

飞行器舱室突发污染源散发强度动态辨识

常海娟¹, 庞丽萍¹, 曲洪权², 王 浚¹

(1. 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京 100191; 2. 北方工业大学信息工程学院, 北京 100041)

摘 要: 诸如载人航天器和大型飞机等密闭微环境, 随着人员停留时间的延长, 舱室突发污染问题已成为危害工作人员生命安全的主要因素, 所以迫切需要开展突发不确定污染源辨识及危害性预测研究技术, 以提高上述密闭环境主动应对突发污染的能力。本文提出一种新的浓度离散随机模型, 并建立敏感性分析方法实现污染源定位及强度初步估计, 之后利用隐式与显式卡尔曼滤波相结合的方法同时完成污染源散发特性的动态辨识及舱室空气污染物的浓度预测。上述研究能够实现污染源散发特性的快速准确辨识。仿真结果证实了该算法的有效性。

关键词: 污染源辨识; 浓度预测; 浓度离散随机模型; 卡尔曼滤波

中图分类号: V851 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1328(2010)02-0593-05

DOI: 10.3873/j.issn.1000-1328.2010.02.045

0 引言

随着载人航天器及大型民机等飞行器飞行时间的延长, 舱室突发污染问题日益受到人们的重视, 因为此时常规配置并不能及时有效地应对突发污染, 所以迫切地需要开展突发不确定污染源特性辨识(定位及强度分析)方法研究, 实现快速的污染定位及危害预测, 提高该类密闭微环境主动应对突发污染的能力, 保证人员生命安全。

国外在污染特性辨识方面的研究刚刚起步, 目前研究较多的方法主要包括基于解析解、基于概率和直接 CFD 的逆问题求解方法^[1,2]。将基于概率的方法和直接 CFD 方法相结合, 用于辨识密闭空间污染源特性已经成为一个主要研究方向。美国普渡大学的 Qingyan Chen 和国内天津大学 Zhiqiang Zhai 等学者^[3,4]采用该联合方法, 针对飞机座舱密闭空间气体污染源辨识进行了研究, 获得了一些初步的进展。上述研究为污染源特性辨识提供了一种思路, 但是研究也表明上述计算方法过于依赖稳定准确的速度场, 并且多围绕利用计算流体力学 CFD 方法预测浓度场^[5], 在污染源散发强度的确定上仍存在着较大的误差, 并且计算耗时较长, 需要探讨新的方法和技术解决实时浓度预测及污染源特性辨识难题。

本文提出一种新的浓度离散随机模型, 在采用

敏感性分析算法实现污染源定位后, 利用隐式与显式卡尔曼滤波相结合的方法同时完成污染源散发强度动态估计及污染物浓度实时预测。

1 新的浓度离散随机模型

为了实现污染源定位及强度辨识, 本文从对流-扩散方程出发, 建立一种新的浓度离散传播三维模型, 该模型引入随机噪声, 用以克服风速场波动等引起的系统模型误差。

对于不可压缩流体, 可采用 SIMPLE 算法获得飞行器密闭空间速度场分布。

污染浓度 C 方程满足:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (uC) = \nabla \cdot [\Gamma \cdot \text{grad}(C/\rho)] + S \quad (1)$$

式中 u 为速度, Γ 为扩散系数(kg/m/s), ρ 气体密度, S 为污染源(是位置和强度的函数)。

本文采用控制容积积分法导出(1)式的离散方程, 选用乘方格式的离散形式, 可将浓度方程写成如下方程组^[4,5]:

$$A_1 C^{n+1} = A_2 C^n + S \quad (2)$$

为了提高计算效率, 本文采用 Douglas 格式^[9]的交替方向隐式方法(ADI)求解三维方程组。该方法在 x 方向用隐式求解而使 y, z 方向成为显式, 然后再类似地在 y, z 方向各自用隐式求解一次。因而,

$$S_{u, t+1|t} = S_{u, t} \quad (11)$$

一步最优预测估计误差方差

$$P_{t+1|t} = \begin{bmatrix} NPN^T + P_s + Q & WP_sW^T + Q \\ WP_sW^T + Q & WP_sW^T + Q \end{bmatrix} \quad (12)$$

最优滤波增益方程:

$$K_{t+1} = P_{t+1|t}H_1^T(H_1P_{t+1|t}H_1^T + R)^{-1} \quad (13)$$

K 为 $K_{t+1} = (K_1^T, K_2^T)^T$ 。

对浓度和污染强度的最优滤波估计方程:

$$MC_{t+1} = \hat{Y}_{t+1|t} + K_1(z_{t+1} - H_{11}\hat{Y}_{t+1|t}) \quad (\text{隐式}) \quad (14)$$

$$S_{t+1} = S_{t+1|t} + K_2(z_{t+1} - H_{11}\hat{Y}_{t+1|t}) \quad (\text{显式}) \quad (15)$$

滤波估计误差方差阵:

$$P_{t+1|t+1} = (I - KH_1)P(I - KH_1)^T + KRK^T \quad (16)$$

由式(14)和(15)可以获得浓度和污染源强度的动态最优滤波估计值,从而同时完成污染源散发特性的动态辨识及污染物的浓度预测。

4 突发污染源散发特性辨识仿真分析

本文以某飞机座舱为例说明如何实现突发污染源定位和散发强度辨识。

舱内 CO₂ 的初始浓度和新风浓度为 0.5g/m³。在位置 A 出现突发污染源,呈线型变化,释放速度随时间变化函数为

$$S = \begin{cases} 15 & t \leq 20 \\ 15 - 0.2(t - 20) & 20 < t \leq 60 \\ 7 & t > 60 \end{cases} \quad (17)$$

选用四个测量噪声均为 1% 的传感器,分别布置在图中位置 B₁、B₂、B₃、B₄。

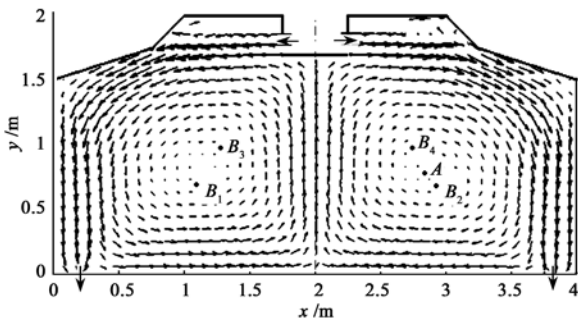


图 1 飞机座舱内流场分布
Fig.1 Air flow in the cabin

经敏感性算法分析,确定点 A 处方差最小,为 0.2004,及污染散发强度为 15.0024 g/(m³·s)。

将污染源位置和初步的散发信息输入到卡尔曼

滤波器,进一步预测污染源强度动态变化以及舱室污染物浓度的动态变化,如图 2~5 所示。

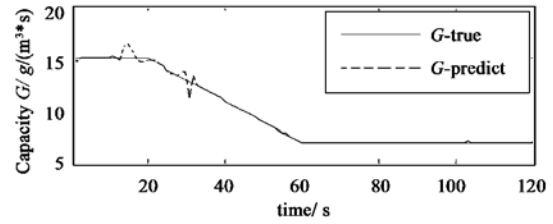


图 2 卡尔曼滤波强度跟踪

Fig.2 Strength tracking performance of kalman filter

图 2 中实线表示污染源的实际散发速率,虚线表示卡尔曼滤波估计的污染源散发速率。图 3 为散发强度的估计误差 RMSE。可见,算法对污染源散发强度的估计相当精确。

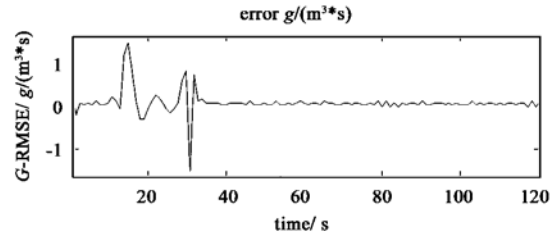


图 3 卡尔曼滤波强度跟踪的 RMSE

Fig.3 Estimation error RMSE of Kalman filter

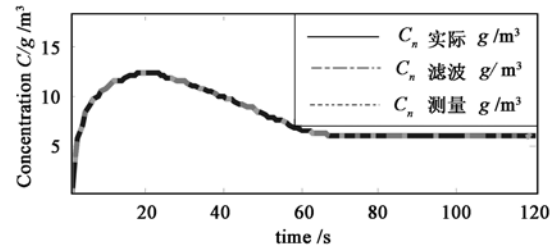


图 4 传感器 #2 位置污染物浓度预测

Fig.4 Predicted concentration at sensor #2

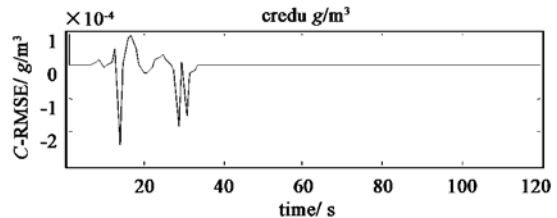


图 5 传感器 #2 位置污染物浓度预测 RMSE

Fig.5 Estimation error RMSE of concentration at sensor #2

图 4 中黑色实线表示传感器 #2 位置污染物浓度随时间变化的曲线,绿色虚线表示传感器测量值,红色

双划线表示卡尔曼滤波估计该点的浓度变化。图 5 给出了算法对浓度的估计误差 RMSE, 误差不超过 5%。

另外, 下图图 6 为 $t = 120$ s 时刻舱室浓度分布真值, 图 7 为 $t = 120$ s 时刻采用卡尔曼滤波估计出的浓度分布, 图 8 为 $t = 120$ s 时刻浓度估计误差。可知: 最大误差不超过 0.15 g/m^3 。所以利用本文提出的算法能够对空间各点浓度进行精确预测。

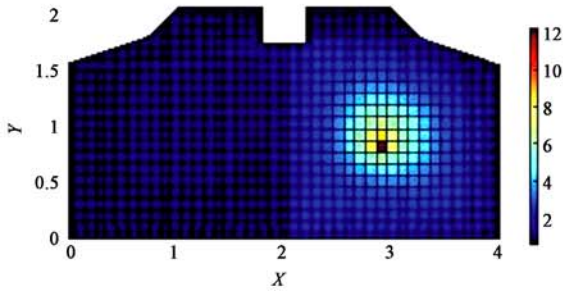


图 6 $t = 120$ s 时刻浓度分布

Fig. 6 Concentration distribution at $t = 120$ s

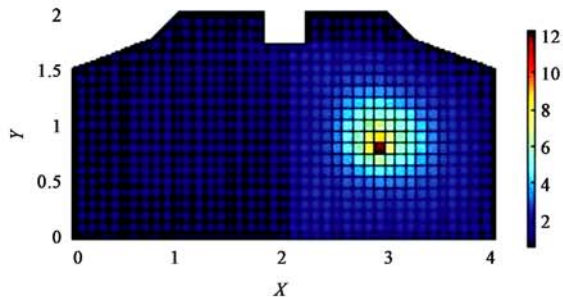


图 7 $t = 120$ s 时刻卡尔曼滤波估计浓度分布

Fig. 7 Estimated concentration distribution at $t = 120$ s

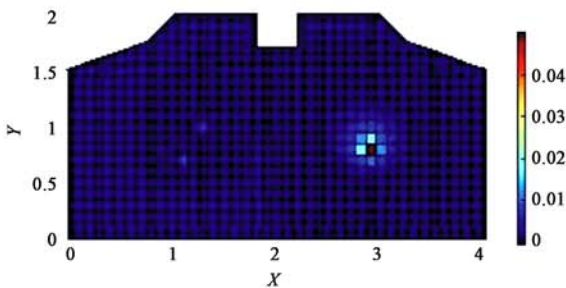


图 8 $t = 120$ s 时刻浓度估计误差

Fig. 8 Concentration estimated error at $t = 120$ s

5 结论

本文所提出的污染源散发特性辨识方法基于建

立的三维离散随机模型, 通过敏感性分析算法可实现污染源的准确定位及强度初步估计, 然后利用隐式与显式卡尔曼滤波相结合的方法, 能够有效地辨识出污染源的动态散发强度, 并对污染物的浓度分布做出准确预测。仿真结果表明本文提出的方法可以实现快速准确的突发污染源散发特性(位置及强度)辨识及浓度预测, 以便工作人员确定预警时间, 并采取正确的处理措施, 保证生命安全。

参考文献:

- [1] Xiang Liu, Zhiqiang Zhai. Probability-based inverse modeling algorithm for indoor pollutant source tracking Proceedings: Building Simulation, 2007; 810 - 817.
- [2] Zhang T, Chen Q. Identification of contaminant sources in enclosed environments by inverse CFD modeling. Indoor Air, 2007, 17(3): 167 - 177.
- [3] Chang H, Son. Analysis of carbon dioxide concentration in the shuttle orbiter middeck for the launch on need mission. 35th International Conference on Environmental Systems, 2005 - 01 - 2799.
- [4] Pantankar S V. A calculation procedure for two-dimensional elliptic situation, Number Heat Transfer, 1981, 4: 405 - 425.
- [5] 陶文铨. 数值传热学(第 2 版)[M]. 西安交通大学出版社, 2001: 150 - 152. [TAO Wen-quan. Numerical Heat Transfer (The Second Edition)[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 150 - 152.]
- [6] 庞丽萍, 常海娟, 曲洪权. 飞行器舱室突发污染源定位及强度估计方法研究[J]. 宇航学报, 2010, 31(1): 282 - 286. [PANG Li-ping, CHANG Hai-juan, QU Hong-quan. Source identification of emitting characters in aircraft cabin [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(1): 282 - 286.]
- [7] Kalman R E, Bucy R S. New results in linear filtering and prediction theory[J]. Journal of Basic Engineering, 1961, 83: 95 - 100.
- [8] MikhailSkliar, Fred Ramirez W. Implicit Kalman filtering[J]. INT. J. CONTROL, 1997, 66(3): 393 - 412.

作者简介: 常海娟(1982 -), 女, 博士, 主要研究方向为密闭空间综合环境控制。

通信地址: 北京海淀区学路 37 号, 北京航空航天大学 505 信箱 (100191)

电话: (010)82313186

E-mail: pangliping@buaa.edu.cn

Dynamic Source Identification of Emitting Characters in Aircraft Cabin

CHANG Hai-juan¹, PANG Li-ping¹, QU Hong-quan², WANG Jun¹

(1. School of Aeronautic science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. School of Information Engineering, North China University of Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: Along with the prolonging of people's staying time in enclosed environments such as spacecraft, aircraft and so on, air pollution in the cabin has become a main factor which endangers occupants' life safety. Therefore, it's crucial to develop investigation about identification of sudden unknown contaminant source and forecast of endangerment, which could help improve the ability of enclosed environments to deal with sudden contaminant. This paper presented a novel discrete concentration stochastic model, moreover, presented the sensitivity analysis algorithm which can identify source location and strength, then realize the dynamic identification of source emitting characters and prediction of contaminant concentration using combined implicit and explicit Kalman filter. The research above can identify the source emitting characters rapidly and accurately. Simulation results has proved the virtues of the novel method.

Key words: Source identification; Concentration prediction; Discrete concentration stochastic model; Kalman filter