

12-12-2019

Numerical Simulation of Spread and Infection Risk of Respiratory Pathogens in the Aircraft Cabin

Jiaquan Lin

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

Fengshan Sun

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

Yachong Li

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 Spread and Infection Risk of Respiratory Pathogens in the Aircraft Cabin

Abstract

Abstract: In order to study the transmission law of respiratory pathogens through the breath of the sick passengers in the aircraft cabin and reduce the risk of infection, the numerical model of respiratory pathogens spread in Boeing737 economy cabin is established. The dynamic propagation process of respiratory pathogens released by the sick passenger is simulated. The risk of infection for other passengers is obtained. *Taking SEI (Susceptible Exposure Index) as an evaluation index, the seats with the least risk of infection for other passengers are obtained based on the simulated data by changing the seats of the sick passengers. Some seats of the sick passengers with the highest risk of infection for the remaining passengers are analyzed.* The results provide a theoretical basis for studying respiratory pathogen transmission and the prediction of infection risk in the aircraft cabin.

Keywords

aircraft cabin, numerical simulation, respiratory pathogens, transmission law, infection risk

Recommended Citation

Lin Jiaquan, Sun Fengshan, Li Yachong. Numerical Simulation of Spread and Infection Risk of Respiratory Pathogens in the Aircraft Cabin[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(8): 1541-1547.

客舱内呼吸道病原体传播与感染风险数值模拟

林家泉, 孙凤山, 李亚冲

(中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: 为研究呼吸道病原体通过患病乘客的呼吸在飞机客舱内的传播规律, 降低疾病的感染风险, 构建了呼吸道病原体在 Boeing737 经济舱内传播的数值模型, 模拟了患病乘客通过呼吸释放呼吸道病原体后, 呼吸道病原体的动态传播过程以及客舱中其他乘客的被感染风险。以 *SEI (Susceptible Exposure Index)* 作为评价指标, 通过改变患病乘客的座位, 依据仿真数据得出使其他乘客感染风险最小的座位, 并分析出患病乘客位于某些座位时, 其余乘客的被感染风险最大。所得结果为研究客舱呼吸道病原体传播规律与感染风险的预测提供理论依据。

关键词: 飞机客舱; 数值模拟; 呼吸道病原体; 传播规律; 感染风险

中图分类号: V245.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 08-1541-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.18-0701

Numerical Simulation of Spread and Infection Risk of Respiratory Pathogens in the Aircraft Cabin

Lin Jiaquan, Sun Fengshan, Li Yachong

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

Abstract: In order to study the transmission law of respiratory pathogens through the breath of the sick passengers in the aircraft cabin and reduce the risk of infection, the numerical model of respiratory pathogens spread in Boeing737 economy cabin is established. The dynamic propagation process of respiratory pathogens released by the sick passenger is simulated. The risk of infection for other passengers is obtained. Taking *SEI (Susceptible Exposure Index)* as an evaluation index, the seats with the least risk of infection for other passengers are obtained based on the simulated data by changing the seats of the sick passengers. Some seats of the sick passengers with the highest risk of infection for the remaining passengers are analyzed. The results provide a theoretical basis for studying respiratory pathogen transmission and the prediction of infection risk in the aircraft cabin.

Keywords: aircraft cabin; numerical simulation; respiratory pathogens; transmission law; infection risk

引言

随着民航事业的蓬勃发展, 乘坐飞机出行的人数逐年增加。在 2017 年, 全球范围内乘坐飞机出

行的旅客数量达 41 亿人次。因此, 为乘客提供健康的乘机环境至关重要。目前大部分商业飞机将客舱内的部分空气由高效空气过滤器和气体过滤器过滤后送回到飞机客舱中^[1]。

研究表明, 患病乘客在呼吸时, 含有呼吸道病原体的液滴会被排出到空气中, 其中直径 $>5\mu\text{m}$ 的液滴可能会沉积到其他乘客的粘膜上引发感染^[2], 而较小的液滴, 在温暖干燥的空气中迅速蒸发成液



收稿日期: 2018-10-22 修回日期: 2019-03-12;
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; 孙凤山(1994-), 男, 辽宁, 硕士生, 研究方向为飞机客舱系统建模与仿真。

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

• 1541 •

滴核后仍具有传染性,同时液滴核能够悬浮在空气中较长时间,并且完成较长距离的传播感染^[3]。因此,呼吸道疾病的传播(如麻疹、流感、结核病等病毒性疾病)对客舱中的其余乘客的健康构成了较大的威胁^[4]。

关于不同的环境下呼吸道病原体的传播规律与感染风险的预测已经产生了许多研究成果,文献[5]提出了一种新的数学模型来预测空气中传播的呼吸道病原体的感染风险。采用新的数学模型分析了 2003 年 SARS 流行期间在香港某医院爆发的一场非典型肺炎,研究了医院病房内呼吸道病原体在空气中的传播规律,得出气流与非典型肺炎感染之间的关系。文献[6]针对轮船上呼吸道疾病发病率高的情况,采用计算流体力学方法模拟研究了乘客在密闭船舱内咳嗽产生的呼吸道病原体在空气中的传播规律,得出加大通风量在置换通风模式下可更好地控制病原体的传播感染。文献[7]研究了在建筑物中呼吸道病原体在空气中的传播规律,得出感染风险大小与传播途径有关。现有文献对飞机客舱环境下研究呼吸道病原体的传播规律,以及预测呼吸道病原体的感染风险研究成果较少,因此,本文基于 Boeing737 经济舱真实尺寸,应用 CFD 技术建立飞机客舱仿真模型,建立了飞机客舱模型和 30 名乘客的人体模型,通过 Ansys Workbench-Fluent 仿真平台对客舱内呼吸道病原体传播规律进行数值模拟,根据所得到的模拟仿真结果分析出其余乘客的被感染风险,为研究呼吸道病原体在密闭客舱内的传播规律与感染风险的预测提供理论依据。

1 数值模型

1.1 湍流模型

对客舱内空气湍流流动进行模拟,依据文献[8]选取 RNG(Renormalization Group) $k-\varepsilon$ 模型。

RNG $k-\varepsilon$ 模型控制方程如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(v + v_T) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

式中: $\bar{u}_i$ 为 x_i 方向的平均速度(m/s); x_i 代表 3 个垂直坐标轴的坐标,其中 $i=1,2,3$; $\bar{u}_j$ 为 x_j 方向的平均速度(m/s); $\bar{P}$ 为平均压力(Pa); v 为分子粘性系数(m^2/s); v_T 为涡粘性系数(m^2/s)。

涡粘性系数表达式如下:

$$v_T = c_\mu k^2 / \varepsilon \quad (3)$$

式中: k (m^2/s^2), ε ($\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{s})$) 分别为湍动能和耗散率; c_μ 为常数。

1.2 呼吸道病原体传播模型

欧拉模型着眼于空间的点,是考察空间中 1 个点上的物理量及其变化。在欧拉模型中,FLUENT 将不同的相处理成互相贯穿的连续介质,可应用于各种稳态和非稳态的气流模型^[9]。欧拉模型将客舱中的患病乘客所释放出的呼吸道病原体和空气看成 2 种流体,在欧拉坐标系下观察病原体和空气的相互作用,能够得出呼吸道病原体在客舱中的浓度分布及其传播规律。本文以 N_2O 作为示踪气体代替患病乘客呼出的呼吸道病原体^[10]。

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho C (\bar{u} + \bar{v}_s)] = \nabla \cdot (\Gamma \nabla C) + S_C \quad (4)$$

式中: t 是时间; C 是 N_2O 浓度; ρ 是客舱空气密度; ∇ 是哈密顿算子; $\bar{u}$ 是 3 个方向上的平均空气速度分量; Γ 是 N_2O 的扩散系数; S_C 是 N_2O 的源项; $\bar{v}_s$ 是 N_2O 的沉降速度。

Γ 是 N_2O 的扩散系数:

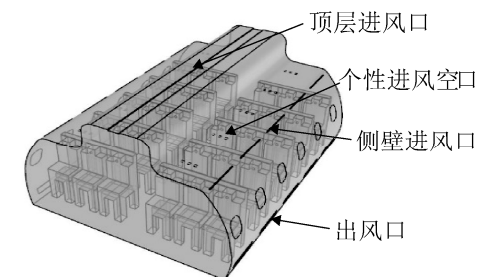
$$\Gamma = \rho(v_p + D) \quad (5)$$

式中: v_p 是 N_2O 的湍流扩散系数; D 是 N_2O 的布朗扩散率。

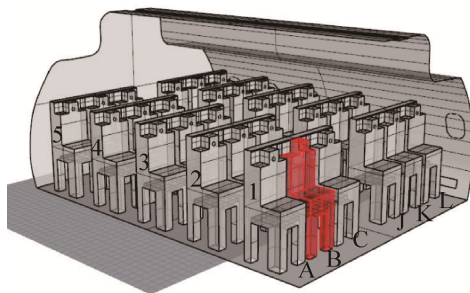
1.3 客舱 CFD 模型

选择 Fluent 进行客舱内呼吸道病原体传播规

律的模拟,建立了 Boeing737 经济舱模型,模型进风口共有 42 个,其中顶部有 2 个长条形进风口,侧壁顶部有 10 个长条形进风口,座椅顶部有 30 个个性进风口,出风口共有 10 个,位于客舱侧壁底部,5 排 30 个座椅,由于真实的座椅模型较为复杂,为简化建模和计算过程,提升工作效率,在进行客舱建模时,选取简化后的座椅模型代替真实的座椅。且文献[8,11]也对座椅模型做了近似的简化处理,并通过实验验证了模型的精度,得出所产生的仿真结果存在误差,但误差在合理范围内。如图 1(a)所示。客舱内有 5 排,6 列,满员情况下共 30 名乘客,患病乘客被标注为红色,以第 1 排 B 列乘客为例。如图 1(b)所示。



(a) 客舱进风口与出风口分布



(b) 客舱内乘客位置分布

图 1 Boeing737 飞机客舱模型
Fig. 1 Boeing737 aircraft cabin model

1.4 边界条件

密闭的飞机客舱内空气流动是由空调系统以及客舱表面和乘客的边界条件形成的,本文边界条件设置情况如下^[12-15]。

(1) 送风口边界条件: 送风温度为 295.15 K, 送风量为 1 200 m³/h, 湍流强度取 5%。

(2) 人体边界条件: 人体热边界条件为固定热流量, 发热量为 80 W/m², 客舱内所有乘客的嘴巴开口大小均为 4 cm², 体表温度为 32℃, 患病乘客口腔的温度为 37.5℃, 其余乘客的口腔的温度为 36.5℃。

2 采样点的选取

为便于观察出密闭客舱内,患病乘客在不同座位通过呼吸向空气中释放呼吸道病原体后,呼吸道病原体的传播规律,以及仿真数据的采集,对客舱中的 30 个座位进行 1~30 顺序编号。对客舱内所有乘客的呼吸区域截取横截面,进行呼吸道病原体浓度检测,检测截面距客舱地板高度为 110 cm,在每个横截面上距乘客口腔 5 cm 处取 30 个采样点,采集乘客呼吸区域的呼吸道病原体浓度,采样结果由 Fluent 软件自动产生,保证了检测精度。上述所设置的检测截面和采样点的设置依据参考文献[16]。检测截面与采样点如图 2 所示。

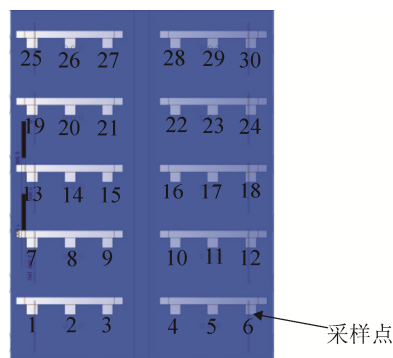


图 2 检测截面与采样点

Fig. 2 Cross-sectional view of 30 sampling points

3 仿真结果处理与讨论

3.1 SEI 指标

空气中传播的呼吸道病原体存在于患者通过呼吸时产生的液滴中,同时会被易感染者吸入。在飞机客舱内,来自空调系统的气流与客舱设备和乘客相互作用后,导致客舱中气流和含有呼吸道病原体的液滴传播是不均匀的。因此,为分析出位于客舱内不同座位的乘客的被感染风险,需要研究乘客

对空气中散布的呼吸道病原体的相对摄入量。采用 $SEI^{[10]}$ 指标量化乘客对呼吸道病原体的相对摄入量, 进而得出乘客被感染的风险, 该指标的阈值为 1, 乘客的 SEI 指标值超过 1 时, 其被感染风险较大, SEI 指标计算表达式如下:

$$SEI = (C_i - C_s) / (C_r - C_s) \quad (6)$$

式中: C_i 是乘客吸入的呼吸道病原体浓度, C_r 是乘客呼出的呼吸道病原体浓度, C_s 是送风气体中含有的呼吸道病原体浓度。

本文以 N_2O 作为示踪气体代替患病乘客呼出的呼吸道病原体, 患病乘客呼出气体的 N_2O 体积分数为 4%^[10], 在仿真中乘客呼出的呼吸道病原体浓度和吸入的呼吸道病原体浓度是取 4 个呼吸周期(16 s)的平均浓度。由于客舱通风管道内设有高效空气过滤器 HEPA (High Efficiency Particulate Air filter), 高效空气过滤器 HEPA 能够 100% 去除直径大于 0.3 μm 的颗粒, 通常含有呼吸道病原体的液滴直径 > 1 μm ^[1], 因此呼吸道病原体能够完全被 HEPA 滤除, 本文将客舱空调系统送风气体中含有呼吸道病原体浓度设为 0, 即 C_s 为 0, 因此在这种情况下 SEI 指标计算表达式如下:

$$SEI = C_i / C_r \quad (7)$$

式中: C_i 是乘客吸入的呼吸道病原体平均浓度, C_r 是乘客呼出的呼吸道病原体平均浓度。

3.2 呼吸道病原体的动态传播过程分析

为研究患病乘客位于不同座位时对其余乘客的影响, 在同一空调送风条件下, 通过对患病乘客从 1 号座位到 30 号座位位置的改变, 进行瞬态模拟。仿真过程反应出患病乘客在不同座位上通过呼吸释放呼吸道病原体的动态传播过程, 得出呼吸道病原体的传播规律。同时, 计算稳态条件下其余乘客的 SEI 指标值, 用于评估其余乘客的被感染风险。在分析和处理 SEI 指标值后, 得出患病乘客的最佳座位, 即患病乘客在某些座位乘坐时, 其余乘客的 SEI 指标值 > 1 的人数最少, 并分析出患病乘客位于某些座位时, 其余乘客的 SEI 指标值 > 1 的人数最多, 需要避免患病乘客在这些座位乘坐。本

文以患病乘客位于 15 号座位为例, 对患病乘客呼吸时间为 16 s, 32 s, 48 s...160 s 进行模拟仿真, 展现呼吸道病原体的动态传播过程, 得到的乘客呼吸区域截面图, 如图 3 所示。

为评价出其余乘客的被感染风险, 计算出其余乘客稳态下的 SEI 指标值。以患病乘客处于飞机客舱 15 号座位通过呼吸释放呼吸道病原体为例, 对采集到的 SEI 指标值进行分析后得出其余 29 名乘客的 SEI 指标值的变化情况与呼吸时间 T 的关系, $T=112$ s, 128 s, 144 s, 160 s, SEI 指标值变化如图 4 所示, 其中横轴为乘客座位号, 纵轴表示乘客的 SEI 指标值。

由图 4 可得出在呼吸时间 T 达到 144 s 后, 其余 29 名乘客的 SEI 指标值随时间的变化基本稳定, 表明 $T=144$ s 时, 乘客的 SEI 指标达到稳定状态。为了体现出患病乘客的特殊性, 设定患病乘客的 SEI 指标值为 10。得出当患病乘客处于飞机客舱 15 号座位时, 位于 8、9、10、13、14、16、18 号座位的乘客 SEI 指标值 > 1, 即位于这些位置的乘客被感染风险较大。其中由于在飞机客舱内含有 30 个个性进风口, 14 号乘客位于第 3 排, B 列, 由于受到其上方的个性进风口送风影响, 15 号患病乘客产生的病原体传播至 14 号乘客检测区域的浓度较低, 同时, 16 号乘客受到顶层进风口送风影响, 导致 15 号患病乘客产生的病原体传播至 16 号乘客检测区域的浓度较低。

为研究患病乘客的最佳座位的选取, 同时, 避免患病乘客在某些座位乘坐时, 其余乘客的被感染风险最大。对患病乘客位于 1 到 30 号的不同座位时, 释放呼吸道病原体的过程进行模拟仿真, 分析得出其余乘客稳态下的 SEI 指标值。为了便于观察患病乘客位于不同的座位时, 其余乘客稳态下的 SEI 指标值超过 1 的人数, 患病乘客所在的座位号与其余乘客 SEI 指标值 > 1 的人数的关系如图 5 所示, 横轴表示患病乘客所在座位号, 纵轴表示其余乘客的 SEI 指标值 > 1 的人数, SEI 指标值 > 1 表示被感染风险较大。

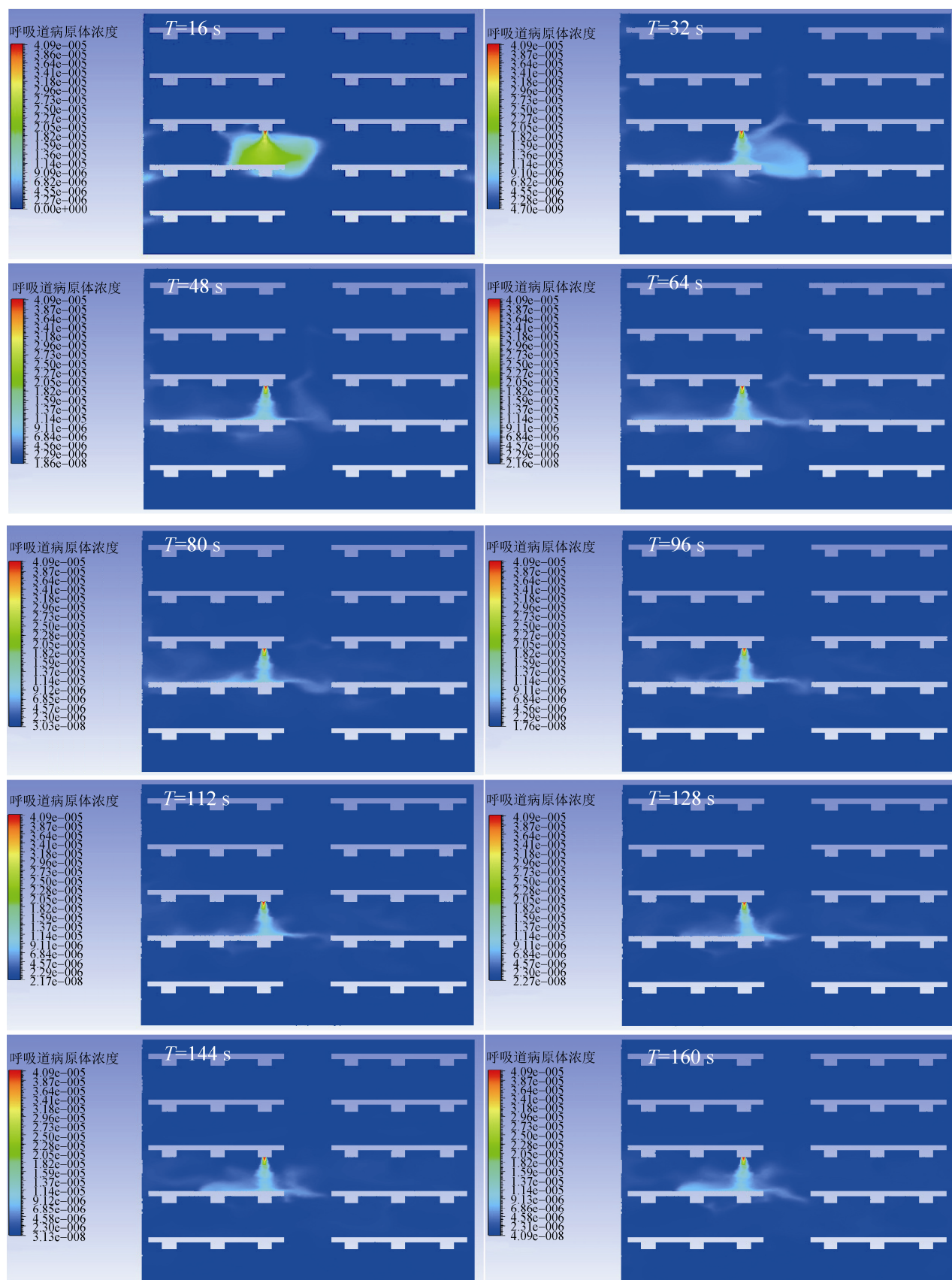


图 3 呼吸道病原体的动态传播过程
Fig. 3 Dynamic transmission of respiratory pathogen

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

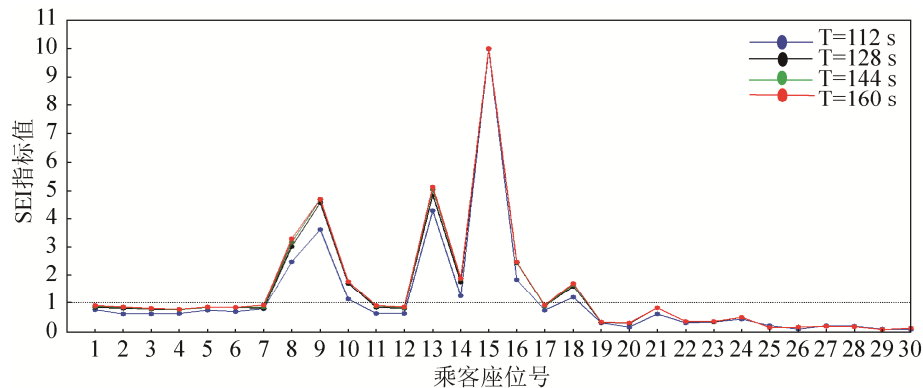


图4 $T=112\text{ s}$, 128 s , 144 s , 160 s 与 SEI 指标值的变化关系
Fig. 4 The relationship between $T=112\text{ s}$, 128 s , 144 s , 160 s and SEI index values

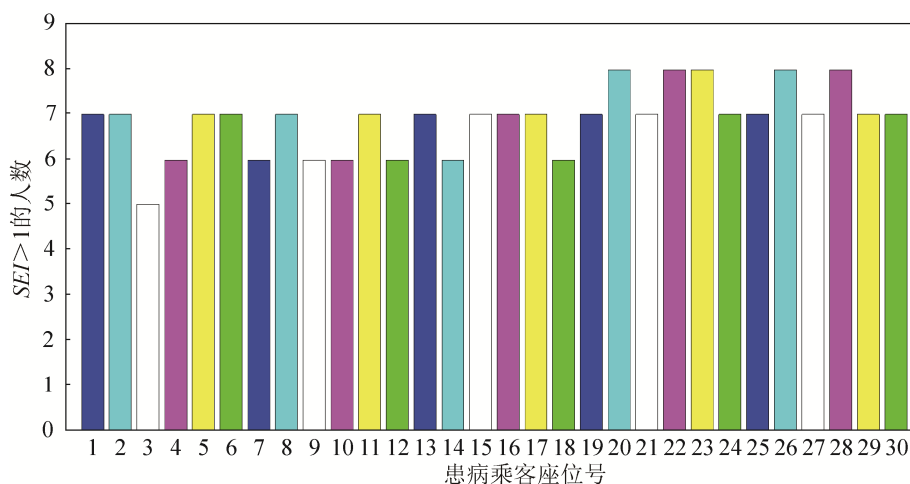


图5 其余乘客稳态下的 $SEI>1$ 的人数
Fig. 5 The number of $SEI>1$ of the remaining passengers under steady state

结合图5得出,当患病乘客位于3号座位时,其余乘客稳态下的 SEI 指标值 >1 的人数为5人,当患病乘客位于4,7,9,10,12,14,18号座位时,其余乘客稳态下的 SEI 指标值 >1 的人数均为6人,当患病乘客位于20,22,23,26,28号座位时,其余乘客稳态下的 SEI 指标值 >1 的人数均为8人,当患病乘客位于剩余座位时,其余乘客稳态下的 SEI 指标值 >1 的人数均为7人。当患病乘客位于3号座位时,其余29名乘客中感染风险较大的人数为5人,即其余29名乘客的 SEI 指标 >1 的人数为5人占其余乘客总人数(29人)的比例为 $5/29$,即患病乘客位于3号座位时,其余乘客被感染风险最小;当患病乘客位于20,22,23,26,28号座位时,其余29名乘客中感染风险较大的人数为8人,占其余乘客总人数(29人)的比例为 $8/29$,其余

乘客被感染风险最大。

4 结论

建立了 Boeing737 经济舱模型和30名乘客的人体模型,模拟仿真了患病乘客位于客舱30个不同座位时,通过呼吸释放呼吸道病原体的动态传播过程,得出了呼吸道病原体在客舱内的传播规律。

基于其余29位乘客的 SEI 指标值变化情况与呼吸时间的关系,得到其余乘客稳态下的 SEI 指标值。对仿真结果进行分析和处理后,得出患病乘客位于3号座位时,其余乘客稳态下的 SEI 指标值 >1 的人数最少,占其余乘客总人数的比例为 $5/29$,即其余乘客被感染的风险最低,因此,3号座位为患病乘客的最优乘坐座位;得出患病乘客位于20,22,23,26,28号座位时,其余乘客稳态下的 SEI

指标值>1 的人数最多, 占其余乘客总人数的比例为 8/29, 其余乘客被感染的风险最高, 当飞机客舱有患病乘客时, 乘务人员需要尽量避免将患病乘客安排在这 5 个座位。

该研究结果得出客舱内呼吸道病原体传播规律。同时, 通过改变患病乘客的座位, 依据仿真数据得出使其他乘客感染风险最小的座位, 并分析出患病乘客位于某些座位时, 其余乘客的被感染风险最大, 为客舱内呼吸道病原体感染风险的预测提供理论依据, 在一定程度上预防了呼吸道病原体传播, 有效的减少了交叉感染病例的发生。

描述更多个体之间复杂关系, 以及预测更多个体随着时间受感染的风险, 是研究呼吸道病原体传播规律与感染风险预测的热点之一。

参考文献:

- [1] 王光秋, 汲生成. 病菌在机舱内传播分析综述[J]. 航空学报, 2015, 36(8): 2577-2587.
Wang Guangqiu, Ji Shengcheng. Overview of pathogen transmission in civil aircraft cabins[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(8): 2577-2587.
- [2] Ai Z T, Melikov A K. Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: a review[J]. Indoor Air (S0905-6947), 2018, 28(4): 500-524
- [3] Li Y, Zhao B. Application of building simulation tools for studying airborne infection and its control[J]. Building Simulation (S1996-3599), 2012, 5(1): 3-4.
- [4] Hertzberg V S, Weiss H, Elon L, et al. Behaviors, movements, and transmission of droplet-mediated respiratory diseases during transcontinental airline flights [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (S0027-8424), 2018, 115(14): 3623-3627.
- [5] Qian H, Li Y, Nielsen P V, et al. Spatial distribution of infection risk of SARS transmission in a hospital ward[J]. Building & Environment (S0360-1323), 2009, 44(8): 1651-1658.
- [6] 郑立捷, 许建, 吴方良, 等. 通风模式对住舱人员咳嗽液珠扩散过程的影响[J]. 中国舰船研究, 2016, 11(2): 12-20.
Zheng Lijie, Xu Jian, Wu Fangliang, et al. Influences of ventilation modes on the coughing droplet dispersion process in a cruise cabin[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2016, 11(2): 12-20.
- [7] Wei J, Li Y. Airborne spread of infectious agents in the indoor environment[J]. American Journal of Infection Control (S0196-6553), 2016, 44(9): 102-108.
- [8] 林家泉, 李弯弯. 基于 PMV-PPD 的地面空调最佳送风速度[J]. 航空学报, 2017, 38(8): 72-79.
Lin Jiaquan, Li Wanwan. Best wind speed of ground air conditioning system based on PMV-PPD[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(8): 72-79.
- [9] Wang M, Lin C H, Chen Q. Advanced turbulence models for predicting particle transport in enclosed environments[J]. Building & Environment (S0360-1323), 2012, 47(1): 40-49.
- [10] Liu L, Li Y, Nielsen P V, et al. Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people [J]. Indoor Air (S0905-6947), 2016, 27(2): 452-462.
- [11] 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.
- [12] 林家泉, 王瑞婷. A320 飞机客舱热舒适性及 PM₁₀ 浓度分布的数值模拟[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(1): 164-170.
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.
- [13] Gupta J K, Lin C, Chen Q. Transport of expiratory droplets in an aircraft cabin[J]. Indoor Air (S0905-6947), 2011, 21(1): 3-11.
- [14] 林家泉, 李弯弯, 王瑞婷, 等. 基于飞机客舱空气品质的桥载空调送风优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2017, 43(11): 2259-2265.
Lin Jiaquan, Li Wanwan, Wang Ruiting, et al. Optimization of air supply for bridge load air conditioning based on aircraft cabin air quality[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(11): 2259-2265.
- [15] 林家泉, 王瑞婷, 皮骏, 等. 飞机客舱火灾阴燃阶段 CO 扩散规律的数值模拟[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(3): 509-515.
Lin Jiaquan, Wang Ruiting, Pi Jun, et al. Numerical Simulation of Diffusion Regularity of CO in Fire Smoldering Phase in Aircraft Cabin[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(3): 509-515.
- [16] Acikgoz M B, Akay B, Miguel A F, et al. Airborne Pathogens Transport in an Aircraft Cabin[C]. Defect & Diffusion Forum. Switzerland: Trans Tech Publications, 2011, 312-315: 865-870.