

航空发动机高原起动成功率提高措施

李小彪,马 征,邱续茂,谷雪花
(中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要: 针对某型航空发动机在高原地区起动成功率偏低的问题,基于发动机起动工作原理,分析了起动失速、转速悬挂、排气温度超温等失败现象,得出失败是由剩余功率减小所致,制定了通过优化调整供油钉使发动机达到最佳油气比的调整方案,并采取增大涡轮起动机输出功率、卸载液压、优化调整供油量等3项措施。同时进行外场试车验证,判读飞参,对比采取措施前、后的起动数据。结果表明:采用调整方案后使发动机高原起动成功率提升30%,保证了发动机的工作性能,满足了用户的使用要求。

关键词: 航空发动机;高原起动;涡轮起动机功率;液压卸载;供油量调整

中图分类号: V232.4

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.04.015

Improvement Measures of Success Starting Rate of Aeroengine at Plateau area

LI Xiao-biao, MA Zheng, QIU Xu-mao, GU Xue-hua

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to solve the problem of low starting success rate of an aeroengine at plateau area, the failure phenomena such as starting stall, rotating speed suspension and exhaust over temperature were analyzed based on the working principle of engine starting. It was concluded that the failure was caused by the reduction of residual power. The adjustment scheme was worked out by optimizing the fuel supply nail to achieve the best oil / gas ratio of the engine, and three measures were taken to increase the output power of the turbo starter, unload the hydraulic pressure and optimize the fuel supply. At the same time, the field test verification was carried out, the flight parameters were read, and the starting data with and without the measures were compared. The results show that the success rate of engine plateau starting is increased by 30% after the adjustment scheme is adopted, which ensures the working performance of the engine and meets the requirements of the users.

Key words: aeroengine; plateau starting; turbo starter power; hydraulic pressure unloading; fuel supply adjustment

0 引言

航空发动机高原起动试验是检验发动机性能、考核发动机工作指标、验证发动机使用范围的重要手段。国军标《航空燃气涡轮动力装置飞行试验要求》和《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》等标准对航空发动机高原起动试验的考核提出了具体要求^[1-3]。然而,随着高原地区海拔高度增加,空气密度和压力减小,使得起动时进入发动机的空气质量流量减少,余气系数减小,造成涡轮起动机功率、输出功率明显衰减,使发动机起动困难,经常出现起动失速、转速悬

挂、超温等现象,或者起动时间偏长,严重影响日常训练和任务的完成。

郭昕等^[4]根据 GJB241 对航空发动机高、低温起动及高原起动试验的要求,分析了高、低温及高原环境条件对航空发动机起动性能的影响机理;李文峰等^[5]分析了高原起动存在的主要技术问题,介绍了小型可移动式地面试车台试验设备,讨论了高原起动的试验方法,研究了起动机和发动机的参数调整规律以及解决发动机高原起动的途径;吴利荣等^[6]针对某型发动机高原起动过程中具有危险性大及变化规律复杂的特点,提出了一种变记忆长度的小波变换多分辨分析

收稿日期:2018-04-12 基金项目:航空动力基础科研项目资助

作者简介:李小彪(1987),男,工程师,从事航空发动机技术支持工作;E-mail: xiaobiaoli1987@163.com。

引用格式: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.LI Xiaobiao, MA Zheng, QIU Xumao, et al.Improvement measures of success starting rate of aeroengine at plateau area[J].Aeroengine,2019,45(4):75-78.

方法。国外在航空发动机高原起动方面对我国进行严格的技术封锁。

为了使航空发动机在高原地区能安全可靠地起动,进行了某型航空发动机高原起动技术理论分析和试验验证。

1 发动机起动原理

发动机地面起动是指在起动系统控制下,起动机、涡轮按时序输出功率,克服消耗功率,使转子由静止状态逐步达到慢车状态的过程。

发动机的地面起动通常可分为 3 个阶段,如图 1 所示^[7-8]。在开始的第 1 阶段,起动机输出功率 N_0 ,克服压气机消耗功率,带动高压转子旋转,到达某一转速或起动到某一时间段,发动机燃烧室开始喷油、点火。在该阶段,完全

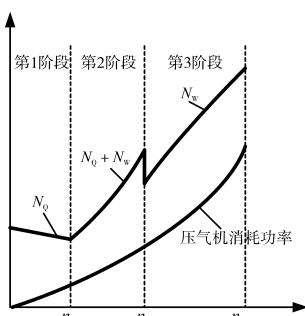


图 1 发动机起动过程原理

靠涡轮起动机将高压转子带动到点火转速 n_{0h} 。第 2 阶段是起动机和涡轮共同输出功率 ($N_0 + N_w$) 完成的。起动机输出的功率逐渐减小,发动机转速由 n_{0h} 上升至 n_k ,此时起动机脱开不再输出功率。在该阶段的后半程涡轮输出功率已大于压气机消耗所需功率,但为了保证起动的可靠性及缩短起动时间,起动机将继续工作,与涡轮共同将转子转速提升至 n_k 。第 3 阶段是涡轮单独带转到慢车状态的阶段。从起动机脱开到转子加速到慢车状态,完全靠涡轮输出功率 N_w 将转子加速到慢车域^[9-10]。

由发动机起动原理可知,起动过程的影响因素实质上就是剩余功率提取(图 1 黑实线之间部分)的影响因素。在高原起动时,大气密度和压力均减小,发动机进口流量明显减少,造成涡轮、起动机输出功率衰减,导致剩余功率减小,转子的加速度减小,起动时间延长,起动温度升高^[11-13]。

2 发动机起动性能表征量

发动机的起动性能主要用起动时间 t_{qt} (从按下起动按钮到高压转子转速达到规定转速所经历的时间)来表征,在规定范围内 t_{qt} 越短,起动性能越好。

结合发动机的数学模型,起动时间^[14-15]为

$$t_{qt} = \frac{30}{\pi} \int_0^{n_2^*} \frac{J}{\Delta p} n_2 dn_2 \quad (1)$$

式中: J 为高压转子转动惯量; Δp 为高压转子剩余功率。

由式(1)可知,增大输出功率、减小提取功率,即增大高压转子剩余功率 Δp ,从而缩短起动时间,有效改善起动性能。

3 发动机高原起动性能调整技术

综上所述,通过增大输出功率、减小提取功率即增大起动有效功率有助于发动机起动。且由于高原空气密度小,温差变化大,发动机空气流量比平原地区显著减少,需要通过优化调整供油钉使发动机达到最佳油气比。为此提出 3 项措施:增大涡轮起动机输出功率、卸载液压、优化调整供油量。

3.1 增大涡轮起动机输出功率

高原空气压力低、密度小,导致燃气涡轮起动机功率减小,带转发动机的能力降低。本次采用高原试验所使用的起动机出厂功率均处于技术要求范围的下限,在此状态下进行高原起动,导致发动机起动时间延长,超温风险加大。

通过起动机调整钉 A 可以调整起动机最大供油量,从而增大起动机功率。通过起动机调整钉 B 可以调整起动机最大限制转速,当 A 钉不起作用时,可调整 B 钉来增大起动机功率。试验表明:通过提高起动机最大供油量和最高转速,可保证发动机正常起动。起动机功率调整前、后发动机起动曲线如图 2 所示。图中曲线仅表示各参数的变化趋势,具体数值需结合飞参判读,发动机在相对时间 7 时脱开(图 3~9 与此相同)。

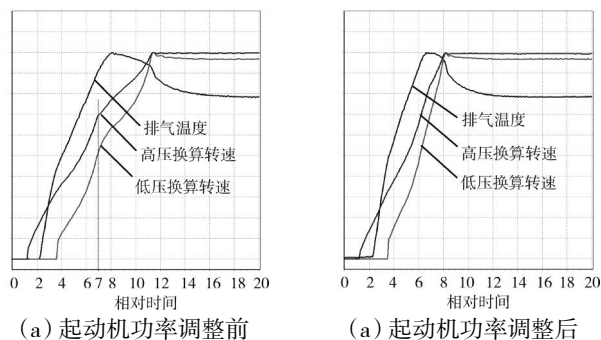


图 2 起动机功率调整前、后发动机起动曲线

从图 2 中可见,起动机功率调整前,发动机脱开转速较低,相对起动时间为 11;起动机功率调整后,

发动机脱开转速有所提高,相对起动时间为8。结合飞参具体数据,与调整前相比,脱开转速提高20%左右,起动时间缩短27%左右。

3.2 卸载液压

在发动机起动时,通过接通液压泵上的卸压电磁阀门使其供油压力降低,从而减轻起动过程液压负载的作用。待发动机起动成功后断开液压泵上卸压电磁阀门的电源,恢复液压泵供油压力,保证飞机液压控制系统正常使用。采用该方案,可以在不影响液压系统正常工作的前提下减小起动过程中的提取功率,从而增大剩余功率。液压卸载前、后起动曲线如图3所示。

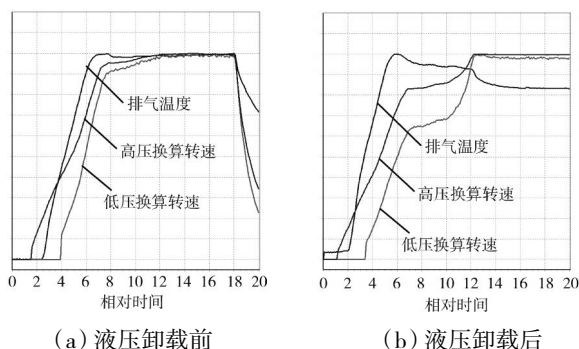


图3 液压卸载前、后发动机起动曲线

从图3中可见,在发动机起动试验时,液压卸载前,发动机高压转子脱开后,上升缓慢,在起动后段处转速悬挂不上升,起动失败;液压卸载后,高压转子转速按规定持续升高,起动成功。

3.3 优化调整供油量

高原气压低、空气稀薄,从油气比合适的角度考虑,应适当减少起动供油。发动机使用的燃气涡轮型起动机在高原条件下会有一定的功率减小,带动发动机加速能力减弱,使点火转速降低,为此,应减少起动前段油量,避免前段富油,导致温度升高过快。同时,由于高原气流量小,起动机脱开后,如果起动供油量调整不合适,将严重影响燃烧室混合气的余气系数和起动时涡轮前燃气温度,导致起动时间偏长甚至悬挂。供油量调整钉a主要影响起动前段供油,往外拧可减小供油量;调整钉b、c优化起动后段供油,可按起动机脱开时刻至慢车时间判断,如该段时间较长,调整钉应适当往里拧;反之则适当往外拧,避免起动后段失速。调整钉a调整前、后起动曲线如图4所示;调整钉b、c调整前、后起动曲线如图5所示。

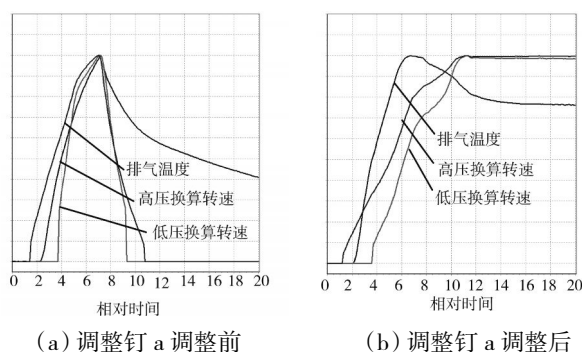


图4 调整钉a调整前、后发动机起动曲线

从图4中可见,调整钉a调整前,起动前段富油,在发动机起动前段时,发动机排气温度已达到极限值,超温使起动失败;将调整钉a往外拧减油后,起动成功。

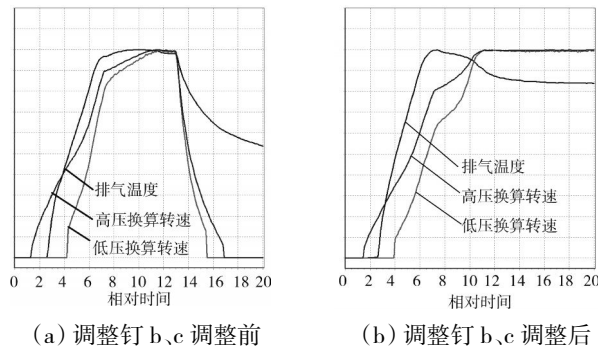


图5 调整钉b、c调整前、后发动机起动曲线

从图5中可见,在发动机起动试验时,调整钉b、c调整前,发动机高压转子脱开后,转速升高缓慢,在起动后段处转速悬挂不升高,起动失败;调整钉b、c调整后,增加了后段供油量,高压转子转速按规定持续升高,起动成功。

4 结束语

航空发动机高原起动成功率是检验发动机性能的重要指标,对于保障用户日常训练和任务完成具有重要意义。为保证发动机在高原地区的起动成功,拓宽发动机的使用环境,本文分析了发动机起动过程的各个阶段,剖析出剩余功率减小是高原起动失败的主要原因,提出了提高涡轮起动机输出功率、液压卸载、优化调整供油量等3项调整措施。经外场起动试验验证,发动机起动成功率提升30%,提升了发动机的使用疆域。文中论述的改善发动机高原地面起动性能的方法,对于确保发动机在高海拔地区的正常使用具有重要意义。

参考文献:

- [1] 苗禾状,王朝蓬,朱哲,等. 航空发动机“三高”启动试验研究[J]. 工程与试验,2015,55(1): 38-42.
MIAO Hezhuang, WANG Chaopeng, 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)
- [2] 乔洪信,夏爱国,杨立. 某型航空发动机高原使用启动供油量调整研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(4): 534-537.
QIAO Hongxin, XIA Aiguo, YANG Li. Study of adjusting aeroengine starting fuel supply in the plateau area [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(4): 534-537. (in Chinese)
- [3] 江勇,周宗才,桑增产,等. 发动机高原地面启动实验初步研究[J]. 推进技术, 2003, 24(6): 547-549.
JIANG Yong, ZHOU Zongcai, SANG Zengchan, et al. An engine-starting test on the highland ground [J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(6): 547-549. (in Chinese)
- [4] 郭昕, 杨志军. 航空发动机高低温启动及高原启动试验技术探讨[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)
- [5] 李文峰,王永生,雷震,等. 某涡扇发动机高原启动试验研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(5): 599-603.
LI Wenfeng, WANG Yongsheng, LEI Zhen, et al. Experimental investigation of some turbofan engine starting in plateau area [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(5): 599-603. (in Chinese)
- [6] 吴利荣,李剑,谢寿生,等. 某型发动机高原启动过程数学模型建立[J]. 航空动力学报, 2004, 19(1): 58-60.
WU Lirong, LI Jian, XIE Shousheng, et al. Establishment of a certain aeroengine starting mathematical model in plateau regions [J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(1): 58-60. (in Chinese)
- [7] 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.
MIAO Hezhuang, YAN Wenjie, ZHANG Xiaofei. Analysis on influences of plateau condition on starting performance of turbofan engine [J]. Engineering and Test, 2016, 56(1): 57-60. (in Chinese)
- [8] Sexton W R. A new method to control turbofan engine starting by varying compressor surge valve bleed [D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [9] 张云飞. 发动机高原性能研究现状与展望[J]. 内燃机与配件, 2012, (7): 31-35.
ZHANG Yunfei. Research and development in engine performance at altitude [J]. Internal Combustion Engine and Parts, 2012(7): 31-35. (in Chinese)
- [10] 李鹏辉,陈华,胡宇超,等. 某型发动机高原启动过程中慢车转速异常分析[J]. 航空维修与工程, 2016(12): 93-96.
LI Penghui, CHEN Hua, HU Yuchao, et al. Analysis on idling speed abnormal in the process of plateau startup for a certain type of aero-engine [J]. Aviation Maintenance and Engineering, 2016(12): 93-96. (in Chinese)
- [11] Kung S Y, Hu Y H. A frobenius approximation reduction (FARM) for determining optimal number of hidden units [J]. IEEE, 1991(2): 163-168.
- [12] 刘建勋,刘同胜,魏东. 涡扇发动机理想启动过程分析与控制问题探讨[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(10): 100-105.
LIU Jianxun, LIU Tongsheng, WEI Dong. Idea starting procedure analysis and optimization control investigation for turbofan engine [J]. Science Technology and Engineering, 2009, 9(10): 100-105. (in Chinese)
- [13] 廉筱纯,吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2013: 315-325.
LIAN Youchun, WU Hu. Aviation engine principle [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2013: 315-325. (in Chinese)
- [14] Libeozm D, Morse A S. Basic problems in stability and design of switched systems [J]. IEEE Control System Magazine, 1999, 19(5): 59-70.
- [15] 李凡玉,李军,江勇,等. 改善发动机高原地面启动性能的实验研究[J]. 空军工程大学学报, 2012, 13(5): 25-29.
LI Fanyu, LI Jun, JIANG Yong, et al. Experimental investigation on improvement of engine-starting performance on plateau ground [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2012, 13(5): 25-29. (in Chinese)

(编辑:贺红井)