

文章编号: 1000-8055(2003)03-0327-04

航空发动机高、低温起动及高原起动 试验技术探讨

郭 昕, 杨志军

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 根据 GJB241^[1]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; 阐述了利用自然环境条件、低温起动室及高空模拟试验台进行航空发动机高、低温起动及高原起动试验的优、缺点; 结合国产斯贝 MK202 发动机分别在英国 R. R. 公司低温起动室和高空模拟试车台进行的低温起动试验方法^[2~4]和俄罗斯中央航空发动机研究院(CIAM)高空台的发动机高、低温起动及高原起动试验的方法, 提出了符合我国国情的航空发动机高、低温起动及高原起动试验的实施途径。

关键词: 航空、航天推进系统; 航空发动机; 高温起动; 低温起动; 高原起动; 试验

中图分类号: V263.3

文献标识码: A

Study of Aeroengine Starting Tests at High/Low Temperatures and at Plateau

GUO Xin, YANG Zhi-jun

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The paper analyzes the influences of the starting conditions on engine starting characteristics, and elucidates the advantages and disadvantages of several testing approaches under various testing conditions: natural ambient starting in a sea-level test cell, starting in a low temperature test cell, and in the mechanically simulated high altitude test cell meeting GJB241^[1] requirements for high/low temperature starting test and plateau starting test. The test methods of these starting tests are based on the low-temperature starting test results of the domestic engine SPEY MK202^[2~4] in the low-temperature starting room and the simulated altitude facility of Rolls-Royce Corporation. Additionally, the paper illustrates the aeroengine starting test approaches and schedules at high/low temperatures and at plateau level that conform to the practice and national conditions of China.

Key words: aerospace propulsion system; aeroengine; high-temperature starting; low-temperature starting; plateau starting; tests

1 前 言

我国幅员辽阔, 山势西高、东低, 夏季全国普

遍高温, 冬季南、北温差较大。为适应飞机远距离转场的需要, 航空发动机应有在高、低温及高原环境条件下起动并加速到中间状态的能力。GJB241

收稿日期: 2002-07-10; 修订日期: 2002-11-26

作者简介: 郭昕(1963-), 男, 四川富顺人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士生, 主要从事航空发动机试验研究。

《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》^[1]规定航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机必须通过高、低温起动及高原起动试验方能定型。随着航空发动机试验技术的发展和我国航空发动机研制基础保障条件的建设进展,为严格的贯彻执行 GJB241,准确鉴定国产航空发动机高、低温起动及高原起动性能,本文对航空发动机高、低温起动及高原起动试验技术进行一些探讨。

2 问题的提出

2.1 地面大气温度条件对航空发动机起动性能的影响

地面大气温度条件变化对发动机起动性能的影响主要有以下几方面:

大气温度变化将引起空气密度的变化,使得进入发动机的空气质量流量变化,若供油量不变,则余气系数将发生变化,影响发动机的点火性能和起动性能,改变燃烧室出口温度、压气机工作特性、涡轮工作特性和发动机的起动时间,严重时导致起动失败。

同时大气温度的变化,将引起飞机油箱内燃油密度的变化,在发动机调节规律不变的条件下,供给发动机的燃油容积流量特性不变而质量流量特性改变。若供油质量流量减少,则涡轮功减少,起动时间加长,严重时发动机热悬挂导致起动失败。若供油质量流量增加,则燃烧室出口温度增加,严重时发动机起动超温导致起动失败。燃油温度的变化还将引起燃油粘性的变化,改变燃油的雾化效果,影响发动机的起动性能。

大气温度的变化也将引起发动机滑油箱内的滑油温度变化,滑油温度的变化将改变滑油的粘性。大气温度升高,滑油粘性降低,影响润滑的效果;大气温度降低,滑油粘性增加,起动过程中发动机转子的阻力矩增加,起动困难。

大气温度条件变化对发动机起动还将带来其他影响,如用电机起动的发动机,由于低温使得电池内阻增加,引起起动机的输入电压降低而功率减小,导致发动机起动缓慢、起动时间增长甚至起动失败。同时 O 型密封圈在低温条件下失去弹性,可能引起严重的泄漏;齿轮箱比其内部的齿轮收缩得更快,引起严重的节线干涉造成齿轮损坏;在低温极端条件下的初始起动将引起滑油压力“突升”,滑油压力的迅速增加有时使油滤壳体爆裂并使滑油管产生裂纹。

2.2 高原大气条件对航空发动机起动性能的影响

地面高原大气条件下,海拔高度越高,空气密度越低,使得进入发动机的空气质量流量减少,余气系数降低,燃烧室出口温度升高。余气系数降低,富油造成点火困难,严重时导致点火失败;燃烧室出口温度升高,造成发动机过热,压气机靠近热边界和喘振边界,严重时导致起动失败。

3 极值的确定

3.1 高温起动极值的确定

HB5652.1^[5]中给出我国地面大气温度最高记录值为 49.6℃,考虑机场上飞机在烈日下暴晒,发动机舱内温度急增,地面温度大大高于大气温度,GJB241 按极限条件对航空发动机高温起动作了明确规定:发动机在 71℃ 的环境温度下保温 10 h,然后在进气温度为 52℃,燃油温度为 93℃ 下起动发动机并加速到中间状态。且试验高度要求从海平面到起动包线规定的最高高度。

3.2 低温起动极值的确定

HB5652.1^[5]中给出我国地面大气温度最低记录值为 -53℃,GJB241 按极限条件对航空发动机低温起动作了明确规定:发动机在 -54℃ 环境温度中保温 10 h,在进气温度为 -54℃,燃油和滑油温度为 -54℃ 下起动发动机并加速到中间状态。且试验高度要求从海平面到起动包线规定的最高高度。

3.3 高原起动极值的确定

GJB241 规定,航空发动机高原起动:发动机从海平面到 3 km(如使用部门特殊要求,也可提高至 4.5 km)高度内,应能在无冲压条件下起动。根据我国各机场的实际海拔高度,发动机型号规范应作出具体的规定,作者建议高原起动试验的高度定在 4.5 km 为宜。

4 试验设备

综合国内、外航空发动机高、低温起动及高原起动试验技术的发展,有以下几种进行航空发动机高、低温起动及高原起动试验的设备和方法。

4.1 发动机随飞机转场

用试验机或原型机做试验台,在不同机场、不同大气条件下来进行航空发动机高、低温起动及高原起动试验,这是较早采用的方法。

如涡桨五和涡桨六发动机定型试验中的高、低温起动及高原起动试验,为了“三抢”即抢高寒、抢高温、抢高原,几十个工人、技术员,在 1975 年 1 月~7 月和 1976 年 3 月~7 月,飞奔南北,追随发动机转了 20 多个机场,飞行行程数万里,耗时几个月,也只在海拉尔机场冬季“抢”到了 -23.4°C 的低温;在长沙机场夏季“抢”到了 34.8°C 的高温;高原机场选了格尔木机场,海拔高度只有 2840 m,与 GJB241 的要求有较大差距。

由此可见发动机随飞机转场进行航空发动机高、低温起动及高原起动试验。虽然其试验状态真实,但因受环境大气条件限制,试验周期长,难于满足 GJB241 的要求。

4.2 地面试车台

为了进行冷起动试验,有的国家曾在雪山上建设地面试车台。显然这种试车台所能模拟的飞行状态是有限的(仅为当地静止状态)。这样做不仅耗资大、周期长,且各方面的困难很多,仅是为了满足当时某种局部需要的权宜之计。如我国曾将某型发动机用汽车运往某山区进行高山试车,由于未带加载装置而使试验结果的适用性不完全。

一般海平面试车台,只有在特定地区、特定时间才能进行满足部分要求的高、低温起动试验。虽然我国幅员辽阔,但只有吐鲁番盆地才达到过 49.6°C ,大兴安岭才到过 -53°C ,而且不是年年都有这种气温,也不是在较长的时间内连续有这样的气温。即使在酷热的夏天午后或严寒冬天的凌晨短时间内能达到 $\pm 45^{\circ}\text{C}$ 极值大气温度范围的地区也不多。显然要找这样极端气候条件去做高、低温起动试验是不现实的。如某涡喷发动机在室内地面试车台上进行的高、低温起动定型试验的最高温度只达到了 35°C ,最低温度只达到了一 25°C 。故普通海平面(地面)试车台难以胜任航空发动机高、低温起动及高原起动试验的任务,除非在迫不得已的情况下降低试验要求。

4.3 低温起动室

它又称冷冻车间,是一间保温较好的房间,英国罗·罗公司专门设计制造了一个发动机冷起动试车台^[2~4]。国产斯贝发动机的低温起动摸底试验就是在该起动试车台上进行的。

试车台内部结构与一般试车台完全相同,不同的是这个试车台用一个钢结构的房屋包覆起来。房屋分两部分,一部分固定在地面;另一部分

可沿预埋在地面的导轨沿发动机轴线方向移动。房屋的墙壁屋顶均装有保温材料。

利用低温起动可进行航空发动机低温起动试验中的部分调试工作及部件试验工作。其优点是试验场地固定、设备费用低、试验人员免受风霜之苦,冷“浸”时间不受限制,比高空模拟试车台费用少,但模拟状态有限,试验时仅为当地大气压,无法满足高原条件,发动机吸入的空气是未经冷却的空气,无法满足发动机进口温度要求,不能检查低温下发动机的加速性,不能完全满足 GJB241 的要求。

4.4 高空模拟试车台

高空模拟试车台包含有冷冻、干燥、膨胀涡轮降温设备,有直接式或间接式空气加温设备,有加压供气和低压抽气设备,因而可正确建立从海平面到 6 km 之间的任何可靠起动高度所需的试验状态,连续提供从 -70°C ~ 250°C 之间起动所需的高温或低温空气。

例如,民用斯贝发动机,为“三叉戟”飞机到热带气候(苏丹)使用,曾在英国罗·罗公司高空模拟试车台上进行过热带气候试验。我国制造的斯贝 MK202 979003 号发动机 1980 年 4 月曾在罗·罗公司 1 号高空舱成功地完成了 -40°C 低温起动考核试验,并模拟了 10000 英尺(3.048 km)的高空。

俄罗斯中央航空发动机研究院(CIAM)建有一个专门用来进行航空发动机高、低温起动及高原起动的高空舱(Y-10M),可试验的最低温度 -70°C ,最高温度 70°C ,最大高度 6 km。在该高空舱内曾完成了俄罗斯研制的各型航空发动机的高、低温起动及高原起动试验。

由此可见,高空模拟试车台完全可满足前述高、低温起动和高原起动试验的所有要求,且比利用环境大气条件试验经济、安全、周期短,比其它设备功能强,因而它是高、低温起动和高原起动试验最有效的工具,使用也日益普遍。

5 试验方法

为叙述方便,下面我们以国产斯贝 MK202 979003 号发动机 1980 年 4 月在罗·罗公司分别在低温起动室和高空模拟试车台进行的低温起动摸底试验和考核试验为例,介绍高、低温起动和高原起动试验的方法。

5.1 低温起动室的摸底试验

我国制造的斯贝 MK202 979003 号发动机在

低温起动室进行过 -40°C 长达 20 多小时的冷冻试验,测量低温下油门操纵系统和空气起动机的扭矩。

试验前,先把发动机安装在发动机试车台架并连接好各种必要的管、线,然后沿导轨移动房屋的活动部分与房屋的固定部分贴合并以连接件固定。这样,发动机就被包覆在一个密闭的房间内而与外界大气隔绝。为了使发动机的温度降低至型号规范规定的冷起动温度,通过管路向屋内不断地充液态氮,液态氮气化时使屋内温度逐步下降,气化的氮由房屋专设的排气管排出屋外,同时通过预先安装的测温装置测量发动机选定点(如轴承)处的温度。当选定点的温度降至所要求的温度时,迅速移开房屋的活动部分,打开发动机排气口堵盖,并立即起动发动机,来检查发动机的低温起动可靠性,并根据试验情况来确定是否对发动机起动系统进行更改设计或改进。另外很重要的一点,在进行发动机起动边界摸索时,当发动机调节供油规律满足低温试验时,却不一定能满足高温试验要求,而要同时验证低温、高温起动性能,在低温起动室是无法完成的。这就决定了低温起动室的作用只能局限于低温起动规律的摸底。

5.2 高空台的考核试验

由压气机组供气,经过加温系统的高温空气、经过降温系统的低温空气或常温空气($-40^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$),经进气自动调压系统获得高原起动所需的发动机进口和出口压力;为了实现发动机内部较长时间的热“浸”或冷“浸”,在向发动机内流动以高温(或低温)干燥空气时,为防止发动机呈风车状态运转,需控制高空舱前、后室压差在 $0\sim 3.5\text{ kPa}$ 之间,对高、低压转子分别增设防转装置,起动前片刻拨出)。为了实现发动机部件及各附件较长时间的热“浸”或冷“浸”,需将发动机裹以一外罩(用薄铁皮波纹软管拼装而成,夹层间隙 $80\sim 90\text{ mm}$),从混合器后引出与发动机内流温度相同的干燥空气,从罩前端面的 10 个孔较均匀地进罩内。热“浸”或冷“浸”的保温时间从发动机的指定部位(如燃烧室外壁或主轴承)达到所要求的温度后算起。保温结束后,拨出防转销棒,由燃油加温(或降温)系统提供所需的高温(或低温)燃油,在规定时间内起动发动机并加速到中间状态(在此过程中,燃油温度、发动机进气温度以及发动机进、出口压力应保持不变)。包括保温在内的

上述考核过程重复一至两遍。

由此可见,在罗·罗公司 1 号高空舱中成功地进行斯贝 MK202 979003 号发动机冷起动的考核试验,证明在高空模拟试车台上进行航空发动机的高、低温起动和高原起动试验,在试验技术上是可行的。

在发动机研制阶段,利用自然环境条件、低温起动室进行高、低温起动及高原起动试验中的部分调试及部件试验工作,对发动机起动规律进行研究,以确定起动供油装置的最佳调节,摸索起动边界,提高发动机在低温环境条件下的起动成功率,为鉴定试验的顺利完成提供保障,提高在高空模拟试车台试验的成功率是有益的。

6 结 论

由上述分析可见:

(1) 高、低温及高原环境条件对航空发动机起动性能有较大的影响,航空发动机按 GJB241 的规定进行高、低温起动及高原起动试验是十分必要的。

(2) 利用自然环境条件、低温起动室进行航空发动机的高、低温起动及高原起动试验中的部分调试工作及部件试验工作是可行的。

(3) 只有高空台能完全满足 GJB241 中 $0\sim 6\text{ km}$, -54°C (或 71°C) 10 h 保温的要求,要严格贯彻执行 GJB241,航空发动机高、低温起动及高原起动的鉴定试验只能在高空模拟试验台上进行。

(4) 建议参照国产斯贝之路,摸底试验利用自然环境条件、低温起动室进行,而定型试验在高空模拟试车台考核。

参考文献:

- [1] 国防科学技术工业委员会. GJB241-87 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范[Z]. 中华人民共和国国家军用标准,1987.
- [2] 英国罗·罗公司. 979003 号发动机高空试车台冷起动试验[R]. 机械发展报告 MDR86512,1980.
- [3] 夏光义,刘大响. 中国斯贝 MK202 发动机高空模拟冷起动试验[A]. 航空发动机高空模拟试验论文选集[C]. 四川:燃气涡轮研究所. 1992:64-71.
- [4] 王长喜,李明亮,刘选民. 英、美航空发动机部分特种地面试验简介[J]. 航空发动机,1998,3:54-61.
- [5] 中华人民共和国航空航天工业部. HB5652. 1 气候极值大气温度极值[Z]. 中华人民共和国航空航天工业部航空工业标准,1987.