

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2018.04.009

# 民用飞机集成验证试验平台规划研究

## Research on Planning of Integrated Verification Test Bench for Civil Aircraft

朱 川 徐德胜 谢殿煌 郭晓燕 / ZHU Chuan XU Desheng XIE Dianhuang GUO Xiaoyan

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

### 摘 要:

在现代大型民用飞机的研发过程中,为了保证飞机的飞行安全,开展民用飞机地面模拟试验是飞机成功研制的重要保证。通过对飞机的试验需求进行分析,指出了全机级集成验证试验平台建设的原则,对铁鸟综合试验台、航电综合试验台和电源综合试验台的规划进行了说明。通过试验件互联、试验设备互联及试验接地技术,将不同的综合试验台连接起来,形成了全机级集成验证试验平台架构。

**关键词:** 民用飞机;集成验证试验;规划;试验互联

**中图分类号:** V241.06

**文献标识码:** A

**OSID:**



[Abstract] To ensure the flight safety of the modern large-scale civil aircraft, ground simulation test has become an important role for the successful development of the aircraft. In this paper, the construction principle of the full machine level integrated verification test platform is pointed out, the plan of iron-bird test rig, avionics test rig and power test rig is described as well. Through the interconnection of test pieces, the interconnection of test equipment and the grounding technology, the different test rig is connected to form the whole machine level integrated test platform.

[Keywords] civil aircraft; integrated verification test; planning; test interconnection

## 0 引言

为了满足客户的需求,提高市场竞争力,民用飞机制造商不断推进技术创新,为验证飞机需求增加了复杂性和验证难度,给试飞试验增加了试飞架次和排故难度。大中型民用飞机在研制过程中普遍采用地面模拟试验技术来支持飞机级系统设计验证和适航验证。随着现代民机技术的发展,电传操纵和主动控制技术、高度综合的航空电子及机电综合技术等成为了民用飞机新技术的发展方向,系统间的交联关系越来越复杂,多系统之间的交联试验需求越来越迫切并成为必须要完成的试验内容。

多系统之间的综合验证试验是飞机需求最直接有效的验证手段。国外著名民用飞机制造商对不同机型采用了不同集成验证方法:波音 777 飞机采用了飞机系统综合试验台,综合了电源系统、飞控系统、机电系统、航电系统、环控系统、推进系统等关键

机载系统<sup>[1]</sup>;波音 787 采用了模块化集成方式,综合了飞控系统、液压系统、航电系统、起落架系统和环控系统<sup>[2]</sup>;空客 A350 采用了 Aircraft “Zero” 试验台和集成仿真试验台, Aircraft “Zero” 试验台综合了铁鸟飞控系统、液压系统、起落架系统和电气系统,集成仿真试验台综合了真实的驾驶舱和飞机电子<sup>[3]</sup>。

全机集成验证技术不仅提高了飞机地面模拟试验的充分性,增强了试验结果的可信性,而且能够利用飞行试验数据在试验台上进行飞行复现,实现系统飞行故障在地面的复现和检查,对飞机故障的排除和飞行安全起着重要作用。因此,对民用飞机集成验证试验平台规划进行研究具有十分重要的意义。本文在分析了全机集成验证需求的基础上,借鉴了国外飞机系统集成验证经验,提出了一种全机集成验证试验平台方案。

## 1 需求分析

民用飞机在研制过程中的试验需求包括设备级验证需求、系统级验证需求、多系统级验证需求、全机级集成验证需求。

1) 设备级需求:对飞机的功能和性能起到重要影响作用的机载设备的功能、性能、安全性、稳定性等进行验证,确保机载设备的完好;

2) 系统级需求:验证系统的功能符合设计要求,验证系统动、静态性能符合设计要求,验证系统故障检测/隔离/告警功能,验证系统和其他系统的接口正确性;

3) 多系统需求:通过不同系统之间的交联试验,验证系统联合工作的功能和性能是否满足设计要求,验证不同系统之间接口信号的正确性,验证不同系统之间的控制逻辑、响应是否正确、可靠、达到设计要求;

4) 全机级需求:开展各种飞行场景和飞行操作模拟试验,动态检查飞机系统交互逻辑、飞机系统与驾驶员逻辑接口,包含故障条件下系统之间的逻辑,验证全机告警系统设计是否合理,优化全机能量和数据流需求,暴露飞机系统协同工作内部缺陷,增长飞机系统设计和集成的成熟度。此外,支持试飞试验,复现故障和排故<sup>[4]</sup>。

## 2 试验平台规划

### 2.1 规划思路

如图1所示,全机级集成验证试验平台的规划是从飞机试验需求出发,以传统的飞机子系统试验验证技术为基础,在系统设计及系统试验方案制定时综合考虑各相关系统试验设施的配置,既有利于各系统的单独试验,又能进行多系统集成试验,突破

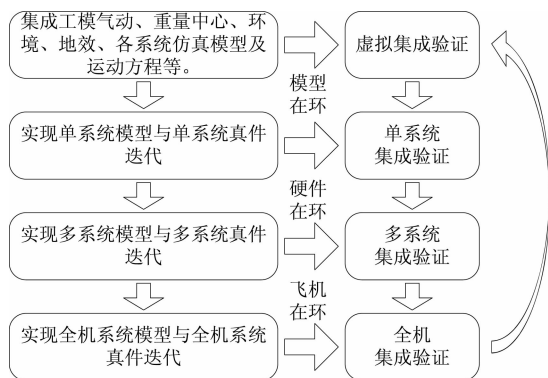


图1 全机集成验证平台规划思路

了传统试验方法中各系统“各自为政”的试验理念,创造系统“大综合”的试验思路。

在全机级集成验证平台建设过程中,弱化专业界限,从试验需求出发,自下而上验证,通过模型迭代实现从虚拟集成验证到物理集成验证、从单系统集成验证到多系统集成验证的转换,最终形成完善的飞机级集成验证试验环境。

### 2.2 规划原则

集成验证试验平台的规划主要遵循以下原则<sup>[5]</sup>:

#### 1) 真实构型原则

为了保证试验结果的可信度,在进行集成验证试验平台的规划时,试验构型应尽可能逼近飞机真实构型。

#### 2) 最先需求原则

根据民用飞机集成验证试验的整体建设规划和系统对飞机的影响,对试验平台的项目、资金、设备、场地等资源进行设计规划和配置优化。

#### 3) 先进性原则

从试验项目的规划到试验方案的选择,整个过程都要与民用飞机集成验证技术的发展紧密结合。在综合考虑技术前瞻性和技术成熟度的基础上,合理规划试验平台及试验项目。

#### 4) 资源共享原则

民用飞机的各个系统并不是相互独立的,而是密切的联系。因此,在建立集成验证试验平台的时候,需要统筹考虑不同系统之间功能及技术上的联系,对于具有相同试验需求,或重叠试验需求的不同系统,在充分考虑试验时间安排的前提下,建立可以共用的试验平台,以充分提高试验设备的利用率,实现最大程度的资源共享。

#### 5) 综合建设原则

民用飞机在设计过程中不仅有系统级的试验需求,还有飞机级的试验需求。飞机级集成验证试验要求在尽可能接近飞机真实构型下进行功能及性能试验,这就要求在进行试验平台的规划时要考虑不同系统试验台之间的交互作用。

#### 6) 可扩展原则

民用飞机各系统的试验需求可能会随着飞机研制进程中遇到的问题而出现新的试验验证需求,因此在试验平台规划时要充分考虑扩展试验功能,为试验功能的提升和持续发展提供可能。

### 7) 规范化管理原则

民用飞机集成验证试验包含了不同系统、不同专业的试验需求验证,为了满足不同系统、不同专业对验证试验的需求,需要在符合企业实际情况制定科学、规范的管理模式,为快速、高效地完成各级试验需求任务提供保障。

### 2.3 综合试验平台组成

根据以上规划思路及原则,本文提出了一种基于“分布式”布局的民用飞机集成验证试验平台规划方案。将具有相同或相似试验需求的系统规划到同一个试验台,然后将不同的试验台通过互联系统进行联通<sup>[6]</sup>,构建全机集成验证试验环境。

#### 2.3.1 仿真试验台

虚拟仿真平台在飞机设计的早期阶段,通过仿真的方式对系统的控制逻辑关系、功能关系、输入/输出参数、数据流进行需求确认,对系统进行可行性分析、验证,对全机能量流及信号流进行优化,有助于进行早期评估以及资源优化,在短时间内检验构型变化,减少开发时间。为了满足全机级的验证需求,仿真试验台应该具备与真实飞机相同的仿真模型,其中包括各系统的模型以及飞行过程中的各种环境模型,如图 2 所示。后续继承系统数字仿真的结果,并将其转变成具备真实物理接口的实时仿真模型<sup>[7]</sup>。在真实设备研制出来后,通过真件与仿真件之间的逐一替换,逐步完成试验平台的集成工作。



图 2 大规模飞行仿真

#### 2.3.2 铁鸟综合试验台

铁鸟综合试验台主要是验证主飞控系统、高升力系统、液压系统、起落架系统以及刹车系统的功能及性能的符合性,除此之外,还要验证各系统结构安装定位的准确性、机械运动的合理性、控制逻辑的正确性、计算机软硬件运行的正确性及匹配性以及各种工作模式下各系统的控制率,如图 3 所示。

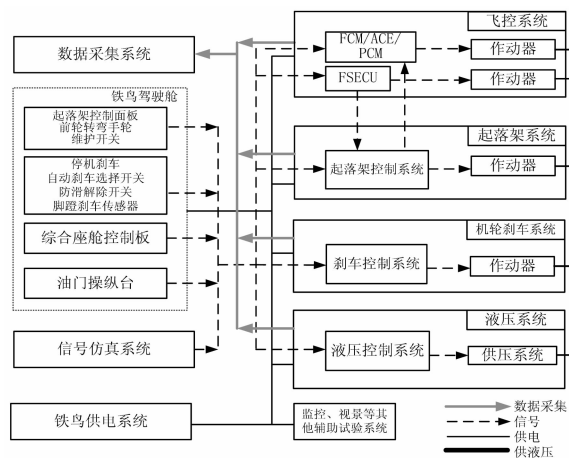


图 3 铁鸟综合试验台

铁鸟综合试验台架构主要安装有主飞控系统、高升力系统、液压系统、起落架系统和刹车系统 LRU (Line Replaceable Unit, 简称 LRU) 试验件、结构试验件、管路试验件以及电缆试验件,除了受客观原因所做的必要等效或简化外,试验台构型应与真实飞机构想完全相同<sup>[8-9]</sup>。

为了试验方便,铁鸟综合试验台建设有独立的模拟驾驶舱,并且通过视景仿真系统模拟更加直观反映试验时飞机的飞行状态。此外,为了保证试验安全,平台还有视频监控系统。

#### 2.3.3 航电综合试验台

航电综合试验台主要用于支持航电各子系统的原理仿真验证,既可用于前期的概念设计验证,也可用于后期各子系统功能及性能的符合性验证。

航电综合试验台架构如图 4 所示,主要包括测试系统、数据管理系统、非航电系统仿真试验台<sup>[10]</sup>和航电相关系统试验模块。航电相关系统试验模块包括:通信系统试验模块、指示/飞行数据记录系统试验模块、导航/监视系统试验模块、机载维护系统试验模块、自动飞行系统试验模块以及其他与航电系统有数据交互的系统仿真模块。

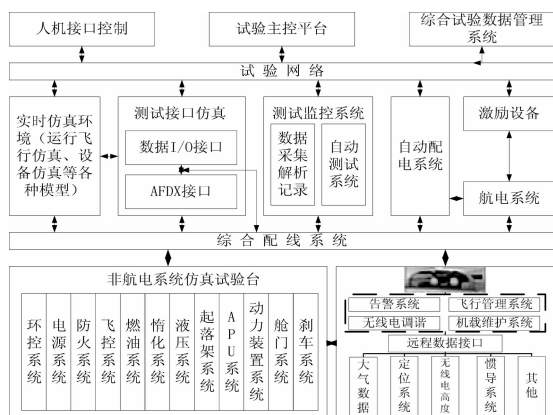


图 4 航电综合试验台

### 2.3.4 电源综合试验台

电源综合试验台主要验证供电系统的供电性能、容错能力和控制功能,除此之外,还要验证配电系统的逻辑原理、配电原理、负载特性、接口与功能,并对电源系统处于故障状态下对飞机的影响进行评估。

电源综合试验平台如图 5 所示,主要由试验控制系统、供电系统、配电系统、模拟负载、测试系统和半物理仿真系统等组成。

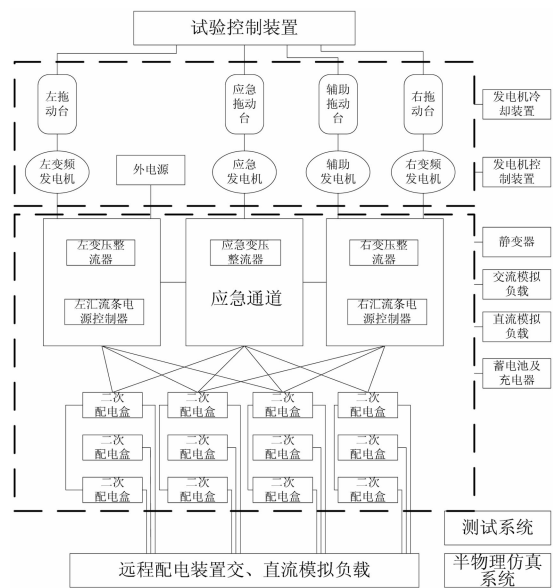


图 5 电源综合试验台

为了验证以上试验需求,除主发动机的动力源采用电力拖动系统和部分用电设备采用变频模拟负载外,组成电气系统的部件都应是与装机产品相同的定型产品试验件,馈电线和控制线的规格、长度、

线束组合以及盘箱盒等都与飞机设计情况一致<sup>[11-12]</sup>。辅助发电机的动力源采用真实辅助动力装置驱动,并采用航电及仿真系统支持电气系统的验证试验,电气系统的布局与机载状态保持一致。以确保实验室驱动装置与实际驱动装置特性之间差异不超出允许范围,以避免因差异造成对系统性能的影响。

### 2.3.5 其他试验台

除了集成到上述平台的试验设备外,还有一些单独的试验设备如三轴转台、总静压模拟器、加载系统等一并对全机集成验证试验进行支持。对于一些无法方便集成到上述试验台的系统,可以单独规划单系统试验台进行系统验证。

### 3 某型号全机级试验集成方案

以某型民机为例,在进行飞机级集成验证试验时,不同的综合试验平台应能够通过互联系统实现试验网络的互联互通,主要包括不同平台设备之间、真实设备与虚拟设备之间的信号交互。

### 3.1 集成验证试验架构

全机级集成验证试验架构如图 6 所示。

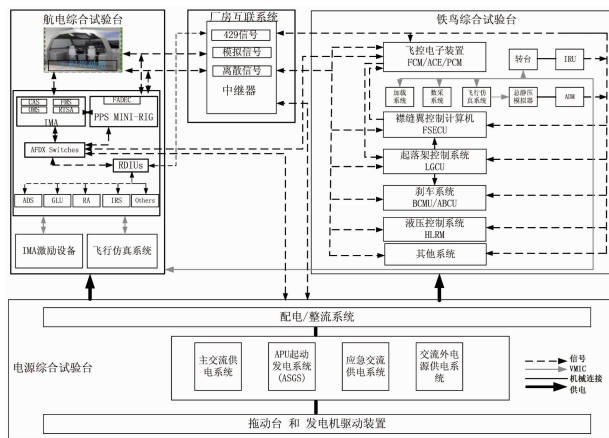


图6 飞机级集成验证试验架构

1) 航电综合试验台提供工程驾驶舱、真实的航空电子系统、告警系统、显示系统等, 外部环境的大气数据、位置信息、地面塔台及卫星发射的无线电波及视景信息由相关的仿真试验台提供;

2)铁鸟综合试验台提供真实的主飞控、高升力、液压、起落架系统,提供飞行仿真系统、数据采集系统、舵面加载系统、物理效应激励设备和部分飞机系统信号仿真设备;

3) 电源综合试验台为铁鸟综合试验台及航电

综合试验台的试验件及各用电设备供电,此外,还通过航电网络与其他系统进行信号交联;

4) 厂房互联系统提供各种信号的传输和中继。

### 3.2 试验件互联

试验件互联系统包括信号互联和强电互联。

基于“分布式”布局的航电综合试验台、铁鸟综合试验台和电源综合试验台之间的距离较远,因此,信号会因为远距离传输而出现衰减和失真情况。各试验台之间传输的信号类型主要包括 ARINC429 信号、ARINC664 信号、离散量信号、模拟量信号。对于离散量信号和模拟量信号而言,过长的距离会导致其衰减,因此交联时必须增加中继;对于 ARINC429 信号、ARINC664 信号来说,过长的距离会导致其波形失真,因此交联时必须增加中继<sup>[13]</sup>。针对这种情况,可以利用“电光-光交换机-光电”转换技术,实现电气信息的远距离和无损传输,实现多试验平台的物理接口互联互通。

为了尽可能地模拟飞机真实工作环境,在进行飞机级集成验证试验时,电源综合试验台为铁鸟综合试验台和航电综合试验台的试验件及相关用电设备供电。根据 MIL-M-25500B 的要求<sup>[14]</sup>,在试验室试验时,飞机电源系统馈电线和控制线的规格、长度、占空位置、线束组合与支撑方法等都必须保持与飞机设计情况相同。因此在进行飞机级集成验证试验时,需要建设专门的供配电试验电缆,将不同试验平台的真实负载挂接在电源系统综合试验平台上提供真实的供配电环境。

### 3.3 试验设备互联

试验设备互联系统包括不同试验平台间设备的时钟同步,试验数据互联互通,仿真数据的实时交互。

1) 时钟同步系统:利用统一的 GPS 时钟源授时,采用 1588 时钟同步协议,保证各试验台、仿真系统都在同一个时间基准下完成互联和试验;

2) 以太网:通过千兆以太网实现试验数据、文件、视频等的互联互通;

3) 实时光纤反射内存网:基于反射内存的仿真数据互联网络,将飞机模型、发动机模型等仿真数据实时交互,实现模型资源共享,数据优势互补。

### 3.4 试验接地

适航标准和相关的设计规范规定飞机级系统综合试验必须模拟真实的机载设备和电搭接环境,因

此在进行飞机集成验证试验环境规划时,必须充分考虑不同试验平台间的接地问题。对于真实的飞机而言,飞机结构作为一个等电位联结体为飞机系统提供各种信号的系统地参考点,并提供用于抑制电磁干扰和防静电的电搭接点。

飞机级集成验证试验主要需要做好两大类电气装置的接地:试验设备接地和飞机系统试验件接地。利用接地铜汇流条将铁鸟综合试验台、航电综合试验台、电源综合试验台连接成一个整体,作为全机级集成验证试验环境下的等电位体。等电位联结体为飞机各系统试验件及试验设备提供低阻抗回路,并为测试信号和电搭接提供良好的基准电位参考点。飞机电缆馈电线的中性线(N线)和负线、飞机电缆信号线中的 N 线和负线、飞机电缆中的屏蔽线的屏蔽层搭接线、飞机试验件外壳、信号测试和加载系统电缆中的数据采集信号和输入的飞机电源 N 线和负线均应按有关图纸和规范的规定接入等电位体<sup>[15]</sup>。

### 3.5 试验开展

基于以上集成方案及平台进行了以下试验:

(1) 作动器等试验件的性能验证;(2) 飞控、液压、起落架、刹车、电源、航电等系统的功能与性能验证;(3) 航电与非航电 Rig、航电与铁鸟、航电与电源、铁鸟与电源等不同系统与平台的交联试验;(4) 首飞飞行剖面模拟、300/450 m 航线起落以及特殊场景等全机级验证试验。以上试验均取得了良好的试验结果。

## 4 结论

在充分分析全机集成验证试验需求的基础上,借鉴了国外飞机系统集成验证经验,遵循试验平台规划原则,提出了铁鸟综合试验台、航电综合试验台和电源综合试验台的建设方案。以某型民机为例,通过厂房互联系统将不同试验台连接起来组成了全机集成验证试验平台,进行了相关试验,提高了集成工作质量,大大提升了全机集成验证试验的有效性和置信度。

### 参考文献:

- [1] LANSDAAL M, LEWIS L, BEZDEK W J. The history of commercial simulators and the Boeing 777 systems integration lab[R]. AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit, Providence, Rhode Island: AIAA, 2004.

- [2] CHAS D. Terra firma testing (B787) [J]. Challenge a Boeing Engineering, Operations & Technology, 2006:40-41.
- [3] MARK C. Flight airworthiness support technology (A350) [Z]. Airbus, Special edition, 2013(7):2-3.
- [4] 谢殿煌,许光磊. 大型民用飞机全机系统地面综合验证试验平台研究[J]. 航空科学技术, 2015,26(8):38-42.
- [5] 李学红,王建波,李冬玲,等. 大学实验室建设的原则[J]. 实验室研究与探索, 2008,27(8):136-137,146.
- [6] 丁立冬. 民用飞机机上地面验证试验研究[J]. 航空标准化与质量, 2013,256(03):27-29.
- [7] 赵红军. 现代飞机航电系统集成验证方法研究[C]//第五届中国航空学会青年科技论坛论文集. 南昌:中国航空学会, 2012:243-248.
- [8] 陈烨. 铁鸟测控系统关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2014.
- [9] 李敬,张伟. 论工程模拟器与铁鸟试验台在飞机研制中的应用[J]. 黑龙江科技信息,2014(33):171,206.
- [10] 周德新,彭妮娜,马腾达. 航电仿真系统集成验证平台设计方法的研究[J]. 自动化与仪表,2015,30(3):1-5.
- [11] 于新红. 飞机电源系统建模仿真及实验平台研制[D]. 南昌:南昌航空大学,2015.
- [12] 王亚晓. 飞机电源地面试验测试系统的设计与实现[D]. 西安:西北工业大学,2004.
- [13] 郭晓燕. 异地综合试验互联网络技术研究[J]. 电子科技,2016,29(7):147-150,155.
- [14] Mockup Testing, Electric System, Piloted Aircraft And Guided Missile, General Requirements For: MIL-M-25500B [S]. USA, 1995.
- [15] 邵惠明. 飞机系统综合试验接地设计与应用[J]. 民用飞机设计与研究,2007(2):35-41.

#### 作者简介

朱川 男,硕士,助理工程师。主要研究方向:振动控制、民用飞机综合验证和设计研究。E-mail:zhuchuan@comac.cc

徐德胜 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机综合验证和设计研究。E-mail:xudesheng@comac.cc

谢殿煌 男,博士,研究员。主要研究方向:民用飞机综合验证和设计研究。E-mail:xiedianhuang@comac.cc

郭晓燕 女,硕士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机综合验证和设计研究。E-mail:guoxiaoyan@comac.cc