

12-13-2019

## Design of Universal Control Load System of Helicopter Flight Simulator

Chen Zhen

*1. Training Department of Bomber and Transport Aircraft Pilots, 93199 Troops, Harbin 150001, China; ;*

Haikuan Yang

*1. Training Department of Bomber and Transport Aircraft Pilots, 93199 Troops, Harbin 150001, China; ;*

Jiang Nan

*1. Training Department of Bomber and Transport Aircraft Pilots, 93199 Troops, Harbin 150001, China; ;*

Yuancheng Wang

*1. Training Department of Bomber and Transport Aircraft Pilots, 93199 Troops, Harbin 150001, China; ;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Design of Universal Control Load System of Helicopter Flight Simulator

## Abstract

**Abstract:** To improve the universality and handling quality of control system of helicopter flight simulator, a universal control load system of helicopter flight simulator suitable for helicopter flight simulator is designed. *The dynamic feedback model is proposed to solve the contradiction between control rigidity and stability, control precision and response frequency, the control rigidity and kinematic accuracy are improved. The operating load mechanism is designed, the system structure and drive system are simplified, the smoothness of force perception is improved; the third order smoothing algorithm and fieldbus technology based on EtherCAT are applied to improve the anti-jamming capability and response speed, the flexibility of control system is enhanced.*

## Keywords

helicopter flight simulator, control load system, dynamic feedback, operating load mechanism, third order smoothing algorithm

## Authors

Chen Zhen, Haikuan Yang, Jiang Nan, Yuancheng Wang, and Tianjiao Jiang

## Recommended Citation

Chen Zhen, Yang Haikuan, Jiang Nan, Wang Yuancheng, Jiang Tianjiao. Design of Universal Control Load System of Helicopter Flight Simulator[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(11): 2408-2412.

## 直升机飞行模拟器通用型操纵负荷系统设计

陈珍<sup>1</sup>, 杨海宽<sup>1</sup>, 姜南<sup>1</sup>, 王元诚<sup>1</sup>, 江天娇<sup>2</sup>

(1. 93199 部队轰运飞行人员改装系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 95801 部队, 北京 100843)

**摘要:** 为解决直升机飞行模拟器操纵负荷系统的通用性及操纵品质问题, 设计了适用于直升机飞行模拟器的通用型操纵负荷系统。提出了动态反馈控制模式, 解决了控制刚度与系统稳定性、控制精度与响应频率之间的矛盾, 有效提高了控制刚度及运动精度; 研发了力加载机构, 结合三阶平滑算法, 简化了系统机械结构和传动环节, 改善了力感平滑度; 采用了三阶平滑算法和基于 EtherCAT 现场总线的数字控制技术, 提高了系统的抗干扰能力及响应速度, 增强了系统控制的灵活性。

**关键词:** 直升机飞行模拟器; 操纵负荷系统; 动态反馈控制; 力加载机构; 三阶平滑算法

中图分类号: TP29 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2019) 11-2408-05

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-FZ0333

## Design of Universal Control Load System of Helicopter Flight Simulator

Chen Zhen<sup>1</sup>, Yang Haikuan<sup>1</sup>, Jiang Nan<sup>1</sup>, Wang Yuancheng<sup>1</sup>, Jiang Tianjiao<sup>2</sup>

(1. Training Department of Bomber and Transport Aircraft Pilots, 93199 Troops, Harbin 150001, China; 2. 95801 Troops, Beijing 100843, China)

**Abstract:** To improve the universality and handling quality of control system of helicopter flight simulator, a universal control load system of helicopter flight simulator suitable for helicopter flight simulator is designed. The dynamic feedback model is proposed to solve the contradiction between control rigidity and stability, control precision and response frequency, the control rigidity and kinematic accuracy are improved. The operating load mechanism is designed, the system structure and drive system are simplified, the smoothness of force perception is improved; the third order smoothing algorithm and fieldbus technology based on EtherCAT are applied to improve the anti-jamming capability and response speed, the flexibility of control system is enhanced.

**Keywords:** helicopter flight simulator; control load system; dynamic feedback; operating load mechanism; third order smoothing algorithm

## 引言

操纵负荷系统是飞行模拟器的重要组成部分, 其仿真效果直接影响模拟器的飞行品质和训练效果。目前国内缺少专门应用于直升机飞行模拟器的专用操纵负荷系统, 而直升机本身的操纵及功能特

性与运输机、歼击机等差别很大, 通用操纵负荷系统难以很好的模拟直升机的操纵感觉。

为解决直升机飞行模拟器操纵负荷系统的通用性及操纵品质问题, 针对直升机操纵系统的特点, 研制出了适用于直升机飞行模拟器的通用型操纵负荷系统。提出了动态反馈控制模式, 解决了控制刚度与系统稳定性、控制精度与响应频率之间的矛盾, 有效提高了控制刚度及运动精度; 研发了力加载机构, 结合三阶平滑算法, 简化了系统机械结构和传动环节, 改善了力感平滑度, 结构紧凑、维



收稿日期: 2019-05-30 修回日期: 2019-07-16;  
作者简介: 陈珍(1989-), 女, 内蒙古巴彦淖尔, 硕士, 研究方向为飞机动力装置、飞行模拟器仿真; 杨海宽(1983-), 男, 河北保定, 硕士, 研究方向为飞行模拟器仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 2408 •

护便捷、稳定可靠; 采用了三阶平滑算法和基于 EtherCAT 现场总线的数字控制技术, 提高了系统的抗干扰能力及响应速度, 增强了系统控制的灵活性。

## 1 技术方案

本操纵负荷系统用于模拟直升机飞行模拟器操纵系统的各种功能及力感, 其工作原理如图 1 所示, 操纵负荷系统通过网络接收模拟器发送的各种功能及位置控制指令, 通过力解算及功能解算后转换为驱动系统所需要的驱动控制指令, 控制力感加载机构实现各种位置、力感及功能的输出。同时, 采集反馈系统将实时采集的各种系统状态、位置及力信息, 反馈给运动控制系统, 用于实现闭环控制, 并将模拟器所需的位置及状态信息经过处理后通过网络发送给模拟器。

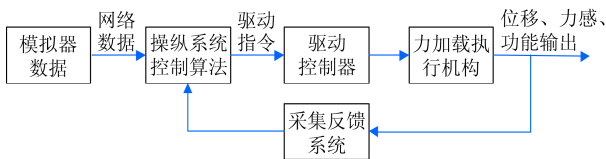


图 1 操纵负荷系统工作原理

Fig. 1 Principle of control load system

根据直升机模拟器对操纵负荷系统的要求, 我们将通用型操纵负荷系统分为操纵负荷控制系统、驱动控制系统、力感加载机构及采集反馈系统等几大部分, 如图 2 所示。

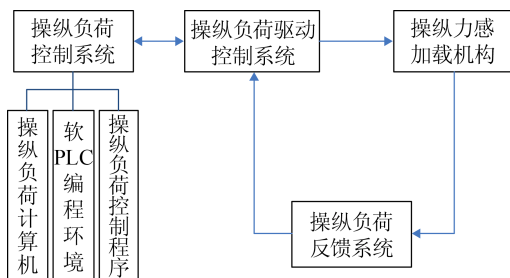


图 2 操纵负荷系统组成图

Fig. 2 Constitution diagram of control load system

### 1.1 操纵控制系统

操纵控制系统用于实现与模拟器之间数据收发、操纵力感及功能的解算、驱动系统所需控制指

令的转换和发送等功能, 系统主要由操纵负荷计算机、操纵控制软件、总线驱动软件组成, 其中操纵控制软件是操纵控制系统的核心部分, 其具体工作流程如图 3 所示。

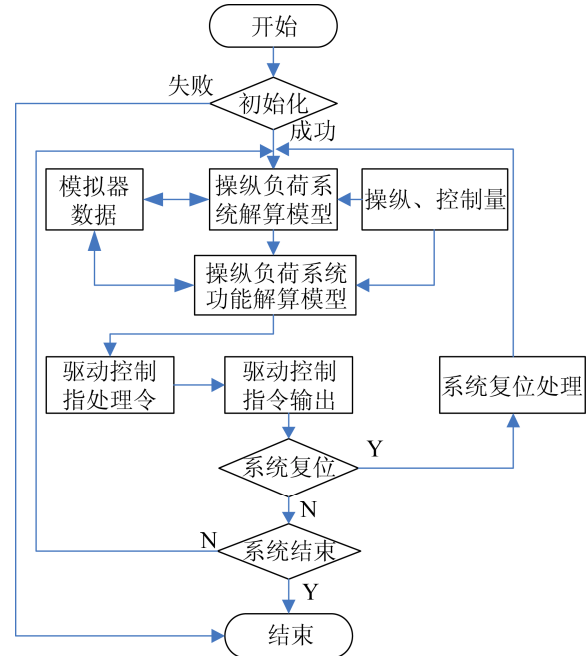


图 3 控制系统工作流程图

Fig. 3 Flow diagram of control load system

操纵负荷控制软件初始化成功后通过网络接收模拟器发送的位置及功能控制数据, 经过力解算及功能解算, 并与通过现场总线采集的操纵系统状态信息进行闭环处理后, 转换为驱动控制指令并通过现场总线发送给驱动系统, 从而实现对操纵系统的控制。

### 1.2 驱动系统

驱动系统主要实现操纵负荷系统力加载机构及采集反馈系统的驱动控制。本系统所选用的交流伺服驱动器为带现场总线全数字形式, 可以驱动交流伺服电机平滑的输出位置、速度及加速度, 响应速度快、抗干扰能力强、结构紧凑、安装方便等特点, 可同时配置多种工作模式参数, 支持在线调试及模式切换, 具有编程及存储功能。

本操纵负荷系统中交流伺服驱动器通过现场总线实现与控制系统的通信, 接收上位机的控制信

号驱动力感加载机构的交流伺服电机实现各种力感及运动输出,同时采集交流伺服电机的位置及力矩输出信息发送给上位机,整个控制及通过程序周期为 1 ms,满足了系统实时性的要求。

### 1.3 力感加载机构

操纵负荷系统的执行部分,主要包括力感加载机构及传动杆系等,其中力感加载机构是其核心部件,可根据操纵控制系统的指令实现对操纵力感及功能的模拟。

力感加载机构结构原理如图 4 所示。力感加载机构主要由交流伺服电机、行星减速机、电磁离合器、力模拟单元、位置传感器等组成。正常飞行模式时,伺服电机提供输出扭矩,模拟所需的操纵力。特情模拟时,离合片与离合器座吸合,摩擦环与摩擦片之间产生摩擦力,为直升机操纵系统提供大的阻尼力,模拟所需的特情操纵力。

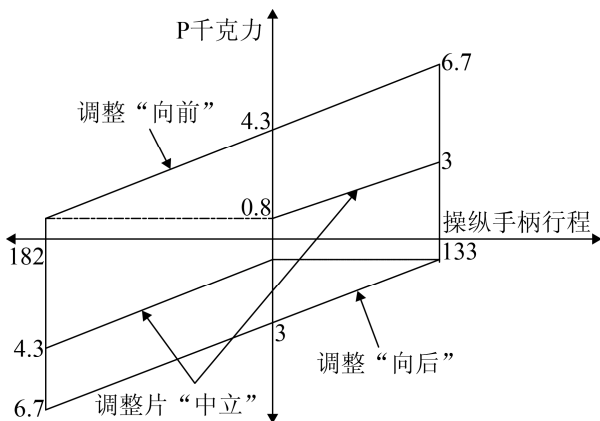


图 4 力感加载机构原理图

Fig. 4 Schematic diagram of operating load mechanism

### 1.4 采集反馈系统

采集反馈系统采集整个系统的状态及操纵信息,如位移、力矩、系统工作状态、开关量等,供控制系统及模拟器使用。主要包括总线模块、采集模块、位置传感器、接近传感器等。系统基于 Ethercat 现场总线协议,具有扩展便捷、接线简单、抗干扰能力强、传输速率高等优点,提高了操纵系统的实时性和稳定性。

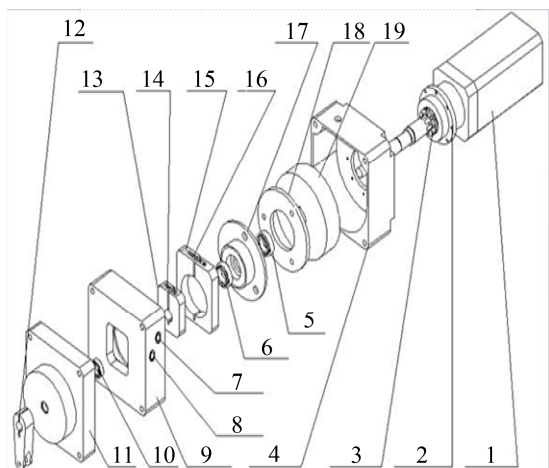
## 2 关键技术

### 2.1 动态反馈控制模式

针对实装机操纵负荷系统在不同飞行模式下的运动和力感特性,对交流伺服电机的控制提出动态反馈控制模式,充分利用位置模式控制刚度大、运动精度高,力矩模式力感平滑、外界可操纵控制的特性,打破传统单一控制模式的理念,根据实际控制情况在线修改伺服电机驱动器的控制指令,在计算机操纵系统解算模型中调用相应的功能块进行相应的算法控制,使伺服电机始终工作在最优状态,给操纵负荷系统提供更高品质的操纵特性和力感。

### 2.2 力感加载机构

为了解决以往电动操纵负荷系统在飞行模拟训练时对特殊情况处理不足的问题,设计出适合直升机飞行模拟器的力感加载机构,该机构不仅能模拟飞行模拟器正常情况下操纵负荷系统操纵力的变化,而且能更好的模拟特情发生时操纵负荷系统操纵力的变化。由于在结构上采用一体化的设计,模拟效果可逼真,结构简单,便于安装及维护。其结构如图 5 所示。直升机正常工作时,交流伺服电机与减速机、输出轴、输出摇臂连接,形成串联机构。此时,离合片与离合器座是脱开的,转动输出摇臂,使输出轴旋转,带动交流伺服电机转动,伺服电机提供输出扭矩,扭矩的大小即为模拟操纵所需的操纵力。由于采用了行星式法兰减速机,电机可选择小功率的交流伺服电机。通过修改输出摇臂的长度,也可小范围的调整操纵力的大小。当特殊情况发生时,系统接通 24 V 电源,电磁离合器工作,离合片与离合器座吸合,即输出轴、离合片、离合器座以及固定在离合器座上的摩擦环形成一个刚性整体。摩擦环与输出轴同步转动,与固定在固定座上的摩擦块之间形成摩擦接触,产生摩擦力,为直升机操纵系统提供一个大的阻尼力,摩擦力的大小通过安装在调节孔内调节螺钉调整。



1 伺服电机 2 减速机 3 输出轴 4 后盖 5 轴承 I 6 轴承 II  
7 调节螺钉 I 8 调节螺钉 II 9 中壳 10 编码器 11 前盖  
12 摇臂 13 阻尼块 14 预紧弹簧 I 15 摩擦片 16 预紧弹簧 II  
17 摩擦环 18 离合器片 19 离合器座

图 5 摩擦片式力加载机构

Fig. 5 Friction plate type of operating load mechanism

### 2.3 三阶平滑算法

由于电动操纵负荷系统操纵机构中存在摩擦力、系统惯量等不确定的干扰因素, 理论杆力曲线模型与实际情况有很大的差异, 为了使电动操纵负荷系统更逼真的模拟直升机模拟器的操纵力, 我们利用 Matlab 语言算法, 将杆力数学模型用 3 次样条插值多项式表达出来, 减小输入误差, 使实测的杆力曲线更接近与理论杆力曲线。其具体做法为:

(1) 初步确定杆力曲线数学模型, 将其作为输入曲线, 同时记录实测的杆力-位移曲线。

(2) 分析输入曲线与实测的曲线, 找出误差比较大的区间, 同时分好区间。

(3) 修正杆力曲线数学模型, 选取具有代表性的数值, 进行插值, 同时将杆力曲线模型用 3 次样条插值多项式表达出来。

(4) 重复第 3 步, 不断修正模型参数, 使实测的杆力曲线接近理论杆力曲线, 得到理想的杆力输出曲线模型。

### 2.4 基于 EtherCAT 的工业控制总线技术

在电动操纵负荷系统设计研发过程中, 运动控制计算机与伺服电机驱动器的控制一般采用在工

控机底板上安装各种模数转换输入输出卡的形式来实现, 控制方法复杂、零漂现象严重, 并且伺服电机驱动器的一些内部实时反馈参数不容易获得, 较难实现复杂的控制规律。在本项目中, 操纵负荷控制系统选用数字式伺服驱动器, 运动控制计算机通过 EtherCAT 工业控制总线与数字伺服驱动器通讯, 将控制参数一次性全部读出或写入, 从而提高系统抗干扰能力, 并有效的减少因滤波环节对系统带来的滞后, 提高操纵负荷系统的响应速度。

EtherCAT 协议使用一个特殊类型的以太网数据帧。如图 6 示, EtherCAT 以太网数据帧的数据区由多个子报文组成, 每个子报文都服务于一个特定的逻辑映像区。数据帧在设备中持续传输, 每个设备中的 FMMU (Fieldbus Memory Management Unit) 在数据帧通过时读出该数据帧中映射到此设备的逻辑地址中的数据, 如数字伺服控制指令等数据。同样, 输入数据, 如数字伺服状态等数据, 可以在数据帧通过时插入到相应的逻辑地址区中, 数据帧在整个过程仅有几纳秒的延时, 通常每个通信周期只需要传输一个以太网数据帧, 这个数据帧沿着逻辑环传输一周, 完成所有的广播式、多播式以及从站间的通信。这种通信方式大大提高了 EtherCAT 的通信速率和有效数据率。控制 100 个输入输出数据均为 8 字节的伺服轴只需要 100  $\mu$ s。EtherCAT 的高性能特性使它可以很好的处理数字式驱动器的控制。

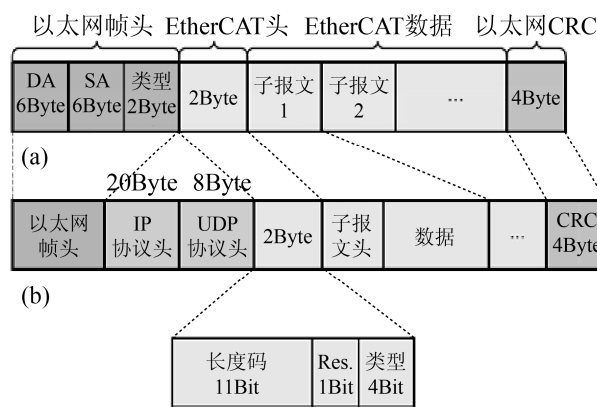


图 6 EtherCat 数据帧结构

Fig. 6 Structure EtherCat data frame

### 3 结论

为解决直升机飞行模拟器操纵负荷系统的通用性及操纵品质问题, 针对直升机操纵系统的特点, 研制出了适用于直升机飞行模拟器的通用型操纵负荷系统。在提高品质功能及力感模拟精度的同时, 巧妙设计机械结构来减小电机型号, 节约了成本。系统结构紧凑、可靠性高、安装维护方便、互换性强、重启复位便捷, 大大减少了使用维护人员的工作量, 满足陆航部队的使用需求, 有效提升了部队战斗力。

#### 参考文献:

- [1] 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: 1-3.  
Wang Fang. The research of the control load system of flight simulator[D]. Nanjing: Nanjing Aerospace University, 2008: 1-3.
- [2] 王军锋, 唐宏. 伺服电机选型的原则和注意事项[J]. 装备制造技术, 2009 (11): 135-137.  
Wang Junfeng, Tang Hong. Principles and Points of Attention for Selecting Servo Motor [J]. Equipment manufacturing technology, 2009 (11): 135-137.
- [3] 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(26): 196-197.  
Yan Liang, Liang Jianmin, Pan Chunping, et al. Modeling and Simulating of Force Models in Control Loading System of Flight Simulator[J]. Microcomputer Information, 2010(26): 196-197.
- [4] 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): 39-42.  
Fu Jiakai, Liu Xianhua, Ma Tianchu. Control Strategy of Electric Manipulator Load System in Flight Simulator[J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2010, 20(5): 39-42.
- [5] 任长伟. 飞行模拟器操纵负荷系统机构分析与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010: 6-8.  
Ren Changwei. Analysis and Design of Mechanism for Control Loading System of A Flight Simulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010: 6-8.
- [6] 杨永欣. 飞行模拟机操纵负荷系统操纵力建模与仿真[J]. 电光与控制, 2014, 21(9): 80-82.  
Yang Yongxin. Maneuvering and Simulating for Control Force of flight simulator[J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(9): 80-82.
- [7] 段永胜, 卢颖, 郭全, 等. 直升机模拟器操纵负荷系统建模与实验研究[J]. 计算机工程与应用, 2013 (17): 262-266.  
Duan Yongsheng, Lu Ying, Guo Quan, et al. Modeling and Experimental Research on Manipulator Load System of Helicopter Simulator[J]. Computer Engineering and Applications, 2013(17): 262-266.