

航空涡扇发动机吞水性能变化

邢 洋, 王常亮, 李兆红, 郭海红, 于 涵
(中国航空发动机集团有限公司 沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 为了解某涡扇发动机吞水后性能变化,基于常规地面试车台,设计并开展某涡扇发动机吞水后性能变化试验。进行了发动机在慢车状态、节流状态、中间状态和最大状态时,吞水量为进口空气质量流量的 2%、3.5% 和 5% 的试验。试验结果表明:慢车状态,风扇内、外涵出口温度的降低程度不随吞水量的变化而变化,吞水后发动机推力最多降低约 20%;最大状态,风扇内涵出口温度降低的程度随着吞水量的增加而增加,吞水后由于低压转速提高,发动机推力最多升高约 15%。吞水过程中没有造成失速、喘振以及发动机主燃烧室熄火。吞水后发动机性能无恶化。

关 键 词: 航空涡扇发动机; 吞水试验; 发动机性能; 发动机推力; 吞水量

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A

Performance change of aero turbofan engine after swallowing water

XING Yang, WANG Changliang, LI Zhaohong, GUO Haihong, YU Han
(Shenyang Engine Research Institute,
Aero Engine Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to understand the turbofan engine performance change after swallowing water, the test of one turbofan engine performance change after swallowing water was designed and carried out on the conventional testing facility. When the engine was at idling, throttling, max speed, and afterburning, the mass of swallowing water was 2%, 3.5% and 5% of the inlet air mass flow. The test results showed that: at the idling, the lowering degree of the inner and outer culvert outlet temperature of the fan did not change with the change of the mass of water swallowing, after swallowing water the engine thrust decreased about 20% at most; at the afterburning, the decreasing degree of the outer culvert outlet temperature of the fan grew with the increase of the mass of water swallowing, after water was swallowed, due to the low-pressure speed increase, engine thrust increased about 15% at most. No stalling, surge and flameout of the combustion chamber of the engine were caused during the swallowing process. Engine performance did not deteriorate after water was swallowed.

Key words: aero turbofan engine; swallowing water experiment; engine performance; engine thrust; mass of swallowing water

大气环境条件下,存在着体积不同、含水量不等的各种云层。当飞机穿越云层或在云层中做较长时间飞行时,发动机要吸入含有液态水的空气。如果遇到的是正在下雨的云层,则不但吸入的液

收稿日期:2018-09-03

作者简介:邢洋(1987—),男,工程师,硕士,主要从事航空发动机总体性能研究。

引用格式:邢洋,王常亮,李兆红,等.航空涡扇发动机吞水性能变化[J].航空动力学报,2019,34(8):1717-1723. XING Yang, WANG Changliang, LI Zhaohong, et al. Performance change of aero turbofan engine after swallowing water[J]. Journal of Aerospace Power, 2019, 34(8): 1717-1723.

态水量大,且液态水会呈不均匀分布地进入发动机。暴雨天时,飞机起飞、着陆(着舰)过程中,跑道上的积水以及飞机头部轮子溅起的水,都可能被吸入发动机。过量液态水的吞入,会对发动机工作特性产生影响,气流温度降低,发动机压缩部件会在较高换算转速和较高增压比下工作。如果液态水量较大,会使燃油气化困难,燃油气化物不易点燃,严重时有可能使燃烧室熄火。此外,不均匀地吸入液态水又会引起机匣的变化,将对发动机工作可靠性产生不良影响。因此,在航空发动机设计定型前必须开展整机吞水考核试验,以验证发动机是否具有好的吞水能力,同时获得吞水后发动机性能变化情况,对确保飞机飞行安全具有重要的意义^[1-2]。

国外许多学者致力于发动机吞水性能变化的研究工作,并取得了一定成果。20世纪80年代,普渡大学的 Tsuchiya 等^[3]对航空发动机吞水进行了仿真研究,结果显示,发动机吞入的水量在2%到15%之间时,压气机的效率、压力比随吞水量增加而减小,每一级叶栅增压比也相应减小,随着吞水量逐渐增加压气机的喘振裕度减小,压气机稳定性大大下降。1996年, Murthy^[4]做了从机场跑道上起飞时的涡扇发动机吞水试验,并监测气水混合物被吸入发动机后的温度和压力,研究了起飞吞水后涡扇发动机上轴流式压气机和燃烧室对其性能随着时间变化的影响。2008年,英国克莱菲尔德大学的 Nikolaidis^[1]用CFD数值计算方法对一级半压气机进行了吞水研究,吞水情况下压气机等熵效率、质量流量、扭矩及压比变化作了大量的数值计算,可以看到压气机的效率、流量和压比等性能参数受到不同程度的恶化,压气机的整体性能明显下降。直到现在,我国对发动机吞水性能变化的研究甚少,90年代,旷桂兰等^[5]设计并进行了某型航空涡轴发动机吞水试验,试验结果表明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。

目前,国内针对航空发动机吞水试验研究尚少,而在新机设计定型或者鉴定之前都必须通过吞水试验。本文首先按要求设计了喷水系统,之后开展涡扇发动机地面模拟吞水试验,根据试验结果,分析吞水前后发动机截面参数及性能的变化情况,为其他型号涡扇发动机吞水试验提供借鉴。

1 试验要求

国家军用标准均规定航空发动机须具备一定的环境吞咽能力,并对发动机须具备的吞入大气中液态水能力进行了详细规定。GJB241A-2010《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》规定^[6],涡喷、涡扇发动机在高度为13 km以下的整个工作范围内,在下列条件下应能满意地工作:从慢车到最大推力状态,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。当发动机以最大推力状态工作时,把占空气总质量流量2%、3.5%和5%的水(液态和气态)引进发动机进口,在这3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,发动机在上述每一条件下工作5 min后,再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。

在试验中,应注意和记录吞水对发动机性能的影响。试验结束后将发动机停车,冷却到环境温度,然后进行试验后性能检查,检查后将发动机完全分解检查。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。

2 涡扇发动机吞水性能变化试验

2.1 试验用发动机

试验用发动机为混合排气小涵道比军用涡扇发动机,为某原型发动机的改进型发动机。

2.2 吞水试验设备

本次吞水试验在地面常规试车台上进行,从发动机进气道外向发动机内部喷水。因此,需要在台架上增加喷水设备,喷水设备主要由供水循环系统、喷水系统和电控系统等部分组成^[7-8],其系统原理图见图1,结构简图见图2。该喷水装置详细参数如下:

1) 水箱的有效容量为 10 m^3 ,可以保证试验时有足够的水可供应。

2) 所选水泵最大工作压力为 1 MPa ,最大流量为 $31\text{ m}^3/\text{h}$,喷出的水滴直径不大于 2 mm 。

3) 调节阀的流量范围为 $0\sim 40\text{ m}^3/\text{h}$,可通过调节阀来控制喷水环的供水压力和流量。

4) 流量计测量范围为 $0.563\sim 6.444\text{ kg/s}$,可以显示流入喷水环的水量。

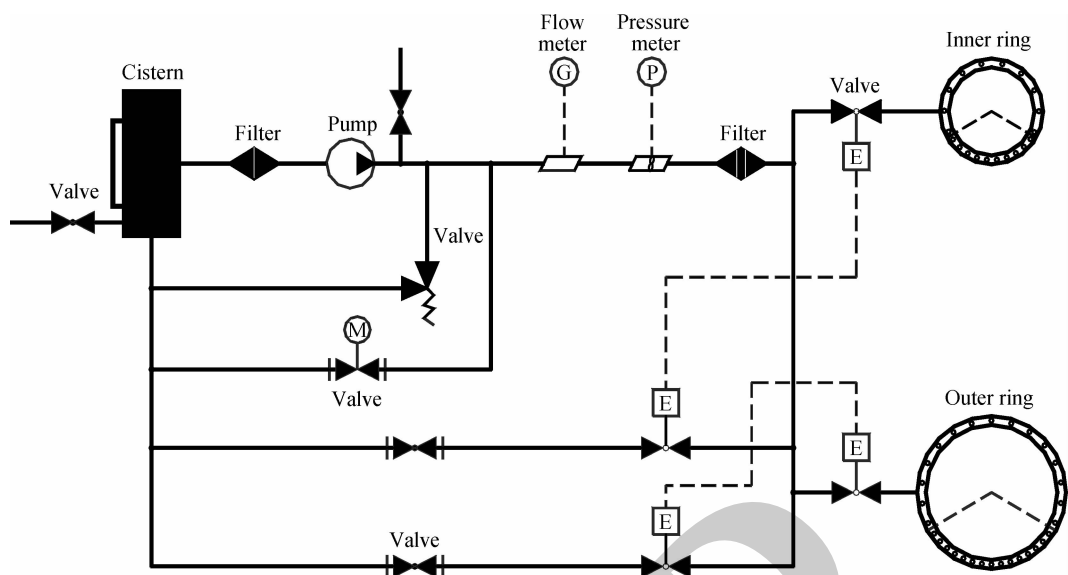


图 1 喷水系统原理图
Fig.1 Water spraying system

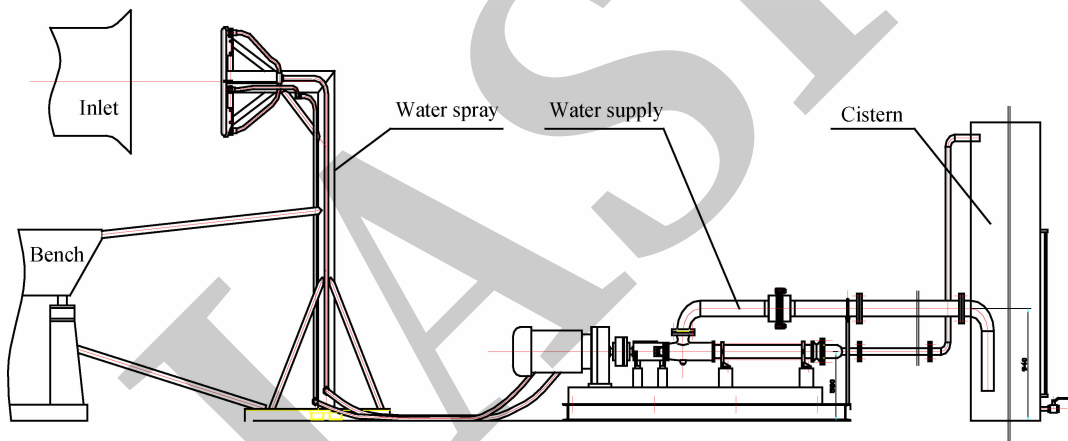


图 2 喷水系统结构简图
Fig.2 Water spraying structure

5) 喷水环由内环和外环组成,通过喷水环上喷嘴的不均匀分布可保证喷水不均匀度是下 1/3 扇形区内的水量占总水量的 50%。

2.3 试验用水要求^[9]

吞水试验用水应为软化水,水质符合下列要求:

- 1) 除去机械杂质,PH 值在 6.5~7.5 范围内。
- 2) 总固体质量浓度不大于 30 mg/L,溶解固体质量浓度不大于 25 mg/L。
- 3) 水的电阻率不小于 150 kΩ·cm。

2.4 试验概况

整个吞水试验包括 4 次发动机开车,首先进行吞水试验前的性能录取开车。之后进行吞水试验开车,包括慢车和最大状态时,吞水量 Q_m 占进

气流量 W_a 的百分比 $P(P=Q_m/W_a)$ 分别为 2%、3.5%、5% 的吞水试验,节流和中间状态 P 为 3.5% 的吞水试验,具体见表 1,表中每个状态吞水时间持续 5 min。吞水试验结束后,发动机停车并冷却到环境温度,进行了吞水试验后的发动机性能录取开车。

表 1 发动机不同状态的试验点
Table 1 Test site of swallowing water experiments

状态	$P/\%$
慢车	2,3.5,5
节流	3.5
中间	3.5
最大	2,3.5,5

吞水试验过程中,喷水环喷水情况见图 3。在慢车吞水过程中,喷口部位有气态及液态水的排出,随着吞水量增大,喷口排出的液态水量明显增加。

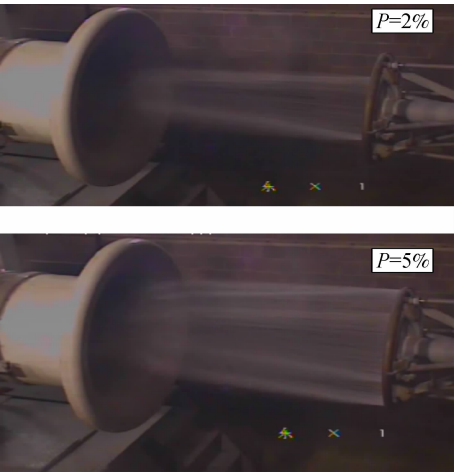


图 3 喷水过程
Fig. 3 Spraying process

在最大状态吞水过程中,可以看到喷口后的火焰颜色较无吞水的情况有明显变化,不同吞水量下的喷口火焰变化情况见图 4。

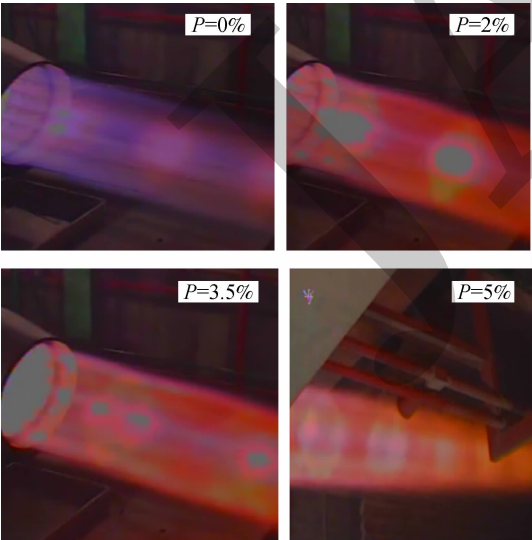


图 4 最大状态火焰颜色变化
Fig. 4 Flame color change at afterburning

分析原因是发动机处于最大状态时,发动机吸入蒸气后,会导致进口空气成分变化,氧气含量会瞬间减小,而在加力燃烧室供油保持基本稳定的情况下,燃烧室会因氧气量不足使油气比向富油燃烧方向偏移,燃烧效率下降,进而导致加力火焰变为红黄色。

试验结束后,选取了发动机最低工作状态(慢车状态)和最高工作状态(最大状态) P 分别为 2%、3.5%、5% 的吞水试验,对发动机的截面温度、部件性能及稳态性能等参数变化情况进行分析,具体见文中第 2.5 至 2.8 节。

2.5 不同吞水量条件下的截面温度参数变化

风扇内、外涵出口温度,在慢车和最大状态吞水量不同时,表现出不同的变化规律,即在慢车状态时,风扇外涵出口温度和风扇内涵出口温度的降低程度均不随吞水量的变化而变化,具体见图 5。而最大状态时,随着吞水量的增加,风扇内涵出口温度降低的程度也增加,风扇外涵出口温度的降低程度基本不随吞水量的变化而变化,具体见图 6。图中 T_{23} 表示风扇内涵出口温度, T_{13} 表示风扇外涵出口温度,试验数据已作归一处理,仅给出相对变化关系,下同^[10-11]。

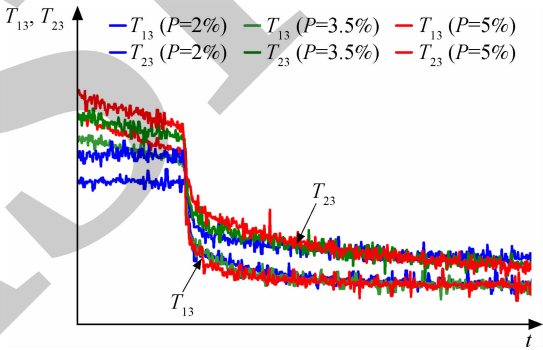


图 5 慢车状态吞水后风扇出口温度变化
Fig. 5 Temperature change behind the fan after swallowing water at idling

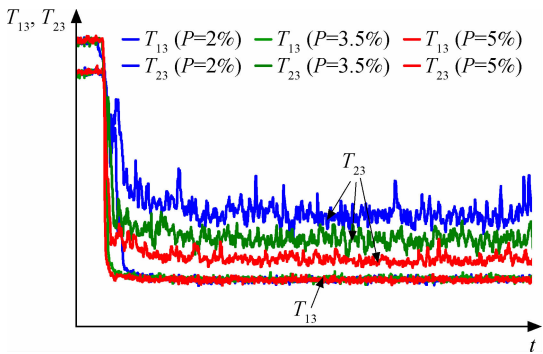


图 6 最大状态吞水后风扇出口温度变化
Fig. 6 Temperature change behind the fan after swallowing water at afterburning

分析主要原因:

1) 在慢车状态时发动机转速较低,空气流量较最大状态要小的多,在试验的吞水量条件下,风

扇内、外涵出口处的液态水量均是相对过剩的,因此风扇内、外涵出口温度的降低程度也基本相同。

2) 在最大状态时发动机转速较高,液态水进入风扇后,在离心力的作用下,大部分的液态水被甩入外涵,对于外涵来说,由于风扇外涵出口部位的水量相对过剩,吞水量大幅增加但液态水气化程度低,因此风扇外涵出口温度的降低程度基本不变。对于内涵来说,由于吞水量的增加,导致进入内涵的水量适当增多,同时内涵出口温度高,内涵出口部位液态水的气化程度增大,内涵出口温度随着吞水量增多而降低^[12]。

2.6 吞水后部件性能参数变化

慢车状态,发动机按一定的高压转速给定油量,高压转速不变,吞水后,压气机进口温度降低,导致压气机换算转速升高,增压比增加,压气机出口压力升高。而由于高压转速不变,低压涡轮功增加,低压转速有所升高,导致涡轮后出口压力基本不变,因此涡轮膨胀比(压气机出口压力与低压涡轮出口压力之比)有所增加。

最大状态,吞水后,压气机进口的温度降低,导致换算转速增加,压气机压比升高,此时由于发动机的喷口进入闭环控制,对于相同的发动机进气温度,涡轮膨胀比基本维持不变,具体见图 7 和图 8。图中, π_c 为高压压气机总压比, π_t 涡轮膨胀比, n_{hcor} 为高压换算转速。

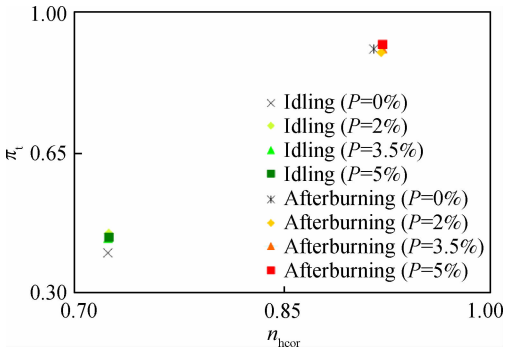


图 8 吞水后涡轮膨胀比变化

Fig. 8 Expansion ratio of turbine changes after swallowing water

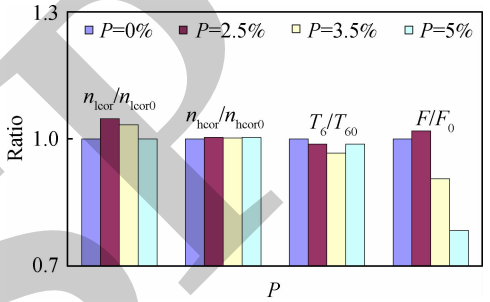


图 9 慢车状态吞水后稳态性能变化

Fig. 9 Steady state performance change after swallowing water at Idling

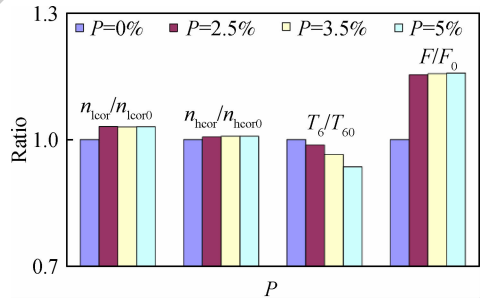


图 10 最大状态吞水后稳态性能变化

Fig. 10 Steady state performance change after swallowing water at afterburning

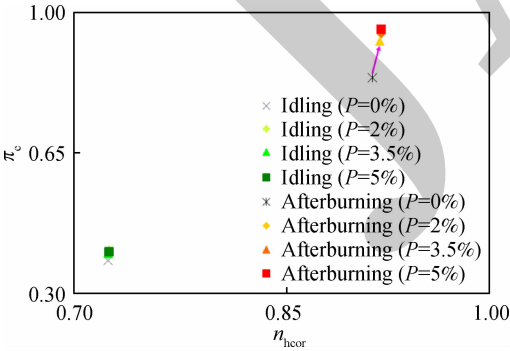


图 7 吞水后高压压气机总压比变化

Fig. 7 Pressure ratio of high-pressure compressor changes after swallowing water

2.7 不同吞水量条件下的稳态性能参数变化

不同吞水量条件下的发动机稳态性能参数对比见图 9 和图 10。图中 n_{lcor} 、 n_{hcor} 、 T_6 、 F 分别为吞水后低压换算转速、高压换算转速、涡轮后排气温度和推力, n_{lcor0} 、 n_{hcor0} 、 T_{60} 、 F_0 分别为未吞水时发动机相应状态下参数,纵坐标为吞水后参数与

吞水前参数比值。

在慢车状态,高压转速不变,由于液态水的吞入,导致发动机各截面温度降低。由于涡轮膨胀比增加,低压涡轮功增加,进而导致低压转速升高,进气流量增加,推力增大。但随着吞水量的增加,大量的液态水吸热气化,水蒸气体积迅速膨胀,导致进入燃烧室和涡轮的空气流量减小,涡轮中过量水蒸气的存在以及液态水的气化降低了涡轮的工作效率,推力明显降低,又使低压涡轮后排气温度(T_6)有相对上升的趋势。

在最大状态,发动机由综合电子调节器的低压转速、高压转速和涡轮后排气温度 3 个调节通道采取低选形式控制。无吞水的情况下,该发动机按限涡轮后排气温度控制。发动机吞水后,由于涡轮后排气温度的降低,发动机转为限低压转速控制,因此发动机低压转速升高,进气流量增大,推力增大。随着吞水量增加,发动机进气温度进一步下降,由于低压转速不变,换算转速上升,发动机压比具有上升趋势,所以推力也有所上升。而由于进气温度下降,因此低压涡轮后排气温度也有所下降^[13-14]。

综上所述,发动机最大状态吞水后,推力有所上升,排气温度有所下降,而且吞水量越多,推力上升越多,排气温度下降也越多。

2.8 吞水试验前和吞水试验后的发动机性能对比

吞水试验前和吞水试验后的发动机节流状态的性能对比情况见图 11~图 13,图中 p_{31hs} 为高压压气机后换算压力, p_{6hs} 为低压涡轮后换算压力, T_{6hs} 为低压涡轮后排气温度, F_{hs} 为换算推力。发

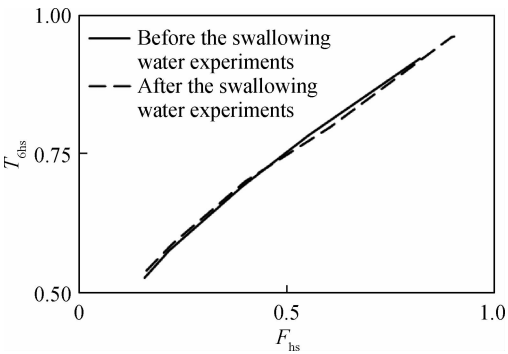


图 13 吞水试验前后排气温度对比

Fig. 13 Exhaust temperature comparison before and after wallowing water experiments

动机节流状态的 p_{31hs} 、 p_{6hs} 等参数无明显变化,同一 F_{hs} 下, T_{6hs} 未见明显变化,且吞水过程中发动机工作稳定,未发生失速、喘振、发动机主燃烧室熄火的情况。综上所述,本台发动机吞水后工作正常,且性能未见恶化,说明在试验考核范围内,吞入试验规定的液态水量,对后续的发动机使用性能影响不明显^[15-17]。

2.9 其 他

本次试验过程中,对发动机各个截面脉动压力全程监控,通过对脉动压力实时监测的数据分析,吞水试验过程中发动机内部气流稳定性良好,发动机没有出现失速、喘振等气动失稳现象。说明喷水控制在发动机进口 1/3 扇形面对发动机各个截面气流参数均匀度影响不明显,此种情况下发动机可正常工作。

3 结 论

基于某涡扇发动机地面模拟吞水试验,开展了发动机吞水后性能变化研究,研究结果表明:

- 1) 慢车状态,风扇内、外涵出口温度的降低程度不随吞水量的变化而变化。最大状态时,随着吞水量的增加,风扇内涵出口温度降低的程度增加,风扇外涵出口温度的降低程度基本不变。
- 2) 慢车状态,大量的液态水吞入后,涡轮的工作效率降低,发动机推力降低。最大状态,发动机吞水后,发动机转为限低压转速控制,因此发动机低压转速升高,推力有所上升,而且随着吞水量增加,上升趋势更加明显。

3) 该台涡扇发动机及其附件在吞水试验过程中工作正常,吞水后发动机性能无恶化,并且没有造成失速、喘振、发动机主燃烧室熄火,说明该型发动机具备吞水能力。

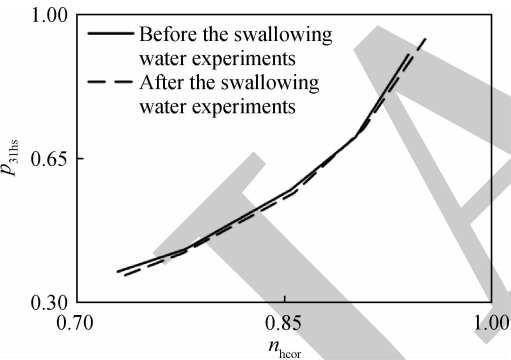


图 11 吞水试验前后高压压气机后压力对比

Fig. 11 Total pressure after high-compressor before and after wallowing water experiments

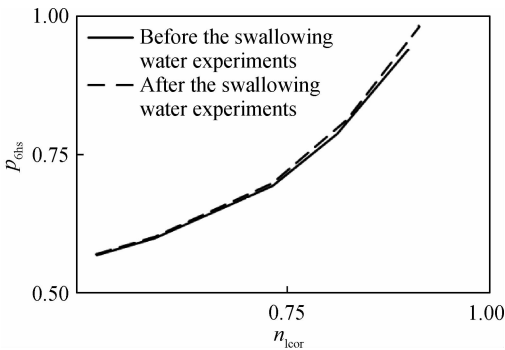


图 12 吞水试验前后涡轮后压力对比

Fig. 12 Total pressure after turbine comparison before and after wallowing water experiments

4) 吞水试验顺利进行,说明试验方法及试验装置的设计合理可行,可为后续涡扇发动机吞水试验提供借鉴。

参考文献:

[1] NIKOLAIDIS T. Water ingestion effects on gas turbine engine performance[D]. Cranfield,England;Cranfield University,2008.

[2] 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):39-44.

MA Qingxiang. Aeroengine sea level water ingestion simulation test[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2002,15(4):39-44. (in chinese)

[3] TSUCHIYA T, MURTHY S N B. A computer code for the prediction of a multistage axial compressor. performance with water ingestio[R]. NASA-CR-3624,1982.

[4] MURTHY S N B. Dynamic performance of high bypass ratio turbine engines with water ingestion[R]. NASA-CR-4703,1996.

[5] 旷桂兰,王道波,单晓明,等. 某型航空涡轴发动机整机吞水性能试验[J]. 航空动力学报,2009,24(11):2415-2420.

KUANG Guilan, WANG Daobo, SHAN Xiaoming, et al. Swallowing water capability experiment of one turbine-shaft overall aviation engine [J]. Journal of Aerospace Power,2009,24(11):2415-2420. (in Chinese)

[6] 国防科学技术工业委员会. GJB 241A-2010 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2010:53.

[7] 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,2005:199-203.

[8] 田小江,张灵,夏全忠,等. 小型航空涡喷发动机吞水试验装置研制[J]. 燃气涡轮试验与研究,2015,28(2):49-52.

TIAN Xiaojiang, ZHANG Ling, XIA Quanzhong, et al. Development of equipment foe water ingestion test of certain mini-typeaero-engine[J]. Gas Turbine Experiment and

Research,2015,28(2):49-52. (in Chinese)

[9] 国防科学技术工业委员会. GJB 4877-2003 航空涡轮发动机吞水试验要求[S]. 北京:总装备部军标出版发行部,2003:1-6.

[10] 杨璐,郑群,张海,等. 轴流压气机吞水后的性能变化研究[J]. 推进技术,2017,38(7):1499-1506.

YANG Lu, ZHENG Qun, ZHANG Hai, et al. Study on performance changes of axial flow compressor after water ingestion[J]. Journal of Propulsion Technology, 2017,38(7): 1499-1506. (in Chinese)

[11] 邢洋,李兆红,郭海红,等. 舰载机发动机高温条件下起动试验研究[J]. 推进技术,2018,39(6):1234-1239.

XING Yang, LI ZhaoHong, GUO Haihong, et al. Experimental investigation on performance changes of one aero turbofan engine after swallowing water[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018,39(6):1234-1239. (in Chinese)

[12] 陈光. 雨水对飞机发动机的影响[J]. 航空发动机,2013,39(4):1-4.

CHEN Guang. Influence of rain on aeroengine [J]. Aero-engine,2013,39(4):1-4. (in Chinese)

[13] TSUCHIYA T, MURTHY S N B. Water ingestion into axial flow compressors; Part II computer program[R]. Wright-Patterson Air Force Base, US; Air Force Wright Aeronautical Laboratories,1980.

[14] MURTHY S N B, TSUCHIYA T, EHRESMAN C M, et al. Water ingestion into axial flow compressors; Part III experimental results and discussion[R]. Wright-Patterson Air Force Base, US; Air Force Wright Aeronautical Laboratories,1981.

[15] 朱之丽,陈敏,唐海龙,等. 航空燃气涡轮发动机工作原理及性能[M]. 上海:上海交通大学出版社,2014.

[16] 肖国树. 航空发动机设计手册:第 5 册 涡喷及涡扇发动机总体[M]. 北京:航空工业出版社,2001.

[17] DAY I, WILLIAMS J, FREEMAN C. Rain ingestion in axial flow compressors at part speed[J]. Journal of Turbomachinery,2008,130:011024. 1-011024. 10.

(编辑:李岩梅、张 雪)