

某型飞机空中加受油训练模拟器的研制^①

谢保川, 范毅晟, 曾 鸣, 李雪青, 陈 磊

(海军模拟飞行训练中心, 北京 102488)

摘 要: 根据加受油模拟训练的实际需求, 提出了某型飞机空中加受油训练模拟器的功能, 设计了模拟器的体系结构, 并说明了模拟器模拟座舱、飞行仿真、伞套运动、运动平台、信号采控、操纵负荷、视景、教员控制台、计算机网络、音响通讯等分系统的实现. 该模拟器采用实物与图像相结合的半实物仿真方式, 空中对接环节临场感强、效果逼真, 对实装飞行帮助很大, 受训飞行员对该模拟器评价较好. 该模拟器的投入使用, 对提高仿真训练的质量效益, 促进部队战斗力建设具有十分重要的价值和意义.

关键词: 加油; 模拟器; 伞套

Development of Flight-refuel Training Simulator

XIE Bao-Chuan, FAN Yi-Sheng, ZENG Ming, LI Xue-Qing, CHEN Lei

(Naval Simulation Flight Training Center, Beijing 102488, China)

Abstract: The function of flight-refuel training simulator was proposed for requirement of flight-refuel training. The architecture of simulator was designed. The implement of simulator components were explained, which include simulation cabin, flight simulating, umbrella movement, movement platform, signal collecting control, manipulating loading, visual sign, instruction console, computing net and sound communication. The combination of object and picture was adopted in the simulator. The sense of arriving area is strong and the effect is vivid in the process of through the umbrella. The simulation training helped the flight of fighter plane, so a better apprise was given by training aviator. The simulator can improve the simulation training and promote the fighting capacity.

Key words: refuel; simulator; umbrella

空中加油飞行是飞行部队实施远程作战的有效手段, 目前飞行部队已实现空中加油训练常态化, 但实装训练需要加油机和受油机同时出动, 协调难度大, 风险系数高, 训练消耗大. 而模拟训练可以达到接近实战的训练效果, 可增加飞行员加油经验, 促进部队战斗力提升, 并且节省空中飞行训练时间, 节约大量训练经费.

本文描述了某型飞机空中加受油训练模拟器研制中采用的技术方案、体系结构.

1 需求与功能

以满足某型飞机与加油机进行双机超密集编队飞

行训练、与加油机进行编队飞行、对接、加油、脱离训练为需求, 该模拟器模拟范围是座舱和伞套设备, 座舱设备主要模拟与加受油训练有关的设备, 其它设备仅作外观模拟. 为了使加受油训练更逼真, 伞套设备采用真实伞套.

该模拟器的功能有: (1)加受油空中编队训练. (2)受油机在不同环境下的对接、加油、退出训练. (3)训练成绩评定统计. (4)是按照训练课目的要求, 可以设置不同的飞行条件. (5)实时记忆主要数据, 并可重现记忆的飞行过程. (6)可以实时显示空中加油场景, 并提供俯视图、侧视图、第三者观察视图和加油员视图的视点切换, 帮助教员全面掌握训练信息. (7)测试和冻

^① 收稿时间:2014-10-31;收到修改稿时间:2014-12-08

结飞行过程,用于设备排故和飞行中讲评.

2 体系组成

模拟器由模拟座舱及设备、飞行仿真分系统、伞套运动分系统、运动平台分系统、信号采控分系统、操纵负荷分系统、视景分系统、教员控制台、计算机网络分系统、音响通讯分系统以及电源和辅助分系统等部分组成^[1].

该模拟器是以计算机为核心的复杂的人机闭环实时仿真系统,飞行员在座舱内可按照实际加受油步骤进行操作,飞行员的每一步操作均通过相应的系统进入计算机,主计算机根据这些输入信号进行飞行方程的解算,并将解算结果输出到有关分系统,激励分系统产生相应的响应,这些视觉、听觉、动感、力感信号被飞行员所接收,以确定下一个动作和操纵量.飞行过程中,教员即可以实时监测飞行状态,也可通过计算机对飞行过程进行干预.系统结构如图1所示.

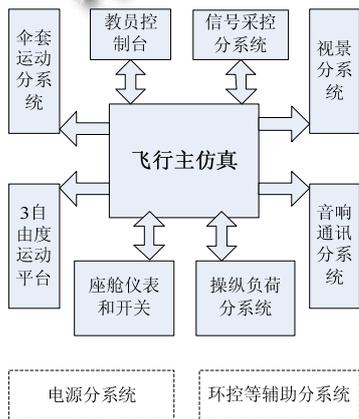


图1 系统总体框图

3 主要系统实现

3.1 飞行仿真分系统

飞行仿真分系统接收操纵系统的操作面位置、燃油重量、发动机系统工作状态、气动系数等数据,根据飞机空气动力特性,解算飞机六自由度非线性全量运动方程,计算出飞机的姿态位置以及其它飞行参数.这些飞行参数输出到模拟器的其它分系统,以便为飞行员提供视觉、听觉和动感等信息.并且进行大气环境对飞行影响的模拟,真实反映飞机的升力、阻力、侧力、俯仰力矩和横侧力矩特性;实现加油机气流扰动仿真.飞行仿真主要由气动模块、运动方程模块、发动机推力模块等模块组成.飞行仿真分系统仿真框

图如图2所示.

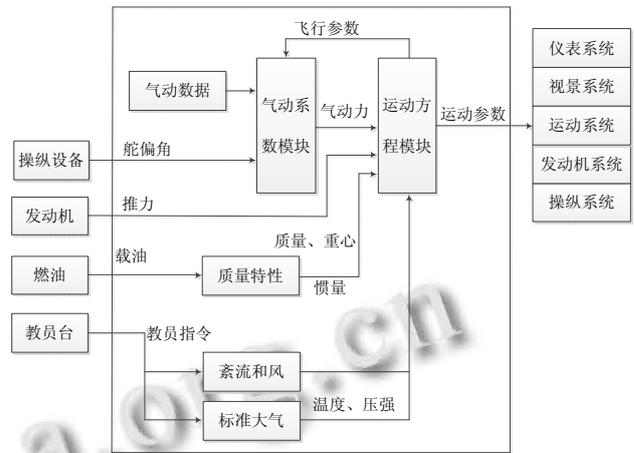


图2 飞行仿真分系统仿真框图

气动模块完成飞机空气动力特性的仿真,计算飞机的气动系数、气动力和力矩.该模块包括纵向气动系数、横侧气动系数以及气动函数生成.

运动方程模块完成飞机六自由度刚体运动方程的解算.在该模块中,首先综合飞机所受的各种力和力矩,包括重力、气动力、发动机推力,计算沿机体轴的线加速度和角加速度,然后应用积分产生飞机的合成速度^[2].把风和紊流扰动速度加到机体轴线速度上,并用来计算飞行轨迹参数.

发动机推力主要根据油门杆位置确定发动机工作状态、计算发动机涡轮转速与发动机推力.

空中加受油时,受油机从加油机后方进入对接位置,容易受到加油机尾流影响.加油机的尾流由发动机的喷流、飞机表面的紊流附面层和尾涡组成^[3].

对于加油机扰流模型,运用空间尾涡矢量力矩矩阵原理,建立可控强度的加油机气流扰动模型,保证飞行员循序渐进地掌握空中加受油技能^[4].

3.2 模拟座舱分系统

采用模拟座舱,油门杆、驾驶杆、舵、空中受油准备电门、准备加油指示灯、平显显示内容与真实飞机状态一致.与空中加受油过程有关的发动机转速表、气压高度表、空速表、马赫数表、升降速度表、攻角表、地平仪和油量表进行功能模拟,仪表的逻辑关系、工作极限及指示情况与实际飞机相同.模拟座舱内的其它仪表板、仪表、开关按钮、控制盒、指示灯的布局、外形、标牌、颜色与实际飞机一致.

仪表采用 ARM 方式的嵌入式微处理器技术,仪

表由 ARM 核心模块、电机/液晶驱动模块、网络通讯模块、电源模块组成,如图 3 所示.仪表内采用模块化标准工业产品,每个仪表控制单元均为自主式单元,并可进行互换,同外界采用 POE 工业以太网总线方式通讯.

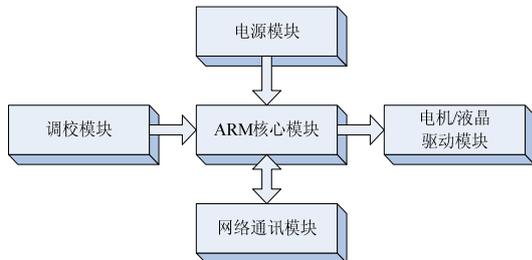


图 3 仪表组成模块图

接口通信分系统发送仪表指示数据至仪表通讯模块,仪表接收到指示数据后,经内部微处理器及驱动电路把指示数据转化为仪表指示的驱动信号,驱动信号驱动电机或显示屏来完成指示数据的指示.

3.3 信号采控系统

信号采控分系统实现驾驶杆、油门、方向舵、开关、按键等器件的数据采集以及平台、操纵负荷、平显、指示灯的驱动,该系统采用了针对模拟器信号采控场合的通用型信号采控模块,可以实现模拟量输入采集、模拟量输出控制、数字量输入采集、数字量输出控制等各种常见功能.

系统采用基于 Cortex-M3 架构 ARM,单个模块信号采控量大,可多至 16 路模拟量输入、16 路模拟量输出、32 路单路 5V 小电压数字量输入、32 路单路 28V 大电压数字量输入、32 路单路 10mA 小电流数字量输出、16 路单路 100mA 大电流 LED 驱动输出.模块采用工业级器件设计,对模拟量等敏感信号进行了屏蔽、隔离等一系列保护,可满足工控环境的温度、湿度、振动等要求.模块体积小,可就近放置于需要采控的设备附近,缩短了信号连线,简化座舱内外接线.信号采控模块的硬件组成框图如图 4 所示.

信号采控模块首先对嵌入式系统初始化,对采集的模拟量、数字量进行数字滤波,然后通过选定的网络接口发送到主机,并将本次采集数据存入存储器.同时通过网络接收主机的控制模拟量、数字量,实现平台、操纵负荷、平显、指示灯的驱动.

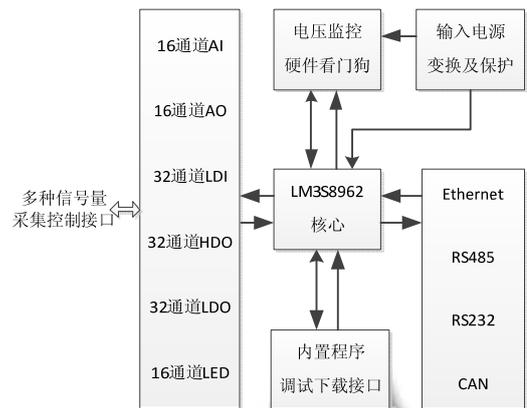


图 4 信号采控模块硬件组成框图

3.4 运动平台分系统

运动平台分系统为 3 自由度平台,模拟飞机在飞行中的姿态以及由碰撞和空中紊流引起的抖振特性.

该系统主要由上下台面、3 个防扭臂、3 个电动缸、平台控制箱(下位机软件)及上位工控机(上位机软件)组成.运动平台可以实现俯仰、横滚和垂直运动,俯仰角和横滚角范围均为 $\pm 7^\circ$,垂直方向范围为 $\pm 110\text{mm}$.

软件分上位机和下位机两部分,通过以太网进行通信.

上位机软件主要完成三自由度运动平台三个缸长的位置反解运算、输入位置信号滤波及平台启停控制等功能.

下位机软件固化于运动控制卡内,运动控制卡和伺服执行机构共同组成一个位置闭环控制系统.运动控制卡接收上位机发来的 3 个轴的位置及速度信息,得到期望位置,并通过伺服控制器接收电动缸实际位置的反馈值,将反馈值与期望值比较,根据偏差,通过模拟量输出通道向伺服控制器发出转矩控制指令,伺服驱动器根据转矩指令调整供给伺服电机的电流,实现转矩闭环,驱动伺服电动缸,运动控制卡并通过编码器反馈电动缸行程位置,使交流伺服电机驱动电动缸到达相应的位置,完成位置闭环.运动控制卡同时控制三只电动缸协调动作带动上平台产生预期运动.运动控制卡内程序同时监测伺服电机状态及限位开关等安全信息,确保平台安全.

3.5 操纵符合分系统

操纵负荷分系统采用了全电动的操纵负荷系统,该系统由作动器(伺服电机和减速机)、伺服驱动器、人感控制器及机械连接(摇臂和连杆)组成.

作动器选用高扭矩密度无齿槽效应伺服电机加单级行星减速机组成作动器的执行机构。伺服驱动器与伺服电机配套为电机提供工作电流，接受人感控制器的指令，控制伺服电机实现所要求的功能。人感控制器实现人感系统的基本功能，同时完成与主控计算机进行信息交互功能。

人感控制器通过模拟和数字 IO 口实时读取作动器输出端的位置信号，由该位置信号依据力感模型计算出对应该位置需输出多大的力(其他影响因素也要加入此回路中)，将计算得出的力折算成对应的模拟量电压，通过模拟量输出口输出送给伺服电机的放大器(伺服驱动器)，由放大器驱动电机减速机机构输出实际的力。该闭合回路的控制器是比例、微分类型。比例通道是主控制通道，增益为位置增益，表现为力感模型的静态特性，微分通道产生相位超前，添加速度前馈，以增加频率相应，表现为力感模型的动态特性。

3.6 伞套运动分系统

伞套运动分系统采用实物和图像相结合的半实物仿真方法，实现了对过程中的伞套运动特性半实物仿真，这种与视景图像相结合的模拟方式，极大地提高了空中对接环节的准确性和临场感。

伞套运动分系统由伞套及平台、伞套控制计算机、自整角机采样模块、伺服机构、伞套接口箱和电源模块等组成。伞套控制计算机包括伞套控制软件、计算机和数字量采集卡等；自整角机采样模块包括自整角机、自整角机数据采集卡、信号调制板、励磁电源模块等；伺服机构包括直流力矩测速机组、力矩电机驱动箱、力矩电机模出卡、涡轮减速器等。

伞套控制计算机接收飞行仿真计算机的飞行参数，伞套控制软件根据接收的飞行参数解算出伞套运动平台运动的预想位置，并给力矩电机模出卡置数，模出卡的电压通过伞套接口箱、力矩电机驱动箱和力矩电机测速机组驱动负载机构向预想位置运动，这时与负载机构联动的自整角机输出电压也随之改变，自整角机输出电压通过信号调制箱、伞套接口箱、自整角机数据采集卡传送到伞套控制计算机中，伞套控制软件解算出伞套平台的运行位置，将这个位置和伞套运动平台运动的预想位置相比较，从而使伞套运动平台运动到预想位置。伞套运动控制原理如图 5 所示。

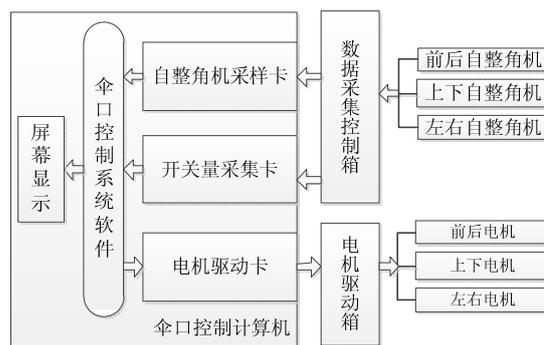


图 5 伞套控制原理图

3.7 计算机网络分系统

计算机网络分系统主要使用 100/1000M 带宽自适应网卡和 2 台 1000M 网络交换机连接各分系统计算机。

根据通信任务的要求，以面向对象编程的方式编写相应的通信模块程序。各分系统在相应的程序中加入该模块程序文件。通过程序中的模块接口引入和发送相应的数据，完成通讯任务。网络通信程序采用 VC++ 调用 windows API 来实现，即利用 windows 套接字(windows socket)进行。

3.8 视景分系统

视景分系统包括图像生成子系统和图像显示子系统，结构组成如图 6 所示。由计算机图形工作站实时生成的视景图像经过几何变形和边缘融合计算后，通过视频信号线送入相应的投影器中，投射到球幕上相应的通道位置。通过对投影器对比度亮度的统一调整，在投影幕上显示。各通道之间完整连续，整个投影画面无缝衔接，具有很强的沉浸效果。同时每台图形工作站利用显卡双头输出再输出一路视频信号到切换器，由切换器控制切换监视器上的显示画面，来实现对显示输出的监控。

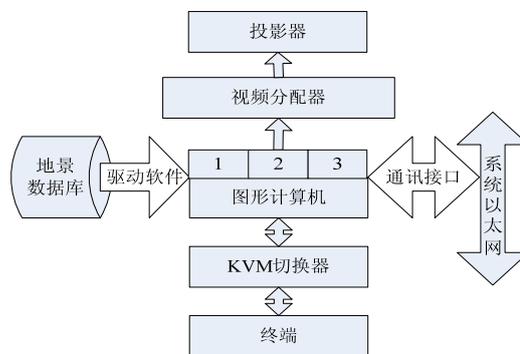


图 6 视景分系统结构组成图

视景图像的驱动采用的是 VegaPrime, VegaPrime 自动实现基本的视景驱动功能, 同时通过套接字接收网络数据, 通过对 VegaPrime 内置节点属性的重写, 实现视景内视点运动、视点转换、场景变化、特效显示等功能的动态控制。

视景仿真软件包括网络通信模块、模型调度模块、大地形处理模块和视景变形融合模块^[5]。

(1) 网络通信模块

该模块主要接收来自飞行仿真分系统、伞套运动分系统和教学管理分系统的数据来驱动视景系统的运行, 其中: 飞行仿真分系统传输受油机飞行的飞行姿态, 供视景驱动程序控制视点的运动。伞套运动分系统传输伞套的运动数据, 供视景驱动程序控制伞套模型的运动。教学管理分系统传输场景条件数据, 供视景驱动程序控制视景环境数据和进行特效显示。

(2) 模型调度模块

该模块主要接收来自飞行仿真的模型数据来驱动视景系统模型的显示和运动, 模型主要包括加油机模型和加油管模型。

(3) 大地形处理模块

该模块使用 VegaPrime 的 LADBM 进行大地形处理, LADBM 支持 TerrPage 和 OpenFlight 两种格式的大地形文件。LADBM 需要预先对大地形进行配置, 设置分页调度等参数, 并保存配置文件, 然后在 VegaPrime 中添加 LADBM 节点, 将该 LADBM 节点的访问对象指向大地形配置文件, VegaPrime 即可在视景运行后通过分页调用, 来实现地形数据的动态载入和释放, 实现大地形的调用处理。

(4) 视景变形融合模块

该模块使用 OpenGL 编写, 通过捕获 vegaPrime 画面, 结合采用 nurbs 多阶算法, 对画面进行分割、重叠带生成、几何校正、边缘羽化、色彩还原, 最后通过显卡输出在投影幕上显示出一张完整的影像, 实现曲面的平滑变形。

3.9 教员控制台

教员控制台主要实现教学管理、态势显示和虚拟仪表显示。

(1) 教学管理

教学管理主要包括训练参数设置、训练过程控制、训练信息显示、训练信息管理、模拟器维护信息管理、仪表测试六部分功能。

训练参数设置, 训练参数包括训练科目、气象条

件、外挂方案及加油位置等基本信息设置。

训练过程控制, 包括初始化、运行、冻结、结束训练等内容, 为飞行教员提供训练控制功能。

训练信息显示, 训练信息显示包括加油机状态、受油机状态、伞套状态及系统参数四部分信息显示内容, 为飞行教员全面掌握飞机及系统状态提供数据支持。

训练信息管理, 主要负责实现飞行员资料信息管理和训练记录查询及回放功能。飞行员资料信息管理功能可以将飞行员的基本信息录入系统便于日后查看; 训练记录查询及回放功能可以查看以往训练记录, 并通过回放功能实现训练过程回看^[6]。

模拟器维护信息管理, 本部分功能包括维护信息管理和故障信息管理功能。维护信息管理主要可以将模拟器维护信息录入系统, 实现电子存档, 便于日后快速查阅; 故障信息管理可以将模拟器遇到的故障、处理方法等信息记录下来, 为排除故障积累经验。

仪表测试, 可以通过仪表测试功能为仪表故障排除提供软件支持。

(2) 态势显示

通过不同视点观察加、受油机的三维姿态和相对空间位置关系。三维态势提供 5 个不同的视角画面, 包括顶视视角、侧视视角、前视视角、自由视角及综合视角。通过简单的键盘操作可以实现各种视图间的切换。界面中还包括一些简单的参数信息显示。

态势显示采用 Vega Prime 软件来进行场景管理和驱动, 它分为两个程序模块: 场景管理模块及实时场景驱动模块。场景管理模块主要是用于运行环境的设置、窗口设置、通道设置、观察者设置、数据库管理设置、场景设置、路径设置、一般天气环境设置以及信号灯模块、云模块的建立; 实时场景驱动模块主要是用于调用场景管理模块数据, 根据加、受油机数据, 实时地产生图形。态势显示画面如图 7 所示。



图 7 态势显示图

(3) 虚拟仪表模块

虚拟仪表可以将模拟器中部分仪表信息以图形仪表的形式显示,为训练管理人员提供教学辅助手段.界面中包括:地平仪、速度表、高度表、转速表、油量表、升降速度表及各种开关、灯,这些图形仪表显示内容与模拟器中相应仪表显示的数据完全一致.

虚拟仪表主要由 VC++、GL Studio 及 VegaPrime 共同开发实现. GL Studio 是由 DISTI 公司开发的虚拟仪表软件,该软件通过简单的界面操作实现图形仪表的布局设计,通过软件接口设计功能实现各种指针、开关等设备的接口. GL Studio 生成的文件经过 VC++ 编译生成动态链接库供 VegaPrime 调用. VegaPrime 通过插件加载 GL Studio 生成的动态连接库文件,并通过动态链接库的接口实现虚拟仪表的控制. 仪表驱动的数据都来自于飞行主仿真程序. 虚拟仪表显示画面如图 8 所示.



图 8 虚拟仪表显示图

3.10 音响通讯分系统

音响通讯分系统硬件由音响通讯计算机、普通声卡、音频功率放大器和音箱等组成,结构如图 9 所示.

声音采用“回放式”模式实现^[7]. 音响仿真软件根据从网络上得到的飞机油门位置、高度、速度等数据和离线频谱分析获得的“音响数据”来判断应该发的声音的类型及相应的频率和幅值,然后调用声音文件、对缓冲区进行设置,进而驱动声卡,声卡的声音信号

经左、右两个声道的功率放大器和音箱后输出声音.

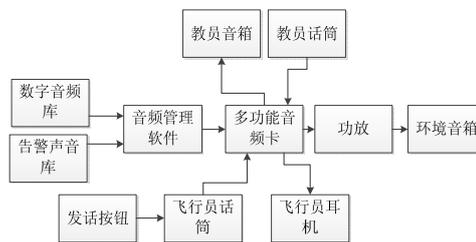


图 9 音响通讯结构图

4 结语

本文描述了某型飞机空中加油训练模拟器的需求、功能和体系组成,并说明了模拟器主要系统实现. 该模拟器研制成功后,已承训多人多批次的模拟训练, 受训飞行员对该模拟器普遍评价较好,认为该模拟器采用了实物和图像相结合的办法,空中对接环节效果逼真,对实装飞行帮助很大.

参考文献

- 谷树山,柴守权,王江南.飞行训练模拟器设计.电脑编程技巧与维护,2013,(6):73-75,77.
- 刘春,魏辉.飞机动力学仿真模型误差分析及调整.计算机仿真,2013,30(3):101-104.
- 张雷雨,张洪,杨洋,黄龙.空中加油对接过程的动力学建模与仿真.航空学报,2012,33(7):1347-1354.
- 胡孟权,柳平,聂鑫,周瑞祥.大气紊流对空中加油软管锥套运动的影响.飞行力学,2010,28(5):20-13.
- 谭颖,闫建国.空中加油视景仿真系统的研究与实现.现代电子技术,2012,35(10):84-86,89.
- 周增波,范敏毅,陈曦.飞行模拟器教员控制台系统的设计与实现.系统仿真学报,2012,24(11):2279-2284.
- 盛晓伟,郑淑涛,韩俊伟.飞行模拟器音效系统声音分析与合成技术.吉林大学学报(工学版),2013,43(5):1433-1440.