地下车库通风与排烟系统设计与优化

彭　华
新疆生产建设兵团建工设计研究院有限责任公司　新疆　乌鲁木齐　830000

摘　要：地下车库通风与排烟系统设计需关注通风和排烟两方面。通风系统设计要合理计算送排风量，选择合适的气流组织形式，优化设备选型与布置；排烟系统则要准确计算排烟量，合理规划排烟路径，联动设计补风系统。系统优化可从气流组织、设备性能提升和智能控制系统集成三方面入手。效能评估需构建评价指标体系，采用实验室缩尺模型试验、现场实测数据对比等方法进行测试验证，并长期监测关键点位参数，结合主观评价，为系统性能综合评估提供依据。

关键词：地下车库；通风与排烟系统；设计与优化

引言：地下车库作为现代建筑的重要配套设施，其通风与排烟系统直接关系到人员健康与消防安全。由于地下空间封闭性强、车辆活动频繁，系统设计需兼顾日常污染物稀释与火灾烟气控制双重目标。本文从基础设计要素出发，系统阐述通风与排烟系统的关键参数计算、气流组织模式、设备选型原则，并深入探讨基于数值模拟的优化策略、智能控制技术集成路径，最终提出涵盖通风效能、排烟安全及经济性的多维评估体系，为提升地下车库环境保障能力提供理论支撑与实践指导。

1 地下车库通风与排烟系统设计关键要素

1.1 地下车库通风系统设计

送风与排风量计算方法需考虑车库内车辆启动时排放的尾气总量及人员短暂停留时的空气质量要求，重点控制一氧化碳累积浓度不突破限值。按换气次数法确定基础参数时，依据车库单层高度及单车位占地面积设定合理换气频率，不同使用频率的车库可采用差异化基准。基于一氧化碳浓度实时监测的动态调节手段通过分布在车库平面的传感器采集数据，当某区域浓度升高时加大该区域排风量，避免全时段满负荷运行造成能源浪费。气流组织形式选择需关注送风射流能否有效到达车位区域并将污染物推送至排风口。上送下排模式将新鲜空气从上方送入，利用污染物密度较大的特性使其沉降后从低位排风口抽出；侧送侧排模式依靠水平气流推动尾气沿车道方向运动，适合层高受限的地下空间。射流特性与均匀性优化可通过调整送风口安装角度及组合多股射流的相互作用来减少气流死角，保证车库内每个防火分区均能获得足够的空气交换[1]。设备选型与布置应依据车库实际尺寸及车位排布方式确定风机台数与单台风量，使运行工况点落在风机高效区内。风口位置与风速控制应避免送风口正对车辆排气管或排风口过于集中造成部分区域气流停滞，同时限制靠近车位的风速以防止扬尘。

1.2 地下车库排烟系统设计

排烟量计算依据取决于车库内可能发生的火灾规模及烟气生成速率，由于地下空间相对封闭且疏散路径单一，排烟能力需按较高标准确定。空间净高与排烟速率关系中，低净高车库烟气层下降速度较快，要求排烟口在更短时间内启动并将烟气抽离；高净高车库虽有更大的储烟容积，但烟气上升过程中卷吸周围空气增加了总排烟量需求。储烟仓厚度与烟气层高度控制需保证在人员疏散所需时间内，烟气层下沿不低于人行与车行通道的净空要求，通过调整排烟口设置高度及开启数量来维持稳定分层。排烟路径规划应引导烟气从起火区域向排烟口单向移动，避免烟气沿车行通道蔓延至相邻防火分区或安全出口位置。自然排烟与机械排烟的适用性分析中，地下车库由于无外墙开口或开口面积不足，通常以机械排烟为主；当具备直通地面的采光井或坡道开口时，可评估自然排烟的有效性后组合使用。补风系统与排烟系统联动设计确保排烟开启时，补风口设置在着火分区以外或靠近地面位置，补风气流从低位送入而不扰动烟气层[2]。防烟分区划分标准依据车库顶板结构及梁网尺寸确定，每个分区边界应明确。挡烟垂壁设置要求其下垂深度足以抵抗烟气水平流动压力，并在分区边缘形成完整隔断。分区面积与排烟量协同设计时，较大分区需要匹配更大排烟能力，但过大分区会导致烟气蔓延范围过广，需在分区规模与排烟设备容量之间取得平衡。

2 地下车库通风与排烟系统优化策略与技术路径

2.1 气流组织优化

计算流体力学数值模拟技术应用能够针对地下车库的封闭空间特征建立空气流动模型，在不进行实体改造

的前提下预测不同送排风口布置方案下的污染物分布状态。湍流模型选择与边界条件设定需考虑地下车库内车辆移动产生的扰动、柱网结构对气流的阻挡以及坡道开口处的风压影响，边界条件应准确反映送风口出流速度、排风口负压值以及车库出入口的自然通风潜力。速度场与温度场耦合分析关注车辆发动机散发的热量与尾气共同作用下的气流运动规律，温度差异会改变空气密度分布进而影响污染物的扩散方向与沉降速度。多目标优化方法同时追求地下车库内一氧化碳浓度的快速稀释与通风设备运行电耗的最小化，这两个目标在部分使用时段存在冲突关系。通风效率与能耗的帕累托前沿分析将不同风机组合与风口布置方案映射到目标空间中，筛选出所有非支配解构成前沿线，线上每个点代表一种无法在不提高能耗的前提下进一步改善空气品质的配置状态。权重系数分配与综合评价模型构建依据地下车库的使用频率、停放车辆类型及所在区域的气候条件对不同目标赋予相对权重，使优化结果更贴合实际运行需求。

2.2 设备性能提升

变频风机节能控制依据地下车库内一氧化碳传感器的实时读数自动调节风机转速，在车辆出入稀疏时段维持低风量运行，在高峰时段快速提升排风能力，避免工频风机全时满负荷工作造成的无效耗电。压差传感与频率调节策略在车库主风道及支路关键点设置压差测点，将实测静压值与设定目标比较后产生频率调整指令，确保每个防火分区获得与实际需求匹配的风量。工况切换响应时间优化关注地下车库通风模式向火灾排烟模式转换时的动态行为，通过优化电机驱动参数及减少控制回路信号迟滞来缩短切换时段，确保烟气初起阶段排烟系统即达到预设排烟能力[3]。高效过滤装置选型需在捕集车辆尾气中悬浮颗粒物的效率与气流通过过滤介质产生的阻力之间取得平衡，过高阻力会增加风机负载并提升运行噪声。模块化维护结构设计将风机单元、过滤单元及控制单元按照标准化接口划分，便于在地下车库有限的顶部空间内完成单个模块的拆卸更换而不影响相邻模块的正常工作，降低长期运行中的维护难度。

2.3 智能控制系统集成

多传感器数据融合技术将分布在地下车库各防火分区的一氧化碳传感器、温度传感器、湿度传感器及烟雾探测器输出的信号汇集至中央处理单元，经过关联分析后形成对整个车库空气状态的综合判断。一氧化碳浓度、温湿度以及烟雾浓度协同监测能够区分由车辆频繁启停引起的常规污染物累积与由火灾引发的烟气产生，不同信号的变化速率及空间传播特征有助于准确识别事件类型。异常数据识别与容错机制通过比对同一防火分区内多个同类传感器的读数或分析单个传感器输出值的历史波动范围来判断数据有效性，在识别出漂移或卡滞等异常后自动降低该测点参与控制的权重或将该区域切换至相邻传感器的覆盖范围，防止单点故障引发误动作。自适应控制算法开发使系统能够持续学习地下车库的使用规律，如高峰时段分布及季节性通风需求变化，无需人工重新设定参数即可优化运行策略。模糊控制与神经网络应用分别处理边界不清晰的定性规则与多变量非线性映射关系，两者结合可在不建立精确数学模型的前提下实现从传感器输入到风机频率及阀门开度的智能决策[4]。模式切换逻辑与优先级判定规定了当日常通风需求与火灾排烟需求同时出现时，排烟模式无条件获得执行权，待烟气完全排除且确认安全后才恢复至通风模式。

3 地下车库通风与排烟系统效能评估方法

3.1 评价指标体系构建

通风效能指标中的换气效率用于衡量送入地下车库的新鲜空气替代车辆尾气积聚区域的快慢程度，该指标关注的是空气龄分布特征是否覆盖了车位区及车道等关键位置而不仅仅是总送风量大小。不均匀系数则反映地下车库内速度场、一氧化碳浓度场在柱网两侧及不同防火分区之间的差异程度，系数值越小表明空气分布越均匀，车库内不同车位区域的空气品质趋于一致。排烟效能指标中的排烟时间定义为从火灾发生到烟气层高度被控制在车库通行净高以上或烟气浓度降至人员可耐受水平所需的持续时间，该指标直接关联地下车库内人员向安全出口疏散的时间窗口长度。能见度维持率表示排烟系统运行过程中车库内各疏散路径位置保持能够辨识安全出口标志及车行通道边界的视觉条件所占的时间比例，能见度恶化会导致疏散方向错误甚至车辆碰撞等次生事件。经济性指标中的单位面积能耗将地下车库通风与排烟系统运行所消耗的电量折算后除以车库建筑面积，用于横向比较不同设计方案的能源利用效率。全生命周期成本则统筹考虑系统从设备采购、施工安装、日常运行、定期维护到最终拆除替换的全部投入，避免只关注初期投资而忽视地下车库长期服役过程中的运行费用。

3.2 测试与验证方法

实验室缩尺模型试验按照一定几何比例缩小地下车库实际尺寸，重点保留柱网结构、坡道开口及车位布局特征，在可控条件下获取气流组织与尾气输送规律。相似准则与参数换算确保模型流场与实际车库流场满足动力学相似，通过调整模型内的送风速度、排风流量及一氧化碳释放源强度，将模型测得数据转换为实际尺度下

的对应数值。稳态与非稳态工况模拟分别针对地下车库日常通风持续运行状态和启停过渡过程或火灾发展过程开展测试，稳态工况用于评估设计工况下各防火分区的污染物平衡性能，非稳态工况用于检验系统应对车辆出入高峰或火情发生时的动态响应能力。现场实测数据对比将实验室预测结果与真实地下车库安装环境下的实测数值进行对照，验证数值模型或缩尺模型的预测偏差是否处于可接受区间内。关键点位参数长期监测选取地下车库内车位区中部、车道交叉口、送风口附近、排风口附近以及坡道入口处等具有代表性的位置，持续记录一氧化碳浓度、温度、风速及烟雾浓度等物理量，数据采集周期覆盖工作日与节假日及不同季节[5]。主观评价与客观数据关联分析收集车库管理人员及司乘人员对空气品质、异味感及空气流动感的主观反馈，将主观评分序列与同期一氧化碳浓度监测指标进行同步分析，识别客观参数超出阈值后主观不适感是否相应显现，为地下车库通风系统性能的综合评估提供依据。

4 地下车库通风与排烟系统技术挑战与发展方向

4.1 现有技术局限性分析

极端工况下系统稳定性不足表现在地下车库处于车辆出入高峰叠加恶劣气象条件时，设备性能明显衰减。高温天气中风机电机散热条件恶化可能触发过热保护，低温条件下坡道开口处冷风侵入形成温度分层，影响气流组织。火场高温烟气使风道内气流受热膨胀，排烟量无法维持设计值，传感器精度漂移削弱对真实火势的判断能力。多系统协同控制复杂度高源于日常通风、火灾排烟及诱导风机三个子系统相互耦合，共用风道时阀门切换时序与风量匹配关系需要精细设计，任何环节配合失误均可能导致排烟或通风失效。初期投资与运维成本平衡难题反映在变频驱动及智能传感器虽能降低长期运行能耗，但其采购及维护成本较高。部分设计为压低初始造价选用低效设备，造成服役期内电费持续偏高。

4.2 前沿技术探索方向

新能源驱动技术应用将太阳能引入地下车库通风系统。光伏—风机—体化设计利用车库上方光伏组件产生的直流电直接驱动风机，日照充足时可部分覆盖通风用电，光伏组件背面热量可预热冬季进风或降低外围护结构的热。地源热泵辅助通风利用地下土壤温度恒定特性，使新风经地下换热管道预冷或预热，减少冬季冷风侵入对车库温度场的扰动。数字孪生技术融合构建与实体系统对应的虚拟镜像，实时同步传感器数据驱动模型运行，实现气流状态可视化与污染物演变推演。虚拟调试在设备安装前完成控制逻辑验证，减少现场调试周期。预测性维护通过比对模型预测值与实测值的偏差，提前识别轴承磨损及过滤网堵塞等征兆。增强现实与虚拟现实辅助运维将风道走向及设备状态叠加到运维人员视野中，便于快速定位故障点位。

结束语

地下车库通风与排烟系统设计需全面考量通风与排烟关键要素，从送排风量计算到气流组织、设备选型等各方面精心规划。优化策略上，借助气流组织优化、设备性能提升和智能控制系统集成等手段提升系统效能。构建科学的评价指标体系，运用实验室缩尺模型试验、现场实测数据对比等多种测试验证方法，对系统效能进行准确评估。如此，才能打造出安全、高效、节能且符合实际需求的地下车库通风与排烟系统。

参考文献

[1]任龙,梁伟西.地下车库建筑的通风排烟设计思路分析[J].工程技术研究,2022,7(12):173-175.

[2]江源.防排烟及通风系统在住宅地下汽车库的设计与应用[J].建筑技术开发,2021,48(15):21-22.

[3]张晓磊.地下室车库诱导通风系统防排烟风机选型方法探讨[J].建筑热能通风空调,2021,40(4):92-95,87.

[4]王宇.车库通风消防排烟及补风系统设计研究[J].世界家苑,2022(6):186-188.

[5]刘慕云.深圳月亮湾综合车场通风与排烟设计探讨[J].建筑热能通风空调,2021,40(7):100-103.