

大型运输机工程模拟器设计与试验验证综述

朱江*, 林皓, 马力

中航工业第一飞机设计研究院, 陕西 西安 710089

摘要: 为了更好地发挥工程模拟器在飞机研制过程中的作用, 详细规划了工程模拟器的顶层功能设计要求, 设计了模拟器的系统组成, 阐述了其实现原理, 详细描述了主要系统设计, 给出了工程模拟器各阶段试验验证内容, 分析了工程模拟器研制中的关键技术。该工程模拟器已应用于大型飞机人机功效评估、飞控系统控制律开发、飞行品质评估试验、首飞前试飞员改装培训以及多个高风险科目的模拟飞行训练中。结果表明: 模拟器系统运行可靠, 与飞机的空中感受完全一致。

关键词: 大型运输机; 工程模拟器; 系统工程; 试验验证

中图分类号: V217

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453 (2015) 12-0053-06

工程模拟器作为飞机研发不可缺少的重要工具之一, 已成为与风洞试验环境、喷气发动机试验台、结构环境试验设备并列的航空四大试验研究设施。针对大型运输机气动构型复杂、巨量气动数据处理、系统试验条目和需求多、外围设备繁多、接口类型繁杂等特点, 开展大型运输机工程模拟器研制, 建立完善的飞机模型数据库和支撑软件, 使大型运输机飞控系统从前台设计到后台试验融为一体, 设计流程从开环变为闭环, 从串行变为并行。因此, 工程模拟器的研制与验证十分必要。

1 模拟器总体设计

1.1 设计思想

大型运输机工程模拟器作为一个庞大繁杂的系统工程, 其任务规划、顶层设计和统筹管理尤为重要。因此, 在模拟器设计过程中遵循以下指导思想:

- (1) 针对飞机特点, 注重通用性、实用性、可靠性、先进性和标准化。
- (2) 考虑到工程模拟器与飞机研制同步进行, 工程模拟器模拟座舱可根据机载设备研制的实际情况, 先期采用外形

一致的模拟件。操纵负荷系统、运动系统、视景和声音模拟系统由计算机控制, 响应飞机各种飞行状态, 给飞行员提供视觉、听觉、力负荷和运动响应等人体感觉, 实现逼真的模拟, 从而达到人在环境中仿真验证与评估的目的, 满足工程模拟器研制的功能和性能要求。

(3) 为保证工程模拟器的良好运行, 在设计时需考虑提供灵活可靠的配电系统、自动加电系统、实时故障检测系统和环境控制系统以及模拟器专用测试设备和维修工具。

1.2 系统组成及主要功能

大型运输机工程模拟器主要由主飞行仿真系统、综合控制管理系统、座舱系统、操纵负荷系统、运动系统、航电仿真系统、网络系统、接口系统、视景系统、声音仿真系统、工程师仿真平台、环境与支持系统等组成, 如图1所示。

工程模拟器在新型号飞机设计、试验、定型及改装过程中发挥重要作用, 它主要完成以下功能:

- (1) 座舱操纵机构选型;
- (2) 座舱布置研究与评估;
- (3) 人感特性和评定飞机的飞行品质;
- (4) 人机功效评估与优化设计研究;

收稿日期: 2015-03-16; 退修日期: 2015-10-14; 录用日期: 2015-10-23

*通讯作者. Tel.: 029-86832251 E-mail: zjiang_fai@163.com

引用格式: ZHU Jiang, LIN Hao, MA Li. Design and test verification of large transport aircraft engineering simulator [J]. Aeronautical Science & Technology, 2015, 26(12): 53-58. 朱江, 林皓, 马力. 大型运输机工程模拟器设计与试验验证综述[J]. 航空科学技术, 2015, 26(12): 53-58.

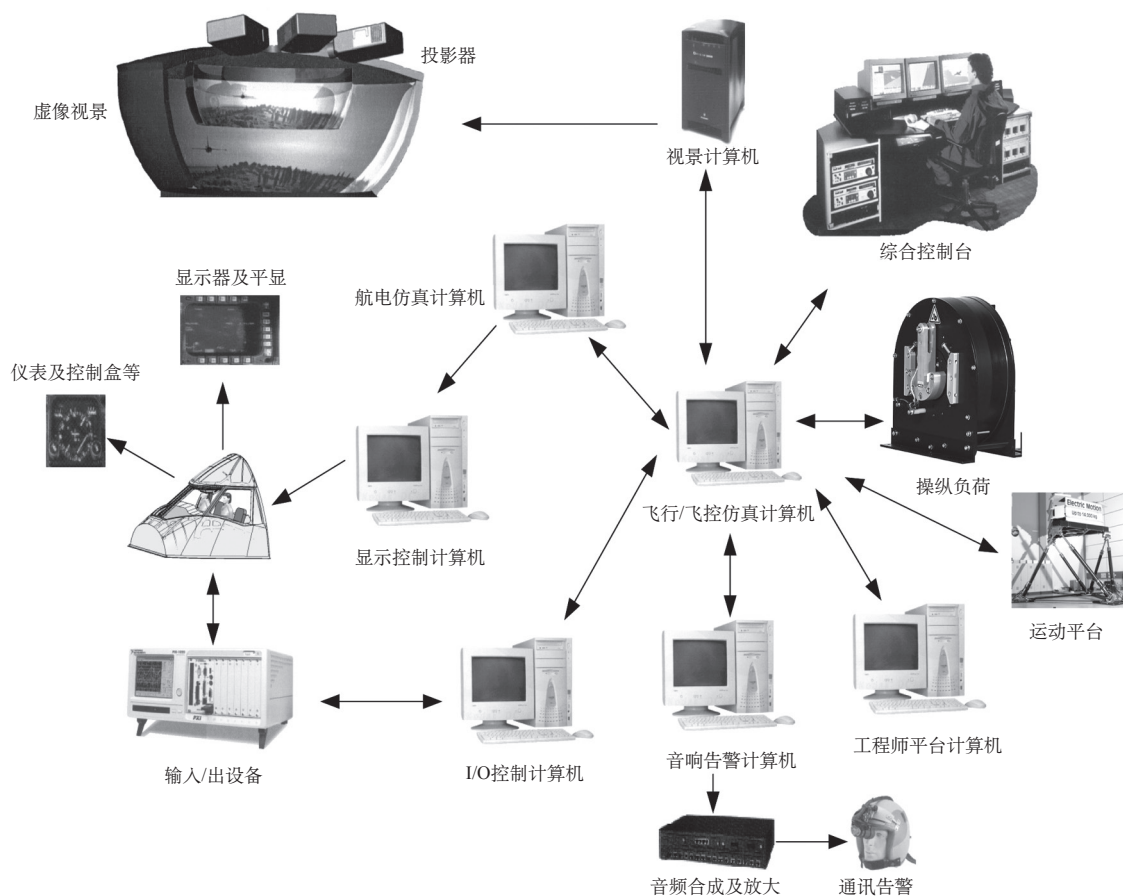


图1 大型运输机工程模拟器组成框图

Fig.1 System architecture of large transport aircraft engineering simulator

- (5) 开发、优化飞行控制系统控制律;
- (6) 进行飞机战术动作, 包括大攻角、失速、过失速状态的研究;
- (7) 研究模态转换和故障瞬态及故障影响;
- (8) 试飞员培训及试飞支持。

1.3 实现原理

工程模拟器的实现原理如图2所示。主要利用尽可能逼真的飞行环境, 通过具有丰富飞行经验的飞行员或工程技术人员操纵模拟器, 观察飞行显控设备和仪表, 感受座舱外视景、音响等来评定飞行性能和飞行品质, 对系统的设计提出修改意见。工程设计人员据此对相关系统进行修改, 再到模拟器中飞行, 经过多次迭代而设计出满意的飞机性能参数^[1]。

在检查或验证设计结果时有2种途径, 一种是飞行员的直接参与, 根据直观感受对飞机的飞行品质给出定性评估; 另一种是工程技术人员根据典型输入下的系统响应, 经过拟合匹配参数, 结合具体标准给出定量数值评估。

研制出的飞控系统全部物理样件在物理模拟试验平台(即铁鸟试验台)上进行充分的系统试验验证和考核后, 还要

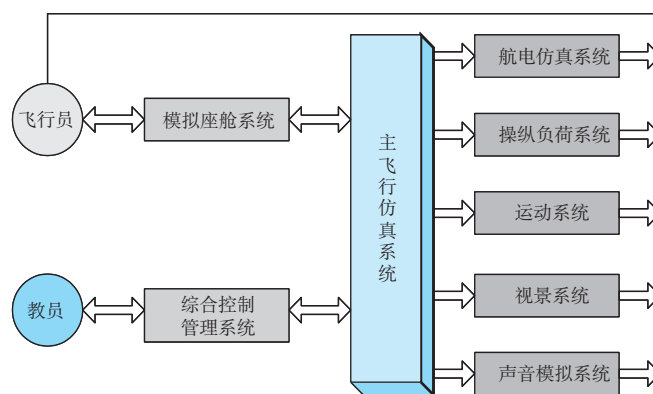


图2 工程模拟器原理

Fig.2 Principle of engineering simulator

在工程模拟器上进行飞行模拟评定。试验通过后, 进行空中试飞验证。空中试飞发现的飞机飞行品质问题仍要在工程模拟器上进行分析试验研究。在试飞成功后, 用实际测得的飞行数据和飞控系统参数来修改工程模拟器数据库, 使工程模拟器模拟水平更加逼近于试飞飞机, 这时的工程模拟器还可用来培训新的飞行员。

1.4 主要系统设计

(1) 主飞行仿真系统

主飞行仿真系统主要完成飞机在正常飞行情况下(包括起飞、巡航、进场、着陆等典型过程)飞行包线以内的飞行过程仿真,必要时对飞行包线边界进行飞行仿真,结合飞机飞行和试飞定型等风险科目进行过程仿真,同时对飞行过程中出现的常见故障能够进行定量或定性仿真模拟。主飞行仿真系统包括软件开发运行环境和飞行仿真软件包两部分。

软件开发运行环境采用“基于Windows的实时操作系统RTX+高性能计算机+反射内存网卡”的方式,搭建了实时管理系统的硬件环境,该环境也是飞行仿真软件包和实时操作系统的运行平台,支持C, C++, Matlab/Simulink等多语言统一建模,并能保证模型运行的实时性和可靠性。

飞行仿真软件包作为工程模拟器的核心软件,负责模拟飞机在地面和空中的各种运动,主要包括飞行、飞控、动力、液压、燃油、电源和环控等仿真模块。

大型运输机实时仿真系统模型与一般飞机的仿真模型有不同之处。例如:对于气动模型和六自由度模型,要采用全量非线性运动方程并考虑气动弹性的影响;对于大气扰动和自然环境模型,要充分考虑飞机的机体尺寸与实际风场特征等因素。同时,采用面向对象的建模方法构建可重配置的仿真模型,以支持新机研制中的设计改进。

建模时需考虑地面效应、结冰、气动弹性的因素影响以及收放机构(如起落架、襟缝翼等)和刹车机构的作用对飞机运动的影响。在软件包里除了要建立飞行动力学模型、气动模型、发动机模型、起落架模型、大气扰动模型等数学模型,并对这些数学模型进行实时解算外,还要建立飞行冻结、摔毁等数学模型,并对控制台发来的各种与飞机状态和飞行参数有关的指令进行处理。

(2) 航电仿真系统

航电仿真系统由航电仿真解算主机、虚拟仪表计算机、监控计算机、接口计算机、显控设备(大屏幕显示器、控制板等)以及相关软件组成。飞行员通过操作座舱内的航电系统启动板、显示控制板、选择转换板、多功能键盘、轨迹球等显示控制组件,将相关按键、旋钮值等通过A429或离散信号发送到接口计算机上进行处理,然后发送至航电仿真解算主机,解算主机根据这些外部操作以及飞行、飞控等其他系统的信号和一些外部环境数据完成航电仿真系统的解算,并将显示控制信息发送至虚拟仪表系统,驱动显控设备实现飞行员对航电仿真系统的控制。

航电仿真系统软件包括控制管理模块、导航模块、仪表

驱动模块、告警模块和网络通信模块。控制管理模块负责航电系统内部各子模块之间的通信和实时调度工作,对各子系统进行实时监控;导航模块包括大气数据计算机、无线电高度表、自动定向仪、全向信标、仪表着陆、测距器、微型导航、气象雷达、近地告警等仿真模块;告警模块接收主飞行仿真系统发送的告警信息,驱动告警灯的显示和语音告警。

(3) 操纵负荷系统

操纵负荷系统为飞行员提供控制、操纵飞机的手段,是模拟器的重要组成部分。操纵负荷系统必须实时地、逼真地复现飞机在不同飞行条件和不同操纵模式(自动、手动、应急)下操纵系统的静态和动态特性,并提供给飞行员一种驾驶飞机时操纵力的真实感觉,使之体现真实飞机中操纵系统的功能和特性,给飞行员提供正确的提示。同时,操纵负荷系统还必须实时地把飞行员的操纵输入反馈给飞行仿真主机,作为主机模型的重要输入量。

根据大型运输机操纵系统行程和输出力要求,选择美国MOOG公司三部Q150和四部C40分别对俯仰、滚转、偏航3个操纵通道和4个油门杆操纵通道进行加载。该电动加载装置采用无刷直流电机,配以高分辨率的力传感器和位移传感器,能够精确地提供所需的行程和操纵力。

每部Q150使用1台CQD04078型伺服驱动器,每部C40使用1台CCD03221型伺服驱动器,它们的功能主要是驱动电机并与操纵计算机进行以太网数据通讯。伺服驱动器内部参数可以通过系统自带的软件进行调整。

操纵负荷仿真软件主要完成接口检测、实时通讯及负载力的计算。其中操纵飞机所需的力和位移的变化是针对飞机的飞行速度、飞机高度、飞机配置和飞机重心的函数。

需要仿真实际操纵力中的对象有:杆系摩擦力、杆系阻尼、杆系刚度和死区;前端摩擦力、阻尼;后端摩擦力、阻尼;惯性;死区;三种频率两个拐点的载荷弹簧;启动力;限位;与自动驾驶仪的接口;配平;抖动力等11个方面。

具体实现时,把软件划分为操纵负荷计算机软件模块和主控计算机飞行操纵模块。其中,操纵负荷计算机软件模块包括电机控制算法、操纵通用模型(俯仰通道、横滚通道、偏航通道、配平通道、发动机通道等5种)以及通信模块等;主控计算机中内嵌了飞行操纵软件代码,包含俯仰通道逻辑、横滚通道逻辑模块、偏航通道逻辑模块、机械备份水平安定面配平逻辑模块、发动机逻辑模块共5种需要电动执行机构模拟的通道。

(4) 运动系统

运动系统主要模拟飞机纵向、升降、侧向、俯仰、横滚和航

向的六自由度运动,为飞行员提供瞬时过载感觉,并且对飞机起飞、着陆触地、失速抖振、空投空降等过程的动感进行模拟。

运动系统选用美国MOOG公司60英寸行程系列的660-14000标准六自由度电动运动系统。该运动平台是工程模拟器的载体,需要在平台上安置模拟座舱和投影球幕等设备。平台有6套独立的伺服系统,通过协调6个作动器的运动,来实现平台六自由度运动。为保证控制精度,六自由度运动控制系统中使用了位移传感器、力传感器、压力传感器和加速度传感器等。

运动系统仿真软件负责建立运动系统控制模型,主要内容是过载/失重的模拟和振动特效的模拟。根据力的效果分为持续的过载力仿真和由于振动产生的振动力仿真。同时,需要实时接收来自于模拟器主飞行仿真系统的不同类型命令,包括平台位置、速度和加速度命令;作动筒位置、速度和加速度命令;动态命令等3个方面。

(5) 视景系统

视景系统作为工程模拟器中相对独立的一个系统,为工程师和试飞员提供逼真的舱外景象模拟,包括各种气象条件下不同飞行状态的视觉效果,多种空、地景物及其相对运动动态效果。

视景仿真系统硬件部分主要由图形生成器和投影显示系统组成。图形生成器是视景系统的核心,用来实时生成相应的场景画面。投影显示系统主要由虚像显示系统、投影器和房体三部分组成。

视景系统软件按功能模块分为两大类:一类是非实时应用软件,一类是实时应用软件。前者主要是建模软件,主要用于地景数据库、固定目标及活动目标模型的建立;后者是实时场景管理软件和实时通信软件。实时场景管理软件完成场景的调度、环境的设置、特殊效果的设置、数据库的管理。实时通信软件完成主飞行仿真计算机与视景系统的数据交换。

(6) 工程师仿真平台

工程师仿真平台通过以太网与模拟器计算机系统相连,根据试验需要,工程师网络终端上可建立若干个离线仿真软件包和分析软件环境。工程师在各自终端上使用建模、分析软件对本系统的模型进行预先设计、数据和模型预处理、在非实时软件包上进行设计验证,通过网络将修改的模型传送到模拟器计算机系统上进行人在回路的验证。

对于Matlab/Simulink非实时模型软件转换成模拟器上以标准C语言实时运行的模型软件可采取以下步骤。一是在工程师仿真平台内将Matlab/Simulink模型自动或手动转换为C语言模型,二是通过主飞行仿真系统编译环境将C语言

模型下载到主飞行仿真计算机中,完成向实时模型的转换。

工程模拟器实时仿真过程和结果可通过网络传到工程师平台,通过飞机性能、飞行品质分析与测试软件包对仿真结果进行性能品质评估。

2 模拟器试验验证

2.1 系统初步设计阶段

在飞控系统初步设计阶段,大量的工程模拟器飞行员在环评估是必需的。

首先是操纵机构选型试验,可以在工程模拟器上安装不同形式的操纵机构,制定对比试验大纲和任务单,让有经验的试飞员或者飞行员进行对比验证试验,依据他们的飞行经验和实际试验飞行效果对操纵机构选型给出合理化建议。

其次是座舱布置研究与评估试验,根据初步搭建的模拟器,座舱内的设备是仿真件或C型件,该阶段飞行员可以对座舱设备的外形设计、安装位置以及设备之间的干涉等进行检查评估,为下一阶段的详细设计提供改进建议。

除了这两项试验之外,也可以对模拟器本身的特性进行评估,例如模拟器控制器(人感系统、油门杆)特性的真实性、视景系统的品质(时间延迟、锐度、周边覆盖情况等),以便找出相应评估的潜在缺陷。

2.2 首飞前阶段

本阶段重点是进行控制律与飞行品质评估试验,主要依据电传操纵系统飞机的飞行品质对飞机的纵轴和横轴飞行品质以及各轴组合时的飞行品质进行评估验证。闭环飞行品质的预测是基于几何数据、质量分布、气动数据、推进模型以及合理成熟的飞控系统结构。主要目标是找出重大的操纵品质缺陷、验证以前预测出的飞行品质问题的关键度、修改控制律参数以改进飞行品质,经过多轮次的迭代试验,使得控制律设计逐步收敛、正常飞控模态的飞行品质提高到1级。

为确保首飞安全,首飞前应该对首飞机组进行操作程序培训,最好进行封闭式训练,使首飞机组熟悉飞机的飞行品质和操作流程,另外还应对飞机及飞控系统的常见故障进行模拟试验,提高首飞机组对常见故障的处置和应变能力,增强首飞机组信心。

2.3 首飞后阶段

首飞后,飞机全面转入飞行试验阶段。本阶段在继续进行控制律优化的同时开展与试飞相关的一些科目试验,如扩包线飞行试验、试飞风险科目控制律调整检查试验等。

另外,本阶段的试验重点是自动飞控系统验证试验,需要对自动飞控的各种模态进行检查试验,评估各模态逻辑是

否正确、功能是否正常、模态切换瞬态是否在可接受的范围内以及性能是否满足设计要求。

通过以上不同阶段的控制律与飞行品质评估试验,在工程模拟器上感受飞行品质,对飞控系统控制律设计提出修改意见,最后在铁鸟半实物仿真环境中综合验证品模试验提出的设计修改结果,使得控制律设计逐步收敛。经过多轮次的品模试验以及首飞机组操作程序培训和故障特情培训,全面验证了飞控系统设计要求中规定的各项技术指标。

3 主要关键技术

3.1 仿真建模/验模技术

电传飞控系统的广泛应用,使得建立工程模拟器飞机系统模型时需要充分考虑可能出现的主要使用方式、故障模式和故障影响相关性。在设计之初,立足大型运输机长航时、大运载量、高任务率等特点,参考了飞机定型适航要求和高等级飞行训练模拟器的标准规范,有计划地开展了飞控、动力、起落架控制和航电等系统正常和故障模式下的性能仿真;采用基于理论数据/试验数据的多平台对比验证逼近方法以及飞机系统模型优化设计技术,建立了面向对象、可重配置的高灵活度飞行实时仿真模型,完成了系统参数优化,降低了建模复杂度,保证了模型的真实性和真实性,也满足了飞控系统验证要求^[2]。

3.2 飞机瞬态响应动感模拟技术

飞行员的体感信息源由运动平台提供,需要准确建立飞机动力学模型、运动感觉提示模型和平台动力学模型等。通过民航同类型飞机培训中心的实际飞行体验,分析以往型号的飞行试验数据,邀请试飞员进行飞行运动感受交流,并与试飞员共同进行相关试验,建立了滑行颠簸、起飞离地过载畸变、空中气流颠簸、着陆接地冲击、滑行纠偏等运动响应特效和洗出滤波环节,为飞行员提供了真实的飞行运动感觉,加强了飞行员的环境沉浸感,为飞行模态切换、功能进入条件和相关控制律参数设计等提供了真切的试飞员意见和建议^[1]。

3.3 操纵感觉校核验证技术

使用激光测定方法和在线编程技术,对操纵负荷模拟系统中的三轴启动力、力-位移曲线、最大操纵力、最大操纵位移和力-形变等主要技术指标进行高密度标定,并通过操纵模式切换开关实现不同操纵性能之间的变换,为飞行员提供了与真实飞机(或试验台架)完全一致的操纵感觉,有效提高了飞行员评估意见准确率。

3.4 控制显示设计技术

通过引入适用于飞行品质评估试验的控制显示设计技

术,在主飞行显示器和视景显示中增加必要的显示元素(图形、标识和数字等),提高飞行员精确完成给定任务的能力,增加完成特殊飞行任务(纠偏飞行)和(PIO)趋势的真实性和有效性,为进一步评估控制律参数提供了有力保障。

3.5 飞行品质评估试验方法和试验结果评估技术

采用飞机气动数据、动力数据和控制律参数的相关性分析方法,编制一组飞行试验科目(系统状态、重量、重心、高度、速度和试验动作),结合飞行员评估意见,在全飞行包线范围确定控制律参数调节规律的方法;通过飞行试验过程的全程监控,快速完成试验中飞行动作的有效性评估,及时与飞行员交换出现操纵时机、操纵量和完成精度等问题的意见,必要时重复完成试验,及时修正飞行员评估意见^[4]。

3.6 综合化试验管理平台设计技术

针对大型飞机特点以及飞行品质评估试验需求,建立完善的综合化试验管理平台。该平台集成了登机桥、运动平台、操纵负荷和应急操纵等设备控制管理功能,集成了飞行状态设置、冻结、重定位和执行等试验任务执行功能,集成了系统状态参数、飞行状态参数和试验动作等的实时监控、同步记录、事后回放、动作定位和数据分析功能,既满足飞控系统试验全过程需求,又大大减少试验人员需求。

4 结束语

大型运输机工程模拟器集系统分析、设计、仿真、建模、试验验证为一体,实现复杂电传飞控系统控制律设计、开发和试验验证。利用工程模拟器,在客观定量分析飞机功能和性能的基础上,进行飞机总体气动布局、飞行控制、发动机、综合航电系统的优化设计,通过试验全面验证飞控系统设计要求中规定的各项技术指标,有效提高设计效率、缩短研制周期、降低研制成本。同时,由于工程模拟器的通用性,可在大型运输机的改进型和新型号研制中发挥重要作用。

AST

参考文献

- [1] 李林,翁东东,王宝奇,等. 飞行模拟器[M]. 北京:北京大学出版社,2012.
LI Lin, WENG Dongdong, WANG Baoqi, et al. Flight simulation [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2012. (in Chinese)
- [2] 康凤举,杨惠珍,高立娥,等. 现代仿真技术与应用[M]. 北京:北京国防工业出版社,2010.
KANG Fengju, YANG Huizhen, GAO Li'e, et al. Modern simulation and application[M]. Beijing: Beijing National Defense Industry

Press,2010. (in Chinese)

- [3] 由勇,由育阳,由俊生. 持续载荷飞行仿真技术与工程设计. 北京:北京国防工业出版社,2013.

YOU Yong, YOU Yuyang, YOU Junsheng. Sustained acceleration flight simulation technology and engineering design [M]. Beijing: Beijing National Defense Industry Press,2010. (in Chinese)

- [4] 张德发,叶胜利. 飞行控制系统的地面与飞行试验[M]. 北京:北京国防工业出版社,2003.

ZHANG Defa, YE Shengli. Ground and flight tests of flight control system. Beijing: Beijing National Defense Industry Press,2010. (in Chinese)

作者简介

朱江(1969—) 男,硕士,研究员。主要研究方向:飞行仿真设计与试验验证。

Tel:029-86832251

E-mail:zjiang_fai@163.com

林皓(1979—) 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行仿真设计与试验验证。

马力(1980—) 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行仿真设计与试验验证。

Design and Test Verification of Large Transport Aircraft Engineering Simulator

ZHU Jiang*, LIN Hao, MA Li

AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China

Abstract: In order to maximize the utilization of the engineering simulator in the aircraft design, the design requirements of top level functions of the engineering simulator were worked out in detail. The components, technical principles, primary subsystem design and test verification contents in different phases of engineering simulator were briefly described, and the key technologies were analyzed. The engineering simulator has been applied on the ergonomics evaluation, flight control system control law development, flying qualities evaluation, test pilot refitting training before first flying and high-risk subjects' simulated flight training. The results show that the system runs reliably, and has high fidelity comparing with the real aircraft in the air.

Key Words: large transport aircraft; engineering simulator; system engineering; test verification

Received: 2015-03-16; Revised: 2015-10-14; Accepted: 2015-10-23

*Corresponding author. Tel. : 029-86832251 E-mail: zjiang_fai@163.com