

# 发动机高原地面启动实验初步研究<sup>\*</sup>

江 勇, 周宗才, 桑增产, 李 军, 张发启, 孔卫东, 张百灵

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘 要:** 为了解决某种飞机在海拔3500m高原机场的地面启动问题。突破其规定的>2500m不能启动的限制。研制了专门的发动机启动试车台架, 在海拔高度分别为400m, 2800m, 3650m的三个机场进行涡轮启动机单独启动带转和与发动机共同工作启动试验。分别得到了启动机单独工作和与发动机共同工作的地面启动高度特性。实验表明: 高度自400m增加到3650m, 启动机功率下降的同时, 压气机转速下降10.67%, 带转的发动机高压压气机转速下降7.64%, 但不出现排气超温。共同工作时, 发动机点火成功时间延迟10s, 启动过程延长28s, 排气温度升高160℃。经过对启动机和发动机的初步调整试验研究, 使发动机启动时间缩短6s, 并改善了启动参数的变化规律。使得发动机在保证参数不超标的前提下启动成功。

**关键词:** 航空发动机; 高原试验; 启动试验; 性能; 调整

**中图分类号:** V233.63      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4055 (2003) 06-0547-03

## An engine-starting test on the highland ground

JIANG Yong, ZHOU Zong-cai, SANG Zeng-chan, LI Jun, ZHANG Fa-qi, KONG Wei-dong, ZHANG Bai-ling

(Engineering Inst., Air Force Engineering Univ., Xi'an 710038, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of starting, a certain type of jet engine on the highland airfields' ground over an elevation of 3500 meters, which is limit over of 2500 meters, an engine test cell was specially developed for carrying out engine-starting tests. Altogether we finished more than 80 tests using a turbine generator to start an engine first and then the engine would work itself at three different airfields of different heights: 400m, 2800m, and 3650m respectively. Finally we obtained specific features of the engine started at those different starting heights. The experiments indicate that as the height increases from 400m up to 3650m, the turbine generator's starting power decreases and its rotating speed decreases by 10.6%. The powered rotating speed of the pressure compressor of the turbine generator decreases by 7.64%, but no over-high exhaust temperature appears. When working together, the ignition of the engine is 10 seconds late, and the starting process is 28 seconds longer while the exhaust temperature rises by 160℃. By the adjusting the generator and the engine, the engine starting time is shortened by 6 seconds and the changing rules of the starting parameters are improved so that the engine can be successfully started provided that the parameters do not exceed the limits.

**Key words:** Aircraft engine; Highland test; Starting test; Performance; Adjustment

## 1 引言

带有涡轮启动机的涡轮发动机通常不允许在较高海拔高度进行地面启动。但是我国高原面积很大, 青藏高原海拔高度通常在3400m以上, 使许多飞机进藏受到限制。某型飞机限定地面启动高度低于2500m。通过对其启动系统的研究, 认为发动机启动

过程中, 启动电机的工作不受外界大气压的影响。涡轮启动机和发动机由于高原大气压的降低, 进气流量减少, 使启动剩余功率减少, 同时气动负荷也下降。另外, 调节系统有可能工作范围超限而出现超调。两者的综合影响可能使启动失败。因此, 必须先摸索发动机启动特性随高度的变化规律, 然后通过综合调整使各启动参数达到要求, 保证启动成功。

\* 收稿日期: 2002-10-28; 修订日期: 2003-03-06。获奖情况: 2001年军队科技进步一等奖, 并获国家科技进步一等奖。

作者简介: 江 勇 (1956—), 男, 博士生, 高级实验师, 研究领域为航空发动机稳定性评定方法实验研究。

E-mail: khl725@sina.com

## 2 试验

### 2.1 试验装置

发动机安装在一个支撑式台架上,台架下部安装有燃油系统。电气控制系统、电动油门和自动测试系统安装在附近的操纵台内。试验时还需地面电源车等配合。该试验装置可保证连续启动10次以上,发动机“慢车”状态工作20min。试车参数由仪表和计算机同时显示。

### 2.2 试验步骤

首先,在海拔高度为400m,2800m和3450m的三个机场分别进行同样的对比试验。然后,在高海拔机场进行发动机启动系统的调整试验,摸索调整规律,确定该机是否可以在高原使用。最后回到平原机场对比调整前后的发动机启动性能,并总结使用方法。

进行启动机和发动机“冷启动”、发动机“热启动”,记录并分析启动机和发动机参数。分别调整启动机和发动机不同调整点,再进行以上试车过程。

## 3 数据分析

### 3.1 启动机单独启动高度特性

在不调整启动机前提下,对启动电机和涡轮启动机带动发动机性能进行试验(发动机不工作),以观察启动机的高度特性和带转发动机高压转子随高度的变化规律。图1~3分别示出了其压气机转子和自由涡轮带转的发动机高压转子转速以及排气温度的变化规律。其中三个机场的高度分别以当地的大气压测量值表示, $N_{2s}$ 表示涡轮启动机压气机转速, $N_2$ 表示发动机高压转子转速, $T_{4s}$ 表示涡轮启动机排气温度。图中可以看出:随机场高度的上升,进气流量逐渐减小,涡轮启动机压气机最大转速逐渐减小,最多达到10.67%。且转速变化速率略有下降。启动机排气温度亦逐渐升高,最多达到91℃。由启动机带转的发动机高压转子最高转速由23.4%降低到

15.76%,降低7.64%。由于电动机功率不变,随高度增加,带转的启动机压气机转速增加较快,故启动初期启动机排气温升较低。过渡过程中启动机压气机最大瞬时转速未达到105%最大稳定工作状态。

压气机转速也未达到102%,表明最大转速限制器工作正常,因为其具有静差,导致压气机转速随高度升高而下降。其结果是进气流量和排气温度都下降,自由涡轮功率大大降低,带转的发动机高压转子最大转速下降。这将给发动机启动点火带来困难。

### 3.2 发动机与启动机配合工作高度特性

在不调整发动机的前提下,进行启动机和发动机配合工作的启动试验是在不考虑装机条件和没有液压负载和发电机负载的情况下进行的。

图4示出的启动机压气机转速变化规律与启动机单独启动基本相同,表明不包括自由涡轮的启动机本身的高度特性与发动机是否参加工作关系不大。图5为启动机排气温度变化规律,启动的后半段,因发动机已开始点火工作,转速上升较启动机单独带动快,使其排气温度有所下降。同时,在第35s~60s内,有温度突然开始下降的过程,说明:发动机点火成功并开始工作。但是,随高度的上升,发动机点火成功的时间延迟。图6可见,发动机高压转子转速在不同高度下启动上升的速率相差较大,在100kPa高度与66kPa高度高压转子转速达到53%的时间推迟28s,达到70%的时间推迟48s。图7显示发动机随高度上升,开始工作的时间推迟,点火成功时间延迟约10s,排气温度 $T_4$ 上升的速率下降,但与转速上升相对应,温升过程变长,最高温度增加了约160℃。图8示出的发动机低压转子转速 $N_1$ 变化曲线在高度升高后转速上升变慢的规律与高压转子基本一致。

### 3.3 调整原则

为了保证在高原正常启动,必需对燃调系统进行调整。重点是提高高压转子转速上升率和缩短发动机点火延迟时间,并保证排气温度不至超温。

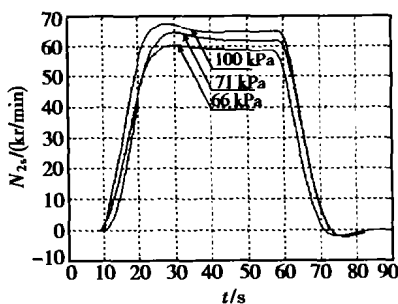


Fig.1  $N_{2s}$  changes with the altitude

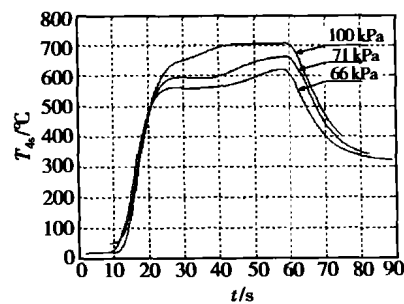


Fig.2  $T_{4s}$  changes with the altitude

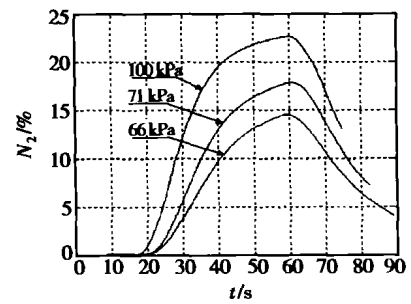


Fig.3  $N_2$  changes with the altitude

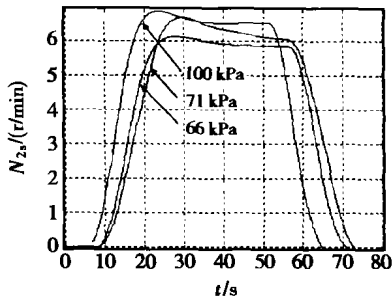


Fig. 4  $N_{2s}$  changes with the altitude

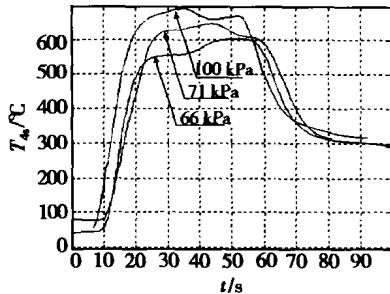


Fig. 5  $T_{4s}$  changes with the altitude

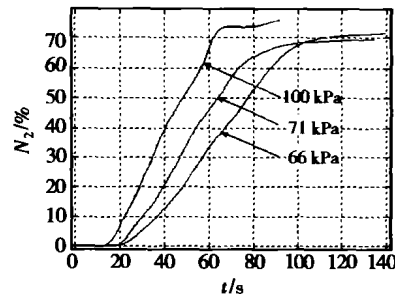


Fig. 6  $N_2$  changes with the altitude

经过大量摸索性试验,初步确定了效果较为明显的调整点和调整方法。其要点是在不出现超温和超转的前提下使供油量处于最佳,以最大限度的发挥启动机和发动机的潜力。

高原启动调整的主要目的是解决点火困难和启动时间过长以及易出现排气超温等问题。一方面要在点火瞬间提高供油压力来保证点火成功率;另一方面使供油量与进气流量的变化相匹配。经过试验,初步确定了主要调整燃油分配器和启动调节器特性的方法。图 9 示出了启动机和发动机调整后发动机启

动转速的变化。可以看出:调整后,发动机高压转子转速达到 53% 的时间缩短 6s,达到 70% (“慢车”转速)的时间也缩短 6s。测试系统所记录的低压转子转速达到 28% 的时间缩短 5.5s。表明:由启动系统控制的高压转子在 0~53% 转速范围内的启动特性得到改善。由图 10 可见,发动机启动排气温度开始上升时间提前 7s,说明点火成功时间提前 7s;排气温度上升呈现先快后慢的现象。其最高温度下降 20℃。表明点火瞬时燃油供油压力提高,随后,供油压力上升较未调之前缓慢,使最高排气温度得以降低。

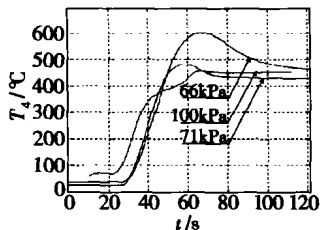


Fig. 7  $T_4$  changes with the altitude

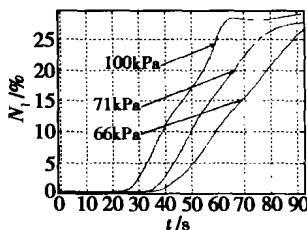


Fig. 8  $N_1$  changes with the altitude

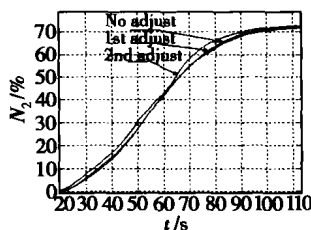


Fig. 9  $N_2$  changes after adjustment

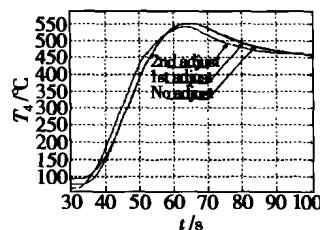


Fig. 10  $T_4$  changes after adjustment

#### 4 结论

(1)通过在不同高度发动机台架地面启动试验,初步摸索出了发动机高原启动试验的方法并研制出了相应的试验设备。

(2)实验表明:该发动机的涡轮启动机在高度上升时单独带转能力下降,最高达到 7.64%。但并不出现人们担心的启动机排气超温和点火失败的问题。

(3)当启动机与发动机共同工作时随高度上升,发动机点火成功的时间被大大推迟。发动机剩余功率较小,导致转速上升缓慢,达到“慢车”转速的时间需时约 100s,超过不长于 70s 的规定。而同时排气温度升高约 160℃,由于尚有较大余量,发动机没有出

现排气超温。

(4)通过调整,经多次实验表明:发动机能够在高原正常地面启动。初步的调整使启动点火成功时间提前 7s,启动时间缩短 6s,排气温度下降约 20℃。

#### 参考文献:

- [1] Alabin M A. Starting of aircraft gas turbine engine [R]. AD740291, 1972.
- [2] 郑 严. 弹用涡喷发动机启动加速过程试验 [J]. 推进技术, 2000, 21(4).

(编辑:王居信)