

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-667-05

基于 Fluent 的机翼翼盒通风方案仿真与试验

郭文娟 高育辉 李卫平 周新房

(中航西安飞机工业集团股份有限公司 西安 710089)

【摘要】 以机翼外翼翼盒作为研究对象, 针对施工人员进入翼翼盒作业时的环境保护问题, 设计通风方案并进行仿真分析。首先进行简化物理模型, 建立数学模型, 分析边界条件。然后采用计算流体力学软件 Fluent 对翼翼盒内气流速度、温度、甲醛浓度等进行模拟。根据仿真结果对各个通风方案的通风效果、制冷效果以及空气净化效果进行分析, 最后设计进行实物通风实验对仿真结果进行验证。实验结果表明与仿真模拟的结果一致, 验证了设计的机翼翼盒通风系统方案的可行性。

【关键词】 翼翼盒; 仿真; 通风方案; 空气净化

中图分类号 TP391.9 文献标志码 A

Simulation and Experiment of Ventilating Scheme of Wing Box Based on fluent

Guo Wenjuan Gao Yuhui Li Weiping Zhou Xinfang

(AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd, Xi'an, 710089)

【Abstract】 Aiming at the problem of environmental protection when construction personnel enter the wing box, taking the outer wing box as the research object, different ventilation schemes were designed. At first, the simplified physical model, the mathematical model was established, and the boundary conditions were analyzed. Then the computational fluid mechanics software Fluent was used to simulate the airflow velocity, temperature, formaldehyde concentration and so on inside the wing box. Ventilation, refrigeration, and air purification of individual ventilation schemes were analyzed based on simulation results, and physical ventilation experiments were finally designed to verify the simulation results. Experimental results showed consistent with the results of simulation, confirming the feasibility of the designed wing box ventilation system proposed in this article.

【Keywords】 Wing box; Simulation; Ventilation schemes; Feature of texture

0 引言

飞机机翼尺寸大, 翼翼盒维护口盖少, 施工人员在进入翼翼盒狭小空间施工时, 大量使用清洗溶剂、油箱底涂等挥发性有害物质, 对身体伤害极大; 同时在夏天温度较高的情况下, 由于翼翼盒内部相对封闭, 会产生高温环境, 需要有良好的制冷保证施工人员安全。因此翼翼盒内部良好通风是安全作业的基本条件, 设计良好的翼翼盒通风方案具有极大的现实意义。

目前, 针对翼翼盒内的通风系统设计的研究较少, 未形成一个系统的、能准确预测翼翼盒通风情况的方法。矿井掘进巷道有着与翼翼盒类似的狭小封闭

空间, 相关通风研究较多^[1-3], 因此对于翼翼盒内通风问题可以参考矿井通风进行研究。在研究方法上, 相比实验的研究方法, 采用计算机仿真有着成本低, 灵活性高, 直观性强等优点。本文以机翼外翼翼盒作为研究对象, 设计不同的通风方案, 采用软件 Fluent 对不同通风方案进行模拟分析, 最后通过通风实验进行验证。

1 通风方案设计

1.1 通风标准

由于没有明确的翼翼盒内通风标准, 翼翼盒内部工

作空间为狭长封闭的环境与矿井巷道的工作环境相近，所以参考煤矿安全规程（2016）^[4]拟定翼盒内部空间的通风要求，设定输出风速维持在 0.15~4m/s 之间，每人每分钟供给风量不得少于 4m³。默认同时在翼盒工作人数最多为 3 人，则翼盒的总送风量至少为 720m³/h，取 800m³/h。

1.2 物理模型

机翼翼盒通常由中央翼、左右外翼三个部分组成，左右外翼对称布置在中央翼两侧。外翼翼盒主要由前缘、后缘、翼肋、壁板组成^[5]，如图 1 所示。

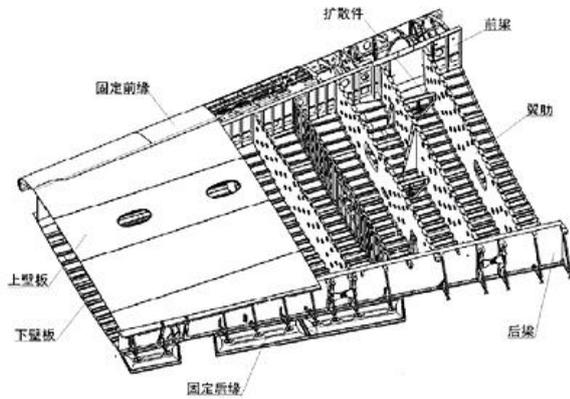


图 1 机翼翼盒结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of wing box structure

为方便分析，将机翼翼盒简化为长 10m，宽 2.9m，高 0.6m 的长方体，内部被翼肋间隔开，翼盒物理模型与栅格编号如图 2 所示。

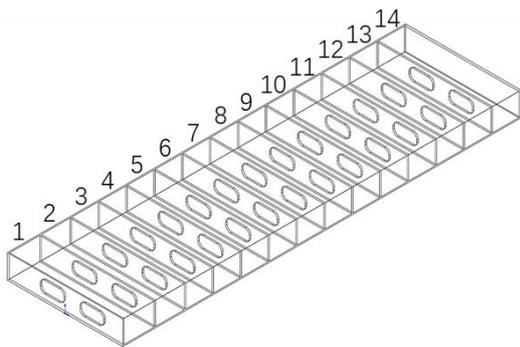


图 2 机翼翼盒物理模型

Fig.2 Physical model of wing box

1.3 通风方案

矿井掘进巷道通常采用压入式通风方式，在翼盒中由于翼肋的遮挡，导致空气交换不够充分，在栅格内存在有毒有害气体排除不充分、氧气不充足的问题，因此采用局部空间通风方案，如图 3 所示。具体的，采用柔性风管进行送风，刚性风管进行回

风。将送风管和回风管穿过的每个栅格处开孔，以达到在每个栅格局部空间内通风的效果。

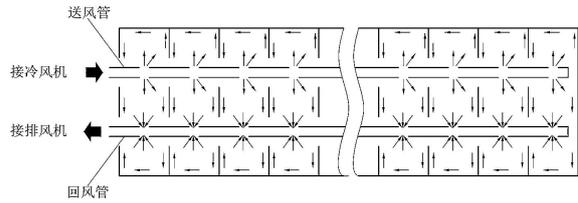


图 3 局部空间通风示意图

Fig.3 Schematic diagram of local air ventilation

为进一步验证局部空间通风的可行性，确定各项通风参数。采用直径为 100mm 的柔性风管进行送风，直径为 150mm 刚性风管进行回风，送风管接冷风机，送风量为 800m³/h，回风管接排风机。

接下来需要通过仿真确定在送风管和回风管的开孔方案。通过前期分析对比，拟定出以下三种开孔方案：方案 1，在每个栅格开 1 对直径 25mm 的孔；方案 2，在每个栅格等距开 3 对直径 15mm 的孔；方案 3，在每个栅格等距开 3 对孔，孔径根据栅格位置调整大小。由于送风管前端风压小末端风压大，回风管则相反，为保证各栅格通风均匀，送风管前端孔径较大末端孔径较小，回风管前端孔径较小末端孔径较大，见表 1。

表 1 方案 3 开孔编号及孔径

Table 1 Scheme3 opening numbers and apertures

栅格编号	1~3	4~11	12~14
送风管单孔直径 (mm)	18	15	14
回风管单孔直径 (mm)	12	15	18

2 数学模型与边界条件的设置

2.1 计算流体力学

计算流体力学 (Computational Fluid Dynamic, 简称 CFD) 是通过可视化和数值模拟，对流动和传热等物理现象进行数值分析的一门力学分支科学。利用 CFD 解决问题一般流程为：剖析物理问题、划分计算网格、选择数学模型、确定边界条件、算后处理、模型的校核与修正^[6]。Fluent 是目前主流的 CFD 软件包，本文采用 Fluent 进行模型网格的划分和数值模拟。

2.2 数学模型

由于翼盒内部实际通风情况比较复杂，影响因素较多，为方便研究，做以下假设。

(1) 通风气流可视为不可压缩流体, 忽略流体黏性力做功引起的耗散热。

(2) 流体的紊流黏性具有各向同性, 紊流黏性系数作为标量处理, 满足 Boussinesq 假设。

(3) 紊流模型采用 Realizable $k-\varepsilon$ 方程模型, 可以更好地模拟圆孔射流问题。

(4) 翼盒内部无热源, 各壁面包括送风管和回风管传热均匀。

(5) 翼盒内部密封性良好, 不考虑漏风的影响。

2.3 边界条件参数设置

(1) 送风口边界条件。根据送风量 $800\text{m}^3/\text{h}$, 送风管直径 100mm , 经计算送风口空气速度为 28.29m/s 。送风口的边界条件定义为速度入口, 设定速度为 28.29m/s , 温度为 10°C 。

(2) 回风口边界条件。根据回风量 $800\text{m}^3/\text{h}$, 回风管直径 150mm , 经计算回风口空气速度为 12.58m/s 。回风口的边界条件定义为速度入口, 设定速度为 -12.58m/s , 温度为 26°C 。

(3) 壁面条件。翼盒壁板、翼肋、送风管和回风管等边界设置为壁面边界条件。采用热辐射的热边界条件进行数值模拟, 外部辐射温度为 35°C 。

2.4 求解方法

流场求解的迭代方法包括 SIMPLE 算法、SIMPLEC 算法、PISO 算法等。SIMPLE 算法属于压力修正法, 是目前应用最广泛的流场计算方法; SIMPLEC 算法在通量修正方法上有所改进, 加快了计算的收敛速度; PISO 算法对 SIMPLE 在每个迭代步加入了动量修正和网格畸变修正, 使每个迭代步中获得的压强场更准确, 计算收敛得更快^[7]。本文求解方法采用 PISO 算法。

3 仿真结果及分析

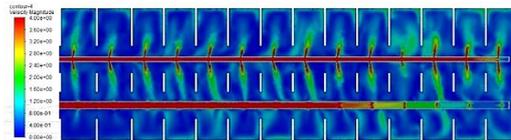
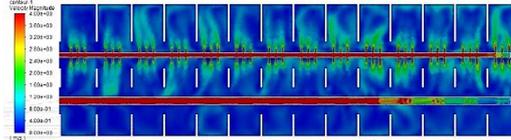
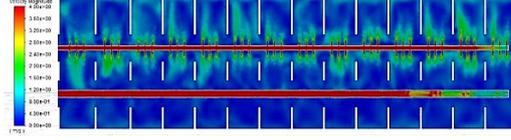
根据上一章节对仿真模型及各项参数的设置, 对三种方案经过 1000 步左右迭代, 各残差线都满足精度要求, 计算收敛。

3.1 速度分析

通过仿真得出不同方案下的气流流速。主要通过分析气流流速在翼盒横截面内的分布情况来判断不同方案是否满足通风换气的标准。

表 2 速度仿真结果

Table 2 Simulation results of velocity

方案	速度分布图 (范围 $0\sim 4\text{m/s}$)
1	
2	
3	

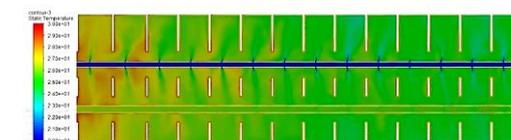
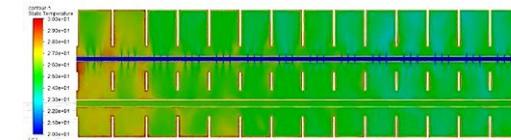
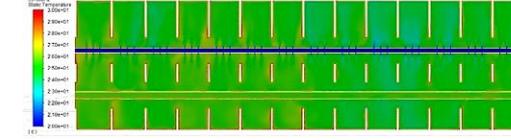
分析表 2 速度仿真结果, 三种方案基本均满足风速通风标准, 除风管内部大部分空间风速在 $0.15\sim 4\text{m/s}$ 之间。由于方案 3 的回风管末端风速较方案 1 和方案 2 大, 更有利于末端栅格空气流通, 方案 3 的通风效果最佳。

3.2 温度分析

通过仿真得出不同方案下的温度分布结果。主要通过分析在翼盒横截面内的温度情况来分析不同方案的降温效果。

表 3 温度仿真结果

Table 3 Simulation Results of Temperature

方案	温度分布图 (范围 $20\sim 30^\circ\text{C}$)
1	
2	
3	

分析表 3 温度仿真结果, 方案 1 在壁面外部辐射温度为 35°C 下, 整个截面上温度分布不均匀, 送风入口前的 5 个栅格温度过高超过了 27°C , 局

部达到了 28.5℃，显然该方案的降温效果较差；对比方案 1，方案 2 同样在整个截面上温度分布不均匀，前 2 个栅格温度较高（27℃），局部达到了 29℃，而末尾的 5 个栅格温度偏低（23℃）；对比方案 1 和方案 2，方案 3 在整个截面温度分布均匀，且大部分区域温度在 24℃到 26℃范围内，是人体舒适的温度范围，得出结论在通风量和进风温度不变的情况下，改变开孔情况可以有效提高制冷效果。

3.3 气流流线轨迹分析

流线是基于欧拉法对流体流动的描述，可以反映流体的流动方向，所以运用流线来进一步反映翼盒空间的气流组织。通过仿真分析，设置入口为送风管管口截面，得出不同方案下的气流流线轨迹，如图 4 所示。

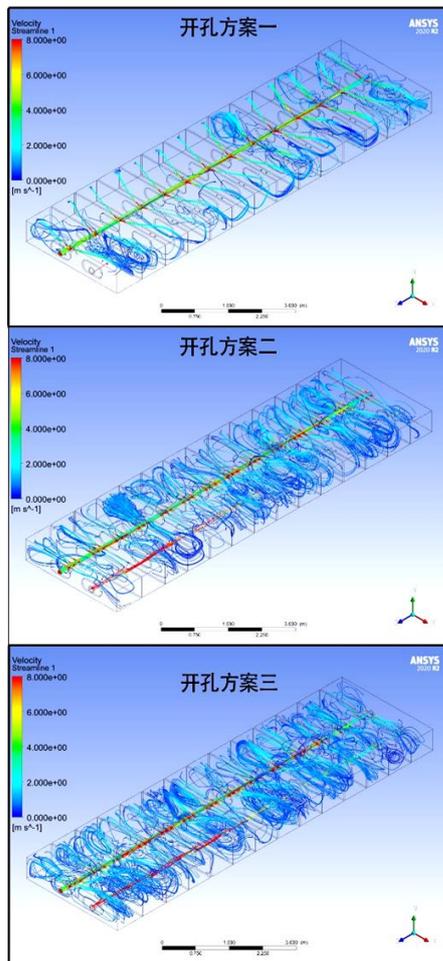


图 4 气流流线轨迹图

Fig.4 Gas streamline trajectory diagram

分析气体流线轨迹图，方案 1 气体整体流动不

通畅，通风效果较差，而且靠近翼肋的区域存在较多死角，这阻碍了栅格内污染物的有效排除，从出风孔射出的气流集中，这在前文中的速度分布图上也有反映，等值线图速度变化小，说明空气流动有限；分析方案 2，相比方案 1 气体整体流动比较通畅，但在前两个栅格中气流流线稀疏，存在部分死角；分析方案 3，流线分布均匀，气体流动通畅，气流从送风管开孔斜向上流向上壁板，然后沿上壁板向两侧壁板向下流动，最后沿下壁板折返后从回风管开孔排出，气流组织较好。

3.4 气体浓度分布

在工业领域存在有害物质超标的危险隐患，甲醛属于高挥发性有机化合物，是一种常见的广泛用于工业生产中化学性空气污染物。本文假设壁板散发甲醛分析翼盒通风系统空气净化效果，设置壁板表面散发甲醛的质量分数为 1.0×10^{-7} ，总质量流量为 $2.25 \times 10^{-2} \text{kg/s}$ 。通过仿真得出不同方案下主要截面的甲醛摩尔浓度分布图。

表 4 气体浓度仿真结果

Table 4 Simulation results of gas concentration

方案	甲醛摩尔浓度分布图 (范围: $0 \sim 5 \times 10^{-8} \text{kmol/m}^3$)
1	
2	
3	

分析表 4 气体浓度仿真结果，分析方案 1，翼盒横截面大部分区域的甲醛摩尔浓度高于 $3.5 \times 10^{-8} \text{kmol/m}^3$ ，换算成质量浓度为 1.05mg/m^3 ，部分区域最高浓度可达 1.41mg/m^3 ，这些区域属于气流死角，因此甲醛不能被及时稀释。方案 2 和方案 3 较方案 1 有较大的改善，大部分区域的甲醛摩尔浓度为 0.75mg/m^3 ，部分区域最高 1.05mg/m^3 。且方案 3 较方案 2 在前两个栅格的甲醛浓度更低，整体净化效果更好。

4 实验验证

根据上一章节的仿真分析, 选择最优通风方案即方案 3 进行实验验证。由于条件限制, 实验仅测量送风管各出风孔的风速, 并对比仿真结果是否一致, 以验证仿真结果的可信度。

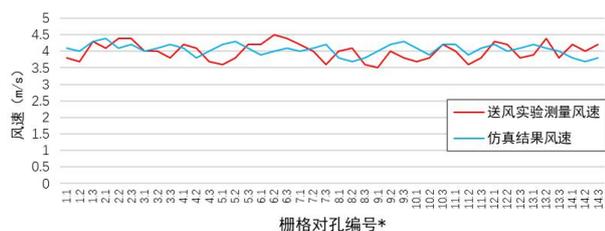
根据通风量、功率、制冷等要求确定了冷风机、增压风机的选型。冷风机, 最大流量: 910m³/h; 功率: 2.4kW; 增压风机, 最大流量: 1200m³/h; 功率: 1.5kW; 额定压力: -2kPa。

实验中首先将牛津布送风管按方案 3 开孔。然后将送风管与增压风机出风口连接固定, 再将波纹管分别与增压风机进风口与冷风机出风口连接固定, 并将送风管摆放平直。在准备工作完成, 并检查没有问题后, 将冷风机和增压风机通电, 并进行实验项目的测量, 实验过程如图 5。



图 5 送风实验过程图

Fig.5 Schematic diagram of air supply experiment process



*栅格对孔编号: 如编号3.1意为在编号为3的栅格上开的第1对出风孔。

图 6 送风实验各出风孔风速折线图

Fig.6 Line graph of air velocity at each outlet in the air supply experiment

测量时将风速仪的扇叶靠近送风管的出风孔并保持 10 厘米的距离, 倾斜一定角度使其沿风流方向测量, 当风速稳定后记录各个开孔的风速, 绘

制成曲线图, 并与仿真的出风孔风速对比, 如图 6 所示。

根据实验结果, 每个出风孔风速均在 4m/s 左右, 风速均匀, 且每个栅格的风量基本一致, 与仿真模拟的风速结果一致, 也从侧面说明仿真中的温度、空气净化等结果具有一定的可信度, 验证了本文设计的机翼翼盒通风系统方案的可行性。

5 结束语

本文基于 Fluent 软件对翼盒的通风情况进行模拟, 可以有效仿真实际翼盒内部的气体流速、温度以及气体浓度。同时根据仿真确定最佳通风方案, 使每个栅格空间内部均具有良好的通风效果, 并通过实验验证本文设计的翼盒通风系统方案的可行性。经过仿真和实验可以得出结论: 采用局部空间通风方案可以有效地解决翼盒有毒有害气体排除不充分、氧气不充足、制冷不均匀的问题。进一步的, 为了使仿真结果更加符合实际情况, 可以将物理模型精细化复杂化, 例如加入机翼翼肋壁板的机械结构; 并且加入更具体的边界条件, 比如风管的粗糙度、人员散热、翼盒缝隙漏风等因素。

参考文献:

- [1] 秦帆. 高温掘进巷道热环境及降温冷负荷分析计算研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2015.
- [2] 汤民波. 掘进工作面压入式通风风流流场数值模拟研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2013.
- [3] 孙勇, 王伟. 基于Fluent的掘进工作面通风热环境数值模拟[J]. 煤炭科学技术, 2012, 40(7): 31-34.
- [4] 中华人民共和国国家安全生产监督管理总局. 煤矿安全规程(2016)[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
- [5] 胡铮. 大型机翼活动翼面安装调试技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [6] 范傲. 通风空调管道Y型分流三通阻力性能仿真与优化[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [7] 吴剑锋. 基于 FLUENT 软件的建筑物风荷载数值模拟[D]. 大庆: 东北石油大学, 2019.