

1-2-2019

Numerical Simulation of Thermal Comfort and PM₁₀ Concentration Distribution in A320 Aircraft Cabin

Jiaquan Lin

Institute of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Ruiting Wang

Institute of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Simulation of Thermal Comfort and PM₁₀ Concentration Distribution in A320 Aircraft Cabin

Abstract

Abstract: *A model of A320 aircraft cabin and human body was established using CFD. Temperature field, velocity field and PM₁₀ concentration field was simulated at different air supply rate of the bridge load air conditioning based on mathematical model of fluid dynamics in cabin. The values of the ADPI and drainage efficiency were calculated respectively at different air supply rate. The optimal supply air velocity evaluation function was constructed based on ADPI and drainage efficiency. The wind speed, temperature and PM₁₀ concentration of the sample points were used to calculate the value of the evaluation function with different air supply rate. The function relation between air supply rate and evaluation function was obtained by Gaussian fitting, then the optimal air supply rate was obtained, which can make the cabin environment optimal and provide the basis for energy saving control of bridge load air conditioning.*

Keywords

CFD, A320 aircraft cabin, numerical simulation, thermal comfort, drainage efficiency

Recommended Citation

Lin Jiaquan, Wang Ruiting. Numerical Simulation of Thermal Comfort and PM₁₀ Concentration Distribution in A320 Aircraft Cabin[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(1): 164-170.

A320 飞机客舱热舒适性及 PM₁₀ 浓度分布的数值模拟

林家泉, 王瑞婷

(中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: 采用 CFD 技术建立了 A320 飞机头等客舱及人体的仿真模型, 基于客舱流体动力学数学模型, 模拟了桥载空调在不同送风速度下客舱内的速度场、温度场和 PM₁₀ 浓度场。分别计算出在不同送风速度下空气分布特性指标(ADPI)及排污效率的值。基于 ADPI 和排污效率构造了桥载空调最优送风速度评价函数。根据各个采样点处风速、温度和 PM₁₀ 浓度的值, 计算出不同送风速度下评价函数的值。通过高斯拟合, 得到送风速度与评价函数之间函数关系式, 并得到桥载空调最优的送风速度。所得到的桥载空调最优送风速度既能够使客舱内环境最优, 而且能够为桥载空调的节能控制提供依据。

关键词: CFD; A320 客舱; 数值模拟; 热舒适性; 排污效率

中图分类号: V245.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 01-0164-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801020

Numerical Simulation of Thermal Comfort and PM₁₀ Concentration Distribution in A320 Aircraft Cabin

Lin Jiaquan, Wang Ruiting

(Institute of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: A model of A320 aircraft cabin and human body was established using CFD. Temperature field, velocity field and PM₁₀ concentration field was simulated at different air supply rate of the bridge load air conditioning based on mathematical model of fluid dynamics in cabin. The values of the ADPI and drainage efficiency were calculated respectively at different air supply rate. The optimal supply air velocity evaluation function was constructed based on ADPI and drainage efficiency. The wind speed, temperature and PM₁₀ concentration of the sample points were used to calculate the value of the evaluation function with different air supply rate. The function relation between air supply rate and evaluation function was obtained by Gaussian fitting, then the optimal air supply rate was obtained, which can make the cabin environment optimal and provide the basis for energy saving control of bridge load air conditioning.

Keywords: CFD; A320 aircraft cabin; numerical simulation; thermal comfort; drainage efficiency

引言

随着民航事业的不断发展, 人们乘坐飞机时不

仅关注飞机在飞行过程中的安全问题, 而且越来越关注飞机客舱内的热舒适性和空气的品质。飞机停靠在机场时, 目前大都是由机载空调对客舱送风, 而机载空调航空燃油消耗量大, 污染物排放多, 因此目前推广使用桥载空调代替机载空调对飞机客舱送风^[1]。桥载空调是悬挂于机场廊桥底部的空调, 由于桥载空调消耗工业用电, 因此既节约能源,



收稿日期: 2015-11-16 修回日期: 2015-12-29;
基金项目: 国家自然科学基金委-中国民航局联合基金(U1433107);
作者简介: 林家泉(1975-), 男, 黑龙江, 博士, 副教授, 研究方向为飞机客舱能耗预测控制; 王瑞婷(1993-), 女, 山西, 硕士, 研究方向为飞机客舱系统建模与仿真。

<http://www.china-simulation.com>

• 164 •

又减少污染物的排放。但是由于对飞机客舱的能耗不能准确的估计, 造成桥载空调机组控制的盲目性, 很难达到桥载空调的节能减排最大化。因此研究桥载空调的最优送风速度很有必要。

计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)技术, 在流体分析与热分析中被广泛的应用, 在飞机客舱内的数值模拟中也经常使用 CFD 技术。关于飞机客舱的数值模拟和实验研究已经有了很多进展。文献[2]建立了飞机客舱模型和 9 名乘客的人体模型, 分析了三种不同的送风形式对客舱内热舒适性的影响, 通过数值模拟与实验的对比, 得出在热边界条件下混合送风系统能够有很好的性能; 文献[3]通过对飞机客舱的 CFD 数值模拟和实验的对比, 研究了在飞机客舱内五种不同的条件下臭氧的分布, 由此评估臭氧对乘客健康的影响; 文献[4]提出了一种新型的四风口混合送风形式, 通过真实 MD-82 客机座舱的实验数据同 CFD 模型的数值仿真进行比较, 得出新型的送风形式较已有的送风形式乘客的舒适度更佳。

关于飞机客舱内流场的数值模拟已有很多研究成果, 但是以桥载空调的控制为目标的研究较少。本文通过 CFD 技术对飞机客舱内的速度场, 温度场和 PM₁₀ 浓度场进行了数值模拟, 综合考虑 ADPI 和排污效率两个评价指标, 建立了桥载空调最优送风速度评价函数, 并得到桥载空调的最优送风速度, 为桥载空调的节能控制提供依据。

1 数值模型

1.1 客舱模型

本文使用的建模平台为 Rhinoceros, 为准确模拟飞机客舱内速度场, 温度场和 PM₁₀ 浓度场的分布情况, 参考 A320 飞机的真实尺寸, 以 1:1 的比例建立了飞机头等客舱模型。所建立的 A320 飞机头等客舱的模型如图 1 所示, 模型包括飞机蒙皮, 内客舱、客舱窗户、进风口、出风口、座椅模型、人体模型。

使用 ANSYS Workbench 14.0 对飞机客舱进行

网格的划分以及对客舱内速度场、温度场、PM₁₀ 浓度场的数值模拟。对内客舱进行网格的划分时, 采用四面体网格划分法, 算法采用协调分片算法, 单元尺寸设置为 16 mm。划分出的网格在进风口处、出风口处、玻璃窗边缘和曲面边缘都非常密集, 这样划分的网格质量较好, 能够满足仿真的要求。

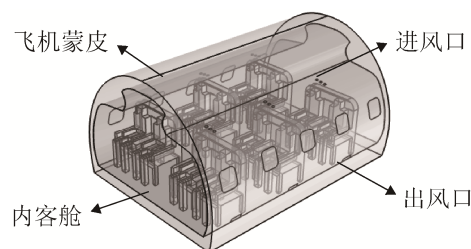


图 1 A320 飞机头等舱模型

Fig. 1 Model of the first class of A320 aircraft cabin

1.2 客舱流体动力学控制方程

考虑飞机停靠在机场的情况, 飞机客舱内的空气压力基本等于客舱外大气压。桥载空调为客舱送风, 因此可将客舱内空气看作不可压粘性流体。客舱内空气流动遵循以下控制方程^[5]:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho \beta g_i (T_{ref} - T) \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + S_H \quad (3)$$

组分方程:

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho C U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{\sigma c} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + S_C \quad (4)$$

式中 U_i 为 x_i 方向的速度(m/s), x_i 代表三个垂直坐标轴的坐标, 其中 $i=1, 2, 3$; U_j 为 x_j 方向的速度(m/s); ρ 为空气密度(kg/m³); P 为空气压力(Pa); μ 为空气层流动力粘度[kg/(m·s)]; β 为空气热膨胀

系数(1/K); T_{ref} 为参考温度(K); T 为空气温度(K); g_i 为 i 方向的重力加速度 (m/s^2); h 为空气定压比焓 (J/kg); S_H 为热源(W); λ 为空气热导率 [$W/(m \cdot K)$]; C_p 为空气比定压热容 [$J/(kg \cdot K)$]; C 为组分浓度 (kg/kg); σc 为传质 Schmidt 数; S_C 为组分浓度源 (kg/s)。

上述方程表述的物理意义是流体流动微团的守恒定律: 连续方程表示的是质量守恒定律, 动量方程表示的是某个方向上的动量守恒定律, 能量方程表示的是能量守恒定律, 组分方程表示的是组分浓度守恒定律。

重整化群(Renormalization Group, RNG)的基本思想是通过在任意空间尺度上的一系列连续的变换, 对原本十分复杂的系统或过程实现粗分辨率的描述。RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型是在标准 $k-\varepsilon$ 模型的基础上进行了 RNG 处理, 因此 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型比标准 $k-\varepsilon$ 模型有更高的可信度和精度^[6]。因此对于飞机客舱内的湍流流动, 本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。

RNG $k-\varepsilon$ 控制方程如下^[4]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{u}_i\phi) - \Gamma_{\phi, \text{eff}} \text{grad}\phi = S_\phi \quad (5)$$

式中: ϕ 为变量, \bar{u}_i 为时均速度 ($i=1,2,3$), $\Gamma_{\phi, \text{eff}}$ 为有效扩散系数, ρ 为密度, S_ϕ 为源项。当 ϕ 的值不同时, 式(5)可表示连续性方程、动量方程、能量方程、湍动能方程等。当 $\phi = k$ 时(这里 k 为湍动能)时, 式(5)为湍动能方程。

2 边界条件及空气质量评价指标

2.1 边界条件的设置

(1) 进风口边界条件: 内容舱顶部有 18 个进风口, 桥载空调的送风温度设置为 291 K, 湍流强度取 5%。民用飞机客舱空气质量标准限值规定, PM₁₀ 的浓度限定值为 0.15 mg/m³^[7]。因此模拟中设置进风口处 PM₁₀ 的浓度设置为 0.08 mg/m³。

(2) 客舱壁面边界条件: 飞机蒙皮热边界条件为外部辐射换热, 外部发射率为 0.8, 外部辐射温

度为 313 K; 内容舱热边界条件为混合型, 热传导系数为 4 W/(m²·K), 自由流温度 298 K, 外部发射率 0.49, 以及外部辐射温度为 310 K。客舱玻璃热边界条件为混合型, 热传导系数为 4 W/(m²·K), 自由流温度 298 K, 外部发射率 0.49, 以及外部辐射温度为 336 K。人体热边界条件为固定热流量, 发热量为 80 W/m²。

(3) 太阳辐射条件: 设置飞机在夏季中午 1 点停靠在首都国际机场, 机场经纬度分别为东经 116.36°, 北纬 40.04°。飞机的方位为机头朝南。天气条件为很少云层覆盖的晴朗天气。

2.2 客舱热舒适指标

描述热舒适的指标有很多, 包括平均辐射温度、操作温度、PMV、PD、ADPI、不均匀系数等。本文采用 ADPI 指标来研究飞机客舱内的热舒适性。ADPI 定义为满足规定风速和温度要求的测点数和总测点数之比^[5], 即

$$ADPI = \frac{-1.7 < \Delta ET < 1.1 \text{ 的测点数}}{\text{总测点数}} \times 100\% \quad (6)$$

ΔET 表示有效温度差与室内风速之间的关系, 即

$$\Delta ET = (t_i - t) - 7.66(v_i - 0.15) \quad (7)$$

其中 t_i 为采样点的温度, t 为给定的空间设计温度, v_i 为采样点的风速。当 ΔET 在 -1.7~+1.1 范围内, 多数人感到舒适, 且在一般情况下, 应使 ADPI ≥ 80%。并且 ADPI 的值越大, 感到舒适的人群比例越大^[5]。

2.3 客舱污染物去除有效性指标

污染物去除有效性指标有排污效率、污染物年龄、污染源可及性等。本文采用排污效率来分析飞机客舱内污染物去除的有效性。排污效率反映空间各点的污染程度以及在该点排污的有效性, 排污效率 ε 定义如下^[5]:

$$\varepsilon = \frac{C_e - C_s}{C - C_s} \quad (8)$$

其中 C_e 为出风口的污染物浓度, C_s 为进风口污染物的浓度, C 为空间内污染物的平均浓度。 ε 的值越大表明排污效率越好。

3 仿真结果与讨论

为了更好的分析桥载空调的送风速度对客舱内的速度场, 温度场和 PM₁₀ 浓度场的影响, 在选取采样截面和采样点时, 在客舱中每一排乘客前 5 cm 位置取采样截面, 共取 3 个截面。每个采样截面在每位乘客头部和脚部取观测点, 每个截面共有 8 个采样点。每位乘客头部和脚部采样点的位置如图 2 所示。这样选取的采样截面和采样点, 能够更加合理的分析出客舱内乘客的热舒适程度以及污染物浓度的分布对乘客健康的影响。

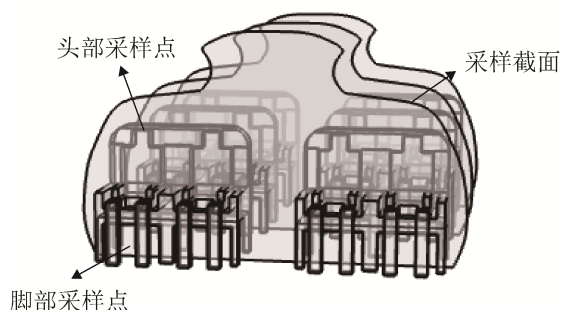


图 2 采样截面以及采样点的分布

Fig. 2 Distribution of sampling cross sections and points

3.1 速度场和温度场仿真

为分析桥载空调不同的送风速度对客舱内风速的影响, 分别对送风速度为 0.2 m/s, 0.4 m/s, 0.6 m/s, ..., 1.8 m/s 进行仿真。ASHRAE 标准规定, 人员附近局部风速应小于 0.3 m/s^[8]。图 3 为进风口处风速为 1 m/s 时客舱内风速的三维流线图。

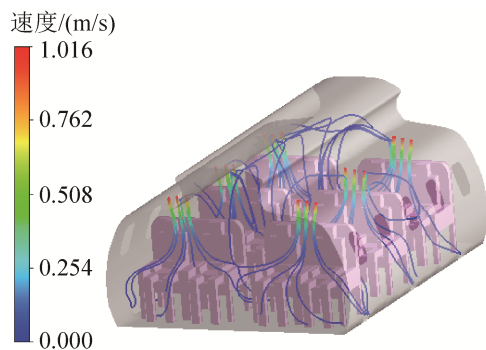


图 3 送风速度为 1 m/s 时风速的三维流线图

Fig. 3 The three dimensional streamlines with the air supply velocity of 1m/s

由图 3 可以看出, 由于座椅和人体的阻挡, 风从进风口进入后, 绕过人体与座椅, 再从出风口流出。在进风口处的风速较大, 之后风速逐渐减小, 在乘客附近风速大约为 0.05 m/s。因此在进风口处风速为 1 m/s 时, 对于绝大部分乘客来说, 基本无吹风感, 因此符合 ASHRAE 的规定。

送风速度从 0.2 m/s 增大到 1.8 m/s 的过程中, 人体周围的风速也在不断增大, 但始终小于 0.3 m/s, 因此在对速度场的仿真中, 人体附近的局部风速均符合 ASHRAE 的规定。

为分析桥载空调不同的送风速度对客舱内温度分布的影响, 分别对送风速度为 0.2 m/s, 0.4 m/s, 0.6 m/s, ..., 1.8 m/s 进行仿真。ASHRAE 中规定, 乘客头部到脚部的垂直温差不可超过 2.8 K, 且夏季座舱温度范围在 291.45~297.05 K 之间^[8]。文献[9]通过主观问卷调查, 得出对于中国人群, 夏季舒适温度的上限可升高至 299.15 K。图 4 为进风口处风速为 1.2 m/s 时客舱内的温度场。

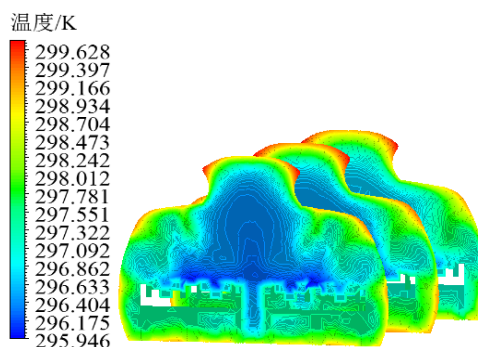


图 4 送风速度为 1.2 m/s 时的温度场图

Fig. 4 Temperature field with the air supply velocity of 1.2m/s

由图 4 可以看出, 飞机座舱温度范围为 295~299 K, 乘客附近温度在 296~297.6 K 的范围内, 且乘客头部和脚部的垂直温差约为 1.6 K。由于模拟时刻为夏季中午 1 点, 此时太阳辐射温度较高。由于飞机机头朝南, 飞机顶部接收的太阳辐射也较多, 因此客舱顶部边缘的温度较高, 为 299 K 左右。因此在送风速度为 1.2 m/s 时飞机客舱内温度符合 ASHRAE 的规定。

送风速度从 0.2 m/s 增大到 1.8 m/s 的过程中, 客舱内的温度不断降低, 且送风速度在 0.2~0.6 m/s 的范围时, 客舱内温度较高, 送风速度在 1.4~1.8 m/s 的范围时, 客舱内温度较低, 均不满足 ASHRAE 的规定。

由上述模拟可得不同送风速度下各个采样点处相应的温度值 t_{mi} , 速度值 v_{mi} 。其中 m 代表采样截面, $m=1,2,3$ 。 i 代表采样点, $i=1,2,\dots,8$ 。

ΔET 的计算结果如下:

$$\Delta ET_{mi} = (t_{mi} - \bar{t}) - 7.66(v_{mi} - 0.15) \quad (9)$$

其中 $\bar{t} = \frac{1}{24} \sum_{m=1}^3 \sum_{i=1}^8 t_{mi}$ 。根据 ADPI 的计算公式(6), 求出桥载空调不同送风速度下的 ADPI。

根据 ADPI 的计算结果可知, 送风速度从 0.2 m/s 到 1.2 m/s 的过程中, ADPI 的值逐渐增大, 送风速度从 1.2 m/s 到 1.8 m/s 过程中, ADPI 值逐渐减小。送风速度为 1.2 m/s 时达到最大。当 $ADPI \geq 80\%$ 时, 送风速度大约在 0.9~1.4 m/s 的范围内。因此当送风速度在该范围内时, 客舱内乘客能够得到较好的热舒适性。

3.2 PM₁₀ 浓度场的仿真

由于机场飞机的起降以及附近机动车的行驶造成机场周围环境污染浓度较大, 例如 NO_2 , SO_2 , 可吸入颗粒物(PM_{10})等等。当桥载空调为飞机客舱送风时, 通常会将周围环境中的污染物带入客舱内。本文选择 PM_{10} 为研究对象。

民用飞机客舱空气质量标准限值规定, PM_{10} 的浓度限定值为 0.15 mg/m^3 ^[7]。本文假设外界环境中的 PM_{10} 的浓度为 0.08 mg/m^3 , 即从进风口进入飞机客舱的 PM_{10} 的浓度为 0.08 mg/m^3 , 其他边界条件的设定同温度场、速度场的模拟。分别对进风速度为 0.2 m/s, 0.4 m/s, 0.6 m/s, ..., 1.8 m/s 进行模拟。图 5 为送风速度为 0.8 m/s 时客舱内 PM_{10} 的浓度场。

由图 5 可以看出, 客舱内的 PM_{10} 浓度最大约为 1.45 mg/m^3 , 且主要集中在人体腰部位置, 这

是由于座椅和人体对空气流通的阻挡。人体头部附近的 PM_{10} 浓度约为 0.12 mg/m^3 , 因此在该送风速度下, 客舱内 PM_{10} 浓度符合规定。

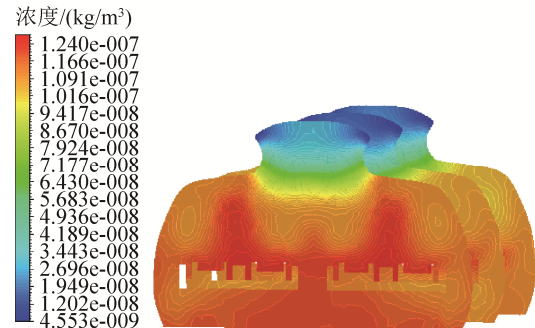


图 5 送风速度为 0.8 m/s 时 PM_{10} 的浓度场
Fig. 5 Concentration field with the air supply velocity of 0.8m/s

送风速度从 0.2 m/s 增大到 1.8 m/s 的过程中, PM_{10} 的浓度先迅速增大, 然后增速趋于平缓, 最后开始减少。这是由于空调送风速度的增大, 虽然带入更多的 PM_{10} , 但同时也增大了空气的流通, 利于 PM_{10} 的排出。

由排污效率的计算公式(8)可知, 除了图 2 中的 24 个采样点外, 还需要得到 6 个出风口处和 18 个进风口处 PM_{10} 的浓度。由于进风口的排列方式特殊, 因此可以选择每三个相邻排列的进风口中处于中间位置的进风口进行浓度的采样。

C_{ei} 为每个出风口处 PM_{10} 的浓度, $i=1,2,\dots,6$ 。 C_{si} 为每个进风口处 PM_{10} 的浓度, $i=1,2,\dots,6$ 。 C_{mi} 为每个采样点处 PM_{10} 的浓度, 其中 m 代表采样截面, $m=1, 2, 3$ 。 i 代表采样点, $i=1,2,\dots,8$ 。故排污效率计算如下:

$$\varepsilon = \frac{C_e - C_s}{C - C_s} = \frac{\frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 C_{ei} - \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 C_{si}}{\frac{1}{24} \sum_{m=1}^3 \sum_{i=1}^8 C_{mi} - \frac{1}{6} \sum_{i=1}^6 C_{si}} \quad (10)$$

根据排污效率的计算结果可知, 送风速度从 0.2 m/s 到 0.8 m/s 的过程中, ε 的值逐渐增大, 送风速度从 0.8 m/s 到 1.8 m/s 过程中, ε 值逐渐减小。送风速度为 0.8 m/s 时 ε 值达到最大, 此时排污效率最好, 客舱内污染程度最小。

4 最优送风速度评价函数的构造

由以上分析可知,客舱内热舒适性和排污效率都与桥载空调的送风速度有很大关系,送风速度为 1.2 m/s 时客舱内热舒适度最佳,送风速度为 0.8 m/s 时,排污效率最佳。因此需要得到最优的送风速度能够同时满足使客舱内较好的热舒适性和较高的排污效率。

根据客舱热舒适指标和客舱污染物去除有效性指标,为确定桥载空调最优的送风速度,需要将两个评价指标进行综合考虑。

由 ADPI 的计算公式(6)和排污效率 ε 的计算公式(10)可得,ADPI 值域为 33~95, ε 的值域为 1.01~3.28,分别将 ADPI 和 ε 进行归一化处理,构造了桥载空调最优送风速度评价函数 $P(v)$:

$$P(v) = \lambda \frac{ADPI(v)}{62} + (1 - \lambda) \frac{\varepsilon(v)}{2.27} \quad (11)$$

式中 λ 和 $1 - \lambda$ 的值分别代表归一化后的 ADPI 和 ε 所占的比例。由于热舒适性仍旧是主要的影响因素,因此选取 $\lambda = 0.7$ 。将已计算得到的不同送风速度下的 ADPI 与 ε 值代入式(11),得到相应的 $P(v)$ 值,如图 6 中每一个离散点所示。

由于数值模拟中不可能将所有的送风速度均进行模拟,因此为求出桥载空调的最优送风速度,将所得的离散 $P(v)$ 值进行高斯拟合,得到桥载空调最优送风速度评价函数与送风速度之间的函数关系式,通过该函数关系式来计算桥载空调的最优送风速度。

经过高斯拟合后的 $P(v)$ 为:

$$P(v) = 1.344e^{-\left(\frac{v-1.09}{0.773}\right)^2} + 0.4364e^{-\left(\frac{v-2.022}{0.2784}\right)^2} \quad (12)$$

拟合曲线如图 6 中曲线所示。

求出式(12)的 $P(v)$ 最大值所对应的速度 v 为 1.09 m/s,该速度即为桥载空调最优的送风速度。因此当桥载空调提供的送风速度为 1.09 m/s,既能够使客舱内热舒适性较好而且 PM₁₀ 排污效率较高。确定出该最优送风速度,可为桥载空调的控制提供参考。

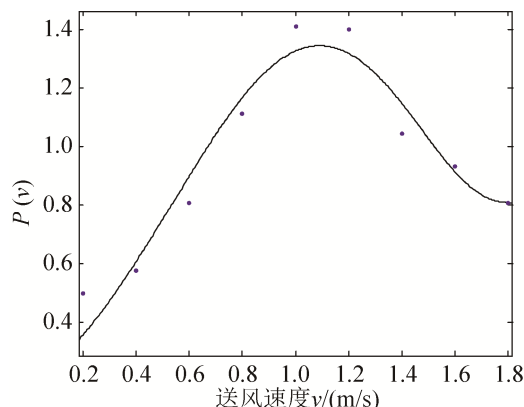


图 6 $P(v)$ 与 v 的关系图

Fig. 6 Relationship between $P(v)$ and v

5 结论

本文建立了 A320 飞机头等客舱的模型,模拟了桥载空调不同的送风速度下客舱内速度场、温度场、PM₁₀ 浓度场的分布情况。

基于客舱热舒适指标和客舱污染物去除有效性指标,构造了最优送风速度评价函数,由此得到桥载空调的最优送风速度为 1.09 m/s。

桥载空调的最优送风速度能够使客舱内热舒适性较好且 PM₁₀ 排污效率较高,使客舱环境最优。而且能够为桥载空调机组的控制提供依据,使其节能减排效果更佳。

参考文献:

- [1] 陈军. 桥载设备替代飞机 APU 的节能减排成效[J]. 节能与环保, 2012, 30(10): 54-56.
Chen Jun. The results of energy conservation and emissions reduction of bridge equipment instead of APU. Energy Conservation & Environmental Protection, 2012, 30(10): 54-56.
- [2] Jan Fišer, Miroslav Jicha. Impact of air distribution system on quality of ventilation in small aircraft cabin [J]. Building and Environment(S0360-1323), 2013, 67(11): 171-182.
- [3] Aakash C Rai, Chen Qingyan. Simulations of ozone distributions in an aircraft cabin using computational fluid dynamics [J]. Atmospheric Environment (S1352-2310), 2012, 51(7): 348-357.
- [4] 孙贺江, 吴尘, 安璐. 大型客机座舱混合送风形式的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2013, 30(3): 439-444.
Sun Hejiang, Wu Chen, An Lu. Numerical study of

- mixing ventilation systems in commercial aircraft cabin[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(3): 439-444.
- [5] 李先庭, 赵彬. 室内空气流动数值模拟[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
Li Xianting, Zhao Bin. Numerical analysis on indoor air flow[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [6] 胡杰桦, 谷正气, 何忆斌, 等. 汽车尾部流场湍流模型数值分析与实验研究[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(2): 321-325.
Hu Jiehua, Gu Zhengqi, He Yibin, et al. Numerical Simulation and Experimental Research on Turbulent Wake of Vehicle [J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(2): 321-325.
- [7] 邱兵, 白国银, 李丽丽, 等. 民用飞机客舱空气质量标准限值及检测方法的比较[J]. 环境卫生学杂志, 2013, 40(6): 515-518.
Qiu Bing, Bai Guoyin, Li Lili, et al. Comparative Study of Limit Values and Test Methods for Civil Aircraft Cabin Air Quality Standards[J]. Journal of Environmental Hygiene, 2013, 40(6): 515-518.
- [8] American Society of Heating, Refrigerating, Air-Conditioning Engineers. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004 Thermal Environment Condition for Human Occupancy[S].
- [9] 刘俊杰, 李炳焜, 裴晶晶, 等. 不同季节飞机客舱环境的主观实验研究[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2015, 61(2): 103-110.
Liu Junjie, Li Binghua, Pei Jingjing, et al. Subjective and Objective Experimental Study of Cabin Environment in Different Seasons[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2015, 61(2): 103-110.
- [10] 易赛莉. 双层地铁换乘站性能化火灾烟气虚拟仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(4): 681-686.
Yi Saili. Performance-based Fire Smoke Virtual Reality Simulation and Analysis of Exchanging Subway Station [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(4): 681-686.
- [11] 季益斌, 庞丽萍, 王浚. 现役民航客舱热舒适评价[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 306-309.
Ji Yi-bin, Pang Liping, Wang Jun. Assessment of thermal comfort for aircraft cabin environment[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1): 306-309.
- [12] 林家泉, 梁小贝, 陈维兴, 等. A320 飞机客舱热舒适性的数值模拟研究[J]. 流体机械, 2015, 44(5): 75-78.
Lin Jiaquan, Liang Xiaobei, Chen Weixing, et al. Numerical Simulation Study of the A320 Aircraft Cabin Thermal Comfort[J]. Fluid Machinery, 2015, 44(5): 75-78.
- [13] 崔勇, 关长涛, 万荣, 等. 人工鱼礁流场效应的数值模拟与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(23): 7393-7396.
Cui Yong, Guan Changtao, Wan Rong, et al. Research and Numerical Simulation on Features of Flow Field around Artificial Reefs[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(23): 7393-7396.

(上接第 163 页)

- [7] 蒲明, 吴庆宪, 姜长生, 等. 新型快速动态终端滑模反步控制[J]. 系统工程学报, 2012(5): 575-582.
Pu M, Wu Q X, Jiang C S, et al. New Fast Dynamic Terminal Sliding Mode Backstepping Control[J]. Journal of Systems Engineering, 2012(5): 575-582.
- [8] Mohammadi M, Shahri A M. Adaptive Nonlinear Stabilization Control for a Quadrotor UAV: Theory, Simulation and Experimentation[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems(S0921-0296), 2013, 72(1):105-122 .
- [9] Jeong S H, Seul J, Tomizuka M. Attitude control of a quad-rotor system using an acceleration-based disturbance observer: An empirical approach[C]// Proceedings of the International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), USA: IEEE/ASME, 2012: 916-921.
- [10] Liu C, Tang S J, Yang S Y, et al. Fuzzy Sliding-mode Control for Quad-rotor Trajectory Tracking, Fuzzy Sliding-mode Control for Quad-rotor Trajectory Tracking [C]// International Conference on Mechatronics and Control Engineering. Switzerland: Trans Tech Publications, 2013: 1593-1600.
- [11] 马悦悦, 唐胜景, 郭杰. 基于 ESO 的复合滑模面非奇异 terminal 滑模控制[J]. 控制与决策. 2015(1): 76-80.
Ma Y Y, Tang S J, Guo J. Nonsingular terminal sliding mode control with compound sliding surface based on ESO[J]. Control and Decision(S1001-0920), 2015(1): 76-80.