

高空通风活门内流场特性数值模拟和试验验证

韩金在^{1,2}, 苏 壮^{1,2}

(1. 中国航发沈阳发动机研究所, 2. 中国航空发动机集团航空发动机动力传输重点实验室: 沈阳 110015)

摘要: 为准确掌握大通风量条件下高空通风活门工作特性, 以高空通风活门为研究对象开展流场特性数值仿真分析技术研究, 对不同膜盒间隙的高空通风活门内部流场进行对比分析, 获得了不同入口质量流量条件下高空通风活门的压降特性曲线。结合滑油系统附件试验器改造, 利用小量程与大量程体积流量计组合形式实现纯空气体流量的测量, 开展了高空通风活门压降试验, 并将试验结果与数值仿真分析结果进行对比验证。结果表明: 仿真分析结果与试验结果吻合较好, 流场特性仿真分析方法可用于高空通风活门压降特性预测, 现有高空通风活门在不同膜盒间隙下内流场特性相似, 其压降主要集中于膜盒间隙处, 改善膜盒间隙处结构, 可有效降低压降。

关键词: 通风活门; 膜盒间隙; 通风系统; 润滑系统; 航空发动机

中图分类号: V233.4

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2024.03.015

Numerical Simulation and Experimental Verification of Flow Field Characteristics in High-altitude Ventilation Valve

HAN Jin-zai^{1,2}, SU Zhuang^{1,2}

(1. AECC Shenyang Engine Research Institute,

2. AECC Key Laboratory of Power Transmission Technology on Aero-engine: Shenyang 110015, China)

Abstract: In order to accurately grasp the characteristics of high-altitude ventilation valves under high-flow ventilation conditions, the numerical simulations and analyses were conducted on the flow field characteristics of a high-altitude ventilation valve. Comparative analyses were conducted on the internal flow fields of the ventilation valve with different bellow clearances, and the pressure drop characteristic curves of the valve under different inlet mass flow conditions were obtained. Leveraging the opportunity of renovating the lubricating oil system accessory tester, a combination of small-range and large-range volume flowmeters was used to measure pure air volume flow. The pressure drop tests of the valve were conducted, and numerical results were compared and verified with test results. The results show that the numerical results are in good agreement with the test results, the simulation analysis method can be used to predict the pressure drop characteristics of high-altitude ventilation valves. The valve has similar internal flow field characteristics under different bellow clearances, the pressure drop mainly occurred near the bellow clearance area, and the structural improvement near the bellow clearance can effectively reduce the pressure drop.

Key words: ventilation valve; bellow clearance; ventilation system; lubrication system; aeroengine

0 引言

自由通风系统是航空发动机润滑系统^[1-2]普遍采用的通风形式, 当发动机处于高空飞行状态时, 润滑系统中滑油泵进口压力随大气压力降低而降低。为满足高空条件下滑油泵进口压力需求^[3-4], 确保滑油供给, 进而保证润滑系统在飞行包线内正常工作, 通常在通风系统出口安装高空通风活门, 其工作特性对发

动机通风系统至关重要。

高空通风活门工作特性受通风系统通风量^[5-6]影响, 引起航空发动机通风系统工作特性变化, 掌握其阻力特性对通风系统的设计具有指导意义。Glahn 等^[7-8]通过计算流体力学(CFD)方法预测滑油系统部件内部油气两相流流动, 用于指导轴承腔通风设计; Eastwick 等^[9]通风系统中通风器进行了数值模拟, 并给出了通风器内流场速度分布; Willenborg 等^[10]采用

收稿日期: 2021-08-21 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 韩金在(1987), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 韩金在, 苏壮. 高空通风活门内流场特性数值模拟和试验验证[J]. 航空发动机, 2024, 50(3): 103-106. HAN Jinzai, SU Zhuang. Numerical simulation and experimental verification of flow field characteristics in high-altitude ventilation valve[J]. Aeroengine, 2024, 50(3): 103-106.

试验的方法对通风系统中装有海绵状金属基体的通风器性能进行了研究,给出了通风量、转速等对压力损失的影响规律;李国权^[11]深入研究了高空通风活门膜盒的工作过程,并推导了膜盒封焊压力斜线的理论方程式;谷俊^[12]总结归纳了高空通风活门完整的空中工作特性以及与结构参数的关联性。虽然中国对高空通风活门特性的研究很少,但可借鉴其他活门的研究方法。李嘉等^[13]通过数值模拟对不同出口节流开度的等压差活门模型进行了对比研究;相晓伟等^[14]对调节阀进行了3维流场特性的数值模拟。在航空发动机润滑系统设计中,通风系统通风量高达30 g/s,远远超过现有通风量水平(10 g/s以下),高空通风活门阻力特性不明,为保持稳定的封严压差与防止通风系统腔压超限,结合数值模拟结果与膜盒间隙变化,对高空通风活门开展内流场特性研究。

本文采用基于商业软件的数值仿真方法^[15-16],对高空通风活门模型进行内流场特性研究及针对不同入口流量和不同膜盒间隙下的压降变化进行分析,并结合试验方法开展高空通风活门阻力特性验证,为通风系统和高空通风活门设计提供参考^[17]。

1 高空通风活门结构

发动机高空通风活门结构如图1所示。高空通风活门由膜盒活门和弹簧活门组成。其中膜盒活门是由膜盒壳体、波纹管、膜盒盖组成的充满氦气的封闭腔;弹簧活门由活门座、弹簧及活门组成。当大气压力降低时,作用于膜盒盖的压力降低,膜盒盖移动,膜盒间隙减少,直至关闭通风导管,此时通风系统腔内压力由弹簧活门控制。本文以膜盒活门打开状态下的高空通风活门为研究对象,此时弹簧活门处于关闭状态。

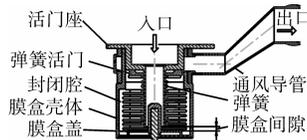


图1 发动机高空通风活门结构

2 物理模型

真实的高空通风活门内部结构复杂,加之弹簧活门及相关安装结构对内部稳态流场影响较小,为简化模型,忽略弹簧活门结构。该计算域为由活门座、膜盒盖、膜盒壳体、通风导管组成的连通区域。膜盒壳体计算域与其他零件连接截面采用interface,保证整体计算域内均为六面体网格^[18]。关键的壁面附近采用边界层网格,保证壁面 y^+ 在合理范围内。网格总数约为

200万的方案的求解结果具有网格的独立性。计算域网格划分如图2所示。

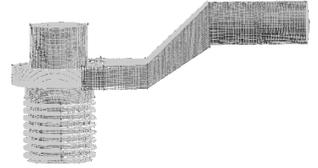


图2 计算域网格划分

3 数值方法

3.1 控制方程

连续性方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = S_m \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; \mathbf{u} 为速度; S_m 为质量源项。

动量方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F} \quad (2)$$

式中: p 为静压; \mathbf{F} 为外部体积力矢量; $\boldsymbol{\tau}$ 为应力张量。

3.2 边界条件

模型进口采用质量流量入口边界条件,入口流动方向垂直于进口面,出口采用压力出口边界条件,压力为标准大气压力(101325 Pa),湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型,壁面给定无滑移边界条件。计算过程进行了如下假设:流体为不可压缩、牛顿流体;介质选择纯空气;内部流体没有热传导现象等^[19]。

4 计算结果及分析

4.1 膜盒间隙为4 mm下内流场仿真分析

膜盒间隙为4 mm、入口质量流量为10 g/s时的压力分布、速度矢量分布如图3、4所示。

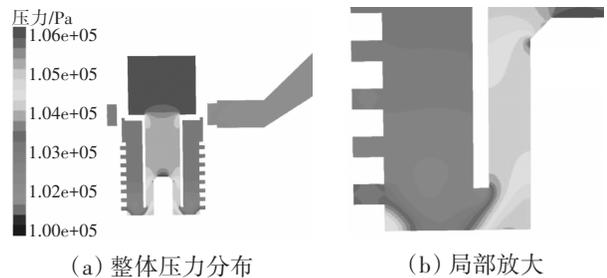


图3 压力分布(膜盒间隙为4 mm、入口质量流量为10 g/s)

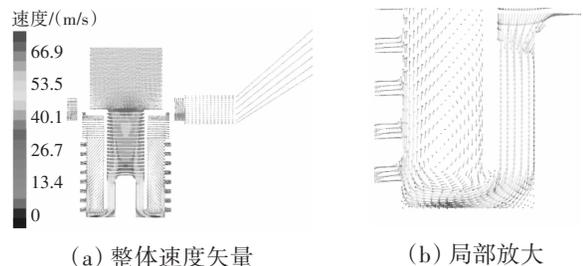


图4 速度矢量分布(膜盒间隙为4 mm、入口质量流量为10 g/s)

从图3中可见,高空通风活门进口至出口压力逐渐降低,在膜盒间隙处的压力梯度变化较大,其压降

主要集中在该处。从图 4 中可见,膜盒间隙处由于截面面积减小,导致速度骤增,其最大速度位置为膜盒间隙处,且膜盒间隙处气体反向流动,存在漩涡流动,是能量损失集中的地方,漩涡中心的压力明显小于其他部分。

高空通风活门压降值取计算域入口与出口静压之差,膜盒间隙为 4 mm 时压降-入口质量流量曲线如图 5 所示。

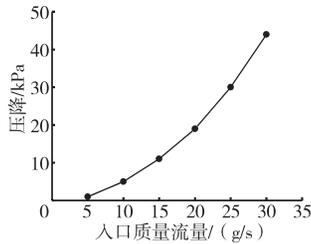


图 5 压降-入口质量流量曲线 (膜盒间隙为 4 mm)

从图中可见,在膜盒间隙为 4 mm 时,随入口质量流量增加,高空通风活门压降近似呈抛物线增加。当入口质量流量从 10 g/s 增加至 30 g/s 时,其压降增长约 8 倍,随着入口质量流量增加,高空通风活门膜盒间隙处流速增加,加之气体通过膜盒间隙后撞击引起速度变化大,导致压降大,改善此处结构可有效减少压降。

4.2 膜盒间隙为 2 mm 下内流场仿真分析

膜盒活门关闭过程中,膜盒间隙逐渐减小,选取膜盒间隙为 2 mm,对高空通风活门内流场作进一步分析。膜盒间隙为 2 mm、入口质量流量为 10 g/s 时的压力分布、速度矢量分布分别如图 6、7 所示。

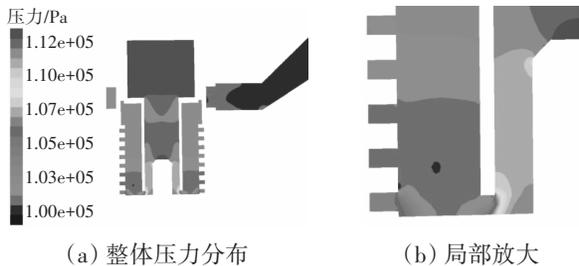


图 6 压力分布 (膜盒间隙为 2 mm、入口质量流量为 10 g/s)

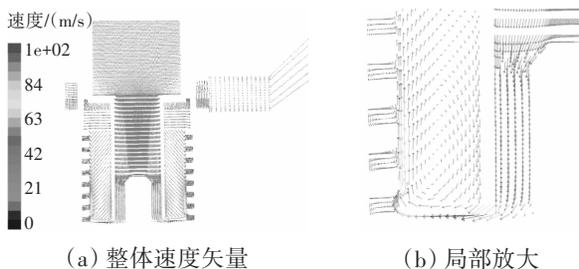


图 7 速度矢量分布 (膜盒间隙为 2 mm、入口质量流量为 10 g/s)

从图中可见,随着膜盒间隙减小,高空通风活门在相同入口质量流量下内流场流动性能大致相似,速度压力分布趋势一致,但是流动状态有细微变化,膜盒间隙处漩涡流动越来越大,尺寸也随膜盒间隙减少

而增加,气体通过膜盒间隙后撞击引起速度变化增大,压降进一步增大。

膜盒间隙为 2 mm 时,压降-入口质量流量曲线如图 8 所示。从图中可见,其压降随入口质量流量增加而增加,且随着膜盒间隙减少,压降进一步增加,当入口质量流量从 10 g/s 增加至 30 g/s 时,其压降增长约 9.6 倍。对比图 5 与图 8,随着膜盒间隙减少 50%,入口质量流量为 10 g/s 时,高空通风活门压降增加约 2 倍。

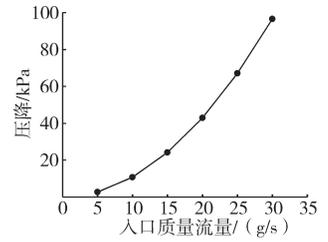


图 8 压降-入口质量流量曲线 (膜盒间隙为 2 mm)

5 试验验证

5.1 试验系统

为满足试验系统要求,对滑油系统附件试验器进行了部分改造,试验原理如图 9 所示。该系统包含双入口空气系统,利用小量程与大量程体积流量计组合形式实现纯空气体积分流量的测量,高空通风活门试验件膜盒间隙为 4 mm。

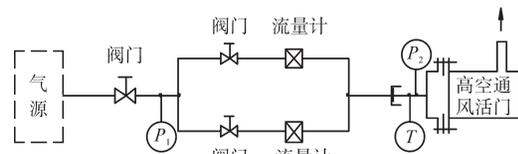


图 9 试验原理

将气体体积流量换算为所对应的质量流量

$$m = \frac{P_2 \cdot (Q_1 + Q_2)}{RT} \quad (3)$$

式中: m 为换算质量流量; Q_1 、 Q_2 分别为小量程、大量程体积流量计测量纯空气的体积流量; R 为空气气体常数; P_2 为进入高空通风活门的气源压力; T 为进入高空通风活门的气源温度。

5.2 数据对比

为验证所用的数值仿真计算方法的准确性,对高空通风活门特性仿真数据与试验数据进行了对比,如图 10 所示。其中试验数据

压降选取为压力 P_2 与外界大气压力差值。从图中可见,计算结果与试验结果吻合较好,应用此数值仿真计算方法能够较好地模拟高空通风活门压降特性。

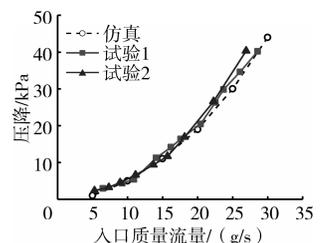


图 10 试验数据与仿真数据对比

6 结论

(1) 高空通风活门压降随入口质量流量增加而增加,膜盒间隙处由于截面面积减小,导致速度骤增,加之膜盒间隙处气体反向流动,导致压力梯度变化较大,压降主要集中在该区域。

(2) 不同膜盒间隙下高空通风活门内流场特性相似,随着高空通风活门膜盒间隙减小,其形成的旋涡流动变大,尺寸也随之增加,气体通过膜盒间隙后引起的压降进一步增大。

(3) 改善高空通风活门膜盒间隙处结构,可有效减小压降。

本文的数值模拟方法及结果可为高空通风活门结构设计提供技术支持。

参考文献:

- [1] 林基恕. 航空燃气涡轮发动机机械系统设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2005: 95-116.
LIN Jishu. Mechanic system design of aero-engine[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005: 95-116. (in Chinese)
- [2] 李国权. 航空发动机滑油系统的现状及未来发展[J]. 航空发动机, 2011, 37(6): 49-52.
LI Guoquan. Analysis of altitude performance of aeroengine oil pump[J]. Aeroengine, 2011, 37(6): 49-52. (in Chinese)
- [3] 李国权. 航空发动机滑油泵高空性分析[J]. 航空发动机, 2008, 34(1): 46-47.
LI Guoquan. Present and future of aeroengine oil system[J]. Aeroengine, 2008, 34(1): 46-47. (in Chinese)
- [4] 王灵峰, 郭迎清, 张效伟. 某型涡扇发动机润滑系统高空适应性改进设计[J]. 机械设计与制造, 2005(12): 1-3.
WANG Lingfeng, GUO Yingqing, ZHANG Xiaowei. Improved design of high altitude adaptability on a turbo-fan aeroengine's lubricating system[J]. Machinery Design & Manufacture, 2005 (12): 1-3. (in Chinese)
- [5] 田文正, 李国权, 杜红军. 某型发动机滑油通风节流嘴流量-阻力特性试验研究[J]. 航空发动机, 2010, 36(5): 56-58.
TIAN Wenzheng, LI Guoquan, DU Hongjun. Experimental study of choke flow-drag characteristics for an aeroengine lubrication throttling vent system[J]. Aeroengine, 2010, 36(5): 56-58. (in Chinese)
- [6] 郁丽, 李国权. 节流通风的航空发动机轴承腔腔压计算方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(11): 2616-2621.
YU Li, LI Guoquan. Calculation method of bearing chamber pressure for aeroengine throttling vent lubrication system[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(11): 2616-2621. (in Chinese)
- [7] Glahn A, Blair M F, Allard K L, et al. Disintegration of oil films emerging from radial holes in a rotating cylinder[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125: 1011-1120.
- [8] Glahn A, Kurreck M, Willmann M, et al. Feasibility study on oil droplet flow investigations inside aeroengine bearing chambers-PPDA techniques in combination with numerical approaches[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1996, 118: 749-755.
- [9] Eastwick C N, Simmons K, Wang Y, et al. Study of aero-engine oil-air separators[J]. Journal of Power and Energy, 2006, 220(7): 707-717.
- [10] Willenborg K, Klingsporn M, Tebby S, et al. Experimental Analysis of Air/Oil Separator Performance[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(6): 062503.
- [11] 李国权. 论航空发动机高空膜盒的封焊斜线[J]. 航空发动机, 2004, 30(1): 37-39.
LI Guoquan. Linear characteristic of welding pressure to the altitude bellow for aeroengine[J]. Aeroengine, 2004, 30(1): 37-39. (in Chinese)
- [12] 谷俊. 航空发动机滑油系统高空通风活门空中特性研究[J]. 航空科学技术, 2013(1): 45-48.
GU Jun. Study of ventilation valve for aero-engine lubrication system in flight performance[J]. Aeronautical Science & Technology, 2013(1): 45-48. (in Chinese)
- [13] 李嘉, 李华聪, 符江锋. U型节流槽等压差活门内流场特性[J]. 航空动力学报, 2016, 31(6): 1469-1476.
LI Jia, LI Huacong, FU Jiangfeng. Flow field characteristics of the U-shaped throttling constant differential pressure valve[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(6): 1469-1476. (in Chinese)
- [14] 相晓伟, 毛靖儒, 孙弼. 汽轮机调节阀全工况三维流场特性的数值研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(3): 289-293.
XIANG Xiaowei, MAO Jingru, SUN Bi. Numerical investigation of flow characteristic of control valve of steam turbine in entire range of operating mode[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(3): 289-293. (in Chinese)
- [15] 韩金在, 陈聪慧, 徐让书. 超高转速离心通风机性能仿真分析[J]. 航空动力学报, 2016, 31(3): 685-691.
HAN Jinzai, CHEN Conghui, XU Rangshu. Simulation analysis on performance of a high speed centrifugal oil-air separator[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(3): 685-691. (in Chinese)
- [16] 赵蕾. 阀芯运动过程液压滑阀内部流场的CFD计算[D]. 太原: 太原理工大学, 2008.
ZHAO Lei. CFD study for the flow field inside the hydraulic spool valve considering of the movement of valve element[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [17] 李宏新, 李国权. 航空发动机动力传输系统的技术发展思考[J]. 航空发动机, 2013, 39(2): 1-5.
LI Hongxin, LI Guoquan. Technology development thought on aeroengine power transmission system[J]. Aeroengine, 2013, 39(2): 1-5. (in Chinese)
- [18] 徐让书, 邵长浩, 牛玲. 结构因素对离心通风机性能影响的数值研究[J]. 航空发动机, 2014, 40(6): 18-23.
XU Rangshu, SHAO Chanhao, NIU Ling. Numerical study on efficiency of centrifugal breather's performance of structural factors [J]. Aeroengine, 2014, 40(6): 18-23. (in Chinese)
- [19] 徐让书, 宗庆贺, 刘立博. 湍流弥散对轴心通风机油气分离过程的影响[J]. 航空发动机, 2011, 37(4): 5-9.
XU Rangshu, ZONG Qinghe, LIU Libo. Effect of turbulent dispersion on oil/gas separation process in axial ventilator[J]. Aeroengine, 2011, 37(4): 5-9. (in Chinese)

(编辑: 程海)