

文章编号: 1000-8055(2009)11-2241-06

某型航空涡轴发动机整机吞水性能试验

旷桂兰^{1,3}, 王道波², 单晓明^{1,3}, 吴志勇³, 韦海龙³

(11 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

21 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016;

31 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所, 株洲 412002)

摘 要: 为进行某型航空涡轴发动机吞水试验, 设计了喷水设备及专用进气整流装置, 采用大小喷水环实现对发动机进行给定水流量的喷入. 进行了发动机进口吞水量为空气流量 2% 和 3% 的试验, 试验结果表明: 试验方法及装置的设计合理可行; 均匀吞水量不高于进气流量 3%, 发动机吞水时各截面温度下降量由进口至出口依次降低; 吞水试验后, 发动机性能下降.

关 键 词: 航空发动机; 吞水试验; 测试; 流量; 喘振

中图分类号: V263.3

文献标识码: A

Swallowing water capability experiment of one turbine-shaft overall aviation engine

KUANG Guilan^{1,3}, WANG Dao-bo², SHAN Xiaoming^{1,3},
WU Zhiyong³, WEI Hailong³

(11 College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

21 College of Automation,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

31 China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou 412002, China)

Abstract: Waterworks and special air intake path were designed to conduct swallowing water experiments for one aviation turbine-shaft engine under research, while big and small rings were used to spurt certain quantity of water into the engine. The experiments were conducted at swallowing water in the quantity of 2% and 3% of engine's intake air. The results show that, the designs of the experiment method and device are feasible; when symmetrically swallowing water not higher than 3% of engine's intake air, the temperature drop at each engine's section decreases from the inlet to the exit; the engine's performance degrades after swallowing water experiments.

Key words: aviation engine; swallowing water experiment; test; flux; surge

飞机在雨天飞行时, 发动机要吞入大气中的液态水(雨水)和以水汽形式存在大气中的水. 另外, 如机场积有雨水, 当飞机在地面滑行时发动机

离地面较近, 地面积水有可能被吸入发动机. 如发动机吞入大量雨水, 可能使发动机机匣局部受冷收缩, 引起机匣和叶片之间的间隙减小, 产生摩擦

收稿日期: 2008-12-12; 修订日期: 2009-02-11

作者简介: 旷桂兰(1972), 女, 湖南衡阳人, 博士生, 高级工程师, 主要从事航空发动机试验、测试、控制与状态监控的研究.

损坏发动机,也有可能使发动机性能恶化,甚至引起压气机喘振、燃烧室熄火.尤其是当发动机在慢车状态下工作时,空气流量较小,雨水占空气流量的百分比比较大,更易引起发动机熄火,这种事故在国内、国外都曾发生过^[1].无论军用还是民用发动机,在新机设计定型之前都必须做吞水试验^[1],以便进行针对性的改进设计,使发动机达到要求的吞水能力.本文结合某涡轴发动机研制需要,开展了对发动机整机吞水性能试验的研究工作.

1 试验要求

国家军用标准 GJB242287^[2] 和 GJB241287^[3] 规定航空发动机须具备一定的/环境吞咽能力0,并对发动机须具备的/吞入大气中液态水0能力进行了详细规定.涡轴涡桨发动机在整个工作包线内,在最大高度以下;涡喷、涡扇发动机在高度为13 km 以下的工作范围内,在下列条件下应能满意地工作:从慢车到最大功率/推力状态,空气中含水(液态水和水蒸气)的质量达总空气流量的5%,并且有50%液态水通过进气道1/3扇形面积进入发动机进气道^[23].当发动机以最大功率/推力状态工作时,无论军用涡轴涡桨发动机还是涡喷涡扇发动机都要求吞水量是发动机空气总质量流量的2%,315%和5%^[4].在这三种试验条件下都要有50%的液态水进入1/3的发动机进口扇形面积内,发动机应在每一条件下工作5 min,

并要求在慢车状态重复上述程序,因为在此状态下发动机容易熄火^[1].

发动机吞水试验时,在防喘装置保护下应不失速、不喘振、不熄火.试验中应注意和记录吞水对发动机性能的影响.试验结束将发动机停车,冷却到环境温度,然后进行试验后性能检验,检验后将发动机完全分解检查零部件,尤其是过滤器和磁性屑末检测器的状况,并分析滑油中水分和金属微粒的含量.如发动机保持了足够的间隙,未发生损伤或有害擦伤,性能未恶化,燃气流路中零件未受到损伤则认为试验满意完成^[1].

某涡轴发动机由前段组件、组合压气机、燃烧室、燃气涡轮和动力涡轮及附件传动机匣组件等组成,为保证该涡轴发动机具备相当的吞水能力,并为该型发动机型号规范编制提供依据,必须进行地面模拟吞水试验.试验在该型涡轴发动机专用露天试验台进行.

2 某涡轴发动机吞水性能试验

2.1 试验设备

2.1.1 吞水试验装置

吞水试验采用喷水环,喷水环将水喷出后被发动机吸入^[1].设计的吞水试验装置如图1所示,喷水装置由喷水环、储水箱、电动机、压力表、流量计、流量计、球阀、电磁阀等组成.试验中通过调节

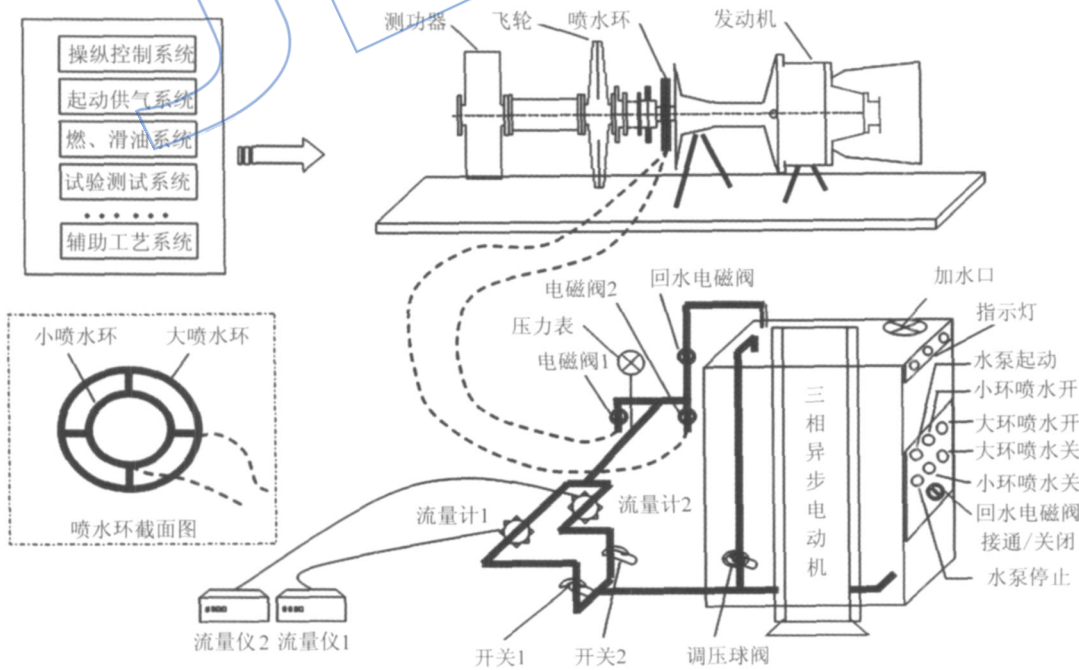


图 1 吞水试验装置图
Fig. 1 Swallowing water experiment equipment

调压球阀控制喷水量的大小。

21 1 2 吞水试验用发动机进气整流装置

该涡轴发动机为前输出轴,在整机台架试验时存在功率前输出问题,因此试验台在发动机前端安装测功装置吸收和测量功率,在发动机前通过一个轴系连接发动机和测功装置,联结轴被安排在进气整流装置中心。发动机进口流场畸变对发动机性能具有重大影响,为了减小进口流场畸变,在涡轴发动机地面台架试验中无一例外地采用了进气整流装置(导流盆)。为了在测功器与发动机中间安装喷水环,新设计了导流盆(图 2),设计时主要考虑以下几个方面:1° 保证与发动机及功率输出轴的几何尺寸匹配;2° 进气通道型面设计应能保证没有气流分离,能使通道获得较好的流场;3° 整个装置总长度不能太长,以免造成功率输出轴过长,加工困难,且难以保证轴系稳定工作;4° 保证喷水环足够的安装空间。

新设计的导流盆缩短了长度,不安装测试座。内通道型面设计采用椭圆外廓线和一直线段,结构简单,便于生产。采用 ANSYS/CFX101 0 计算分析导流盆通道内气体流动,结果表明其出口流场基本均匀,没有大的畸变区域,能够满足发动机进气要求。

21 2 试验参数测量

21 2 1 水流量测量

采用涡轮流量计和流量测试仪对水流量进行

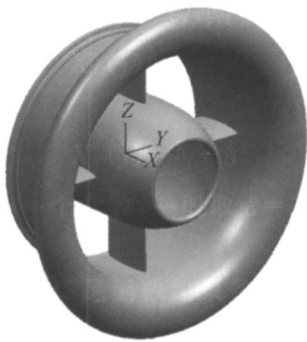


图 2 新设计导流盆三维模型
Fig. 2 Three-dimensional model of the new designed air intake path

测量,为了提高小水流量的测量精度,设计两路水流量测量,通过图 1 中开关 1、开关 2 可控制两路流量独立工作或同时工作,一路连接小喷水环,一路连接大喷水环。

21 2 2 发动机流道参数及振动测量

试验时除试验台常规监测及水流量测试外,发动机测试见表 11 为防止吞水时发动机可能出现喘振、失速等异常,测试参数在接入 VXI 稳态数采系统测量的同时,选取了部分测点接入美国尼高力 Odyssey 动态存储示波记录仪进行示波记录。

21 3 吞水试验

本阶段吞水试验先行验证喷水环进行对称均匀喷水时发动机的吞水能力。喷水环上均匀分布

表 1 整机吞水专项试验测试安排

Table 1 Test arrangement of overall engine in swallowing water experiment

参数名称	截面	测点数	精度要求	测量方法	备注
p_{s1}	进气道出口	4	± 35%	静压	进气量测量用
t_1	进气道防尘网	4	± 5%	铂电阻	
p_{s2}	压气机进口	1	± 35%	静压	
p_{c2}	压气机进口	1 @ 3	± 2%	总压梳	1 点动态示波
p_{s3}	压气机出口	1	± 35%	静压	动态示波
p_{c3}	压气机出口	1	± 2%	总压	动态示波
t_3	压气机出口	1	± 3%	热电偶	
t_{45}	燃气涡轮出口	6 @ 2	± 4%	热电偶	1 点动态示波
p_{c5}	动力涡轮出口	1	± 2%	总压	
t_5	动力涡轮出口	1	± 3%	热电偶	
Z_{d1}	附件机匣	1	± 5%	专用振动测试仪测	
Z_{d2}, Z_{d3}	压气机机匣	2	± 5%	量, 振动总量进稳态	
Z_{d4}, Z_{d5}	涡轮机匣	2	± 5%	数据采集系统	

喷水孔, 喷水量由少到多逐步增多, 拟按 21.5% (较要求略提高), 31.5% 和 5% 进行试验. 选取该型发动机 X1 号机用于该阶段吞水试验研究.

21.31.1 发动机进口空气流量测量试验

为了获得发动机吞水试验喷水量, 需准确测量发动机各状态进口空气流量. 将发动机进口装原设有测量安装座的导流盆进行试验. 该导流盆沿周向均匀布置 4 个静压测量点. 试验时在获得 4 个静压的绝压平均值 p_{s1} 及大气压力 p_h 、大气温度 t_0 的基础上按以下公式计算出发动机各运行状态下的进口空气流量.

马赫数

$$Ma = \sqrt{\left[\left(\frac{p_h}{p_{s1}} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} - 1 \right] \frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (1)$$

进口标准换算流量(流量校准台试验获得)

$$W_{ac} = -0.033 + 221.767 Ma - 41.3729 Ma^2 \quad (2)$$

发动机进口实际流量

$$W_a = W_{ac} \frac{p_h}{101325} \sqrt{\frac{288.15}{t_0}} \quad (3)$$

21.31.2 吞水量 21.5% 试验

发动机装喷水试验专用导流盆. 起动发动机到地面慢车状态(对应燃气涡轮转速 n_g 相对值=01.8, 动力涡轮转速 n_p 相对值=01.75), 保持发动机状态不变, 把占总空气流量 21.5% 的液态水喷入发动机内, 各监视参数无异常现象, 持续 5min 后将发动机上推至空中慢车状态(对应 n_g 相对值=01.844, n_p 相对值=11.0)停留 2min. 各监视参数均正常, 缓慢增加负载至功率相对值 01.73 状态, 保持发动机状态不变, 把占总空气流量 21.5% 的液态水喷入发动机内, 在喷水过程中发现轴流压气机和离心压气机中间的放气活门漏水严重, 立即停止喷水, 下拉发动机至空中慢车、地面慢车直至发动机停转.

该型涡轴发动机在轴流压气机和离心压气机中间设置了压差式的/放气活门0装置, 主要目的是为了增加在低换算转速下的喘振裕度^[5]. 当转速上升到活门内外压差大于某设定值时关闭活门. 发动机在功率相对值 01.73 状态下, 该活门应该处于关闭状态. 将该型 X1 号机换装上该型相同设计状态下 X2 号机的放气活门进行试验, 在功率相对值 01.73 运行状态喷水, 放气活门同样漏水. 说明该型机放气活门在高转速下的泄漏现象

并非个别现象. 泄漏现象解决后, 发动机在高转速下的整体性能应会有所提高, 性能的提高有多大, 有待进一步试验研究. 恢复 X1 号机放气活门, 进行发动机在功率相对值 01.73 及最大功率状态下的 21.5% 吞水试验. 各状态持续喷水 5min 试验过程中, 发动机工作正常, 试验监视未发现失速、喘振等迹象. 喷水完毕, 发动机正常停车. 图 3 ~ 图 6 中纵坐标均为各曲线参数归一化处理后的相对值. 图 3 为地面慢车状态下, 吞水量为空气流量的 21.5% 试验曲线图, 图中曲线起始处从上到下分别对应参数 n_g , t_{15} , p_{13} , t_{45} , t_{13} , p_{13} , p_{s3} 及吞水流量.

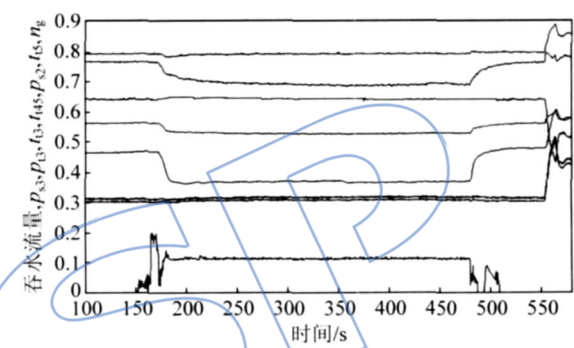


图3 地面慢车状态下, 吞水量为空气流量的 21.5% 试验曲线

Fig. 3 Experiment curve whose swallowing water is 21.5% of intake air at $n_g=01.8$

图 4 为最大功率状态下, 吞水量为空气流量的 21.5% 试验曲线图, 图中曲线起始处从上到下分别对应 n_g , t_{15} , t_{13} , t_{45} , p_{13} , p_{s3} , p_{s2} 及吞水流量.

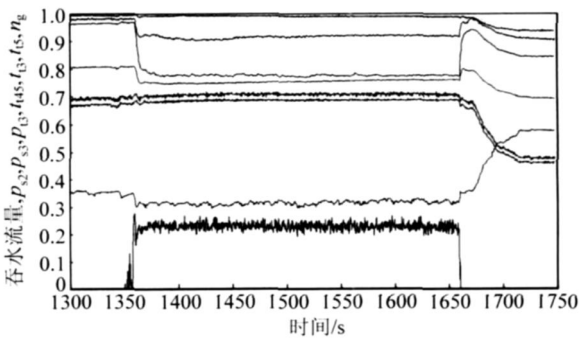


图4 最大功率状态下, 吞水量为空气流量的 21.5% 试验曲线

Fig. 4 Experiment curve whose swallowing water is 21.5% of intake air at max power state

21.31.3 吞水量 31.5% 试验

将吞水量调整至 31.5%, 分别进行发动机地

面慢车、功率相对值 0.73 及最大功率状态下的吞水试验. 发动机保持地面慢车、功率相对值 0.73 状态时, 持续吞水 5 min, 试验监视未发生异常现象. 在最大功率状态下持续喷水 5 min 过程中, 试验监视无异常现象, 但在 5 min 吞水完毕下拉转速过程中, 发动机发出“放炮”声, 出现了喘振现象. 图 5 为功率相对值 0.73 状态下, 吞水量为空气流量的 31.5% 试验曲线图, 图中曲线起始处从上到下分别对应 n_g , t_{t3} , p_{t3} , t_{t45} , t_{t5} , p_{s3} , p_{s2} 和吞水流量.

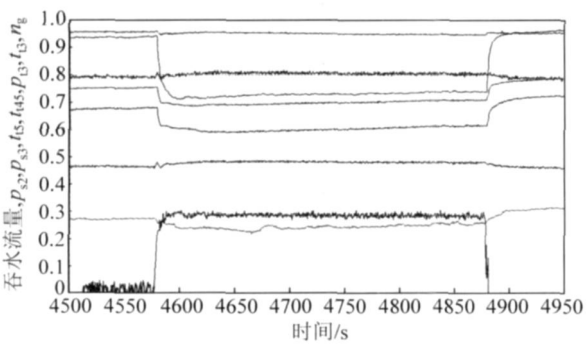


图 5 功率相对值 0.73 状态下, 吞水量为空气流量的 31.5% 试验曲线

Fig. 5 Experiment curve whose swallowing water is 31.5% of intake air at 73% of max power state

图 6 为最大功率状态下, 吞水量为空气流量的 31.5% 试验曲线图, 图中曲线起始处从上到下分别对应参数 t_{t5} , n_g , t_{t3} , p_{t3} , p_{s3} , t_{t45} , p_{s2} 和吞水流量.

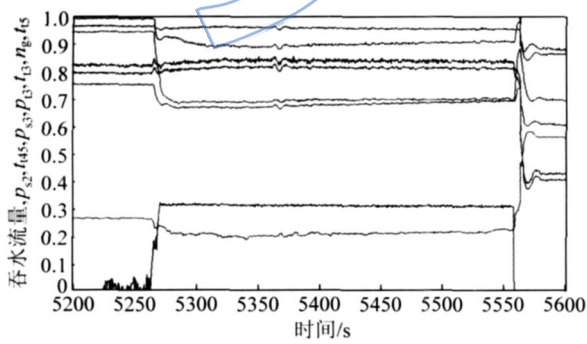


图 6 最大功率状态下, 吞水量为空气流量的 31.5% 试验曲线

Fig. 6 Experiment curve whose swallowing water is 31.5% of intake air at max power state

2.3.1.4 性能检查试验

将发动机完全冷却, 发动机进口装设有测量安装座的导流盆进行性能检查试验. 试验中, 燃气

涡轮换算转速 $n_{gr} = 0.940$ 时, t_{t45} 较之吞水试验前大幅升高, 没有继续上推至最大功率状态. 在将 n_{gr} 直接从 0.940 下拉至 0.867 过程中, 发动机发出“放炮”声, 出现喘振现象. 试验结果表明, 发动机性能水平恶化, 如高转速下发动机工作曲线上移(图 7); 在相同转速状态发动机 t_{t45} 大幅升高(图 8)等. 图 7 中横坐标为进口流量, 纵坐标为压比. 图 8 中横坐标为 n_{gr} , 纵坐标为 t_{t45} 归一化后相对值.

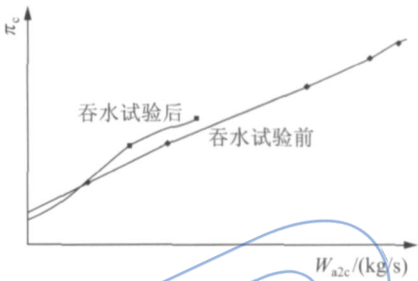


图 7 吞水试验前后发动机工作曲线对比

Fig. 7 Engine running curve contrast before and after the swallowing water experiments

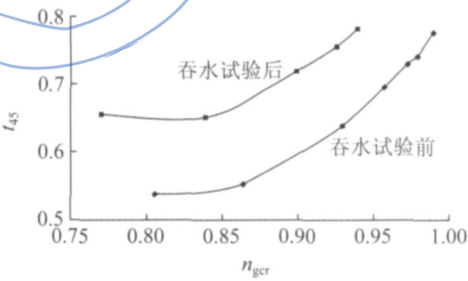


图 8 t_{t45} - n_{gr} 曲线对比

Fig. 8 t_{t45} - n_{gr} contrasting curve

发动机完成上述各项试验后, 下台分解, 发动机并未发现明显损伤或有害擦伤等异常现象.

3 结 论

该型涡轴发动机第一阶段吞水性能试验研究结果表明:

- 1) 该型涡轴发动机在各运行状态下, 当均匀吞水量不高于进气流量 31.5%, 发动机吞水后压气机出口总温 (t_{t3})、燃气涡轮出口总温 (t_{t45})、动力涡轮出口总温 (t_{t5}) 均有一定程度降低, 且各温度的下降量由发动机进口至出口依次降低即 t_{t3} 下降量最大, t_{t45} 次之, t_{t5} 下降最少. 关闭喷水装置, 发动机停止吞水 t_{t3} , t_{t45} 和 t_{t5} 快速回升至喷水

前水平.

2) 该型涡轴发动机在各运行状态下, 均匀吞水量为进气流量 21.5% 时, 吞水对发动机功率、振动的影响不大; 吞水量为进气流量 31.5% 时, 在最大工作状态进行 5 min 吞水后下拉转速发生喘振, 说明发动机工作性能下降.

3) 该型涡轴发动机在吞水试验结束后性能水平显著下降, 分解后各单元体并无明显异常现象.

4) 各次试验顺利进行, 说明试验方法及试验装置的设计合理可行.

该型涡轴发动机吞水性能第一阶段研究工作表明该型涡轴发动机吞水能力还亟待提高. 该型涡轴发动机早期设计时, 设计其自带进气防尘装置即整体式进气粒子分离器(IPS), 取消 IPS 对吞水性能的影响有多大值得研究. 探清影响涡轴发动机吞水性能的因素有哪些, 各因素影响的权重有多大, 如何提高发动机的吞水性能等, 均有待进

一步研究. 该型涡轴发动机性能在吞水后性能急剧下降, 深层次的原因也有待进一步分析验证. 上述问题将通过进一步的吞水试验来验证并解决.

参考文献:

[1] 马庆祥. 航空发动机地面模拟吞水试验[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2002, 15(4): 39244
MA Qingxiang. Aviation engine ground simulated experiment of swallowing water[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2002, 15(4): 39244 (in Chinese)

[2] 国防科学技术工业委员会. GJB242- 87 航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1987

[3] 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[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1987

[4] 张宝诚. 航空发动机试验和测试技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005

[5] 彭泽琰, 刘刚. 航空燃气轮机原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000