

基于FLUENT和ADAMS的环境实验室压力平衡窗联合仿真分析

任红云, 成竹, 李喜明, 李冬梅

(中航工业中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 提出针对环境实验室发动机地面开车试验压力平衡系统的压力平衡窗设计方案, 研究压力平衡窗对于室内压力的作用情况, 并验证优化设计方案。 **方法** 基于FLUENT及ADAMS技术, 通过动力学及流体力学联合仿真分析得到不同结构作用下的流场变化情况。 **结果** 压力平衡窗窗体结构形式决定其动力学特性, 压力平衡窗的动力学特性与其受力耦合作用影响环境实验室压力。 **结论** 联合仿真模拟结果可以清晰地描述流场变化情况, 合理设计压力平衡窗可以有效地保证实验室内压力在规定范围内, 所设计的压力平衡窗能够满足设计要求。

关键词: 压力平衡窗; 联合仿真; 计算流体力学; 虚拟样机技术; 动网格

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.02.014

中图分类号: TJ81⁺0.1 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)02-0077-07

Co-simulation Study of Pressure Balanced Equipment in Climatic Test Chamber Based on FLUENT and ADAMS

REN Hong-yun, CHENG Zhu, LI Xi-ming, LI Dong-mei

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

ABSTRACT: Objective To propose the design scheme of pressure balanced equipment for the pressure balanced system of engine start tests in environmental laboratory, study the effect of pressure balanced equipment on climate test chamber pressure and optimize the design solution. **Methods** Pressure movement of climate test chamber under different structures was obtained through co-simulation of CFD and dynamics based on FLUENT and ADAMS. **Results** The climate test chamber pressure was affected by dynamic characteristics of pressure balanced equipment decided by its structure and force on pressure balanced equipment. **Conclusion** Change in flow field was clearly described by the co-simulation results. Reasonable design solution of pressure balanced equipment could ensure the chamber pressure in a regulated range, and the design solution proposed in this paper could meet the needs.

KEY WORDS: pressure balanced equipment; co-simulation; CFD; virtual prototype; dynamic mesh

发动机开车环境模拟是在室内模拟飞机发动机 启动或运行过程中遭遇的低温、高温、湿热等气候环

收稿日期: 2015-11-16; 修订日期: 2015-11-21

Received: 2015-11-16; Revised: 2015-11-21

作者简介: 任红云(1987—), 女, 陕西, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为气候环境试验。

Biography: REN Hong-yun(1987—), Female, from Shaanxi, Master graduate student, Engineer, Research focus: climate environment test of equipment.

境,在环境实验室中须配备空气补偿系统、压力平衡系统和废气排放系统。其中空气补偿系统用于为室内送入一定温湿度和流量的新风;压力平衡系统用于保持室内压力平衡,保证实验室安全;废气排放系统用于将发动机排出的高温尾气降温、降噪后排出室外,保证室内的温度均衡^[1-8]。

在环境实验室的发动机地面开车试验中,发动机开车消耗空气量较大,已知单台发动机最大空气消耗量可达400 kg/s,且在发动机启动过程中,吸气量变化范围很大,对室内流场影响较大。如果发动机空气补偿系统启动与发动机启动出现不一致现象,会导致室内压力在短时间内增大或减少,严重时会造成实验室结构破坏,威胁人员、试件、设备安全。因此,实验室压力平衡系统是气候环境实验室关键的一个部分。

发动机补气压力平衡系统的主要实现方式为压力平衡窗与发动机空气补偿系统的联合作用。如果出现上述压力非正常变化情况,压力平衡窗作为安全装置需要在室内压力高于(低于)外界压时力开启,向外(向内)排气,保证实验室内安全。

对于压力平衡窗,流体和窗体之前存在着相互作用:流场的气动力以压力的形式作用于窗体表面,压力平衡窗受压力与重力结合作用开启,向室外排气,排气量由室内压力及窗体开角决定,而排气量反过来影响室内压力,进而改变作用于窗体上的气动力。压力平衡窗开启速度的变化规律等动力学特性由其表面压力分布决定,而其运动又会改变压力分布,因此在求解室内压力时,必须将计算流体力学及动力学结合起来,才能得到接近真实的分析结果^[9-10]。

1 压力平衡窗设计

1.1 压力平衡窗性能设计要求

为了保证气候环境实验室发动机地面开车试验时实验室压力平衡,压力平衡窗(如图1所示)须满足以下性能设计要求:

- 1) 正压平衡窗在室内压力高于外界压力250 Pa时开启,向外排气,保证实验室内压力不高于外界压力500 Pa;
- 2) 负压平衡窗在室内压力低于外界压力250 Pa时开启,向内进气,保证实验室内压力不低于外界压力500 Pa;
- 3) 需具有加热功能,以防止窗体位置结冰;
- 4) 具有结露水外排措施;

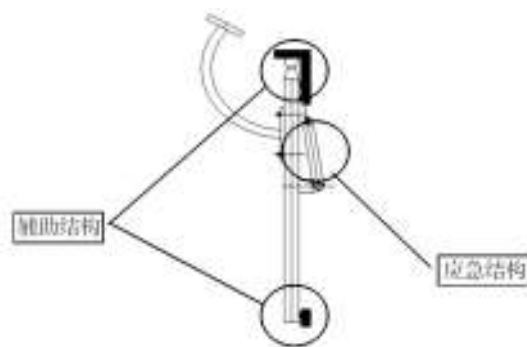


图1 压力平衡窗结构

Fig.1 Structure of the pressure balanced equipment

5) 关闭状态下,系统保温密封效果与舱体结构保持一致;

6) 设备具有可达性,检修维护方便。

1.2 压力平衡窗初步设计方案

压力平衡窗采用机械驱动开启方式,并且以电力驱动开启方式作为应急开启方式,采用重力闭合方式。重力及压力的匹配设计同时尽量避免各种失效,压力平衡窗除满足环境实验室的安全性要求外,还满足保温、密封、防结冰等细节设计要求。图1给出了一套压力平衡窗初步设计方案的结构,主要由三部分组成:

1) 机械结构——该结构主要保证压力平衡窗的重力压力匹配定压开启功能,同时满足强度及结构美观等要求,如图2所示。



图2 压力平衡窗机械结构

Fig.2 Mechanical structure of the pressure balanced equipment

2) 辅助结构——该结构主要保证压力平衡窗保温、防结冰等功能的实现。

3) 应急结构——该结构为应急装置,主要功能为压力平衡窗未正常开启时,可发出应急信号并且工作人员可以启动应急开启窗体模式。

1.2.1 窗体结构设计

现设置两套正压平衡窗和两套负压平衡窗,考虑到开启初期压力平衡窗开启速度较慢,为保证环境室内压力不超过限定值,经过初步计算,将压力平衡窗窗体大小设置为4 m×5.5 m(不含转轴部分)。根据最大风量(400 kg/s)的要求,同时为避免开启角度过大配重执行结构产生开启作用力,将压力平衡窗最大开角设置为固定值35°。压力平衡窗采用了双层钢板的钢结构框架内加聚氨脂保温材料结构形式。

1.2.2 配重执行结构设计

压力平衡窗采用机械式锁紧方式,设置锁紧配重重量保证正压平衡窗在压力差值(室内压力减去外界压力)小于250 Pa时无法开启,负压平衡窗在压力差值(外界压力减去室内压力)小于250 Pa时无法开启。

1.2.3 计算模型及情况初步确定

以开启压力阈值250 Pa及最大开角35°为设计基准,取配重中心与转动中心在垂直方向的夹角为 θ ,取配重重心与转动中心距离为窗体重心距与动中心距离一半的倍数为 k ,分析得知以上两种参数会影响机构布局形式、压力平衡窗窗体自重、配重重量及压力平衡窗运动状态。以不同的角度 θ 、倍数 k 进行分析计算,取较大加速度情况为计算情况,结果见表1。

表1 计算情况
Table 1 Calculation conditions

情况	夹角 θ	倍数 k	窗体质量/kg	配重质量/kg	最大角速度/(d·s ⁻¹)
1	52°	0.5	1365	1422	24
2	90°	0.5	838	1123	29
3	90°	0.75	979	742	27.6

2 联合仿真分析

2.1 压力平衡窗模型建立

2.1.1 计算流体力学模型建立

将环境实验室及压力平衡窗室外环境简化为相连两室结构,将压力平衡窗假设为刚体。由于压力平衡窗开启引起流场区域的变化,每次迭代计算前都要对流场区域的网格进行重新划分。因此采用FLUENT提供的动网格计算,使用非结构化网格技术对流场区域进行划分。模型共有76 384个节点,430 445个网格单元。

2.1.2 动网格更新方法与UDF

动网格技术分为杂交重叠网格(CGM)和非结构动网格技术(DUT)。目前,基于有限体积法的动态网格划分方法主要有三种模型:弹簧光滑模型(Smoothing)、动态铺层模型(Laying)和局部重构模型(Remeshing)。

弹簧光滑模型根据弹性近似原理实现网格变化来适应边界运动,网格拓扑始终不变,无须插值,可保证计算精度,但不适于模拟有较大变形的计算域。对于文中压力平衡窗开启角度较大的情况,须采用局部重构模型,使用插值方法在计算区域内重新生成网格,以适应计算域的变化^[11]。综上所述,采用局部重构模型与弹性光滑模型来实现对网格的更新。

弹性常数取0.5,边界节点松弛因子取1,最大网格扭曲率取0.65,尺寸重构间隔取5,最小长度取0.001 m,最大长度取0.005 m。模拟中,取时间步长为0.01 s进行400步迭代,每步迭代次数为20次,直到仿真结束。

UDF意为用户自定义函数。它是一个在C语言基础上扩展了FLUENT特定功能后的编程接口。借助UDF,用户可以使用C语言编写扩展FLUENT的程序代码,然后动态加载到FLUNET环境中,供FLUENT使用。文中通过动力学分析得出的运动特性,然后采用UDF中DEFINE_CG_MOTION宏函数编译压力平衡窗的运动过程;同时通过求解器计算得出压力平衡窗开启过程的动态排气量,采用UDF编译压力平衡窗由排气量决定的入口压力值。

2.1.3 边界条件设置

文中研究的是快速升压非定常过程,初始条件须反映实际情况。因此,流场的初始压力指定为UDF编译的由排气量决定的入口压力值,速度为0,温度为298 K,密度和内能可由状态方程获得。另外,为避免方程奇异,湍流动能 k 和动能耗散率 ε 取大于0的极小值。

模型入口采用压力入口边界条件,初始压力UDF编译由排气量决定的入口压力值,出口采用压力出口边界条件,压力为0。

2.1.4 控制方程和数值解法

室内空气流动受自然对流和强迫对流的共同作用,采用Realizable, $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型来模拟环境实验室内的空气流动^[12]。为了简化问题,引入以下假设:室内空气为不可压缩流,空气物性为常数;流动为稳态湍流;考虑重力的影响,空气密度采用不可压缩理想气体模型;不考虑粘性力作用引起的能量耗散;

实验室密封良好,不考虑空气泄露的问题。

根据以上假设,室内流体应满足湍流连续方程、动量方程、能量方程,其通用表达式为:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\varphi) = \text{div}(\Gamma_{\varphi}\text{grad}\varphi) + S_{\varphi}$$

式中: φ 为通用变量,可以代表 u, v, w, T 等求解变量; Γ_{φ} 为广义扩散系数,由湍流模型决定, S_{φ} 为广义源项^[13]。

计算软件采用ANSYS FLUENT 13.0,压力耦合采用SIMPLE算法,空间离散格式为2阶迎风格式,时间离散格式为1阶隐式。

2.1.5 动力学模型建立

动力学仿真的目的在于利用ADAMS动力学分析计算软件来确定压力平衡窗在任意时刻的位置、速度、加速度等^[14-15]。根据设计得出的压力平衡窗模型,基于虚拟样机的建模特性,将模型简化如下:将液压合页简化为铰链,液压合页与压力平衡窗连接方式简化为固定连接,压力平衡窗均布载荷简化为集中载荷驱动,配重保证重心位置的前提下简化为实体,同样连接方式为固定连接。对需要的测量结构建立MEASURE。

2.1.6 spline 函数

在压力平衡窗的仿真过程中,对于模型驱动力的描述,涉及到调用函数。ADAMS仿真过程中,主要使用两种函数形式,即设计时间函数和随时间变化函数。文中采用的即为随时间变化函数中的Spline函数,同时选择采用Akima差值方式的AKISPL函数。该函数差值速度快,估值效果好,满足使用要求。

2.2 联合仿真分析

根据压力平衡窗如图3所示的工作流程,采用Fluent和ADAMS对其进行联合仿真,联合仿真流程如下:首先利用固定气动力时的压力平衡窗运动数据作为压力平衡窗特性分析的初始速度设置,利用Fluent进行数值模拟计算,得到压力平衡窗开启过程中所受的气动压力及周围的流场变化规律;再将所得到的气动压力耦合到动力学模型上,利用ADAMS进行考虑气动压力的压力平衡窗动力学仿真分析,得到下一步的气动分析的运动数据;再进行气动分析,得到下一步的动力学分析和气动数据,按照这样的过程如此往复,直至气动力数据保持稳定,实现Fluent和ADAMS的联合仿真分析。流程图如图4所示。

取压力为400 Pa时的压力平衡窗角速度为初始运动数据,经过迭代计算,各情况压力平衡窗开启角



图3 压力平衡窗工作流程

Fig.3 Work flow of the pressure balanced equipment

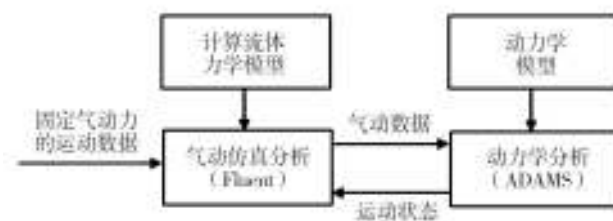


图4 联合仿真流程

Fig.4 Flowchart of co-simulation

度曲线如图5所示,其中情况1最大开启角度为46°,已严重超出规定值,情况2,3分别为37°及36°。

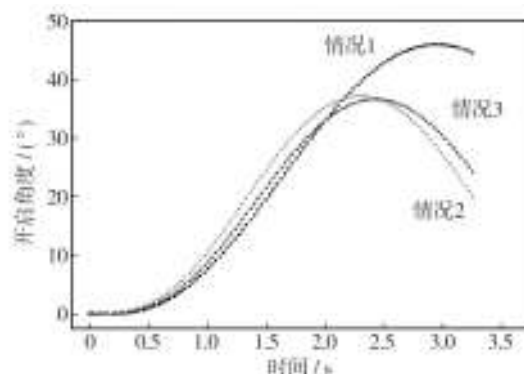


图5 各情况压力平衡窗开启角度曲线

Fig.5 Curves of opening angle of pressure balanced equipment under different conditions

各计算情况压力平衡窗开启角速度曲线如图6所

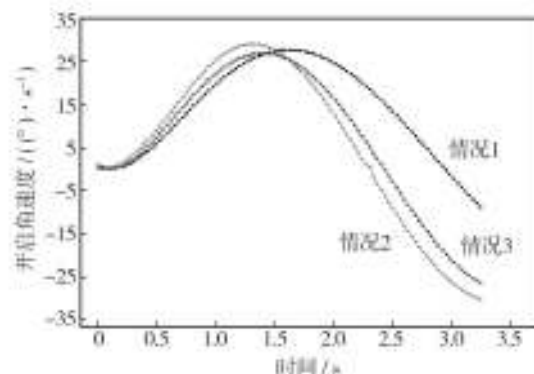


图6 各情况压力平衡窗开启角速度曲线

Fig.6 Curves of opening angular velocity of pressure balanced equipment under different conditions

示,与角度曲线相对应,情况1角速度较小,情况2角速度最大。

各情况环境实验室压力曲线如图7所示,其中情况2最大压力为498 Pa,满足要求,情况1最大压力为531 Pa,情况3最大压力为516 Pa。因情况1中压力平衡窗开启角度大于规定值,因此其后期压力减小速度较其他情况快。

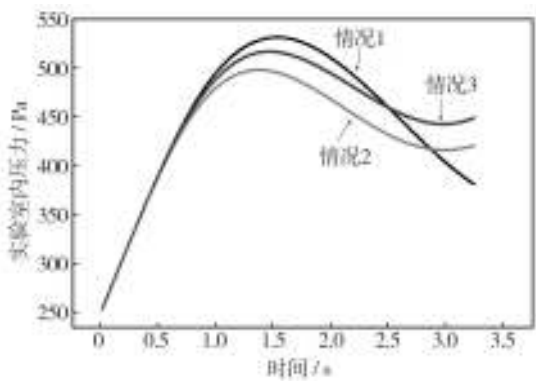


图7 环境室内压力曲线
Fig.7 Curves of pressure in the test chamber

各情况压力平衡窗受力曲线如图8所示,结合压力曲线及开启角度曲线可以看出,中期压力虽然较大,但因开启角度较大其受力递增减缓。由于情况1开启角度最大,虽然其受力值最大,但递减速度也最块。

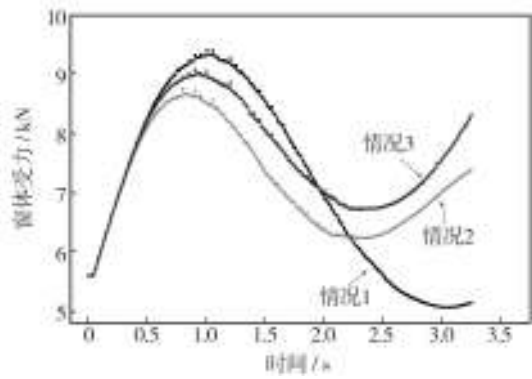


图8 各情况压力平衡窗受力曲线
Fig.8 Curves of force on the pressure balanced equipment

取情况2的压力速度变化云图示意如下,情况2对称面($z=0$)压力云图如图9所示。

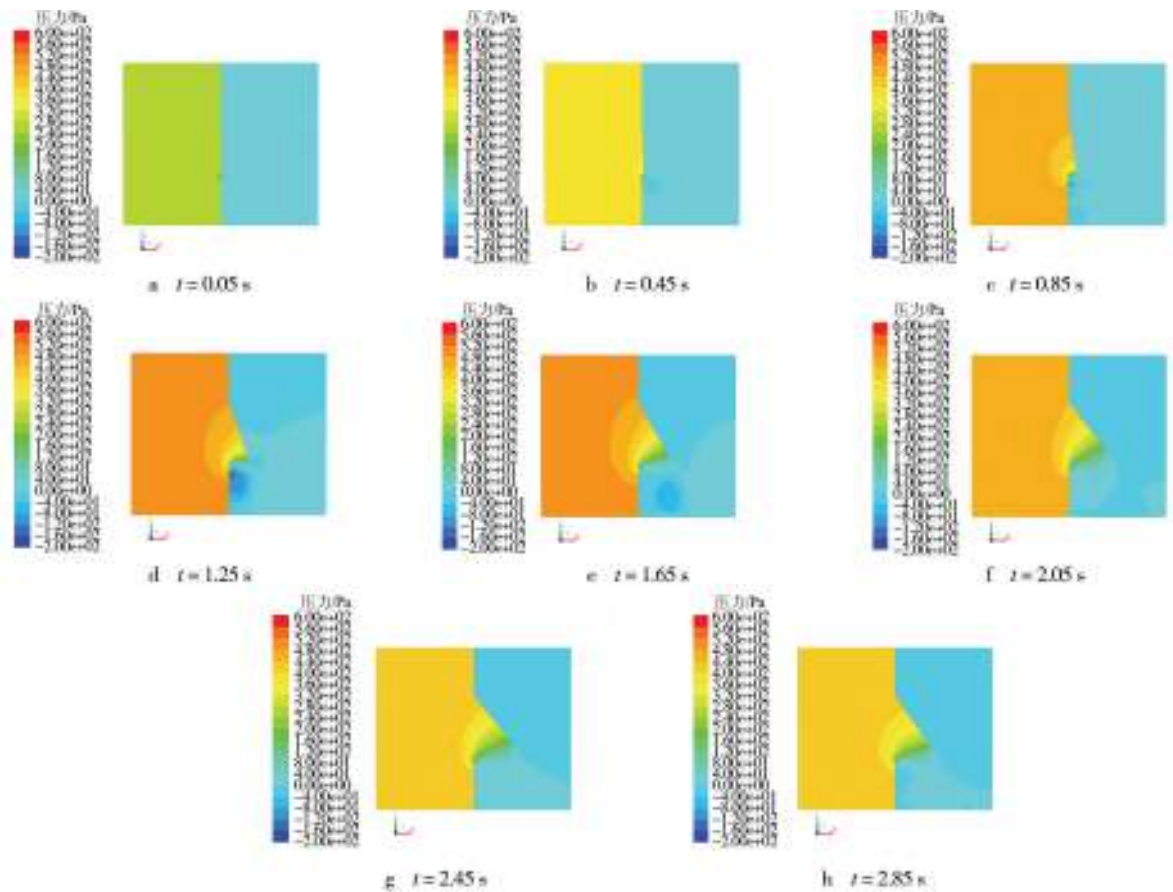


图9 情况2对称面的压力云图
Fig.9 Pressure contour of the plane of symmetry in condition 2

情况2的速度云图如图10所示。

初期由于室内压力较低,压力平衡窗受力较小,

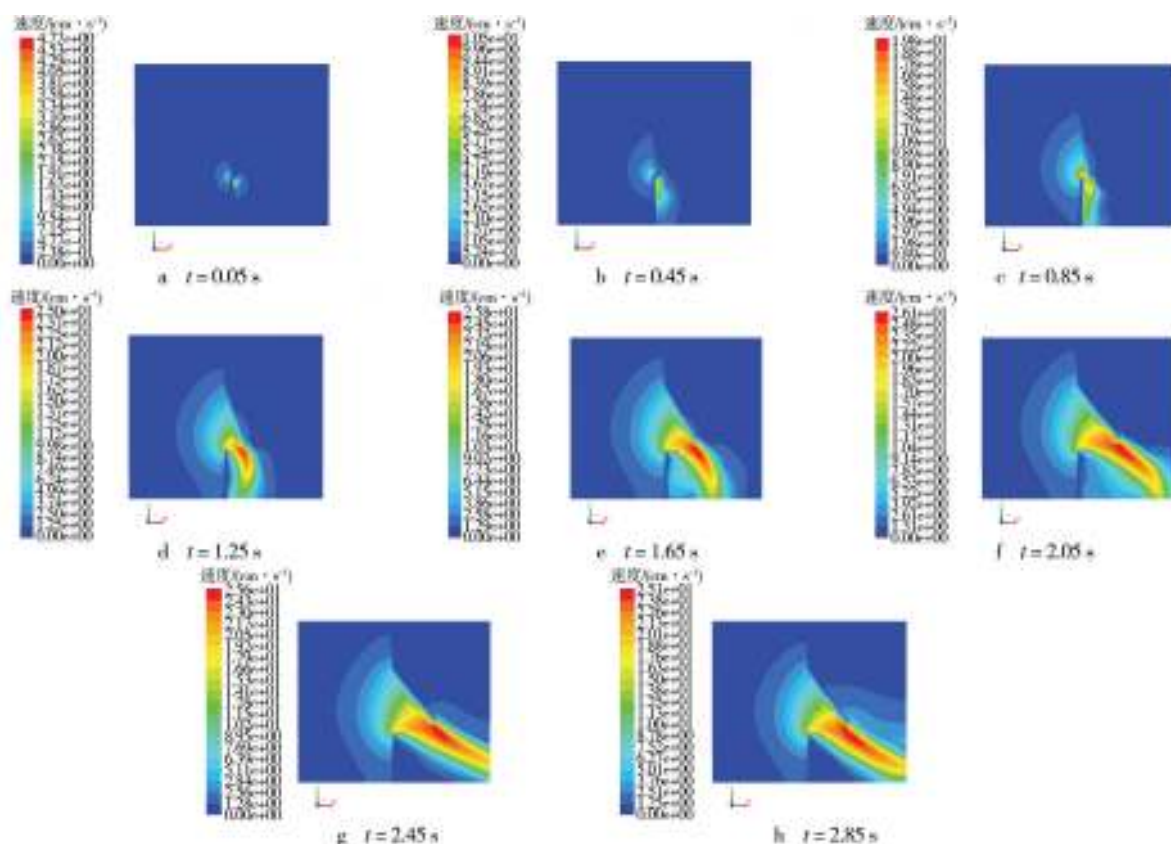


图10 情况2的速度云图

Fig.10 Velocity contour of the plane in condition 2

压力平衡窗开启速度较慢,压力递增较快,中期压力平衡窗受力增加。压力平衡窗开启速度变快后,压力增幅逐渐变小直至压力达到峰值后递减,同时由于压力平衡窗此时开启角度较大,虽然室内压力值较大,其受力仍出现减小,伴随重力力矩加大,压力平衡窗开启至最大角度后开始闭合,在闭合过程中,压力出现反增现象。

在闭合过程中,室内压力反增至压力平衡窗速度逐渐减小为0进而速度方向反向,压力平衡窗重新开启,释放压力,但这种情况会使得压力平衡窗开启角度大于 35° ,一般出现在压力平衡窗开启3s后。虽然压力反增现象使得压力平衡窗开启角度超出规定范围,但其满足了初次压力达到峰值后减小,且压力峰值满足要求,有效控制了室内压力的增大,作为安全装置,为空气补偿系统控制响应争取到了充足的时间,满足使用要求。

3 结论

1) 数值模拟结果可视化程度高,信息完整,不仅

可以得到不同情况的流场状态,为分析压力平衡窗的性能提供依据,并且可为优化结构提供参考。

2) 计算的三个情况中,情况2,3可满足设计要求。从总重量角度考虑情况3较优,然而其布局不够合理,情况2较之情况3综合结果较优,可以采用此设计方案。

3) 配重执行机构主要作用为保证压力平衡窗定压开启,配重重量的选取与开启阈值相关。配重执行机构与窗体结构联合作用影响压力平衡窗运动状态,运动状态决定其能否满足限制最大压力的要求。窗体开启角速度过快虽会短时间内满足排气量要求,但会造成开启角度越大进而使其受力变小,致使开启角速度变慢的状况,角速度过慢则会由于排气量过小致使室内压力超过限制值,要合理选择压力平衡窗的结构形式。

4) 压力平衡窗作为一项安全装置,主要功能应为保证环境实验室压力不超过规定极限值,保证实验室安全,而实验室压力平衡系统中各分系统的相互作用,决定着环境实验室内压力情况,设计中要认真研究各分系统的相互作用。

参考文献:

- [1] 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. Climatic Test of Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1):60—65.
- [2] DRAKE C W, Environmental Test Capabilities of the Air Force Mckinley Climatic Laboratory[C]// AIAA 23rd Aerospace Sciences Meeting. Reno, Nevada, 1985.
- [3] AD-A201 710, Flight Testing under Extreme Climatic Conditions[S].
- [4] GJB 150.A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S].
GJB 150.A—2009, Laboratory Environment Test Methods for Military Material[S].
- [5] GJB 4239—2001, 装备环境工程通用要求[S].
GJB 4239—2001, General Requirement for Materiel Environment Engineering[S].
- [6] 刘海燕,马建军,张惠. 大型气候环境实验室空气处理系统方案探讨[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5), 107—65.
LIU Hai-yan, MA Jian-jun, ZHANG Hui. Discussion on Design of the Air Handling System in Large Climatic Environmental Test Laboratory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(5):107—65.
- [7] 王浚. 我国环境模拟技术现状与发展[J]. 航空制造技术, 2004(8):49—52.
WANG Jun. Present Status and Development of Environment Simulation Technology in China[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004(8):49—52.
- [8] 胥泽奇,张世艳,宣卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1):54—59.
XU Ze-qi, ZHANG Shi-yan, XUAN Wei-fang. Environmental Worthiness Evaluation of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(1):54—59.
- [9] 樊小丽,刘云飞,郭然,等. 轴流压气机转子叶片的流固耦合分析[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(2):218—221.
FAN Xiao-li, LIU Yun-fei, GUO Ran, et al. The Research and Application on Coupled Fluid-Structure Simulation of Compressor Rotor[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(2):218—221.
- [10] 李哲,魏志军,张平. 调节阀内流场数值模拟及动态特性分析[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(5):390—394.
LI Zhe, WEI Zhi-ping, ZHAGN Ping. Internal Flow Field Numerical Characteristic Study of Pressure-Regulating Valve[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(5):390—394.
- [11] 隋洪涛,李鹏飞,马世虎,等. 精通CFD动网格工程仿真与案例实战[M]. 北京:人民邮电出版社, 2013.
SUI Hong-tao, LI Peng-fei, MA Shi-hu, et al. Engineering Simulation and Actual Case Exercise with Dynamic Mesh[M]. Beijing: The People's Posts and Telecommunications Press, 2013.
- [12] ZHAI Zhi-qiang, ZHANG Zhao. Evaluation of Various Turbulence Models in Predicting Airflow and Turbulence in Enclosed Environment by CFD: Part-1: Summary of Prevalent Turbulence Models[J]. HVAC & R Research, 2007, 13(6):853—870.
- [13] 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 PublishingHouse, 2001
- [14] 郑建荣. ADAMS—虚拟样机技术入门与提高[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
ZHENG Jian-rong. ADAMS—Virtual Prototype Technology Introduction and Improvement[M]. Beijing: China Machine Press, 2001.
- [15] 刘小平,郑建荣,朱治国,等. 虚拟样机及其相关技术研究和实践[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(S1):235—238.
LIU Xiao-ping, ZHENG Jian-rong, ZHU Zhi-guo, et al. Study and Experiment on Virtual Prototype and Its Relating Technology[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(S1):235—238.

(上接第7页)

- Conditions of Wet and Dry Cycles of Organic Coatings by Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. Chinese Society for Corrosion and Protection 2011, 31(5):329—335.
- [17] 史强,沈承金,胡光伟. 聚乙二醇分散的锌铝粉涂层在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀行为及防腐蚀机理[J]. 表面技术, 2010, 39(6):10—12.

2010, 39(6):10—12.

- SHI Qiang, SHEN Cheng-jin, HU Guang-wei. The Corrosion Mechanism and the Anti-Corrosion Behavior of Polyethylene Glycol Dispersion Zinc-Aluminum-Chromium Coating in 3.5% NaCl Solution[J]. Surface Technology, 2010, 39(6):10—12.