

橡胶-金属缓冲弹簧在飞机舵机电液伺服系统中的应用^{*}

滕在明,韩秋旻,朱世赫,刘晓琳,杨楠

(中国民航大学 电子信息与自动化学院,天津 300300)

摘要:针对飞机舵机电液伺服系统在抑制多余力干扰时,缓冲装置无法实现变刚度连续加载的问题,采用在系统结构中设置橡胶-金属缓冲弹簧的结构补偿方法。首先,设计橡胶-金属缓冲弹簧结构,利用 ANSYS 仿真软件构建有限元模型并对其进行性能分析。通过构建飞机舵机电液伺服系统各元件数学模型,从而得到系统整体数学模型。最后,利用 MATLAB 仿真软件验证该方法的可行性和有效性。研究结果表明,橡胶-金属缓冲弹簧能够达到技术指标要求,改善系统稳定特性,具有较高的工程实践价值。

关键词:飞机舵机电液伺服系统;橡胶-金属缓冲弹簧;ANSYS 有限元模型;数学模型

中图分类号:TH135

文献标识码:A

DOI: 10.19358/j.issn.2096-5133.2020.05.014

引用格式:滕在明,韩秋旻,朱世赫,等.橡胶-金属缓冲弹簧在飞机舵机电液伺服系统中的应用[J].信息技术与网络安全,2020,39(5):69-74.

Application of rubber-metal buffer spring in electro-hydraulic servo system of aircraft rudder

Teng Zaiming, Han Qiumin, Zhu Shihe, Liu Xiaolin, Yang Nan

(College of Electric Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the problem that the buffering device can't realize the continuous loading of variable stiffness when the electro-hydraulic servo system of aircraft steering gear can restrain the interference of extra torque, the structural compensation method of setting rubber-metal buffering spring in the system structure is adopted. Firstly, the rubber-metal buffer spring structure is designed, and the finite element model is constructed with ANSYS simulation software and its performance is analyzed. Then, by constructing the mathematical model of each component of the electro-hydraulic servo system of the aircraft steering gear, the overall mathematical model of the system is obtained. Finally, MATLAB simulation software is used to verify the feasibility and effectiveness of the method. The results show that the rubber-metal buffer spring can meet the technical requirements and improve the stability of the system.

Key words: aircraft steering gear; electro-hydraulic servo system; rubber-metal buffer spring; ANSYS finite element model; mathematical model

0 引言

飞机舵机电液伺服系统作为舵机试验使用的半实物仿真设备,用于模拟舵机在飞机飞行过程中所受到的各种力载荷的变化情况,在飞行控制地面仿真系统研究领域应用广泛。虽然飞机舵机电液伺服系统极大程度地改进了飞机舵机的测试方式,然而它也是一个典型的被动式力伺服控制系统,其

中舵机的主动运动会使系统产生多余力。多余力的存在会严重影响系统的稳定特性。因此,该研究课题在国际上已经引起了人们的高度关注。

国内外学者主要采用结构补偿方式来抑制多余力干扰。结构补偿方式就是通过在系统结构中添加一个新环节或改善已有环节,从而减小多余力。常用的方法有安装连通孔、蓄压器校正法、安装缓冲弹簧等^[1]。安装连通孔方法是在液压缸的两个油腔之间安装一个可调节的节流口,以防止因流量的快速变化而产生液压冲击^[2]。但不足之处是负载曲线弯曲,线性度差。蓄压器校正法是利用

^{*} 基金项目:大学生创新创业训练计划项目(201910059121、201910059120);天津市自然科学基金(17JCYBJC18200);中央高校基本科研项目(3122018C002);中国民航大学研究生科技创新基金项目(201930);第九届波音基金项目(20190621022)

蓄压器来吸收和释放液压缸腔内的压力,减少强迫流量的产生,提高系统的控制精度^[3]。但是其校正状态与加载梯度有关,而加载梯度是不断变化的,这就限制了该方法的通用性。相比于前两种结构补偿方式,安装缓冲弹簧的方法以其结构简单的优势在飞机舵机电液伺服系统中应用更为广泛。该方法是在电液伺服系统和飞机舵机之间安装材质为纯金属或纯橡胶的缓冲弹簧,使其在系统加载力和舵机运动力的共同作用下发生弹性形变,从而减小舵机主动运动所产生的多余力干扰^[4]。金属缓冲弹簧的刚度为定值,当系统进行变刚度加载时,不得不中断试验,并对缓冲弹簧进行更换,破坏试验的连续性。橡胶缓冲弹簧虽具有可变刚度值,但自身材质受温度、湿度等环境因素影响,造成试验误差较大^[5]。

鉴于此,本文在充分考虑飞机舵机电液伺服系统结构特性的基础上,对缓冲弹簧进行结构及性能优化,以满足系统对稳定特性及试验连续性的要求。

1 飞机舵机电液伺服系统结构设计及工作原理

飞机舵机电液伺服系统由电液伺服子系统和飞机舵机子系统两部分组成,其结构如图 1 所示。电液伺服子系统是加载系统,飞机舵机子系统是承载对象,中间由橡胶-金属缓冲弹簧连接在一起。一方面,橡胶-金属缓冲弹簧对多余力起缓冲作用,防止产生振荡现象,提高系统稳定性;另一方面,当系统进行变刚度加载时,由于橡胶-金属缓冲弹簧所具有的变刚度特性,能够使系统实现连续加载,从而保证试验的连续性。

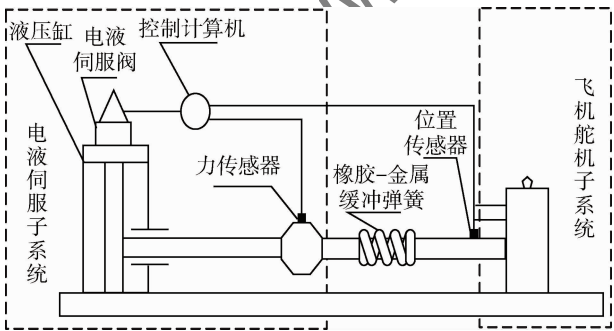


图 1 飞机舵机电液伺服系统结构示意图

飞机舵机电液伺服系统的工作原理如图 2 所示。控制计算机完成力传感器与位置传感器反馈信号的接收与处理工作,并向系统输入端发出指令信号,再由电液伺服阀对其进行放大,将电能转换

成液压能并传送给液压缸,从而通过橡胶-金属缓冲弹簧驱动飞机舵机运动^[6]。

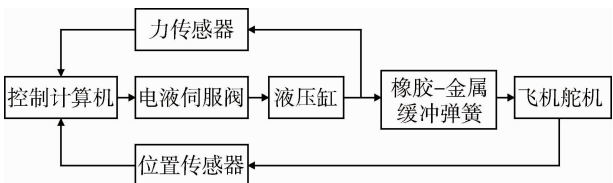


图 2 飞机舵机电液伺服系统工作原理图

飞机舵机电液伺服系统的共振频率为 0 ~ 10 Hz,橡胶-金属缓冲弹簧所承受的系统加载力为 1 000 ~ 7 000 N。考虑安装位置以及橡胶-金属缓冲弹簧承受载荷性质等因素,使缓冲弹簧两端硫化并安装钢板,缓冲弹簧内外均被光滑的筒形橡胶所包裹,并将缓冲弹簧形状设置为空心圆柱形,对其结构尺寸进行设计。其空心圆柱形橡胶-金属缓冲弹簧结构的主视图与俯视图如图 3 所示。

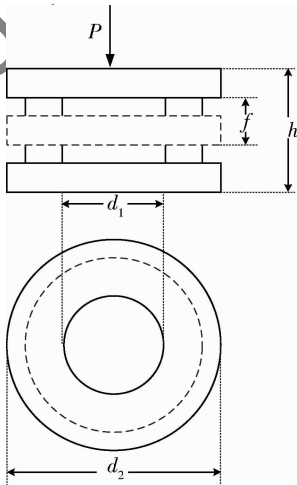


图 3 橡胶-金属缓冲弹簧结构示意图

根据胡克定律计算橡胶-金属缓冲弹簧的尺寸参数,弹性模量 E 与高度变形量 f 和刚度 P' 关系分别为:

$$f = \frac{4Ph}{E\pi(d_2^2 - d_1^2)} \tag{1}$$

$$P' = \frac{P}{f} = E \frac{\pi(d_2^2 - d_1^2)}{4h} \tag{2}$$

式中, P 为加载力(N); h 为弹簧高度(mm); d_1 为内圈直径(mm); d_2 为外圈直径(mm)。

根据飞机舵机电液伺服系统的实际结构,将橡胶-金属缓冲弹簧的形状尺寸设置为 $d_1 = 30 \text{ mm}$, $d_2 = 50 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$ 。空心圆柱形缓冲弹簧在未被压缩或拉伸情况下的刚度为 98 N/mm,由式(1)、

(2)可得缓冲弹簧的弹性模量为 2.34 MPa。

2 橡胶-金属缓冲弹簧有限元模型建立及性能分析

为了验证橡胶-金属缓冲弹簧作为连接元件的可行性与有效性,应用 ANSYS 软件构建缓冲弹簧的有限元模型并对其进行性能分析^[7]。对橡胶-金属缓冲弹簧进行有限元模型分析的过程为,首先,将缓冲弹簧看作是由有限个小小体组成的模型,也可看作是通过在结构上划线,将结构划分成有限个单元的模型。然后,对每一个单元分析其特性,建立相关物理量之间的联系,并依据单元与单元之间的联系再将各单元组装成整体,从而获得整体性方程。最后,得到应用方程相应的解法,完成缓冲弹簧整个问题的分析过程。

2.1 橡胶-金属缓冲弹簧有限元模型建立

依据橡胶-金属缓冲弹簧的材料性质,应用 ANSYS 中的 APDL Product Launcher 模块创建其有限元模型。

首先,定义分析环境和材料属性。根据已知的橡胶-金属缓冲弹簧的材料特性和几何结构,选择 Solid 单元类型中的 Brick 8 node 185。该类型单元的每个单元上有 8 个节点,通过定义节点上沿 XYZ 轴向的平动自由度,以实现高弹性、应力、应变等特性。并设置 Material Models 下的实常数弹性模量为 2.34 MPa,泊松比为 0.497。

其次,选择本构模型。根据橡胶-金属缓冲弹簧的材料性质,考虑到 Mooney-Rivlin 模型是分析天然橡胶的最佳理想模型,因此选择此模型进行构建和分析^[8]。

最后,建立弹簧的实体模型。为了方便计算,在对几何模型进行简化处理中忽略模型中的倒角和圆角,构建一个内径 $d_1 = 30\text{ mm}$,外径 $d_2 = 50\text{ mm}$,高度 $h = 300\text{ mm}$ 的空心圆柱,并对建成的模型进行 Sweep 方式的网格划分。该方式可以使非线性求解更容易收敛,缩短计算求解时间。

至此,橡胶-金属缓冲弹簧有限元模型的构建工作完成,模型进行网格划分后如图 4 所示。由图分析可知,橡胶-金属缓冲弹簧有限元模型最终被划分成 4 200 个节点和 17 683 个单元。

2.2 橡胶-金属缓冲弹簧性能分析

为了模拟橡胶-金属缓冲弹簧在受力过程中的变化情况,设定缓冲弹簧左端面为固定面,对其施加位移固定约束。同时,设定右端面为受力加载平面,施



图 4 橡胶-金属缓冲弹簧有限元网格划分模型

加 7 000 N 压力载荷。将橡胶-金属缓冲弹簧分别进行应力、应变、振动、变刚度连续加载性能测试。

2.2.1 应力、应变性能测试

对橡胶-金属缓冲弹簧的受力加载平面施加力载荷,得到应力、应变情况如图 5 所示。由图分析可知,橡胶-金属缓冲弹簧产生的最大应力为 5.405 MPa,在压缩情况下的取用应力为 10 MPa。产生的最大应变为 0.19%,在压缩情况下的取用应变为 5%。由此说明橡胶-金属缓冲弹簧在 1 000 ~ 7 000 N 的应力和应变都在取用范围以内,验证了缓冲弹簧作为连接元件的可行性与有效性。

2.2.2 振动稳定性性能测试

为了测试橡胶-金属缓冲弹簧是否会与飞机舵机电液伺服系统产生共振,对缓冲弹簧进行 1 ~ 6 阶的振动模态分析,如表 1 所示。由表分析可知,在 6 阶模态中 1 阶固有频率 25.9 Hz 为最小,远大于系统共振频率范围,说明橡胶-金属缓冲弹簧与系统不会发生共振现象,保证了整个系统的振动稳定性。

表 1 橡胶-金属缓冲弹簧振动模态频率

模态阶数	固有频率/Hz
1	25.9
2	26.4
3	27.1
4	30.3
5	32.4
6	37.8

2.2.3 变刚度连续加载性能分析

飞机舵机电液伺服系统加载力呈梯度变化,在

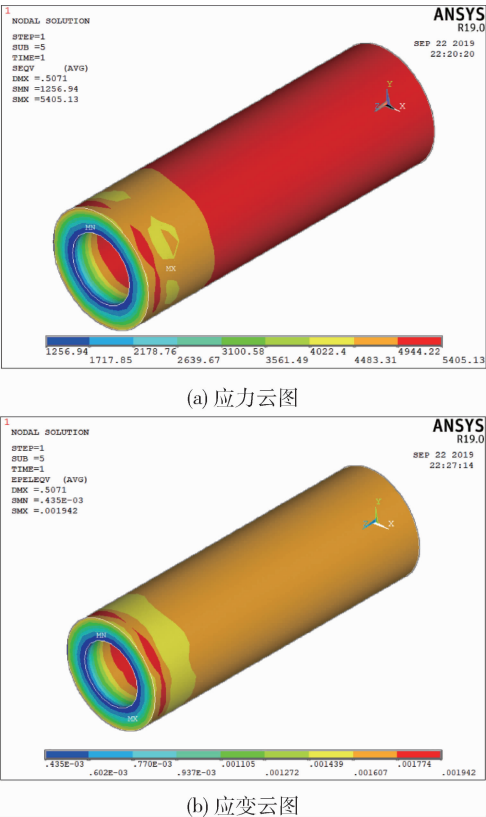


图5 橡胶-金属缓冲弹簧应力、应变云图

加载力较小时,橡胶-金属缓冲弹簧受力形变产生较小阻尼,内部金属丝有较小滑移,但总体刚度不变;当加载力不断增大时,橡胶-金属缓冲弹簧受力形变产生较大阻尼,内部金属丝因加载力作用而相互挤压,刚度值较初始值有所减小;当加载力继续增大到一定程度时,内部金属丝不再形变,滑移现象停止,力与位移之间呈现出硬特性,即刚度值开始增大。传统缓冲弹簧与橡胶-金属缓冲弹簧的刚度曲线如图6所示。由图分析可知,传统缓冲弹簧的刚度值为常量100 N/mm,而橡胶-金属缓冲弹簧的刚度值随加载力的增大而增加,说明橡胶-金属缓冲弹簧能够进行变刚度连续加载,可以满足实际需要。

3 飞机舵机电液伺服系统数学模型建立

3.1 橡胶-金属缓冲弹簧数学模型

由于飞机舵机电液伺服系统的加速度与加载惯量都比较小,因此将飞机舵机近似为惯性负载,并忽略其粘性阻尼系数及舵机运动过程中力的损耗,则可近似认为液压缸活塞杆和飞机舵机之间的位移差值与橡胶-金属缓冲弹簧输出的力之间存在

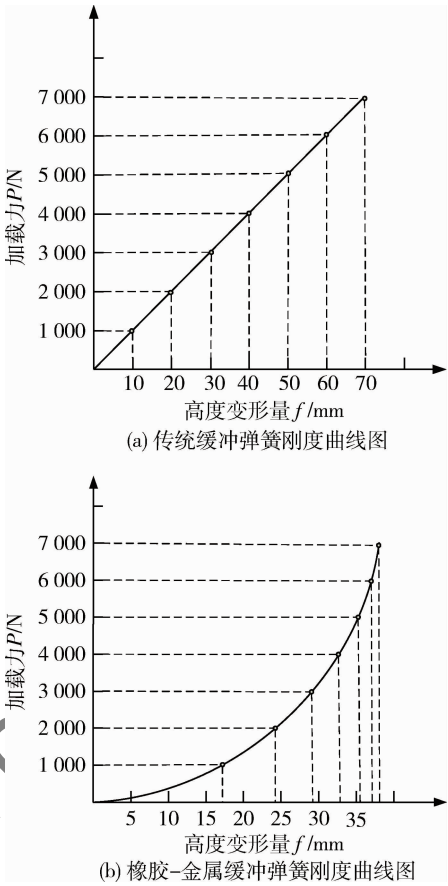


图6 缓冲弹簧刚度变化曲线图

线性关系为:

$$F_L = K_L(x_p - x_s) \tag{3}$$

式中, F_L 为作用在橡胶-金属缓冲弹簧上的负载力(N); K_L 为橡胶-金属缓冲弹簧刚度系数(N/m); x_p 为液压缸活塞杆位移(mm); x_s 为飞机舵机位移(mm)。

在小梯度加载的情况下,增加橡胶-金属缓冲弹簧的刚度系数能够提高系统的极限频带,但同时会使加载力信号中的高频分量增加。当刚度系数增加到一定数值后,会导致系统发散,进而降低系统稳定特性。反之,在同样的加载梯度下,减少橡胶-金属缓冲弹簧的刚度系数,虽然可以提高系统的加载精度,但会降低极限频带。因此依据研究需要,橡胶-金属缓冲弹簧的刚度系数设置为变刚度加载梯度值的3倍,即:

$$K_L = 3K_r \tag{4}$$

式中, K_r 为系统的加载梯度(N/m)。

3.2 电液伺服阀数学模型

系统采用 MOOGD079 三级电液伺服阀,由电子

控制器、前置阀、三级滑阀和位移传感器组成^[9]。考虑到模型将用于变化的频率加载,根据系统加载频率,可以将电液伺服阀传递函数进行简化,近似为惯性环节。

$$G_{sv}(s) = \frac{X_v}{U_{sv}} = \frac{K_{sv}}{T_s s + 1} \quad (5)$$

式中, X_v 为电液伺服阀阀芯位移 (mm); U_{sv} 为输入电压 (V); K_{sv} 为电液伺服阀增益; T_s 是时间常数。

3.3 液压缸数学模型

假设液压缸与电液伺服阀之间为理想连接管,其外形对称、长度较短、直径较大,并且管道的动态与管中压力损失均忽略不计,液压油温度与弹性模量定义为常数^[10]。液压缸非线性微分方程经线性化处理后,可以得到控制框图如图 7 所示。

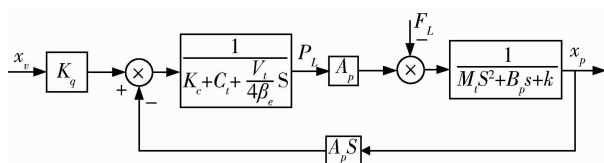


图 7 液压缸控制框图

因为液压缸为理想模型,故忽略液压缸油量泄露。由此可以得到液压缸传递函数为:

$$X_p = \frac{K_q}{A_p} X_v - \frac{K_c}{A_p} \left(\frac{V_t}{4\beta_e K_c} s + 1 \right) F_L \left/ \left(\frac{V_t M_t}{4\beta_e A_p^2} s^3 + \left(\frac{K_c M_t}{A_p^2} + \frac{B_p V_t}{4\beta_e A_p^2} \right) s^2 + \left(\frac{k V_t}{4\beta_e A_p^2} + \frac{B_p K_c}{A_p^2} + 1 \right) s + \frac{K_c h}{A_p^2} \right) \right. \quad (6)$$

经过化简后,可以得到:

$$X_p = \frac{\frac{K_q}{A_p} X_v - \frac{K_{ce}}{A_p^2} \left(\frac{V_t}{4\beta_e K_{ce}} s + 1 \right) F_L}{s \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (7)$$

式中, K_q 为电液伺服阀流量增益 (m^3/s); K_c 为流量-压力系数; $C_t = C_i + \frac{C_e}{2}$ 为总泄漏系数,其中, C_i 为液压缸内泄漏系数 ($\text{m}^3/(\text{Ns})$), C_e 为液压缸外泄漏系数 ($\text{m}^3/(\text{Ns})$); V_t 为液压缸两腔的总容积 (mm^3); β_e 为油液的弹性模量 (Pa),一般取 6.9×10^8 Pa; A_p 为活塞面积 (mm^2); M_t 为活塞及由负载折算至活塞上的总质量 (kg); ω_h 为阀控液压缸固有频率 (rad/s),且 $\omega_h = \sqrt{\frac{4\beta_e A_p^2}{M_t V_t}}$; ξ_h 为阀控液压缸相对阻尼系数,且 $\xi_h = \frac{K_c}{A_p} \sqrt{\frac{\beta_e M_t}{V_t}}$ 。

3.4 飞机舵机电液伺服系统数学模型

综上,根据控制元件电液伺服阀、执行元件液压缸、连接元件橡胶-金属缓冲弹簧的传递函数,结合经典力传感器、位置传感器的数学模型,依据飞机舵机电液伺服系统的工作机制,结合式(1)~(7)后可以得到飞机舵机电液伺服系统的总体数学模型如图 8 所示。

4 仿真实验与结果分析

在 MATLAB/Simulink 软件中构建飞机舵机电液伺服系统数学模型并进行仿真实验。设置系统

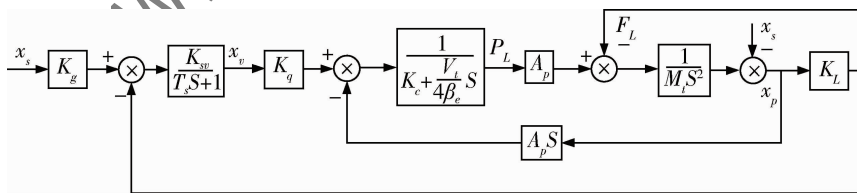


图 8 电液伺服系统模型图

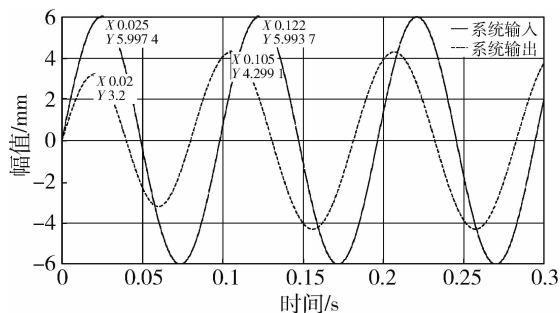
加载梯度为 1 T/mm,输入信号为幅值为 6 mm、频率为 10 Hz 的正弦信号。系统在采用橡胶-金属缓冲弹簧进行结构补偿前后的实验结果如图 9 所示。

由图分析可知,飞机舵机电液伺服系统在采用橡胶-金属缓冲弹簧进行结构补偿之前,输出幅值从 3.2 mm 逐渐趋近于 4.3 mm,响应幅值差为 25%,输入信号与输出信号相位差为 49°,系统稳定性和跟随性较差。而在采用结构补偿之后,输出幅值趋

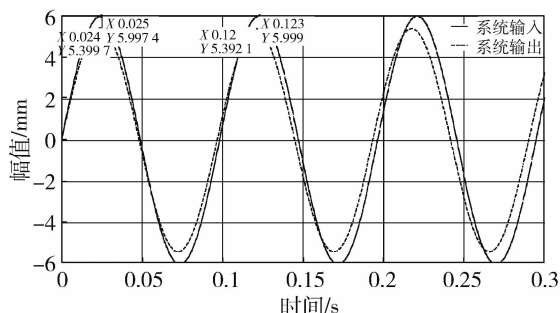
近于 5.4 mm,输入信号与输出信号相位差为 5.4°,符合双十指标。系统稳定性和跟随性得到明显改善。

5 结论

本文根据飞机舵机电液伺服系统的控制要求,以解决多余力干扰和无法进行连续加载问题为目的,采用在系统结构中设置橡胶-金属缓冲弹簧的结构补偿方法。首先,对橡胶-金属缓冲弹簧结构进行



(a) 未采用橡胶-金属缓冲弹簧的系统输入与输出响应曲线



(b) 采用橡胶-金属缓冲弹簧的系统输入与输出响应曲线

图9 系统输入和系统输出响应图

了设计,利用 ANSYS 仿真软件构建有限元模型,并对其进行了应力、应变、振动、刚度性能分析,验证了其作为连接元件的可行性与有效性。然后,通过构建橡胶-金属缓冲弹簧、电液伺服、液压缸的数学模型,从而得到了飞机舵机电液伺服系统整体数学模型。最后,利用 MATLAB 仿真软件对系统在采用橡胶-金属缓冲弹簧进行结构补偿前后的实验结果进行了对比分析。实验结果表明,橡胶-金属缓冲弹簧不仅能够使系统实现连续加载,保证试验的连续性,而且可以使多余力的作用明显减小,提高系统的稳定特性。

参考文献

- [1] ZHU Y, JIANG W L, et al. Study on nonlinear dynamics characteristics of electro-hydraulic servo system [J]. Non-linear Dynamics, 2015, 80(1-2): 723-737.
- [2] 李沛剑. 先导溢流阀节流孔特性的仿真研究[J]. 流体机械, 2019, 47(8): 28-31.
- [3] 王细波, 满满, 廖传军, 等. 蓄压器产品质量提升管理方法探索与实践[J]. 航天工业管理, 2018(12): 23-26.
- [4] 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.
- [5] 姜万录, 朱勇. 电液位置伺服系统非线性动力学行为研究[J]. 机床与液压, 2013, 41(7): 5-11.
- [6] 刘晓琳, 苏杨. 飞机舵机电液伺服系统智能 PID 控制方法研究[J]. 信息技术与网络安全, 2020, 39(3): 50-55.
- [7] 隋秀华, 何静, 苏旭, 等. 基于 ANSYS 的同轴圆柱双螺旋弹簧刚度分析[J]. 煤矿机械, 2015, 36(10): 118-120.
- [8] 罗华安, 赵大旭. 基于等轴拉伸试验的丙烯酸橡胶的黏超弹性模型及分析[J]. 机床与液压, 2013, 41(1): 11-14.
- [9] 周克俭, 李玉华, 于云峰. 液压负载模拟器控制方法研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(35): 9523-9527, 9531.
- [10] 郭洪波, 李磊. 阀控液压缸传递函数模型应用与建模误差分析[J]. 流体传动与控制, 2017(5): 16-20.

(收稿日期: 2020-03-23)

作者简介:

滕在明(1998-), 男, 本科, 主要研究方向: 智能控制、故障诊断。

韩秋旻(1995-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能控制、故障诊断。

刘晓琳(1978-), 通信作者, 女, 博士, 副教授, 主要研究方向: 智能控制、故障诊断。E-mail: caucyanjiusheng@163.com。

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《信息技术与网络安全》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《信息技术与网络安全》编辑部
中国电子信息产业集团有限公司第六研究所