

基于单发飞机的涡扇发动机 空中起动试飞方案设计

熊蓓文, 刘志林, 熊宇琳, 尹梦骄
(成都飞机工业(集团)有限责任公司, 成都 610092)

摘 要: 单发飞机空中起动试飞一直是试飞领域的难点和风险点。针对在单发飞机上如何进行涡扇发动机的空中起动试飞,从试飞方案的设计着手,对试飞科目安排、试验点选择、试飞方法、操作流程、飞机测试改装、试飞监控以及飞行演练等具体内容进行了阐述。介绍了某涡扇发动机在单发飞机上进行空中起动试飞的方案设计和试验情况,可为今后开展类似的发动机空中起动试飞提供有益借鉴和参考。

关键词: 单发飞机; 涡扇发动机; 空中起动; 鉴定试飞; 方案设计

中图分类号: V212.1 文献标识码: A 文章编号: 1672-2620 (2020) 06-0051-05

Design of air-start test scheme of turbofan engine based on single-engine aircraft

XIONG Bei-wen, LIU Zhi-lin, XIONG Yu-lin, YIN Meng-jiao
(Chengdu Aircraft Industry(group) Co. Ltd, Chengdu 610092, China)

Abstract: Air-start test flight of single-engine aircraft is always a difficult and risky point. To carry out air-start test flight of turbofan engine on single-engine aircraft, starting from the design of test flight scheme, the arrangement of test subjects, selection of test sites, test flight methods, operation procedures, aircraft test modification, test flight monitoring and flight drills were described. The design and test of a turbofan engine in air-start test flight on single-engine aircraft was introduced, which can provide useful reference for similar engine air-start test flight.

Key words: single-engine aircraft; turbofan engine; air starting; flight test; schematic design

1 引言

航空发动机的空中起动性能事关飞行安全,其起动包线是否准确、起动过程是否稳定可靠,都需要通过试飞来进行考核和验证,因此发动机空中起动性能的考核是发动机鉴定试飞的关键项目。长期以来,空中起动试飞都是试飞领域受到高度关注与重视的风险科目,尤其是在单发飞机上进行的新研发发动机空中起动试飞,相比双发飞机难度更大、风险更高,GJB 626A-2006《军用固定翼飞机和旋翼飞机科研试飞风险科目》^[1]将单发飞机的空中起动试飞列为 I 类风险科目。通常,国内外新研发发动机的鉴定试飞都尽量安排在双发飞机上进行,试飞时试验飞机上配装一台成熟发动机和一台用于鉴定的新发动

机,以减少和化解新研发发动机不可靠、不成熟所带来的风险。一般来讲,新研发发动机只有在双发飞机上试飞成熟并定型后才会配装单发飞机,但有时由于缺乏合适的双发飞机平台,个别新研发发动机只能在单发飞机上开展鉴定试飞,这就大大增加了试飞的难度和风险。尤其是试飞时发动机空中起动一旦失败,飞行员只能选择空滑迫降或弃机跳伞,因此空中起动试飞方案的设计是单发飞机进行新研发发动机鉴定试飞的重要内容。

由于各型飞机及其配装的发动机在设计上的差别,发动机空中起动的种类和方式各不相同。如按发动机停车后的状态有惯性起动和风车起动之分,按涡轮起动机是否参与起动有辅助带转起动和非辅

助带转起动之分,按飞行员是否参与起动过程有自动起动和手动起动之分。受飞机飞行包线的影响,同样的发动机在不同的飞机上其起动包线范围也会不一样,其试验点的选择就比较关键。另外,发动机的起动过程也各具特点,有的发动机起动时会带着飞机附件机匣上的交流发电机和液压泵等负载工作,而有的则不需要。因此,在设计空中起动试飞方案时要根据飞机和发动机的特点,明确空中起动类型和方式,选择合适的试验点,确定相应的试验架次和试验顺序,规定试验的方法和操作流程,制定试飞监控方案,指导如何开展空中起动试飞前的空滑迫降演练等。

2 空中起动试飞方案设计思路

与双发飞机相比,单发飞机空中起动有以下特点:①一旦起动失败,要么飞机迫降,要么飞行员弃机跳伞;②停车后由发动机驱动的飞机交直流发电机和液压泵停止工作,机上的供电和液压驱动转换为由应急或备份系统保障,转换过程飞机会出现告警和故障现象;③发动机起动过程中往往存在带着交流发电机和液压泵等负载的情况,增大了发动机风车起动难度。为此,单发飞机空中起动试飞方案设计的思路主要为:

(1) 根据试飞目的和试飞要求设计试飞科目,确定空中起动试飞类型,明确进行惯性起动还是风车起动,是否进行辅助带转起动还是只进行非辅助带转起动,或者兼而有之。并根据飞机飞行包线和发动机起动包线范围及有关标准、要求,选择空中起动试验点,明确试验条件、试验次数和试验顺序。

(2) 按照飞行操作要求和特点,设计空中起动试飞的试验方法和操作流程。

(3) 根据获取试飞数据和安全监控的需要,制定飞机、发动机测试改装要求和试飞监控方案。

(4) 明确飞行前地面试验要求,制定飞行前飞机和发动机的地面检查、试验方案。

(5) 按照方案确定的试验点和试验条件设计相应的试飞航线和飞行剖面。

(6) 做好起动失败被迫进行迫降的准备,空中起动试飞方案应包含空滑迫降演练内容。

3 空中起动试飞方案设计

3.1 试飞科目设计

试飞科目设计是试飞方案设计的核心,也是编

制试飞大纲的重要内容,主要包括空中起动试飞类型、空中起动试验点及起动次数和试验顺序。

3.1.1 空中起动试飞类型

无应急动力系统的单发飞机通常不进行风车起动而只进行惯性起动。这是由于风车转速很低,此时发动机带着交流发电机和液压泵等负载进行起动会很困难、失败的几率高;如果发动机的涡轮起动机具有辅助带转能力,除了进行惯性起动外,还应进行辅助带转起动试验以检查其辅助带转起动功能。空中起动试飞需要飞行员把油门杆拉至停车位置人为拉停发动机,待发动机高压转子转速 N_2 降至试验转速后再推油门杆至慢车位置起动发动机,因此空中起动试飞只能通过飞行员推油门杆的手动方式进行起动。某型飞机无应急动力系统,其发动机也无辅助带转起动功能,为此该发动机只进行惯性起动,通过油门杆手动起动方式进行。

3.1.2 空中起动试验点及起动次数

根据国军标 GJB 243A-2004^[2]的规定,空中起动试飞一般在起动包线内选取3~4个高度、2~3种速度作为试验点,重点检查和考核起动包线边界(特别是小速度边界)的起动能力,且每个试验点的起动次数不少于3次。典型的空中起动试验点,通常包括包线中央试验点、高空左边界试验点、低空左边界试验点和中高空大速度试验点几类。图1为某发动机空中起动试验点安排示意图,图中 H 为飞行高度, Ma 为飞行马赫数。为充分考核发动机的空中起动性能,每个试验点都应尽可能进行不同转速的起动试验。如某试验点要进行3次惯性起动,可安排1次高转速($N_2=50\%$)和2次低转速($N_2=35\%$)起动。

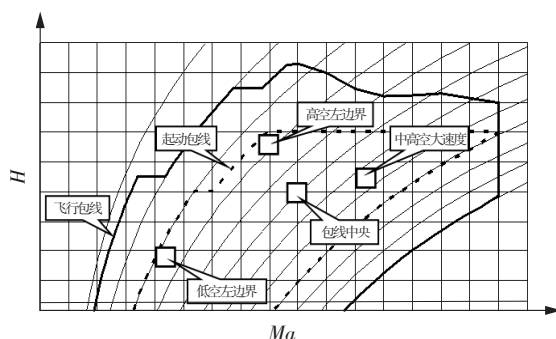


图1 发动机空中起动试验点安排示意图

Fig.1 Scheduling diagram for the engine air-start flight test pointes

3.1.3 空中起动试验顺序

试验顺序安排按照先易后难的原则进行。前述几个典型试验点相比较,高空左边界试验点因空气

稀薄、含氧量低,发动机空中起动最困难。但由于飞行高度高、处置时间充裕,一旦起动未成功,不仅有多次起动机会,飞行员还能调整飞机的飞行高度和飞行速度到飞行包线中易起动区域进行起动。低空左边界试验点虽然大气条件对起动有利,但一旦起动不成功往往缺乏回旋余地,无第二次起动机会,只

能空滑迫降。包线中央试验点兼有以上二者优点。因此,空中起动试飞一般先在包线中央进行,然后依次在高空左边界、中空大速度、低空左边界进行。同一个试验点的空起试飞,则先大转速($N_2=50\%$)、后小转速($N_2=35\%$)。按照上述原则与方法,该型飞机的发动机空中起动试飞科目设计如表1所示。

表1 空中起动试飞科目设计
Table 1 Design of the air-start flight test subject

试验点类别	飞行高度/km	飞行速度/(km/h)	起动类型	N_2 起动转速/%	试验顺序	试验架次	
包线中央	7~8	550~600	惯性起动	50±2	1	1	
				35±2	2	2	
高空左边界	11~12	450~500		50±2	3	1	
				35±2	4	2	
中空大速度	8~10	800~850		50±2	5	1	
				35±2	6	2	
低空左边界	4~5	400~450		50±2	7	1	
				35±2	8	2	

3.2 试飞方法和流程设计

3.2.1 试飞方法

空中起动试飞时,飞行员在高于试验点规定的高度、速度位置先将油门杆收到停车位置,待发动机转速降到试验规定的转速,飞机也下降到试验要求的高度、速度范围后,推油门杆到慢车或慢车以上位置,此时发动机控制系统发出起动指令,对燃烧室进行补氧、点火,起动发动机。应注意,如果起动过程中发动机出现转速悬挂、超温等现象,需将发动机拉停后重新起动。

3.2.2 操作流程

空中起动试飞时,飞机起飞后飞行员一般要先按照预先规划和设计的空中起动试飞航线进行1~2次模拟操作演练,以熟悉操作流程、方法和飞行航线路径,待准备充分后才开始空中起动试验。图2为某飞机发动机空中起动试飞的操作流程,给飞行员提示了试飞的操作流程以及拉停发动机后飞机的显示告警和操纵特性变化情况。图中, N_1 为发动机低压转子转速, T_4 为发动机涡轮后燃气温度。

3.3 测试改装和试飞监控设计

为获取试飞数据和保障试飞安全,飞机需加装机载数据采集系统(ADAS),采集、记录飞机的飞行参数和飞机、发动机的状态信息,并遥测发送到地面;地面建立试飞监控系统(GDAS)。试飞时GDAS实时接收并处理ADAS发送回地面的试飞数据,对飞机和发动机的相关参数与状态信息进行实时监

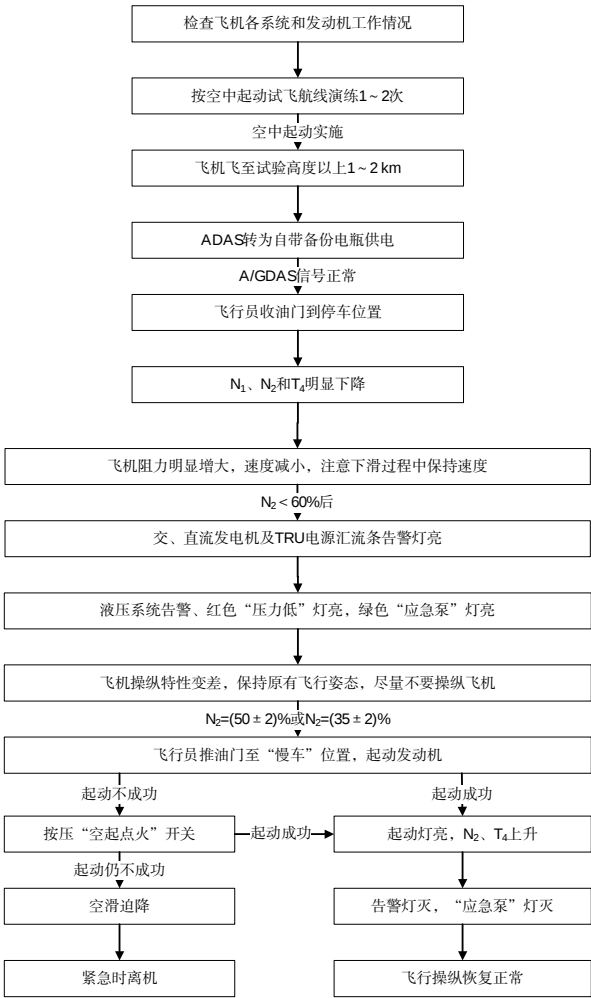


图2 空中起动试飞操作流程

Fig.2 Implementation flowchart of the air-start flight test

控。发动机停车后飞机电源系统会故障报警,飞机系统将转为由机上蓄电池或应急动力系统供电。为此,空中起动试飞时 ADAS 应自备蓄电池,飞行员在拉停发动机前通过座舱内的电源转换开关将 ADAS 由机上电源系统供电转为由自备蓄电池供电,以避免发动机停车后机上电源故障和供电转换过程导致的试飞数据丢失与监控信号中断。

空中起动试飞时, GDAS 应重点监控飞行的高度、速度、飞机航迹和位置、油门杆位置、点火信号、发动机低压转子转速、高压转子转速、涡轮后燃气温度、发动机燃油入口压力、滑油压力等是否正常。起动过程中尤其要重点关注发动机高压转子转速和涡轮后燃气温度的变化,一旦出现转速冷悬挂或热悬挂现象,要立即提醒飞行员采取相应处置措施。

3.4 试飞前地面检查和试验

不同型号飞机和发动机根据其设计不同,飞行前各自的地面检查、试验内容不尽相同。该型飞机空中起动试飞前的地面检查和试验主要包括:发动机流道检查、起动电气系统检查、点火补氧系统检查,飞机应急供电系统检查、应急电动泵检查、应急放起落架检查、应急刹车检查,发动机地面模拟空中起动试验等。

3.5 试飞航线和飞行剖面

为确保空中起动不成功时飞机能空滑返回机场进行迫降,每次空中起动试飞前要根据空中起动试验的高度、速度、转速要求,按照飞机的空滑比计算和确定每个空中起动科目动作点(拉停和起动发动机)距机场的最佳位置,规划和设计空中起动试飞的航线与飞行剖面(图3)。试验前要将计算出的空中起动作点坐标和规划的航线加载到飞机上便于飞行员操作,地面监控系统也将制作相应监控画面在飞行时实时监控。

3.6 空滑迫降演练设计

为应对空中起动失败后飞机被迫进行空滑迫降的情况,空中起动试飞前需先进行空滑迫降演练,使



图3 空中起动试飞航线和飞行剖面

Fig.3 Diagram of the flight line and the flight profile for air-start

飞行员熟悉飞机失去动力后的操纵特性和空滑迫降的操作流程,验证预先规划的各次试验的空中停车点、试飞航线、迫降航线是否准确。空滑迫降演练应包括地面飞行模拟器演练和飞行演练两部分。飞行模拟器演练是根据以往试飞数据、飞机的升阻比和空滑比等参数在模拟器上建立空滑迫降模型,试飞员和试飞工程师根据试飞任务书内容进行演练;飞行演练则是严格按照每次空中起动预先设计的试飞航线和飞行剖面(图3),在空中将发动机油门收至慢车、打开飞机减速板,模拟发动机停车失去动力后如何通过空滑返回机场进行迫降。

4 空中起动试飞试验

某发动机试飞中,先后进行了15次空中起动试飞,且空中起动均一次成功,充分检查和验证了该发

表2 空中起动试飞试验情况

Table 2 Results of the air-start flight test

试验条件			试验情况			
飞行高度/km	飞行速度/(km/h)	N_2 起动转速/%	飞行高度/km	飞行速度/(km/h)	N_2 起动转速/%	起动时间/s
7.0~8.0	550~600	35±2 和 50±2	7.5~7.8	545~552	34.8~46.6	15~28
11.0~12.0	450~500		11.5~11.6	462~508	34.5~47.1	16~56
8.0~10.0	800~850		5.9~6.8	796~813	35.8~53.3	12~13
4.0~5.0	400~450		5.0~5.2	442~459	34.2~49.3	12~20

发动机的空中起动性能。表2给出了该发动机空中起动试飞试验情况。试验数据表明,飞行高度低和速度大对空中起动有利,起动时间相对较短;单发飞机超声速起动较难实施,发动机拉停后飞机减速很快,发动机降到规定转速时飞机已变为亚声速飞行。如进行中高空飞行高度(8.0~10.0 km),大飞行速度(800~850 km/h)、小转速($N_2=(35\pm 2)\%$)空中起动试飞,发动机在飞行高度8.1 km、飞行速度1 050 km/h时拉停,停车后飞机迅速减速,飞行员操纵飞机通过大角度俯冲直到5.9 km高度才能达到起动所需的速度要求。

另外,试验中还发现了飞机相关系统存在的问题与缺陷。如进行高空左边界 $N_2=(35\pm 2)\%$ 惯性起动

试验时,涡轮后燃气温度上升很缓慢,起动时间长达56 s,如图4所示。经分析,其原因是在高空发动机燃油入口压力低导致起动时供油不足。为此,飞机燃油系统专门加设了增压泵以提高发动机起动时的燃油入口压力,并明确了空中起动试飞时发动机燃油入口压力值的监控要求。改进后,再次进行该状态点的空中起动试飞验证,起动时间缩短到30 s以内,效果明显。

5 结束语

介绍了基于单发飞机的涡扇发动机空中起动试飞方案设计的思路、内容和方法,以及在某型飞机涡扇发动机空中起动试飞中的应用与试验情况。该发动机据此开展的15次空中起动试飞结果表明,其空中起动试飞方案内容完整、方案合理、方法可行,可满足单发飞机空中起动试飞的需要,能安全、稳妥、有效地推进发动机空中起动试飞的进程。

参考文献:

[1] GJB 626A-2006,军用固定翼飞机和旋翼飞机科研试飞风险科目[S].

[2] GJB 243A-2004,航空燃气涡轮动力装置飞行试验要求[S].

[3] PD-93发动机技术使用说明书[Z]. 贵阳:贵州凯阳航空发动机有限公司,2016.

[4] 张 媛,郭 斌. 某型发动机空中启动试验方法研究[J]. 工程与试验,2013,53(4):46—48.

[5] 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):28—33.

[6] 吕碧江,殷湘涛,肖 钢,等. 发动机空中起动包线扩展试飞组织与实施[J]. 民用飞机设计与研究,2019,(2):80—84.

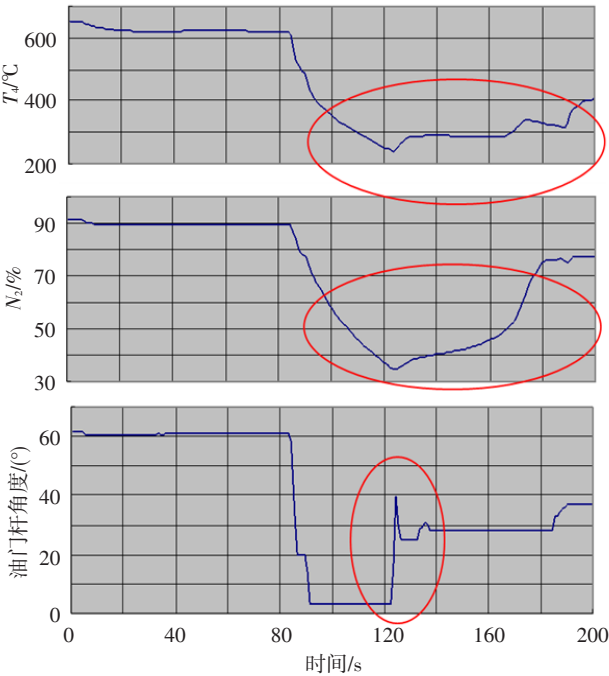


图4 发动机在辅助空中起动试验期间的参数变化
Fig.4 Parameters history for the turbofan engine during the auxiliary air-start test