

文章编号:1000-8055(2013)06-1286-05

非标准大气条件下航空发动机地面起动性能

郭海红, 潘 旭, 张志舒

(中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 为了得到非标准大气条件对航空发动机地面起动性能的影响, 对非标准大气条件下空气涡轮起动机输出功率特性、标准大气条件下理想起动过程的影响因素进行了分析. 研究了非标准大气条件对航空发动机地面起动性能影响, 分析了大气温度对起动点火时间、起动时间、起动过程排气温度的影响. 应用均匀加速原理, 对某型涡扇发动机起动时间进行估算. 基于地面台架起动试验条件, 对试验数据统计分析: 大气温度增加或降低, 将增加起动点火及脱开时间. 对大气温度在 293.15 K 以上的开车次的平均起动时间与 293.15 K 以下的平均起动时间进行对比, 热天起动时间比冷天要短约 3 s, 试验结果符合理论分析.

关 键 词: 航空发动机; 非标准大气; 地面起动; 空气涡轮起动机; 均匀加速原理

中图分类号: V263.3

文献标志码: A

Aero-engine ground starting performance at non-standard atmosphere

GUO Hai-hong, PAN Xu, ZHANG Zhi-shu

(Shenyang Engine Design and Research Institute,
Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to gain the influences of the atmosphere condition on aero-engine starting characteristics, the output power of air turbine starter and ideal starting process at standard atmosphere were analyzed, and the diversities of ground starting performance at non-standard atmosphere were described, e. g.: differences of ignition time, start time and exhaust gas temperature. Besides, with use of constant acceleration method, the starting process was simulated. Based on grounding test conditions, test data was summarized. The ignition and breaking-up time was prolonged with the temperature drop or rise. Comparing the start time below or above 293.15 K, it is 3 s shorter in hot days than in cold days, so the results meet the theory analysis well.

Key words: aero-engine; non-standard atmosphere; ground starting;
air turbine starter; constant acceleration method

航空发动机的起动过程一般分为 3 个阶段, 第 1 个阶段发动机主燃烧室不供油, 由起动机将发动机的转子带转到点火转速; 第 2 阶段发动机主燃烧室供油点火成功, 涡轮开始产生功率, 涡轮和起动机将发动机转子带转到最小平衡转速; 第 3 阶段发动机转速达到起动机断开转速后, 起动机断开, 发动机靠涡轮功率加速到慢车状态.

航空发动机起动是一个复杂的动态过程, 其部分结构参数、可调几何部位的调节规律、起动供油规律、起动机功率、发动机转子转动惯量、发动机起动工作环境以及发动机负载等因素均会对起动性能产生影响. 发动机用户和通用规范对起动过程基本要求是起动时间短、不超温、不喘振、不悬挂^[1], 所以成功而快速的起动对于航空发动机

收稿日期: 2012-09-29

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130617.0940.201306.1286_010.html

作者简介: 郭海红(1981—), 女, 山西介休人, 工程师, 硕士, 主要从事航空发动机总体性能研究设计工作.

来说至关重要。

发动机起动过程第1阶段和第2阶段的时间构成了起动时间的主要部分,这2个阶段中发动机加速过程主要取决于起动机扭矩和起动功率,受大气条件影响较大;第3阶段,主要受发动机本身特性及起动燃油流量的影响。

本文根据同一技术状态下发动机地面台架试验的结果,对冷、热天条件下发动机起动性能的差异进行了比较、分析,得出非标准大气条件空气涡轮起动机起动特性^[2-5],得到发动机起动过程中第1,2阶段发动机的起动性能,进而研究非标准大气条件对发动机起动性能的影响。

1 空气涡轮起动机功率特性

空气涡轮起动机具有质量轻、功率大、应用范围广的特点。根据发动机起动性能表现,可以通过起动机功率和输出转速、扭矩等性能参数的调整进行发动机起动性能的调节^[6-7]。

空气涡轮起动机不同转速 n_{sta} 对应的输出轴功率为^[8]

$$P_{sta} = \dot{m}_{oa} \cdot \frac{\kappa}{\kappa - 1} R T_{ot} \left(1 - \frac{1}{\pi_{sta}^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}} \right) \eta_{sta} \quad (1)$$

P_{sta} 为空气涡轮起动机输出轴功率(kW); R 为气体常数(J/(K·mol)); κ 为气体等熵指数; $\dot{m}_{oa}$ 为空气涡轮起动机进口空气质量流量(kg/s); T_{ot} 为空气涡轮起动机进口空气总温(K); η_{sta} 为空气涡轮起动机效率,按起动机换算转速和 π_{sta} ,由空气涡轮起动机特性线查出,典型特性线见图1。 π_{sta} 为空气在起动机涡轮中的膨胀比, $\pi_{sta} = \frac{p_{0t}}{p_{2s}}$; p_{0t} 为起动机涡轮进口空气总压(Pa); p_{2s} 为涡轮后的压力(Pa),等于或者稍大于大气压力。

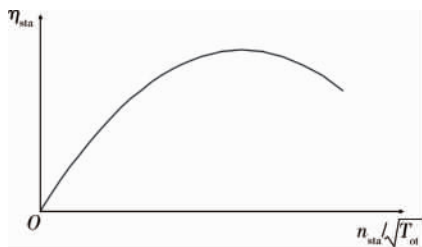


图1 空气涡轮特性线

Fig. 1 Air turbine characteristic curve

可从公式(1)推导得出:空气涡轮起动机进口空气质量流量一定的前提下,最大输出功率与起动机进气压力、温度相关。进气压力越大,涡轮膨胀比越大,起动机的输出轴功率越大;进气温度越

高,起动机的轴功率越大。在保证气源参数恒定的条件下,空气涡轮起动机输出功率受环境温度影响小。

2 非标准大气条件对发动机起动性能的影响

2.1 相似理论条件下的起动性能

发动机起动过程不完全满足流动相似准则,通过简化,起动过程满足以下假设条件时,运用流动相似理论,对发动机起动过程进行推导,可以得到起动时间的相似参数^[9]。具体假设条件如下:

1) 发动机共同工作线不变;

2) 同一发动机状态,起动机换算扭矩不随外界大气条件变化而变化;

3) 起动过程的第2,3阶段,同一发动机状态,涡轮前燃气温度与发动机进口温度比值 $\sqrt{T_4/T_0}$ 固定不变;

4) 同一发动机状态,高压转子机械效率、燃烧室总压损失系数等不随大气条件变化而变化。

基于上述假设条件,可推导得到发动机起动时间的相似参数为

$$t_r = (p_0/101.325) \cdot t / \sqrt{T_0/288.15} \quad (2)$$

p_0 为环境大气压力(Pa); T_0 为环境大气温度(K); t_r 为起动时间换算值(s)。

理想起动条件下, t_r 与大气条件无关,起动时间 t 随外界大气温度升高而增长,随外界大气压力升高而缩短。

2.2 其他因素对起动性能的影响

理想起动过程的前提是满足了起动油气比最佳条件下,起动时间只受点火转速和脱开转速的影响。但实际工作过程中,在供油规律给定的条件下,起动特性会受到大气条件影响^[10]。

低温天,燃油黏度大、挥发性差,在燃烧室雾化效果差,导致形成稳定火焰条件变差。燃烧室油气混合气被点燃并形成稳定火焰的时间,随着大气温度降低而延长,使涡轮投入工作时间延长,起动时间也延长^[11-12]。

大气温度低,使滑油变稠,黏度增加,摩擦力矩增加,一般 233.15 K 条件下的压气机阻力是 288.15 K 时的 1.27 倍。在起动机功率一定时,两者因素导致低温天起动过程用于转子加速的剩余功率减少,起动可靠性降低,严重时,出现冷悬挂。

高温天,空气密度低,发动机空气质量流量减小,起动过程易出现燃烧室富油,涡轮前温度高,

导致压气机失速,出现热悬挂。

3 地面台架起动时间理论计算

基于匀加速原理,对起动时间进行理论估算。起动时间通过高压转子的扭矩平衡方程求得^[13]。

$$M_{ct} + M_t - \frac{M_c}{\eta_m} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3)$$

$$t = J \frac{\pi}{30} \int_0^n \frac{dn}{M_{ct} + M_t - M_c/\eta_m} \quad (4)$$

J 为发动机高压转子转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$); M_{ct} 为起动机扭矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$); M_c 为压气机扭矩 ($\text{N} \cdot \text{m}$), 与高压转子转速的关系, 见式(5)。计算时对系数 c 考虑了大气温度修正。

$$M_c = c \cdot n^2 \quad (5)$$

η_m 为转子传动机械效率; M_t 为涡轮扭矩, 在涡轮前温度为常数的情况下, 可以认为与转子转速成正比。

$$M_t = c_1 \cdot n - c_2 \quad (6)$$

式中 c_1, c_2 为常数, 决定于发动机类型和特征转速。

采用上述方法, 考虑了大气温度对发动机转子扭矩的修正, 对某型涡扇发动机地面起动时间进行了计算, 计算结果见图 2。

计算结果曲线与理论分析一致, 起动功率一定的前提下, 标准天起动时间最短; 起动时间随着大气温度降低而延长, 随着大气温度增高, 也呈延长的趋势。

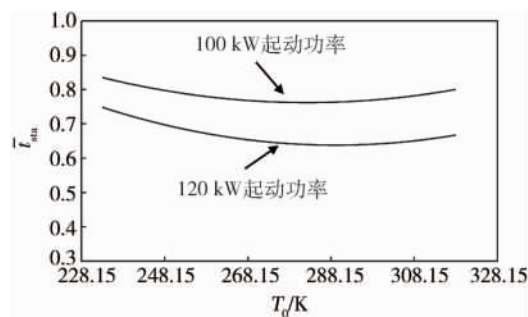


图2 某型涡扇发动机地面起动时间计算结果

Fig. 2 Ground starting time simulation result of a turbofan engine

4 地面台架起动试验数据对比分析

某涡扇发动机地面台架试车, 采用空气涡轮起动机, 进气采用地面气源。因此, 各次试车中起动机进口空气流量、压力、温度重复性较好。根据

起动机输出轴功率计算公式(1), 可以得到地面台架试车起动机功率基本一致。

地面台架试车受环境限制, 本论文所选取试验温度在 262.15~303.15 K 范围内, 大气压力在 99.7~101.5 kPa 范围内。

4.1 非标准天起动时间差异

试验数据统计时, 排除了涡扇发动机转子转动惯量、几何可调面积及供油规律影响, 选取同一台份涡扇发动机, 保证其技术状态基本一致, 对起动过程数据进行对比分析^[14]。

点火转速按照物理转速执行, 不受大气温度影响。因此, 在起动机功率一定的前提下, 点火时间取决于发动机阻力矩, 受大气温度影响因素明显。

发动机点火转速到起动机脱开这一阶段, 由于该阶段用于加速的涡轮剩余功较少, 因此仍主要取决于发动机阻力矩和起动机扭矩^[15]。

由图 3、图 4 是某台份涡扇发动机相对点火时间和脱开时间分布图。可以看出: 在 288.15 K 大气温度附近, 时间最短, 随着大气温度降低或者增加, 时间均呈现增长的趋势。

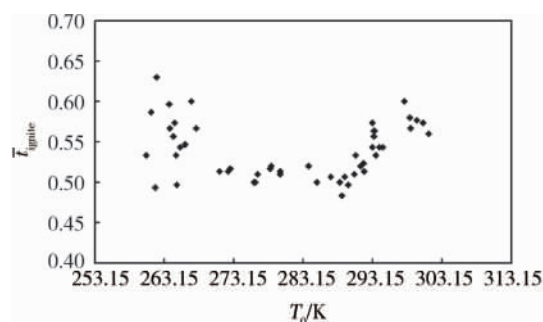


图3 某台份涡扇发动机点火时间分布图

Fig. 3 Ignition time distribution of a turbofan engine

实际的起动过程, 大气温度会对空气密度、滑油工作特性等带来显著影响, 影响了起动机及压气机扭矩, 从而影响起动点火、脱开时间, 最终影响起动时间。同时, 实际起动过程不能完全满足相似准则条件, 在不同大气温度下, 慢车状态换算转速一定前提下, 换算起动时间受起动扭矩和压气机扭矩影响, 随温度升高或降低而延长。

选取同一台份涡扇发动机, 起动供油规律基本一致的试车数据, 在 288.15 K 大气温度附近, 时间最短, 随着大气温度降低或者增加, 时间均呈现增长的趋势, 见图 5、图 6。由图可以看出冷天带

来起动时间的延长比热天显著,试验结果与理论计算一致。

对大气温度在 293.15 K 以上的开车次的平均起动时间与 293.15 K 以下的平均起动时间进行对比,热天起动时间比冷天要短约 3 s。

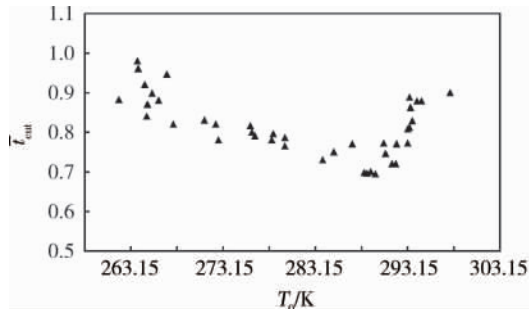


图4 某台份涡扇发动机脱开时间分布图

Fig. 4 Cut off time distribution of a turbofan engine

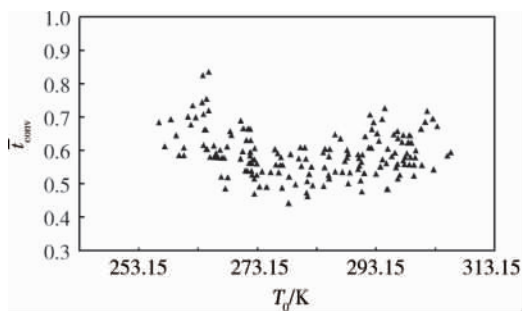


图5 某台份涡扇发动机试车换算起动时间趋势

Fig. 5 Conversion test starting time of a turbofan engine

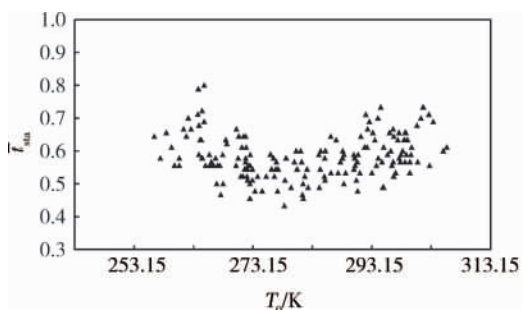


图6 某台份涡扇发动机试车起动时间趋势

Fig. 6 Test starting time of a turbofan engine

4.2 非标准大气条件起动中排气温度差异

发动机技术状态一致前提下,起动排气温度突升值受大气温度、供油规律及是否为热起动等因素的影响。保证起动供油规律一致且都是冷起动,起动排气温度大小随着大气温度的升高而升

高,见图7。

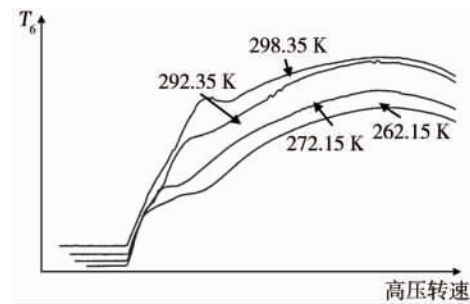


图7 某台份涡扇发动机试车起动过程排气温度趋势

Fig. 7 Gas temperature curves of a turbofan engine in test starting

5 结 论

通过上述理论分析及试验验证结果对比,可以得出如下结论:

- 1) 地面台架起动试验中,大气条件对起动过程第1,2阶段时间影响显著。
- 2) 在起动功率一定的前提下,起动第1,2阶段时间在标准大气温度条件时最短,随着大气温度降低或升高,时间呈延长趋势。
- 3) 保证起动供油规律一致,且均为冷起动的前提下,起动过程中排气温度随着大气温度升高而升高。

鉴于以上结论,起动系统设计时,应当充分考虑大气条件对起动性能影响,起动机功率及扭矩要求应当有足够裕度,保证发动机在工作温度范围内满足起动技术要求。

试验分析对于全包线范围内,高、低温起动试验及高原起动试验的调试,对于起动性能优化试验有工程指导意义,对发动机设计中,合理制定起动技术要求有参考价值。

参考文献:

- [1] 国防科学技术工业委员会. GJB241A-2010 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2010:48-50.
- [2] 屠秋野,唐狄毅. 涡扇发动机起动模型及起动控制规律的研究[J]. 推进技术,1999,20(2):21-24.
TU Qiuye, TANG Diyi. Study on startup model and startup control law of turbofan engine[J]. Journal of Propulsion Technology, 1999, 20(2): 21-24. (in Chinese)
- [3] 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 turbofan/turbojet engine[J]. Gas

- Turbine Experiment and Research, 2002, 15(1): 14-19. (in Chinese)
- [4] 李文峰, 王永生, 雷震. 某涡扇发动机高原起动试验研究[J]. 航空动力学报, 2003, 18(5): 599-603.
LI Wenfeng, WANG Yongsheng, LEI Zhen. Experimental investigation of some turbofan engine starting in plateau area[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(5): 599-603. (in Chinese)
- [5] 乔洪信, 夏爱国, 杨立. 某型航空发动机高原使用起动供油量调整研究[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)
- [6] 孙牧桥, 苏三买, 成剑. 空气涡轮起动机调压装置 AMESim 建模与仿真[J]. 航空动力学报, 2012, 27(2): 450-456.
SUN Muqiao, SU Sanmai, CHENG Jian. Air turbine starter pressure controller modeling and numerical simulation based on AMESim[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(2): 450-456. (in Chinese)
- [7] 常博博, 苏三买, 刘铁庚. 辅助动力装置建模及数值仿真[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 2122-2127.
CHANG Bobo, SU Sanmai, LIU Tiegeng. Model and numerical simulation of auxiliary power unit[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2122-2127. (in Chinese)
- [8] 《航空发动机设计手册》总编委会. 航空发动机设计手册第14册: 辅助动力装置及起动机[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001: 54-59.
- [9] 刘建勋. 基于流动相似理论的涡扇发动机起动过程分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2009, 22(2): 1-4.
LIU Jianxun. Ideal start procedure analysis of turbofan engine based on similarity theory assumption[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2009, 22(2): 1-4. (in Chinese)
- [10] 郭昕. 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. Study of aeroengine starting test at high/low temperatures at plateau[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(3): 327-330. (in Chinese)
- [11] 刘磊. 航空发动机地面与高空起动特点分析[J]. 价值工程, 2011, 30(15): 34-35.
LIU Lei. Starting characteristics of aero-engine at ground and in high altitude[J]. Value Engineering, 2011, 30(15): 34-35. (in Chinese)
- [12] 朴英. 航空燃气涡轮发动机起动性能分析[J]. 航空动力学报, 2002, 18(6): 777-782.
PIAO Ying. An analysis of the starting characteristics of aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 2002, 18(6): 777-782. (in Chinese)
- [13] 骆广琦. 航空燃气涡轮发动机数值仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 124-131.
- [14] 苏伟生, 孙建国. 基于扭矩特性的航空发动机起动系统数学建模[J]. 航空动力学报, 2005, 6(3): 499-502.
SU Weisheng, SUN Jianguo. Study on mathematic model of aeroengine starting systems based on moment characteristics[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 6(3): 499-502. (in Chinese)
- [15] 斯辽赫钦科 C M. 空气喷气发动机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 369-373.