

# 电动车无刷直流电机 simulink 建模仿真<sup>①</sup>

赵国材, 孙广涛, 王仕镪

(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

**摘要:** 在分析电动车电机的数学模型基础上, 应用一种新的电动车电机建模方法, 并利用电压方程、运动方程和电磁转矩方程, 搭建了电动车电机实验平台。其中控制部分利用速度环采用 PID 控制, 电流环采用滞环电流跟踪型 PWM。仿真与实验研究表明, 系统具有良好的动静态性能, 表明了该方法的可行性, 为电动车电机控制系统的设计和调速提供了重要依据。

**关键词:** 电动车; 无刷直流电机; Simulink 仿真; 电流滞环

## Modeling and Simulation of BLDCM in Electric Vehicle Based on Simulink

ZHAO Guo-Cai, SUN Guang-Tao, WANG Shi-Qiang

(Electrical Control Engineering Institute, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Based on the mathematical model of Electric vehicle motor, the experiment platform is established by using a new modeling method of BLDCM control system, the voltage equation, the motion equation and the electromagnetic torque equation. PID control is used in the speed loop and hysteresis current track type of PWM is used in the current loop. Simulation and experimental results show that the control system has good dynamic and static performance, which shows the feasibility of the proposed method and provides an important basis for the design and control of motor control system.

**Key words:** electric vehicle; BLDCM; simulink simulation; current hysteresis

电动车以其节能、高效、零污染获得了人们的良好评价以及快速稳定的发展。与此同时, 无刷直流电机又有着卓越的性能和不可替代技术优势受到人们的持续关注与研究。随着永磁材料技术、计算机控制技术等先进技术的发展以及微电机制造水平的提高, 无刷直流电机获得了广泛的应用并占据了主导地位<sup>[1,2]</sup>。因此建立无刷直流电机的仿真模型可有效减少系统设计时间。另外还可加入一些扰动, 更好的观察不同结构及扰动下的动静态性能。文章在分析电动车电机的基础上, 利用 MATLAB 中的 Simulink 工具, 对传统的仿真模型进行改进, 并利用实验室的一台大秦无刷永磁电机搭建了实验平台, 控制系统采用 TMS320F2812 作为主控芯片, 实验研究表明其具有良好的动静

态性能。

### 1 无直流电机数学模型

无刷直流电机的反电动势为梯形波, 含有较多的高次谐波, 且其电感为非线性, 因此, 可以直接运用电机原有的相变量建立无刷直流电机的数学模型<sup>[3]</sup>。文中以二二导通方式(即两相导通三相星形六状态)为例来分析电动车电机的数学模型及其电磁转矩等特性。为分析方便, 可作如下假设<sup>[4]</sup>:

- 1) 不计涡流及磁滞损耗, 磁路不饱和;
- 2) 定子气隙磁场是方波、三相绕组完全对称, 定子电流、转子磁场分布都是对称的且 Y 形连接;
- 3) 忽略电枢反应及换相过程的影响;

① 收稿时间:2011-07-08;收到修改稿时间:2011-09-03

4) 电枢绕组在定子内表面均匀连续分布。

因此由无刷直流电机的电压平衡方程可得:

$$\begin{bmatrix} u_{L1} \\ u_{L2} \\ u_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{L1} \\ e_{L2} \\ e_{L3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $u_{L1}, u_{L2}, u_{L3}$  为电机定子绕组三相相电压;  $i_{L1}, i_{L2}, i_{L3}$  为电机定子三相绕组相电流;  $e_{L1}, e_{L2}, e_{L3}$  电机定子绕组三相反电势;  $r$  为电机定子绕组电阻;  $L$  为定子绕组的自感;  $M$  为定子绕组的互感;  $p$  为微分算子  $p=d/dt$ 。

又因为在三相对称的星形绕组电机中存在  $i_{L1}+i_{L2}+i_{L3}=0$ , 因此有  $M*i_{L1}+M*i_{L2}+M*i_{L3}=0$ , 所以式(1)可以简化为

$$\begin{bmatrix} u_{L1} \\ u_{L2} \\ u_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 \\ 0 & 0 & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & M \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{L1} \\ e_{L2} \\ e_{L3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

无刷直流电机的电磁转矩方程:

$$T_e = (e_{L1}i_{L1} + e_{L2}i_{L2} + e_{L3}i_{L3}) / \omega \quad (3)$$

无刷直流电机的运动方程:

$$d\omega/dt = (T_e - T_L - B\omega) / J \quad (4)$$

其中,  $T_e$  为电磁转矩;  $T_L$  为负载转矩;  $B$  为阻尼系数;  $J$  为转子的转动惯量;  $d\omega/dt$  为转子机械角加速度。

## 2 电机系统仿真模型的建立

在 Matlab 的 Simulink 环境下, 利用 SimPower-SystemToolbox 提供的丰富模块库<sup>[5]</sup>。在分析无刷直流电机的数学模型的基础上, 应用建立电动车电机控制系统仿真模型的方法, 控制系统的设计框图如图 1 所示。文中采用三闭环控制方案: 转速环由自整定 PID 调节器构成, 电流滞环由实际电流和参考电流构成, 位置环通过位置计算给出三相绕组的各相电流的控制信号。

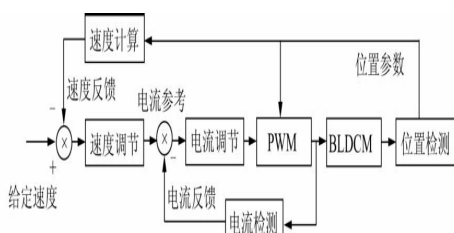


图 1 控制系统仿真模型

控制系统可分为几个功能独立的模块, 主要包括位置检测控制模块、电机本体模块、转速 PID 控制模块及逆变器模块等。通过有机整合, 则可在 Simulink 中构建电动车电机控制系统的整体框图, 如图 2 所示。

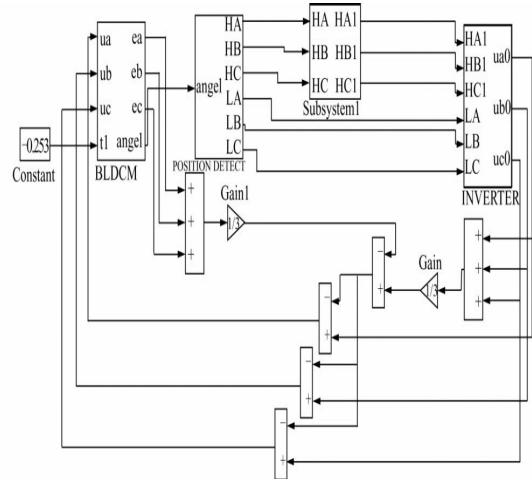


图 2 仿真模型框图

### 2.1 电机本体模块

由电压平衡方程式可知, 求取三相反电动势信号  $e_a, e_b, e_c$  以及三相相电流信号  $i_a, i_b, i_c$  是建立无刷直流电机模型的关键问题。其中求取反电动势波形的方法一直是比较难解决的问题, 也是无刷直流电机仿真建模的关键之一<sup>[6]</sup>。如果获得了不理想的反电动势波形, 则会导致相电流波形失真、转矩脉动增大等一系列问题, 严重时将导致换相失败以至于电机失控。文中采用分段线性法搭建反电动势波形: 即根据某一时刻的转子位置和转速信号来确定该时刻各相所处的运行状态, 最后通过直线方程求得反电动势波形。分段线性法简单易行, 且精度较高, 能够较好的满足电动车电机控制系统建模仿真的设计要求<sup>[7]</sup>。

电机的三相电压、电流和反电动势的关系如式(5)所示

$$\begin{cases} U_{ab} = R_{LL}i_1 + (L-M) \frac{di_1}{dt} + e_{ab} \\ U_{bc} = R_{LL}i_2 + (L-M) \frac{di_2}{dt} + e_{bc} \\ U_{ca} = R_{LL}i_3 + (L-M) \frac{di_3}{dt} + e_{cd} \end{cases} \quad (5)$$

由式(1)及式(5)可得电动车电机的三相绕组模块结构如图 3 所示。

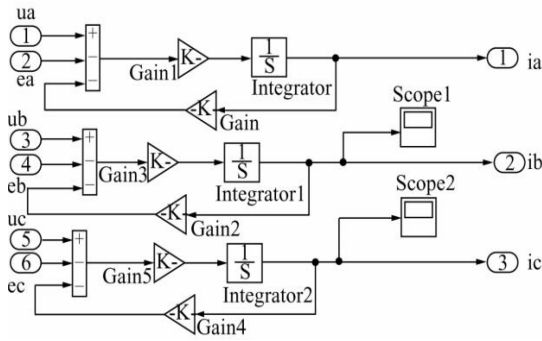


图 3 电机三相绕组结构图

进入正常换流过程。位置检测模块结构如下图所示。

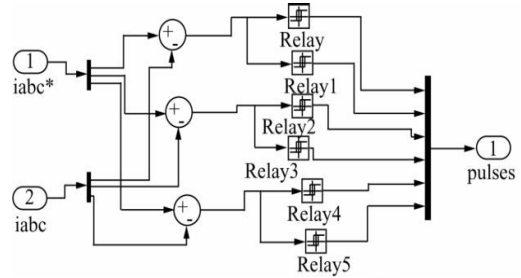


图 6 电流滞环控制模块结构图

根据无刷直流电机电磁转矩方程及运动方程可得电机的转矩模块如图 4 所示。

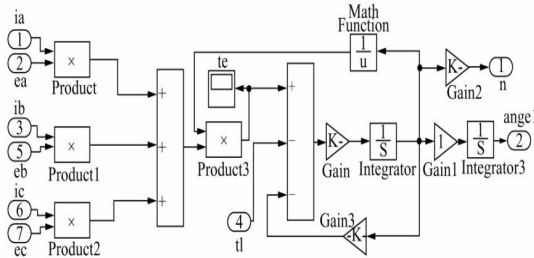


图 4 转矩模块结构图

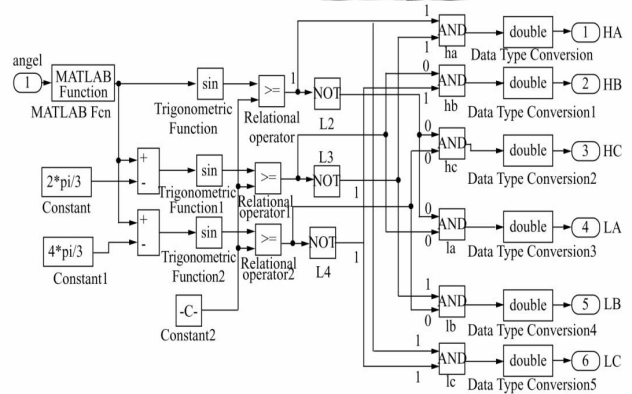


图 7 位置检测模块结构图

### 2.2 速度、电流控制模块

速度、电流控制模块主要完成转速、电流的负反馈，检测电机的运行状态信息。速度及电流调节器都采用带限制和饱和的 PI 调节器，如图 5 及图 6 所示。

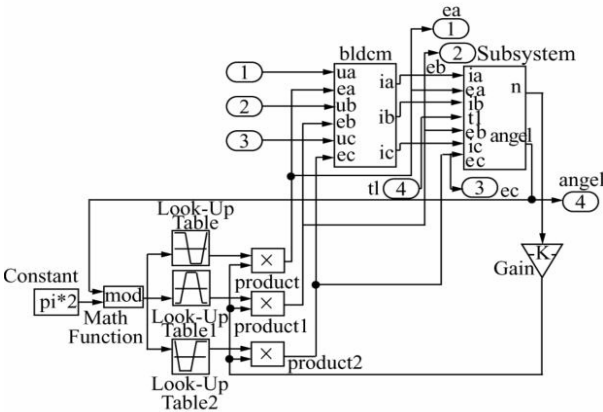


图 5 速度控制模块结构图

### 3 实验结果分析

在选择电动车电机控制系统的 PID 参数时应全面考虑  $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$  三个参数的变化，具体可以按照先比例后积分再微分的顺序反复调试参数<sup>[8,9]</sup>。文中采用一台大秦无刷永磁电机，具体电机参数为：定子相绕组电阻  $R=1\Omega$ ，定子相绕组互感  $L-M=0.061H$ ，转动惯量  $J=0.005kg \cdot m^3$ ，额定转速  $n_e=1500r/min$ ，极对数  $p=4$ ，200V 直流电源供电，采用 TMS320F2812 芯片，PWM 载波周期设定为 7.5KHZ。电动车电机的通电方式为三相 Y 联结全控电路二二通电方式。为了验证所设计的电动车用无刷直流电机的动、静态性能，系统空载启动，待进入稳态后，在 2s 时突加负载，并在 3s 时撤去负载。得到的系统转矩、转速、A 相电流和三相反电动势实验及仿真曲线如下列图所示。

由上述实验波形可知，系统响应时间短且运行平稳，反电势的波形达到了理想状态。系统启动时转矩运行平稳，空载稳定运行时，可以忽略系统的摩擦转矩，所以此时的电磁转矩可以认为是零。实验波形图 10 中，突加负载后，负载转矩有较大的脉动，这主要是由电流换向和电流滞环控制器的频繁切换造成的<sup>[10]</sup>。实验结果证明了这种电动车电机建模方法的有效性及其

控制系统的合理性。

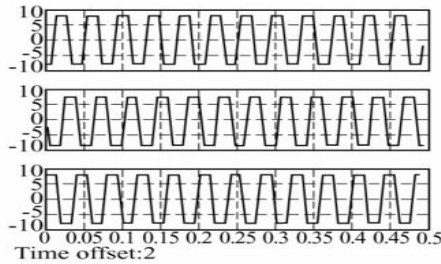


图 8 反电势曲线

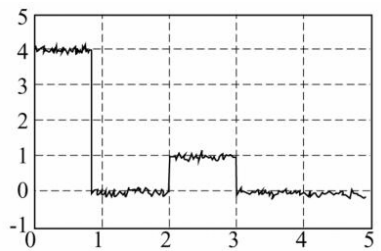


图 9 转矩曲线

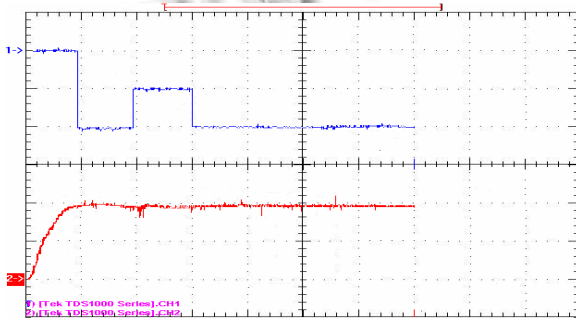


图 10 系统转矩与转速曲线

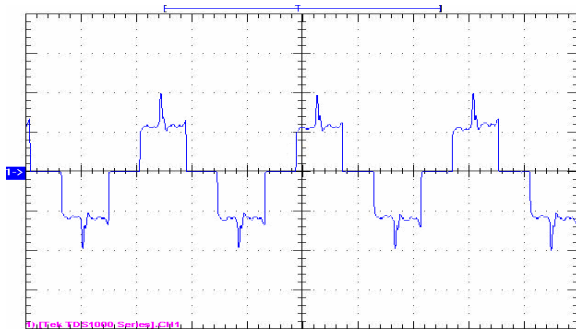


图 11 A 相电流响应曲线

#### 4 结论

本文应用一种新型的基于 Simulink 的电动车电机仿真建模的方法,搭建了实验平台验证文中模型的各项性能指标。

仿真实验结果表明:系统运行平稳,且具有较好的动、静态性能。采用该仿真模型可以十分方便地实现、验证和改进控制算法。因此,它为分析和设计电动车控制系统提供了新的研究方法和工具,也为实际电动车控制系统的设计和调试提供了新的方式、方法。

#### 参考文献

- 1 Yilnaz S. Direct adaptive control of permanent magnet motors. The office of graduate studies of Rensselaer Polytechnic Institute: Rensselaer Polytechnic Institute, 2000.
- 2 邓兵,潘俊民.无刷直流电机控制系统仿真.计算机仿真,2002,19(5):50-100.
- 3 陶桂林,马志云.永磁无刷电机的建模与仿真分析.华中科技大学学报,2003,1:83-85.
- 4 王灿,刘刚,王志强.一种永磁无刷直流电机自抗扰-锁相环双模控制方法.微电机,2010.
- 5 张相军,陈伯时,朱平平.直流无刷电机无位置传感器控制中反电动势过零检测算法及其相位修正.电气传动,2001,(2):14-16.
- 6 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.
- 7 薛晓明,杨翀.一种统一的无刷直流电机直接反电势法.电工技术学报,2010.
- 8 Ren XY, Du FS, Huang HG, Zhang SB. Application of Improved Fuzzy Immune PID Controller to Bending Control System. Journal of Iron and Steel Research (International), 2011,(2):8-11.
- 9 周艳青,黄常抒.基于 Matlab 无刷直流电机控制系统的新型建模仿真.防爆电机,2008,43(6):27-31.
- 10 殷云华,郑宾,郑浩鑫.一种基于 MATLAB 的无刷直流电机控制系统建模仿真方法.系统仿真学报,2008,20(2):293-298.
- 11 郭涛,刘小虎.一种无刷直流电机的无位置传感器控制研究.微计算机信息,2011,27(3):42-44.
- 12 张立,方斌,陈振伟,李莉.基于 Matlab 的无刷直流电动机闭环调速系统研究.煤矿机械,2010,31(6):133-135.