

某型涡轴发动机高低温起动性能试验与分析

祁斌¹, 刘涛¹, 杨彩琼¹, 夹福年¹, 朱明勇²

(1. 中国航空发动机集团有限公司 四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621000;

2. 中国航空发动机集团有限公司 湖南动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

摘 要: 开展了采用 RP-3 燃油和 RP-5 燃油的涡轴发动机高低温起动性能对比试验。分析了不同环境温度下转子的阻力矩和电动机扭矩的变化规律,指出了当前计算方法的局限性;对比了环境温度、燃油种类、燃油流量对发动机起动性能的影响,摸索出了该型发动机低温起动极限温度。试验结果表明:随着温度降低,滑油黏度增大,转子阻力矩增大,发动机带转转速和转子自转时间显著降低;在极限低温条件下,两种燃油对涡轴发动机起动性能影响非常大,而在高温条件下,采用上述两种燃油,发动机起动性能基本一致;该型发动机采用 RP-3 燃油能在 -40°C 环境下成功起动,而采用 RP-5 燃油,经过调油等措施最终只能在 -20°C 环境下成功起动;在一定范围内,增加燃油流量,能改善发动机采用 RP-5 燃油的起动能力。研究结论为同类发动机高低温试验提供了参考。

关 键 词: 涡轴发动机; 高低温起动试验; 起动性能; 燃油; 黏度

中图分类号: V231.2

文献标志码: A

Test and analysis on high and low temperature on starting performance of a turboshaft engine

QI Bin¹, LIU Tao¹, YANG Caiqiong¹, JIA Funian¹, ZHU Mingyong²

(1. Sichuan Gas Turbine Establishment,

Aero Engine Corporation of China, Mianyang Sichuan 621000, China;

2. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,

Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China)

Abstract: The comparative analysis test of the starting performance of turboshaft engine with RP-3 and RP-5 fuel was carried out. The variation law of resistance torque and electric motor torque under different ambient temperature was analyzed and the limitation of current calculation method was pointed out. The influences of ambient temperature, fuel type and fuel flow rate on the starting limit temperature of the engine were found out. The test results showed that with the decrease of temperature, the viscosity of oil increased, the rotor resistance torque increased and the engine belt speed and rotor rotation time decreased significantly. Under the extreme low temperature conditions, the two kinds of fuel had great influence on the starting performance of turboshaft engine. However, under the high temperature condition, the engine starting performance with the above fuels was the same. The engine can start successfully at -40°C with RP-3 fuel, but it can only start successfully at -20°C with RP-5 fuel after adjusting

收稿日期: 2021-04-10

作者简介: 祁斌(1990—),男,工程师,硕士,主要从事航空发动机整机试验性能分析。

引用格式: 祁斌,刘涛,杨彩琼,等. 某型涡轴发动机高低温起动性能试验与分析[J]. 航空动力学报, 2021, 36(10): 2029-2035. QI Bin, LIU Tao, YANG Caiqiong, et al. Test and analysis on high and low temperature on starting performance of a turboshaft engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(10): 2029-2035.

the fuel. Increasing the fuel flow within a certain range can improve the starting ability of the engine using RP-5 fuel. The research results provide a reference for high and low temperature tests of similar engines.

Key words: turboshaft engine; high and low temperature starting test; starting performance; fuel; viscosity

国内外学者对航空发动机高低温起动试验方法作了大量的研究,吴锋、郭昕等介绍了某型涡扇发动机的低温起动试验,讨论了低温试验的冷浸方法,提出考虑试验成本、安全性和有效性方面,以滑油温度达到低温要求为准开展低温冷浸试验^[1-2]。苗禾状、郭海红等介绍了航空发动机“三高”起动试验方法^[3-4]。胡九生等介绍了低温起动试验的流程方法^[5]。国内外同类的高低温起动试验,保温时间并未严格按照国军标规定10h执行,而是针对具体被试发动机、燃滑油牌号及使用对象的差异进行裁剪^[6-8]。刘伟、任智勇等研究了低温对涡轴发动机点火边界以及温升效应对发动机起动性能的影响^[9-10]。蔡建兵等研究了涡轴发动机起动过程扭矩的确定方法^[11-12]。汪涛等研究了低温环境对涡轴发动机性能的影响以及低温环境下涡轴发动机起动控制规律和相关故障分析^[13-14]。朴英通过数值仿真和试验研究了涡轴发动机起动过程的影响因素^[15]。

RP-3号航空煤油闪点低、黏度小,通常适用于我国陆基战斗机、运输机、直升机以及民航飞机;RP-5号航空煤油闪点高,低温下黏度大,通常适用于海军舰载机^[16]。高空台试验通常采用RP-3号燃油,而采用RP-5号燃油的高低温试验还从未开展,缺少对RP-5号燃油高低温特性的研究。

鉴于高空模拟试车台的技术优势,为研究某型涡轴发动机高低温起动特性,在中国航空发动机集团有限公司四川燃气涡轮研究院高空台进行了该型涡轴发动机的高低温起动试验,获得了高低温环境条件下该型发动机起动特性。这是高空台首次开展采用RP-3和RP-5航空煤油的涡轴发动机高低温起动性能对比试验,所得结论对高低温环境条件下的涡轴发动机起动试验研究具有一定的工程应用价值,可以为高低温试验提供相关参考。

1 试验方法介绍

高低温起动试验,发动机起动前,发动机需进行保温。参考同类试验方法,本文高低温起动试验,当滑油温度达到规定温度,均保温4h后再进行起动。本次试验采用燃油加降温系统供给高低温燃油;为避免高低温气流对测功器造成影响,发动机安装保温罩,保温罩从前室与二股流供气管道进气,可以将保温罩内的空气温度调节到规定的温度,实现对发动机周围环境的升、降温与保温;当发动机滑油箱温度达到保温要求温度时,调节并保持发动机环境压力至对应高度,保持发动机保温温度,并开始保温计时,达到相应的保温时间后进行高低温起动试验。图1为该型涡轴发动机在高空舱内布局示意图。

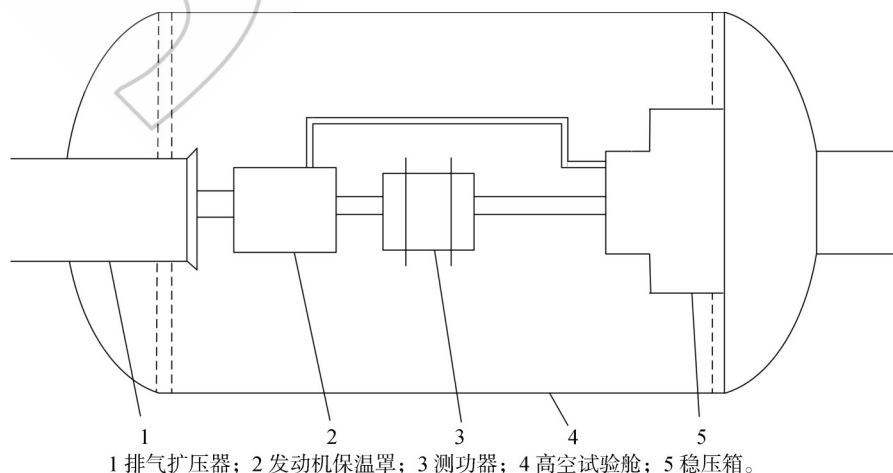


图1 发动机在高空试验舱内布局示意图

Fig.1 Sketch of engine in altitude test cell

2 试验结果与分析

2.1 降温与保温过程

图2为低温起动试验发动机燃气涡轮后温度 t_{45} 、滑油温度 t_{oil} 和燃油温度 t_{fin} 的降温 and 保温过程,横坐标 x 表示时间。从图2可以看出,经过1 h降温后, t_{45} 、 t_{oil} 和 t_{fin} 降至约 -35°C 。 t_{fin} 采用专用的燃油加降温系统降温, t_{45} 降温较 t_{oil} 稍快,这是由于滑油的降温需经历发动机本体吸热和滑油中过饱和水的凝结过程^[17]。降到规定温度后,保温4 h,保温过程中 t_{45} 、 t_{oil} 和 t_{fin} 温度波动范围为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。保温完成后,发动机进行起动机扭矩试验和高低温起动试验。

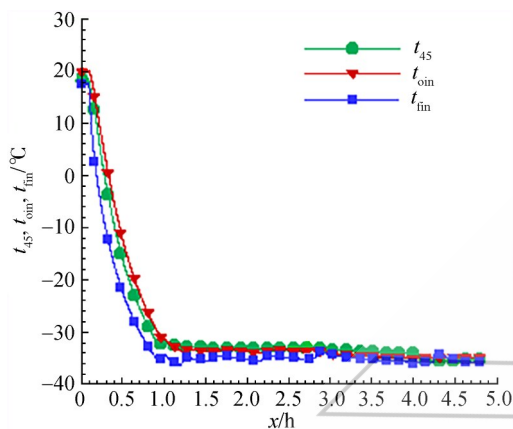


图2 低温冷浸历程曲线

Fig.2 Curves of cold soak process at low temperature

2.2 不同温度下带转特性

为研究温度对发动机带转特性的影响,本文选取了高低温共5个温度点,利用发动机冷运转数据进行对比分析。为排除发动机冷机和热机的影响,在发动机滑油温度到达规定温度后,均保温4 h再进行冷运转。试验结果如图3所示,图中 t_{sch} 表示发动机环境温度。从图3可以看出,随着环境温度降低,发动机带转转速显著降低,转速上升速率降低;起动机脱开后,转子自转时间明显缩短,转速下降速率升高。 55°C 温度下,带转转速 N_g (燃气涡轮相对物理转速)最高为23%,转子自转时间约为27 s; -40°C 温度下,带转转速 N_g 最高为16%,转子自转时间约为5 s。

因发动机起动机扭矩无法直接测量,工程上通常采用冷运转数据计算起动机扭矩,计算方法为:按起动机脱开时刻为分界线进行计算,可以获得发动机在起动机脱开前 N_g 的变化率 dN_{g1}/dt 和起动机脱开后 N_g 的变化率

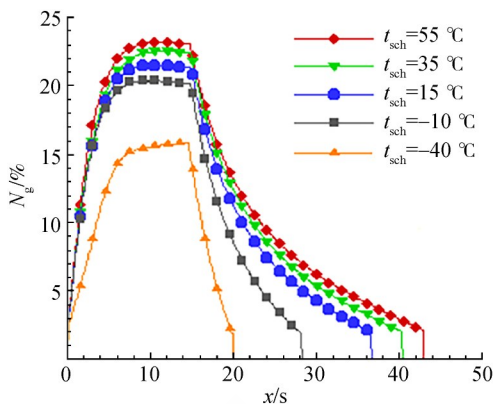


图3 不同温度下带转转速对比曲线

Fig.3 Comparison curves of belt speed at different temperatures

dN_{g2}/dt ,根据转子动力学关系,起动机脱开前起动机轴上的净力矩 ΔM 表达式如下^[18]:

$$\Delta M = i \times J \times \frac{2\pi}{60} \times \frac{dN_{g1}}{dt} \quad (1)$$

式中 J 为起动机带转的所有转动件相对于起动机轴的有效转动惯量; i 为起动机转速与燃气发生器转子转速的传动比。按式(2)可以得到起动机脱开后起动机轴上的阻力矩 M

$$M = -J \times i \times \frac{2\pi}{60} \times \frac{dN_{g2}}{dt} \quad (2)$$

按式(3)计算可得到起动机扭矩 M_{all}

$$M_{all} = \Delta M + M \quad (3)$$

各温度下,起动机脱开后电动机轴上的阻力矩如图4所示,随着温度降低阻力矩显著增大。这是由于温度越低,滑油黏度越大,转子摩擦阻力越大。图5为不同温度下的电动机扭矩计算结果,除 -40°C 温度外,其余温度各转速下,电动

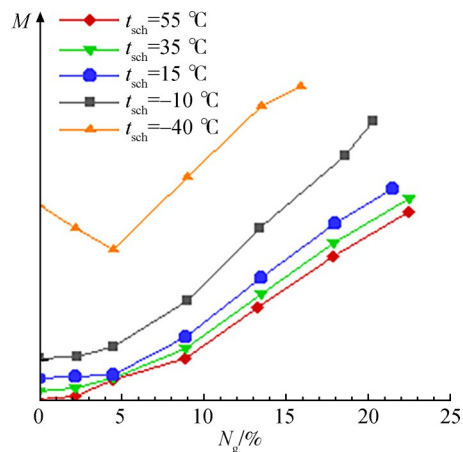


图4 不同温度下阻力矩对比曲线

Fig.4 Comparison curves of resistance torque at different temperatures

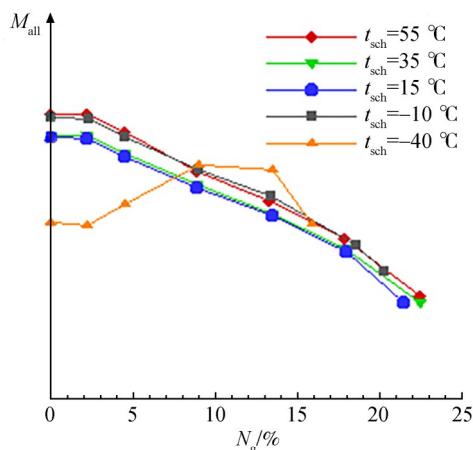


图5 不同温度下电动机扭矩对比曲线

Fig.5 Comparison curves of electric motor torque at different temperatures

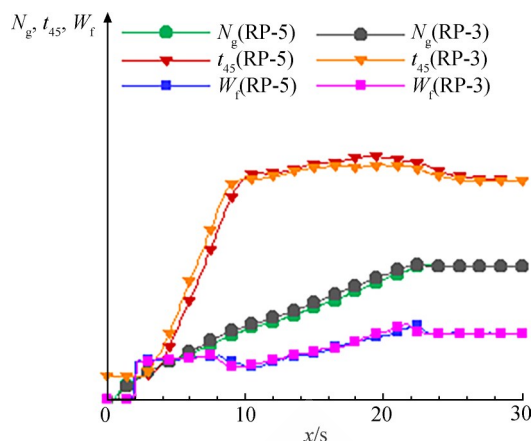
机扭矩基本一致,而 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下,小转速状态的电动机扭矩明显异常(较其余温度点低)。根据起动电动机功率输出特性,电动机带转过程中,电流迅速(约为 0.2 s)上升到最大后再逐渐减小,而电动机电源电压基本稳定在 28 V 左右,因此带转过程中电动机输出扭矩应逐渐减小。图5中其余温度计算结果符合这种输出特性。

按式(3)电动机扭矩计算方法,认为相同转速下,燃气涡轮转子自转阶段阻力矩和电动机带转阶段阻力矩相等,该方法存在一定局限性。当发动机滑油温度极低时,滑油黏度迅速增大,根据文献[9]提供的试验数据, $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下滑油运动黏度是 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的近77倍。本文分析认为,电动机带转初始阶段转子阻力较大;而电动机脱开后,燃气涡轮转子经过约 40 s 运转,此时转子周围滑油温度已上升,黏度下降,摩擦阻力减小,燃气涡轮转子灵活性增大,在低转速下,自转阶段阻力矩小于带转初始阶段。因此,极限低温条件下,按式(3)计算的低转速电动机扭矩偏小。

2.3 RP-3和RP-5燃油对发动机起动性能的影响

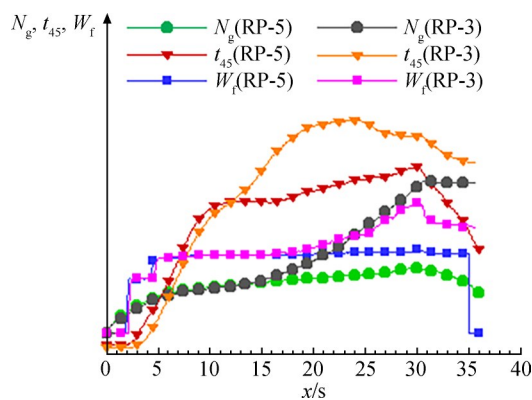
为了研究RP-3和RP-5燃油对发动机起动性能的影响,本文开展了采用两种燃油的高低温起动性能对比试验。发动机起动前均在相应温度保温 4 h 。图6为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下采用两种燃油的起动过程对比,图中 W_f 表示发动机燃油流量。从图中可以看出,当燃油流量一致时,燃气涡轮后转速 N_g 和燃气涡轮后温度 t_{45} 上升斜率基本一致,起动时间一致,说明 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下,采用RP-3和RP-5燃油发动机起动性能相当。

该型涡轴发动机起动供油分为3个阶段,第1

图6 RP-3和RP-5起动过程对比曲线($t_{sch}=55\text{ }^{\circ}\text{C}$)Fig.6 Comparison curves of RP-3 and RP-5 starting process ($t_{sch}=55\text{ }^{\circ}\text{C}$)

阶段为固定供油段,该阶段燃油流量不进行任何修正和限制;第2阶段为开环供油段,根据发动机进口温度和压力进行修正;第3阶段为闭环供油段,根据 N_g 加速率闭环供油。

图7为 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下采用两种燃油的起动过程对比,从图中可以看出,在起动初始阶段供油量一致, t_{45} 和 N_g 上升速率基本一致。采用RP-5燃油, N_g 上升到 20% 左右, t_{45} 上升缓慢,导致 N_g 无法达到闭环供油转速,因此供油量上不去,电动机脱开后, N_g 迅速下掉,最终起动失败;采用RP-3燃油,当进入开环供油段后, t_{45} 上升迅速, N_g 到达闭环供油转速后,供油量增加, t_{45} 和 N_g 迅速爬升,最终成功起动到慢车。

图7 RP-3和RP-5起动过程对比曲线($t_{sch}=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)Fig.7 Comparison curves of RP-3 and RP-5 starting process ($t_{sch}=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

为分析发动机采用RP-5燃油在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下起动失败的原因,本文对比了RP-3和RP-5燃油在不同温度下的黏度值,如表1^[16]所示,其中

RP-5 燃油 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的黏度 $6.14\times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$ 为本文试验用油实测值。低温下 RP-5 燃油的黏度约为 RP-3 燃油的黏度的 2 倍,温度越低,黏度差别越明显。

表 1 RP-3 和 RP-5 燃油在不同温度下的黏度值
Table 1 Viscosity values of RP-3 and RP-5 fuel at different temperatures

温度/ $^{\circ}\text{C}$	黏度/ $10^{-6}\text{ (m}^2/\text{s)}$	
	RP-3	RP-5
-40	5.84	11.30
-20	3.27	6.14
0	2.14	
20	1.48	2.02
40		

本文分析认为采用 RP-5 燃油起动失败的原因如下:在低温起动过程中,RP-5 燃油温度低,黏度大,燃油雾化效果差,同时发动机进气温度低,燃油着火相对困难,燃烧情况差,燃烧室联焰不佳,起动过程中发动机喷管喷出大量烟雾和火焰。虽然涡轮后温度有所上升,但燃烧室主喷嘴可能并未全部点燃,部分油气混合物可能在燃气涡轮后才燃烧,所以起动过程中能看到发动机喷管喷出大量火焰,造成燃气涡轮剩余功不足,难以维持发动机转速爬升,最终掉转,起动失败。

2.4 低温起动解决方案

为了研究该型发动机采用 RP-5 燃油低温起动的极限温度,解决发动机在低温下起动失败的问题,本文提出了 4 种解决方案:①增加起动阶段供油量;②增加起动电动机电源电压,提高带转转速;③延长电动机带转时间;④延长点火时间。

图 8 为延长点火时间 5 s 和增加电动机带转时间 5 s 的起动过程。在 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下,两次起动均失败,其中延长点火时间后燃烧室未点燃,分析认为该型发动机在低温条件下,起动阶段可靠点火区间较窄,点火相对困难,一旦错过最佳的点火油气比范围,即使延长点火时间,也较难点燃。增加带转时间后, N_g 最大为 28%,虽然 t_{45} 有所上升,但燃烧室联焰不佳,与其他起动失败过程类似,涡轮热功明显不足,电动机脱开后, N_g 迅速下掉。

经过 4 项调整措施反复试验,该型发动机在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下温度采用 RP-5 燃油均不能成功起动。将发动机进气温度和环境温度均降至

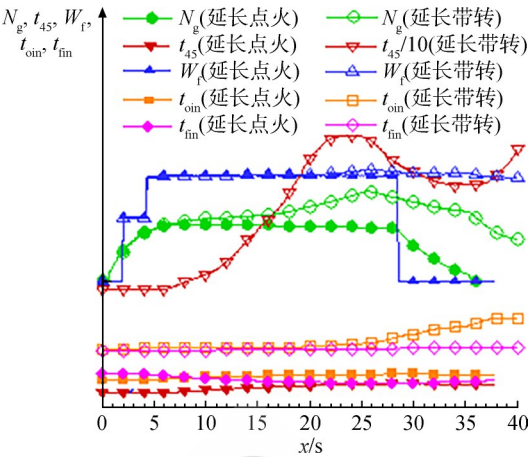


图 8 延长点火和带转起动过程曲线($t_{sch}=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Fig.8 Curves of starting process with extended ignition and driving time ($t_{sch}=-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

$-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 4 h 后再进行起动,发动机仍然起动失败,具体过程如图 9 所示(调整前), N_g 最高上升到 21%, N_g 上升速率低,无法达到闭环供油段,虽然 t_{45} 最高温度尚可,但结合 N_g 上升速率来看,此时燃气涡轮后温度高,可能燃气涡轮前温度仍然很低,部分油气混合物可能在燃气涡轮后才燃烧,这也和尾喷管喷出大量火焰和烟雾这一现象相吻合。

调整发动机固定供油和开环供油量,提高约 2 kg/h,并将起动电动机电源电压提高 2 V,在进气温度和环境温度均为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下,保温 4 h 后再次起动,发动机起动成功,具体过程见图 9 (调整后)。从图中可以看出,在固定供油段和开环供油段, t_{45} 上升速率明显提高,在 N_g 达到 30% 后,此时进入闭环供油段,供油量进一步增加, N_g 迅速爬升,最终发动机成功起动到慢车。

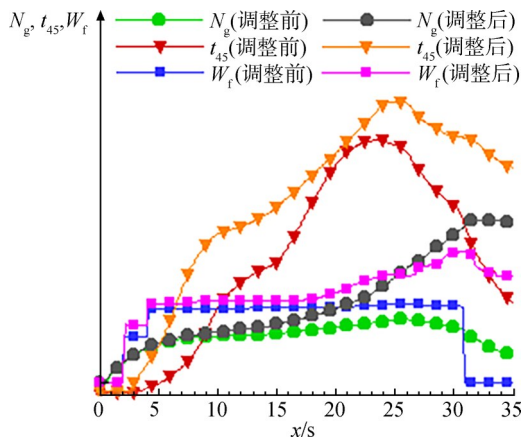


图 9 调整燃油前后起动过程对比曲线
Fig.9 Comparison curves of starting process before and after adjusting fuel

当进气温度和环境温度进一步降低,再增加供油量,发动机起动失败,进一步增加供油,起动过程中,发动机超温保护停车,说明采用RP-5燃油,进气温度和环境温度 -20°C 已是该型发动机低温起动的极限温度。值得注意的是,通过增加起动阶段燃油流量能拓宽发动机采用RP-5燃油的低温起动边界,但数控系统要增加相应的判据,否则发动机在高温条件下起动可能超温。

3 结 论

本文开展了某型涡轴发动机高低温起动试验,介绍了试验方法,对比了RP-3燃油和RP-5燃油对发动机起动性能的影响,通过调整燃油流量等措施摸索出了该型发动机低温起动极限温度,分析了低温起动失败的原因,主要结论如下:

1) 随着温度降低,滑油黏度增大,转子阻力矩增大,发动机带转转速和转子自转时间显著降低。

2) 利用自转阶段的阻力矩替代带转阶段的阻力矩,进而计算出起动电动机总力矩的方法,存在一定的局限性,在极限低温、低转速状态下,自转阶段的阻力矩小于带转初始阶段的阻力矩。

3) 高温下,采用RP-3燃油和RP-5燃油,发动机起动性能相当,而在低温下,则差别较大。该型发动机采用RP-3燃油能在 -40°C 环境下成功起动,而采用RP-5燃油,经过调油等措施最终只能在 -20°C 环境下成功起动。

4) 在一定范围内,通过增加燃油流量,能改善发动机采用RP-5燃油的起动能力,但要避免高温起动时发动机起动超温等问题。

参考文献:

- [1] 吴锋,龚小琦,乔松松.高空舱内涡扇发动机低温起动试验[J].航空动力学报,2013,28(10):2348-2354.
WU Feng, GONG Xiaoqi, QIAO Songsong. Low temperature start of turbofan engine in altitude test cell[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(10): 2348-2354. (in Chinese)
- [2] 郭昕,杨志军.航空发动机高、低温起动及高原起动试验技术探讨[J].航空动力学报,2003,18(3):327-330.
GUO Xin, YANG Zhijun. Study of aeroengine starting tests at high/low temperatures and at plateau[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(3): 327-330. (in Chinese)
- [3] 苗禾状,王朝蓬,朱哲,等.航空发动机“三高”起动试验研究[J].工程与试验,2015,55(1):38-42.
MIAO Hezhuang, WANG Zhaopeng, ZHU Zhe, et al. Experimental research on aeroengine starting at high/low temperature and at plateau[J]. Engineering and Test, 2015, 55(1): 38-42. (in Chinese)
- [4] 郭海红,潘旭,张志舒.非标准大气条件下航空发动机地面起动性能[J].航空动力学报,2013,28(6):1286-1290.
GUO Haihong, PAN Xu, ZHANG Zhishu. Aero-engine ground starting performance at non-standard atmosphere[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(6): 1286-1290. (in Chinese)
- [5] 胡九生,赵春光.军用涡喷涡扇发动机低温起动试验的优化[J].燃气涡轮试验与研究,2002,15(1):14-19.
HU Jiusheng, ZHAO Chunguang. Optimization of cold start test on military turbojet/turbofan engines[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2002, 15(1): 14-19. (in Chinese)
- [6] 张媛,苗禾状.某型涡轴发动机地面低温起动技术研究[J].航空发动机,2011,37(6):34-36.
ZHANG Yuan, MIAO Hezhuang. Investigation on ground-start of a turboshaft engine in low temperature[J]. Aeroengine, 2011, 37(6): 34-36. (in Chinese)
- [7] KAMYKOWSKI R. Turbine engine cold soak start testing techniques[R]. AIAA 95-3076, 1995.
- [8] GRUBER H. Cold start optimization on a military jet engine [R]. Advisory Group for Aerospace Research and Development, AGARD CP-480 8-1-5, 1993.
- [9] 刘伟,黄开明,王旭,等.低温对涡轴发动机起动性能影响的试验与分析[J].航空动力学报,2019,34(6):1282-1289.
LIU Wei, HUANG Kaiming, WANG Xu, et al. Test and analysis on influence of low temperature on starting performance of turboshaft engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(6): 1282-1289. (in Chinese)
- [10] 任智勇,王俊琦,邓晓政.温度对涡轴发动机起动性能影响的试验研究[J].燃气涡轮试验与研究,2019,32(3):13-18.
REN Zhiyong, WANG Junqi, DENG Xiaozheng. Experimental study of the effects of temperature on turboshaft engine starting performance[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2019, 32(3): 13-18. (in Chinese)
- [11] 蔡建兵,尹泽勇,熊焰,等.一种确定燃气涡轮涡轴发动机起动最小所需扭矩的工程办法[J].航空动力学报,2005,20(5):736-739.
CAI Jianbin, YIN Zeyong, XIONG Yan, et al. An engineering method of determining turboshaft engine minimum required torque for starting[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(5): 736-739. (in Chinese)
- [12] 蔡建兵,李建华,钟建平,等.某涡轴发动机起动不成功分析[J].航空动力学报,2014,29(1):169-174.
CAI Jianbing, LI Jianhua, ZHONG Jianping, et al. Analysis of a turboshaft engine starting failure[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(1): 169-174. (in Chinese)
- [13] 汪涛,王朝蓬,王俊琦.低温环境对某型涡轴发动机起动性能影响分析研究[J].试验分析,2017,25(2):87-89.
WANG Tao, WANG Zhaopeng, WANG Junqi. Analysis of the influence of low temperature on starting performance of the turbo-shaft engine[J]. Experimental Analysis, 2017, 25(2): 87-89. (in Chinese)
- [14] 汪涛,赵海刚,姜健.某型涡轴发动机起动控制规律研究及

- 故障分析[J].航空科学技术,2016,27(2):20-24.
- WANG Tao, ZHAO Haigang, JIANG Jian. Study on starting control law and trouble shooting of turboshaft engine[J]. Aeronautical Science and Technology, 2016, 27(2):20-24. (in Chinese)
- [15] 朴英. 航空燃气涡轮发动机起动性能分析[J]. 航空动力学报, 2003, 18(6):777-782.
- PIAO Ying. An analysis of the starting characteristics of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(6):777-782. (in Chinese)
- [16] 任伟, 王涛. RP-3 和 RP-5 煤油对飞机动力装置和燃油系统试飞的影响[J]. 工程与试验, 2014, 54(1):49-51.
- REN Wei, WANG Tao. Effects of RP-3 and RP-5 kerosene on flight test of aircraft power plant and fuel system[J]. Engineering and Test, 2014, 54(1):49-51. (in Chinese)
- [17] 屈元元. 低温下航空燃油中水的存在形式和特性研究[J]. 科技视界, 2018, 5(2):44-46.
- QU Yuanyuan. Study on the existence form and characteristics of water in aviation fuel at low temperature[J]. Science and Technology Vision, 2018, 5(2):44-46. (in Chinese)
- [18] 廉筱纯, 吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2005:315-331.

(编辑:王碧珺)