

文章编号:1007-130X(2009)08-0147-03

基于模糊控制的无刷直流电机建模仿真新方法*

A New Approach to the Modeling and Simulation of Brushless DC Motors Based on Fuzzy Control

罗维玲, 刘建成

LUO Wei-ling, LIU Jian-cheng

(中南大学信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410075)

(School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

摘要:为提高无刷直流电动机(BLDCM)控制系统的精度,本文根据电机的数学模型,基于 Matlab 仿真平台构建了 BLDCM 电流、转速模糊 PI 复合控制的双闭环控制系统的仿真模型。该模型采用了一种基于分段线性化的思想,利用 Simulink 中的 Look-Up Table 对梯形波感应电动势和电磁转矩进行快速建模的方法。仿真结果表明,该模型准确易行、控制精度高,为实际 BLDCM 控制系统的设计和调试提供了有效的工具。

Abstract: In order to improve the precision of the Brushless DC motor (BLDCM) control systems, a simulative model is built on a timing system of double closed loops with current and the speed fuzzy-PI control in Matlab by analyzing the corresponding mathematical model. Based on the method of Piecewise Linear Curves, the Look-Up Table block in Simulink is applied to quickly realizing the modeling of trapeziform-wave inductive EMF and Electromagnetic Torque. The results show that the modeling method has a higher control precision and can easily be applied, so it offers effective methods and means to designing and debugging actual motors.

关键词: 无刷直流电动机; 建模仿真; 模糊 PI 复合控制; 分段线性化

Key words: brushless DC motor (BLDCM); modeling and simulation; fuzzy-PI control; piecewise linear curves

中图分类号: TM330.3

文献标识码: A

1 引言

无刷直流电动机(BLDCM)由于利用电子换向器取代了机械电刷和机械换向,不仅具有直流电动机优秀的线性机械特性,如运行效率高、调速性能好等诸多优点,同时相对直流电机而言又具控制精度高、体积小、惯性小等优越性。因此,近年来被越来越广泛地应用到各种驱动装置和伺服系统中。与此同时,各种控制算法和控制策略也层出不穷,为了便于理论分析和验证各种控制算法,正确建立 BLDCM 控制系统的模型就显得非常重要^[1]。由于 BLDCM 是一个多变量、非线性、时变的复杂系统,用传统的 PI 或 PID 控制已很难满足一些对电机性能、控制精度要求较高的应用场合。为提高 BLDCM 控制系统的精度,本文采用的模糊 PI 复合控制策略既能发挥模糊控制鲁棒性强、动

态响应好、上升时间快的特点,同时引入的积分控制又能大大减小系统的稳态误差。针对这种控制策略,本文在 Matlab 仿真平台下运用独立模块化的思想建立了三角波 PWM 控制 BLDCM 调速系统的仿真模型,通过对实例电机的仿真,给出了各种仿真波形。实验结果表明,这种新型的模糊 PI 复合控制方法响应快、稳态精度高,与传统 PI 控制方法相比具有更好的稳定性和抗干扰能力。

2 无刷直流电动机的数学模型

无刷直流电机由定子三相绕组、永磁转子、逆变器、转子磁极位置检测器等组成^[2]。假定 BLDCM 工作在两两导通星形三相六拍工作方式;三相绕组完全对称,并按集中绕组处理;磁路不饱和,不计涡流和磁滞损耗;不考虑电枢反应,气隙磁场分布为梯形波,平顶宽为 120°电度角,电流呈

* 收稿日期:2008-05-18;修订日期:2008-09-25

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(04JJ6036)

作者简介:罗维玲(1984-),女,甘肃白银人,硕士,研究方向为控制理论、伺服电机等;刘建成,博士,副教授,研究方向为智能系统与模式识别。

通讯地址:410075 湖南省长沙市中南大学铁道学院电子楼 312 刘建成;Tel:13808416730;E-mail: ljlc@mail.csu.edu.cn

Address: Room 312, Electronics Building, School of Railway, Central South University, Changsha, Hunan 410075, P. R. China

方波。由此可建立 BLDCM 动态数学模型。

BLDCM 三相定子电压的平衡方程可以用以下状态方程表示：

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_n \\ u_n \\ u_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, u_a, u_b, u_c 为定子绕组相电压, i_a, i_b, i_c 为定子绕组相电流, e_a, e_b, e_c 为定子绕组相感应电动势, r, L, M 分别为定子绕组相电阻、自感和相间互感, p 为积分算子, u_n 为定子绕组中性点电压。将式(1)中 A、B、C 三相电压方程相加得：

$$u_n = (u_a + u_b + u_c)/3 - (e_a + e_b + e_c)/3 \quad (2)$$

电磁转矩和运动方程为：

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)/\omega_n \quad (3)$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_n}{dt} \quad (4)$$

其中, T_e 为电机的电磁转矩, ω_n 为电机转子机械角速度; T_L 为负载转矩, J 为转动惯量。由于在任何时刻定子绕组只有两相导通,所以电磁功率为：

$$P_e = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c = 2EI \quad (5)$$

3 系统仿真模型的建立

BLDCM 调速系统采用转速电流双闭环控制,内环为电流环。考虑到文献[3]采用电流滞环控制容易导致开关频率不恒定,会产生大量的开关噪音,本文采用三角波 PWM 比较调节以解决此问题。外环(速度环)采用模糊 PI 复合控制。在 Matlab 6.5 仿真环境下,根据模块化的思想,将图 1 所示的控制系统分为各个功能独立的子模块,包括速度模糊 PI 控制、电流调节器 PWM、功率变换、电机本体和电流检测五个模块。电机总体仿真模块见图 2。

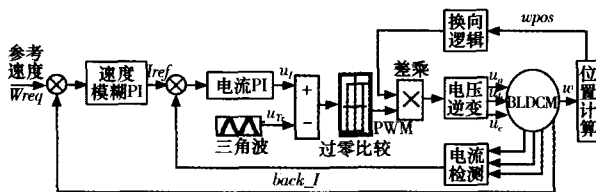


图 1 BLDCM 控制系统设计框图

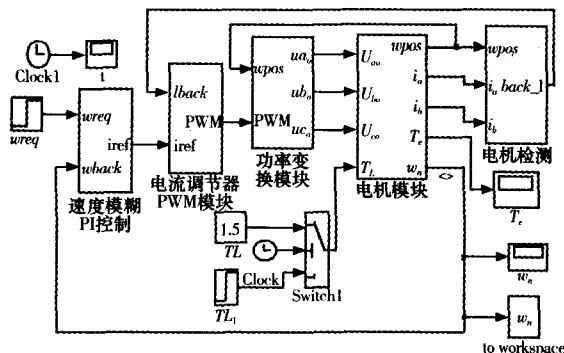


图 2 电机总体模块

3.1 BLDCM 本体模块

在 BLDCM 本体模块的搭建中,反电动势的求取是建模的关键与难点。文献[4]在求取电机反电动势时利用 s 函数,编程实现上较为麻烦困难。本文利用 Simulink 中的 Look-Up Table 模块,运用分段线性化的思想简单直观地实现了梯形波电动势的模拟,如图 3 所示。

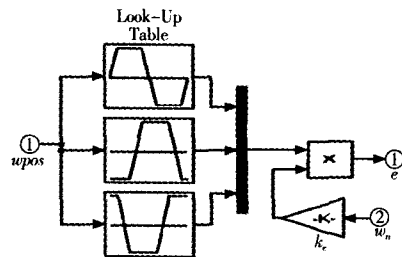


图 3 反电动势模块

Look-Up Table 模块是通过查表构造波形,只要把 $0 \sim 2\pi$ 内感应电动势的单位波形预先输入 Look-Up Table 模块中就能得到其单位理想波形。感应电动势幅值大小由式(3)、式(5)可知: $E = K_e \omega_n$, 其中 K_e 为电动机感应电动势系数。根据转子位置将运行周期分为 7 个阶段,用矢量表示为 $[0, \pi/6, \pi/2, 5\pi/6, 7\pi/6, 3\pi/2, 11\pi/6, 2\pi]$, 则 a 相单位感应电动势输出为 $[0, 1, 1, -1, -1, -1, 0]$ 。同理, b、c 两相依次相差 120° , 可分别表示为 $[-1, -1, -1, 1, 1, 1, 0]$ 和 $[1, 1, -1, -1, -1, 1, 1]$ 。在求取转矩 T_e 时,若按式(3)存在倒数函数有可能出现分母为零的情况,将式(3)稍作变换:

$$T_e = (e_a/\omega_n)i_a + (e_b/\omega_n)i_b + (e_c/\omega_n)i_c$$

由于 e/ω_n 波形与定子感应电动势 e 的波形一致,所以可以利用上述构建感应电动势 e 的方法得到转矩 T_e , 不同的只是幅值变成了 K_e 。

3.2 电流及位置检测模块

理想情况下,当 BLDCM 处于两相导通三相六拍状态下,每一时刻只有两相导通,另外一相悬空,因此可以通过位置传感器检测转子的位置角来判断电机的三相电流导通情况。由文献[5]可知,通过检测非换向相电流绝对值可以得到电流反馈值 $back_I$ 。

对 120° 梯形波感应电势,当转子位置角 w_{pos} 属于 $[\pi/6, \pi/2]$ 或 $[7\pi/6, 3\pi/2]$ 时, b 相为非换向相,则可以检测 b 相电流值作为反馈值。同理,当 w_{pos} 属于 $[\pi/2, 5\pi/6]$ 或 $[3\pi/2, 11\pi/6]$ 时, a 相为非换向相;当 w_{pos} 属于 $[5\pi/6, 7\pi/6]$ 或 $[11\pi/6, 2\pi]$ 或 $[0, \pi/6]$ 时, c 相为非换向相。由于 BLDCM 三相电流之和为 0, 即只要检测 a、b 两相电流值即可推出 c 相电流值。模块框图见图 4。

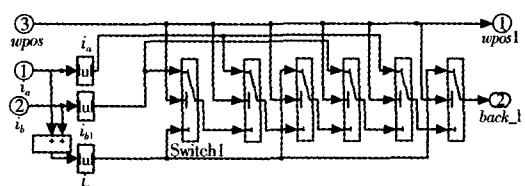


图 4 电流位置检测模块

3.3 电流调节器模块

电流调节器采用三角波比较控制方式,参见图 1 有:参

考电流值 I_{ref} 与电流反馈值 $back_I$ 之差经过一个比例积分(PD)电流控制器,其输出信号 u_i 与三角载波 u_{Tr} 之差再经过一个过零比较器,即如果 u_i 大于或等于 u_{Tr} , 输出为 1;反之则输出为 0。记过零比较器输出信号为 pwm 。

3.4 转速模糊调节模块

由于模糊控制器本身消除系统稳态误差的性能比较差,难以达到较高的控制精度,而 PI 调节器的积分调节作用从理论上可使系统的稳态误差控制为零,有着很好的消除误差的作用。因此,本文在速度环引入模糊 PI 复合控制器来代替传统电机调速所采用的 PI 控制技术,它能够保证当系统速度误差较大时采用模糊控制有较快的反应速度;而当误差较小时采用 PI 控制有较高的稳态精度。

3.4.1 模糊控制

设切换阈值为 U_c , 当 $|e(t)| > U_c$ 时,采用模糊控制。二维模糊控制器的输入为速度误差 E 和误差变化 EC , 输出为控制量 U 。根据实际要求,将 E, EC, U 均分为 7 类模糊集合,分别为负大、负中、零、正小、正中、正大,对应的模糊子集为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$, 它们的论域为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ (本文中电机额定转速为 1000rpm)。

取 E, EC, U 的隶属度函数均为高斯型。对双输入模糊逻辑控制器有 $7^2=49$ 条控制规则。可用以下 49 条模糊条件语句来描述:

- (1) if E is NB and EC is NB, then U is NB;
- (2) if E is NB and EC is NM, then U is NB;
- (3) if E is NB and EC is NS, then U is NM;
-
- (49) if E is PB and EC is PB, then U is PB;

控制器中,模糊决策采用 Mamdani 型推理算法,解模糊用中心平均法(Centroid)。

3.4.2 PI 控制

当 $|e(t)| < U_c$ 时,采用 PI 控制,该参数的确定由实际系统的仿真调试可以得出。根据以上思想可以搭建如图 5 所示的 Simulink 仿真框图。

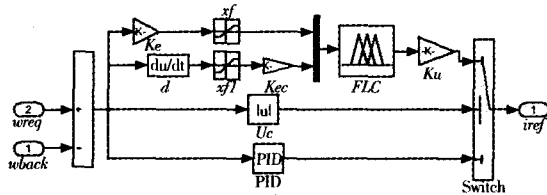


图 5 转速模糊调节模块

4 仿真结果及分析

本仿真系统样机参数如下:额定电压 $U_{dc}=300V$, 绕组电阻 $R=10.5\Omega$, 等效电感为 $28.5mH$, 转动惯量 $J=6.8e-5kg \cdot m^2$, 极对数 p 为 2, 三角波频率为 $10kHz$, 仿真时间为 $0.4s$, 给定转速为 $1000rpm$ 。

图 6a 和图 6b 分别是模糊 PI 方法和传统 PI 方法对 BLDCM 调速系统进行控制的仿真结果。对比图 6a 和图 6b 可以看出:在给定转速下,普通 PI 控制响应时间为 $0.04s$,超调为 5% ;模糊 PI 控制下,响应时间减半,并且没有

超调。由此可知,与传统 PI 控制相比,模糊 PI 复合控制具有快速性更好、脉动更小、精度更高的特性。

为验证所设计的 BLDCM 控制系统模型的静、动态特性及抗干扰能力,系统先空载启动,在 $t=0.05s$ 时突加 $1N \cdot m$ 的负载,待稳定后,在 $t=0.2s$ 时转矩增加至 $1.5N \cdot m$,与传统 PI 控制比较,结果分别如图 6c 和图 6d 所示。仿真结果表明,模糊 PI 控制系统能够以最大转矩更快速启动,并在负载发生变化时快速进行调节,产生合适的电磁转矩与负载转矩相匹配。图 6e 表明,相反电动势波形很理想,是典型的梯形波。

以上分析充分说明所建立的 BLDCM 模型是准确且行之有效的。

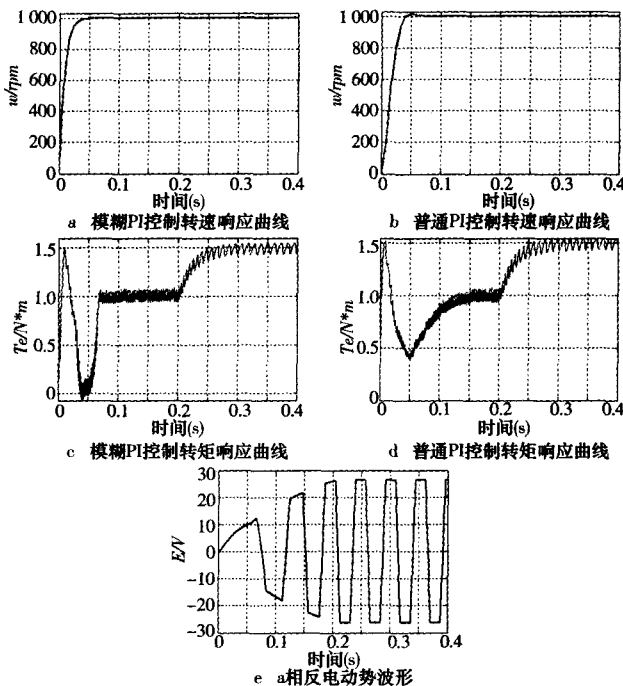


图 6 BLDCM 仿真结果波形图

5 结束语

本文在分析 BLDCM 端电压和中性点电压的基础上,运用模块化的建模思想,在 Matlab 环境下实现了电流三角波 PWM 比较调节、转速模糊 PI 复合控制的双闭环调速系统的仿真。仿真结果和分析表明,该系统在模糊控制调节下具有很强的抗干扰能力和鲁棒性。波形符合理论分析,电机转矩脉动小,系统过渡时间短,无超调,稳态性能好。该模型易于调整、改进,大大缩短了开发周期,并为今后分析该类电机和对其控制策略的研究提供了新的方法。

参考文献:

- [1] Pillay P, Krishnan R. Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent-magnet Motor Drives(I): The Permanent-magnet Synchronous Motor Drives[J]. IEEE Industry Applications, 1989, 25(2): 265-273.
- [2] 王季铁, 曲家骥. 执行电动机[M]. 北京: 电子工业出版社, 1997.

(下转第 155 页)

FLASHOE 为 Flash 的输出使能信号; FLASHCE 为 Flash 的片选信号。

为了完成 C5416 的并行自举加载工作,最重要的是要将做好的 Boot 表以 dsp. h 头文件的形式添加到烧写工程中,然后通过烧写工程将其写进 Flash 芯片中。本设计中的 Flash 芯片烧写步骤如下:

(1)将 Flash 芯片复位,使其进入工作状态;

(2)对 Flash 芯片中要编程的地方进行擦除,以免后面出现错误。

(3)在 CCS 软件开发环境下,对烧写工程进行编译、加载,然后运行程序使烧写完成。

(4)将写入 Flash 的内容读出进行校验。选择 CCS 软件的 View 菜单下的 Memory 栏,出现 Memory window options 对话框。选择数据空间且起始地址为 0x8000,不断刷新,当看到数据空间的内容为与 dsp. h 文件中一样的十六进制代码时则说明烧写成功。

一般的 Flash 芯片的擦写过程都基本相同,在此给出设计中对 Flash 进行整片擦除的过程。擦除的编程步骤有六步,如表 2 所示。

表 2 Flash 芯片擦除步骤

步骤	地址(0x)	本文地址(0x)	数据(0x)
1	5555	D555	AA
2	2AAA	AAAA	55
3	5555	D555	80
4	5555	D555	AA
5	2AAA	AAAA	55
6	5555	D555	10

因为 I/O 空间和数据空间的 Flash 映射部分在 0x8000~0xFFFF,所以访问表 2 中的地址实际上是不可能的。不过由于 Flash 在擦片的过程中只能认到 A0~A14, A15~A19 都被用来选择存储空间了,所以在实际编程时采用的地址是表 2 中“本文地址”一栏中的内容。

以下是 Flash 的擦除过程的程序示例:

```
void Erase_Entire_Chip(void)
{
    UINT16 *Temp;
    Temp = (UINT16 *)FLASH_ADDR_UNLOCK1; /* set up
address to be 0xD555 */
    *Temp = 0xAA; /* write data 0xAA to the address */
    Temp = (UINT16 *)FLASH_ADDR_UNLOCK2; /* set
up address to be 0xAAAA */
    *Temp = 0x55; /* write data 0x55 to the address */
    Temp = (UINT16 *)FLASH_ADDR_UNLOCK1; /* set
up address to be 0xD555 */
    *Temp = 0x80; /* write data 0x80 to the address */
    Temp = (UINT16 *)FLASH_ADDR_UNLOCK1; /* set
up address to be 0xD555 */
    *Temp = 0xAA; /* write data 0xAA to the address */
    Temp = (UINT16 *)FLASH_ADDR_UNLOCK2; /* set
up address to be 0xAAAA */
    *Temp = 0x55; /* write data 0x55 to the address */
    Temp = (UINT16 *)FLASH_ADDR_UNLOCK1; /* set
up address to be 0xD555 */
    *Temp = 0x10; /* write data 0x10 to the address */
    Delay(10000); /* Delay Tsce time */
}
```

此外,用户还可以通过判断 DQ6 和 DQ7 的状态来了解是否已经完成擦除,向 Flash 写入数据的过程中也可以通过同样的方法进行判断,直至烧写完成。限于篇幅,在此不再给出具体的程序。

4 并行自举加载结果

在本文中,工程 experiment1. pj1 进行的是 ASK 调制,当按照上述过程将并行自举加载完成之后断开系统电源,然后再进行加电操作。在示波器上可以看到 ASK 调制的波形图,如图 2 所示。



图 2 ASK 调制波形图

5 结束语

本文详细地阐述和分析了 DSP 并行自举加载的原理,设计了以 TMS320VC5416DSP 为 CPU 和 Am29LV160 为外扩 Flash 的 DSP 嵌入式系统,给出了系统的硬件结构,并通过软件编程,成功地实现了 DSP 并行自举加载,且系统运行稳定。

参考文献:

- [1] Teaxs Instruments. TMS320VC5416 Fixed-Point Digital Signal Processor[M]. 2000.
- [2] 张勇. C/C++ 语言硬件程序设计——基于 TMS320C5000 系列 DSP[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2003.
- [3] AMD. Am29LV160D 16megait (2M × 8bit/1M × 16bit) CMOS 3.0 Volt-only Boot Sector Flash Memory[M]. 2000.
- [4] 彭启琮,管庆. DSP 集成开发环境——CCS 及 DSP/BIOS 的原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2004.

(上接第 149 页)

- [3] 殷云华,郑宾,郑浩鑫,等. 一种基于 Matlab 的无刷直流电机控制系统建模仿真方法[J]. 系统仿真学报,2008,20(2):293-298.
- [4] 叶振铎,曾准刚. 基于 MATLAB 的无刷直流电动机控制系统仿真[J]. 电气传动自动化,2005,27(1):23-25.
- [5] 许镇琳,吴忠,王秀芝,等. 无刷直流伺服电机换向最优控制[J]. 自动化学报,1996,22(4):428-434.

(上接第 152 页)

- [6] 王殊,阎毓杰,胡富平,等. 无线传感器网络的理论及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007.
- [7] [http://www1. microchip. com/downloads/en/DeviceDoc/39626b. pdf](http://www1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39626b.pdf).
- [8] Callaway E H. Wireless Sensor Networks: Architecture and Protocols[M]. Ohio: CRC Press, 2004.
- [9] 陈新建,邵少雄,葛长虹. PIC 系列单片机程序设计与开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007.