

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.07.021

电动操纵负荷系统多余力抑制研究

闫梁, 梁建民, 刘刚, 詹家宾
(空军航空大学 军事仿真技术研究所, 吉林 长春 130022)

摘要: 为有效抑制多余力对系统的伺服精度、动态性能和稳定性等指标的影响, 提出PID+前馈补偿复合控制策略的设计思想。阐述电动操纵负荷系统的组成及工作原理, 通过对系统的模型建立及仿真分析, 深入了解多余力产生的机理及对系统的影响, 并以俯仰通道为例, 采用阶跃响应和正弦响应进行测试验证。结果表明, 该控制策略能有效抑制多余力影响, 提高电动操纵负荷系统的力感跟踪精度。

关键词: 操纵负荷系统; PID控制; 前馈; 多余力
中图分类号: N945.12; TP391.9 **文献标识码:** A

Research on Eliminating Extra Force of Electric Control Loading System Based on Complex Control Method

Yan Liang, Liang Jianmin, Liu Gang, Zhan Jiabin
(Military Simulation Technology Research Institute, Aviation University of Air Force, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to eliminate the extraneous force of the system and enhance the servo accuracy, dynamic capability and stability, put forward the PID & IMC complex control method. Introduce the structure and working principles of the electric control loading system. Analyze the mechanism of production of extraneous force by setting up the mathematic model and simulating it, and to pitch channel, for example, using step response and sinusoidal response to test validation. The results indicate that the complex control method can lower the influence of extra force and enhancer tracing capability of the system.

Keywords: control loading system; PID control; IMC; extra force

0 引言

电动操纵负荷系统是一种典型的电动式被动力伺服系统, 该类系统中产生的多余力将直接影响飞行模拟器操纵负荷系统的性能。因此, 如何减少多余力对系统的影响因素, 对提高系统性能品质, 具有重要的意义。抑制电动伺服系统多余力的方法主要有硬件、软件 2 方面^[1]。从硬件(机械)上改进, 具有性能稳定、可靠性好等优点, 但加工和安装精度仍存在问题。在模拟控制系统开始到数模混合控制及计算机控制系统的长期发展过程中, 形成了许多行之有效的控制策略^[2]。目前, 关于液压加载方式的操纵负荷系统的控制策略主要有经典 PID 控制法、结构不变性设计方法、自适应、自学习、智能控制方法等。相对液压加载方式而言, 电动操纵负荷系统的研究在我国的起步较晚, 研究较少。故通过对操纵系统的数学模型的建立及仿真, 应用 PID+前馈的复合控制策略抑制系统的多余力。

1 操纵负荷系统的组成及工作原理

操纵负荷系统是由自动控制部分和机械运动部分组成的复杂控制系统。其中, 自动控制部分采用“PC机+控制器”方式, 主要包括: 主计算机、

操纵负荷计算机、伺服控制器、伺服驱动器、交流伺服电机及传感器; 机械部分由驾驶杆和电动缸等组成。两部分独立完成各自的任务, 协同实现机电一体化的控制^[3]。以纵向操纵负荷系统为例, 系统框图如图 1。

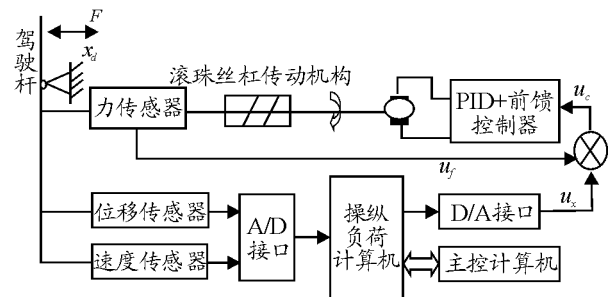


图 1 系统组成部件示意图

操纵负荷系统是被动式力伺服系统, 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踏施加相应的力, 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。其工作原理为: 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等经 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

收稿日期: 2010-01-11; 修回日期: 2010-03-31

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(20080431390)

作者简介: 闫梁(1987-), 男, 黑龙江人, 空军航空大学军事仿真技术研究所硕士研究生, 从事操纵负荷系统精确控制方法研究。

信号，以及主计算机传送的飞行高度、飞行速度等飞行参数，通过飞行操纵仿真模型计算出各个通道的模型力，操纵负荷计算机的控制器将模型力与通过力传感器获取的实测力进行比较，得到力的误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，驱动执行机构实现对操纵机构的加载，从而实现力感的逼真模拟。

2 系统数学模型的建立及仿真分析

由于飞行模拟器操纵负荷系统由升降舵通道、方向舵通道和副翼通道 3 个通道组成，并且副翼加载系统、方向舵加载系统与升降舵加载系统的结构和原理的相似性，故只以升降舵加载系统为例建立力伺服加载系统数学模型。

1) 交流永磁伺服电机^[4]

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

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

2) 驱动器

因功率放大器的脉冲频率远高于系统的频宽，可忽略高次谐波的影响，简化成比例环节，其比例系数为 K_q ，具体数据要根据系统性能确定。

3) 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/rad)。滚珠丝杠的模型为：

$$F = \frac{T_f}{m} \quad (3)$$

4) 力传感器

力传感器是闭环系统中重要的测量环节，其精度在很大程度上决定着系统的精度。选定力传感器增益 K_v ，则模型为：

$$U_f = K_v F \quad (4)$$

其中： K_v 为力传感器转换系数 (V/N)； U_f 为力传感器的输出电压 (V)。

5) 扭矩传感器

扭矩传感器是连接电机与被加载机构的关键部件，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：

$$T = K_t \Delta\theta \quad (5)$$

根据以上各部分的数学模型，可以建立电动力伺服加载系统的方块图如图 2。

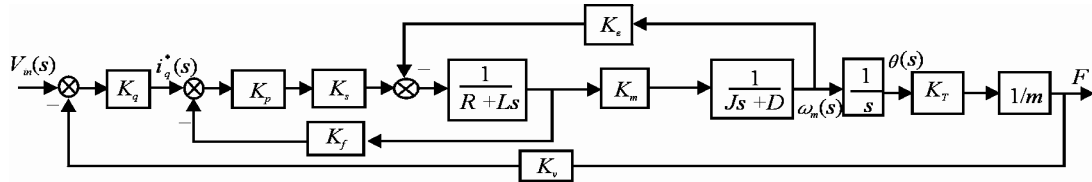


图 2 电动力伺服加载系统方块图

6) 机械系统传递函数

机械系统可简化为二阶定常系统，其传递函数可以简化为：

$$G(s) = \frac{1}{Js^2 + Ds + K_l} \quad (6)$$

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，取估计值为 1； K_l 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，因此系统等效的弹性系数 $K_l = 0$ ^[5]。

根据操纵负荷系统的工作原理、建立的数学模

型及系统力伺服加载控制方块图及动态仿真模型，如图 3。图 3 中， K_1 为驾驶杆握手处到电动缸输出轴的传动比； $1/(Js^2 + Ds + K_l)$ 为机械系统的传递函数； K_2 为由电机输出轴转角与位移间的比例关系； K_3 为模型力修正系数，调整其大小可以影响系统的动态响应，保证系统的静态控制精确； K_4 为电机反电势补偿增益 ($K_4 = \text{电源电压} / \text{最大空载转速}$)； K_5 为力传感器比例系数； K_6 为滚珠丝杠导程系数； $K/[(\tau_m s + 1)(\tau_e s + 1)s]$ 为电动机的传递函数； K_q 为驱动器环节。

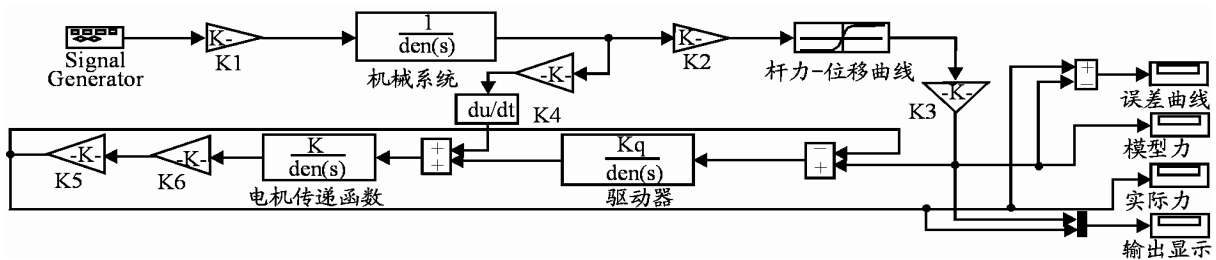


图 3 力伺服加载系统仿真模型

通过以上设置,对系统模型进行以下仿真研究:当输入为阶跃信号时,调节相关环节参数,得到如图4的仿真曲线。由图4可知,系统稳定,并且阶跃响应曲线在参数调节之后,整个过程柔和,超调量由68.4%减小为31.3%,调节时间由4.4s缩短为2.3s,但动态性能仍需要进一步改善。

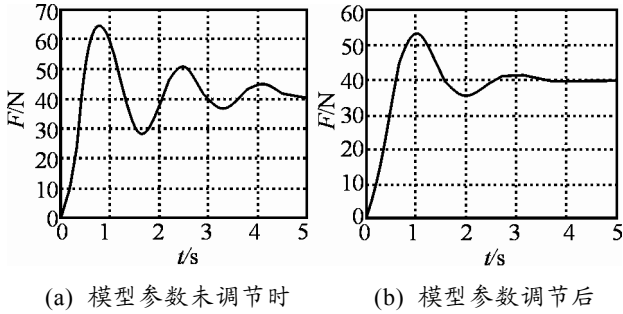


图4 阶跃响应仿真曲线

当输入正弦信号时,得到如图5的仿真曲线(模型力曲线—虚线,实际力曲线—实线)。由图5可知,虽然通过调节系统模型参数使跟踪性能得到改善,但是正弦响应仿真曲线仍存在较大的跟踪误差和滞后现象,特别是在杆运动方向改变的时刻(即曲线的波峰、波谷位置)尤其明显。误差曲线如图6,图6(a)误差最大值为58.4N,图6(b)误差最大值为36.5N,这是由于系统存在位置扰动产生的多余力引起的。因此,多余力使系统模型的加载精度大大下降,难以实现点点跟踪。

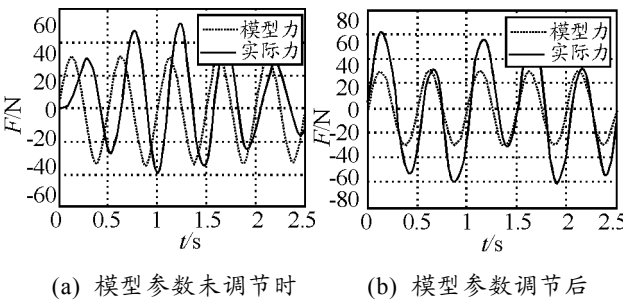


图5 正弦响应仿真曲线

通过对系统模型的仿真,深入了解了电动操纵

负荷系统的性能和影响系统性能的主要因素,完成了数字式电动操纵负荷系统的仿真任务。仿真结果验证了操纵负荷系统模型的正确性。

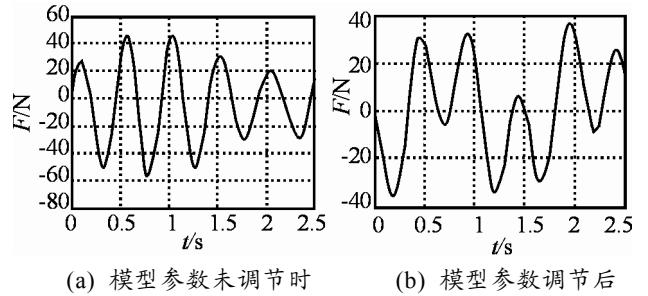


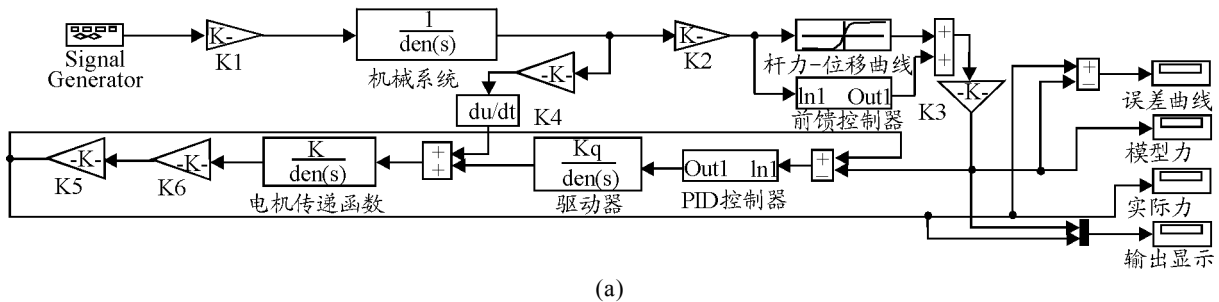
图6 正弦响应误差曲线

3 PID+前馈校正控制策略及仿真分析

PID控制器与前馈补偿控制器是控制系统工程中2种常用的校正方法,在一定程度上可以使被校正系统满足给定的性能指标要求。前馈补偿控制策略增加了系统零点,在提高快速性的同时导致系统振荡^[6]。因此,当控制系统中存在强扰动,或者系统的稳态精度和响应速度要求很高,使用一种控制器的校正方法难以满足要求。操纵负荷控制系统作为飞行模拟器的重要组成部分,其稳态精度要求很高,响应速度要求很快,加上其输入是未知的时变函数,要求系统响应以零稳定误差跟踪输入信号,所以一般来说单独的PID控制或前馈校正控制不能满足上述要求,常采用两者相结合的复合控制策略。

PID+前馈补偿复合控制策略的优点在于可以将精度指标和稳定性分开,由于应用复合控制,传递函数的特征方程的根是不变的,因此不影响系统的稳定性,同时利用前馈速度、加速度补偿或者反馈校正,可有效抑制位置扰动引起的多余力、提高系统的精度、减少稳态误差,为实现电动操纵负荷系统的高逼真度仿真打下良好的理论基础^[7]。

依据前文操纵负荷系统的数学模型和力伺服加载控制系统的方块图,建立电动操纵负荷系统的动态仿真模型,如图7。



(a)

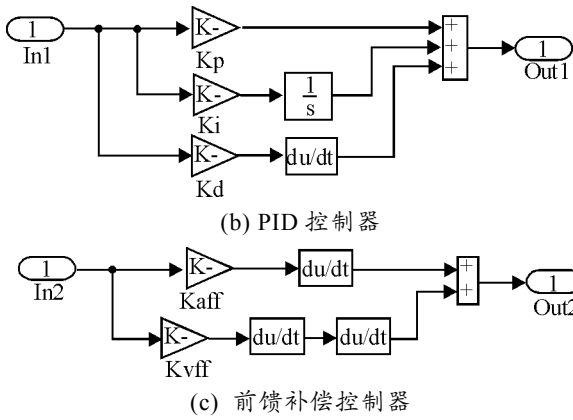
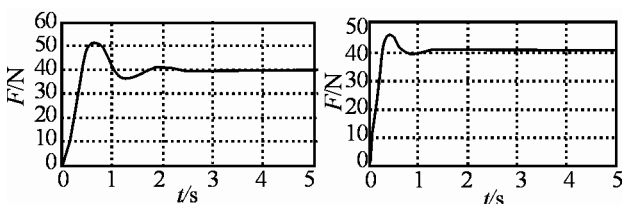


图 7 控制策略仿真模型

采用 PID+前馈补偿复合控制策略以及各种辅助算法对系统模型进行仿真研究，仿真条件同上。首先，进行阶跃响应仿真，观察系统模型的稳定性、响应速度、超调量等动态特性。设置比例环节参数 $K_p=200$ ，在未调节其它控制策略参数时获得阶跃响应仿真曲线，如图 8(a)，与图 4(b)对比发现 P 控制加快了系统的响应速度，调节时间和上升时间得到明显改善。根据 PID 控制器参数对系统的影响，对 PID 控制器多次调节进行参数选优，使 $K_p=105$ ， $K_i=12.4$ ， $K_d=8.5$ ，获得阶跃响应仿真曲线，如图 8(b)。对前馈补偿控制器进行参数选优，使 $K_{vff}=8.5$ ， $K_{aff}=0.12$ ，获得阶跃响应仿真曲线，如图 9。

由图 8、图 9 可看出，系统模型在复合控制策略校正下，动态性能得到很好的改善，系统稳定性得到提高，超调量减小，上升时间和调节时间缩短。



(a) 模型参数未调节时 (b) 模型参数调节后

图 8 PID 控制阶跃响应仿真曲线

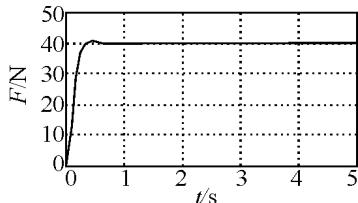
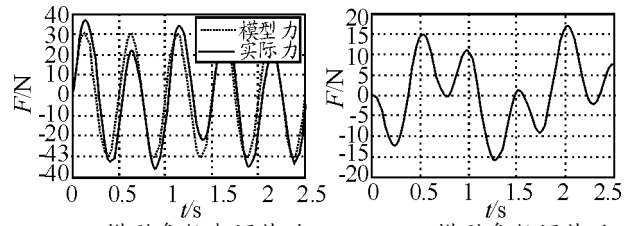


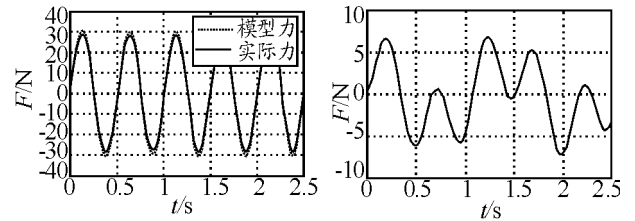
图 9 复合控制阶跃响应仿真曲线

然后，对系统模型进行正弦响应仿真，控制策略参数设置与阶跃响应一致，正弦响应及其误差仿真曲线如图 10、图 11、图 12。



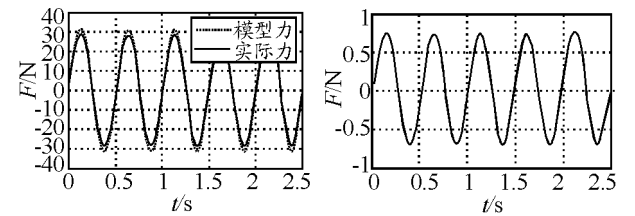
(a) 模型参数未调节时 (b) 模型参数调节后

图 10 P 控制正弦响应仿真曲线



(a) 模型参数未调节时 (b) 模型参数调节后

图 11 PID 控制正弦响应仿真曲线



(a) 模型参数未调节时 (b) 模型参数调节后

图 12 复合控制正弦响应仿真曲线

由图 10、图 11、图 12 可以看出，在系统模型仿真中，由于误差主要是多余力引起的，所以采用 PID+前馈补偿复合控制策略校正，能够有效抑制多余力，使实际力输出曲线很好地跟踪理论力输出曲线，实际输出力曲线与理论输出力曲线随时间变化基本上处于重合状态，最大误差由最初的 17.3 N 减小到 0.72 N。因此，PID+前馈补偿复合控制策略可以有效地抑制多余力，降低其对稳态误差的影响，从而提高控制系统的力感跟踪精度；同时验证了数学模型与控制策略的正确性、有效性。

4 实验验证

为了测试操纵负荷系统的性能与控制策略的设计效果，需要在电动操纵负荷系统原理样机上进行相应的实验验证，原理样机结构如图 13，左图为外部结构图，右图为内部结构图。由于阶跃响应与正弦响应能够基本反映系统的性能，因此，以俯仰通道为例采用阶跃响应和正弦响应进行测试验证。

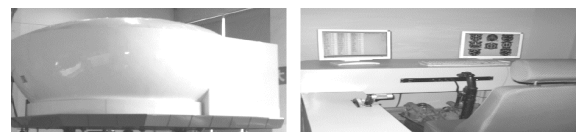


图 13 原理样机结构图

操纵负荷系统原理样机的模型力为 40 N 阶跃信号，得到如图 14 的测试曲线(模型力曲线—虚线，

实际力曲线—实线)。由阶跃响应曲线看出, 系统的上升时间为 0.076 s, 自然频率为 4 Hz, 超调量为 33.3%, 系统振荡次数较多, 需要通过调节其他参数来减小振荡次数。然后根据 PID 控制器参数对系统的影响规律, 减小比例环节参数 K_p , 同时适当设置微分环节参数 K_d 与积分环节参数 K_i , 多次实验测试, 调节 PID 控制器参数, 使 $K_p=2\ 200$, $K_i=1\ 250$, $K_d=800$, 得到如图 15 所示测试曲线。通过调节 PID 控制器参数使得系统上升时间变为 0.096 s, 自然频率升高到 8.1 Hz, 超调量减小至 26.3%, 系统振荡次数减少, 震荡周期变长^[8-9]。

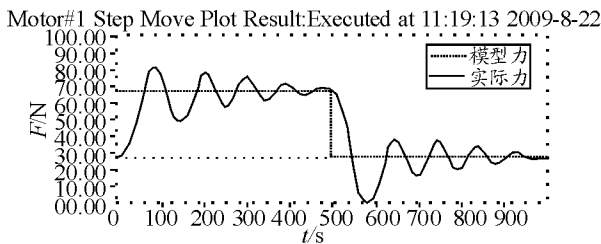


图 14 P 控制阶跃响应测试曲线

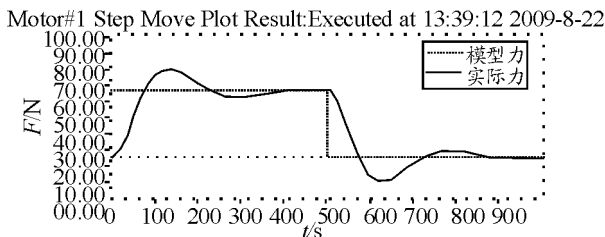


图 15 PID 控制阶跃响应测试曲线

在充分调节 PID 控制器的参数的基础上, 设置前馈补偿控制器参数, 并进行参数选优, 使 $K_{ff}=800$, $K_{aff}=15$, 得到如图 16 的测试曲线。由阶跃响应曲线可看出, 系统上升时间缩短至 0.029 s, 自然频率升高至 11.3 Hz, 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, 动态响应性能提高。正弦响应的实验验证同阶跃响应一样, 得到如图 17、图 18 的曲线。

通过对电动操纵负荷系统原理样机的实验验证, 实验结果与仿真结果相似, 说明系统模型与控制策略的正确性和有效性。由于在仿真过程中, 忽略了实际系统中的不确定性因素, 得到理想化模型, 加载误差与多余力几乎等效; 而在实际系统中, 加载误差和许多因素有关, 如电机齿槽效应、系统参数变化、力传感器的测量精度、控制器的性能以及加载系统的摩擦等, 虽然多余力得到有效抑制, 但仍存在其它因素引起的较小误差, 导致实验结果与仿真结果存在差异。

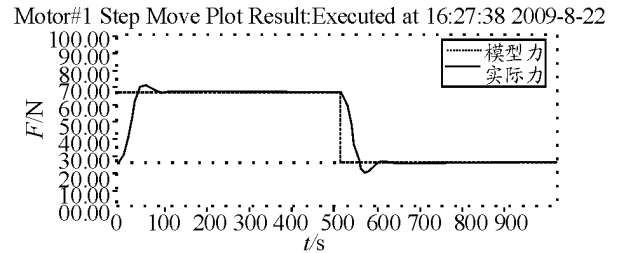


图 16 复合控制阶跃响应测试曲线

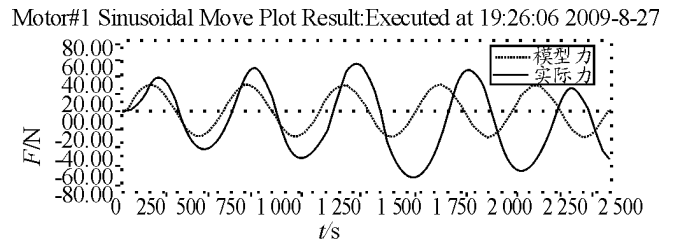


图 17 PID 控制正弦响应测试曲线

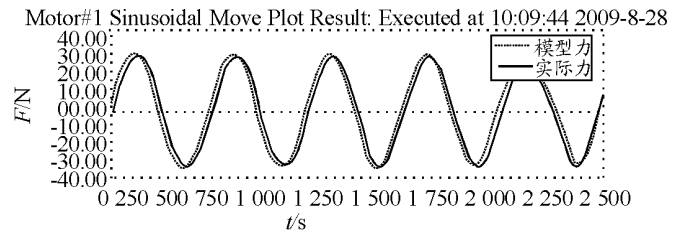


图 18 复合控制正弦响应测试曲线

5 结论

仿真和实验表明, 该控制策略能有效抑制多余力的影响, 提高电动操纵负荷系统的力感跟踪精度。

参考文献:

- [1] 刘兴堂, 万少松, 张双选. 论军用模拟训练器/系统的发展趋势[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(5): 647-649.
- [2] 王维翰. 干线飞机飞行模拟器研制初探[J]. 飞行力学, 1994, 12(3): 3-4.
- [3] 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.
- [4] 邹海峰, 孙力, 阎杰. 飞行器舵机电动伺服加载系统研究[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 657.
- [5] F.J.Li, K.K.Shyu, Y.S.Lin. Variable. Structure Adaptive control for PM Synchronous Servo Motor Drive[J]. IEEE Proceedings: Electric Power Applications, 1999, 146(2): 173-185.
- [6] Amy Parkinson, Martin McDonagh. Evidence for Positive Force Feedback during Involuntary After-contractions[J]. Exp Brain Res, 2006, 17(1): 516-523.
- [7] M.Shafiq and N.R.Butt.Real-Time Adaptive Tracking of DC Motor Speed Using U-Model Based IMC.Automatic Control and Computer Sciences, 2007, 41(2): 31-38.
- [8] 王伟, 张晶涛, 柴天佑. PID 参数先进整定方法综述[J]. 自动化学报, 2000, 26(3): 354-355.
- [9] 吴春, 庞洪. 一种 PID 参数调整方法研究[J]. 兵工自动化, 2009, 28(4): 92-93.