

# 气动负载虚拟加载系统设计

李鑫, 彭健, 贾长伟, 赵雯

(中国运载火箭技术研究院研究发展中心, 北京 100076)

**摘要:** 飞行器在飞行过程中, 舵机将承受空气动力的力矩载荷, 气动负载虚拟加载模拟器是用于模拟空气力矩载荷变化规律的地面半实验设备; 针对在地面试验过程中, 传统负载模拟器与承载系统因机械结构耦合而产生的“多余力矩”问题, 以磁粉离合器和力矩传感器为核心, 构建虚拟负载模拟器, 利用系统输出转矩的大小和方向分别只与励磁电流的大小和速度滑差的方向有关的特性, 较彻底地解决“多余力矩”的问题, 提高力矩加载试验设备的性能, 从而进一步提高飞行器虚拟试验的水平。

**关键词:** 磁粉离合器; 多余力矩; 速度滑差; 力矩传感器

## Design of Virtual loading System for Aerodynamic Loader

Li Xin, Peng Jian, Jia Changwei, Zhao Wen

(R&D Center China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** During the aircraft's flight, steering gear may sustain aerodynamic torque loader. Motor drive load simulator is the ground hardware-in-the-loop equipment which is used for simulating aerodynamic torque loader's change rule. For the ground test procedure, the problem of surplus torque arises because the mechanical structure's coupling between the traditional load simulator and the bearing system. Based on the magnetic particle clutch and torque sensor, we can structure virtual load simulator, by using the characteristic of torque's size and direction only related to speed slip's direction. We can settle the surplus torque finally. It improves torque loading test equipment's performance, and results in a more highly level of aircraft's virtual test.

**Keywords:** magnetic particle clutch; surplus torque; speed slip; torque sensor

## 0 引言

飞行器在飞行过程中, 舵机(承载系统)将承受空气动力的力矩载荷, 气动负载虚拟加载模拟器(负载模拟器)是用于模拟空气力矩载荷变化规律的地面半实验设备。传统负载模拟器的输出轴通过力矩传感器和承载系统输出轴连在一起, 构成相互耦合的系统<sup>[1]</sup>。负载模拟器的执行器件根据加载力矩指令, 输出符合指令要求的力矩, 作为承载系统的负载。由于加载轴和承载轴连接在一起, 加载轴一方面要按加载力矩指令运动, 另一方面又要被承载轴强制带动着一起运动<sup>[2]</sup>。因此承载轴的运动必然成为负载模拟器的扰动, 必然带来“多余力矩”问题。

针对负载模拟器和承载系统因结构耦合而产生的多余力矩问题, 传统上有基于结构不变性原理的补偿方案, 即负载模拟器控制器加入该角速度前馈补偿的方式消除多余力矩的干扰, 在实际工程应用时, 由于补偿控制器算法中常包含高阶微分, 物理上难以实现, 同时扰动补偿模型只能是物理过程的近似, 常存在模型失配问题, 很难获得理想的多余力矩抑制效果<sup>[3]</sup>; 传统上也有结合扰动补偿、给定前馈以及鲁棒扰动抑制的综合设计方法<sup>[4]</sup>, 能够在很大程度上抑制多余力矩, 此设计方法依赖于系统精确的数学模型, 设计方法复杂, 实现和调试的难度很大; 同时负载模拟器设计中, 也有应用小脑模型关节控制器、迭代学习控制<sup>[5]</sup>等方法, 以上方法对“多余力矩”的干扰只能取得一定效果, 不能根本解决“多余力矩”的问题。基于磁粉离合器的电动负载模拟器设计方案, 从总体构架着手, 改

变负载模拟器和承载系统耦合的结构形式, 从而彻底地解决多余力矩问题。

## 1 多余力矩概述

“多余力矩”定义为当加载力矩指令为零时, 负载模拟器输出非零的加载力矩。它是因负载模拟器和承载系统结构耦合, 承载对象运动强制负载模拟器跟随运动而对负载模拟器产生的扰动误差, 为了与指令跟踪时系统产生的静动态误差进行区分, 称该扰动产生的加载力矩为多余力矩。当加载力矩指令为零时, 负载模拟器执行器件应该是静止的, 而承载对象运动强制负载模拟器执行器件跟着运动, 若此器件是液压缸, 则液压缸的两负载腔产生强迫流量, 强迫流量产生强迫压力, 这种强迫压力产生的力就是多余力。若此器件是电动机, 则电动机被带动而工作在发电机状态, 发电机通过功率放大器的输出阻抗产生很大的电流, 从而产生很大的阻力矩, 即造成很大的多余力矩。多余力矩被负载模拟器上的力矩传感器测出, 反馈到负载模拟器的输入端, 形成负反馈, 此反馈信号产生的力矩输出试图抵消上述多余力矩。但由于力矩调节系统的放大倍数不可能无限大, 且系统输出存在惯性, 因此, 反馈信号对多余力矩的抵消是不完全且存在滞后的。随着承载系统扰动频率的增高, 多余力矩幅值随之增大, 严重影响了负载模拟器的加载精度以及系统频宽, 因此, 如何克服多余力矩, 是设计负载模拟器的关键。

## 2 系统总体方案设计

基于磁粉离合器的电动负载模拟器, 如图2所示, 主要由力矩生成单元、方向控制单元以及传感器单元组成。力矩生成单元主要包括磁粉离合器以及电流控制电路, 方向控制单元主要包括伺服电机、转速控制器以及减速器, 传感器单元主要为转矩转速传感器, 磁粉离合器内转子轴与承载系统(舵机)、转矩转速传感器同轴, 外转子轴与伺服电机的减速器同轴。此

收稿日期: 2015-01-28; 修回日期: 2015-03-31。

基金项目: 国防基础科研计划重大项目(C0320110001)。

作者简介: 李鑫(1983-), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事伺服控制系统与虚拟试验方向的研究。

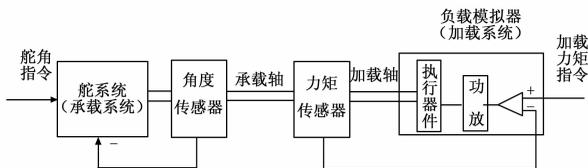


图1 传动负载模拟器一般结构

系统从总体构架着手，以磁粉为工作介质，以激磁电流为控制手段，达到控制制动转矩或传递转矩的目的。其输出转矩的大小与激磁电流呈良好的线性关系，只与激磁电流大小成正比，而与转速或滑差（转子和定子间的转速差，或内转子和外转子间的转速差）无关，并具有响应速度快、结构简单等优点。负载模拟器产生力矩的方向，是阻止磁粉离合器内转子和外转子间的相对运动的方向，可用外转子轴上连接的伺服电机的转向和转速，来调节磁粉离合器产生力矩的方向，配合电流调节力矩的大小，使得负载模拟器的输出力矩跟随力矩指令的变化。因此，承载对象带动磁粉离合器内转子轴的转动，不影响负载模拟器电流的大小，也就不影响加载力矩的产生和调节，从而也不会产生“多余力矩”。

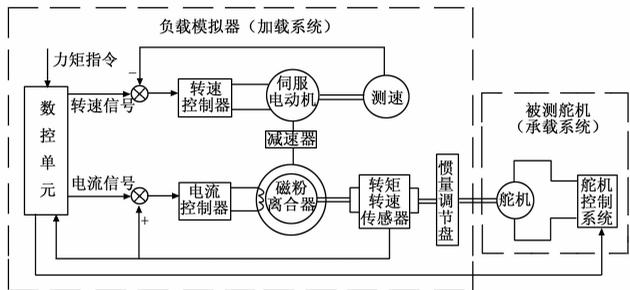


图2 带磁粉离合器的电动负载模拟器结构图

### 3 硬件设计

#### 3.1 传感器单元

传感器单元主要为转矩转速传感器组成，根据最大设计加载力矩  $T_M \geq 100 \text{ Nm}$ ，最大偏转角速度  $\geq 500^\circ/\text{s}$  的技术指标，选用满量程转矩 200 Nm 的旋转式转矩转速传感器，允许转速 5 000 rpm，技术参数如表 1 所示。

表 1 转矩转速传感器技术参数汇总表

转矩准确度	重复性	线性	过载能力	滞后	绝缘电阻	工作温度	相对湿度
$\leq 0.2\%$ F·S	$\leq 0.1\%$ F·S	$\leq 0.1\%$ F·S	150%	$\leq 0.1\%$ F·S	$\geq 200$ MΩ	-20~ 60℃	$\leq 90\%$ RH

#### 3.2 力矩生成单元

力矩生成单元主要由磁粉离合器以及电流控制器组成。

##### 1) 磁粉离合器：

磁粉离合器是一种性能优越的自动控制元件。它以磁粉为工作介质，通过控制电流来产生扭矩，达到控制力矩的目的。其输出转矩的大小与激磁电流呈良好的线性关系，而与输入或输出的转速或滑差无关。其输出转矩的方向由滑差方向决定（是阻止磁粉离合器内转子和外转子间的相对运动的方向）。磁粉离合器具有加载平稳、无噪音、系统比较简单、响应速度快等优点。激磁电流与转矩呈良好的线性关系，通过调节激磁电流可以无级控制转矩的大小。磁粉离合器的转矩只与其激磁电流成正比，而与转速（滑差）无关。在散热条件一定时，磁粉

离合器的允许滑差功率是定值，是等功率特性，连续运行时，实际滑差应在允许滑差功率以内，使用转速高时，需降低力矩使用。磁粉离合器功率为  $P = T \times n$ ， $P$  为允许滑差功率，量纲为瓦特（W）， $T$  为转矩，量纲为牛顿米（Nm）， $n$  为转速，量纲为弧度/秒（rad/s）。负载最大加载力矩  $T_M \geq 100 \text{ Nm}$ ，最大滑差角速度为 2 rpm，滑差功率  $P = T \times n = 100 \times 0.21 = 21 \text{ W}$ ，其选取的磁粉离合器参数如表 2 所列。

表 2 磁粉离合器主要参数

额定转矩/ Nm	激磁电流/ A	激磁电压/ V	时间常数/ ms	内转子转动惯量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	外转子转动惯量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	滑差功率/ W	轴径/ mm	总高/ mm
400	3	80	0.3	0.08	0.13	1000	45	395

##### 2) 电流控制器：

选用与磁粉离合器配套的电流控制器，参数如表 3 所示，通过 RS232 通讯端口接受上位机数字量信号，调节对应输出电流，从而改变磁粉离合器的输出力矩。

表 3 电流控制器参数汇总表

电源	额定输出电压	额定输出电流	尺寸
220 V/50 Hz	80 V±1 V	5 A	320×130×340(mm)

#### 3.3 方向控制单元

方向控制单元由伺服电机、转速控制器以及减速器组成。

##### 1) 伺服电机：

伺服电机选用永磁同步电机，采用霍尔器件进行电子换相，旋转变压器进行角度和角速度测量，其主要参数为见表 4。

表 4 电机主要性能参数

额定电压 $U_N$	380v 3 相	尺寸/mm	145×145×325
额定功率 $P_N$	2.46 kW	重量 $M$	12 kg
额定电流 $I_N$	4.84 A	转动惯量 $J$	1 050 $\text{kgmm}^2$
电感	19.27 mH	电阻 $R$	1.93 Ω
额定转矩 $M_N$	7.84 Nm	反电势系数 $C_e$	0.146 V/rpm
峰值扭矩 $M_M$	48.9 Nm	力矩系数 $C_m$	1.70 Nm/A
额定转速 $n_N$	3 000 rpm	反馈器件	旋变

##### 2) 转速控制器：

转速控制器主要根据转速控制指令以及霍尔与旋转变压器的反馈信号完成伺服电机的换相、转速与转向控制。根据伺服电机相关参数，选用与电机配套的转速控制器，其主要参数为见表 5。

表 5 转速控制器主要性能数据

连续电流	3 相 7.5A	控制接口	数字量
最大电流	3 相 15 A(<5 s)	控制方式	编程控制
电源	3 相 380 V 50 Hz	反馈形式	旋变

##### 3) 减速器：

系统最大转速为 83.3 rpm，伺服电机额定转速为 3 000 rpm，则减速比  $i$  设计为  $i = 3\ 000/83.3 = 36.01$ ，相关参数如表 6 所示。

#### 3.4 数控单元

数控单元根据反馈的力矩信号，主要完成以下功能。

1) 根据用户所给出的指令力矩（载荷谱），分解成力矩大小指令（绝对值）和力矩方向指令（正负）两个信号；根据磁粉离合器的原理，力矩大小指令（绝对值）对应激磁电流的大

表 6 减速器主要性能参数

减速比	30	额定输入转速	3400 rpm
转动惯量(反映在输入轴)	$4.5 \text{ g} \cdot \text{cm}^2$	额定输出扭矩	396 Nm
最大输出扭矩	1040 Nm	低齿隙	$\leq 5'$
额定效率	94%	重量	20 kg

小, 力矩方向指令(正负)对应滑速度的方向。因此, 需要数控单元将力矩指令变换为为电流信号和转速信号。力矩大小指令信号作为磁粉离合器电流控制电路的输入指令, 磁粉离合器输出力矩的大小与电流成正比, 从而实现负载力矩的大小; 力矩方向指令和转矩转速传感器测到的舵机转速的大小和方向, 两个信号共同决定伺服电机的转向和转速, 作为伺服电机控制电路的指令信号。实现负载力矩的方向。

2) 采集负载模拟器和承载系统的各有关参数, 进行存储、显示、绘制曲线、指标判读等。

3) 当负载模拟器不连接用户的被测系统而自行调试时, 数控单元根据试验的需要, 向负载模拟器中的模拟承载系统(假舵机)发送控制信号, 实现假定被测系统的运动。

### 3.5 模拟承载系统(假舵机)

为了便于系统调试和测试, 设计模拟的承载系统(舵机), 其结构框图见图 2 所示。

## 4 软件系统方案设计

本系统的组态软件是 LabVIEW 软件, LabVIEW 图形化编程语言—G 语言。该软件是一种通用编程软件, 将板卡驱动数据采集和数据输出与图形显示界面有机结合在一起, 并且提供各种各样、功能强大的数据库, 包括数据采集、GPIB、串行一起控制、数据分析、数据显示及数据存储。利用 LabVIEW,

通过交互式的图形化前面板来控制系统, 并显示所得的结果。软件流程图如图 3 所示。

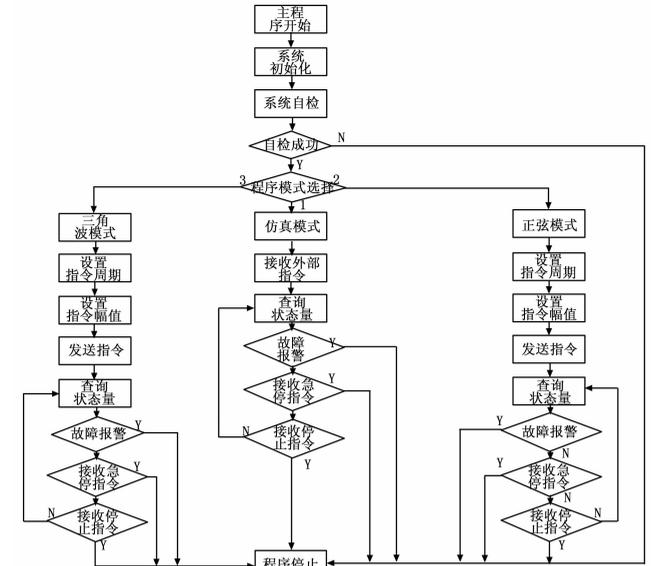


图 3 电动负载模拟器软件流程图

## 5 仿真实证

### 5.1 数学建模

为了便于建模和仿真, 将承载系统的主要部分与加载系统在一起建模。通过上述分析, 建立单通道负载模拟器和承载系统的数学模型, 再根据系统设计的结果获得模型参数, 电动负载模拟器的数学框图如图 4 所示。

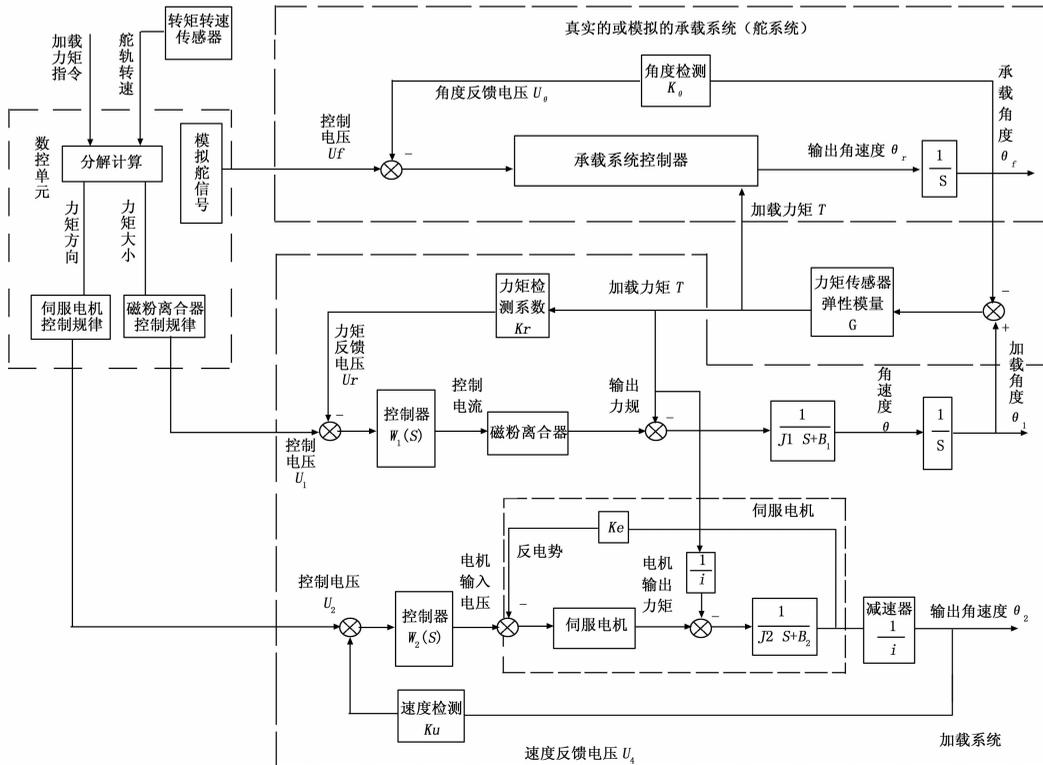


图 4 电动负载模拟器数学框图

提方案的传感系统的应变能力表现明显优于单耦合方案的传感系统。

#### 4 结束语

光纤光栅传感系统经常用于对应变、温度和磁场等要求较高的测量应用中, 然而受到各类外界参量的干涉, 监测精度和系统稳定性面临挑战。基于该类问题, 本文从周期性的纤芯轴向折射和透射角度出发, 基于分类设计了自适应耦合器件及其切换机制, 接着基于复合耦合决策输出电压特性提出了自调谐光纤光栅器件及其调谐算法, 最后结合光纤复合耦合器和自调谐电路给出了一种新型的光纤光栅传感系统布设方案。实验从波长、温度和应变等方面进行测量, 结果证明了与单耦合方案的传感系统相比, 所提方案布设的传感系统具有高可靠性、稳定性和检测精度。

#### 参考文献:

[1] Chryssis A N, Saini S S, Lee S M, et al. Detecting hybridization of DNA by highly sensitive evanescent field etched core fiber Bragg grating sensors [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2005, 11 (4): 864-872.

[2] 章鹏博, 胡辽林, 华灯鑫, 等. 光时域反射—光纤光栅传感系统中双激光器的驱动设计 [J]. 中国激光, 2012, 39 (4): 85-90.  
 [3] 祁耀斌, 吴敢锋, 王汉熙. 光纤布拉格光栅传感复用模式发展方向 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2012, 43 (8): 3058-3072.  
 [4] 陈志伟, 谭中伟, 闫俊芳, 等. 光纤光栅传感系统的信号解调 [J]. 光电技术应用, 2012, 27 (2): 47-52.  
 [5] 王玉宝, 管 超. 面向光接入网的光纤光栅传感数据数字化系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2012 (9): 092202.  
 [6] 黎 威, 文泓桥. 基于 CDMA 的布拉格光纤光栅传感系统的仿真分析 [J]. 光学与光电技术, 2013, 11 (3): 23-26.  
 [7] 刘志强, 刘甲春, 李沼云. 光纤光栅频域反射应变传感系统性能分析 [J]. 光器件, 2013 (10): 19-21.  
 [8] 王亚萍, 胡辽林, 张卫超, 等. 分布式光纤光栅传感系统中微弱信号检测研究 [J]. 西安理工大学学报, 2013, 29 (4): 428-433.  
 [9] 余有龙, 谭 玲, 李 茜, 等. 压电陶瓷发热对光纤光栅传感信号干涉解调的影响 [J]. 光学学报, 2014, 34 (5): 0506005.  
 [10] Ma G M, Li C R, Mu R D. Fiber bragg grating sensor for hydrogen detection in power transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21 (1): 380-385.

(上接第 1771 页)

#### 5.2 仿真实验

基于磁粉离合器的气动负载虚拟加载系统从总体构架上实现了输出加载力矩与承载系统之间的解耦, 从而避免了“多余力矩”的产生, 其建模仿真重点是在力矩指令  $T=100 \sin (2\pi \cdot f)$  输入下, 检验负载模拟器的动态性能。采用图 4 数学模型, 在 MATLAB 环境下, 利用 Simulink 工具进行仿真, 分别取  $f=7 \text{ Hz}$  与  $20 \text{ Hz}$ , 得到负载模拟器的输出力矩跟踪曲线如图 5~6 所示, 其中实线为输入力矩曲线, 虚线为输出力矩曲线。

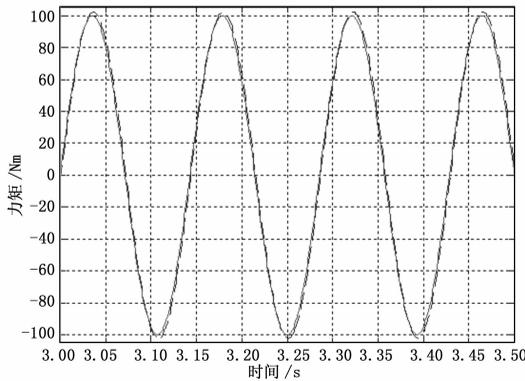


图 5  $T=100 \sin (2\pi \times 7)$  输入下的系统输出

从图 5~6 中可以看出, 在 7 Hz 指令信号作用下, 负载力矩模拟器的幅度误差为 2.2%, 相位滞后为  $-2.6^\circ$ ; 在 20 Hz 指令信号作用下, 负载力矩模拟器的幅度误差为 8.9%, 相位滞后为  $-7.6^\circ$ 。

#### 6 总结

基于磁粉离合器的气动负载虚拟加载系统以磁粉为工作介质, 以激磁电流为控制手段, 达到控制制动转矩或传递转矩的目的。利用外转子轴上连接的伺服电机的转向和转速, 来调节

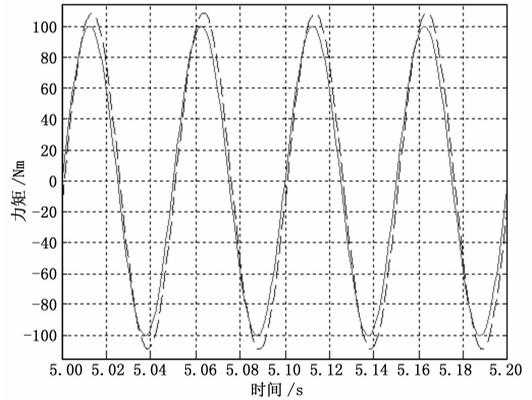


图 6  $T=100 \sin (2\pi \times 20)$  输入下的系统输出

磁粉离合器产生力矩的方向, 配合电流调节力矩的大小, 使得负载模拟器的输出力矩跟随力矩指令的变化, 不影响负载模拟器电流的大小, 也不影响加载力矩的产生和调节, 从而避免了“多余力矩”的产生。从仿真结果中可以看出, 负载模拟器在不产生“多余力矩”的同时, 具有较好的动态特性指标。

#### 参考文献:

[1] 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]. 电气与自动化, 2014, 43 (3): 175-178, 185.  
 [2] 王跃轩, 陈俊杰, 黄玉平, 等. 新型舵机负载模拟系统电动加载技术研究 [J]. 航天控制, 2014, 32 (2): 79-86.  
 [3] 范文澜, 李宏图, 李 想, 等. 电动操纵负荷系统在飞行模拟器中的应用 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25 (S): 401-407.  
 [4] 郭 行, 陈 康, 孙 力, 等. 一种引入位置比例控制提高电动负载模拟器性能的控制系统设计方法 [J]. 西北工业大学学报, 2014, 32 (2): 235-239.  
 [5] 魏 琼, 吴 帅, 焦宗夏, 等. 气动负载模拟器的多余力矩分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40 (9): 1213-1218.