面向人因工程学的公共建筑空气环境安全运维与控制

曹世杰^{1,2*}, 冯壮波¹, 王俊淇^{1,3}, 任宸¹, 朱浩程¹, 陈刚⁴, 梅江涛⁴

1. 东南大学建筑学院, 南京 210096;

2. Global Centre for Clean Air Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey, Guildford GU2 7XH, UK;

3. 苏州科技大学环境科学与工程学院, 苏州 215009;

4. 中建八局第三建设有限公司, 南京 210046

* 联系人, E-mail: shijie_cao@seu.edu.cn

2021-09-30 收稿, 2021-11-24 修回, 2021-11-25 接受, 2021-12-02 网络版发表

国家自然科学基金(51778385, 51808138, 52178069, 52108083)资助

摘要 公共建筑空间人员密集、人流量大, 空气污染种类多并呈现非均匀动态的分布特性, 给新冠肺炎疫情常态化空气安全保障带来了巨大挑战. 采用过量送风不仅可能造成较大能源浪费, 同时也可能导致交叉污染. 从人因工程学的核心理念和基本方法出发, 围绕室内空气污染水平(特别是人员散发的飞沫污染物)这一重要人因环境变量, 发展了一套建筑空气环境安全运维控制系统. 该系统基于室内空气污染和人员流动的动态监测, 由快速预测模型以及计算机视觉处理得到室内污染与人员的非均匀动态分布, 进一步通过环境控制决策系统输出最优通风参数设定, 实现通风智能化调控; 同时, 在通风环境营造基础上构建空气净化消杀系统, 对空气环境安全运维形成有力的辅助保障. 最后, 通过实际案例(某国际会议中心前厅)详细展示了该系统的工作流程和设计效果. 设计结果显示, 实施智能化通风可将人员感染风险降低至4%以内, 其通风节能率可达44.9%; 负氧离子的空间可达性较好且空间消杀率计算值超过99%, 可进一步降低感染风险.

关键词 室内空气安全, 智能通风, 人因工程, 净化消杀, 快速预测, 建筑节能

随着我国经济、社会的快速发展, 各类大型公共建筑如雨后春笋般出现在城市各个角落, 并已成为组织城市生活、构成城市形象、传承城市文化的重要载体^[1]. 据统计, 我国未来将会有约 $1 \times 10^8 \text{ m}^2$ 的新建大型公共建筑(如机场航站楼、铁路客站、工业厂房、体育场馆、大型商业中心等)^[2]. 大型公共建筑具有人员密集、人流量大等特点, 一旦发生空气安全事故, 则往往造成不可估量的损失和重大社会负面影响^[3,4]. 作为影响人员安全健康的重要人因环境变量, 室内空气污染水平是建筑空气环境安全运维的核心控制目标^[5], 具体包括 $\text{PM}_{2.5}$ /臭氧等室外来源污染物、挥发性有机

化合物等家具装修室内来源污染物以及二氧化碳/ SARS-CoV-2 气溶胶等人员呼吸来源污染物^[6]. 特别是2019年暴发的全球新型冠状病毒肺炎(Corona Virus Disease 2019, COVID-19)疫情, 对建筑空气环境的安全运维控制提出了巨大的挑战^[7,8].

营造安全、健康建筑空气环境的根本任务是控制各类空气污染物浓度水平和人员暴露量, 其核心要点在于“人”: 一方面, 需要根据人员健康需求控制室内污染^[9]; 另一方面, 需要将人员产生的 CO_2 、病毒型颗粒等有效去除^[10-13]. 在COVID-19疫情特殊时期, 人员呼吸产生的飞沫/飞沫核更是为最重要的空气污染控制类

引用格式: 曹世杰, 冯壮波, 王俊淇, 等. 面向人因工程学的公共建筑空气环境安全运维与控制. 科学通报, 2022, 67: 1783–1795

Cao S J, Feng Z B, Wang J Q, et al. Ergonomics-oriented operation, maintenance and control of indoor air environment for public buildings (in Chinese). Chin Sci Bull, 2022, 67: 1783–1795, doi: 10.1360/TB-2021-1024

别^[8]. 对于大型公共建筑空气污染高效控制, 其关键科学问题是“人”(室内人员)和“机器”(通风、净化消杀及智能化控制系统)的高效耦合和交互作用, 这也属于建筑学科的新兴研究方向: 城市/建筑人因工程学^[14]. 人因工程学旨在从人的生理、行为特性和感受体验出发, 以改善使用效能为导向^[15], 关注城市/建筑空间在各层次与人行为的互动^[16,17]. 因此, 大型公共建筑空气环境的安全营造需要聚焦相关人因环境变量(空气质量、人员分布)的实时监测与控制, 形成面向人因工程学的空气环境运维控制系统.

建筑通风和空气净化消杀是去除室内空气污染物和控制人员暴露量的重要方法^[18,19], 也是构建公共建筑空气环境运维控制系统的关键技术手段, 其实际效果不仅由设备本体效率、污染源特性等决定, 也同两者之间的耦合情况有关, 例如通风气流组织的设计决定污染物可达性, 进而影响空气净化消杀系统的总体效率. 对于人员密集且流动性强的大型公共建筑, 其空间复杂、布局多样、功能多元, 室内空气污染参数(尤其是人员呼吸来源污染物)呈现“非线性、非均匀、非定常”复杂分布特性^[20]. 若采用传统固定模式的通风/净化消杀方式, 易产生空气污染局部积聚、人员交叉感染、能源浪费等现象^[21,22], 例如2020年广东省某带有空调系统的中餐馆所发生的COVID-19聚集性感染事件^[23]. 为解决上述难题, 需聚焦于空气质量这一关键的人因环境变量, 根据建筑室内污染以及人员的动态分

布规律和行为特性, 对建筑通风和净化消杀系统进行智能化控制, 以实现空气污染物, 特别是人员散发生物气溶胶污染的有效去除.

针对大型公共建筑空气环境安全运维控制, 需要基于人因工程学思想, 树立“以人为本”的核心营造理念, 在各个环节都需要考虑人、设备机器和建筑环境的相互作用, 并将人在安全、健康方面的需求和动态分布/行为特性逐时反馈给智能化监控系统, 以实现关键人因环境变量(室内空气质量/空气污染水平)的高效控制. 本文着重介绍以人因工程学为基础的大型公共建筑空气环境安全运维控制系统, 包括环境监测、设备控制以及运维管理等, 重点阐述现有技术和人因工程理论的结合点. 最后, 以某国际会议中心为例, 展示该系统的实际实施成效.

1 方法与理论

1.1 建筑空气环境安全运维与控制

CO₂常作为公共建筑污染监测指标进行通风监控, 其可以关联人因参数(如疲劳程度等^[24]), 同时CO₂空间分布可以反映飞沫核(如粒径1 μm且跟随气流传播的新型冠状病毒附着体)的运动规律^[25], 对其进行在线监控对于疫情常态化防控也具有重要的意义. 建筑空气环境安全运维控制流程详见图1: 基于环境监测(环境参数和人员分布)数据, 通过快速预测模型以及监控图

图1 (网络版彩色)建筑空气环境安全运维控制流程

Figure 1 (Color online) Flowchart of operation and maintenance and control system for indoor air safety in buildings

像处理可得到室内污染与人员的非均匀动态分布,通过环境控制决策系统调用通风参数(如风机转速、风阀开度和风口风向等)并输出最优通风参数设定,实现智能化调控以营造安全、健康的公共建筑环境。其中,智慧云平台作为运维管理中枢和“人-机”交互桥梁;空气净化消杀可在智能通风基础上对病毒/细菌等污染进行有效控制,为建筑空气环境安全运维提供重要的辅助保障。

基于上述控制方案,我们构建了建筑空气防疫智能监控一体化平台(图2)。该平台以人因工程学为导向,充分考虑室内人员以及污染非均匀动态分布特性,通过智能化通风与净化消杀手段营造安全、健康、节能的公共建筑环境。此外,充分利用现代信息通信技术调动人员的主观参与,通过“环境监测-设备控制-运维管理”的一体化联动平台,实现“人-机”高效耦合和交互作用。具体内容如下。

(1) 环境监测。通过有限环境传感器监测室内环境参数,作为快速预测模型输入边界;通过视觉图像处理

监控视频数据,可得到人员动态分布情况。

(2) 设备控制。基于环境和人员快速预测信息,控制器实施快速决策并对通风系统进行智能化调控,进而对污染物浓度或人员密度较高区域进行强化通风,同时耦合室内空气净化消杀系统对室内空气进行处理,以最大程度降低人员感染风险并提升室内环境质量和通风能效。

(3) 运维管理。基于智慧云平台与移动端APP,将环境、人员及能耗数据实时展示,将风险评估结果通过语音预警等方式通知管理人员,及时疏散密集人群,同时联动智能通风系统。

1.2 智能通风

1.2.1 环境监测

实现面向人因工程学的建筑环境营造,需要对室内人员和CO₂动态分布进行实时监测,为室内环境快速预测模型和快速决策系统提供输入边界。室内人员监测技术一般适用于已具备视频监控模块、易受外界环

图2 (网络版彩色)建筑空气防疫智能监控一体化装备与平台

Figure 2 (Color online) Equipment and platform of intelligent monitoring for buildings epidemic prevention

境干扰的建筑空间,进一步实现人员的精准检测与定位。CO₂动态分布监测技术一般适用于人员流动性较大、环境密闭性较好的建筑空间,为实现人员数量的动态预测提供保障。室内人员和CO₂动态分布监测具有各自的技术优势,需要根据不同的应用场景选择更为合适的监测方案以提升监测有效性。两种监测策略具体内容如下。

当前的人员检测方法按收集信息的种类可分为三类:(1)基于环境信息间接监测,如测量温度或CO₂浓度等环境参数;(2)基于信息和通信技术间接监测,如红外线、Wi-Fi或低功耗蓝牙;(3)基于图像信息方法,通过计算机视觉处理视频监控数据获取人员密度分布、行为状态等高信息细粒度的人因参数。综合考虑监测精度、人员信息细粒度、实施便利性和成本因素,利用计算机视觉识别人员方法,构建了基于人员动态监测的智能通风控制技术^[26]。

考虑到室内CO₂动态非均匀分布特性以及监测成本和有效性,采用基于模糊聚类算法的有限监测最优部署策略,大大提升了监测数据信息有效性,可为室内环境快速预测模型提供可靠边界,进而实现了通过有限监测对室内污染非均匀分布进行快速预测^[27]。

1.2.2 快速决策

(1) 基于污染物监测的通风控制系统。对于大型公共建筑等人流量和环境特性存在明显变化的空间,需要对建筑通风系统进行动态快速调控,以充分满足人员安全和健康需求,其本质是在快速预测环境/人员分布的基础上做出科学评估和指令决策。然而,传统建筑环境预测方法(如计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD))计算时间长、成本高,不能直接用于在线控制。因此,我们构建了适用于大型公共建筑动态空气污染预测的自适应“非均匀降维-线性”快速预测模

型(图3)^[28],解决了均匀降维带来的多尺度网格单元信息缺失等问题。自适应方法能够高效、自动识别最优降维区域和数量,线性模型可快速预测任意空间分布和源强状态下的多源空气污染分布。该模型提高了90%以上预测精度(与多区模型相比),相对于传统CFD模拟节省了90%的计算时间(从几小时甚至几天降到几秒),并极大降低了数据存储容量(从上万MB降到几百KB,降低90%以上)^[29]。同时,发展了高斯分布“动量源法”^[30],可快速、准确预测人员移动对建筑环境气流组织和污染物扩散的影响。

基于室内污染物浓度有限监测数据,在自适应“非均匀降维-线性”空气污染快速预测模型的基础上,结合人工神经网络(artificial neural network, ANN)自主学习和优化求解的特性,提出了基于人工神经网络的空气污染快速决策方法:将通风气流组织模式、换气次数、传感器监测数据作为输入向量,输出量为最优通风设定参数,比如气流模式(风口风向)、通风量大小(风机转速或风阀开度)等^[31]。决策目标是在确保各类空气污染物浓度和人员暴露水平的基础上,尽可能将能耗最小化。进而,在算法模型的基础上结合先进传感器、控制器和执行器硬件装备(风机或风阀处),构建了智能化通风快速决策系统,形成了“监测、预测、控制”三位一体集成化空气污染通风监控平台,如图4(a)^[32]。

(2) 基于人员密度监测的通风控制系统。为应对新型冠状病毒的空气传播,一般建议采用较高的新风量来降低人员感染风险,但长时间采用较高新风量运行可能导致较高的能源消耗和运营成本。通过利用公共建筑中广泛布置的监控摄像头采集视频数据,采用智能计算机视觉识别算法YOLO(you only look once),实现了人员密度分布的实时监测(平均监测误差为7.5%)。

图3 面向室内空气污染快速预测的自适应“非均匀降维”预测模型。污染为点源

Figure 3 Adaptive non-uniform and low-dimensional rapid prediction model for indoor air pollutant concentration. Pollutant source is a point

图4 (网络版彩色)通风控制系统原理图。(a) 基于污染物监测的通风控制系统; (b) 基于在线人员密度监测的通风控制系统

Figure 4 (Color online) Schematic diagrams of ventilation control systems. (a) Ventilation control system based on monitoring of pollutant concentration; (b) online occupant-density-detection based ventilation control system

建筑通风系统可基于人员密度分布进行分区按需控制,避免局部区域过量通风或通风不足现象,实现通风防疫与节能。与传统的通风模式(固定新风比为15%)相比,该智能通风控制策略可以实现11.7%的节能率,同时可将感染概率降低到2%^[26]。我们搭建了基于低成本微控制器的智能化在线人员密度监测和通风控制硬件平台,如图4(b):首先采集视频数据,然后输入图像处理程序,得到人员密度分布数据,通过量化评估模型(即根据监测的人员密度分布与通风设计标准实施评估)得到最优通风控制参数(相关程序算法均嵌入控制器),将指令信号传输至风阀或变频风机控制通风风量。该控制系统可结合空调通风系统进行升级改造快速部署,具备快速应用推广潜力。

1.3 建筑室内空气污染净化消杀系统

建筑室内空气污染物广泛存在于空气中,也可沉降于室内表面,亦或聚积于空调系统,因此需要在建筑室内空间和暖通空调系统中进行空气过滤和消杀。对于空气中病毒性颗粒(如SARS-CoV-2气溶胶)的控制,目前常采用纤维式空气过滤器或紫外灯管去除或消杀。纤维式空气过滤器通过扩散、拦截、惯性等物理捕捉

机制去除不同粒径范围内的颗粒物。高效纤维过滤器(high efficiency particulate air filter, HEPA)的颗粒物去除效率可接近100%,但仍存在如下不足: (1) 压降大、能耗和更换成本高; (2) 细菌和病毒可在纤维过滤器中繁殖,存在再雾化和生物释放隐患,易导致二次污染和健康风险。紫外灯管具有消杀功能,可灭活病毒,但对颗粒污染物没有净化能力,功能过于单一。纤维过滤器和紫外线灯管对沉降在室内壁面的污染物均束手无策。

为解决当前常用净化消杀手段的局限性,现有研究采用了“紫外-静电-负氧离子-过滤”新型耦合式空气净化消杀系统,具体包括紫外线(ultra violet, UV)和空气过滤耦合系统(UV+Filter)^[33]、静电和空气过滤耦合系统(electrostatic disinfectant, ESD)^[34]和负氧离子发生器(ion generator)。UV+Filter和ESD系统的作用是针对空气中各类颗粒污染物进行过滤去除和消杀失活处理,其区别在于经济成本和副产物有所不同,而负氧离子发生器则可对空气和室内表面的沉积污染物进行消杀处理。

1.3.1 紫外线和空气过滤耦合系统

UV+Filter将紫外线灯管和褶皱式空气纤维过滤器串联布置,如图5(a)所示。生物气溶胶被空气过滤器捕

图5 建筑室内空气污染过滤消杀系统示意图。(a) 紫外线和空气过滤耦合系统; (b) 静电和空气过滤耦合系统; (c) 负氧离子发生器
Figure 5 Schematic diagrams of indoor air filter and disinfection system. (a) A coupling system of UV and air filter (UV+Filter); (b) a coupling system of electrostatics and air filter; (c) ion generator

提并沉积于滤料内部或表面, 紫外线可对纤维过滤器中的细菌、病毒进行高效失活(单紫外线消杀由于空气停留时间过短, 失活效率有限)。对于纤维滤料中的新型冠状病毒, 其失活所需的紫外光暴露量约为 3.3 J/m^2 ^[35]。同单独的过滤器和紫外灯管相比, UV+Filter兼具净化消杀功能, 降低了二次污染风险。为对UV+Filter关键参数(紫外灯数目、光强、褶皱距离/高度、纤维尺寸等)进行优化设计, 可采用多物理场数值模型, 包括空气湍流场、紫外线光场、颗粒分布和过滤消杀等。优化设计后, 过滤效率从低于20%提高到接近于100%, 同

时60 min的消杀效率保持在99.9%以上^[33]。

1.3.2 静电和空气过滤耦合系统

ESD通过微电晕放电产生离子化静电场, 一方面可大幅度增强纤维过滤器的颗粒净化效率, 另一方面也可通过电晕放电产生的负离子使过滤器中的生物颗粒失活并实现消杀, 如图5(b)所示。现有静电净化相关研究大多聚焦微电晕电场对过滤效应的提升作用, 并未将静电过滤和静电消杀耦合考虑。为充分利用静电消杀潜力, 可将静电消杀融入静电和空气过滤耦合设计中, 形成兼具高效过滤和消杀效率的静电空气处理

系统(ESD)。同单独的静电除尘器相比,ESD避免了电晕击穿所造成的零效率隐患。现有研究建立了ESD多物理场模型^[34],具体包括静电场、离子浓度场、电流体湍流场、纤维-离子耦合场、颗粒运动分布、过滤消杀等。相关参数(电压、入口速度)优化设计后,ESD的物理过滤和离子消杀效率都高于99.9%以上,同UV+Filter相比可节省99%的能耗。但是,ESD会释放一定量的臭氧,而UV+Filter无任何副产物产生。臭氧能破坏分解细菌的细胞壁,可以直接与细菌、病毒发生作用,使细菌的代谢和繁殖过程遭到破坏。低浓度的臭氧有助于消毒杀毒,但其浓度超标也将严重危害室内人员健康。

1.3.3 负氧离子发生器

UV+Filter和ESD对室内空间中被污染的表面没有消杀和净化效力。对于新型冠状病毒等高危型污染物,表面接触也是主要传播途径,需要进行有效的消杀处理^[36]。结合空气中负离子的健康效应,研究发展了适用于建筑室内的负氧离子发生器(图5(c)),其通过碳刷电极释放大量的负氧离子:一方面,可以有效消杀空气中的细菌和病毒^[37];另一方面,由于其良好的空间可达性,可以对室内表面的污染进行消杀灭活。对于大型公共建筑空间,为保证负氧离子较好的空间可达性,需针对建筑情况和气流组织特性,对负氧离子发生器的数量、安装位置等进行优化设计。

2 案例研究

下面以某国际会议中心智能化监控项目为例进行

案例分析。该国际会议中心包括单层公共建筑(展览厅)和高层民用公共建筑(会议、酒店和办公区域)。规划用地面积为 $8.7 \times 10^4 \text{ m}^2$,总建筑面积为 $1.86 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。本案例设计了智能化通风监控和净化消杀两种方案,设计效果展示如下。

2.1 建筑模型介绍

本案例选取一层前厅区域(用地面积为 292 m^2)展开详细阐述,几何模型如图6(a)所示。目标区域采用全空气变风量空调系统(设置新风比可调节),空调送风方式设置为顶送顶回模式,包括9个送风口、1个回风口和1个排风口均匀布置于顶部,排风口用于消防排烟,平时呈关闭状态。送风口呈圆形射流式,半径为200 mm,回风口呈单层百叶型,尺寸为 $2000 \text{ mm} \times 960 \text{ mm}$ 。根据人均面积设计需求($2.5 \sim 3 \text{ m}^2$),估算前厅区域设计容纳人员数量范围为0~100人。前厅区域最大送风量为 $9300 \text{ m}^3/\text{h}$,每个送风口的最大风速为2.3 m/s,空调可实现送风速度的三级调节,分别为0.7、1.5和2.3 m/s。

2.2 智能化通风监控

2.2.1 监控方案

如图6(a),本案例采用有限传感器布置策略:在人员呼吸区域贴墙布置4个传感器,在室内回风口旁布置1个传感器。以 CO_2 作为污染物示踪气体, CO_2 传感器将监测到的浓度值传送给数据采集器,为实施快速预测提供输入。如图6(b)所示,本案例针对人员呼吸平面(高

图6 (网络版彩色)案例研究模型示意图。(a)前厅区域几何模型、传感器和消杀装置部署策略示意图;(b)非均匀降维方法的子区域编号(呼吸平面处)

Figure 6 (Color online) Schematic diagrams of models in a case study. (a) Schematic diagram of the geometric model of the anteroom and deployment strategies of monitoring sensors and ion generators; (b) sub-area numbering (at the breathing plane) for the non-uniform and low-dimensional prediction method

度为1.7 m)实施了自适应非均匀降维, 将平面区域划分为11个非均匀子区域. 基于线性求解思路, 提出了呼吸平面各子区域的CO₂浓度快速预测方法:

$$C_i = \sum_{j=1}^5 a_j S_j \quad (1)$$

式中, i 为子区域编号($i=1\sim11$), C_i 为区域 i 内的低维CO₂浓度(ppm, 1 ppm=10⁻⁶), j 为传感器序号($j=1\sim5$), a_j 为系数, S_j 为传感器监测浓度(ppm). 根据各子区域浓度, 利用面积加权方法得到呼吸面平均CO₂浓度. 最后, 结合人工神经网络方法, 根据呼吸面平均浓度预测结果与空调送风速度(或换气次数)预测室内人员数量, 实施最优建筑通风参数(送风速度)快速决策.

2.2.2 监控效果

本案例采用数值模拟方法验证智能化通风监控效果, 设定人员数量变化范围为0~100(具体为0、20、40、60、80和100), 每个人员的CO₂释放速率为16.8 g/h^[29], CO₂背景浓度为400 ppm. 表1为具体模拟工况.

基于工况1~14, 获取CO₂浓度快速预测方法各系数, 相关系数均达到0.9. 基于工况15的数值模拟与快速预测方法比较情况如图7所示. 非均匀降维方法的平均离散误差为16.1%, CO₂浓度的平均预测误差为

11.9%, 说明“非均匀降维”快速预测方法预测效果良好.

结合基于人数预测的建筑通风快速决策方法^[20], 本案例得到了不同人员数量范围下的最优送风速度, 如表2所示. 当人数范围为0~40、41~80和大于80时, 最优送风速度分别为0.7、1.5和2.3 m/s. 不同最优送风速度作用下的呼吸面平均CO₂浓度均在健康标准范围内(小于700 ppm), 证明了快速决策方法的有效性. 智能化通风控制效果如表2所示, 包括感染风险和通风节能率. 其中, 感染风险根据Wells-Riley方程^[26]计算得到:

$$P = 1 - e^{-\frac{Iqpt}{Q}}, \quad (2)$$

式中, P 为感染风险(%), I 为感染者数量(设定为1), q 为每个感染者的病毒产生速率(h⁻¹), p 为每个易感人群每小时肺通气率(m³/h), t 为时间(h), Q 为建筑通风量(m³/h). 通风节能率根据不同人员数量下空调计算负荷与空调最大设计负荷的比值得到:

$$E = \frac{(E_f + E_h + E_e + E_l)}{\text{COP}}, \quad (3)$$

$$R = 1 - \frac{E}{E_{\max}}, \quad (4)$$

式中, E 为空调计算负荷(kW), E_f 为新风负荷(kW), E_h 为人体负荷(kW), E_e 为围护结构负荷(kW), E_l 为照明等设

图7 基于工况15的呼吸平面处数值模拟与快速预测方法所得CO₂浓度结果比较. (a) 数值模拟; (b) 非均匀降维; (c) 快速预测
Figure 7 Comparisons of CO₂ concentration at the breathing plane based on case 15 from simulations and fast prediction methods. (a) Numerical simulation; (b) non-uniform and low-dimensional method; (c) fast prediction method

表1 智能化通风监控模拟工况

Table 1 Simulation cases for intelligent monitoring and ventilation control

案例序号(工况)	送风速度(m/s)	换气次数	人员数量
1~10(快速预测方法构建)	0.7, 2.3	1, 3	20, 40, 60, 80, 100
11~14(快速预测方法构建)	1.5	2	20, 40, 80, 100
15(快速预测方法验证)	1.5	2	60

备负荷(kW), COP为空调能效比, R 为通风节能率(%), $E_{\max}$ 为空调最大设计负荷(kW). 从表2可以看出, 最优送风速度作用下, 人员感染风险均在4%以内且感染风险最多降低66.4%. 基于最优决策方法的节能率最高可达44.9%, 表明建筑通风智能化监控方案效果良好.

2.3 空气净化消杀

为进一步保障建筑室内空气安全, 需要在通风基础上强化空气净化和消杀(尤其考虑到病毒消杀), 综合考虑机电工程安装等因素, 本案例采用可移动式空气消杀系统, 通过释放负氧离子对室内空气和表面的生物污染进行消杀处理^[38]. 在前厅中, 沿着围墙布置负氧离子释放装置, 其高度为0.5 m. 建筑室内空间中负氧离子浓度($\#/\text{cm}^3$)通过求解组分方程得到, 并根据负氧离

子浓度分布得到空间消杀率分布情况^[34]. 空间消杀率指的是空间中某一点释放的污染物在负氧离子作用下, 运动1.5 m后的消杀比率. 空间消杀率的模拟方法是在空间某点释放气溶胶, 在计算其运动轨迹时, 通过对其离子暴露量进行时间积分, 得到轨迹中被灭活颗粒的比率, 即空间消杀率. 其中, 负氧离子浓度和空间消杀率的数值计算方法可参考文献^[34]. 本案例通过对比送风速度为2.3 m/s时不同数量消杀装置的效果, 进行净化消杀方案的优化设计.

图8(a)描述了不同负氧离子消杀设备数量工况下, 前厅中无量纲负氧离子浓度的分布情况(高度为1.7 m的水平面). 其中, C 和 C_0 分别代表空间中某点的负氧离子浓度值和负氧离子浓度参考值($2.1 \times 10^6 \#/\text{cm}^3$). 靠近消杀设备区域的负氧离子浓度较高, 且由于空气对流

表 2 不同人员数量范围下的最优送风速度及呼吸面平均 CO_2 浓度、感染风险和通风节能率

Table 2 Optimal air supply velocity, average CO_2 concentration at the breathing plane, infection risk and ventilation energy saving rate under different scenarios of occupant number

人员数量	最优送风速度(m/s)	呼吸面平均 CO_2 浓度(ppm)	感染风险(%)	相比于空调最大设计负荷的通风节能率(%)
0~20	0.7	524	3.04	44.9
21~40	0.7	649	3.04	35.9
41~60	1.5	576	1.53	26.9
61~80	1.5	694	1.53	17.9
81~100	2.3	592	1.02	8.8
>100	2.3	628	1.02	0.0

图 8 前厅不同消杀设备数量下的负氧离子浓度分布(a)及负氧离子消杀率分布(b). N 为负离子发生器数量

Figure 8 Distributions of negative ion concentration (a) and negative ion disinfection efficiency (b) in the anteroom with different numbers of ion generators. N is number of ion generators

和湍流扩散等因素,负氧离子浓度分布较为均匀.随着消杀设备数量的增加,负氧离子浓度水平也有显著的提升.

图8(b)描述了不同的负氧离子消杀设备数量工况下,前厅中空间消杀率的分布情况(高度为1.7 m的水平面).靠近消杀设备区域的空间消杀率数值较高.随着消杀设备数量的增加,负氧离子空间消杀率水平也有显著提升.对于10台消杀设备工况,空间消杀率基本接近100%,且分布较为均匀.对于其他工况,消杀设备附近消杀率较高(接近100%),其余区域空间消杀率明显降低且分布不均,在20%~100%范围内变化.

建筑通风和空气净化消杀的耦合起到了“1+1>2”的效果:(1)通风环境下的对流和湍流扩散作用强化了负氧离子空间可达性和消杀效果,同无通风工况相比,负氧离子的扩散速率提高了几十倍;(2)空气净化消杀可有效补充通风系统的污染去除效力(如通风死区、低速区等).负氧离子消杀系统可在建筑通风的基础上,将生物气溶胶浓度、人员暴露量和感染率继续降低1~2个数量级,进一步提升建筑空气环境安全运维系统的性能.

若继续增加消杀设备的数量,平均消杀率仍维持在100%左右,故在最终设计中采用10台消杀设备.前厅中10台消杀设备的总能耗约为30~50 W,单位建筑面积的消杀能耗约为0.10~0.17 W/m²,同公共建筑其他能耗(如空调冷负荷,>50 W/m²^[39])相比可以忽略.针对消杀设备的空间布局,本案例采用沿墙均匀布置的策略.未来研究需要针对消杀设备的空间布局模式进行深入探讨和优化.

3 结论

针对大型公共建筑空间人员密集、人流量大等特点,本文基于人因工程学的核心理念和基本方法,聚焦疫情时期人员在安全健康方面的重大需求,围绕室内

空气污染水平(特别是人员散发的飞沫污染物)这一重要人因环境变量,发展了一整套建筑空气环境安全运维控制系统.该系统在室内空气污染水平和人员流动情况监测的基础上对通风系统进行智能化动态调控,并在建筑空气消杀的辅助作用下确保空气污染物浓度在安全阈值以下.最后,通过实际案例详细展示了该系统的工作流程和设计效果.设计结果显示:(1)“非均匀降维”及污染浓度快速预测模型平均预测误差为11.9%,实施智能化通风监控可将人员感染风险降低至4%以内,基于最优决策方法的节能比率最高可达44.9%;(2)在通风环境基础上对空气消杀装置的数量/分布进行优化设计后,负氧离子的空间可达性较好且空间消杀率计算值超过99%,可进一步降低感染风险.该实例可为后续建筑空气环境安全运维控制系统的大范围推广和更新提升提供重要基础.

在未来研究中需要进行如下几个方面的提升:(1)将智能通风系统和净化消杀装置进行深度耦合,搭建全尺度建筑空气环境安全运维与智能化监控系统;(2)发展新型生物传感器装置(如呼吸道气溶胶或病毒在线监测设备),将病毒等微生物个体作为敏感材料进行浓度识别,并引入智能通风和净化消杀系统中,对呼吸道疾病传播进行直接监测;(3)在智能通风、新型监测、净化消杀等基础上加入人员密度、流量和行为的实时预测和分析,实现建筑空气防疫系统的预前控制,进一步提升传染病预防和控制的效果;(4)将面向大型公共建筑的建筑空气环境安全运维体系深入完善,推广于更多建筑类型(如住宅建筑、工业建筑等)与应用场景(监控目标多样化),结合建筑设计或改造阶段的优势与局限性,实现运维系统高效发展;(5)优化建筑环境“监测-预测-控制”算法逻辑,克服建筑环境快速决策理论与实际工程应用的衔接问题,推进运维平台规模化应用.

参考文献

- 1 Bian D H. Research on energy-saving operation and management of central air-conditioning systems in large public buildings (in Chinese). Ind Technol Inno, 2020, 2: 91–92 [边德海.大型公共建筑中央空调系统节能运行管理研究.产业科技创新, 2020, 2: 91–92]
- 2 Liu H. Energy efficiency monitored, diagnosis and optimized performance discussion of HVAC in large-scale public buildings (in Chinese). Master Dissertation. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2008 [刘航.大型公共建筑中央空调监测系统设计与实现.硕士学位论文.西安:西安交通大学, 2008]
- 3 Liang S. CFD simulation and optimization of airflow organization based on large space plant (in Chinese). Master Dissertation. Tianjin: Tiangong University, 2021 [梁爽.基于大空间厂房的CFD气流组织模拟和优化.硕士学位论文.天津:天津工业大学, 2021]
- 4 Zhang W D, Chen Y Z, Li Q, et al. Analysis of degree of influence and risk possibility of fire risk factors in large-scale public buildings in cities (in

- Chinese). *J Safety Environ*, 2021, 21: 1434–1439 [张无敌, 陈一洲, 李琪, 等. 城市大型公共建筑火灾风险因素影响程度及可能性分析. *安全与环境学报*, 2021, 21: 1434–1439]
- 5 Zhang Y P. Problems, thinking and suggestions on indoor air safety and health. *Safety Secur*, 2020, 41: 1–10 [张寅平. 室内空气安全和健康: 问题, 思考和建议. *安全*, 2020, 41: 1–10]
- 6 Long H B, Meng J J. Sources of major air pollutants in residential buildings and preventive and control measures (in Chinese). *Rural Economy Technol*, 2020, 31: 11–12 [龙慧斌, 孟晶晶. 住宅内主要空气污染物的来源及防控措施. *农村经济与科技*, 2020, 31: 11–12]
- 7 Dai R Y, Meng C. Positive role of green buildings in COVID-19 edidemic prevention and control (in Chinese). *Heat Ventil Air Cond*, 2020, 50: 36–39 [戴瑞烨, 孟冲. 绿色建筑在疫情防控中的积极作用思考. *暖通空调*, 2020, 50: 36–39]
- 8 Xu C W, Luo X L, Yu C, et al. The 2019-nCoV epidemic control strategies and future challenges of building healthy smart cities. *Indoor Built Environ*, 2020, 29: 639–644
- 9 Zhang Y P, Mo J H, Cheng R. Developing a sustainable indoor air environment: Problems, considerations and suggestions (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 1651–1660 [张寅平, 莫金汉, 程瑞. 营造可持续室内空气环境: 问题、思考和建议. *科学通报*, 2015, 60: 1651–1660]
- 10 Castner J, Gehrke G E, Shapiro N, et al. Community interest and feasibility of using a novel smartphone-based formaldehyde exposure detection technology. *Public Health Nurs*, 2018, 35: 261–272
- 11 Wang L, Ma J Z, He H. Technologies and suggestions for killing biological aerosol pathogens in indoor air (in Chinese). *Chin J Environ Eng*, 2020, 14: 1710–1717 [王莲, 马金珠, 贺泓. 室内生物气溶胶消杀措施及启示. *环境工程学报*, 2020, 14: 1710–1717]
- 12 Liu S Y, Yuan J Y. Regulation of concentration of indoor carbon dioxide (in Chinese). *Chem Educ*, 2021, 42: 1–7 [刘思源, 袁金颖. 室内二氧化碳浓度的调控. *化学教育*, 2021, 42: 1–7]
- 13 Zhuang Y J, Ma Z J, Long X A, et al. Numerical simulation on deposition effects of ultrafine particles in the asymmetrical lower respiratory tract (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 4054–4064 [庄依杰, 马子健, 龙霄翱, 等. 超细颗粒物在非对称下呼吸道中沉积效应的数值模拟. *科学通报*, 2021, 66: 4054–4064]
- 14 Zhang L. Urban ergonomics: An emerging field of cross-disciplinary studies (in Chinese). *World Architect*, 2021, (3): 8–9 [张利. 城市人因工程学: 一个学科交叉的新领域. *世界建筑*, 2021, (3): 8–9]
- 15 de Winter J C F, Hancock P A. Why human factors science is demonstrably necessary: historical and evolutionary foundations. *Ergonomics*, 2021, 64: 1115–1131
- 16 Zhu Y X. How to create a healthy and comfortable indoor thermal environment: Exploration on the relationship between the built environment and human comfort and health (in Chinese). *World Architect*, 2021, (3): 42–45, 126 [朱颖心. 如何营造健康舒适的建筑热环境——建筑环境与人体舒适及健康关系的探索. *世界建筑*, 2021, (3): 42–45, 126]
- 17 Jiang L M. Three dimensions and two projects of “Natural Construction” (in Chinese). *World Architect*, 2021, (3): 24–31, 12 [江立敏. “自然营造学”的三个维度、两个实践. *世界建筑*, 2021, (3): 24–31, 12]
- 18 Ruan T C, Rim D. Indoor air pollution in office buildings in mega-cities: Effects of filtration efficiency and outdoor air ventilation rates. *Sustain Cities Soc*, 2019, 49: 101609
- 19 Zhang Y P, Li J G, Liu W, et al. Tackling difficult problems through collaboration among multi-disciplinary research and industry (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2020, 65: 231–238 [张寅平, 李景广, 刘伟, 等. 多学科和多行业协同破解建筑室内空气质量难题. *科学通报*, 2020, 65: 231–238]
- 20 Cao S J, Ren C, Zhu H C. Online monitoring strategy of HVAC system based on the fast prediction models using limited monitoring data and low-dimensional linear models (in Chinese). *Build Sci*, 2021, 37: 83–92 [曹世杰, 任宸, 朱浩程. 基于有限监测与降维线性模型耦合预测的暖通空调系统在线监控方法与策略. *建筑科学*, 2021, 37: 83–92]
- 21 Xu C W, Liu W B, Chi J H, et al. Ventilation strategies for prevention and control of COVID-19: Potentials and challenges (in Chinese). *Build Sci*, 2021, 37: 135–142 [徐春雯, 刘文冰, 迟进华, 等. 新冠病毒肺炎防控的通风策略: 潜力与挑战. *建筑科学*, 2021, 37: 135–142]
- 22 Zhang X Y, Sun L Y, Gu X, et al. Study on influence of vents type and position on air cleaner (in Chinese). *J Harbin Univ Commer (Nat Sci Ed)*, 2021, 37: 314–320 [张心雨, 孙丽颖, 顾璇, 等. 风口形式和位置对空气净化器作用的影响研究. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2021, 37: 314–320]
- 23 Li Y G, Qian H, Hang J, et al. Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. *Build Environ*, 2021, 196: 107788
- 24 Zhang L, Deng H S, Mei X H, et al. Urban ergonomics and subterranean space design: A preliminary study on empirical methodologies and design making patterns (in Chinese). *World Architect*, 2021, (3): 19–23, 126 [张利, 邓慧姝, 梅笑寒, 等. 城市人因工程学导向的地下空间界面实证研究与设计决策方法初探. *世界建筑*, 2021, (3): 19–23, 126]
- 25 Ai Z, Mak C M, Gao N, et al. Tracer gas is a suitable surrogate of exhaled droplet nuclei for studying airborne transmission in the built environment. *Build Simul*, 2020, 13: 489–496
- 26 Wang J Q, Huang J J, Feng Z B, et al. Occupant-density-detection based energy efficient ventilation system: Prevention of infection transmission. *Energy Build*, 2021, 240: 110883
- 27 Cao S J, Ding J, Ren C. Sensor deployment strategy using cluster analysis of Fuzzy C-Means Algorithm: Towards online control of indoor

- p>environment's safety and health.
- [Sustain Cities Soc](#)
- , 2020, 59: 102190
- 28 Ren J, Cao S J. Development of self-adaptive low-dimension ventilation models using OpenFOAM: Towards the application of AI based on CFD data. [Build Environ](#), 2020, 171: 106671
 - 29 Ren C, Cao S J. Implementation and visualization of artificial intelligent ventilation control system using fast prediction models and limited monitoring data. [Sustain Cities Soc](#), 2020, 52: 101860
 - 30 Cao S J, Cen D, Zhang W, et al. Study on the impacts of human walking on indoor particles dispersion using momentum theory method. [Build Environ](#), 2017, 126: 195–206
 - 31 Cao S J, Ren C. Ventilation control strategy using low-dimensional linear ventilation models and artificial neural network. [Build Environ](#), 2018, 144: 316–333
 - 32 Zhu H C, Yu C W, Cao S J. Ventilation online monitoring and control system from the perspectives of technology application. [Indoor Built Environ](#), 2020, 29: 587–602
 - 33 Feng Z B, Cao S J, Haghighat F. Removal of SARS-CoV-2 using UV+Filter in built environment. [Sustain Cities Soc](#), 2021, 74: 103226
 - 34 Feng Z B, Cao S J, Wang J Q, et al. Indoor airborne disinfection with electrostatic disinfectant (ESD): Numerical simulations of ESD performance and reduction of computing time. [Build Environ](#), 2021, 200: 107956
 - 35 Sarkis-Onofre R, Borges R C, Demarco G, et al. Decontamination of N95 respirators against SARS-CoV-2: A scoping review. [J Dent](#), 2021, 104: 103534
 - 36 Zhao B, Liu Y M, Chen C. Air purifiers: A supplementary measure to remove airborne SARS-CoV-2. [Build Environ](#), 2020, 177: 106918
 - 37 Zhou P, Yang Y, Lai A C K, et al. Inactivation of airborne bacteria by cold plasma in air duct flow. [Build Environ](#), 2016, 106: 120–130
 - 38 Lin L, Liu X H, Zhang T, et al. Cooling load characteristic and uncertainty analysis of a hub airport terminal. [Energy Build](#), 2021, 231: 110619
 - 39 Lai A C K, Cheung A C T, Wong M M L, et al. Evaluation of cold plasma inactivation efficacy against different airborne bacteria in ventilation duct flow. [Build Environ](#), 2016, 98: 39–46

Summary for “面向人因工程学的公共建筑空气环境安全运维与控制”

Ergonomics-oriented operation, maintenance and control of indoor air environment for public buildings

Shi-Jie Cao^{1,2*}, Zhuangbo Feng¹, Junqi Wang^{1,3}, Chen Ren¹, Hao-Cheng Zhu¹, Gang Chen⁴ & Jiangtao Mei⁴

¹ School of Architecture, Southeast University, Nanjing 210096, China;

² Global Centre for Clean Air Research, Department of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Surrey, Guildford GU2 7XH, UK;

³ School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China;

⁴ The Third Construction CO., Ltd of China Construction Eighth Engineering Division, Nanjing 210046, China

* Corresponding author, E-mail: shijie_cao@seu.edu.cn

In response to the construction process of Healthy China, it is rather important to create a safe, healthy and energy-efficient indoor environment for public buildings. The public building space is often densely populated, with a large flow of people and many types of air pollution, which presents non-uniform dynamic distribution characteristics. This brings great challenges to the control of indoor air safety, especially during the pandemic period of COVID-19. Excessive ventilation may not only cause large energy waste, but also lead to cross-contamination and even a cluster of infection. In this paper, an operation and maintenance (O&M) control system for indoor air safety is developed based on the core concepts and basic methods of human ergonomics. In this system, one of the important human environmental variables is focused for control, i.e., indoor air pollution level. Especially after the outbreak of COVID-19, droplets and droplet nuclei from respiration are the most significant air pollution categories required for mitigation. Towards the efficient control of air pollution in large public buildings, it should further take into account the interaction of human, equipment and machines (i.e., ventilation, air purification and disinfection and intelligent control system) and building environment. Firstly, on the basis of the online monitoring of indoor air pollution concentration and personnel flow, the non-uniform dynamic distribution of indoor pollutants and personnel can be obtained by using the non-uniform and low-dimensional rapid prediction models and computer vision processing. Then, the optimal setting results of ventilation parameters (e.g., ventilation modes, supply air rate, etc.) can be outputted by the environmental control decision system. Finally, based on a combination of monitoring sensors, controllers and actuator hardware equipment (at the location of fans or dampers), the intelligent regulation and control of ventilation system can be realized, aimed at minimizing energy consumption and reducing pollutant concentration and exposure level. Meanwhile, the air purification and disinfection system (especially for the disinfection of virus particles) are operated under the condition of the ventilated environment, which can serve as a powerful auxiliary to the maintenance of indoor air safety. The workflow and effect of the O&M control system are demonstrated by an engineering application case of the front hall in the International Convention and Exhibition Center. The results indicate that the non-uniform and low-dimensional rapid prediction model for pollutant concentration is effective for the ventilation control with the average prediction difference of 11.9%. The implementation of the intelligent ventilation system can reduce the risk of human infection to less than 4%, and its energy-saving ratio for the ventilation can be as high as about 45%. Through optimizing the layout strategies of disinfection devices based on the intelligent ventilation control, the space accessibility of negative oxygen ions can be well accepted, to further increase the removal efficiency of air pollution. The calculated value of space disinfection rate is more than 99%, which can further reduce the risk of infection by 1–2 orders of magnitude. This study can provide an important reference for the promotion and upgrading of O&M control system for indoor air safety.

indoor air safety, intelligent ventilation, ergonomics, air purification and disinfection, fast prediction, building energy efficiency

doi: [10.1360/TB-2021-1024](https://doi.org/10.1360/TB-2021-1024)