

文章编号: 1000-8055(2024)10-20220835-09

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20220835

航空发动机腐蚀敏感性试验系统研制

马平昌¹, 刘 玥¹, 高 飞¹, 芮 鹏¹, 徐海博²

(1. 北京强度环境研究所 产品研发中心, 北京 100076;

2. 天津航天瑞莱科技有限公司 北京分部, 北京 101102)

摘 要: 针对航空发动机腐蚀敏感性试验需求, 设计研制了基于新风进气、直通式布局形式的腐蚀敏感性试验系统, 并介绍了系统关键设计要点, 包括供气量确定、大流量加湿、盐雾注入混匀一体化、动态盐雾含量检测等。为了验证关键技术设计的有效性, 进行了系统性能测试, 测试结果表明系统性能在腐蚀敏感性试验各阶段均满足标准要求, 其中流量静态控制精度可达 $\pm 1.6\%$, 动态控制精度在 $\pm 4.6\%$ 以内; 静态温度控制精度可达 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 发动机运转过程实际温度与设定温度最大偏差为 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$; 试验中系统最大加湿量可达 550 kg/h , 在加湿度量最大的阶段湿度控制精度处于 $+3\%\sim -5\%$ 以内, 而在加湿量最小的阶段湿度控制精度可达 $\pm 2\%$; 供气盐雾含量处于 $(200\pm 18)\text{ ppb}$ 以内, 盐雾粒径分布于 $0.3\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 之间, 供气截面盐雾均匀性基本可达 $\pm 10\%$ 。

关 键 词: 腐蚀敏感性试验; 供气量确定; 大流量加湿; 盐雾注入及均混; 动态盐雾含量检测

中图分类号: V216.8

文献标志码: A

Development of aero-engine corrosion sensitivity test system

MA Pingchang¹, LIU Yue¹, GAO Fei¹, RUI Peng¹, XU Haibo²

(1. Product Research and Development Center,

Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China;

2. Beijing Branch,

Tianjin Aerospace Reliability Technology Company Limited, Beijing 101102, China)

Abstract: In order to meet the requirements of corrosion sensitivity test for aero-engines, a corrosion sensitivity test system based on fresh air intake and straight through layout was designed and developed. The key design points of the system were introduced, including determination of air supply, design of large flow dry steam humidifiers, integrated design of salt spray injection and mixing, and design of dynamic salt spray sampling. To verify the effectiveness of the key technology design, system performance test was carried out. The test results showed that system performance met the standard requirements at all stages of the corrosion sensitivity test. The static control accuracy of flow can reach $\pm 1.6\%$, and the dynamic control accuracy was within $\pm 4.6\%$. The static temperature control accuracy can reach $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the maximum deviation between the actual temperature and the set temperature was $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ during engine operation. In the test, the maximum humidification capacity of the system can reach 550 kg/h , the humidity control accuracy was within $+3\%\sim -5\%$ at the stage with the maximum humidification capacity, and the humidity control accuracy can reach $\pm 2\%$ at the stage with the minimum humidification capacity. The salt content of the gas supply was within $(200\pm 18)\text{ ppb}$. The simulated particle size distribution of salt spray was between $0.3\text{ }\mu\text{m}$ and $10\text{ }\mu\text{m}$, and the distribution uniformity of salt spray was basically $\pm 10\%$ at different positions of the air supply duct section.

收稿日期: 2022-11-02

作者简介: 马平昌(1993—), 男, 高级工程师, 硕士生, 主要从事环境模拟技术及装备研究。

引用格式: 马平昌, 刘玥, 高飞, 等. 航空发动机腐蚀敏感性试验系统研制[J]. 航空动力学报, 2024, 39(10): 20220835. MA Pingchang, LIU Yue, GAO Fei, et al. Development of aero-engine corrosion sensitivity test system[J]. Journal of Aerospace Power, 2024, 39(10): 20220835.

Keywords: corrosion sensitivity test; determination of air supply;
large flow dry steam humidifiers; salt spray injection and mixing;
dynamic salt spray content detection

航空发动机在沿海环境飞行时,会受到海洋性气候环境和诱发环境的严酷影响,主要影响因素包括温度、湿度、盐雾、淋雨、酸性大气等,其中影响最突出的有温、湿、盐雾环境^[1-3]。海洋及沿海地区高温、湿热、盐雾等恶劣多变的气候环境将对发动机上通流部件造成严重的腐蚀,这种腐蚀会导致发动机气动性能恶化以及影响发动机的结构强度和疲劳寿命^[4-7]。根据《航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范》^[8]和《航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范》^[9]要求,航空发动机必须进行腐蚀敏感性试验,试验需真实模拟发动机工作时所处的温、湿、盐雾环境,以考核发动机整机在各种工作状态下受海洋温、湿、盐雾环境的综合性能影响,特别是对于在航空母舰或沿海基地那样含盐量较大的环境工作的发动机。

随着我国海航装备的不断发展,海洋环境对于航空发动机的综合性能影响愈发突出,然而由于受试验设备条件所限,我国很长一段时间未能在试验室内开展并完成腐蚀敏感性试验^[10-11]。目前国内对于发动机受海洋气候环境作用影响的研究主要集中在分析压气机叶片腐蚀机理以及其与发动机性能衰退的关系^[12-15],其中叶片的腐蚀主要以盐雾箱静态试验为主,而发动机在不同腐蚀情况下的性能变化则是主要采用数值研究方法。对于航空发动机在海洋高温、湿热、盐雾的综合环境效应下的工作性能研究,目前只能通过飞行试验进行^[16],但是飞行试验受真实气候环境变化的影响太大,无法进行重复性试验,且成本较高,安全系数较低。因此研制一套满足相关国军标要求的航空发动机腐蚀敏感性试验系统,用于真实

模拟发动机工作时经历的温、湿、盐雾典型海洋环境气候,对于满足海航发动机海洋环境适应性设计和性能考核的需求,提升海航发动机的可靠性,具有重要的意义^[17]。

1 设计指标

该试验系统可实现 GJB 242A-2018《航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范》中腐蚀敏感性试验需求,满足温度、湿度、盐雾浓度(为盐与空气的质量比)等试验参数的测量与调节,针对某型航空涡轴发动机,设计试验系统具体指标如下:

- 1) 最大供气量为 6 kg/s;
- 2) 供气温度为环境温度(10~60)℃;
- 3) 相对湿度为 70%~100%;
- 4) 空气含盐量为(200±40) ppb, ppb 表示 10^{-9} 。

2 方案设计

2.1 系统组成及工作原理

航空发动机腐蚀敏感性试验系统采用新风进气、直通式布局形式,防止发动机试验过程形成的尾气通过循环再次进入发动机入口,造成试验污染。试验系统顺序布置供气单元、温度调节单元、湿度调节单元、盐雾混合调节单元、动态盐雾取样单元、防护舱、测控单元,如图 1 所示。

试验系统的详细组成如图 2 所示,新风大气通过供气单元进入系统内部,首先进入温度调节单元加温至目标温度;随后进入湿度调节单元进行加湿,经过一段距离的混合吸收形成温湿气体;温湿气体经过盐雾混合单元与盐雾进行混匀并输送至防护舱供发动机工作进气;防护舱入口前端

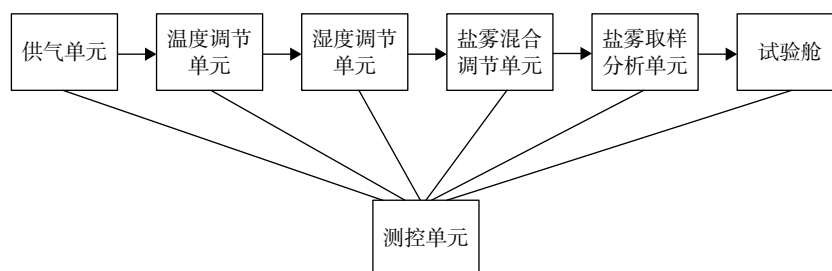


图 1 系统架构

Fig. 1 System architecture

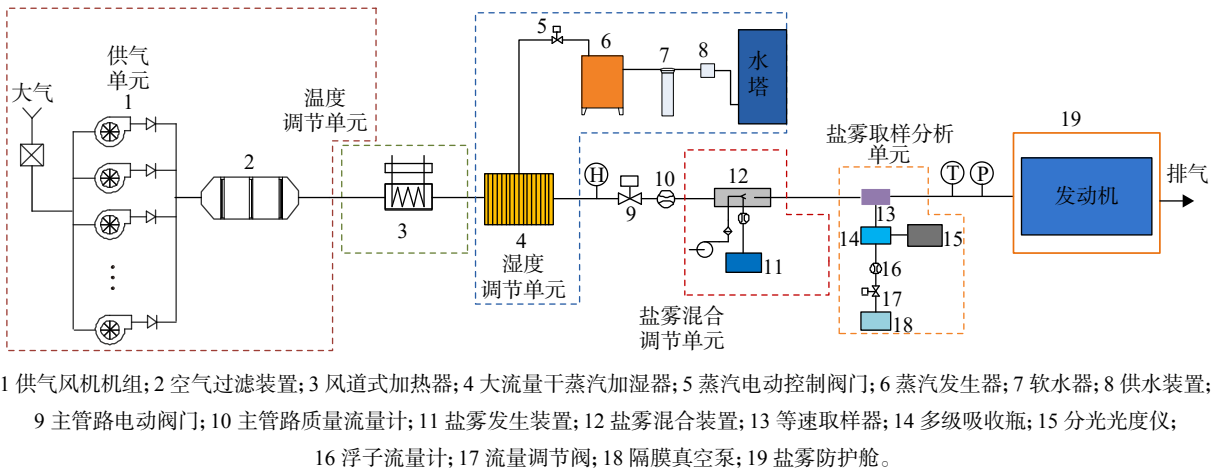


图 2 系统详细组成

Fig. 2 Detailed composition of the system

设置动态盐雾取样单元,用于校准含盐气体的盐雾含量;发动机工作尾气与舱内环境气体通过排气引射筒排出至外界环境。

2.2 关键设计要点

腐蚀敏感性试验主要包括 4 个阶段,分别是:发动机运行、大气贮存、动态盐雾贮存、湿热贮存,各阶段试验条件要求如表 1 所示,因此腐蚀敏感性试验系统中各单元的性能特性需要满足表 1

中各状态环境参数要求。腐蚀敏感性试验系统中供气单元与温度调节单元均具有成熟的设备支撑,满足试验各阶段供气流量以及供气温度的能力需求,而试验所涉及的高湿环境模拟以及 10^{-7} 量级的微盐雾含量模拟技术是形成腐蚀敏感性试验系统的关键,此外系统供气流量的确定原则同样至关重要,因为供气流量的大小是确定系统各单元能力的基础参数。

表 1 混合域可分离卷积与深度可分离卷积参数

Table 1 Mixed-domain separable convolution and depth-separable convolution parameters

阶段	试验状态	发动机状态	供气盐雾含量/ppb	供气温度/℃	供气湿度/%	试验时间/h
I	发动机运行	运转	200±40	≥10	≥73	3
II	大气贮存	不运转	0	大气	大气	2
III	动态盐雾贮存	不运转	200±40	≥10	≥73	7
IV	湿热贮存	不运转	0	43±5	≥90	12

2.2.1 供气量确定

供气单元最大供气量的确定需要满足发动机运行阶段的供气需求,最大供气量 $q_{m,g}$ 按照式(1)进行设计,该供气量确定原则一方面可以保证在封闭式供气下,发动机性能与开放式台架试车性能基本一致;另一方面可以实现发动机内流道与外表面同时历经海洋大气环境的目标。

$$q_{m,g} = K(1+r) q_{m,inlet} \tag{1}$$

式中 $q_{m,inlet}$ 为发动机最大进气量; r 为排气引射比; K 为设计余量。

2.2.2 大流量加湿

腐蚀敏感性试验需要模拟发动机运行态或贮存态所处的湿热环境,考虑试验过程中供气流量

较大,湿度调节单元的绝对加湿量需求远高于常规环境试验室环境模拟需求。为满足腐蚀敏感性试验高湿供气需求,选用干蒸汽等温加湿方式,其具有加湿量大,加湿效率高等优点^[18],而大流量高温蒸汽直接注入风道势必导致风道喷水、加湿控制波动大等问题,因此大流量干蒸汽加湿器的设计至关重要。

大流量干蒸汽加湿器结构设计如图 3^[19]所示,通过特殊的内部流道设计,使其具有多级汽水分离功能,防止蒸汽输送及进入风道过程中形成的冷凝水直接喷射至风道内部,从而改善风道大流量加湿特性,具体的工作原理为:高温蒸汽由干蒸汽加湿器蒸汽入口进入内部蒸汽流道时,由于蒸汽流道截面设计尺寸大于蒸汽入口,则输送过

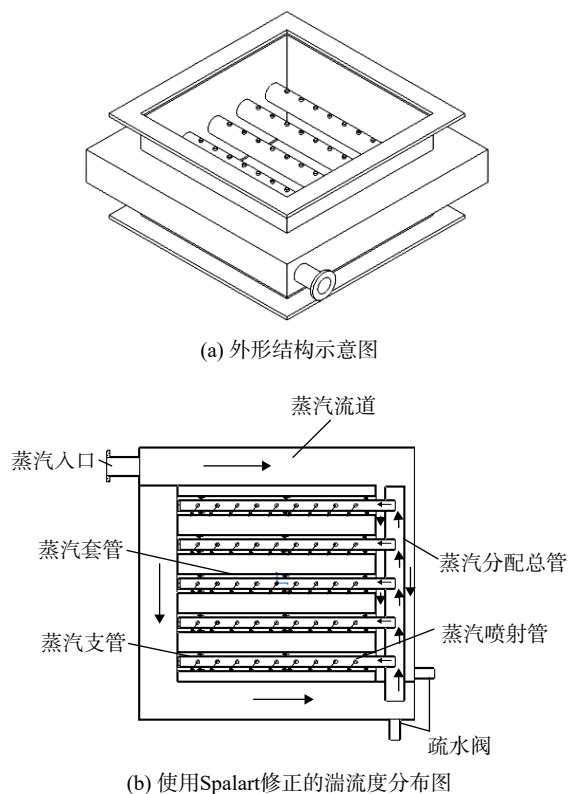


图 3 大流量干蒸汽加湿器

Fig. 3 Large flow dry steam humidifier

程中掺杂于高温蒸汽中的水滴依靠惯性作用实现一级汽水分离;完成汽水分离后的高温蒸汽继续在蒸汽流道内进行流动,并完成对处于蒸汽流道内部的蒸汽分配总管、蒸汽套管、蒸汽支管和蒸汽喷射管的管壁预热,预热产生的冷凝水由于蒸汽加湿器结构上的疏水阀排出,从而完成第二级的汽水分离;完成加湿器各部件预热后,高温蒸汽由蒸汽流道进入蒸汽分配总管内部,自下向上进行流动,并进入蒸汽支管,最后由蒸汽喷射管喷射至加湿空间,高温蒸汽在蒸汽分配总管内流动时,汽水重力差作用配合流动转向的惯性作用完成第三级汽水分离。此外,大流量干蒸汽加湿器根据风道尺寸设计多个喷口喷射蒸汽,通过干蒸汽加湿器的安装使得蒸汽喷射方向与来流方向相反,从而实现高温蒸汽的快速吸收,有效缩短加湿吸收距离。

2.2.3 盐雾注入混匀一体化

腐蚀敏感性试验要求模拟发动机在运行及贮存过程中内外部微盐雾含量环境,相关标准^[8-9]指出供气盐雾浓度应满足 (200 ± 40) ppb。目前成熟的盐雾发生主要采用雾化喷嘴,雾化喷嘴具有喷雾流量大及喷雾粒径大的特点,而为保证腐蚀敏感性试验过程中供气截面盐雾浓度尽可能均匀,

设计人员通常会在供气截面上布置喷嘴阵列,这就导致微盐雾含量模拟需求与盐雾均匀性设计相互矛盾。为解决这一问题,阿诺德工程发展中心(AEDC)海上试验平台 SL-3^[20]在风道截面布置 73 个盐雾喷嘴同时喷雾,并采用去离子水稀释标准规定的盐溶液的方法实现大流量喷雾下的微盐雾含量模拟,然而这一方法会导致喷射盐溶液的浓度的变化,并且雾化喷嘴产生的盐雾粒径最小为 $20\text{ }\mu\text{m}$,而自然环境中长期悬浮于大气中 90% 的盐雾粒子基本处于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下^[21],研究表明盐溶液的浓度以及盐雾粒径对于腐蚀作用效果至关重要^[22],因此建立新的盐雾发生方法对提升腐蚀敏感性试验系统性能十分必要。

根据海洋盐雾产生原理,设计基于自由液面破碎雾化原理的盐雾发生装置,如图 4 所示。压缩空气经过过滤及调节后通过气体分散器快速进入人工海水中,由于空气射流的搅动,在液体中产生了微小气泡的浓泡沫,当这些气泡在液体表面炸裂时,形成微粒微量的盐雾气溶胶颗粒,从而有效替代传统盐雾喷嘴喷雾,来实现贴近自然环境盐雾粒径分布的微量盐雾。试验过程中根据供气流量的测量反馈,对盐雾发生装置的供气压力进行实时调节,进而实现对盐雾发生量的调节,从而保证供气气流盐雾含量为 (200 ± 40) ppb。

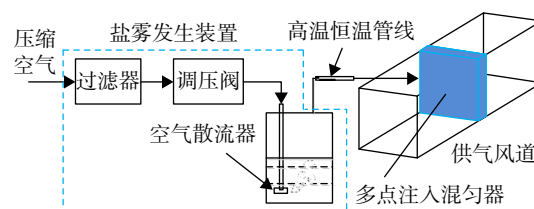


图 4 盐雾发生及输送

Fig. 4 Salt spray generation and transportation

结合自由液面破碎雾化原理形成的盐雾粒径小、气流跟随性好的特点,进行盐雾注入与混匀一体化设计,提升供风截面盐雾浓度均匀性。如图 4 所示,盐雾发生装置置于供气风道外部,用于产生微量盐雾气流,通过多点注入混匀器进入风道与供气气流混合,同步实现盐雾粒子在风道内的注入与混匀,盐雾发生装置与多点注入混匀器之间采用高温恒温管线连接,以防止盐雾在输送过程中由于冷凝附壁引起损失。

多孔注入混匀器结构如图 5 所示,多孔注入器在高度方向设置由两端分别进气、两两一组的多组分管,分管上均布多个喷射孔,其中分

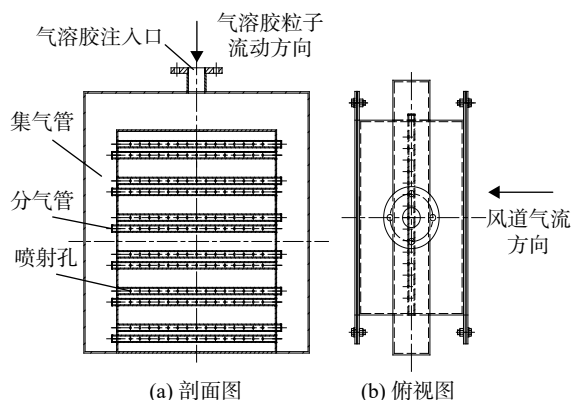


图 5 多孔注入混匀器结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of multi-points injection mixer

气管设计为一端封闭的圆柱结构，喷射孔位于圆柱分气管的背风位置。载有气溶胶的气流从气溶胶注入入口进入多孔注入器内，并通过集气管均分进入不同的分气管内，随后通过分气管上多个喷射孔喷射至风道内。对侧进气的分气管设计保证风道宽度方向盐雾注入的均匀性，圆柱结构的外形设计则有效利用圆柱扰流背风侧的漩涡流动进一步对初始盐雾喷射进行混匀，实现风道高度方向盐雾的均匀性。多孔注入混匀器有效地结合多点注入和圆柱扰流的作用，快速实现初始截面盐雾浓度的混匀。

2.2.4 动态盐雾含量检测

动态盐雾含量检测用于验证试验过程供气供气盐雾浓度是否符合要求，是评价和判断腐蚀敏感性试验系统微盐雾含量模拟能力的重要手段。国内目前尚无成熟设备支撑高湿环境下动态气流盐雾含量检测，AEDC 海上试验平台 SL-3^[20] 分别采用撞击型等速取样探针和激光击穿光谱仪实现了高湿环境盐雾气溶胶的动态检测，其中撞击型等速取样探针具有单次取样检测时间长、测量误差高、重复性差等缺点，而激光击穿光谱仪可以实现实时测量，结果分散性较小，测量精度较高，可达±20%，但该设备价格昂贵不利于工业应用。综合考虑盐雾粒子液相气溶胶的特点以及高湿环境的影响，设计一套动态盐雾含量检测装置，如图 6 所示^[23]，通过材料选择、结构设计及取样检测流程控制，解决盐雾气溶胶在取样输送过程中的高温水蒸气凝结以及附壁所产生的测量误差。

取样装置依据等速取样原理将具有代表性的气体抽取进入取样系统后，使用空白溶液吸收气溶胶中的典型离子，通过对样品液中典型离子浓度的检测，从而确定空气中对应气溶胶的含量。

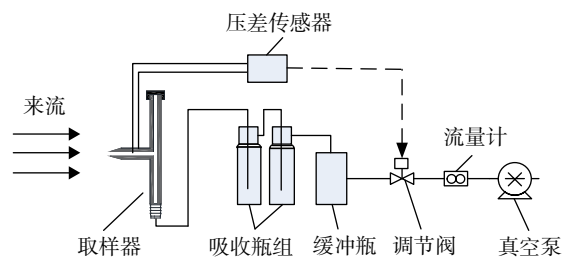


图 6 取样装置组成及原理

Fig. 6 Composition and principle of sampling device

对盐雾气溶胶取样，空白吸收液选择去离子水，典型离子选择氯离子进行吸收分析。对样品液中氯离子浓度检测采用分光光度法，使用分光光度法对检测溶液中微量氯离子具有较高的分辨率^[24]。参考文献 [23]，空气盐雾质量浓度计算公式如下：

$$\rho_{sc} = \frac{1}{C} \times \frac{\rho_{Cl^-} \cdot V}{q_v \cdot t} \quad (2)$$

式中 ρ_{sc} 为空气盐雾质量浓度；单位为 mg/m^3 ； C 为氯离子占盐质量分数； ρ_{Cl^-} 为样品液氯离子质量浓度，单位为 mg/L ； V 为样品液总体积，单位为 L ； q_v 为取样抽吸体积流量，单位为 m^3/min ； t 为取样时间，单位为 min 。

取样器前端设计为薄壁锥角形状，从而减小取样器对原有空气流动的影响。取样器壁面设计取压孔，测量取样器内部流动以及外部流动的差压，如图 7 所示。由于取样器前向流动总压一定，所以当取样器内部流动静压 p_1 与外部流动静压 p_2 一致，即可代表取样器实现等速取样。高湿空气进入取样系统后会发生冷凝，附着于在沿程壁面上，进而吸附盐雾，造成取样测试结果偏低，为了尽可能减小冷凝附壁效应的影响，取样器以及沿程输送软管均采用疏水聚四氟乙烯材料，并且取样器特别设计有清洗口，取样结束后，使用去离子水从清洗口注入，清洗取样器及沿程软管内

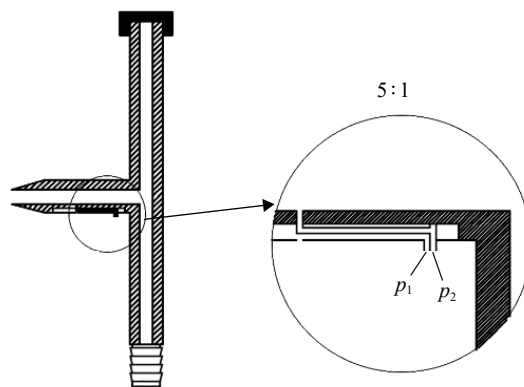


图 7 取样器结构

Fig. 7 Sampler structure

壁面,使得清洗液进入冲击式吸收瓶内,形成最终的样品液。

3 试验系统性能测试

为了验证试验系统的性能特性,腐蚀敏感性试验系统联合某型号涡轴发动机根据腐蚀敏感性试验要求进行四阶段循环测试。

3.1 供气流量特性

为了模拟发动机运行或贮存时内流道及外表面的动态气流,供气单元采用变频离心风机,将周围环境气流引入系统,并根据发动机的不同试验状态需求对供气风机进行变频调节。图 8 为一个完整 24 h 四阶段循环供气流量特性图,其中阶段 I 流量设定值为 5.4 kg/s,阶段 II 关闭风机,阶段 III 流量设定值为 3.05 kg/s,阶段 IV 保持风机运转频率不变。由图 8 可知,阶段 I 供气流量波动相对较大,最大供气流量瞬时达到 5.65 kg/s,定义流量控制精度为实际流量与设定值偏差与设定值的比值,则阶段 I 供气流量控制精度处于 $\pm 4.6\%$ 以内。阶段 I 供气流量波动较大是由于发动机在试验过程中存在不同的功率状态切换,导致试验系统背压不断发生变化,而风机变频控制周期相对较长、存在滞后;其他阶段由于发动机不运转,系统背压稳定,供气流量控制精度较高,实测流量与设定流量最大偏差处于 ± 0.05 kg/s 以内,即控制精度可达 $\pm 1.6\%$ 。此外在保证风机运转频率不变的情况下,阶段 IV 相对于阶段 III 的流量有所增加,这是由于阶段 IV 系统供气温度和供气湿度的增加所导致的。

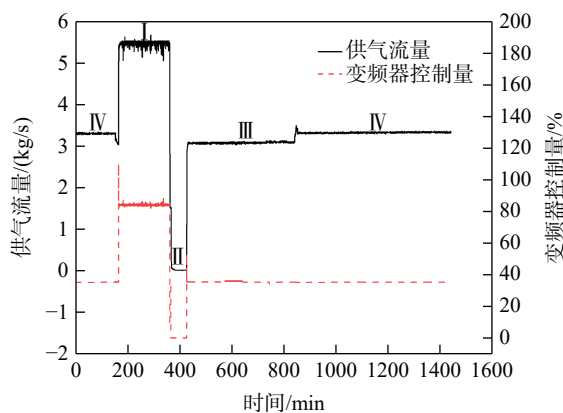


图 8 供气流量控制特性

Fig. 8 Flow control of the supplied airflow

3.2 供气温度特性

供气气流进入系统后,通过温度调节单元中

风道电加热器进行加温调节,从而模拟发动机进气温度。加热器的加热功率由可控硅控制,并根据目标温度点反馈值进行闭环调节,实时改变加热器的加热功率。系统目标温度测量位置设置于发动机防护舱入口,从而减小系统下游湿度模拟及盐雾模拟带来的温度波动。

系统供气温度控制特性见图 9,其中阶段 I 温度设定值为 20 °C,阶段 II 关闭加热器,阶段 III 温度设定值为 20 °C,阶段 IV 温度设定值为 43 °C。在阶段 III 和阶段 IV 期间,由于发动机处于不运转状态,系统供气流量相对稳定,此时系统供气温度控制精度较高,实际温度测量值相对于设定值偏差处于 ± 0.5 °C 以内,并且阶段 III 向阶段 IV 状态切换时,温度控制超调量为 2.5 °C,满足阶段 IV 供气温度处于 (43 ± 5) °C 要求;由阶段 IV 切换至阶段 I 期间,加热器功率逐渐降低直至几乎关闭,相对应的供气温度由 43 °C 逐渐回落至 20.5 °C,但在阶段 I 期间,温度又持续升高至 22.2 °C,这是由于阶段 IV 加热器处于高功率输出,尽管切换至阶段 I 时,加热器输出功率降低,但是加热器内部仍存在大量的余热,而在进入阶段 I 试验条件后发动机启动导致系统背压减小,系统供气流量增大,从而带出更多的余热,导致温度升高,并且此时加热器输出功率几乎为 0,调节能力较弱,无法有效回调温度。

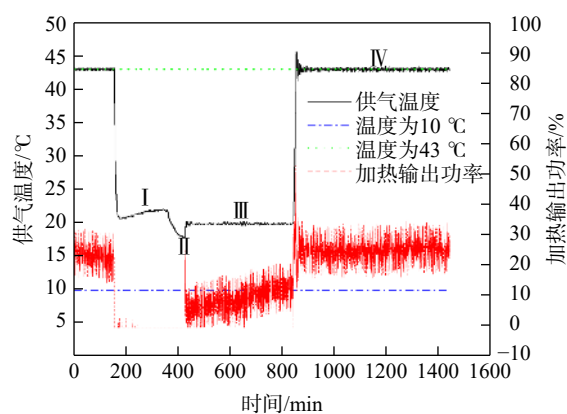


图 9 供气温度控制特性

Fig. 9 Temperature control of the supplied airflow

3.3 供气湿度特性

系统配置电蒸汽发生器,通过大流量干蒸汽加湿器将高温蒸汽注入风道进行带温气流的加湿,以模拟腐蚀敏感性试验中高湿环境,高温蒸汽输送管路上设置电动调节阀门,通过阀门开度实现加湿量的调节控制。

系统供气湿度控制特性如图 10 所示,其中阶

段 I 湿度设定值为 77%, 阶段 II 关闭蒸汽阀, 阶段 III 湿度设定值为 77%, 阶段 IV 湿度设定值为 96%。整个试验过程中阶段 IV 加湿量最大, 阀门开度达到 55%, 由于巨大的加湿量导致蒸汽发生器频繁补水, 从而出现供气湿度的陡降波动, 试验过程中实际供气湿度与设定值偏差基本处于 +3%~-5% 以内, 最低湿度大于 90%, 满足试验要求。阶段 I 相对于阶段 IV 加湿量有所降低, 整个阶段过程湿度控制精度处于 +2%~-4% 以内, 最低湿度大于 73%, 满足试验要求。阶段 III 加湿需求较小, 并且来流流量及温度均比较稳定, 因此该阶段湿度控制精度较好, 可达 $\pm 2\%$, 试验过程中最低湿度大于 73%, 同样满足试验要求。

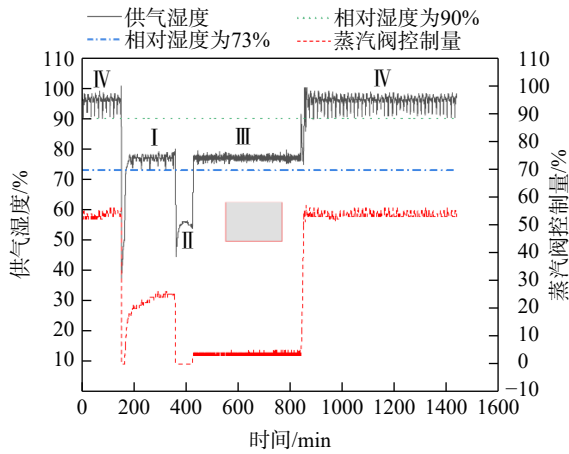


图 10 供气湿度控制特性

Fig. 10 Humidity control of the supplied airflow

环境温湿度条件与阶段 II 时系统的温湿度一致, 结合图 9 和图 10 可知, 试验环境温度为 18 °C, 相对湿度为 56%, 试验系统工作过程中最大加湿量处于阶段 IV, 43 °C 时湿度可达 98.6%, 此时所需的绝对加湿量 Q 为

$$Q = q_{m,IV} \times \Delta d = 550 \text{ kg/h} \quad (3)$$

式中 $q_{m,IV}$ 为阶段 IV 供气流量, 取值 3.05 kg/s; Δd 为加湿前后含湿量差, 单位为 kg/kg。

相对湿度与含湿量之间的转化公式如下^[19]:

$$d = \frac{0.622 \times \varphi \times p_{\text{smax}}}{p_0 - \varphi \times p_{\text{smax}}} \quad (4)$$

式中 d 为空气湿量, 表示单位质量的干空气含有的水蒸气质量, 单位为 kg/kg; φ 为相对湿度; p_{smax} 为对应温度下的饱和蒸汽压, 单位为 Pa; p_0 为大气压力, 单位为 Pa。

因此大流量干蒸汽加湿器至少可实现 550 kg/h 高温蒸汽的加湿注入, 并且根据试验过程中的观

察可知, 加湿器无明显的水滴喷射现象及风道无湿底现象的发生, 因此干蒸汽加湿器的设计完全可以满足系统高湿环境模拟。

3.4 盐雾模拟特性

供气气流经过温湿调节后进入盐雾混合调节单元, 盐雾发生装置将生成的微量盐雾通过盐雾混合装置注入系统内部, 完成盐雾粒子与供气气流的均混, 形成含有微量盐雾的温湿气流, 其中供气气流的盐雾含量通过控制盐雾发生量与供气流量的比值实现。系统盐雾模拟特性包括盐雾含量、盐雾粒径分布、供气截面盐雾均匀性, 由于发动机运行过程中的安全性要求, 无法进行盐雾特性测试, 因此各项指标在阶段 III 分别进行测试说明。

采用动态盐雾含量检测装置在图 2 部件 13 位置处对系统供气盐雾含量进行多次检测。单次取样时间选择 40 min, 以消除试验过程中的随机误差, 与此同时增加了样品溶液氯离子的含量, 提高分光光度法的检测精度。检测结果如图 11 所示, 多次测量中系统模拟盐雾含量基本处于 (200 $\pm$ 40) ppb 范围内, 由于检测过程中存在较多的人为操作, 因此各次检测存在一定的分散性, 测试结果取多次平均后为 206 ppb, 与目标值 200 ppb 偏差仅为 3%。发动机工作过程盐雾含量可根据阶段 I 与阶段 III 供气流量控制精度比进行类比, 因此发动机工作过程盐雾含量与目标值 200 ppb 最大偏差处于 ± 18 ppb 以内, 满足标准要求。

采用六通道粒子计数器, 如图 12(a) 所示, 在图 2 部件 13 位置处进行截面盐雾粒径分布与均匀性的测试评估。测试位置采用九点测试, 如图 12(b) 所示, 每个点进行 3 次平均取样测试, 单次测试时间为 1 min, 抽气流量为 2.83 L/min。

测试结果如图 13 所示, 其中风道本底粒子数

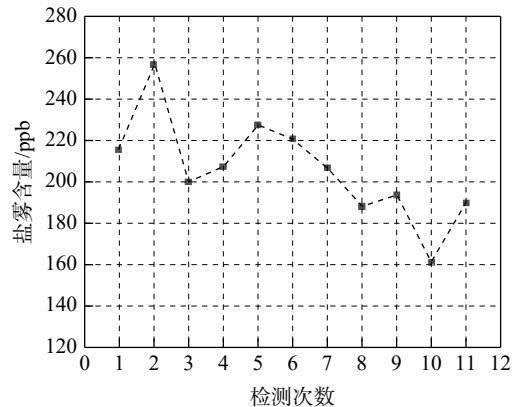


图 11 动态盐雾取样结果

Fig. 11 Dynamic salt spray sampling results

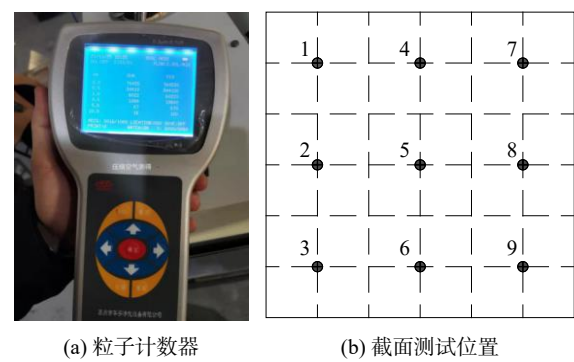


图 12 测试仪器及截面测试位置定义

Fig. 12 Definition of test instrument and section test position

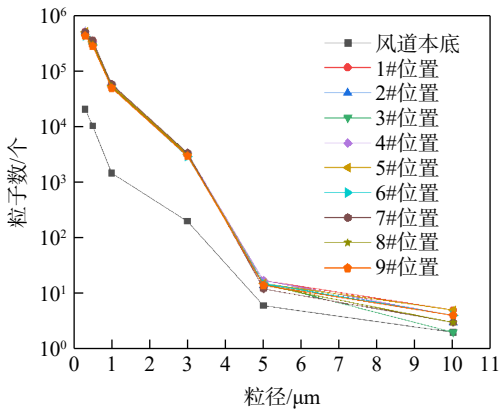


图 13 截面粒子分布

Fig. 13 Particle distribution in section

为盐雾发生装置未工作时所测得的风道内环境粒子分布。由图 13 可知盐雾发生装置产生的盐雾气溶胶粒径分布处于 $0.3\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 之间,并且大部分粒径分布于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 以下,符合自然环境盐雾气溶胶分布规律^[22]。盐雾气溶胶通过多孔注入器注入并历经一定直线段稳流后,供气截面不同位置盐雾分布具有较好的一致性,并且粒径 $\leq 3\text{ }\mu\text{m}$ 的盐雾气溶胶在供气截面的分布均匀性更好,各粒径数量分布与平均值偏差基本处于 $\pm 10\%$ 以内,这是由于小粒径气溶胶惯性较小,初始注入点是否均匀是其尽快实现混匀的主要关键因素,并且小粒径气溶胶与风道本底粒子数量差距较大,测量受环境影响较小,因此多孔注入器可以有效实现腐蚀敏感性试验供气截面盐雾粒子快速混匀目标。

3.5 盐雾模拟特性

阶段切换时间为从某一阶段试验结束开始计时至完全达到下一阶段试验条件结束计时所需要的时间。阶段切换时间相对于试验各阶段循环而言属于额外附加时间,因此试验过程中需要尽可能缩短阶段切换时间,从而降低额外的环境条件

影响。各阶段切换所需要的时间统计如表 2 所示,并与 SL-3^[20] 试验平台进行对比,由表 2 可知,相对于 SL-3 试验平台,本系统采用全流程自动化控制,极大地缩短了各阶段切换时间,试验过程中额外附加时间共为 68 min。

表 2 试验系统各阶段切换时间

Table 2 Switching time at each stage of the test system

阶段切换	切换附加时间/min	
	本文试验系统	SL-3 试验平台
阶段 I—阶段 II	0	0
阶段 II—阶段 III	30	80
阶段 III—阶段 IV	20	75
阶段 IV—阶段 I	18	50

4 结 论

通过供气量确定、大流量加湿、盐雾注入混匀一体化、动态盐雾含量检测等关键技术问题的解决,形成腐蚀敏感性试验系统。该系统具有温、湿、微量盐雾模拟及调节功能,并可根据发动机工作状态进行供气调节,完全满足国军标规定航空发动机腐蚀敏感性试验要求,对航空发动机海洋环境适应性设计和性能考核具有重要的意义。为了验证腐蚀敏感性试验系统整体性能,系统联合某型号涡轴发动机根据腐蚀敏感性试验要求进行四阶段循环测试,得出结论如下:

- 1) 试验系统在试验过程中最大供气流量达到 5.65 kg/s ,并且在发动机运转阶段,系统供气动态流量控制精度在 $\pm 4.6\%$ 以内,而在发动机停止运转阶段,系统供气流量静态控制精度为 $\pm 1.6\%$ 。
- 2) 试验系统在阶段 III 和阶段 IV 期间静态温度控制精度处于 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,阶段切换温度控制超调量为 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,优于试验要求,而在发动机工作过程中供气温度与设定温度偏差处于 $2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内。
- 3) 试验系统在试验过程中最大干蒸汽加湿量可达 550 kg/h ,在加湿量最大的阶段,由于蒸汽发生器频繁补水,湿度控制精度处于 $+3\%\sim -5\%$ 以内,而在加湿量最小的阶段,湿度控制精度可达 $\pm 2\%$ 。
- 4) 试验系统产生的盐雾粒径分布处于 $0.3\sim 10\text{ }\mu\text{m}$ 之间,更加贴近自然环境分布,模拟的供气含雾含量处于 $(200\pm 18)\text{ ppb}$ 以内,满足试验要求,供气截面不同位置盐雾分布具有较好的一致性,并且粒径 $\leq 3\text{ }\mu\text{m}$ 的盐雾气溶胶在供气截面的分布均匀性基本处于 $\pm 10\%$ 以内。

5) 试验系统采用全流程自动化控制, 极大地缩短了各阶段切换时间, 降低了额外的环境条件影响, 试验过程中额外附加时间共为 68 min。

参考文献:

- [1] 张艳辉. 浅析舰载武器海洋环境适应性验证要求[J]. 装备环境工程, 2017, 14(5): 8-11.
ZHANG Yanhui. Requirement on suitability verification of shipborne weapons in marine environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(5): 8-11. (in Chinese)
- [2] 曲晓燕, 邓力. 舰载武器海洋环境适应性分析[J]. 舰船电子工程, 2011, 31(4): 138-142, 146.
QU Xiaoyan, DENG Li. Analysis of the environmental worthiness of shipborne weapons in marine environment[J]. Ship Electronic Engineering, 2011, 31(4): 138-142, 146. (in Chinese)
- [3] 王乐, 丁晨, 房桂祥. 海洋自然环境下舰载武器失效模式分析[J]. 装备环境工程, 2019, 16(4): 98-102.
WANG Le, DING Chen, FANG Guixiang. Failure mode of shipborne weapons in marine natural environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(4): 98-102. (in Chinese)
- [4] 霍武军, 孙护国. 海航发动机压气机叶片腐蚀与防护措施[J]. 航空工程与维修, 2002(6): 39-41.
HUO Wujun, SUN Huguo. Corrosion and precaution for blades of aero-engine compressor in the navy air arm[J]. Aviation Engineering & Maintenance, 2002(6): 39-41. (in Chinese)
- [5] 王素华, 王秀霞, 樊庆和. 舰载直升机的腐蚀与防护[J]. 海军航空工程学院学报, 2004, 19(3): 343-345.
WANG Suhua, WANG Xiuxia, FAN Qinghe. Corrosion and protection of the shipboard-helicopter[J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2004, 19(3): 343-345. (in Chinese)
- [6] 沈军, 魏荣俊, 边英杰, 等. 直升机在海洋气候环境下的腐蚀防护对策研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 71-74.
SHEN Jun, WEI Rongjun, BIAN Yingjie, et al. Corrosion control of helicopter in environment of marine climate[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 71-74. (in Chinese)
- [7] 张彩先, 杨小河, 周绍华, 等. 东南沿海环境因素对直升机的影响研究[J]. 装备环境工程, 2010, 7(6): 126-129.
ZHANG Caixian, YANG Xiaohu, ZHOU Shaohua, et al. Study on the influence of environmental factors in the southeast coast on helicopters[J]. Equipment Environmental Engineering, 2010, 7(6): 126-129. (in Chinese)
- [8] 中央军委装备发展部. 航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范: GJB242A-2018 [S]. 北京: 国家军用标准出版发行部, 2018: 91-93.
- [9] 中国人民解放军总装备部. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范: GJB241A-2010 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2010: 94-95.
- [10] 国防科学技术工业委员会. 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范使用指南: GJB/Z 216-2004 [S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2004: 97.
- [11] 国防科学技术工业委员会. GJB242-1987《航空涡轮螺桨和涡轮轴发动机通用规范》使用指南: GJB/Z 225-2005 [S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2006: 98
- [12] 卢明亮. 盐雾腐蚀对压气机性能影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
LU Mingliang. Research on the effects of salt spray corrosion on the compressor performance[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
- [13] 刘正发, 徐哲, 张春梅. 某型压气机叶片防护层耐蚀性研究[J]. 热能动力工程, 2007, 22(5): 490-494, 576.
LIU Zhengfa, XU Zhe, ZHANG Chunmei. A study of the corrosion-resistant characteristics of the blades of a compressor and their protective coatings[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(5): 490-494, 576. (in Chinese)
- [14] 李冬, 张文, 嵇明钊, 等. 发动机导叶和涡轮叶片性能衰退的数值研究[J]. 燃气轮机技术, 2015, 28(1): 35-41, 72.
LI Dong, ZHANG Wen, JI Mingzhao, et al. Numerical study of performance deterioration of engine guide vane and turbine blade[J]. Gas Turbine Technology, 2015, 28(1): 35-41, 72. (in Chinese)
- [15] 李本威, 李冬, 李姜华, 等. 单级压气机性能衰退定量研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(7): 1588-1594.
LI Benwei, LI Dong, LI Jianghua, et al. Quantitative research on performance degradation of single-stage compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(7): 1588-1594. (in Chinese)
- [16] 任智勇, 李志鹏, 王俊琦. 湿热盐雾对涡轴发动机性能的影响分析[J]. 机械研究与应用, 2017, 30(4): 27-29.
REN Zhiyong, LI Zhipeng, WANG Junqi. Analysis on effect of hot moisture and salt spray on the performance of turboshaft engine[J]. Mechanical Research & Application, 2017, 30(4): 27-29. (in Chinese)
- [17] 骆晨, 李明, 孙志华, 等. 海洋大气环境中飞机的环境损伤和环境适应性[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 101-107.
LUO Chen, LI Ming, SUN Zhihua, et al. Environmental damage and environmental adaptability of the aircraft in marine atmosphere[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2016, 36(3): 101-107. (in Chinese)
- [18] 张亚娟, 吴敬涛, 刘海燕. 大型气候环境舱加湿系统设计的关键技术研究[J]. 结构强度研究, 2014(4): 51-53, 58.
ZHANG Yajuan, WU Jingtao, LIU Haiyan. Research on key technologies of humidification system design for large climate environment cabins[J]. Structural Strength Research, 2014(4): 51-53, 58. (in Chinese)
- [19] 马平昌, 高飞, 刘玥, 等. 大流量干蒸汽加湿器的研制[J]. 暖通空调, 2020, 50(7): 133-136.
MA Pingchang, GAO Fei, LIU Yue, et al. Development of large flow dry steam humidifiers[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50(7): 133-136. (in Chinese)
- [20] MOON A D. Characterization and capability of the turbine engine corrosion testing facility at Arnold engineering development complex[C]//Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. Atlanta, Georgia: AIAA, 2018: 1-16.
- [21] 向延华, 鲁亮, 胡宇鹏. 基于海洋大气环境的盐雾参数分析[J]. 电子技术, 2017, 46(12): 30-35.
XIANG Yanhua, LU Liang, HU Yupeng. Analysis of salt mist parameters in marine environment[J]. Electronic Technology, 2017, 46(12): 30-35. (in Chinese)
- [22] 唐毅, 宋爱民. 盐雾试验条件对试验结果的影响[J]. 微电子学, 2009, 39(2): 289-292.
TANG Yi, SONG Aimin. Effect of salt spray conditions on test results[J]. Microelectronics, 2009, 39(2): 289-292. (in Chinese)
- [23] 马平昌, 李红, 刘玥, 等. 高湿环境下盐雾气溶胶动态取样系统[J]. 仪表技术与传感器, 2021(5): 77-81.
MA Pingchang, LI Hong, LIU Yue, et al. Dynamic sampling system of salt aerosol in high humidity environment[J]. Instrument Technique and Sensor, 2021(5): 77-81. (in Chinese)
- [24] 郭明明. 抽气预处理法测定氰化物[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(9): 174-177.
GUO Mingming. Pretreatment method by gas suction for determination of cyanide[J]. Environmental Science and Management, 2006, 31(9): 174-177. (in Chinese)

(编辑: 陈越)