基于源项辨识的飞机座舱污染浓度动态预测

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)

摘 要: 随着大型民机飞行时间的延长, 座舱空气污染事故发生概率也随之增大, 快速准确的污染浓度预测对保证乘客生命安全具有重要意义. 座舱各污染浓度的动态预测和污染源项强度辨识是实现座舱空气质量实时预测的关键技术. 污染源项散发强度辨识, 如采用最小二乘算法, 参数估计是静态的, 一般延迟较大; 如采用单模卡尔曼滤波算法, 虽能实现动态辨识, 但不能同时兼顾稳态和过渡过程(突发污染)的参数估计性能, 导致误差较大. 为解决上述难题, 本文提出基于源项辨识的飞机座舱污染浓度动态预测方法, 同时完成污染源散发强度动态辨识和污染浓度状态实时预测. 该算法由 2 个滤波器组成, 分别用于匹配系统的稳态和突发过渡过程特征, 提高浓度方程参数估计和状态预测性能, 保证飞机座舱空气质量态势预测的快速性和准确性. 仿真结果证实了该算法的有效性.

关 键 词: 飞机座舱环境; 污染浓度预测; 污染源强度辨识; 双模滤波器; 卡尔曼滤波

中图分类号: V 851

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2009) 08-0946-04

Contaminant concentrations dynamic prediction method for aircraft cabin based on estimating emission rates

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)

Abstract The probability of air pollution in aircraft cabin will be increased with the prolongation of passenger aircraft pilot time, so it is very important to predict the contaminant concentrations dynamically. The key is source emission rate estimation and concentration dynamic prediction method. For the source emission rate estimation, Minimum mean-square value can only get the static estimate values; while extended Kalman filter (EKF) can realize dynamic parameter estimation, but single EKF couldn't exhibit good ability both for the normal process and fault process. Therefore, a contaminant concentrations dynamic prediction method for aircraft cabin based on estimating emission rates was presented to solve this question. Double model filter was used to trace the steady state and transient state (sudden contaminant source happening) of system. The performance of parameter estimation and state prediction could be improved using this method, and then the accuracy and speed of air quality prediction could also be improved. Simulations were done to demonstrate the performance of algorithm.

Key words aircraft cabin environment; contaminant concentration prediction; contaminant source estimation; double model filter; Kalman filter

收稿日期: 2008-07-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50808007); "凡舟"青年科研基金资助项目(20080504)

作者简介: 庞丽萍(1973-), 女, 黑龙江海林人, 副教授, pangliping@buaa.edu.cn.

安全、健康、舒适、环保已经成为干线客机市场竞争的焦点. 以人为本的设计理念已经渗透到飞机研发的各个环节, 与空气管理系统相关的技术研究已经成为在未来激烈航空市场竞争中得以生存发展的必要保证. 由于大型飞机座舱具有人员密度高、新风量小、相对湿度低、滞空时间长等特点, 飞机座舱空气质量日益受到人们的重视. 飞机座舱相对湿度通常低于 20%, 在巡航高度座舱压力约为 2 4km. 文献[1]研究表明: 在这种环境下能够加剧污染空气的相互作用, 加强类似大厦综合症等疾病的发生. 虽然现代飞机上配置了高效过滤器[2], 但对于挥发性有机物和病毒, 其处理能力极其微弱, 尤其发生突发污染时, 将引起浓度急剧增高, 这时有必要通过动态实时的污染浓度预测, 向驾驶员预报座舱污染态趋, 采取快速应急方案. 所以突发污染源特性辨识及座舱浓度实时预测功能对于大型民机的安全性具有重要意义.

本文提出采用基于源项辨识的飞机座舱污染浓度动态预测方法, 根据在线观测浓度信息, 采用双模滤波技术, 能同时完成污染源强度动态估计和浓度状态实时预测, 从而提高飞机座舱空气质量态势预测的快速性和准确性, 保证乘客生命安全.

1　飞机座舱空气污染分析

1.1　飞机座舱空气污染物

一般飞机在巡航高度时外部空气非常清洁, 不需要处理, 但是座舱空气污染途径主要是从通风增压系统进入的燃料蒸气和各种油料、涂料、内装饰、塑料制品等的热分解产物, 飞机座舱污染主要包括: 臭氧, CO, CO_2, NO, PM_{10}, $PM_{2.5}$, 甲醛, 乙酸, 丙酮, 丙烯醛, 苯, 乙醇, 甲苯, 二甲苯, 细菌, 真菌, 杀虫剂等. 当某个环节发生故障, 造成座舱突发污染事故时, 乘客会暴露于各种污染源引起的污染环境中[3-4], 目前的飞机座舱通风系统不具有及时净化的能力. 所以突发污染源特性辨识及座舱浓度实时预测对大型民机安全就具有相当重要的意义.

1.2　飞机座舱浓度实时监测技术

目前飞机座舱污染浓度实时监测已日益受到人们重视, 最新研究进展是文献[5]提出的采用座舱环境监测网络实现污染浓度的实时监测. 该项技术的发展为本文提出的大型民机突发污染源特性辨识及座舱浓度实时预测提供了技术支持.

2　飞机座舱浓度模型

飞机座舱中任意被监测污染浓度模型可采用单区质量守恒方程[6-7], 其方程表达如下:

$$V\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}t} = G(t) + [QxC_{in} + Q(1-x)C] - QC$$

整理得到上式的差分方程为

$$C(k+1) = \frac{\Delta t}{V}G(k) + \frac{\Delta t}{V}QxC_{in} + C(k)\left(1 - Qx\frac{\Delta t}{V}\right) \quad (1)$$

式中, C 为座舱污染物浓度, mg/m^3; C_{in}为供气污染物浓度, mg/m^3; G 为污染源产生率, 为时间的函数, mg/s; V为为飞机座舱有效空气体积, m^3; t 为时间, s; Q 为座舱通风率, m^3/s; x 为新风系数 (新风量与总风量之比); k为离散时刻.

式(1)中, 污染源产生率 G具有重要意义, 其散发强度随时间变化, 如果能利用在线监测的污染浓度数据, 辨识出 $G(t)$随时间的变化规律, 再与式(1)和滤波算法相结合, 就可以实现实时动态座舱污染浓度预测, 为空气质量预测与污染态势分析提供快速的判断依据.

实时预测座舱空气质量时, 由于污染源散发强度 G 具有动态变化的不确定性, 这对污染浓度预测的精度提出了更高的要求[8]. 对于污染源项散发强度 G 的辨识, 如采用常规的最小二乘算法, 参数估计是静态的, 一般延迟较大; 如采用单模卡尔曼滤波算法, 虽然能够实现动态估计, 但不能同时兼顾稳态过程和过渡过程 (突发污染)的参数估计性能, 导致误差较大.

为了解决上述难题, 本文提出基于双模滤波算法的座舱污染源散发强度动态辨识与污染浓度实时预测新方法, 用于实时预测座舱空气质量. 该方法结合建立的数学模型, 根据在线观测浓度数据, 采用双模滤波技术, 同时完成实时模型参数估计和系统状态预测, 实现污染源项动态辨识与浓度实时预测. 该算法由 2个滤波器组成, 分别用于匹配系统的稳态过程和过渡过程 (突发污染), 从而提高空气质量预测的精度和速度.

3　双模型滤波算法

采用一个滤波模型完成系统参数辨识与状态预测时, 如该模型与系统的稳态过程匹配得较好, 一般对过渡过程的跟踪性能会较差; 反之, 该模型与系统过渡过程匹配的较好, 一般对稳态过程的跟踪性能会较差. 为克服此问题, 本文提出采用双

滤波模型, 分别与系统的稳态和过渡过程匹配, 这样可以改善参数辨识和状态预测的精度. 双模型算法的原理如图 1所示, 将 k时刻的滤波输出的状态和方差分别作为滤波器 1和滤波器 2的输入状态和方差, 滤波器 1和滤波器 2采用 2个不同的系统模型, 经过滤波分别得到 2个不同滤波输出, 根据 2个滤波器的似然函数来选择滤波器的输出结果.

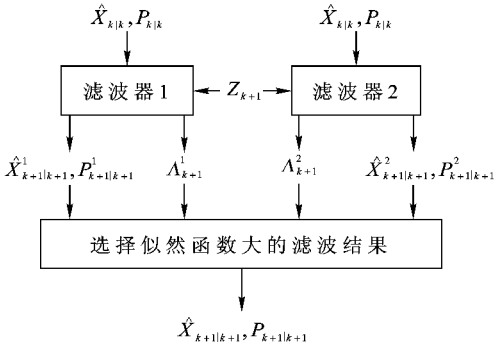

图 1 双模型算法原理图

图 1中, Z_{k+1}表示 $k+1$时刻的观测, Λ_1 和 Λ_2 的算法如下:

$$\Lambda^i_{k+1} = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^M \mid S^{(i)}_{k+1} \mid}} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} v^{(i)\prime}_{k+1} (S^{(i)}_{k+1})^{-1} v^{(i)}_{k+1}\right] \quad (2)$$

其中, M 是观测维数; $v^{(i)}_{k+1}$是 $k+1$时刻的第 i个滤波器的滤波新信息和新信息方差. 每个滤波器仍采用 EKF (Extended Kalman Filter), 算法如下式[9]:

$$\hat{X}_{k+1|k} = \Phi \hat{X}_{k|k}$$

$$P_{k+1|k} = \Phi P_{k|k} \Phi' + Q_k$$

$$[\hat{Z}_{k+1|k} \quad P_{Z\hat{Z}} \quad P_{X\hat{Z}}] = [h(\hat{X}_{k+1|k}) \quad H_{k+1} P_{k+1|k} H'_{k+1} \quad P_{k+1|k} H'_{k+1}]$$

$$v_{k+1} = Z_{k+1} - \hat{Z}_{k+1|k}$$

$$S_{k+1} = P_{Z\hat{Z}} + R_k$$

$$G_{k+1} = P_{X\hat{Z}} S^{-1}_{k+1}$$

$$\hat{X}_{k+1|k+1} = \hat{X}_{k+1|k} + G_{k+1} v_{k+1}$$

其中

$$H_{k+1} = \left.\frac{\partial h(X)}{\partial X}\right|_{X=\hat{X}_{k+1|k}}$$

为了应用双模型算法, 将飞机座舱污染模型 (1)重新写为式 (3), 即系统观测方程:

$$C(k) = \left[\frac{\Delta t}{V} G(k) + \frac{\Delta t}{V} Q x C_{in} + C(k-1)\left(1 - Q x \frac{\Delta t}{V}\right)\right] + n_c(k) \quad (3)$$

其中 $n_c(k)$表示浓度 C 在 k时刻的观测噪声, 这里假设为高斯分布.

系统状态方程:

$$G(k) = G(k-1) + n_G(k) \quad (4)$$

$n_G(k)$是 k时刻的噪声, 这里假设为高斯分布.

采用 2个滤波模型, 2个滤波模型中 $n_G(k)$的方差不同. 对于模型 1, 我们采用方差较小的 $n_G(k)$来跟踪稳态过程; 对于模型 2, 采用方差较大的 $n_G(k)$来跟踪过渡过程.

4 仿真分析

以 Airbus 320飞机飞行高度 12 km时[10], 座舱容积 210 m^3, 座舱通风率 0.566 m^3/s, 乘客人数为 150人, 座舱供气的 56% 为新风. 座舱一污染物初始浓度 100 g/m^3, 突然发生污染事故. 仿真中观测噪声和系统状态噪声概率密度函数满足正态分布. 观测噪声 $n_c(k) \sim N(0, 0.1)$. 对于滤波模型 1, $n_G(k) \sim N(0, 2)$, 跟踪稳态过程; 对于滤波模型 2, $n_G(k) \sim N(0, 10)$, 跟踪突发污染过渡过程.

由于突发污染源强度特性未知, 文中针对 3种典型的污染源散发强度开展了仿真研究: 线性散发污染源、抛物线型污染源和对数型污染源.

图 2~图 4为突发污染源强度真值与辨识值, 为便于比较, 图中同时给出: 单独采用滤波模型 1的仿真结果"-sigle", 以及同时采用滤波模型 1和 2的仿真结果"-double". 图 5为污染源为图 4中指数型污染源时, 飞机座舱浓度变化的真值与预测值.

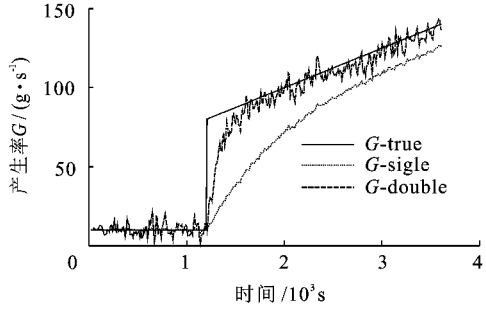

图 2 线性突发污染源强度真值与辨识值

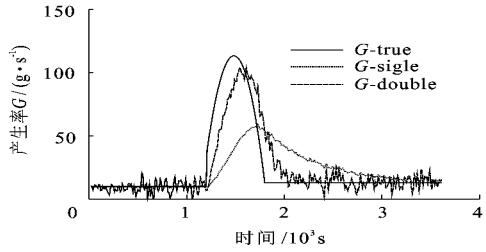

图 3 抛物线型突发污染源强度真值与辨识值

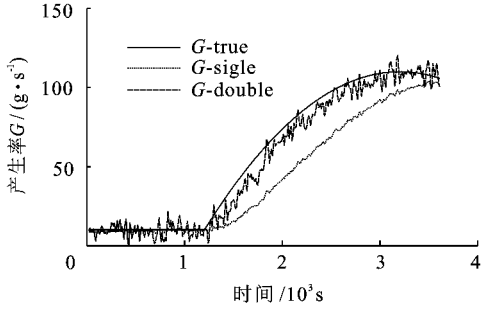

图 4　指数型突发污染源强度真值与辨识值

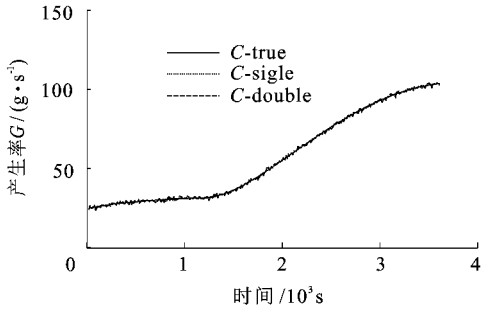

图 5　飞机座舱浓度真值及预测值

由仿真结果可知:

1) 本文提出的基于双模型滤波器的污染强度辨识算法具有较强的适应能力强, 能够快速、准确地辨识未知特性的污染源散发强度;

2) 由于采用双模型滤波技术, 实现了同时完成污染源强度动态估计和浓度状态实时预测, 可以提高飞机座舱空气质量态势预测的快速性和准确性;

3) 双模型滤波算法与单模型滤波算法相比, 在稳态和过渡过程中都取得了较高精度, 这是由于采用 2个模型分别匹配不同的系统状态; 由于采用了双滤波器模型分别匹配不同的系统特征, 能够提高座舱污染浓度的参数估计和状态预测性能;

4) 由于滤波方法可以在线估计状态参数, 所以对对象数学模型的准确性要求不严格, 用于实时预测座舱空气质量.

5　结束语

本文提出采用基于源项辨识的飞机座舱污染浓度动态预测方法, 实现准确快速的座舱污染浓度预测. 该方法采用双模滤波算法, 由 2个滤波器组成, 分别用于跟踪系统的稳态和过渡过程. 由于采用双滤波器模型分别匹配不同的系统特征, 能够提高座舱污染浓度的参数估计和状态预测性能, 提高了空气质量预测精度和速度. 该算法能同时完成污染源散发强度动态估计和浓度状态实时预测, 可提高空气质量态势预测的快速性和准确性.

仿真结果表明提出的基于源项辨识的飞机座舱污染浓度动态预测方法可以实现系统动态特性估计, 并进一步提高模型参数辨识效率, 保证对象模型参数自适应辨识的可靠性和精度, 从而实现了快速准确的座舱污染浓度预测与预报.

参考文献 (**References**)

[1] Fang L, Wyon D P, Fanger P O. Sick building syndrome symptoms caused by low humidity [C]// Proceedings of Healthy Buildings. Singapore, 2003: 1-6

[2] Sun Yuexia, Fang Le, Wyon P, et al. Experimental research on photocatalytic oxidation air purification technology applied to aircraft cabins [J]. Building and Environment, 2008, 43(3): 258-268

[3] Committee on Air Quality in Passenger Cabins of Commercial Aircraft. The airliner cabin environment and the health of passengers and crew [M]. Washington DC: National Academy Press, 2002

[4] Dechow M, Sohn H, Steinhanses J. Concentrations of selected contaminants in cabin air of Airbus aircrafts [J]. Chemosphere, 1997, 35: 21-31

[5] Loo S M, Owens J. ASCENT: airliner sensor and cabin environment network [C]//Hamid R. International Conference on Wireless Networks, 2006: 441-447

[6] Persily A, Reed C H, Nabinger S J. Transient analysis of volatile organic compound concentrations for estimating emission rates [J]. Atmospheric Environment, 2003, 37: 5505-5516

[7] Chen Yongcheng, Zhang Yuanhui, Ernest M B. A dynamic method to estimate indoor dust sink and source [J]. Building and Environment, 2000, 35: 215-221

[8] Liu Xiang, Zhai Zhiqiang. Probability-based inverse modeling algorithm for indoor pollutant source tracking [C]//Yang Xudong. Building Simulation. Beijing: Tsinghua Press and Springer-Verlag, 2007: 810-818

[9] Ristic B, Arulampalam S, Gordon N. Beyond the Kalman filter-particle filter for tracking application [M]. Artech House, 2004: 39

[10] Hocking M B. Passenger aircraft cabin air quality: trends, effects, societal costs, proposals [J]. Chemosphere, 2000, 41: 603-615

(责任编辑: 吴　琼)