

DOI: 10.19416/j.cnki.1674-9804.2021.04.013

飞机座舱颗粒物浓度评估方法研究

曹 伟* 张絮涵

(上海飞机设计研究院, 上海 201210)

摘 要: 飞机客舱内的空气品质越来越受到关注,舱内颗粒物浓度超过限值会对人体健康造成伤害。因此在飞机通风系统设计时必须考虑座舱颗粒物浓度限值对系统设计的约束。可吸入颗粒物包括粗颗粒物 PM10 和细颗粒物 PM2.5。以某民用飞机为研究对象,提出飞机座舱颗粒物浓度评估方法。通过对国内外相关技术文献调研并进行指标权衡分析,得到颗粒物浓度权衡指标限值。以舒适值作为设计需求,对某民用飞机通风系统设计方案的需求符合性进行评估。结果表明,不考虑舱内源产生的颗粒物时,达到稳定的舱内颗粒物浓度与座舱容积、通风量无关,座舱内颗粒物浓度稳定值 PM2.5 为 $31.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM10 为 $51.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。为满足座舱颗粒物环境舒适性设计需求,需增加过滤器。经计算,不安装再循环过滤器时,引气过滤器效率最低限值为 5.5%;不安装引气过滤器时,再循环过滤器效率最低限值要求为 26%。

关键词: 民用飞机;座舱颗粒物;评估

中图分类号: V219

文献标识码: A

OSID:



0 引言

随着民航事业的不断发展,人们乘坐飞机时不仅关注飞机在飞行过程中的安全问题,而且越来越关注飞机客舱内的空气品质^[1]。近年来,全国多地出现雾霾,而可吸入颗粒物是雾霾的主要成分。可吸入颗粒物包括粗颗粒物 PM10 和细颗粒物 PM2.5。飞机在地面停机或飞行时,通风系统会将大气中的颗粒物通过送风管路带入座舱,使飞机座舱内颗粒物浓度增大。而飞机狭小的座舱环境不利于舱内颗粒物的排出,颗粒物浓度超过限值时会对人体健康造成伤害^[2]。因此,在飞机通风系统设计时必须考虑座舱颗粒物浓度限值对系统设计的约束。通常在飞机设计研制阶段,这一约束作用体现为通过对通风系统设计方案进行反向校核,评估其是否满足座舱颗粒物浓度设计需求。

本文以某民用飞机为研究对象,提出飞机座舱颗粒物浓度评估方法。通过对国内外相关技术文献

调研并进行指标权衡分析,得到颗粒物浓度权衡指标限值,并基于此设计需求,对某民用飞机的通风系统设计方案的需求符合性进行评估。

1 需求分析

1.1 颗粒物标准值

世界各国组织机构对于环境中颗粒物限值做了规定,各规定中相应参数见表 1。

表 1 颗粒物的空气质量标准

国家/组织	标志物	标准值 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	时间平均
欧洲/航空工业 协会 AECMA prEN 4618-2013 ^[3]	PM10	150	TWA24 h
	PM2.5	100	TWA1 h
		40	连续
中国/GB 9673- 1996、GB 18883- 2002、GB 3095- 2012	PM10	150 ^[4]	-
		70 ^[5]	年均值
		150 ^[5-6]	24 h 均值
	PM2.5	35 ^[5]	年均值
		75 ^[5]	24 h 均值

* 通信作者。E-mail: caoyi1@comac.cc

引用格式: 曹伟,张絮涵. 飞机座舱颗粒物浓度评估方法研究[J]. 民用飞机设计与研究,2021(4):79-84. CAO Y, ZHANG X H. Research on evaluation method of particle concentration in airplane cabin[J]. Civil Aircraft Design and Research,2021(4):79-84(in Chinese).

国家/组织	标志物	标准值 μg/m ³	时间平均	
美国/环境保护局 EPANAAQS-2014 ^[7]	PM10	150	24 h 均值	
		12	年均值	
	PM2.5	15	年均值	
		35	24 h 均值	
	PM2.5	3 000	上限值	
	ACGIH-2005 ^[8]	PM10	10 000	上限值
		PM2.5	15	8 h 均值
	ASHRAE 62.1-2016 ^[9]	PM10	50	年均值
	准则值	PM10	20	年均值
			50	24 h 均值
PM2.5		10	年均值	
		25	24 h 均值	
世界卫生组织 WHO-2005 ^[10]	过渡期目标-1	PM10	70	年均值
		150	24 h 均值	
		PM2.5	35	年均值
		75	24 h 均值	
	过渡期目标-2	PM10	50	年均值
		100	24 h 均值	
		PM2.5	25	年均值
		50	24 h 均值	
	过渡期目标-3	PM10	30	年均值
		75	24 h 均值	
PM2.5		15	年均值	
37.5		24 h 均值		
公共交通工具 卫生标准 GB9673-1996 ^[4]	PM10	150	—	

1.2 指标权衡分析

对于客机座舱颗粒物浓度 PM10,目前基本所有的飞机相关标准及各国适航条例中并未对此做出详细规定,欧洲航空工业协会标准 prEN 4618-2013^[3]中要求 PM10 24 h 内加权平均浓度值不高于 150 μg/m³,这个限值是从健康角度出发制定的,与国家标准 GB 9673 - 1996^[4]与 GB 18883 - 2002^[6]中对 PM10 浓度标准限值相同,并且 150 μg/m³也是 EPA-2014^[7]等很多组织室内空气质量 PM10 浓度限值。而 WHO-2005^[10]对 PM10 规定更为严格,准则值为 24 h 均值 50 μg/m³。美国政府工业卫生协会在 ACGIH-2005^[8]中规定,考虑工业环境中恶劣情况,对 PM10 的峰值规定为 10 000 μg/m³。因此,可以按照标

准取 PM10 峰值为 10 000 μg/m³,满足安全的要求;取 PM10 24 h 内加权平均浓度值 150 μg/m³,满足健康的要求;取 PM10 24 h 均值 50 μg/m³,满足舒适的要求。

对于客机座舱颗粒物浓度 PM2.5,各国适航条例中并未对此做出详细规定,欧洲航空工业协会标准 prEN 4618-2013^[3]中要求 PM2.5 1 h 内加权平均浓度值 100 μg/m³,连续值 40 μg/m³,这个限值是从健康角度出发制定的。美国环境保护局 EPA-2014^[7]中对 PM2.5 24 h 均值取 35 μg/m³,而在 WHO-2005^[5.2-5]对 PM2.5 规定为更为严格的准则值 24 h 均值 25 μg/m³。美国政府工业卫生协会 ACGIH-2005^[8]中,考虑工业环境中恶劣情况,对 PM2.5 的峰值规定为 3 000 μg/m³。因此,可以按照标准取 PM2.5 峰值为 3 000 μg/m³,满足安全的要求;取 PM2.5 连续值 40 μg/m³,满足健康的要求;取 PM2.5 24 h 均值 25 μg/m³,满足舒适的要求。

颗粒物浓度权衡指标限值见表 2^[7]。本文以舒适值作为设计需求,对某民用飞机通风系统设计方案的需求符合性进行评估。

表 2 颗粒物浓度权衡指标限值

参数	标准值/μg · m ⁻³	时间值	标准来源	备注
PM10	10 000	峰值	ACGIH	安全值
	PREN 4618-2013			
	150	TWA24 h	GB 9673 - 1996	健康值
	GB 18883 - 2002			
	50	24 h 均值	WHO-2005	舒适值
	3 000	峰值	ACGIH-2005	安全值
PM2.5	40	连续值	PREN 4618-2013	健康值
	25	24 h 均值	WHO-2005	舒适值

2 计算方法

进入座舱的颗粒物的污染源可分为舱外源和舱内源。舱外源是指地面污染和高空大气中的化合物,其通过飞机引气系统进入座舱,颗粒物在环控系统内部会出现沉降。舱内源可能的来源主要包括座舱内人员散发的颗粒物、餐饮服务产生的颗粒物等。本文暂不考虑由舱内源产生的颗粒物。

假设进入引气管路的颗粒物浓度 C_B与外界环境中的浓度 C_{out}保持一致,则某时刻送入座舱的颗粒物浓度计算公式为:

$$C_v \cdot Q_v = C_B \cdot Q_v \cdot (1 - S) \cdot (1 - \eta_B) + C_i \cdot Q_v \cdot S \cdot (1 - \eta_r) - E_s \tag{1}$$

式中: C_V 为送入座舱的颗粒物浓度, kg/m^3 ; Q_V 为总通风量, m^3/s ; S 为再循环比例; η_B 为引气过滤器效率; C_i 为座舱内的颗粒物浓度, kg/m^3 ; η_r 为再循环过滤器效率; E_s 为颗粒物在环控系统内部的沉降量, kg/s 。

颗粒物在环控系统内部的沉降量计算公式为:

$$E_s = \eta_s C_B Q_V (1 - S) \quad (2)$$

式中: η_s 为颗粒物在环控系统内部的沉降率。

座舱内颗粒物质量浓度平衡关系式为:

$$V \frac{dC_i}{dt} = C_V \cdot Q_V - C_i \cdot Q_V + E_C \quad (3)$$

式中: V 为座舱容积, m^3 ; E_C 为由舱内源产生的颗粒物量, 本文取 $E_C = 0 \text{ g/s}$ 。

根据上述公式即可求得某时刻座舱内颗粒物浓度值。

当座舱内颗粒物浓度达到稳定时, 颗粒物浓度值计算公式为:

$$C_i = \frac{\eta_s \cdot C_B \cdot Q_V \cdot (1 - S) - C_B \cdot Q_V \cdot (1 - S) \cdot (1 - \eta_B) - E_C}{Q_V \cdot S \cdot (1 - \eta_r) - Q_V} \quad (4)$$

当不考虑舱内源时, 公式(4)可简化为:

$$C_i = \frac{\eta_s \cdot C_B \cdot (1 - S) - C_B \cdot (1 - S) \cdot (1 - \eta_B)}{S \cdot (1 - \eta_r) - 1} \quad (5)$$

即当达到稳定时, 舱内颗粒物浓度与座舱容积、通风量均无关。

对公式(3)进行拉氏变换, 即可得座舱内颗粒物浓度变化的时间常数 τ 计算公式为:

$$\tau = \frac{V}{Q_V - Q_V \cdot S \cdot (1 - \eta_r)} \quad (6)$$

即座舱内颗粒物浓度达到稳定的时间只与座舱容积、通风量、再循环比例及再循环过滤器效率有关, 与舱外环境的颗粒物浓度等因素无关。

当座舱内颗粒物浓度不满足飞机座舱环境舒适性需求时, 需增加过滤器。过滤器效率值的求解过程应为稳态过程, 即舱内颗粒物浓度达到稳定最大值时, 对应的过滤器效率即为最低过滤效率值。

根据公式(4), 可得到引气过滤器效率计算公式为:

$$\eta_B = 1 - \frac{C_i Q_V - E_C - C_B Q_V (1 - S) (1 - \eta_r) + \eta_s C_B Q_V (1 - S)}{C_B Q_V (1 - S)} \quad (7)$$

当不考虑舱内源时, 公式(7)可简化为:

$$\eta_B = 1 - \frac{C_i - C_i S (1 - \eta_r) + \eta_s C_B (1 - S)}{C_B (1 - S)} \quad (8)$$

由公式(8)可知, 引气过滤器效率与通风量无关。

根据公式(4), 可得到再循环过滤器效率计算公式:

$$\eta_r = 1 - \frac{C_i Q_V - E_C - C_B Q_V (1 - S) (1 - \eta_B) + \eta_s C_B Q_V (1 - S)}{C_i Q_V S} \quad (9)$$

当不考虑舱内源时, 公式(9)可简化为:

$$\eta_r = 1 - \frac{C_i - C_B (1 - S) (1 - \eta_B) + \eta_s C_B (1 - S)}{C_i S} \quad (10)$$

由公式(10)可知, 再循环过滤器效率与通风量无关。

3 颗粒物浓度评估

以某客机为例, 采用上述计算方法对座舱内颗粒物浓度进行评估分析。

3.1 计算输入分析

计算时取客舱容积为 500 m^3 , 再循环比例为 0.5。

舱外环境颗粒物浓度基于目前中国主要五大机场(北京首都国际机场、上海浦东国际机场、上海虹桥国际机场、广州白云国际机场、深圳宝安国际机场)和天津滨海国际机场在 2014 年 PM2.5 和 PM10 平均值得到^[11]。由于图 1 中数据为颗粒物浓度平均值, 本文选取各机场浓度最大值并上浮 50% 作为本次计算舱外环境颗粒物浓度极限值, 故 PM2.5 极限值取 $126 \mu\text{g}/\text{m}^3$; PM10 极限值取 $207 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

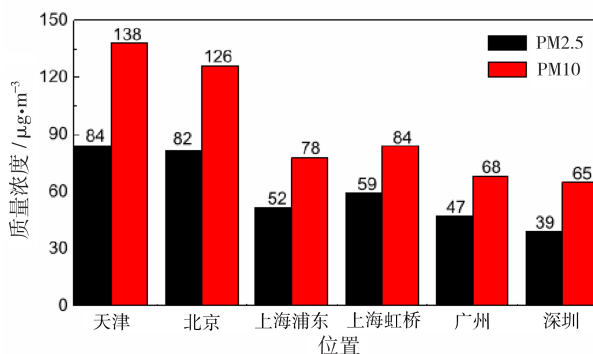


图 1 中国主要机场颗粒物浓度平均值

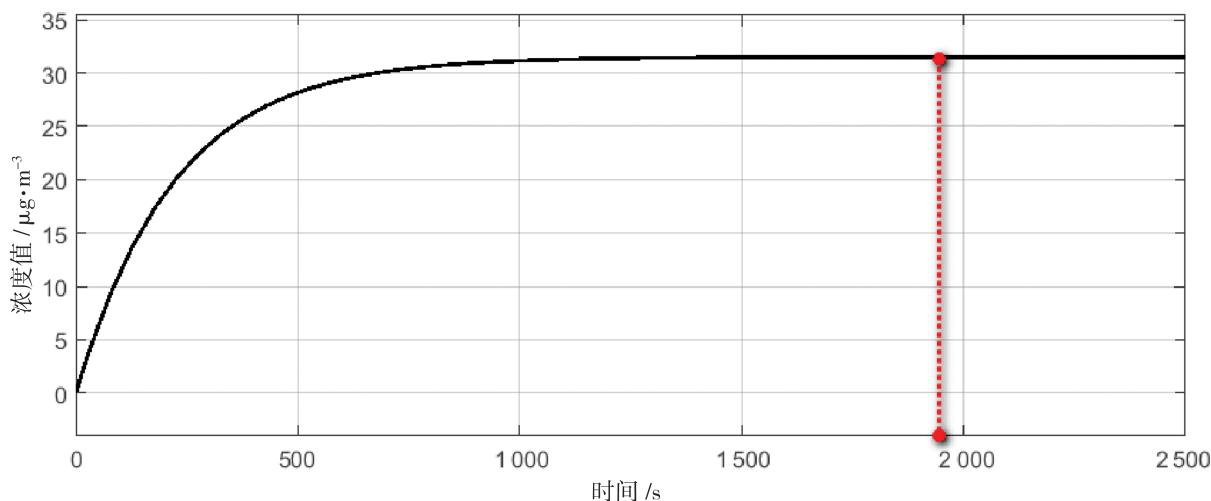
舱外污染物通过发动机引气进入环控系统, 在经过系统各个部件后会出现沉降。颗粒物的沉降包括气流经过弯头较多、管路较细或表面积较大的复杂管路或设备表面时, 颗粒物的自主沉降;

以及气流经过机械旋转部件、洗涤装置等设备,导致颗粒物与气流分离,从而实现气流中颗粒物浓度降低。这两种方式的去除均以沉降率进行定量描述。研究表明,0.3 μm 的细小颗粒在环控系统内的沉降率约为 75%,且沉降率随颗粒粒径的增大而增大^[11-12]。本文取舱外空气颗粒物在环控系统内的

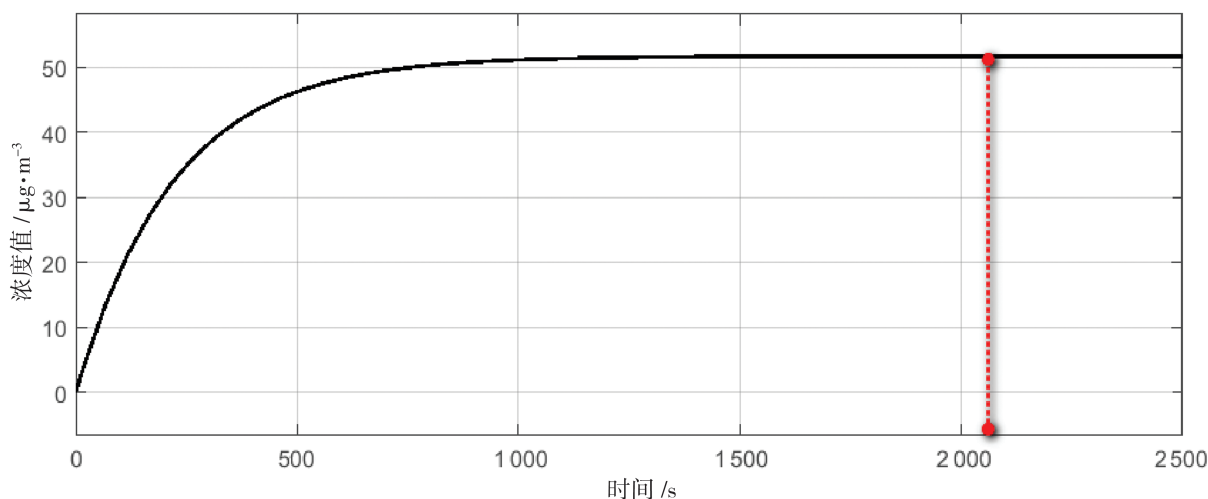
总沉降率为 75%。

3.2 浓度评估计算

根据公式(1)至公式(4)建立座舱内颗粒物浓度计算模型。分别取浓度值 C_{out} 为 126 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 207 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,计算得到座舱内的 PM2.5 和 PM10 浓度变化趋势,结果如图 2 所示。



(1) PM2.5 浓度变化趋势



(2) PM10 浓度变化趋势

图 2 飞机座舱内颗粒物浓度变化趋势

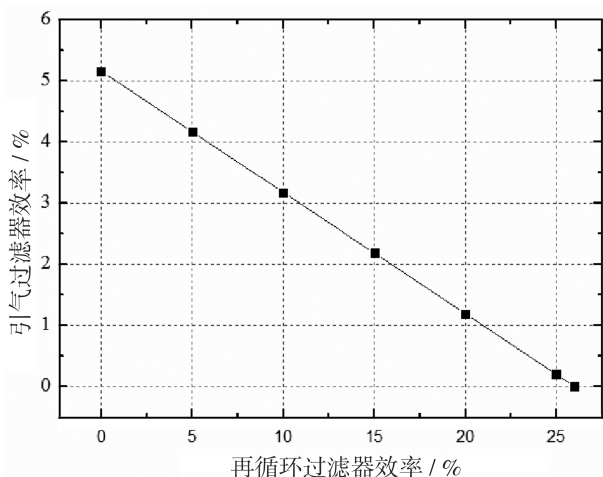
由图 2 可知,当外界环境 PM2.5 浓度恒定为 126 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,初始浓度为 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,约 1 945 s 后座舱内 PM2.5 浓度达到稳定,稳定值为 31.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。当外界环境 PM10 浓度恒定为 207 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,初始浓度为 0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,约 2 055 s 后座舱内 PM10 浓度达到稳定,稳定值为 51.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

由第 2 章分析可知,不考虑舱内源产生的颗粒

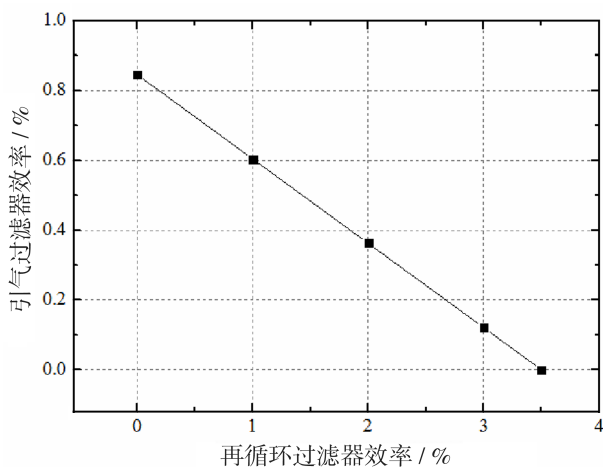
物时,达到稳定的舱内颗粒物浓度与座舱容积、通风量无关,即驾驶舱内颗粒物稳定值与客舱相同,即 PM2.5 为 31.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,PM10 为 51.75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在不考虑舱内源产生的颗粒物时,座舱颗粒物浓度无法满足环境舒适性设计需求。因此,需要增加过滤器。

由公式(4)可知,引气过滤器效率与再循环过滤器效率间相互耦合,共同影响达到稳定的舱内颗

颗粒物浓度。基于公式(8)或公式(10)建立过滤器效率计算模型,得到在座舱内颗粒物 PM2.5 及 PM10 浓度满足设计需求的前提下,引气过滤器效率与再循环过滤器效率间的相互关系。



(1) PM2.5



(2) PM10

图3 再循环过滤器效率与引气过滤器效率间相互关系

由图3可知,针对PM2.5,不安装再循环过滤器时,需保证引气过滤器效率不低于5.5%,即可使座舱内颗粒物PM2.5浓度满足设计需求;不安装引气过滤器时,再循环过滤器效率最低限值要求为26%。针对PM10,不安装再循环过滤器时,需保证引气过滤器效率不低于0.9%,即可使座舱内颗粒物PM10浓度满足设计需求;不安装引气过滤器时,再循环过滤器效率最低限值要求为3.5%。若已知引气过滤器效率或再循环过滤器效率值,即可通过查图3得到对应的再循环过滤器或引气过滤器的最

低效率限值。综合PM2.5和PM10的再循环过滤器效率及引气过滤器效率,取其最大值即可作为座舱通风系统设计过滤器效率的最低限值。

4 结论

本文以某型民用飞机为研究对象,提出飞机座舱颗粒物浓度评估方法。通过对国内外相关技术文献调研并进行指标权衡分析,得到颗粒物浓度权衡指标限值。以舒适值作为设计需求,对某民用飞机通风系统设计的需求符合性进行评估。结果表明,不考虑舱内源产生的颗粒物时,达到稳定的舱内颗粒物浓度与座舱容积、通风量无关,座舱内颗粒物浓度稳定值PM2.5为 $31.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$,PM10为 $51.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。针对颗粒物增加过滤器,得到在座舱内颗粒物浓度满足设计需求的前提下,引气过滤器效率与再循环过滤器效率间的相互关系。不安装再循环过滤器时,引气过滤器效率最低限值为5.5%;不安装引气过滤器时,再循环过滤器效率最低限值要求为26%。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 王瑞婷. 飞机客舱内热舒适性及污染物传播规律的研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2017: 3-6.
- [3] Aerospace and Defence Industries Association, European Committee for Standardization. Aerospace series—aircraft internal air quality standards; criteria and determination methods; prEN 4618; 2013[S]. Brussels: AEC-MA-STAN, 2013.
- [4] 中华人民共和国卫生部. 公共交通工具卫生标准: GB 9673 - 1996[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [5] 环境保护部,国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB 3095-2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局,卫生部,国家环境保护总局. 室内空气质量标准: GB 18883 - 2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [7] ZHANG X H, WU C Y, WANG G W, et al. Establishment methodology of comfort parameters series for civil aircraft cabin[C]. [S. l.]: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2020.
- [8] American conference of governmental industrial hygien-

- ists (ACGIH). TLVs and BEIs 2005 [M]. [S. l. : s. n.], 2005.
- [9] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Ventilation for acceptable indoor air quality: ANSI/ASHRAE 62.1-2016[S]. [S. l. : s. n.], 2016.
- [10] WHO. Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: summary of risk assessment [S]. Geneva: World Health Organization, 2005.
- [11] 徐秋雨. 机场空气污染对飞机 ECS 性能的影响[D]. 天津: 天津大学, 2016: 36-49.
- [12] LIU Y D, CAO Q, LIU W, et al. Numerical modeling of particle deposition in the environmental control systems of commercial airliners on ground [J]. Building Simulation, 2017 (10): 265-275.

作者简介

曹 祎 女, 硕士, 工程师。主要研究方向: 飞机环控系统设
计。E-mail: caoyi1@comac.cc

张絮涵 女, 博士, 高工。主要研究方向: 飞机环控系统设
计。E-mail: zhangxuhan@comac.cc

Research on evaluation method of particle concentration in airplane cabin

CAO Yi * ZHANG Xuhan

(Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: People pay more and more attention to the air quality in the passenger cabin when they are flying. If the concentration of particles in the cabin exceeds the limit, it will cause harm to human health. Therefore, in the design of aircraft ventilation system, it is necessary to consider the constraints of cabin particle concentration limit on the system design. Inhalable particulate matter includes coarse particulate matter PM₁₀ and fine particulate matter PM_{2.5}. Taking a civil aircraft as the research object, this paper proposes an evaluation method of particulate matter concentration in the cockpit. By investigating the relevant technical documents at home and abroad and analyzing the index balance, the limit of particle concentration balance index was obtained. Taking the comfort value as the design requirement, the requirement compliance of the design scheme of a civil aircraft ventilation system was evaluated. The results show that the stable concentration of particulate matter in the cabin is independent of the cabin volume and ventilation volume, and the stable concentration of PM_{2.5} in the cabin is $31.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀ is $51.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In order to meet the design requirements of comfortable environment for particulate matter in cabin, it is necessary to add filters. According to calculation, when the recirculation filter is not installed, the minimum efficiency limit of the bleed air filter is 5.5%; when the bleed air filter is not installed, the minimum efficiency limit of the recirculation filter is 26%.

Keywords: civil aircraft; cabin particulate matter; evaluation

* Corresponding author. E-mail: caoyi1@comac.cc