

# 改善发动机高原地面起动性能的实验研究

李凡玉, 李军, 江勇, 张百灵

(空军工程大学航空航天工程学院, 陕西西安, 710038)

**摘要** 为解决航空燃气涡轮发动机在高海拔机场地面起动时间过长的问题,在理论分析的基础上寻找缩短起动时间的调整方案,然后在某高海拔地区机场进行高原起动试验,试验中首先采用起动初期补氧的方法,在此基础上采用起动液压负载控制的方法,验证这些调整方案的可行性,并且进一步寻找最佳的调整方案。经过理论分析和试验研究,得到了起动初期补氧和起动液压负载控制的综合调整方案。试验结果表明,综合调整方案能够有效增加发动机起动初期的剩余功率,可缩短发动机的起动时间18%,起动最大排气温度略有下降。因此,综合调整方案能够有效改善发动机在高海拔地区的起动性能。

**关键词** 航空发动机;高原试验;起动试验;补氧;液压负载控制

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.05.006

**中图分类号** V233.63 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)05-0025-05

我国高原面积比较大,部分机场海拔高度在3 000 m以上。与低海拔机场相比,高海拔机场的大气压力降低,空气密度减小,发动机的空气流量明显减小,这样会造成发动机起动性能变差<sup>[1-2]</sup>。因此,探索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机场的正常使用具有重要意义。

某型涡扇发动机的起动性能主要用起动时间 $t_{st}$ (从按下起动按钮到高压转子转速 $n_2$ 达到规定转速 $n_2^*$ 所经历的时间)来表征,在规定范围内 $t_{st}$ 越小,起动性能越好。起动时间可计算为:

$$t_{st} = \left( \frac{30}{\pi} \right) \int_0^{n_2^*} \frac{J}{\Delta P} n_2 dn_2 \quad (1)$$

式中: $J$ 为高压转子转动惯量; $\Delta P$ 为高压转子剩余功率。增加涡轮功率,减小提取功率,可增大起动剩余功率从而有效改善起动性能<sup>[2-3]</sup>。

为此,本文在某型发动机高海拔机场发动机试验中,针对改善发动机起动性能进行了补氧增加涡轮功率和调整液压负载卸载时机以减小提取功率的试验研究。

## 1 高原地面起动试验

### 1.1 试验系统简介

本次试验采用移动式试车系统,包括移动式试车台架、移动式工艺系统以及车载式测控系统3大部分。移动式试车台架是最主要组成部分,包括发动机主体和安装固定发动机及外置机匣的车体。移动式工艺系统用于对发动机供油、供氧以及进行维护。车载式测控系统用于对发动机及工艺系统进行参数测量及状态监控。移动式试车系统方便移动,能够在不同的试验场地进行试验。

### 1.2 试验条件与方法步骤

在某高海拔机场进行地面起动试验,大气压力为61 kPa,大气温度为13℃。针对2种不同的调整方案,试验分为2步进行:

收稿日期:2012-02-24

作者简介:李凡玉(1988-),男,山东汶上人,硕士生,主要从事飞机推进系统热力理论与工程研究。

E-mail: 00010601@163.com

1) 发动机起动补氧试验。在其他条件基本一致的情况下,①未补氧条件;②在起动过程全程补氧(从起动按钮按下开始到高压转子转速达到53%结束),称为补氧方案A;③考虑到发动机补氧主要影响燃烧室点火,补氧方案A消耗的氧气量较大,因此调整补氧策略,从起动按钮按下后0.2相对时间开始到高压转子转速达到35%结束,称为补氧方案B。

2) 发动机起动液压负载控制的试验。在其他条件基本一致的情况下,①发动机液压满载起动实验,即起动后短时间内液压系统压力达到最大值;②发动机液压负载控制,即起动初期进行液压压力卸载,当高压转子转速达到57%后再恢复液压系统压力;③发动机高压转速大于57%即达到慢车转速时恢复液压系统压力。后2种方案分别称为液压负载控制方案A和方案B。考虑到第1步中采用补氧方案B取得的改善效果较好,而且均为液压满载起动,故可用第1步中第3次试验的结果作为液压满载起动试验的结果,为保证试验条件相同和起动的可靠性,液压负载控制方案的2次试验同样采用补氧方案B。

### 1.3 试验数据处理方法

分别以该型发动机在标准大气条件下地面起动的最大允许时间  $t_{\max}$  和最大允许排气温度  $T_{4\max}$  为标准值,进行无量纲处理,得到相对时间  $\bar{t}$  和相对温度  $\bar{T}_4$ 。

为定量分析剩余功率的变化,首先对实验中采集的转速等数据采用低通滤波的方法进行数字滤波处理,经对比分析滤波截止频率对处理结果的影响,选取滤波截止频率为1 Hz,最大的处理误差为2.6%。在此基础上,再对转速随时间变化的曲线求微分,并采用 Savitzky-Golay 平滑化算子进行平滑,得到高压转子转速变化率随时间变化趋势曲线,进一步得到相对剩余功率  $\Delta\bar{P}$ ,定义见式(2)。由于同一台发动机在不同的起动过程中  $J$  不变,所以  $\Delta\bar{P}$  与  $\Delta P$  是成比例的, $\Delta\bar{P}$  可以反映起动过程中的剩余功率  $\Delta P$  随时间的变化情况。

$$\Delta\bar{P} = \frac{\Delta P}{J} \left( \frac{30}{\pi} \right)^2 - n \frac{dn}{dt} \quad (2)$$

## 2 试验结果与分析

### 2.1 补氧对发动机起动性能的影响

在高海拔地区,发动机燃烧室点火成功时间会推迟,进而会减小起动第2阶段的剩余功率  $\delta P$ ,见图1,使该阶段转子加速度减小,起动时间增加<sup>[2]</sup>。

图2-3为未补氧和采用2种补氧方案进行的3次试验中排气温度和高压转子转速随时间的变化曲线。由图3可以看出,未补氧时,发动机起动到慢车转速时间较长,起动性能差,不符合该型发动机的性能指标要求。

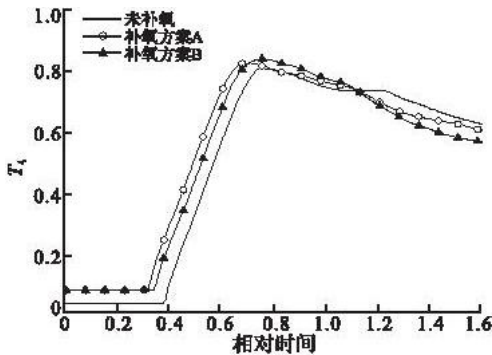


图2 采用补氧方案时  $T_4$  的变化情况

Fig.2 The variation of  $T_4$  (oxygen supply)

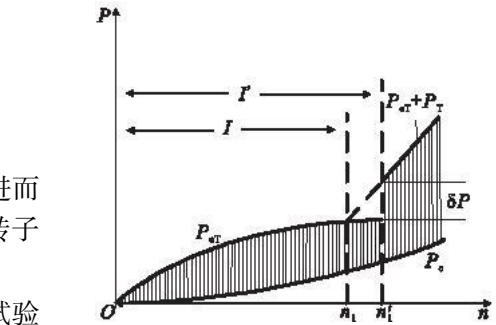


图1 起动过程中各部件功率变化情况

Fig.1 The change of the power of every component during engine starting

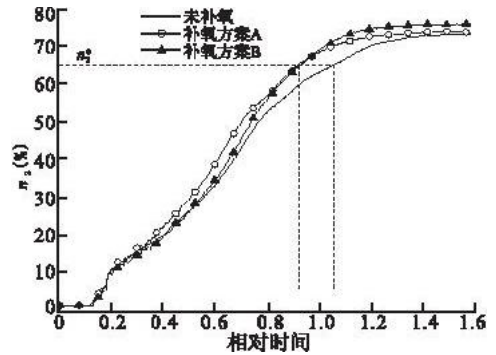


图3 采用补氧方案时  $n_2$  的变化情况

Fig.3 The variation of  $n_2$  (oxygen supply)

对比未补氧和补氧方案A的实验结果可以看出,补氧后,排气温度开始上升的时间即燃烧室点火成功时间提前了0.07相对时间,最大排气温度略有升高,但没有超过最大限制值。发动机点火成功后,高压转子转速上升明显比不补氧时加快,发动机起动成功时间提前了0.14相对时间,起动性能明显提高。由于补氧

方案 A 采用了全程补氧的方法,消耗的氧气量较大。

对比 A、B 补氧方案下的实验结果可以看出,采用方案 B 后,排气温度开始上升的时间较方案 A 略有推后,但仍比不补氧时提前了 0.05 相对时间,说明燃烧室成功点火时间较不补氧时仍有较大的提前。点火成功后,采用方案 B 时高压转子转速刚开始比方案 A 增加慢,但后期转速增加较快,起动成功时间与方案 A 基本相同,约提前了 0.14 相对时间。采用调整补氧方案后,补氧氧气消耗量明显减小,按照补氧时间来计算,方案 B 比 A 减少氧气消耗量 40% - 50%。在 3 次实验中,排气温度均没有超过最大限制值(相对温度均在 1 以下),说明采用补氧的方法不会使发动机起动过程出现超温故障。

图 4-5 为高压转子转速变化率和相对剩余功率随时间变化趋势曲线。从图中可见,采用补氧方法后,转子转速变化率和  $\Delta P$  明显提高。点火成功后的一段时间内转速变化率提高十分明显。在 0.6 相对时刻,未补氧时转速变化率仅为 1.37,而采用补氧方案 A、B 后,转速变化率分别提高到 1.82 和 1.58,分别提高了 32% 和 16%。计算可知,在点火成功后的一段时间内(相对时间从 0.40 到 0.75),采用补氧方案 A、B 可分别使剩余功率平均增大 40%、20%。因此,采用补氧的方法的确有效提高了发动机起动中第 2 阶段的剩余功率,改善了起动性能。

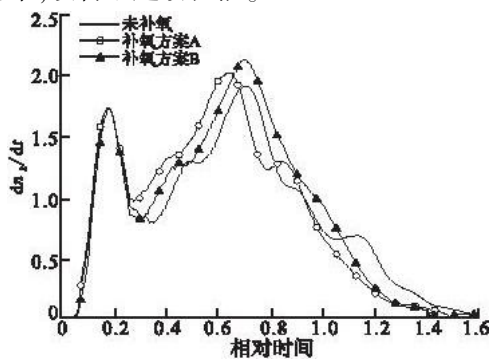


图 4 采用补氧方案时  $n_2$  变化率的变化情况

Fig. 4 The variation of the derivative of  $n_2$  (oxygen supply)

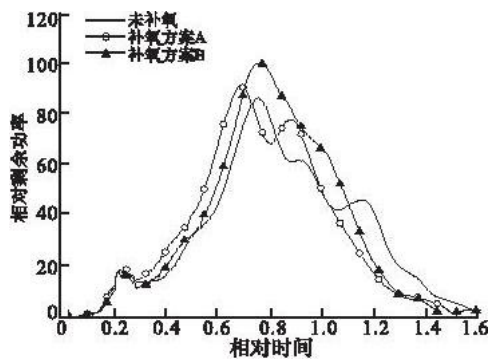


图 5 采用补氧方案时转子相对剩余功率变化情况

Fig. 5 The variation of of the relative residual power of HP rotor(oxygen supply)

## 2.2 液压负载控制对发动机起动性能的影响

经研究发现,在起动初期卸载液压系统压力,等到涡轮可以发出足够功率时再恢复液压系统压力,就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,从而提高剩余功率。本文仅讨论在采用补氧方案的基础上液压负载控制对起动性能的影响。图 6-7 为液压满载起动和采用两种不同的液压负载控制方案起动 3 次实验的排气温度、高压转子转速、转速变化率和相对剩余功率  $\Delta P$  随时间的变化曲线。

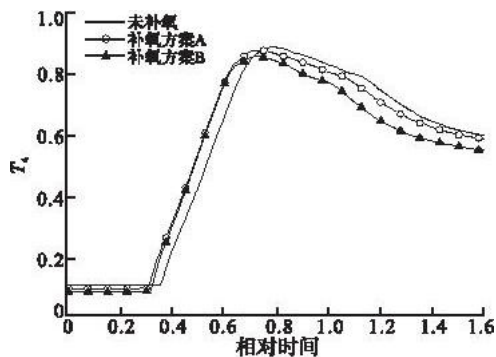


图 6 采用液压负载控制  $T_4$  的变化情况

Fig. 6 The variation of  $T_4$  (hydraulic load control)

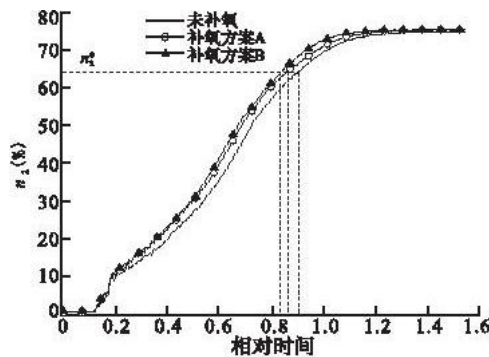


图 7 采用液压负载控制时  $n_2$  的变化情况

Fig. 7 The variation of  $n_2$  (hydraulic load control)

对比液压满载和液压负载控制方案 A 可以发现,在起动液压卸载的情况下,发动机高压转子转速上升明显更快,起动成功时间提前了 0.06 相对时间。排气温度开始上升的时间提前,并且最大排气温度下降了 13 °C。这是由于液压卸载后发动机起动的第一个阶段剩余功率增大,使燃烧室内的温度和压力较早达到了

成功点火的条件,燃烧室成功点火时间有所提前。同时,液压卸载使得在保证有较大剩余功率的前提下涡轮的负载减小,从而使得排气温度会有所下降。

液压负载恢复时机的不同对起动过程也有影响。对比方案 A、B 可以发现,高压转子转速变化情况在开始阶段基本相同,但在起动后期,方案 B 转子转速增加较快,起动成功时间减少了 0.02 相对时间,最大排气温度减小了 0.03 相对温度。这是由于方案 B 液压负载恢复较晚,后期的剩余功率相对较大,因此转速变化率较大,转速上升快。起动后期方案 B 的涡轮负载更低,因此排气温度有较大下降。

由图 8-9 可见,采用液压负载控制的方法,起动初期转子转速变化率明显增大,在 0.6 相对时刻,液压负载控制方案 A 和方案 B 分别增大了 16% 和 30%。说明开始阶段转子转速很快增大,在较短时间内接近规定转速,而后转速变化率减小。在起动初期,液压卸载条件下发动机剩余功率明显增大。经计算,方案 A 和方案 B 在 0.40-0.75 相对时间内剩余功率分别最大增加了 20% 和 40%,在 0.85-1.0 相对时间内,方案 B 的剩余功率明显比方案 A 增大,说明方案 B 推迟了液压压力恢复时间的确增加了后期的剩余功率。对比发现,方案 B 的起动时间较短,更重要的是,方案 B 的最大排气温度减小,有利于减小涡轮负荷,确保发动机在起动过程中不超温。

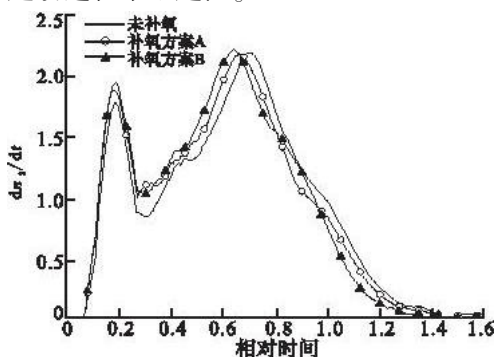


图 8 采用液压负载控制  $n_2$  变化率的变化情况

Fig. 8 The variation of the derivative of  $n_2$  (hydraulic load control)

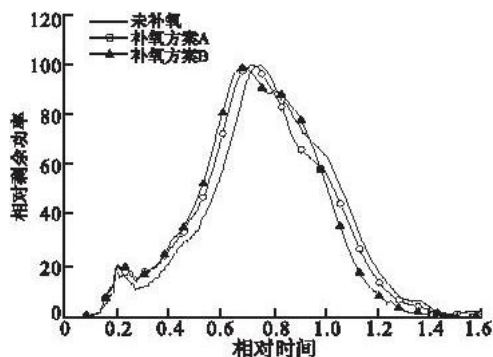


图 9 采用液压负载控制时转子相对剩余功率变化情况

Fig. 9 The variation of of the relative residual power of HP rotor (hydraulic load control)

### 2.3 综合调整前后发动机起动性能的改善

经过试验研究,发现采用补氧方案 B 和液压负载控制方案 B,对发动机起动性能有较好的改善。图 10 为发动机采用综合调整方案前后起动性能的变化情况,可以看出,调整后起动成功时间提前了 0.203 相对时间,起动性能得到较大的改善。在起动过程中转速变化率明显提高,相对剩余功率最大增加了 60%。说明该综合调整方案可以有效改善发动机高原起动性能。

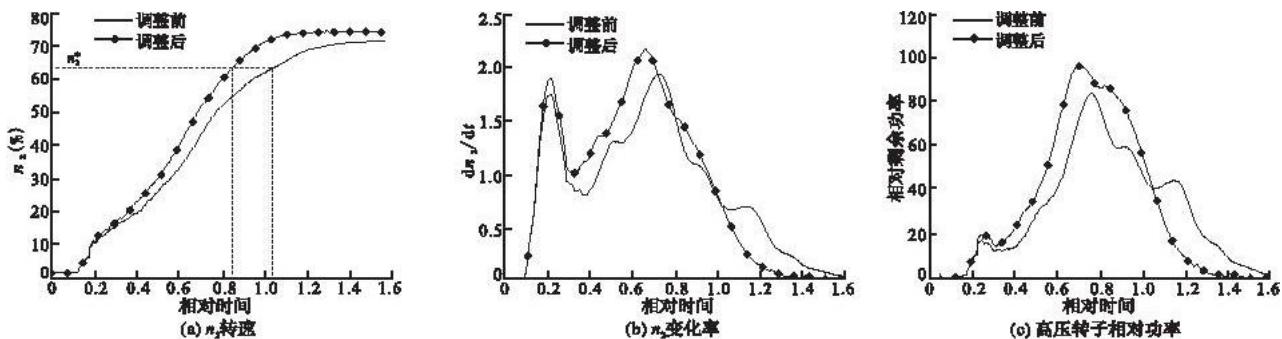


图 10 调整前后相关参数的变化情况

Fig. 10 The variation of relative parameter in the case of with or without adjustment

## 3 结论

本文通过一系列高原起动试验研究,探索改善发动机高原起动性能的有效方法,得出如下结论:

1) 采用补氧的方法可以增加起动第二阶段的剩余功率,缩短起动时间,并不会出现超温故障。试验中,

与不补氧相比可缩短起动时间 12.4%。另外没有必要全程进行补氧,只需要在起动初期补氧即可。补氧方案 B 可以比方案 A 减少氧气消耗量 50% 左右。

2) 在采用补氧方案 B 的前提下,与不采用液压负载控制相比,采用液压负载控制可以增加起动过程的剩余功率,缩短起动时间约 6%。在保证液压系统正常工作的前提下适当后推液压系统压力复时机,可以进一步缩短起动时间,改善起动性能,同时能够降低最大排气温度。试验中排气温度下降了 13 ℃。

3) 综合采用补氧和液压负载控制两种方案后,缩短起动时间 18%。

该综合调整方案是从发动机原理上得到的,具有一定的普遍性,可以作为其他型号发动机改善起动性能的重要参考。

#### 参考文献(References):

- [1] 江勇,周宗才,桑增产,等. 发动机高原地面起动实验初步研究[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)
- [2] 何立明. 飞机推进系统原理[M]. 北京:国防工业出版社,2006.  
HE Liming. Theory of aircraft propulsion [M]. Beijing: National defence industry press, 2006. (in Chinese)
- [3] 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.  
LIAN Xiaochun, WU Hu. Theory of aero engine [M]. Xi'an: Northwestern polytechnical university press, 2005. (in Chinese)
- [4] 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):599-603.  
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):599-603. (in Chinese)
- [5] Alabin M A. Starting of aircraft gas turbine engine [R]. AD740291, 1972.
- [6] 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.  
GUO Xin, YANG Zhijun. Study of aeroengine starting tests at high/low temperature and at plateau [J]. Journal of aerospace power, 2003, 18 (3): 327-330. (in Chinese)
- [7] Owen A K, Daugherty A, Garrard D, et al. A parametric starting studying of an axial centrifugal gas turbine engine using a one-dimensional dynamic engine model and comparisons to experimental results [J]. Journal of engineering for gas turbines and power, 1999, 121:377-383.
- [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: 14-66.

(编辑:徐敏)

## Experimental Investigation on Improvement of Engine-starting Performance on Plateau Ground

LI Fan-yu, LI Jun, JIANG Yong, ZHANG Bai-ling

(School of Aeronautics and Astronautics Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the aero-gas turbine may cost too long time when starting on plateau ground, adjustment schemes were searched to shorten the starting time based on theory analysis. And then an engine-starting experiment was carried out on a plateau airport. To test the feasibility of adjustment schemes and further to get the optimal one, the scheme of oxygen supply was used in the experiment and the scheme of hydraulic load control was used on the base of the first scheme. After theory analysis and experimental investigation, a synthesized adjustment scheme, oxygen supply at the beginning of engine start together with hydraulic load control during engine start, was got. The results do show that the adjustment scheme can improve the residual power of the engine at the beginning of starting and shorten the starting time about 18%. The maximum discharge temperature during starting is reduced a little. Therefore, the adjustment scheme can improve the engine-starting performance on plateau ground effectively.

**Key words:** aircraft engine; plateau test; starting test; oxygen supply; hydraulic load control

#### 本刊相关链接文献:

- [1] 张百灵,李军,李晓勇. 某型涡扇发动机稳定性试验[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2003,4(6):14-16.
- [2] 徐浩军,吴利荣,朱建太. 某型飞机高原机场放起落架的安全高度[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2002,3(1):14-17.