

## 技术专论

## 动态飞行模拟器运动控制系统软件设计

胡荣华, 舒杨, 刘仕钊

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** **目的** 研究动态飞行模拟器(DFS)运动控制系统软件功能、架构、模块、接口设计以及软件具体实现方法。**方法** 在DFS工程控制系统功能及软件设计基础上,对运动控制系统功能及其与工程控制系统关系进行分析,结合现有软件设计方法及数据通讯方式,对软件进行架构设计、接口设计、模块设计,并结合软件运行环境对系统上位机软件进行设计。**结果** 采用合适的编程语言实现了运动控制系统软件及其上位机软件的设计,并通过了工程实践对软件设计方法有效性的验证。**结论** 工程实践表明文中所述DFS运动控制系统软件设计方法切实可行,能够满足工程应用要求。

**关键词:** 动态飞行模拟器; 控制系统; 运动控制; 通信协议

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2015.05.020

**中图分类号:** TJ05; V416 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2015)05-0116-05

## Software Design of DFS Dynamic Movement Control System

HU Rong-hua, SHU Yang, LIU Shi-zhao

(Institute of Structural Mechanics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**ABSTRACT: Objective** To study the software function, framework, module, interface design and accomplishment way of the movement control system of the dynamic flight simulator (DFS). **Methods** Based on the analysis of the function and the software design of the DFS engineering control system, the movement control system function and the relationship between the movement control system and the engineering control system was analyzed, the framework, the interface and the module of the movement control system were designed in combination of the existing software design method and data communication method. The host-computer software was also designed in combination of the software operation environment. **Results** Design of the software of the movement control system and the host-computer system was realized with appropriate program language. **Conclusion** The DFS movement control system is feasible in engineering practice and can satisfy the requirement of engineering application.

**KEY WORDS:** dynamic flight simulator; control system; movement control; communication protocol

现代先进战机进行特技飞行、机动飞行、战术飞行训练时,由于 $G$ 的增加,人体脑组织因血液循环量急剧减少,导致缺血、缺氧,容易引发灰视、黑视、空间定位错觉,甚至丧失意识( $G\_LOC$ ),直接影响飞行员的操纵技能、心理状态和生理状态,严重影响飞行员对战场态势的判断,对飞行员的安全构成严重威胁<sup>[1]</sup>。动态

收稿日期: 2015-07-31; 修订日期: 2015-08-15

Received: 2015-07-31; Revised: 2015-08-15

作者简介: 胡荣华(1987—),男,江西南昌人,硕士研究生,主要研究方向为非标设备电气设计。

**Biography:** HU Rong-hua(1987—), Male, from Nanchang, Jiangxi, Master, Research focus: electrical design of non standard equipment.

飞行模拟器主要通过三自由度的协调运动来产生持续性高过载,用于飞行员持续性高过载耐力训练,提高飞行员高过载环境下的操纵熟练程度。动态飞行模拟器结合了载人离心机与飞行模拟技术,不仅具备提供持续性加速度环境的能力,还具备飞行员主动控制、高逼真视景/仪表显示、真实飞行环境模拟等特点,其在现代持续性高过载飞行训练方面具有广阔的应用前景。随着航空技术的发展,动态飞行模拟器更趋向于空战飞行模拟训练,可以在地面以更安全、更低成本的方式完成飞行训练<sup>[1-5]</sup>。

作为动态飞行模拟器运动控制中枢,工程控制系统管理协调各个分系统运行,负责各个分系统间数据交互,根据分系统要求将数据进行转化、分类、传输、

记录。作为控制系统的重要组成部分,运动控制系统负责完成目标模拟过载到离心机三自由度协调运动目标控制参数之间的载荷控制转换。文中在对动态飞行模拟器控制系统功能、设计进行分析的基础上,对运动控制系统软件功能设计、软件设计进行分析讨论。

### 1 控制系统软件设计

为满足控制系统功能设计对多种设备运行模式的要求,提高系统运行效率,明确各方面控制逻辑关系,动态飞行模拟器控制系统主要包含工作模式见表1<sup>[1-2]</sup>。

表1 系统工作模式

Table 1 Work pattern of the system

工作模式	功能描述
手动姿态调试模式	通过工程控制终端设定主臂角速度、滚转框滚转角/滚转角速度、俯仰舱俯仰角/俯仰角速度或者三轴过载等参数,主要用于系统调试。
预编程模式	在工程控制终端,通过图形编辑器编制预编程过载曲线,离心机对预编程曲线进行模拟,用于开展高过载环境下飞行员高G耐力训练
主动过载模式	飞行员在模拟座舱内操纵驾驶杆,根据输出目标过载驱动离心机运动,用于飞行员在过载环境下的操纵训练以及加速度生理学研究
动态飞行模拟模式	飞行员在模拟座舱内结合视景/仪表与真实的过载感受操纵模拟操纵元件,经飞行仿真系统解算出飞行参数,对三轴过载进行模拟,用于对真实飞行环境下飞行过程进行模拟训练
静态飞行模拟模式	飞行员在模拟座舱中结合视景/仪表显示通过操作模拟操纵元件来运行飞行仿真系统,此时,离心机驱动系统不运动,用于对飞行仿真系统进行测试

为满足系统功能要求,设计完成动态飞行模拟器控制系统结构如图1所示,包括工程控制分系统、运动控制分系统、飞行模拟分系统、安全保护分系统以及医学监测分系统。各分系统均由相应的硬件设备与软件构成,分系统软件间的数据、指令交互通过专用的多层次网络。其中,运动控制方面的功能实现主要由工程控制分系统、运动控制分系统、飞行模拟分系

统共同完成。

### 2 运动控制系统软件设计

运动控制系统主要根据输入目标过载、转速、姿态等控制驱动系统产生与目标过载、转速、姿态相近的运动,以及在停机过程中根据接收到的停机指令选择相应的停机程序控制离心机停机。其软件主要由上位机软件、运动控制软件以及多轴运动协调控制软件组成。运动控制软件在试验运行过程中通过多层次数据交互网络接收目标过载,根据工作模式的不同,选择不同的运动控制方法,经过运动控制解算后计算出相应的目标控制参数,如主旋臂角速度、滚转框滚转角以及俯仰舱俯仰角,下发至多轴运动协调控制软件。此外,在停机过程中,根据停机指令的不同选择相应的停机程序,解算后通过多层次数据交互网络下发目标控制参数至多轴运动协调控制软件。

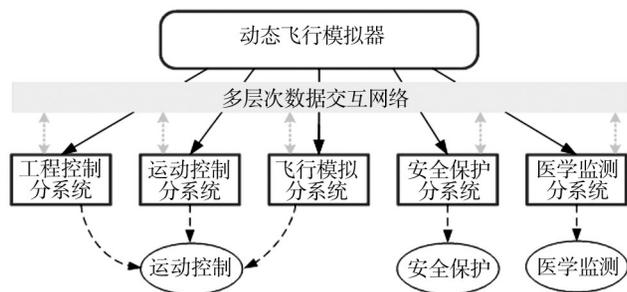


图1 控制系统结构

Fig.1 Diagram block of the control system

### 2.1 运动控制系统功能

静态飞行模拟模式下驱动系统不参与运动,其他几种工作模式下都需要驱动离心机运行产生持续性过载,给飞行员以过载感受。根据系统功能要求及工作模式设计,运动控制软件应该具备如下功能:具备接收与运动控制系统软件运行相关的指令并反馈指令执行状态的功能;具备接收目标过载、转速、姿态等参数的功能;具备根据工作模式的不同选择不同的运动控制方法进行运动载荷控制解算的功能;具备在不同停机模式下选择不同的停机程序进行停机控制的功能;具备下发目标控制参数至多轴运动协调控制软件的功能;具备上传当前离心机运行状态至上位机软件的功能。

### 2.2 系统运行与工作模式关系

系统运行过程中,运动控制终端通过多层次数据传输网络接收目标过载、目标姿态、目标转速等,经运动控制解算后,下发目标控制参数至多轴运动协调控制系统,通过驱动器驱动离心机运动。在进行运动控制解算过程中,接收离心机当前运行姿态参数,同时接收数据采集系统上传的座舱内实测过载参数进行运动控制<sup>[1,6-8]</sup>。

根据工作模式的不同,运动控制计算方法分为以下四类:直接将输入目标值作为目标控制参数进行输出,如目标转速;通过对目标过载根据“基础过载值”法<sup>[1]</sup>进行过载转换后作为指令过载,再进行运动控制解算后输出目标控制参数;直接把目标过载作为指令过载进行运动控制解算后输出目标控制参数;离心机驱动系统不运动,此时输出目标制参数为0。

根据工作模式的不同,选择上述四种计算方法中的一种进行运动控制解算。手动姿态调试模式的计算方法为第一或三种,预编程模式、主动过载模式、动态飞行模拟模式对应的计算方法为第二种,静态飞行模拟模式为第四种。

### 2.3 运动控制设计思路

系统设计采用如图2所示如设计思路,将控制目标生成作为相对独立的环节,根据飞行员操纵量及当前飞机飞行状态对飞机本体进行飞行仿真解算,得到所需控制目标(或直接给定控制目标)。通过后续的控制参数转换、多轴运动协调、驱动系统控制实现离心机的运动,产生不同方向的过载,并由传感器实时采集座舱过载用于控制参数转换时反馈修正。采用

该思路设计的运动控制系统,能够有效地避免动态飞行模拟器的系统特性对飞机操控模型的影响,使得运动控制从根本上更接近真实情况<sup>[9]</sup>。

运动控制系统运行所涉及到的交互设备有工程

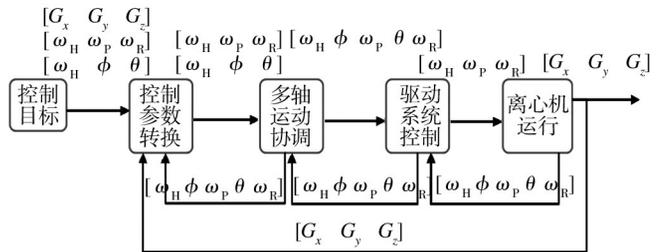


图2 运动控制设计思路

Fig.2 Design of movement control

控制终端、数据采集终端、飞行模拟终端、多轴运动协调SIMTION以及上位机,上位机用于数据信息以及状态信息查看。各设备之间主要采用以太网UDP通讯协议、TCP/IP通讯协议以及反射内存网络等数据交互网络进行数据通信<sup>[9-12]</sup>。

### 2.4 运动控制系统软件模块设计

为满足系统软件使用要求,软件设计以下主要功能模块:主程序模块、自检模块、试验运行模块、停机模块、指令通信模块、反射内存通信模块、SIMOTION通信模块、数据存储模块以及错误处理模块等。运动控制软件启动后自动启动主程序,通过主程序对其他各功能子模块进行通信和调用。部分主要功能模块功能说明如下。

1) 主程序模块。主程序模块是整个软件核心控制模块,负责各个子模块之间的通信及调用。软件运行过程中,控制调用其他子模块,其他子模块之间不进行直接的通信,通过主程序模块进行命令与数据交互。

2) 自检模块。自检模块主要对硬件及软件进行自检,主要包括板卡自检、数据网络自检、通信设备自检,确定板卡与系统能否正常通信,确定是否为高速数据交互做好准备。

3) 试验运行模块。试验运行模块在接收到运行指令后通过主程序模块调用启动,根据工作模式的不同,选择不同的运动控制方法,根据当前离心机状态以及模拟目标解算出目标控制参数并下发至多轴运动协调控制系统进行运动驱动控制。

4) 停机功能模块。停机模块在接收到停机指令后通过主程序模块调用启动,根据停机模式的不同,选择不同的停机控制算法,解算出目标控制参数并下

发至多轴运动协调控制系统进行运动驱动控制。

5) 指令通信模块。指令通信模块负责接收运动控制指令并对其进行解析,通过主程序模块选择不同的功能模块执行相应的操作,并反馈指令操作情况。

6) 反射内存通信模块。反射内存通信模块主要负责通过反射内存网络进行高速数据交互并对其进行解析。

7) SIMOTION 通信模块。主要通过运动控制数据网络下发经运动控制解算得到的目标控制参数至 SIMTION,以及接收 SIMTION 上传的离心机运行状态参数,并对其进行解析。

8) 数据存储模块。数据存储模块将试验运行产生的数据记录在运动控制终端本地。数据存储模块在试验运行后由主程序模块调用启动,之后一直保持运行状态或者等待运行状态直至接收到停机指令后由主程序通知结束退出。

9) 错误处理模块。错误处理模块主要负责在程序出现异常时,包括内部程序运行错误、通信指令反馈超时异常记录、模块通信机制异常以及系统运行监控异常等情况下的错误处理机制。

### 3 反射内存网络数据接口

运动控制系统软件设计采用 LabVIEW2012 编程实现,数据传输接口主要实现运动控制终端与工程控制终端、飞行模拟终端、数据采集终端以及 SIMTION 之间的数据传输。数据通讯主要通过以太网、反射内存网络以及运动控制数据网络等进行。

为了满足数据传输的实时性,采用反射内存网络

实现运动控制终端与其他设备之间的运动控制数据交互。反射内存网络由反射内存数据板卡以及反射内存数据交换机组成,通过在预先分配好的内存地址读写数据实现数据的高速交互,动态飞行模拟器运动控制软件运行在动态飞行模拟模式、静态飞行模拟模式下,需要动态飞行模拟终端通过反射内存网络发送三轴加速度等飞行参数进行高速数据交互,三轴加速度数据反射内存网络内存地址分配见表 2<sup>[13-14]</sup>,其他数据反射内存网络内存地址分配与此类似。

表 2 反射内存网络内存地址分配

Table 2 The memory address assign in the reflective memory network

偏置地址	程序变量	数据类型	字节	功能描述
65	JACQX	DBL	8	加速度 G <sub>x</sub>
73	JACQY	DBL	8	加速度 G <sub>y</sub>
81	JACQZ	DBL	8	加速度 G <sub>z</sub>

### 4 上位机软件设计

运动控制系统软件采用 LabVIEW2012 编程代码实现<sup>[15]</sup>,运动控制系统上位机软件主界面设计如图 3 所示,包括设计指令状态显示区域、数据查看区域以及数据显示监测区域。指令状态显示区域用于在接收到其他系统下发的工作指令后,进行状态显示;数据查看区域用于根据需要实时查看预编程曲线等参数;数据显示监测区域用于实时显示离心机三自由度运

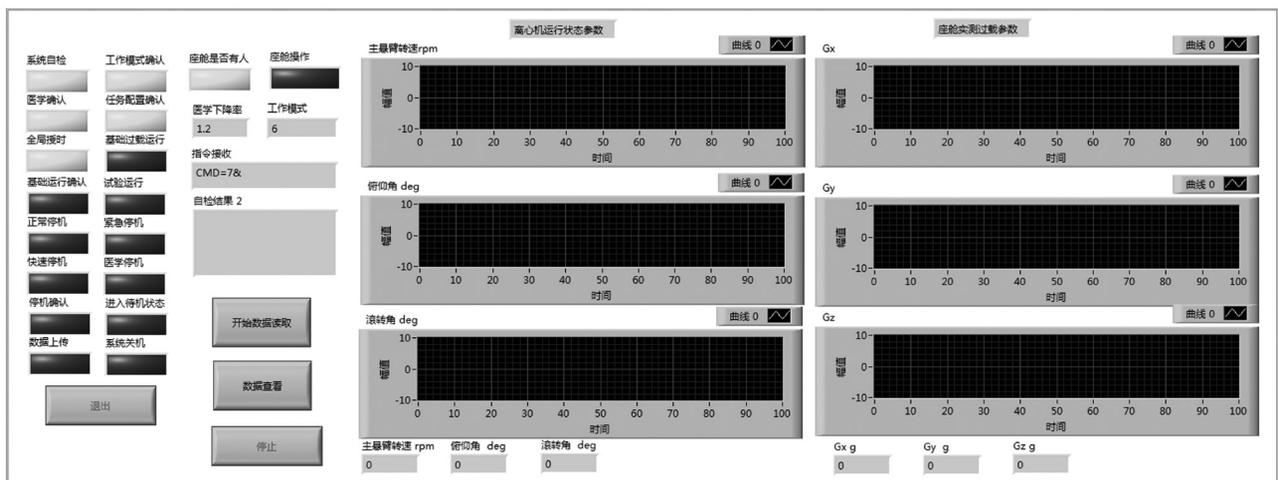


图3 上位机软件界面

Fig.3 The interface of the host-computer software

行状态参数以及座舱内实测过载参数。

### 5 结语

文中主要对动态飞行模拟器工程控制系统重要组成部分运动控制系统的软件设计进行概要描述,通过动态飞行模拟器调试过程中的软件联调,表明该软件设计架构及实现方式切实可行,能够满足使用要求。

#### 参考文献:

[1] 陆惠良. 载人离心机及其应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2001.  
LU Hui-liang. Human Centrifuge and Its Application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.

[2] 贾普照. 稳态加速度模拟试验设备——离心机设计[M]. 北京:国防工业出版社, 2013.  
JIA Pu-zhao. Steady State Acceleration Simulation Test Equipment—Centrifuge Design[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.

[3] 潘文俊,王立新. 持续载荷飞行模拟器过载模拟新原理[J]. 航空学报, 2010, 31(11): 2159—2165.  
PAN Wen-jun, WANG Li-xin. Principles of G<sub>load</sub> Simulation for a Novel Sustained-G Flight Simulator[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010, 31(11): 2159—2165.

[4] 周宽. 集离心机与模拟器于一体的第四代飞行模拟器[J]. 国际航空, 2004(5): 46—48.  
ZHOU Kuan. The Fourth Generation Flight Simulator within One Set of Centrifuge and Simulator[J]. International Aviation, 2004(5): 46—48.

[5] 由俊生,由勇,许叙遥,等. 歼击机飞行员三轴加速度过载建模与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(S2): 28—30.  
YOU Jun-sheng, YOU Yong, XU Xu-yao, et al. Research for Modeling and Simulation of Pilot Three-shaft Acceleration[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(S2): 28—30.

[6] 由俊生. 动态飞行仿真系统高载荷训练研究[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(11): 1533—1535.  
YOU Jun-sheng. Research on High Acceleration Training of Dynamic Flight Simulation System[J]. Journal of System Simulation, 2002, 14(11): 1533—1535.

[7] 由勇,吴澄,由俊生,等. 持续载荷飞行模拟器运动系统研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(5): 1154—1156.  
YOU Yong, WU Cheng, YOU Jun-sheng, et al. Study of Motion System of Flight Simulator of Persisted Load[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(5): 1154—1156.

[8] BANKS R D, BRUSH M L, WRIGHT H L. Operational Implications of Push-pull Effect[J]. Aviation Space Environmental, 1997, 68(7): 614.

[9] VITTURI S. DP-Ethernet: The Profibus DP Protocol Implemented on Ethernet[J]. Computer Communications, 2003, 26(10): 1095—1104.

[10] CHEN Juan, LI Li, WAN Li-qiang. The Application of PRO-FIBUS Technology in the Fengchan River Project's Electronic Control System Reform[C]// 2012 Fifth International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems. 2012: 130—133.

[11] 李一鸣,任勇毛,李俊. 基于UDP的传输协议性能比较与分析[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(10): 3906—3910.  
LI Yi-ming, REN Yong-mao, LI Jun. Comparison and evaluation of UDP-based transport protocol performance[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(10): 3906—3910.

[12] 狄博. TCP/IP协议分析及通信应用编程[J]. 计算机与现代化, 2006, 127(3): 37—39.  
DI Bo. TCP/IP Protocols Analysis and Program About Communication Application[J]. Computer and Modernization, 2006, 127(3): 37—39.

[13] 林晓焕,唐长春,柳文安. 基于反射内存的实时网络系统设计[J]. 西安工程大学学报, 2010, 24(1): 60—65.  
LIN Xiao-huan, TANG Chang-chun, LIU Wen-an. The Real-time Network System Design Based on the Reflection Memory[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2010, 24(1): 60—65.

[14] 李龙华,魏长安,姜守达. 基于RTX与反射内存的实时支撑系统设计[J]. 现代电子技术, 2013, 36(18): 65—67.  
LI Long-hua, WEI Chang-an, JIANG Shou-da. Design of Real-time Support System Based on RTX and Reflective Memory[J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(18): 65—67.

[15] 李瑞,周冰,胡仁喜,等. LabView2009中文版虚拟仪器—从入门到精通[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.  
LI Rui, ZHOU Bing, HU Ren-xi, et al. LabView2009 from Entry to The Master[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.