

文章编号:1674-8190(2017)04-388-06

# 基于双回路控制的电动负载模拟器研究

税洋, 尉建利, 闫杰

(西北工业大学 航天学院, 西安 710072)

**摘要:** 电动舵机负载模拟器可在实验条件下模拟飞行器飞行过程中舵机受到的空气动力铰链力矩, 是半实物仿真的重要设备。在介绍电动负载模拟器研究进展并指出目前伺服系统研究所面临的难题的基础上, 以改善系统动态响应为目标, 设计基于双回路电机的加载方案并建立双回路系统的数学模型; 通过系统仿真, 分析系统输出力矩对指令力矩的跟踪能力, 验证数学模型的准确性。结果表明: 双回路方案有效地抑制了系统多余力, 其工作频带在舵机扰动的情况下仍可达 35 Hz, 为电动负载模拟器提供了一种频带更高、匹配性更好的实现方案。

**关键词:** 电动负载模拟器; 双回路电机; 多余力; 高频带; “双十”指标

**中图分类号:** TP271<sup>+</sup>.4

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2017.04.004

## Research of Electric Load Simulator Based on Double-loop Control

Shui Yang, Wei Jianli, Yan Jie

(School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Electric load simulator, which can simulate aerodynamic loads acting on aircraft rudder during flight under laboratory conditions, is an important equipment in hardware-in-loop simulation. The article introduces the contemporary research progress and the challenges confronted with electric load simulator. In order to improve the dynamic frequency response, a kind of double-loop motor driven load simulator with rapid response is introduced. The mathematical model of the load simulator is established and is verified by the comparison of output torque and command torque. It is indicated that the double-loop load simulator restrains the disturbance torque effectively, and can reach the frequency band at 35 Hz with steering gear perturbation under simulation circumstances. The research provides an implementation with higher frequency and better compatibility for electric load simulator.

**Key words:** electric load simulator; double-loop motor; disturbance torque; high-frequency band; dual-ten index

## 0 引言

负载模拟器可在半实物仿真实验中模拟飞行器舵面所承受的气动载荷, 测试飞行器舵机系统的性能, 其动态性能通常在“双十”指标下进行评价。按驱动装置的不同, 负载模拟器可分为电液式和电动式两种, 在高精度、高频响等加载领域, 电液式负载模拟器已被电动式负载模拟器所取代<sup>[1]</sup>。

由于负载模拟器相关系统多运用于国防领域, 国外可供检索的资料很少。美国的 Boeing 公司、Carco 公司是负载模拟器的主要研究和生产厂家<sup>[2-3]</sup>; 日、法、德等国均围绕负载模拟器开展了各个方面的研究, 并设计了符合应用要求的系统及配套的原理样机; N. Ullah 等<sup>[4]</sup>介绍了采用模糊自适应控制的交流电动负载模拟器, 其多余力抑制比可达 95% 以上。近年来, 国内也对电动系统及其多余力的抑制进行了较为深入地研究<sup>[5-8]</sup>, 表明提高负载模拟器工作频带的关键是抑制多余力, 通常可从选择适配的加载执行机构和改善系统控制方法两方面展开研究。目前, 电动加载执行机构多采用

收稿日期: 2017-11-04; 修回日期: 2017-11-22

通信作者: 尉建利, weijianli@mail.nwpu.edu.cn

力矩电机和永磁电机,符文星等<sup>[9]</sup>提出了一种基于直流力矩电机的大力矩电动加载系统,输出力矩为 200 Nm,频带可达 10 Hz;王鑫等<sup>[10]</sup>在系统中引入弹簧杆的弹性环节,降低了系统多余力的同时还提高了加载性能;刘松斌<sup>[11]</sup>采用永磁同步电机作为配套的加载电机,探讨了电机机械惯量和驱动方式对系统频带的影响。

从 21 世纪初发展至今,国内 20 Hz 电动加载技术已相对成熟,但随着现代空战对空空导弹等机动性能和控制精度要求的提升,舵机系统已逐步向快速、机动及小型化转变<sup>[12]</sup>,某些电动舵机的频带已达到 25 Hz 以上<sup>[13]</sup>,现有的负载模拟器并不能完全满足高性能系统的试验要求。从实际控制角度分析,舵机的运动对负载模拟器形成位置扰动(多余力),电机不仅要进行力矩加载,还要进行位置跟踪,其快速性和精度无法兼备:快速性需要高增益,高增益导致系统稳定性下降,难以满足多飞行条件下的鲁棒性要求。通常采用控制的方式补偿多余力,但补偿效果有限。

本文从结构入手,以改善系统动态频响为目标,提出基于双回路电机的负载模拟器方案,并建立双回路系统的数学模型;该双回路电动负载模拟器由两条回路分别完成位置伺服和力矩伺服,通过系统仿真,验证所提双回路负载模拟器模型的准确性。

## 1 双回路伺服电机结构

### 1.1 双回路系统设计思想

双回路负载模拟器的设计思想是:在力矩加载系统的力矩控制主回路之外再引入另一角度位置同步跟踪回路,该回路的主要作用是使加载电机的角位置运动能够跟踪舵机的角位置运动,从而确保加载电机和舵机的转角差可以维持在一个期望值上<sup>[4]</sup>,即结构上采取双回路进行加载,令舵机运动与位置回路的作用相抵消,最大限度地减小被加载对象带来的位置扰动。传递到电机侧的控制指令主要由两方面构成:一是加载回路的加载指令,二是位置跟踪回路给出的指令。双回路电机的原理是将舵机运动引起的力矩干扰,由传统的力矩回路抑制转换为由响应更快的位置回路进行抑制,进而提高系统的响应特性。双回路电机原理框图如图 1 所示。

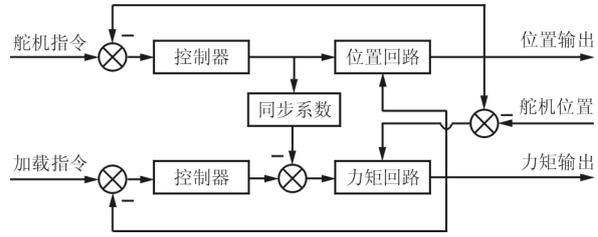


图 1 双回路电机原理框图

Fig. 1 Functional block of double-loop motor

从图 1 可以看出:系统是一个双输入、双输出的系统,对舵机和位置回路的输出位置之差进行反馈,形成闭环系统,可提高系统和舵机之间的位置同步精度,有效抑制多余力带来的影响。

### 1.2 双回路电机结构

双回路电机采用双转子/双定子结构,通过弹性连接件串联起来,如图 2 所示。舵机系统、位置回路与力矩回路同轴连接,从电机外部看,仅有一个输出端。两个定子分别产生磁势,其中力矩定子的磁势与力矩转子磁场相互作用,作为输出端输出加载力矩;位置转子跟踪舵机的位置,用于补偿电机转轴与舵机转轴之间的转角差,实现两个回路的位置同步控制;通过弹簧杆,位置转子运动将带动力矩转子跟随其运动,并减小双回路间因耦合作用产生的多余力;旋转编码器作为角度传感装置,与位置转子固连,用于测量脉冲数量以获得舵机输出的角位置信号。

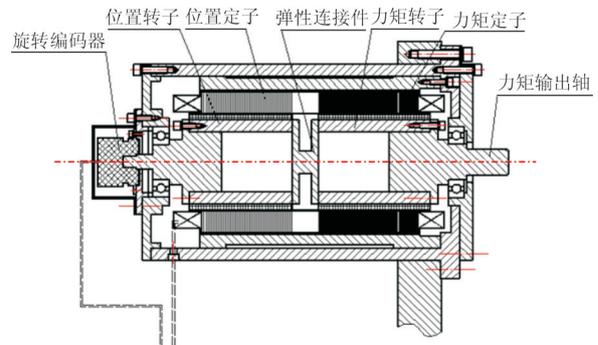


图 2 双回路电机结构

Fig. 2 Structure of double-loop motor

## 2 双回路系统数学模型

### 2.1 位置回路数学模型

位置回路主要由前馈网络、反馈回路和输入补

偿网络组成,其作用是使伺服电机的位置输出能够实时、准确地跟踪舵机位置。位置回路的控制框图如图 3 所示。

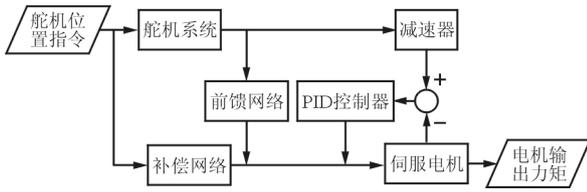


图 3 电机位置回路控制框图

Fig. 3 Control block of location tracking loop

(1) 前馈网络传递函数

综合补偿后系统的频带和实现难易程度等因素,分别采用角度、角速度和角加速度进行前馈补偿,其传递函数为

$$G_Q(s) = \frac{k_m}{s} + k_v + k_a s \quad (1)$$

(2) 反馈回路传递函数

为了让伺服电机位置输出能够跟踪舵机位置,设计 PID 反馈控制器,该方法的实用性较好,架构简易,具有理想的动态响应、稳态特性,良好的同步精度、鲁棒性,同时,在抗干扰方面也表现突出,可适用于非线性、时变、强干扰等特殊情况。反馈回路的传递函数为

$$G_F(s) = \frac{k_P}{s} + k_I + k_D s \quad (2)$$

(3) 补偿网络数学模型

为了提高加载控制系统的响应速度、降低调节时间、减小稳态误差,引入舵机位置指令输入信号补偿环节<sup>[14]</sup>,其系统框图如图 4 所示, $G(s)$ 为 PID 反馈控制系统开环传递函数; $G_r(s)$ 为补偿环节的传递函数。

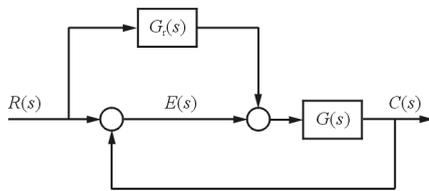


图 4 补偿环节控制框图

Fig. 4 Control block of compensation unit

由图 4 可知,系统输出为

$$C(s) = [E(s) + G_r(s)R(s)]G(s) \quad (3)$$

系统误差为

$$E(s) = R(s) - C(s) \quad (4)$$

则

$$C(s) = \frac{[1 + G_r(s)]G(s)}{1 + G(s)}R(s) \quad (5)$$

若选择补偿网络的传递函数为

$$G_r(s) = \frac{1}{G(s)} \quad (6)$$

则式(5)可表示为

$$C(s) = R(s) \quad (7)$$

由式(7)可知,对于各个时刻的输出,均能够无误差地复现其实际输入量,存在较为理想的时间响应特征。

对于加载系统,其开环传递函数  $G(s)$  可表示为

$$G(s) = KG_D(s)G_S(s)G_F(s) \quad (8)$$

式中: $K$  为系统总增益; $G_D(s)$  为舵机系统传递函数; $G_S(s)$  为伺服系统传递函数; $G_F(s)$  为反馈控制系统传递函数。

因为伺服系统带来的延迟和误差相对舵机系统可以忽略,所以式(8)可近似表示为

$$G(s) = KK_s G_D(s)G_F(s) \quad (9)$$

式中: $K_s$  为伺服系统的增益。

在设计位置跟踪系统时,将舵机系统简化为二阶环节,其传递函数为

$$G_D(s) = \frac{1}{0.01^2 s^2 + 2 \times 0.01 \times 0.7 s + 1} \quad (10)$$

参考 PID 控制器结构,则反馈系统传递函数为

$$G_F(s) = k_P + \frac{k_I}{s} - k_D s \quad (11)$$

代入控制参数,可得输入补偿符合校正网络的传递函数为

$$G_r(s) = \frac{0.0002s^3 + 0.0012s^2 + 0.881s}{0.8739s^2 + 1.7771s + 1} \quad (12)$$

根据针对位置跟踪体系的分析,建立位置跟踪回路控制框图如图 5 所示。

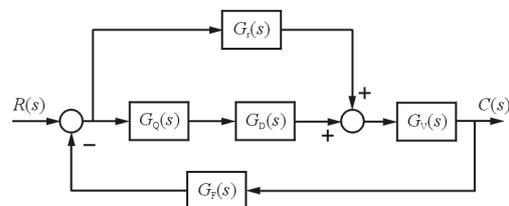


图 5 位置回路控制框图

Fig. 5 Control block of location tracking loop

结合式(12),可得位置跟踪回路的传递函数为

$$G_w(s) = \frac{G_V(s)[G_D(s)G_Q(s) + G_r(s)]}{1 + G_F(s)G_V(s)[G_Q(s)G_V(s) + G_r(s)]} \quad (13)$$

### 2.2 双回路电机数学模型

双回路电机中力矩回路采用交流伺服电机电

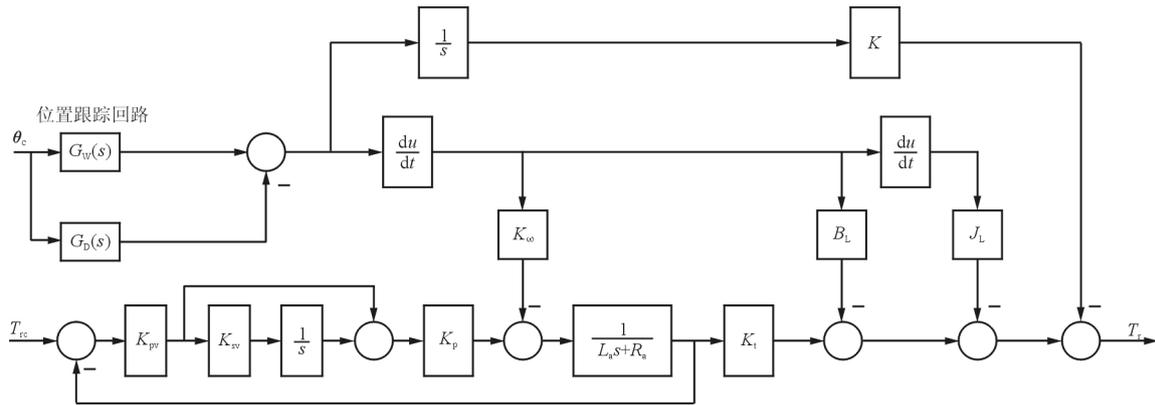


图 6 双回路电机系统控制框图

Fig. 6 Control block of double-loop motor

推导伺服系统的传递函数时,可将舵机的位置视为扰动信号,其传递函数用  $G_N(s)$  表示,力矩信号为输入信号,其传递函数用  $G_R(s)$  表示。则伺服系统中输入信号和扰动信号的传递函数为

$$G_R(s) = \frac{K_t Q(s)}{1 + Q(s)} \quad (14)$$

$$Q(s) = \frac{K_p K_{pv} (K_{sv} + s)}{1 + Q(s)} \quad (15)$$

式中:  $Q(s)$  为输入信号的前向通道传递函数。

舵机位置扰动信号传递函数为

$$G_N(s) = - \left[ J_L s^2 + B_L s + \frac{K_\omega K_t s}{L_a s + R_a} + \frac{K}{s} \right] \cdot [G_w(s) - G_D(s)] \quad (16)$$

由式(16)可知,在理想状态下,如果位置跟踪控制回路设计合理,则  $G_w(s) - G_D(s) = 0$ ,即舵机位置扰动信号对应的实际输出为 0,可消除舵机运动对负载模拟器的扰动。

### 2.3 整体双回路系统数学模型

在电动加载控制系统中,主控制回路为力矩伺服控制回路,位置回路可视为对力矩伺服控制回路的扰动,可采用结构不变性原理进行补偿;为了改善控制系统的性能,参照在交流伺服控制系统中引

流环控制。结合位置跟踪系统图(图 5)和双回路电机原理图(图 1)可以给出双回路伺服电机系统的控制框图,如图 6 所示,  $J_L$  为舵机转动惯量;  $B_L$  为舵机折合摩擦系数;  $K_\omega$  为舵机折合角速度系数;  $K_t$  为弹簧杆刚度系数;  $K_{pv}$  为电流环控制器。

入力速度反馈的方法,将其反馈到输入端,与 PID 控制器输出信号比较,可以增大系统阻尼,改善系统动态性能;为了提高系统对输入的响应、减少输出相位滞后,在指令信号处引入力矩前馈补偿环节。

为了检验控制系统消除多余力矩的能力,设置指令力矩恒值为 0,使舵机以一定幅值和频率做正弦运动,记录力矩传感器的输出,即为系统消扰后多余力矩值。系统消扰前后多余力矩之比,即为消扰比率,其大小则表征控制系统消除多余力矩的能力。

根据本文所设计的双回路结构(图 6),得出整个加载系统的控制框图如图 7 所示,  $k_g$  为角度弧度转换;  $k_{fv}$  为力矩信号微分反馈增益;  $k_f$  为指令前馈。

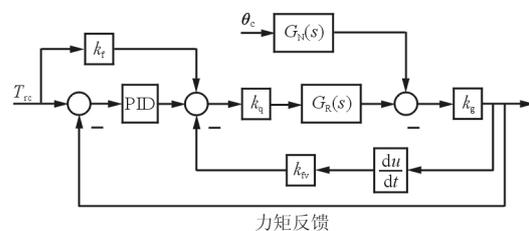


图 7 双回路负载模拟器系统控制框图

Fig. 7 Control block of double-loop load simulator

从力矩指令到负载模拟器出力矩的传递函数为

$$G(s) = \frac{[K_f G_{PID}(s)]G_1(s)}{1 + [k_f + G_{PID}(s)]G_1(s)} \quad (17)$$

$$G_{PID}(s) = k_{qp} + \frac{k_{qi}}{s} + k_{qd}s \quad (18)$$

$$G_1(s) = \frac{k_q + k_\eta G_R(s)}{1 + sk_{\nu}k_qk_\eta G_R(s)} \quad (19)$$

式中： $G_{PID}(s)$ 为前馈 PID 传递函数； $G_1(s)$ 为内环传递函数。

在实际加载流程内，舵机通常保持运动状态，会对力矩加载回路造成很大的扰动，尤其是在小转矩加载过程中，指令力矩较小而舵机运动速度较大。双回路加载系统能够使伺服电机的位置跟踪舵机运动，大幅减小舵机运动对加载回路的力矩扰动；而且舵机的位置和角速度均可以通过旋转变压器测量得到，即双回路加载在工程上是可实现的。

### 3 系统仿真验证

#### 3.1 仿真条件

检测负载模拟器动态特性的方法是分析系统输出力矩对指令力矩的复现能力<sup>[15]</sup>，通常采用“双十”指标作为评价标准，即指令力矩的幅值偏差达到 10% 和相位偏差达到 10° 时系统所能达到的工作频带。一般地，由于舵机输出位置扰动的影响，加载幅值、频带越高，舵机运动越快，则负载模拟器输出信号跟踪指令信号的难度越大，加载精度也随之降低。为了测试系统的动态性能，系统的指令信号设定为幅值 60 Nm、频率 35 Hz 的正弦曲线，分别选取舵机以 1°、15 Hz 和 1°、25 Hz 扰动两组指标进行仿真，仿真环境为 Simulink，设置系统参数如下。

(1) 电机参数：等效电阻  $R=11.11 \Omega$ ；等效电感  $L=1.24 \text{ mH}$ ；转动惯量  $J=1.24 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ；摩擦系数  $B=6.9 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}/^\circ$ 。

(2) 弹簧杆刚度系数： $K_L=10 \text{ N} \cdot \text{m}/^\circ$ 。

(3) PID 控制器参数： $K_p=1.3$ ； $K_i=0.5$ ； $K_d=0.002$ 。

(4) 系统补偿参数：力矩前馈  $K_f=0.033$ ；力速度反馈  $K_{\nu}=0.00005$ 。

#### 3.2 仿真结果

力矩输出响应曲线如图 8~图 9 所示。

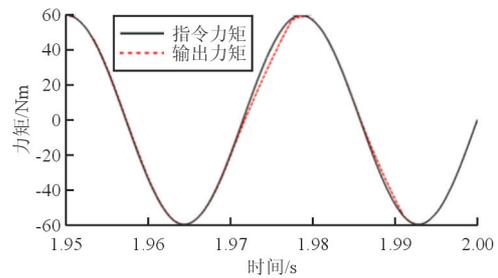


图 8 舵机运动 1°、15 Hz，指令力矩 60 Nm、35 Hz 仿真结果

Fig. 8 Simulation result of steering engine 1°, 15 Hz, command torque 60 Nm, 35 Hz

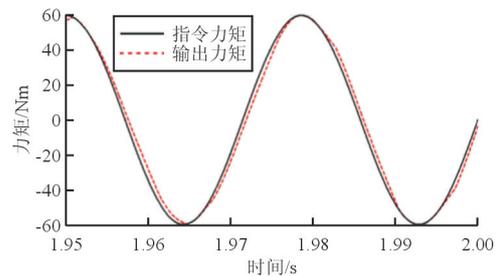


图 9 舵机运动 1°、25 Hz，指令力矩 60 Nm、35 Hz 仿真结果

Fig. 9 Simulation result of steering engine 1°, 25 Hz, command torque 60 Nm, 35 Hz

从图 8~图 9 可以看出：指令力矩曲线与输出力矩曲线的一致性较好，幅值差、相位差均控制在很小的范围内，表明系统对工作频带内的指令信号复现情况良好，即具有优良的动态特性，验证了双回路负载模拟器方案的有效性。

其他频率下的仿真结果如表 1 所示。

表 1 60 Nm 动态性能指标测试结果

Table 1 Results of dynamic performance of 60 Nm

舵机运动		指令力矩		加载精度	
角度/ $^\circ$	频率/Hz	幅值/Nm	频率/Hz	幅差/%	相差/ $^\circ$
1	25	60	10	0.62	-0.22
1	25	60	20	0.16	-0.11
1	25	60	30	1.87	-1.45
1	25	60	35	3.61	-6.63

从表 1 可以看出：随着舵机频率的提高，对系统的扰动加剧，相应的输出曲线与指令曲线之间的幅差和相差也逐渐增大，即跟踪效果变差，与理论预期一致。经验证，在舵机位置扰动为幅值 1°、频率 25 Hz，指令力矩为 60 Nm 时，系统在满足“双

十”指标的前提下可达到的最高工作频带为 35 Hz。

## 4 结 论

(1) 设计了基于双回路电机的加载方案和增量式 PID 控制器,在此基础上,完成了双回路负载模拟器的数学建模。

(2) 通过系统仿真,表明所设计的双回路负载模拟器在工作频带内,其输出力矩对指令力矩具有较好的复现能力;系统在满足“双十”指标的前提下可达到的最高工作频带为 35 Hz。

### 参考文献

- [1] 田巨,张科. 电动负载模拟器的发展与现状[J]. 微特电机, 2014, 42(5): 70-74.  
Tian Ju, Zhang Ke. Development and present status of electric load simulators[J]. Small & Special Electrical Machines, 2014, 42(5): 70-74. (in Chinese)
- [2] Tinoco E N. Transonic CFD(computational fluid dynamics) applications at Boeing[R]. Washington: Boeing Commercial Airplane Co., 1989.
- [3] Carco Co. Capabilities in flight motion simulation and guidance and navigational test equipment[M]. USA: Carco Electronics, 1992: 1-10.
- [4] Ullah N, Shaoping W. High performance direct torque control of electrical aero-dynamics load simulator using adaptive fuzzy backstepping control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering, 2015, 229(2): 369-383.
- [5] 王昊. 电动负载力矩模拟器系统分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.  
Wang Hao. Analysis for electric load torque simulator system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014. (in Chinese)
- [6] 张兆恒,褚建新,毕如林. 电动负载模拟系统的设计与仿真[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(2): 6-9.  
Zhang Zhaoheng, Chu Jianxin, Bi Rulin. Design and simulation of electromotor load emulation system[J]. Electric Machines & Control Application, 2013, 40(2): 6-9. (in Chinese)
- [7] 张小磊,宗光华,牛国臣. 大扭矩电动负载模拟器的设计与研究[J]. 机械制造与自动化, 2014(3): 175-178.  
Zhang Xiaolei, Zong Guanghua, Niu Guochen. Design of large torque load simulator and its research[J]. Machine Building & Automation, 2014(3): 175-178. (in Chinese)
- [8] 陈宇青. 电动负载力矩模拟器多余力矩产生机理及抑制方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.  
Chen Yuqing. Research on mechanism and elimination of surplus torque in electric torque load simulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015. (in Chinese)
- [9] 符文星,孙力,于云峰,等. 大力矩电动负载模拟器设计与建模[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(12): 3596-3602.  
Fu Wenxing, Sun Li, Yu Yunfeng, et al. Design and model-building of motor-driven load simulator with large torque outputs[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(12): 3596-3602. (in Chinese)
- [10] 王鑫,冯冬竹. 引入弹簧杆的电动负载模拟器实验研究[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(9): 91-94.  
Wang Xin, Feng Dongzhu. Experimental research on DC load simulator test bed with elastic rod[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(9): 91-94. (in Chinese)
- [11] 刘松斌. 电动负载模拟器加载电机驱动技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.  
Liu Songbin. Research on drive technology of loading motor for electrical load simulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [12] 杨超凡,聂振金,郭鹏. 一种微小型电动舵机设计仿真与试验[J]. 导弹与航天运载技术, 2016(5): 87-91.  
Yang Chaofan, Nie Zhenjin, Guopeng. Simulation and experiment of one micro electromechanical actuator's design[J]. Missiles and Space Vehicles, 2016(5): 87-91. (in Chinese)
- [13] 顾文娟,刘涛,朱战霞,等. 位置比例加力补偿电动负载模拟器的研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(23): 6960-6963.  
Gu Wenjuan, Liu Tao, Zhu Zhanxia, et al. Research of electric load simulator based on position proportion and force compensation[J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(23): 6960-6963. (in Chinese)
- [14] 苏永清,赵克定,苏东海. 模糊自适应在电液负载仿真台同步补偿中的应用[J]. 黑龙江工程学院学报, 1999, 13(1): 5-8.  
Su Yongqing, Zhao Keding, Su Donghai. Application of fuzzy adaptive control to synchro-compensation for electro-hydraulic loading simulator[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 1999, 13(1): 5-8. (in Chinese)
- [15] 王晓东,尚耀星,焦宗夏. 负载模拟器的综合评价体系研究[C]//第六届全国仿真器学术会议论文集. 南京: 中国系统仿真学会, 中国航空学会, 2007: 34-36.  
Wang Xiaodong, Shang Yaoping, Jiao Zongxia. Research for the general evaluation system of load simulator[C]// Proceedings of the 6th National simulator Conference, Nanjing: CSSs, CSAA, 2007: 34-36. (in Chinese)

### 作者简介:

税洋(1986—),男,博士研究生。主要研究方向:舵机负载模拟器控制。

尉建利(1978—),男,博士,副教授。主要研究方向:飞行器控制与仿真技术。

闫杰(1960—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器控制技术。

(编辑:马文静)