

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.007

PT6A-65B 涡桨发动机地面低温起动试验研究

李翔¹, 彭桂林¹, 周德胜², 夏育荣¹

(1. 中国电子科技集团公司第三十八研究所, 安徽 合肥 230088;

2. 哈尔滨工业大学 先进动力研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在环境试验舱内对 PT6A-65B 涡桨发动机地面低温起动性能进行试验验证。试验结果表明: PT6A-65B 涡桨发动机可在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上的温度条件下自主可靠起动; 低温条件下润滑油流动性能急剧恶化, 在起动过程中将会由于转子旋转阻力矩的增大导致起动失败; 延长起动电机带转时间、连续多次实施起动, 可以改善发动机的低温起动性能。研究结论可为 PT6A-65B 涡桨发动机的使用、保障提供参考。

关键词: PT6A-65B 涡桨发动机; 低温环境; 地面起动试验; 起动性能

中图分类号: V235 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0040-05

Reserch on Ground-starting Test for PT6A-65B Turboprop Engine in Low Temperature

LI Xiang¹, PENG Guilin¹, ZHOU Desheng², XIA Yurong¹

(1. No.38 Research Institute of CETC, Hefei 230088, China;

2. Institute of Advanced Power, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Low temperature ground-starting tests were conducted inside the environmental test chamber to verify the starting performance of the PT6A-65B turboprop engine. The results show that the PT6A-65B turboprop engine can start self-reliantly and reliably at $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. The oil fluidity deteriorates rapidly in low temperature, and the increased rotor resistance torque leads to a fail start. Prolonging the work time of the starter and implementing multiple starts will improve the engine starting performance in low temperature. The research results provide a reference for the use and maintenance of the PT6A-65B turboprop engine.

Keywords: PT6A-65B turboprop engine; low temperature; ground-starting test; starting performance

0 引言

作为某公司 PT6A 系列发动机中的一款, PT6A-65B 涡轮螺旋桨发动机因性能优异、工作可靠、具备良好的耐久性和维修性, 被广泛应用于通用航空领域^[1-3]。

发动机地面起动性能以及能否在目标环境下可靠地进入工作性能状态, 其优劣直接影响发动机工作的可靠性和安全性^[4-14]。为满足飞行器在低温工况下的应用需求, 必须保证发动机具有良好的低温起动性能。本文通过开展低温起动试验探究发动机低温起动性能, 为发动机环控加热系统的设计和飞行器外场保障方案的制定提供准确的输入和依据, 这具有较大的工程实用价值。

发动机低温起动试验的主要实施方法包括高寒机场飞行器地面试验、发动机地面试车台试验^[15] (特定地区、特定时间)、低温环境舱试验和

高空模拟试车台试验^[16]。其中, 低温环境舱试验不受环境大气条件限制, 试验周期较短, 在效费比方面具有突出优势。本文将 PT6A-65B 涡桨发动机作为研究对象, 在环境舱内开展了低温起动试验, 并对试验结果及影响因素进行了分析。

1 试验情况

1.1 试验准备

在开展低温起动试验之前, 受试的 PT6A-65B 涡桨发动机已经完成常温条件下的系统测试并确定了起动控制策略: 起动电机独立带转燃气发生器转子, 加速至供油转速 N_{g1} (13% 燃气发生器最大转速), 燃烧室喷油点火、燃气涡轮投入工作, 燃气发生器转子在起动电机和燃气涡轮的共同带转下继续加速; 在燃气发生器转速达到 N_{g2} (45% 燃气发生器最大转速) 后, 起动电机断开连

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52206044)

第一作者简介: 李翔 (1989—), 男, 安徽亳州人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为浮空器动力推进系统设计, 583972253@qq.com。

接,涡轮发出的功率继续维持转子的运转、加速,直至发动机进入慢车状态。

PT6A-65B 涡桨发动机低温起动试验在环境试验舱内进行,试验舱内的系统布置状态如图 1 所示。



图 1 发动机系统舱内布置状态

1.2 冷浸实现方法及试验判据

在国内外相关科研单位公开发表的研究成果中^[17-19],针对低温起动试验过程中的冷浸时间选取均是根据不同的飞行器任务剖面、发动机类型

和燃滑油牌号,针对国军标中的相关要求进行了适应性裁剪。

考虑到低温冷浸过程中发动机滑油系统的冷浸降温过程耗时更长;业内普遍采用轴承温度作为冷浸温度的判据,但受限于轴承温度实际测量的不可达性,可将润滑油温度作为轴承温度的间接表征。因此,本文将发动机系统完成低温冷浸的判据选为:在发动机自带的滑油温度传感器温度反馈值达到目标测试温度后,继续执行 4 h 的保温冷浸之后,开始执行起动试验。

2 试验过程及数据分析

2.1 -20℃低温起动

通过多次起动试验发现,PT6A-65B 涡桨发动机可在-20℃的温度条件下实现正常起动,典型起动过程中的主要参数变化如图 2 所示。其中,图中所示的燃气涡轮转速以 37 500 r/min (100%燃气涡轮转速)为基准进行了无量纲化。

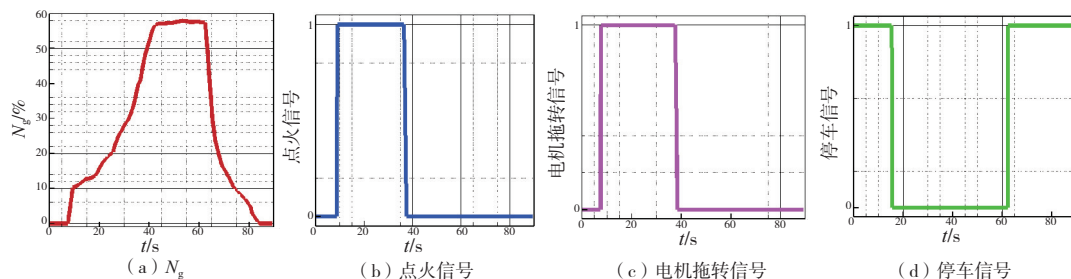


图 2 -20℃低温起动参数变化曲线

由图 2 可知,在起动电机和点火开关依次接通之后,起动电机开始带动转子转动,燃气发生器转速逐渐上升,点火电嘴开始放电并产生火花。在起动电机接通约 8 s 后,燃气发生器转速达到供油转速 N_{g1} ,此时停车信号置为无效,燃油控制开关打开,开始向燃烧室供油。发动机油路接通之后,燃烧室内点火成功,涡轮开始发出功率,起动电机和涡轮共同带动转子转动,转子的转速变化率增大;起动电机接通约 30 s 后,燃气发生器转速达到自立转速 N_{g2} ,此时关闭点火开关和起动电机,转子由涡轮单独带转并持续加速;起动电机断开约 10 s 后,发动机达到慢车转速并稳定运转;在停车信号置为有效之后,发动机燃油供给切断,燃气发生器转速急剧降低,直至完全静止。

2.2 -30℃低温起动

在-30℃温度条件下实施的两次发动机起动均未能成功,对应两次起动过程中的主要参数变

化情况分别如图 3 和图 4 所示。

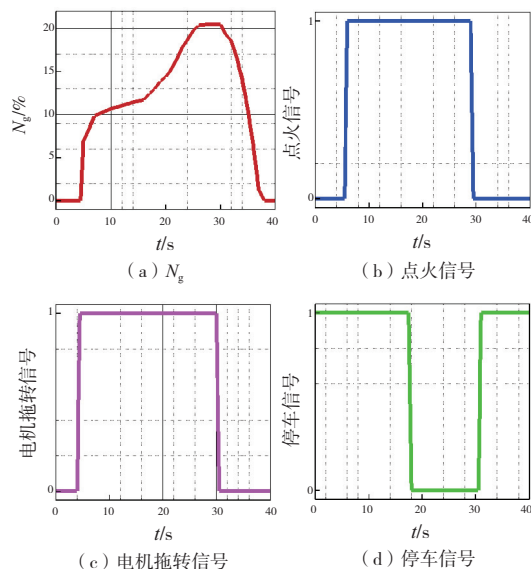


图 3 -30℃第 1 次起动参数变化曲线

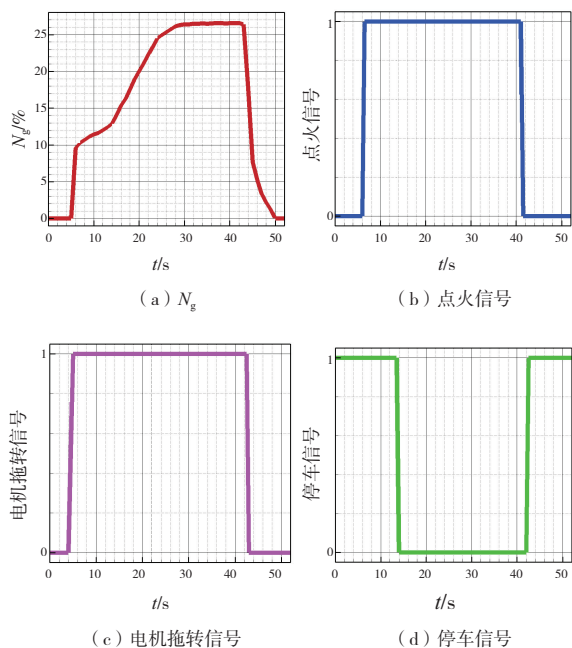


图4 -30 °C第2次起动参数变化曲线

由图4可知,在起动电机接通约14 s后,燃气发生器转速达到供油转速 N_{g1} ,开始向燃烧室供给燃油。燃烧室点火成功之后燃气发生器转速提高,在加速至20%的量级之后转速变化率急剧降低,出现了起动悬挂的现象。为了避免发动机在非设计工作状态下长时间运转,在起动电机接通约26 s后中止起动,第1次起动未能成功。

根据第1次起动过程中的参数采集情况,在涡轮间温度相较于限制值具有较大余量的前提下,第2次起动采用了延长起动电机带转时间的控制策略,以期通过增加输入电功的方式完成该温度下的发动机起动。由图4可知,在第2次起动过程中,起动电机接通约10 s后加速至供油转速 N_{g1} ,点火成功后燃气发生器转速急剧提高,在转速达到26%的量级之后再次出现了起动悬挂的现象,第2次起动依然未能成功。

两次起动过程的工作参数对比如表1和图5所示。由图5可知,在初始的起动电机带转阶段,第2次起动转子加速更快、达到供油转速历时更短;在燃烧室点火成功之后,第2次起动燃气发生器转速的变化率显著大于第1次起动;虽然在两次起动中均出现了在自立转速前悬挂的现象,但是在第2次起动的过程中,通过执行延长起动电机带转时间的控制策略,转子在涡轮和起动电机的共同带转下加速到了9 749 r/min,转速显著高于第1次起动时的转速。

表1 -30 °C低温起动过程参数对照表

参数名称	第1次起动	第2次起动
供油转速带转时间/s	14	10
合计带转时间/s	26	37
最高转速/(r/min)	7 689	9 963

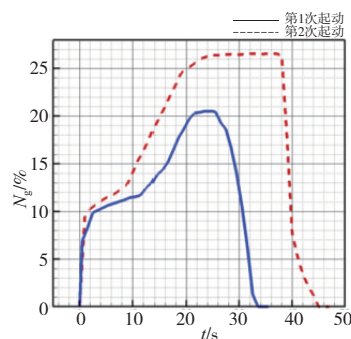


图5 -30 °C低温起动测试结果对比

试验结果的对比表明:第1次起动起到了预热的作用,在第2次起动的过程中滑油的流动性能有所提升,转子卡滞现象有了较为明显的改善。因受限于滑油和发动机系统的物理性质以及起动电机功率的限制,在燃烧室点火成功后发动机仍然无法加速至自立转速,-30 °C温度下的发动机起动无法完成。

2.3 -25 °C低温起动

在-25 °C温度条件下实施的两次起动均未能成功。对应两次起动过程中的转子转速变化情况如图6所示。

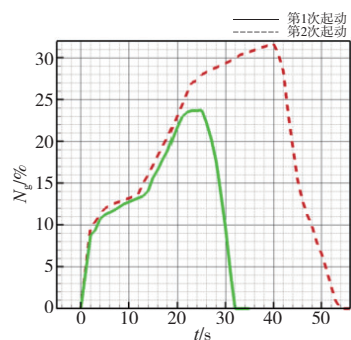


图6 -25 °C低温起动测试结果对比

由图6可知,在第1次起动的过程中,转子加速至24%的量级之后出现了起动悬挂;在涡轮间温度具有较大余量的前提下,第2次起动的实施过程中相应延长了起动电机的带转时间,但在转子加速至30%的量级之后再次出现了起动悬挂。

与 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温起动的实施过程相同,该工况下的第1次起动起到了预热的作用,在第2次起动的过程中转子卡滞现象得到改善,但在燃烧室点火成功后转子无法加速至自立转速,发动机起动无法完成。

3 低温起动影响因素分析

3.1 低温/常温起动过程参数对比

对应于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温起动和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 常温起动,起动机接通之后燃气发生器转速随时间的变化曲线如图7所示。

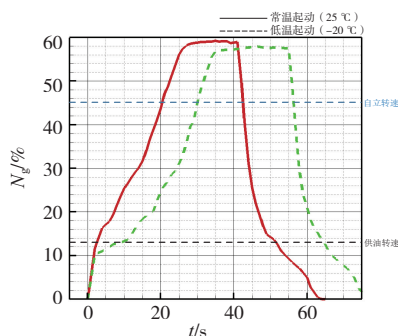


图7 常温/低温起动测试结果对比

由图7可知:1)相较于常温起动,低温工况下燃气发生器转速变化更为缓慢,转子存在一定程度的卡滞现象。究其原因,是因为滑油黏度随着温度的降低急剧增大、流动性能显著变差,造成转子旋转阻力矩显著增加。在起动电机输出的驱动转矩基本相同的前提下,转子的加速率明显降低。2)在发动机点火成功之后,低温条件下的起动电机带转时间显著长于常温条件。这是因为低温条件下燃油雾化性能下降,使得燃烧室的工作特性显著恶化^[20],燃气发生器涡轮参加工作,输出功率的时间相应推迟,导致转子加速缓慢、带转时间延长。

对应上述两个起动过程中滑油压力随燃气涡轮转速的变化关系如图8所示。起动初始阶段在起动电机的带转下,低温/常温工况下的滑油压力基本相当;燃烧室点火成功之后,常温条件下滑油压力急剧提高,低温条件下滑油压力增加缓慢;对应相同的转速条件下,低温工况下的滑油压力显著低于常温工况。在带转时间更长的前提下,低温工况下的滑油压力仍然较低,印证了滑油在低温条件下的流动性能显著恶化,导致发动机起动困难。

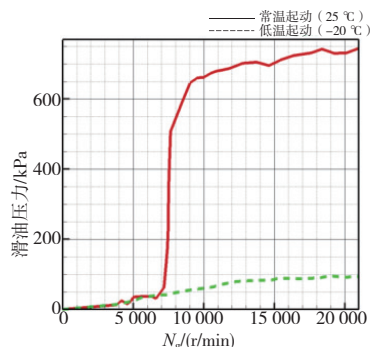


图8 常温/低温起动滑油压力-转速变化曲线

3.2 低温起动过程参数对比

对应 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 3个温度条件下的冷车起动过程,滑油压力随燃气发生器转速的变化关系如图9所示。图中选取了3次起动共同经历的一段转速范围和该转速范围内对应的滑油压力作为目标数据。

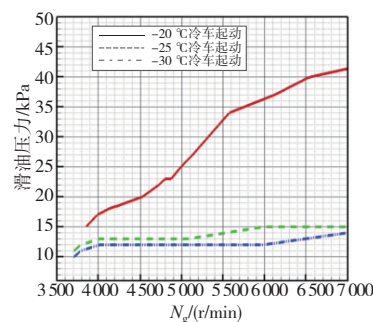


图9 低温起动滑油压力-转速变化曲线

由图9可知,随着温度的降低,对应相同转速条件下的滑油压力呈现下降趋势,滑油压力的下降将会导致发动机出现润滑不良的情况;此外,作为螺旋桨调速器的工作动力源,滑油的相对欠压将会导致螺旋桨桨距由顺桨状态向定速状态的调整出现延迟甚至无法完成变距,螺旋桨始终工作于负荷较高的状态,导致自由涡轮负荷较大、起动剩余功率不足,转子加速缓慢甚至无法持续加速。在上述两个原因的共同作用下,发动机可在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温条件下起动成功,而 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下的起动尝试均以失败告终。

根据试验数据可知,环境温度越低,起动过程中所能达到的最大燃气涡轮转速越低,与滑油压力的变化规律一致。

4 结语

1)在环境温度为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及以上时,PT6A-65B

涡桨发动机具备自主起动能力;在低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境条件下无法实现自主起动。针对该型发动机在低于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度条件下的实际应用需求,必须采取环控加热及相应的保温措施。考虑到滑油流动性能与发动机能否成功起动直接相关,环控加热措施的实施应重点考虑滑油箱、燃滑油散热器等部件。

2)环境温度越低,PT6A-65B 涡桨发动机起动过程中对应相同转速条件下的滑油压力越低,转子加速过程中所能达到的最大转速越低,直至因出现起动悬挂导致起动失败。

3)通过延长起动电机带转时间,连续多次实施起动可以改善发动机的低温起动性能,在满足起动电机连续工作时长和工作间歇要求的前提下,可以用作发动机地面低温起动的辅助措施。

参考文献:

- [1] 明卉,周恒宇. PT6A 发动机反桨失效分析[J]. 机械研究与应用,2024,37(6):121-125.
- [2] 綦文龙,侯永吉. PT6A-27 发动机故障分析[J]. 设备管理与维修,2018(增刊1):44-45.
- [3] 连喜贺. PT6A 发动机典型故障维修与调试方法总结[J]. 设备管理与维修,2021(13):43-44.
- [4] 卢明亮,徐嘉悦. 航空发动机起动系统性能匹配与分析[J]. 内燃机与配件,2024(7):5-8.
- [5] 蒋聪,刘冕,熊欣,等. 航空用空气涡轮起动机典型故障诊断分析[J]. 机械制造与自动化,2021,50(5):203-205.
- [6] 雷东亮. 民用大涵道比涡轮风扇发动机起动设计浅谈[J]. 科学与技术,2022,30(6):1-3.
- [7] 李相政,高磊. 启动条件对涡扇发动机高原启动影响研究[J]. 工程与试验,2022,62(4):72-74.
- [8] 苗禾状,严文洁,张晓飞. 高原条件对航空涡扇发动机启动性能影响分析[J]. 工程与试验,2016,56(1):

57-60.

- [9] 李小彪,马征,邱续茂,等. 航空发动机高原起动成功率提高措施[J]. 航空发动机,2019,45(4):75-78.
- [10] 陈春翔,李永红,丁业达. 某型发动机起动超温不切油故障分析[J]. 航空维修与工程,2021(10):81-83.
- [11] 刘家兴. 空气涡轮起动系统建模及其性能分析[D]. 南京:南京航空航天大学,2021.
- [12] 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):34-35,48.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 王霞,陈月春,李素婷,等. 不同海拔高度下柴油机低温起动性能试验研究[J]. 内燃机与动力装置,2022,39(1):7-11.
- [16] 邢洋,杨怀丰,刘亚君,等. 舰载涡扇发动机高低温起动试验与分析[J]. 推进技术,2024,45(1):241-247.
- [17] 翟政,张帅,周伟. 模拟自然环境的航空发动机低温起动试验研究[J]. 航空发动机,2021,47(增刊1):115-119.
- [18] 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.
- [19] KAMYKOWSKI R. Turbine engine cold-soak start testing techniques [C]//31st Joint Propulsion Conference and Exhibit. San Diego, CA. Reston, Virginia: AIAA,1995:3076.
- [20] 孟繁睿,雷雨冰. 航空发动机折流燃烧室火焰筒构型设计方法研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(5):44-47.

收稿日期:2023-12-08