

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.07.069

# 城市隧道火灾报警系统潜在问题分析及优化

辛奇峰

(上海浦江桥隧运营管理有限公司,上海市200120)

**摘要:**通过对城市隧道的历史火灾案例分析研究,总结火灾报警系统的潜在问题,并针对性地提出优化及解决方案。通过智能化手段研究解决问题,包括优化系统人机监控图形界面,增加应急后备功能,对每个雨淋阀组分区与监控摄像机进行二次对位,提高系统容错率及对位准确率。通过试验案例测试效果,当现场火警(光纤光栅、双波长火焰探测器)因环境原因未能探测到火灾信号,但视频事件检测或人工通过大屏视频判断火灾情况下,可以后备准确开启现场雨淋阀组,并通过数字孪生技术辅助启动相关预案。

**关键词:**隧道火灾;联动灭火;系统优化

**中图分类号:**U458

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-7716(2023)07-0292-06

## 0 引言

随着我国城市路网建设的不断推进,越江隧道、下立交、地下通道等新建交通设施先后投入使用。城市隧道空间相对密闭,在运营过程中一旦发生火灾,如不能及时发现并正确处置,火势蔓延以及引起的次生灾害将造成重大人员伤亡及财产损失。在真实隧道火灾案例中发现火警延迟及漏报等情况,同时无法准确联动火灾点雨淋阀组、防排烟、逃生诱导等系统设备,错过最佳灭火时机,暴露了潜在问题。

## 1 隧道火灾案例分析

### 1.1 隧道火灾联动工况简述

当隧道发生火情时,消防报警主机在接收到隧道内探测的火灾报警信号(FAS)之后,经确认,联动隧道内的泡沫雨淋灭火系统灭火;并同时联动综合监控系统(BAS)相关系统。具体包括:

(1)根据探测到的火灾点对应隧道区域联动相关通风预案,自动开启射流及轴流风机送风排烟。

(2)自动切换火灾点联动预案的交通监控系统的交通信号灯、情报板;自动开启防火卷帘门,广播系统引导及疏散车流。联动安全疏散诱导装置,指明人员逃生路线。

(3)联动其他相关设备设施。

收稿日期:2022-10-24

作者简介:辛奇峰(1983—),男,本科,工程师,从事市政管理工作。

### 1.2 隧道火灾及试验数据统计

以上海通车运行超过10年,有数据积累的7条城市隧道为研究对象(见表1),目前城市隧道使用的火警探测器分为双波长火焰探测器、分布式光纤感温、分布式光纤(光栅)感温、视频图像识别等类型。

### 1.3 火灾案例及试验分析

火灾发生后能及时准确地探测到火警是隧道整个消防系统的联动起点,如无法有效探测到火警,则无法有效联动相关设备对火灾点灭火、排烟。通过统计隧道真实火灾及模拟火灾试验数据(共计火情13次、试验28次),分析各类探测器的响应准确率、漏报率及联动情况(见表2)。

双波长火焰探测器真实探测率为73%,在真实火灾情况下,出现联动错位情况。分布式光纤(光栅)感温探测器受环境干扰较大,探测率仅为27%,且火灾发生时存在火警“偏移”报警延迟、错位现象。

## 2 问题及难点分析

### 2.1 潜在问题分析

#### (1)环境因素

隧道设计一般按照20MW火灾规模计算<sup>[1]</sup>,但是隧道内通行的一般乘用车发生火情初期热释放率仅为0.5~3MW,真实火灾发生的环境下,隧道风速约1~5m/s,地面火源距敷设在隧道顶部的感温光纤、光栅约5~6m高度,隧道车行道定温的报警阈值通常取50~60℃,差定温设定在8℃/min。

隧道内发生火情初期,在隧道通风设备(射流风机)开启的情况下,敷设在隧道车行道顶部的感温光

表1 上海市运行超10年的越江隧道历史火灾探测统计表

单位:次

编号	隧道	建成时间	火警探测器	真实火情	火灾试验	探测响应	漏报或未达阈值	备注
1	打浦路隧道	1971年、复线2010年	分布式光纤	1	3	1	3	2010年大修后增设火灾报警系统
2	延安东路隧道	北线1988年、南线1996年	双波长、分布式光栅	2	5	5	2	2015年大修
3	外环隧道	2003年	双波长探测器	7	6	10	3	
4	翔殷路隧道	2005年	双波长探测器	2	4	4	2	
5	人民路隧道	2009年	分布式光纤、图像识别	1	5	2	4	
6	新建路隧道	2009年	分布式光纤、图像识别	0	3	1	2	
7	龙耀路隧道	2010年	分布式光纤	0	2	1	1	
累计频次				13	28	24	17	

表2 隧道历史火灾探测器报警统计表

火灾探测器类别	响应准确率	漏报率	联动情况
双波长火焰探测器	73%	27%	11次FAS联动,15次联动失败
分布式光纤(光栅)感温探测器	23%	67%	3次FAS联动,12次联动失败
图像识别检测	79%	21%	无联动模式

纤,受火灾规模、隧道断面高度、隧道风速等因素综合影响,单位时间温升无法达到该报警阈值,导致感温光纤不能第一时间探测到火警信号。侧墙搪瓷钢板对火焰产生的辐射波有折射及散射效应,影响双波长探测器探测火焰波长。

若调低感温光纤报警阈值以及缩小差定温范围,增加探测敏感度,则易受环境干扰,如拥堵路况大型车辆的上排空调影响,以及部分光格栅路段,阳光直射造成频繁误报警。

### (2) 烟雾探测失效

双波长火焰探测器安装于侧墙上方距地面2.5~2.7 m处,其用于响应火焰的光特性;其工作原理是探测扩散火焰燃烧的光照强度和火焰的闪烁频率,即燃烧所产生的光和热会形成紫外光(UV)、可见光(VIS)、红外光(IR)。根据试验结果分析(见表3),由其基本探测原理决定了只能探测处于明火阶段的火灾,无法有效探测烟雾。

表3 隧道火灾探测器报警时间统计表

编号	火灾探测器	火灾类型	平均报警时间
1	双波长探测器	烟雾	无报警
2		火焰	16 s
3	分布式光纤	烟雾	无报警
4		火焰	135 s
5	分布式光栅	烟雾	无报警
6		火焰	87 s
7	图像识别检测	烟雾	无功能
8		火焰	15 s

根据实际火灾统计(见表2),车辆因故障自燃的前期,通常处于无明火、阴燃状态,因燃烧不充分,同时伴随着大量浓烟,温度无法达到感温光纤(光栅)报警阈值,干扰双波长探测及通常的图像识别也无法识别火焰。而此时正是火灾初级阶段的灭火“黄金期”,但若无法有效探测火警,则不能有效联动灭火系统,无法将火灾扼杀在萌芽状态。

### (3) 障碍物遮挡

在通行条件较差的隧道中,伴随重型货车的尾气及各个物体(大、小型车辆)之间会出现目标交错遮挡和运动模糊现象。当起火车辆与探测器之间被大车或障碍物遮挡时,会出现监控盲区,对基于图像识别的火灾探测模式造成影响,导致探测失败。

## 2.2 难点分析

### (1) 联动失效

以2015年大修完成的延安东路隧道为例,大修应用最新国标规范《火灾自动报警系统设计规范》(GB 50116—2013),设计隧道车行道内选用3种FAS联动逻辑(见表4)。

表4 延安东路隧道火灾报警联动逻辑表

逻辑序号	泡沫雨淋阀组联动条件	联动控制设备	保护范围
1	相邻的2个双波长火焰探测器报警	相邻的2个双波长火焰探测器之间的2套喷淋阀组	50 m
2	1个双波长火焰探测器报警+感温光纤报警(任意点位)	1个报警的双波长火焰探测器左右两边的2套喷淋阀组	50 m
3	1个双波长火焰探测器报警+1个手动按钮报警(任意点位)	1个报警的双波长火焰探测器左右两边的2套喷淋阀组	50 m

即3种火警信号:双波长报警信号、感光纤报警信号和手动按钮报警信号视为3个逻辑点,需同时满足触发2组信号,才能联动启动隧道内的对应雨

组位置的泡沫雨淋阀组,向对应区域进行泡沫雨淋灭火(如图1所示);如同一报警区域只有一个触发信号报警,系统则判定不满足联动条件,导致联动失效。

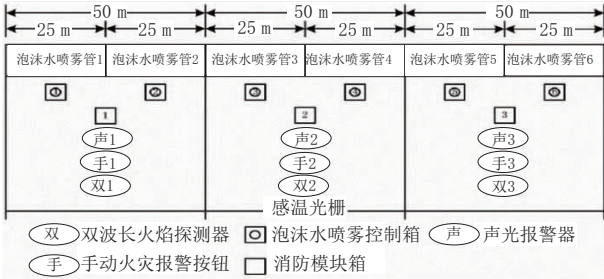


图1 隧道火灾报警设备及雨淋阀对应位置

(2)火警“漂移”及联动错位

对于应用《火灾自动报警系统设计规范》(GB 50116—2013)<sup>[2]</sup>之前建造的隧道,通常只有一种逻辑点判断火灾。在环境风速影响下,产生热量“漂移”造成感温光纤(光栅)火警点错位。

对于只安装双波长探测器的隧道,如火警点处于2组双波长探测器中间位置,则火焰产生的检测波段,易导致泡沫雨淋阀出水区域与火灾点联动错位现象,如图1所示,进而造成联动雨淋阀组错位,无法有效扑灭或控制火势。

(3)图像识别及人工判断错位

对于安装有图像识别系统的越江隧道,摄像机安装间隔距离一般在70~100m范围。根据消防规范,当发生火灾开启火灾区域50m范围内的2段25m喷淋管覆盖消防灭火范围。但现场摄像机安装间距与雨淋阀组间距设计不对应,这也就造成很难通过图像识别系统或者人工判定火灾处于监控镜头里哪个“25m区间”。

由于城市隧道泡沫水喷雾系统的消防管道压力限制,火灾工况下只能满足相邻两组同时作用,一次保护50m区段,如开启超过2组雨淋阀组,则管道压力及流量无法达到设计要求<sup>[3]</sup>。

(4)移动火灾点探测困难

上海目前通车运行的17条越江隧道,火灾报警设计均为同一时间点、同一隧道只考虑“一次火灾”,即对移动火灾点报警探测只考虑第一次探测火警位置点的联动。

在火源不断移动的情况下,根据《自动喷水灭火系统设计规范》(GB 50084—2017)<sup>[4]</sup>,火灾工况下只能满足相邻两组同时作用,一次保护距离50m,当联动点灭火装置打开后,火源若继续移动,根据目前

消防管道压力设计,则无法再次有效联动。由于越江隧道整体构造为两头高中间低的“倒拱形”结构,存在向江中心方向的坡度;因此事故车辆起火后,在无人操控的情况下,起火车辆会发生“滑向最低点”的移动火灾。

3 针对性优化

3.1 总体思路

为解决上述分析的问题,在原设计框架内,增加应急后备的系统功能。如遇探测火警联动失败的情况,应用基于深度学习的检测模型,快速检测出初期火灾特征,即对火灾有“预判”,从而辅助人工决策;准确点动雨淋阀组,并通过数字孪生准确联动BAS设备,将火灾扼杀在萌芽状态,增加隧道火灾工况容错率。总体消防联动控制流程如图2所示。

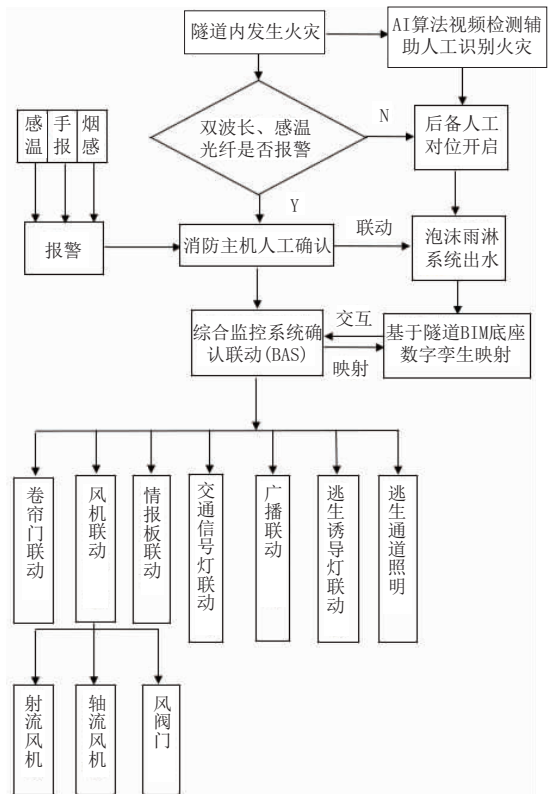


图2 隧道消防联动优化控制流程图

3.2 优化控制界面

优化原先的中控火灾报警CRT监控界面,以人体工学“带鱼屏”全景展示隧道火灾控制界面,如图3所示,便于值班监控人员操作及定位。图列以隧道内现场对位的摄像机监控区域为界限,在界面中以深浅的颜色区块明显划分;同步对应隧道内火灾探测器及对应雨淋阀组覆盖区域;达到人工监控一目了然、图列清晰、定位精确、逻辑准确,解决火灾对位难题。

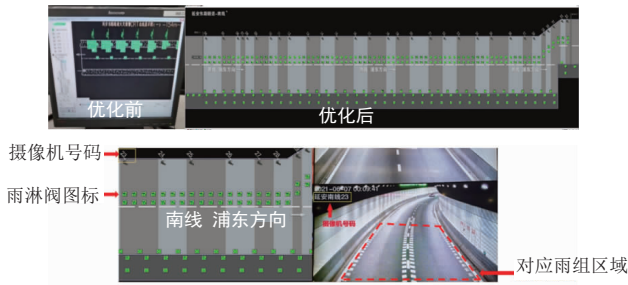


图 3 优化前及优化后火灾报警系统人机界面

### 3.3 优化视频检测

针对隧道常规视频事件检测算法对火灾检测多尺度火焰和烟雾精度低,且环境干扰、遮挡等问题;基于深度学习的目标检测 YOLOv5 算法,采集隧道火灾图像数据,学习样本数据内在规律,拟合隧道背景、环境照度<sup>[5]</sup>。火灾检测模型算法训练流程如图 4 所示。

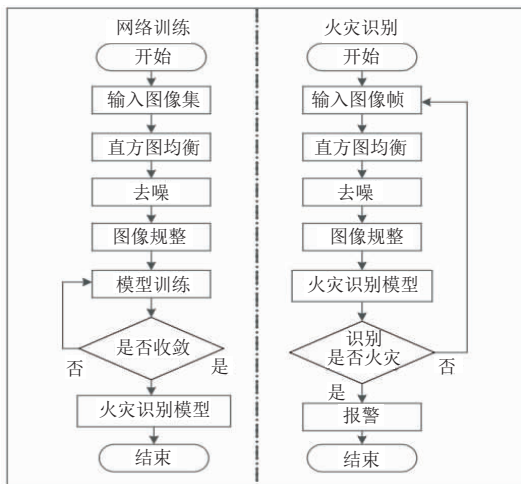


图 4 火灾检测模型算法训练流程

通过优化算法,引入注意力机制,解决隧道内光线不足的工况环境摄像机拍摄图像质量相对较差、覆盖远端目标分辨率有限、识别难度较大等难题。训练适合隧道火灾检测算法模型。提升对多尺度目标火灾的特征提取效果,提高火焰、烟雾的特征识别准确率。火灾检测模型特征优化及检测效果如图 5 所示。

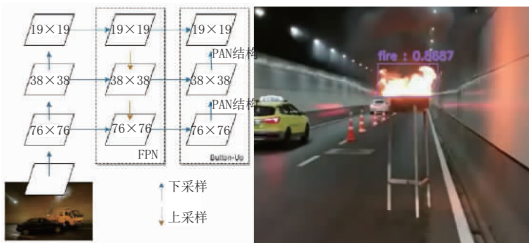


图 5 火灾检测模型特征优化及检测效果

### 3.4 优化预案启动方式

采用数字孪生技术,同步采集隧道各系统设备监控反馈参数、运行历史等数据,在此基础上形成计算机虚拟映射<sup>[6]</sup>,如图 6 所示。通过对隧道中央计算机系统的火灾自动报警系统、疏散指示、消防广播

等平台,对不同火灾工况下的设备联动进行“预案备份”,在联动失效的情况下,能根据火灾点的设计联动预案,后备“一键”准确联动设备。

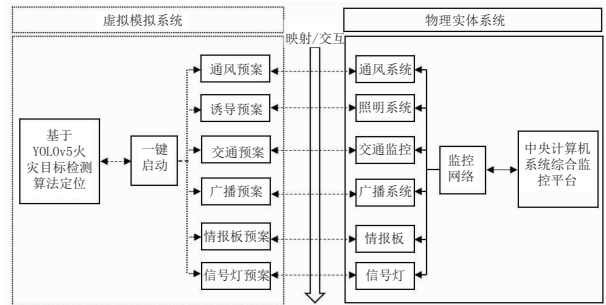


图 6 隧道数字孪生映射结构图

## 4 联动试验及效果分析

### 4.1 固定点火灾试验

以陆家嘴区域人民、新建、延安东路 3 条越江隧道为测试对象。

根据隧道实际情况,试验方法参照国际隧道火灾类型的研究试验方法(如图 7 所示)具体如下:

(1)液体油盘火。主要模拟车辆自燃造成油箱燃烧或者车辆撞击中出现的火灾。这类火灾发展速度很快,在很短时间内即会达到最高热释放率;火源采用直径 0.7 m 火盆,架设高度模拟常规轿车高度 1.2 ~ 1.5 m,模拟车辆自燃、火灾初期的情况。

(2)烟雾。主要由于车辆发动机故障,引擎盖内阴燃,或者货物早期阴燃等引发。采用消防试验 S-3500 消防烟雾弹,发烟时间 ≥ 180 s。

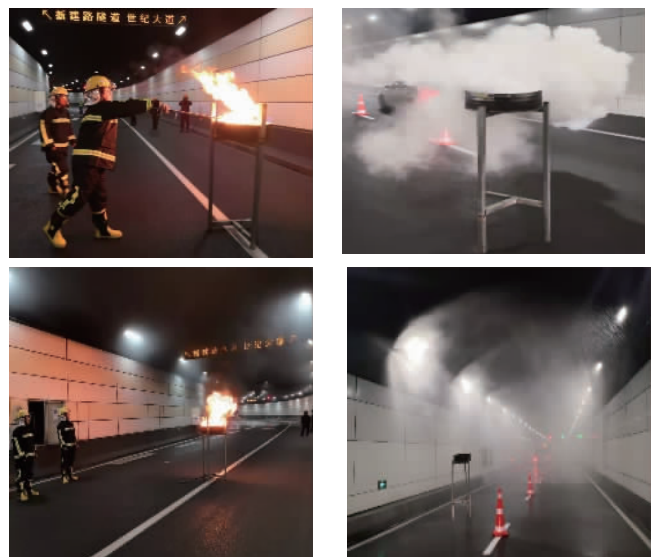


图 7 隧道固定点火灾试验

### 4.2 移动点火灾联动对点测试

火源架设在高度为 2 m 的高架车大平台上,在确保安全的情况下,火源以 20 km/h 的速度行径,逐个火

灾分区测试,模拟车辆失控滑行状态(如图8所示)。



图8 隧道移动点火灾试验

主要测试内容为火灾工况下的雨淋分区、通风分区、交通监控联动、诱导逃生。对最密集的260个隧道火灾雨组联动区域逐一试验,对三条隧道共计14种通风联动模式同步试验;以及其他设施设备也同步试验。

试验分为三组,即隧道原生火灾报警系统联动测试、人工操作测试以及优化系统辅助人工测试。

### 4.3 效果分析

#### (1) 自动联动

隧道固定点火灾试验结果(见表5)暴露了传统火灾报警探测器的一个潜在问题,即环境温度必须

达到设置的阈值才能报警。这一过程冗长,错过最佳灭火时机,最重要的是不能预判火情的发生。隧道消防报警系统的FAS联动受制于探测器报警准确率和及时性,且受隧道各类环境影响,无法及时联动设备灭火、排烟、通风。AI模型图像识别+人工确认模式优势明显,并互补了短板。

#### (2) 人工检测

人工识别的特点是对隧道火灾事件判断准确率高,但是交通事件漏检率较大,不能保证检测的速度与时效。隧道设备数量多,专业多,工况复杂。当发生火灾后,第一时间根据火灾点的位置开启不同火灾工况划分区域的设备,并要求能准确对位,难度极大且对操作人员的要求非常高,同时操作,误差较大。

所以根据试验结果可知,人工操作适合简单的重要设备且数量少的“大件”设备操作,对事件的决策判断准确率高。

#### (3) 系统优化效果

由隧道火灾报联动试验结果(见表6)对比得出,优化的后备系统在雨组联动、通风联动、交通监控联动和智能诱导联动补强了人工操作的短板,准确率都有明显提升。

表5 隧道固定点火灾试验结果表

隧道位置	火源	燃料类型	热量释放速度 /kW	环境温度 /℃	报警延迟时间 /s			
					双波长火焰探测器	分布式光栅感温探测器	分布式光纤感温探测器	AI模型图像识别+人工确认
人民北线进口暗埋段	Φ0.7 m 火盆	汽油	700 ~ 800	23	—	—	未超阈值	9
人民南线盾构段(联络通道)	消防烟雾弹	S-3500	≥180 s	24	—	—	未响应	10
延东北线盾构段(江中心)	Φ0.7 火盆	汽油	800 ~ 900	18	13	42	—	8
延南线盾构段(江中心)	消防烟雾弹	S-3500	≥180 s	20	未响应	未响应	—	11
新建东线出口暗埋段	Φ0.7 m 火盆	汽油	700 ~ 800	11	—	—	132	12
新建西线出口暗埋段	消防烟雾弹	S-3500	≥180 s	15	—	—	未响应	13

表6 隧道火灾报联动试验结果表

序号	火灾工况联动区域	区域数量	设备数量	联动准确率		
				自动联动	人工操作	人工+优化系统
1	雨组联动区域	260	518 组	48%	72%	89%
2	通风联动区域	14	127 台	33%	12%	87%
3	信号灯	76	152 套	32%	45%	88%
4	情报板	6	16 块	33%	94%	93%
5	广播联动区域	6	87 套	33%	45%	90%
6	智能诱导联动区域	34	334 只	34%	11%	88%

针对雨组对位的问题,优化过程中对每个雨淋阀组分区进行二次对位。对每个摄像机监控区域覆盖的雨淋阀组以由远及近的顺序,利用视频监控软件,进行分区划线,并标号对位。将“带鱼屏”图控按钮编号与现场分区一一对应。当发生火灾时,监控人员通过摄像机查询到现场编号,按下相应的雨组按钮即可准确定位灭火发生位置,不再依靠人的经验判断分区,以免因误判而错过最佳灭火时机。

针对操作准确率低、对位难度大的通风排烟专业设备,及设备数量大且操作复杂、误操作率高交通监控设备、逃生诱导设备,只需一键启动不同火灾联动工况的“预案备份”,即可实现火灾点位置的火灾联动功能。

## 5 结 语

通过对上海越江隧道火灾报警系统历史案例的分析和梳理,结合隧道日常运维中发现的潜在问题,从运营安全的角度提出进一步优化系统可靠性的建议。

(1)现行设计规范《火灾自动报警系统设计规范》(GB 50116—2013)中未明确小规模火灾或火灾

初期阶段,在未达到火灾报警探测器报警阈值或者环境因素造成火灾漏报的情况下的判定条件。介入后备应急系统,人工确认喷水操作的执行条件。

(2)随着新能源汽车的普及,纯电车及装备高能量密度电池的乘用车数量激增,隧道按照老规范设计的泡沫雨淋阀灭火系统适用于燃油汽车的灭火条件,是否适用于新能源汽车自燃情况还有待进一步讨论研究。

(3)根据各隧道的工况特点,结合各区段不同的环境因素,通过实地环境探测,确定火灾报警阈值的合理区间,以“一隧一方案”的办法来设定报警阈值。

### 参考文献:

- [1] 李新星,孟静.隧道火灾报警试验及其技术比较分析[J].地下工程与隧道,2010(4):20-23.
- [2] GB 50116—2013,火灾自动报警系统设计规范[S].
- [3] 陈旻.火灾探测器对城市隧道消防运维管理的影响[J].上海船舶运输科学研究所学报,2019,42(1):6.
- [4] GB 50084—2017,自动喷水灭火系统设计规范[S].
- [5] 辛奇峰.基于深度学习的目标检测技术在隧道运维中的应用研究[J].中国市政工程,2021(3):7.
- [6] 陆剑峰,张浩,赵荣泳.数字孪生技术与工程实践[M].北京:机械工业出版社,2022.

(上接第 278 页)

- 同济大学,2008.
- [9] 吴晓庚.大型隧道与综合管廊一体化建设应用实例[J].中国市政工程,2015(4):88-90.
  - [10] 邱婧,吕亮,康晓乐,等.城市综合管廊与地铁隧道协同建造方法综述[J].市政技术,2021,39(9):128-135.
  - [11] 张忠宇,徐建,黄俊,等.综合管廊与地下工程协同建设的关键问题与对策[J].地下空间与工程学报,2018,14(S2):493-499.
  - [12] 张凌翔.城市地下道路、物流廊道与综合管廊一体化研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(S1):7-11.
  - [13] 张忠宇,李奥,龚丹丹,等.基于虚拟映射技术的城市地下空间保

- 护开发的应用[J].城市道桥与防洪,2022(4):198-203.
- [14] 沈桂平,曹文宏,杨俊龙,等.管幕法综述[J].岩土工程界,2006(2):27-29.
  - [15] 上海中环线北虹路地道工程[J].土木工程学报,2009,42(3):1.
  - [16] 李积栋,油新华,肖龙鸽.地下工程支护-结构一体管幕预筑法技术及发展[J].隧道建设(中英文),2018,38(3):456-460.
  - [17] 侯立勋,黄俊,俞蔡城,等.管幕结构法隧道下穿南京城墙设计方案研究[J].现代交通技术,2020,17(6):35-42.
  - [18] 杨奎,邢冬冬,黄俊,等.地下交通隧道建设中的协同设计及工程实践[J].工程建设与设计,2018(15):97-102.