

城市轨道交通列车客室火灾主动预测 报警装置布置方案研究*

张克妹¹ 厉志强¹ 李大燕²

(1. 中车青岛四方机车车辆股份有限公司, 266111, 青岛; 2. 奥雅纳工程咨询(上海)有限公司, 200031, 上海//第一作者, 正高级工程师)

摘要 研究了城市轨道交通列车客室火灾的特点, 分析了不同探测器的适用性。对列车客室的防火设计进行建模, 选取车厢中部座椅处发生汽油火灾和端部角落发生汽油火灾两种场景, 并选取了3种探测器布置方案进行模拟研究, 得到了不同场景下各布置方案的探测响应时间, 给出建议的探测器布置方案。该建议方案经济、有效, 可为列车客室的防火设计提供理论基础和实践依据。

关键词 城市轨道交通; 客室火灾; 火灾报警; 主动探测; 响应时间

中图分类号 U270.38+9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.03.035

Layout Scheme of Active Predictive Alarm Device for Fire in Passenger Compartment on Urban Rail Transit Trains

ZHANG Keshu, LI Zhiqiang, LI Dayan

Abstract The characteristics of fire in passenger compartment on urban rail transit trains are studied, and the applicability of different detectors is analyzed. The fire protection design of the train passenger compartment is modeled, and two fire scenarios are selected, namely seat gasoline fire in the middle of compartment and gasoline fire in end corners. Three detector layout schemes are selected for simulation research. The detection response time of each layout plan in different scenarios is obtained, and the suggested layout plan of detectors is given. The proposed scheme is economical and effective, providing a theoretical and practical basis for the fire protection design of train passenger compartments.

Key words urban rail transit; passenger compartment fire; fire alarm; active detection; response time

First-author's address CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., 266111, Qingdao, China

城市轨道交通列车内部空间较小, 若发生火灾, 产生的烟尘及热气容易在车厢内快速累积并沉降至人员活动空间。采取技术防范措施, 在火灾初期对车厢环境进行探测并及时采取控制措施, 可提高列车的安全性, 确保乘客人身安全。

目前, 对城市轨道交通列车火灾探测报警系统的设计及安装, 业内并没有制定详细的要求。有些标准仅提出火灾探测报警设备的布置位置, 但在探测器数量及类型等方面均无明确的规定。本文对列车客室区域的主动预测报警装置的布置方案进行深入研究。

1 车厢特点及对探测系统的特殊要求

城市轨道交通列车具有特殊的空间特点及运营特点, 其火灾也具有特殊性。为保证人员的生命安全, 需确保火灾探测系统早期探测和报警的准确性。

1.1 列车客室车厢特点

1) 列车车厢狭长封闭。客室车厢为狭长的密闭型空间, 一旦发生火灾, 所产生的烟气和热量容易蓄积, 进而影响人员的安全。

2) 列车载客数量多。1列城市轨道交通列车在满负荷运营时, A型车的定员可达2 500人, B型车的定员可达1 500人。一旦发生火灾, 容易造成大量人员伤亡。

3) 列车可燃物的特殊性。列车内部的主要可燃物包括座椅、内饰板、电器件等, 如图1所示。此外, 乘客行李也是引发列车内火灾的主要可燃物, 其组成物质与燃烧特性不固定。

4) 列车由若干节车厢连接构成。火灾探测系

* 国家重点研发计划课题(2016YFB1200404)

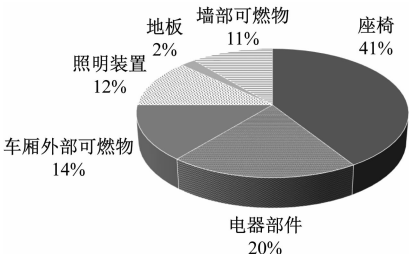


图 1 列车内可燃物占比分析

Fig. 1 Analysis of the proportion of combustible matter in train

系统的信号探测和联动均需要传输至中央控制平台（一般位于司机室），因而，各车厢间的连接也是火灾探测系统设计时需要重点关注的问题。

1.2 火灾探测系统的适用性分析

列车火灾防护设计时，考虑人员如何不受到火、烟的威胁尤为重要。目前国内外城市轨道交通列车多采用烟温复合探测器和吸气式感烟火灾探测器，这些探测器响应灵敏，可用于不同的探测环境。

由于车厢材料及乘客行李燃烧特性具有多样化的特征，故在火灾早期阶段其主要燃烧产物并不固定，建议可针对车厢内的烟气及温度进行复合式探测。城市轨道交通线路的站间距一般较小，列车进站后车厢门开启频繁，对车厢内气流组织的稳定性有一定的影响。因此，建议可采用吸气式感烟探测系统，以便在早期探测到火灾发生。

根据列车客室区域发生火灾的特点，以及各类探测器的适用范围和优缺点，本文对各类探测器的适用性进行分析，如表 1 所示。

2 列车火灾探测布置方案火灾动力学模拟分析

本文采用 CFD（计算流体力学）模拟方式，以列车的端部车厢为例，分析列车客室区域内可能发生火灾的部位及燃烧材料的特性，并开展必要的火灾场景模拟，以获取火场烟气、温度等参数随时间的发展变化趋势，在此基础上进一步分析火灾探测器的布置方案。仿真模拟所采用的 CFD 软件为 FDS（火灾动力学模拟软件）。

2.1 创建车厢火灾模型

列车的端部车厢包括驾驶室及客室区。客室区内车厢两侧均设有座椅。列车端部有直流柜，客室区两侧各有 5 个侧门及 4 扇玻璃窗。FDS 模型的车厢外观如图 2 所示。

表 1 列车客室区域内火灾探测器的适用性分析

Tab. 1 Applicability analysis of fire detectors in train passenger compartment

探测器类型	适用性说明	适用性结论
感烟探测器	探测较为迅速	适用
感温探测器	探测时间较长	不建议只设置感温探测器
火焰探测器	可快速探测，但无法探测被遮挡部位	可采用，但不推荐
气体探测器	可快速探测	不建议只设置气体探测器
复合型探测器	可快速探测，可靠性好	适用，建议采用至少包含感烟和感温功能的复合型探测器
电气火灾监控探测器	可快速探测电气火灾	不适用
吸气式感烟火灾探测系统	可快速探测	适用
缆式线型感温探测器	适用于吊顶内封闭电缆空间或车厢底部电缆空间	不适用
火探管/感温自启动灭火装置	适用于外壳相对密闭的特殊或重要的机柜设备	不适用

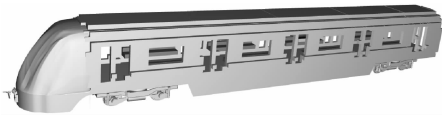


图 2 FDS 模型的车厢外观效果图

Fig. 2 Rendering of compartment appearance in FDS model

考虑计算域单元格的大小及计算机的计算能力，将车厢内所有可燃物的表面离散为 0.04 m^2 （即边长 0.2 m 的正方形）的燃料单元，如图 3 所示。

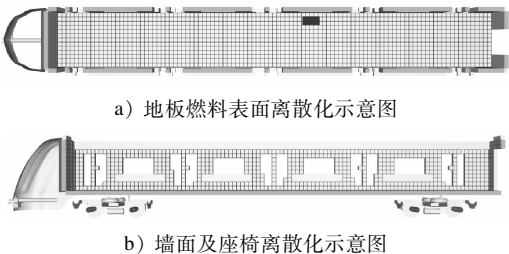


图 3 列车端部车厢内可燃物表面的离散化示意图

Fig. 3 Schematic diagram of combustible surface discretization in train end compartment

车厢 FDS 模型输入参数见表 2，起火源的 HRR（热释放速率）随时间变化情况如图 4 所示。

表 2 车厢内可燃物的部分参数

Tab.2 Partial parameters of combustible material in compartment

可燃物	材料	厚度/m	密度/ (kg/m ³)	C _p /(kJ/ (kg·K))	引燃温 度/°C	单位面积 HRR 峰值/(kW/m ²)	单位面积质 量/(kg/m ²)
地板布	PVC 地板布	0.003 3	1 583	1.29	318	235.00	5.07
侧墙板	铝板喷漆	0.002 1	2 613	1.04	2 054	1.21	5.44
天花板	铝板喷漆	0.002 1	2 613	1.04	2 054	1.73	5.44
座椅	不锈钢	0.005 0	1 230	1.30	380	70.00	3.25

注:PVC——聚氯乙烯;C_p——定压比热容。

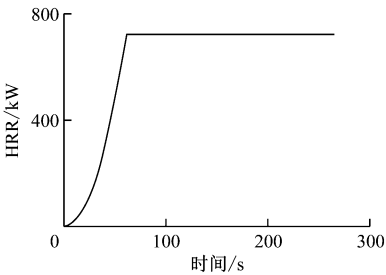


图 4 车厢内起火源的 HRR-时间曲线

Fig.4 HRR-time curve of fire source in compartment

2.2 设计火灾场景及车厢探测器布置方案

在防火安全设计时,需要考虑的两个重要因素为火灾发生的概率和火灾所导致的结果。美国的 Coles 等研究人员提出了一个城市轨道交通列车火灾风险的评估框架,该框架涵盖了起始火源引发火灾的概率及其可能产生的后果。参考该研究结果,本文选取了两个火灾模拟场景,分别为场景一(火源位置位于车厢中部座椅)和场景二(火源位置位于车厢末端角落地面),如图 5 所示。两个场景的具体设定如下:①环境初始温度均为 20 ℃;②火灾类型为超快速火;③HRR 峰值为 700 kW,持续时间为 264 s。

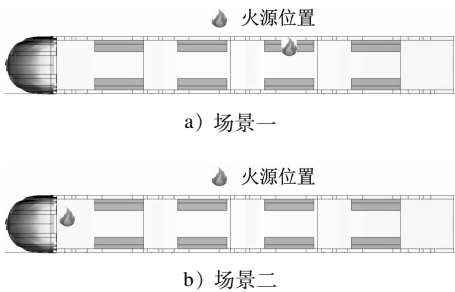


图 5 两个火灾模拟场景火源位置示意图

Fig.5 Location of the fire source in two fire simulation scenarios

两个场景下均采用感烟感温复合探测器进行

探测。如图 6 所示,探测器的具体布置方案有 3 种:①方案一,在回风口设置 2 个探测器;②方案二,在客室中央设置 1 排探测器,探测器的总数为 5 个;③方案三,在客室两侧各设置 1 排探测器,探测器的总数为 10 个。

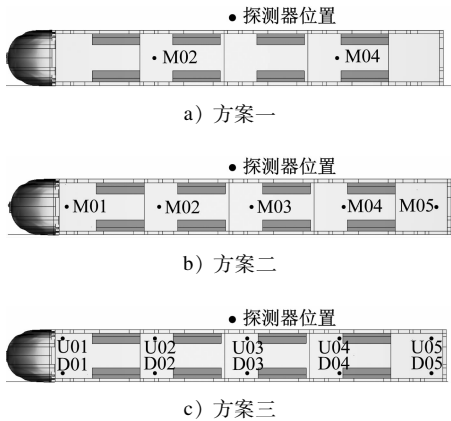


图 6 客室车厢内感烟感温复合探测器的布置方案

Fig.6 Layout scheme of combination smoke/heat detector layout in passenger compartment

2.3 模拟结果分析

本场景假设发生恐怖袭击,模拟人为纵火、概率极小的极端火灾,火源为 3.758 L 汽油(C7H16),且具有 0.25 m² 的表面积。

场景一和场景二下各探测器布置方案的响应时间分别如表 3 和表 4 所示,两个场景下各探测器布置方案的最短响应时间汇总如表 5 所示。各模拟场景下 CO 探测器均未启动。

2.4 模拟结果分析

2.4.1 不同探测器响应时间分析

在相同的火灾场景下,在相同的探测位置采用不同种类探测器进行探测,其响应时间有明显的区别:感烟探测器的响应时间较短,感温探测器的响应时间较长。由于列车结构和可燃物分布情况,发

表 3 场景一下各探测器布置方案的响应时间
Tab.3 Response time of each detector layout scheme in scenario 1

布置方案	测点	感烟探测器的 响应时间/s	感温探测器的 响应时间/s
方案一	M02	26	80
	M04	20	68
	M01	37	113
方案二	M02	27	82
	M03	17	62
	M04	21	68
	M05	29	88
	U01	45	132
方案三	U02	29	102
	U03	16	80
	U04	25	87
	U05	37	101
	D01	43	123
	D02	29	87
	D03	21	60
	D04	22	76
	D05	35	89

表 4 场景二下各探测器布置方案的响应时间
Tab.4 Response time of each detector layout scheme in scenario 2

布置方案	测点	感烟探测器的 响应时间/s	感温探测器的 响应时间/s
方案一	M02	22	70
	M04	36	90
	M01	14	48
方案二	M02	22	70
	M03	30	80
	M04	36	90
	M05	44	112
	U01	12	42
方案三	U02	26	90
	U03	32	92
	U04	38	100
	U05	46	120
	D01	24	72
	D02	22	78
	D03	32	88
	D04	38	98
	D05	46	116

表 5 两个场景下各探测器布置方案的最短响应时间汇总
Tab.5 Summary of the shortest response time of each detector layout scheme in two scenarios

场景	布置方案	感烟探测器的最 短响应时间/s	感温探测器的最 短响应时间/s
场景一	方案一	20	68
	方案二	17	62
	方案三	16	60
场景二	方案一	22	70
	方案二	14	48
	方案三	12	42

生不完全燃烧的可能性较低,产生的 CO 浓度较低,且远低于 CO 探测器的报警阈值,因此 CO 探测器均未启动。

对于单节列车车厢来说,在场景一和场景二下,根据不同探测点距离起火源的远近,感烟探测器达到响应阈值的时间差值约为 34 s,而布置在不同位置的感温探测器达到响应阈值的时间差值可能超过 90 s,最靠近火源的感温探测器达到阈值的时间也需要约 42 s。考虑到不同火源位置、不同可燃物布局对火灾蔓延的影响,若仅靠少数感温探测器进行探测,其响应时间可能会超过 2 min。

本文所模拟的火灾是起火源较大且火势蔓延迅速的场景,如果起火源较小,那么发生火灾后感温探测器的响应时间将更长。此外,考虑到列车内空调系统的作用,感温探测器可能会出现不报警的情况。

2.4.2 不同探测器布置方案探测结果分析

上文所述的 3 种不同探测器布置方案中,探测器布置越密集,启动时间则越早。分别沿着车厢长度和宽度方向增加探测器布置密度并进行模拟测试,发现沿车厢长度方向上增加测点对缩短响应时间的效果更为明显。

2.4.3 建议的探测器布置方案

综合考虑在客室内不同位置发生不同功率的火灾场景、车厢内可燃物布局的差异、车厢内空调系统的影响、探测器报警系统的可靠性和经济性等因素,本文建议采用方案二。

3 结语

本文结合城市轨道交通列车火灾的特点,对客

(下转第 173 页)