

高空台发动机风车起动及 停车方法的试验研究

燃气涡轮研究所 陈建民

摘要 介绍了在 SB101 高空台上进行供、抽气联调试验时发动机风车起动和停车的方法,分析了起动状态参数,给出了风车起动时的发动机进出口压力和温度范围。

关键词 航空发动机 高空模拟试车台 风车起动

1 前言

涡轮喷气发动机在高空模拟试车台进行试验时,首先遇到的就是风车起动问题,而起动成功与否,又直接关系到整个试验的成败。1994 年年底至 1995 年年初,为了进行高空模拟试车台的标定和交付使用,用 WP-7 和 P11Φ-300 发动机进行了供、抽气联调的总体性能及标定对比试验。从而全面考核了高空台供气、加温、降温、排气冷却和抽气等设备的工作特性,掌握了 WP-7 系列发动机高空试验时的风车起动方法。

2 高空模拟试车台简介

高空模拟试验就是将发动机装在高空试验舱中,使其处于飞行中所承受的压力、温度条件下进行试验,测取发动机的稳态和瞬态性能参数,以此评定发动机在实际飞行条件下的功效和性能。

为了满足涡轮喷气发动机在宽广范围中进行模拟试验的需要,高空台配置了一套复

杂的空气系统。它将气源(供、抽气压机)、空气处理系统(空气加温、干燥、降温系统)、混合器、进气调压系统、试验舱和排气系统(排气扩压器、排气冷却器和排气调压系统)等连成一个庞大的试验设备,来模拟发动机在各种飞行状态下的进口总压、总温及空中飞行时的环境压力。SB101 高空台的最大模拟高度为 25 km,最大飞行马赫数为 2.5。能模拟的发动机进口总压为 $0.0706 \times 10^5 \sim 2.942 \times 10^5$ Pa,进口总温 $-50 \sim 215$ °C,进口流量 $5 \sim 120$ kg/s,环境压力 $0.0248 \times 10^5 \sim 0.785 \times 10^5$ Pa。高空模拟试车台的工作原理见图 1。

3 高空模拟试车台涡轮喷气发动机的风车起动方法

众所周知,进行高空试验时,气源供气压机必须供给一定压力、温度及足够流量的空气,经过空气处理系统进行加温或降温,达到模拟温度,然后经进气调压系统、旁路调压系统、高空舱、排气调压系统和抽气系统的协

收稿日期:1995-03-15

调一致工作而实现发动机进口压力、温度及周围环境压力的模拟。根据已有的经验,调至所需模拟发动机进口压力只需 4~5 min,而欲由常温调至所需的模拟进口温度则需 20~30 min 甚至更长时间。进行高空模拟试验时,如首先将混合器后的温度调至模拟状态

点附近进行管道加温,然后在此温度下直接风车起动发动机,则会使发动机起动成功后进入模拟状态的时间大大缩短。试验证明,混合器后的温度在 -40~145 ℃ 范围内直接进行发动机风车起动是可行的。

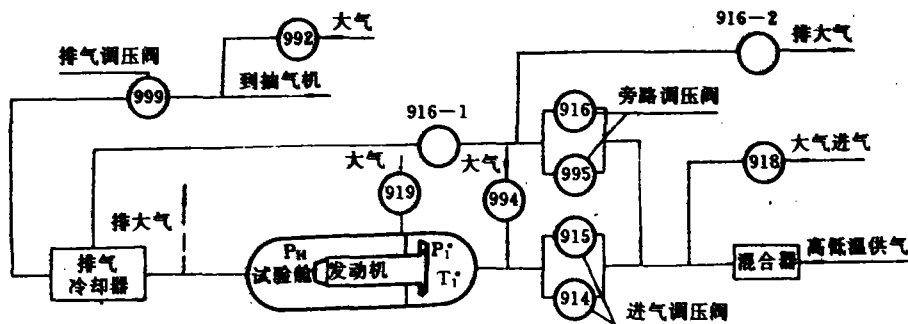


图1 高空模拟试车台工作原理图

高空模拟试车台涡轮喷气发动机的风车起动程序如下:

首先分别起动发动机高空模拟试验所需要的供、抽气及加温或降温设备,使排气扩压器的循环水系统投入运行,高温或低温供气气流经混合后通过 916、995、916-2 阀排入大气,抽气系统完成抽气机的并、串网后,发动机做好风车起动准备。此时 916 与 995 阀配合操作保证阀前压力为 150 kPa,995 阀进入自动状态后慢开 916-1 至全开,慢关 916-2 至全关。使高温或低温供气气流(低温供气时需开喷蒸汽系统)经旁路管道进入抽气总管。打开高空舱二股流进气阀 919 阀至 20°,调节 999 阀使高空舱内压力 $P_H = 60 \sim 70$ kPa,手动慢开 915 自动调压阀,使 P_i^* 由 60 kPa 缓慢升至 70~80 kPa (保持 $P_i^* - P_H \geq 12$ kPa)。当发动机低压转子转速达到 10%~15% 时,迅速将油门杆推至慢车位置,并立即接通空中起动开关,进行发动机空中起动。

高空台发动机风车起动及停车方法的试验研究

4 WP-7 及 P11Φ-300 发动机在高空台进行供、抽气联调试验时的几次风车起动情况

(1) 1994 年 12 月 2 日用 WP-7 发动机模拟 $H = 18$ km、 $M = 1.6$ 及 $H = 15$ km、 $M = 1.6$ 状态试验时进行了 6 次风车起动。起动前混合器出口温度达 60 ℃ (发动机前模拟进口总温为 54.4 ℃)。起动按照前述程序进行。前 5 次由于 915 阀开启较快,发动机转速迅速升至 60% 左右而未点燃;第 6 次采取了缓慢开启 915 阀的措施,并将给定起动开关和油门杆推至慢车位置的转速提前至 8%,最终起动成功。点火时, $P_i^* = 70$ kPa、 $P_H = 62$ kPa、 $T_i^* = 13$ ℃。

(2) 1994 年 12 月 10 日用 WP-7 发动机模拟 $H = 18$ km、 $M = 2.05$ 及 $H = 13$ km、 $M = 2.05$ 状态试验时一次点火成功。起动前混合器后温度为 110 ℃,发动机进口温度 38 ℃;点火时 $P_i^* = 85$ kPa、 $P_H = 74$ kPa、 $T_i^* =$

44 ℃。

(3) 1994年12月17日用WP-7发动机模拟 $H=11\text{ km}$ 、 $M=0.7$ 、 $H=16\text{ km}$ 、 $M=1.0$ 及 $H=13\text{ km}$ 、 $M=1.0$ 状态试验时进行了3次风车起动。起动前混合器出口温度为 -40 ℃ ，发动机模拟进口总温为 -35.3 ℃ 。按照以往点火成功的程序进行了2次起动均未点燃；第3次起动时，采取将油门杆推至慢车上限位置，增大起动供油量的方法获得成功，此时， $P_i^*=72\text{ kPa}$ ， $P_H=63\text{ kPa}$ ， $T_i^*=-11\text{ ℃}$ 。

(4) 1995年2月21日用P11Φ-300发动机模拟 $H=11\text{ km}$ 、 $M=0.7$ 及 $H=16\text{ km}$ 、 $M=1.0$ 状态试验时进行了一次风车起动。起动前混合器出口总温为 -42 ℃ （发动机模拟进口总温 -35 ℃ ）。当风车转速达到 $n_1=8\%\sim 10\%$ 时，将油门杆推至慢车上限位置，然后打开空中点火开关，一次点火成功。此时 $P_i^*=79\text{ kPa}$ ， $P_H=70\text{ kPa}$ ， $T_i^*=4\text{ ℃}$ 。

(5) 1995年2月23日用P11Φ-300发动机模拟 $H=18\text{ km}$ 、 $M=2.05$ 状态试验时，进行了一次风车起动。起动前混合器出口温度为 145 ℃ （发动机模拟进口总温为 126 ℃ ）。当风车转速 $n_1=8\%\sim 10\%$ 时，将油门杆推至慢车中线位置，一次点火成功。此时 $P_i^*=77\text{ kPa}$ ， $P_H=70\text{ kPa}$ ， $T_i^*=50\text{ ℃}$ 。

上述5次试验结果表明，WP-7系列发动机在高空模拟试车台进行风车起动时，只要保证 $P_i^*=70\sim 85\text{ kPa}$ ， $P_H=60\sim 75\text{ kPa}$ ， $P_i^*-P_H\geq 12\text{ kPa}$ ，混合器后温度为 $-42\sim 145\text{ ℃}$ ，均能可靠地进行风车起动。这是由于从进气调压阀914、915至发动机进口有较长一段距离，起动过程中发动机进口温度仅在 $-15\sim 60\text{ ℃}$ 范围内，故温度对发动机的风车起动影响不大。

5 WP-7发动机在高空台进行供、抽气联调试验时风车起动的改进措施

(1) 发动机起动时力争一次点燃。供、抽气联调试验证明，用提前点火，即点火转速提前至8%及油门杆置于慢车上限位置，必要时再修油门杆的办法增大供油量，均能达到这一目的。上述几次试验中风车起动时 T_i^* 均未超过 360 ℃ 。

(2) 发动机风车起动不成功时，可将油门杆拉至停车位置，然后将进气调压阀缓慢关小，使发动机风车转速保持在30%左右运转3 min，将未点燃的油气吹走；继续缓慢关小进气调压阀，使发动机风车转速保持在15%左右，准备再次进行风车起动。

(3) 由于高空台试验费用昂贵，所以设备一旦开始运行，除有特殊情况发生，试验均要连续进行，最长可达10 h左右。这样就需要自动地为发动机补加滑油。为此，罗·罗公司高空台1号舱设置了一套自动滑油装置。建议在SB101高空台采取类似措施，并对发动机油箱进行改装，增加一套远距离液位指示器，以便在试验中随时监视发动机的滑油消耗量，适时地加以补充，从而彻底排除由于滑油消耗过多而带来的事故隐患。

6 发动机在高空台进行供、抽气联调试验时的停车方法

WP-7系列发动机高空台试验完成后，应将其低压转子转速稳定在87.9%~93%，退出模拟状态点（即调整 P_i^* 、 T_i^* 和 P_H 到接近大气状态），然后继续降低转速至82.5%，冷却3 min后停车，全关914、915阀，停止供抽，整个试验结束。需要特别注意的是，一定

（下转第55页）

6 结论

(1) 试验完全模拟了 WP-7 发动机的三个飞行状态的真实高度。

(2) 通过膨胀涡轮直接调温的方法可行,

这样可减少动用设备台数,降低能耗,节约经费。

(3) 所用串、并联方法可行,运行程序正确。

(上接第 50 页)

要将 915 阀打至手动位置再行操作,否则在降低转速实现停车的过程中 915 阀可能会自动关闭,引起发动机喘振或放炮。

7 结论

在 WP-7 供、抽气联调试验中风车启动

时,发动机应保持一定的转速,主燃烧室的气流压力、速度、流量及慢车供油压力,应保证混合器后的温度在 $-42 \sim 145$ °C 之间。此时直接进行风车启动,可大大减少发动机在非模拟状态点的工作时间。所述启动失败后的再起启动方法,经标定试验证明完全可行。根据发展的需要,必须增加一套发动机自动补加滑油装置及监视系统。