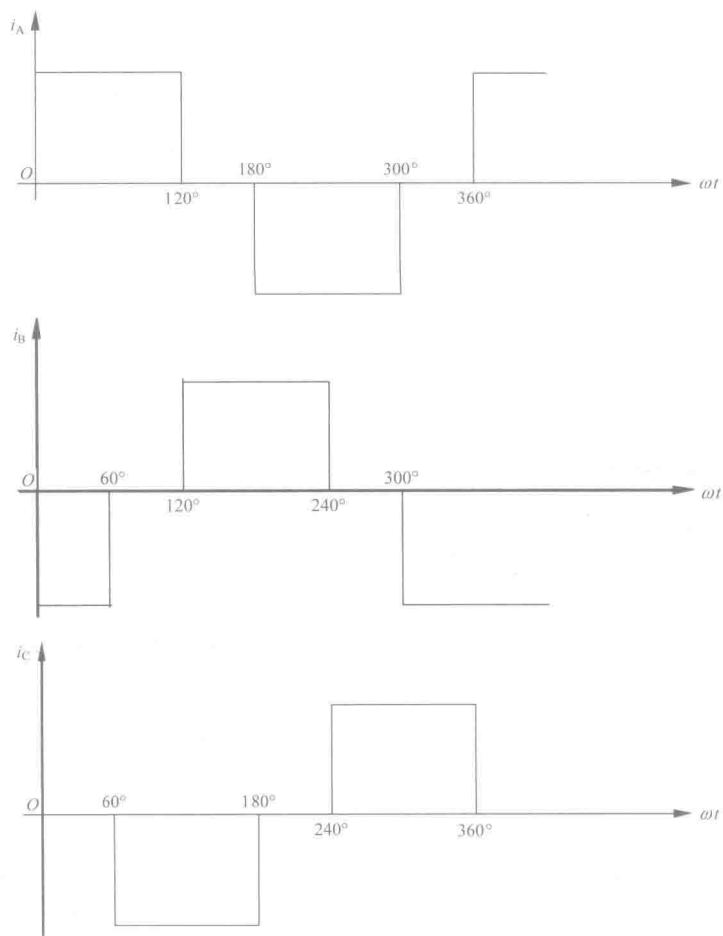


图 1.7 三相方波电流波形图

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。

1.2 永磁无刷直流电动机转速控制系统的工作原理

1.2.1 三相半桥驱动方式的工作原理

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。

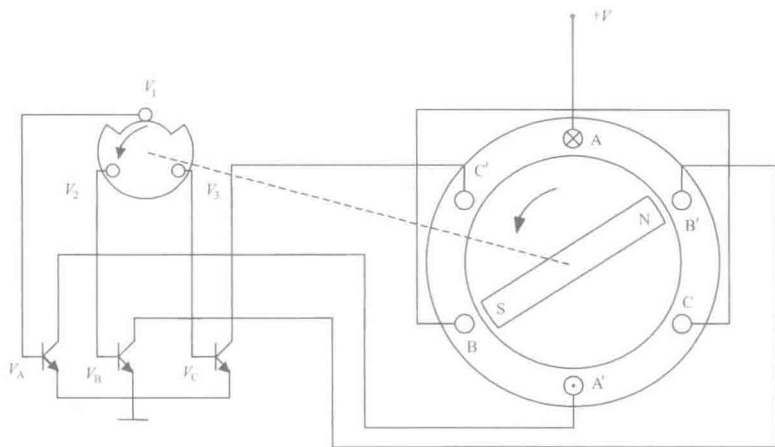


图 1.8 三相永磁无刷直流电动机工作原理示意图

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 3 个光敏接收元件 V_1 、 V_2 、 V_3 与之对应。这 3 个光敏接收元件在空间上间隔 120° ，分别控制 3 个开关管 V_A 、 V_B 、 V_C （本例为半桥驱动，只用 3 个开关管），与此同时，这 3 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 1.8 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)所示的位置时，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)所示的位置，使转子转过一周又回到原来的位置。如此循环下去，电动机就转动起来了。

