

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.04.037

基于大功率无刷直流电动舵机的建模与分析

师振云*, 魏麟欢, 高亚奎

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 以某型飞机电动伺服控制系统中的大功率无刷直流电动舵机为研究对象, 利用 Matlab 完成无刷直流电机本体、减速器的数学建模, 考虑到经典 PID 算法的缺陷, 采用不完全微分 PID 算法实现对电动舵机的控制; 建模过程中充分考虑了产品内部减速齿轮机械间隙带来的非线性影响及外部负载的惯性转矩影响, 较准确地完成了某大功率电动舵机外在机械特性数学仿真。通过产品实测数据与仿真结果的对比分析, 充分验证了数学模型的正确性; 仿真模型也分析了产品目前设计不足之处, 为进一步优化指明方向。

关键词: 大功率电动舵机; 机械间隙; 不完全微分 PID; 仿真

中图分类号: V241 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017) 04-0037-06

舵机用于调整飞机舵面位置进而改变飞机的飞行姿态, 是飞控系统的重要组成部分。传统舵机采用液压源为动力, 对液压能源的需求量和可靠性都有较高要求, 飞机设计过程中常出现舵机对液压流量的需求大于液压泵可供最大流量的问题; 近年来, 随着无刷直流电机 (Brushless DC Motor, BLDCM) 控制技术的发展, 具有控制精度高、响应速度快, 同时又能充分利用飞机电能等特点的电动舵机已逐步应用在各型飞机上^[1,2]。受电动舵机控制技术复杂性的限制, 目前国内航空业广泛采用了额定功率小于 1kW 的电动舵机, 对于额定功率大于 5kW 的大功率电动舵机则仍处于技术空白阶段。某型飞机飞控系统研制过程中, 充分考虑能源配置、系统余度和舵面响应要求等综合因素, 决定采用额定功率为 15kW 的无刷直流电动舵机代替传统的液压舵机, 此项技术填补了国内航空业大功率无刷直流电机控制领域的空白。该电动舵机采用两台相互独立的三相稀土永磁无刷直流电动机作为动力源, 通过差速传动齿轮减速器实现两台电机的速度加和; 除电动舵机本体外, 还含有控制器、功率放大器和位置传感器等, 实现电动舵机的电流、速度和位

置三闭环控制。为确保可靠性和安全性, 该电动舵机采用主-热备份工作模式, 即单台电机失效后电动舵机仍能降速工作, 实现对舵面控制的响应。

1 工作原理

某大功率无刷直流电动舵机采用额定功率 15kW 无刷直流电机为动力源, 控制算法采用稳定余度较高的不完全微分 PID 控制实现电动舵机的电流、速度和位置三闭环控制; 为减小电机启动时对飞机电网系统的冲击, 采用“软启”工作方式; 为确保电机快速停止运动, 采用经典机械离合刹车。电动舵机位置闭环控制原理如图 1 所示。

电动舵机给定位置信号 U_a 反馈位置信号 U_b 生的偏差经位置调节器得到速度参考值 V_g ; 控制器测算出的电机当前转速 V_s 与参考速度 V_g 进行速率调节得到电流给定电压参考值 U_{ig} ; U_{ig} 与电机绕组电流反馈得到的当前主回路电流反馈电压值 U_{if} 计算后调节 PWM 波占空比, 控制功率开关管的导通与关断, 实现电动舵机的位置闭环控制^[3]。

收稿日期: 2016-12-13; 退修日期: 2017-02-06; 录用日期: 2017-02-24

* 通讯作者. Tel.: 029-86832246 E-mail: shizhenyun@21cn.com

引用格式: Shi Zhenyun, Wei Linhuan, Gao Yakui, et al. Modeling & Research based on certain high power brushless DC electrical actuator [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(04): 37-42. 师振云, 魏麟欢, 高亚奎. 基于大功率无刷直流电动舵机的建模与分析 [J]. 航空科学技术, 2017, 28(04): 37-42.

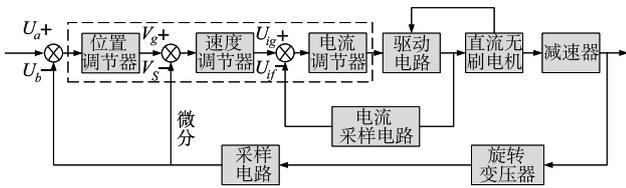


图1 电动舵机位置跟踪控制原理图

Fig.1 Electrical actuator position control theory

电机控制方面,经典PID控制算法引入的微分信号可改善系统的动态特性,但同时易引起高频干扰;为改善误差扰动突变特性,某电动舵机采用不完全微分PID算法(算法结构如图2所示),加入一阶惯性环节 $G_i(s)=\frac{1}{1+T_f s}$ (低通滤波),改善了舵机的动态稳定性^[4]。

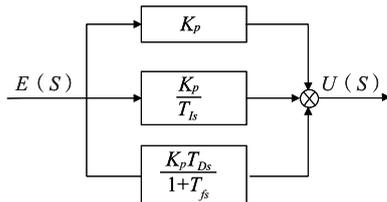


图2 不完全微分PID结构

Fig.2 Incomplete differential PID structure

2 技术参数

某型电动舵机采用两台技术指标完全相同的270V无刷直流电机驱动,是国内飞机采用的最大功率的电动舵机(额定功率15kW),技术指标如表1所示。

3 数学建模

3.1 BLDCM建模

稀土永磁无刷直流电机的气隙磁场、反电势、电流为非

表1 电动舵机技术参数

Table 1 Technical parameters of electrical actuator

名称		技术指标
电机本体	接线方式	三相Y形
	额定电压	270V±5%
	额定转速	7800rpm
	额定转矩	14.5N·m
电动舵机	额定功率	15kW
	行星减速器总减速比	10.37
	额定转矩	150N·m

正弦,因此,对电机本身相变量建立数学模型^[5]。假设磁路不饱和,忽略电枢反应影响,不计涡流和磁滞损耗,且三相绕组完全对称,则永磁无刷直流电机三相绕组电压平衡方程为:

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

式中: u_a, u_b, u_c 为定子三相电压(V); i_a, i_b, i_c 为定子三相电流(A); e_a, e_b, e_c 为定子三相电动势(V); L 为每相绕组自感(H); M 为每相绕组间的互感(H)^[6]。

电机机械运动方程为:

$$T_e - T_L = J \frac{dw}{dt} + Bw \quad (2)$$

式中: T_e 为电磁转矩, T_L 为负载转矩, w 为电机旋转机械角速度, J 为电机自身及减速器折算到电机输出轴上的转动惯量和^[7]。

根据无刷直流电机电压平衡方程、转矩平衡方程及建立的PWM模块、斩波模块、三相全桥逆变模块,可实现无刷直流电机的仿真模型,如图3所示^[8,9]。

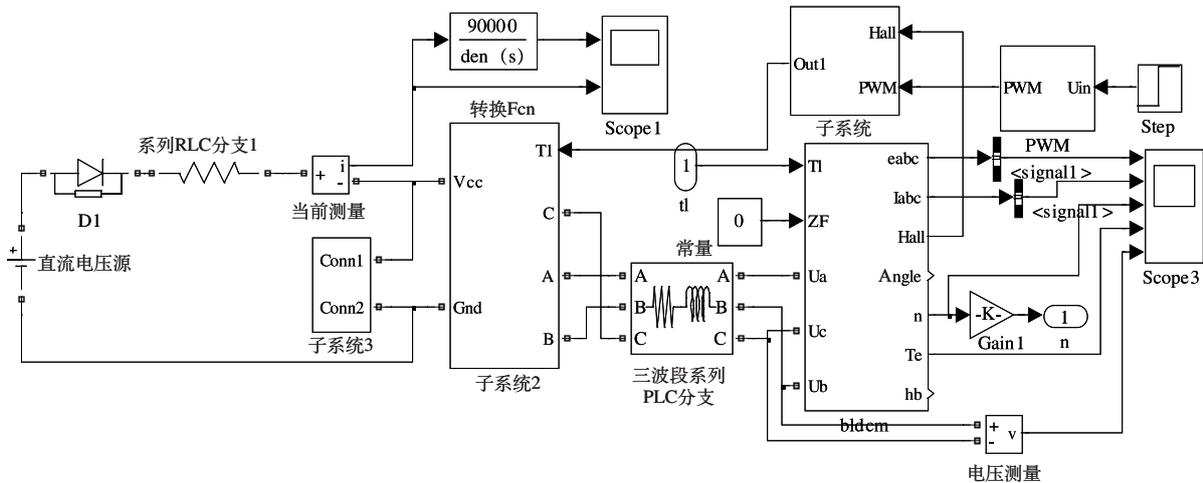


图3 电机本体数学模型

Fig.3 BLDCM model

图3中输入信号 U_a, U_b, U_c 为三相电压, T_l 为负载转矩, Z_f 为电机正反转信号, 输出 e_{abc} 为三相反电势, i_{abc} 为线电流, Hall 为开关信号, Angle 为电机电角度, n 为电机转速, T_e 为电磁转矩。

3.2 转动惯量折算

电动舵机无刷直流电机通过减速机构实现减速增扭后, 输出扭矩和转速信号。故计算电机转动惯量时, 要将减速机构的转动惯量折算到电机轴上, 如图4所示。

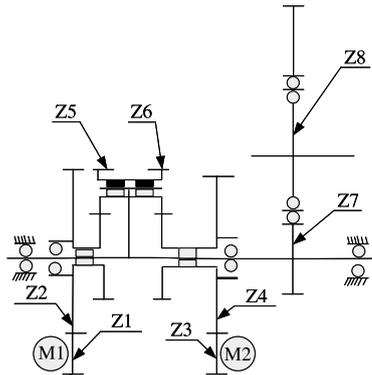


图4 减速器结构
Fig.4 Reducer structure

减速机构转轴飞轮矩为 GD_f^2 , 其动能折算到电机输出轴上后, 能量保持不变, 则:

$$\frac{1}{2} \frac{GD_f^2}{4g} \left(\frac{2\pi n_f}{60} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{GD_f^2}{4g} \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2 \quad (3)$$

式中: GD_f^2 为转轴飞轮矩, g 表示重力加速度, J 表示转动惯量, GD_f^2 为折合成到电机转轴上的飞轮矩。

减速器折合成到电动机轴上总飞轮矩 GD^2 为:

$$GD^2 = GD_a^2 + \frac{GD_b^2}{j_1^2} + \frac{GD_c^2}{(j_1 j_2)^2} + \dots + \frac{GD_f^2}{j^2} \quad (4)$$

由式(4)得舵机总转动惯量:

$$J = J_a + \frac{J_b}{j_1^2} + \frac{J_c}{(j_1 j_2)^2} + \dots + \frac{J_f}{j^2} \quad (5)$$

考虑到减速器非对称布置的特性, 根据式(5)可计算出: 电机1在电机2处于静止状态时的舵机总转动惯量 $J_1 = 4400700 \text{g} \cdot \text{mm}^2$; 电机2在电机1处于静止状态时的舵机总转动惯量 $J_2 = 4400700 \text{g} \cdot \text{mm}^2$ 。

3.3 有间隙二惯性系统模型

电机本体和负载之间的减速机构存在机械间隙, 将造成电机已开始运动而负载却完全未动的情况, 使得系统成为一种具有死区的二惯性系统。这种非线性因素的影响, 在电动舵机建模过程中必须加以考虑。图5为单组减速器模型。

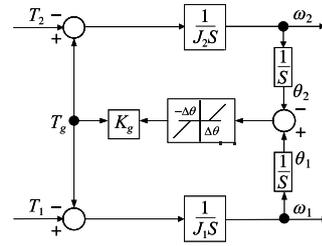


图5 单组减速器模型
Fig.5 Gearbox model

图5中, K_g 为齿轮齿的弹性系数, ω 为角速度, θ 为变位角, J 为转动惯量, T 为转矩, T_g 为齿轮转矩, $\Delta\theta$ 为间隙角, s 为拉普拉斯算子, 下标1表示驱动轮侧系数, 下标2表示负载侧参数。

式(6)~式(8)为考虑间隙时齿轮组特性表达式。

$$T_g = K_g [\theta_1(s) - \theta_2(s) \pm \Delta\theta] \quad (6)$$

$$\begin{cases} \theta_1(s) = \theta_{10} + \frac{w_1(s)}{s} \\ \theta_2(s) = \theta_{20} + \frac{w_2(s)}{s} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} w_1(s) = w_{10} + \frac{T_1(s) - T_g(s)}{J_1 s} \\ w_2(s) = w_{20} + \frac{T_2(s) - T_g(s)}{J_2 s} \end{cases} \quad (8)$$

基于式(6)~式(8), 建立带有间隙二惯性系统的齿轮转矩补偿模型, 如图6所示。

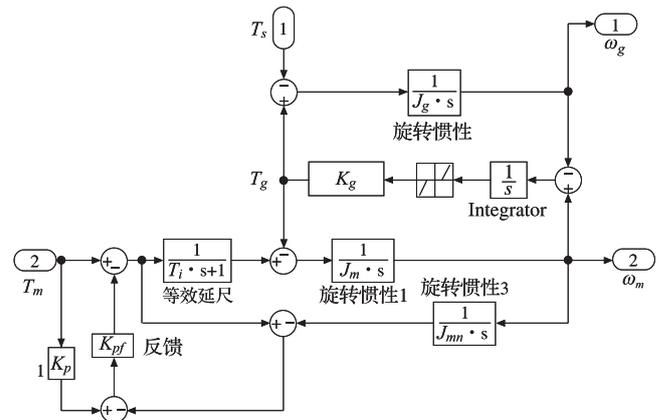


图6 有间隙二惯性系统模型
Fig.6 Two-inertia system model with backlash

4 仿真与实测结果对比

在充分考虑外载转动惯量和减速器机械间隙的同时, 基于BLDCM本体模型, 利用Matlab/Simulink建立电动舵

机的仿真模型,如图 7 所示。

在 5.15N·M、26.41N·M 两种典型外载作用下,对比分

析电机的 AC 线电压 (V)、B 相电流 (A)、BC 线电压 (V) 的仿真曲线和实测结果,如图 8 所示。

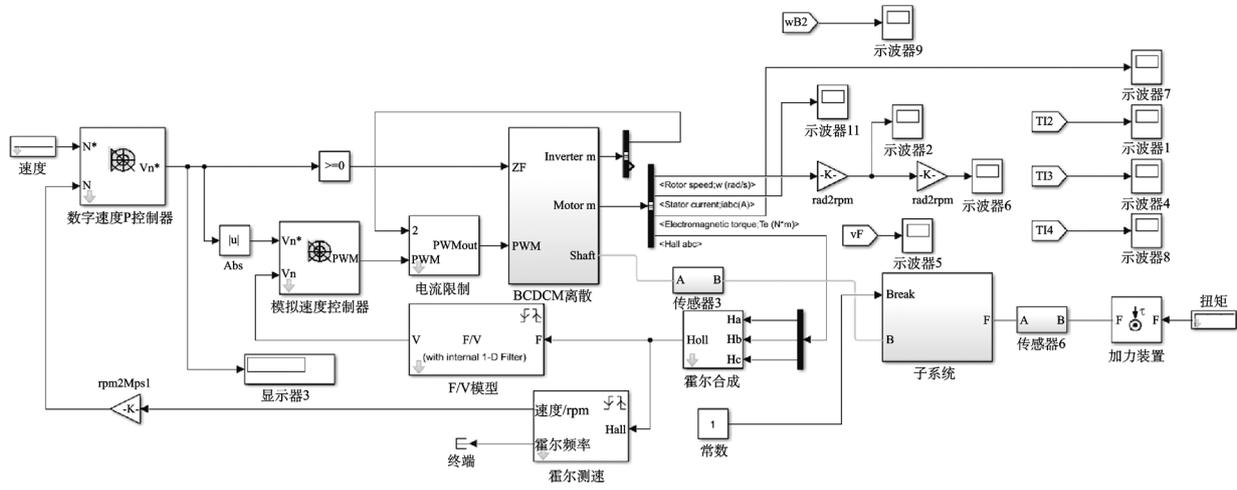
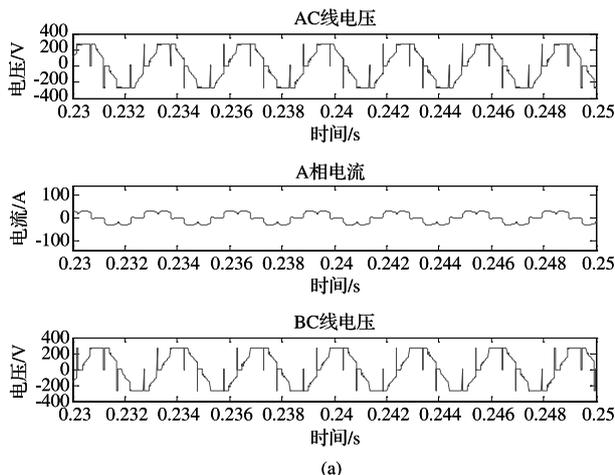
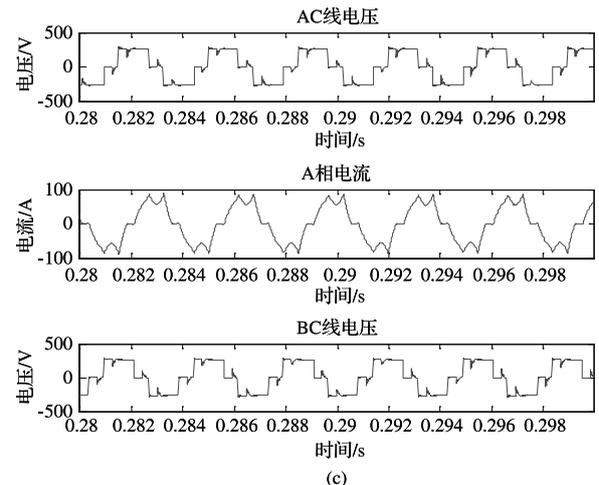


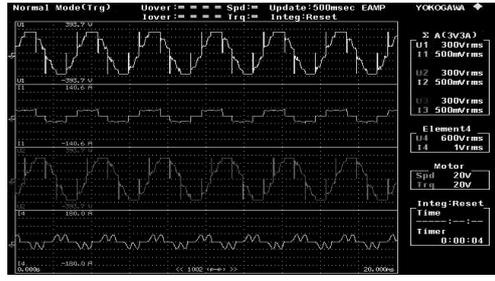
图 7 电动舵机 Simulink 模型
Fig.7 Electrical actuator Simulink model



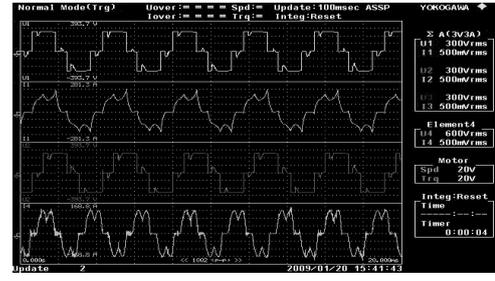
(a)



(c)



(b)



(d)

图 8 仿真与实测结果
Fig.8 Simulation and measure results

图 8 (a)、图 8 (b) 分别为 5.15N·M 负载下的仿真值与实测值,图 8 (c)、图 8 (d) 分别为 26.41N·M 负载下的仿真值与实测值。

分析图 8 可知,不同负载下线电压和相电流的仿真结果与实测结果波形完全一致;负载 26.41N·M 时线电压仿真结果为 370V,与实测值 393.7V 之间的最大误差不超过

6%, 仿真模型具有较高的准确性。对该舵机高速额定负载时离合器刹车的电机制动进行仿真, 从上到下依次是转速 (r/min), A 相电流 (A), BC 线电压 (V), 转矩 (N·m), 横轴表示时间 (s), 仿真波形如图 9 所示。

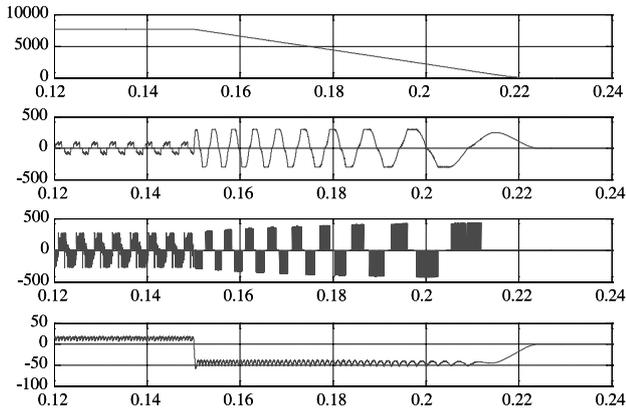


图 9 电机制动仿真结果

Fig.9 Simulation results of motor braking

分析图 9 可知, 电动舵机由 7800rpm 减速到 0 所需时间为 0.22s, 刹车过程中电压由 270V 泵升至 450V, 将对电网产生冲击。

5 结论

通过对某型飞机大功率电动舵机的性能仿真及性能实测, 有以下结论:

(1) 仿真模型搭建过程中充分考虑了不完全微分 PID 控制算法、减速器转动惯量及减速器机械间隙导致的非线性因素, 模型具有较高的准确性。

(2) 通过典型负载条件下电机线电压、相电流等指标仿真与实测结果对比, 仿真波形与实测波形完全相同, 大负载时线电压的仿真精度误差可控制在 6% 之内。

(3) 舵机可实现高速离合器刹车, 满足设计要求 ($\leq 1s$); 但刹车过程中存在较大母线电压泵升, 对飞机电网系统产生较大冲击, 因此, 需要增加刹车电阻对刹车能量进行释放, 降低线电压, 保护电容和功率器件。

AST

参考文献

[1] 郭雪梅, 贾宏光, 冯长有. 无刷直流电机位置跟踪的模糊 PID 控制 [J]. 长春理工大学学报, 2008, 37 (1): 97-101.
GUO Xuemei, JIA Hongguang, FENG Changyou. Position-tracking based on fuzzy PID control of brushless DC motor[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology,

2008, 37 (1): 97-101. (in Chinese)

- [2] 钟晓伟, 宋蛰存, 姜忠. 模糊 PID 控制器在无刷直流电机控制系统中的应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37 (8): 87-89.
ZHONG Xiaowei, SONG Zhecun, JIANG Zhong. The application of fuzzy PID controller on brushless DC motor control system[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2010, 37 (8): 87-89. (in Chinese)
- [3] 陈涛, 郑文婧, 胡淮浦. 基于 Matlab/Simulink 的模糊 PID 双闭环直流电机调速 [J]. 中国科技信息, 2009 (6): 137-140.
CHEN Tao, ZHENG Wenjing, HU Huaipu. Fuzzy PID control with two closed loop of brushless DC motor's velocity adjustment based on Matlab/Simulink [J]. Chinese Science and Technology Information, 2009 (6): 137-140. (in Chinese)
- [4] 忽麦玲, 张光辉, 卫平, 等. 双电机驱动伺服系统的建模与分析 [J]. 火炮发射与控制学报, 2008 (2): 93-96.
HU Mailing, ZHANG Guanghui, WEI Ping, et al. Modelling and analysing based on double-DC drive sever system [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2008 (2): 93-96. (in Chinese)
- [5] 海老原大树. 电动机技术实用手册 [M]. 王益全, 译. 北京: 科学出版社, 2006: 590-595.
HAI Laoyuandashu. Motor technical handbook [M]. WANG Yiquan, translated. Beijing: Science Press, 2006: 590-595. (in Chinese)
- [6] 刘刚, 王志强, 房建成. 永磁无刷直流电机控制技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 234.
LIU Gang, WANG Zhiqiang, FANG Jiancheng. Brushless DC motor technical and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2008: 234. (in Chinese)
- [7] 侯虹, 郭栋, 李建军. 一种数字无刷电动舵机的原理建模 [J]. 电光与控制, 2011, 18 (6): 74-78.
HOU Hong, GUO Dong, LI Jianjun. Modeling based on a certain digital brushless motor[J]. Electronics Optics & Control, 2011, 18 (6): 74-78. (in Chinese)
- [8] LI Y Y, SHENG A D, WANG Y G. Synthesis of PID-type controllers without parametric models: a graphical approach [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49 (8): 2392-2402.
- [9] 晁盛远, 王凯, 刘富勇. 无刷直流电机系统的建模与仿真 [J].

计算技术与自动化, 2008, 27 (2): 39-43.

CHAO Shengyuan, WANG Kai, LIU Fuyong. Modelling and simulation of brushless DC motor System [J]. Computing Technology and Automation, 2008, 27 (2) : 39-43. (in Chinese)

作者简介

师振云 (1982—) 男, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞行控制系统总体设计。

Tel: 029-86832246

E-mail: shizhenyun@21cn.com

Modeling & Research Based on High Power Brushless DC Electrical Actuator

SHI Zhenyun*, WEI Linhuan, GAO Yakui

The AVIC First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: Aimed at a certain kind of aircraft's electrical sever system, mainly focused on high power electrical actuator, built model of brushless motor and reducer based on Matlab. Considering drawback of classical PID, used inexact differential PID to control electrical actuator, and some critical impacts, such as reducer's mechanical backlash, inexact differential PID and nonlinear influence were also taken into consideration. Finally obtained a certain high power electrical actuator mechanical performance accurately. The comparing of simulation results and real test results, prove the accuracy of model, and it also provides theory support to design and optimize the product.

Key Words: high power electrical actuator; mechanical backlash; inexact differential PID; simulation

Received: 2016-12-13; Revised: 2017-02-06; Accepted: 2017-02-24

*Corresponding author. Tel. : 029-86832246 E-mail: shizhenyun@21cn.com