密闭微环境突发污染源动态散发特性辨识

常海娟 庞丽萍 曲洪权

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

王 浚

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院，北京 100191)

摘 要：载人航天器、飞机、潜艇等密闭微环境，随着人员停留时间的延长，舱室空气污染问题已成为危害工作人员生命安全的主要因素.为了提高上述密闭环境主动应对突发污染的能力，建立一种新的浓度离散随机模型，提出采用敏感性分析算法实现污染源定位及强度估计，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；分析了不同位置处的传感器可辨识区域，给出最优传感器布置策略.仿真结果证实了敏感性分析算法及隐式与显式卡尔曼滤波相结合方法能够实现污染源散发特性的快速准确辨识.

关 键 词：密闭微环境；污染源辨识；浓度预测；敏感性分析；卡尔曼滤波

中图分类号：X 323

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)01-0031-04

Dynamic source identification of emitting characters in enclosed environments

Chang Haijuan Pang Liping

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Qu Hongquan

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

Wang Jun

(School of Aeronautic Science and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Along with the prolonging of people's staying time in enclosed environments such as spacecraft, aircraft, submarine and so on, air pollution in the cabin has become a main factor which endangers missionaries' life safety. To improve the ability of these enclosed environments in dealing with sudden contaminant, a novel discrete concentration stochastic model was established. The sensitivity analysis algorithm which can identify source location and strength was presented. Then the dynamic identification of source emitting characters and prediction of contaminant concentration were realized using combined implicit and explicit Kalman filter. The identifiable zone of different sensor placements was analyzed, and the best scheme of sensor placement had been found. Simulation results prove that the sensitivity analysis algorithm and combined implicit and explicit Kalman filter can realize the dynamic identification of source emitting characters and prediction of contaminant concentration speedily and accurately.

Key words: enclosed environments; source identification; concentration prediction; sensitivity analysis; Kalman filterin

收稿日期：2009-12-22

基金项目：国家自然科学基金资助项目(50808007)

作者简介：常海娟(1982—)，河北唐山人，博士生，changhaijuan@163.com.

载人航天器、飞机、潜艇等由于处于特定的使用环境，密闭舱室空气需要再生循环使用，污染源复杂，因此舱室空气污染问题严重[1]. 随着工作时间的延长，舱室空气污染问题日益受到人们的重视，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，提高该类密闭微环境主动应对突发污染的能力.

目前研究较多的污染源特性辨识方法主要包括基于解析解、基于概率和直接 CFD(Computational Fluid Dynamics)的逆问题求解方法[2-3]. 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发展方向. 文献[2－3]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深入的研究. 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 CFD 方法预测浓度场[4]，在污染源散发强度的确定上仍存在一定误差，并且计算耗时较长，需要探讨采用新的方法和技术来解决实时浓度预测及污染源特性辨识难题.

1 浓度传播模型

1.1 传统的浓度预测传播模型

为提高污染源强度辨识与浓度预测效率，传统的污染物浓度模型多基于集总参数方法建立，根据质量守恒定律，建立舱室内污染物浓度微分方程. 根据传感器观测信息，利用集总参数模型估算出污染产生率 $\boldsymbol{S}$，污染物降解率 $\boldsymbol{R}$ 和净化效率 η，从而达到预测污染物浓度的目的. 该方法的优点是计算速度快、辨识效率高，但很难实现污染源准确定位，而且污染产生率辨识误差大.

1.2 新的浓度离散随机模型

由于集总模型无法实现污染源定位，且对散发强度的辨识也不准确，因而有必要建立一种全面的浓度模型，用于实现污染源散发特性(位置和强度)的快速准确辨识. 本文从对流-扩散方程出发，建立浓度离散传播模型，同时引入随机噪声，以克服建模带来的系统误差.

不可压缩流体满足连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程，采用 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations)算法可获得密闭空间速度场分布.

污染浓度 $\boldsymbol{C}$ 满足方程：

$$\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial t}+\nabla \boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{C}=\nabla^2\boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{M}}\cdot\boldsymbol{C}+\boldsymbol{S} \tag{1}$$

式中，$\boldsymbol{u}$ 为气流速度；$\boldsymbol{S}$ 为污染源位置和强度的函数. 污染物在整个传输过程中不发生任何化学或物理变化.

采用控制容积积分法导出离散方程，式(1)选用乘方格式[5]的离散形式为

$$\boldsymbol{a}_{\mathrm{P}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{P}}=\boldsymbol{a}_{\mathrm{E}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{P}}+\boldsymbol{a}_{\mathrm{W}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{P}}+\boldsymbol{a}_{\mathrm{N}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{P}}+\boldsymbol{a}_{\mathrm{S}}\boldsymbol{C}_{\mathrm{P}}+\boldsymbol{b} \tag{2}$$

所以，对空间任意一点$(i,\ j)$，都有：

$$a_{\mathrm{p}}(i,j)C_{i,j}^{t+1}-a_{\mathrm{E}}(i,j)C_{i+1,j}^{t+1}+a_{\mathrm{W}}(i,j)C_{i-1,j}^{t+1}+a_{\mathrm{N}}(i,j)C_{i,j+1}^{t+1}+a_{\mathrm{S}}(i,j)C_{i,j-1}^{t+1}=a_{\mathrm{p}}^{0}(i,j)C_{i,j}^{t}+S_{i,j} \tag{3}$$

对流-扩散方程可写成如下方程组：

$$\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{C}_{t+1}=\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{C}_t+\boldsymbol{S} \tag{4}$$

在确定性模型中加入随机项是不确定性统计建模最常用的方法. 本文模型存在离散时的舍入误差、风速或涡流扩散率的微小误差等不确定因素，有必要给系统加一随机扰动 $\boldsymbol{\omega}_1$，因而模型方程变为离散随机模型：

$$\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{C}_{t+1}=\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{C}_t+\boldsymbol{S}+\boldsymbol{U}_t\boldsymbol{\omega}_1 \tag{5}$$

式中，$\boldsymbol{\omega}_1$ 为相互独立的高斯白噪声，$E[\boldsymbol{\omega}_1\cdot\boldsymbol{\omega}_1^{\mathrm{T}}]=\boldsymbol{Q}$，对角阵 $\boldsymbol{Q}$ 为模型噪声，数学模型越精确，$\boldsymbol{Q}$ 值越小，反之，则 $\boldsymbol{Q}$ 值越大.

1.3 边界条件的处理

本文涉及到 3 种边界类型：入口边界、固体壁面、出口边界. 入口边界按第 1 类边界条件处理，规定入口边界上的污染物浓度；固体壁面和出口边界均按第 2 类边界条件处理，令固体壁面或出口边界上的污染物浓度值与相邻内结点的浓度值相等.

2 突发污染源散发特性辨识

2.1 位置及散发强度初步辨识

考虑存在单个未知污染源，并假设在较短时间内以恒定的速率散发.

定义敏感性系数 $\boldsymbol{Z}=(\boldsymbol{Z}_1^{\mathrm{T}},\boldsymbol{Z}_2^{\mathrm{T}},\cdots,\boldsymbol{Z}_N^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}$，则

$$\boldsymbol{Z}_i=\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial \boldsymbol{S}_{u,i}}\quad i=1,2,\cdots,N \tag{6}$$

式中，$\boldsymbol{S}_u$ 为污染源；$\boldsymbol{S}_{u,i}$ 表示未知污染源的散发强度，i 表示源的位置；敏感性系数 $\boldsymbol{Z}_i$ 为污染源在第 i 个网格点处时对各个网格点位置的污染物浓度 $\boldsymbol{C}$ 的影响；N 为网格点数.

式(1)对 $\boldsymbol{S}_u$ 求偏导，可计算矩阵 $\boldsymbol{Z}$，整理得

$$\frac{\partial}{\partial t}\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial S_{u,i}}+\nabla\left(\boldsymbol{u}\cdot\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial S_{u,i}}\right)=\nabla^2\left(\boldsymbol{D}_{\mathrm{M}}\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial S_{u,i}}\right)+\frac{\partial \boldsymbol{S}_u}{\partial S_{u,i}} \tag{7}$$

用 $\boldsymbol{Z}_i$ 替换式(7)中的$\frac{\partial \boldsymbol{C}}{\partial S_{u,i}}$，可以得到下式：

$$\frac{\partial \boldsymbol{Z}_i}{\partial t}+\nabla(\boldsymbol{u}\cdot\boldsymbol{Z}_i)=\nabla^2(\boldsymbol{D}_{\mathrm{M}}\boldsymbol{Z}_i)+\boldsymbol{I}_i \tag{8}$$

式中,$\boldsymbol{I}_i$为单位阵的第 i 列.

同样对模型方程的边界条件和初始条件求偏导可以得到求敏感性系数矩阵问题的边界条件和初始条件.利用同样的离散方法和数值求解方法可以求出突发污染源出现后每一时刻的敏感性矩阵 $\boldsymbol{Z}(t)$.值得注意的是,这一部分计算可采取离线计算,在突发污染源出现之前就预先计算并存储 $\boldsymbol{Z}(t)$,以减少在线判断污染源特性的时间.

实际应用中,只需要知道某个位置的突发污染源对若干传感器所在位置的污染物浓度产生的影响.因而可以将 $\boldsymbol{Z}$ 分为 2 部分:传感器所在位置的信息为有用部分,记作 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{s}}$;没有传感器位置的信息为无用部分,记作 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{n}}$.

$$\boldsymbol{Z}=[\boldsymbol{Z}_{\mathrm{s}},\ \boldsymbol{Z}_{\mathrm{n}}] \tag{9}$$

突发污染源出现后,传感器检测系统会提供故障信息,这一时刻记为 t_{d}.在传感器监测系统预报污染源出现后 τ s,即 $t=t_{\mathrm{d}}+\tau$ 时刻,可以利用矩阵 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{c}}=\boldsymbol{Z}_{\mathrm{s}}|_{\tau}$ 来判断污染源的位置及散发特性.$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{c}}$是一个 $N\times m$ 维矩阵,N 为网格点个数,m 为传感器个数,即 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{c}}$表示舱室内任意一点的污染源强度变化一个单位对各个传感器位置的污染物浓度产生的影响.

t 时刻传感器预报误差 $\boldsymbol{e}=(e_1,e_2,\cdots,e_m)$,$e_i=z_i-y_i$ 表示第 i 个传感器的预报误差.由于 $Z_{ij}=\dfrac{\partial C_j}{\partial S_{u,i}}=\dfrac{e_j}{\Delta S_{u,i}}$,所以污染源散发强度 $\Delta S_{u,i}=e_j/Z_{ij}$.定义:

$$\Psi_i=e_j/Z_{ij} \tag{10}$$

$\boldsymbol{\Psi}$ 也是 $N\times m$ 维矩阵.

判断污染源位置及散发特性的算法如下:①记录 $t=t_{\mathrm{d}}+\tau$ 时刻传感器预报误差 $\boldsymbol{e}$;②输入 τ 时刻的敏感性矩阵 $\boldsymbol{Z}_{\mathrm{c}}$;③根据式(10)计算污染源散发强度;④对 $\boldsymbol{\Psi}$ 的每一行内 m 个数求标准差;⑤选取标准差最小的行,判断该行为实际污染源位置;⑥对该行 m 个值求均值得源项散发强度.

实际应用中,$t=t_{\mathrm{d}}+\tau$ 时刻可能只有部分传感器预报误差值超过阈值,其它传感器预报误差值都未超阈值,即突发污染源只对部分传感器位置浓度场产生扰动,而其它传感器位置并未受到影响.这种情况下运行上述敏感性分析算法时需要剔除不起作用的传感器,因而实际用到的 $\boldsymbol{\Psi}$ 矩阵列维数小于等于 m.

判断出位置后用卡尔曼滤波追踪强度变化.

2.2　污染源散发强度动态特性辨识

卡尔曼滤波器[6]用状态空间概念描述其数学公式,与其它静态算法相比,显著特点是求解是递归计算的,且可不加修改地应用于平稳和非平稳环境.本文采用隐式与显式卡尔曼滤波相结合的方法辨识突发污染源动态散发强度,未知污染源可由 N 维向量 $\boldsymbol{S}_u=(0,0,\cdots,0,S_{u,i},0)^{\mathrm{T}}$ 表示.

假设污染源满足以下方程:

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{S}_u}{\mathrm{d}t}=\boldsymbol{0}+\boldsymbol{\omega} \tag{11}$$

式中,$\boldsymbol{\omega}$ 为污染源噪声.将上式积分并离散化,得

$$S_{u,t+1}=S_{u,t}+\boldsymbol{K}_t\boldsymbol{\omega} \tag{12}$$

式中,$\boldsymbol{K}_t$为 $N\times N$ 维矩阵,反映积分的时间步长.

包含未知污染源在内的状态方程为

$$\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{a}}\boldsymbol{C}_{t+1}^{\mathrm{a}}=\boldsymbol{A}_2^{\mathrm{a}}\boldsymbol{C}_t^{\mathrm{a}}+\begin{pmatrix}\boldsymbol{S}\\ \boldsymbol{0}\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}\boldsymbol{\omega}_{1,t}\\ \boldsymbol{\omega}_t\end{pmatrix} \tag{13}$$

式中,$\boldsymbol{A}_1^{\mathrm{a}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_1 & \boldsymbol{0}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{W}\end{bmatrix}$;$\boldsymbol{A}_2^{\mathrm{a}}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_2 & \boldsymbol{W}\\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{W}\end{bmatrix}$;$\boldsymbol{W}$ 为 $N\times N$ 维对角阵,$\boldsymbol{W}$ 的对角线元素由 0 和 1 组成,1 的个数与未知污染源个数相同.

传感器观测方程 $\boldsymbol{z}_{t+1}=[\boldsymbol{H}\quad\boldsymbol{0}]\boldsymbol{C}_{t+1}^{\mathrm{a}}+\boldsymbol{v}_{t+1}$.

令 $\boldsymbol{H}_{11}\boldsymbol{A}_1=\boldsymbol{H}$,则有

$$\boldsymbol{z}_{t+1}=[\boldsymbol{H}_{11}\quad\boldsymbol{0}]\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{C}_{t+1}^{\mathrm{a}}+\boldsymbol{v}_{t+1} \tag{14}$$

记 $\boldsymbol{H}_1=[\boldsymbol{H}_{11}\quad\boldsymbol{0}]$.

卡尔曼一步最优预测估计方程:

$$\hat{\boldsymbol{Y}}_{t+1|t}=\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{C}_{t|t}+\boldsymbol{S}_t+\boldsymbol{S}_{u,t} \tag{15}$$

$$\boldsymbol{S}_{u,t+1|t}=\boldsymbol{S}_{u,t} \tag{16}$$

一步最优预测估计误差方差:

$$\boldsymbol{P}_{t+1|t}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_2^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{P}\boldsymbol{s}+\boldsymbol{Q} & \boldsymbol{W}\boldsymbol{P}\boldsymbol{s}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q}\\ \boldsymbol{W}\boldsymbol{P}\boldsymbol{s}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q} & \boldsymbol{W}\boldsymbol{P}\boldsymbol{s}\boldsymbol{W}^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{Q}\end{bmatrix} \tag{17}$$

最优滤波增益方程:

$$\boldsymbol{K}_{t+1}=\boldsymbol{P}_{t+1|t}\boldsymbol{H}_1^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{H}_1\boldsymbol{P}_{t+1|t}\boldsymbol{H}_1^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{R})^{-1} \tag{18}$$

$\boldsymbol{K}$ 结构形式为 $\boldsymbol{K}_{t+1}=(\boldsymbol{K}_1^{\mathrm{T}},\boldsymbol{K}_2^{\mathrm{T}})^{\mathrm{T}}$.

最优滤波估计方程:

$$\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{C}_{t+1}=\hat{\boldsymbol{Y}}_{t+1|t}+\boldsymbol{K}_1(\boldsymbol{z}_{t+1}-\boldsymbol{H}_{11}\hat{\boldsymbol{Y}}_{t+1|t})\text{(隐式)} \tag{19}$$

$$\boldsymbol{S}_{u,t+1}=\boldsymbol{S}_{u,t+1|t}+\boldsymbol{K}_2(\boldsymbol{z}_{t+1}-\boldsymbol{H}_{11}\hat{\boldsymbol{Y}}_{t+1|t})\text{(显式)} \tag{20}$$

滤波估计误差方差阵:

$$\boldsymbol{P}_{t+1|t+1}=(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}\boldsymbol{H}_1)\boldsymbol{P}(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{K}\boldsymbol{H}_1)^{\mathrm{T}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{R}\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}} \tag{21}$$

3　仿真分析

3.1　突发污染源散发特性辨识仿真

仿真基于一个 6 m×3 m 的房间,室内 CO_2 的初始浓度为 0.5 g/m^3,新风 CO_2 浓度为 0.5 g/m^3.用 20×20 的网格离散化该房间,在点(15,13)处引入一个以 7 g/(m^3 · s)速率释放的污染

源，选用4个测量噪声均为1%的传感器，分别布置在点(3,3)，(15,5)，(12,11)，(6,18).

经敏感性算法分析，确定点(15,13)方差最小，为0.5422，由各个传感器计算出的污染源的释放速率见表1，均值为6.4101 g/(m³·s).

表1 污染源在点(15,13)时各传感器估计污染源强度值

传感器编号	1	2	3	4
污染源散发强度 S/(g·m^{-3}·s^{-1})	5.7008	6.6628	6.9629	6.3138

将污染源位置强度信息输入到卡尔曼滤波器，进一步预测污染源强度变化以及舱室污染物浓度变化，得到结果如图1～图5所示.

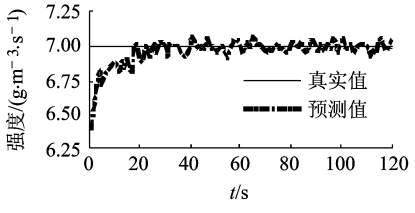


图1 卡尔曼滤波强度跟踪

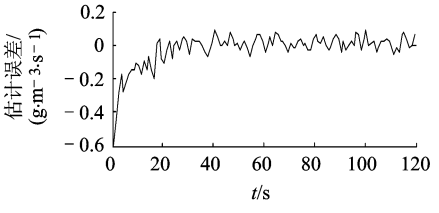


图2 卡尔曼滤波强度跟踪的估计误差

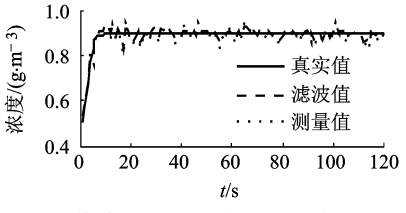


图3 传感器2对应位置的污染物浓度预测

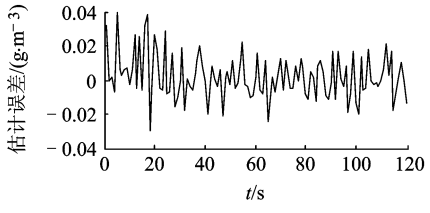


图4 传感器2对应位置的污染物浓度预测误差

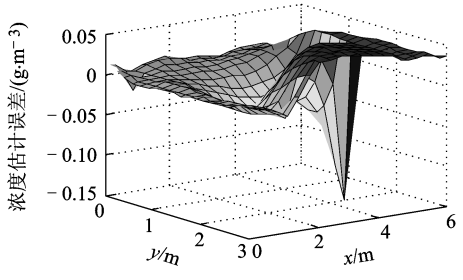


图5 t=60 s时刻浓度估计误差

由图1～图5可知，算法对污染源散发强度的相对估计误差小于2%，对浓度的估计误差小于5%，最大误差不超过0.15 g/m³，所以本文提出的算法能对空间各点浓度进行精确预测.

3.2 可辨识区域分析

通过敏感性矩阵可以观察出空间某一点处的随机扰动随系统向空间各个方向的传播速度，同时，也为研究敏感性分析算法的可辨识区域提供了重要依据.经仿真分析得出以下结论：①可辨识区域与传感器布置有关，传感器集中布置辨识效果优于分散布置；②不同置信概率情况下可辨识区域不同，低置信概率的可辨识区域更广；③预报污染源后等待时间 τ 影响可辨识区域，等待时间越长，可辨识区域越广；④测量噪声影响可辨识区域，测量噪声越大，可辨识区域越小.

4 结 论

本文提出的污染源散发特性辨识方法能够有效地对污染源的散发特性作出快速准确的估计，并对污染物的浓度分布作出准确预测.可辨识区域的研究为传感器的布置及精度选择提供了重要参考依据.仿真结果表明，如果传感器布置合理，该方法可以对流场中某些区域出现的任意形式突发污染源的动态散发特性作出准确判断，从而可实现快速准确的污染物浓度辨识与预测，以及突发污染源散发特性辨识，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（References）

[1] Miller L J, Haven C P, Mccollum S G, et al. The ISS human life sciences experiment implementation process[J]. Acta Astronautica, 2001, 49(3－10): 477－482

[2] Liu X, Zhai Z Q. Probability-based inverse modeling algorithm for indoor pollutant source tracking[J]. Building Simulation, 2007, 49(9): 810－817

[3] Zhang T F, Chen Q. Identification of contaminant sources in enclosed environments by inverse CFD modeling[J]. Indoor Air, 2007, 17(3): 167－177

[4] Son C H, Dunaway B R, Smirnov E M, et al. Analysis of carbon dioxide concentration in the shuttle orbiter middeck for the launch on need mission[J]. Society of Automotive Engineers, 2005, 114(1): 112－117

[5] Patankar S V. A calculation procedure for two-dimensional elliptic situation[J]. Numerical Heat Transfer, 1981, 4(4): 409－425

[6] Kalman R E, Bucy R S. New results in linear filtering and prediction theory[J]. Journal of Basic Engineering, 1961, 83(D): 95－108

(编 辑:李 晶)