第1章 绪 论

1.1 研究背景与意义

1.1.1 选题背景

作为资源节约和环境友好型的交通方式，城市轨道交通具有运力大、效率高、能耗低、集约化等优势，已成为我国城市公共交通系统的重要组成部分[1]。在过去几十年间，我国的城市轨道交通系统经历了由缓慢起步到快速发展的态势转变，并在“十三五”时期后进入“爆发式”发展阶段[2]（见图 1-1）。截至 2023 年年底，我国已有 55 个城市开通了轨道交通系统，运营总里程数达到 10 078km，其中 26 个城市拥有 100km 以上运营里程，37 个城市拥有 2 条以上运营线路，轨道交通系统网络化运营格局已基本形成[3]。2022 年 7 月发布的《“十四五”全国城市基础设施建设规划》指出，支持超大、特大城市为中心的重点都市圈织密以城市轨道交通和市域（郊）铁路为骨干的轨道交通网络，促进中心城市与周边城市（镇）一体化发展[4]，表明城市轨道交通系统的迅猛发展态势还将长期持续。随着运营线路的增加，城市轨道交通的客运量也呈现快速上升趋势，在城市公共交通中的骨干作用愈发明显[5]。例如 2022 年度上海轨道交通客运量占公共交通分担率已达到 70%，常态化日均客运量超过 1000 万人次[3]。

城市轨道交通系统存在多种制式，其中地铁是目前我国应用最为广泛的轨道交通形制。在 2022 年年底已投入运营的轨道交通线路中，地铁的线路里程占到了 77.84%。地铁制式线路平均客运强度达到 0.49 万人次/km，分别是市域快轨线路和有轨电车线路平均客运强度的 7.4 倍和 10 倍[5]。日趋常态化的大客流压力对地铁系统的运营保障和安全管理提出了更高的要求。

作为地铁系统中的枢纽节点，地铁车站是人员高度密集的公共场所且往往位于地下，在发生火灾等突发事件时，极易导致严重的人员伤亡和财产损失。例如 2003 年韩国大邱地铁由于人为纵火引发的列车站内起火事故，

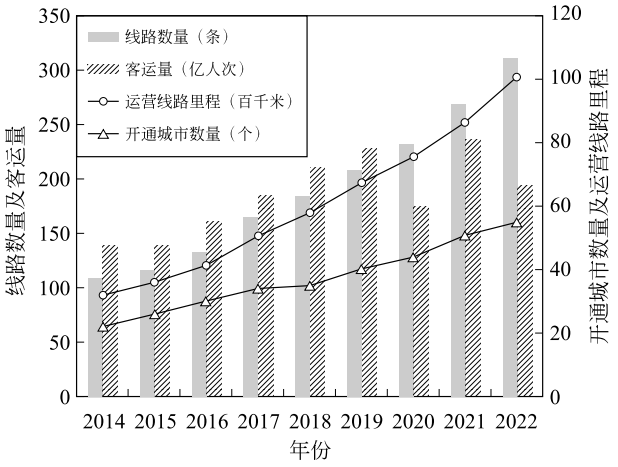


图 1-1　“十二五”以来我国城市轨道交通系统发展态势

（数据来源：中国城市轨道交通协会）

造成了 192 人死亡、148 人受伤[6]；2016 年比利时布鲁塞尔机场和马埃勒贝克地铁站先后发生恐怖袭击，共造成 35 人死亡、130 多人受伤[7]。对地铁车站火灾事故的调查和研究结果表明，地铁车站的火灾风险特点与地面建筑物存在较大差异，主要体现在以下方面：

（1）地铁车站内排烟设施和疏散设施功能受限。地铁车站需要在较小空间内集成大量运营和维护系统，极大限制了排烟和疏散设施的布局。在火灾事件中，通风排烟系统难以及时排出所有烟气，导致烟气在站内迅速蓄积蔓延，波及范围较大。与此同时，宽度有限的通道、楼扶梯和出入口难以在短时间内保障所有乘客完成疏散，导致乘客长时间滞留等待，极易出现拥挤、踩踏等事件。

（2）地铁车站空间封闭，烟气威胁更为突出。地铁车站一般位于地下，仅通过少数出入口与外界连通，空气补充和烟气排出均较为困难。发生火灾时可燃物往往由于氧气不足而无法充分燃烧，产生的有毒有害气体可能使乘客中毒和窒息。同时，火灾烟气中含有的颗粒物在沉降过程中还会导致能见度迅速下降，降低人员疏散效率，并增加了乘客迷路、受困的可能性。

（3）地铁车站内烟气蔓延方向与人员疏散方向重叠。受热浮力驱动，高温火灾烟气将沿建筑物顶棚向外蔓延，极易通过楼扶梯口、电梯口等顶部开口向上方楼层扩散。由于地铁车站一般位于地下，人员疏散方向和烟气扩散方向重叠且烟气蔓延速度远快于人员疏散速度，疏散过程将持续受到

烟气威胁。与此同时,向上扩散的烟气还会阻碍救援人员靠近起火点,妨碍对起火位置和火灾规模的准确判断,影响救援行动的展开。

烟气作为地铁车站火灾事故中的主要危险源,有必要对其蔓延特性和防控方法开展深入研究。而乘客作为地铁车站火灾场景中最为脆弱的承灾载体,更需要科学评估其暴露风险并设计合理的疏散设施。针对地铁车站中烟气蔓延过程与人员疏散过程高度耦合的特征,亟须在烟气动力学和人员疏散交叉领域开展研究,在理解烟气蔓延模式的基础上,充分发挥人员疏散特征对火灾风险评估的指导作用,形成科学合理的排烟和疏散设施设计优化方法,提升地铁车站火灾风险控制能力。

1.1.2 地铁车站消防设计现状

地铁车站的消防设计是一项复杂的系统工程,目前设计的主要依据包括《地铁设计规范》(GB 50157—2013)[8]、《地铁设计防火标准》(GB 51298—2018)[9]、《城市轨道交通工程项目规范》(GB 55033—2022)[10]等地铁专业设计标准,以及《建筑防烟排烟系统技术标准》(GB 51251—2017)[11]、《建筑防火通用规范》(GB 55037—2022)[12]等建筑通用设计标准。

根据《地铁设计防火标准》(GB 51298—2018)[9]中的内容划分,地铁车站消防设计主要包含车站建筑、安全疏散、消防给水与灭火、防烟和排烟、火灾自动报警、应急通信与照明等内容。两项防火标准[9,12]均以“减少火灾危害,保障人身和财产安全”作为制定的出发点,体现了我国消防设计领域以人为本的理念。而对应到地铁系统中,以控制火灾场景下的主要危险源——烟气蔓延为目标的防排烟设计,以及保障火灾场景下的首要承灾载体——人员安全为目标的疏散设计,是地铁消防设计中的重要内容。同时,烟气蔓延和人员疏散过程均具有动态演化的特征,其规律会随火灾场景改变,增加了实践中防排烟和疏散设施设计的难度。

在现行标准体系中,2022年发布的《城市轨道交通工程项目规范》(GB 55033—2022)[10]和《建筑防火通用规范》(GB 55037—2022)[12]为强制性工程建设规范,全部条文均具有强制约束力,是对工程建设项目的控制性底线要求,是工程建设领域“技术法规”体系建设的最新成果。强制性工程建设规范正式实施后,相关工程建设标准中的强制性条文被同步废止。然而,强制性工程建设规范作为对工程项目的基本技术规定和基本水平要求,难以覆盖消防设计的全部技术细节。其他标准规范中大量强制性条款的废除

导致消防设计实践中出现较大自主空间，使得消防设计方案的可靠性更加依赖于设计团队的经验积累，迫切需要科学评估手段支撑。

同时，随着建筑物形制和结构复杂度的提升，诸多大型建筑物的消防设计面临超出现行规范适用范围或按照现行规范执行存在困难的问题。作为对处方式设计方法（prescriptive-based design）的补充，性能化设计方法（performance-based design）被广泛应用于北京奥运会[13]、上海世博会[14]场馆等大型建筑物的消防设计中。与处方式设计强调对规范条文的满足不同，性能化消防设计以确保建筑物中的人员生命安全不受到火灾威胁为目标，能够采用更为灵活有效的设计方案，实现科学合理的防火保护[15]。然而，消防性能化设计的可靠性高度依赖于火灾场景设计、烟气运动模拟、人员疏散模拟、安全判定标准选择等环节的准确性[16]。因此，有必要针对地铁地下车站这一特殊场景中的烟气蔓延规律、人员疏散规律、全局火灾风险评估方法等基础性问题开展深入探索，为性能化设计思想在地铁行业的推广应用提供方法和理论支撑。此外，性能化设计方法以人员生命安全是否受到火灾威胁作为设计方案评判标准，能够较为便捷地评判设计方案是否满足安全性要求，却难以量化评估所有达标方案的相对优劣。因此，有必要在性能化设计思想的指导下，以人员实际面临的风险水平作为依据，建立地铁车站防排烟及疏散设计评估及优化方法，为进一步提升地铁车站火灾风险防控能力提供科学手段。

1.1.3 研究意义

建筑设计阶段的风险管理可以从根本上降低风险水平，有效提升运营阶段对安全风险的应对能力[17]。然而，现有地铁车站火灾风险防控大都是基于现有设计的被动式管理，缺少针对车站排烟设施和疏散设施设计的预先优化，未能充分发挥设计阶段控制火灾风险的潜力。为提升地铁车站火灾风险防控能力，降低火灾场景人员疏散面临的风险水平，本书主要从火灾烟气蔓延理论、火灾风险评估方法以及火灾风险控制优化方法三个方面展开研究，主要研究意义如下。

1. 揭示了站内障碍物和楼扶梯对火灾烟气流动的影响机制

对于地铁车站等地下狭长大空间烟气蔓延规律的相关理论研究已较为成熟，但目前仍缺乏针对楼扶梯、立柱等车站内部结构与烟气层动态作用机制的深入研究。在车站形制日趋多样、建筑面积不断增大的情况下，各类型车站内部结构的数量和规模不断增加，将对火灾烟气的蔓延过程产生更为复

杂的影响。相关研究的缺乏将降低车站防排烟设计的可靠性和有效性,限制了火灾防控措施向精细化方向发展,不利于车站火灾风险防控能力的提升。

因此,本书首先揭示了柱体式障碍物对烟气蔓延过程的影响形式,建立了起火楼层内温升分布特征和烟气水平流动规律的预测模型。随后,本书研究了楼扶梯区域的流场时空分布特性,讨论了火灾烟气跨层蔓延条件。通过分析小尺度结构附近区域的烟气流动特征,上述研究展示了流体力学理论与烟气动力学场景结合的广阔应用前景,旨在引发对于烟气层与地铁车站复杂结构作用机理的更多探讨,为地铁车站消防设计提供了更为精细化的烟气动力学理论基础。

2. 提出了定量、无量纲化的地铁车站火灾风险评估方法

本书建立了综合烟气蔓延特征和人员疏散性能的地铁车站火灾风险定量评估方法,采用无量纲化的风险因子表征火灾风险,可获取车站全局火灾风险分布特征,并支持不同车站、不同设计方案火灾风险水平的直接比较,提升了地铁车站火灾风险评估的科学性和客观性。通过将风险评价标准由单一的可用疏散时间/需求疏散时间转变为疏散过程中人群实际面临的风险水平,该方法探索了性能化设计思想在地铁车站中的实践模式,使风险评估结果与疏散人员伤亡可能性建立了对应关系,可有效提升地铁车站设计、运营人员对于火灾风险的认知水平,真正做到“以人为本”的地铁车站消防设计与火灾应急处置。

3. 建立了智能化、标准化的地铁车站设施设计优化方法

本书从最优化通风排烟效果和最优化人员疏散性能出发,分别建立了地铁车站通风排烟设施和人员疏散设施设计优化方法,旨在探索可行域中的车站消防设计最优解,在不进行大幅度设计调整或提升车站建设运营成本的前提下,提高车站火灾风险控制能力。由于方法中不包含对车站形制的限制和要求,该方法具备推广至任意地铁车站的应用潜力。此外,该方法采用了启发式检索算法等新方法,在提升优化效率的同时也降低了方法的使用难度,可为未来地铁车站的防排烟和人员疏散设计提供智能化方法支撑。

1.2 研 究 现 状

由于地铁车站火灾具有极高的危险性和人员伤亡风险,国内外学者在地铁车站烟气扩散规律、风险评估模型与风险控制方法等领域开展了长期

的研究，主要采用的研究方法包括现场实验及观测、模型实验以及数值模拟等。

1.2.1 地铁车站火灾烟气动力学研究现状

1. 烟气蔓延规律

在地铁车站火灾事故中，乘客安全的首要威胁并非火源产生的高温，而是在车站内持续蔓延和沉降的烟气[18,19]。因此，许多学者对地铁车站火灾中的烟气扩散特性进行了研究，主要关注的参数包括顶棚最高温度[20]、纵向温度分布[21]、垂直温度分布[22]、烟气扩散速率[23]、烟气层厚度[24]等。

近年来随着研究的深入，对地铁车站烟气蔓延过程的探索正在向综合化的方向发展，学者们开始分析更多内外部因素对烟气扩散特性的影响。Zhong W.等[25]、谢知航[26]研究发现活塞风效应将在车站中产生大范围的气流涡旋，破坏烟气分层并加快烟气沉降。Chen F.等[27]、Lan B.等[28]探讨了烟囱效应对车站烟气蔓延特性的影响，并指出烟囱效应是决定烟气运动方向的主导性因素之一，不同顶部开口的横截面积和距离将决定其成为排烟口还是补风口。Zhong W.等[29]、Ji J.等[30]讨论了吸穿效应对车站排烟效率的影响，并建立了排烟口吸穿临界条件预测模型。

同时，随着地铁车站形制的多样化，学者们针对不同结构地铁车站中的烟气蔓延规律差异展开了广泛讨论。张亦昕[31]、李炎锋等[32]探讨了十字换乘型地铁车站中的烟气蔓延规律，指出多防烟分区、大埋深将增加车站防排烟难度。王季鹏等[33]研究了T型地铁车站中的火灾场景危险性，指出站台层双点火灾为最不利火灾场景。吴佳梦等[34]分析了L型地铁车站中的火灾烟气蔓延特点，并讨论了火灾烟气对人员疏散过程的影响强度。龙增等[35]研究了含阶梯式站厅地铁车站的火灾烟气扩散规律，指出自然风压会显著改变烟气蓄积位置。

另一个研究的重点方向是车站局部区域的烟气蔓延特性精细化建模。朱伟等[36]分析了车站出入口区域的烟气温度衰减规律，提出了该区域烟气分层条件的预测模型。史聪灵等[37]研究了地铁车站隧道内的火灾烟气蔓延特性，并分析了区间隧道射流风机与车站隧道轨顶排烟系统联动模式对气流组织形式的影响。张培红等[38]讨论了屏蔽门开启情况对火灾烟气蔓延特性的作用机制，并指出合理选择屏蔽门开启数量可以降低扩散至站台的烟气规模。樊洪明等[39]讨论了挡烟垂壁对火灾烟气蔓延的抑制作用，指

出加装挡烟垂壁后烟气扩散速率和关键疏散通道温度均出现明显下降。罗娜[40]分析了安装空气幕对烟气扩散过程的阻碍作用,并探索了空气幕的最佳设计参数和结构形制。

大量的地铁车站火灾实验和数值模拟研究建立了一系列烟气蔓延特性预测模型,为地铁车站火灾烟气控制奠定了坚实的基础。然而,近年来地铁系统的发展对烟气动力学研究提出了新的要求。地铁系统网络化运营格局的形成使得换乘地铁车站的数量和规模迅速扩张,三线、四线换乘车站已在上海、广州等多个城市出现。面对复杂多变的车站结构,传统的案例式研究方法难以及时为新建车站防排烟设计提供指导,有必要针对各类型车站中广泛存在的小尺度结构建立更具有普适性的烟气流动模型。同时,多线换乘车站建筑面积更大、楼层更多,对立柱等支撑结构的强度提出了更高要求,更大的客流规模也使得站内楼扶梯和直梯数量增加。这些障碍物会占用一部分站内空间,并显著改变车站内的气流组织形式,特别是在宽度较窄的站台区域[41]。尽管障碍物产生的阻塞效应在隧道火灾场景中已有充分的研究,但障碍物对地铁车站中火灾烟气蔓延规律的影响却长期缺乏深入的探索,值得进一步展开研究。

2. 烟气控制理论

受热浮力作用,火灾烟气在火源区域产生后会迅速上升至顶棚附近向外扩散,且具有强烈的向上流动趋势(与地铁车站中人员疏散的方向重叠)。因此,阻止火灾烟气向起火层以外的区域蔓延,成为地铁车站防排烟设计的关键目标之一。作为地铁车站楼层间最常见的连接设施,楼扶梯区域的烟气控制在相关国家标准中做出了专门规定[8,9]。

如何准确预测楼扶梯处的烟气控制条件是一个被长期研究的问题。顾正洪等[42]将阻止烟气通过楼梯向上方楼层扩散的最小风速定义为该楼梯处的临界通风速度,并指出临界通风速度与火灾热释放速率呈正相关,而与楼梯口挡烟垂壁高度呈负相关。随后,钟委[43]基于气流阻力与烟气热浮力平衡的假设推导了楼梯口区域的临界风速理论模型,并运用全尺寸实验结果检验了模型的可靠性。在此基础上,Liu Y. 等[44]进一步完善了不同侧壁形制的楼扶梯临界风速理论模型,并指出临界风速与火源热释放速率的三分之一次方成正比。

力平衡假设来源于房间和走廊火灾研究中提出的中性面假说[45,46]。中性面的定义为火灾场景下一个墙壁开口(opening)中两侧压差为零的水平面。在中性面上方,火源一侧压强更高,受热浮力驱动的烟气将越过该开

口向外扩散；而在中性面下方，外界一侧的大气压更高，新鲜空气将越过该开口向内补风。当中性面位于开口顶部时，该开口完全成为补风口，达到无烟气流出的临界状态。根据这一理论，可以利用楼扶梯口顶部热浮力与气流阻力的力平衡条件来预测开口处的临界风速。

然而，相关研究[47,48]表明开口处的浮力交换流具有较为显著的振荡特征，难以达成绝对静止的稳定状态。根据墙壁开口或走廊场景建立的临界条件预测模型可能由于烟气层特征和空间结构的差异，而与楼扶梯场景的烟气流动规律存在偏差。例如 Li Y. 等[49]在研究隧道联络通道区域的临界条件时发现，该区域的临界弗劳德数与走廊场景存在显著差异。受复杂的几何形制和流场结构影响，车站楼扶梯区域在达到烟气控制临界条件时也处于不断波动的动态平衡状态，可能无法满足力平衡假设成立的前提条件。因此，有必要针对火灾场景下楼扶梯区域的流场时空分布规律展开探讨，在充分理解火灾烟气与机械通风气流作用模式的基础上，建立动态视角下的楼扶梯烟气控制临界条件预测模型。

1.2.2 地铁车站火灾风险评估研究现状

根据《风险管理——风险评估技术》(IEC 31010—2019)的定义，风险评估是指可用于提高对不确定性及其对决策和行动影响的理解的一种手段[50]。风险评估的主要步骤包括风险识别、风险分析与风险评价。常见的风险评估方法主要可分为定性、半定量和定量三类。

由于地铁火灾的极高危害性，学者们针对地铁车站的火灾风险评估工作开展了较为系统的研究。李炎锋等[51]按照时序分阶段的模式建立了地铁车站火灾风险评估体系模型，并运用层次分析法计算了火灾各阶段车站风险水平。陈曼英[52]综合运用模糊故障树和模糊层次分析法定量分析了地铁车站火灾事故发生概率和潜在后果的严重程度，并提出了降低车站火灾风险水平的具体措施。米红甫等[53]从火灾发生概率和后果的严重程度两个维度出发，运用概率模糊评估方法计算了地铁车站的火灾风险水平。Ju W. 等[54]运用博弈论方法建立了地铁车站火灾风险指标体系，并引入 TOPSIS 方法实现了车站火灾风险量化计算。王建波等[55]运用主成分分析法降低了风险评估指标体系的维度，并运用径向基函数(radial basis function，RBF)神经网络实现了火灾风险水平推理预测。上述研究建立了形式不同的火灾风险评估指标体系，但受基础数据可得性和精确度的限制，在参数选择、权重设计、概率评估等环节大都不同程度地采用了专家评价法

以提供额外数据支撑，因而风险评估结果不可避免地受到评价者的主观影响。

为解决火灾风险评估中基础数据不足的问题，一些学者结合数值模拟方法构建了基于场景的火灾风险评估方法。黄丹妍[56]建立了乘客携带火灾载荷的动态仿真模型，在模拟行人运动过程的基础上实现了移动火灾载荷风险分布的动态计算。孙舒琪[17]将社会力模型与火灾动力学模型相结合，建立了大型地铁站火灾疏散仿真模型，分析了火灾疏散过程的高风险瓶颈位置和优化方法。张鑫[57]运用模糊贝叶斯方法提取了地铁车站火灾情景关键要素，并运用数值模拟方法再现了火灾演化和人员疏散过程，实现了多情景交织的风险分析。Chen Y.等[58]从生存率、人群风险、疏散效率、疏散有序性四个维度建立了地铁车站人员疏散风险评价指标体系，并采用数值模拟方法实现了典型火灾场景中的人员疏散风险评估。Zhang L.等[59]提出采用各关键节点位置需求疏散时间与可用疏散时间的比值评价车站整体火灾风险水平，实现了对最危险火灾场景的辨识。Marzouk M.等[60]综合运用建筑信息模型(building information modeling，BIM)方法与多主体仿真模型实现了建筑物疏散性能计算，并综合评估了不同火灾场景下的人员疏散风险水平。

上述研究结果证明，在评估地铁车站火灾风险时，需要综合考虑火灾烟气蔓延规律与人员疏散特性，以准确表征火灾环境对人员的影响。然而，在实际火灾场景中，地铁车站不同区域的主要风险源可能存在较大差异。对于火灾烟气蓄积的区域，烟气层的高温及其中的有毒有害气体是造成人员伤亡的首要因素[61]。但对于烟气无法扩散到达的区域，拥挤、踩踏等事故则是人群面临的主要风险[62]。因此，有必要针对两类区域分别建立风险量化表征与评估方法，全面分析地铁车站火灾场景下的全局风险水平。

1.2.3 地铁车站火灾风险控制优化方法研究现状

1. 通风排烟设施设计优化方法

一般来说，地铁车站每个防烟分区内都设置了独立的通风排烟系统，可根据火灾场景动态调整工作模式。在结构较为复杂的换乘地铁车站中，发生火灾时往往需要开启多个防烟分区的通风排烟系统，共同控制火灾烟气的蔓延。如何有效制定通风排烟系统的联动工作模式，控制烟气的扩散范围，成为学界广泛关注的问题。

Hu L.等[63]讨论了车站隧道列车火灾场景下车站的最佳通风模式，指

出采用轨顶排烟联动站台排烟模式能有效阻止烟气从车站隧道进入站台。Li J.等[64]研究了十字换乘型地铁车站的烟气扩散特征,提出采用中间层站台送风与底层站台排烟结合的模式可以更有效地控制底层站台火灾场景烟气蔓延。Long Z.等[65]针对双岛式地铁车站站台、列车和车内火灾场景分别制定了最优通风排烟模式,并指出排烟策略效果与火源位置具有较强相关性。Zhou Y.等[66]分析了多层换乘车站复杂结构楼扶梯区域的烟气控制方法,并提出了烟气控制薄弱区域的通风优化策略。Luo N.等[67]研究了上下平行式换乘车站的最佳通风模式,指出底部站台层火灾时中间层站台同步开启送风能最大限度降低中间站台层烟气浓度。

近年来,更多的学者开始关注防排烟系统结构对烟气控制效果的影响。Meng N.等[68]研究了挡烟垂壁高度对烟气扩散特性的影响,并建立了考虑挡烟垂壁高度的温度衰减特性预测模型。Razeghi S.等[69]分析了空气幕对烟气蔓延的阻挡效果,并讨论了空气幕排风角度、排风风速的最佳取值。Zhong W.等[29]讨论了侧向排烟模式在地铁车站中的适用性,并提出了侧向排烟吸穿效应发生的临界条件预测模型。Wang K.等[70]研发了大型地铁车站火灾救援协同应急指挥平台,可通过实时控制通风、排烟和挡烟设施设备协同控制烟气蔓延。

对于地铁车站排烟系统的工作模式和结构设计已有较为系统的研究,且多项技术成果已经得到实际应用。然而,现有研究主要从车站尺度宏观视角展开,较少考虑排烟口等具体设施的设计参数优化。相关研究表明,排烟口的高度[71]、尺寸[72]以及位置[73]都会对通风效率产生显著影响,有必要针对车站通风排烟系统的精细化结构设计展开深入分析。同时,现有研究一般通过直接比较温度、有毒有害气体浓度等烟气特征参数间接评判车站排烟模式的性能优劣,针对通风性能和排烟效果的定量化评价手段值得进一步研究,以支撑对车站通风排烟系统最优设计方案的探索。

2. 疏散设施设计优化方法

火灾环境会显著干扰人员疏散过程,浓烟将造成疏散效率降低[74],强迫疏散者改变疏散路径[75],还可能引发人员的过激和竞争行为[76]。在人员密集、环境封闭的地铁车站中,如何优化疏散过程并降低人员伤亡风险,受到学界广泛关注。

在优化方法方面,最常见也最易于实现的方法是制定新的疏散策