

低温对涡轴发动机起动性能影响的试验与分析

刘伟¹, 黄开明¹, 王旭¹, 黄兴¹, 贾琳渊²

(1. 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;
2. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 712002)

摘 要: 为研究低温对涡轴发动机起动性能的影响,对国军标的适用与裁剪进行了讨论,开展了低温起动试验,试验以滑油箱内的滑油温度达到 -34°C 算起,冷浸 4 h 后进行起动,分析了低温起动过程的阻力矩、剩余扭矩、点火性能和温升效应对起动性能的影响。结果表明: -34°C 条件下的初始阻力矩是 25°C 条件下的 2.25 倍,至点火转速附件阻力矩降低为 1.53 倍;温度越低,点火边界对应的索尔太平均直径(SMD)越小,燃烧室点火边界越窄;温升效应对低温起动性能的影响显著,考虑温升效应的起动时间延长约 25%。热空气加温和起动滑油断油可以降低起动初始阻力矩,改善点火性能,从而提高了低温起动性能。研究结论对同类发动机开展低温起动试验、起动供油规律优化及相关研究提供了参考。

关 键 词: 涡轴发动机; 低温起动试验; 起动性能; 阻力矩; 点火性能; 温升效应

中图分类号: V231.2 **文献标志码:** A

Test and analysis on influences of low temperature on starting performance of turboshaft engine

LIU Wei¹, HUANG Kaiming¹, WANG Xu¹,
HUANG Xing¹, JIA Linyuan²

(1. Hunan Aviation Powerplant Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Zhuzhou Hunan, 412002, China;
2. School of Power and Energy,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To investigate the influences of low temperature on turboshaft engine starting performance, application and tailoring of national military standard were discussed. Low temperature starting tests were conducted at -34°C based on oil temperature in four-hour cold soak process. The influences of resistance torque, residual torque, ignition performance and warm-up effect on cold starting performance were investigated. Results showed that, initial resistance torque under -34°C was 2.25 times of 25°C and 1.53 times near the ignition. The Sauter mean diameter (SMD) was smaller for ignition boundary in the lower temperature. The influences of warm-up effect on low temperature starting was significant and the start-up time with warm-up was extended by about 25%. Heating up on the engine and cutting off oil lubricating can reduce initial resistance torque and improve the ignition performance, thus improving the low temperature starting performance. The conclusion provides a

收稿日期: 2018-08-08

作者简介: 刘伟(1987—),男,工程师,硕士,主要从事航空涡轴发动机总体性能设计。

引用格式: 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 influences of low temperature on starting performance of turboshaft engine[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(6): 1282-1289.

reference for the low temperature starting test, starting fuel supply control law optimization and research of similar engines.

Key words: turboshaft engine; low temperature starting test; starting performance; resistance torque; ignition performance; warm-up effect

随着直升机在全疆域和全气候条件使用要求的逐步提高,对航空涡轴发动机的起动性能要求也越来越高。涡轴发动机的快速、可靠起动对保证军用直升机作战效能至关重要^[1-2]。发动机起动过程的影响因素繁多且复杂,要准确描述发动机的起动过程是非常困难的^[3-5],试验是一种有效地研究手段,对此国内外学者或相关机构已经开展了大量的研究工作。

美国空军于1953年在阿诺德中心建立了世界上最大的高空模拟试验舱,其试验能力覆盖了航空发动机的使用包线,可以模拟的最大海拔高度为30480 m,最大飞行速度为 $Ma=3.8$,环境温度范围为 $-62^{\circ}\text{C}\sim 1371^{\circ}\text{C}$,提供的最大空气流量为680 kg/s, F110、F119、F135、PW4000、GP7200和Trent800等军民用发动机在此完成了一系列高空模拟试验^[6]。在此基础上,Kamykowski提出了F110-GE-129发动机的低温起动冷浸试验方法,按照其型号规范要求,该型发动机应分别采用JP-4燃油进行 -54°C /冷浸10 h、JP-8燃油进行 -40°C /冷浸10 h的低温冷浸试验。但实际中考虑到燃滑油特性,当检测到发动机轴承温度达到预定温度后,继续冷浸0.5 h开展试验^[7]。Gruber介绍了斯贝MK202和RB199发动机低温起动试验设备、试验方法和试验结果,重点讨论了低温起动试验方法的优化问题^[8]。Naegeli等研究了不同温度对喷嘴特性及燃油雾化质量等的影响^[9]。吴锋等介绍了某型涡扇发动机的低温起动试验,讨论了在高空舱进行发动机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^[10]。朴英采用数值仿真研究了涡扇发动机起动过程的影响因素,结果表明起动机输出功率的影响大于发动机本身的影响^[11]。

然而,上述研究工作主要集中在涡喷、涡扇发动机的起动试验或理论研究,起动特性变化规律视发动机不同各有不同特点,涡轴发动机在部件特性、尺寸间隙、温升效应等方面存在较大差异^[12],对其低温起动试验及研究尚鲜有经验可循。

为此,本文以某型航空涡轴发动机为平台,开展了一 35°C /冷浸4 h的低温起动试验,研究了低

温下压气机扭矩(压气机叶片上产生气动力所需的扭矩)、摩擦阻力矩(克服轴承摩擦力、附件损耗所需的扭矩)、剩余扭矩、点火性能和温升效应对起动性能的影响,为同类发动机低温起动试验的开展及研究提供了参考。

1 试验方法介绍

国军标^[13]对发动机低温起动做出如下规定:“使用型号规范规定的滑油工作的发动机,应在 -54°C 的环境中至少冷浸10 h,从型号规范规定的那一部位达到 -54°C 算起,在进气温度和燃油温度均为 -54°C 条件下起动发动机,且试验高度要求从海平面到起动包线规定的最高高度”。需要指出,国军标的要求是基于严重的,而发动机实际可能遭遇的环境提出的,然而发动机遭遇的低温环境及使用时间在很大程度上取决于具体的发动机和直升机,因此冷浸温度和时间可在国军标相关要求的基础上进行适应性裁剪。参考国外同类的低温冷浸试验,冷浸温度和时间也并未严格按照 -54°C 和10 h的要求执行,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,并在发动机型号规范中明确^[8]。

国际上,一般采用轴承温度作为冷浸温度是否满足要求的判断依据,但无论是台架试验还是装机试飞,轴承温度均难以测量。本次试验通过压气机机组供气,经降温系统和自动调压系统将大气环境调节至海平面、静止、 -34°C 条件,以滑油箱内的滑油温度达到 -34°C 算起,然后继续冷浸4 h后进行起动,此时基本可以判断轴承温度也达到了预定低温的要求。

2 试验结果与分析

2.1 低温冷浸历程

图1所示为低温冷浸历程中,大气温度 t_h 、燃气涡轮后温度 t_5 、滑油温度 t_{oil} 和燃油温度 t_{fuel} 的降温过程。

从图1可以看出,经过0.5 h后, t_h 和 t_5 降至预定温度,而 t_{oil} 和 t_{fuel} 的降温过程缓慢,这是由于燃滑油的降温需经历发动机本体吸热^[11]和燃滑

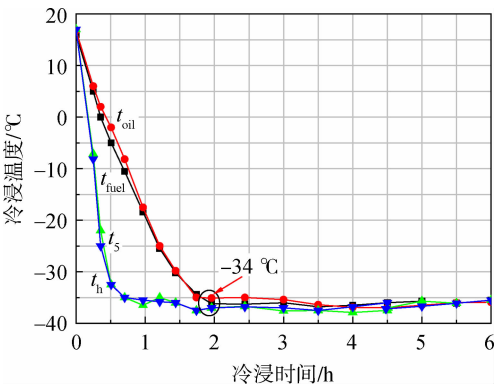


图 1 低温冷浸历程曲线

Fig. 1 Curve of cold soak process at low temperature

油中过饱和水凝结过程^[14]。经过 2 h,燃滑油温度降低至预定温度,继续冷浸后温度波动范围为 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$,此时表明发动机已基本冷透。

2.2 低温起动特性

低温起动试验的目的是验证被试发动机的低温起动性能。为了对比说明,本文同步录取了大气温度 t_h 为 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下的起动曲线,获得了表征发动机起动性能的燃气涡轮后温度 t_5 变化曲线、燃气发生器相对转速 n_g 变化曲线和动力涡轮相对转速 n_p 变化曲线,分别见图 2~图 4。为排除起动机输出扭矩差异对发动机自身起动特性的影响,试验前调节起动机供气参数保持一致。

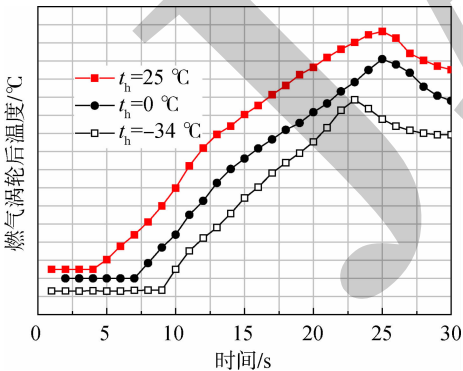


图 2 燃气涡轮后温度变化曲线

Fig. 2 Variation curve of gas turbine exhaust temperature

从图 2 可以看出,随着 t_h 降低,点火时间变长,达到 t_5 峰值的时间缩短,峰值温度降低。分析原因如下:一是低温下滑油运动黏度增加,摩擦阻力矩变大,相同输出扭矩的起动机的带转加速率降低,造成点火时间延长;二是低温下燃油运动黏度增加,燃油的流动性和雾化质量变差,燃烧室联焰缓慢,造成点火时间延长^[15];三是该型发动机起动供油过程由数控系统按照转速上升分 3 个

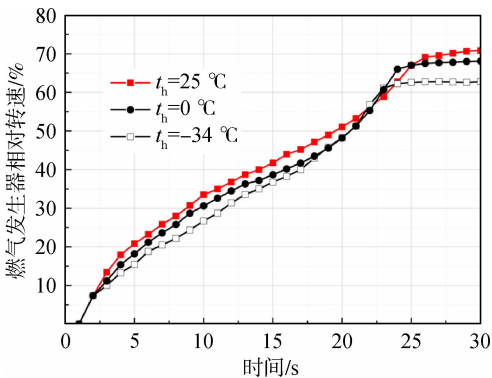


图 3 燃气发生器相对转速变化曲线

Fig. 3 Variation curve of gas generator relative rotation speed

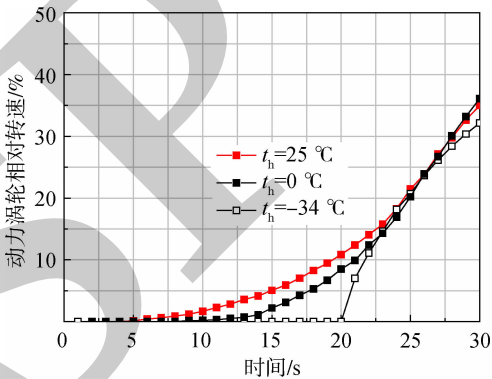


图 4 动力涡轮相对转速变化曲线

Fig. 4 Variation curve of power turbine relative rotation speed

阶段控制,第一阶段 n_g 较低时按开环供油,第二阶段按换算转速 n_{ge} 加速率闭环供油,第三阶段按 n_p 闭环供油,由于 t_h 越低,开环供油阶段结束时对应的 n_{ge} 越高,使第二阶段的目标加速率越大,供油量越大,因此第二阶段的加速时间会缩短。

从图 3 可以看出,起动前阶段,转子加速度随 t_h 降低而减小;起动后阶段,转子加速度随 t_h 降低而增加,但起动总时间基本相同。这是由于在达到最小稳定工作转速以前,涡轮扭矩小于阻力矩(包括压气机、附件、轴承和风阻损失消耗的扭矩),剩余扭矩随 n_g 升高而减小,导致转子加速度减小;在达到最小稳定工作转速后,涡轮扭矩开始大于阻力矩,剩余扭矩随 n_g 升高而增加,使转子加速度增大。温度越低这种影响就越明显,且会导致最小稳定转速越靠前,对此文中第 3.2 节和第 3.3 节进行了深入分析。从图 3 还可以看出,温度越低地面慢车状态的稳定工作转速越低。

从图 4 可以看出, $-34\text{ }^{\circ}\text{C}$ 条件下动力涡轮转子存在明显“卡滞”现象。动力涡轮与燃气发生器

不存在直接的机械连接,其阻力矩不会直接作用于燃气发生器转子,但 n_p 变化却会对燃气发生器的流通能力和燃气涡轮的做功能力产生影响,进而影响到剩余扭矩。

3 低温对涡轴发动机起动性能的影响分析

3.1 涡轴发动机起动过程简介

涡轴发动机的起动过程是指燃气发生器相对转速 n_g 由静止状态加速到地面慢车状态^[16],主要分成 3 个阶段:起动机带转阶段、点火带转阶段和发动机独立加速阶段。在起动带转阶段,起动机获取能量后将扭矩传递给燃气发生器转子,该阶段阻力矩随着 n_g 增加而增大,动力涡轮克服阻力矩开始转动。起动机输出扭矩在起动开始后不久便达到峰值,这对起动带转阶段有利,但冲击扭矩过大会对起动链造成损伤,为此工程上通过缓开引气控制阀,逐渐增加起动机的输出扭矩。点火后涡轮开始产生功率,且阻力矩会迅速降低,但是在达到最小稳定转速前,涡轮功率仍小于压气机、附件、轴承和风阻损失的消耗功率,发动机自身并不具备加速的潜力,仍需起动机带转,点火后压气机工作线会出现急剧上移,为避免喘振和超温,起动机输出功率仍在不断增加,通常会在 50% 的额定转速时达到功率峰值,因此起动机大小选取、导叶调节规律和起动供油规律制定在这一阶段显得尤为重要。起动机脱开后,涡轮开始独立带转发动机加速至地面慢车状态,该阶段一般会增加供油量以尽可能提高剩余功率,缩短起动时间。

根据转子动力学关系,发动机转子轴上的扭矩平衡关系表达式如下^[17]:

$$\Delta M = J \times \frac{\pi}{30} \times \frac{dn_g}{dt} \quad (1)$$

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; ΔM 为燃气发生器轴上的剩余扭矩。

起动过程 3 个阶段的剩余扭矩分别表示为

$$\Delta M_I = M_{st} - M_c \quad (2)$$

$$\Delta M_{II} = M_{st} + M_t - M_c \quad (3)$$

$$\Delta M_{III} = M_t - M_c \quad (4)$$

式中 M_{st} 、 M_t 、 M_c 分别表示起动机扭矩、涡轮扭矩、阻力矩(包括压气机机扭矩、摩擦阻力矩和附件扭矩等)。

不考虑机械效率的影响,由式(2)~式(4)可得各阶段起动时间 τ ,即

$$\tau_{st, I} = \frac{\pi}{30} \int_0^{n_I} \frac{J}{M_{st} - M_c} dn_g \quad (5)$$

$$\tau_{st, II} = \frac{\pi}{30} \int_0^{n_{II}} \frac{J}{M_{st} + M_t - M_c} dn_g \quad (6)$$

$$\tau_{st, III} = \frac{\pi}{30} \int_0^{n_{III}} \frac{J}{M_t - M_c} dn_g \quad (7)$$

则整个起动过程总时间为

$$\tau_{st} = \tau_{st, I} + \tau_{st, II} + \tau_{st, III} \quad (8)$$

从式(5)~式(8)可知,起动各阶段 M_{st} 、 M_t 、 M_c 的变化特性,首先对各阶段的 ΔM 产生影响,进而对起动时间产生影响,而点火时间会直接影响涡轮投入工作的时间,从而影响起动时间。

3.2 低温对阻力矩的影响

发动机的阻力矩特性可通过试验进行实测,工程上一般利用冷运转数据获得发动机阻力矩特性,冷运转时起动机脱开后,由于阻力矩的作用,使得 n_g 下降,减速率反映了发动机阻力矩的大小。通过计算发动机冷运转时起动机脱开后 n_g 的变化率,来获得发动机在最小平衡转速以下的阻力矩^[18]。国外也采用类似方法得到高温、常温 and 低温下的发动机阻力矩特性,再根据测得的发动机阻力矩特性等选择合适的起动机,起动机脱开后发动机的 M_c 表达式如下:

$$M_c = -J \times \frac{\pi}{30} \times \frac{dn_g}{dt} \quad (9)$$

为了获得低温对阻力矩的影响,本文首先录取了 -34°C 与 25°C 条件下发动机冷运转时起动机脱开后的 n_g 变化曲线,见图 5,然后根据式(9)分别计算获得 -34°C 条件下的阻力矩 $M_{c, t_h = -34^\circ\text{C}}$ 和 25°C 条件下的阻力矩 $M_{c, t_h = 25^\circ\text{C}}$,并进行了对比,见图 6。

从图 5 可以看出, -34°C 条件下 n_g 存在一定“卡滞”现象,相对 25°C 条件下,减速率明显变大。

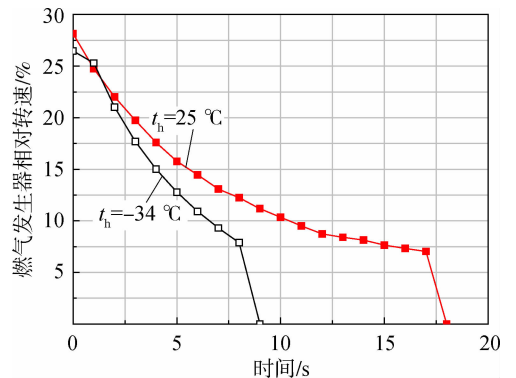


图 5 冷运转脱开后的 n_g 变化率

Fig. 5 Variation rate of n_g after starter shut off

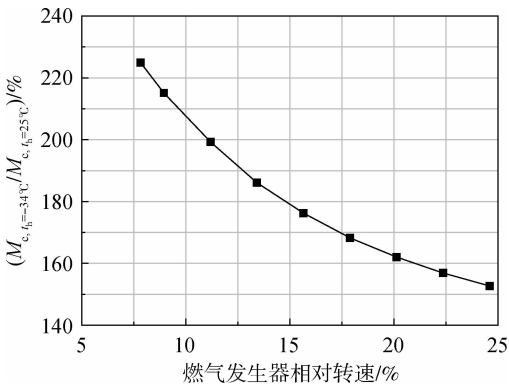


图 6 不同温度下阻力矩对比曲线

Fig. 6 Comprison curve of resistance torque with different temperatures

从图 6 可以看出， -34°C 条件下发动机初始阻力矩是 25°C 条件下的 2.25 倍，这是由于起动初始阶段主要受摩擦阻力矩影响，而 t_h 越低滑油运动黏度越大，摩擦阻力矩越大，该阶段对起动机的影响大于对发动机自身的影响^[11]。据实测， -34°C 条件下滑油运动黏度是 25°C 条件下的近 77 倍，采用文献[15]提供了摩擦阻力矩与滑油运动黏度的关系式进行计算，计算值与本次试验值基本吻合，验证了该结论。从图 6 还可以看出，当 n_g 增加至点火转速附近时， -34°C 条件下的阻力矩降低为 25°C 条件下的 1.53 倍，说明环境温度的影响减弱， n_g 增加对滑油起到预热效果，使摩擦阻力矩降低。因此，低温起动前进行预先冷运转可以减小初始阻力矩，缩短起动时间。

3.3 低温对剩余扭矩的影响

从式(2)~式(8)可知，剩余扭矩 ΔM 直接决定了起动时间，其中压气机扭矩是指压气机叶片上产生气动动力所需的扭矩，表征压气机的负荷水平，而压气机负荷取决于流量、压比和效率^[19]。

在不考虑附件功率提取时，发动机功率平衡表达式如下：

$$H_{\text{pacc}} = L_t - L_c \tag{10}$$

式中 H_{pacc} 表示剩余功率； L_t 表示涡轮功率； L_c 表示压气机功率。

$$L_t = W_{g4} c_{pg} t_{t4} \left[1 - \frac{1}{\pi_t^{(\gamma-1)/\gamma}} \right] \eta_t \tag{11}$$

$$L_c = W_{a2} c_{pa} t_{t2} \left(\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) / \eta_c \tag{12}$$

联合式(10)、式(11)和式(12)可得

$$H_{\text{pacc}} = W_{a2} T_{t2} \left\{ (1 + R_{fa}) c_{pg} \frac{t_{t4}}{t_{t2}} \left[1 - \frac{1}{\pi_t^{(\gamma-1)/\gamma}} \right] \eta_t - c_{pa} \left(\pi_c^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) / \eta_c \right\} \tag{13}$$

式中 c_{pg} 表示燃气比定压热容； c_{pa} 表示空气比定压热容； γ 表示空气或燃气比热比； R_{fa} 表示油气比 (fuel air ratio)。

由式(13)可知，在达到最小稳定工作转速前，通过降低 W_{a2} 和 π_c 可以减小 L_c ，从而增加了 H_{pacc} ；在最小稳定工作转速以后，通过增加空气流量 W_{a2} 、提高涡轮前温度 t_{t4} 、提高涡轮落压比 π_t 、降低压气机压比 π_c ，可以增加 H_{pacc} 。目前工程上一般采用导叶调节或级间放气等措施改变 L_c ，从而改善了起动性能。

为了获得 t_h 与 H_{pacc} 的定量关系，进一步分析如下，压气机换算流量 W_{a2c} 表达式为

$$W_{a2c} = \frac{W_{a2} \sqrt{t_{t2}/288.15}}{p_{t2}/101325} \tag{14}$$

当 n_{gc} 相同时，燃气发生器状态相似，根据相似原理， T_{t4}/T_{t2} 、 π_c 、 π_t 、 η_c 和 η_t 均保持不变，联合式(13)和式(14)可得

$$H_{\text{pacc}} \propto \sqrt{t_{t2}} \tag{15}$$

可见，在相同 n_{gc} 下， t_h 越低，压气机进口温度 t_{t2} 越低， H_{pacc} 越小，从而进一步解释了文中第 2.2 节的结论。鉴于发动机这一特性，目前传统的发动机起动供油规律采用了大气温度和压气机出口压力修正的修正方法，这种修正在低温冷机起动时效果较好，但在热机起动时，由于滑油温度高，摩擦阻力矩较小，有可能导致起动供油量偏大，引起起动喘振或超温，因此，考虑到不同“冷浸”温度下阻力矩或剩余扭矩的差异，可采用滑油温度替代大气温度对起动控制规律进行修正。

3.4 低温对点火性能的影响

燃油的运动黏度随温度下降而呈指数上升，据实测，当 t_{fuel} 低于 -20°C 时，燃油会出现“析蜡”现象。燃油运动黏度的上升大幅降低了雾化质量，进而减弱了点火能力和燃烧效率。针对燃油雾化质量对点火性能的影响，国内外相关学者已经进行了研究。Rao 等^[20-21]对最小点火能量展开了深入研究，揭示了气流速度、湍流强度、索尔太平均直径 (Sauter mean diameter, SMD, 量符号记为 D_{sm}) 等关键参数对最小点火能量的影响，其中 SMD 的影响最为显著。康尧等^[22]研究了旋流杯文氏管和套筒结构的变化对燃烧室的喷雾分布和粒径的影响，结果显示喷雾分布和粒径变化对燃烧室点火性能的影响最大。

然而，上述研究未给出低温对燃烧室点火边界及 SMD 的影响。为此，本文开展了相同马赫

数相同压力不同温度下的点火试验,得到 SMD 与燃烧室进口温度之间的变化规律,见表 1。从表中可以看出,点火边界上的 SMD 随温度降低而减小,这说明温度越低,燃烧室点火边界越窄,越容易出现点火失败,因此低温点火是燃烧室的关键考核点。

表 1 温度对点火边界 SMD 的影响
Table 1 Influence of temperature on SMD in ignition boundary

压力/MPa	马赫数	温度/℃	$D_{sm}/\mu m$
1.0	0.11	0.96	38.3
1.0	0.11	0.81	33.6
1.0	0.11	0.78	27.3

3.5 温升对起动性能的影响

发动机的起动性能还与起动前发动机的热状态有关,研究表明^[4],起动过程燃料的热能 60% 用于发动机加热,20% 用于驱动转子,10%~15% 用于零部件加热,4% 用于转子加速。根据相关研究结论,考虑温升效应和不考虑温升效应的起动时间变化约 25%,而温度越低温升效应的影响越显著。

图 7 所示为考虑温升效应和未考虑温升效应对发动机起动性能的影响。从图中可以看出,温升效应主要对起动的后阶段影响较大,这是因为发动机点火以后,涡轮前温度会迅速增加,热空气/燃气与发动机金属之间存在显著的净热流,而用于转子加速的能量相应减小。从图 7 还可以看出,若考虑温升效应的影响,地面慢车状态稳定工作转速发生变化, n_g 由 72% 下降为 70%。

另外,相对于涡喷、涡扇发动机,涡轴发动机

流道截面高度小、转速高、叶片相对径向间隙大,流动损失大。据实测^[23],涡轴发动机叶尖间隙每增加叶片高度的 1%,效率约降低 1.5%,根据式 (13) 可知,这也是影响起动剩余功率的重要因素。

4 改善低温起动性能的措施

4.1 热空气加温

从降低摩擦阻力矩、温升效应和改善点火性能出发,在低温起动前,采用热空气对滑油箱、燃烧室机匣、泵组件等进行加温,可以提高发动机的起动性能。某型涡轴发动机在 -35℃ 条件下进行了加温和不加温的起动对比试验,结果表明,加温 15 min 起动时间缩短了约 15%。

4.2 起动滑油断油技术

从降低低温起动的摩擦力矩出发,如果低温天冷机起动时,减少或阻止滑油进入发动机,则能够降低起动阻力矩,有利于提高低温起动性能。而且国军标^[13]规定,发动机应进行滑油中断试验,试验中滑油泵在其进口处吸入空气,发动机在中间功率状态工作 30 s,验证轴承的干运转能力。

目前,滑油断油技术已在汉胜公司研制的部分 APS 系列辅助动力装置上应用,并取得了较好效果,其工作原理见图 8。当检测到起动前滑油温度低于 -6.7℃ 时,断油电磁阀打开,使滑油泵进口放空,阻止滑油进入轴承;当转速达到 60% 后,电磁阀关闭实现滑油泵正常供油。同时,设置低温起动旁通阀,使高压滑油返回滑油泵入口。

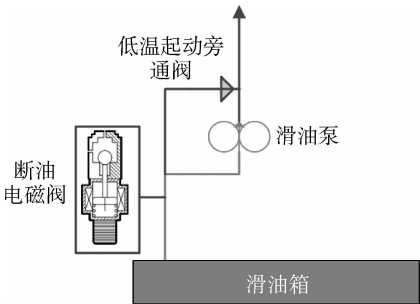


图 8 滑油断油工作原理
Fig. 8 Principle of cutting off oil lubricating

5 结 论

本文开展了涡轴发动机 -34℃/冷浸 4 h 的低温起动试验,结合对比试验,分析了低温对压气机阻力矩、摩擦阻力矩、点火性能和温升效应的影响,获得了低温对发动机起动性能的影响,主要结

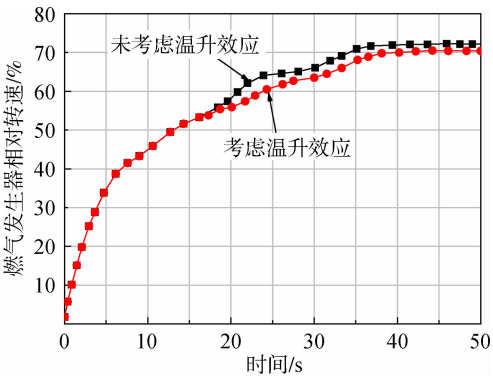


图 7 温升效应对起动性能的影响^[4]
Fig. 7 Influence of warm-up effect on starting performance^[4]

论如下:

1) 考虑到发动机个性差异、燃滑油特性及装机对象的使用条件,参考国外同类试验,发动机低温起动试验可在国军标基础上适应性裁剪;

2) 起动前冷浸温度越低,滑油运动黏度越大,起动阻力矩越大,转速增加对滑油起到预热效果,因此,低温天冷机起动时可考虑增加预先冷运转;

3) 起动前冷浸温度越低,对起动点火性能的影响越大,点火边界对应的索尔太直径 SMD 越小,越容易出现点火失败,因此,低温点火是燃烧室的关键考核点;

4) 考虑到不同冷浸温度下起动阻力矩的差异,为避免发动机低温天热机起动时发生喘振或超温,可采用滑油温度替代大气温度对起动供油规律进行修正;

5) 热空气加温和起动滑油断油可以降低起动阻力矩,改善点火性能,有效提高发动机低温起动性能。

参考文献:

- [1] MOHONMMAD H Z. Mini-turbojet engine test stand for starting test[R]. AIAA-2002-4052, 2002.
- [2] 郭海红,潘旭,张志舒.非标准大气条件下航空发动机起动性能[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)
- [3] 居海星,张海波,陈浩颖.一种通用涡轴发动机起动过程建模方法研究[J].推进技术,2017,38(6):1386-1394.
JU Haixing, ZHANG Haibo, CHEN Haoying. A Research on start-up modeling for turboshaft engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017, 38(6): 1386-1394. (in Chinese)
- [4] 黄开明,周剑波,刘杰,等.涡轴发动机起动过程的一种气动热力学实时模型[J].航空动力学报,2004,19(5):703-707.
HUANG Kaiming, ZHOU Jianbo, LIU Jie, et al. Thermodynamic model of turbo-shaft engine starting process[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(5): 703-707. (in Chinese)
- [5] 陈玉春,王朝蓬,黄兴鲁,等.功率提取法在涡喷发动机起动特性模拟及控制规律设计中的应用[J].航空动力学报,2010,25(6):1277-1283.
CHEN Yuchun, WANG Zhaopeng, HUANG Xinglu, et al. Application of power extraction method in starting process simulation and control law design of turbojet engines[J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 25(6): 1277-1283. (in Chinese)
- [6] LOMINAC J K, BOYTOS J F. Aeropropulsion environmental test facility[R]. Arnold Engineering Development Center, Air Force Security, AFS TN-19991130-098, 1998.
- [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] NAEGELI D W, DODGE L G, DAVID W. Effects of fuel properties and atomization on ignition in a T63 gas turbine combustor[R]. DAAK70-87-C-0043, 1987.
- [10] 吴锋,龚小琪,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)
- [11] 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)
- [12] 《航空发动机设计手册》总编委会.航空发动机设计手册:第6册 涡轮及涡轮轴发动机总体[M].北京:航空工业出版社,2001:2-5.
- [13] 中央军委装备发展部.航空涡轮螺旋桨和涡轮轴发动机通用规范:GJB242A-2018[S].北京:中国标准出版社,2018:90.
- [14] 张瑞强,刘少军,胡小舟.供油压力和滑油温度对某航空齿轮润滑喷嘴射流特性的影响[J].航空动力学报,2016,31(7):1777-1784.
ZHANG Ruiqiang, LIU Shaojun, HU Xiaozhou. Effects of supply pressure and temperature of oil on jet characteristics of lubricating nozzles for an aviation gears[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(7): 1777-1784. (in Chinese)
- [15] WALSH P P, FLETCHER P. Gas turbine performance [M]. 2nd Ed. Oxford: Blackwell Science Limited, 2004: 383-461.
- [16] 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)
- [17] 廉筱纯,吴虎.航空发动机原理[M].西安:西北工业大学出版社,2005:315-322.
- [18] 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方法[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 Propulsion Technology, 2005, 20(5): 736-739. (in Chinese)
- [19] ELMENDORF W, KURZ H, GALLUS H E. Design and

performance of a mixed flow supersonic compressor stage [C]//Proceedings of 12th International Symposium on Air Breathing Engines. Melbourne, Australia: AIAA, 1995; 113-124.

[20] RAO H N S, LEFEBVRE A H. Ignition of kerosene fule sprays in a flowing air stream[J]. Combustion Science and Technology, 1973, 8(1): 95-100.

[21] RAO H V L, LEFEBVRE A H. Mininum ignition energies in flowing kerosene-air mixtures [J]. Combustion and Flame, 1976, 27: 1-20.

[22] 康尧, 林宇震, 霍伟业, 等. 双级旋流杯结构变化对点火特性的影响研究[J]. 推进技术, 2014, 35(5): 675-680.

KANG Yao, LIN Yuzhen, HUO Weiye, et al. Effects of hardware geometry of dual-stage swirl cup on ignition performance[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(5): 675-680. (in Chinese)

[23] 蔡建斌, 成本林, 刘杰, 等. 离心压气机温升效应对涡轴发动机起动性能的影响[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 403-406.

CAI Jianbin, CHENG Benlin, LIU Jie, et al. Centrifugal compressor warm-up effecton turboshaft engine starting charateristics[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3): 403-406. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)