

数字式电动操纵负荷系统的研究

詹家宾, 卢颖, 闫梁

(空军航空大学 军事仿真技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘要:飞行模拟器操纵负荷系统是飞行模拟器的重要组成部分,是向飞行员提供操纵力的人感系统。介绍了操纵负荷系统的仿真方法和全数字式操纵负荷系统的工作原理以及电动伺服加载系统的原理和结构特点,建立了电动驱动数字式操纵负荷系统数学模型,并通过样机试验验证了PID控制算法的有效性,实现了对飞机操纵系统的性能模拟,具有误差小、跟踪性能好的特点。为了验证仿真结果的有效性,在原理样机中进行了力加载实验,实验结果验证了数学模型以及仿真的有效性。

关键词:飞行模拟器;数字式操纵负荷系统;传感器;力伺服系统

中图分类号:TP15

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2009)12-0162-04

Research of the Digital Electric Control Loading System

ZHAN Jia-bin, LU Ying, YAN Liang

(Military Simulation Technology Institute, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: As an important component in flight simulator, the control loading system in flight simulator is the human-felt system that provides operating force for pilots. This paper introduces the emulating methods for load-operating system, the working principles of the all digital load-operating system, and the principle and structural characteristics of motor servo loading system, the mathematical model of motor driven digital control loading system were developed. Experiments have provided that PID control arithmetic was valid. The characteristic of the control loading system is small error and good tracking performance. To verify the simulation, the experiments of loading control force have been performed on the principle prototype. The experimental results indicate: the mathematical model established, and the simulation are valid.

Key words: flight simulator; digital control loading system; sensor; force servo system

0 引言

飞行模拟器操纵负荷系统是飞行模拟器的重要组成部分,它是向飞行员提供操纵力的人感系统,同时还要完成操纵面偏角的实时计算。仿真效果直接影响飞行员的训练,影响对飞行模拟器飞行品质的评定,而且要求飞行模拟器操纵负荷系统必须实时地、逼真地复现飞机在不同飞行条件下和不同操纵模式下(自动、手动、应急操纵等)操纵系统的静态和动态特性^[1]。

20世纪60年代到70年代国外操纵负荷系统的力感模拟采用模拟计算机与电液伺服控制相结合的方法实现,采用位置闭环进行力感模拟,受多余力的影响,力感逼真度较低;随着计算机技术的发展,20世纪80年代数字计算机的出现使得数字式操纵负荷系统

开始应用于飞行模拟器,并且为了提高力感模拟的逼真度,控制系统也由位置控制系统变为力伺服系统;90年代随着电动技术、电动操纵负荷系统得到广泛应用,并且为了提高力感模拟的逼真度,各种提高系统稳定性和频率响应的补偿技术被用于操纵负荷系统。相对而言国内对于该技术的研 究较少。因此对操纵负荷系统的关键组成部分进行深入的理论分析和实验研究,尽快研制出性能优良的操纵负荷系统,实现高逼真力感模拟,提高我国的仿真技术水平,具有重大的理论意义和实际应用价值^[2,3]。

文中以应用于飞行模拟器样机系统的操纵负荷系统为背景,根据飞机操纵系统的传动原理,建立了数字式电动操纵负荷系统,最后在该系统上进行了控制算法的试验研究,实现了预期的效果,并应用于飞行模拟机样机系统中,为进一步开发提供了指导。

1 操纵负荷系统的仿真方法

飞行模拟器操纵负荷系统的主要任务是仿真驾驶

收稿日期:2009-04-07;修回日期:2009-07-23

作者简介:詹家宾(1984-),男,河北沧州人,硕士研究生,研究方向为操纵负荷系统精确控制方法等;卢颖,教授,研究方向为飞行模拟器动感系统。

杆和脚蹬上的负载力及其变化特性,通常采用的仿真方法有:

- ① 弹簧加载。
- ② 利用载荷机构实物加载。
- ③ 力伺服系统加载。

根据执行机构的不同类型,力伺服系统可分为以下 2 类:液压力伺服系统;电动式力伺服系统。其中液压力伺服系统有功率大、快速性好、精度较高等优点,但也存在系统复杂、性能受油温影响、使用维护工作量大等缺点。电动式力伺服系统随着伺服电机性能的提高,已有越来越广泛的应用,因为它也可以满足功率大、快速性高的要求,同时使用维护方便,性能更加稳定。综上所述,数字式电动操纵负荷系统已经成为一种人感仿真系统的发展趋势。

2 数字式电动操纵负荷系统

在全数字式操纵负荷系统中,不仅操纵系统的全部功能在计算机中通过软件实现,而且把通过力传感器实测的驾驶杆(脚蹬)加载力与计算出的模型力在计算机内进行综合,在计算机内构成力的闭环控制,用力的误差信号驱动执行机构。

2.1 数字式电动操纵负荷系统的数学模型

操纵负荷系统是人在回路的负载模拟装置,它要完成飞行员十分敏感的驾驶杆力和脚蹬力的仿真,同时完成舵偏角的实时计算。驾驶杆力和舵偏角与飞机的飞行状态、机械传动机构的结构参数、非线性因素等密切相关,因此首先建立相应的数学模型^[4]。

(1) 负载力建模方法。

文中主要以升降舵(不考虑带助力器)为例,说明负载力模型的建立过程。升降舵所受负载力主要包括气动力、惯性力、粘性摩擦力、库仑摩擦力、弹簧力、止动力等六个部分,即:

$$F = F_a + F_n + F_v + F_f + F_x + F_l \quad (1)$$

其中气动力是飞行员所感受的主要载荷力。

● 气动力 F_a :

$$F_a = K_a(M_{JR} + M_{JC}) \quad (2)$$

式中: F_a - 气动力,即作用在舵面上的铰链力矩和作用在调整片上的铰链力矩之和,再转至飞行员作用点处的力;

K_a - 舵面至飞行员作用点处的传动系统;

M_{JR} - 作用在升降舵舵面上的铰链力矩;

M_{JC} - 作用在升降舵调整片上的铰链力矩。

● 惯性力 F_n :

$$F_n = K_{n1} \cdot \frac{d\omega}{dt} + K_{n2} \cdot N \quad (3)$$

式中: F_n - 惯性力,由于驾驶杆质量不平衡,在飞机角加速度或过载作用下产生的惯性力;

K_{n1}, K_{n2} - 等效比例系数;

ω - 操纵角加速度;

N - 纵向过载。

● 粘性摩擦力 F_v :

$$F_v = K_v \cdot \frac{dX}{dt} \quad (4)$$

式中: F_v - 粘性摩擦力,取决于粘性阻尼系数和驾驶杆运动速度大小;

K_v - 粘性阻尼系数;

X - 驾驶杆位移。

● 库仑摩擦力 F_f :取决于驾驶杆移动时速度极性和摩擦力系数,为一常值摩擦力,当驾驶杆位移速度增加,库仑摩擦力为正值;驾驶杆位移速度减少,库仑摩擦力为负值。

● 弹簧力 F_x :

$$F_x = K_x \cdot X \quad (5)$$

式中: F_x - 驾驶杆回中或限制驾驶杆推力过大的弹簧力;

K_x - 弹簧刚度;

X - 驾驶杆位移。

● 止动力 F_l :当驾驶杆运动到极限位置时,产生一个很大的止动力。

(2) 舵偏角实时计算模型。

当直接操纵舵面时,舵偏角与驾驶杆(或脚蹬)位移成正比,可将传动机构与舵面近似等效为一个惯性环节,其传递函数为:

$$\delta = \frac{K_c}{T_c + 1} \cdot X \quad (6)$$

在编程时,可采用差分方程解算舵偏角,若采用欧拉积分法,如下式所示:

$$\delta_n = \delta_{n-1} + \frac{\Delta T}{T_c} (K_c \cdot X - \delta_{n-2}) \quad (7)$$

式中: X - 驾驶杆位移(或脚蹬位移);

K_c - 驾驶杆握点或脚蹬至舵偏角传动比;

T_c - 惯性环节时间常数;

ΔT - 计算迭代步长。

2.2 力伺服加载系统的设计

操纵负荷系统为被动式力伺服系统,是典型的位置扰动型施力系统,它要求施力系统根据被加载对象的位移大小给驾驶盘或脚蹬施加相应的力,所施加的力要以高精度复现力函数,且要求具有快速响应性。工作原理如下:当飞行员操纵驾驶杆时,操纵机构的位置发生变化,相应的位置信号和力信号经 A/D 数据采

集卡进入到操纵负荷计算机,操纵负荷计算机根据接收到的当前位移传感器的位置信号,以及实时仿真计算机传送的飞行高度、飞行速度等信号,通过飞行操纵仿真模型实现计算力的生成,操纵负荷计算机的控制器将计算力与通过力传感器获取的实测力进行比较,得到的偏差信号经变换及数字滤波传送给 D/A 通道,再经过对驱动信号的放大和调理,驱动电动缸实现对操纵机构的加载,从而实现力感的逼真模拟。图 1 给出了电动操纵负荷系统的原理方框图。

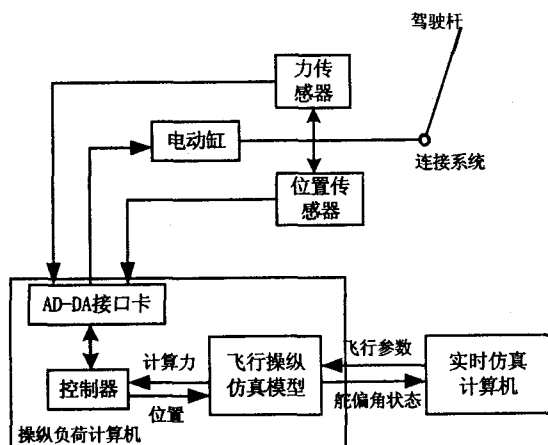


图 1 电动操纵负荷系统模拟原理图

整个控制系统的组成为外环和内环两部分。其中模型力为外环,根据实时仿真计算机传送的飞行参数和位移传感器采集的驾驶杆位置信号根据公式(1)进行模型力的计算,这个力是飞行员在这个位置应该感受的力,这个需要的力必须准确计算,即使操纵机构位置改变的很迅速。控制器为内环,根据外环输入的模型力和力传感器获取的实测力进行对比,最终实现力加载伺服系统的控制,通过采用很高的采样频率,避免混迭效应引起的失真以及量化阶梯带来的不平滑感,以得到逼真的模拟操纵系统杆力特性,并采用 PID 控制器实现^[5,6]。其中比例增益 P 用于调节系统的快速性和系统的稳态误差;微分增益 D 用于改善系统的动态性能,减少系统抖动;积分增益 I ,代表的是每次伺服环完成后进行延时的时间,从本质上讲它是降低系统性能的参数,其存在的目的是牺牲速度的一致性来换取系统的稳定,在系统稳定的条件下,积分参数应当为零,仅仅在系统稳定性不高的条件下,适当增加来提高系统稳定性,并有利于系统稳态性能的提

高^[7]。

根据控制系统的一般数学模型,为满足系统跟随精度,建立力伺服加载系统的标准二阶系统。在此基础上,为满足系统控制精度而又不改变系统特征方程,运用复合校正,将速度前馈和加速度前馈添加到系统中,构建如图 2 所示的结构图。

图 2 中, K_{vff} 为速度前馈参数, K_{aff} 为加速度前馈参数, P 为比例增益参数, D 为微分增益参数, I 为积分增益参数, M 为积分环节有效开关。放大死区环节是为了协调线性控制方式与非线性控制元件之间的矛盾,使全部元件可以按照线性方式进行运算处理。

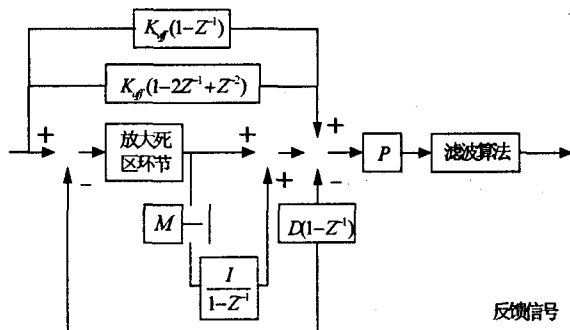


图 2 控制器力伺服环的控制框图

3 系统仿真实验与结果分析

根据飞机操纵系统所建立的数学模型和控制系统的研究,在建造的原理样机上对系统进行了试验^[8]。一般认为,阶跃输入对系统来说是最严峻的工作状态。如果系统在阶跃函数作用下的动态性能满足要求,那么系统在其它形式的函数作用下,其动态性能也是令人满意的。图 3 和图 4 就是在原理样机上控制系统阶跃响应仿真 PID 调试过程的两种测试曲线。

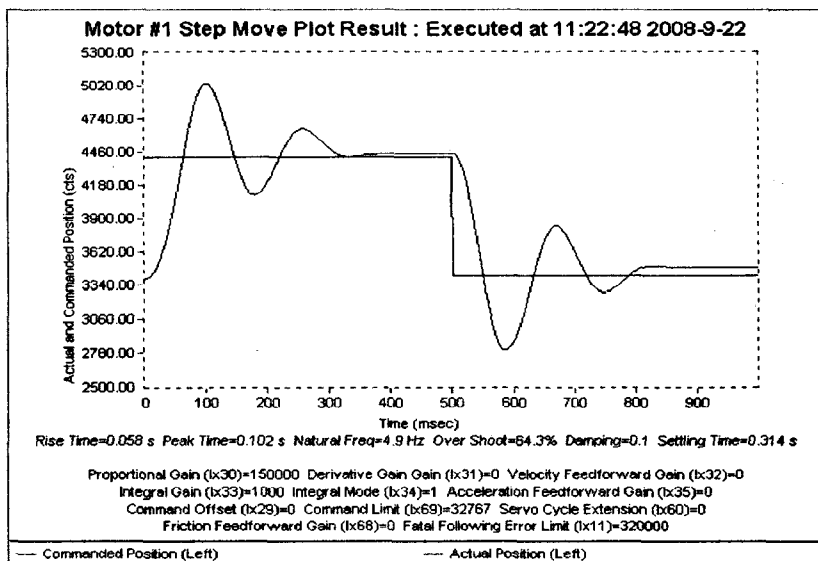


图 3 P 控制器响应曲线

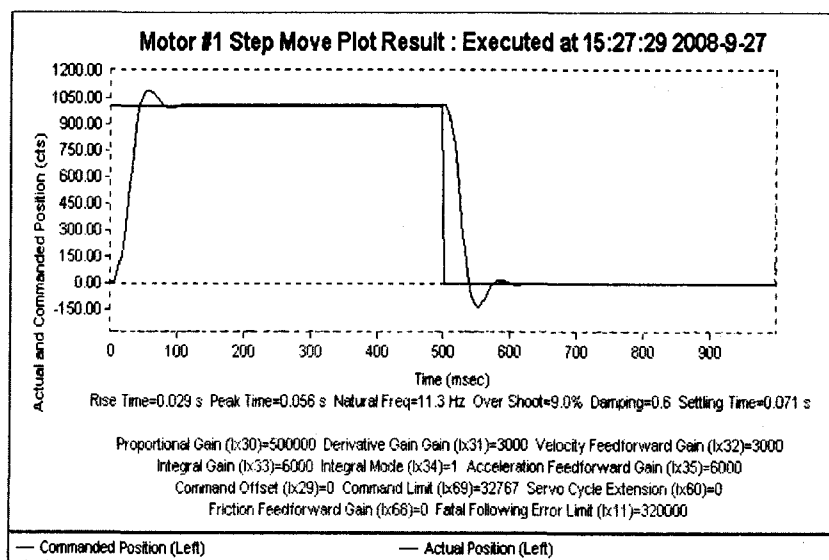


图 4 PID 控制器参数调节后响应曲线

调节比例增益参数 P , 在阶跃信号输入条件下, 获得图 3 的测试曲线。可以看到, 当增大比例增益参数 P , 使得系统的上升时间减小到 0.076s, 自然频率升高到 4Hz, 超调量升高至 33.6%, 系统振荡次数的增多, 影响系统的性能, 必须通过调节其他参数来减小振荡次数。通过调节比例增益 P , 可以减小稳态误差, 提高控制精度, 但不能消除稳态误差。增加 D 改善系统的动态特性, 减小超调, 缩短调节时间, 注意响应曲线和数据值的变化, 记录数据。确定 P, D 后, 小心地加入积分增益 I 观察响应的变化, 最后使响应尽可能快地调回期望值。图 4 为 PID 控制器参数调节后阶跃响应曲线。系统上升时间缩短至 0.029s, 自然频率升高至 11.3Hz, 超调量减小至 9.0%, 振荡次数下降, 系统的阶跃响应曲线明显改善。

实验结果表明系统的仿真精度、响应时间、超调量等经过 PID 调节后符合设计的性能要求。

4 结束语

根据对飞机操纵系统的分析, 给出了飞行模拟器

飞机操纵系统的仿真原理, 建立了采用电动缸进行力感模拟的数字式电动操纵负荷系统的样机系统。试验结果表明系统仿真精度高, 响应速度快, 超调小, 负载力模型和参数易于修改及采用 PID 算法的有效性, 已应用于开发的飞行模拟器样机系统中。

该方法还可用于横向操纵负载力及脚踏力的仿真。

参考文献:

- [1] 卢颖, 王勇亮, 王占林. 基于电动式力伺服的纵向操纵人感仿真系统[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(4): 505-507.
- [2] Martinez M, Rahkola A, Woodard M. Development of A 10 Channel Re-configurable High Performance Control Loading System[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference. Montreal: [s. n.], 2001: 1-9.
- [3] 张戟. Fokker Ecol 8000 电动操纵负荷系统[J]. 科技资讯, 2007(1): 227-229.
- [4] 王行仁, 贾荣珍, 彭晓源, 等. 飞行实时仿真系统及技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.
- [5] Gerretsen A, Mulder M, van Paassen M M. Comparison of Position-loop, Velocity-loop and Force-loop Based Control Loading Architectures[C]//Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. San Francisco, CA: [s. n.], 2005.
- [6] FCS Simulator Systems Technical Proposal ECol 8000 - SPEC - C - 5DS - 01 for Electric Control Loading System [M]. [s. l.]: [s. n.], 2003.
- [7] Alleyne A, Liu R. On the Limitations of Force Tracking Control of Hydraulic Servosystems[J]. ASME Journal of Dynamic System Measurement and Control, 1999, 40(2): 876-879.
- [8] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(上接第 142 页)

- Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks[S]. [s. l.]: [s. n.], 2003.
- [3] Pottie G J, Kaiser W J. Embedding the Internet: Wireless integrated network sensors[J]. Communications of ACM, 2000, 43(5): 51-58.
- [4] 任丰原, 黄海宁, 林闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [5] 李晓维, 徐勇军, 任丰原. 无线传感器网络技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
- [6] Crow B P, Widjaja I, Kim L G. IEEE 802.11 Wireless Local Area Networks[J]. Communications Magazine, IEEE, 1997, 35(9): 116-126.
- [7] 崔莉, 鞠海玲, 苗勇. 无线传感器网络研究进展[J]. 计算机研究与发展, 2005, 42(1): 163-174.
- [8] 黄镇建. NS2 中新协议的实现[J]. 计算机系统应用, 2009 (1): 119-121.