

广州地铁车辆段周界安防系统方案对比及选择研究

潘成灿¹ 李志龙²(通讯作者) 刘亚杰²(通讯作者)

1 广州地铁集团有限公司运营事业总部, 广东广州, 510220;

2 公诚管理咨询有限公司, 广东广州, 510610;

摘要:城市轨道交通网络化运营深化, 广州地铁车辆段周界安防对运营安全至关重要。本文以地铁车辆段为研究对象, 分析震动光/电缆、雷达、红外、视频分析4类方案的组成与原理, 结合广州地铁车辆段地形复杂、环境干扰多等特点, 构建“可靠性-经济性-功能性-智能化-环境适应性”五维对比体系, 并择优推荐方案, 本文研究可为广州地铁及国内同类城市轨道交通车辆段周界安防系统的升级与建设提供技术参考。

关键词:地铁车辆段; 周界安防; 方案对比; 广州地铁; 智能安防

DOI: 10.64216/3104-9664.25.01.017

1 引言

1.1 研究背景

截至2024年, 广州地铁已建成运营线路21条, 运营里程超700公里, 下辖25个车辆段(含停车场), 承担着日均近千万人次客流的列车保障任务。车辆段内不仅存放大量价值高昂的列车及检修设备, 还涉及信号控制、供电系统等关键设施, 同时有数百名工作人员日常作业, 其安全防护直接关系到地铁运营的稳定性^[1]。

周界安防系统作为车辆段的“第一道防线”, 需实现对非法入侵的实时检测、报警及联动处置。然而, 广州地铁现有车辆段周界安防系统存在明显短板: 部分车辆段未设置周界报警(如厦滘车辆段、新造车辆段), 只有围网和防爬倒刺防止人员入侵, 同时需安保人员加密巡视, 不能实时监测及掌握车辆段四周情况; 其余车辆段(停车场)均使用震动电缆, 部分四周空置地广的车辆段受风雨、植被干扰, 错报率较高, 且现车辆段四周围蔽非全围网, 存在部分墙体等围蔽, 震动电缆无法有效发挥作用。随着《广州市城市轨道交通安全检查工作规定》对安防系统“智能化、低误报、全联动”的要求升级, 现有方案已无法满足需求, 亟需开展系统性方案对比与优化^[2]。

1.2 研究意义

一是填补广州地铁车辆段周界安防方案缺乏量化

对比的空白, 为不同类型车辆段提供精准选型依据;

二是提出“分层组合”安防架构, 解决单一方案在复杂环境下的适应性问题;

三是增强周界安防“主动预警”功能, 契合智慧城市轨道交通的发展方向。

2 广州地铁车辆段周界安防现状与需求分析

2.1 现状问题梳理

通过对广州地铁车辆段的研究分析, 现状问题归纳为三类:

(1) 设备技术落后, 误漏报率高: 部分建设较早的车辆段周界系统, 使用的震动电缆抗干扰能力较差, 受大风、植物等影响, 月均误报次数达35次/段。

(2) 系统联动性差, 处置效率低: 虽然车辆段的周界报警与视频监控系统实现联动, 但部分车辆段的周界报警只能联动视频监控弹窗显示, 无入侵人员或物体的追踪等智能分析功能, 前段无声光报警功能。

(3) 维护成本高, 生命周期短: 震动电缆因户外老化, 每3~5年需更换一次电缆, 维护成本高达5万元/年。

2.2 核心需求指标

结合广州地铁车辆段的差异化场景, 从“功能-性能-成本”三维度分析需求指标, 各项指标如表1所示:

表 1：“功能-性能-成本”三维度指标分析

需求维度	核心指标	量化要求	适用场景
可靠性	误报率	≤1 次/公里/月	所有车辆段
	漏报率	0 (关键区域)	列车停放区
	响应时间	≤500ms	检修作业区
经济性	建设成本	≤35 万元/公里 (普通区域)	非关键周界
	年维护成本	≤0.8 万元/公里	全场景
	生命周期	≥8 年	户外设备
功能性	环境适应性	-30℃~60℃, 雨雾雪天正常工作	山地型车辆段
	联动能力	支持视频、声光、门禁联动	全场景
	数据存储	报警视频留存 ≥90 天	全场景
智能化	行为识别	区分人员/动物/车辆入侵	居民区周边车辆段
	自主学习	可优化误报阈值	复杂环境车辆段

3 常见周界安防方案技术原理与系统组成

3.1 震动光/电缆方案

3.1.1 系统组成

震动光/电缆方案是以“震动感知+信号传输”为核心，典型配置如下：

(1) 前端探测：采用 GYTA53 型铠装震动光缆（外径 11mm，抗拉强度 ≥1500N）或 RVVSP 型震动电缆（4 芯屏蔽，耐温 -40℃~85℃），沿周界围栏中部敷设；

(2) 信号处理：信号采集器（采样率 1MHz，支持光纤/以太网传输），每 200 米配置 1 台；

(3) 后端控制：报警主机（支持 485 总线，可接入 128 路采集器），联动声光报警器（分贝 ≥110dB）及视频监控 DVR^{[3][4]}。

3.1.2 工作原理

震动光/电缆方案工作原理如图 1 所示，当入侵者翻越围栏时，振动信号使光缆内光强发生变化（或电缆电容改变），信号采集器将模拟信号转换为数字信号，通过“时域分析+频域滤波”算法（如小波变换）；当振动幅值超过预设阈值（如 1.2g）时，报警主机在 300ms 内触发报警，并联动对应区域摄像头切换至监控大屏，同时设置于前端和监控室的声光报警器发出声光告警。

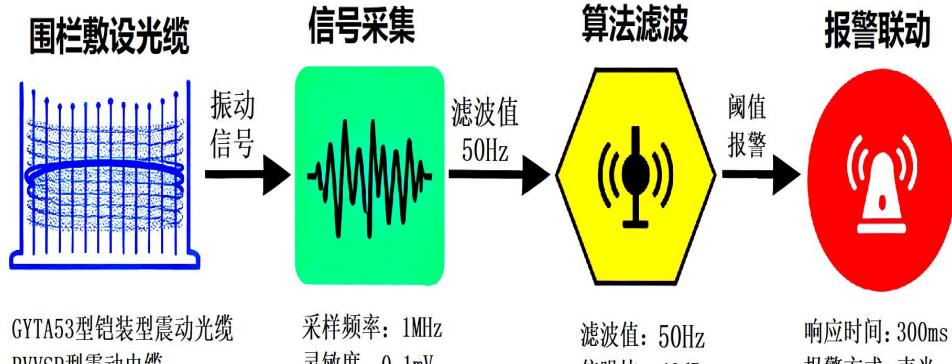


图 1 震动光/电缆方案工作原理示意图

3.2 雷达方案

3.2.1 系统组成

采用 FMCW（调频连续波）雷达技术，适合远距离、复杂环境探测，系统架构如下：

(1) 前端探测：24GHz 毫米波雷达探测器（探测距离 0~200m，方位角 120°，分辨率 0.5m），每 500 米安装 1 台，防护等级 IP67；

(2) 数据处理：雷达信号处理器（支持目标轨迹

跟踪，可区分静态/动态目标），集成 AI 滤波算法；

(3) 联动设备：与球型摄像头（40 倍光学变焦）联动，报警时自动对准入侵区域^{[3][4]}。

3.2.2 工作原理

雷达探测器持续发射线性调频波，当波遇到入侵者（或车辆）时发生反射，反射波与发射波的频率差经处理器计算后，得到目标的距离 ($\Delta f \propto$ 距离)、速度（多普勒频移）及方位（天线阵列相位差）；通过“目标特征库”（如人员步行速度 0.5~2m/s，车辆 $\geq 5m/s$ ）筛选

非法入侵目标，排除飞鸟、落叶等干扰，误报率可控制在 0.5% 以内。

3.3 红外方案

表 2: 红外探测技术方案

类型	前端设备	传输方式	适用场景
主动红外对射	4 光束红外发射器（距离 50-100m）、接收器	有线 485 总线	直线围栏、无遮挡区域
被动红外探测	双元红外传感器（探测角 90°，距离 10-20m）	无线 ZigBee	室内检修库、半封闭区域

3.3.2 工作原理

(1) 主动红外对射：发射器发射 4 束平行红外光（波长 940nm），接收器实时检测光强；当入侵者遮挡 ≥2 束光且持续时间 ≥100ms 时，触发报警（避免落叶短暂遮挡误报）；

(2) 被动红外探测：利用人体红外辐射 (3-15 μm) 与环境的差异，当人员进入探测区时，传感器接收的辐射量变化转化为电信号，经放大后触发报警，高温环境 (≥35°C) 下需开启温度补偿功能。

3.4 视频分析方案

3.4.1 系统组成

该方案是“视觉感知+智能算法”的结合，核心配置如下：

(1) 前端采集：400 万像素星光级摄像头（最低照度 0.001lux，支持宽动态），每 200 米安装 1 台，覆盖无死角；

3.3.1 系统组成（分两类）

红外方案有主动红外对射和被动红外探测两类，系统组成如表 2 所示。

表 2: 红外探测技术方案

(2) 分析处理：GPU 视频分析服务器（搭载 YOLOv8 目标检测算法，支持 16 路视频并行分析）；

(3) 平台应用：安防管理平台（集成报警弹窗、轨迹回放、报表统计功能）。

3.4.2 工作原理

摄像头实时采集周界视频 (25fps)，服务器对每帧图像进行“背景建模→目标检测→行为分析”：先通过高斯混合模型剔除静态背景，再识别人员、车辆等目标，最后判断是否存在“翻越围栏”“徘徊超 5 分钟”等异常行为；当检测到非法入侵时，服务器在 300ms 内发送报警信息至平台，并控制摄像头跟踪目标，同时留存 10 秒前至报警后的视频片段。

4 广州地铁车辆段周界安防方案五维对比分析

4.1 核心参数量化对比

本文从 5 个维度对 4 类方案进行量化对比，结果如下表 3 所示：

表 3: 典型车辆段 5 个维度方案量化对比

对比维度		震动光/电缆方案	雷达方案	红外方案（主动）	红外方案（被动）	视频分析方案
可靠性	误报率 (次/公里/月)	2.1	0.8	8.3	5.7	1.5
	漏报率 (%)	0.3	0	2.8	1.2	0.1
	响应时间 (ms)	450	300	200	150	350
经济性	建设成本 (万元/公里)	10.5	32.8	4.2	6.8	36.5
	年维护成本 (万元/公里)	1.1	0.6	0.3	0.5	0.9
	生命周期 (年)	6	10	5	7	8
功能性	探测范围 (m)	沿围栏 1-3	0-200 (半径)	50-100 (直线)	10-20 (扇形)	200 (镜头覆盖)
	环境适应性	中 (耐温 -40°C ~85°C, 怕鼠咬)	强 (-30°C~60°C, 雨雾雪适用)	弱 (雾天误报升高)	弱 (高温需补偿)	中 (夜间依赖补光)
	联动能力	支持视频、声光、门禁、广播联动	支持视频、声光、门禁、广播联动	仅声光联动	仅声光联动	支持视频、声光、门禁、广播联动
智能化	目标识别	仅振动，无识别	区分人员/车辆	无	仅识别人体	区分人员/动物/车辆
	自主学习	无	支持阈值优化	无	无	支持行为库更新
	数据输出	报警位置	位置+速度+方位	报警位置	报警位置	位置+轨迹+截图
适配性	山地型车辆段	中 (需防鼠)	优	差	中 (室内用)	中 (需清障植被)
	平原居民区	优	中 (成本高)	中 (需除遮挡)	优 (室内补充)	优
	预算敏感型	中	差	优	中	差

4.2 关键维度深度分析

4.2.1 可靠性：雷达方案最优，红外方案待优化

从数据上看，雷达方案的漏报率为 0，误报率仅 0.8 次/公里/月，主要得益于其抗环境干扰能力，在暴雨天气（降雨量 50mm/h）测试中，雷达仍能稳定探测 150m 内的人员入侵，而主动红外对射系统因雨水反光误报 12 次。视频分析方案虽误报率略高于雷达（1.5 次/公里/月），但通过“动态阈值调整”（如雨天降低灵敏度）可进一步优化，且能提供可视化证据，适合关键区域。

震动光/电缆方案的误报主要来自大风吹摇晃等，通过灵敏度调整可进一步优化；红外方案的漏报多发生在植被遮挡区域，需每季度修剪围栏周边树木。

4.2.2 经济性：红外方案成本最低，视频分析需平衡投入

主动红外对射方案的建设成本最低（4.2 万元/公里），但生命周期短（5 年），且误报导致的人工成本高（按每次处置 15 分钟、时薪 30 元计算，月均人工成本增加 2160 元/段）；雷达方案虽建设成本高（32.8 万元/公里），但生命周期长达 10 年，年均总成本（建设摊销+维护）仅 4 万元/公里，低于震动光/电缆方案（4.3 万元/公里）。

视频分析方案的成本主要来自 GPU 服务器（单台 8 万元）和算法授权，适合有智能化升级需求的车辆段。

4.2.3 智能化：视频分析方案领先，雷达方案有提升空间

视频分析方案通过 YOLOv8 算法可实现“入侵行为分类”（如翻越/钻越/徘徊），并自动生成每日报警报表，帮助安防人员分析高频入侵区域；在大石车辆段的测试中，其对“人员翻越围栏”的识别准确率达 98.7%，对“小动物（≤5kg）”的排除率达 95%^[5]。

雷达方案虽能区分人员与车辆，但无法识别具体行为（如“正常作业人员”与“非法入侵者”），需人工二次确认；震动光/电缆和红外方案无智能识别功能，仅能提供报警信号，适合对智能化要求低的区域。

4.2.4 环境适应性：山地选雷达，平原选震动光/电缆

广州地铁的山地型车辆段多位于郊区，雨雾天气多、地形复杂，雷达方案的“全天候探测”优势明显；平原型车辆段周边多为居民区，无复杂地形干扰，震动光/

电缆方案的成本优势可充分发挥，且误报率可控（2.1 次/公里/月）。

被动红外探测方案因探测距离短（10–20m），更适合室内检修库，可与户外方案形成互补。

5 广州地铁车辆段周界安防方案选择建议

5.1 单一方案选型：匹配车辆段类型

根据广州地铁车辆段的地形、环境及预算特点，单一方案的选型建议如下：

5.1.1 山地型车辆段/停车场

（1）推荐方案：雷达方案

（2）选型理由：抗雨雾干扰，漏报率 0，适合远距离探测（覆盖山地边坡周界）；

（3）配套措施：每 500 米安装 1 台雷达，联动球型摄像头，在雷达探测盲区（如低洼处）补充被动红外探测器。

5.1.2 平原居民区车辆段/停车场

（1）推荐方案：震动光/电缆方案

（2）选型理由：建设成本适中（10.5 万元/公里），误报率低（2.1 次/公里/月），避免扰民；

（3）配套措施：光缆采用防鼠套管，沿围栏顶部敷设，每 2 公里配置 1 台信号采集器，联动声光报警器（避免高分贝扰民，分贝控制在 80dB 以内）。

5.1.3 预算敏感型车辆段/停车场

（1）推荐方案：优化后的主动红外对射方案

（2）选型理由：建设成本最低（4.2 万元/公里），通过“多光束+动态阈值”降低误报；

（3）配套措施：采用 6 光束红外发射器（减少单光束遮挡误报），每季度修剪围栏周边植被，在转弯处增加探测器（消除探测盲区）。

5.2 组合方案设计：构建分层安防架构

对于安防需求高的车辆段，建议采用“外层-中层-内层”分层组合方案（方案如图 2 所示），充分发挥各方案优势：

（1）外层（预警层）：敷设雷达探测器（探测距离 150m），实现远距离预警，提前识别逼近周界的目标；

（2）中层（拦截层）：沿围栏敷设震动光缆，精准检测翻越行为，触发声光报警；

(3) 内层(确认层): 安装视频分析摄像头, 对报警区域进行可视化确认, 联动门禁系统关闭附近通道。



图 2 广州地铁车辆段分层周界安防架构图

该组合方案的误报率降至 0.3 次/公里/月, 响应时间缩短至 250ms, 且建设成本控制在 45 万元/公里, 实现“安全-成本”平衡。

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文通过对 4 类周界安防方案的技术原理、核心参数及广州地铁试点数据的分析, 得出以下结论:

(1) 单一方案各有优劣: 雷达方案可靠性最高, 适合山地型车辆段; 震动光/电缆方案性价比高, 适合平原型车辆段; 主动红外方案成本最低, 适合预算敏感型车辆段; 视频分析方案智能化最强, 适合关键区域。

(2) 组合方案可实现优势互补: “雷达+震动光/电缆+视频分析”的分层架构, 能将误报率降至 0.3 次/公里/月以下, 响应时间缩短至 250ms, 满足广州地铁高安全需求。

(3) 方案选择需结合场景: 需根据车辆段的地形、环境、预算及安防等级, 制定“一地一策”的选型方案, 避免盲目升级或成本浪费。

6.2 未来展望

随着技术的发展, 广州地铁车辆段周界安防系统可向三个方向升级:

(1) 5G+安防融合: 利用 5G 的低时延特性($\leq 10\text{ms}$), 实现报警信号与视频的实时传输, 进一步缩短响应时间;

(2) AI 大模型应用: 引入城市轨道交通安防大模型, 实现跨车辆段的入侵行为关联分析(如同一人员连续入侵多个车辆段);

(3) 绿色节能设计: 采用太阳能供电的雷达探测器和低功耗摄像头, 降低车辆段的能耗(预计可减少年用电量 1.2 万度/段)。

未来研究可进一步探索“周界安防+物联网”的融合应用, 如通过振动光缆同时监测围栏结构健康状态, 实现“安防+运维”一体化, 为地铁车辆段的智慧化运营提供更全面的技术支撑^[6]。

参考文献

- [1] 尤立江. 铁路周界入侵报警系统[J]. 中国铁路, 2015(7): 66-68.
- [2] 广州市公安局, 广州市交通运输局. 广州市轨道交通安全检查工作规定[R]. 广州: 广州市公安局, 广州市交通运输局, 2022.
- [3] 海康威视. 周界防范系统技术白皮书[R]. 杭州海康威视数字技术股份有限公司, 2023.
- [4] 华为技术有限公司. 智能感知融合周界防护解决方案白皮书[R]. 深圳: 华为技术有限公司, 2023.
- [5] 中国安全防范产品行业协会. 2024 年城市轨道交通安防管理系统发展分析报告[R]. 北京: 中国安全防范产品行业协会, 2024.
- [6] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通周界安防技术发展白皮书(2025)[R]. 北京: 中国城市轨道交通协会, 2025.

作者简介: 潘成灿(1981-), 男, 广东广州人, 本科学士, 工程硕士, 工程师, 主要研究方向为城市轨道交通通信工程建设及无线通信、视频监控、传输通信、调度通信、乘客信息服务等。

李志龙(1983-), 男, 湖南郴州人, 本科双学士, 高级工程师, 通信作者, 主要研究方向为无线网络、宽带技术、通信工程及电力信息化建设全过程管理等。

刘亚杰(1991-), 女, 河南周口人, 本科, 工程师, 通信作者, 主要研究方向为无线技术、宽带技术、信息化开发及工程建设全过程管理等。