

涡扇发动机风车起动点火匹配研究

陈立, 罗载奇

(中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘要: 针对涡扇发动机在高空状态的风车起动点火失败情况进行了原因分析和油气匹配研究。通过分析影响风车起动点火的主要因素, 找出了点火失败的原因是点火油气不匹配, 偏离了燃烧室可靠点火的余气系数边界。在油气匹配研究的基础上, 提出了调整点火油气比的解决措施, 并在高空台进行了试验验证。验证表明: 该涡扇发动机风车起动点火失败的分析评估方法和解决措施合理可行, 可为同类型发动机风车起动点火匹配设计和评估提供参考。

关键词: 航空发动机; 风车起动; 燃油雾化; 点火匹配; 起动控制; 余气系数

中图分类号: V233.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2620 (2017) 05-0008-05

Windmilling starting ignition match for turbofan engine

CHEN Li, LUO Zai-qi

(AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract: Aiming at windmilling start ignition failure cases in the state of high altitude for a certain type of turbofan engine, mechanism analysis and research of fuel and gas match for the windmilling start ignition has been completed. The main factors affecting windmilling start ignition have been analyzed. The reason for the ignition failure was that fuel and gas was not match and excess air coefficient deviated from the combustor ignition boundary. On the basis of fuel and gas match research, the measures were put forward, and verification test at high altitude test bed was completed. Test results show that the methods of analysis and measures are reasonable, which can provide reference for match design and evaluation of windmilling start ignition for the same type of engine.

Key words: aero-engine; windmilling start; fuel atomization; ignition match; starting control; excess air coefficient

1 引言

航空发动机风车起动是指发动机空中停车、燃烧室熄火或不工作后, 发动机在空气动力、转子惯性和阻力矩的共同作用下, 在不低于最低风车速度的情况下, 经过燃烧室再点火, 并且能够成功加速到空中慢车状态的过程^[1]。风车起动的第一步即是点火, 而燃烧室风车状态点火是一个复杂的过程, 受到发动机风车特性、压气机特性、燃烧室进口参数、点火能量、燃烧室余气系数、燃油雾化特性等诸多因素的综合影响^[2-3], 若匹配不当很可能出现点火失败。目前国内对风车起动点火问题进行了相关研究, 杨

萍等^[4]用计算和图解的方法来确定空中起动点火边界, 冯延光等^[5]研究了提高发动机高空点火性能的方法, 田金虎等^[6]通过试验探究了不同燃油急增方案对点火特性的影响, 阎巍等^[7]研究了渐进式供油提高点火性能的方法。但长期以来, 涡扇发动机风车起动空中点火都是一个难题, 缺乏系统性研究。

本文针对某型涡扇发动机在试验中出现的风车起动点火失败问题, 开展了原因分析及风车起动点火油气匹配研究, 提出了相应的油气匹配方案, 并在后续进行的高空风车起动试验验证中取得了较为满意的效果。该方法具有工程参考价值, 可为其他航

空发动机空中起动点火匹配研究提供参考。

2 风车起动点火失败概述

该涡扇发动机在高空台进行了高度 $H=5\text{ km}$ 、表速 $V_b=500\text{ km/h}$ 的 FS01 风车起动试验,和 $H=5\text{ km}$ 、 $V_b=700\text{ km/h}$ 的 FS02、FS03 风车起动试验。3 次风车起动试验点火电压、电流正常,风车状态参数调节正常,风车点火转速正常,供往燃烧室的燃油符合给定要求,但出现发动机转速不上升、发动机低压涡轮出口温度 T_6 不上升等现象,均点火失败。各次风车起动过程主要点火参数见图 1,图中 N_c 为压气机相对物理转速。

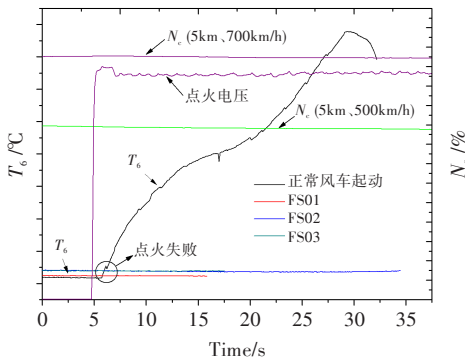


图 1 各次风车起动 T_6 和 N_c 曲线

Fig.1 T_6 and N_c curve of all windmilling starting

3 点火失败原因分析与匹配研究

3.1 点火机理

风车起动点火过程是指发动机在风车状态下,采用电火花或其他点火热源将周围的油气混合物点燃,再传焰到整个燃烧室的过程。该涡扇发动机燃烧室点火采用的是电点火方式,点火系统产生高能电火花,直接点燃燃烧室油气混合气。其点火过程大致可分为以下三个阶段:

- (1) 通过点火电嘴产生的高能电火花将附近的油气混合气点燃,形成一个热气体核心,这个阶段主要取决于电嘴的工作能力;
- (2) 热气体核心将周围的油气混合物点燃,形成一个具有足够大小和温度的火焰核心,这个阶段主要取决于点火能量和持续时间,也取决于点火喷嘴附近混合气浓度和紊流度;
- (3) 火焰随即从这个核心传到整个燃烧区,与火焰筒头部的气流结构和浓度分布密切相关。

3.2 点火失败原因分析

发动机风车起动点火失败的原因有多方面,结

合试验现场具体情况,排除了启封不彻底、燃油中掺杂有滑油等情况。现针对几个主要可能原因进行分析,图 2 列出了点火失败故障树。其中,经发动机试验后分解检查和试验现场数据监测,可排除点火电嘴积碳、燃油喷嘴面积变化、空气流量偏差较大等问题。

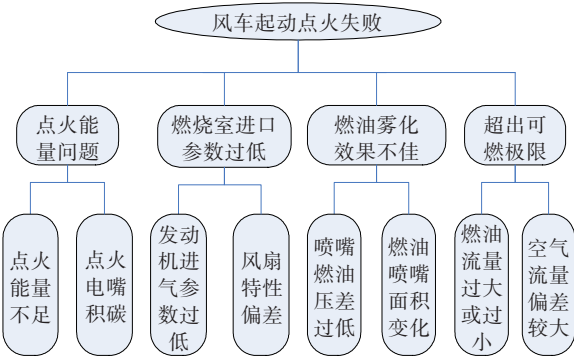


图 2 发动机风车起动点火失败故障树

Fig.2 The fault tree of windmilling starting ignition failure of the engine

3.2.1 点火能量分析

一般来说,点火能量越大,点火范围越宽。点火过程的第一阶段就是要形成一个足够大、温度足够高的火花核心,此热核心的放热率要大于辐射换热和紊流扩散的散热率。当点火能量较小时,随着点火能量的增加,点火性能改善,但点火能量增加到一定程度后,对点火性能的改善并不大,反而增加了点火器质量^[2,4]。

该发动机风车起动试验时,点火装置的点火电压和点火电流随时间的变化曲线分别如图 3、图 4 所示,可见点火电压和点火电流均在正常范围内。由于用该能级完成过燃烧室空中点火性能试验,试验结果也表明点火需求能量能够得到保障,可排除点火能量的影响。

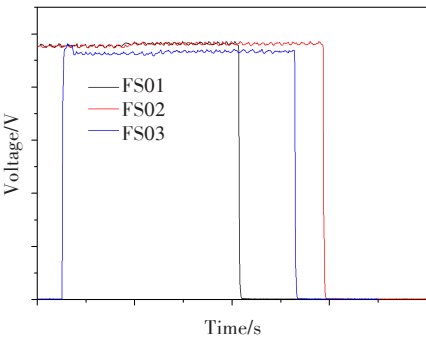


图 3 点火电压曲线

Fig.3 The ignition voltage curve

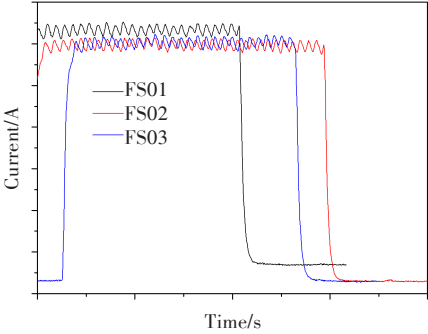


图4 点火电流曲线

Fig.4 The ignition current curve

3.2.2 燃烧室进口参数分析

燃烧室进口空气压力、温度对点火性能都有不同程度的影响,通常是压力、温度越高点火相对容易。气流压力降低,化学反应减慢,使其放热速率降低,不利于点燃混合气。温度不仅影响可燃混合气的初始化学反应速率,还会影响燃料的蒸发和雾化。温度低会使火花团的热量更容易散失,且影响火焰的传播和稳定性^[8]。

将该发动机风车起动试验中燃烧室进口压力 p_3 和温度 T_3 ,与部件点火试验中的燃烧室进口压力和温度进行对比,如图5所示。图中,部件点火试验中的试验点均为点火成功的试验点,可见其与整机试验点的压力、温度基本一致。所以,在此压力和温度下,整机具备点火成功的燃烧室进口条件,因此排除燃烧室进口参数的影响。

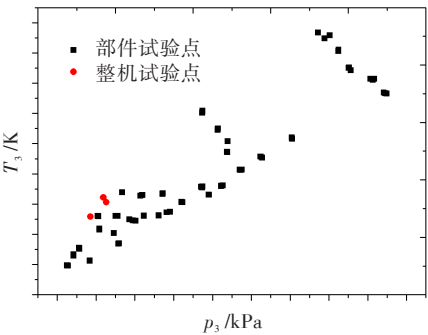


图5 整机和部件试验点对比图

Fig.5 The contrast between the engine and parts test points

3.2.3 燃油雾化效果分析

燃油雾化是一个非常复杂的过程,与供油压力(影响相对速度及液/气接触面积)、喷嘴型式和尺寸(影响出口速度以及液/气接触面积)、燃油物理性质(影响表面张力、黏性等)、气流速度、温度及环境压力(影响密度等)等有关^[9]。

在发动机整机试验中,喷嘴压降没有直接测量,而是通过燃油总管压降 Δp_f 来间接表示。该发动机风车起动点火时的 Δp_f 变化见图6,图中绿色区域是部件试验中点火成功的 Δp_f 范围。由于三次起动的供油规律有所调整,所以三次起动的 Δp_f 不同。可见,FS01、FS02这两次风车起动是由于喷嘴前后 Δp_f 较低,低于点火成功的范围,导致了点火失败;而FS03喷嘴前后 Δp_f 在点火成功范围内,故燃油雾化效果不是导致FS03点火失败的原因。

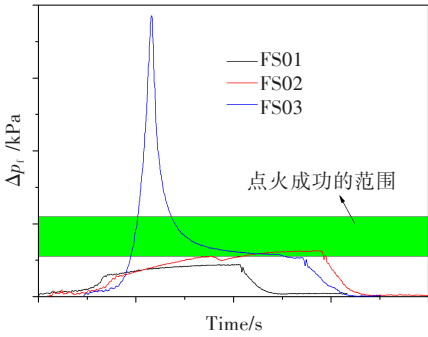


图6 点火时刻燃油总管压降变化情况

Fig.6 The change of Δp_f at ignition moment

3.2.4 可燃极限分析

在发动机整个起动包线范围内,均要求燃烧室能稳定点火并保持火焰稳定。能够使火焰从点火源开始在整个混合气空间范围内传播的余气系数 α 的极限被称为混合气的可燃极限,其又分为贫油边界(余气系数最大值)和富油边界(余气系数最小值)^[8]。

通过燃烧室点火试验,得到 $H=5\text{ km}$ 的贫油边界和富油边界。将该发动机风车起动点火余气系数与贫、富油边界进行对比,如图7所示。FS01风车起动的余气系数在可燃极限之内,故可燃极限问题不是导致FS01点火失败的原因;FS02风车起动的余气系数过大,已经超出了贫油边界,未点火成功;FS03

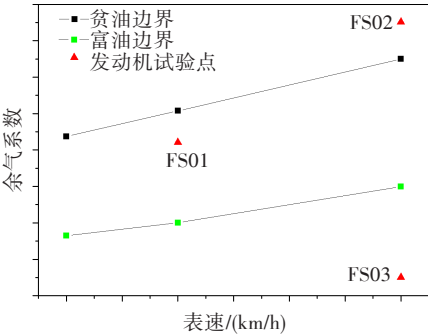


图7 余气系数对比图

Fig.7 The contrast of excess air coefficient

风车起动的余气系数较小,超出了富油边界,未点火成功。

3.3 油气匹配研究

综上所述可知,发动机风车起动点火失败主要原因是点火油气不匹配,出现了燃油雾化效果不好、燃烧室头部富油和贫油等情况:FS01点火失败是由于燃油雾化效果不好,FS02点火失败是由于燃油雾化效果不好及燃烧室头部贫油超出了可燃极限,FS03点火失败是由于燃烧室头部富油超出了可燃极限。

为解决该发动机点火油气不匹配的问题,评估了风车起动包线内各个风车工况点的可燃油气范围,并对起动供油附件装置特性进行分析。将燃油泵一维差值特性改为多维差值特性,使燃油计量更加精确。对燃烧室结构特点进行分析,量化燃油急增雾化特性,修正急增燃油量。利用发动机进口气流参数等变量值,对风车起动供油量 W_f 进行修正,使点火油气匹配满足风车起动全包线设计要求。 W_f 修正如下:

$$W_f = f(N_e, p_3, p_2, T_2, V) \tag{1}$$

式中: p_2 为发动机进口压力, T_2 为发动机进口温度, V 为总管充填容积。

使用改进后的风车起动控制规律,该发动机在 $H=5\text{ km}$ 、 $V_b=500\text{ km/h}$ 和 $H=5\text{ km}$ 、 $V_b=700\text{ km/h}$ 两个风车工况下,计算得出的燃烧室头部点火余气系数如图8所示,已将风车状态的点火余气系数调整到燃烧室可燃极限范围内。

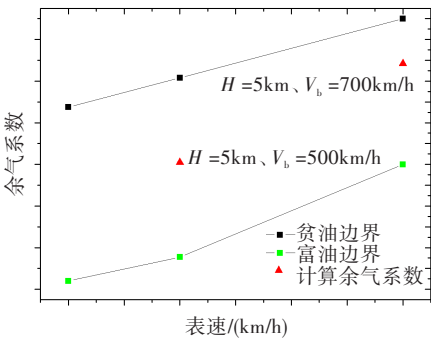


图8 计算得出的余气系数
Fig.8 The calculated excess air coefficient

4 高空风车起动试验验证

4.1 试验方法

高空台模拟发动机风车起动,先分别启动试验所需要的供、抽气及加温/降温设备,使排气扩压器

的循环水系统投入运行,高温或低温供气气流经混合后通过916、995、916-2阀排入大气,抽气系统完成抽气机的并、串网后,发动机做好风车起动准备,见图9。当发动机进入风车状态后,按发动机风车起动操作要求进行风车起动^[10]。

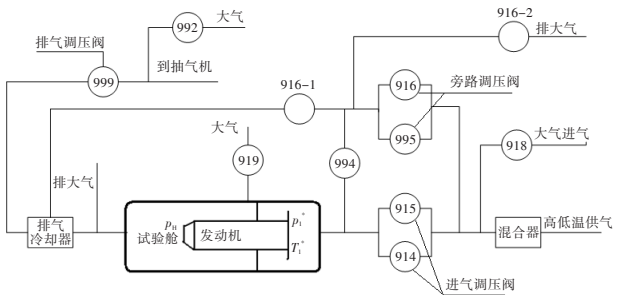


图9 高空台模拟风车起动工作原理图
Fig.9 High altitude simulation windmilling starting working principle

4.2 试验验证

在模拟高度进行了多次风车起动,选出具有代表性的FS04、FS05、FS06三次风车起动验证结果(图10~图13)。FS04、FS05是 $H=5\text{ km}$ 、 $V_b=500\text{ km/h}$ 的风车起动,FS06是 $H=5\text{ km}$ 、 $V_b=700\text{ km/h}$ 的风车起动。

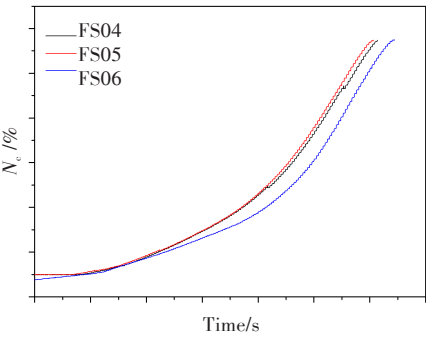


图10 压气机相对物理转速变化曲线
Fig.10 The curve of relative speed

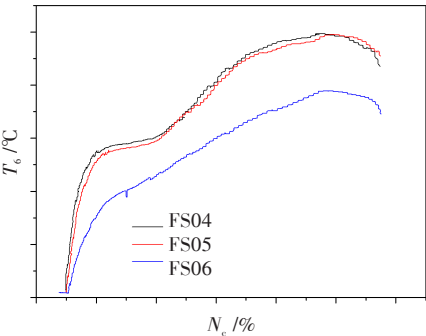


图11 低压涡轮出口温度变化曲线
Fig.11 The curve of T_6

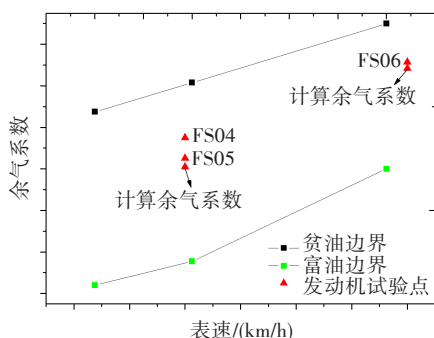


图12 点火时刻余气系数

Fig.12 Excess air coefficient at ignition moment

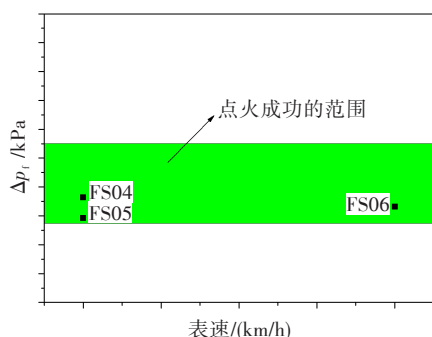


图13 点火时刻燃油压差

Fig.13 Δp_f at ignition moment

试验结果表明,FS04、FS05、FS06风车起动均成功点火,且加速到空中慢车状态(图10、图11)。点火时刻的燃烧室头部余气系数都在可燃极限范围内,与油气匹配研究计算得出的余气系数基本一致(图12),但由于供油存在少许偏差,所以实际余气系数与计算略有差异。燃油总管压差都在能够可靠点火的范围内(图13)。点火油气匹配达到了预期效果,表明该发动机点火失败原因分析正确,点火油气匹配研究方法和提出的相应解决方案合理可行。

5 结论

该型发动机风车起动点火失败,经分析得出点火油气不匹配是其失败的根本原因。据此对其进行

了油气匹配研究,并采取了相应的解决方案,经后续高空风车起动试验验证表明,该发动机风车起动点火失败原因分析正确,点火油气匹配研究方法和相应的解决方案合理可行。空中点火油气匹配应关注和评估燃油雾化效果(燃油压差)和燃烧室头部余气系数,只有在一定范围内点火才能成功。目前,确定燃烧室的可燃极限主要依靠试验方法得出,未来还可利用燃烧室点火模型开展点火匹配的理论分析研究。而本文提出的风车起动点火匹配研究方法,可有效解决空中点火困难等问题,降低风车起动调试试验的风险和成本。

参考文献:

- [1] 张东方,李应红,尉询凯,等. 基于约简遗传规划的航空发动机风车起动模型[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(9): 2262—2265.
- [2] 《航空发动机设计手册》编辑委员会. 航空发动机设计手册:第九分册——主燃烧室[K]. 北京:航空工业出版社, 2000.
- [3] Kim S K, Griffin I A. Surge margin tracking for active control of quick windmilling relighting[R]. ASME GT2004-53730, 2004.
- [4] 杨萍,彭朴. 确定发动机空中再点火边界的方法[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1994, 7(4): 47—51.
- [5] 冯延光,杨新江. 提高WP-11发动机起动高度的研究与实施[J]. 推进技术, 1994, 15(4): 22—26.
- [6] 田金虎,马前容,刘志友,等. 某型发动机起动试验点火特性分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2005, 18(4): 34—36.
- [7] 阎巍,梁彩云. 涡扇发动机渐进式点火供油规律研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2013, 30(2): 9—12.
- [8] 聂加耶夫,费多洛夫. 航空燃气涡轮发动机原理[M]. 北京:国防工业出版社, 1984.
- [9] 彭泽琰,刘刚,桂幸民,等. 航空燃气轮机原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2008.
- [10] 陈建民. 高空台发动机风车起动及停车方法的试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 1995, 8(2): 48—50.