

城市轨道交通信号系统降级情况下的延误分析

张 江

(无锡地铁运营有限公司, 214171, 无锡//工程师)

摘 要 目的:在因城市轨道交通信号系统故障导致的列车降级运行初期,应及时有效地调整行车组织,以控制列车延误的传播,提升突发故障后的处置效率。**方法:**基于列车降级运行初期所产生的延误及传播的特性,对故障区延误、故障区后方延误及故障区前方终到延误过程进行划分与梳理,总结了不同区域延误的计算方法。结合案例场景的分析并进行定量计算,从而判断列车运行调整的关键点,可准确采用越站、小交路折返和下线列车等调整方法,阻断延误的增强传播。**结果及结论:**信号系统故障产生影响的本质是列车无法按图运行,最终表现为延误,使线路通过能力下降,从而考验行车组织人员的应急处置能力。通过对初期故障区的延误计算,可提前预判故障区后方的延误情况,及时进行人工介入调整行车;在故障中期对各区域的延误及传播的有效控制,有利于故障恢复后快速匹配正常运行图。对延误时间的计算可帮助调度人员预判故障的影响,最终在兑现率、正点率、运能匹配上寻求平衡,也可对故障应急情况下的行车组织策略提供参考。

关键词 城市轨道交通;信号系统故障;降低运行等级;延误

中图分类号 U231+.7

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.12.033

Delay Analysis of Urban Rail Transit Signaling System Downgrade Situation

ZHANG Jiang

Abstract **Objective:** In the initial phase of downgrade train operation due to failures in urban rail transit signaling system, it is essential to promptly and effectively adjust train organization to control the spread of train delays and enhance the efficiency of response to unforeseen malfunctions. **Method:** Based on the characteristics of delays and propagation generated in the initial stage of downgrade train operations, the processes of delay in the fault zone, delay behind the fault zone, and terminal delay in front of the fault zone are classified and sorted. Different methods for calculating delays in various areas are summarized. Combining analysis of case scenarios with quantitative calculations, key points for adjusting train operations are identified, which allows accurate application of adjustment methods

such as station overtaking, short-turning at minor routes, and sending trains offline to prevent the enhanced spread of delay.

Result & Conclusion: The fundamental impact of signaling system failures is the inability of trains to operate according to train diagram, which is ultimately manifested as delays, lowering line passing capacity. This challenges the emergency response capabilities of the train organization personnel. Calculating delays in the early stage of a fault allows for the early prediction of delays behind the fault zone, facilitating timely manual intervention in train operation. Effectively controlling delays and their propagation in various regions during the mid-term of the fault is advantageous for quickly restoring and following up the normal train diagram after the malfunction is resolved. The calculation of delay time helps dispatchers to anticipate the impact of faults, seeking a balance in punctuality rates, on-time performance, and operational capacity matching, providing reference for organizational strategies during emergency situations caused by faults.

Key words urban rail transit; signaling system malfunction; downgrade operation level; delay

Author's address Wuxi Metro Operation Co., Ltd., 214171, Wuxi, China

由于 CBTC(基于通信的列车控制)模式的普及,城市轨道交通日常列车运行均采用全自动控制系统,即根据运行图自动生成运行进路。然而,该系统一旦突发故障导致无法保持 CBTC 模式,为维持线路运营,则需降低运行等级。此时,闭塞分区也将从列车间最小间隔扩大至固定闭塞间隔;无论采用何种人工闭塞的方法,行车效率均受到了严重的影响。在运行模式降级后,调度人员如能预判延误的影响,在故障初期对行车组织及时进行人工干预,则可降低延误造成的影响,同时能最大程度地利用现有的通过能力维持运营。因此,需要对信号系统降级情况下的延误进行分析,为行车调整方案的制定提供参考。

国内外学者在延误的产生、传播特性及影响等

方面已进行了较多研究,并取得了不少成果。文献[1]在分析了城市轨道交通初始延误与连带延误产生的原因基础上总结了延误的传播特性。文献[2]以控制列车总晚点及提升列车到发的均衡性为优化目标,构建了运行调整模型。文献[3]借鉴“沙丁鱼群”运动效应,通过划分相邻列车间的运行时间、距离,构建列车间的协同运动关系,实现了延误情况下的列车运行调整。文献[4]针对初始晚点利用运行图缓冲时间,制定调整策略以避免连带延误,并使受影响列车尽快恢复正点运行。

这些研究综合考虑了初始延误、连带延误和延误的传播,总结了延误的特性,建立了延误的消除模式。在既往研究成果的基础上,本研究针对因延误导致信号系统故障从而产生降级运行的情况,按区域分析信号系统降级后延误的传播,并计算不同区域所产生延误的时间。

1 延误的描述

信号系统故障造成列车运行降级,将线路按区域划分为:故障区、故障区后方和故障区前方,延误在故障初期不同区域的传播规律不同。

在故障区及其后方,没有人工控制的情况下,延误呈现增强传播。根据信号系统功能损失的情况,闭塞方式将包含站间闭塞法和电话闭塞法。若故障初期增强传播得不到控制,最严重情况将导致故障区后方列车严重拥堵,故障区前方行车密度稀疏,列车运行间隔严重不均衡。当列车驶离故障区,由于运行模式恢复为 CBTC 模式,线路通过能力高,列车可高效赶点,则延误呈现衰减情况。故障初期不同区域延误传播特性不同:故障区前方为衰减;故障区、故障区后方为增强。

虽然信号故障的发生原因、影响或降级后的闭塞方式不同,但通常列车通车流程和条件却相同。故障初期的一段时间对整个运行调整的过程至关重要,因此,需对故障发生后各区域延误进行计算,并以此定量分析故障的影响。

根据初期故障区的延误计算,进一步预判故障区后方的延误;基于此,在人工介入采用调整方法组织列车运行后,可在故障中期控制各区域的延误及传播;故障末期可更加快速匹配运行图恢复正常运行,以达到减小延误导致的终到晚点和乘客服务水平下降等目的。

2 延误的计算与分析

2.1 故障区列车的延误

通过上述分析,对故障区的列车初期延误传播的时间进行计算探讨。列车在故障区运行分解为如下 6 个阶段:列车紧急制动,接收调度命令,切除 ATC(列车自动控制),起动列车和停车待令等待闭塞条件满足,降级模式继续运行。

对上述几个阶段产生的相关参数进行设定:调度命令发布时间为 t_{dl} ,列车切除 ATC 时间为 t_{qc} ,列车降级后的旅行速度为 v_j ,CBTC 模式下的旅行速度为 v_c ,列车 i 距离前方非故障区的距离为 $L_{i,q}$,一站两区间行车间隔为 T_j ,图定行车间隔为 T ,列车 i 在故障区产生延误的总时间为 $t_{i,z}$ 。列车紧急制动和起动的过程简化为匀加(减)速,延误时间的计算公式为:

$$t_{jz} + t_{qd} = \frac{v_z a_{qd} + v_x a_{jz}}{a_{jz} a_{qd}} \quad (1)$$

式中:

- t_{jz} ——列车紧急制动时间;
- t_{qd} ——列车从禁止起动至怠速时间;
- v_z ——紧急制动前正常运行速度;
- v_x ——切除 ATC 的要求限速;
- a_{qd} ——列车起动加速度;
- a_{jz} ——列车紧急制动减速度。

根据列车通过故障区的过程,计算总延误时间递推式如下:

第一列车通过故障延误总时间:

$$t_{1,z} = t_{jz} + t_{dl} + t_{qd} + (T_j - T) + t_{qd} + \frac{v - v_j}{vv_j} L_{2,q}$$

第二列车通过故障延误总时间:

$$t_{2,z} = t_{jz} + t_{dl} + t_{qc} + 2(T_j - T) + t_{qd} + \frac{v - v_j}{vv_j} L_{2,q}$$

第三列车通过故障延误总时间:

$$t_{3,z} = t_{jz} + t_{dl} + t_{qc} + 3(T_j - T) + t_{qd} + \frac{v - v_j}{vv_j} L_{3,q}$$

递推法归纳上述各公式,得到故障区内第 i 列车通过故障区延误总时间为:

$$t_{i,z} = t_{jz} + t_{dl} + t_{qc} + i(T_j - T) + t_{qd} + \frac{v - v_j}{vv_j} L_{i,q} \quad (2)$$

其中,由于不同站不同区间的一站两区间的运行间隔无法统一转化为固定值,因此需要根据实际

情况计算当时相邻两列车的一站两区间间隔。

2.2 故障区后方列车的延误

根据上述故障区初期列车延误的计算,故障区后方的列车受到故障区内列车通过能力降低的影响,导致延误的传播;此外,故障区后方列车想要通过故障区也需满足一系列条件。具体列车运行的分解按如下阶段:接收调度命令、切除 ATC 和等待前方闭塞出清。

假设故障区内有 m 列车,则故障区内延误传播至故障区后方列车受到的延误时间为:

第一列车:

$$t_{m+1,cb} = t_{jz} + t_{qd} + (m+1)(T_j - T)$$

第二列车:

$$t_{m+2,cb} = t_{jz} + t_{qd} + (m+2)(T_j - T)$$

同理,故障区后方第 k 列车受到的延误传播影响时间 $t_{m+k,cb}$ 计算式为:

$$t_{m+k,cb} = t_{jz} + t_{qd} + (m+k)(T_j - T) \quad (3)$$

为此,对故障区后方列车通过故障区后的总延误进行预判计算,即总延误时间计算(含切除 ATC 降级通过故障区)的具体递推式如下:

第一列车:

$$t_{m+1,z} = t_{jz} + t_{qd} + (m+1)(T_j - T) + t_{dl} + t_{qc} + t_{tg}$$

第二列车:

$$t_{m+2,z} = t_{jz} + t_{qd} + (m+2)(T_j - T) + t_{dl} + t_{qc} + t_{tg}$$

同理,故障区后第 k 列车通过故障区后的延误时间 $t_{m+k,z}$ 计算式为:

$$t_{m+k,z} = t_{jz} + t_{qd} + (m+k)(T_j - T) + t_{dl} + t_{qc} + t_{tg} \quad (4)$$

其中,故障区外所有列车通过故障区采用降级模式运行,所产生的延误时间 t_{tg} 计算式为:

$$t_{tg} = \frac{v - v_j}{vv_j} L_{m+1,q} \quad (5)$$

2.3 故障区前方的终到延误

故障区前方由于信号系统仍保持 CBTC 模式,运行效率不变,所以列车驶离故障区后通过运行等级冗余与站台作业缓冲^[5],可在不对客运服务造成较大影响的情况下,CBTC 模式就具备延误修复功能。通过“赶点”后列车的延误会得到一定改善。

1) 列车区间运行等级冗余。列车区间运行等级在日常运行设置为中间档位,通常还设置有更高运行等级和较低的运行等级,运行等级越高的区间运行速度也越快,因此区间运行时间也将缩短。最高运行等级即为此区间线路允许的最大速度。运

行等级冗余时间 t_{dr} 如图 1 所示。列车从 j 站至 $j+1$ 站,区间图定运行时间为 $t_{j,j+1}$,区间运行最小时间为 $t_{\min,j,j+1}$,运行等级冗余时间 t_{dr} 计算式为:

$$t_{dr} = t_{j,j+1} - t_{\min,j,j+1} \quad (6)$$

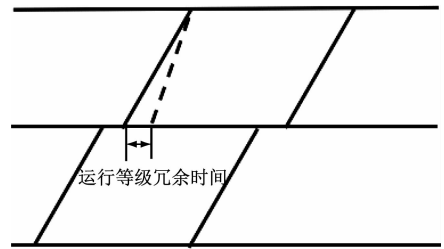


图 1 运行等级冗余时间

Fig. 1 Operation level redundancy time

2) 运行图站台作业时间缓冲。缓冲时间指运行图中列车在站台停站作业、追踪间隔时间与可以完成该项作业实际时间的差值。其中,实际完成作业时间是根据站台标准化作业流程进行测量而得的各个环节所需时间之和。站台作业时间包括司机离开司机室、打开车门与屏蔽门、乘客乘降、关闭车门与屏蔽门和确认动车条件等。在保障安全的情况下,此类时间进过标准化作业的时间计算相对固定。站台作业缓冲示意图如图 2 所示。列车 i 在 j 站的图定站台作业时间 $T_{zl,j}$,最小站台作业时间 $t_{z,\min,j}$,站台作业缓冲,其计算式为:

$$t_{zth} = T_{zl,j} - t_{z,\min,j} \quad (7)$$

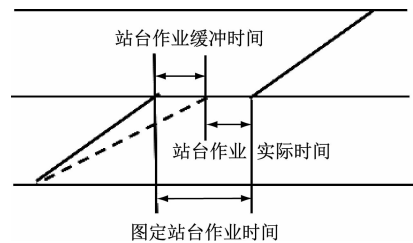


图 2 站台作业缓冲时间示意图

Fig. 2 Schematic diagram of platform operation buffer time

3) 终到延误的计算。充分利用运行等级冗余及站台作业缓冲,则在故障区前方运行效率可以得到提升,通过能力可以得到改善。设故障区前方有 u 站,具体在故障区前方可“赶回”的时间 t_{gh} ,其计算式为:

$$t_{gh} = \sum_{i=1}^{u-1} t_{dr} + \sum_{i=1}^u t_{zth} \quad (8)$$

其中,区间运行等级冗余有 $u-1$ 个区间,站台作业缓冲有 u 个车站。

式中:

t_{dr} ——运行等级冗余时间;
 t_{zth} ——站台作业作业缓冲时间。

故障区列车的终到延误时间 t_{gzd} 计算式为:

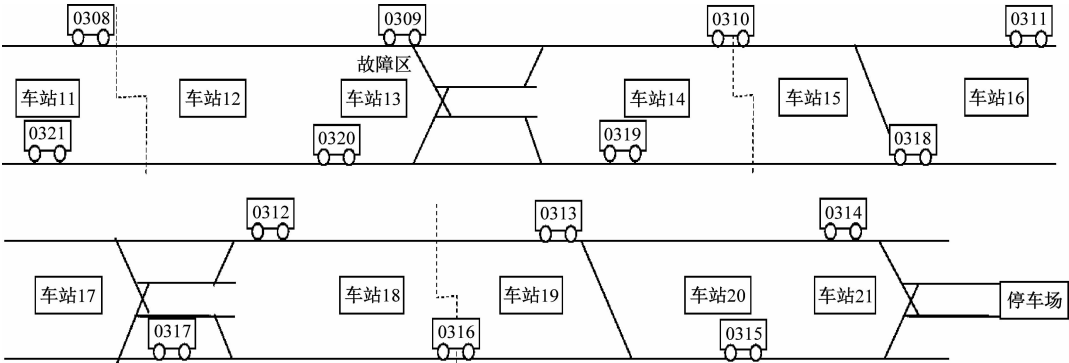
$$t_{gzd} = t_{i,z} - t_{gh} \tag{9}$$

故障区后方列车的终到延误时间 t_{hzd} 计算式为:

$$t_{hzd} = t_{m+k,z} - t_{gh} \tag{10}$$

3 案例分析

场景假设某联锁区 CBTC 模式不可用,列车在车站 11 至车站 15 降级至人工模式运行,如图 3 所示。停站时间、站台作业缓冲、站间距、最小发车间隔和区间运行时间等信息如表 1 及表 2 所示。除上述运行数据外,图定行车间隔、列车加减速度和调度命令发布等其他基本参数如表 3 所示。



注:0308 为列车编号,余类同。

图 3 某案例线路图

Fig. 3 Circuit diagram of a case

表 1 车站运行数据

Tab. 1 Station operation data

车站编号	图定站台 作业时间 $t_{zt,j}/s$	站台作业 缓冲时间 t_{zth}/s	列车追踪 间隔缓冲 时间 t_{zz}/s	最小发车 间隔时间 $T_{h,min}/s$
车站 11	30	10	113	98
车站 12	30	10	121	92
车站 13	35	15	122	91
车站 14	30	10	108	105
车站 15	35	15	125	88

表 2 区间运行数据

Tab. 2 Interval operation data

运行区间	站间距/ km	图定区间 运行时间 $t_{j,j+1}/s$	最小区间 运行时间 $t_{min,j,j+1}/s$	运行等级 冗余时间 t_{dr}/s
车站 11—车 站 12 区间	0.98	85	72	13
车站 12—车 站 13 区间	1.05	83	71	12
车站 13—车 站 14 区间	1.35	101	85	16
车站 14—车 站 15 区间	0.98	78	68	10

为简化 t_j 的计算,故障区及其前后邻站车站 11—车站 15,一站两区间站间距与旅行速度计算取平均值,得到 $T_j = 270\text{ s}$,因此固定行车间隔 213 s 小于一站两区间需满足的行车间隔 270 s 。在此故障区内 0309 车会对 0310 车产生连带晚点。

1) 故障区列车延误计算。本案例上行 0309 车、0310 车在故障区内,结合式(1)和式(2),分别计算故障区内各列车和驶离故障区各列车的总延误时间。

$$t_{0309,z} = t_{jz} + t_{qd} + (T_j - T) + t_{dl} + t_{qc} +$$

$$\frac{v - v_j}{vv_j} L_{0309,q} = 186\text{ s}$$

$$t_{0310,z} = t_{jz} + t_{qd} + 2(T_j - T) + t_{dl} + t_{qc} +$$

$$\frac{v - v_j}{vv_j} L_{0310,q} = 270\text{ s}$$

不采取调整措施 0309 车延误产生的连带延误就会使 0310 车通过故障这后的延误时间大于一站两区间的行车间隔,即后续列车会持续产生延误的增强传播,延误将持续扩大。

2) 故障区后方列车延误计算。故障区后方区域车站 15—车站 21,传播延误影响到后续列车

表 3 基本参数

Tab.3 Basic parameters

基本参数	参数值	基本参数	参数值
固定行车间隔 T/s	213	CBTC 技术速度 $v_z/(\text{ km/h})$	46
运用列车数/辆	27 + 1	切除 ATC 技术速度 $v_x/(\text{ km/h})$	40
紧急制动减速度 $a_{jz}/(\text{ m/s}^2)$	1. 2	赶点旅行速度/($\text{ km/h})$	38
起动加速度 $a_{qd}/(\text{ m/s}^2)$	1	RM 限速 $v_r/(\text{ km/h})$	25
发布调令时间 t_{dl}/s	30	列车降级运行速度 $v_j/(\text{ km/h})$	30
司机切除 ATC 时间 t_{qc}/s	36	CBTC 旅行速度 $v_c/(\text{ km/h})$	36

注:RM 为限制人工驾驶模式。

0311、0312、0313……,根据式(3)一式(5),计算故障区后各列车通过故障区后的延误时间:

$$\begin{aligned}t_{0311,z} &= t_{jz} + t_{qd} + (T_j - T)(m + 1) + \\&\quad t_{dl} + t_{qc} + t_{tg} = 347 \text{ s} \\t_{0312,z} &= t_{0311,z} + (270 - 213) = 404 \text{ s}\end{aligned}$$

同理, $t_{0313,z} = 461 \text{ s}$, $t_{0314,z} = 518 \text{ s}$ 。

3) 故障区前方列车终到延误计算。根据式(8)计算故障区前方“赶回”时间,从车站 11 至终点站运行可赶点时间设置为 280 s。由此,根据式(9)得故障区 0309 车与 0310 车终点站前可消除延误;根据式(10)得故障区后方 0311 车终到延误时间 $t_{hzd,0311} = 67 \text{ s}$,0312 车终到延误时间 $t_{hzd,0312} = 124 \text{ s}$,0313 车终到延误时间 $t_{hzd,0313} = 180 \text{ s}$,0314 车终到延误时间 $t_{hzd,0314} = 238 \text{ s}$ 。

4) 影响分析。若不采取其余人工介入的调整措施,仅在故障区前 CBTC 模式下系统自行采用最高运行速度和最短停站时间控制,可消除 5 min 左右的延误。上述各列车的终到延误时间,除 0309 车、0310 车延误消除以及 0311 车终到延误时间 2 min 以内,其余上下行所有列车均产生终到到站晚点。同时,延误呈增强传播,在 0314 车终到时已经超出图定一个行车间隔 T 。在故障发生后的一个全周转时间内终到延误小于 2 min 的正点率约 20%,若除去故障区前方不受影响的列车或故障恢复时间较长的列车,正点率将远低于 20%。

列车延误的传播为增强传播,故障区后方若无列车间隔控制,将出现严重的排队拥堵情况,并持续蔓延至全线,直至故障区后所有列车均站台停车待令。然而故障区前方由于列车运行畅通,则行车间隔会出现故障区前方较稀疏,故障区较均匀,故障区后方严重拥堵的情况。由于故障区外列车仍为 CBTC 模式,需要调度对排队列车在站台及时扣

车或发布调令,避免在区间发生迫停或产生列车冲突,几乎所有列车都需要扣车,操作难度最大,发布调度命令和信号操作频率很高。

4 结语

信号系统故障产生影响的本质是列车无法按图运行,最终表现为延误。制定运输组织方案的主要目的通常是为了消除或控制故障产生的延误。因此,根据延误传播理论,划分延误类型为单列车延误和连带延误,若连带延误持续影响即产生延误的传播。延误的传播又分为衰减、等效和增强,而延误一旦超过运行图缓冲冗余则产生连带并开始传播。本文在研究关于延误分析的文献基础上,梳理了信号系统故障造成列车运行降级后的延误特性与时间,根据延误时间可帮助调度人员预判故障的影响,在故障区及故障区后方准确采用越站、小交路折返和下线列车等调整方法,可阻断延误的增强传播。

参考文献

[1] 江志彬,苗秋云. 城轨交通列车运行延误影响及其减缓措施[J]. 现代城市轨道交通, 2009(5): 59.
JIANG Zhibin, MIAO Qiuyun. Delay influence and its mitigation measures of train operation in urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2009(5): 59.
[2] 柏赞,陈垚,陈玥,等. 考虑列车总晚点和到发均衡性的地铁列车运行调整方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(3): 104.
BAI Yun, CHEN Yao, CHEN Yue, et al. Rescheduling of metro train timetable for delay reduction and equilibrium of trains' arrival and departure[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(3): 104.
[3] 赵源. 列车晚点情况下的地铁运营调整自组织机制研究[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(4): 13.

(下转第 199 页)

表 5 建设规划阶段轨道交通规划控制标准

Tab.5 Control standards for rail transit planning during the construction planning stage

控制对象	敷设位置	规划控制标准
线路区间 (含联络线、 出入段线)	地下	轨道正线两侧各 15 m 内
	地面/高架	轨道正线两侧各 35 m 内
线路站点	地下	宽度方向上,轨道正线两侧各 15 m 内,或道路红线两侧各 10 m 内,两者取较大者 长度方向上,有效站台边线 60 m 内
	地面/高架	宽度方向上,轨道交通中心线两侧各 35 m 内,或道路红线两侧各 10 m 内,两者取较大者 长度方向上,有效站台边线范围内
车辆基地		车辆基地用地边线范围内

4 结语

城市轨道交通用地控制的目的在于城市轨道交通用地的预留、预控,其关键在于解决城市轨道交通建设用地需求与城市用地开发建设间的矛盾。成都市在城市轨道交通规划控制工作中通过不断探索、深入研究,提出采用“规划控制区”进行科学管控,形成了“规划控制标准 + 控制要求”的管控体系。

规划控制标准重点考虑了城市轨道交通结构

宽度、预留调整空间和噪声、振动影响范围等 3 大因素。在科学制定规划控制标准的基础上,按照“刚弹”结合的原则提出管控要求,从而实现轨道交通建设与城市建设的良性互动与融合。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家发展改革委员会.城市轨道交通工程项目建设标准:建标 104—2008[S].北京:中国计划出版社,2008.

Ministry of Construction of the People’s Republic of China, National Development and Reform Commission. Construction standards of urban rail transit transportation engineering: JB 104—2008 [S]. Beijing: China Planning Press, 2008.

[2] 于艳强.关于城市轨道交通用地规划与控制的思考[J].都市快轨交通,2016,29(1):82.

YU Yanqiang. Reflection on land planning and control for urban rail transit[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016, 29(1): 82.

[3] 李娟,张馨,郭飞,等.城市轨道交通车站附属设施规划用地控制探讨[J].现代城市轨道交通,2019(4):1.

LI Juan, ZHANG Xin, GUO Fei, et al. Discussion on land use control method for planning of affiliated facilities at urban transit station area[J]. Modern Urban Transit, 2019(4): 1.

[4] 王获,张冠增.轨道交通规划与城市控制性详细规划的对位缺失[J].城市轨道交通研究,2011,14(11):13.

WANG Di, ZHANG Guanzeng. The contraposition absence of the rail transit planning and the urban regulatory detailed planning [J]. Urban Mass Transit, 2011, 14(11): 13.

(收稿日期:2022-09-16)

(上接第 194 页)

ZHAO Yuan. Self-organization mechanism of metro operation adjustment in case of train delay[J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(4): 13.

[4] 龚艺,蒲琪.城市轨道交通晚点列车的运行调整模型[J].城市轨道交通研究,2017,20(3):31.

GONG Yi, PU Qi. Operation adjustment model for the delayed urban mass transit train [J]. Urban Mass Transit, 2017, 20

(3): 31.

[5] 周晓昭.复杂高速铁路路网下的列车运行智能调整策略与方法研究[D].北京:中国铁道科学研究院,2018.

ZHOU Xiaozhao. Research on strategies and methods for train intelligent rescheduling in complex China high-speed railway network [D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences, 2018.

(收稿日期:2021-06-07)

欢迎订阅《城市轨道交通研究》

服务热线 021—56830728 转 821