doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.06.013

强约束下的津滨轻轨信号系统更新改造优化设计

张小磊[1,2]，吴晶晶[1]，刘　帅[1]，吴秋颜[2]，郭博迪[1]
（1. 天津津航计算技术研究所，天津 300141；2. 天津轨道交通运营集团有限公司，天津 300222）

摘　要：津滨轻轨 9 号线信号系统更新改造工程面临终点站站前折返站型、列检库线长度不足、设备用房面积紧张等强约束，与实现 2 min 折返间隔、自动化列检库功能升级及设备无扰安装等改造目标存在显著矛盾，需进行针对性优化设计。首先介绍信号系统改造研究现状，分析强约束条件对设计目标的制约。其次，重点从站前折返能力、自动化列检库设计和信号机房设备布置 3 方面展开设计研究，识别常规设计方法在强约束条件下难以满足改造目标的关键瓶颈。最后提出系统性优化方案，即在站前渡线区段增设计轴设备，道岔控制逻辑由双动改为单动；优化入库停车安全制动模型，调整 C 轨联锁逻辑；对集中站采用不间断电源(uninterruptible power supply，UPS)/蓄电池过渡进场方案，同时精简非集中站设备配置。研究结果表明：优化措施能够有效解决强约束与改造目标间的矛盾，站前折返间隔由 136 s 压缩至 120 s 内，满足 2 min 运营要求；列车自动入库停车所需的保护距离由 7.58 m 缩短至 3.8 m 内，实现列车自动出入列检库；同时降低设备安装的空间需求，在既有机房条件下完成设备无扰安装。

关键词：轨道交通；强约束；信号系统；更新改造；优化设计
中图分类号：U231.7　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)06-0098-09

Optimization Design for the Signaling System Refurbishment of Tianjin-Binhai Light Rail under Strong Constraints

ZHANG Xiaolei[1,2], WU Jingjing[1], LIU Shuai[1], WU Qiuyan[2], GUO Bodi[1]
(1. Tianjin Jinhang Computing Technological Research Institute, Tianjin 300141;
2. Tianjin Metro company Co., Ltd., Tianjin 300222)

Abstract: The signaling system renovation project of Jinbin Light Rail Line 9 is facing strong constraints such as the type of of the terminal station for pre-station turnback, insufficient length of the train inspection garage line, and tight equipment room area. There are significant contradictions with the renovation goals of achieving a 2-minute turnback interval, upgrading the function of the automated train inspection garage, and installing equipment without disturbance. Targeted optimization design is needed. Firstly, the current research status of signaling system transformation was introduced, and the constraints of strong constraint conditions on design objectives were analyzed. Secondly, the focus of the design research is on three aspects: pre-station turnback capability, automated train inspection garage design, and signaling room equipment layout. The key bottlenecks that conventional design methods cannot meet the renovation goals under strong constraints are identified. Finally, this paper proposes a systematic

收稿日期：2025-01-17　修回日期：2025-05-16
第一作者：张小磊，男，硕士，高级工程师，从事轨道交通运维管理及信号系统研究工作，470240243@qq.com
通信作者：吴晶晶，男，本科，高级工程师，从事轨道交通信号系统研究和设计工作，wujingjing@jhict.com.cn
基金项目：中国城市轨道交通协会核心技术攻关项目(2023ZBGG010)；天津市交通运输科技项目(2024-A32)
引用格式：张小磊，吴晶晶，刘帅，等. 强约束下的津滨轻轨信号系统更新改造优化设计[J]. 都市快轨交通，2025，38(6)：98-106.
ZHANG Xiaolei, WU Jingjing, LIU Shuai, et al. Optimization design for the signaling system refurbishment of Tianjin-Binhai light rail under strong constraints[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(6): 98-106.

optimization plan: adding axle counter equipment in the pre-station crossover section and changing the switch control logic from double-acting to single-acting, optimizing the safety braking model for train inspection garage stopping and adjusting the C-track interlocking logic, and adopting an uninterruptible power supply (UPS)/battery transition scheme for centralized stations while streamlining the equipment configuration at non-centralized stations. The application results show that the optimization measures effectively solve the contradiction between strong constraints and renovation goals. The turnback interval of the pre-station has been compressed from 136 seconds to within 120 seconds, meeting the requirement of 2-minute operation; The protection distance required for automatic stopping of trains has been shortened from 7.56 meters to within 3.8 meters, achieving automatic entry and exit of trains into the inspection garage; At the same time, the space requirements for equipment installation were reduced, and the equipment was installed without disturbance under the existing equipment room conditions.
Keywords: rail transit; significant constraints; signaling system; refurbishment; optimization design

我国城轨交通经过多年发展，多条线路陆续进入设备更新周期，信号系统作为指挥列车运行的核心控制系统，已然步入到期(限)更新改造以及功能提升改造的高峰期[1]，如何高质量地开展信号系统提质改造，成为当前的研究热点。

目前，很多学者对此进行了研究，吴杰[2]从提升车地通信质量、线路折返能力和线路自动化程度 3 方面提出了既有线基于通信的列车控制(communication based train control，CBTC)系统大修改造更新技术方案；储海平等[3]阐述了信号机、计轴设备、道岔转辙机及通信网络设备的倒接方案；孙磊[4]详细介绍了上海轨道交通 2 号线信号改造的具体实施方案，包括技术、信号倒接和大修后 CBTC 的开通方案；罗运真等[5]结合既有车载设备情况及国内主流型号车载设备冗余配置方式，确定深圳地铁 3 号线信号系统车载设备改造方案。

以上研究多聚焦具体的设备改造、过渡倒切设计和实施方案，较少分析既有线固有的外部强约束条件与信号改造设计间的冲突，并提出具体优化措施以适应约束并消除冲突。本文以津滨轻轨 9 号线信号系统改造为例，研究适应强约束下的城轨交通信号系统更新改造优化设计，在站前交替折返设计、列检库内近距离停车、机房设备配置等方面进行了创新，以期在约束中找到最优解决方案。

1　约束分析

强约束指必须严格满足的约束条件，通常为不可违反的硬性限制，工程设计中多通过创新设计、技术改进等方法实现有效优化，以期在满足约束的前提下达成项目目标。

津滨轻轨 9 号线开通运营超过 20 年，目前已将进口准移动闭塞系统信号设备全线替换为国产化 CBTC 信号系统。同时为进一步提高自动化水平，降低运营人员劳动强度，CBTC 信号系统正在进一步升级，新增列车自动出入车辆段、休眠唤醒等全自动运行(fully automatic operation，FAO)功能。9 号线建设之时，尚处于国内轨道交通行业发展的前期，在折返站型设计、停车库线长度、机房面积等方面，未对远期 CBTC/FAO 改造升级所需的线路、站场等资源做充分预留，常规改造难以满足日益增长的运营需求。这些强约束(终点站站前折返限制、列检库长度过短、机房面积紧张)与改造设计目标间形成了冲突，需在信号系统设计层面做出相应改进和技术创新。

1.1　站前折返约束

天津站为线路西段终端折返站，配置站前交叉渡线，东海路为线路东段终端折返站，采用站后双存车线折返配置，所有渡线道岔均按双动设计。站前折返时，前车出站过程中需完全出清渡线道岔区段后，后车才能征用道岔资源并建立进站进路，而站后折返时，前车折返作业不影响后车正常进站，故站前折返间隔远大于站后折返，天津站站前折返能力决定了整个线路的最小运营间隔[6]。图 1 为天津站典型的信号设备布置，JZ1、JZ4 为站台区段兼 1#和 4#道岔岔前计轴磁头，JZ2、JZ3 为 2#和 3#道岔岔前计轴磁头。

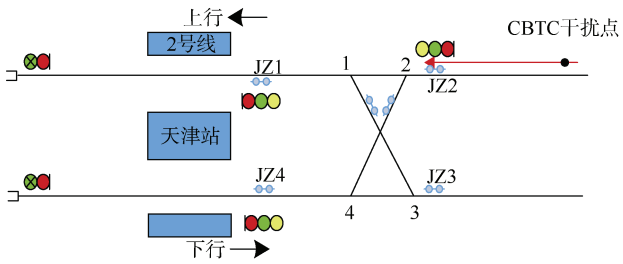


图 1　天津站典型的信号设备布置

Figure 1　Typical signal track layout of Tianjin Station

《地铁设计规范》[7]规定，系统设计远期最大能力应满足行车密度不小于 30 对/h 的要求，故改造后线路

的最小设计折返间隔应达到 2 min。

考虑采用充分利用两侧轨道的交替折返方式，压缩站前折返间隔，使用牵引计算软件进行交替折返间隔仿真，计算时序见图 2。

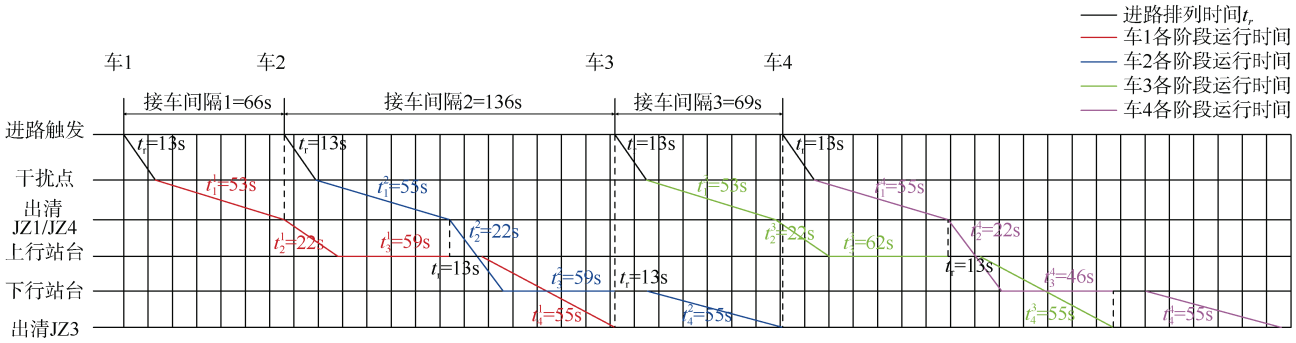


图 2　天津站交替折返间隔仿真计算

Figure 2　Alternative turnback timing diagram of Tianjin Station

图 2 中，t_r 为进路排列时间，取通用值 13 s，t_1^n 为第 n 列车从干扰点至出清岔前计轴磁头 JZ1/JZ4 的运行时间，干扰点为当后车进站信号开放时刚好处于不受前车影响的降速干扰点位置。t_2^n 为第 n 列车从出清 JZ1/JZ4 至运行至上/下行站台停稳的时间，t_3^n 为第 n 列车在上/下行站台停站时间(不含出站进路排列时间 t_r)，t_4^n 为第 n 列车从上/下行站台发车至出清岔区计轴点 JZ3 的时间，n 取值 1，2，3，4。

交替折返间隔计算场景如下：①列车 1 直进出清 1#道岔岔前计轴磁头 JZ1 完全占用站台区段后，恰好办理列车 2 侧进至天津站下行站台的进路；②列车 1 侧出出清 3#道岔岔前计轴磁头 JZ3 后，恰好办理列车 3 直进至天津站上行站台的进路；列车 3 直进天津站上行站台的进路与列车2直出下行站台的进路为平行进路，可同时作业；③列车 2 直出出清 JZ3 后，恰好办理列车 4 侧进至天津站下行站台的进路，依次循环。

交替折返间隔时间的计算式为

$$T_{交替}=\mathrm{Max}\left(t_{接车1}，t_{接车2}，t_{接车3}\right) \tag{1}$$

式中，$t_{接车1}$为车1办理直进进路至车2办理弯进进路的时间间隔；$t_{接车2}$为车2办理弯进进路至车3办理直进进路的时间间隔；$t_{接车3}$为车3办理直进进路至车4办理弯进进路的时间间隔。

根据图2，$t_{接车1}$=66 s，$t_{接车2}$=136 s，$t_{接车3}$=69 s，$T_{交替}$=$t_{接车2}$=136 s，在站前折返站型的强约束限制下，常规设计难以满足2 min折返间隔的要求。

1.2　列检库长度约束

津滨轻轨 9 号线车长 79.35 m，车辆段列检库全长 186 m，含双列位，有效轨道长度(车挡至库门)仅 181 m，改造前司机凭地面调车信号人工驾驶出入库。列检库布局如图 3 所示。

信号系统更新改造不涉及列检库扩建，需利用既有库线长度和轨道安装条件开展自动化场段库内信号设计，常规的信号设备布置如图 4 所示。

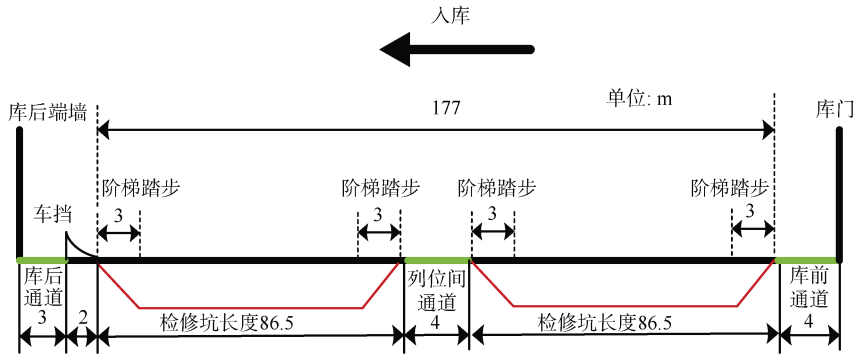


图 3　列检库布局

Figure 3　Train inspection garage Layout

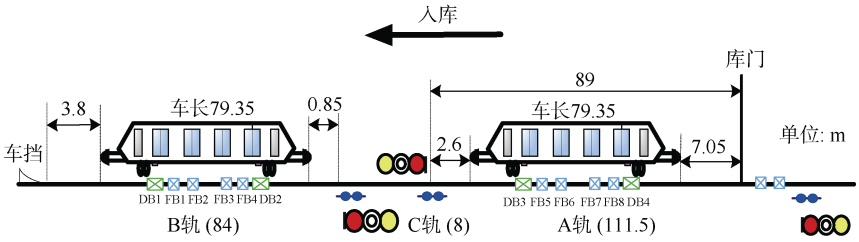


图 4　典型 FAO 列检库信号设备布置

Figure 4　Typical signaling track layout in FAO train inspection garage

基于列检库现状的常规信号设计要点如下：①A 轨、B 轨区段为停车股道，新系统停车点与既有停车点保持一致，确保检修人员可正常上下检查坑阶梯踏步；②库内划分为 A 轨、B 轨、C 轨 3 个计轴区段，A 轨区段终端计轴磁头设置在库门外方；③A 轨、B 轨之间设置 C 轨，用于 B 轨列车唤醒后的快速筛选以及作为 A 轨列车停车的保护区段。根据轨道长度并结合计轴磁头安装条件，C 轨区段长度设置为 8 m；④在应答器传输模块(balise transfer module，BTM)天线正下方设置休眠唤醒应答器(dormancy balise，DB)，用于列车唤醒后的重定位，精确停车应答器(fixed balise，FB)参考站台精确停车应答器布置方式布置。B 轨列车精准停车后，车钩距离尽头车挡 3.8 m。

在既有列检库长度约束下，该设计存在以下问题，难以实现 FAO 出入库和 B 轨精确停车功能：①C 轨长度仅 8 m，小于 B2 型列车两转向架间距 12.6 m，无法正常监控列车占用和出清。按联锁占用出清判断逻辑，在列车驶入驶出 C 轨过程中，C 轨状态会在占用、出清间来回切换，不能保证相邻连续计轴区段正常的占用出清顺序，导致进路故障。②B 轨列车停放时，车钩距离边界计轴磁头仅 0.85 m，B 轨列车唤醒建立定位升级为 CBTC/FAO 模式后，列车安全包络(初始定位误差)为 2 m，列车安全包络同时占用 B 轨和出 B 轨进路内方区段 C 轨，导致出 B 库进路信号无法开放。③列车在 B 轨停车点停车后车钩距离尽头车挡(保护区段)仅 3.8 m，而理论计算的保护区段至少为 7.58 m，保护距离过短，列车自动驾驶(automatic train operation，ATO)系统无法控制列车在 B 轨精准停车。

常规设计以 ATO 模式入库停车曲线为参考曲线，从该参考曲线上任意一点以最大的加速度按照安全制动模型计算撞线后列车的走行距离，得到的列车真正停车点和运营停车点的距离差值最大值即为保护区段[8-9]。

通用的安全制动模型和保护距离计算原理如图 5 所示。

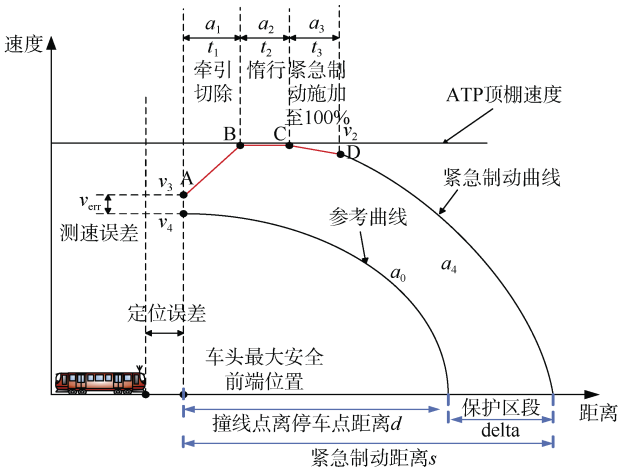


图 5　保护区段计算原理

Figure 5　Schematic diagram for calculating the overlap

保护区段 delta 的计算式为

$$\begin{cases} V_4^2 = 2a_0 d \\ V_3 = V_4 + V_{\text{err}} \\ V_{\text{B}} = V_3 + a_1 t_1 \\ V_{\text{C}} = V_{\text{B}} + a_2 t_2 \\ V_{\text{D}} = V_{\text{C}} - a_3 t_3 \\ s = \dfrac{\left((V_3 + V_{\text{B}}) t_1 + (V_{\text{B}} + V_{\text{C}}) t_2 + (V_{\text{C}} + V_{\text{D}}) t_3 + \dfrac{V_{\text{D}}^2}{a_4} \right)}{2} \\ \text{delta} = s - d \end{cases} \tag{2}$$

式中，V_4 为紧急制动触发速度；V_{err} 为测速误差；V_3 为考虑测速误差后的紧急制动触发速度；t_1 为列车自动防护(automatic train protection，ATP)系统监测到列车超速开始至输出紧急制动指令、车辆接收到紧急制动指令到完全切除牵引的时间，列车在该时间段内具有最大牵引加速度 a_1；t_2 为车辆切除牵引后到车辆开始施加紧急制动的惰行时间，列车在该时间段具有加速

度 a_2；t_3 为车辆从紧急制动开始施加到制动力施加到100%大小所需时间，列车在该时间段具有减速度 a_3；a_4 为可保证的列车紧急制动率(guaranteed emergency braking rate，GEBR)；s 为以某一固定速度触发紧急制动，根据安全制动模型计算后的最不利情况下的紧急制动距离；d 为该速度下正常的停车制动距离；a_0 为ATO 制动减速度。

津滨轻轨 9 号线车辆接收到紧急制动命令后，切除牵引和紧急制动施加同时进行，且切除牵引延时时间大于紧急制动延时施加时间，故不存在惰行时间，因此 t_2=0。

以 ATO 制动前库内最高运行速度 5 km/h 时触发紧急制动计算保护区段长度，参数取值为 V_4=5 km/h，V_{err}=0.6 km/h，a_1=0.92 m/s^2，t_1=1.14 s，a_3=0.4 m/s^2，t_3=1.46 s，a_4=0.8 m/s^2(平直干燥轨道损失 2 个转向架制动力)，a_0=0.56 m/s^2，代入式(2)计算可得 delta=6.58 m。另考虑定位设备安装误差 1 m 作为安全余量，停车保护距离至少需要 7.58 m。

综上，在列检库线长度仅 186 m 的强约束下，常规改造设计方案不能实现 FAO 出入库和 ATO 精准停车。需通过设计和技术创新，消除设计方案与约束条件之间的冲突。

1.3 设备机房安装空间不足约束

1.3.1 设备集中站

设备集中站新旧设备改造倒切过渡期间共用信号设备房，且设备用房面积偏小。根据文献[10]要求：集中站电源设备采用 UPS、双母线设计。以 30 kW 电源容量的设备集中站为例，电源系统所需机柜数量如表 1 所示。

表 1 双 UPS/双母线电源设备配置

Table 1 Dual UPS/dual busbar power supply equipment configuration

机柜类型	机柜数量	机柜尺寸(宽×深)/mm
电源屏	5	800×600
UPS	2	600×800
稳压柜	2	600×800
电池架	3	2000×600

电源设备机柜数量多，占地面积大，既有机房在倒切开通后拆除既有设备前，无足够的新设备安装空间。

1.3.2 非设备集中站

新建线非设备集中站一般配套有 40 m^2 左右的信号设备用房，用于安装车站列车自动监控系统(automatic train supervision，ATS)、电源屏、UPS、蓄电池、交换机、分线柜等相关设备。津滨轻轨 9 号线建成年限较久，非集中站无单独信号设备用房，因此需利用既有车控室房间合理设计非集中站设备配置，以适配非集中站无设备用房的强约束。

2 优化设计方案

2.1 交替折返设计优化

根据1.1可知，折返间隔的瓶颈在于$t_{接车2}$，若能缩短车2办理弯进进路至车3办理直进进路的时间间隔，即可提升折返能力，提高整条线路的运能。

$t_{接车2}$的计算式为

$$t_{接车2}=t_{r1}+t_1^2+t_{r2}+t_3^1 \tag{3}$$

式中，t_{r1} 为车 2 进站进路排列时间；t_{r2} 为车 1 出站进路排列时间。

2.1.1 缩短侧入时间 t_1

只要车 2 侧入进站过程中出清交叉渡线道岔区段后，系统即可为车 1 排列直出进路，而天津站站前道岔岔尖距离站台边缘约 110 m，故可在 1#、4#道岔前各增设一个岔前计轴点，提前释放道岔资源，缩短 t_1 时间。调整后的轨旁设备布置如图 6 所示。

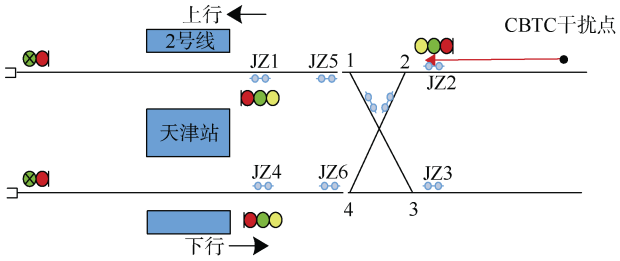


图 6 优化后天津站 CBTC 设备布置

Figure 6 Optimized signaling track layout of Tianjin Station

调整后 t_1 耗时为从干扰点至出清 JZ6 的时间(常规方案需出清 JZ4)，节约了 JZ6 至 JZ4 间的走行时间，经仿真计算 t_1 时间可减少 14 s。

2.1.2 缩短侧入时间减少进路排列时间 t_{r1}、t_{r2}

常规设计渡线道岔为双动控制逻辑，以排列弯进站台进路为例，联锁下达双动道岔 2/4#反操命令后，2/4#道岔转辙机动作电路控制转辙机先将第一动道岔 2#扳动到反位，再将第二动道岔 4#扳动至反位。为缩短道岔转换时间，新系统将渡线道岔设计为单动控制，每组道岔设置单独的道岔控制电路，进路排列时联锁并行下达道岔 2#和道岔 4#的转换命令，两组道岔的转辙机动作电路分别控制对应的转辙机启动，道岔 2#和

道岔 4#同时转换，以节省道岔转换时间，从而缩短了进路排列至开放的耗时。经测算，道岔控制由双动改为单动控制后，进出站进路排列时间由 13 s 缩短为 9 s。

2.1.3 计算数据

优化后的交替折返间隔仿真计算时序如图7所示。

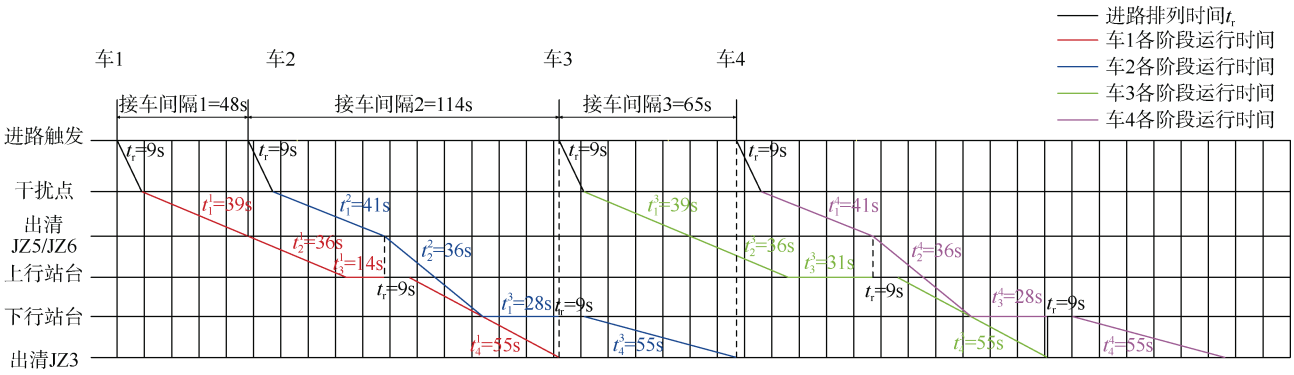


图 7　优化后天津站交替折返间隔仿真计算

Figure 7　Optimized alternative turnback timing diagram of Tianjin Station

接车间隔 2 共缩短 22 s，最小折返间隔达到 114 s，经现场动车测试验证，通过了 6 列车 2 min 交替折返能力测试，满足 120 s 的最小折返间隔要求。

2.2 自动化列检库优化方案

2.2.1 缩短停车保护距离

1) 优化安全制动模型。在 B 轨停车制动前一定距离由 ATP 提前切除牵引，ATO 控制列车惰行和制动停车。故惰行和停车制动阶段的紧急制动过程实际上是无切除牵引延时阶段的加速运行过程，即式(2)中 t_1=0，仅包含紧急制动施加延时阶段的惰行和紧急制动施加后的制动过程。据此可对入库运行时的安全制动模型进行优化，以减少理论计算所需的紧急制动距离。优化后的入库停车阶段安全制动模型和保护区段计算原理见图 8。

保护区段 delta 的计算式为：

$$\begin{cases} V_4^2 = 2a_0 d \\ V_3 = V_4 + V_{\mathrm{err}} \\ V_{\mathrm{B}} = V_3 \\ V_{\mathrm{c}} = V_{\mathrm{B}} + a_2 t_2 \\ V_{\mathrm{D}} = V_{\mathrm{C}} - a_3 t_3 \\ s = \dfrac{\left(\left(V_{\mathrm{B}} + V_{\mathrm{C}}\right) t_2 + \left(V_{\mathrm{C}} + V_{\mathrm{D}}\right) t_3 + \dfrac{V_{\mathrm{D}}^2}{a_4} \right)}{2} \\ \mathrm{delta} = s - d \end{cases} \tag{4}$$

式中，t_2 为 ATP 监测到列车超速至车辆开始施加紧急制动的惰行时间；列车在该时间段具有加速度 a_2。

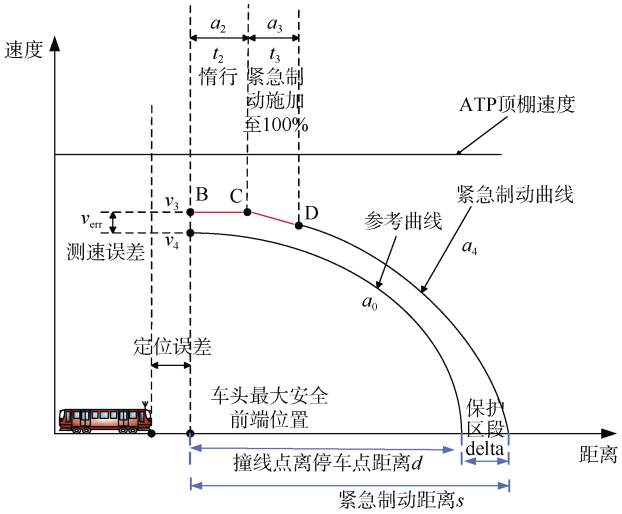


图 8　优化后保护区段计算原理

Figure 8　Optimized schematic diagram for calculating the overlap

2) 理论计算。根据津滨轻轨 9 号线车辆供货商提供的数据，车辆在平直干燥轨道损失 2 个转向架制动力时的紧急制动减速度为 0.8 m/s^2，在无任何制动故障、黏着系数为 0.096 时的湿轨紧急制动减速度为 0.6 m/s^2，分别代入式(4)，得到的计算结果如表 2 所示。其他参数取值为 V_{err}=0.6 km/h，t_2=1 s(ATP 紧急制动指令输出最大延时+车辆接收到紧急命令至开始施加紧急制动最大延时)，t_3=1.6 s，a_2=0，a_0=0.56 m/s^2。

9 号线列检库为封闭式厂房结构，轮轨黏着系数受雨、雪、冰、霜等的影响较小。根据表 2 计算结果，

表 2 保护距离计算对比

Table 2 Overlap calculation comparison

$V3$/(km/h)	a_4/(m/s^2)	a_3/(m/s^2)	保护距离/m
5	0.8	0.4	2.4
5	0.6	0.3	2.9
3	0.8	0.4	1.6
3	0.6	0.3	1.9

入 B 库运行阶段 ATO 控制列车运行速度由 5 km/h 降低至 3 km/h，GEBR=0.8 m/s^2 时，计算的保护距离为 1.6 m，GEBR=0.6 m/s^2 时，保护距离为 1.9 m。实际现场预留的保护距离为 3.8 m，理论上无冲撞车挡风险，满足近距离停车要求。

2.2.2 优化 C 轨联锁处理逻辑

对 C 轨联锁逻辑处理进行优化，保证 C 轨计轴区段正常占用出清以及进路功能正常。优化逻辑如下；

1) 出 B 轨进路接近锁闭时，检测到 C 轨计轴占用后，只有 B 轨和 C 轨均出清，C 轨才能判定出清，保证相邻区段的占用出清正常顺序；

2) 入 B 轨进路接近锁闭时，检测到 C 轨计轴占用后，只有 A 轨和 C 轨均出清，C 轨才能判定出清。

2.2.3 系统设计

根据以上策略，结合列检库实际长度、库内道口等情况，轨旁信号设备布置如图 9 所示。

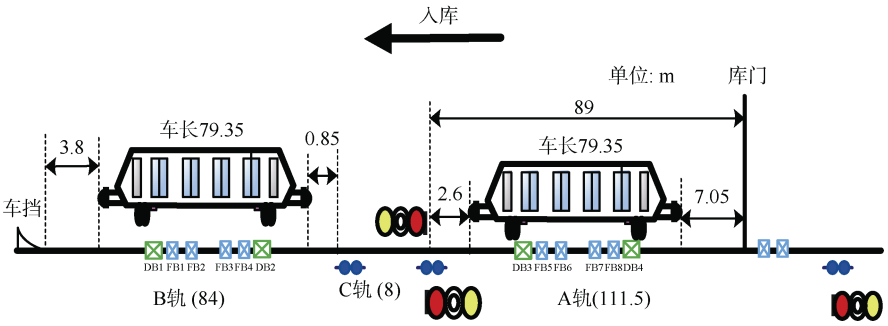


图 9 优化后列检库内设备布置

Figure 9 Optimized signaling track layout of train inspection garage

设计优化项点如下：

1) 为避免 B 轨列车安全包络占用 C 轨，导致出 B 轨信号无法开放，将出 B 轨信号机和入 B 轨信号机设置方式由差置改为并置，C 轨作为出 B 库信号机的外方接近区段，包络占用 C 轨不影响出 B 库进路的锁闭与开放；

2) 受限于 B 轨长度，FAO 列车停放 B 轨时，列车包络占用 C 轨，通过修改联锁配置，库内 C 轨包络占用但计轴区段为出清状态时，进 B 库进路保护区段(C 轨)可正常锁闭，进 B 库进路信号可正常开放。

通过以上优化设计，可在适配 186 m 库线长度的强约束下，安全高效实现 ATO 库内近距离停放和 FAO 休眠唤醒、自动出入库功能，有效降低改造成本和难度。

2.3 电源方案优化

2.3.1 设备集中站

弱约束为有一定弹性的约束条件，可通过调整资源、时间、范围等方式适度放宽，允许阶段性松弛，但长期仍需尽量满足，以确保项目整体目标。正线集中站双 UPS、双母线供电设计方案为弱约束，而既有机房安装空间紧张是倒切开通拆旧前的阶段性强约束，故在此阶段可暂时松弛弱约束，待强约束解除后恢复。优化方案为在开通前仅安装电源屏，开通后待拆除既有设备空余足够安装空间后，逐步进场 UPS、蓄电池。过渡开通期间电源屏采用双母线分散稳压方案，确保外电两路切换过程中后端负载设备不会断电。

在倒切开通至安装新系统 UPS 和蓄电池前，为确保在电源屏两路外电出现同时断电的短时故障时，列车停车后仍能保持既有运行模式不丢定位，且供电正常后系统能瞬时恢复运营，对集中站的联锁、区域控制器(zone controller，ZC)、ATS、数据通信系统(data communication system，DCS)和计轴设备的其中一路供电电源临时加装一台小型后备式 UPS，当外电网双路断电时，由后备式 UPS 供电关键系统设备，使得正线关键信号设备能正常工作，大幅降低故障影响。

后备式 UPS 容量选取 1 kVA，尺寸为 130 mm×336 mm×215 mm(长×宽×高)，体积较小，可安装于负载机柜附近，占用机房空间少。UPS 安装连接示意如图 10 所示。

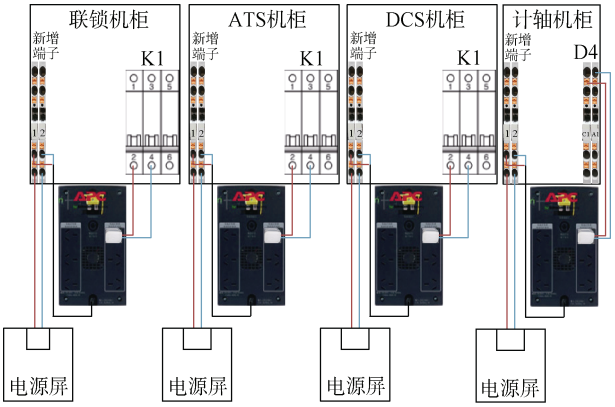


图 10　后备式 UPS 连接示意

Figure 10　Schematic diagram of backup UPS connection

经测试，后备式 UPS 供电时，联锁机柜工作时间为 40 min，ZC 机柜工作时间为 33 min，ATS 机柜工作时间为 21 min，DCS 机柜工作时间为 30 min，计轴机柜工作时间为 10 min，满足短时供电需求。

2.3.2　非设备集中站

取消非集中站的电源屏、UPS、蓄电池、稳压器设备，由所属集中站电源屏远程供电。非集中站仅在车控室安装 ATS 监视工作站及综合设备机柜，综合柜内集成了网络通信和分线设备。系统配置如图 11 所示。

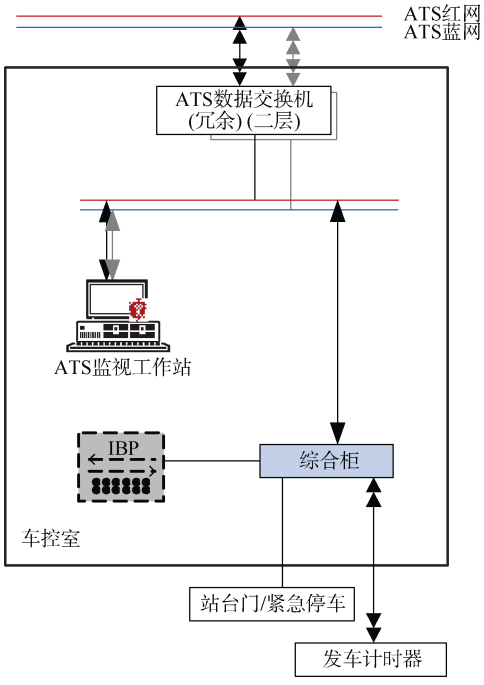


图 11　非集中站系统配置

Figure 11　System configuration diagram for non-equipment centralized station

为减少远距离供电压降，保证设备正常工作，采用 6 mm^2 规格电缆，相较常规的 2.5 mm^2 电缆，电阻由 6.8 Ω/km 降低到 3.08 Ω/km，并将远端集中站电源屏端综合柜供电模块配置为 220 V 可调电源。

压降ΔU 的计算式为

$$\Delta U=I\times R \tag{5}$$

线路电流 I 的计算式为

$$I=P/1.732\times U\times\cos\theta \tag{6}$$

线路电阻 R 的计算式为

$$R=\rho\times L/S \tag{7}$$

式中，P 为机柜功率；U 为电压；$\cos\theta$ 是功率因素；ρ 为导体电阻率；L 为线路长度；S 为线缆标称截面。本项目最长站间距 3.36 km，综合柜功率 800 W，标准电压 220 V，功率因素取通用值 0.8，代入式(5)计算压降ΔU 约为 54 V，故电源屏非集中站模块设计时应满足最大 274 V 的可调范围。此设计方案满足非集中站无设备用房的强约束限制。

3　结论

本文研究了强约束下的既有线改造信号系统优化设计，采取的优化方案和措施符合用户对信号系统改造的预期，已应用于津滨轻轨 9 号线改造项目，得出的主要结论如下：

1) 增设站台与交叉渡线间计轴点位、采用道岔单动控制逻辑，可有效缩短站前交替折返间隔；

2) 库内 B 轨 ATO 运行速度由 5 km/h 调整为 3 km/h，提前切除牵引优化安全制动模型的策略能显著减少停车保护距离；

3) 优化库内 C 轨占用出清逻辑避免了小于两转向架距离轨道区段的异常占用出清，A/B 库间信号机设置由差置改为并置，解决了 B 轨停放列车包络占用 C 轨引起的出 B 库进路无法开放问题；

4) 集中站 UPS、蓄电池待倒切开通拆除既有设备后进场，非集中站车控室设置综合柜并采取远程供电设计，解决了集中站/非集中站机房安装空间不足的问题。

目前城市轨道交通已由新建线路逐渐转向既有运营设备更新改造，本文剖析的约束限制条件和改造设计目标间的冲突在既有线路改造中具有一定的普遍性，提出的优化设计措施可以为其他类似线路信号系统更新改造提供方法借鉴。

为给用户带来更高效、更智能、更节约的城轨信号改造体验，后续可进一步研究道岔资源精细化控制、全电子联锁、列控一体化、云信号等新技术在改造项目中的应用设计。

参考文献

[1] 中国城市轨道交通协会. 中国城市轨道交通既有线改造指导意见(一): 任务与形势、定义与分类、原则与目标[J]. 城市轨道交通, 2024(6): 31-34.

[2] 吴杰. 上海轨道交通既有线 CBTC 信号系统大修更新改造技术方案[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(11): 207-211.
WU Jie. Technical plan for overhaul and renovation of CBTC signal system in Shanghai rail transit[J]. Urban mass transit, 2023, 26(11): 207-211.

[3] 储海平, 孙克寒. 上海轨道交通 13 号线北翟路停车场信号系统改造倒接方案[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(11): 103-106.
CHU Haiping, SUN Kehan. Signaling system retrofit and reverse-connection scheme for Shanghai rail transit line 13 beidi road depot[J]. Urban mass transit, 2024, 27(11): 103-106.

[4] 孙磊. 上海轨道交通 2 号线信号系统改造实施方案[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(11): 138-141.
SUN Lei. Signaling system transformation scheme of Shanghai rail transit line 2[J]. Urban mass transit, 2021, 24(11): 138-141.

[5] 罗运真, 朱志伟. 城轨信号系统更新工程中车载设备改造技术方案研究[J]. 铁道通信信号, 2025, 61(1): 85-91.
LUO Yunzhen, ZHU Zhiwei. Research on technical scheme of on-board equipment transformation of signal system renovation project in urban rail transit[J]. Railway signalling & communication, 2025, 61(1): 85-91.

[6] 吴晶晶, 郭博迪, 孙金龙, 等. 天津轨道交通 9 号线信号系统更新改造运营能力提升技术研究[J]. 铁道通信信号, 2025, 61(5): 75-82.
WU Jingjing, GUO Bodi, SUN Jinlong, et al. Research on operational capacity improvement technology after renovation of signal system in Tianjin rail transit line 9[J]. Railway signalling & communication, 2025, 61(5): 75-82.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

[8] 董洪卫. 全自动车辆段停车列检库线信号设备布置方案分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16(10): 13-16.
DONG Hongwei. Scheme analysis of signal equipment layout of parking track in fully automatic depot[J]. Railway signalling & communication engineering, 2019, 16(10): 13-16.

[9] 王继男. CBTC 系统保护区段设置的控制策略探讨[J]. 铁路通信信号工程技术, 2014, 11(4): 56-58.
WANG Jinan. Discussion on control strategy of setting overlap protection block section for CBTC system[J]. Railway signalling & communication engineering, 2014, 11(4): 56-58.

[10] 交通运输部. 城市轨道交通信号系统运营技术规范(试行)[S]. 北京: 交通运输部, 2022.

(编辑: 王艳菊)

封面车站设计理念

东陵公园站为沈阳地铁 1 号线车站, 于 2025 年 6 月 30 日开通, 与世界文化遗产清福陵(东陵公园)毗邻。

车站装饰设计以中式古建为魂, 将传统建筑的韵律融入站厅与站台的空间。抽象化的古建筑元素既让乘客轻松识别空间动线, 又契合现代简约的审美潮流。红色梁柱上的青绿彩画, 脱胎自清福陵隆恩殿梁枋彩绘的花卉图案。一笔一画间, 将地面凝固的岁月引入地下流动的时空, 让百年皇家园林的雅致意蕴流淌于现代交通空间, 也借传统吉祥纹样寄寓着对现代美好生活的祈愿。

沈阳地铁集团有限公司 供稿