

# 虚拟试飞关键技术及应用研究

沈 琦<sup>1</sup> 肖 刚<sup>1\*</sup> 鲁岱晓<sup>2</sup> 田 蓓<sup>1</sup>

(1. 上海交通大学, 上海 200240; 2. 上海飞机设计研究院, 上海 201210)

**摘 要:** 飞行试验是民机产业链的关键环节, 试飞周期较长会导致飞机交付时间延迟、企业信誉损失、资金无法及时回笼等问题, 因此中国民机飞行试验在经济性、安全性等方面还有较大提升空间。虚拟试飞指试飞环节中含有一个或多个采用了仿真手段的试飞技术。借助虚拟试飞技术可以构建“预测-试验-比较”迭代式的试飞新模式, 提前开展试飞结果预测和试飞风险评估, 保障安全, 提高质量, 降低成本。界定了虚拟试飞概念, 选取了虚拟试飞中较为典型的地面试飞与空地一体试飞, 阐释了其技术概念、讨论了其应用范围、说明了其实现原理、梳理了其应用现状, 并针对国内空地一体试飞实际应用较少的情况, 提出了一套用于评估在实际飞行试验中引入空地一体试飞平台可行性的装备论证方案。

**关键词:** 飞行试验; 虚拟试飞; 空地一体试飞; 装备论证

中图分类号: V217

文献标识码: A

OSID:



## 1 虚拟试飞概念

虚拟试飞(Virtual Flight Test, 简称 VFT)的概念在 1995 年由 Ratliff 等人首次提出<sup>[1-2]</sup>。为了使地面测试设施和飞行器飞行实验活动在设计阶段就参与进飞行器的生命周期, 从而削减实验成本, 提升设计效率, 美国阿诺德工程发展中心(Anold Engineering Development Center, 简称 AEDC)的 Ratliff 等人将现场或场外的风洞等多种地面设施进行连接, 从而对多个子系统整合形成的飞行器复杂整体系统进行测试, 实现了基于风洞的虚拟试飞。

在该阶段, 他们将 VFT 定义为: 运行于模拟飞行场景下, 基于包括地面测试设施、指令单元、控制单元、战场调度单元等设施在内的现场/场外测试与评估(Test and Evaluation, 简称 T&E)设施间的闭环连接, 同时测试评估各子系统运行情况, 在试飞前确认、验证、认证飞行系统运行情况的粗略模拟手段<sup>[1-2]</sup>。

在之后的发展过程中, 飞行模拟、空地一体化试飞、数字试飞等概念随着计算机技术的演进不断被

提出, 虚拟试飞这一概念指涉的范围开始逐渐扩大, 同时也在逐渐模糊。国防科技大学的 HUANG Min 认为 VFT 应当特指基于风洞的虚拟试飞, 而空地一体化虚拟试飞应当使用飞行模拟(Flight Simulation)指代<sup>[3]</sup>。南京航空航天大学的顾宏斌认为, 分析虚拟试飞概念, 应当对飞行过程中所涉及的人员、飞行器、环境是真实的还是采用了数字仿真等等效手段进行讨论。凡是其中含有一个或多个采用了仿真手段的“虚”环节的, 即可称为虚拟试飞。而在虚拟试飞中间, 依照不同的“虚”环节, 又可以分为几大子类, 如表 1 所示。

表 1 虚拟试飞分类

序号	试飞类别	人	机	环	实时性
1	地面试飞	实	实	虚	实时
2	空地一体	实	虚	实	实时
3	飞行模拟	实	虚	虚	实时
4	数字试飞	虚	虚	虚	可非实时

上述虚拟试飞手段与传统的实机试飞相比, 有以下几点不同:

\* 通信作者. E-mail: xiaogang@sjtu.edu.cn

引用格式: 沈琦, 肖刚, 鲁岱晓, 等. 虚拟试飞关键技术及应用研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2021(4):9-14. SHEN Y, XIAO G, LU D X, et al. Critical virtual flight test technology and application research[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2021(4):9-14(in Chinese).

### 1) 可靠性

实机试飞几乎能够完全模拟出飞行器投入使用后真实运行的情况,逼真度高,试飞得出的结果、结论可靠性强,也是目前法定的验证手段。

虚拟试飞结果的可靠性需要视建模数据、模型方法等综合判断。目前虚拟试飞的模型精确度尚未发展到足以取代或部分取代实机试飞的程度,中国的适航条款也尚不允许使用虚拟试飞技术取得的结果替代实机试飞工作。

### 2) 经济性

虚拟试飞成本低廉,模型在完成建立后,其维护成本、运行成本极低。

实机试飞技术难度大,飞行器运行过程中需要消耗燃油,试飞任务之间需要对试飞驾机进行维护、改装,都会产生巨大成本。

### 3) 安全性

实机试飞当中,难以进行故障状态试飞,试飞危险科目时需要承担极大风险。一些具有极高危险性,或将会对飞行器造成重大损伤的科目,如双发失效、火灾等,无法在实机试飞中进行。在试飞较危险科目时,一旦发生意外,也将造成巨大的人员损失和经济损失。实机试飞中,一旦可能出现危险情况,必须马上改出,无法继续完成试飞任务。

进行虚拟试飞时,对高危险性科目限制较少,尤其是进行虚拟程度较高的飞行模拟或数字试飞时,在此方面几乎不存在限制。

### 4) 环境依赖度

在进行实机试飞时,一方面,部分科目对气候环境有特殊要求,如要求大侧风、高寒、高湿、高热等等,因而对外部气候环境高度依赖。另一方面,在执行一般科目时,外部的气候环境不可能保持处处均匀稳定,因而有可能在数据分析时因为外部环境影响而引入无关变量,给数据分析造成困难。

而在虚拟试飞中,外部环境是可以调节的参数,因此既不存在需要等待某种气候现象出现的情况,也不存在需要排除外部环境引入的无关变量的情况,环境依赖度低。

### 5) 反馈速度

实机试飞一般发生在产品生命周期中靠后的环节,对设计环节的反馈周期长,影响研发效率。

虚拟试飞可以参与从需求分析、方案论证、设

计、试飞直至训练使用的全生命周期,试验周期短,反馈速度快,可以提升研发效率,允许设计人员在项目初期以较少的时间和经济代价对设计方案进行优化。

## 2 地面试飞

### 2.1 概念界定

在虚拟试飞过程中不对飞行员和飞行器进行模拟,但通过特定手段在地面实验室环境中对飞行过程中的外部环境进行仿真模拟的虚拟试飞手段被定义为地面试飞。1995年,在VFT概念诞生之初,Ratliff的团队<sup>[1-2]</sup>通过在风洞中安置飞行器,研究气体流动及其与模型的相互作用,这种基于风洞的虚拟试飞方法就是地面试飞的一种。

### 2.2 应用范围

在概念诞生之初,美国阿诺德工程发展中心主要使用基于风洞的VFT实现对原始设计概念的确认、验证与评估,评估各子系统的运行情况,在试飞前粗略地对整合后的飞行系统运作情况进行初步模拟,也使用VFT手段进行快速地配平计算。在该阶段VFT不能代替真实的飞行测试,只能起辅助作用<sup>[1-2]</sup>。

2002年Baltes提到,随着虚拟试飞概念的不断成熟,EADS在军机上使用基于风洞的VFT手段进行飞行测试的预演,以检查飞行任务单中的飞行机动项目以及试飞科目顺序是否具备可行性。同时,EADS也使用VFT手段进行飞行包线的拓展和总体武器系统性能的确证。在这一阶段,EADS可以使用VFT代替一定占比的真实试飞任务<sup>[4]</sup>。

### 2.3 实现方法

基于风洞的虚拟试飞实现原理如图1所示<sup>[5]</sup>。一套允许被测试物体在若干自由度上自由运动的设备将需要进行虚拟试飞的硬件悬挂在风洞中,随后控制指令从自动驾驶单元传输到被测试物体上的控制执行机构。控制执行机构被激活后,在被测试物体发生响应时,相应的空气动力学载荷和模型的移动将会被测量。测得信息被传送到数据获取计算机,计算机随后依据测得信息给出飞行器在真实飞行状况下应当给出的响应。该响应信息进一步通过遥测技术被反馈到自动驾驶单元。在控制指令依据新的反馈信息给出更新过后的控制指令后,新的指令被发送到被测试物体上的控制执行机构。

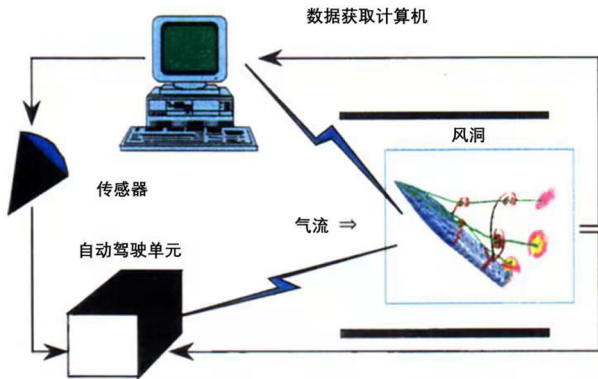


图1 基于风洞的虚拟试飞原理示意图

通过不断迭代这一过程,被测试物体在虚拟意义上飞行在风洞环境当中,从而提供了一套地面模拟结果。基于这一地面模拟结果,可以相应地演示和评估集成后的飞机器结构与飞控系统的工作表现。

### 3 空地一体试飞

#### 3.1 概念界定

米毅等认为空地一体化试飞可以被定义为一种具有“试飞员在环”特征的地面飞行模拟。这一技术能够在空中试飞员执行试飞任务过程中实时采集其对飞机的输入(如侧杆、脚蹬及油门情况等),从而驱动高逼真试飞模型。利用这一技术可允许地面试飞人员获取精确的、同步的飞机模拟仿真结果,并进一步通过数据同步软件实现对飞行模拟仿真结果与空中实机试飞数据的实时监控与对比。通过分析对比监控偏差的幅值,监控人员可以对试飞机组给出当前试验点或下一个试验点的执行建议,甚至在危险情况下叫停试飞任务<sup>[6]</sup>。

根据美国 NASA 的论断,空地一体试飞技术被认为是一种“非常重要的新机试飞工具”。20 世纪 90 年代,NASA 就已在其进行的 X-29 飞机项目当中首次进行了空地一体监控试飞,通过实时对比试飞数据与仿真数据,保障试飞安全。

#### 3.2 应用范围

2013 年,刘华勇在《航空器虚拟试飞技术》<sup>[7]</sup>中总结了虚拟试飞的五类应用领域,分别是:

- (1) 试飞预研课题所需飞行动态仿真数据生成;
- (2) 试飞任务单在环优化验证;
- (3) 试飞定常状态信息定量预测;

(4) 实时试飞动作质量监控;

(5) 实时试飞安全对比监控。

总体而言,空地一体化虚拟试飞的应用范围较基于风洞的虚拟试飞而言更为广泛。

#### 3.3 实现方法

空地一体化虚拟试飞实现原理如图 2<sup>[6]</sup>所示。

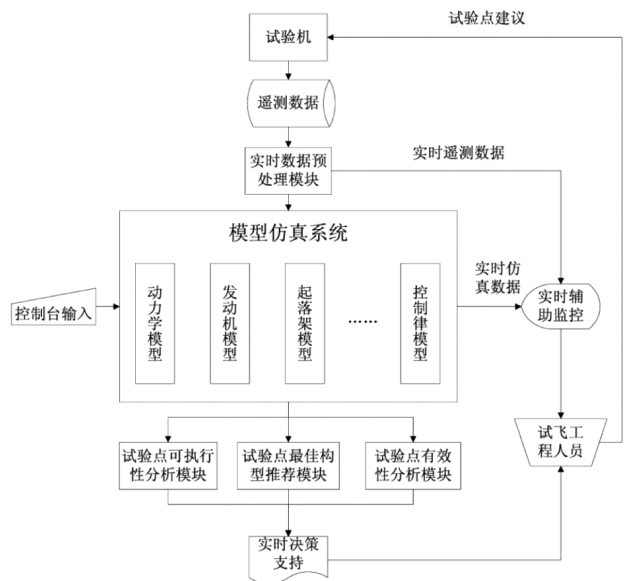


图2 空地一体化虚拟试飞原理示意图

试验机在空中执行试飞任务的同时,通过遥测技术将操纵信息、飞行状态传回地面设施。传回的遥测数据经预处理后传入模型仿真系统。由预先根据实际情况建立的动力学模型、发动机模型等各子模型整合形成的模型仿真系统对传入的实时数据进行快速计算,输出实时仿真数据。

一方面,实时仿真数据经由若干决策支持模块处理后,传递给试飞工程师,提供实时决策能力支持;另一方面,实时遥测数据当中包含的飞行器真实飞行状态与模型仿真系统输出的理论设计状态,即实时仿真数据被一并传入实时辅助监控模块,进行对比分析,以便试飞工程师及时发现飞行器可能遭遇的异常情况。

接收来自决策支持系统和实时辅助监控模块的信息后,试飞工程师结合实际情况、模拟结果、两者间的偏离情况,综合作出判断,并对空中的试飞人员实时给出补点、改出等建议。试飞人员结合地面信息对飞行器下达操纵指令,并且飞行器再次将操纵指令信息和飞行器响应信息传回地面。这一过程不断循环,直到试飞任务结束。

同时,空地一体化虚拟试飞系统也可以脱离试验机,通过向模型仿真系统传入特定的飞行状态信息、指令信息,以单机离线形式给出飞行模拟结论。

## 4 应用现状

近几年,以波音、空客为首的装备制造商为加快适航取证进度,逐步开展了空地一体虚拟试飞的研究,并应用于型号试飞,已完成飞行试验的转型升级<sup>[8]</sup>。空地一体化虚拟试飞技术是当前波音、空客等公司建立“预测-飞行-比较”空地一体化试飞技术体系和构建数字化试飞平台的核心技术,通过空地数据链路传输将空中飞机的实时响应与地面虚拟试飞结果进行同步对比监控,根据对比偏差监控试飞质量、保障试飞安全,从而为企业带来良好的社会效益和经济效益。典型代表包括:波音公司针对其 787 梦想客机所开发的 ZA000 虚拟地面仿真平台; NASA Langley 研究中心开发出的 AirSTAR 实验平台;瑞典萨博集团公司开发的基于实时同步模拟的试飞仿真验证系统等。

国内的虚拟试飞研究,尤其是在民机方面的研究水平相对国际先进水平差距明显,但也已经取得了很多成果,既有针对虚拟试飞理论框架的研究<sup>[9]</sup>,也有基于虚拟试飞的评估方法研究<sup>[10-13]</sup>,一些较为典型的研究成果如下:2008 年,北京航空航天大学李敬磊等阐述了虚拟试飞系统的组成及功能,以短周期运动为例,对虚拟试飞方法和虚拟试飞技术进行了研究<sup>[14]</sup>;2012 年,中国飞行试验研究院的王延路等以某型客机适航审定试飞工程为背景,提出了一套适合民机适航审定试飞空地一体化综合监控网络系统解决方案<sup>[15]</sup>;2012 年,中航工业试飞中心设计了飞行试验实时与仿真数据综合监控平台,经过验证完全可以达到设计需求<sup>[16]</sup>;2015 年,成都飞机工业集团有限责任公司飞行试验中心研究了高精度飞行动态仿真数据生成、试飞任务在环优化验证、试飞安全实时对比监控等技术,初步创建了“虚拟试飞”的基本模式<sup>[7]</sup>。

## 5 应用研究

分析虚拟试飞的国内外应用现状可以发现,目前国内空地一体试飞技术以研究为主,辅助实际飞行试验的应用案例较少。对于如何对空地一体试

飞平台进行装备论证,以便后续实际应用空地一体试飞作为飞行试验的辅助手段,本文提出一种方案。

### 5.1 流程概述

空地一体试飞平台实际应用前的装备论证流程,应当包括平台架构分析、业务分析、服务设计、系统架构等四个阶段。各阶段基本实现内容如下:

1) 平台架构分析:在全局视角下,定义典型业务场景;在能力视角下定义业务场景需求的顶层能力。

2) 业务分析:在活动视角下,分析体系业务流程,梳理实现顶层能力所需活动。

3) 服务设计:在服务视角下,分析具体活动由哪些功能来实现。

4) 系统架构:在系统视角下,梳理具体节点功能由哪些系统来实现。

### 5.2 平台架构分析

明确空地一体试飞平台应用于哪些运行场景,需要满足运行场景中何种应用需求,需要具备何种能力,将业务场景作为需求的源头进行科学分析,以确保空地一体试飞平台的论证工作始终保持正确的方向;并且针对试飞任务中产生的实际需求,对使命任务进行分解,为全面进行系统设计和系统论证提供支持。

### 5.3 业务分析

业务流程分析从运行层面考虑空地一体试飞平台运行过程中不同业务执行单位如何配合以完成相应任务,最终达成运行使命需求。在此阶段主要分析运行过程中业务执行单位间的关联关系以及整个业务流程。通过业务使命/任务分解,确定相应的业务执行单位;确定业务执行单位参与的运行任务,然后进行运行活动分析,在此过程中应尽可能详细地考虑运行过程中的各种不确定因素。然后逐条分析运行规则,确认业务执行单位应具备的状态以及运行活动。

### 5.4 服务设计

在完成业务流程分析和建模后,参与空地一体试飞平台架构的业务执行单位尚不清楚如何划分具体的执行系统,以使用空地一体试飞平台辅助完成试飞任务。服务行为分析的主要内容是针对空地一体试飞平台架构中的业务执行单位进行分析,定义服务节点和服务接口,将服务接口与业务接口实现

连接,然后进行服务功能分析,在此过程中应尽可能详细地考虑服务执行过程中的各种不确定因素。然后逐条分析执行规则,确认服务节点应具备的状态以及执行活动。通过服务行为的分析,明确空地一体试飞平台架构中的业务执行单位可划分成哪些具体的执行系统。

### 5.5 系统架构

系统行为分析的主要内容是针对空地一体试飞需求,设计空地一体试飞平台典型运行场景,以及空地一体试飞任务具体执行系统的体系架构。首先进行的是执行系统方案选择,确定可参与的执行系统,接下来进行空地一体试飞流程分析,对每个空地一体试飞能力分配相应的执行系统功能。对执行系统的接口、系统活动、系统时序、系统状态转换进行分析。

## 6 结论

本文对虚拟试飞概念的提出、演进过程进行了研究,对现况下虚拟试飞这一技术概念应当包含的具体内容进行了讨论,认为凡是试飞环节中含有一个或多个采用了仿真手段的环节的,即可被称为虚拟试飞的定义是合理的。本文进一步研究了地面试飞和空地一体试飞这两种典型的虚拟试飞形式,分析了其具体技术概念、适用范围、实现原理、应用现状等,并针对国内空地一体试飞实际应用较少的情况,提出了一套用于评估在实际飞行试验中引入空地一体试飞平台可行性的装备论证方案。在下一阶段的研究中,可以依照此方案对空地一体试飞平台在中国民机行业当前发展情况下,对飞行试验工作的适用性进行详细论证。

致谢:

特别感谢上海航多航空技术有限公司的朱亮博士在成稿过程中提供的指导帮助。

### 参考文献:

- [ 1 ] RATLIFF C, MARQUART E. An assessment of a potential test technique-Virtual Flight Testing (VFT)[C]. USA:Flight Simulation Technologies Conference,2013.
- [ 2 ] MANNING, E T, RATLIFF C, MARQUART E. Bridging the gap between ground and flight tests-Virtual flight testing (VFT)[C]. USA: Aircraft Engineering, Technology, & Operations Congress, 2013.
- [ 3 ] HUANG M, WANG Z W. A review of wind tunnel

based virtual flight testing techniques for evaluation of flight control systems[J]. International journal of aerospace engineering, 2015(1):1-22.

- [ 4 ] BALTES E, SPITZ W. Virtual flight test as advanced step in aircraft development[C]. USA:AIAA's Aircraft Technology, Integration, and Operations (ATIO) 2002 Technical Forum,2002.
- [ 5 ] LAWRENCE F, MILLS B. Status update of the AEDC wind tunnel virtual flight testing development program [C] USA:40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit,2002.
- [ 6 ] 米毅,连光册. 空地一体化技术在IFTD试飞中的应用[J]. 民用飞机设计与研究, 2020(4): 92-96.
- [ 7 ] 刘华勇. 航空器虚拟试飞技术[C]. 洛阳:第二届中国航空学会青年科技论坛文集,2006:678-682.
- [ 8 ] 钱锟. 波音787的飞行试验[J]. 航空科学技术,2010(5):7-10.
- [ 9 ] GUO L L, ZHU, M H, NIE Bowen, et al. Initial virtual flight test for a dynamically similar aircraft model with control augmentation system [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 30(2):602-610.
- [ 10 ] LIU F, WANF L, TAN X. Digital virtual flight testing and evaluation method for flight characteristics airworthiness compliance of civil aircraft based on HQRM[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2015, 28(1):112-120.
- [ 11 ] 吕晗阳,徐浩军,朱和铨. 一种虚拟试飞验证飞控软件安全性评估方法[J]. 计算机仿真,2017,34(10):45-48,54.
- [ 12 ] 涂章杰,王立新,陈俊平. 基于数字虚拟飞行的民机复飞爬升梯度评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2017,43(12):2530-2538.
- [ 13 ] 刘海良,王立新. 基于数字虚拟飞行的民用飞机纵向地面操稳特性评估[J]. 航空学报,2015,5:1432-1441.
- [ 14 ] 李敬磊,刘丽,贾荣珍. 基于虚拟样机的飞机虚拟试飞系统研究[C]. 呼伦贝尔:中国航空学会控制与应用第十三届学术年会, 2008: 1-5.
- [ 15 ] 王延路,袁炳南,刘语乔. 民机试飞空地一体化综合监控网络系统技术研究 [J]. 现代电子技术, 2012, 35(15):110-112.
- [ 16 ] 任立军,孙艳芳. 飞行试验与飞行模拟一体化平台的研究与实现[J]. 测控技术, 2012, 31(5):95-97.

### 作者简介

沈 琦 男,博士。主要研究方向:数字化试飞与试飞数据

处理。E-mail: Shenyu910014@sjtu.edu.cn

肖刚 男,研究员,博士生导师。主要研究方向:智能信息处理;航空电子综合;民机产业经济。E-mail: xiaogang@sjtu.edu.cn

鲁岱晓 男,研究员,主要研究方向:民用飞机气动设计,民用飞机试飞。E-mail: ludaixiao@comac.cc

田蓓 女,博士。主要研究方向:多目标优化;试飞任务支持与优化。E-mail: tianbei@sjtu.edu.cn

## Critical virtual flight test technology and application research

SHEN Yu<sup>1</sup> XIAO Gang<sup>1\*</sup> LU Daixiao<sup>2</sup> TIAN Bei<sup>1</sup>

- (1. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

**Abstract:** Flight test is a key procedure in the industrial chain of civil aircraft. A long flight test cycle will cause delayed delivery of aircraft, loss of enterprise reputation, and delayed withdrawal of funds. Therefore, China's civil aircraft flight test has a large space for improvement in economy, safety and other aspects. Virtual Flight Test (VFT) refers to the flight test process which contains one or more simulation links. VFT technology can be used to construct a new iterative model of flight test, which can be described as "prediction-test-comparison". This new model can predict flight test results, evaluate task risk in advance, ensure safety, improve quality and reduce cost. This paper defined the concept of VFT. Through selecting ground flight test and air-to-ground integrated flight test as two typical VFT technologies, their technical concepts, application scopes, realization mechanisms, and application statuses were introduced in this paper. In view of the fact that air-to-ground integrated test flight is rarely applied in actual flight tests in China, a set of equipment demonstration scheme is proposed to evaluate the feasibility of introducing an air-to-ground integrated flight test platform in actual flight tests.

**Keywords:** flight test; VFT; air-to-ground integrated flight test; equipment demonstration

---

\* Corresponding author. E-mail: xiaogang@sjtu.edu.cn