

飞机发动机室内开车尾气排放引射 喷淋降温仿真分析

李冬梅, 任战鹏, 马建军

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 将气候实验室飞机发动机开车时产生的高温高噪声尾气实时顺利排出室外, 保持试验所需的稳定环境场, 避免排气不畅或可能的高温尾气回流对试验及试验设施产生破坏, 保证试验安全可靠进行。

方法 设计一套发动机开车尾气排放系统, 对关键的气体引流喷淋降温进行 CFD 数值模拟。**结果** 喷流环孔径、喷射角度及数量分布均直接影响引射喷淋雾化效果。**结论** 获得可以满足发动机开车尾气排放塔出口温度分布的喷淋环参数, 指导引流管喷淋环的详细设计。

关键词: 气候实验室; 飞机发动机开车; 尾气排放; 喷淋降温; 仿真计算

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.12.017

中图分类号: V216.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)12-0109-06

Simulation Analysis of Exhaust Drainage and Ejector Spray Cooling of Aircraft Engine Start

LI Dong-mei, REN Zhan-peng, MA Jian-jun

(Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The work aims to discharge the high-temperature and high-noise exhaust gas generated by the climatic environment test facility during the aircraft engine startup test smoothly in real time, so as to maintain the stability of the test environment, prevent poor exhaust or high-temperature exhaust back-flow from damaging the test and facilities and ensure the safety and reliability of the test. A set of start-up exhaust drainage spray cooling was designed to carry out, CFD numerical simulation on key gas ejector spray cooling. The jet ring aperture, spray angle and distribution directly affected the effect of spray atomisation and cooling. The parameters of spray ring that can meet the temperature distribution at the outlet of exhaust emission tower during engine start are obtained, which can guide the detailed design of spray ring of drain pipe.

KEY WORDS: climatic environment test facility; aircraft engine start; exhaust emissions; spray cooling; simulation calculation

航空发动机作为飞机的核心动力源, 其性能优劣直接影响着飞机的使用安全。其中, 外界自然环境对

发动机的工作状态影响非常明显, 在高寒、湿热、风吹雨/雪、沙尘等极端气候条件下工作时, 会出现不

收稿日期: 2020-04-07; 修订日期: 2020-05-20

Received: 2020-04-07; Revised: 2020-05-20

基金项目: 中航工业集团创新项目 (2013F62302)

Fund: AVIC Group's Innovative Project (2013F62302)

作者简介: 李冬梅 (1969—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞机气候环境试验验证技术研究。

Biography: LI Dong-mei(1969—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: the aircraft climate environment test verification technology research.

能正常启动、进气道结冰、突然停车、叶片磨损、进气通道堵塞等故障,严重影响其正常运行,甚至危害飞行安全。为此需要对飞机发动机的气候环境适应性进行研究和验证。

发动机面临的典型气候环境有高温、低温、湿热、降雨、结冰等,要求在这些气候条件下发动机必须能正常启动,持续正常地运行,并与其他系统协同工作。另外飞机在较低温度下存放后的深冷启动、多次重复启动也是考核发动机性能的一项重要指标。

通常,发动机制造商在发动机研制过程中会开展大量的环境试验,考核发动机在遭遇恶劣气候环境时的功能性能及其可靠性。由于发动机台架试验是依靠地面供电系统、供油系统对其进行供电和供油,发动机本身不带载荷,不能充分评估发动机装机状态下完整的系统性能,存在一定局限性。因此有必要针对发动机装机状态进行极端气候条件下的功能性能测试,进而也能更为全面地评价飞机对极端气候条件的适应能力。

美国、韩国等国家早已实现在实验室中模拟各种气候环境因素对发动机性能指标进行验证(如图 1 所示),使其掌握了大量的发动机受环境因素影响的实验数据,为飞机的优化设计以及安全飞行等提供了有利依据。我国自主设计建设的能够模拟多种自然环境的飞机气候实验室将全面投入使用,但发动机开车实验环境如何实现还有待进一步研究。发动机开车高温尾气如何顺利安全排除实验室,便是其中的关键技术之一。



图 1 发动机尾气排放系统在韩国 ADD 环境室内的布置
Fig.1 Layout of the engine exhaust system in the ADD environment room in South Korea

飞机在实验室内进行整机平台地面开车试验时,发动机进气道将吸入周围足够量的空气和燃烧室内的燃油混合并燃烧,产生推力。同时被消耗的空气经过燃烧后会变成高温高噪音多油的有害气体,温度一般在 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。涡轮喷气发动机在加力工作时,尾气温度甚至可达 $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。如果不及时排出,将会对试验环境场、试验件造成损坏,甚至严重威胁到实验室工作人员的生命安全。因此,有必要对发动机开车高温尾气排放进行合理的引流降温设计,保证试验安

全有效地进行。

1 发动机开车尾气排放系统设计

设计发动机开车尾气排放系统的主要目的:降低尾气排放温度,减少尾气排放对试验环境状态的影响,维持发动机开车试验的安全进行;降低排气噪声,保证排放到环境室外的废气满足场界噪声相关标准要求。该系统主要包含两部分功能:发动机开车尾气的引流降温和尾气的降噪处理。

1.1 性能设计要求

气候实验室内飞机发动机开车尾气排放需满足下述要求:1) 密闭的进排气结构气动性能优良、排气阻力合适;2) 噪声排放指标满足国家和地方标准;3) 排气出口温度合适;4) 室内气流速度不会过大、发动机推力测量所受影响不大;5) 适应不同的机型。

1.2 参数设计要求

为了降低发动机开车尾气对室外环境的影响,发动机尾气排放系统的参数应满足:废气排放量 $\leq 200\text{ kg/s}$; 实验室场界噪音 $\leq 75\text{ dB(A)}$; 排放通道出口温度不高于 $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.3 尾气排放系统设计

发动机开车尾气排放系统如图 2 所示。飞机气候试验要求在纯密闭环境室内进行,故以通道的形式将发动机开车尾气引出环境室。排气通道主要由三部分组成:初始调整段——该段是用来根据发动机大小,调整引流管道入口处尺寸;引流管道——利用该段将尾气引流至排放塔,并实施对高温尾气的一次降温;尾气排放塔——其中设置有降温、降噪装置,对尾气进行再次降温和吸声处理后,排出实验室外。

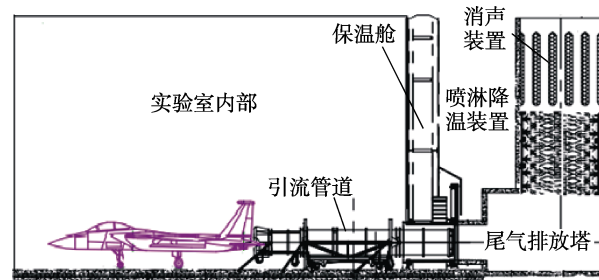


图 2 发动机尾气排放系统
Fig.2 Engine exhaust system

在发动机开车试验前,根据受试飞机发动机的大小以及试验工况,选择合适的尾气排放系统的初始调整段,将发动机尾喷管与尾气排放管道“对接”。试验过程中,高温尾气经过初始调整段和引流管道进入尾气排放塔。其中,引流管道及尾气排放塔中都布置有降温装置,对尾气实施降温,保证废气排放塔出口

温度满足环保要求。同时在排放塔出口处还安装有消声装置, 对开车尾气进行降噪处理, 以满足实验室场界噪音要求。

1.3.1 引流管道及其降温设计

引流管道用于调整发动机尾喷管到尾气排放塔之间的连通, 将尾气引流至排放塔。此段温度较高, 如果不进行降温处理, 将会成为环境室内一个热负荷, 对试验环境场产生影响, 且给实验室带来安全隐患。管道直径为 3 m, 内部沿管壁设置喷水环, 利用水蒸发的潜热, 将尾气初步降温至 100~150 °C, 并防止尾气残留燃料在排气管道中产生爆震。

如图 3 所示, 引流管道分为活动段和固定段。活动段布置在环境室内, 根据试验对象可进行更换。固定段布置在保温舱内, 用于连接尾气排放塔。固定段内部设置隔离门, 隔离门在舱室温度调节阶段处于关闭状态, 减小环境室向外的热量损失。在发动机需要开启进行试验时, 打开隔离门, 使得排气系统处于工作状态。固定段末端为开孔段, 发动机排气通过开孔段的小孔进入排气塔, 排出室外。开孔段开孔率在 15%~30%之间, 通过调节开孔段末端的排气调节机构来调节排气筒的通流面积, 从而使其可以适应不同试验对象的试验需求。

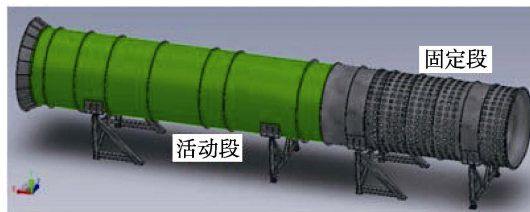


图 3 引流管道
Fig.3 Drain pipe

在引流管道固定段周向设置喷淋系统, 对开车尾气进行一次降温处理。发动机工作时, 打开系统阀门, 向排气筒开孔排气区域喷水。喷入水雾一方面温度较低, 可以带走高温排气的热量; 另一方面水雾发生相变的过程中可以吸收大量的废气预热, 高温尾气温度大大降低, 最终可以降低到排气塔及消音装置可以承受的温度范围内。系统包括 4 组喷头, 每组可布置 4 个喷嘴, 喷嘴方向指向排气方向。根据尾气排放量的不同调节喷嘴喷水量, 总的最大喷水量为 25 kg/s。

2 仿真分析

2.1 模型建立

依据引流管道建立的圆柱仿真模型如图 4 所示。直径 (3 m) 与引流管道相同, 一端为进口, 一端为出口, 在距离进口一端布置喷水环。由于在计算过程中存在多种喷射方式, 考虑到喷雾液滴的蒸发距离, 圆柱模型的总长度分别设置为 6.5、10、12 m。在对模型

进行 ICEM 划分网格时, 考虑到计算时间及计算效果, 模型的网格数量在 100 万~150 万之间。



图 4 圆柱模型
Fig.4 Cylindrical model

2.2 计算边界条件

2.2.1 连续项设置

连续相设置主要是计算一些基本设置, 包括以下几个方面: 开启能量项; 采用 κ - ε 可视化标准湍流方程; 基于压力计算 (Pressure-based); 计算方法采用压力-速度耦合计算, SIMPLEC 二阶迎风格式。监控计算域内的离散相及出口质量平均温度, 当这两项达到平衡时, 即为计算结束。

2.2.2 空气物性参数设置

假设空气的进口质量流量为 200 kg/s, 温度为 480 °C, 要求经过喷水冷却过程之后, 出口温度为 150 °C。由于空气的进出口温差很大, 达到 330 °C, 故在 FLUENT 计算过程中, 空气的物性不能都使用软件自带的常数物性。对空气和水滴之间传热影响较大的导热率、动力黏度、定压比热等, 需要查在温度变化区间的属性变化, 拟合出关于温度变化的物性参数多项式, 输入 FLUENT 进行计算。

导热率 (W/(m·K)):

$$\lambda = -1.64 \times 10^{-8} T^2 + 7.74172 \times 10^{-5} T + 0.0046880517 \quad (1)$$

动力黏度 (Pa·s):

$$\eta = 5.19 \times 10^{-8} T + 4.5922 \times 10^{-6} \quad (2)$$

定压比热 (J/(kg·K)):

$$C_p = -2.2 \times 10^{-9} T^4 + 1.7560 \times 10^{-6} T^3 - 6.14762 \times 10^{-5} T^2 - 0.2118322796 T + 1045.2964185191 \quad (3)$$

2.2.3 空气进出口条件设置

空气进口采用质量入口边界条件: 质量流量为 200 kg/s, 湍流度为 2.3, 水力直径为 3 m, 入口温度为 875 K。排气出口采用压力出口, 出口处的压力设置为大气压, 出口温度设置为 453 K。

2.2.4 喷射水总流量

采用简单的焓平衡方法进行喷水量计算, 假定液雾和空气掺混均匀, 换热充分, 完全汽化, 忽略冷量损失。

$$\dot{m}_L \times H + \dot{m}_L \times C_{pL} (100 - T_L) = \dot{m}_q \times C_{pq} (T_{in} - T_{out}) \quad (4)$$

其中: $\dot{m}_L \times H$ 为喷射水的气化潜热; $\dot{m}_L \times C_{pL} (100 - T_L)$ 为喷射水温度变化的换热量; $\dot{m}_q \times C_{pq} (T_{in} - T_{out})$ 为空气温度变化的换热量。

代入数据计算可得: $\dot{m}_L = 21.395$ kg/s, 此处取

$$\dot{m}_L = 25 \text{ kg/s.}$$

2.2.5 喷射水的物性

在模型计算过程中,喷射水的初始温度为 293 K, FLUENT 默认水的蒸发温度为 284 K, 沸腾温度为 373 K。喷射水的温度变化范围较大, 水在该温度范围内表面张力和动力黏度变化较大, 且表面张力和动力黏度对喷射水的雾化情况有直接影响, 进而影响到换热效果。故喷射水的这两项物性不能采用 FLUENT 的默认常数, 仍需查出温度变化区间的物性, 拟合出温度的物性参数计算公式。

动力黏度 (Pa·s):

$$\eta = 3 \times 10^{-11} T^4 - 9.4 \times 10^{-9} T^3 + 1.009 63 \times 10^{-6} T^2 - 5.586 649 \times 10^{-5} T + 0.001 783 867 20 \quad (5)$$

表面张力 (N/m):

$$\sigma = 2 \times 10^{-10} T^3 - 2.457 \times 10^{-6} T^2 - 1.452121 \times 10^{-4} T + 0.075 600 008 8 \quad (6)$$

3 计算结果

利用 DPM 模型进行喷雾计算, 每 50 步喷射一次粒子, 采用非稳态颗粒计算模型。考虑颗粒碰撞破碎, 采用 WAVE 波动模型, 曳力定律采用 Dynamic-drag。颗粒模型采用 Droplet 模型, 雾化模型采用 Plain-orifice-atomizer (平口雾化模型), 每次喷射粒子数为 4 个, 喷射材质为 Water-liquid, 蒸发项为 H₂O。

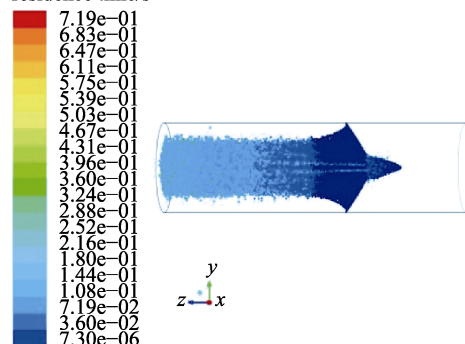
针对模型进行了包括顺喷、逆喷、16 个喷射点、36 个喷射点等多次不同喷射方式的计算。每次喷射粒子为 4 个, 总喷射水流量为 25 kg/s, 喷射水的初始温度为 285 K。

模型 1: 设置 16 个喷射点, 与中轴线夹角为 45°, 逆喷, 喷射点距入口 4 m, 喷嘴直径为 6.91 mm, 每个喷射点的流量为 1.34 kg/s, 喷嘴长度为 25 mm。

由图 5 可见, 粒子在离开喷出孔后, 首先向进口移动一段距离, 之后发生碰撞。然后粒子随来流空气向出口方向移动, 最终从出口逸出。粒子直径较大, 分布在 $4.39 \times 10^{-5} \sim 0.0336 \text{ m}$ 之间, 换热不够充分, 在计算区域内水滴不能完全蒸发。中轴线附近温度较低, 沿径向温度逐渐升高, 换热效果逐渐变差。在圆柱的中心区域温度较低, 壁面温度为 753 K, 仍为高温空气, 整个出口截面的平均温度为 660 K。

模型 2: 设置 36 个喷射点, 与中轴线夹角为 30°, 逆喷, 此时每个喷射点水流量为 0.694 kg/s, 每个喷孔直径为 4.975 mm, 喷嘴长度为 18 mm。图 6 显示, 粒子在离开喷出孔后, 没有发生碰撞, 在碰撞之前便随来流空气向出口方向移动, 最终从出口逸出。粒子直径分布在 $2.17 \times 10^{-5} \sim 0.0044 \text{ m}$ 之间。在采用更小的逆喷角度和更多的喷射点之后, 出口截面的温度分布有所改善, 其质量平均温度降低至 628 K, 但是仍不能满足温度要求。由此可以看出, 增加喷射点后, 增强了雾化效果, 进而使水滴与空气之间的换热更加充分。

Particle traces colored by particle residence time/s



Contours of static temperature/K

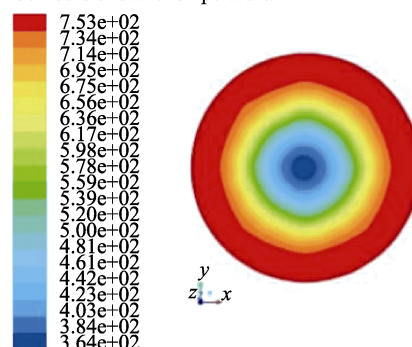
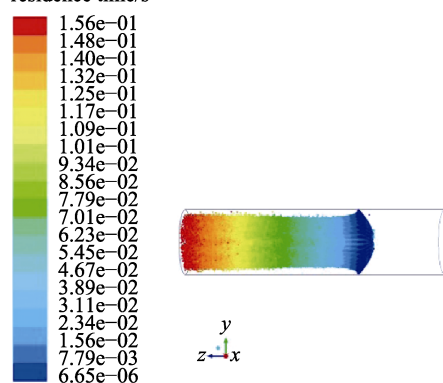


图 5 模型 1 粒子与出口截面温度分布
Fig.5 Particle and temperature distribution of outlet cross section in model 1

Particle traces colored by particle residence time/s



Contours of static temperature/K

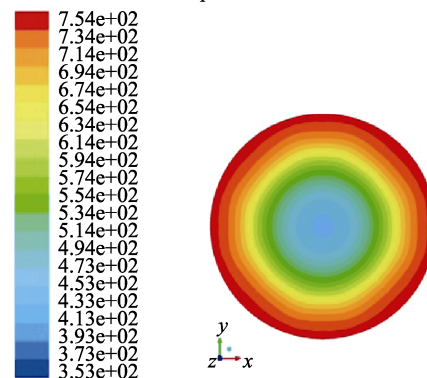


图 6 模型 2 粒子与出口截面温度分布
Fig.6 Particle and temperature distribution of outlet cross section in model 2

模型 3: 设置 36 个喷射点, 喷射方向为逆喷, 即对着来流气体喷射, 与中轴线夹角为 30° , 喷射点距离入口 4 m, 每个喷射点水流量为 0.694 kg/s , 喷射孔径为 1 mm, 喷嘴长度为 2 mm。由图 7 可以看出, 喷射粒子与来流空气产生碰撞, 粒子与空气之间的相对速度较大, 雾化效果良好, 水滴直径分布在 $4.7 \times 10^{-7} \sim 5.4 \times 10^{-4} \text{ m}$ 之间。粒子几乎充满整个圆柱截面, 换热十分充分, 出口截面质量平均温度下降迅速。温度分布由中心到壁面逐渐上升, 中心处温度最低约为 399 K, 而壁面处温度最高约为 501 K。这是由于喷射点设置在壁面上, 而壁面处由于液滴尺寸大, 其换热效果不是很好, 反而在喷出一段距离后, 液滴发生破碎, 液滴的数量增加, 而直径变小, 换热更加充分, 温度降低更为明显。综合出口截面的温度质量平均, 在该计算条件及模型下, 出口处质量平均温度可降到 453 K。

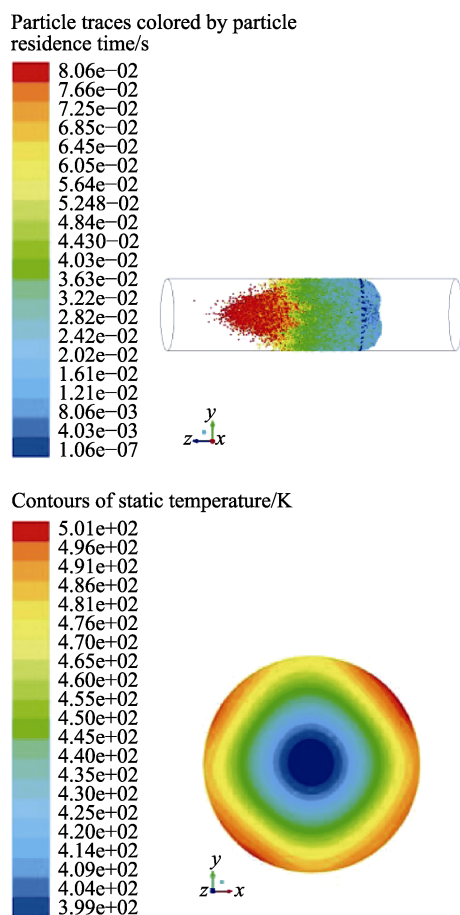


图 7 模型 3 粒子与出口截面温度分布

Fig.7 Particle and temperature distribution of outlet cross section in model 3

4 结论

计算过程中, 对圆柱模型进行了不同喷射条件的尝试计算, 得出如下结论。

1) 影响发动机开车排气出口温度的主要因素是

喷淋的雾化效果。雾化效果越好, 水滴与高温空气之间的换热就越充分, 水滴能够及时地完全蒸发, 使高温空气降温迅速。

2) 供水压力相同的情况下, 增加喷射点个数、减小喷孔直径, 均有利于喷射水滴的雾化。

3) 对比 45° 逆喷和 30° 逆喷发现, 30° 逆喷的雾化效果更好, 换热更加充分。说明逆喷喷射角度越小, 气液速度差越大, 越有利于水滴的雾化, 有利于水滴和高温空气之间的换热。

最终探索出一种能够满足发动机开车排气出口温度分布以及系统压降的喷淋方式。将喷水环布置在圆柱通道与方形通道连接处, 采用 30° 逆喷方式, 喷孔直径为 1 mm。在此喷射条件下, 出口截面的温度分布可达到要求, 稳定在 453 K 以下, 进出口压降为 1.4 kPa, 满足设计要求。该计算结果也可直接应用于尾气排放塔二次喷淋降温喷水环的设计。

参考文献:

- [1] 王敏芹, 郭博志. 民用飞机事故/事故征候统计与分析手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2015.
WANG Min-qin, GUO Bo-zhi. Civil Aircraft and Incident Statistics Analysis Manual[M]. Beijing: Aviation Industry Publishing House, 2015.
- [2] 宋兆泓. 航空发动机典型故障分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1993.
SONG Zhao-hong. Analysis of Typical Failures of Aero-engines[M]. Beijing: Beihang University Book Concern, 1993.
- [3] 唐虎, 李喜明. 飞机气候试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 60-65.
TANG Hu, LI Xi-ming. Aircraft Climate Test[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1): 60-65.
- [4] GARY M E, LEE J H, JEFFREY C L. Design and Operation of the ADD Environmental Test Facility[J]. International Congress of The Aeronautical Sciences 2008(26): 1-10.
- [5] NIELSEN P V. Computational Fluid Dynamics and Room Air Movement[J]. Indoor Air, 2004, 14(S7): 134-143.
- [6] DRAKE C W. Environmental Test Capabilities of the Air Force Mckinley Climatic Laboratory[C]// AIAA 23rd Aerospace Sciences Meeting. Reno, Nevada, 1985.
- [7] AD-A201 710, Flight Testing under Extreme Climatic Conditions[S].
- [8] PELLICANO P, DUMONT C, SMITH T, et al. Propeller Icing Tunnel Test on a Full Scale Turboprop Engine[R]. Climatic Testing of the C-5A, AD/A 045237, 1973.
- [9] FORDC A J. Environmental Test of the F-15 in the Air Force Climatic Laboratory[R]. Society of Flight Test Engineers Sixth Annual Symposium Proceedings, 1975: 198-206.
- [10] HENDRICKSON C. Flight Test under Extreme Climatic

- Condition[R]. AD/A 201710, 1988.
- [11] MIL-STD-810F, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests[S].
- [12] FLEMMING J R, ALLDRIGE P, DOEPPNER R. Artificial Icing Tests of The S-92A Helicopter in the McKinley Climatic Laboratory[R]. AIAA2004-737, 2004.
- [13] 任战鹏, 李冬梅, 马建军. 气候环境实验室发动机开车试验空气补偿系统与尾气排放系统设计[J]. 结构强度研究, 2016(1): 50-54.
- REN Zhan-peng, LI Dong-mei, MA Jian-jun. Design of Air Compensation System and Exhaust Emission System for Engine Starting Test in Climate Environment Test Facility[J]. Research on the Structural Strength Research, 2016 (1): 50-54.
- [14] 桑会文. 环境对发动机工作的影响分析[J]. 科技创新导报, 2012(18): 62-63.
- SANG Hui-wen. Analysis of the Influence of Environment on Engine Operation[J]. Science and Technology Innovation Guide, 2012(18): 62-63.
- [15] 王福军. 计算流体力学分析 CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- WANG Fu-jun. Principle and Application of CFD Software for Computational Fluid Dynamics Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 2004
- [16] 陶文铨. 数值传热学[M]. 第二版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- TAO Wen-quan, Numerical Heat Transfer[M]. Second Edition. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Publishing House, 2001.
- [17] 吴志勇. 环境试验箱围护结构传热研究[J]. 装备环境工程, 2007, 4(5): 51-56.
- WU Zhi-yong. Research on Heat Transfer of Enclosure of Climatic Test Chamber[J]. Equipment Environmental Engineering, 2007, 4(5): 51-56.
- [18] 马建军, 刘海燕. 环境试验箱气流组织与围护结构耦合传热研究[J]. 结构强度研究, 2016(1): 55-60.
- MA Jian-jun, LIU Hai-yan. Numerical Simulation of Coupled Heat Transfer between Airflow and Insulating Layer of Climatic Test Chamber[J]. Research on the Structural Strength Research, 2016(1): 55-60.
- [19] 王怡, 刘国华, 陈靖. 建筑箱内环境数值模拟中的耦合算法[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(4): 79-83.
- WANG Yi, LIU Guo-hua, CHEN Jing. Coupling Algorithm in Numerical Simulation of the Environment Inside the Building Box[J]. Journal of Building Science and Engineering, 2006, 23(4): 79-83.