

引射器引气与压气机抽气建立加力 燃烧室喷口低压条件的综合分析

肖新鹰 赵 煜

(中国航空工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘要:从建设投资、运行费用、设计、操作、维护等诸多方面对引射器引气与压气机抽气建立加力燃烧室高空模拟试验器喷口低压条件进行全面分析和对比,得出引射器引气方案优于压气机抽气方案。

关键词:引气 抽气 加力燃烧室 高空模拟试验器

Comprehensive Analysis of Low Pressure Condition Established with Ejection or Compressor Extraction for Afterburner Nozzle

Xiao Xinying Zhao Yu

(Shenyang Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015)

Abstract: The low pressure conditions at the afterburner nozzle can be established on the simulated altitude test rig with ejection or compressor extraction. Through comparison and analysis, a conclusion can be obtained that the ejection is better than the compressor extraction. Invest, operation cost, design and maintenance are concerned in the paper.

Key words: ejection; extraction; afterburner; simulated altitude test rig

1 引言

目前,国际上著名的发动机研制机构都有近1000kg/s的高压空气用于发动机及各种零部件试验,因为加温加压试车、全温全压燃烧室试验、全温全压涡轮试验、全尺寸加力燃烧室试验等全参数模拟试验更接近发动机的真实工作状态,所以更有利于推进发动机的研制进度。国内外加力燃烧室模型试验器的高空模拟试验大都采用引射器引气这种排气增压方案。因为该方案建设投资非常少,设计、加工、安装简单,操作、维护容易,工作运行十分稳定、可靠。

沈阳发动机设计研究所已在引射器设计技术上进行创新和改进,使其在保持原有优点的前提下,引射系数显著提高,高压空气消耗量显著降低,而运行费用与压气机抽气方案的相当。相比之下,压气机

抽气方案建设投资巨大,设计困难,操作、调节复杂,高速旋转部件使其工作稳定性、可靠性、安全性降低,设备维护复杂、困难。

2 加力燃烧室喷口喉道截面气动参数

选取加力燃烧室高空小马赫数和高空大马赫数两个典型状态,高空小马赫数代表最低压力状态,高空大马赫数代表最大流量状态,这两个状态的加力燃烧室喷口喉道截面气动参数见表1。

表1 两个典型的加力燃烧室喷口喉道
截面气动参数状态

状态	燃气流量 (kg/s)	燃气总温 (K)	燃气总压 (MPa)	燃气静压 (MPa)
1	43.0	2000	0.072	0.036
2	19.1	1950	0.040	0.020

收稿日期:2002-01-10

第一作者简介:肖新鹰,高级工程师,1969年出生,1992年毕业于哈尔滨工业大学,从事航空发动机加力燃烧室试验研究工作。

3 引射器与压气机的进口气动参数

在压气机抽气方案中,为保证压气机正常工作,提高压气机效率,需要对燃气冷却降温。燃气通常经过多级间接换热器冷却到 323K。

在引射器引气方案中,燃气可以用换热器间接冷却,也可以直接喷水冷却。为了提高引射系数,引射器使用低于 1.0MPa 气源时,燃气通过间接换热器冷却到 323K;当引射器使用高于 4.0MPa 以上的高压气源时,燃气可直接喷水冷却到 350K。

为了防止引射器引气或压气机抽气等试验件下游压力脉动对试验的干扰,要求尾喷口喉道截面气流临界。尤其在进行加力燃烧室振荡燃烧试验时,尾喷口喉道截面必须临界。由空气动力学可知,临界截面恰好在喉道处,被压最高,便于引射器或压气机工作。但这时气动状态很不稳定,临界截面在喉道处几乎无法保持。所以,必须将正激波所在临界截面后移,离开喉道截面一定距离。经过计算,将激波损失取为 0.65~0.70,气流经换热器时的平均总压恢复系数取 0.80。

至此,从表 1 就可以导出引射器和压气机进口气动参数,见表 2。

表 2 引射器和压气机进口气动参数

状态	流量 (kg/s)	总温 (K)	总压 (MPa)	冷却方式
1	43.0	323	0.038	换热器
2	19.1	323	0.021	换热器
3	73.6	350	0.050	喷水
4	32.3	350	0.028	喷水

表 2 中的状态 1,2 适用于低压引射器(气源压力小于 1.0MPa)引气和压气机抽气,状态 3,4 适用于高压引射器(气源压力高于 3.0MPa)引气,状态 3,4 的流量为对应于状态 1,2 的流量加上喷水量。

4 引射器引气和压气机抽气工作原理及性能参数

低压引射器工作原理如图 1 所示,高压引射器工作原理如图 2 所示,压气机抽气工作原理如图 3 所示。

根据表 2 的数据,经过计算确定的引射器引气性能参数见表 3,抽气压气机的性能参数见表 4。

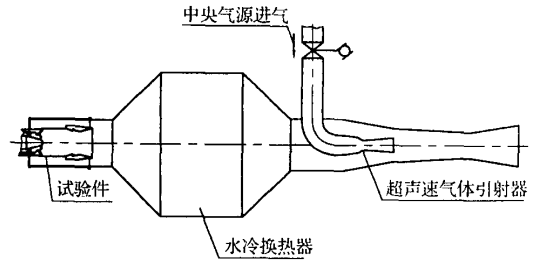


图 1 低压引射器工作原理

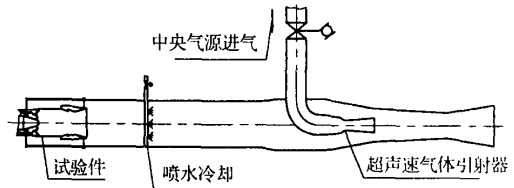


图 2 高压引射器工作原理

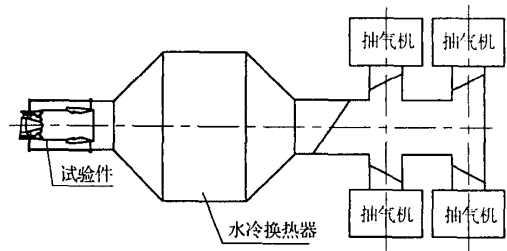


图 3 压气机抽气工作原理

表 3 引射器性能参数

名称	流量 (kg/s)	总温 (K)	总压 (MPa)	耗电 (kW)	备注
低压引射器	50.2	555	0.8	20300	
高压引射器	51.1	555	4.0	33000	

表 4 压气机性能参数

状态	流量 (kg/s)	总温 (K)	压比	耗电 (kW)	备注
1	11×2	323	6	12000	2 台机组
2	11×4	323	6	12000	2 台机组
			3	10000	2 台机组

从表 4 中可以看出,状态 1 需要 2 台压比为 6 的压气机;状态 2 额外还需要 2 台压比为 3 的压气机,才能将 43.0kg/s 的燃气抽出。虽然 2 台压比为 6 的压气机可在压比 3 的状态下工作,但是有可能需要降低转数,即使不降低转数,压气机也很难因压比降低到 3 使流量增大到 20kg/s。所以,为使设备易于调节、安全工作,抽气方案需要 2 台压比为 6 的机组和 2 台压比为 3 的机组。

5 综合分析

5.1 建设投资

低压引射器方案投资见表 5,高压引射器方案投资见表 6,压气机抽气方案投资见表 7。

表 5 低压引射器方案投资

序号	名 称	主要性能	数量	经费估算(万元)	
				单价	总价
1	多级换热器	换热量约 90000kW	1	1000	1000
2	超声速引射器	需 50.2kg/s, 555K, 0. 8MPa 空气	1	500	500

表 6 高压引射器方案投资

序号	名 称	主要性能	数量	经费估算(万元)	
				单价	总价
1	喷水冷却器	换热量约 90000kW	1	100	100
2	超声速引射器	需 51.1kg/s, 555K, 4. 0MPa 空气	1	500	500

表 7 压气机抽气方案投资

序号	名 称	主要性能	数量	经费估算(万元)	
				单价	总价
1	多级换热器	换热量约 90000kW	1	1000	1000
2	压气机	压比为 6, 流量为 11kg/s	2	2000	4000
3	压气机	压比为 3, 流量为 11kg/s	2	1200	2400
4	气源电控		1	1000	1000

从表中可以看出,压气机抽气方案需投资约 8400 万元,低压引射器引气方案需投资约 1500 万元,高压引射器引气方案需投资约 600 万元。

引射器所用气源为加温加压试车、全温全压燃烧室试验、全温全压涡轮试验、全尺寸加力燃烧室试验等所公用的中央气源,即使加力燃烧室试验器不用,这些气源依然要投资。

5.2 运行能耗

从表 3,4 中可以看出,低压引射器方案耗电约 20300kW,高压引射器方案耗电约 33000kW,压气机抽气方案约 12000~22000kW。

低压引射器方案和压气机抽气方案耗水量一样,高压引射器方案耗水量略高于前两个方案。

5.3 其他

低压引射器方案与压气机抽气方案所用换热器设计复杂,加工、安装困难。如 SB101 高空模拟试车台所用排气冷却装置的设计,先后多次派出专家组到欧美等地进行考察,最后参照英国 NGTE 公司的同类装置设计。

另外,对换热器在使用过程中的维护也很困难。因为高空试验燃烧效率低,积炭严重。同时,尽管换热器所用的水是软化水,但在高温骤变的恶劣环境中依然要结垢。这两点都严重影响换热效率,危害换热器安全,不利于换热器的使用。

在抽气方案中,压比为 6 的压气机是在变工况下运行,因而,必须对电控系统提出很高的要求,才能保证其安全、平稳地工作。由于压气机始终在高转速下工作,加力燃烧室中任何烧毁的零件、受感部件等渣滓以及压气机进口前的管道中掉落任何螺钉、螺帽等,都对压气机的安全运行构成威胁。

压气机不但需要专业人员操作,也需要专业人员定期维护。

引射器设计已经程序化,没有加工困难,安装也十分容易,工作稳定可靠,尤其是打开进气阀后,不需要人工操作,并且终生免维护。

6 结束语

通过上面的分析可知,抽气方案投资巨大,运行经济性好,运行安全性、可操作性、可维护性差;低压引射器方案投资较少,运行经济性与抽气方案的相当,运行安全性、可操作性、可维护性好;高压引射器方案投资非常少,运行经济性差,运行安全性、可操作性、可维护性好,设备的增容性好,并联一级或几级引射器后,就可以扩大飞行包线范围,进行多种型号试验。

(下转第 31 页)

表4 凸肩不同装配状态、叶根有无阻尼器情况下结构阻尼特性比较

装配状态	共振频率(Hz)	峰值应力(MPa)	结构阻尼比 η
凸肩间隙、无阻尼器	1803	42~60	0.00847
凸肩间隙、有阻尼器	1803	15.27	0.02806
凸肩过盈、无阻尼器	1810	17.17~53.07	0.0087
凸肩过盈、有阻尼器	1805	13.26~7.7	0.026

4.3 凸肩不同装配状态和附加叶根阻尼器的叶片阻尼分析

对于黏弹性阻尼振动,由半功率点法(即 $\beta = \frac{Q}{\sqrt{2}}$ 处)求结构阻尼因子:

$$\eta = \Delta \sqrt{1 - (\Delta/2)^2} \quad (2)$$

式中: $\Delta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0}$, 即峰值应力的 $1/\sqrt{2}$ 处的频率差与共振频率之比。

在叶片凸肩装配状态不同、叶根有无阻尼器情况下,1800Hz 振型结构阻尼比估算结果见表4,可见橡胶阻尼器使叶片的结构阻尼增加较多,振动应力大幅度降低,而对系统的固有特性没有明显影响。

4.4 黏弹性阻尼器试验分析

综上所述,通过凸肩间隙或过盈装配状态下附加根部橡胶阻尼器的试验可知:橡胶阻尼器减振结构对叶片榫头出现最大振动应力的振型的抑制效果明显,对叶身上的振动应力影响不大。并且橡胶阻尼器对凸肩的状态不敏感,从全转速范围内出现的共振频率及峰值应力看两者无明显区别。

同时说明,凸肩的减振作用并不是对叶片的所有阶次振型起作用,它对叶身部分的振动抑制效果好于对叶根的效果;而根部阻尼器刚好弥补了凸肩的不足,起到了凸肩达不到的减振效果。并且从试验结果看,叶身凸肩减振与叶根阻尼器减振的相互

干扰不明显,可以互相补偿,这一点在部分发动机上已体现出来,如 CFM56-3-B1 发动机风扇叶片虽然带凸肩,但在根部仍采用了阻尼器解决振动问题;RB211-535E4、RB211-524G/H 发动机高压涡轮工作叶片虽然带叶冠,但叶根也采用了摩擦阻尼器。

5 结论

对现有风扇叶片根部增加黏弹性阻尼器的试验表明,橡胶阻尼器减振结构设计合理,对榫头出现大振动应力的振型的抑制效果明显,对叶身上的振动应力影响不大,且不受凸肩状态影响,收到了凸肩达不到的减振效果,满足了动强度储备要求,是在不改变叶片结构条件下最简单易行的方法之一。

在整机试车中,附加橡胶阻尼器的风扇叶片已累计工作 600h 未出现故障。但由于发动机叶片工作环境恶劣,不同状态其工作温度变化大,选择合适的黏弹性阻尼材料很困难,因此开展高温或不受环境影响的阻尼材料研究工作显得非常必要。

如何有效地采取阻尼控制措施,从定量分析角度进行阻尼结构设计,阻尼位置、质量和硬度优化,建立一套叶片阻尼设计工程软件,为叶片设计提供有利工具,是今后工作中值得研究的课题。

参考文献(略)

(上接第16页)

尽管高压引射器方案运行费用较高,但仍然适用于全尺寸加力试验器。因为从表6和7中可知,抽气方案比高压引射器方案需多投资7800万元,这些资金足够高压引射器方案所用高压气源运行两万多小时。

有资料表明,国内外也有在高空模拟试车台上使用超声速气体引射器方案的。

通过上述详细分析可以得出结论:虽然引射器引气方案和压气机抽气方案都能满足全尺寸加力燃烧室部件高空模拟试验,但应该优先选用引射器引气方案。