

基于 RT-LAB 的无刷直流电动机伺服系统半实物仿真

郭长欢 黄建

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

摘要: 为了适应机载电气系统结构的日益复杂变化,保证电气系统性能的良好性,降低飞行试验的风险,提出了一种机载电气系统半实物仿真方法。以无刷直流电机(brushless DC motor, BLCDM)伺服系统为研究对象,按照 RT-LAB 建模规则,搭建了系统仿真模型;设计了以 DSP(TMS320F28335)为核心的电动机控制电路和信号调理电路;在 CCS3.3 开发环境下,完成了电机控制软件的设计。在此平台上,对该伺服系统进行了突加负载和突加给定转速的动态性能仿真,并与全数字仿真的结果进行了对比分析,验证了半实物仿真方法的有效性和准确性。

关键词: 无刷直流电机;伺服系统;半实物仿真;有效性;准确性

中图分类号: TP33 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Hardware-in-the-loop simulation of brushless DC motor servo system based on RT-LAB

Guo Changhuan Huang Jian

(School of Automatic Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: In order to adapt to the increasingly complex changes of the airborne electrical system structure, ensure that the electrical performance of the system is well, reduce the risk of flight test, this paper puts forward a kind of airborne electrical system hardware-in-the-loop simulation method. This paper uses the semi-physical simulation platform RT-LAB to study brushless DC motor (BLCDM) servo system. According to the RT-LAB modeling rules, the model of the motor was put up. The controller of the motor, which takes DSP TMS320F28335 as the core, and signal conditioning circuit were implemented. The control program was accomplished in CCS3.3 Hardware-in-the-loop simulation experiments were carried out to simulate the serve system's dynamic performances. The dynamic response of the motor could be simulated by changing the load torque and the speed settings. Compared with digital simulation and real-time simulation, the validity and accuracy of hardware-in-the-loop simulation were confirmed.

Keywords: brushless DC; servo system; hardware-in-the-loop simulation; validity; accuracy

1 引言

机载电源系统作为机载电气系统的重要组成部分,是一个多参数、强耦合的复杂系统,其性能好坏会直接影响飞行质量^[1]。影响机载电源系统的负载中,最具代表性的是飞机控制系统的电力作动器。电力作动器要求电机响应速度快、可靠性高。随着飞机技术的不断提升,机载用电功率增大,负载呈现出非线性、时变性和恒功率等特征^[2],电源系统与负载之间耦合程度

增大。因此,仅仅使用全数字仿真不足以验证电气系统性能的良好。为了降低飞行试验的风险,缩短研制周期,采用半实物仿真技术来验证其性能,这样在安全、耗费低情况下,在接近真实的环境下评估系统的性能^[3],为产品的研制提供科学依据。

半实物仿真是指在仿真试验系统的仿真回路中接入所研究系统的部分实物的仿真^[4]。国内外用于半实物仿真系统快速原型开发的软件平台主要有德国的 dSPACE 和加拿大的 RT-LAB^[5]。目前,国内外航空航天领域,半

收稿日期:2015-05

实物仿真平台在多个科研项目中得到应用,并取得成功。如加拿大航天局利用 RT-LAB 仿真平台对国际空间站机械手臂进行半实物仿真,解决了进入太空之前不能进行实物试验的问题;美国陆军利用 MATLAB/SIMULINK、Real-Time Workshop 以及鲁棒控制工具箱等工具,对 UH-60 黑鹰直升机导航系统进行半实物仿真,成功完成了直升机自由飞行测试实验^[6]。国内西北工业大学运用 RT-LAB 对导弹飞行控制系统进行半实物仿真,验证飞控系统算法的正确性,考核控制系统的性能^[7];中航工业计算机所、航天科工集团等运用 RT-LAB 对高空飞艇飞行控制系统进行半实物仿真,验证半实物仿真系统的可行性^[8]等。

以 BLDCM 伺服系统为研究对象,在理论分析、仿真建模的基础上,利用半实物仿真平台 RT-LAB,实现该伺服系统的半实物仿真,具有重要研究价值。

2 BLDCM 的数学模型

BLDCM 采用“三相六状态两两导通方式”,永磁无刷直流电动机建模的 5 点假设^[4]假设磁路不饱和,不计涡流和磁滞损耗;忽略齿槽转矩、摩擦转矩;忽略换相过程、电枢反应和功率管的饱和压降等影响;假设定子三相集中绕组完全对称,可得星型连接方式的定子绕组的电压平衡式为:

$$\begin{pmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{pmatrix} \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: p 为微分算子, R 为相绕组内阻, U_i 、 I_i 、 e_i ($i = 1, 2, 3$) 分别为相绕组电压、电流和反电势, L_{aa} 、 M_{ab} 、 M_{ac} 、 M_{ba} 、 L_{bb} 、 M_{bc} 、 M_{ca} 、 M_{cb} 、 L_{cc} 为相绕组自感和互感系数。

电机的电磁转矩方程为:

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega \quad (2)$$

式中: ω 为电机的转速。

电机的机械运动方程为:

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

式中: T_L 为负载转矩; T_f 为系统摩擦转矩; J 为转动惯量。

BLDCM 实际参数如表 1 所示。

表 1 BLDCM 技术指标参数

额定电压	额定电流	额定转速	额定转矩
28 V	20 A	2 500 r/min	1 Nm
定子电阻	定子电感	互感	反电势系数
0.022 Ω	9.4E-2mH	-9.94E-6mH	3.76E-2
转动惯量	黏性系数	极对数	仿真步长
8.894E-4	0.000 01	3	1E-5s

3 BLDCM 半实物仿真的实现

为实现 BLDCM 伺服系统硬件在回路的半实物仿真,拟将电动机和功率驱动电路作为仿真模型,运行于半实物仿真平台 RT-LAB 中,由 DSP 及其外围电路组成的硬件电路构成硬件控制器,并结合信号调理电路,实现硬件在回路的半实物仿真, BLDCM 伺服系统的半实物仿真总体结构如图 1 所示。

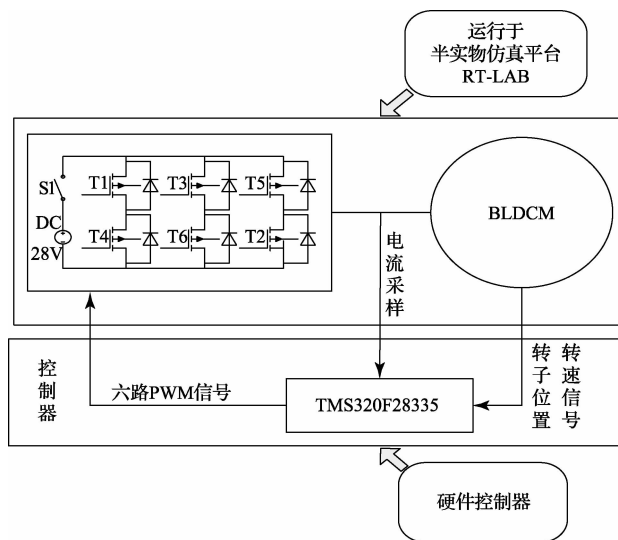


图 1 BLDCM 伺服系统半实物仿真总体结构

3.1 BLDCM 的 RT-LAB 建模

实现 BLDCM 伺服系统硬件在环半实物仿真,需将电机模型运行于半实物仿真平台 RT-LAB 中。要使电机模型与硬件控制器连接,需要设置电机模型输入和输出信号的接口,输入信号为 PWM 脉宽调制信号、转子位置和转速控制信号,输出信号为转子位置、转速信号和三相电流信号,按照 RT-LAB 建模规则搭建的 BLDCM 的模型如图 2 所示。

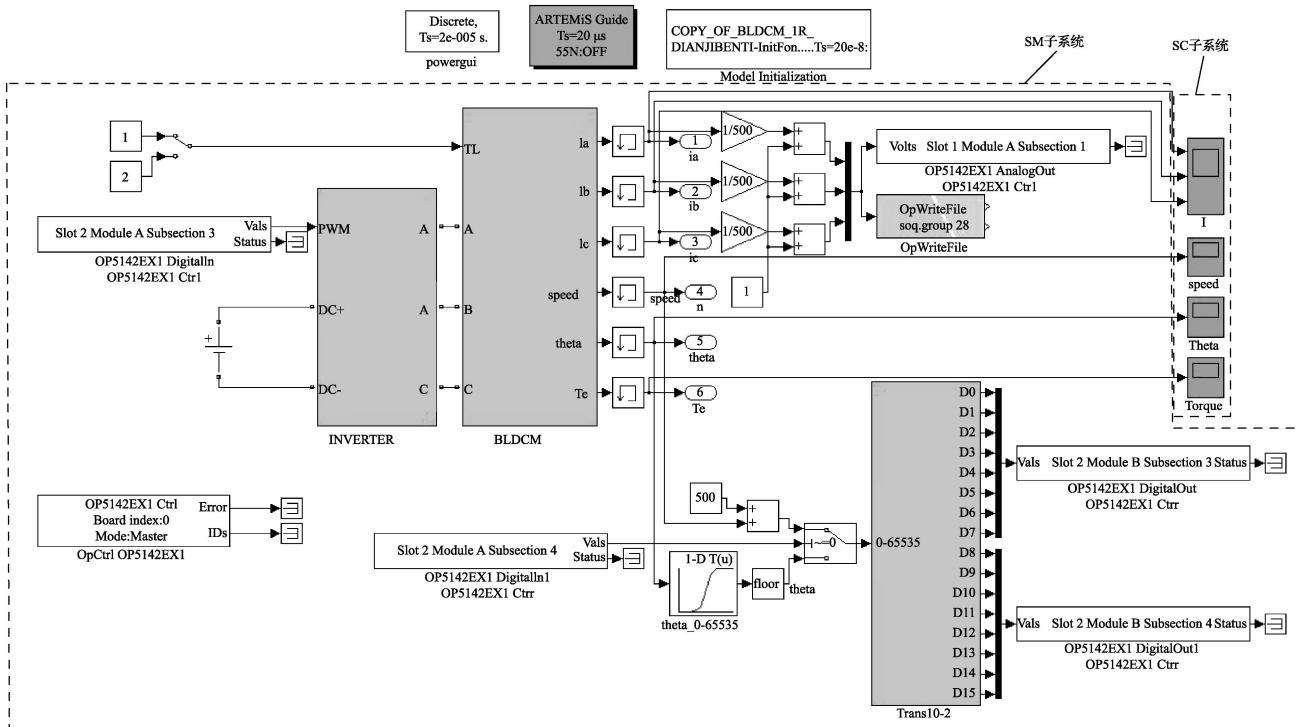


图2 RT-LAB中BLDCM的模型

模型中PWM信号是由RT-LAB中的OP5142EX1 DigitalIn模块接收控制器输出的6路PWM信号。为了使输出的转子位置和转速信号具有较高的精度,并结合目标机OP5600数字量输出板卡OP5354的位数(16位),模型中采用了16位的转子位置和转速信号输出,

并由OP5142EX1 DigitalIn1模块的一路数字量输入信号来控制两信号的切换,转子位置和转速信号的输出模块如图3。十进制转16位二进制模块(Trans_Dec2Bin)如图4所示。

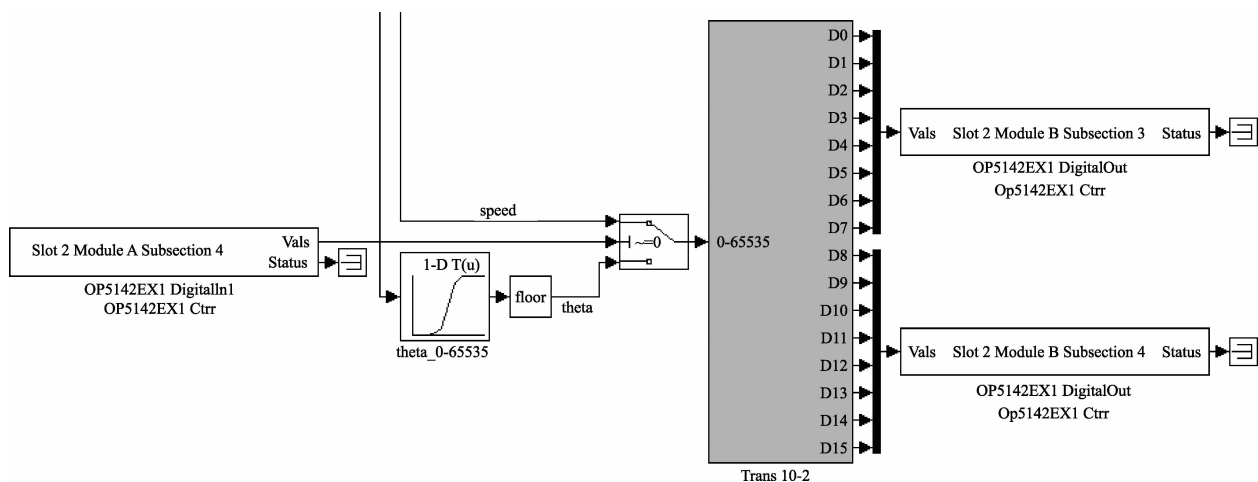


图3 转子位置和转速信号输出模块

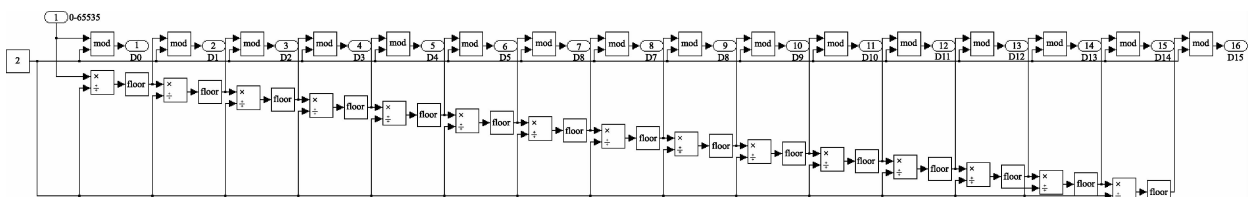


图4 十进制转16位二进制模块

由于额定转速为 2 400 r/min,因此直接通过 Trans_Dec2Bin 模块将其转化为 16 位的二进制数字输出;而转子位置范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$,直接经过 Trans_Dec2Bin 模块,输出误差较大,因此加入了 1-D Lookup Table 模块,将 $0^{\circ}\sim 360$ 先转化为 0~65 535,然后经过 Trans Dec-Bin 模块转化为 16 位的二进制数字输出,转子位置和转速信号均由 OP5142EX1 DigitalOut 模块输出。OP5142EX1 DigitalIn1 接收控制器输出的转子位置和转速控制信号,转子位置和转速信号通过 switch 模块进行切换。

三相电流信号(I)由 OP5142EX1 AnalogOut 模块输出给控制器,三相电流信号范围为 $-70\sim 70\text{A}$,对应的模拟量输出板卡 OP5330 输出为 $-70\sim 70\text{V}$,所以,控制器采样电流信号时需要对模型进行处理,由公式 $1+I/500$ 将电流信号限制在 1~2 V,从而转化为 DSP 的 A/D 模块所

能接收的信号。

DSP 接收到的三相电流、转子位置和转速信号均需通过解码,将其还原为实际的信号,以便 DSP 进行转速环和电流环的计算。

3.2 BLDCM 控制器硬件电路设计

控制芯片采用 TI 公司的 32 位浮点运算 DSP (TMS320F28335),主频可达 150 MHz,系统时钟由 30 MHz 无源晶振提供^[10],DSP 所需的内核电压 1.9 V 和 I/O 电压 3.3 V 由 TLV1117 系列芯片提供。

三相电流信号由目标机 OP5600 的模拟量输出板卡 OP5330 直接输出给 DSP,电流信号之间的传输通过隔离运放 AD215 来完成,电路如图 5 所示,为防止 A/D 采样电压超过 3.3 V,加入了电压钳制电路,如图 6 所示。

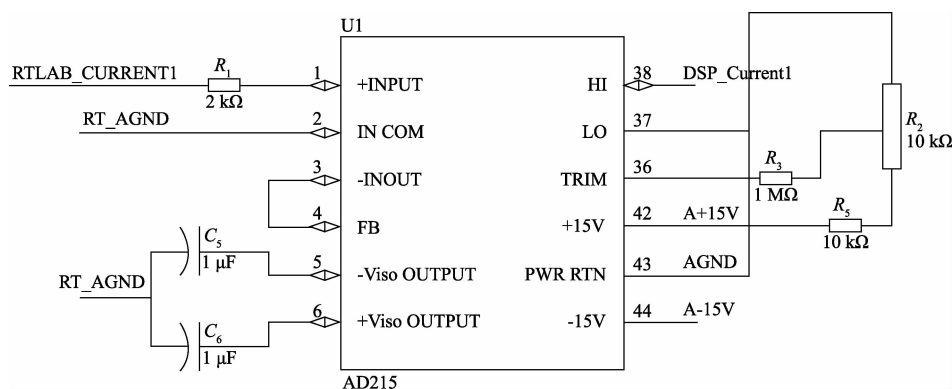


图 5 电流信号调理电路

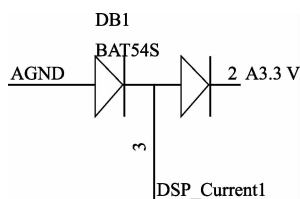


图 6 电压钳制电路

对于转子位置、转速和 PWM 信号,因为 RT-LAB 输出的高电平为 5 V,而 DSP 的工作电压为 3.3 V,所以在信号调理电路中使用了 SN74LVC4245A 芯片,该芯片是 TI 公司生产的八进制总线收发器和三输出状态 3.3 V、5 V 转换器,实现了 3.3 V 和 5 V 的转换。

DSP 产生的 PWM 信号转化为 RT-LAB 所能承受的 PWM 信号的电路如图 7 所示,RT-LAB 输出的电机转子位置和转速信号通过 16 位的数据总线输出,转化为 DSP

所能承受信号的电路如图 8 所示,其中,DSP_Pos0-15、DSP_n1-16 为 DSP 接收到的转子位置和转速信号,RT-LAB_POS0-15、RTLAB_N1-16 为 RT-LAB 输出的转子位置和转速信号。

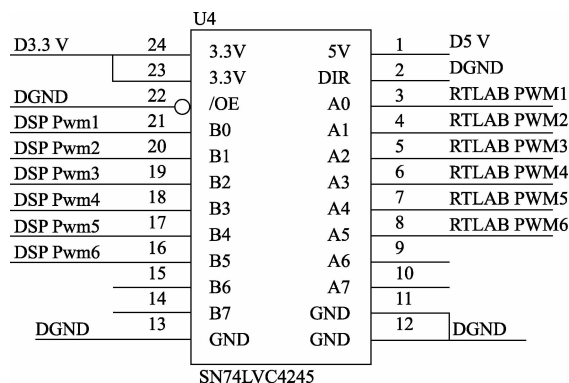


图 7 PWM 信号电平转换电路

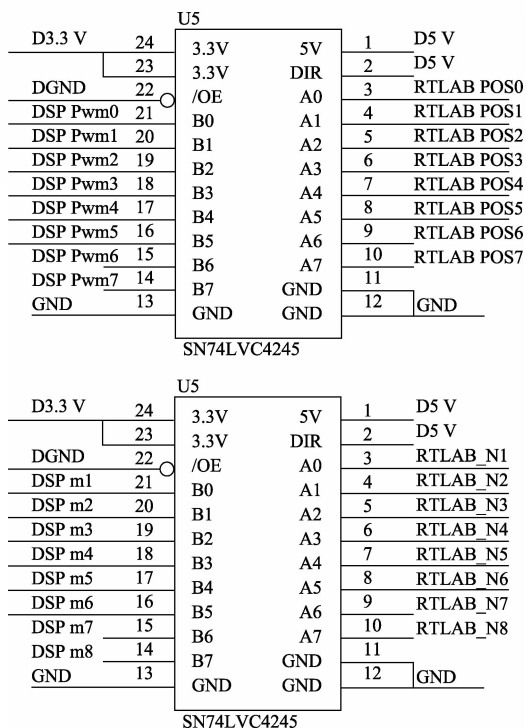


图8 转子位置信号和转速信号电平转换电路

此外,调理电路所需的 $\pm 15\text{ V}$ 、 5 V 和 3.3 V 电源分别由电源模块XZR05/24D05、XZR05/24S15-15和电源芯片TPS7333提供,如图9所示。

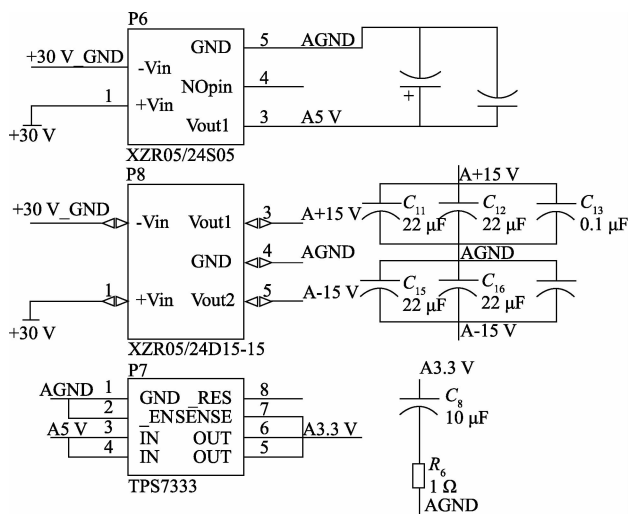


图9 调理电路电源模块

3.3 DSP的软件设计

1) 主程序

主程序主要完成DSP的系统初始化、中断向量初始化、中断向量表初始化、PID参数的初始化等工作,主程序流程如图10所示。

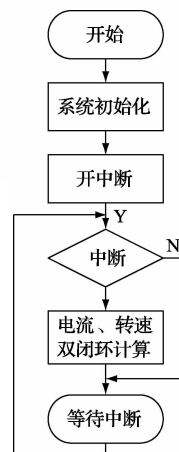


图10 主程序流程

2) 中断服务子程序

中断服务子程序完成电流、转子位置和转速的检测,电流环和转速环的运算,输出PWM信号等工作。转速环调节如图11所示,电流环调节如图12所示,计算电流反馈值的流程如图13所示。

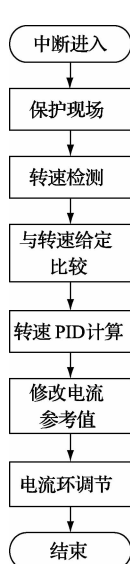


图11 转速环调节流程



图12 电流环调节流程

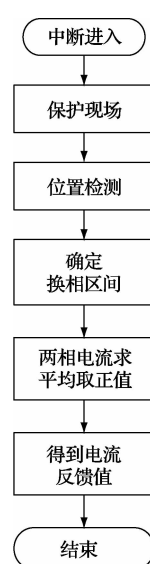


图13 电流反馈值流程

4 系统调试及试验结果

系统的实验平台由半实物仿真平台RT-LAB的上位机、目标机OP5600、BLDCM以DSP为核心的控制器、信号调理电路、 $30\text{ V}/10\text{ A}$ 开关电源及示波器组成,如图14所示。在此硬件平台上对该电机的瞬态性能进行测试,主要包括:突加突卸负载和突加给定转速实验,并验证硬件在回路半实物仿真方法的准确性和有效性。

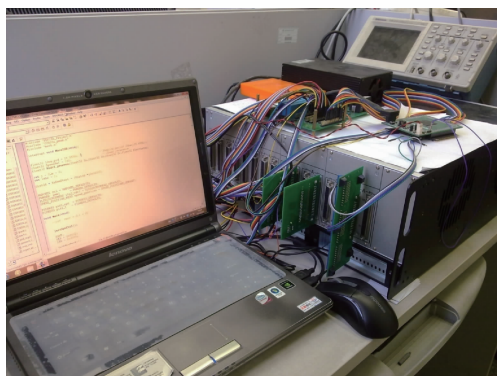
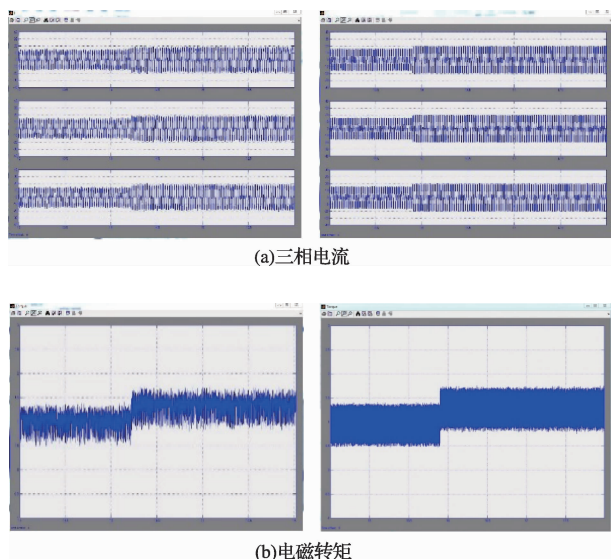


图14 BLDCM半实物仿真实验硬件平台

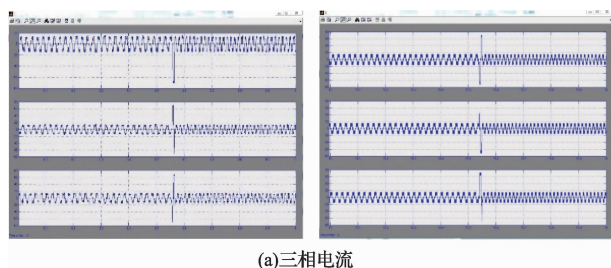
1) 突加负载实验

电机额定负载启动,控制转速 1 000 r/min,负载转矩由 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 增加到 $1.33 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。图 15 为硬件在回路的半实物仿真和全数字仿真的响应曲线,其中(a)、(b)分别表示突加负载的三相电流波形和电磁转矩波形。

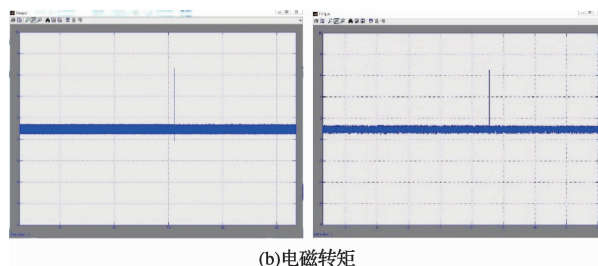
图15 负载转矩 T_L : $1 \sim 1.33 \text{ N} \cdot \text{m}$ 电机的响应曲线

2) 突加给定转速实验

电机带恒定转矩负载 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 启动,初始时刻给定转速 1 000 r/min,一段时间后,在 CCS3.3 开发环境下将转速设为 1 500 r/min,实现突加给定转速的动态仿真实验。RT-LAB 上位机显示的响应曲线如图 16 所示,其中(a)、(b)分别表示突加给定转速的三相电流波形和电磁转矩波形。



(a)三相电流



(b)电磁转矩

图16 转速:1 000~1 500 r/min 电机的响应曲线

由图 15、16 可以看出突加负载,突加给定转速时,半实物实时仿真能够较为准确的反映出实际的试验情况。同时也能看到硬件在回路的半实物仿真的电流响应和电磁转矩响应的波动较大。影响因素可能有以下几点:

1) 电机控制过程中,电流信号的采样直接使用了 DSP 本身的 12 位 A/D,没有采用精度较高的外置 A/D,在电流采样上可能会有较大的误差;

2) 全数字仿真的信号均为数字信号,而半实物仿真电流信号为模拟信号,输出给控制器需要转化为数字信号,因此两者的信号在时间特性和数值上略有差别,且存在延时现象。

5 结 论

本文基于 RT-LAB 半实物仿真平台,搭建了 BLDCM 的半实物实时仿真系统,在 MATLAB/SIMULINK 环境下搭建了系统数学模型,经过 RT-LAB 对数学模型进行分割处理,生成实时仿真语言,实现了半实物仿真平台与 MATLAB/SIMULINK 的无缝连接,提高了系统研制质量。和全数字实时仿真的结果相比,硬件在环的半实物仿真更接近实际情况,仿真结果没有存在较大误差。通过改变电机的负载转矩和转速,可以模拟不同转矩、转速工作状态下的动态性能,证明了硬件在回路的半实物仿真方法的有效性和准确性。

半实物仿真可以实现闭环调试,不仅在 BLDCM 伺服系统中应用,在很多产品的研制调试过程中都可以得到应用,尤其是在实际研发环境恶劣,研制对象比较复杂,不适合反复做试验以及一些预研项目中,半实物仿真可以替代实际试验,降低研发试验成本,提高研发效率。目前半实物仿真已在航空航天、船舶、汽车、电力等领域得到广发应用,会成为仿真技术的一个发展趋势。

参 考 文 献

- [1] 梁旭,朴成日,全应栓. 基于贝叶斯融合的机载电源系统拍评估方法[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(10): 29-32.
- [2] 沈颂华. 航空航天器供电系统[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005.

(下转第 44 页)

2013,33(19): 47-56.

- [9] 赵齐月,毛征,张庆龙,等. 基于局域熵值分布图的目标分割及质心计算[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(2):20-22.
- [10] 陈雁,文劲宇,程时杰. 电网规划中考虑风电场影响的最小切负荷量研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34):20-27.
- [11] 王菲,余贻鑫,刘艳丽. 基于安全域的电网最小切负荷计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 28-33.
- [12] 张柯,杜丽敏,金龙旭. 成像扫描低速变负载大惯量系统自抗扰控制[J]. 电子测量技术, 2014, 37(12): 17-23.
- [13] 潘旭东,赵杨,云雷,等. 基于不确定性的线路退运

模糊切负荷量计算[J]. 广东电力, 2014, 27(3): 58-62.

作者简介

朱雪松, 1989 年出生, 硕士研究生. 主要研究方向为电力系统配网优化, 规划与运行.

E-mail: 1059700510@qq.com

汪静, 1983 年出生, 大学本科. 主要研究方向为水电站控制系统设计工作.

E-mail: 18840253@qq.com

刘志勇, 1989 年出生, 硕士研究生. 主要研究方向为电力系统配网优化, 规划与运行.

E-mail: lzycl0738@163.com

(上接第 27 页)

- [3] 姜东红,吴根水,屠宁. RT-LAB 软件在半实物仿真系统中的应用[J]. 测控技术, 2008, 27(4): 71-73.
- [4] 刘坤,方芳,王伟. 基于 MATLAB/RTW 的通信模块的设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(2):296-301.
- [5] 肖河川,廖俊必. 基于 FSM 的平板模型研究[J]. 电子测量技术, 2012, 35(3):107-111.
- [6] 陈宇宙. 实时仿真平台 RT-LAB 及其在飞行器设计上的应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2007.
- [7] 万士正,常晓飞,闫杰. 基于 RT-LAB 的飞控系统快速原型开发[J]. 电子测量技术, 2012, 35(10): 115-118.
- [8] 吕俊,李鑫,凡永华. 基于 RT-LAB 的高空飞艇半

实物仿真系统设计[J]. 电子测量技术, 2015, 38(3):13-16.

- [9] 朱剑波. 无刷直流电机控制系统的仿真与分析[J]. 国外电子测量技术, 2013, 32(12):25-30.

- [10] 李海波. 基于 TMS320F28335 无刷直流电机的控制系统研究[D]. 长春:中科院长春光学精密机械与物理研究所, 2010.

作者简介

郭长欢, 1988 年出生, 工学硕士. 主要研究方向为电机与电器.

E-mail: 2289767288@qq.com

黄建, 1953 年出生, 研究员. 主要研究方向为电机与电器.