

飞行模拟器电动操纵负荷系统的迭代学习控制研究

段永胜¹, 卢颖¹, 任贝贝², 闫梁³

(1. 空军航空大学军事仿真技术研究所, 长春 130022; 2. 东北师范大学, 长春 130022;
3. 装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘要: 为提高电动操纵负荷系统力感跟踪精度、动态性能, 阐述了电动操纵负荷系统组成及工作原理; 建立系统数学模型, 在电流和速度双环伺服控制的基础上, 提出迭代学习控制加前馈补偿复合控制策略; 利用阶跃与正弦响应信号对系统进行仿真测试和分析。仿真结果表明, 采用迭代学习加前馈控制策略, 系统跟踪精度进一步提高, 动态性得到改善, 可应用于实际操纵负荷系统。

关键词: 飞行模拟器; 操纵负荷系统; 前馈控制; 迭代学习控制

中图分类号: V271.9; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2013)03-0089-04

Iterative Learning Control of Electric Controlled Loading System of Flight Simulator

DUAN Yongsheng¹, LU Ying¹, REN Beibei², YAN Liang³

(1. Military Simulation Technology Research Institute, Aviation University of Air Force, Changchun130022, China; 2. Northeast Normal University, Changchun 130022, China; 3. Academy of Equipment Command & Technology, Beijing 101416, China)

Abstract: The purpose of this paper is to enhance the tracking accuracy and dynamic performance of electric controlled loading system. Firstly, the composition and working principle of electric controlled loading system were described, and the system mathematical model was established. An Iterative Learning Control (ILC) & feed-forward compensation composite control strategy was proposed on the basis of the dual loops of current and velocity. At last, step response and sinusoidal response signals were used to test the control strategy. The results indicated that the compound control method can improve the system tracking accuracy and improve the dynamic performance, which can find application in practical load control systems.

Key words: flight simulator; control loading system; feed-forward control; iterative learning control

0 引言

数字式操纵负荷系统是飞行模拟器的重要组成部分, 用来对飞行员驾驶飞机的操纵杆力、脚蹬力进行仿真^[1], 其性能好坏直接影响到飞行模拟器的逼真程度和品质评定^[2]。影响飞行模拟器操纵负荷系统性能的因素主要有两方面原因: 一是伺服加载系统; 二是系统控制补偿策略。加载系统达到一定技术指标要求后, 很难继续改进且成本较高, 而软件控制策略开发潜力大, 能弥补硬件的不足, 可实现各种非线性控制需求。

为实现飞行模拟器操纵负荷系统的精确加载, 已

经有学者对加载系统做过相关的研究, 如结构补偿法、神经网络控制、 μ 理论控制等方法^[3], 对提高加载特性和抑制多余力起到一定的作用, 但不能实现对系统模型完全跟踪, 很难达到理想效果。

针对被模拟的真实直升机操纵负荷系统力感技术指标要求, 搭建飞行模拟器电动操纵负荷系统硬件控制系统, 建立加载控制部分的精确数学模型。在分析系统多余力属性的基础上, 采用基于迭代学习控制 (ILC) 加前馈补偿的复合控制策略来抑制系统多余力的干扰, 并且应用于电动操纵负荷控制器中。最后, 利用 Matlab/Simulink 工具对系统控制效果进行仿真研究, 在原理样机上验证复合控制策略的可行性。

1 系统组成及工作原理

电动操纵负荷系统是由伺服加载系统和计算机控

制系统两大部分组成,系统具有机构复杂、扰动大的特点。其中加载系统包括:驾驶杆、伺服电机、滚珠丝杠、伺服驱动器、传感器;计算机控制系统包括:主控计算机、操纵负荷计算机、数据采集卡、控制器。各分系统通过组合构成机电一体化系统,系统的整体结构如图 1 所示。

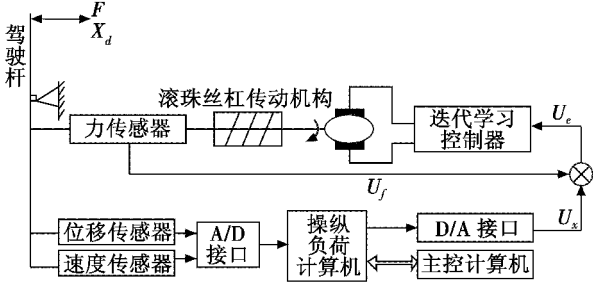


图 1 系统组成结构示意图

Fig. 1 Construction of the system

电动操纵负荷系统是一种被动式力伺服系统,也是典型的位置扰动型施力系统^[4],它要求系统根据被加载对象位移大小给驾驶杆或脚蹬施加相应的力 F ,所加的力要以高精度复现模型力函数,且要求具有很高的实时性。其工作原理为:当飞行员操纵驾驶杆或脚蹬时,操纵机构的位置发生变化,力传感器和光电编码器得到相应的信号,经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杆位移 X_d ,以及主控计算机传送的飞机高度、飞行速度以及气动参数等飞行参数,通过解算飞行操纵力感模型计算出各通道的模型力 U_x 。与此同时,操纵负荷计算机的控制器将模型力与实测力 U_f 进行比较,并将误差 U_c 返回给控制器,控制器根据误差以及各种相关信号来控制驱动器,减小跟踪误差。如此反复进行,逐渐实现精确跟踪,提高力感逼真度。

迭代学习控制采用“在重复中学习”的学习策略,它具有记忆系统和经验修正机制。由于这种控制技术需要较少的经验知识、以非常简单的方式处理不确定程度相当高的动态系统,其适用于具有某种重复运动性质的被控对象并且可实现完全跟踪,这不同于渐近跟踪;可在不精确已知(甚至未知)被控对象动力学特性的情况下设计控制器,它适用于一般非线性系统。

2 系统数学模型

直升机操纵负荷系统由横向、纵向、航向和总矩四通道组成,分别由驾驶杆、脚蹬和总矩杆控制,各通道加载系统的结构和原理相似,以纵向通道为例,采用力闭环控制方式,建立力伺服加载系统数学模型。

1) 交流永磁伺服电机。

选用 Exlar 公司的 KX809_008 型号电机,交流永

磁同步伺服电机模型为^[5]

$$u_c = R_a I_a + L_a \dot{I}_a + K_e \dot{\theta}_m \quad (1)$$

$$K_t + J_e \ddot{\theta}_m + B_e \dot{\theta}_m + nM_L \quad (2)$$

式中采用 $i_d = 0$ 的电流反馈矢量控制方式,其电流调节器等效为比例环节, I_a 为输入电流。

2) 滚珠丝杠。

根据选用的交流伺服电动机确定电动缸滚珠丝杠,滚珠丝杠导程设为 M ,单位 m 。滚珠丝杠的模型为

$$V_z = V_x / M \quad (3)$$

式中: V_z 为丝杠转速; V_x 为丝杠线速度。

3) 力传感器。

力矩传感器是连接电机与被加载对象的关键部件,由于其本身的惯量和摩擦较小,可以视为一个比例环节,模型简化为

$$T = k_a L \quad (4)$$

选用美国 TRANSCCELL 公司的 BSS 系列力传感器,其中: $k_a = 50$,为力矩传感器转化系数; L 为形变量。

4) 机械系统传递函数。

机械系统可简化为二阶定常系统,当输入为杆位移,输出为电机的转角,其传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{Js^2 + Ds + K_t} \quad (5)$$

式中: J 为所有机械系统部件的转动惯量折合到电机轴上之和; D 为等效阻尼系数,由于机械结构都是刚性的,取其值为 1; K_t 为机械系统的等效弹性系数,由于操纵负荷系统机械部件均为刚性部件,因此系统等效弹性系数 $K_t = 0$ ^[6]。

5) PWM 控制器。

PWM 控制器等效为一阶惯性环节, K' 为电机传动系数, k_c 为速度控制器比例系数。即

$$I_a = \frac{k_c}{K' s + 1} I_c \quad (6)$$

根据以上各部分的数学模型,建立电动力伺服系统模型,如图 2 所示。

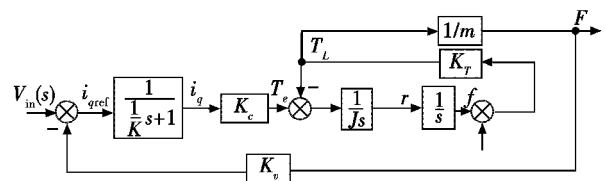


图 2 电动力伺服加载系统方框图

Fig. 2 Electrical force-servo system diagram

3 迭代学习控制加前馈控制器设计

当杆位移不为零时,系统存在多余力的影响,尤其是杆速度较高时,多余力效果更加明显,加上系统非线性

性的影响(如速度控制器),输出力对模型力的跟踪精度受到很大影响。只通过单一 PID 或者结构补偿不能有效解决上述问题,为此,采用迭代学习控制加前馈补偿控制器,其结构如图 3 所示。

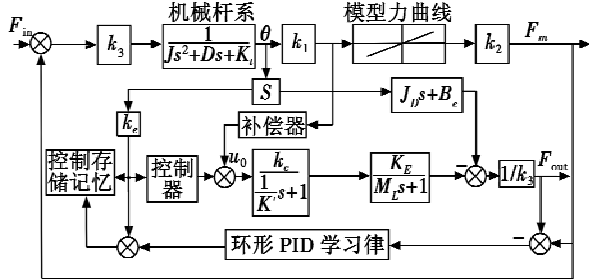


图 3 迭代学习控制框图

Fig.3 ILC control diagram

3.1 迭代学习控制器设计

针对系统非线性和外力扰动干扰问题, Joon-Ho Park 和 Tae-Que Kim 等人通过采用动态分析仪对 PID 参数进行整定^[7], 由于是通过波特图法调整比例增益和积分增益, 整定繁琐, 不易实现; 文献[8]采用迭代学习控制策略, 跟踪精度高, 算法易实现。采用迭代学习控制, 其中利用开环 PID 学习律来提高学习速度, 克服了单纯 PID 控制参数整定的局限性。迭代学习控制器如图 4 所示。

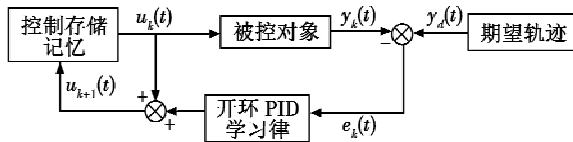


图 4 迭代学习控制原理图

Fig.4 Working principle of ILC control

系统状态方程在第 k 次运行时可表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_k(t) = f(t, x_k(t), u_k(t)) \\ y_k(t) = g(t, x_k(t), u_k(t)) \end{cases} \quad (7)$$

输出误差为

$$e_k(t) = y_d(t) - y_k(t) \quad (8)$$

式中: 下标 k 表示迭代次数; $y_d(t)$ 为有界连续期望输出; $u_k(t)$ 为系统第 k 次迭代的控制输入信号; $y_k(t)$ 为系统第 k 次迭代的输出信号。

迭代学习控制的中心问题是, 如何选择一种学习律, 使得系统既有良好的稳定性又有较快的收敛速度^[9]。控制器通过选取开环 PID 学习律来控制系统误差信号。

3.2 前馈补偿器设计

为提高系统响应速度, 满足动态性的要求, 利用前馈控制的速度、加速度补偿, 可预见性地对系统进行提前补偿, 避免系统震荡的发生, 从而为整体系统的稳定

性及实时性打下理论基础^[10]。前馈控制器如图 5 所示。

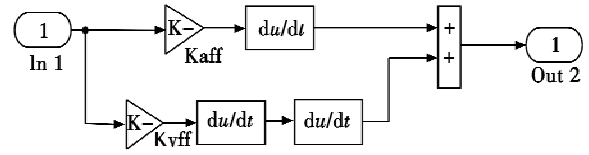


图 5 前馈控制器

Fig.5 Feedforward controller

4 系统仿真与结果分析

4.1 参数选取

以某型直升机飞行模拟器电动操纵负荷系统为研究对象, 电机选用永磁同步交流伺服电机, 系统相关参数为: 交流伺服电机电感 $L_a = 0.15 \text{ H}$; 永磁交流电机电阻 $R_a = 9.5 \Omega$; 电机转动惯量 $J_m = 0.18 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; 永磁交流电机的反电势 $K_e = 0.13 \text{ V} \cdot \text{min}/\text{r}$; 控制器比例系数 $k_c = 4.5$; 机械系统等效转动惯量 $J = 0.245 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$; 滚珠丝杠导程 $m = 2.54 \text{ mm}$; 机械系统的传动比 $k_3 = 0.53$; 机械系统弹性系数 $K_1 = 0$; 迭代周期 $T = 500 \text{ ms}$; PID 学习律参数 $P = 10, I = 0.5, D = 0.8$; 系统模型力预置载荷为 $F_0 = 5 \text{ N}$ 。

为分析前馈补偿控制对系统动态性能以及稳态误差范围的影响, 在阶跃响应条件下, 令输入扰动 $\theta = 0$, 输入幅值为 20 N 的阶跃信号, 仿真时间为 1 s , 控制参数 $M = 5, P = 6, N = 40, Q = I$ 。

为分析在加入 ILC 控制器后, 系统跟踪性能变化情况以及系统学习前后误差的变化, 在正弦响应条件下, 令输入扰动 $\theta = 0$, 输入正弦信号, 幅值为 20 N , 频率为 5 Hz , 仿真时间为 1 s , 控制器参数不变。

为分析同时加入 ILC 控制器和前馈补偿器对系统扰动的抑制能力、系统跟踪性能变化以及系统学习前后静差的变化情况, 在正弦响应条件下, 令输入扰动 $\theta = 3 \text{ N}$, 输入正弦信号, 幅值为 20 N , 频率为 5 Hz , 仿真时间为 1 s , 控制器参数不变。

4.2 仿真曲线

根据给定参数, 利用 Matlab/Simulink 工具对系统进行仿真, 得到的响应曲线如图 6 ~ 图 10 所示。

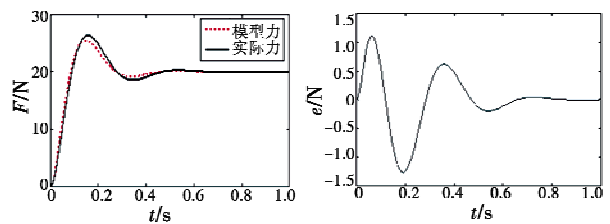


图 6 PID 控制

Fig.6 PID control

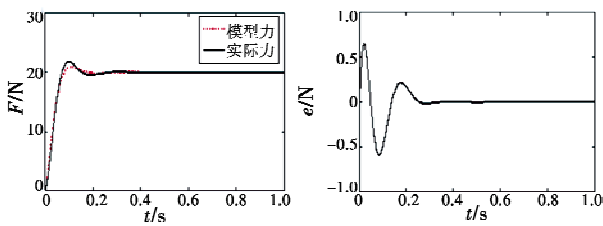


图7 前馈加PID控制

Fig.7 Feedforward + PID control

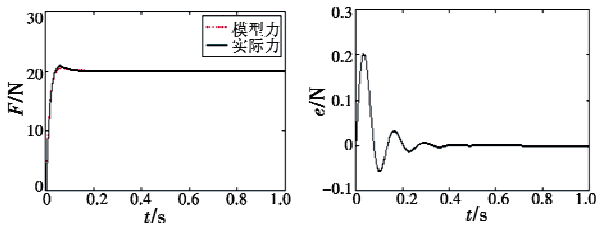


图8 10次迭代学习控制

Fig.8 10-times of ILC control

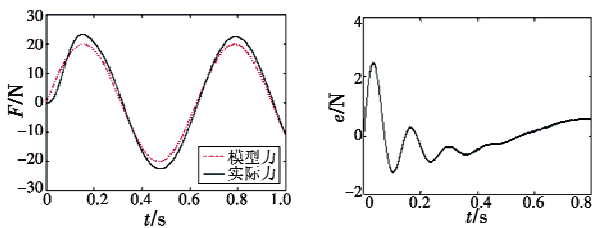


图9 PID控制

Fig.9 PID control

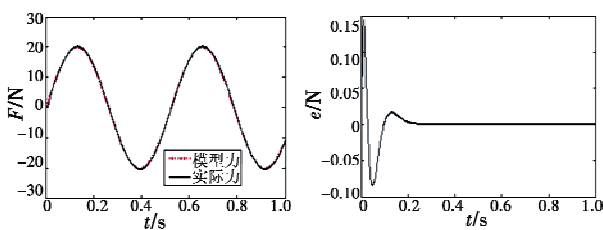


图10 10次迭代学习控制

Fig.10 10-times of ILC control

4.3 结果分析

系统PID控制阶跃响应效果如图6所示,超调量 $\sigma\% = 49.5\%$,最大误差为1.2 N,很难满足系统需求指标;系统加入前馈补偿控制器,如图7所示,系统综合指标明显提高,超调量下降了78.5%,调节时间缩短为0.21 s,最大误差下降为0.6 N。系统同时加入前馈控制器并且10次迭代学习后阶跃响应效果如图8所示,系统综合指标进一步提高,超调量减小为2.5%,静差为0 N,最大误差下降为0.2 N,系统的动静态特性得到有效改善,满足系统需求指标。

系统扰动响应效果如图9、图10所示,PID响应初期偏差大且收敛速度慢,加入前馈补偿并且10次在线迭代学习后,系统控制参数进一步优化,抑制扰动能力有很大提高,误差稳定在0.05 N之内,完全满足系统需求指标的要求。

5 结束语

1) 对某型直升机飞行模拟器电动操纵负荷系统控制策略进行研究和设计,使其满足飞行模拟器操纵负荷系统的力感跟踪需求指标及逼真度要求。

2) 前馈补偿控制提高了动态性能,迭代学习控制可在线不断优化系统控制参数,具有抑制输出干扰的能力,实现零误差跟踪控制。

参考文献

- [1] 卢颖,王勇亮,王占林,等.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] 付家才,刘宪华,马天楚.飞行模拟器电动式操纵负荷系统控制策略[J].黑龙江科技学院学报,2010,20(5):367-370.
- [3] 王立文,信光成.基于力矩电机的飞行模拟机操纵负荷系统研究[J].计算机测量与控制,2010,18(8):1818-1820.
- [4] FRDRISCOLL V, ALEONESSA C D. Design of a prototype ocean current turbine—Part II: Flight control system [J]. Ocean Engineering. 2006, 33(11/12):1522-1551.
- [5] 闫梁,梁建民,潘春萍,等.飞行模拟器操纵负荷系统模型力建模仿真研究[J].微计算机信息,2010(34):12-16.
- [6] 卓家寿.力学建模导论[M].北京:科学出版社,2007:53-67.
- [7] AYASUN S, FISCHL R, VALLIEU S, et al. Modeling and stability analysis of a simulation—stimulation interface for hardware-in-the-loop applications [J]. Simulation Modeling Practice and Theory, 2007, 15(6):734-746.
- [8] 罗星宝.基于迭代学习控制的开关磁阻电机转矩脉动最小化控制研究[D].杭州:浙江大学,2008.
- [9] 范杨.采样迭代学习控制算法研究[D].无锡:江南大学,2011.
- [10] CHEN W, CHEN Yangquan. Robust iterative learning control for output tracking via second-order sliding mode technique [C]//American Control Conference, 2010: 2051-2056.