不同通风设计下电梯轿厢空气传播感染风险的数值研究

Ata Nazari[1], 王畅畅 (王畅畅)[2, 3], 何瑞辰 (何瑞辰)[4], Farzad Taghizadeh-Hesary[5],洪家荣 (洪家荣)[*4, 3]

[1]大不里士大学，机械工程系，大不里士，伊朗[2]土木与环境工程系，香港理工大学，红磡，九龙，香港，中国[3] 圣安东尼瀑布实验室，明尼苏达大学，明尼阿波利斯，明尼苏达州 55455，美国[4]机械工程系及圣安东尼瀑布实验室，明尼苏达大学，明尼阿波利斯，明尼苏达州 55455，美国[5]耳鼻喉与头颈研究中心及系，五感健康研究所，医学院，伊朗医学科学大学，德黑兰，伊朗

摘要

封闭空间中含病毒气溶胶传播 SARS-CoV-2 引发了重大关注。电梯是现代高层建筑中常见的封闭空间，但不同供暖、通风与空调（暖通空调）系统对电梯轿厢内病毒传播的影响仍不明确，这带来了挑战。本研究采用计算建模，考察配备不同暖通空调系统的电梯轿厢内气溶胶传播情况。我们利用输运方程对气溶胶浓度进行建模，并评估乘客呼吸区的感染风险分布。我们计算了各类暖通空调设计的颗粒物去除效率，并提出抑制效应判据，以评估暖通空调系统的有效性。研究结果表明，入口和出口均设于天花板的混合通风在减少颗粒物扩散方面效率最高，在暴露时间内的最高去除效率达到79.40%。相比之下，分层通风模式的去除效率仅为3.97%。这些结果凸显了谨慎选择暖通空调系统对于降低电梯轿厢内SARS-CoV-2传播风险的重要性。

关键词：空气循环；新冠肺炎；电梯；OpenFOAM；SARS-CoV-2；通风

1. 引言

2019冠状病毒病（新冠肺炎）主要通过吸入含有严重急性呼吸综合征冠状病毒2型（SARS-CoV- 2）的呼吸道飞沫传播，这些飞沫在说话、咳嗽或打喷嚏等呼气活动中释放（Asadi 等人，2020年；Lewis，2020年；Wilson 等人，2020年；Nazari 等人，2021a；Fadavi 等人，2021年；Rakhsha 等人，2020a，b）。携带 SARS-CoV-2 的气溶胶直径可为 0.1 至 100 μm，

可在空气中悬浮数小时并传播较远距离，即使与感染者相距超过 6 英尺，仍会造成显著的感染风险（Dbouk & Drikakis，2020年；Niazi等人，2021年）。在封闭的室内空间，尤其是人员密集的区域，新冠肺炎的空气传播风险尤其高。在各种工程控制措施中，通风对于降低空气传播感染风险起着关键作用（Bhagat 等人，2020年）。新冠肺炎相关指南建议提高通风率，以降低封闭空间内的病毒传播风险（REHVA，2020年；Stewart 等人，2020年）。通风不足时，暖通空调系统可能会使呼吸道飞沫和气溶胶循环流动，从而增加空气传播风险（Bhagat 等人，2020年；Avni & Dagan，2022年；Calmet 等人，2021年；Dey 等人，2021年）。多项研究评估了各种实际场景中经暖通空调系统传播 SARS-CoV-2 的情况，包括地下停车场（Nazari 等人，2021a）、城市地铁（Nazari 等，2022）、餐厅（Zhang 等人，2021a；Liu 等人，2021年）、洗手间（Schreck 等人，2021年）、电梯（Dbouk & Drikakis，2021年；Nouri 等人，2021年；Peng 等人，2021年）、公共场所（MacIntyre & Hasanain，2020年；Shao 等人，2020年）、洁净室（Rezaei 等人，2020年）、城市公交车（Yang 等人，2022年；Zhang 等人，2021c）、教室（Narayanan 等人，2021年；He 等人，2021a；Burgmann 等人，2021年）、自助餐厅（Wu 等人，2021年）、飞机（Horstman & Rahai，2021年；Talaat 等人，2021年）、牙科诊所（Komperda 等人，2021年；Jia 等人，2021年）、自动扶梯（Li 等人，2021年）、管弦乐团管乐器演奏活动（Abraham 等人，2021年）以及其他封闭空间（Yan & Lan，2020年；Peña-Monferrer 等人，2021年；Motamedi 等人，2022年；Ahmadzadeh & Shams，2021年；Li 等人，2020年；Agrawal and Bhardwaj，2020年）。许多研究探讨了空气传播并制定了相应的缓解策略（Dbouk & Drikakis，2020年；Zhang 等人，2021b；Xi 等人，2020年；Koroteeva & ShagiyanKoroteeva & Shagiyanova，2022年；He 等人，2021b；Dbouk & Drikakis，2020年，Dbouk & Drikakis，2021年；Dbouk & Drikakis，2022年；Auvinen 等人，2022年；Agrawal & Bhardwaj，2021年）。

电梯是城市交通中不可或缺的出行方式，但其空间狭小、人员拥挤且通风不良，属于密闭空间，因此存在较高的新冠肺炎传播风险。迄今为止，尚无研究考察采用不同暖通空调设计的高速电梯内新冠肺炎的空气传播。在COVID-19大流行期间，这一风险在高层建筑密集的大都市尤为突出，例如纽约市，因为人们在这些地方乘坐电梯的时间更长。根据美国国家电梯行业协会的数据，美国人每年乘坐电梯和自动扶梯的行程约达25亿英里，超过铁路和航空总里程（NEII，2020年）。因此，了解气溶胶传播并找出有效且经济可行的

限制电梯轿厢内疾病传播的措施仍是亟待解决的问题。首尔（韩国）报告的首例电梯内新冠肺炎传播病例，引发了社区对电梯安全的讨论，尤其是在新冠肺炎重新开放之后（《首例电梯内新冠肺炎传播病例》，2020年）。保持社交距离的必要性降低了电梯容量，导致大堂排队、等待时间延长和工作效率下降。除保持社交距离、佩戴口罩和勤洗手外，改善电梯通风也有助于减少密闭空间内的病毒传播（Ananthanarayanan 等，2022年）。尽管已有大量证据研究高层建筑电梯井发生火灾时的烟气控制，但只有少数研究评估了电梯轿厢内的空气传播风险。一项近期针对包括电梯轿厢在内的公共场所气溶胶浓度测量的调查显示，通风不良（定义为每小时换气次数少于6次）的电梯感染风险较高（Somsen 等，2020年）。一项实验研究通过模拟在门关闭、门开启或电梯运行期间发生的单次咳嗽，考察了降低医院电梯内气溶胶滞留的措施，研究对象为中型和大型电梯（van Rijn 等，2020年）。该研究强调了通风设计对降低空气传播感染风险的重要性。因此，亟需系统研究电梯轿厢内不同的通风设计，以尽可能降低感染风险，同时有望提高电梯容量。

在COVID-19大流行期间，研究人员利用计算流体力学（CFD）工具开展了大量研究，评估各种室内环境中的感染风险以及不同风险缓解策略的有效性。这些研究表明，气流模式对气溶胶传播十分重要。Nazari 等人开展了一项数值研究，以探测射流风机对地下停车场内呼吸道气溶胶传播的影响。研究人员在地下停车场内确定了四个不同的喷嚏源位置，并建议安全通道应靠近新风管道；在射流风机内安装紫外线发射器和高效微粒空气（HEPA）过滤器，或可进一步消除病毒（Nazari 等，2021年b）。在另一项研究中，同一团队考察了城市地铁内的气溶胶传播，研究中考虑了两种暖通空调系统和多种感染者位置配置。他们通过将排气管道从城市地铁客舱顶部移至靠近地板的位置，提出了一种新型暖通空调系统设计。对于感染者在新风管道附近呼吸的情况，他们发现，传统暖通空调系统设计导致的气溶胶传播范围最大，气溶胶接触概率也最高（坐姿采样面上为51.2%）；而在所提出的设计中，这一数值降至3.5%（Nazari 等，2022年）。Li 等人通过实验和数值模拟

评估了低成本方案箱式风扇空气净化器（BFAP）在小型会议室中的影响。该会议室的表面积与体积之比较高。研究考察了BFAP对直接和间接气溶胶传播的影响。结果表明，BFAP设备显著降低了距离呼吸模拟器约1米以外区域的相对沉积，这有助于缓解封闭空间内的气溶胶扩散（Li 等，2022年）。

尽管全球高层建筑中的电梯使用频率很高，且可能成为新冠肺炎传播的潜在热点，但很少有研究探讨电梯轿厢内不同通风策略所涉及的空气传播感染风险。Shao 等人开展了一项研究，评估了三种实际场景下的空气传播风险，其中包括电梯轿厢。他们提出了局部风险指数，并评估了其在不同通风设置下的空间变化，同时指出，不合理的通风设计是造成室内感染热点的决定性因素（Shao 等人，2021年）。然而，该研究仅评估了一种顶棚通风方式，其气溶胶去除效率较低（低于20%）。在另一项研究中，Dbouk 等人探讨了机械通风系统和空气净化器对电梯轿厢内病毒空气传播的影响，并发现，只有在通风系统与空气净化器设计得到合理集成的情况下，空气净化器才能消除空气传播（Dbouk & Drikakis，2021年）。

迄今为止，尚无系统性研究调查不同通风系统下电梯轿厢内的空气传播，也未制定与电梯容量相关的最低通风率指南。因此，本研究旨在利用计算流体力学工具，系统评估不同通风设计降低电梯内感染风险等级的效果，并确定不同容量下用于尽量降低风险的最佳设计、最低通风率及运行时间。这些研究结果将使电梯能够在正常容量下运行，同时尽量降低空气传播风险。下一节介绍研究方法，包括电梯轿厢建模与空间网格、控制方程，以及通过多个案例研究对结果进行验证。第3节阐述不同电梯暖通空调设计对气溶胶感染概率风险的影响，并考察容量和换气率的作用。本研究提出了新的评价标准，用于说明暖通空调设计的流线模式对电梯性能的影响。此外，还计算了各暖通空调系统的颗粒物去除效率。最后一节总结研究发现并给出结论。

2. 方法

2.1. 电梯轿厢模型和空间网格

本研究建立了一个三维模型，模拟一部载重3,500磅、最大容量为21人的电梯。电梯轿厢的整体尺寸为2.03（m）× 1.65（m）× 2.44（m）（长× 宽× 高），详见图1a。模型表示一个设有九个站立位置的区域，这些位置分为三排。乘客之间的最小距离为0.39 m，最大距离为1.43 m，均小于新冠肺炎防控建议的6 ft间隔距离（Niazi等人，2021年）。假设所有乘客的体型尺寸相同。每位乘客均以一个人体模型块表示，其尺寸为0.28（m）× 0.16（m）× 1.8（m）（长× 宽× 高），体表面积总计为1.73 m^2，面向电梯门，如图1a所示。人体模型参照了在不同通风方式下模拟教室内人体呼出液滴扩散的数值模拟所采用的模型（Farouk等人，2021年）。口腔高度距地面1.60 m，口腔开口面积为3.14 cm^2,，直径为10 mm。假设电梯轿厢内的乘客中有一名新冠肺炎无症状者（下文称为传染源）。

如图 1d 和 1e 所示，采用了带近壁面加密的高精度非结构化网格。当电梯轿厢内有九名乘客站立时，网格由 5.6×10^6 个网格单元组成。随着载客量减少，乘客附近的加密网格被主体区域网格取代，后者比身体附近的网格更粗糙。当电梯轿厢内仅有一名乘客站立时，网格总数减少至 0.95×10^6 个网格单元。生成的网格最大尺寸为 ~15 mm，最小网格单元尺寸为 ~1 mm。为确保模拟过程中最大 $y^+ < 1$，身体表面、墙壁、天花板和地板附近采用了更小的网格。为确保不同乘客的计算网格具有相似性，仅在乘客附近生成一种网格，并对不同乘客采用相同的网格加密设置。本研究忽略所有乘客的吸气，仅考虑传染源的呼气活动。传染源口腔附近的网格进一步加密至约 1 mm，以确保呼吸射流动力学的准确性。为验证计算结果已充分摆脱对网格的依赖，将网格尺寸为 0.95×10^6 的结果与采用更精细的 1.2×10^6 个网格单元的网格所得结果进行了比较。观察到的差异表明，无需进一步加密基础网格。电梯轿厢送风通过多孔介质时的压降采用以下公式计算：

$$\Delta p = \frac{1}{2} C_2 \rho . \Delta n . v^2 + \frac{\mu}{\alpha} . \Delta n . v \tag{1}$$

其中 为 空气动力黏度，设为 ； 为空气速度；并且表示送风面 板的厚度。为获得准确 结果，对电梯送风管道采用了多孔边界条件。将 和 设为 150000 m^{-1} 和 1。5×10^{6} m^{-2}，分别对应（Nazari 等，2022）。

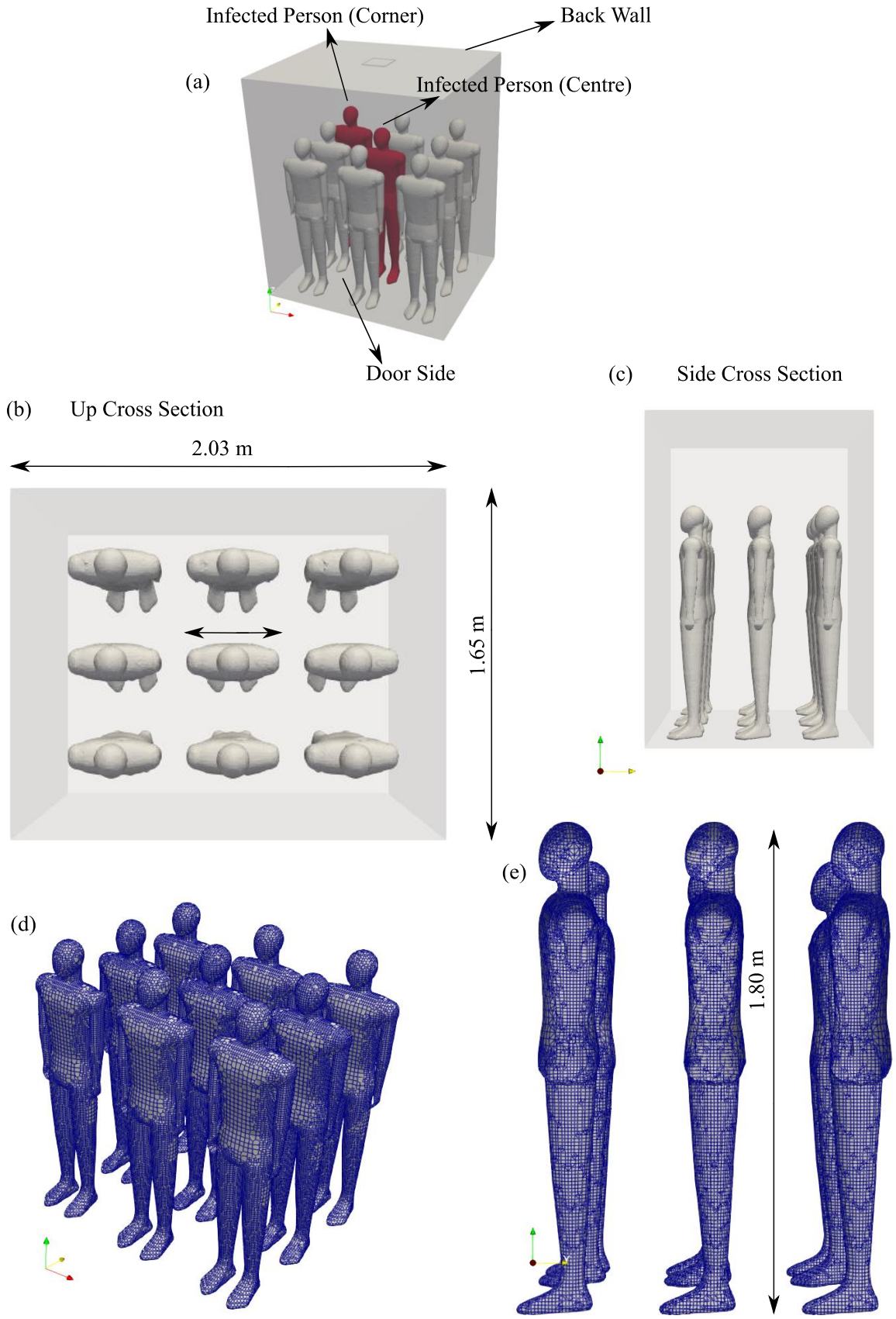


图1.（a）电梯轿厢模型、（b）上部剖面、（c）侧面剖面以及（d 和 e）计算流体力学模拟中使用的计算网格示意图。

2.2. 数值模拟 本研究采用

采用开源有限体积计算流体力学代码（OpenFOAM-5），在欧拉框架下模拟气流和气溶胶输运。通过求解不可压缩雷诺平均纳维–斯托克斯（RANS）方程计算气流，包括载流相的质量守恒、动量守恒和能量守恒方程，以及采用欧拉描述的组分方程。通过求解浓度输运方程，追踪含病毒呼吸道气溶胶的传播（Elghobashi，1994年；Bourouiba 等人，2014年）。以下方程给出了载流相（气流）的控制方程。（ Nazari 等，2022年；Nazari 等人，2021年b；Wang 和 Hong，2023年）：

$$div(\bar{u}_i) = 0 \tag{2}$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g.x\nabla(\frac{\rho}{\rho_0}) + \frac{\partial}{\partial x_j}[\mu(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i})] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \bar{u_i}' \bar{u_j}') \tag{3}$$

$$\rho c_p(\frac{\partial}{\partial x_j}\bar{u}_i \bar{T}) = \nabla.(k\nabla \bar{T}) + \frac{1}{2}\tau : (\nabla \bar{u}_i + \nabla \bar{u}_j^T) + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \bar{u}'_i \bar{T}) \tag{4}$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{u}_i \bar{C}) = \nabla.(D_{eff}\nabla \bar{C}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \bar{u}'_i \bar{C}) \tag{5}$$

其中，ρ、ρ_0、p、u、C、T_D、$_{eff}$k 和 分别表示流体的密度、参考密度、动压、速度、气溶胶浓度、温度、热导率和扩散率。在方程（3）中，动量方程采用了 Boussinesq近似。此外，在方程（5）中， 为 ，其中 Sc_t 和 Sc 分别为湍流和层流施密特数，且 Sc_t = Sc = 1。为忽略布朗运动对气溶胶扩散的影响，假设施密特数等于 1。这意味着在呼吸模型中，对于 1–10 μm 的颗粒，气溶胶的扩散速率与动量扩散速率相同。考虑到颗粒浓度较低，D_{eff} 忽略了颗粒引起的质量、动量和能量传递。对流项采用二阶迎风格式处理，扩散项采用高斯线性二阶方法处理。对计算单元的梯度应用了非正交修正。采用压力隐式算子分裂算法（PISO）耦合压力和速度。压力和速度收敛的最大残差分别为 10^{-8} 和 10^{-12}。所有模拟均采用标准 k-ε 湍流模型

本研究采用了该模型。已有研究表明，该模型适用于封闭空间内的气流模拟，且计算成本较低（Nazari 等人，2022年；Gao et al.，2017年）。模拟模型基于以下假设：（1）呼吸道气溶胶颗粒的尺寸和物理性质在整个模拟过程中保持不变；（2）不考虑呼吸道颗粒的生成；（3）病毒表面棘突状结构对病毒传播的影响可忽略不计；（4）假设电梯轿厢加速度保持恒定。

2.3. 研究设计

图2总结了本研究中的模拟案例，包括：（1）混合通风（MV-1、MV-2、MV-3、MV-4、MV-5、MV-6和MV-7）；（2）置换通风（DV-1）和分层通风（SV-1和SV-2）。作为一种常用的机械通风模式，混合通风（MV）通过与空气充分混合来稀释病毒浓度。根据利用室外新鲜空气置换受污染的室内空气这一原理，DV在降低气溶胶浓度方面具有优势。对于基准情形，电梯轿厢配备了混合通风系统（MV-1），该系统选自电梯轿厢内商用的通风系统，如图2a所示（Du & Chen，2022年）。通风系统的入口位于天花板上，而多个分布式出口则位于靠近地面的侧壁上。MV-1的入口和出口尺寸分别为 0.4×0.4 m^2 和0.15×0.1 m^2, 。MV-1出口采用出口压力边界条件，而MV-1入口采用恒定速度边界条件。

MV-1 的速度设为 0.10 m/s，对于模拟的电梯轿厢尺寸，这相当于 34 立方英尺每分钟和 7 换气次数，用于以循环污染空气的相同流量引入室外洁净空气。固体壁面采用无滑移边界条件。电梯轿厢内的温度设为 20 °C，电梯轿厢侧壁、地板和天花板采用绝热边界条件，以防止与外界发生热传递。人体模型表面和呼吸气流的温度分别设为 31 °C 和 33 °C（Nazari 等，2022）。本研究忽略了通风系统的加热或冷却效应。因此，入口处的通风系统温度与室温相同。感染者位于中心或角落的两个位置之一。乘客被视为驱动电梯轿厢内热浮力流的唯一热源。通过在人体模型口腔处施加随时间变化的注入曲线来模拟呼吸活动，以再现人体呼吸。根据所有模拟工况的实验数据，呼吸气流量设为 0.00033 m^3s^{-1}

（Nazari 等，2022）。每个呼吸周期注入 44 个颗粒物。颗粒物注入模拟持续六分钟，代表感染者呼吸与电梯暖通空调运行所需时间相同。据推定，电梯的重力加速度恒定为 9.81 m/s^2。换言之，忽略了电梯轿厢运动方向的影响。

为研究通风流向的影响，设计了两个采用向外流动设计的案例研究，其入口设于天花板（与此前入口位于底部的案例相反）。为考察不同通风系统的性能，另采用了九种通风系统，包括混合通风（MV-2、MV-3、MV-4、MV-5、MV-6 和 MV-7）、置换通风（DV-1）和分层通风（SV-1 和 SV-2）（图2）。考虑到有两个感染源（乘客1和乘客5）以及九种通风系统，本研究共模拟了十六种工况。为研究提高通风率的影响，通过提高通风系统的速度，使有效换气次数从 2 ACH 增至 12 ACH。此外，为进一步考察容量的影响，对电梯轿厢内乘客人数不同（两名、五名和九名）的工况进行了模拟。除此之外，还评估了电梯轿厢内的颗粒物滞留情况。在这一工况下，分析了电梯轿厢内没有乘客且通风系统仍在运行时受污染颗粒物的滞留情况。

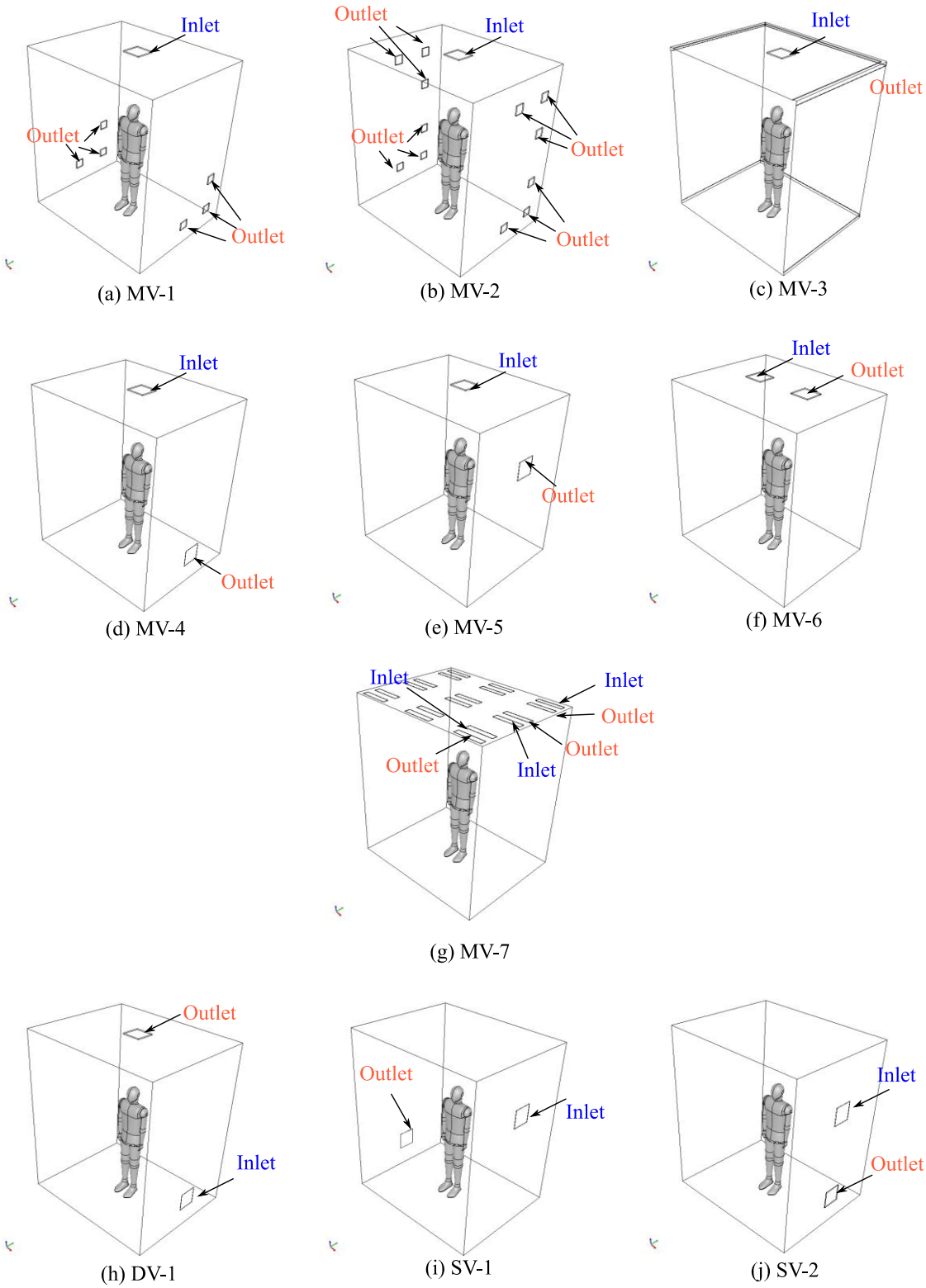


图2. 电梯轿厢内不同通风系统的示意图，显示送风散流器（入口，蓝色）、排风格栅（出口，红色）以及图1中站在位置5（中心）的一个呼吸热人体模型。缩写：MV，混合通风；DV，置换通风；SV，分层通风。

2.4. 模拟验证

本研究分别采用 Salome 软件（版本 6）和 SnappyHexMesh 工具生成并离散人体模型的几何体。由于几何模型较为复杂，本研究采用了适用于各种几何结构的非结构网格。网格无关性测试结果见图 3。单个人体模型工况的合适网格数量为 95 万个网格单元；五个人体模型和九个人体模型工况分别为 170 万个和 390 万个网格单元。图 3d 展示了单个人体模型工况下的三种网格配置，图 3e 表明，95 万网格适用于本研究。图 3e 展示了 I_{risk} 沿电梯长度方向的变化。如图所示，在不同位置，95 万网格与 120 万网格所得曲线之间的差异几乎可以忽略。为验证所采用的气溶胶传播数值计算方法，本研究将计算流体力学模拟结果与 Zhang 等人关于置换通风封闭房间的研究进行了比较（Zhang 等人，2006年）。图 3b 和图 3c 分别比较了两项研究中的速度分布和温度分布。Zhang 等人（2006年）通过实验测量和数值模拟，研究了通风房间中的颗粒物输运与分布。他们设置了七个采样点，用于比较数值结果与实验结果，并采用人体模拟器确定暖通空调系统的复杂气流与污染物来源之间的相互作用。计算点位于封闭房间中央，并沿 z 方向布置。本研究在封闭房间内的三个垂直测量点处计算速度和温度，并与 Zhang 等人（2006年）的实验结果进行比较。随后，计算并比较了垂直速度和温度的最大差异（图 3a 中的 P1、P4 和 P7 点）。图 3b 和图 3c 中两种工况下速度和温度的最大相对偏差分别约为 1.9% 和 0.3%。

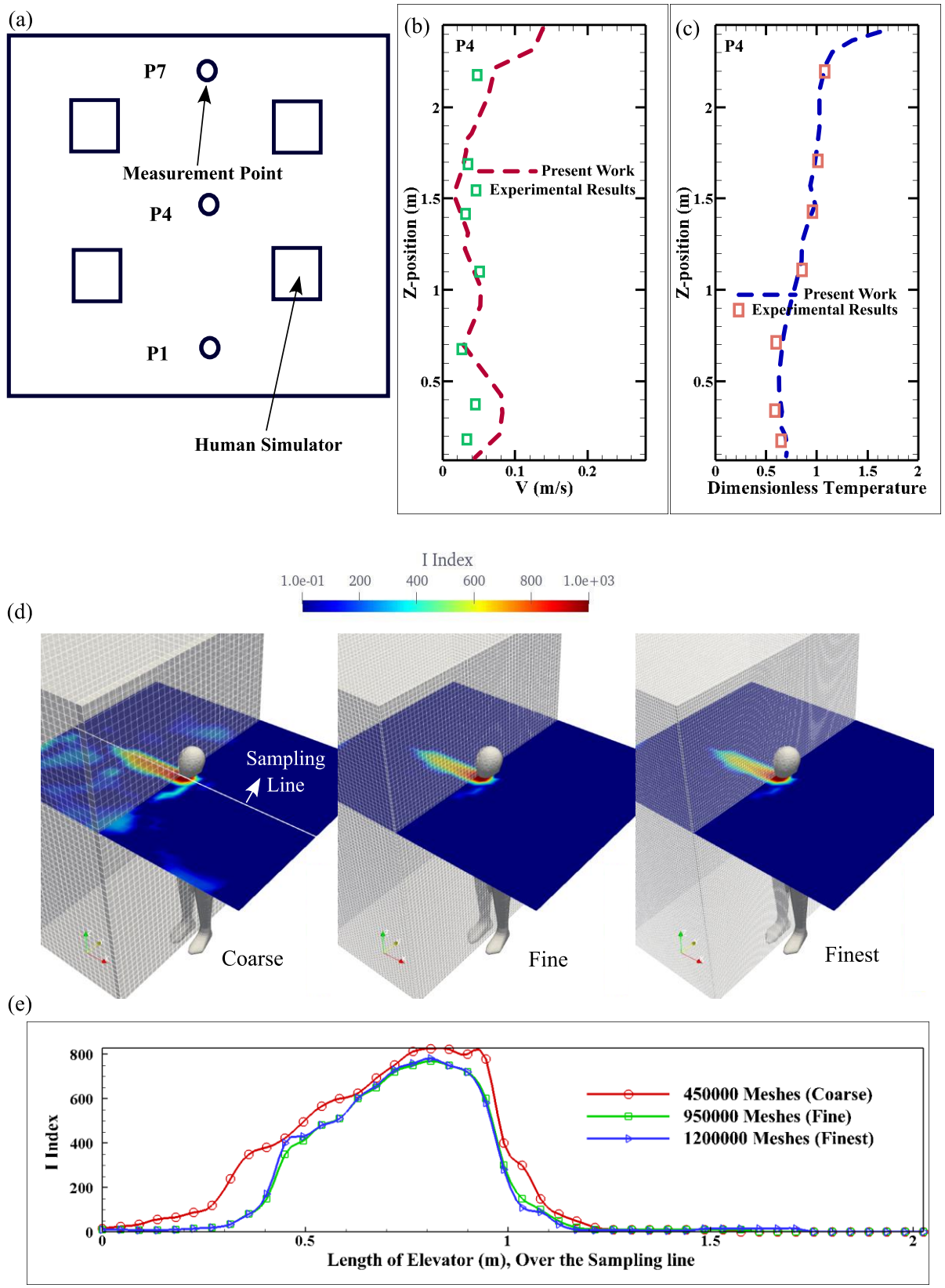


图 3。（a）：Zhang 等人（2006年）研究中的人体模拟器和采样点示意图。（b）和（c）：P4 处的速度和温度与 Zhang 等人的实验结果对比（Zhang 等人，2006年）。（d）和（e）：分别采用包含 45 万个网格单元的粗网格、包含 95 万个网格单元的细网格和包含 120 万个网格单元的最细网格，得到的口腔前方 I_{risk}等值线及其随电梯长度方向位置（采样线）的变化。

2.5. 电梯暖通空调设计评估标准

2.5.1. 感染风险概率

为量化特定位置含病毒颗粒的相对风险，采用了气溶胶概率指数 (P)。根据电梯内典型的温度和通风速度，Wells–Riley 方程 已用于计算感染风险概率。I_{risk} （风险指数）以采样表面含病毒颗粒的风险为特征。该指标量化了模拟周期内经过特定位置的颗粒物数量，计算方法是将整个模拟周期内经过采样表面各点的颗粒物总数相加。

$$I_{risk} = \sum Q_i \tag{6}$$

其中，Q_i 定义为：

$$Q_i = \begin{cases} 1, & \text{第 i 个颗粒物首次出现在采样表面 Q} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

采样表面穿过乘客呼吸区半球的中心（图4a和图4c）。“我们将半球形呼吸区定义为半径300毫米的区域，该区域涵盖鼻子和口腔周围的范围，大部分吸入肺部的空气都来自这里。感染者的量子产生率（q）以每秒量子数（quanta. s^{-1}）为单位。特定区域内的I_{risk} 值越高，表示传播风险越高。喷出的颗粒物数量定义为

$$N = \sum_0^t C\dot{V} \tag{7}$$

其中t和 分别表示暴露时间和人体呼吸速率，设为 240 s 和 0.00033 $m^3.s^{-1}$，（Nazari 等人，2022年；Zhang 等人，2021年b）。本研究假设电梯轿厢内的呼吸源产生连续流（Nazari 等人，2022年；Zhang等人，2021年b）。此外，假设个体口腔处的空气始终以每秒 0.2 m 的速率向外流动。$^{-1}$（呼吸周期为 ~5 s，每分钟呼吸 12 次）。模拟时间足够长，因此可忽略周期性影响，因为研究重点是远离排放源处的空气传播。连续呼吸模型适用于分析暴露时间内电梯轿厢中的病毒运动。本研究忽略了呼吸的脉动特性，而采用与整个呼吸周期平均速度相当的稳态流速。该周期对于呼气阶段的病毒载量及其模拟至关重要——

相关病毒载量，并模拟受限空间中的气溶胶扩散。为获得稳态等效结果，研究考虑了振荡速度流动指数，该指数对从呼气阶段开始到结束的整个模拟过程中的流速取平均值。振荡指数（OI）的一种类似形式如下式所示（Piemjaiswang 等人，2019年）：

$$OI\{\varphi\} = 1 - \frac{\left\| \frac{1}{T}\int_T \varphi dt \right\|}{\frac{1}{T}\int_T \|\varphi\| dt} \tag{8}$$

其中，φ 是通用流场变量，T 是评估时间。将振荡指数按流速加权后，可得到振荡速度流动指数（OVFI），如下式所示（Piemjaiswang 等人，2019）：

$$OI\{u\} = OVFI = 1 - \frac{\|\bar{u}\|}{\|u\|} \tag{9}$$

2.5.2. 抑制效果（SE）

本研究采用的另一项判据是抑制效果（SE）。本研究引入暖通空调抑制效应，用以表示空气传播过程中颗粒物持续处于呼吸区以下的情况。

$$SE = \frac{\sum_0^{t_{ES}} Q_{SE}}{Q_{all}} \tag{10}$$

在本研究中，将至少一次进入呼吸区下方、随后从排气管道中迅速逸出电梯或留在该区域内的气溶胶部分定义为 Q_{SE}。MV-1、MV-2、MV-3、MV-4、SV-1 和 SV-2 的暖通空调设计均在呼吸区下方设置了排气管道，再循环气溶胶会增加采样表面上的风险指数。为更好地理解暖通空调管道配置对气溶胶行为的影响，本文引入了抑制效应区的概念，如图4b所示；图4a和图4c分别展示了采样表面和呼吸区。抑制效应区利用 OpenFOAM 中的 Swak4Foam 工具计算得出，用于说明暖通空调设计的流线对呼吸行为的影响。Nazari 等人最近针对城市地铁中的一种新型暖通空调系统提出了这一概念（Nazari 等，2022），据作者所知，其对电梯这类狭长且较大的空间的适用性尚未得到研究。在电梯内，小空间中墙壁的无滑移边界条件可能会

改变气溶胶载流体的流向，并导致气溶胶在电梯内部扩散。因此，本文研究了不同电梯暖通空调设计对气溶胶扩散的影响。

2.5.3. 颗粒物去除效率（ε_p）

评估电梯暖通空调性能的另一项重要指标是颗粒物去除效率（ε_p）。该参数定义为不同通风率下经通风出口排出的颗粒物数量与注入电梯内部的颗粒物总数之比。颗粒物去除效率常用于评估通风在缓解空气传播方面的效果。

$$\varepsilon_p = \frac{\sum_{0}^{t} Q_{Exit}}{Q_{all}} \tag{11}$$

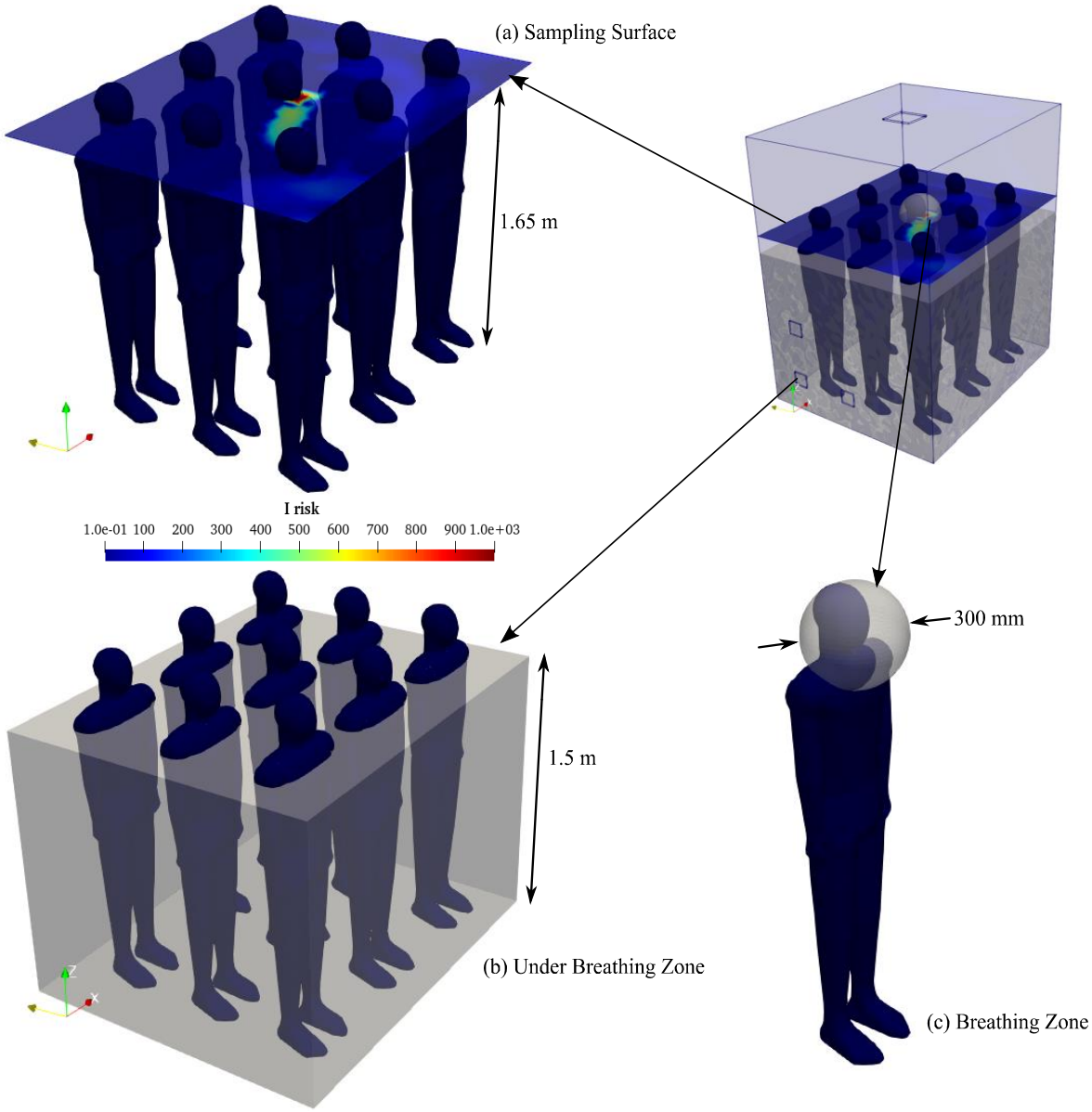


图 4. 呼吸区、呼吸区下方和采样表面的示意图。

3. 结果与讨论

本节展示了不同情景下暴露时间对应的浓度等值线。需要指出的是，电梯轿厢不规则停靠以供乘客上下，是电梯运输的一项重要特点，这会进一步增加病毒传播风险。暴露时间取决于建筑物的高度。本研究通过展示不同通风设计的影响，重点探讨电梯轿厢内的气溶胶动力学。根据呼吸道颗粒的累积情况，结果表明，由于每个风管下方均形成规则流线，MV-7设计能够有效抑制感染者位于两处不同位置时形成的气溶胶云，从而防止气溶胶扩散。

此外，DV-1 暖通空调设计表现出更高的颗粒物去除效率和更低的

与 SV-1 和 SV-2 设计相比，采样表面上的颗粒物积聚更少。在研究的第二步中，探讨了电梯容量对感染风险的影响。研究结果表明，随着电梯容量增加，DV-1 和 MV-7 暖通空调设计的感染风险概率也随之增加。研究发现，MV-7 暖通空调系统能够通过安全路径快速清除气溶胶，效果更佳，这归功于其为每个人单独设置的分隔通风。然而，随着电梯内人数增加，颗粒物逸出的路径减少，导致采样表面上出现颗粒物积聚。这种积聚可能会增加感染风险，尤其是在通风不良的电梯中。在第三步中，研究了电梯换气次数对呼吸气溶胶的影响。本部分研究选取了每小时 2、7 和 12 次换气。结果表明，将换气次数从 2 次提高到 12 次，可降低位于中心和角落的感染源情形下的气溶胶感染风险。换气次数较低、通风不良的电梯会形成较弱的剪切流，无法改变气溶胶云的方向，从而导致病毒更容易向排气管道传播。在通风不良的情形下，会形成颗粒物高度积聚区域，这些区域对应着病毒传播风险较高的位置。图5总结了本研究的三个主要步骤。

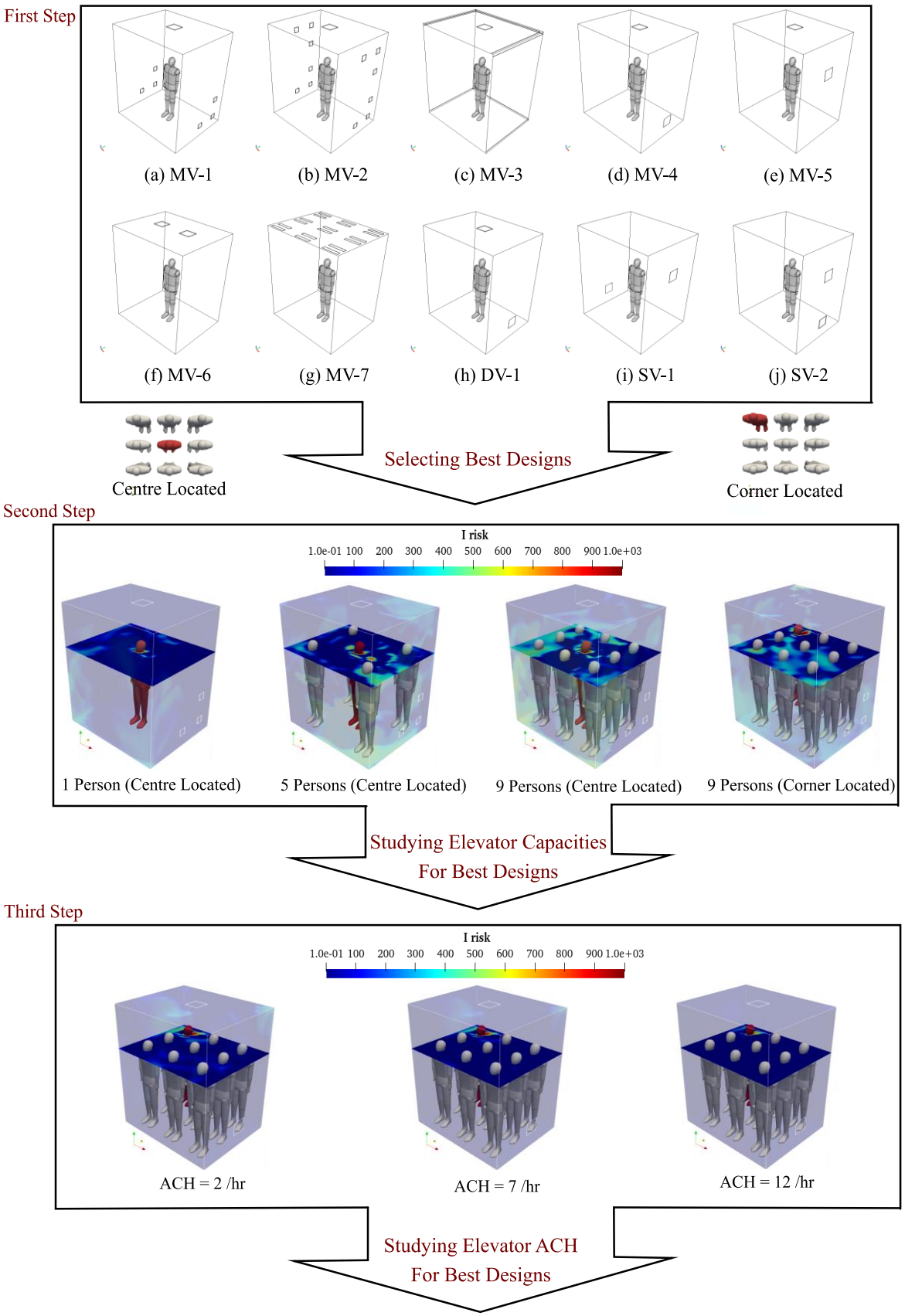


图5. 本研究三个主要步骤的示意图。第一步展示了如何根据采样表面上的呼吸颗粒分布选择合适的暖通空调设计。在第二步中，电梯容量对的影响。

评估了采样表面上的呼吸颗粒物累积。第三步展示了换气次数对颗粒物运动的影响。

3.1. 不同通风设计下的气溶胶感染风险

表1总结了本研究中针对不同暖通空调设计计算的各项指标，分别考虑了感染源位于中心和角落两种情况。结果表明，MV-7设计具有最高的颗粒物去除效率，对于感染源位于中心和角落的情况，其最大值分别为75.90%和79.40%。对于MV-6和MV-3，感染源位于中心时的颗粒物去除效率分别为62.40%和13.20%，而感染源位于角落时，相应数值分别为43.01%和16.84%。在混合通风设计中，由于MV-3采用角部出口风管，且入口气流方向与重力方向相反，导致向上流动的出口气流之间发生交叉接触，从而降低了颗粒物去除效率，因此MV-3的颗粒物去除效率最低。对于DV-1、SV-1和SV-2暖通空调设计，感染源位于中心时计算得到的颗粒物去除效率分别为74.79%、7.93%和4.99%，而感染源位于角落时，相应数值分别为42.77%、4.90%和3.97%。在这三种设计中，由于颗粒物去除路径较短，降低了抑制效应，因此DV-1具有最高的颗粒物去除效率。

在所有通风设计中，分层通风设计（SV-1 和 SV-2）对位于中心和角落的感染源均表现出最高的抑制效果，这意味着它们能够在呼吸区外（即呼吸区下方）去除最多的颗粒物。

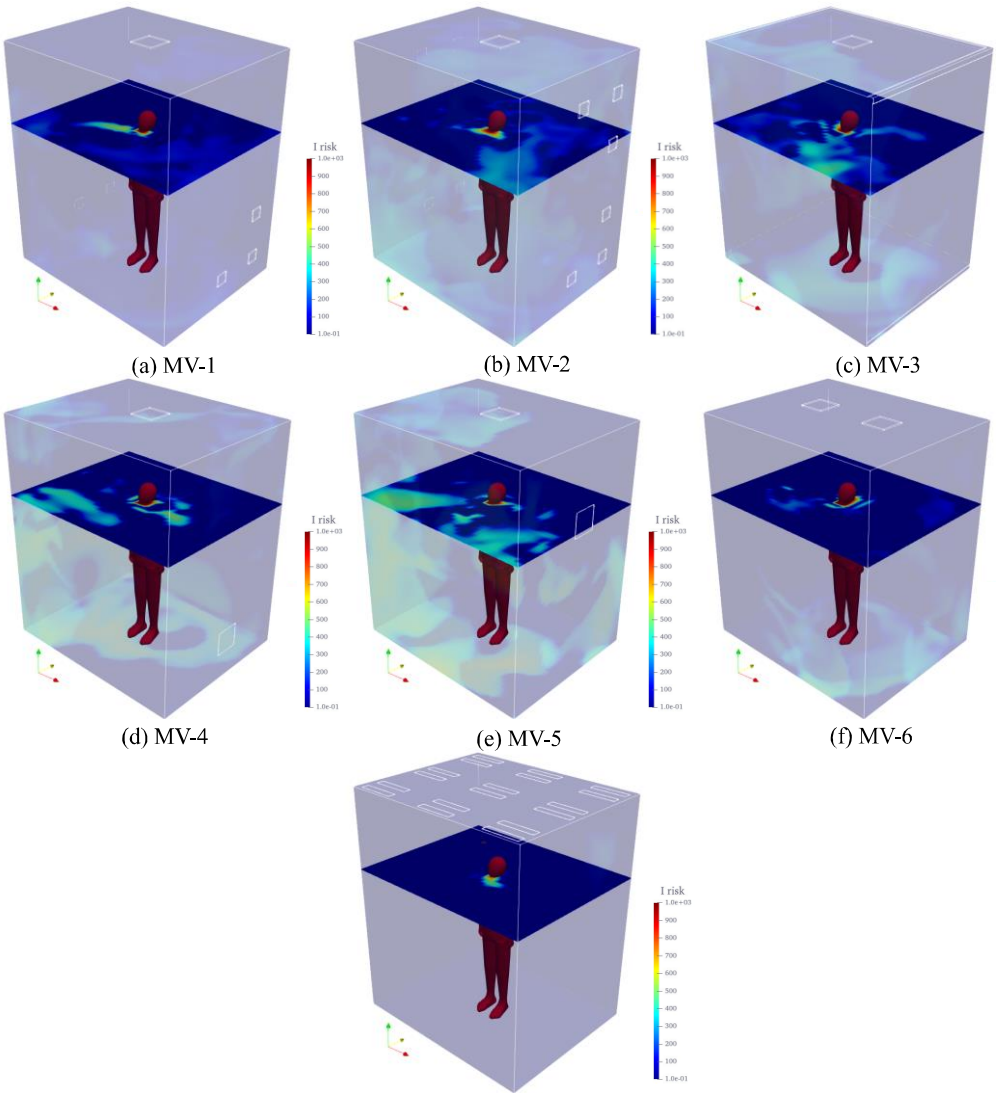
表 1. 本研究中计算指标的汇总。

研究	通风类型	来源	ACH	抑制效果（%）	颗粒物去除效率（%）	感染风险概率（%），在采样表面上
基准情形	MV-1	中心	7	53.20 %	12.31%	16.20 %
	MV-1	角落	7	58.30 %	10.85%	11.80 %
影响	MV-2	中心	7	22.20 %	16.62%	19.50 %
空气分布	MV-3	中心	7	28.30 %	13.20%	10.00 %
	MV-4	中心	7	62.10 %	16.93%	16.80 %
	MV-5	中心	7	26.70 %	20.41%	30.20 %
	MV-6	中心	7	10.40 %	62.40%	07.00 %
	MV-7	中心	7	05.10 %	75.90 %	06.10 %
	DV-1	中心	7	13.20 %	74.79%	18.80 %
	SV-1	中心	7	65.40 %	07.93%	13.00 %
	SV-2	中心	7	73.40 %	04.99%	14.80 %

MV-2	角落	7	30.40 %	15.61%	35.20 %
MV-3	角落	7	35.10 %	16.84%	16.00 %
MV-4	角落	7	58.00 %	10.17%	20.20 %
MV-5	角落	7	22.70 %	19.14%	31.70 %
MV-6	角落	7	08.20 %	43.01%	10.50 %
MV-7	角落	7	05.30 %	79.40 %	07.30 %
DV-1	角落	7	18.40 %	42.77%	09.00 %
SV-1	角落	7	67.70 %	04.90%	07.10%
SV-2	角落	7	62.40 %	03.97%	19.05 %

缩写：MV，混合通风；DV，置换通风；SV，分层通风。

图6展示了位于中心的感染源在不同混合通风设计下的感染风险分布。结果表明，MV-6 和 MV-7 的感染风险分布低于其他通风设计。然而，在混合通风系统中，MV-5 的感染概率最高，为 30.2%。这可能是因为排气管道的位置增加了气溶胶在采样表面上方的运动，从而提高了 MV-5 设计中每个人的感染风险。为进一步探究图6所示观测结果中，位于中心的传染源所对应的抑制效果和感染风险概率背后的物理机制，图7展示了相应的流线。管道的位置和流线直接影响抑制效果数值。如图7所示，流线形态受管道位置影响，而暖通空调系统产生的气流会影响感染风险。计算得出的 MV-7 在感染源位于中心和角落时的感染风险概率分别为 06.10% 和 07.30%。然而，这两种位置对应的抑制效果分别为 05.10% 和 05.30%。这表明 MV-7 设计主要将产生的颗粒物从电梯轿厢顶部排出，且其流动模式不利于气溶胶扩散到呼吸区下方。因此，不建议在电梯乘客上下客的情况下采用这种暖通空调设计。MV-6 和 DV-1 设计的情况类似，抑制效果都很低。然而，由于感染风险较低且颗粒物去除效率高，这些暖通空调设计适用于电梯行驶期间。图8展示了 DV-1、SV-1 和 SV-2 设计下的感染风险分布和流线。SV-1 和 SV-2 在采样表面上的感染风险分布最高。



(a) MV-1 (b) MV-2 (c) MV-3

(d) MV-4 (e) MV-5 (f) MV-6

(g) MV-7

图6. 混合通风设计对位于中心的传染源所产生的颗粒物扩散的影响；换气次数为 7 hr^{-1}

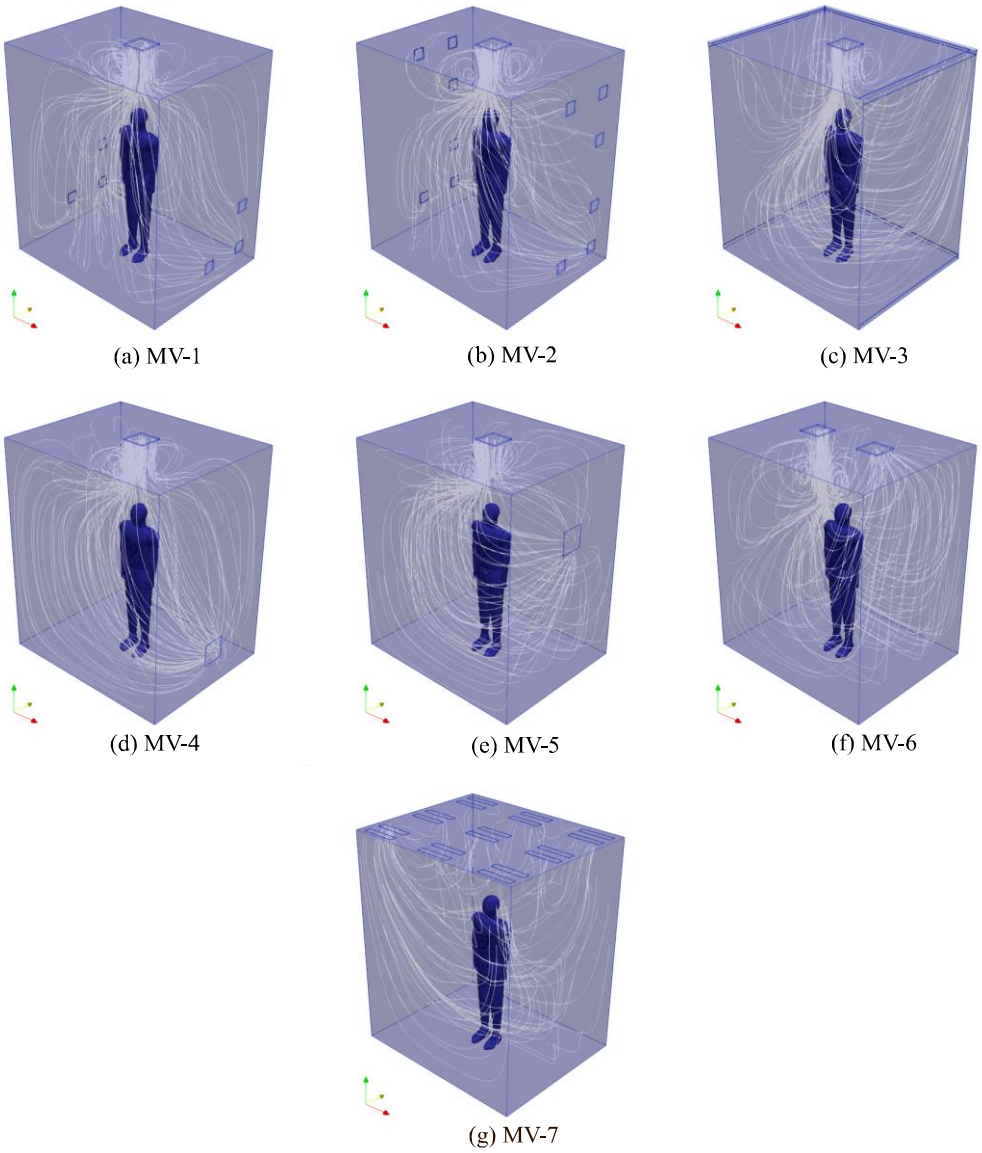
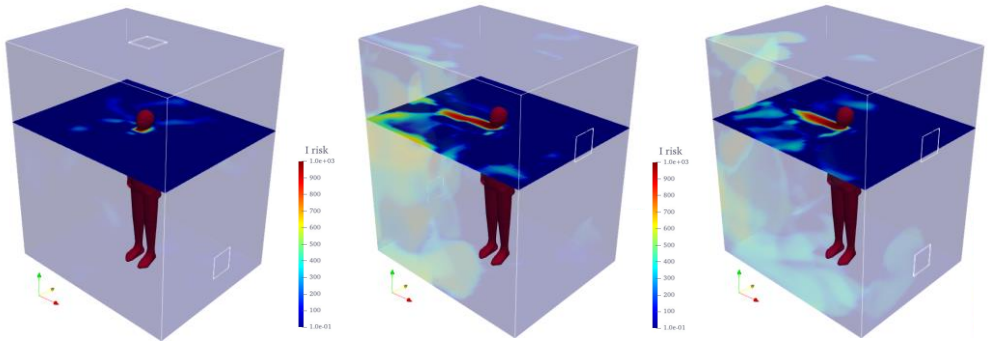
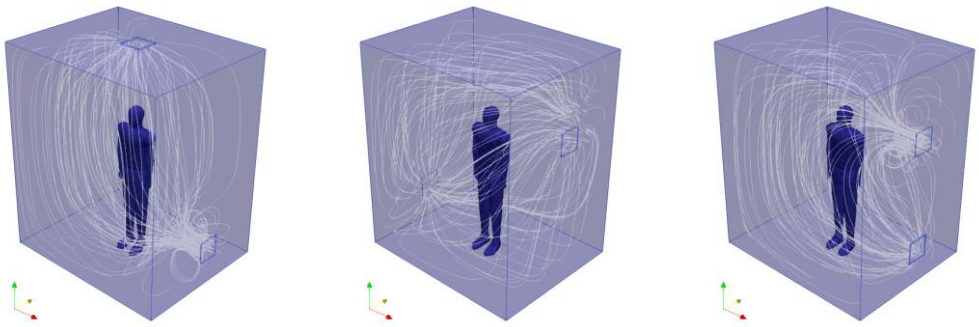


图7. 位于中心的感染者条件下，混合通风设计对流场的影响；换气次数为 7 hr^{-1}



(a) DV-1 (b) SV-1 (c) SV-2



(d) DV-1 (e) SV-1 (f) SV-2

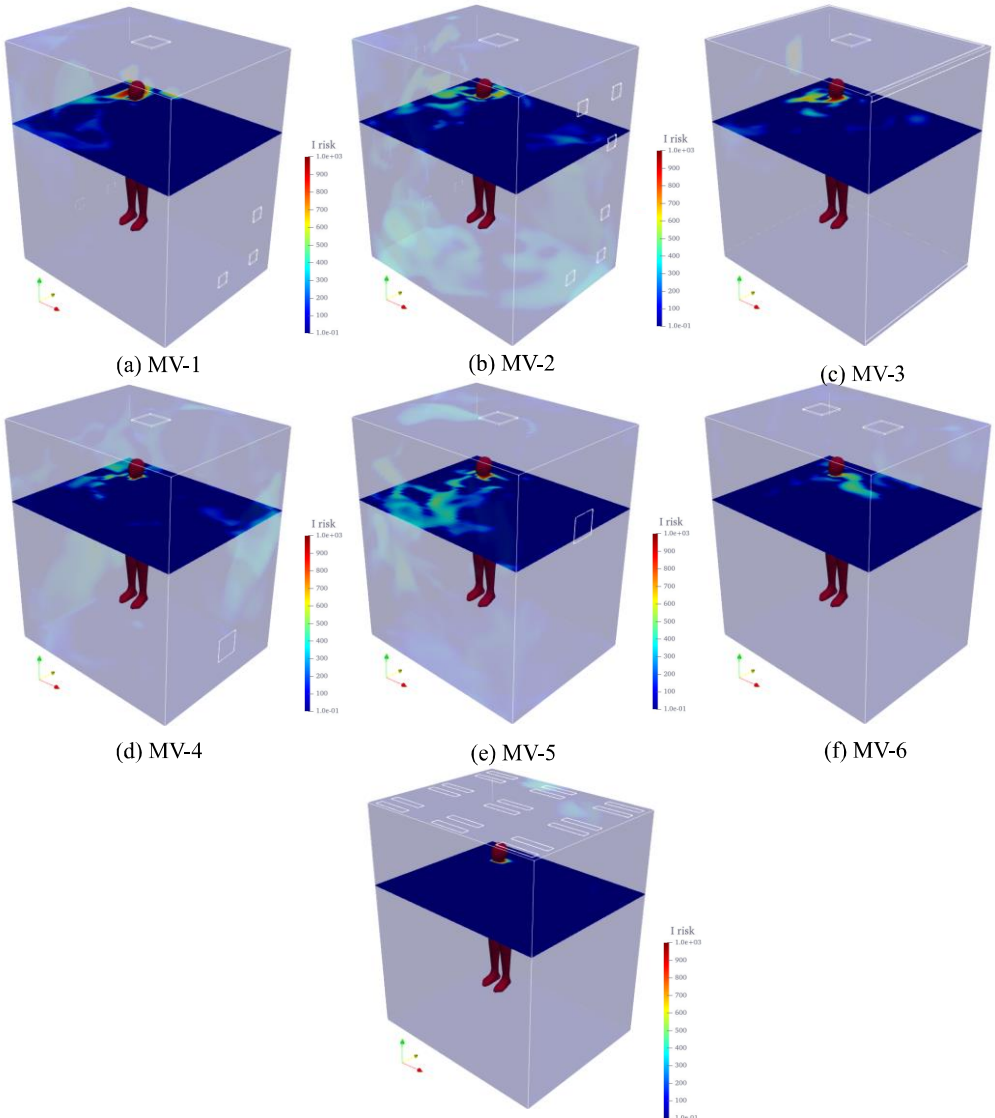
图8. 位于中心的感染者情况下，置换通风和分层通风设计对颗粒物扩散（上排）和流场（下排）的影响。换气次数为 7 hr^{-1}

图9展示了角落感染源情况下，不同混合通风设计下的感染风险分布。与图6所示位于中心的感染者情况相比，MV-7设计下角落感染源处的感染风险分布更高，因此ε_p的值也更高。同样，对于MV-2、MV-3、MV-4、MV-5和MV-6设计，角落感染源处的感染风险均高于位于中心的感染者处。图10展示了角落感染源情况下，不同混合通风设计下的流线。图11展示了DV-1、SV-1和SV-2设计下的感染风险分布和流线。

MV-1的暖通空调气流因侧墙沿线分布着多个排气管道而产生不稳定的流线。MV-2的暖通空调设计中，流线分为两个方向，进一步加剧了这种不稳定模式。在上述暖通空调系统中，流向快速变化且流动模式不稳定，导致感染风险概率上升。研究结果表明，MV-3的暖通空调气流与MV-2相似，但不稳定模式较少。得益于上升气流与有效的暖通空调设计之间的相互作用，这种暖通空调配置在排气管道附近形成平稳的流动模式，并展现出令人满意的颗粒物去除效率。相比之下，MV-4和MV-5的流动模式并不适合电梯暖通空调设计。由于人体模型呼吸区附近的气溶胶排出，MV-5的感染风险有所增加，

而在MV-4中，暖通空调的抑制效果与墙面相互作用形成了不理想的流动模式。研究得出结论，呼吸区内没有涡旋的平稳流线对电梯暖通空调设计至关重要；然而，在所有受测模型（MV-1至MV-5）中，这一目标均无法实现，因为这些暖通空调设计在入口质量流量和排气管道面积方面的条件相似。尽管MV-6设计能够快速捕集气溶胶，但较大的涡旋尺寸会导致部分气溶胶在侧墙附近循环，从而增加感染概率。相比之下，MV-7的暖通空调设计通过在每个人上方设置平顺的进气管道和排气管道，解决了这一问题。这种布局会在每个人上方形成较小的涡旋，从而产生平稳的流体流动模式，降低感染概率并提高颗粒物去除效率。

DV-1 的流体流动能够平稳且无湍流地将气溶胶向上输送，但由于其能有效捕获气溶胶，其颗粒物去除效率优于 SV-1 和 SV-2。SV-1 将气溶胶从一侧扫向另一侧，且不会产生涡流；然而，由于输送路径经过呼吸区，采样表面上超过一半的气溶胶感染概率较高。对于 SV-2，流体流动与前墙相互作用后，返回到与入口位于同一墙壁上的排气管道，从而增加了感染概率并降低了颗粒物去除效率。我们的研究表明，增强抑制效应可能适用于城市地铁等较大的空间。不过，在较小的封闭空间中，这种效应可能会引发不稳定的流动模式。

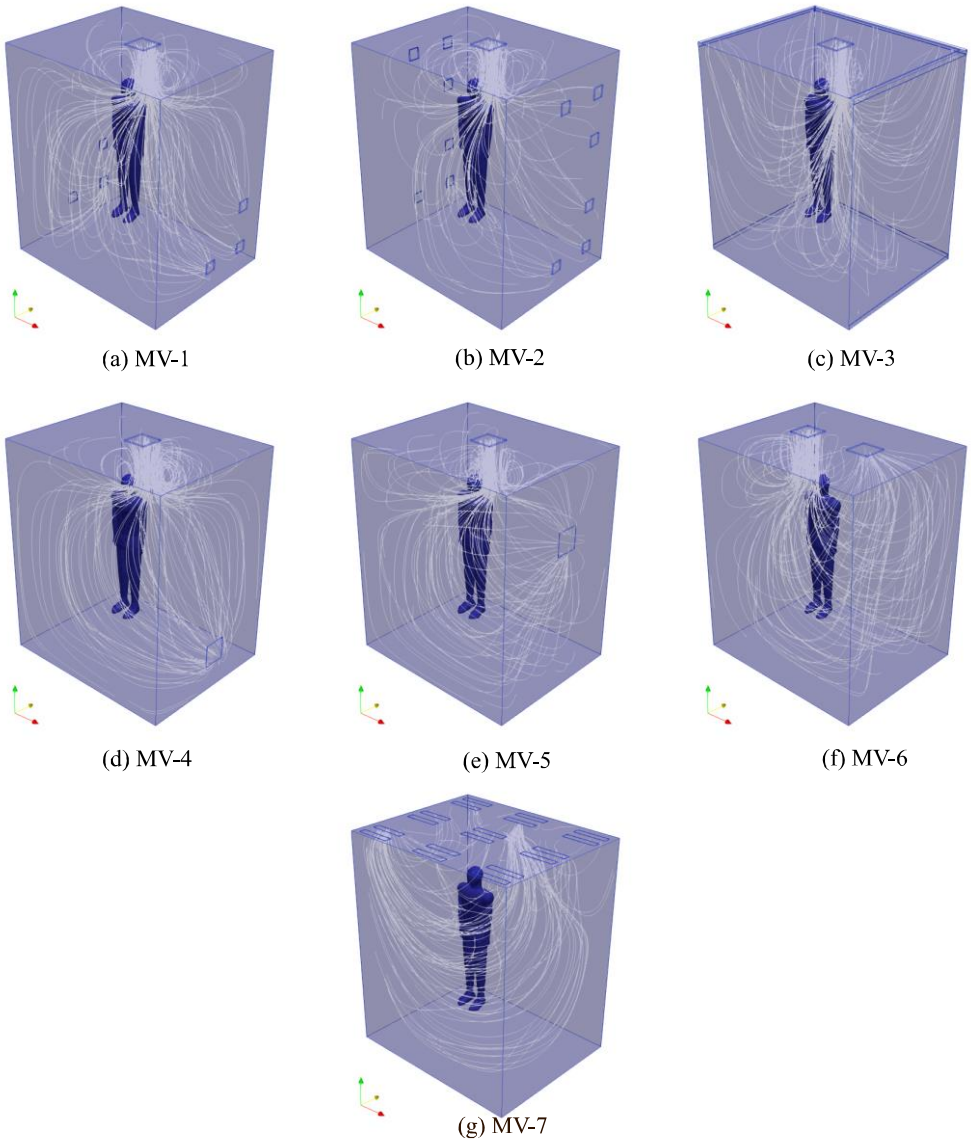


(a) MV-1 (b) MV-2 (c) MV-3

(d) MV-4 (e) MV-5 (f) MV-6

(g) MV-7

图 9. 混合通风设计对位于角落的感染源所致颗粒物扩散的影响；换气次数为 7 hr^{-1}



(a) MV-1 (b) MV-2 (c) MV-3

(d) MV-4 (e) MV-5 (f) MV-6

(g) MV-7

图10. 混合通风设计对位于角落的传染源所对应流场的影响；换气次数为7 小时$^{-1}$

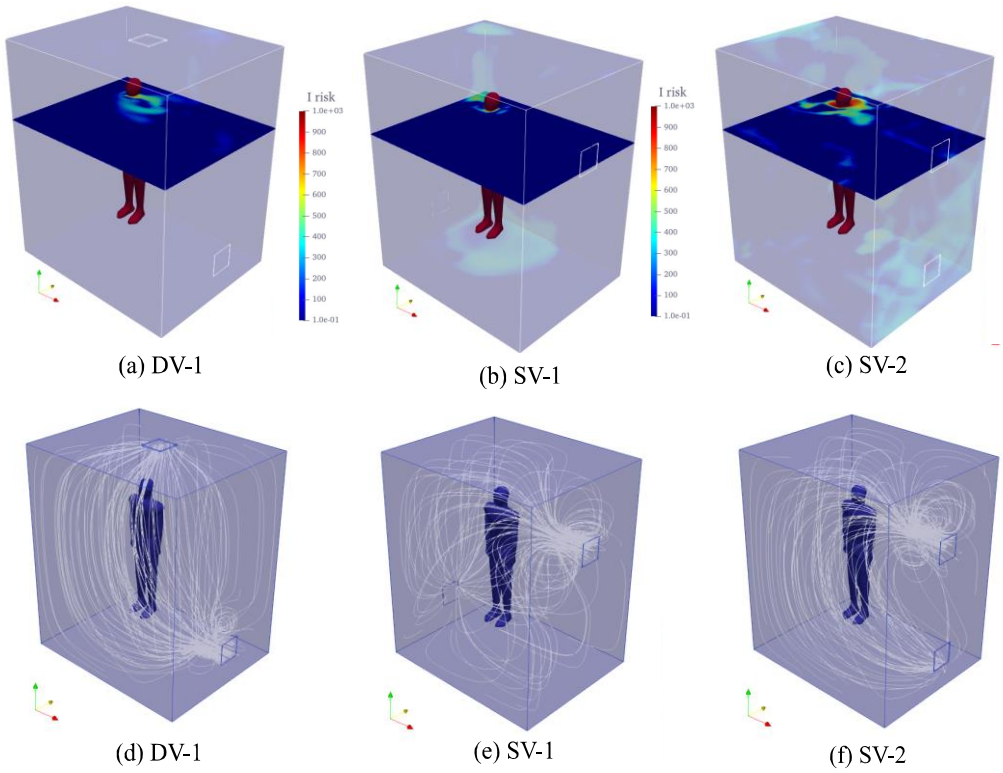
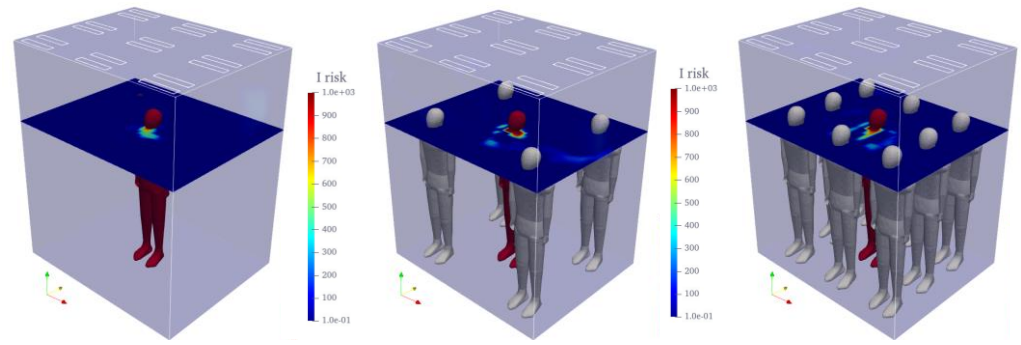


图11. 位于中心的感染者情况下，置换通风和分层通风设计对颗粒物扩散（上排）和流场（下排）的影响；换气次数为 7 次/小时$^{-1}$

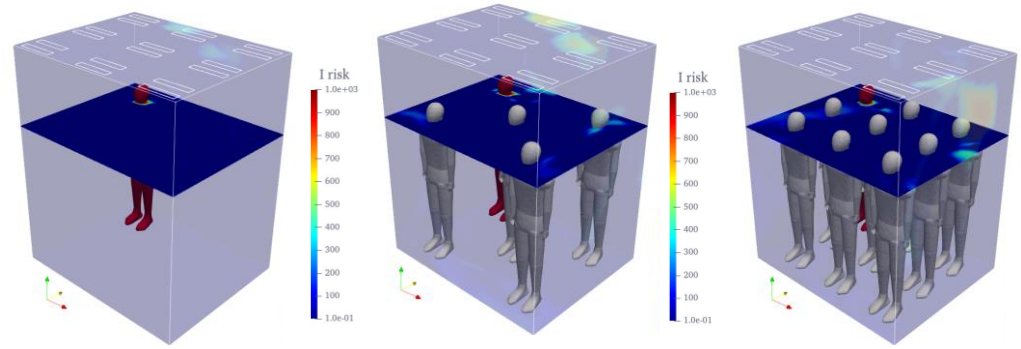
3.2. 不同通风设计下电梯载客量的影响

电梯通风系统中的暴露时间取决于电梯内感染者的人数以及建筑高度。客舱内的人数是影响颗粒物运动的关键因素。为研究电梯内的病毒浓度，我们模拟了不同电梯容量（分别为2人、5人和9人）的情况，并考虑了电梯内每个人的热活性表面。随着乘客人数增加，由于乘客个体相互作用导致电梯内气溶胶循环增强，颗粒物去除速度会变慢。通风管道配置的类型和颗粒物运动方向对于抑制污染物至关重要。我们选取了合适的暖通空调设计（DV-1和MV-7）来评估不同载客量。图12和图13展示了在2人、5人和9人载客情况下，MV-7和DV-1设计的感染风险分布。在高载客密度情况下，颗粒物倾向于滞留在传染源附近，从而增加附近健康人群的感染风险。在置换通风设计中，电梯上行期间，送风管道和传染源的位置对于使呼吸道气溶胶远离健康人群的呼吸区至关重要。然而，送风管道周围的气流模式仍可能使气溶胶扩散至呼吸区。

在混合通风条件下，颗粒物会扩散至整个区域，传染源附近的浓度最高。随着载客量和通风率增加，混合通风和置换通风下的颗粒物去除效率均会降低。与低通风率、低载客量相比，高载客量和高通风率条件下的颗粒物去除效率更高。表2列出了电梯载客量的计算指标，表明载客量增加会提高DV-1和MV-7暖通空调设计的抑制效果。气流减缓会使部分呼吸道气溶胶转移至呼吸区下方；由于MV-7和DV-1设计采用顶部排气管道，颗粒物去除效率因此降低。MV-7模型中，乘客位于一个角落时，颗粒物去除效率最高，为79.40%；而在DV-1设计中，乘客位于中心时，该效率为74.79%。然而，随着电梯载客量增加，部分气溶胶进入呼吸区下方，采样表面上的感染风险也随之增加。

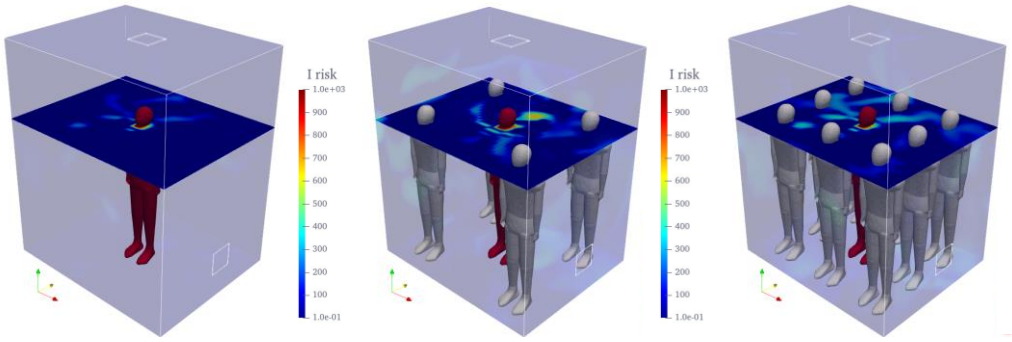


(a) 1 Passenger, Centre Located (b) 5 Passengers, Centre Located (c) 9 Passengers, Centre Located

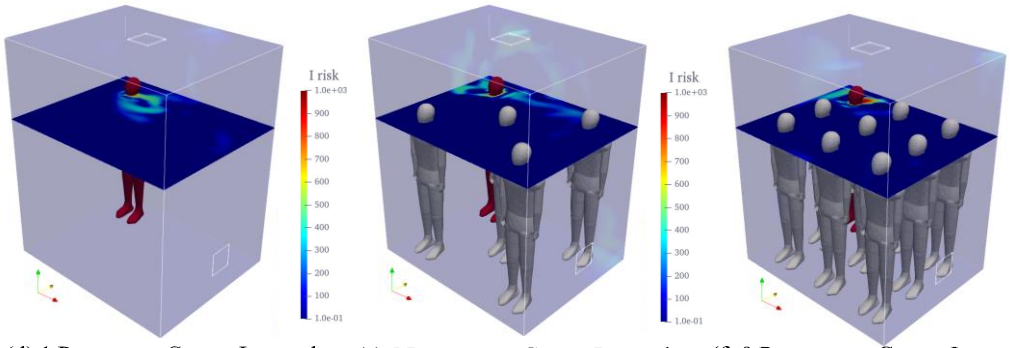


(d) 1 Passenger, Corner Located (e) 5 Passengers, Corner Located (f) 9 Passengers, Corner Located

图12。不同通风设计下电梯容量对颗粒物扩散的影响（MV-7）。



(a) 1 Passenger, Centre Located (b) 5 Passengers, Centre Located (c) 9 Passengers, Centre Located



(d) 1 Passenger, Corner Located (e) 5 Passengers, Corner Located (f) 9 Passengers, Corner Located

图13. DV-1条件下容量对颗粒物扩散的影响

表2. 电梯容量评估计算指标汇总。

通风类型	来源	容量	抑制效果（%）	颗粒物去除效率（%）	感染概率风险（%），在采样表面
MV-7	中心	1	05.10 %	75.90 %	06.10 %
	角落	1	05.30 %	79.40 %	07.30 %
	角落	5	12.41 %	69.35 %	11.71 %
	角落	5	11.83 %	68.54 %	11.31 %
	中心	9	15.32 %	65.85 %	12.78 %
	角落	9	15.48 %	65.78 %	13.10 %
DV-1	中心	1	13.20%	74.79%	18.80%
	角落	1	18.40%	42.77%	09.00 %
	角落	5	26.87 %	39.32 %	11.02 %
	角落	5	26.25 %	40.14 %	11.14 %
	中心	9	30.45 %	35.45 %	19.89 %
	角落	9	32.47 %	35.78 %	22.47 %

3.3. 不同通风设计下通风率的影响

本节研究了不同通风设计下，电梯轿厢内新鲜空气通风率的差异对气溶胶传播的影响。为了量化.....的影响

换气次数（ACHs），分别在 2、7 和 12 hr^{-1} 条件下进行了模拟，并针对每种情景计算了颗粒物去除效率、感染风险概率和抑制效果。图14展示了在低（2 hr^{-1}）、中等（7 hr^{-1}）和高（12 hr^{-1}）通风率条件下，MV-7 和 DV-1 中中心位置和角落位置的传染源所对应的感染风险分布。这些结果表明了在温度为 20 ₀C 时，ACH 对电梯内部呼吸气溶胶传播的影响。在通风不良的条件下，微弱的剪切流无法克服气溶胶云，因此会形成颗粒浓度较高且气溶胶指数风险等级较高的区域，导致病毒传播增加。这些区域遍布整个电梯轿厢，使气溶胶颗粒能够向任意方向移动，这与 Nazari 等人（2022 年）以及 Wang和Hong（2023年）的研究结果一致。

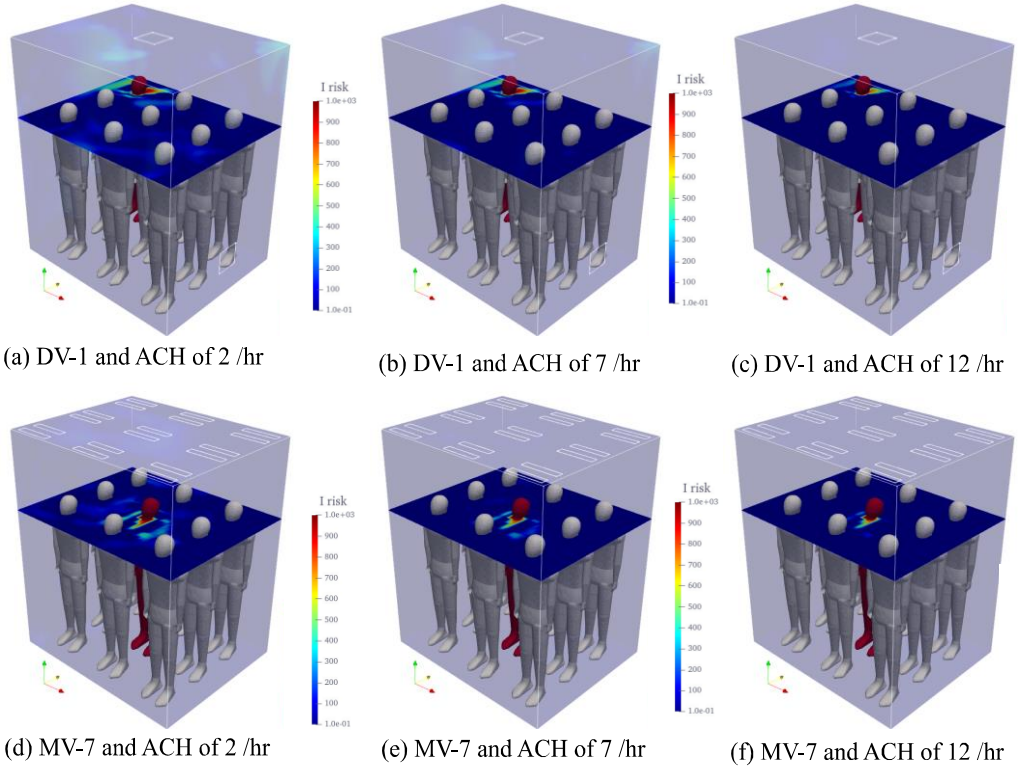


图14。MV-7和DV-1的换气次数对颗粒物扩散的影响。

表3. 满载电梯中DV-1和MV-7换气次数研究所用计算准则汇总

通风类型	容量	ACH	抑制效果（%）	颗粒物去除效率（%）	感染概率风险（%），在采样表面
MV-7	9（中心）	2	38.80 %	40.23 %	19.78 %
	9 (中心)	7	15.48 %	65.78 %	13.10 %
	9（中心）	12	09.78 %	69.78 %	10.25 %
DV-1	9（角落）	2	57.89 %	30.78 %	23.78 %

9（角落）	7	30.45 %	35.45 %	19.89 %
9（角落）	12	10.89 %	41.25 %	11.25 %

3.4. 所研究的暖通空调设计比较

本研究从三个关键方面评估了所设计的电梯暖通空调系统，即抑制效果、颗粒物去除效率和感染风险。结果汇总于表4，其中列出了各设计的优点和缺点。感染风险概率反映了气溶胶在采样表面上的行为，而颗粒物去除和抑制效果则反映了电梯内部的流体流动行为。从这三个方面比较所有设计，可为各类空调系统的设计人员提供全面的参考，因此本研究是未来暖通空调系统设计的重要参考依据。

表 4. 所有电梯暖通空调系统设计的优缺点总结。

通风类型	优点	缺点
MV-1	抑制效果尚可。	颗粒物去除效率和 感染风险概率不可接受，原因是 气流与 墙壁的抑制效果相互作用导致气溶胶扩散，无法捕获气溶胶云 迅速排风。
MV-2	由于流线模式，捕获气溶胶 云团在角落处迅速排风 案例。	不可接受的颗粒物去除效率及 感染风险概率。
MV-3	气流模式与 MV-2 相似，这是由于 流线模式能够捕获气溶胶云， 并在电梯壁附近迅速排出。	颗粒物去除效率和感染风险概率 不可接受。
MV-4	抑制效果可接受，这是由于规则的 流线，捕获气溶胶云， 下送气流和排风，在其中 中心位于中央的情况。	不可接受的颗粒物去除效率和 感染风险概率，由于扩散导致的 气溶胶通过抑制效果的相互作用产生的 暖通空调与防滑墙捕获气溶胶 云未能迅速排出。
MV-5	-	颗粒物去除效率和 感染风险概率不可接受，这是由于 暖通空调与防滑墙的抑制效果相互作用导致气溶胶扩散 暖通空调与防滑墙捕获气溶胶 气溶胶云未能迅速排出。
MV-6	良好的感染风险概率，由于 流线模式能够捕获气溶胶云， 因此在中心位置的情形下可迅速排出。	抑制效果较低，可能会增加 失效情况下的感染风险概率 暖通空调风管。
MV-7	良好的颗粒物去除效果和概率 感染风险，因定期且分开进行的 流线，快速捕获气溶胶云 各个位置的排风。	较低的抑制效果，可能增加 故障情况下的感染风险概率 暖通空调风管。

DV-1	可接受的颗粒物去除效果和感染风险概率 得益于规则流线， 捕获向上流动气流中的气溶胶云 。	抑制效果较低，导致 失效情况下感染风险概率增加 暖通空调风管。
SV-1	抑制效果良好	颗粒物去除效率不可接受，且 感染风险概率。
SV-2	抑制效果良好	颗粒物去除效率不可接受，且 感染风险概率

4. 结论与讨论

本研究探讨了各种暖通空调设计对病毒（如 SARS-CoV-2）在电梯轿厢内传播的影响。通过采用气溶胶浓度输运方程，并利用 Zhang 等人（2006年）的实验数据验证模拟方法，我们研究了不同通风设计和源位置下的空气传播模式及相关感染风险。

我们的研究结果表明，暖通空调系统的选择对于降低电梯轿厢内病毒空气传播的风险至关重要。MV-7系统在减少颗粒物扩散方面效果最佳，单名乘客情况下的最高去除效率达到79.40%。DV-1系统的表现也较好，但颗粒物去除效率略低于MV-7系统。在中心位置，DV-1系统的去除效率为74.79%，而在角落位置则降至42.77%。总体而言，MV-7系统在中心位置和角落位置均表现出更优的颗粒物去除效率。相比之下，分层通风系统（SV-2）的感染风险最高，颗粒物去除效率仅为3.97%。我们的研究还发现，与位于中心位置的来源相比，位于角落位置的来源会带来更高的感染风险，因为前者会产生更强的湍流并增加空气混合，从而加剧感染风险。此外，我们确定电梯内的感染风险会随着乘员人数的增加而上升。

为降低感染风险，我们倡导采用能够提高电梯通风系统通风率并延长其运行时间的暖通空调系统。提高通风率可以降低感染风险，而延长电梯通风系统的运行时间则能进一步降低感染风险。我们还建议未来研究考察电梯运动方向对轿厢内气溶胶浓度的影响，并制定改进暖通空调系统的策略，以便在维持舒适环境的同时控制病毒传播。最后，未来研究评估电梯暖通空调系统时，必须考虑能耗和热舒适性。总之，本研究为通过空气传播的病毒扩散机制提供了有价值的见解

方式，并凸显了谨慎选择和设计暖通空调系统以降低感染风险的重要性。我们的研究结果对公共卫生与安全具有重要意义，尤其是在COVID-19大流行背景下。我们提出的DV-1和MV-7模型能够有效降低高容量密度、密闭空间（如电梯轿厢）中的空气传播风险。本研究也承认存在若干有待进一步探讨的局限性。主要限制之一是，在暖通空调系统设计过程中，未考虑电梯轿厢内打喷嚏或咳嗽产生的气溶胶扩散。未来研究有必要加深对这些情况下暖通空调系统内病毒传播的认识。此外，还应研究不同国家观察到的电梯加速度变化对电梯运行过程中气溶胶云行为的潜在影响。深入了解这一因素，无疑有助于更全面地认识电梯等密闭空间中的暖通空调系统。尽管存在这些局限性，本研究的发现仍可为开发更高效、更安全的电梯暖通空调系统提供有价值的见解，最终促进封闭环境中的公共卫生与安全。

致谢

C. Wang 谨此感谢中国国家留学基金管理委员会提供的资助（CSC，项目编号：201906030144）。

数据可用性：合理请求时，可向通讯作者获取支持本研究结论的数据。

利益冲突：作者声明不存在利益冲突。

5. 参考文献

Abraham, A., He, R., Shao, S., Kumar, S. S., Wang, C., Guo, B., ... & Hong, J. (2021年). 管弦乐器演奏中空气传播疾病传播的风险评估与缓解。《气溶胶科学杂志》, 157, 105797。

Agrawal, A., & Bhardwaj, R.（2020年）。通过封闭空间中的咳嗽云降低COVID-19感染的可能性。《流体物理学》，32(10)，101704。

Agrawal, A., & Bhardwaj, R.（2021年）。普通人和超级传播者咳嗽导致COVID-19感染的概率。《流体物理学》，33(3)，031704。

Ahmadzadeh, M., & Shams, M.（2021年）。列车车厢内乘客暴露于呼吸道气溶胶：车窗、注入源和出流位置的影响。《可持续城市与社会》，75，103280。Asadi, S., Bouvier, N., Wexler, A. S., & Ristenpart, W. D.（2020年）。冠状病毒大流行与气溶胶：COVID-19是否通过呼出颗粒传播？《气溶胶科学与技术》，54(6)，635-638。Ananthanarayanan, S. M., Branas, C. C., Elmachtoub, A. N., Stein, C. S., & Zhou, Y.（2022年）。大流行期间安全地排队乘坐电梯系统。《生产与运营管理》，31(5)，2306-2323。Auvinen, M., Kuula, J., Grönholm, T., Sühring, M., & Hellsten, A.（2022年）。室内湍流及其对呼吸道病原体空气传播影响的高分辨率大涡模拟——模型验证与感染概率分析。《流体物理学》，34(1)，015124。Avni, O., & Dagan, Y.（2022年）。室内尾流对空气传播的呼吸道唾液飞沫的扩散。arXiv预印本 arXiv:2201.00397。Bhagat, R. K., Wykes, M. D., Dalziel, S. B., & Linden, P. F.（2020年）。通风对新冠肺炎室内传播的影响。《流体力学杂志》，903，F1。Burgmann, S., & Janoske, U.（2021年）。使用空气净化系统降低教室中的气溶胶传播。《流体物理学》，33(3)，033321。Calmet, H., Inthavong, K., Both, A., Surapaneni, A., Mira, D., Egukitza, B., & Houzeaux, G.（2021年）。十分钟暴露期间咳嗽射流动力学、飞沫输运和可吸入性的LES模拟。《流体物理学》，33(12)，125122。Dbouk, T., & Drikakis, D.（2020年）。论咳嗽及飞沫向人类的空气传播。《流体物理学》，32(5)，053310。Dbouk, T., & Drikakis, D.（2021年）。论电梯和密闭空间中的病毒空气传播。《流体物理学》，33(1)，011905。Dbouk, T., & Drikakis, D.（2022年）。基于计算流体动力学的流行病模型与大流行情景。《流体物理学》，34(2)，027104。Fadavi, P., Houshyari, M., Kashi, A. S. Y., Jarrahi, A. M., Roshanmehr, F., Broomand, M. A., ... & Taghizadeh-Hesary, F.（2021年）。新冠肺炎危机期间的肿瘤学临床实践综述：挑战与解决方案。《亚太癌症预防杂志》：APJCP，22(1)，19。Dey, P., Saha, S. K., & Sarkar, S.（2021年）。打喷嚏飞沫与污染环境中颗粒物相互作用的研究。《流体物理学》，33(11)，113310。Du, C., & Chen, Q.（2022年）。乘客电梯内新冠肺炎患者的病毒输运与感染评估。《室内空气》，32(10)，e13125。首例电梯内新冠肺炎传播病例，《东亚日报》，2020 [更新于2020年2月29日。来源：
h
t
t
p
s://
w
w
w.
d
o
n
g
a.
com/en/article/all/20200229/1992687/1/First-case-of-COVID-19-transmission-inside-an-elevator。Gao, F., Wang, H., & Wang, H.（2017年）。模拟非定常流动时不同湍流模型的比较。《工程学学报》，205，3970-3977。

He, R.、Liu, W.、Elson, J.、Vogt, R.、Maranville, C. 和 Hong, J.（2021a）。新冠肺炎在通风不良的教室中的空气传播及使用箱式风扇空气净化器进行缓解。《流体物理学》，33(5)，057107。

He, Z., Shao, S., Li, J., Kumar, S. S., Sokoloff, J. B., & Hong, J. (2021年b). 液滴蒸发表明 SARS-COV-2 在表面上的存活能力的残留物。《流体物理学》，33(1)，013309。

Horstman, R., & Rahai, H.（2021年）。客舱内空气传播疾病的风险评估的一客机。SAE《移动出行领域进展与当前实践国际期刊》，3(3)，1263-1271。

Jia, D., Lee Baker, J., Rameau, A., & Esmaily, M.（2021年）。用于控制……的负压头盔模拟牙科和耳鼻喉科门诊干预中的携带病原体的液滴。《流体物理学》，33(1)，013307。

Komperda, J.、Peyvan, A.、Li, D.、Kashir, B.、Yarin, A. L.、Megaridis, C. M.、……和 Mashayek, F.（2021年）。大型牙科诊所中 SARS-CoV-2 污染风险的计算机模拟。《流体物理学》，33(3)，033328。

Koroteeva, E. 和 Shagiyanova, A.（2022年）。呼气流的红外可视化：在佩戴防护口罩时。《流体物理学》，34(1)，011705。

Lewis, D.（2020年）。冠状病毒会通过空气传播吗？专家们尚无定论。《自然》，580(7802)，175。

Liu, H., He, S., Shen, L., & Hong, J. (2021年). 基于模拟的餐厅空调相关新冠肺炎疫情暴发研究。《流体物理学》, 33(2), 023301。

Li, Y. Y., Wang, J. X., & Chen, X. (2020年). 厕所会促进病毒传播吗？从流体动力学的角度进行探讨.《流体物理学》, 32(6), 065107.

Li, Z., Zhang, X., Wu, T., Zhu, L., Qin, J., & Yang, X. (2021年). 自动扶梯坡度和速度对乘客咳嗽产生的飞沫扩散的影响。《流体物理学》，33(4)，041701。

Li, L., He, R., Kong, M., Eilts, S. M., Hong, J., Hogan Jr, C. J., & Pope, Z. C. (2022年). 低成本循环式便携空气过滤对会议室中气溶胶颗粒沉积和浓度的影响：实验、理论与模拟比较。《气溶胶科学杂志》，166，106048。

Motamedi, H., Shirzadi, M., Tominaga, Y., & Mirzaei, P. A. (2022年). 空气传播的计算流体力学建模。不同通风策略下密闭空间中新冠肺炎病原体的传播。《可持续城市与社会》，76，103397。

Narayanan, S. R. 和 Yang, S.（2021年）。不同便携式空气净化器及气溶胶注入率条件下音乐教室内含病毒气溶胶空气传播的研究。《流体物理学》，33(3)，033307。

National Elevator Industry I. 电梯与自动扶梯情况说明书，2020 [可从以下网址获取：chrome extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/viewer.html?pdfurl=https%3A%2F%2Fnationalelevatorindustry.org%2Fwp-content%2Fuploads%2F2020%2F07%2FNEII-Fact-Sheet- 2020年.pdf&clen=122690&chunk=true。

Nazari, A., Jafari, M., Rezaei, N., Arash-Azad, S., Talati, F., Nejad-Rahim, R., ... & Taghizadeh-Hesary, F. (2021a). 高速风、湿度和温度对 SARS-CoV-2 气溶胶生成的影响；一种新颖的观点。《气溶胶与空气质量研究》，21(8)，200574。

Nazari, A.、Jafari, M.、Rezaei, N.、Taghizadeh-Hesary, F. 和 Taghizadeh-Hesary, F.（2021年b）。地下停车场中的射流风机与病毒传播。《流体物理学》，33(1)，013603。

Nazari, A., Hong, J., Taghizadeh-Hesary, F., & Taghizadeh-Hesary, F.（2022年）。降低城市地铁供暖、通风与空调系统的病毒传播。《Toxics》，10(12)，796。

Niazi, S., Groth, R., Spann, K., 和 Johnson, G. R.（2021年）。呼吸道飞沫的作用物理化学因素在限制和促进人类冠状病毒空气传播中的作用：一篇批判性综述。《Environmental Pollution》，276，115767。

Nouri, Z., Norouzi, N., Norouzi, N., Ataei, E., & Azizi, S.（2021年）。病毒微粒流体力学模拟：电梯空间内的新冠肺炎传播。《International Journal of Computational Materials Science and Engineering》，10(02)，2150007。

Peña-Monferrer, C., Antao, S., & Manson-Sawko, R. (2021年). 在无症状病毒传播条件下，坐姿乘客交叉通风空间内飞沫的数值研究。《流体物理学》, 33(12), 123314.

Peng, N. N., Chow, K. W., & Liu, C. H. (2021年)。关于……传播的计算研究电梯轿厢内气溶胶传播SARS-CoV-2病毒：通风系统的影响。《流体物理学》，33(10)，103325。

Piemjaiswang, R.、Shiratori, S.、Chaiwatanarat, T.、Piumsomboon, P. 和 Chalermsinsuwan, B.（2019）。气管内气溶胶沉积的完整呼吸周期计算流体力学模拟：呼吸频率的影响。《Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers》，97，66-79。

MacIntyre, CR. 和 Hasanain, SJ.（2020）。在COVID 19疫情期间社区普遍佩戴口罩——从家庭到旅行者和公共场所。《Journal of Travel Medicine》，27(3)。

Rakhsha, A.、Azghandi, S. 和 Taghizadeh-Hesary, F.（2020）。COVID-19大流行与癌症患者：伊朗德黑兰临床肿瘤中心的方案。《Reports of Practical Oncology & Radiotherapy》，25(5)，765-767。

Rakhsha, A., Azghandi, S., & Taghizadeh-Hesary, F.（2020年）。新冠肺炎大流行期间的化疗决策：来自伊朗的综述与实用方法。《Infection & Chemotherapy》，52(4)，496。

REHVA, C. G.（2020年）。如何运行暖通空调和其他建筑服务系统，以防止工作场所冠状病毒（SARS-CoV-2）疾病（新冠肺炎）的传播，版本4.1。

Rezaei, N., Jafari, M., Nazari, A., Salehi, S., Talati, F., Torab, R., & Nejad-Rahim, R.（2020年）。一种利用余热回收在供暖、通风和空调系统中消除SARS-CoV-2的新方法与新概念。《AIP Advances》，10(8)，085308。

Schreck, J. H., Lashaki, M. J., Hashemi, J., Dhanak, M., & Verma, S.（2021年）。气溶胶生成公共卫生间。《流体物理学》，33(3)，033320。

Somsen, G. A., Van Rijn, C. J., Kooij, S., Bem, R. A., & Bonn, D. (2020年). 使用手持式粒子计数器测量公共场所的小液滴气溶胶浓度。《流体物理学》, 32(12), 121707.

Stewart, E. J., Schoen, L. J., Mead, K., Olmsted, R. N., Sekhar, C., Vernon, W., ... & Conlan, W. (2020年). 关于传染性气溶胶的 ASHRAE 立场文件. ASHRAE：亚特兰大，佐治亚州，美国。

Shao, X.，& Li, X.（2020年）。2020年首次总统辩论中的COVID-19传播。《流体物理学》，32(11)，115125。

Shao, S.， Zhou, D.， He, R.， Li, J.， Zou, S.， Mallery, K.， ……& Hong, J.（2021年）。不同实际场景下无症状个体传播新冠肺炎的空气传播风险评估。《气溶胶科学杂志》，151，105661。

Talaat, K., Abuhegazy, M., Mahfoze, O. A., Anderoglu, O., & Poroseva, S. V. (2021年). 模拟采用干预措施进行COVID-19防控的波音737飞机上气溶胶传播的数值研究。《流体物理学》，33(3)，033312。

van Rijn, C., Somsen, G. A., Hofstra, L., Dahhan, G., Bem, R. A., Kooij, S., & Bonn, D.（2020年）。减少新冠肺炎 SARS-CoV-2 在医院电梯中的气溶胶传播。《室内空气》，30(6)，1065。Wang, C., & Hong, J.（2023年）。置换通风条件下低天花板房间内空气传播的数值研究。arXiv 预印本 arXiv:2301.05818。Wilson, N., Corbett, S., & Tovey, E.（2020年）。新冠肺炎的空气传播。《英国医学杂志》，370。

Wu, L., Liu, X., Yao, F., & Chen, Y.（2021年）。自助餐厅内打喷嚏产生的飞沫传播病毒的数值研究。《流体物理学》，33(2), 023311。

Xi, J., Si, X. A., & Nagarajan, R.（2020年）。佩戴口罩对人体上呼吸道吸入 SARS-CoV-2气溶胶的可吸入性和沉积的影响。《流体物理学》，32(12), 123312。

Yang, Y., Wang, Y., Tian, L., Su, C., Chen, Z., & Huang, Y.（2022年）。净化器对公交车内飞沫空气传播的影响。《流体物理学》，34(1), 017108。

Yan, Z., & Lan, Y.（2020年）。受限空间内新冠肺炎感染的建模。《非线性动力学》，101(3)，1643-1651。

Zhang, Z., & Chen, Q.（2006年）。通风房间中颗粒物输运与分布的实验测量和数值模拟。《大气环境》，40(18)，3396-3408。Zhang, N., Chen, X., Jia, W., Jin, T., Xiao, S., Chen, W., ... & Kang, M.（2021a）。餐馆疫情暴发中缺乏通过近距离接触和接触表面传播新冠肺炎的证据。《感染杂志》，83(2)，207-216。Zhang, Z., Han, T., Yoo, K. H., Capecelatro, J., Boehman, A. L., & Maki, K.（2021年b）。城市公交车上通过呼出气溶胶传播疾病。《流体物理学》，33(1)，015116。

Zhang, Z., Capecelatro, J., & Maki, K.（2021c）。充分混合模型在预测城市公交车上的疾病传播方面的效用。《AIP Advances》，11(8)，085229。