

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2020.04.017

空地一体化技术在 IFTD 试飞中的应用

米 毅 连光册*

(中国商飞公司民用飞机试飞中心,上海 201323)

摘 要: 发动机表明符合性试飞科目飞行中推力确定(In-Flight Thrust Determination, 简称 IFTD)试验点多、耗时长、费用高。为提升试飞架次效率和地面监控力度,降低架次成本,基于 FLIGHTLAB 软件开发了面向物理的空地一体化仿真模型系统,并采用卡尔曼滤波和遗传算法对模型输入数据进行了实时处理和动态优选,最后基于 QT 开发了空地对比监控界面在某型号 IFTD 试飞中进行了应用。经验证,所建空地一体化仿真模型能够有效对某型号的发动机运行和动力学响应进行模拟,发动机各项参数的平均误差约为 3%,采用的数据实时处理和动态优选算法能够良好地匹配空地一体化仿真模型系统,使系统有效运行,在 IFTD 试飞中,仅两个架次就为试飞节约燃油约 3 t;本次应用表明,空地一体化技术,在飞行前能够为试验点可达性分析和试验点优选构型分析提供支持,在飞行中为试飞监控减轻负担。

关键词: 空地一体化;物理建模;实时数据处理;仿真对比

中图分类号: V217

文献标识码: A

OSID:



0 引言

现代民机试飞是一项充满风险与挑战性的大型试验工程,依托现代集成化、网络化的测试技术建立起来的地面监控和指挥系统对试飞科目完成的质量以及故障的预警起着至关重要的作用,是确保飞行试验成功的重要保障^[1]。

飞行中推力确定(IFTD)是某型号第一个表明符合性试飞科目,通过在全飞行包线内的不同高度-速度-发动机转速-引气组合上执行,采集飞行状态参数与重改装发动机测试数据,用于验证及校准发动机稳态性能模型即平均飞行试验模型(Average Flight Test Model,简称 AFTM)。由于 IFTD 试飞试验点多、试验精度要求高及部分试验点包线未打开,使得在试飞过程中对地面监控人员在试验点有效性判断、提高单架次试验点完成效率及确保试飞安全三个方面提出了更高的要求。当前试飞中采用多站集中监控模式,通过 PCM 和数个遥测站的专线将多达 6 700 个不同采样率的试飞参数和 8 Mbps 高清

数字视频传递至指挥监控大厅,并通过实时监控系统的各个画面展现出来^[11]。但监控参数多使得监控人员面临注意力分散,难以第一时间发现异常的问题,而 IFTD 对单架次试飞效率的高要求,使得地面监控人员在监控异常的同时,还要对试验点的操作提出更多的决策意见,这无疑加重了地面监控人员的负担。

2011 年 4 月 2 日,湾流宇航公司(Gulfstream Aerospace Corporation)一架机身编号为 N652GD 的 G650 试验机从位于美国新墨西哥州的罗斯韦国际航空中心起飞不久后坠毁,造成机上 2 名试飞员、2 名试飞工程师死亡。根据美国国家运输安全委员会(National Transportation Safety Board,简称 NTSB)调查报告显示:引起此次事故的主要原因是飞机驾驶杆抖振器和飞机失速角的设置问题。湾流公司在事故发生后,针对当飞机处于地效作用下有可能出现失速的风险,提出了多种改进措施,从技术层面来讲,主要包括两个方面:一是在试飞前进行更精准的地效失速预测,另一个是在试飞过程中进行更为严格的监

* 通信作者。E-mail: lianguangce@comac.cc

引用格式: 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. MI Y, LIAN G C. Application of air-to-ground integration technology in IFTD flight test[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2020(4):92-96(in Chinese).

控,即利用空地一体化技术实时监控关键参数^[2,3]。

美国 NASA 认为空地一体化试飞技术是“非常重要的新机试飞工具”。早在上世纪九十年代, NASA 就在 X-29 飞机项目^[4]中首次实现空地一体化监控,通过将试飞数据与仿真数据实时进行对比,监控试飞安全。波音公司在波音 787 梦想客机项目中开发出代号为 ZA000 虚拟地面研究平台,在真实飞机试飞过程中实现对试飞数据的实时接收以及任务执行过程的实时监控,大大加快了适航取证进度。

目前,空地一体化试飞技术在国内民机领域仍属于前沿技术,工程应用尚处于起步阶段,与航空发达国家相比存在较大差距。中国飞行试验研究院^[5]将仿真模拟设备与实时对比监控平台通过以太网连接初步实现了真实飞行数据和仿真模拟数据综合监控。成都飞机工业有限责任公司^[6]研究了试飞动作质量实时监控、试飞安全实时对比监控等关键技术,通过对飞行动态仿真、基于 A/GDAS 及以太网的实时通信与接口等软件的开发,初步创建了“空地虚拟试飞”的基本模式。在大型民机飞行试验领域,国内尚未开展空地一体化试飞研究及应用。

本文提出运用空地一体化技术在 IFTD 试飞中进行辅助监控和决策支持,以减轻监控人员负担,提高单架次试飞效率,保障试飞安全。

1 发动机空地一体化系统

如图 1 所示,空地一体化试飞实际上是一种

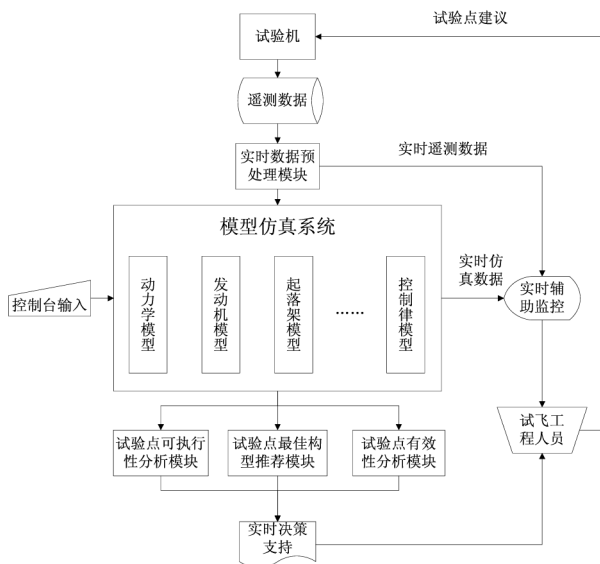


图 1 空地一体化试飞技术原理图

“试飞员在环”的地面飞行模拟,能够在试飞任务执行过程中实时采集试飞员输入(如侧杆、脚踏及油门等)驱动高逼真度的试飞模型。从而可在地面获取精确的飞机同步模拟仿真结果,并通过数据同步软件实现仿真结果与试飞数据的实时对比监控。根据监控结果,监控人员分析对比监控偏差的幅值,给出当前试验点或下一个试验点建议,甚至叫停飞行。

针对 IFTD 科目的试验点均为定转速、定高度、定速度的特性,同时为了验证空地一体化技术在型号试飞现场的可执行性,基于 Flightlab 平台开发了面向物理的发动机模型和动力学模型,形成发动机空地一体化系统的核心;基于当前已建立的遥测数据链路,进行数据处理的二次开发;并在现场设置空地一体化监控席位,进行定制监控界面开发。

1.1 模型建模

1.1.1 发动机建模

在 IFTD 试飞的过程中,根据试验点有效性的判断要求,监控人员需要重点监控发动机的参数为 $N1/N2/EGT/TAT/VBV/PS3$ 等^[9],因此在进行建模时,目的是为了对进气温度、排气温度、低压压气机出口压力、高压压气机出口压力等参数进行仿真,同时需考虑外界温度、高度、飞行员的操纵输入以及其他机载系统的功率提取等对其的影响。据此,结合 IFTD 试飞中的测试参数和监控参数的需求,以 LEAP-1C 的性能盘数据为基础,并参考 CFM 公司提供的发动机资料对发动机的外特性进行仿真模拟,然后再根据前期试飞数据中的一些发动机动态数据,对模型的动态特性进行修正,从而得到一个较完善的发动机模型。发动机模型基本架构如图 2 所示。

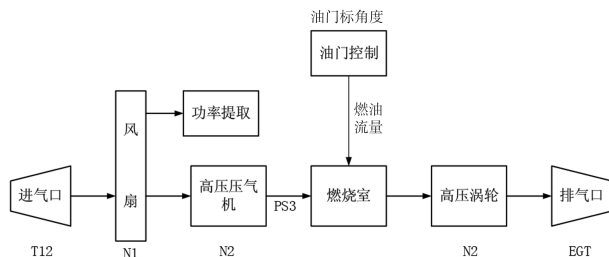


图 2 发动机模型基本架构及主要仿真参数

1.1.2 动力学模型建模

动力学模型则采用基于叶素理论的 Flightlab 软

件进行建模。该软件可模拟环绕机翼不同截面的气流情况,能够在实时模拟过程中根据飞机的不对称运动为飞行员提供局部机翼失速预警。此类警告优于全机翼失速触发式警告,将显著提升试飞安全裕度,降低不对称运动所带来的风险。

1.2 数据实时处理与动态优选

空地一体化的仿真模型系统需要使用试飞遥测数据进行驱动。在试飞过程中,实时数据处理的基本流程是测量信息采集、信号编辑、量纲转换、合理性检择和各种误差修正,最后输出结果^[7]。当前遥测系统能够快速地完成前三个步骤,但在合理性检择和误差修正上仍有不足,为了能够保证数据的有效性,开展数据检择算法开发,并在冗余的信息源中建立动态优选算法,进行数据优选。

采用卡尔曼滤波实现试飞遥测数据的实时处理,提出遥测数据中的野值和高频噪声,并采用遗传算法对滤波器参数进行优化,从而为试飞模型提供高质量的驱动数据^[10]。

经处理后的数据仍有可能存在同个参数,其数据不一致的情况,对同一个参数不同的数据源(一般为 3 个),根据投票结果进行优先度排序,选择优先度高的进行输出,若有多个数据有限度级别相同,则选择通道数最小的数据,若当前选择输出结果的优先度在实时传输过程中出现小于其他信号源的情况,则自动动态切换其他输出,选择其他精度高的结果输出。

1.3 基于 QT 的图形界面开发

针对发动机空地一体化系统,现有的监控界面无法满足仿真数据与遥测数据的同步展示需求,且空地对比监控的显示参数要求不同于现有监控。为此,开展基于 QT 的图形界面开发,作为空地一体化显示界面。

QT 是一款轻量级跨平台开发集成环境(Integrated Development Environment,简称 IDE),有着良好的封装机制、非常高的模块化程度且可重用性好。QT 提供了一种称为 signals/slots(信号槽/信号)的安全类型(class),使各个元件之间的工作系统更加简便,图 3 是空地对比监控界面的设计方案分析图。通过图形界面实现、源文件,然后执行调试的操作,来具体执行 GUI 应用程序的实现。

除了界面 UI 的设计与编码,还建立了基于多线程方式的数据接收流程,通过从 QObject 或其子类



图 3 发动机空地一体化监控界面分析图

(例如 Qwidget)派生的类中选取数据接收控件,当遥测数据与仿真数据接入时,信号就会以 signals 的形式发射(emit)至显示控件 slots 中,通知显示控件进行画布的刷新与重绘。如图 4 所示,是正常运行的显示界面。

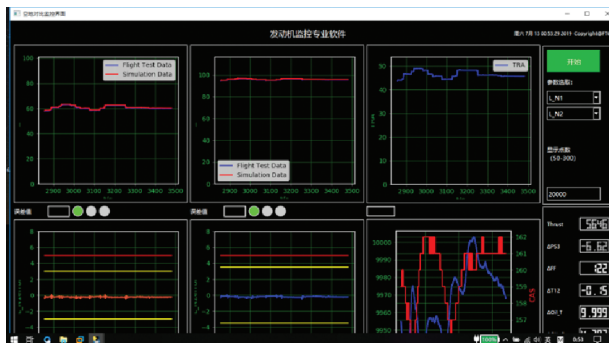


图 4 发动机空地一体化监控界面

2 验证与应用

在发动机空地一体化系统正式应用前,对系统的模型进行验证。运用已获取的某型号大型客机四个架机共计 19 架次的数据对模型的 EGT、PS3、N1 等参数进行了对比验证。结果表明,EGT 的误差范围在 1% 左右,N2 的误差范围在 0.5% 左右,N1 的误差范围在 2.5% 左右,已达到 CCAR-60 部《飞行模拟设备的鉴定和使用规则》中的模拟机客观测试标准要求,D 级训练模拟器在巡航阶段对 N1 和 N2 的精度要不低于 5% 的要求。下表为某型号某架机某架次试验点的主要参数仿真结果与试飞数据

误差。

表1 发动机模型部分参数精度对比表

试验点		EGT/°C	N1/%	N2/%	T12/°C	T3/°C
1	偏差	9.75	1.81	0.55	0.01	19.59
	百分比	1.32%	2.27%	0.54%	0.21%	3.89%
2	偏差	3.32	2.07	0.76	0.28	3.72
	百分比	0.42%	2.57%	0.73%	2.32%	19.90%

通过试飞数据对气动模型进行多轮的修正与校准,模型的逼真度得到进一步提高,对与所选数据或同架次数据均有较高的一致性。图5是采用某架次稳定平飞并在最后带有一定滚转的试飞数据进行部分参数的对比结果示例。

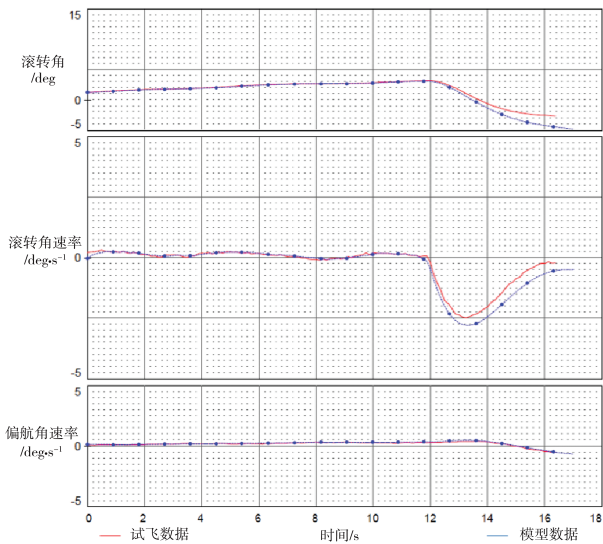


图5 动力学模型验证

自2019年10月,空地一体化技术在试飞现场

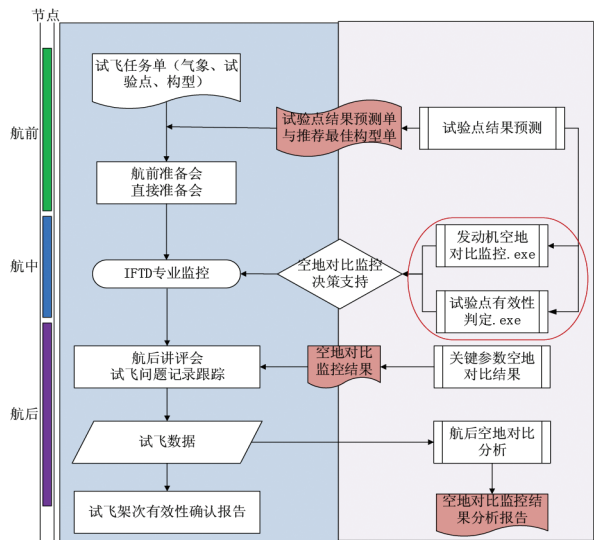


图6 发动机空地一体化现场流程图

进行部署,根据图6中流程进行工程验证和试飞支持工作。在此期间,发动机空地一体化系统共提供26个架次的实时辅助监控,实现“影子伴飞”累计104个小时,提供26个架次的航前试验点预测;在监控期间,为IFTD提供试验点可执行性建议3次,试验点最佳构型建议4次,节省燃油3t,节省了一个架次的飞行。

3 结论

通过在IFTD试飞中的应用,验证了空地一体化技术的原理可行性,目前已在现有基础上为发动机空中起动、发动机特性两个试飞科目提供了发动机功率提取、飘降程序验证等支持。根据现有的支持得出如下结论:

- 1) 空地一体化技术原理可行,且能够在试飞现场实施应用。
- 2) 空地一体化技术可在试飞前提供试验点飞行状态定量预测、试验点执行最佳构型推荐。
- 3) 空地一体化技术能有效降低监控人员负荷,为监控人员提供另一种监控依据。

参考文献:

[1] 严子焜,郭博智,DING Z T. 民用飞机飞行试验任务优化技术研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2014(3):12-16.

[2] National Transportation Safety Board. Crash during experimental test flight, gulfstream aerospace corporation GVI (G650) : N652GD[R]. [S. l. : s. n.], 2011.

[3] O'CALLAGHAN J J. The Gulfstream G650 flight test accident: lessons learned [C]//AIAA Atmospheric Flight Mechanics (AFM) Conference. AIAA Meeting Paper, 2013.

[4] Federal Aviation Administration. 1-g stall speed as the basis for compliance with part 25 of the federal aviation regulations[S]. [S. l. : s. n.], 2002.

[5] 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.

[6] 刘华勇. 航空器虚拟试飞技术[C]//第二届中国航空学会青年科技论坛论文集. 北京: 航空工业出版社, 2006: 694-698.

[7] 李忠武,翟丽丽,李磊. 实时数据处理结果动态选优方法研究[J]. 飞行器测控学报, 2012, 31(05) : 59-62.

[8] GUAN Y L, XU W, ZHANG M Y. Nonlinear modeling of composite wing with application to UAV flight dynam-

- ic analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 138: 106542. 1-106542. 16.
- [9] 任智勇, 邓晓政, 马丁峰. 一种发动机试飞数据快速处理方法[J]. 机械与电子, 2019, 37(1): 11-14.
- [10] 赵旭东. 试飞数据在飞行模拟器上的应用[J]. 系统仿真技术, 2018, 14(4): 236-241, 309.
- [11] 白效贤. 试飞测试技术现状与发展[J]. 测控技术,

2004(10): 1-2; 5.

作者简介

米 毅 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 数字化试飞技术研究。E-mail: miyi@comac.cc

连光册 男, 硕士, 助理工程师。主要研究方向: 空地一体化试飞技术研究。E-mail: lianguangce@comac.cc

Application of air-to-ground integration technology in IFTD flight test

MI Yi LIAN Guangce *

(Flight Test Center of COMAC, Shanghai 201323, China)

Abstract: In Flight Thrust Determination (IFTD) is time-consuming, experimentally expensive and includes numerous test points. In order to improve the efficiency of flight test sorties and ground monitoring, and reduce the cost of sorties, a physical oriented integrated air-ground simulation model system was developed based on FLIGHT-LAB software. Kalman filter and genetic algorithm were used to process and optimize the input data of the model. Monitoring interface of air-ground integration was developed based on QT which was applied in IFTD flight test of a certain type of aircraft. The result indicates that the integrated air-ground model can effectively simulate the engine operation and dynamic response of a certain type of aircraft, the average error of engine parameters is around 3%. The real-time data processing and dynamic optimization algorithm can well match the integrated air-ground model and ensure the operation of the system effectively. During a certain type of aircraft's IFTD flight test, 3 tons of fuel was saved within two sorties by applying the model. This application shows that the air ground integration technology can provide support for test point accessibility analysis and test point optimization configuration analysis before flight, and reduce the burden of flight test monitoring in flight. This application shows that air-ground integration technology can provide support for test point accessibility analysis, test point optimization configuration analysis and reduce the burden of flight test monitoring in flight.

Keywords: air-to-ground integration; physical modeling; real time data processing; simulation comparison

* Corresponding author. E-mail: lianguangce@comac.cc