

# 考虑调车作业约束的城市轨道交通 回库列车股道运用多目标优化模型<sup>\*</sup>

张增超<sup>1</sup> 徐 鹏<sup>2</sup> 辛丽平<sup>2</sup> 范 锐<sup>2</sup> 李 辰<sup>1</sup> 吴泽霖<sup>1</sup>

(1. 济南中车四方所智能装备科技有限公司, 250105, 济南; 2. 青岛理工大学信息与控制工程学院, 266520, 青岛)

**摘 要** [目的]为改善调车作业对城市轨道交通车辆段回库列车股道运用的影响,提高城市轨道交通列车检修效率,需在考虑调车作业约束的情况下对城市轨道交通回库列车股道运用进行优化。[方法]将转场列车视为回库列车,按调车入库时间分别编入早、晚回库计划中,以最少调车次数和最小检修走行距离为目标函数,考虑调车作业约束,基于改进灰狼算法开发了一种先对单个独立回库计划(早回库、晚回库)进行规划,再对所有回库计划通盘规划的列车股道运用多目标优化模型。以天津某地铁线路车辆段的回库列车股道运用方案为算例,验证所建立优化模型的有效性和可行性。[结果及结论]通过所提模型求解得到的列车股道运用方案的走行距离比人工方案减小 65.7% (其中早回库阶段减小 25%,晚回库阶段减小 77.7%),且列车调车次数为 0。该模型能在满足城市轨道交通回库列车洗车、检修、次日发车等调车作业约束的基础上实现回库列车股道运用的最优优化编排。

**关键词** 城市轨道交通; 回库列车; 股道运用多目标优化模型; 调车作业约束

**中图分类号** U279

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2025.01.038

## Multi-objective Optimization Model of Track Utilization for Depot-returning Urban Rail Transit Trains with Shunting Operation Constraints

ZHANG Zengchao<sup>1</sup>, XU Peng<sup>2</sup>, XIN Liping<sup>2</sup>, FAN Rui<sup>2</sup>, LI Chen<sup>1</sup>, WU Zelin<sup>1</sup>

(1. Jinan CRRC Sri Intelligent Equipment Technology Co., Ltd., 250105, Jinan, China; 2. School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, 266520, Qingdao, China)

**Abstract** [Objective] To improve the impact of shunting operations on the track utilization for the depot-returning urban rail transit trains and enhance the train maintenance efficiency,

it is necessary to optimize the track utilization of the depot-returning train with shunting operation constraints. [Method] Regarded as a depot-returning train, the transition train is incorporated into the early and late depot-returning plans respectively according to the shunting time. With the minimum number of shunting operations and the shortest running distance for maintenance as the objective function, and taking the constraints of shunting operations into account, a multi-objective optimization model for train track utilization is developed based on an improved grey wolf algorithm, featuring first for individual independent depot-returning plan (early and late depot-returning) and then for all depot-returning plans as a whole. In a case study of the track utilization plan for the depot-returning train on a metro line in Tianjin, the effectiveness and feasibility of the established optimization model are verified. [Result & Conclusion] The train running distance of the track utilization plan obtained from the proposed model is reduced by 65.7% compared with the manual plan (with a 25% reduction in the early depot-returning stage and a 77.7% reduction in the late depot-returning stage), and the number of train shunting operations is zero. The model can achieve the optimal arrangement of track utilization for the depot-returning train on the basis of satisfying the constraints of shunting operations such as train washing, maintenance, and departure on the next day.

**Key words** urban rail transit; depot-returning train; multi-objective optimization model for train track utilization; shunting operation constraint

如何优化地铁列车股道运用方案是城市轨道交通调度管理智能化首要考虑的关键问题。文献[1]为了提高地铁列车在架大修阶段的股道利用率与作业效率,基于灵活检修工艺建立列车调车作业优化模型,但该模型在优化列车股道运用方案时只考虑了检修作业并未考虑列车洗车、次日发车等其

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(201606141);山东省自然科学基金项目(ZR2021MF076, ZR2016FB04);山东省重点研发计划项目(2018GHY115025)

他调车作业约束。文献[2]在考虑次日发车约束、股道占用约束及A、B股道使用需求约束的基础上,建立地铁列车股道运用自动决策方案,但该研究只针对单一回库计划,未考虑已在库列车对股道运用的影响,从而会导致后续回库列车无法停靠在合适股道,难以实现最优运营。文献[3]考虑了未参与运营的在库列车对回库列车股道运用的影响,但对在库列车的股道运用方案并未合理规划。文献[4]考虑了股道占用、次日车次、检修作业要求等约束条件,但其仅编制当日运营列车的回库股道运用方案,未考虑转场回库列车的股道运用方案编制问题。

本文综合考虑回库列车洗车、检修、次日发车、转场列车等调车作业约束和股道占用约束,以最少调车次数和检修走行距离为目标函数,基于改进灰狼算法建立地铁回库列车股道运用多目标优化模型。根据列车回库时间,将上午回库列车称为早回库列车,将晚上回库列车称为晚回库列车;将从其

他地方调回车库的列车称为转场回库列车。将转场回库列车按调车入库时间编入早、晚回库列车队列中。该模型首先分别对早回库列车、晚回库列车单独进行股道运用方案编制,然后通盘考虑早回库列车在库股道占用对晚回库列车股道运用的影响,最后通过将回库列车股道运用方案编制问题转化为柔性作业车间调度问题对该模型进行求解。为了提升灰狼算法寻找全局最优解的能力,本文提出一种新的收敛因子对灰狼算法进行改进。

## 1 列车股道运用多目标优化模型的建立

### 1.1 改进灰狼算法

灰狼优化算法是通过模拟灰狼领袖和成员之间的群体行为(三精英引导机制),来寻找最优解<sup>[5]</sup>。为了加强灰狼算法的搜索能力,本文采用文献[6]的改进距离公式,对灰狼算法的收敛因子 $\alpha$ 进行了改进,提出了新的计算公式。

$$\alpha = \begin{cases} 1 + \cos((T-1)\pi/(T_{\max}-1))^{n/(2\exp(-T/T_{\max}))}, & T \leq T_{\max}/2 \\ 1 - \cos((T-1)\pi/(T_{\max}-1))^{n/(2\exp(-T/T_{\max}))}, & T_{\max}/2 < T \leq T_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中:

$T$ ——当前迭代次数;

$T_{\max}$ ——最大迭代次数;

$n$ ——从1到0的递减指数。

### 1.2 模型的建立

天津某地铁线车辆段的股道线路布局如图1所示。图1中:4股道为洗车库;5股道为旋轮库;6股道—24股道为运用联合库,每条股道均有A、B两段股道,用于列检及其他日常作业,6股道—24股道均带电,有地沟,无高平台和平台翻板。25股道—

31股道为联合检修库,用于均衡修及月修作业,每条股道只有1段,其中:25股道—29股道带电,30股道—31股道不带电;25股道—31股道均有地沟与高平台,25股道—30股道有平台翻板,31股道无平台翻板。

#### 1.2.1 洗车阶段

在 $t$ 时刻将洗车股道 $G_x$ 分配至列车 $l(l=1, 2, \dots, N)$ 进行洗车作业,若此时 $G_x$ 已被占用,则 $l$ 将跳过洗车任务,进行下一项检修任务。为完成 $l$ 的洗车任务必将增加一次调车,则 $l$ 在洗车阶段的调车次数 $X_{l,G_x}$ 为:

$$X_{l,G_x} = \begin{cases} 1, & P = P_x, J_{E_l, G_x} = 1, J_{G_x, t} = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$P$ ——列车任务集合;

$P_x$ ——洗车任务;

$J_{E_l, G_x}$ ——0-1决策变量,洗车股道 $G_x$ 分配至列车 $l$ 时取1,否则取0( $E_l$ 为回库列车 $l$ 的编号);

$J_{G_x, t}$ ——0-1决策变量, $t$ 时刻洗车股道 $G_x$ 被占用时取1,否则取0。

#### 1.2.2 列车股道运用阶段

若回库列车有列检或均衡修任务,检修股道即为列车最终的停靠股道;若列车回库后无列检或均衡修任务,则列车最终停靠在股道编排阶段列车所

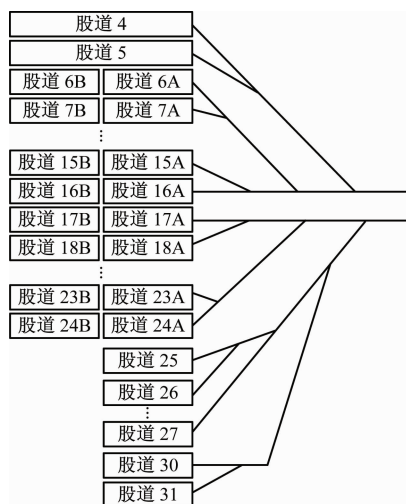


图1 天津某地铁线车辆段的股道线路布局

Fig.1 Track layout of a metro line depot in Tianjin

计算的停靠股道上。查看当日转场调车计划,将上午的转场回库列车编入早回库表中,将下午的转场回库列车编入晚回库表中。尽量安排非均衡修任务的列车进入 6 股道—24 股道中的 A 股道进行检修和停靠。列车股道运用示意如图 2 所示。早高峰要求将列车收至 6 股道—16 股道中的 A 股道,段备车(通勤车)收至 7 股道—11 股道中的 A 股道。先收 B 股道,再收 A 股道,收车时间错开,切勿同一股道 A、B 股道连续收车。次日发车的前两列列车必须收到 6 股道—16 股道中的 A 股道和 17 股道—24 股道中的 A 股道。先发 A 股道列车,再发 B 股道列车,发车时间错开,切勿 A、B 股道连续发车。

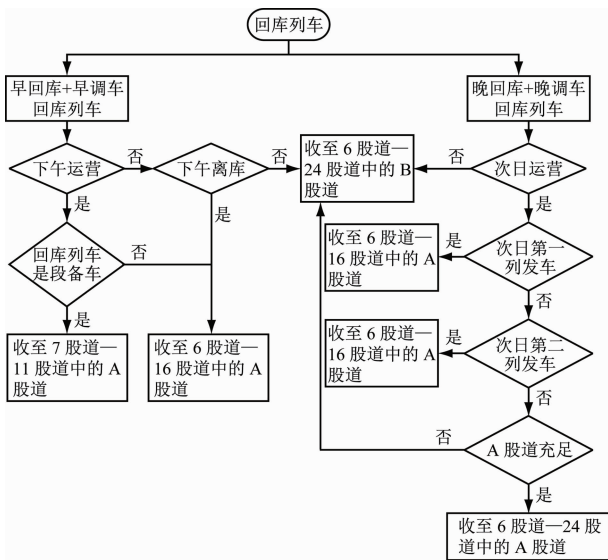


图 2 列车股道运用示意图

Fig. 2 Schematic diagram of track utilization

列车  $l$  在进入 B 股道时,相邻 A 股道已被占用,则增加一次调车次数。因 A 股道被占用导致的调车次数  $Z_{l,G_{i,j}}$  定义为:

$$Z_{l,G_{i,j}} = \begin{cases} 1, J_{E_l,G_{i,2}} = 1, J_{G_{i,1},t} = 1 \\ 0, J_{E_l,G_{i,2}} = 1, J_{G_{i,1},t} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:

$i$ ——回库股道编号,  $i=6,7,\dots,24$ ;

$J_{E_l,G_{i,j}}$ ——0-1 决策变量,股道  $G_{i,j}$  分配至列车  $l$  时取 1,否则取 0;

$J_{G_{i,j},t}$ ——0-1 决策变量,  $t$  时刻股道  $G_{i,j}$  被占用时取 1,否则取 0;

$G_{i,1}$ —— $i$  股道中的 A 股道;

$G_{i,2}$ —— $i$  股道中的 B 股道。

同一股道中的 A、B 股道不能连续收车,若列车

$l'$  与列车  $l$  依次进入某股道中的 A、B 股道,则增加一次调车次数。将相邻列车连续进入同一股道中的 A、B 股道引起的调车次数  $Z_{l,G_{i,j},AB}$  定义为:

$$Z_{l,G_{i,j},AB} = \begin{cases} 1, J_{E_l',G_{i,2}} = 1, J_{E_l,G_{i,1}} = 1 \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中:

$E_{l'}$ ——回库列车  $l'$  的编号。

同一股道中的 A、B 股道不能连续发车,若相邻停靠在某股道中的 A、B 股道的列车  $l'$  与列车  $l$ ,其次日发车顺序也相邻,则增加一次调车次数。因同一股道中的 A、B 股道连续发车导致的调车次数  $Z_{l,G_{i,j},A}$  定义为:

$$Z_{l,G_{i,j},A} = \begin{cases} 1, J_{E_l',G_{i,2}} = 1, J_{E_l,G_{i,1}} = 1, S_{E_l} = S_{E_l'} - 1 \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中:

$S_{E_l}, S_{E_l'}$ ——列车  $l, l'$  次日发车顺序。

停靠在 B 股道的列车  $l'$  的次日发车时间早于相邻 A 股道的列车  $l$ ,则增加一次调车次数。将停靠在 B 股道列车的次日发车时间早于相邻 A 股道列车引起的调车次数  $Z_{l,G_{i,j},B}$  定义为:

$$Z_{l,G_{i,j},B} = \begin{cases} 1, J_{E_l',G_{i,2}} = 1, J_{E_l,G_{i,1}} = 1, S_{E_l'} > S_{E_l} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

列车调车次数  $Z$  为:

$$Z = X_{l,G_x} + Z_{l,G_{i,j}} + Z_{l,G_{i,j},AB} + Z_{l,G_{i,j},A} + Z_{l,G_{i,j},B} \quad (7)$$

为了加快每天列车的检修效率,将相同检修类型的列车放到相邻股道,提出最少检修走行距离。最小检修走行距离包含两点:①相同检修任务的列车相互间距离最小;②所有需要检修的列车相互间距离最小。此处只考虑列检,列检分为双日列检、四日列检、列检巡检。设相邻 A、B 股道量纲一的距离为 1,相邻两个 A 股道量纲一的距离为 2。

所有检修的列车相互间最小距离  $f_1$  定义为:

$$f_1 = \text{diff}(G_{E_l,P}), P = \{P_{r1}, P_{r2}, P_{r3}\} \quad (8)$$

式中:

$\text{diff}(\cdot)$ ——求相邻元素的差值函数;

$P_{r1}, P_{r2}, P_{r3}$ ——双日列检、四日列检、列检巡检。

相同检修任务列车相互间最小距离  $f_2$  定义为:

$$f_2 = \sum_{i=1}^3 \text{diff}(G_{E_l,P_i}), P = \{P_{r1}, P_{r2}, P_{r3}\} \quad (9)$$

式中:

$G_{E_l, P_{ti}}$ ——列车  $l$  完成检修任务  $P$  的股道。

检修走行距离  $f$  定义为:

$$f = f_1 + f_2 \quad (10)$$

本文模型的目标函数  $Q$  为:

$$Q = \min(D, f) \quad (11)$$

目标函数  $Q$  越小,则说明回库列车的股道运用方案安排越合理。求解式(11)的约束条件为:

1) 列车开始当日任务的时间不能早于列车入库时刻,即:

$$t_{l, G_i, P, s} \geq t_{l, h} \quad (12)$$

式中:

$t_{l, G_i, P, s}$ ——列车  $l$  在  $G_i$  股道上进行检修任务  $P$  的开始时刻;

$t_{l, h}$ ——列车  $l$  的入库时刻。

2) 列车完成当日任务的时间不能晚于列车出库时刻,即:

$$t_{l, G_i, P, g} \leq t_{l, c} \quad (13)$$

式中:

$t_{l, G_i, P, g}$ ——列车  $l$  在  $G_i$  股道上进行检修任务  $P$  的结束时刻;

$t_{l, c}$ ——列车  $l$  的出库时刻。

3) 同一股道上,列车  $l$  必须在列车  $l'$  完成检修任务  $P$  并调离股道后才能进行检修任务  $P$ ,即:

$$t_{l', G_i, P, g} + t_1 \leq 1 \quad (14)$$

式中:

$t_1$ ——列车转移时间。

4) 任意时刻,1 条股道只能被 1 列列车占用,则:

$$\sum_{l=1}^n J_{E_l, G_i} \leq 1 \quad (15)$$

5) 任意时刻,1 列列车只占用 1 个股道,则:

$$\sum_{G \in \{G_{i,j}, G_x\}} J_{E_l, G_i} \leq 1 \quad (16)$$

6) 任意时刻,只有当股道  $G_{i,j}$  空闲时才可以分配给列车  $l$ ,则:

$$J_{G_{i,j}, t} + J_{E_l, G_{i,j}} \leq 1 \quad (17)$$

### 1.3 编码与求解

图 3 为单列列车的编码片段。图 3 中:列车顺序栏表示列车回库编号;列车状态栏中,0 表示列车未参与今日运营计划,1 表示早回库列车,2 表示晚回库列车;检修类型栏中,0 表示无检修任务,1 表示双日列检,2 表示四日列检,3 表示巡检列检,4 表示均衡修,6 表示洗车;次日状态栏中,0 表示次日早高峰,1 表示次日正常运营,2 表示均衡修未参与运营,3 表示未参与运营;次日发车顺序栏表示出发列车编号;锁定股道栏表示指定停靠股道;股道号码栏数字表示股道编号;股道类型栏中,1 表示 A 股道,2 表示 B 股道,0 表示列车 1 没有此项检修任务。图 3 表示今日第 9 列晚回库列车进入 5A 股道进行双日列检任务,最后停靠在 5A 股道。

峰,1 表示次日正常运营,2 表示均衡修未参与运营,3 表示未参与运营;次日发车顺序栏表示出发列车编号;锁定股道栏表示指定停靠股道;股道号码栏数字表示股道编号;股道类型栏中,1 表示 A 股道,2 表示 B 股道,0 表示列车 1 没有此项检修任务。图 3 表示今日第 9 列晚回库列车进入 5A 股道进行双日列检任务,最后停靠在 5A 股道。

列车 顺序	列车 状态	检修 类型	次日 状态	次日 发车 顺序	锁定 股道	洗车 股道	列检 股道		均衡修 股道		停车 股道	
							股道 号码	股道 类型	股道 号码	股道 类型	股道 号码	股道 类型
9	2	1	1	10	0	0	5	1	0	0	5	1

图 3 单列列车的编码片段

Fig. 3 Coding fragment of a single train

在求解过程中,将初始列车股道运用方案输入式(18),计算得到灰狼位置信息,将位置信息从第 1 列车次开始,依次输入灰狼算法求解,将求解得到的新的编码信息输入转换公式(见式(19))进行信息转换,得到新的列车股道运用方案。

$$X(l) = \frac{2\varepsilon}{M(l) - 1}(u(l) - 1) - \varepsilon, M(l) \neq 1 \quad (18)$$

$$u(l) = \text{round}\left(\frac{X(l) + \varepsilon(M(l) - 1) + 1}{2\varepsilon}\right), \quad 1 \leq l \leq 21 \quad (19)$$

式中:

$\varepsilon$ ——常数,取 1;

$X(l)$ ——列车  $l$  求解得到的数据;

$M(l)$ ——列车  $l$  可用的股道数;

$u(l)$ ——股道  $G_i$  在列车  $l$  可用的股道集中的编号,即列车可用股道集中将第  $u(l)$  号股道编配给列车;

$\text{round}(\cdot)$ ——取整函数,向上取整数。

## 2 仿真分析

本文采用 MATLAB R2018a 软件进行仿真分析,其中设置种群规模为 100,股道数为 39,列车总数为 25,使用次数为 27,迭代次数为 100。以天津某地铁线车辆段的列车计划回库时间和检修任务数据为算例。

本文模型编制的回库列车股道运用方案和人工编制的回库列车股道运用方案如表 1 所示。本文编制与人工编制的回库列车股道运用方案下的列车走行距离对比如表 2 所示。由表 2 可见:两种列车股道运用方案的列车调车次数都为 0;在列车最小检修



走行距离方面,本文编制的列车股道运用方案比人工编制方案减少了 65.7%,其中早回库减少了 25.0%,晚回库减少了 77.7%。减少的走行距离  $K$  为:

$$K = 1 - f/f_0 \quad (20)$$

式中:

$f_0$ ——人工编制方案的走行距离;

$f$ ——本文编制方案的走行距离。

表 1 两种回库列车股道运用方案对比

Tab. 1 Comparison of two track utilization schemes for depot-returning trains

列车 编号	回库列车股道		列车 编号	回库列车股道	
	本文 编制	人工 编制		本文 编制	人工 编制
1	8A	8A	15	9A	12A
2	12A	13A	16	18A	14A
3	10A	9A	17	19A	15A
4	13A	11A	18	23A	16A
5	15A	12A	19	20A	17A
6	14A	14A	20	16A	18B
7	11A	15A	21	14A	19B
8	21A	24A	22	6A	18A
9	10A	7A	23	13A	19A
10	19B	8B	24	24B	20A
11	15A	9B	25	22A	21A
12	8A	8A	26	24A	22
13	17A	9A	27	7A	23A
14	11A	11A			

表 2 两种回库列车股道运用方案下列车走行距离对比

Tab. 2 Comparison of train running distances in two track utilization schemes for depot-returning trains

方案	调车次数/次	量纲一的早回库走行距离	量纲一的晚回库走行距离	量纲一的总走行距离
人工	0	16	54	70
本文	0	12	12	24

由此可见,将转场列车编入早、晚回库列车队列统筹规划,可极大降低在库列车股道占用对早、晚回库列车股道运用的不良影响。

### 3 结语

本文基于改进灰狼算法提出了一种考虑调车约束的地铁车辆段列车股道运用多目标优化模型。将转场列车编入早、晚回库列车队列进行统筹规划,先分别求解早回库阶段和晚回库阶段的列车股

道运用方案,再通盘考虑早回库列车在库股道占用对晚回库列车股道运用的影响,统一求解所有回库阶段的列车股道运用方案。对天津某地铁线车辆段的列车股道运用方案进行实例仿真验证,得到:

1) 将转场回库列车编入早、晚回库列车队列统筹规划,有利于提高股道利用率和调车作业效率。

2) 合理的列车检修股道安排能提高检修作业效率和检修资源利用率。

3) 首次采用灰狼算法求解列车股道运用问题,证明了灰狼算法求解此类问题具有良好的效果与可行性。

### 参考文献

- [1] 陈绍宽,王丹阳,刘致远,等. 灵活检修工艺下地铁车辆架大修作业调度优化方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 234.  
CHEN Shaokuan, WANG Danyang, LIU Zhiyuan, et al. Flexible process-based optimum unwheeling and overhaul repair scheduling for metro vehicles[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(6): 234.
- [2] 黄嘉,许晶晶. 车辆基地综合自动化管理系统的收发车作业自动办理方案[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 205.  
HUANG Jia, XU Jingjing. Automatic handling scheme of vehicle receiving and dispatching operation of vehicle base integrated automation system[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 205.
- [3] 黄瑛. 地铁车辆段检修调度优化问题研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2017.  
HUANG Ying. Research on the optimization of metro depot maintenance scheduling[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.
- [4] 徐安雄,王鑫,曲正钢. 地铁车辆基地综合自动化管理系统收发车计划编制及动态调整方案[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(12): 193.  
XU Anxiong, WANG Xin, QU Zhenggang. Formulation and dynamic adjustment of vehicle receiving and dispatching plan of metro vehicle base integrated automation management system[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(12): 193.
- [5] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A D. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69(3): 46.
- [6] 张阳,周溪召. 求解全局优化问题的改进灰狼算法[J]. 上海理工大学学报, 2021, 43(1): 73.  
ZHANG Yang, ZHOU Xizhao. Modified grey wolf optimization algorithm for global optimization problems[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2021, 43(1): 73.

· 收稿日期:2024-01-11 修回日期:2024-04-04 出版日期:2025-01-10  
Received:2024-01-11 Revised:2024-04-04 Published:2025-01-10  
· 第一作者:张增超,高级工程师,863110715@qq.com  
通信作者:辛丽平,副教授,lpxin@qut.edu.cn  
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议  
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license