

6-14-2018

## MATLAB-based physical real-time simulation platform of PMSM in Intelligent Test System

Mengru Wang

*Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

Zhou Shan

*Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

Jinbo Wang

*Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

Panpan Xue

*Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## MATLAB-based physical real-time simulation platform of PMSM in Intelligent Test System

### Abstract

**Abstract:** As the physical objects cannot simulate multiple failure modes to cooperate with space controller test, a solution that *establishing the real-time physics simulation platform* which contains the controlled object and the control system is proposed in this paper. In this solution, we established permanent magnet synchronous motor *vector control model* using MATLAB /Simulink toolbox of System Generator, then implemented *on FPGA*; After hardware extension, a complete *closed-loop test system* is constructed with the DUT(controller) and the motor simulation model; the model has high pointing and tracking precision. Besides simulating motor's normal functions, *the model's parameters can be changed and a series of failure modes can be set up*. The test system can do both normal test and failure test of the control system. Thus, the DUT can be tested sufficiently. This solution provides a reference for test of the systems which including *complex executing agency* and provides a new idea for *building the Intelligent test system*.

### Keywords

AC permanent magnet synchronous motor, MATLAB modeling, Physical object Real-time simulation, Closed-loop test system, Intelligent test system

### Recommended Citation

Wang Mengru, Zhou Shan, Wang Jinbo, Xue Panpan. MATLAB-based physical real-time simulation platform of PMSM in Intelligent Test System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2225-2236.

# 基于 MATLAB 的智能测试系统 PMSM 物理实时仿真平台

王梦茹, 周珊, 王金波, 薛盼盼

(中科院空间应用工程与技术中心, 北京 100094)

**摘要:** 针对在航天控制器软件测试过程中存在的实物被控对象不能模拟故障模式配合测试的问题, 提出建立包含被控对象和控制系统的物理实时仿真平台的解决方案。该方案利用 MATLAB/Simulink 的 system generator 工具箱建立电机矢量控制模型, 并在 FPGA 上实现, 硬件扩展后与被测对象构成了一套完备的闭环测试系统; 该模型具有高精度, 能够模拟电机正常功能, 可设置模型参数及故障模式, 可用于控制系统的正常测试和故障测试, 确保测试充分; 该方案为其他复杂执行机构仿真测试提供了参考, 为构建智能测试系统提供了新思路。

**关键词:** 交流永磁同步电机, MATLAB 建模, 物理实时仿真, 闭环测试系统, 智能测试系统

中图分类号: TM34

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 06-2225-12

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806028

## MATLAB-based physical real-time simulation platform of PMSM in Intelligent Test System

Wang Mengru, Zhou Shan, Wang Jinbo, Xue Panpan

(Technology and Engineering Center for Space Utilization, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

**Abstract:** As the physical objects cannot simulate multiple failure modes to cooperate with space controller test, a solution that *establishing the real-time physics simulation platform* which contains the controlled object and the control system is proposed in this paper. In this solution, we established permanent magnet synchronous motor *vector control model* using MATLAB /Simulink toolbox of System Generator, then implemented *on FPGA*; After hardware extension, a complete *closed-loop test system* is constructed with the DUT(controller) and the motor simulation model; the model has high pointing and tracking precision. Besides simulating motor's normal functions, *the model's parameters can be changed and a series of failure modes can be set up*. The test system can do both normal test and failure test of the control system. Thus, the DUT can be tested sufficiently. This solution provides a reference for test of the systems which including *complex executing agency and provides a new idea for building the Intelligent test system*.

**Keywords:** AC permanent magnet synchronous motor; MATLAB modeling; Physical object Real-time simulation; Closed-loop test system; Intelligent test system

## 引言

永磁同步电机(Permanent magnet synchronous



收稿日期: 2016-08-10 修回日期: 2017-07-04;  
基金项目: 国家重大专项载人航天应用系统软件第三方评测(Y2140511RN);  
作者简介: 王梦茹(1989-), 女, 安徽, 博士生, 工程师, 研究方向为形式化验证, 复杂系统建模; 周珊(1983-), 女, 陕西, 硕士, 工程师, 研究方向为 FPGA 验证。

motor, PMSM)具有性能优良、效率高、转矩脉动较小等优点, 作为执行机构, 广泛应用于工业、航天、军工的控制系统。在对这些控制系统的测试过程中, 往往需要构建电机工作在正常模式、电机内部参数有微小波动的异常模式以及故障模式下的场景; 目前在开展此类测试时通常采用直接在实物执行机构(被控对象)上执行测试用例的方法, 这种测试方法的好处在于, 在搭建好测试环境后能够立即

<http://www.china-simulation.com>

• 2225 •

执行测试；缺陷在于多数的测试场景为正常模式测试，对于故障模式的测试不能充分展开，即使能够在实际的执行机构上人为地制造故障，一方面会损坏实物，另一方面更换实物又可能会引入因参数不匹配而影响精度的新问题<sup>[1]</sup>；考虑到此种测试方法的局限性以及可能存在的风险，本文提出搭建合理准确的电机仿真模型，并通过工具将仿真模型工程化来配合测试的解决方案；这种解决方案将仿真模型和控制软件(被测对象)构成一套闭环仿真测试系统；在此系统中，不再将实际执行机构作为测试环境的一部分，而是将功能拟合后的执行机构仿真前端与被测对象进行交联，完成闭环测试。

相对于第一种测试方法，此种测试方法能够覆盖正常、异常的测试场景，测试的充分性大大提高；对于验证控制系统，保障测试充分性有着重要意义。电机仿真模型采用模块化设计，具有很好的复用性和扩展性；模型依据被测对象输出信号及时调整自身的反馈信号，并且模型的内部的电流、角度等信息能够实时、准确地呈现给上位机软件；模型留有参数配置接口、故障模式设置接口、初始角度设置接口等，可以通过上位机软件远程灵活配置电机参数以及工作模式；模型具有一定的容错能力和鲁棒性，在板级信号存在抖动时仍然能够正常工作，整个测试系统更加智能化。

## 1 MATLAB 实时仿真环境

目前对于电机模型的研究大部分是基于纯 MATLAB 环境，即在 MATLAB 中构建整个闭环控制系统；文献[2-5]中给出了永磁同步电机的控制系统建模过程以及基于 MATLAB 的仿真结果；文献[7]在 MATLAB/Simulink 中，利用 S 函数模块搭建交流永磁同步电机控制系统的仿真模型，并给出理论实验结果；这些建模均未对所建模型工程实现后的可用性进行验证。事实上，在实际的工程应用中，外部环境的干扰、参数不完全匹配等因素的存在都会影响电机控制系统的控制效果；换言之，纯理论意义上的电机模型并不能满足实际工程的需

要，从前者到后者存在着相当复杂的调试过程。针对这种情况，文献[16-18]中进行了改进，控制系统部分采用硬件语言 Verilog HDL 实现，电机模型基于 MATLAB/Simulink 搭建，将软硬两部分协同仿真测试来验证控制系统功能的正确性；对比于纯 MATLAB 环境，控制算法 FPGA 实现，但是电机模型部分仍然是运行于纯软件环境中，没有做到完全的工程化。

Xilinx 公司提供的 System generator 是集成在 MATLAB/Simulink 开发环境中的 FPGA 开发工具，它能够直接将 Simulink 的模型转化成为可移植的代码，根据目标配置生成不同环境下的程序文件下载到 FPGA 中，经过硬件扩展，可与控制系统(被测对象)进行实时通信，由此实现仿真动态系统模型在硬件系统上的调试和运行。

本文从构建包含复杂执行机构仿真模型的智能测试系统出发，基于 MATLAB/Simulink 中的 System Generator 建立了三相交流永磁同步电机物理实时仿真模型。MATLAB/Simulink 验证保证了仿真环境下电机功能的正确性；进一步工程实现后，通过 RTL 级调试以及板级调试，保证所建模型工程实现后的正确性和高指向、追踪精度。为了进一步验证，将仿真曲线和实际电机的响应曲线对比，证实此仿真模型能够代替真实电机对控制系统进行正常功能及故障处理测试。

## 2 交流永磁同步电机的数学模型

在某航天跟踪控制软件中，交流永磁同步电机作为控制系统中粗跟踪系统的执行机构<sup>[10]</sup>，在控制机构的作用下带动负载于其上的光学相机转动，从而改变相机的光轴，使其追逐信标光所指方向，实现跟踪过程。为充分测试控制机构功能正确性以及故障处理能力，需建立起作为被控对象交流永磁同步电机准确合理的仿真模型。控制系统采用电压矢量控制、占空比调制的控制方法，即由 PID 计算出每个控制周期内有效电压矢量作用时间；此方法能够有效的减小转矩脉动，并且开关频率固定

[11]; 仿真模型的建立需配合此种控制方式。

交流永磁同步电机为高阶、非线性、强耦合的多变量系统<sup>[2]</sup>, 加之电机本身摩擦和电机负载导致其运动方程更加复杂; 我们在推导交流电机的数学模型前作如下假设<sup>[6]</sup>:

1. 电机铁芯的导磁系数为无穷大, 不考虑磁滞、涡流的影响, 并且磁路不饱和;
2. 感应电动势及气隙磁场均按正弦分布, 且不计磁场的各次谐波;
3. 定子三相绕组在空间呈对称星形分布, 且假设定子各绕组的电枢电阻以及电感均相等;
4. 不考虑温度对电机的影响。

三相交流永磁同步电机的电势和磁链平衡方程式如式(1)。

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & & \\ & R_b & \\ & & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0^\circ & \cos 120^\circ & \cos 240^\circ \\ \cos 240^\circ & \cos 0^\circ & \cos 120^\circ \\ \cos 120^\circ & \cos 240^\circ & \cos 0^\circ \end{bmatrix} L \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix} \psi_{fabc}$$

电机转矩计算方程如下:

$$T_e = \lambda \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \frac{d\psi_{fabc}}{dt} \quad (2)$$

电机的转速计算方程如下:

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

式中:  $u_a, u_b, u_c$  为三相定子绕组电压;  $i_a, i_b, i_c$  为三相定子绕组电流;  $\psi_a, \psi_b, \psi_c$  为三相定子绕组磁链;  $R_a, R_b, R_c$  为三相电阻;  $L$  为电感,  $\psi_f$  为转子磁场的等效磁链;  $\lambda, J, \omega$  为电机的转子磁极对数、转动惯量、电气角速度;  $T_e, T_m, T_f$  分别为电机电磁转矩、负载转矩、摩擦转矩。结合矢量控制的特点, 我们须将三相对称系统通过 PARK 变换和 CLARK 变换转换成两相正交系统。

### 3 交流永磁同步电机仿真模型

基于前面分析出的交流电机数学模型, 在 MATLAB2011B 的 SIMULINK 环境下, 利用 XILINX 库中丰富的模块资源, 搭建仿真模型。整个模型的模块化结构如图 1 所示。

从图 1 中可以看出, 电机仿真模型主要由 PWM 转电压计算模块、电压变化解耦模块、电流及转矩计算模块、电流变换、模拟电流 AD 输出、角度更新、计算、矫正、拆分以及模拟测角板输出、质心更新、计算、判断输出模块组成。

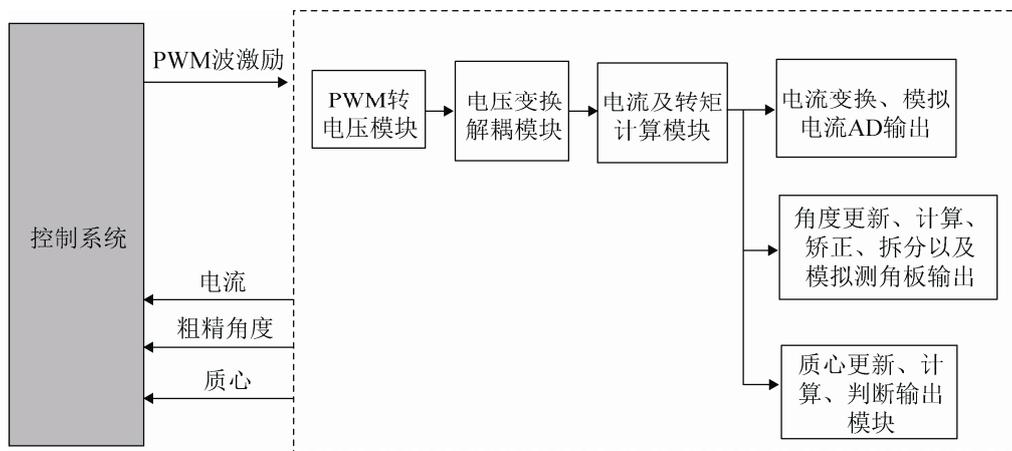


图 1 系统功能模块结构图  
Fig. 1 System function structure chart

### 3.1 PWM 激励模块

通常电机的输入驱动为直流电压或者交流电压,此处电机的直接激励为三相 PWM 波。PWM 波通过改变自身的占空比来实现电压的变化,造成三相电压之间的压差,引起电机电流的方向及大小发生变化,从而改变电机的转矩方向,实现电机的正转和反转; PWM 转电压模块采用 MSK4304 芯片,

实质上为一个 H 桥驱动电路,如图 2,将控制器输出的三相 PWM 波经转换放大得到施加在电机模型上的三相电压,可等效为一个反向比例放大环节。

为了保证模型与实际电机得到的激励一致,本模型采用一个远高于 PWM 波频率的采样器对 PWM 波采样,将采样得到的信号连接到放大器后寄存,然后输出给永磁电机的电压输入端见图 3。

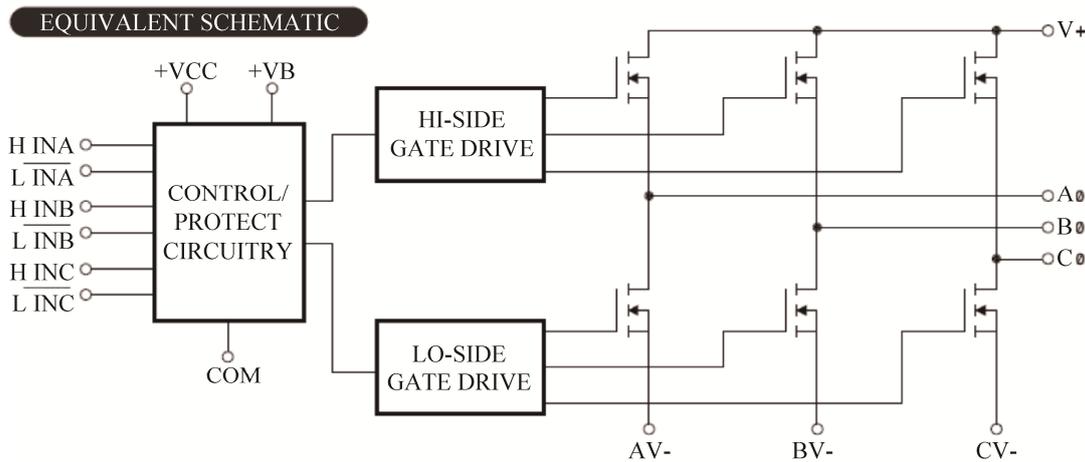


图 2 MSK4304 芯片原理图  
Fig. 2 MSK4304 Chip Schematic diagram

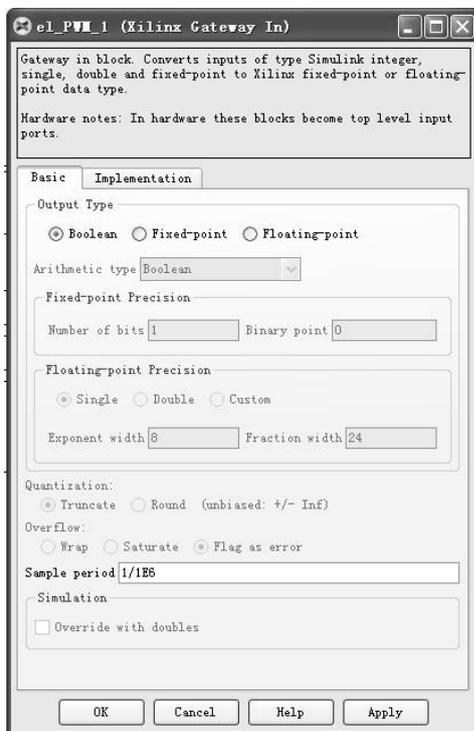


图 3 高频采样  
Fig. 3 High frequency sample

板级输入的三路 PWM 波存在不同步的情况,这种不同步会造成电机初始状态不稳定以及指向精度下降。为了消除这种现象,一方面在板级对输入模型的 PWM 波进行同步处理,另一方面在模型中加入抗干扰模块使得模型能够滤除毛刺,提高电机的鲁棒性和精度。

### 3.2 电压变换及解耦模块

控制系统采用矢量控制,为了有效利用磁场定向控制理论,在模型建立时需对三相对称系统进行 PARK 变换成两相正交系统,再将两相静止正交系统经 CLARK 变换到两相旋转正交坐标系,以便对直轴、交轴分别控制<sup>[6]</sup>。

变换如式(4)。

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha} \\ u_{\beta} \\ u_0 \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $u_a, u_b, u_c$  为三相定子绕组电压, 由 PWM 转电压模块输入。由于三相定子对称,  $u_0 = u_a + u_b + u_c = 0$ , 所以零序电压分量  $u_0$  可以忽略。

又两相静止正交系统到两相转子坐标系的旋转变换如下:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

此处忽略电机铁心饱和, 忽略电机中的磁滞损耗和涡流, 并假定转子无阻尼绕组。在  $d-q$  转子同步坐标系下, 电机定子电压方程表示如下:

$$u_d = R_d i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \lambda \omega \psi_q \quad (6)$$

$$u_q = R_q i_q + \frac{d\psi_q}{dt} - \lambda \omega \psi_d \quad (7)$$

$$\psi_d = L_d i_d \quad (8)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (9)$$

式中:  $\psi_d, \psi_q$  为  $d-q$  轴磁链;  $\omega$  为电机的机械角速度。

对式(6)、(7)进行拉普拉斯变换后传递函数的框图见图 4。

可以看出, 在两相电流计算时存在耦合项, 为方便建模考虑去除耦合项, 此处采用控制理论中的状态反馈解耦法<sup>[7]</sup>, 得到电流计算传递函数框图如图 5, 新得到的电压变量为  $v_d, v_q$ 。可见新的数

学模型的交直流分量已被解耦, 可对两轴实施独立控制。

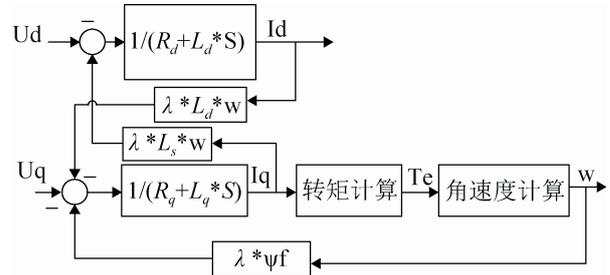


图 4 电压电流传递函数框图(解耦前)

Fig. 4 Block diagram of transfer function between voltage and current (before decoupling)

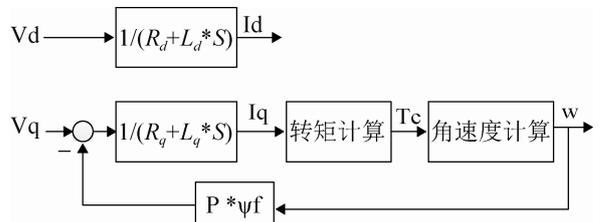


图 5 电压电流传递函数框图(解耦后)

Fig. 5 Block diagram of transfer function between voltage and current (after decoupling)

### 3.3 电流及转矩计算模块

此模块是电机仿真模型中计算模块的核心, Simulink 中结构图, 见图 6。

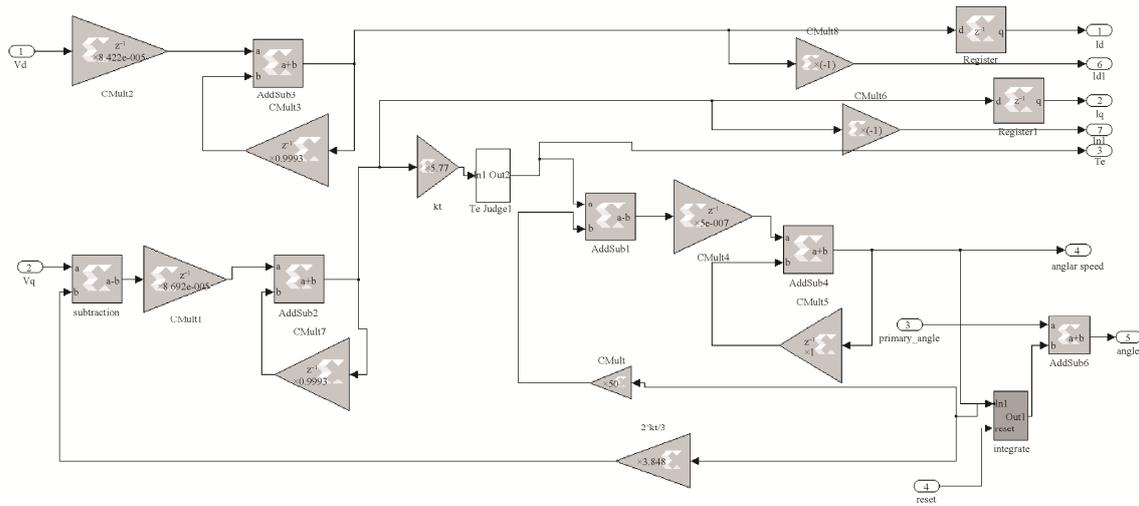


图 6 转矩计算

Fig. 6 torque calculation

由矢量控制原理, 式(2)变换得出电流与转矩的传递函数如下,

$$T_e = \frac{3}{2} \lambda (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (10)$$

通常情况下,  $\psi_d \gg \psi_q$ , 取:

$$T_e = \frac{3}{2} \lambda \psi_d i_q \quad (11)$$

通常我们令  $kt = 3/2 * \lambda \psi_d$ , 为转矩控制系数; 为了降低模型对外界扰动的敏感度, 加入了转矩判断模块, 使得模型的抗干扰性大大提高。

结合式(3), 即可得到电机的机械角速度; 考虑到  $T_m$  (负载转矩),  $T_f$  (摩擦转矩) 对模型精度的影响, 仿真建模时这两种转矩进行线性化逼近。

### 3.4 角度拆分输出

对角速度积分  $\theta = \int \omega dt$  即可得到电机零位机械角度  $\theta$ 。为配合测试, 模型的初始角度能够通过测试系统操作界面设置: 即, 清除积分环节中的历史数据, 使用指令输入的新数据; 另外模型还需对计算得到电机零位机械角进行处理, 一方面, 要由电机零位机械角计算出电气角去参与模型内部的计算, 一方面要对电机零位机械角进行零偏校正、角度限幅等一系列的处理送给粗精角度计算模块作为输入, 整个模块如图7所示。

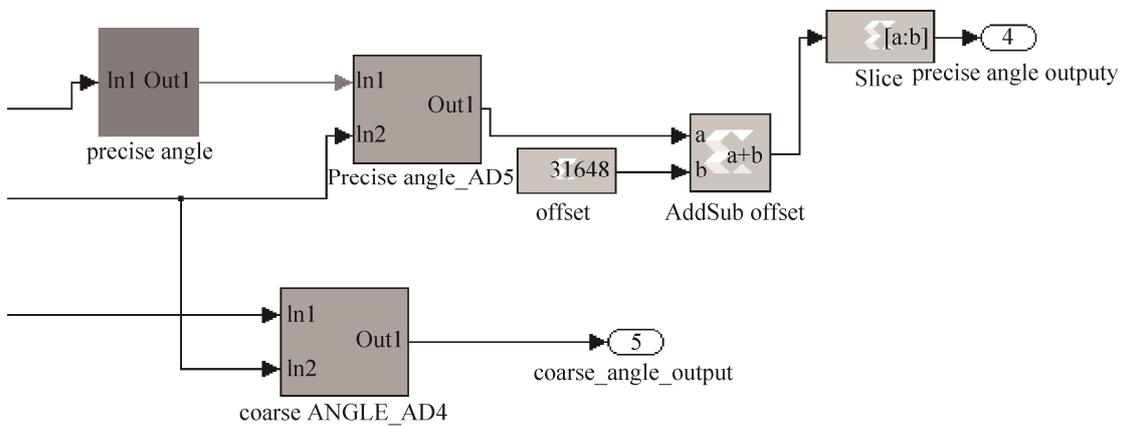


图7 粗精角度拆分  
Fig. 7 Angle separation

### 3.5 质心更新与计算模块

此部分仿真电机负载光学相机的部分功能: 光学相机向控制系统反馈质心, 控制系统通过控制电机转动改变电机角度从而改变光学相机的反馈质心, 直至到达目标质心的位置。反馈的初始质心可以通过测试系统界面设置。图8直观地描述了电机指向角的变化与相机反馈质心变化之间的空间关系。图9是Simulink中的结构图。

### 3.6 电机模型反馈输出模块

仿真模型反馈给控制系统的变量有粗精角度、电流、质心。与之对应, 模型的输出模块模拟了三种设备的功能: 测角板, 电流多路选择分时输出器,

质心判断输出; 此外, 在输出之前需对各个模拟量进行数字化处理, 计算输出的频率由时钟控制。

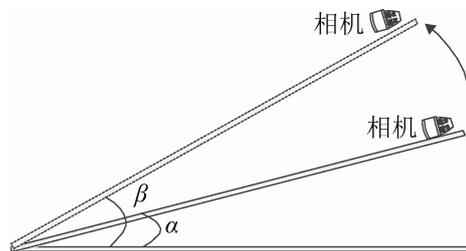


图8 质心随机械角度变化原理图  
Fig. 8 Schematics diagram demonstrating the relationship between centroid and angle

## 4 MATLAB 实现及验证

用 MATLAB 搭建模型的时候, 对以上各时域

方程进行 S 变换, 采用一定的采样率对其进行零阶保持离散化, 就可用 Xilinx 模块搭建。采样率越大, 系统的计算步长越小, 得到的计算结果也相对精确, 但是过高的采样率对系统处理器要求过高, 占用大量的资源; 参数选取时需综合考虑资源和准确性两方面的要求。整体设计框图如图 10。

仿真中, PMSM 的参数选取如下:

定子相绕组电阻  $R=1.9 \Omega$ , 直轴电感  $L_d=0.0033 L$ , 交轴电感  $L_q=0.0029 L$ , 转动惯量

$J=0.75 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ , 阻尼系数  $B=0.02 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$ , 极对数  $p=6$ (以上参数均可通过配置参数界面进行修改)。

给电机提供三相占空比不同的 PWM 波激励, 验证模型输出的电流, 角度, 角速度以及转矩值。

**情景 1:** 给模型输入三相占空比均为 50% 的 PWM 波, 此时电机应处于不转动的初始状态, 输出的电流、转矩、角速度均为 0, 角度保持不变。仿真结果如图 11 所示(时间为 15 ms)。

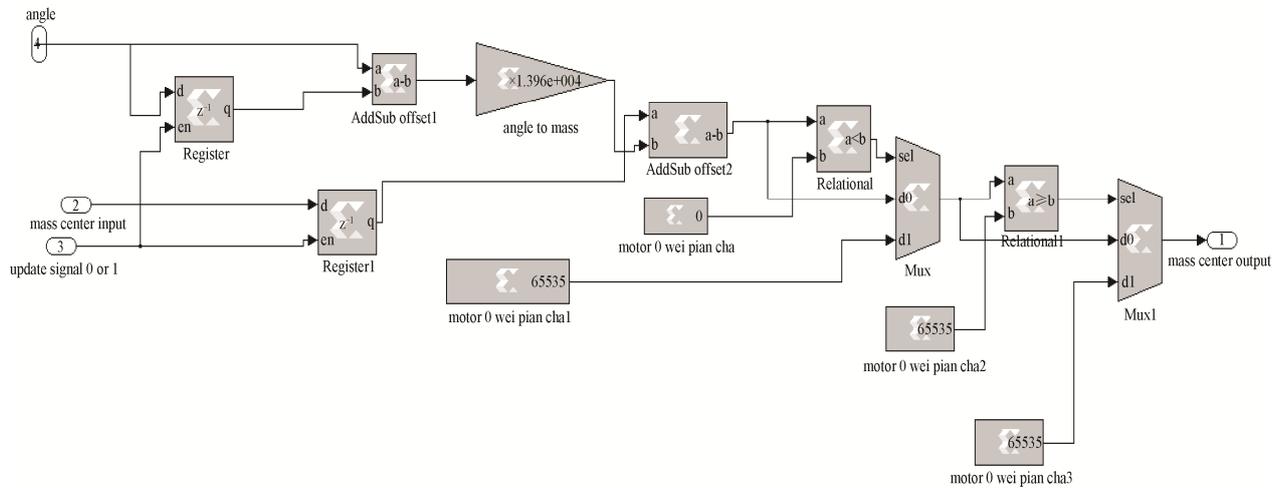


图 9 质心计算  
Fig. 9 centroid calculation

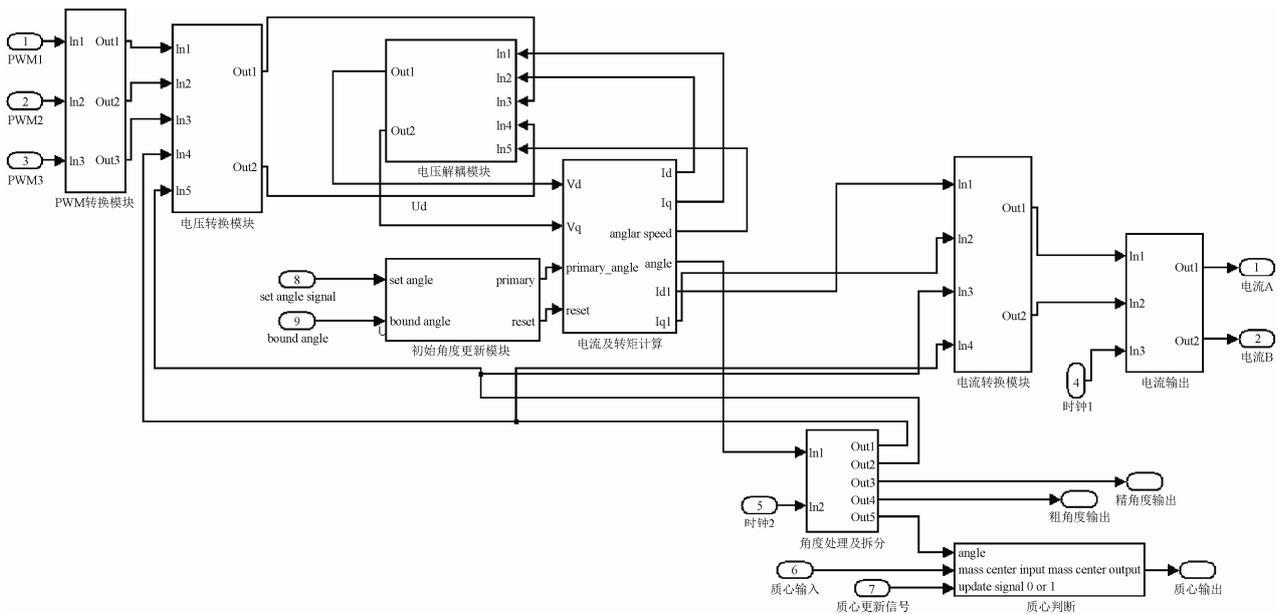


图 10 电机 MATLAB 仿真模型结构图  
Fig. 10 MATLAB simulation model diagram of PMSM

**情景 2:** 给电机提供三相占空比为 70%, 50%, 90% 的 PWM 波, 此时施加在电机上的三相电压不同, 电机开始转动, 并指向固定位置。仿真结果如图 12 所示(仿真时长为 15 ms)。

可以看出 A,B 两相电流输出固定值(前两条曲线), 最终电机指向固定角度(第三条曲线)。

**情景 3:** 给电机提供三相正弦波, 电机的电流及角速度也呈正弦变化。仿真结果如图 13 所示(仿

真时长为 15 ms)。

理论上, 电机在三路相同的 PWM 激励下应该保持不动, 各相电流为 0; 在一组固定占空比 PWM 波激励下应该指向一个固定位置, 在正弦波激励下, 电流和角速度均呈现正弦的变化规律。电机模型在这三种激励下的响应图可以确定电机建模的正确性。

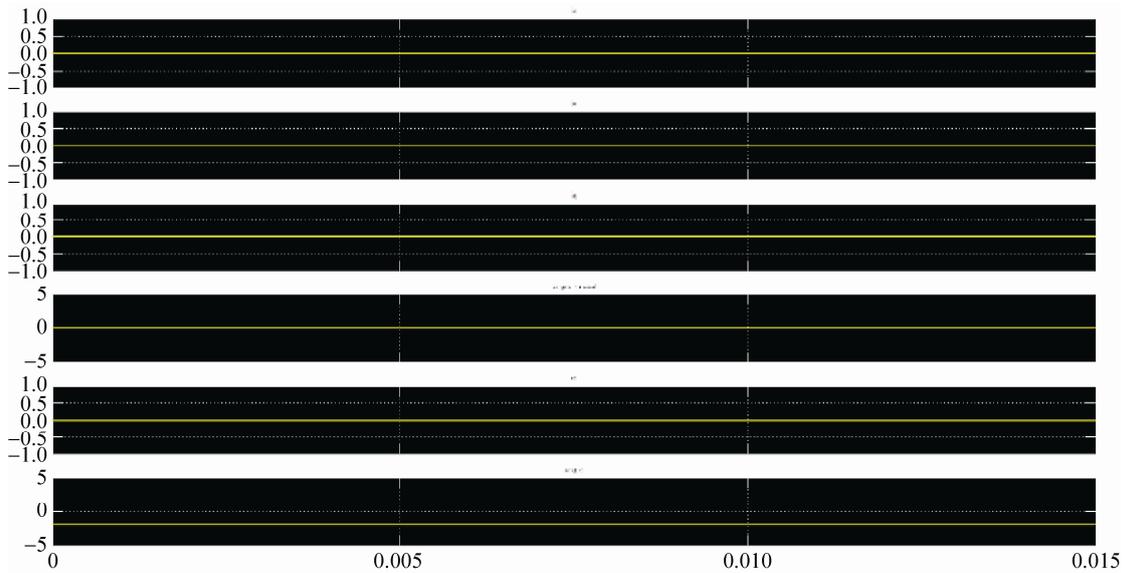


图 11 三相占空比为 50% 的 PWM 激励下电机输出的电流和角度

Fig. 11 Current, angle output under the driving of 50% duty cycle PWM (Three-phase)

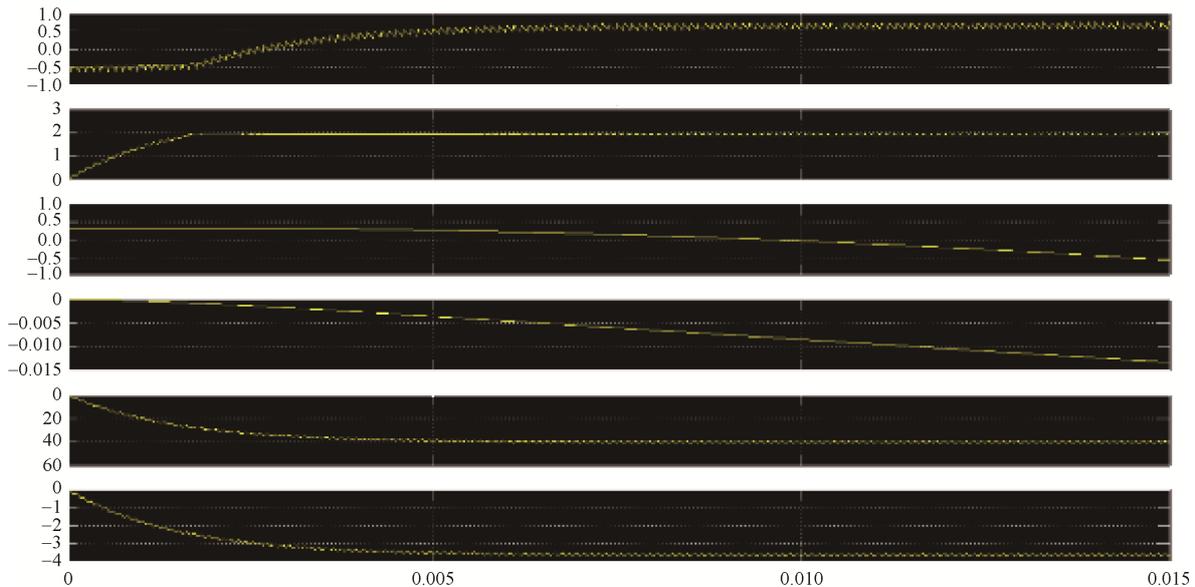


图 12 三相占空比为 70%, 50%, 90% 的 PWM 激励下电机输出的电流和角度

Fig. 12 Current, angle output under the driving of 70%, 50%, 90% duty cycle PWM

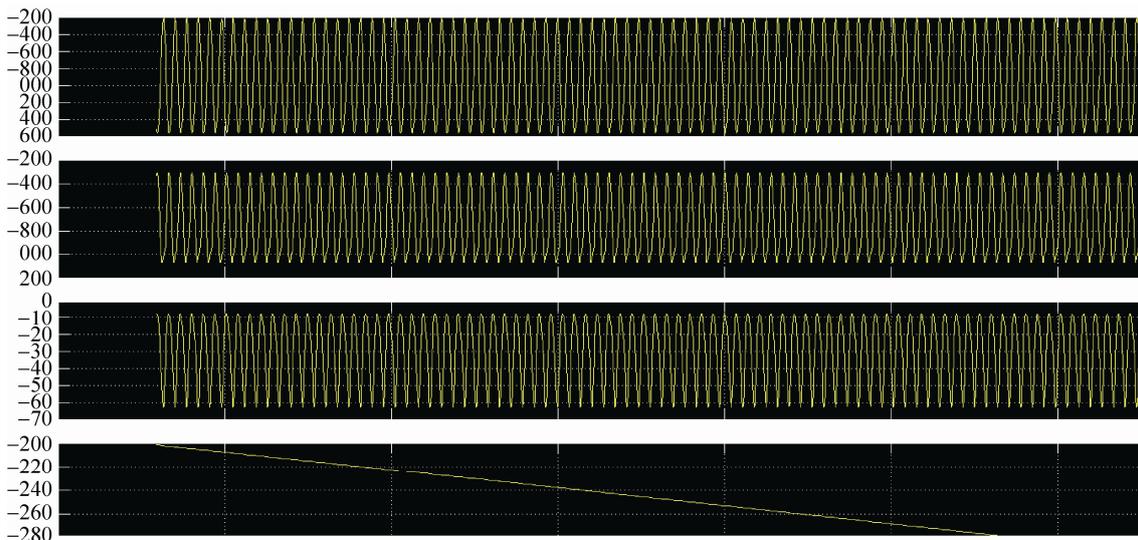


图 13 三相正弦激励下电机输出的电流和角度

Fig. 13 Current angle output under the driving of Three-phase sinusoidal

### 5 物理实时仿真平台以及板级调试

电机模型的 FPGA 硬件平台实现是本次电机建模的创新之一; 模型经 FPGA 实现后, 将电机的特性集成到 FPGA 一些电气属性, 可以用 FPGA 中实现了的物理电机模型进行一系列的正常异常测试, 既可以避免对实际电机造成损坏, 又能避免实验过程中更换电机造成的精度不匹配的问题<sup>[10]</sup>; 且借助于 FPGA 器件资源丰富、现场可编程的优势, 通过将模型合理拆分, 高频采样等手段实现实时仿真模型, 确保模型实现后的实时性和精度满足测试要求。

本模型实现编码的物理器件为 Xilinx 的 Virtex5-110t; 代码实现除了模型本身的功能代码实现外, 还通过硬件扩展, 实现了和被测件的逻辑接口, 以及各种异常状态在接口层面的旁路实现。最终代码占用的逻辑资源如下:

RAM: 59% LUT: 54% DSP: 93%

包含电机物理实时仿真模型的测试系统结构如图 14 所示。

实际电机的参数与文献标定的参数具有一定的偏差, 所以我们需要基于文献标定的参数对模型参数进行微调, 使得电机模型能够更加接近实际运行的电机。

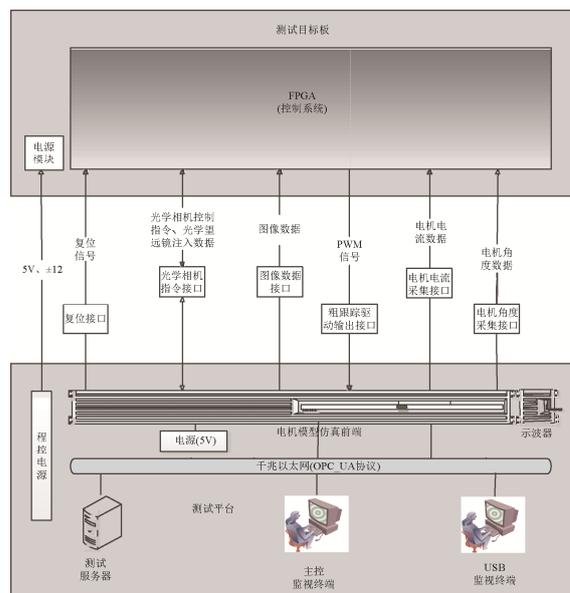


图 14 闭环测试系统

Fig. 14 close-loop test system

控制系统内部采用的是三环控制(电流环, 速度环, 位置环), 板级验证中对三环分别进行验证。

首先是电流环, 在这里以阶跃输入作为系统的参考输入, 来观察电流环的阶跃响应效果。利用 Chipscope 工具, 采集控制系统内部的参考输入电流(阶跃)以及模型反馈电流, 调试中发现模型的电流环阶跃响应与电机的转动惯量密切相关, 采用二分法来逐步获得较好的阶跃响应, 电流环的阶跃响应如图 15 所示。

图中的阶跃直线为电流环的参考输入，曲线部分为采集电机模型的输出电流，可以看到经过参数调节的电机电流环的阶跃响应准确又快速。

其次观察速度环的阶跃响应，仍借助于 Chipscope 工具，采集控制系统内部的参考输入速度(阶跃)以及仿真模型反馈速度，速度环的阶跃响应与电机的摩擦转矩系数以及转动惯量有关，保持上一步调节好的转动惯量不变，调节摩擦系数，直到获得较好的速度环响应，速度环的阶跃响应如图 16 所示。

图中的阶跃直线为速度环的一组参考输入，

曲线部分为电机模型速度环的输出，可以看到经过参数调节的电机速度环的多点阶跃响应快速准确。

并且通过位置环的验证，电机仿真模型的指向精度可到达 0.000 1 度以内，质心追踪精度在 10 个数字量以内(约 0.3 个像素)，同时可以根据测试需要，通过测试系统设置电机的初始角度以及相机的初始质心，还可以构建电机故障的测试场景(比如设置电机停留在一个固定角度来模拟电机不转的故障)，保障了测试充分性。

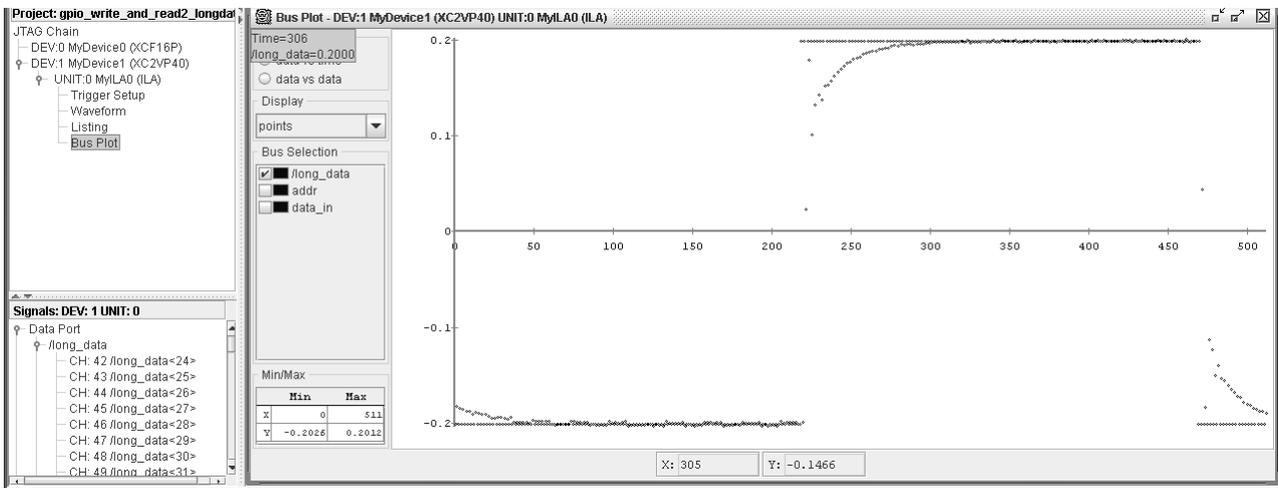


图 15 电流环阶跃响应

Fig. 15 Step response of the current loop

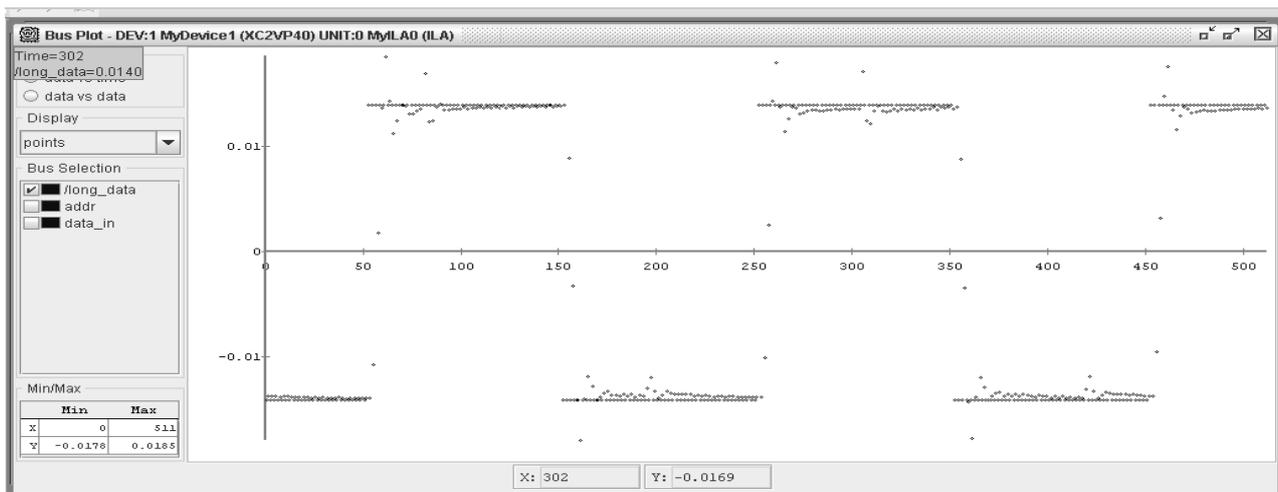


图 16 速度环阶跃响应

Fig. 16 Step response of the speed loop

## 6 结论

基于 MATLAB/SIMULINK System generator, 建立了三相交流永磁同步电机物理实时仿真模型。模型通过对输入激励高频采样并经由寄存器寄存、放大器放大再输出完成了从 PWM 波到三相电压的转换, 并且准确的构建出电机系统对于输入激励的响应过程。该仿真模型在 FPGA 实现后, 经过硬件扩展, 与被测对象一起构成了实时闭环测试系统, 经板级调试后达到很高的指向以及追踪精度, 成功应用于对某航天软件系统的正常工作模式以及故障模式下的测试, 同时也为其他复杂执行机构仿真测试提供了一个参考平台。

### 参考文献:

- [1] 苏宇, 张涛, 王相阳, 等. 有限转角直流无刷电机的建模与实现[J]. 计算机仿真, 2013, 30(4): 72-73.  
Su Yu, Zhang Tao, Wang Xiangyang, et al. Modeling and Implementation of Limited Angle Brushless DC Motor[J]. Computer Simulation, 2013, 30(4): 72-73.
- [2] 张成, 王富东, 李胜宁, 等. 基于 MATLAB/Simulink 的永磁同步电机矢量控制[J]. 苏州大学学报, 2011, 31(3): 63-67.  
Zhang Cheng, Wang Fudong, Li Sheng ning, et al. Vector control of permanent magnet synchronous motor based on MATLAB/Simulink[J]. JOURNAL OF SOOCHOW UNIVERSITY, 2011, 31(3): 63-67.
- [3] 丁文, 高琳. 永磁同步电机矢量控制系统的建模与仿真[J]. 微电机, 2010, 13(12): 77-82.  
Ding Wen, Gao Lin. Modeling and Simulation of Vector Control System for PMSM[J]. Micromotors, 2010, 13(12): 77-82.
- [4] 任先进, 余继良. 永磁同步电机空间矢量脉宽调制系统仿真[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(9): 12-16.  
Ren Xianjin, Yu Jiliang. Simulation of PMSM Based on Sine Pulse Width Modulation[J]. Electric machines and Control application, 2014, 41(9): 12-16.
- [5] 蒋明军, 张学松, 盖绍凤. 基于 PMSM 伺服系统的建模与仿真设计[J]. 测试技术学报, 2011, 25(1): 16-20.  
Jiang Mingjun, Zhang Xuesong, Gai Shaofeng. Model and Simulation Based on the PMSM System[J]. JOURNAL OF TEST AND MEASUREMENT TECHNOLOGY, 2011, 25(1): 16-20.
- [6] 李浩男. 交流永磁同步电机磁场定向控制技术[D]. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2013: 35-38.  
Li Haonan. The Field Oriented Control Technology of AC Permanent Magnet Synchronous Motor[D]. Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics and fine mechanics and Physics. For the degree of Master of Science in Engineering, 2013: 35-38.
- [7] 田逸, Thmas A Lipo. 基于 MATLAB 软件的交流永磁同步电机调速系统研究[J]. 江苏电器, 2008, 12(5): 41-45.  
Tian Yi, Thomas A Lipo. AC Permanent Magnetic Synchronous Motor Speed Control System Study Based on MATLAB[J]. JIANSU DIANQI, 2008, 12(5): 41-45.
- [8] 田逸, 张茂青, T A Lipo. 基于 MATLAB 的交流永磁同步电机解耦控制研究[J]. 电气传动自动化, 2009, 31(3): 26-30.  
Tian Yi, Zhang Mao-qing, T A Lipo. Research on decoupling control of permanent magnet synchronous motor drive based on MATLAB[J]. ELECTRIC DRIVE AUTOMATION, 2009, 31(3): 26-30.
- [9] 江昊, 王建宇, 贾建军, 等. 空间量子通信粗跟踪系统设计研究[J]. 无线光通信, 2012, 6(4): 43-46.  
Jiang Hao, Wang Jianyu, Jia Jianjun, et al. Research on the design of space quantum communication rough tracking system[J]. Journal of Wireless Communications, 2012, 6(4): 43-46.
- [10] 刘静江, 黄永梅, 傅承毓. 空间光通信 ATP 系统中的跟瞄技术[J]. 光电工程, 2003, 30(4): 5-7.  
Liu Jingjiang, Huang Yongmei, Fu Chengyu. Tracking and pointing techniques used to ATP system for space optical communication[J]. Opto-Electronic Engineering, 2003, 30(4): 5-7.
- [11] 杨影, 陈鑫. 占空比调制的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(4): 13-15.  
Yang Ying, Chen Xin. Direct torque control of permanent magnet synchronous motor based on duty ratio control[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(4): 13-15.
- [12] 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[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(2): 165-167.  
Yin Yunhua, Zheng bin, Zheng Haoxin. A model simulation method of brushless dc motor control system based on Matlab[J]. Journal of System Simulation 2008, 20(2): 165-167.