

# 基于 Matlab/dSPACE 的无刷 直流电机双闭环控制实时仿真

朱向东, 呼延霄, 刘 轶, 杨宝娥  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 永磁无刷直流电机 (Brushless DC Motor, 以下简称 BLDCM) 的控制算法一般采用嵌入式软件编程的方法实现, 其开发过程复杂, 代码编写工作繁重, 在电机控制器研制初期不利于提前进行控制算法的研究。基于 Matlab/Simulink 开发的 dSPACE 实时仿真平台, 无需代码编写, 实时性好, 控制算法开发周期短, 能够很好的用于 BLDCM 控制原理的理解和控制算法的仿真研究。通过 BLDCM 的在线实时仿真, 介绍了基于 dSPACE 的半实物仿真技术, 建立了基于 BLDCM 双闭环控制的仿真模型, 利用 ControlDesk 软件进行了在线参数调试, 实现了双闭环控制模型快速控制原型验证 (RCP)。通过 BLDCM 的实时仿真, 验证了 BLDCM 双闭环控制方法的正确性, 实时仿真结果与理论分析一致性较好, 电机转速控制稳态和动态性能较好, 为 BLDCM 的控制算法提供研制依据, 体现了 Matlab/ dSPACE 仿真平台在控制器算法设计中的优越性。

**关键词:** 无刷直流电机 (BLDCM); dSPACE; 实时仿真; ControlDesk

**中图分类号:** V430-34    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-9374 (2015) 01-0117-06

## Real-time simulation for Matlab/dSPACE-based double closed-loop control of brushless DC motor

ZHU Xiang-dong, HUYAN Xiao, LIU Yi, YANG Bao-e  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** The control of brushless DC motor (BLDCM) is accomplished commonly by a built-in software, whose development process is complicated, and code compiling load is heavy. Thus it is not convenient for the study of the BLDCM's control algorithm in the initial stage of the motor controller development. The real-time simulating platform called dSPACE is based on Matlab/Simulink, which is a high-synchronous tool, does not need code compiling, has short develop period of controller algorithm, can be used well for understanding of the principle of BLDCM and study of the control method of BLDCM. According to the on-line BLDCM simulation on the dSPACE platform, the technology of hardware-in-the-loop simulation is introduced in this paper. The emulation model based

收稿日期: 2014-05-10; 修回日期: 2014-06-27

作者简介: 朱向东 (1983—), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为冲压发动机控制技术

double closed-loop control model of BLDCM is established. Simulating researches on the double closed loops control was performed. The on-line debugging of parameters was conducted with the ControlDesk software and the rapid control prototype (RCP) of double closed-loop control model was validated. The result shows that the rotational speed control system has good dynamic and static performance. It provided an evidence for the controller research of BLDCM and also manifested the superiority of Matlab/ dSPACE simulation platform in the controller algorithm design.

**Keywords:** brushless DC motor; dSPACE; real-time simulation; ControlDesk

## 0 引言

永磁无刷直流电机 (简称 BLDCM) 是近几十年来迅速发展起来的一种新型电机。BLDCM 最显著的特点是没有换向器和电刷组成的机械接触机构。因此, 其具备寿命长, 运行可靠, 维护方便等优势。BLDCM 既具有交流电动机的结构简单、运行可靠和维护方便等优点, 又具备直流电动机的运行效率高、无励磁损耗及调速性能好、起动转矩较大等特点<sup>[1-2]</sup>。近年来, 航空发动机逐渐采用电机带动齿轮泵以实现燃油流量的控制, 由于其功耗低、控制精度高、动态性能好, 且功率通过总体统一调配, 功率利用率明显高于涡轮泵和燃油调节器等燃油供应方式。而实现燃油控制关键的一环就是对无刷直流电机的转速控制。

BLDCM 的控制算法一般采用嵌入式软件编程的方法实现, 其开发过程复杂, 代码编写工作繁重, 在其控制器研制初期不利于控制算法的研究。文献 [3] 建立了 BLDCM 数学模型, 借助 DSP TMS320F2812, 将 PID 控制与 BLDCM 控制系统结合在一起设计控制器, 改善了控制系统的性能。但采用该方法对于控制器软件开发较为繁重, 控制算法修改和调试比较困难, 尤其不适合于电机控制器研制初期的控制原理研究。

MATLAB/dSPACE 实时仿真平台基于 MATLAB/Simulink 开发, 二者控制系统模型完全兼容并实现了无缝连接。dSPACE 平台无需代码编写, 实时性好, 控制算法开发周期短, 能够很好的用于 BLDCM 控制原理的理解和控制算法的仿真研

究。基于该平台, 能够建立模型与控制原理模型, 通过监测电量信号的波形曲线来分析、设计和验证实物控制器的原型方案, 通过在线配置仿真模型参数, 调整闭环系统的稳态、动态性能以满足系统要求。

本文为通过控制电机带动齿轮泵实现燃油流量控制的项目开发需求, 建立 BLDCM 实时仿真模型, 通过离线仿真和基于 dSPACE 平台的实时仿真为无刷直流电机控制器的算法提供初步的设计依据, 通过实验软件 ControlDesk 进行实时监测控制和在线调参, 为更加复杂的控制算法研究提供基础。

## 1 无刷直流电机的数学模型

无刷直流电机的定子绕组为三相 Y 形连接、120°导通方式, 采用两相导通三相六拍运行方式为例, 在简化分析的基础上建立 BLDCM 的动态数学模型<sup>[4]</sup>。

### 1.1 绕组电压方程

将各相绕组等效为电阻和电感的串联, 利用基尔霍夫电压定律可以得到三相绕组的电压平衡方程:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $u_a, u_b, u_c$  分别为定子相绕组电压, V;  $i_a, i_b, i_c$  分别为定子相绕组电流, A;  $e_a, e_b, e_c$  分别为定子相绕组反电动势, V;  $R$  为电机绕组电阻;  $L$  为定子绕组自感;  $M$  为定子绕组互感。

### 1.2 电磁转矩方程

无刷直流电机的定子绕组输入功率与产生的电磁转矩关系为:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (2)$$

式中:  $T_e$  为电机转矩;  $\omega$  为电机的机械角速度, rad/s; BLDCM 电磁转矩是由定子绕组中的电流与转子磁钢产生的磁场相互作用而产生的, 由公式 (2) 可以看出, 电机电磁转矩和相电流成正比, 与转动角速度成反比。

### 1.3 电机运动方程

无刷直流电机的运动方程为:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

式中:  $T_L$  为负载转矩;  $J$  为电机转动惯量。

## 2 无刷直流电机的仿真模型搭建

基于无刷直流电机的数学模型, 进行电机本体的仿真模型建模, 主要包括: 电压方程模块、电机反电动势模块及电机转矩计算模块等。

### 2.1 无刷直流电机本体模型

#### 2.1.1 绕组电压方程模块

根据无刷直流电机的绕组电压方程式 (1) 建立无刷直流电机的电压方程模块。

#### 2.1.2 电机反电动势模块

从绕组电压方程和由其建立的电压方程模块看出, 无刷直流电机建模需要得到绕组反电动势。在无刷直流电机本体的建模过程中, 反电动势的建模是关键问题之一。反电动势波形不理想会造成转矩脉动增大、相电流不理想等问题。反电动势求取一般采用有限元法、傅里叶变换 (FFT) 法及分段线性法等<sup>[4]</sup>。

目前, 工程上常用的是分段线性法<sup>[5]</sup>, 其将绕组反电动势的运行周期分为 6 个阶段, 对于每一相绕组, 每  $60^\circ$  为一个运行阶段, 每个阶段用一条直线表示, 各相绕组相位相差  $120^\circ$ 。根据转

子位置 Pos 和转速确定该时刻各相绕组的反电动势波形, 如图 1 所示。

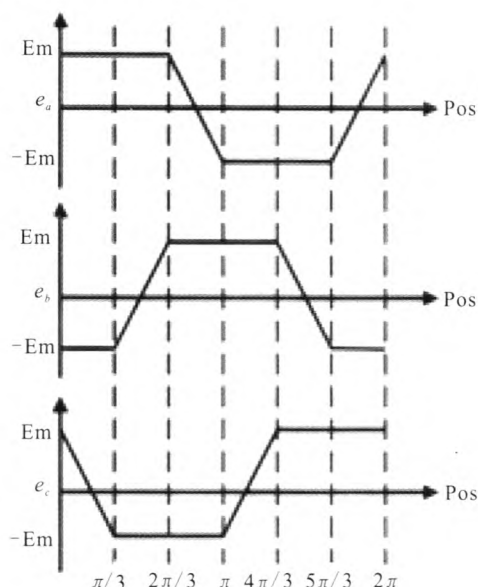


图 1 反电动势波形

Fig. 1 Waveform of counter electromotive force

本文上述方法求取绕组反电动势, 采用 Matlab 自带的 embedded function 模块将反电动势与转子的位置关系封装。

#### 2.1.3 电机转矩模块

转矩计算模块用于计算给定条件下电机所能产生的电磁转矩, 并且在负载  $T_L$  情况下计算电机转速 (角速度  $\omega$ ) 以及位置信号 Pos (范围是  $0 \sim 2\pi$ ), 作为上述电机反电动势模块的输入信号。最后, 通过对各个子模块合理的组织衔接搭建完整的 BLDCM 实时仿真模型。

### 2.2 驱动系统模块

BLDCM 驱动系统主要由速度控制模块、参考电流模块、电流滞环控制模块及电压逆变器模块组成。利用 Simulink 的 SimPowerSystems 工具箱对无刷直流电机驱动系统进行建模, 鉴于篇幅不再赘述。采用双闭环控制: 其转速环采用 PID 控制器构成, 电流环采用电流滞环调节器构成。

#### 2.3 信号输入输出模块

信号输入模块有电流输入模块和转速采集模块, 电流输入由 DS2003 A/D\_B1 接口得到, 占空比信号由 DS4002 数字 IO 板卡输出, 转速采集由 DS5001 计算旋转变压器正余弦波形的个数得到。

信号输出模块为 PWM 信号输出模块, 由 DS4002 产生 BLDCM 控制所需的 6 路 PWM 信号, 由 DS5001 波形捕获板卡实现波形捕获<sup>[6]</sup>。

### 3 实时仿真系统实现

基于 dSPACE 的 BLDCM 实时仿真系统结构如图 2 所示。

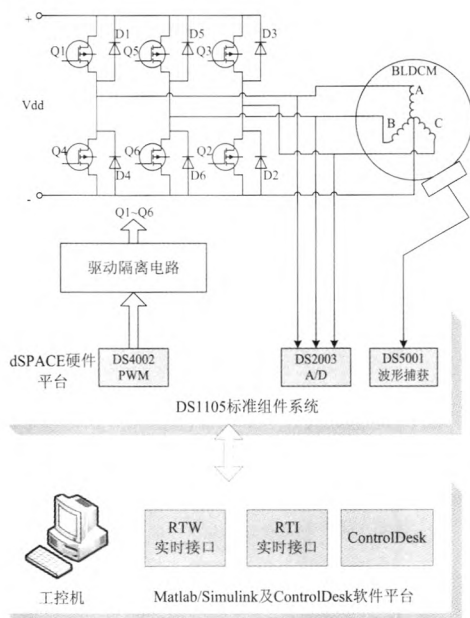


图2 基于 dSPACE 平台的 BLDCM 控制结构

Fig. 2 Control structure of BLDCM based on dSPACE

该系统主要由实际被控对象、dSPACE 实时控制平台和驱动电路 3 部分组成。dSPACE 确保仿真运行时间与实际时钟的严格同步, 允许在线

调整控制器参数; 控制系统设计工具 Matlab/Simulink 以及 ControlDesk 软件在工控机上, 利用图形化模块实现控制器模型, 具有便捷的控制器构建功能, 采集电机位置和转速信号, 输出 6 路 PWM 占空比控制信号。驱动电路包含 6 个模拟开关 Q1~Q6 和保护二极管 D1~D6, 对控制信号进行隔离放大, 实现电机的驱动。

本文所采用的 dSPACE 实时仿真平台采用 DS1105, 基于 IBM 的 PowerPC 750GX, 时钟频率为 1 GHz。DS4002 具有 8 路 200 ns 精度的定时通道, 可以实现 BLDCM 转速控制所需的 6 路占空比信号。DS5001 板卡为 16 通道 25 ns 分辨率的数字波形捕获板, 能够对占空比信号进行精确地捕获。DS2003 A/D 板卡能够对电流传感器输出信号进行采集<sup>[7]</sup>。另外, dSPACE 平台各板卡输出信号均为标准信号, 不能直接用于 BLDCM 的控制, 必须增加驱动部分, 实现电机的驱动。同时, 为了保证设备安全, 必须增加隔离电路<sup>[8]</sup>。

在方案设计初期没有驱动电路和实物电机的情况下, 为了便于对通过控制电机转速实现燃油控制的原理进行研究, 电机本体和驱动器均采用 Simulink 搭建仿真模型, 将转子位置获取、转速计算、占空比信号输出采集 dSPACE 各板卡实现, 进行快速原理性验证 (即 RCP)。按照上述思路结合电机本体模型和驱动系统模型搭建的基于 dSPACE 的 BLDCM 仿真控制驱动模型如图 3 所示。

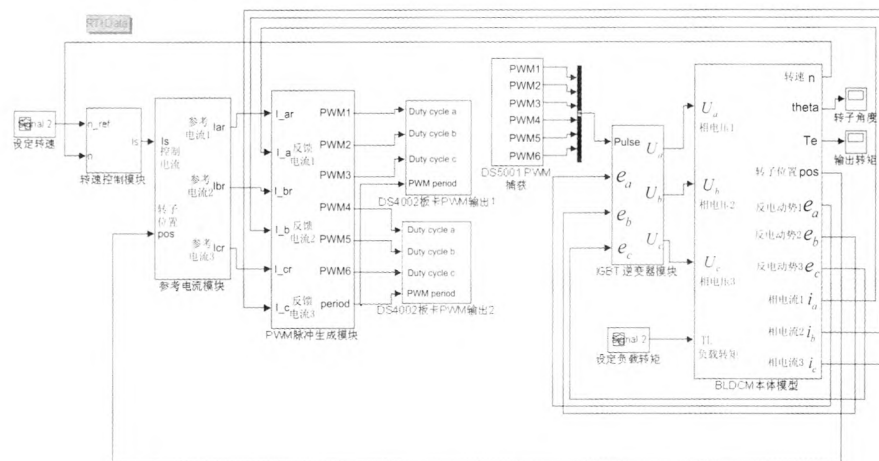


图3 基于 dSPACE 的 BLDCM 仿真控制驱动模型

Fig. 3 dSPACE-based control and drive system model of BLDCM

## 4 仿真结果分析

BLDCM 仿真参数分别为: 绕组电阻  $R=0.39\ \Omega$ , 绕组自感  $L=0.006$ , 绕组互感  $M=0.004$ , 转子惯量  $J=0.002\ 3\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ , 阻尼系数  $B=0.000\ 2\ \text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ , 额定转速  $5\ 000\ \text{r}/\text{min}$ , 极对数  $P=4$ , 供电电压为  $\text{DC}270\ \text{V}$ 。

BLDCM 驱动仿真模型采用双闭环控制: 其中, 转速环(即控制外环)采用 PID 控制器构成, 内环电流环采用电流滞环调节器构成。转速控制采用离散 PID 控制器, PID 参数通过 Simulink 自带工具进行初步的参数整定, 通过在 ControlDesk 软件在实时仿真的环境下进行 PID 参数的在线调试, 最后取值如下: 比例系数  $K_p=2$ , 积分系数  $K_i=0.02$ , 微分系数  $K_d=0$ 。采样周期选

取  $T=0.000\ 6\ \text{s}$ 。基于 dSPACE 平台的 BLDCM 在线实时监控界面及仿真结果如图 4 所示。仿真过程按照以下步骤进行:

1) 控制转速保持  $2\ 000\ \text{r}/\text{min}$  不变, 负载转矩由  $1\ \text{N}\cdot\text{m}$  到  $8\ \text{N}\cdot\text{m}$  按照台阶方式递增, 考核电机控制系统在负载变化下的转速保持能力;

2) 负载转矩设定为  $5\ \text{N}\cdot\text{m}$  保持不变, 转速由  $1\ 000\ \text{N}\cdot\text{m}$  到  $5\ 000\ \text{N}\cdot\text{m}$  按照方式递增, 目的是考核电机转速调节的性能;

3) 转速和负载转矩在仿真过程中通过 ControlDesk 软件进行手动在线调整, (参数设定区), 设定转速在  $500\sim4\ 000\ \text{r}/\text{min}$  范围内, 负载转矩  $1\sim8\ \text{N}\cdot\text{m}$  内调节, 目的是考核负载变化的同时对电机转速的调节能力。仿真结果为图 4 中的曲线波形。

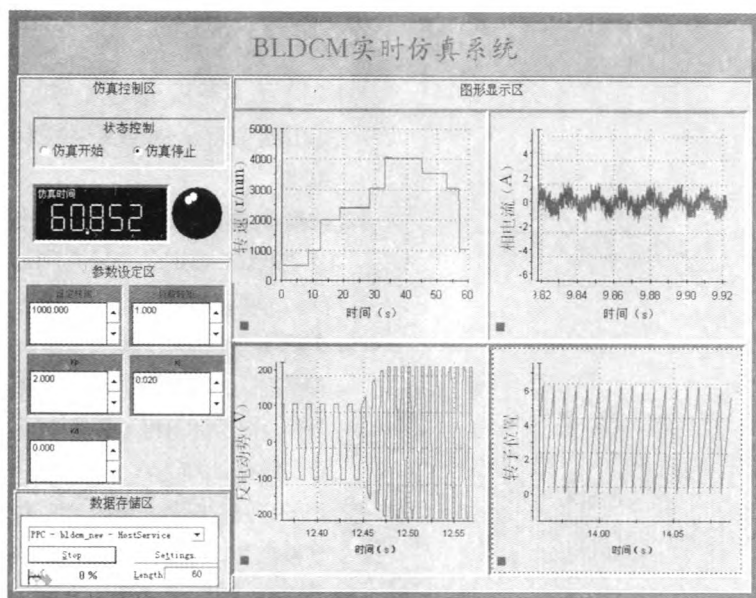


图 4 基于 dSPACE 的 BLDCM 实时仿真监控界面

Fig. 4 Real-time simulation monitoring interface of BLDCM based on dSPACE

由仿真波形可以看出, 在参考转速不变负载力矩变化的情况下, 电机转速几乎没有变化, 在负载由  $1\sim3\sim6\ \text{N}\cdot\text{m}$  变化时, 转速控制差异小于  $2\ \text{r}/\text{min}$ , 电机输出转矩平稳与负载相一致, 如图 5(a)和(b)所示。在负载转矩  $5\ \text{N}\cdot\text{m}$  保持不变的情况下, 电机转速响应快速且平稳, 相电流和反电动势波形较为理想(近似梯形波), 与理论分析结果一致, 如图 5(c)~图 5(e)所示。

设定转速和负载转矩同时变化时, 仿真波形如图 4 所示。起动阶段系统保持转矩恒定, 因而没有造成较大的转矩和相电流冲击; 突加负载时, 转速突降, 后迅速恢复到平衡状态, 稳态运行时静差。本系统离线仿真和实时仿真波形基本一致, 证明了本文所提出的 BLDCM 仿真建模方法的有效性及控制系统的合理性。

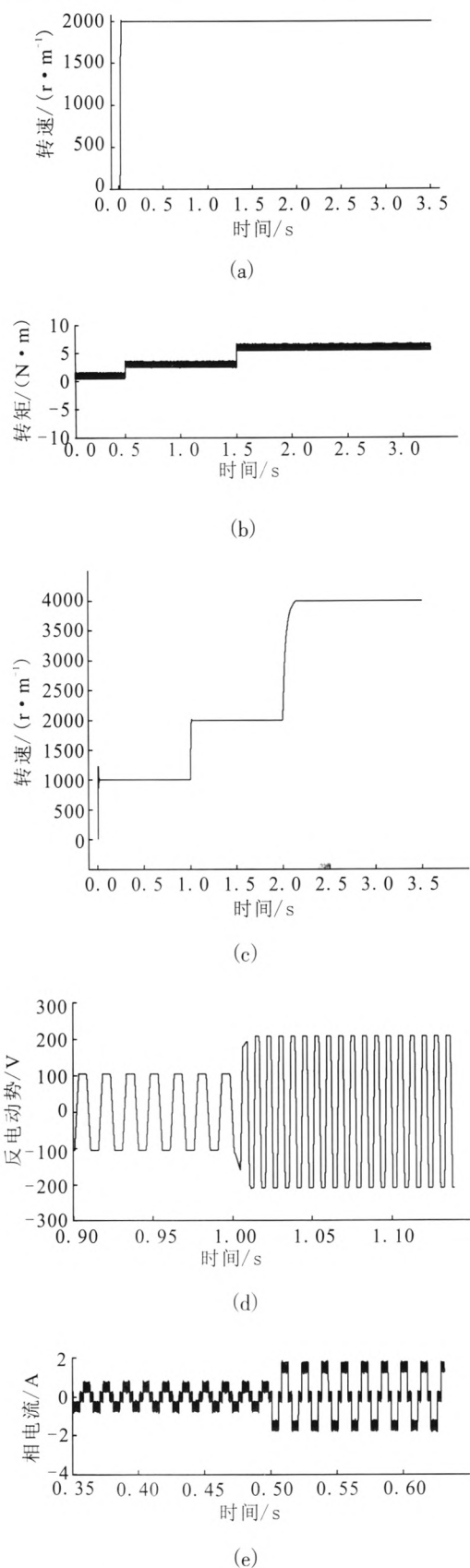


图5 BLDCM 部分仿真波形

Fig. 5 Partial simulation waveform of BLDCM

## 5 结论

本文在无刷直流电机数学模型的基础上,通过构建 BLDCM 本体模型、转速控制模型、驱动模型以及 dSPACE 板卡接口模型,实现了 BLDCM 的实时仿真。仿真结果表明,仿真实验得到的波形符合理论分析,系统的快速性和稳定性较好,具有较好的静、动态特性。利用 ControlDesk 软件进行了在线参数调试,实现了快速控制原型验证 (RCP)。

在 BLDCM 实时仿真中,基于 dSPACE 的实时仿真为原本十分繁复的算法验证和调试工作提供了便捷的实现途径,为分析和设计高性能电机控制器提供了有效的手段和工具。

## 参考文献:

- [1] 纪志成, 沈艳霞, 姜建国. 基于 Matlab 无刷直流电机仿真建模的新方法[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(12): 1745-1749.
- [2] 沈艳霞, 林瑾, 纪志成. 感应电机 Backstepping 控制方法及 dSPACE 实时仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(9): 1318-1325.
- [3] 刘海珊, 陈宇晨. 无刷直流电机 PID 控制系统仿真及实验研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(16): 817-820.
- [4] 杨耕, 罗应立. 电机与运动控制系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [5] 卢子广, 柴建云, 王祥珩, 等. 电动汽车无刷直流电机驱动系统实时仿真[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(4): 541-547.
- [6] 苏宏志, 高文华. 基于 dSPACE 实时仿真的无刷直流电机控制系统[J]. 机电工程, 2007, 24(4): 89-91.
- [7] dSPACE GmbH. Real-time interface (RTI and RTI-MP) implementation guide, release 3.3[R]. Paderborn: dSPACE GmbH, 2001.
- [8] dSPACE GmbH. ControlDesk experiment guide, release 3.2 & 3.3[R]. Paderborn: dSPACE GmbH, 2001.

(编辑: 马 杰)