

航空发动机高原起动性能改善措施

李大为¹, 李家瑞¹, 李锋², 崔金辉¹, 王嘉瞳¹

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015; 2. 空装驻长春地区军事代表室, 长春 130000)

摘要:为了解决航空发动机高原起动超温和转速悬挂等问题,以某型航空发动机起动过程为研究对象,根据高原环境对发动机起动过程的影响进行理论分析,提出了优化高原起动措施,并进行了高原试验验证,摸索出各措施对起动过程的影响程度。结果表明:在发动机起动过程中采用飞机卸载的方式可使排气温度降低 3%,起动机脱离转速提高 3%;起动机功率提高约 1%,点火转速及脱离转速提高约 2%,起动时间缩短约 8%。

关键词:高原起动;大功率起动机;飞机卸载;起动性能;航空发动机

中图分类号: V233.6

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2020.02.008

Improvement Measures of Aeroengine Starting Performance in Plateau

LI Da-wei¹, LI Jia-rui¹, LI Feng², CUI Jin-hui¹, WANG Jia-tong¹

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China;

2. Air Force Armament Department Military Representative Office in Changchun, Changchun 130102, China)

Abstract: In order to solve the problems of aeroengine starting over temperature and speed suspension in plateau, taking the starting process of a certain aeroengine as the research object, the theoretical analysis was carried out based on the influence of the plateau environment on the starting process of the engine. The optimum starting measures in plateau were put forward and the test verification was carried out to find out the influence of each measure on the starting process. The results show that the exhaust temperature is reduced by 3%, the starting speed is increased by 3%, the starting power is increased by about 1%, the ignition speed and stripping speed are increased by about 2% and the starting time is shortened by about 8% by adopting aircraft unloading during the engine starting.

Key words: starting in plateau; high power starter; aircraft unloading; starting performance; aeroengine

0 引言

起动是航空发动机的 1 个重要的过渡过程,是发动机工作的第 1 个阶段,因此显得尤为重要。朴英、廉筱纯等^[1-2]对发动机起动过程等进行了原理阐述,并建立起动过程的数学模型,将发动机起动过程按 3 个阶段进行划分,并总结归纳了影响起动成功的各种因素;苗禾状等^[3]从“三高”的条件因素对发动机起动影响进行研究,并提出了在进行“三高”试验的方法和注意事项;王兆铭^[4]以某型发动机为例对高原起动供油规律的调整进行研究,通过改变自动起动器和起动放气嘴,得到了高原机场起动的调整方法;郭昕^[5]总结了

英、俄等国在高空模拟试验台进行发动机高原起动的验证方法,提出了符合中国国情的发动机高低温起动及高原起动的试验途径和方法;江勇^[6]等分别在不同海拔地区开展了发动机高原起动试车台架研究,得到了起动机运转与发动机共同工作的规律,并得到了海拔因素对起动机功率影响规律。何立明、李俊钢等^[7-8]对 CFM56-7 民航发动机在冬季高原上多次发生冷起动故障进行分析,得到环境因素及民航运输航线对燃烧室喷嘴的雾化特性产生影响,从而导致点火不成功造成起动失败。因此,发动机起动成功与周围环境影响非常大。发动机起动受环境温度、压力、起动机功率

收稿日期:2018-11-08 基金项目:航空动力基础研究项目资助

作者简介:李大为(1981),男,硕士,高级工程师,主要从事航空发动机总体性能设计工作;E-mail:29123114@qq.com。

引用格式:李大为,李家瑞,李锋,等.航空发动机高原起动性能改善措施[J].航空发动机,2020,46(2):47-50. LI Dawei, LI Jiarui, LI Feng, et al. Improvement measures of aeroengine starting performance in plateau [J]. Aeroengine, 2020, 46(2): 47-50.

和压气机、燃烧室、涡轮等部件匹配等因素影响,具有较大的不确定性,特别是在高原低气压、空气低含氧量、气温和向多变风等特殊气候环境下,容易出现发动机点火失败、超温、悬挂、失速等问题,从而导致起动失败,在一定程度上,严重制约飞机在高原地区使用。

本文以某型航空发动机高原起动过程为研究对象,通过高原环境各因素对发动机起动过程带来的影响进行理论分析,得到不同调整措施对起动过程3个阶段的起动参数影响规律,提出解决发动机高原起动困难的措施,并进行了高原起动试验验证

1 某型发动机地面起动原理

以某型小涵道比涡扇发动机为例(起动前段采用燃气涡轮起动机),发动机从零转速过渡到慢车转速的过程称为起动过程。航空发动机在地面起动时必须依靠外界动力源,因为这时没有空气流过发动机,如果向燃烧室喷油点火只能将发动机烧伤而转子不会转动起来。只有达到一定的转速后,燃烧室内的气流才能建立起稳定燃烧所需要的气流压力和温度^[9-10]。

地面起动过程是在电气及燃油系统起动控制逻辑下,使转子由静止状态加速到慢车状态的过渡过程。发动机地面起动分为3个阶段^[11],静止状态到主燃烧室初始点火状态(第1阶段)、主燃烧室初始点火状态到起动机脱开状态(第2阶段)、起动机脱开状态到慢车状态(第3阶段),第1~3阶段分别以点火转速、起动机脱开转速作为分界条件,如图1所示。

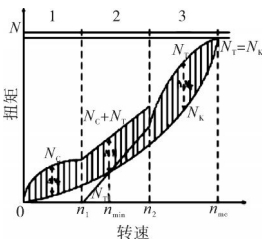


图1 发动机起动过程

第1阶段,主燃烧室未点火,由起动机的功率带动发动机转速提高,转速的上升速率主要取决于起动机的功率。影响第1阶段起动成功与否的重点是发动机点火转速和起动机输出功率的选取。点火转速的选取对发动机起动过程影响很大,如供油过早,发动机转速低,空气流量较小,使主燃烧室富油燃烧而容易引起发动机超温和喘振;转速过高,将延长发动机起动时间。起动机输出扭矩应满足发动机及附件的阻力矩,将发动机带转至点火转速,若起动机输出扭矩充分,可以缩短带转至点火转速时间,缩短起动时间。

第2阶段,从主燃烧室点火成功开始,依靠起动机提供的功率和涡轮功率带动发动机转子转速提高,

转速的上升速率主要取决于起动机提供的功率和涡轮剩余功率。影响第2阶段起动成功与否的重点是主燃烧室供油规律设计和起动机脱开转速的选取。起动供油规律需综合考虑起动时间要求、压气机特性、最大供油量边界(失速/喘振边界)、最小供油量边界(悬挂边界)、飞机附件加载等条件进行设计,起动过程压气机工作线及边界限制条件如图2所示。

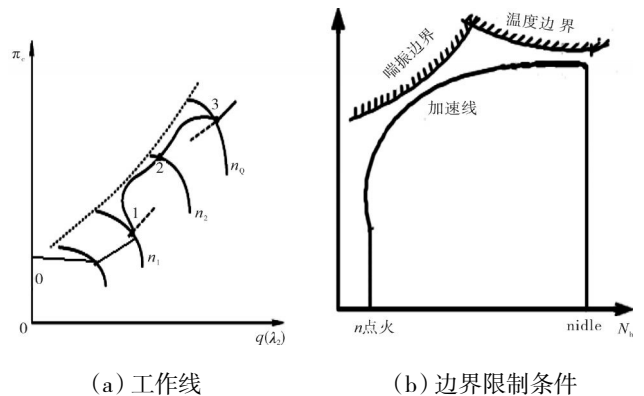


图2 起动过程压气机工作线及边界限制条件

第3阶段,起动机退出工作,由涡轮功率带动发动机转子提高转速,转速的上升速率主要取决于涡轮剩余功率。此阶段影响起动成功与否的重点是主燃烧室供油规律,设计原则与第2阶段相同。

2 高原起动影响理论分析

高原机场具有海拔高、气压低、空气密度小、含氧量低、昼夜温差大等特殊气候环境,对于航空发动机高原起动均会产生不利影响^[12-15]。

对于航空燃气涡轮发动机及燃气涡轮起动机来说,在高原环境下,由于空气压力及空气密度降低,限制转速条件下,起动机输出功率变小,因此,在发动机起动前段(第1、2阶段),起动机带转能力将有所下降,相应到达第1、2阶段的转速会降低或时间变长。根据高原试验结果可知,最长的转速悬挂可达3~5 min,并多次出现。因此要对高原地区起动供油规律及控制时序进行调整,以使发动机油气匹配达到最佳。此外,由于进气密度减小,在相同体积流量的进气条件下,进入发动机的空气质量流量相对降低,余气系数减小,在相同进气温度条件下若按平原地区供油规律供油,油气比会偏高,会产生富油燃烧,造成排气温度升高,从而造成起动失败。因此,可采用提高起动机功率的方法,来提高发动机在高原地区的点火转速和脱开

转速,以使发动机油气匹配达到最佳。

根据飞机需求,发动机还需给飞机附件提供动力,以满足飞机日常需要。在高原起动过程中,发动机自身剩余功率降低,若要给飞机提供正常的功率输出,将会大大增加起动失败的概率。在发动机起动初期,发动机剩余功率相对较少,若起动过程全程加载(飞机附件)或中间加载,相当于发动机负载相对变大,导致发动机工作点偏离正常工作线,从而使排气温度升高,起动转速悬挂,起动时间变长,进而造成起动失败。在起动过程中提供飞机附件的功率相对较少,供飞机液压系统正常工作有限,因此起动过程提供飞机功率提取的意义十分有限。

3 高原起动改进措施及试验验证

针对高原环境对起动过程不利影响的分析,结合发动机自身可实现的调整手段,初步制定以下改进措施,并在某型发动机高原起动试验中验证(高原海拔高度为 3700 m)。

3.1 起动机功率提升

针对起动机在高原环境下工作功率有所降低及第 1、2 阶段带转转速不足的问题,提出提高起动机功率的措施。在某型发动机高原起动试验中,起动机功率调整后约提高 1%,在相同条件下,发动机冷运转转速提高约 1.2%,如图 3 所示。起动机功率提高约 1%,发动机点火转速可提高 2%,起动机脱开转速可提高 2.5%,排气温度可降低 8%,起动时间将缩短约 8%。

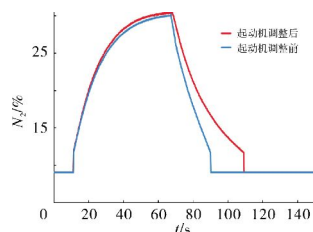


图3 起动功率调整前后发动机冷运转情况对比

3.2 延长点火时间和起动机脱开时间

对比平原(海拔 300 m)及高原起动过程,如图 4 所示。从图中可见,高原起动过程的点火转速和脱开转速都比平原地区的低,点火和脱开时间也要比平原地区的长。针对发动机高原起动过程中,到达点火转速和起动机脱开转速变长的现象,对发动机起动控制时序进行优化,相应滞后或延长发动机供油时间,使发动机点火成功率增加,点火后油气比分配

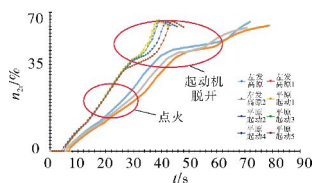


图4 高原及平原地区发动机起动情况对比

更合理,为起动后段创造有利条件。同时也可延长起动机脱开时间,尽可能使带转转速提高,以提高发动机高原起动成功率;根据起动机转速和功率的关系,发动机转速在 40% 时起动机功率开始达到峰值,此时起动机脱开,未能充分发挥其带转能力。因此提出起动机带转时间由 70 s 延长至 90 s,初步评估可使高压转速提高 20%。该项改进措施可提高 42% ~ 48% 范围内剩余加速功率,以解决发动机脱开时转速偏低及较低转速状态发动机加速能力不足的问题。

3.3 提高起动机功率

针对发动机在起动过程中进行液压加载造成负载增加、起动困难的情况,采取在起动过程中全程飞机卸载,卸载后发动机输出功率完全用于发动机起动(飞机加载功率可达 20 kW),对于起动初期发动机产生功率较小的阶段帮助较大,卸载的功率可提高脱开转速,降低排气温度。从高原试验验证结果来看,在起动过程中飞机全程液压卸载措施十分有效,在飞机加载条件下起动不成功时,采取飞机卸载措施可使起动机功率提升,如图 5 所示。

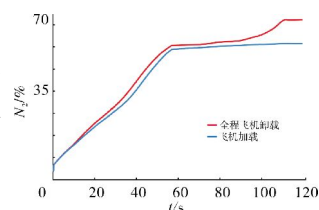


图5 飞机液压加载对起动过程中发动机转速影响

飞机加载时,在起动第 3 阶段(起动机脱开后),发动机转速不提高,出现悬挂现象;在相同条件下,在起动过程中飞机卸载,虽然在起动第 3 阶段(起动机脱开后)转速悬挂现象仍持续 20 s 左右,但最终可以保证起动成功。为评估飞机加载对起动性能影响的关系,挑选飞机卸载和飞机加载均起动成功的数据,在飞机卸载的情况下,起动时间缩短 20%,排气温度下降 3%,起动机脱开转速提高 3%。加载和卸载对起动过程中发动机转速影响如图 6、7 所示。

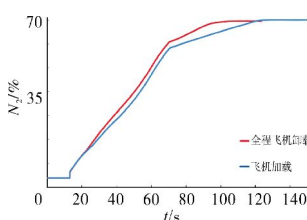


图6 飞机液压加载对起动过程中发动机转速影响

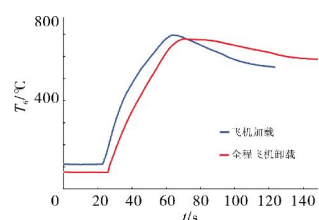


图7 飞机液压加载对起动过程中发动机排气温度影响

4 结论

本文通过一系列高原起动分析及试验,总结出提

高发动机高原起动成功率的有效措施,结论如下:

(1)在发动机起动过程中飞机卸载可以有效降低排气温度和缩短起动时间,提高高原起动成功率,经试验验证,采取飞机卸载措施后,起动时间可缩短20%,排气温度下降3%,起动机脱开转速提高3%。

(2)采取延长点火时间和起动机脱开时间等优化控制时序,可使发动机点火成功率提高,点火后油气比分配更合理,从而为起动后段创造有利条件,提升发动机高原起动成功率。

(3)发动机在高原使用时应采用相对平时更大功率的起动机,以提高发动机转速上升率(起动过程第1、2阶段),经试验验证,起动机功率提高约1%,点火转速及脱开转速可提高约2%,起动时间缩短8%。

参考文献:

- [1] 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.
PIAO Ying.An analysis of the starting characteristics of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power,2003,18(6):777.(in Chinese)
- [2] 廉筱纯.航空发动机原理[M].西安:西北工业大学出版社,2005:115-123.
LIAN Xiaochun. Theory of aeroengine [M]. Xi'an : Northwestern Polytechnical University Press,2005:115-123.(in Chinese)
- [3] 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.
MIAO Hezhuang,WANG Chaopeng,ZHU Zhe,et al. Experimental research on aeroengine starting at high/low temperature and at plateau[J]. Engineering and Testing,2015,55(1):38. (in Chinese)
- [4] 王兆铭,黄毅,李诗军,等.某型航空发动机高原起动供油规律研究[J].航空发动机,2014,40(4):30-38.
WANG Zhaoming,HUANG Yi,LI Shijun,et al. Study on oil supply for ground start performance of engine plateau[J].Aeroengine,2014,40(4):30-38.(in Chinese)
- [5] 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):327-328
GUO Wei,YANG Zhijun. Study of aeroengine starting tests at high/low temperatures and at plateau [J]. Journal of Aerospace Power,2003,18(3):327-328. (in Chinese)
- [6] 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-start-
ing test on the highland ground [J] Journal of Propulsion Technology , 2003,24(6):547-549. (in Chinese)
- [7] 何立明.飞机推进系统原理 [M]. 北京:国防工业出版社,2006:90-104.
HE Liming. Theory of aircraft propulsion [M]. Beijing:National Defence Industry Press,2006:90-104. (in Chinese)
- [8] 李俊钢.冬季高原复杂机场对CFM56-7B发动机的起动影响[J].航空维修与工程,2013(4):77-87.
LI Jungang. Influence of winter plateau complex airport on starting of CFM56-7B engine[J].Aviation Maintenance and Engineering,2013(4):77-87. (in Chinese)
- [9] 李文峰,王永生,雷震,等.涡扇发动机高原起动试验研究[J].航空动力学报,2003,18(5):599-600.
LI Wenfeng,WANG Yongsheng,LEI Zhen,et al. Experimental investigation of some turbofan engine starting in plateau area[J]. Journal of Propulsion Technology,2003,18(5):599-600. (in Chinese)
- [10] Alabin M A. Starting of aircraft gas turbine engine [R]. AAIA-1972-111.
- [11] 李凡玉,李军.改善发动机高原地面起动性能的实验研究[J].空军工程大学学报,2012,13(5):26-36.
LI Fanyu,LI Jun. Experimental study on improving ground start performance of engine plateau [J]. Journal of Air Force Engineering University,2012,13(5):26-36.(in Chinese)
- [12] 敖良忠,钱锋.CFM56-5B发动机高高原冷发启动困难的研究[J].西安航空学院学报,2015,33(3):4-14.
AO Liangzhong,QIAN Feng. Research on the difficulty of CFM56-5B engine high-altitude cold-starting [J]. Journal of Xi'an Aeronautical College, 2015,33(3):4-14. (in Chinese)
- [13] 吴利荣,李剑.某型发动机高原起动过程数学模型建立[J].航空动力学报,2004,19(1):59-67.
WU Lirong,LI Jian. Establishment of mathematical model for a kind of engine plateau starting process [J]. Journal of Aerospace Power, 2004,19(1):59-67. (in Chinese)
- [14] 田金虎,刘志友.某型发动机高原与高温起动过程中喷口喷火现象分析[J].中国航空学会动力分会,2005(1):161-171.
TIAN Jinhu,LIU Zhiyou. Analysis of spouting phenomenon of nozzles during high-altitude and high-temperature starting of a certain engine [J]. China Aviation Society Power Branch,2005(1):161-171. (in Chinese)
- [15] 汪涛,王朝蓬,王俊琦.涡轴发动机高原起动试验研究[J].现代机械,2016(6):92-93.
WANG Tao,WANG Chaopeng,WANG Junqi. Research on starting test of turbine engine plateau[J]. Modern Machinery,2016(6):92-93. (in Chinese)

(编辑:刘亮)