

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2019.02.016

发动机空中起动包线扩展试飞组织与实施

Organization and Implementation of Engine Air Start Envelope Extension Flight Test

吕碧江¹ 殷湘涛¹ 肖刚² 刘艺博² / LYU Bijiang¹ YIN Xiangtao¹ XIAO Gang² LIU Yibo²

(1. 中国商飞民用飞机试飞中心, 上海 200232; 2. 上海交通大学航空航天学院, 上海 200240)

(1. COMAC Flight Test Center, Shanghai 200232, China;

2. Shanghai Jiao Tong University School of Aeronautics and Astronautics, Shanghai 200240, China)

摘 要:

适航条款要求装配两台发动机的飞机,在单发失效后在一定的高度、速度和发动机状态下具备重新启动的能力。为表明对适航条款的符合性,飞机主制造商必须开展发动机空中起动包线扩展试飞(简称空起扩包试飞)试验。而发动机空起扩包试飞是一项风险高、难度大,影响因素众多而复杂的试飞任务。以某型飞机的空起扩包试飞为参考,从试飞科目分析、试飞准备、试飞组织与实施、试飞试验结果等方面总结了相关试飞经验,分析了试飞员、指挥员、试飞工程师、课题和设计人员在空地决策机制方面的专业知识和角色定位。及时把握飞机的状态,并判读试验点的有效性,是试验高效和安全开展的有力保障。该空起扩包试飞的成功组织与实施为后续试飞活动及未来其他型号的类似试验奠定了良好的基础,提供了一定的技术储备。

关键词: 发动机空起扩包; 飞行试验; 适航条款; 试飞组织与实施

中图分类号: V23

文献标识码: A

OSID:



[Abstract] For the aircraft with two engines, the airworthiness regulation requires that the aircraft should have the capability to restart the engine at a suitable altitude, airspeed and engine condition when one engine failed. In order to show compliance to the regulations, the manufacture should conduct engine air start envelope extension flight test. The engine air start envelope flight test is a high risk, tough and many complex factors involved flight test. Taking a reference to some aircraft, this paper expounds flight test content analysis, flight test preparation, flight test organization and implementation, flight test results and so on, and summarizes the flight test experience in a systematic manner. Especially with regard to the air-ground decision-making mechanism, this paper summarizes and analyzes the specialized knowledge and role definition of test pilot, flight commander, flight test engineer, discipline engineer, and design engineer. It was a powerful guarantee for the test that all the participants monitor the aircraft status in real time and interpret the validity of the test sites. This successful organization and implementation of engine air start envelope extension flight test could provide an important reference to other type of aircraft.

[Keywords] engine air start envelope extension; flight test; airworthiness regulation; flight test organization and implementation

0 引言

发动机是影响民用飞机安全最关键的部件,对发动机各方面功能和性能的检查,是适航条款的重要内容。对于装配两台发动机的飞机,存在空中飞

行时单发失效的情况,适航条款要求在单发失效后在一定的高度、速度和发动机状态下具备重新启动的能力。由于气压高度、飞行速度、发动机涡轮级间温度等参数对发动机的起动性能存在影响,因此需要通过飞行试验逐步探索发动机空中起动的包线。

由于发动机空中起动包线扩展试飞(以下简称空起扩包试飞)需在一定的高度和速度以及发动机状态下人为关闭一台发动机并验证其重新启动的能力,其试验本身的风险较高,需要考虑的因素众多。本文以某型现代民用喷气式客机的空起扩包试飞为参考,从试飞内容、试飞准备、试飞组织与实施、试飞试验结果等方面进行阐述,以期为民机发动机空中起动包线扩展试飞提供一套系统的解决方案。

1 试飞科目分析

在进行空起扩包试飞任务准备前,应先对试飞科目从内容与安排、机组操作程序、试飞风险、机场空域等方面进行分析,以便从整体上把握空起扩包试飞任务的需求,为试飞科目的前期准备奠定基础。

1.1 试验内容与安排

为了检验某型飞机在不同架机发动机空中起动能力的可重复性,也为了扩大该型号空起包线,在新的审定试飞执行之前,安排了相关研发试飞。

该型飞机发动机空中起动包线扩展研发试飞包括冷浸透后的起动和 $30\text{ }^{\circ}\text{C}\leq\text{ITT}\leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的起动, $20\text{ }000\text{ ft}\leq\text{试验点高度}\leq 25\text{ }000\text{ ft}$ ($1\text{ ft}\approx 0.30\text{ m}$),试验速度选取为 190 kn 、 250 kn 和 340 kn ,左右两台发动机均需进行试验,综合以上试验条件,约需6架次/18小时完成试飞任务。

针对任一试验点,若起动成功,则在相同条件下,每次增加 $1\text{ }000\text{ ft}$ 重复试验,直至试验高度升至 $25\text{ }000\text{ ft}$ 或不能成功起动,则不再增加试验高度重复试验;若起动不成功,则在相同条件下,每次降低 $1\text{ }000\text{ ft}$ 进行试验,直至试验高度降至 $20\text{ }000\text{ ft}$ 或能起动成功,则不再降低试验高度重复试验。

为安全、高效完成本次试飞,试验点执行顺序及架次按如下原则安排:

1)从操作较为容易的试验点开始,逐渐过渡到操作较为困难的试验点,先执行速度为 190 kn 的试验点,然后执行速度为 250 kn 、 340 kn 的试验点;

2)从安全角度考虑,每个架次只针对一台发动机进行起动试验;

3)速度较大的试验点安排在消耗一定燃油、飞机重量减轻后执行;

4)由于申请空域时, $8\text{ }000\text{ m}$ 以上空域申请较 $8\text{ }000\text{ m}$ 以下空域申请的难度更大,因此在架次任务安排时,尽量将 $8\text{ }000\text{ m}$ 以上高度试验点和 $8\text{ }000\text{ m}$

以下高度试验点分开安排。

1.2 机组操作程序

根据试飞内容的要求,为指导试飞机组安全、合理、高效地完成试验,试飞工程专业人员制定了详细的试飞机组操作程序如下^[1]:

1)选择试验点要求高度以上的高度进行平飞;

2)接通 APU GEN;

3)断开点火器断路器;

4)关闭试验发动机引气,确认交输引气活门处于 AUTO 位;

5)收试验发动机油门杆至 IDLE 位,3min 后按正常停车程序关闭试验发动机;

6)待 ITT (Interstage Turbine Temperature, 涡轮级间温度)接近试验点要求时,飞机以试验点要求高度、速度为目标下降增速;

7)待 ITT、飞机高度、速度接近试验点要求时,关闭非试验发动机引气,接通 APU 引气;

8)在 ITT、飞机高度、速度满足试验点要求时,按 APU 引气辅助起动程序起动试验发动机;

9)试验发动机成功后,关闭 APU 供气,恢复双发供气。

1.3 风险分析

为将飞行试验的风险控制在可接受范围内并做好充分的保障和准备工作,在进行试飞前必须进行风险分析评估。通过风险分析,该试验主要有两个大的风险源。第一是试验发动机起动失败,第二是试验过程中,试验发动机按步骤停车,同时非试验发动机意外失效,造成双发失效。

在第一种情况时,单发飞行,安全裕度显著降低,较大地增加机组负担。风险降低措施如下:

1)试验过程中监控发动机排气温度 (ITT),如达到红线值,则终止起动;

2)试验前对起动机进行维护,包括起动机滑油金属屑探测器检查、起动机滑油勤务维护;

3)每个架次仅对一台发动机进行试验;

4)需地面监控和机上监控,且在起动过程中重点监控 N2,以判定起动机处于第几个循环,如进行3个循环发动机还未成功起动,则及时按压 STOP 按钮,中止起动;

5)更换点火适配器和升级 FADEC 后,须进行地面开车,监控发动机振动、ITT 参数,以确认更换后的点火器能正常工作、发动机能正常起动,且工作正常;

6) 试飞员在模拟机和飞机上进行演练,熟悉发动机空起程序及单发操作程序。

7) 发生该故障时,机组终止试验,按照单发飞行操作程序返场。

第二种情况时,双发失效,飞机失去动力,造成灾难性后果。风险降低措施如下:

1) 需地面监控和机上监控,且在试验过程中关注非试验发动机状态参数,如在试验发动机关车前出现异常,则不进行试验发动机关车操作;

2) 试验过程中,将非试验发动机点火起动开关置于 CONT 位;

3) 试飞前计算飘降距离,选择合适的试飞空域与机组合;

4) 试飞员在模拟机和飞机上进行演练,以熟悉无动力操作程序;

5) 发生该故障时,机组终止试验,恢复双点火器,按照双发失效操作程序返场。

1.4 机场空域分析

由于试飞资源有限,本次空起扩包试飞已经选定了 A 机场和对应空域。空起扩包试飞对于试飞空域要求较高,主要需要考虑双发失效的情况下飞机能否飘降回试飞机场,因此在进行空起扩包试飞之前,对 A 机场和空域能否满足空起扩包试飞进行了详细分析和评估。

由于本次试验存在双发失效的风险,空域的选择需满足飞机空滑着陆的要求。本次最低试验点高度为 20 000 ft,高度允差为 ± 300 ft,为保留一定裕度,按照 19 000 ft 进行计算。飞机重量分别考虑加油 10 t、加油 8 t 及仅剩备用油,由于飞机爬升至试验高度需消耗一定量燃油,因此加油 10 t 和加油 8 t 返回总重分别按照 45 t 和 43 t 进行计算。根据性能计算得到的空滑距离结果见表 1:

表 1 19 000 ft 至着陆空滑距离表

序号	重量/t	直线空滑距离/km	180°转弯一次 (20°转弯坡度) 空滑距离/km
1	45	90	82
2	43	90	82
3	38	89	81

根据以上计算结果综合考虑,本次试飞在 A 机场进行,且试飞空域与跑道距离选择如下:

进行速度为 250 kn 和 340 kn 的试验点时,试飞

空域与跑道距离不得超过 90 km,试飞执行空域约 90 km $\times$ 80 km;

进行速度为 190 kn 的试验点时,试飞空域与跑道距离不得超过 80 km,试飞执行空域约 80 km $\times$ 70 km。

A 机场空域以及 90 km 和 80 km 空域如图 1 所示。



图 1 A 机场及 90km、80km 空域示意图

本次试飞试验点的最高高度为 25 000 ft,但进行速度为 340 kn 的试验点时,单发无法保持平飞,需从试验点高度以上高度采用俯冲的方式达到试验点所需高度、速度,根据该型飞机另一架机试验结果和飞机模拟机演练结果,飞机需从 36 000 ft 的高度进行俯冲。因此,本次试验所需的空域高度为 36 000 ft 及以下高度。

2 试飞准备

在完成试飞科目分析,充分分析清楚试飞任务需求之后,即可进行试飞任务的相关准备工作。主要包括飞行组织准备、飞机本体及工装备件准备、测试系统准备、机组训练、机场和空域协调几方面内容。

2.1 飞行组织准备

飞行试验是一项庞大的系统工程,涉及的专业众多,而空起扩包试飞对于风险把控,空域协调,空地实施监控和通讯等方面有较高要求。为安全高效地开展空起扩包试飞任务,在准备阶段,设置不同专业的小组,对自身的工作进行项目管理,主要包括课题组,作为试验阶段的总策划和总指挥,做好各组功能划分,监控画面设计,判据设定等工作;飞机本体组,负责飞机本体构型和状态维护,特别是发动机试

验前的专项维护;测试组,主要做好机上测试改装和地面遥测监控的准备;飞行组,重点分析各种正常、非正常和应急情况,有针对性的在模拟机和真机上进行演练;航务组,针对空起扩包需要使用的机场和空域特点,做好地面航务及应急保障,以及全高度使用空域的协调工作^[2]。

为确保试飞科目安全高效的实施,确保机上和地面人员能实时监控和沟通飞机状态,需明确清楚试飞实施时各专业人员的职责和通讯关系,因此设立组织关系图,如图 2 所示。

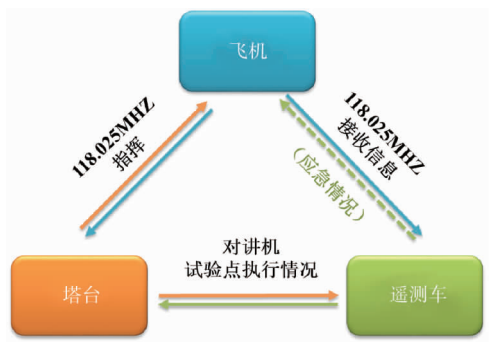


图 2 试飞实施人员组织关系图

同时,监控人员做好岗位分工,明确职责,如图 3 所示。飞行指挥员和航管员在机场塔台负责飞机起飞着陆和空域内的飞行指挥;其他监控人员位于遥测车,主要包括:监控指挥员,由试飞工程师担任,负责监控情况的总体把控以及和塔台指挥员实时通讯;试飞工程人员和设计人员负责监控飞机发动机各项参数状态的合理性和有效性;另有一名试飞工程师和试飞工程人员负责监控飞机常规飞行参数,确保飞机处于可控飞行状态;测试工程师负责监控画面和遥测车工作状态。

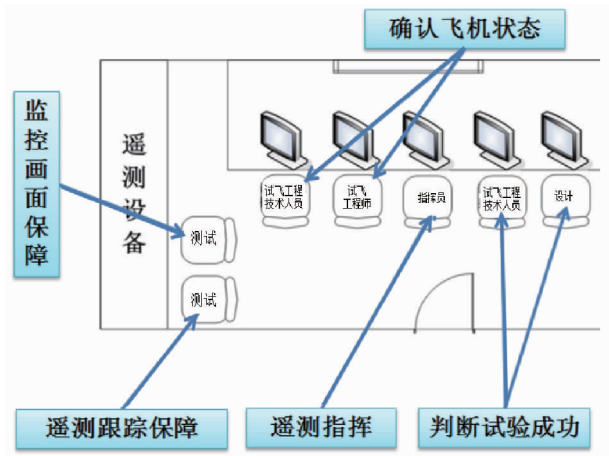


图 3 监控岗位分工图

2.2 飞机本体检查及工装备件准备

由于空起扩包试飞需要人为关闭一台发动机,因此在试验点执行时飞机处于单发飞行状态,为确保飞机状态安全可靠,在试飞前和试飞后需对飞机进行专门的检查和维护。

本次试验采用的风车/起动机混合起动方式将在短时间内频繁使用起动机,为了确保起动机工作正常,需在本次试验开始前及本次试验结束后增加起动机维护要求:对起动机滑油金属屑探测器进行检查、对起动机进行滑油勤务维护。另外,试验的每个飞行日结束后,需对起动机滑油金属屑探测器进行检查。

在检查中需要提前准备的使用工具如金属探测仪、滑油加放工装,每次检查都要更换的滑油滤网等。

2.3 测试系统准备

在空起扩包试飞时进行地面实时监控能让试飞指挥员和工程技术人员实时掌握飞机状态,有效确保试飞安全,因此在试飞前应做好地面实时监控的相关准备,主要包括测定监控信号覆盖范围和监控画面设计两方面。

这次试飞在山区的机场进行,除了进行常规的机载记录遥测监控以外,很重要一点是检测地形地貌对遥测的影响。因此在正式开始试验前,用正常构型和飞行操作的飞机,检测遥测的范围和盲点。结果如图 4 所示,图中红色标记为信号丢失点,飞机形状标记为信号找回点,三角形代表山峰,可以看出遥测车 270°方位有两个高度分别为 850 m 和 900 m 的山峰,是导致信号遮挡的原因。当飞行高度约为 5 000 m 时,白色实线和黄色虚线围成的三角形区域遥测信号正常,区域以西位置由于飞机相对遥测车的仰角变小,遥测信号被遮挡。

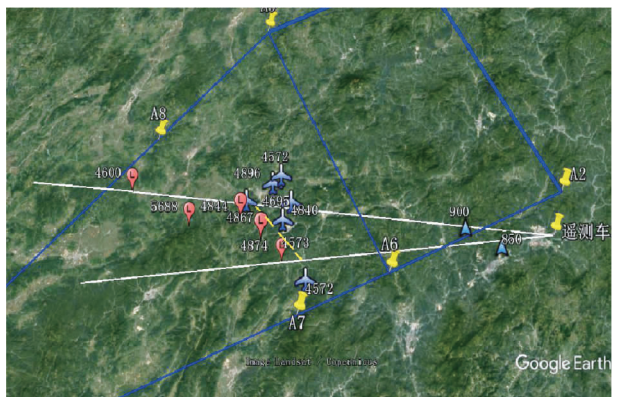


图 4 遥测信号丢失情况汇总

因此,可以识别出来,遥测车可以接收到飞行高度 6 000 m 遥测信号。应该将飞行空域尽量控制在图 5 蓝色区域。

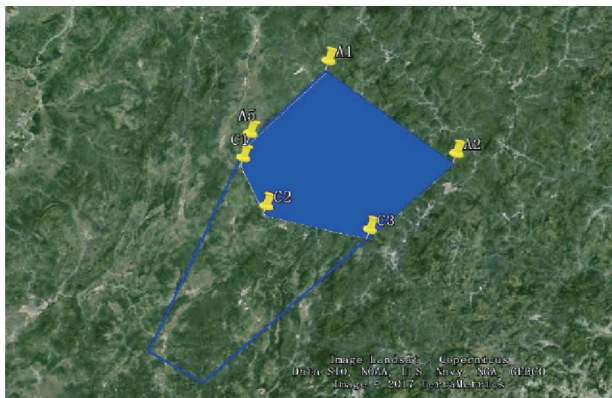


图 5 6 000m 高度遥测信号接收良好区域

测试专业另一项重要准备工作即是监控画面的设计。对于高风险试飞科目的地面实时监控可以快速提取决策信息,帮助判定结论,同时通过各项飞行参数和发动机参数的实时判读也能有效保障试飞的安全^[3]。针对这次空起扩包试飞任务设计的专用监控画面如图6所示。

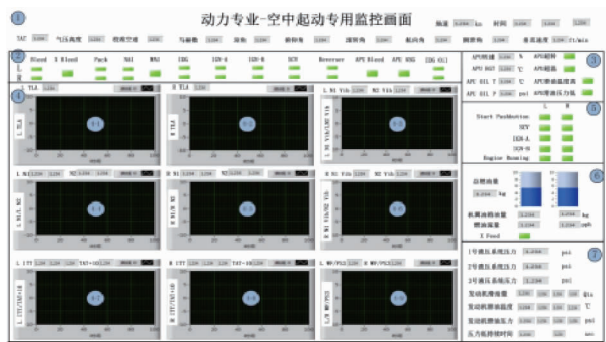


图6 空起扩包试飞专用监控画面

2.4 机组训练

机组的操作和协同,是本次试验的重中之重,要保证好每次空起的成功率以及飞行的安全性,必须要对试飞员做好充分的训练。为保证本次试飞的安全和提高试飞效率,在试飞前需采用模拟机和某型飞机进行模拟演练,再就发动机进行专门的检飞。

1) 模拟机演练

试飞前安排 2 个场次的模拟机演练:

(1)第1次演练验证试验点和试飞方法的合理性和可操作性、空滑程序的有效性,本次演练主要由

试飞工程师操作,试飞技术人员参与;

(2)第2次演练验证试飞任务单、应急预案、科目训练、熟悉试验点操作内容,本次操作由试飞员操作、试飞工程师和试飞技术人员参与,安排在科目训练前1周完成。

2) 采用某型飞机进行演练

试飞前采用某型飞机进行 1 个架次的演练,用于验证、熟悉应急预案程序、单发飞行时的操作感受、飞机下降增速的操作以及地面监控流程,安排在试飞前 1~2 天内进行。具体试验点和试飞方法需安排具体演练任务书。

3) 检飞

为确保飞机状态正常,发动机软件升级版本后,需针对左、右发分别进行一次架次的检飞,以验证软件功能的完整性和可靠性。为确保试飞安全,先升级一发发动机软件至试验版本进行检飞,再升级另外一发进行检飞,检飞可结合发动机空中试飞前其他试飞科目进行。

2.5 机场和空域协调

与机场的协调,主要在于应急情况下的处置。存在由于飞机双发失效,需要飘降和迫降的风险,因此,在消防、救护的应急待命上,按最高等级准备。同时联络当地政府的应急办,要有出现紧急情况时的联络通道。

在空域协调上,主要是两方面,一是已经识别出的遥测监控盲区,需要规避,在申请使用空域时,必须包括可正常监控区,在空域临时调配时,尽量避免进入监控盲区;二是由于机场对应空域,会有军方、民航多项任务执行,通过对空起扩包任务专业的沟通,争取空域的使用最大限度的支持任务实施^[4]。

3 试飞实施

3.1 试验点完成情况

本次试飞,自8月24日开始,至8月29日结束,飞行4架次/10.5小时,共计执行起动14次(重复1次),均起动成功。其中,1个试验点在执行过程中未按试验大纲要求断开试验发动机点火器断路器,不满足试验要求,故重复一次。

本次空起扩包试飞试验点完成情况如图7所示,图中圆圈和三角形所示点即为完成的试验点。

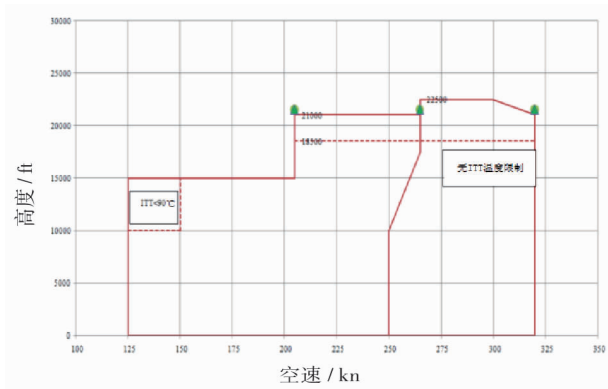


图 7 空起扩包试飞试验点分布图

3.2 试飞结果分析

在数据处理后,可以得到如图 8 所示的数据曲线。经过对所有数据的分析,本次试飞,各个试验点,高度、速度、停车时间、点火时间、ITT 峰值等,均在限制和预期范围内,可以判定试验成功有效。

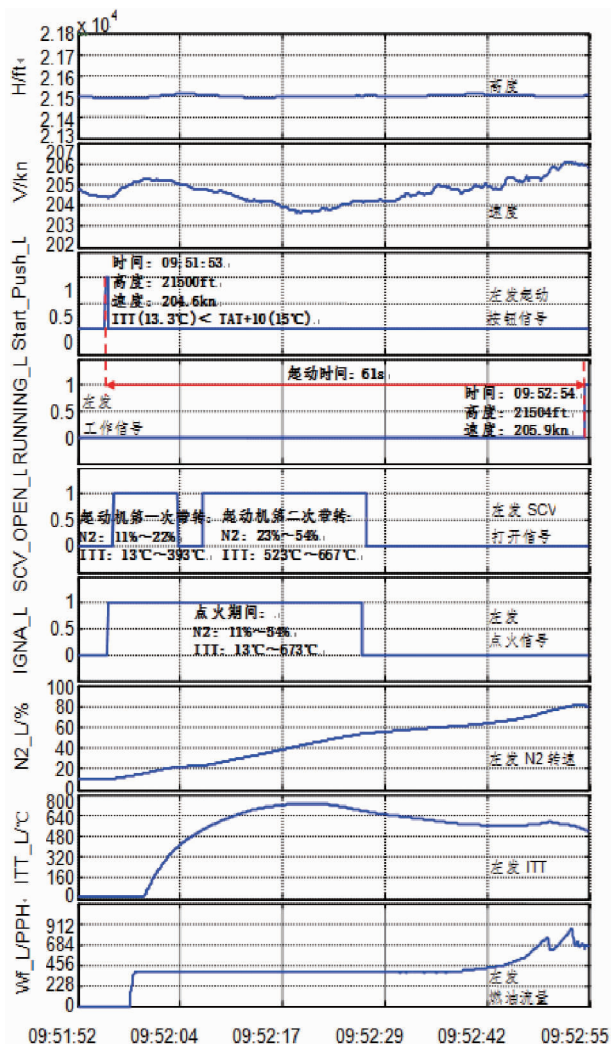


图 8 15 000 ft~30 000 ft、低速、冷浸透、左发数据曲线图

4 试飞成功的关键要素

发动机空起扩包试飞属于飞机动力专业一个典型和难点试飞科目,在做好充分的前期试飞准备工作之外,也离不开一些关键要素的支撑,以确保试飞的成功。同时这些关键要素也是这次试飞活动的主要创新点。通过对这次试飞活动的试飞科目分析、试飞准备和试飞实施等阶段进行总结,主要识别出四项成功的关键要素,分别是:机组之间的默契配合、组织的严谨、对试飞关键技术的把关和对试飞周期的把控。

4.1 机组之间的默契配合

空起扩包试飞是一项高难度的试飞任务,试飞的难点主要体现在按程序人为设置发动机关车并重新启动整个过程中的机组间协同合作。本次试飞过程中,在人为设置发动机关车时,正驾驶主要控制好飞机的高度、速度以及单发失效时飞机的姿态等参数;副驾驶则负责关闭目标发动机,并提前设置好 APU 供电、引气;驾驶舱试飞工程师负责念读试验操作程序,交叉确认飞行手册程序是否逐步执行;客舱监控台试飞工程师负责实时监控发动机转速、ITT 温度等试验关键参数。在重新启动发动机时,正驾驶负责控制好飞机速度、高度以及 ITT 温度在试验目标范围内;副驾驶负责在试验目标最佳时机按压发动机起动开关重新启动发动机,及时切换飞机气源;试飞工程师则负责关注 ITT 温度的变化情况以及起动机介入情况,以判断发动机是否成功起动。本次试飞过程中机组之间的默契配合有力保障了试飞安全和试验任务的高效完成,是试飞成功的关键要素之一。

4.2 组织的严谨

飞行试验工程是一项庞大的系统工程,涉及的专业和因素众多,而空起扩包试飞属于典型的飞行试验科目。为有效保障这次空起扩包试飞任务顺利开展,试飞团队根据专业分工和任务特点将团队细分为不同的小组,包括指挥组、飞行组、课题组、测试组、飞机组、航务组。试飞实施前,通过专门的航前讲评会,各小组之间信息充分沟通,确保了试验信息、飞机本体信息、空域信息、气象信息等准确一致;试飞实施期间,各小组分工明确,飞行组和指挥组通过 VHF 空地对话实时沟通,地面各小组则通过对讲机实时通信,确保了试验任务高效有序的开展;试飞实施后,通过专门的航后讲评会,飞行组通报试飞总体情况和特殊问题,课题组负责分析和解答,指挥组

则根据总体试验情况决策安排后续试飞任务的开展。严谨的团组安排和组织流程设置是本次试飞任务安全而高效完成的有力保障。

4.3 对试飞关键技术的把关

由于飞行试验是在真实的飞行环境下验证飞机的相关性能和功能,因此其具有不可替代的作用。正是这种真实的飞行环境意味着存在真实的不可避免的风险。而最直接、最有效的风险规避手段就是对试飞关键技术的严格把关。本次空起扩包试飞就有这么一个关键技术。起动机是发动机起动的关键部件,试飞过程中应该严格监控和限制起动机的循环使用次数,以免损坏起动机而不能起动发动机造成单发失效。试飞前的技术交底会上,试飞机组和技术人员针对起动机循环次数的计算方式展开了讨论。发动机设计人员认为起动机每介入进行一次发动机带转则算作循环使用一次,而发动机供应商人员则认为发动机起动过程中不管起动机介入带转几次都只算作循环使用一次,双方产生了分歧。为确保试飞期间不超过起动机的循环使用限制,试飞机组要求设计和供应商在试飞前必须给出一致结论。经过分析讨论,最终设计认可供应商的意见,并向试飞机组提供了文件依据。这件事情说明严格把关关键技术,才能规避试飞风险,确保试飞安全。

4.4 对试飞周期的把控

飞行试验的开展受众多因素影响,包括天气、空域、机场、飞机本体状态以及机组健康状态等。为确保试飞顺利完成,应充分考虑各方面因素对试飞任务的影响,把控好试飞周期。在试飞开展前和过程中,应做好充分的项目周期分析评估工作,通过项目风险库来动态记录和管理各项风险的状态,把控好试飞周期^[5]。

5 结论

本文主要以某型飞机的发动机空起扩包试飞的

成功案例为参考,从试飞科目的前期分析与准备,试飞组织安排以及试飞实施全过程等方面进行了阐述,主要有四点成功要素:

1) 机组之间的默契配合有力保障了试飞安全和试验任务的高效完成;

2) 从项目组织层面设置了严谨的团组安排和组织流程;

3) 试飞实施过程中对试飞关键技术进行严格把关;

4) 采用相关项目管理工具,对试飞周期进行严格把控。

参考文献:

- [1] 朱青,蒋一鹤. 某型涡轮喷气发动机空中起动试验研究[J]. 推进技术,1993(2):30-31.
- [2] 李宏斌,史庭全. 民航新机场试飞工作的组织与实施[J]. 中国民航飞行学院学报,2001(3):11-13.
- [3] 张绍基. 涡扇发动机空中风车起动特性分析[J]. 航空发动机,2004(4):3-9.
- [4] 王伟,刘鲁江. 关于建立国家空域资源灵活使用机制的研究[J]. 中国民用航空,2010(6):13-15.
- [5] 汉斯-亨利奇. 阿尔特菲尔德. 商用飞机项目——复杂高端产品的研发管理[M]. 唐长红,译. 北京:航空工业出版社,2013:164-171.

作者简介

吕碧江 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行试验测试系统研究,飞行试验工程研究。E-mail: lvybjiang@comac. cc

殷湘涛 男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行试验工程。E-mail: yinxiangtao@comac. cc

肖刚 男,博士,研究员,博士生导师。主要研究方向:智能信息处理,图像融合与目标跟踪。E-mail: xiaogang@sjtu. edu. cn

刘艺博 男,硕士研究生在读。主要研究方向:民用飞机飞行试验。E-mail: liuyibo1995@sjtu. edu. cn