

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.03.046

飞行模拟器操纵负荷系统仿真分析与实现

王恒亮*, 崔渊博, 胡兴平

西安飞豹科技有限公司, 陕西 西安 710089

摘要: 为了使飞行模拟器操纵具有真实感, 分析了操纵负荷系统仿真内容及原理, 详细描述了操纵负荷系统仿真的软、硬件设计方法, 设计了连接机构、操纵连杆及传动比, 给出了软件架构, 建立了操纵仿真模型, 实现了操纵通道的负荷加载仿真。经型号验证, 可以提高力伺服系统的控制精度, 实现了对操纵负荷系统仿真的逼真度。

关键词: 飞行模拟器; 操纵负荷系统; 传动比; 仿真

中图分类号: V323 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2017) 03-0046-05

操纵负荷系统主要模拟飞机主操纵机构, 为飞行操纵人员提供控制、操纵飞机的手段。操纵负荷系统必须实时、逼真地复现飞机在不同飞行条件下操纵系统的静态和动态特性, 体现真实飞机中操纵系统的功能和特性。

操纵负荷系统通常采用的仿真方法有弹簧加载方法、利用载荷机构实物加载、力伺服系统加载。目前, 国内大型的飞行模拟器操纵负荷系统都采用液压力伺服系统加载的仿真方法。然而液压力伺服系统环境污染大, 不易维护。随着力矩电机性能的提高, 电动力伺服系统不但能满足功率大、快速性好的要求, 还具有成本低、易于维护、使用方便等优点, 已经成为操纵负荷系统的发展趋势。针对某型主飞行操纵负荷系统, 采用电动力伺服系统, 分析系统仿真的实现方法。

1 操纵负荷系统仿真内容与原理

1.1 仿真内容

模拟器操纵负荷系统模拟俯仰、滚转、偏航三通道力的加载, 采用单台计算机控制三通道加载电机。三通道(升降舵、副翼和方向舵)操纵负荷系统仿真内容为: 升降舵操纵负荷系统模拟地面和空中纵向杆力-杆位移操纵特性、杆位移-升降舵偏角关系; 副翼操纵负荷系统模拟地面和空中驾驶盘力-驾驶盘偏转角度操纵特性和驾驶盘偏转角度-副

翼偏转角关系; 方向舵操纵负荷系统模拟地面和空中脚蹬力-脚蹬位移、脚蹬位移-方向舵偏角关系。

1.2 仿真原理

操纵负荷系统根据目标飞机操纵机构的行程、负载力大小和仿真要求的性能指标, 通过初步的指标确定, 进行三维建模和运动仿真, 进而确定每个通道轴向的最大负载力、偏转角度和连接机构的传动比^[1], 由此确定系统的性能参数要求, 根据实时性、安全性及其他动态性能要求设计操纵负荷系统模型软件, 同时满足与其他相关系统的接口控制要求。其工作原理如图1所示。

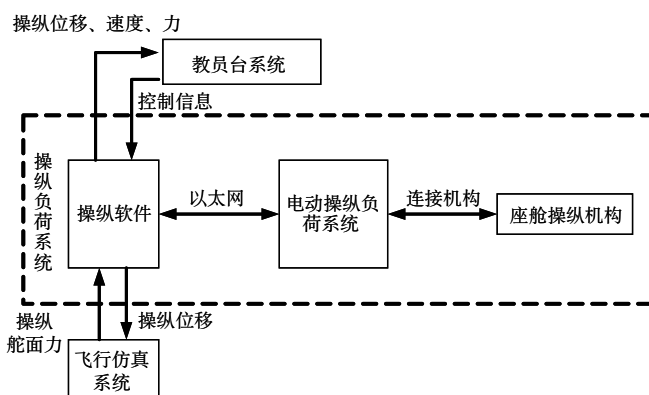


图1 操纵负荷系统仿真原理图

Fig.1 Schematic diagram of control loading system simulation

收稿日期: 2016-10-14; 退修日期: 2017-02-08; 录用日期: 2017-02-09

* 通讯作者. Tel.: 029-86832543 E-mail: feixianghl@163.com

引用格式: WANG Hengliang, CUI Yuanbo, HU Xingping. Flight simulator control loading system simulation analysis and realization [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28 (03): 46-50. 王恒亮, 崔渊博, 胡兴平. 飞行模拟器操纵负荷系统仿真分析与实现 [J]. 航空科学技术, 2017, 28 (03): 46-50.

2 硬件设计

操纵负荷系统的硬件结构如图2所示。该系统主要由操纵负荷控制计算机、系统接口卡、伺服驱动器、伺服电机、升降舵等执行机构组成。

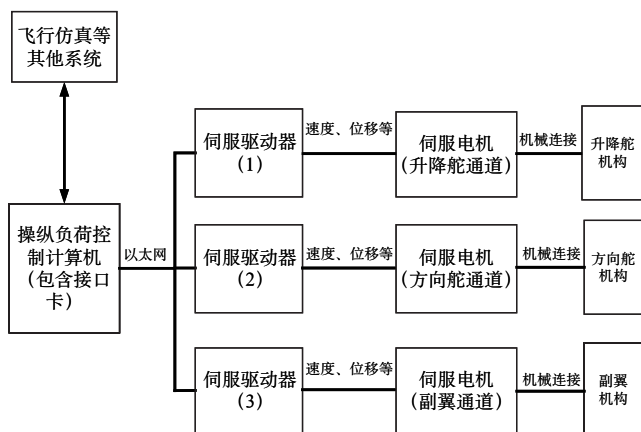


Fig.2 Hardware construction of control loading system

操作人员通过对座舱内驾驶杆、驾驶盘、脚蹬等设备进行操作,操纵负荷控制计算机通过传感器进行数据采集,同时接受飞行仿真等其他系统的信号输入,完成操纵负荷系统的解算,控制执行机构的力与位移,并将解算结果输出给相关的分系统。

2.1 俯仰通道操纵机构设计

升降舵传动系的设计输入是主、副驾驶柱仿真件和伺服电机,主、副驾驶柱输出是一定范围内的圆周运动。

操纵驾驶柱通过传动系将输入的偏转角度传递给伺服电机,伺服电机将反馈力传递给驾驶杆。传动系的主要作用是对驾驶柱输出摇臂的输出量进行调节,同时将输出量转换到伺服电机摇臂最佳范围的输入值。

操纵驾驶柱时,输出摇臂带动拉杆前后运动,拉杆与摇臂相连,带动摇臂绕联动轴旋转,联动摇臂与联动轴固连,又带动拉杆运动,拉杆与伺服电机摇臂连接,带动负荷摇臂旋转,实现将驾驶柱的操纵量到伺服电机的传动,伺服电机根据输入量大小会输出一个实时的反作用力,又通过传动系统反馈到驾驶柱的操纵握点处,实现操纵负荷系统对操纵机构的负荷功能^[2]。俯仰通道操纵结构连接示意图如图3所示。

2.2 连接机构及传动比设计

(1) 连接机构

连接机构由升降舵通道连杆机构、方向舵通道连杆机构及副翼通道连杆机构组成。主要作用是连接主操纵机构

与伺服电机,传递力与位移,且无附加摩擦力和阻尼力,保证飞行操纵控制的真实性。

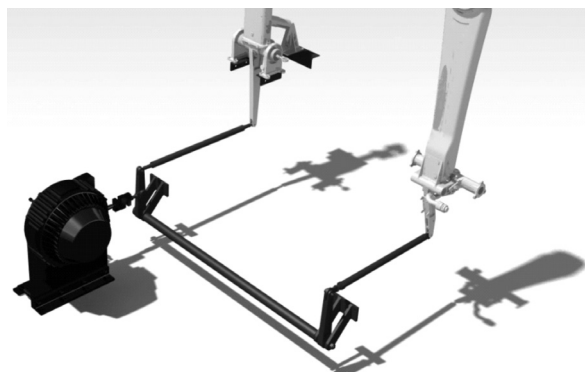


图3 俯仰通道操纵机构连接示意图

Fig.3 Schematic diagram of pitching control mechanism

操纵连杆由硬铝管制成,两端装有接头。一端接头直接与硬铝管铆接,不可调节长度;另一端装有一套筒,套筒通过正反螺纹与硬铝管连接,接头通过螺纹与套筒连接,调节所需长度,通过装在接头处的螺母来锁紧。在传动过程中,操纵连杆不仅做往复直线运动,还要相对于摇臂转动。为了减小摩擦力和间隙,其接头内装有滚珠轴承,操纵连杆如图4所示。

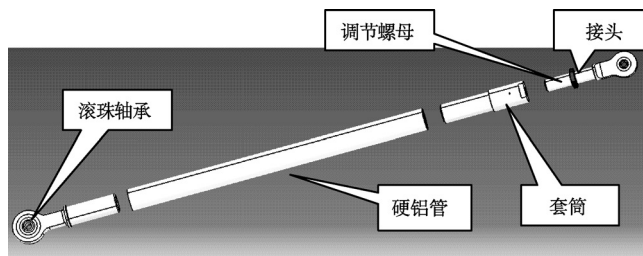


图4 操纵连杆

Fig.4 Control linkage

伺服电机连接处的连杆结构形式与摇臂处操纵连杆结构基本一致,按照伺服电机的安装要求连接,与伺服电机连接的一端直接装杆端轴承。

(2) 传动比设计

驾驶杆、驾驶盘及脚蹬正常情况下有其固定的行程范围,伺服电机同样也存在其最优的行程范围,二者之间行程范围的对应关系通过调整连接机构的传动比来实现。

主副驾驶杆与操纵连杆通过螺栓连接,摇臂的长度反映操纵机构的参数特性,可以通过调整其长度来改变整套机构的传动比。本文以俯仰通道传动比为例,介绍其传动比的设计方法。

俯仰通道主驾驶使用驾驶杆操纵机构,副驾驶安装使用驾驶盘、驾驶柱操纵机构。主副驾驶俯仰通道操纵联动,共用一套伺服电机。主副驾驶机构操纵行程不同,故对主副驾驶拉杆摇臂机构使用不同的传动比设计,以尽可能满足主副驾驶的行程操纵特性。图5为驾驶杆俯仰操纵通道原理图。

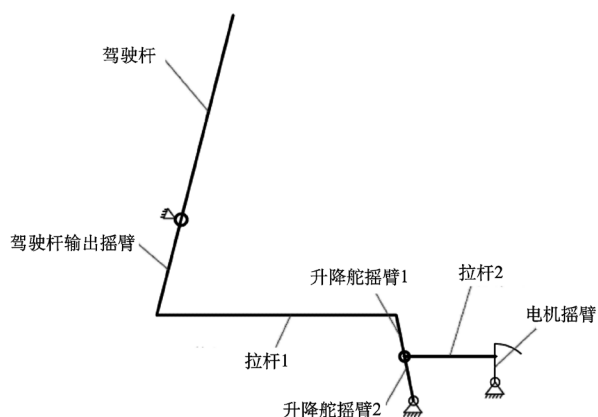


图5 俯仰操纵通道原理图

Fig.5 Schematic diagram elements of control for pitching

参照图5设计原理,整个连接机构按刚性考虑,根据拉杆摇臂运动特性,驾驶杆与对应电机端力臂与位移比例关系如式(1)、式(2):

$$\frac{L_1}{X} = \frac{L_2}{M} \quad (1)$$

$$\frac{L_4}{M} = \frac{L_5}{Y} \quad (2)$$

驾驶杆与对应电机端力臂位移传动比如式(3):

$$\frac{X}{Y} = \frac{L_4}{L_5} \cdot \frac{L_1}{L_2} \quad (3)$$

式中: L_1 为驾驶杆手柄中心至旋转中心力臂长度; L_2 为驾驶杆输出摇臂的长度; X 为驾驶杆对应运动行程; M 为摇臂机构对应运动行程; L_4, L_5 分别为升降舵摇臂1, 2 的长度; Y 为电机端摇臂对应偏转行程。

3 软件设计

3.1 软件架构

软件设计需要根据目标飞机飞行操纵品质和操纵方式,主要包括两部分内容:操纵负荷控制计算机软件 and 飞行仿真系统中的飞行操纵软件。具体实现时,以通道为控制对象,采用模块化的结构设计方法,将每个通道参数分为前端系统参数、连接系统参数、后端系统参数以及其他参数4个部分。操纵负荷系统软件架构如图6所示。

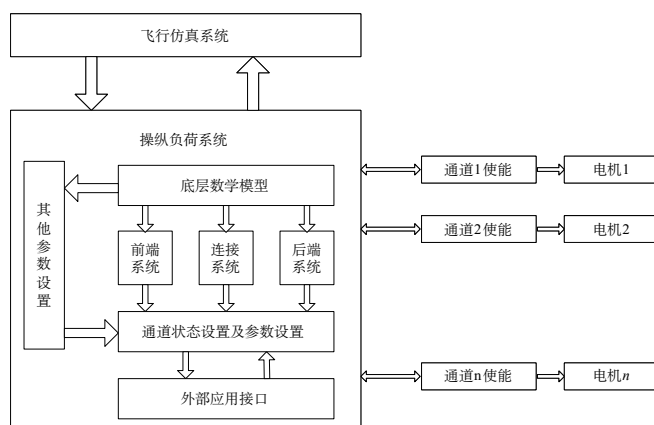


图6 操纵负荷系统软件架构图

Fig.6 Software frame of control loading system

遵循各通道独立模拟的原则,将各控制模拟通道划分为前端系统、连接系统、后端系统^[3]及其他功能模块等。在控制系统中,前端系统、连接系统以及后端系统可以根据仿真的需求调用相对应的力感数学模型。控制系统采用实时网络与伺服驱动器通信,通过使能标记控制和管理通道对象。

3.2 软件实现

操纵负荷系统软件包括飞行仿真系统计算机内驻留的通道模型和操纵负荷控制计算机内的计算模型^[4]。操纵负荷控制计算机通过网络与飞行仿真系统软件通信并完成实时数据更新,飞行仿真系统软件包含与特定飞机操纵品质有关的软件模型。图7给出了操纵负荷系统内部软件结构图。操纵负荷系统软件模块分为工作状态控制模块、参数配置模块、力与位移模型模块。通道模型接收飞行操纵部分的数据,解算伺服电机控制需要的速度、力矩、位置等数值,发送给各通道伺服驱动器控制伺服电机运动。

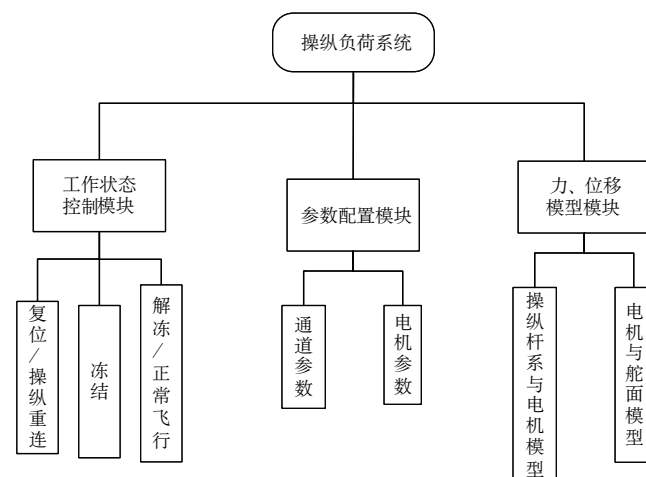


图7 操纵负荷系统软件结构图

Fig.7 Software configuration of control loading system

操纵负荷系统使用力加载技术及控制技术来实现伺服控制的功能。操纵负荷系统力加载采用力伺服系统^[5]加载方案。

操纵负荷系统为操作人员提供快速精确的力感跟踪效果。要实现操纵负荷系统力感的精确实时跟踪,除了需要保证操纵系统模型的准确性外,还需要保证力伺服系统的品质,所以需要力伺服系统进行控制校正。根据系统需要和指标要求,采用PID控制^[6]。

PID控制将系统的闭环反馈信号和输入信号进行比较,产生偏差信号的比例、积分和微分,通过线性组合构成控制量,对被控对象进行控制。常规PID控制的结构原理如图8所示。系统由PID控制器和被控对象组成,PID控制是一种线性控制器,它由系统的给定输入值与实际输出值相比较构成控制的偏差。

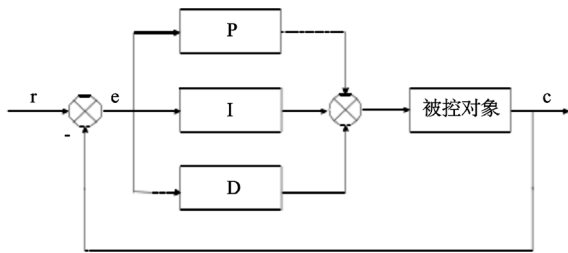


图8 PID控制系统原理框图
Fig.8 Schematic diagram of PID control system

3.3 主要模型

电动操纵负荷系统力与位移模型,仿真建模需要的底层模型主要有:

(1) 摩擦力模型模块

摩擦力模型物理模型如图9所示。

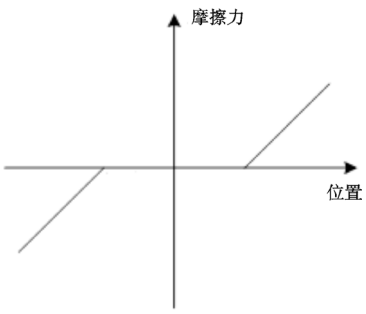


图9 摩擦力物理模型
Fig.9 Physics model of friction

(2) 阻尼模型模块

阻尼模型的物理表达式为:

阻尼力 = 阻尼因数 × 速度;

(3) 惯性模型模块

惯性模型的物理表达式为:

惯性力 = 惯性因数 × 加速度;

(4) 启动力模型模块

启动力模型物理模型如图10所示。

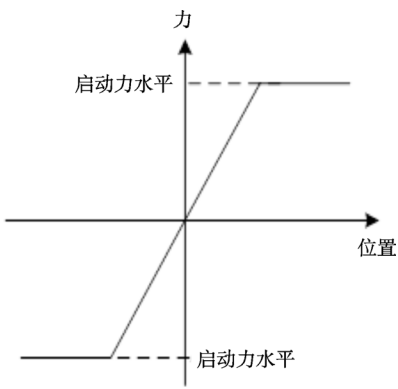


图10 启动力物理模型
Fig.10 Physics model of startup force

(5) 弹簧力模型模块

弹簧力模型物理模型如图11所示。

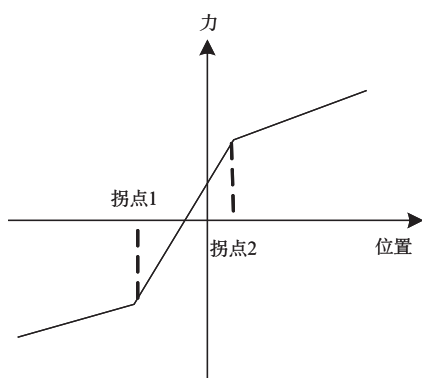


图11 弹簧力物理模型
Fig.11 Physics model of spring

(6) 止动力模型模块

止动力模型物理模型如图12所示。

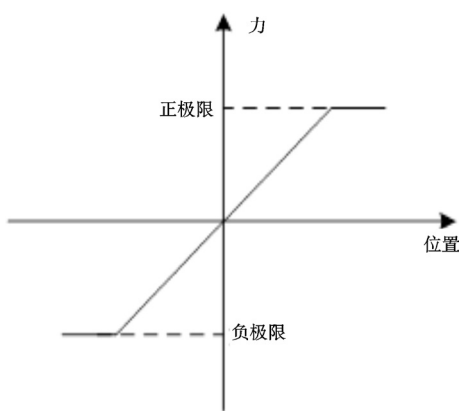


图12 止动力物理模型
Fig.12 Physics model of stop force

4 结束语

从操纵负荷仿真原理出发,基于系统集成和性能考虑,建立了通道模型,并对操纵连接机构及传动比进行了设计,解决了操纵通道机械系统的仿真精度问题。通过操纵仿真模型的建立,实现了操纵通道的负荷加载仿真。仿真软件应用力加载技术及力控制技术,克服多余力的存在,提高了力伺服系统的控制精度,从而实现对操纵负荷系统仿真的逼真度。采用的电动操纵负荷系统仿真方法已应用于型号研制中,可以高度模拟飞机在不同条件下操纵系统的静态和动态特性,体现飞机操纵系统的功能和特性。

本系统仿真方法适用于飞行模拟器配套产品、高性能操纵负荷系统的研制。

AST

参考文献

- [1] Kenneth L J, Kahtan A. A generic flight controls model for reversible systems coupled with a control loader[C]// AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, 2001: 1-9.
- [2] 王辉. 飞行模拟器操纵负荷系统关键技术及原理样机研制 [D]. 天津: 天津大学, 2006.
WANG Hui. Research on essential technology and principle prototype development of control loading system in the simulator [D]. Tianjin: Tianjin University, 2006. (in Chinese)
- [3] 蔡永强. 数字式操纵负荷系统的研究 [D]. 北京: 北京航空航天大学, 1998.
CAI Yongqiang. Research of control loading system in digit [D].

Beijing: Beihang University, 1998. (in Chinese)

- [4] 张举中. 电动伺服加载系统控制方法研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
ZHANG Juzhong. Research of control methods of electric powered servo load system [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)
- [5] 王芳. 飞行模拟器操纵负荷系统研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
WANG Fang. Research on the control loading of flight simulator [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [6] 齐潘国. 飞行模拟器液压操纵负荷系统力感模拟方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
QI Panguo. Force-feel cueing study of hydraulic control loading system of flight simulator [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2009. (in Chinese)

作者简介

王恒亮 (1982—) 男, 工程师。主要研究方向: 模拟器操纵负荷、声音等仿真。

Tel: 029-86832543

E-mail: feixianghl@163.com

崔渊博 (1981—) 男, 高级工程师。主要研究方向: 模拟器等的仿真工作。

胡兴平 (1982—) 男, 工程师, 主要研究方向: 模拟器等的仿真工作。

Flight Simulator Control Loading System Simulation Analysis and Realization

WANG Hengliang*, CUI Yuanbo, HU Xingping

Xi'an Feibao Technology Co., LTD, Xi'an 710089, China

Abstract: In order to obtain the sense of reality for flight simulation, the control loading simulation content and principle were studied. The method of software and hardware design for the control loading system simulation was expounded, the design of the control mechanism control linkage and transmission ratio was conducted. The software frame and control loading model were discussed. The control loading channels simulation was realized. It had been validated in a project that the design could improve the control precision, and realize the fidelity of control loading simulation.

Key Words: flight simulator; control loading system; transmission ratio; simulation

Received: 2016-10-14; Revised: 2017-02-08; Accepted: 2017-02-09

*Corresponding author. Tel.: 029-86832543 E-mail: feixianghl@163.com