

中文引用格式:杨建忠,王鹏翔,陈希远. 基于无模型自适应控制的飞机货舱烟雾模拟[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(12): 18-25.

英文引用格式:YANG Jianzhong, WANG Pengxiang, CHEN Xiyuan. Smoke simulation in aircraft cargo compartments based on model-free adaptive control[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12): 18-25.

基于无模型自适应控制的飞机货舱烟雾模拟^{*}

杨建忠¹教授, 王鹏翔², 陈希远^{**1}讲师

(1 中国民航大学 安全科学与工程学院, 天津 300300;

2 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300)

中图分类号:X949

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.0081

基金项目:国家自然科学基金资助(52402455); 中国民航大学国家自然科学基金配套专项资助(3122025PT15)。

【摘要】 为控制飞机货舱烟雾探测适航验证实验中用于代替真实火灾烟雾的模拟烟雾流场, 依托全尺寸飞机货舱模拟试验舱, 搭建模拟烟雾闭环流动控制试验平台; 基于无模型自适应控制(MFAC)理论开展控制律设计, 以真实火灾烟雾质量浓度为控制目标, 验证模拟烟雾闭环流动控制效果; 并探讨控制律参数对控制效果的影响。试验结果表明: 采用MFAC方法可以较好地克服湍流流场未建模动态对闭环控制的不利影响, 并实现模拟烟雾与真实火灾烟雾非稳态流场的逼近, 与比例-积分-微分(PID)控制方法相比控制性能可提升20%以上。

【关键词】 无模型自适应控制(MFAC); 飞机货舱; 模拟烟雾; 流动控制; 适航

Smoke simulation in aircraft cargo compartments based on model-free adaptive control

YANG Jianzhong¹, WANG Pengxiang², CHEN Xiyuan¹

(1 School of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China,

Tianjin 300300, China; 2 School of Electronic Information and Automation,

Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: To control the simulated smoke flow field (used as a substitute for real fire smoke in the airworthiness verification experiments for aircraft cargo compartment smoke detection), this paper established a closed-loop flow control experimental platform for simulated smoke based on a full-scale aircraft cargo compartment mock-up. Control law design was conducted using MFAC theory. The closed-loop flow control effects of simulated smoke were verified with real fire smoke mass concentration as the control target. Additionally, the influence of control law parameters on control effect was explored. The experimental results demonstrate that MFAC method can effectively overcome the adverse effects of unmodeled dynamics in turbulent flow fields on closed-loop control, and achieve the approximation of the non-stationary flow fields between simulated smoke and real fire smoke. Compared with the PID control method, the control performance can be improved by more than 20%.

* 文章编号:1003-3033(2025)12-0018-08; 收稿日期:2025-07-10; 修稿日期:2025-10-11

** 通信作者:陈希远(1989—),男,天津人,硕士,讲师,主要从事航空器适航技术方面的研究。E-mail: xy-chen@cauc.edu.cn。

Keywords: model-free adaptive control (MFAC); aircraft cargo compartment; simulated smoke; flow control; airworthiness

0 引言

飞机货舱烟雾探测系统是民用飞机中保证飞行安全的重要机载系统,根据现有适航规章及适航指导文件^[1],在烟雾探测系统适航验证试验中,为保证试验过程安全及结果可信,需采用可替代真实火灾烟雾的模拟烟雾进行试验。模拟烟雾与真实火灾烟雾的等效性关乎飞行安全^[2]。若模拟烟雾比真实火灾烟雾更容易触发飞机烟雾探测报警,则会导致飞机出现火情时漏报或报警不及时,反之,若真实火灾烟雾更容易触发报警,则容易出现虚警现象。根据国际民用航空组织安全报告和航空安全网事故统计数据,火灾事故在民航事故总量中约占 10%,且 60% 的火灾事故会造成机毁人亡的后果^[3-5]。因此,实现与真实火灾烟雾等效的烟雾模拟对飞行安全至关重要。

烟雾模拟的本质是以真实火灾烟雾流场为控制目标,以模拟烟雾为被控对象的湍流流场流动控制,从方法来看大致分为 2 类,分别是有模型控制和无模型控制^[6]。有模型控制的大致思路为,先依靠湍流流场产生的数据获取低阶近似的控制数学模型,然后在此基础上基于李雅普诺夫控制理论进行控制律设计。例如:安朝^[7]、吴文昌^[8]等在气动弹性、钝体减阻等方面,基于系统辨识方法获取湍流流场低阶近似模型,包括传递函数、状态空间等,并在此基础上基于极点配置方法开展控制律设计^[9]。然而,通过辨识得到的低阶控制模型与真实复杂的湍流流场之间存在差异,这种模型与真实物理对象之间的差异称为未建模动态,未建模动态会导致基于低阶模型设计的控制律无法很好地适用于真实流动环境,如何解决湍流流动控制的未建模动态是有模型流动控制的关键挑战。无模型流动控制的本质是一种数据驱动的方法,如利用湍流流场的 I/O 数据,采用遗传算法^[10]、强化学习^[11]、差分进化^[12]等深度学习算法自主优化流动控制所需的控制输入。在烟雾模拟问题中,洪瑶等^[13]采用比例-积分-微分(Proportional-Integral-Derivative, PID)控制律直接与计算流体力学模型相耦合实现火灾烟雾流场的闭环控制。陈希远等^[14]采用多岛遗传算法实现烟雾发生器模拟烟雾与真实火灾烟雾的等效。在自动化领域,文献[15-17]提出一种基于数据驱动

的无模型自适应控制(Model Free Adaptive Control, MFAC)理论,可在不依靠任何先验模型基础上,仅依靠控制系统的 I/O 数据生成控制律。然而,李翔等^[18]研究表明:MFAC 的效果受控制律参数的影响极为敏感,如何有效整定控制律参数是其中的关键。DENG Kai 等^[19]提出了一种改进格式的 MFAC 方法,其中,控制律参数具有更强的可解释性。可以看出,MFAC 理论在解决难以建模系统的控制问题时优势显著。

鉴于此,笔者拟面向适航验证中代替真实火灾烟雾的烟雾模拟技术问题,针对模拟烟雾流动控制中存在的未建模动态、非稳态跟踪的挑战,基于 MFAC 理论开展应用研究。基于飞机货舱全尺寸模拟实验舱,搭建模拟烟雾闭环流动控制试验系统,基于 MFAC 理论设计控制律,开展控制律参数研究,并通过试验验证模拟烟雾闭环流动控制效果,逼近真实火灾烟雾,以期飞机货舱烟雾探测提供技术指导。

1 模拟烟雾流动控制试验系统

1.1 试验系统架构

根据文献[20],模拟烟雾流动控制系统组成如图 1 所示。试验系统以真实火灾烟雾质量浓度为控制目标。控制器接收控制目标信号和烟雾质量浓度传感器的反馈信号,生成控制命令,并改变烟雾发生器的边界条件,闭环控制模拟舱内模拟烟雾质量浓度。

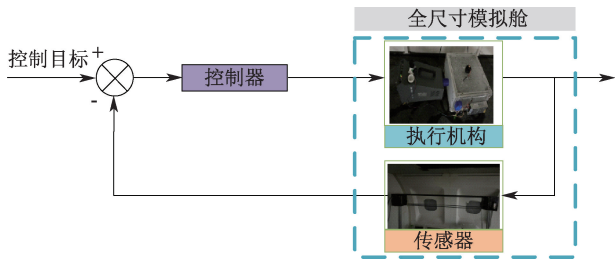


图 1 模拟烟雾流动控制系统架构

Fig. 1 Schematic diagram of simulated smoke flow control system architecture

1.2 控制律软件

为实现模拟烟雾 MFAC,使用 Matlab 编程语言开发控制系统软件^[20],用于承载 MFAC 律,来实时

显示控制系统的输入输出数据,接受传感器反馈信号,并向作动器发送控制指令。

1.3 作动机构

烟雾模拟装置如图2所示,由烟雾发生器和位于烟雾发生器出口的执行器组成。在烟雾发生器内部,加热器将乙二醇和水的混合溶液进行加热至蒸发,具体工作原理见文献[2]。风扇转速保持不变,通过改变阀门开度调节。当烟雾模拟装置中的执行器接收到控制指令并开启后,烟雾首先被引入一个长方体形状容器中,随后,由容器顶部中央的风扇向上排出。模拟烟雾流动控制试验系统以阀门开度作为控制输入,控制阀门能够接受来自控制律软件的指令信号并进行动作^[20]。

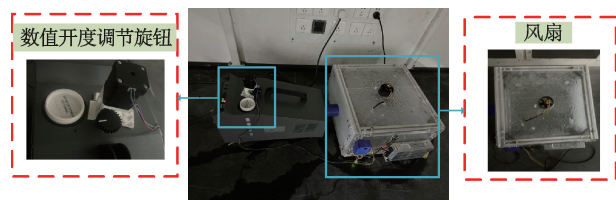


图2 模拟烟雾流动控制系统中的作动器:
烟雾模拟装置

Fig.2 Actuator in simulated smoke flow control system:
physical diagram of smoke simulation device

2 MFAC

MFAC理论由侯忠生提出^[15-17],其本质是在非线性系统的每个工作点处建立等价的动态线性数据模型,利用被控系统的I/O数据在线估计系统的伪偏导数,然后设计加权向前一步的控制输入,在不建立被控系统数学模型的基础上实现数据驱动的MFAC。

文献[19]在传统MFAC理论上改进了数据模型格式,提出一种控制律参数个数更少且更易于整定的MFAC方法。采用文献[19]提出的MFAC律实现模拟烟雾的闭环流动控制。

模拟烟雾质量浓度的闭环控制可用下式中的离散时间非线性方程表示:

$$\begin{aligned} y(k+1) &= f(y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_y), \\ u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_u)) &= f(w(k), u(k)) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: k 为时刻; f 为非线性函数; n 为系统输出及输入离散数据个数; n_y 为系统输出数据个数; n_u 为系统输入数据的个数; u 为控制系统输入,即模拟烟雾流动控制系统中作动器信号; y 为控制系统输出,即

模拟烟雾质量浓度值, $\mu\text{g}/\text{m}^3$; $w(k) = [y(k), y(k-1), \dots, y(k-n_y), u(k), u(k-1), \dots, u(k-n_u)]$,为控制输入、输出数据共同构成的数列。提出以下假设:

假设1 除有限时刻点外,关于第 (n_y+2) 个变量的偏导数是连续的。

假设2 除有限时刻点外,系统满足广义Lipschitz条件,即对任意 $k_1 \neq k_2, k_1, k_2 \geq 0$ 和 $u(k_1) \neq u(k_2)$ 有:

$$|y(k_1+1) - y(k_2+1)| \leq c |u(k_1) - u(k_2)| \quad (2)$$

式中 c 为正常数。

根据文献[19],当离散非线性系统满足假设1和假设2时,时变参数 $\delta(k)$ 和 $\phi(k)$ 必须存在,则式(1)可转化为以下模型:

$$y(k+1) = \delta(k) + \frac{\Delta u(k)}{\phi(k)} \quad (3)$$

式中 $\phi(k)$ 为伪偏导数。其表达式为:

$$\phi(k) = \frac{1}{f_u(w(k), \mu_k)} \quad (4)$$

其中, $f_u(w(k), \mu_k) = \frac{\partial f(w(k), u(k))}{\partial u(k)} \Big|_{u(k) = \mu_k}$,且满足 $u(k-1) \leq \mu_k \leq u(k)$ 。

此外,时变参数 $\delta(k)$ 的表达式为:

$$\delta(k) = f(w(k), u(k-1)) \quad (5)$$

式中: $\hat{\delta}(k)$ 为 $\delta(k)$ 的估计; $\hat{\phi}(k)$ 为伪偏导数 $\phi(k)$ 的估计值。则式(3)表示为:

$$y(k+1) = \frac{\Delta u(k)}{\hat{\phi}(k)} + \hat{\delta}(k) + d(k) \quad (6)$$

其中, $d(k)$ 包括模型的估计误差和系统的干扰 $d(k) = \Delta u(k)/\phi(k) - \Delta u(k)/\hat{\phi}(k) + \delta(k) - \hat{\delta}(k)$ 。

定义:

$$\hat{y}(k+1) = \hat{\delta}(k) + \frac{\Delta u(k)}{\hat{\phi}(k)} \quad (7)$$

$$\hat{\delta}(k) = y(k) - \frac{\Delta u(k-1)}{\hat{\phi}(k-1)} \quad (8)$$

$$\hat{d}(k) = y(k) - \hat{y}(k) \quad (9)$$

式中: $\hat{d}(k)$ 为 $d(k)$ 的估计; $\hat{y}(k)$ 为近似模型(7)的输出。则式(6)可写为:

$$y(k+1) = \hat{y}(k+1) + d(k) \quad (10)$$

根据文献[19],MFAC律见下式:

$$\frac{u(k) = u(k-1) + \hat{\phi}(k)(y^d(k+1) - \hat{\delta}(k) - m(y(k) - \hat{y}(k)))}{1 + \sigma \hat{\phi}^2(k)} \quad (11)$$

$$\frac{\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(k-1) + (y(k) - \hat{\delta}(k-1))(\Delta u(k-1) - \hat{\phi}(k-1)(y(k) - \hat{\delta}(k-1)))}{\beta + (y(k) - \hat{\delta}(k-1))^2} \quad (12)$$

此外,伪偏导数 $\phi(k)$ 还应满足重置算法:

$$\hat{\phi}(k) = \hat{\phi}(1) = \frac{1}{a}, \text{当 } \hat{\phi}(k) < \frac{1}{a} \quad (13)$$

式中 a 为式 (4) 中 $f_u(w(k), \mu_k)$ 的上界, 即 $f_u(w(k), \mu_k) < a$ 。

综上,采用的 MFAC 律由式 (11)一式 (13) 组成。经过文献[19]的稳定性证明可知:当控制律参数满足 $\beta > 0, m > 0, \sigma \geq \frac{1}{4}(1+m)^2 a^2$ 时,控制系统是稳定的。分析式 (11)一式 (13) 可得:控制律参数 a 值决定了伪偏导数重置的触发条件,该值越大,伪偏导数重置的阈值越低。此外,由于控制律参数约束条件 $\sigma \geq \frac{1}{4}(1+m)^2 a^2$, a 值越大,参数 σ 值也随之增长,根据式 (11),参数 σ 决定控制输入增量 $\Delta u(k) = u(k) - u(k-1)$, 参数 σ 越大,控制输入增量越小。综上,控制律参数 a 与 σ 会显著影响控制系统表现,而参数 a 又会决定参数 σ 的取值范围,因此,需对比研究不同参数 a 下的控制效果,从而获得效果较好的控制律参数。

3 飞机货舱模拟烟雾流动控制试验工况设计

试验在全尺寸飞机货舱模拟试验舱中进行,试验舱长 4.80 m,底部宽 3.70 m,顶部宽 2.84 m,高 1.68 m。如图 3 所示,模拟舱的底部和顶部均为矩形,侧壁为曲面。模拟舱两侧壁底部设有对称出风口,进风口位于模拟舱两侧侧壁上方。烟雾模拟装置紧贴模拟舱后壁面(图 3)。

在真实飞机货舱中,火源可能出现在任何位置,不同位置火源造成烟雾探测器的响应不同。为模拟飞机货舱内不同火源与烟雾探测器的相对位置,试验设置了 2 种典型的烟雾质量浓度传感器位置,即图 3 中的位置 1 和位置 2。根据文献[20-21],位置 1 距离烟雾发生器距离较近(1.6 m,图 3),该位置用于模拟飞机货舱内通风量较小时,火源产生的烟雾由于受

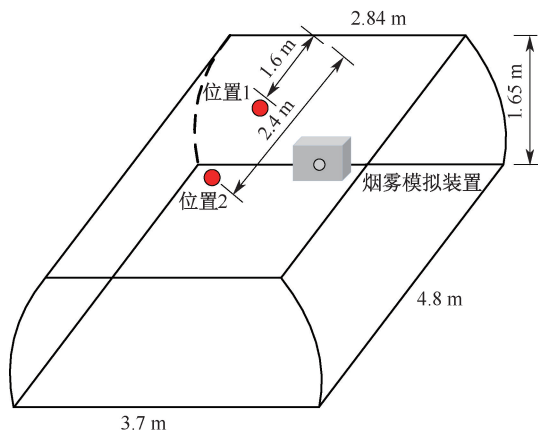


图 3 模拟烟雾流动控制试验工况

Fig. 3 Schematic diagram of experimental conditions for simulated smoke flow control

到火源的热浮力效应,能够直接到达火源正上方烟雾探测器的情形。位置 2 距离烟雾发生器距离较远(2.4 m,图 3),用于模拟当飞机货舱内的通风量较大时,通风将抑制火源的热浮力效应,使烟雾无法直接达到其正上方的货舱顶棚区域,而在距离烟源较远的货舱顶棚区域首次到达探测器的情形。每个烟雾质量浓度传感器位置的模拟烟雾闭环流动控制试验进行 5 次,并计算 5 次试验的平均烟雾质量浓度。

根据文献[20],采用真实火灾烟雾质量浓度作为模拟烟雾无模型自适应闭环流动控制的控制目标。根据文献[21],真实火源功率的选取应能够使模拟舱内的烟雾质量浓度传感器在 1 min 内出现响应,若火源功率太小,则烟雾质量浓度传感器在《运输类飞机适航标准》^[1]规定的飞机货舱烟雾探测器响应时间内无法响应,无法代表真实飞机货舱内可能出现的火源。因此,选取文献[21]中的火源(采用恒温加热炉以 1 kW 的加热功率加热 4 根长 25 mm 的木条)进行真实火灾烟雾试验,该火源可保证模拟舱内的烟雾质量浓度传感器在 1 min 内出现响应,代表真实飞机货舱内可能出现的火源。在模拟舱内进行 5 次真实火灾试验,真实火源的位置与模拟烟雾流动控制试验中烟雾发生器位置相同,并记录位置 1 与位置 2 的烟雾质量浓度响应的平均值。

根据文献[22],飞行过程中,货舱通风来源于飞机空调系统,飞机空调系统运行状态的改变会使飞机货舱内的通风量发生变化,而飞机货舱通风的变化会显著影响飞机货舱内烟雾扩散规律。因此,为考虑飞行运行过程中货舱通风量的变化,模拟烟雾的闭环流动控制试验分别在高($1\ 050\ \text{m}^3/\text{h}$)、低($525\ \text{m}^3/\text{h}$)2 种不同通风量下进行。

4 飞机货舱模拟烟雾流动控制试验结果及分析

在探测位置 1、位置 2 处分别进行不同通风量下真实火灾烟雾浓度目标跟踪控制试验,并记录不同控制律参数的控制效果。控制律采用第 2 节的 MFAC 律,根据文献[19],设定控制律参数 $m=1, \beta=1$,参数 σ 和参数 a 的选取满足条件 $\sigma=\frac{1}{4}(1+m)^2 a^2$,选取不同参数 a 试验。为衡量不同工况下模拟烟雾控制效果,计算各工况的均方根误差 e_R 见下式:

$$e_R = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N e^2(k)}$$
 (14)

式中: e_R 为均方根误差; $e(k)$ 为 k 时刻模拟烟雾质量浓度与目标真实火灾烟雾质量浓度之间的跟踪误差; N 为试验中总采样时刻数量。图 4a、图 4c、图 4e、图 5a、图 5c、图 5e 为不同探测器位置工况下的模拟烟雾质量浓度目标跟踪控制结果,其中,黑色虚线为真实火灾烟雾质量浓度(控制目标),灰色阴

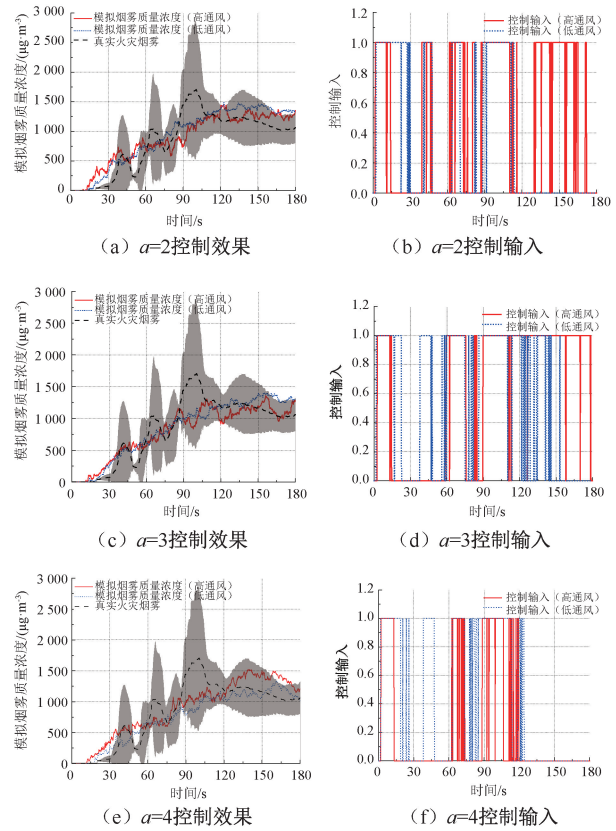


图 4 探测位置 1 处真实火灾烟雾质量浓度目标追踪控制效果及控制输入
Fig. 4 Target tracking control effect and control input for real fire smoke mass concentration at detection position 1

影为真实火灾烟雾质量浓度多次重复实现形成的误差棒^[20],实线与点线为模拟烟雾质量浓度闭环控制试验中多次重复试验结果的平均值。首先,图 4 和图 5 中,真实火灾烟雾质量浓度先非稳态上升,随后逐渐趋于平稳,这是因为随着真实火灾的燃烧过程,其释放的烟雾先逐渐增多后逐步减少。基于 MFAC 方法,在探测器位置 1 和位置 2 共 2 种典型烟雾探测器位置工况下,模拟烟雾质量浓度基本位于真实火灾烟雾质量浓度的误差棒范围内,表明:本文所采用控制方法能在不同烟源与探测器相对位置的工况下有效闭环跟踪控制真实火灾烟雾质量浓度目标。其次,采用 MFAC 控制下的均方根误差显著低于文献[20]中传统 PID 控制,控制性能提升均超过 20%~50%(表 1)。充分验证了 MFAC 在模拟烟雾湍流流动控制中的优势。最后,探测器位置 1 工况下的模拟烟雾控制效果优于探测器位置 2 工况,这是因为探测器位置 2 距离烟雾模拟装置更远,加剧了系统的时滞效应。

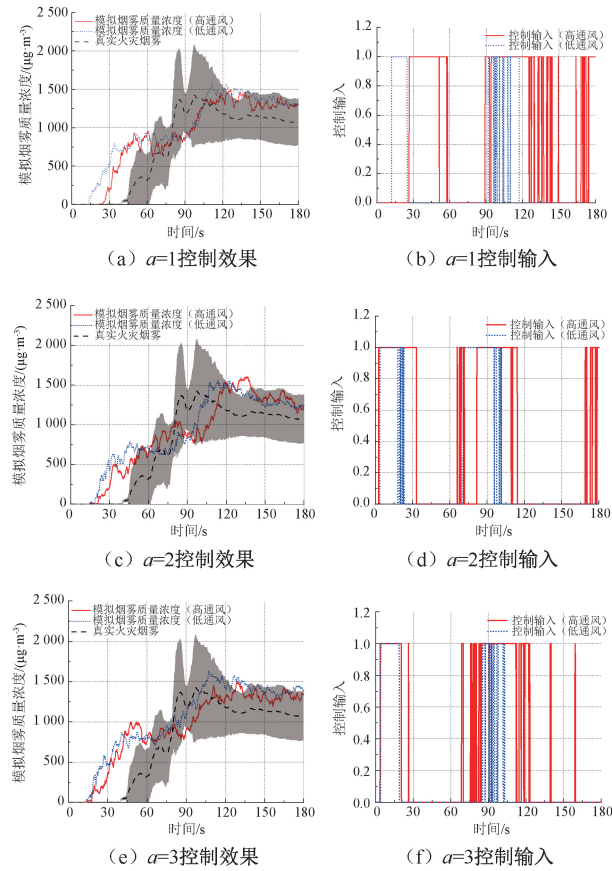


图 5 探测位置 2 处真实火灾烟雾质量浓度目标追踪控制效果及控制输入
Fig. 5 Target tracking control effect and control input for real fire smoke mass concentration at detection position 2

表 1 模拟烟雾无模型自适应流动控制试验均方根误差

Table 1 Root mean square error of model free adaptive flow control experiments for simulated smoke

探测器位置 1			探测器位置 2		
控制方法	高通风量	低通风量	控制方法	高通风量	低通风量
PID	488. 61	382. 36	PID	570. 57	587. 48
MFAC: $a = 2$	259. 96	244. 78	MFAC: $a = 1$	294. 44	353. 51
MFAC: $a = 3$	234. 78	231. 61	MFAC: $a = 2$	288. 83	295. 54
MFAC: $a = 4$	262. 88	260. 20	MFAC: $a = 3$	319. 95	342. 80

不同控制律参数下的模拟烟雾流动控制试验结果(表 1、图 4、图 5)表明:MFAC 律的参数对控制效果具有显著影响,不同参数取值会导致控制精度差异,表明该方法对控制律参数具有较强依赖性。然而,MFAC 律需要整定控制律参数较少(根据文献[19],仅需调节式(13)中参数 a)。且控制律参数均具有明确物理意义,例如:在式(11)一式(13)中,控制律参数 a 决定伪偏导数重置值大小,控制律参数 σ 直接影响控制输入增量,且 a 与 σ 之间满足特定约束条件 $\sigma \geq \frac{1}{4}(1+m)^2a^2$,这意味着仅需进行少量不同控制律参数的试验,即可快速完成控制律参数的整定过程,在解决模拟烟雾这类复杂湍流流场的流动控制问题中工程优势显著。

在高(1 050 m³/h)和低(525 m³/h)2 种通风量下的模拟烟雾质量浓度控制结果表明:通风量变化对模拟烟雾质量浓度的闭环控制结果并无显著影响,表明本文所提方法可适用于飞行运行过程中货舱不同的通风量工况(对比图 4a、图 4c、图 4e、图 5a、图 5c、图 5e 中的实线与点线)。其原因在于 MFAC 是动态自适应控制,当环境条件(通风量)改变时,控制器会根据实时的 I/O 数据更新控制输入。例如:图 4b、图 4d、图 4f、图 5b、图 5d、图 5f 中,在高通风量工况下,控制器会自动调增加模拟烟雾流量调节活门打开时间(实线),以适应通风量的变化。以上结果表明:MFAC 控制方法在不同的飞机运行环境下能够保持良好性能,具有良好的鲁棒性。

根据飞机货舱火灾烟雾探测器需满足的工业标准^[23],真实飞机货舱的烟雾探测器大多采用光透率(Light Transmission, LT)作为探测器输出单位,采用 LT 可以直观地反映闭环控制下的模拟烟雾与真实火灾烟雾在触发烟雾探测器响应方面的等效性,LT 计算见下式:

$$LT(\%) = \exp(-K_m \sum_{i=1}^N y_i \Delta x_i / L) \times 100\% \quad (15)$$

式中: K_m 为消光系数, $K_m = 7000 \text{ m}^2/\text{kg}$; y_i 为第 i 层

的烟尘密度, g/m^3 ; Δx_i 为第 i 层介质的厚度, m ; L 为烟密度计光程, $L = 0.1 \text{ m}$ 。

根据式(15),分别计算探测位置 1 和探测位置 2 点位的真实火灾烟雾与 MFAC 控制下模拟烟雾的 LT。LT 与烟雾质量浓度呈反比,烟雾质量浓度越高,LT 越低,反之,烟雾质量浓度越低,对应的 LT 越高。

闭环控制下模拟烟雾与真实火灾烟雾 LT 响应对比如图 6 所示,图 6 表明:在 MFAC 闭环控制下,不同时刻模拟烟雾在 2 个探测器位置的 LT 响应与真实火灾烟雾的 LT 响应吻合良好,随着时间推移(60~180 s),真实火灾烟雾 LT 先降低随后升高,表明烟雾质量浓度先增加后减少,模拟烟雾的浓度在 MFAC 控制下呈现相同的演化规律。表明:MFAC 闭环控制下,模拟烟雾能够产生与真实火灾烟雾近似的烟雾探测器动态响应,在飞机货舱烟雾探测的适航符合性验证中,采用本文提出的模拟烟雾 MFAC 方法代替真实火灾烟雾。

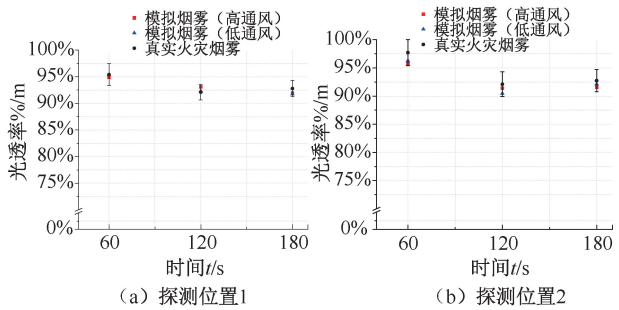


图 6 闭环控制下模拟烟雾与真实火灾烟雾 LT 响应对比

Fig. 6 Comparison of simulated smoke and real fire smoke LT response under closed-loop control

5 结 论

1) 基于 MFAC 理论,通过数据驱动控制策略,可实现模拟烟雾闭环控制,该方法无需依赖数学模型,直接利用系统的输入输出数据进行控制。

2) MFAC 控制律能够实现不同位置模拟烟雾

质量浓度的非稳态无模型自适应目标跟踪控制。试验结果表明:MFAC 方法可实现以真实火灾烟雾质量浓度为控制目标的跟踪控制,与 PID 控制相比,控制性能提高 20%~50%,且闭环控制下模拟烟雾可获得与真实火灾烟雾等效的烟雾探测器响应。

3) 文中的适航符合性验证方法,通过 MFAC 方法实现模拟烟雾的闭环控制,确保了模拟烟雾与真

实火灾的等效性。

4) 文中研究在常压地面环境下开展模拟烟雾闭环流动控制试验,验证了 MFAC 方法的有效性。然而,飞机在高空飞行时,货舱所处的低压环境会影响烟雾的扩散行为及探测响应特性^[24],未来工作可进一步验证高空飞行环境下采用 MFAC 方法实现烟雾模拟可行性。

参 考 文 献

- [1] CCAR-25-R4,运输类飞机适航标准[S]. 2011.
- [2] JILL S A, WALT G, LOUIS G. Comparison of actual and simulated smoke for the certification of smoke detectors in aircraft cargo compartments[R]. Federal Aviation Administration, 2003.
- [3] 程关兵,叶豪辉. 基于 FDS 的风扇舱双油池火温度变化特征[J]. 中国安全科学学报,2024,34(1):133-139.
CHENG Guanbing, YE Haohui. Temperature variation characteristics of double fuel-pool fire in fan cavity based on software FDS[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 133-139.
- [4] 徐文婕,于水. 民用飞机火灾特定风险分析方法研究[J]. 民用飞机设计与研究,2024(2):138-143.
XU Wenjie, YU Shui. Specific risk analysis method for civil aircraft fires[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2024(2): 138-143.
- [5] 于海成,田羽,李庆健,等. 基于红外图像和目标检测的露天矿火灾探测技术[J]. 中国安全科学学报,2024,34(增1):212-218.
YU Haicheng, TIAN Yu, LI Qingjian, et al. Fire detection technology in open-pit mines based on infrared images and target detection[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(S1): 212-218.
- [6] 吴智,范德威,周裕. 人工智能控制湍流进展:系统、算法、成就、数据分析方法[J]. 力学进展, 2023, 53(2): 273-307.
WU Zhi, FAN Dewei, ZHOU Yu. Advances in control of turbulence by artificial intelligence: systems, algorithms, achievements and data analysis methods[J]. Advances in Mechanics, 2023, 53(2): 273-307.
- [7] 安朝,赵睿,谢长川,等. 大柔性机翼几何非线性结构降阶模型与气动弹性分析[J]. 航空学报,2024,45(增1): 102-118.
AN Chao, ZHAO Rui, XIE Changchuan, et al. Reduced-order modeling and aeroelastic analysis of geometrically nonlinear structures of large flexible wings[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(S1): 102-118.
- [8] 吴文昌,韩省思,毛军逵. 基于被动控制的 D 型钝体减阻大涡模拟研究[J]. 推进技术,2020,41(8):1 692-1 700.
WU Wenchang, HAN Xingsi, MAO Junkui. Large eddy simulation of flow around a D-shaped bluff body for drag reduction based on passive control[J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(8): 1 692-1 700.
- [9] 张伟伟,寇家庆,刘溢浪. 智能赋能流体力学展望[J]. 航空学报,2021,42(4):26-71.
ZHANG Weiwei, KOU Jiaqing, LIU Yilang. Prospect of artificial intelligence empowered fluid mechanics[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 26-71.
- [10] KATOCH S, CHAUHAN S S, KUMAR V. A review on genetic algorithm: past, present, and future[J]. Multimedia Tools and Applications, 2021, 80: 8 091-8 126.
- [11] FAN Dixia, LIU Yang, WANG Zhicheng, et al. Reinforcement learning for bluff body active flow control in experiments and simulations[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2020, 117(42): 26 091-26 098.
- [12] MENG Zhenyu, PAN Jengshyang, TSENG K K. PaDE: an enhanced differential evolution algorithm with novel control parameter adaptation schemes for numerical optimization[J]. Knowledge-Based Systems, 2019, 168: 80-99.
- [13] 洪瑶,康建宏,符策基. 基于 PID 方法的倾斜隧道中火灾烟气控制数值模拟[J]. 中国矿业大学学报,2021,50(4): 701-708.

- HONG Yao, KANG Jianhong, FU Ceji. Numerical simulation on control of fire smoke in inclined tunnels based on the PID method [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(4): 701–708.
- [14] 陈希远,邵资焱,杨建忠. 基于逆向设计的飞机货舱烟雾等效方法[J]. 航空学报,2020,41(11):312–325.
CHEN Xiyuan, SHAO Ziyang, YANG Jianzhong. Equivalence strategy for aircraft cargo compartment smoke based on inverse design[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(11): 312–325.
- [15] 范方远,侯忠生. 多智能体系统分布式直接型无模型自适应 PID 控制[J]. 控制与决策,2025,40(4):1 107–1 115.
FAN Fangyuan, HOU Zhongsheng. Distributed direct model free adaptive PID control for multi-agent systems[J]. Control and Decision, 2025, 40(4): 1 107–1 115.
- [16] HOU Zhongsheng, XIONG Shuangshuang. On model-free adaptive control and its stability analysis [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(11): 4 555–4 569.
- [17] 侯忠生. 再论无模型自适应控制[J]. 系统科学与数学,2014,34(10):1 182–1 191.
HOU Zhongsheng. Highlight and perspective on model free adaptive control [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2014, 34(10): 1 182–1 191.
- [18] 李翔,侯忠生. 基于 PID 参数整定的无模型自适应控制器参数整定方法[J]. 控制理论与应用,2023,40(10): 1 737–1 745.
LI Xiang, HOU Zhongsheng. Parameter tuning of the PG initial values for direct model-free adaptive control based on PID tuning methods[J]. Control Theory & Applications, 2023, 40(10): 1 737–1 745.
- [19] DENG Kai, LI Fanbiao, YANG Chunhua. A new data-driven model-free adaptive control for discrete-time nonlinear systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 126 224–126 233.
- [20] CHEN Xiyuan, WANG Pengxiang, WANG Xinru, et al. Design of an unsteady smoke simulation system for airworthiness verification of smoke detection in aircraft cargo compartments based on the adaptive flow control method[J]. Aerospace, 2025, 12(2): DOI: 10.3390/aerospace12020148.
- [21] CHEN Xiyuan, OUYANG Jingpeng, YANG Jianzhong. Optimal detector placement for the fire smoke detection in ventilated aircraft cargo compartment[J]. Fire Technology, 2022, 58(4): 2 251–2 281.
- [22] 杨建忠,邵资焱,陈希远. 通风对飞机货舱烟雾探测影响研究[J]. 中国安全科学学报,2019,29(2):69–75.
YANG Jianzhong, SHAO Ziyang, CHEN Xiyuan. Research on influence of ventilation on detection of smoke in an aircraft cargo compartment[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(2): 69–75.
- [23] SAE AS 8036, Cargo Compartment Fire Detection Instruments[S]. 1985.
- [24] 王洁. 飞机货舱环境顶棚射流区火灾烟气特征及温度分布规律研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2015.
WANG Jie. Studies on fire smoke characteristics and temperature distribution law in ceiling jet zone of an aircraft cargo compartment[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.



作者简介: 杨建忠 (1974—),男,天津人,硕士,教授,主要从事航空器适航技术的研究。E-mail:jzyang2004@126.com。