

# 恶劣天气下山岭区有轨电车的列车运行调整方法

陈佳琪<sup>1, 2</sup>

(1. 丽江雪山轨道交通有限公司, 674199, 丽江; 2. 中铁建云南投资有限公司, 650220, 昆明//高级工程师)

**摘要** 目的: 山岭区的有轨电车常会受到恶劣天气的影响, 导致有轨电车的运行时刻偏离初始时刻表。为提高山岭区有轨电车在恶劣天气下的运营效率, 提出一种有轨电车运行调整方法。方法: 考虑有轨电车在交叉口信号优先模式下的影响, 基于山岭区恶劣天气对有轨电车运行的扰动特点, 构建了有轨电车列车运行调整的混合整数线性规划模型; 介绍了模型求解算法; 以丽江有轨电车 1 号线为例, 基于不同恶劣天气场景设置 15 个试验组对所构建的模型进行验证。结果及结论: 临时限速值越低, 各站到发时刻总偏离时间越高; 当临时限速值一致时, 总偏离时间随着限速持续时间的增加而增加; 当临时限速值与限速持续时间一致时, 相对优先模式的增加幅度较绝对优先模式的增加幅度更大; 当限速持续时间一致时, 总偏离时间均随着临时限速值的降低而增加; 在不同程度的恶劣天气下, 绝对优先模式可以降低 15%~87% 的总偏离时间, 随着恶劣天气严重程度增加 (临时限速值越低), 绝对优先模式的优势呈下降趋势。

**关键词** 有轨电车; 恶劣天气; 山岭区; 列车运行调整

**中图分类号** U292.4; U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.002

## Operation Rescheduling Method for Trams in Mountainous Areas under Adverse Weather Conditions

CHEN Jiaqi

**Abstract** Objective: Trams in mountainous areas are vulnerable to adverse weather conditions, leading to deviations from the initial timetable. To improve the operational efficiency of trams in this situation, a tram rescheduling method is proposed. Method: Considering the impact of intersection signal priority mode on tram operation and the disturbance characteristics caused by adverse weather in mountainous areas, a mixed-integer linear programming model for tram rescheduling is constructed, the solution algorithm for the model is described. Taking Lijiang Tram Line 1 as example, 15 experimental groups are set up based on different adverse weather scenarios to validate the constructed model. Result & Conclusion: The lower the temporary speed restriction, the higher the total deviation time of arrivals and departures at each station;

when the temporary speed restriction is consistent, the total deviation time increases as speed restriction duration increases; when temporary speed restriction value is consistent with duration time, the increased amplitude under relative priority mode is greater than that under absolute priority mode; when speed restriction duration is consistent, the total deviation time increases as temporary speed restriction value decreases; under different levels of adverse weather conditions, the absolute priority mode can reduce total deviation time by 15% to 87%. However, as the severity of adverse weather increases (with lower temporary speed restriction value), the advantage of absolute priority mode shows a decreasing trend.

**Key words** tram; adverse weather; mountainous area; train rescheduling

**Author's address** Lijiang Xueshan Rail Transit Co., Ltd., 674199, Lijiang, China

## 0 引言

有轨电车具有建造成本低、运量大、建设难度低等优点, 是城市轨道交通的重要组成部分之一。山岭区的城市轨道交通制式大多为有轨电车, 而山岭区易受到雪、风、雨、雾等恶劣天气的影响, 当恶劣天气发生后, 如何在保证安全的前提下, 提高有轨电车的运营效率是亟需解决的一个运营管理问题。

高效的列车运行调整方法是提高有轨电车运营效率的有效途径之一。在日常运营中, 城市轨道交通通常会受到外界因素的影响而引起列车偏离初始时刻表的情况, 如果偏离情况没有得到及时调整, 可能导致大面积的列车延误, 进而影响列车的正常运行, 降低乘客对城市轨道交通的满意度<sup>[1]</sup>。在实际运营过程中, 调度员基于经验根据扰动因素对列车进行人工调整。随着计算机技术的发展, 列车的运行调整逐渐向自动化、智能化发展, 而运行调整方法是实现自动化、智能化发展的基础。然

而,对于列车运行调整方法的研究大多集中于地铁系统。

与拥有独立路权的地铁系统有所不同,有轨电车线路以半独立路权运营为主,具有城市轨道交通及道路交通的双重特征<sup>[2]</sup>。一方面,有轨电车运营以时刻表为基础,具有城市轨道交通计划性强的特点;另一方面,有轨电车在道路的交叉路口会受道路交通的影响,需要通过信号控制的方式与社会车辆共享路权<sup>[3]</sup>。因此,对有轨电车进行运行调整需要同时考虑在车站的准点运行及在交叉路口的优先模式影响。基于此,本文针对山岭区恶劣天气的特点,考虑有轨电车在站间的运行时间受交叉路口信号优先模式的影响,研究有轨电车的列车运行调整方法。

## 1 恶劣天气下有轨电车列车运行调整模型

在恶劣天气下,有轨电车的运行调整方法有两个关键点:

1) 有轨电车在交叉路口是否停留与信号优先模式直接关联。信号优先模式分为绝对优先模式和相对优先模式。绝对优先模式是指当有轨电车到达路口时,道路信号系统无条件给予有轨电车放行信号,与有轨电车冲突的交通车辆暂缓通行的模式。相对优先模式是指当有轨电车到达路口时,道路信号系统在保障其他交通协调运行的前提下,适度给予有轨电车优先通行的方式。在构建模型时,需要考虑不同信号优先模式下区间运行时间的区别。本文考虑的区间旅行时间为技术最小运行时间、冗余时间,以及与有轨电车是否停留相关的起停附加时间之和,使得区间旅行时间与信号优先模式相关联。

2) 如何评估恶劣天气对有轨电车运行的影响。基于运行调整方法降低与初始列车运行图的偏离程度是另一个研究关键点。本文通过设置一组约束条件对有轨电车是否受恶劣天气影响进行判断,以确定受影响的列车区间运行时间,从而最小化恶劣天气对列车运行的影响。

本文首先构建了恶劣天气下有轨电车运行调整优化的非线性整数规划模型,并基于混合整数规划理论对列车运行调整模型进行线性重构,使得所提模型可以基于优化求解器进行求解。

### 1.1 目标函数

将目标函数  $Z$  设为调整后的列车时刻表与初

始列车时刻表的总偏离时间最小,可以表示为:

$$Z = \min \sum_{n \in N} (|t_{n,s}^{\text{arr}} - t_{n,s}^{\text{p-arr}}| + |t_{n,s}^{\text{dep}} - t_{n,s}^{\text{p-dep}}|) \quad (1)$$

式中:

$t_{n,s}^{\text{arr}}$ ——有轨电车  $n$  在车站、交叉口  $s$  的到达时刻;

$t_{n,s}^{\text{p-arr}}$ ——有轨电车  $n$  在车站  $s$  的计划到达时刻;

$t_{n,s}^{\text{dep}}$ ——有轨电车  $n$  在车站、交叉口  $s$  的离开时刻;

$t_{n,s}^{\text{p-dep}}$ ——有轨电车  $n$  在车站  $s$  的计划发车时刻;

$N$ ——有轨电车集合。

### 1.2 约束条件

1) 恶劣天气影响约束。有轨电车如果在恶劣天气时段内 $[\gamma_{s,s+1}, \delta_{s,s+1}]$ ( $\gamma_{s,s+1}$ 为区间 $(s,s+1)$ 恶劣天气开始时刻; $\delta_{s,s+1}$ 为区间 $(s,s+1)$ 恶劣天气结束时刻)位于区间 $(s,s+1)$ ( $s,s+1$ 为车站或交叉路口的索引, $s \in S$ , $S$ 为有轨电车线路所有车站及交叉路口的集合),则有轨电车的运行速度不能超过该恶劣天气下的限速要求值  $v_{s,s+1}^{\text{limit}}$ 。为了描述此特点,本文引入一个有轨电车  $n$  在区间 $(s,s+1)$ 是否受恶劣天气影响的0-1变量  $\theta_{n,s,s+1}$ ( $\theta_{n,s,s+1} = 1$ 表示有轨电车运行受影响; $\theta_{n,s,s+1} = 0$ 表示有轨电车运行不受影响),此变量的取值需要综合调整后的有轨电车在区间的到发时刻及恶劣天气的影响时段进行综合确定。构建以下约束:

$$\theta_{n,s,s+1} = \begin{cases} 1, & (t_{n,s}^{\text{dep}} \leq \delta_{s,s+1}) \cap (t_{n,s+1}^{\text{arr}} \geq \gamma_{s,s+1}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\forall n \in N; s \in S_n, s \neq d_n$$

式中:

$d_n$ ——有轨电车  $n$  的终点站;

$S_n$ ——有轨电车  $n$  经过的车站及交叉路口的集合。

约束条件式(2)表示,若有轨电车在恶劣天气开始前就到达了车站  $s+1$ ,或在恶劣天气结束后才离开车站  $s$ ,则有轨电车不会被恶劣天气影响;否则该有轨电车会受恶劣天气的影响。

2) 有轨电车在车站及交叉路口的运行时间约束。有轨电车在区间的运行时间为区间最小技术运行时间、起车附加时间、停车附加时间与冗余时间之和。最小技术运行时间与有轨电车是否受恶劣天气影响有关,而起停附加时间与有轨电车在区间两

个车站及交叉口是否停留有关,如式(3)所示:

$$t_{n,s,s+1}^{\text{run}} = \begin{cases} \omega_{s,s+1} + \alpha\sigma_{n,s} + \beta\sigma_{n,s+1} + \pi, & \theta_{n,s,s+1} = 0 \\ \frac{l_{s,s+1}}{v_{s,s+1}^{\text{limit}}} + \alpha\sigma_{n,s} + \beta\sigma_{n,s+1} + \pi, & \theta_{n,s,s+1} = 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\forall n \in N; s \in S_n, s \neq d_n$$

式中:

$t_{n,s,s+1}^{\text{run}}$ ——有轨电车  $n$  在区间  $(s, s+1)$  的运行时间;

$\omega_{s,s+1}$ ——区间  $(s, s+1)$  的纯技术运行时间;

$\alpha$ ——起车附加时间;

$\sigma_{n,s}$ ——有轨电车  $n$  在车站或交叉口  $s$  是否停留的 0-1 参数,  $\sigma_{n,s} = 1$  表示停留,  $\sigma_{n,s} = 0$  表示不停留;

$\beta$ ——停车附加时间;

$\pi$ ——有轨电车在区间运行的冗余时间;

$l_{s,s+1}$ ——车站或交叉口  $s$  到  $s+1$  的区间线路长度;

$v_{s,s+1}^{\text{limit}}$ ——恶劣天气下有轨电车在区间  $(s, s+1)$  的临时限速值。

3) 有轨电车在车站及交叉口停留时间约束。有轨电车在车站的停留时间上下限由乘客数量、作业时间、开关门时间等确定;在交叉口的停留时间上下限由与道路的优先模式(如相对优先、绝对优先)、路口红绿灯时长等因素有关。有轨电车在车站及交叉口的停留时间由停留时间上下限进行约束,可以表示为:

$$t_{n,s}^{\text{dmin}} \leq t_{n,s}^{\text{dwe}} \leq t_{n,s}^{\text{dmax}} \quad (4)$$

$$\forall n \in N; s, s+1 \in S_n^z$$

式中:

$t_{n,s}^{\text{dmin}}$ ——有轨电车  $n$  在车站或交叉口  $s$  的最小停留时间;

$t_{n,s}^{\text{dwe}}$ ——有轨电车  $n$  在车站或交叉口  $s$  的停留时间;

$t_{n,s}^{\text{dmax}}$ ——有轨电车  $n$  在车站或交叉口  $s$  的最大停留时间;

$S_n^z$ ——有轨电车  $n$  经过的车站集合。

4) 有轨电车在车站发车时刻约束。由于有轨电车在各车站需要停站进行乘客上下车作业,且山岭区有轨电车通常为提前售票制,乘客需要根据车票上的列车发车时刻进行乘车,因此调整后的有轨电车发车时刻不能早于计划发车时刻,如式(5)

所示:

$$t_{n,s}^{\text{dep}} \geq t_{n,s}^{\text{p,dep}} \quad (5)$$

$$\forall n \in N; s \in S_n^z$$

5) 有轨电车在车站、交叉口的到发时刻约束。有轨电车在交叉口、车站的到达时刻由运行方向上本节点以前所有区间的运行时间及除本节点外的停站时间确定,如式(6)所示;发车时刻由在本节点到达时刻与停留时间决定,如式(7)所示:

$$t_{n,s}^{\text{arr}} = \sum_{i=o_n+1}^s t_{n,i-1,i}^{\text{run}} + \sum_{i=o_n}^{s-1} t_{n,i}^{\text{dwe}} \quad (6)$$

$$\forall n \in N; s \in S_n, s \neq o_n$$

$$t_{n,s}^{\text{dep}} = t_{n,s}^{\text{arr}} + t_{n,s}^{\text{dwe}} \quad (7)$$

$$\forall n \in N; s \in S_n, s \neq d_n$$

式中:

$i$ ——有轨电车线路车站或交叉口索引;

$o_n$ ——有轨电车  $n$  的起点站。

6) 有轨电车间安全间隔约束。相邻有轨电车到达同一个车站或交叉口需要有一定的时间间隔以保证运行安全,如式(8)所示;同理,离开车站、交叉口的时刻需要满足约束条件,如式(9)所示:

$$|t_{n,s}^{\text{arr}} - t_{n',s}^{\text{arr}}| \geq h \quad (8)$$

$$\forall n, n' \in N; s \in S_n \cap S_{n'}$$

$$|t_{n,s}^{\text{dep}} - t_{n',s}^{\text{dep}}| \geq k \quad (9)$$

$$\forall n, n' \in N; s \in S_n \cap S_{n'}$$

式中:

$h$ ——相邻有轨电车在车站的到达安全间隔时间;

$k$ ——相邻有轨电车在车站的发车安全间隔时间;

$n'$ ——有轨电车列车索引,  $n' \in N$ 。

## 2 模型求解算法

本文所构建的模型为混合整数非线性规划模型,其中的非线性项主要存在于式(2)与式(3)中的 if-then 约束。通过将非线性约束转换为线性约束,可以得到混合整数规划模型,进而运用优化求解器(如 CPLEX 求解器)求解该模型的精确解。

式(3)的结果均为非变量,因此可以通过乘积的形式转换为线性化约束:

$$t_{n,s,s+1}^{\text{run}} = \omega_{s,s+1} (1 - \theta_{n,s,s+1}) + \theta_{n,s,s+1} \frac{l_{s,s+1}}{v_{s,s+1}^{\text{limit}}} + \alpha\sigma_{n,s} + \beta\sigma_{n,s+1} + \pi \quad (10)$$

$$\forall n \in N; s \in S_n, s \neq d_n$$

对于非线性约束式(2),需要再引入两个0-1变量 $\varphi_{n,s,s+1}$ 、 $\omega_{n,s,s+1}$ ( $\varphi_{n,s,s+1}$ 为有轨电车 $n$ 离开车站 $s$ 进入区间 $(s,s+1)$ 的时刻与恶劣天气开始时刻关系的0-1变量, $\varphi_{n,s,s+1}=1$ 表示恶劣天气开始后进入区间,否则 $\varphi_{n,s,s+1}=0$ ; $\omega_{n,s,s+1}$ 为有轨电车 $n$ 到达车站 $s+1$ 离开区间 $(s,s+1)$ 的时刻与恶劣天气结束时刻关系的0-1变量, $\omega_{n,s,s+1}=1$ 表示恶劣天气结束前离开区间,否则 $\omega_{n,s,s+1}=0$ ),以用于描述有轨电车在区间到发时刻与恶劣天气持续时间之间的关系。

$$\varphi_{n,s,s+1} = \begin{cases} 1, & t_{n,s}^{\text{dep}} < \delta_{s,s+1} \\ 0, & t_{n,s}^{\text{dep}} \geq \delta_{s,s+1} \end{cases} \quad (11)$$

$$\forall n \in N; s \in S_n, s \neq d_n; t_{n,s}^{\text{dep}} \geq t_{n,s}^{\text{p-dep}}$$

$$\omega_{n,s,s+1} = \begin{cases} 1, & t_{n,s+1}^{\text{arr}} > \gamma_{s,s+1} \\ 0, & t_{n,s+1}^{\text{arr}} \leq \gamma_{s,s+1} \end{cases} \quad (12)$$

$$\forall n \in N; s \in S_n, s \neq d_n$$

当且仅当 $\varphi_{n,s,s+1}=1$ 及 $\omega_{n,s,s+1}=1$ 时,有轨电车会受恶劣天气的影响(即 $\theta_{n,s,s+1}=1$ ),则约束条件式(2)转换为:

$$\theta_{n,s,s+1} = \begin{cases} 1, & \varphi_{n,s,s+1} = 1 \cap \omega_{n,s,s+1} = 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

由于式(13)的条件及结果式均为0-1变量,因此可以转化为线性化计算式:

$$\left. \begin{aligned} -\varphi_{n,s,s+1} + \theta_{n,s,s+1} &\leq 0 \\ -\omega_{n,s,s+1} + \theta_{n,s,s+1} &\leq 0 \\ \varphi_{n,s,s+1} + \omega_{n,s,s+1} - \theta_{n,s,s+1} &\leq 1 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

对于式(11)和式(12),可以通过大 $M$ ( $M$ 为一个极大值)法转化为线性化计算式:

$$\left. \begin{aligned} M(\varphi_{n,s,s+1} - 1) &\leq \delta_{s,s+1} - t_{n,s}^{\text{dep}} - \varepsilon \\ M\varphi_{n,s,s+1} &\geq \delta_{s,s+1} - t_{n,s}^{\text{dep}} + \varepsilon \\ M(\omega_{n,s,s+1} - 1) &\leq t_{n,s+1}^{\text{arr}} - \gamma_{s,s+1} - \varepsilon \\ M\omega_{n,s,s+1} &\geq t_{n,s+1}^{\text{arr}} - \gamma_{s,s+1} + \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

式中:

$\varepsilon$ ——一个极小值。

### 3 模型及算法验证

#### 3.1 试验数据

本文以丽江有轨电车1号线为例,研究其线路数据。线路全长约为20 km,共设车站5座,分别为游客集散中心站、白沙古镇站、玉水寨站、东巴谷站和玉龙雪山站,全部为地面站。从游客集散中心站

至玉龙雪山站的4个站间距分别为1 830 m、4 155 m、2 545 m、116 800 m。

沿线共计15个路口,其中有3个立交路口对有轨电车运行无影响,因此将此3个交叉路口的停留时间上下限设置为0。对于其他12个交叉路口,考虑路口有轨电车绝对优先与相对优先模式对有轨电车运行的影响,设置交叉路口的停留时间上下限。对于绝对优先模式,有轨电车在经过交叉口时不考虑延误,但有轨电车需要限速30 km/h通过交叉口,基于有轨电车加减速时间及交叉口长度,测算出此线路条件下需要增加5~10 s的交叉口运行时间,因此将此时间作为在交叉路口的停留时间,设置 $t_{n,s}^{\text{dmin}} \in [5, 10]$  s。将此类交叉路口下是否停留的0-1变量设置为0(即 $\sigma_{n,s}=0$ ),即在绝对优先模式下,有轨电车通过交叉路口不停留。在相对优先模式下,有轨电车在交叉路口可能遇到红灯进行停留,因此停留时间的上下限可以基于路口的红灯相位时间进行设置。此外,对于有轨电车遇到红灯需要停留的交叉口,设置 $\sigma_{n,s}=1$ 。由于临时限速多见于长大下坡道区段,因此本文仅以长大下坡道有轨电车单向运行过程为例进行试验研究。有轨电车初始到发时刻表如表1所示。

对于恶劣天气的相关数据,本文基于文献[4]中对于恶劣天气下的有轨电车运行保障措施进行临时限速值的设置:当有轨电车运营期间遇到雾、雨、雪等恶劣天气时,有轨电车限速可能为60 km/h、50 km/h、30 km/h、25 km/h和15 km/h。本文设置限速区段为靠近玉龙雪山的玉水寨站至东巴谷站、东巴谷站至玉龙雪山站的2个站间区间,限速区长度约为14 km,恶劣天气下有轨电车的限速参数如表2所示。

#### 3.2 试验结果分析

本文使用优化求解器IBM ILOG CPLEX 12.10对模型进行求解。软件运行环境为11 th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1165G7 @ 2.80 GHz,内存为16.0 GB的计算机。基于所构建的模型及算法,所有案例均可以在1 s内求得问题的最优解。

分析不同恶劣天气对有轨电车运行的影响。由于恶劣天气造成的临时限速情况不一致,因此根据所构建的模型及算法调整后的列车时刻表呈现出了不同的延误程度。调整后的有轨电车到发时刻表如表3所示。

不同优先模式下,各案例的最优解目标值如

表 1 有轨电车初始到发时刻表

Tab. 1 Initial train arrival and departure time table

站名	到发状态	初始到发时刻														
		列车 1	列车 2	列车 3	列车 4	列车 5	列车 6	列车 7	列车 8	列车 9	列车 10	列车 11	列车 12	列车 13	列车 14	列车 15
游客集散中心站	到达	09:59	10:04	10:09	10:14	10:19	10:24	10:29	10:34	10:39	10:44	10:49	10:54	10:59	11:04	11:09
	发车	10:00	10:05	10:10	10:15	10:20	10:25	10:30	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55	11:00	11:05	11:10
白沙古镇站	到达	10:03	10:08	10:13	10:18	10:23	10:28	10:33	10:38	10:43	10:48	10:53	10:58	11:03	11:08	11:13
	发车	10:03	10:08	10:13	10:18	10:23	10:28	10:33	10:38	10:43	10:48	10:53	10:58	11:03	11:08	11:13
玉水寨站	到达	10:08	10:13	10:18	10:23	10:28	10:33	10:38	10:43	10:48	10:53	10:58	11:03	11:08	11:13	11:18
	发车	10:09	10:14	10:19	10:24	10:29	10:34	10:39	10:44	10:49	10:54	10:59	11:04	11:09	11:14	11:19
东巴谷站	到达	10:12	10:17	10:22	10:27	10:32	10:37	10:42	10:47	10:52	10:57	11:02	11:07	11:12	11:17	11:22
	发车	10:12	10:17	10:22	10:27	10:32	10:37	10:42	10:47	10:52	10:57	11:02	11:07	11:12	11:17	11:22
玉龙雪山站	到达	10:25	10:30	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55	11:00	11:05	11:10	11:15	11:20	11:25	11:30	11:35
	发车	10:25	10:30	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55	11:00	11:05	11:10	11:15	11:20	11:25	11:30	11:35

表 2 恶劣天气下有轨电车的限速参数

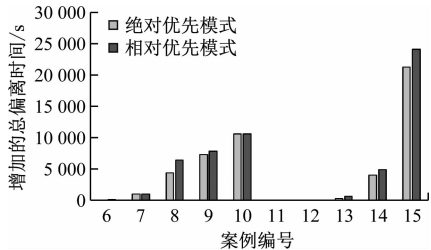
Tab. 2 Parameters of tram speed restriction under adverse weather conditions

案例编号	列车编号	临时限速值/(km/h)	限速持续时间/min
1	1	60	15
2	2	50	15
3	3	30	15
4	4	25	15
5	5	15	15
6	6	60	30
7	7	50	30
8	8	30	30
9	9	25	30
10	10	15	30
11	11	60	60
12	12	50	60
13	13	30	60
14	14	25	60
15	15	15	60

表 4 所示。由表 4 可知:① 临时限速值越低,目标值(各站到发时刻总偏离时间)越高。例如,案例 1 与案例 5 的限速持续时间均为 15 min,而由于案例 5 的临时限速值(15 km/h)比案例 1 的临时限速值(60 km/h)低,造成有轨电车通过临时限速区段的运行时间更长,则目标值分别增加了 41 742 s(绝对优先模式)与 40 199 s(相对优先模式)。② 当临时限速值一致时,随着限速持续时间的增加,对有轨电车运行造成的影响呈现上升趋势,即总偏离时间

有所增长。例如,案例 1 和案例 6 的临时限速值均为 60 km/h,而案例 6 由于限速持续时间增加了 15 min,导致总偏离时间增加了 69 ~ 177 s。

当有轨电车临时限速值一致时,限速持续时间的增加会导致总偏离时间的增长。以案例 1—案例 5 的计算结果作为其他案例优化结果的对比标准,在相同临时限速值下,案例 6—案例 15 总偏离时间的增加情况如图 1 所示。由图 1 可知:两种模式下,总偏离时间均随着限速持续时间的增加而增加;当临时限速值与限速持续时间一致的情况下,相对优先模式的增加幅度较绝对优先模式的增加幅度更大。



注:各案例临时限速值和限速持续时间见表 2。

图 1 在不同限速持续时间下各案例的总偏离时间增加情况

Fig. 1 Situation of total deviation time increases under different speed restriction durations in each case

当限速持续时间一致时,目标值随着临时限速值的降低而增加。在相同限速持续时间情况下,以较高限速值的案例(案例 1、案例 6、案例 11)作为其他案例优化结果的对比标准,其余各案例的总偏离时间增加情况如图 2 所示。由图 2 可知:两种模式

表 3 调整后的有轨电车到发时刻表

Tab.3 Initial train arrival and departure time table after adjustment

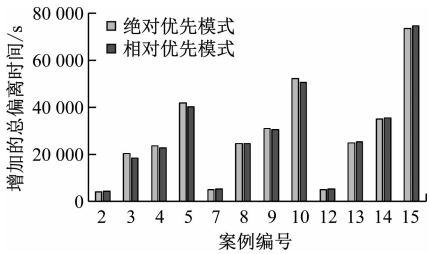
站名	到发状态	调整后的到发时刻														
		列车 1	列车 2	列车 3	列车 4	列车 5	列车 6	列车 7	列车 8	列车 9	列车 10	列车 11	列车 12	列车 13	列车 14	列车 15
游客集散中心站	到达	09:59	10:04	10:09	10:14	10:19	10:24	10:29	10:34	10:39	10:44	10:49	10:54	10:59	11:04	11:09
	发车	10:00	10:05	10:10	10:15	10:20	10:25	10:30	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55	11:00	11:05	11:10
白沙古镇站	到达	10:03	10:08	10:13	10:18	10:23	10:28	10:33	10:38	10:43	10:48	10:53	10:58	11:03	11:08	11:13
	发车	10:03	10:08	10:13	10:18	10:23	10:28	10:33	10:38	10:43	10:48	10:53	10:58	11:03	11:08	11:13
玉水寨站	到达	10:08	10:13	10:18	10:23	10:28	10:33	10:38	10:43	10:48	10:53	10:58	11:03	11:08	11:13	11:18
	发车	10:09	10:14	10:19	10:24	10:29	10:34	10:39	10:44	10:49	10:54	10:59	11:04	11:09	11:14	11:19
东巴谷站	到达	10:12	10:17	10:22	10:27	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55	11:00	11:05	11:10	11:15	11:20	11:25
	发车	10:12	10:17	10:22	10:27	10:35	10:40	10:45	10:50	10:55	11:00	11:05	11:10	11:15	11:20	11:25
玉龙雪山站	到达	10:25	10:31	10:47	10:52	11:00	11:05	11:10	11:15	11:20	11:25	11:30	11:35	11:40	11:45	11:50
	发车	10:25	10:31	10:48	10:53	11:00	11:05	11:10	11:15	11:20	11:25	11:30	11:35	11:40	11:45	11:50

表 4 不同优先模式下各案例的最优解目标值

Tab.4 Optimal solutions for different cases under different priority modes

案例编号	临时限速值/(km/h)	最优目标值/s		两种模式的最优解目标值差值/s
		绝对优先模式	相对优先模式	
1	60	1 767	13 623	11 856
2	50	5 795	17 816	12 021
3	30	21 952	31 968	10 016
4	25	25 329	36 365	11 036
5	15	43 509	53 822	10 313
6	60	1 836	13 800	11 964
7	50	6 811	18 851	12 040
8	30	26 374	38 393	12 019
9	25	32 676	44 226	11 550
10	15	54 126	64 438	10 312
11	60	1 836	13 800	11 964
12	50	6 811	18 851	12 040
13	30	26 722	39 067	12 345
14	25	36 685	49 183	12 498
15	15	75 350	88 533	13 183

注:所有案例的限速持续时间见表 2。



注:各案例临时限速值见表 2。

图 2 在不同临时限速值下各案例的总偏离时间增加情况  
Fig.2 Situation of total deviation time increases under different temporary speed restriction values in each case

下,总偏离时间均随着临时限速值的降低而增加;绝对优先模式的增加幅度较相对优先模式的增加幅度更大。

当限速条件一致时,对比分析绝对优先模式与

相对优先模式对于有轨电车总偏离时间的影响。优化调整后,各案例的相对优先模式相较于绝对优先模式的目标值增加比例如图 3 所示。一般来说,相对优先模式需要考虑交叉口信号灯的影响,有时会增加有轨电车的停留时间,进而造成有轨电车在区间的旅行时间增加,导致总偏离时间也有所增加,这与图 3 中所有条状图均为正值的结果一致。此外,相对优先模式与绝对优先模式在总偏离时间的降低程度方面与临时限速值的关系较大。与相对优先模式下的最优解相比较,当临时限速值较高时(如 60 km/h),绝对优先模式可以降低 86% ~ 87% 的总偏离时间;而当临时限速值较低时(如 15 km/h),绝对优先模式可以降低 14% ~ 19% 的总偏离时间。

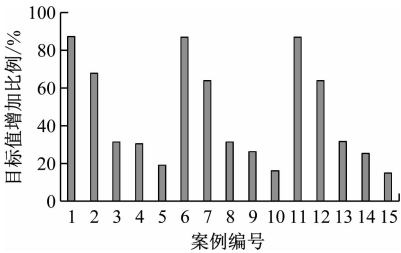


图 3 优化后各案例的相对优先模式相较于绝对优先模式的目标值增加比例  
Fig.3 Target value increase proportion of relative priority mode compared to absolute priority mode in each case after optimization

4 结语

有轨电车在山岭区运行时常会受到恶劣天气的影响。在不同恶劣天气下,有轨电车运营常采用临时限速的方式保证运行安全。为了减小临时限速对有轨电车运行的影响,本文考虑交叉口信号优

先模式对有轨电车区间旅行时间的影响,构建了恶劣天气下有轨电车运行调整混合整数非线性规划模型。基于混合整数规划理论,将模型的非线性项进行重构,获得了混合整数规划模型。本文所构建的模型与算法可以嵌入有轨电车智能化调度指挥系统中,为恶劣天气下的有轨电车自动调整提供理论及技术基础。

以丽江有轨电车 1 号线的线路数据为例进行实例分析。由模型求解结果可知,所提模型及算法可以求解不同恶劣天气下有轨电车的调整时刻表。此外,本文对不同临时限速条件、不同交叉口优先模式的优化结果进行了对比,获得以下结论:

1) 当临时限速值一定时,总偏离时间随着限速持续时间的增加而增加(基于本文案例数据,增加时间为 0 ~ 24 095 s)。

2) 当限速持续时间一致时,总偏离时间随着临时限速值的减小而增大(基于本文案例数据,增加时间为 4 028 ~ 74 733 s)。

3) 在不同程度的恶劣天气下,绝对优先模式与相对优先模式对总偏离时间的降低程度不一致。总体来看,绝对优先模式可以降低 15% ~ 87% 的总偏离时间,但恶劣天气越严重(临时限速值越低)

(上接第 7 页)

鲁棒性的要求。为考察快慢车方案的系统稳态特征,本文针对市域铁路快慢车运行特点,基于 Max-plus 代数法构建市域铁路快慢车运行系统闭环模型。以一段计划开行快慢车的市域铁路为例,从变量输入到系统输出演化求解了列车运行动态转移的全过程,并通过状态转移变量矩阵的求解结果生成列车运行时刻表,分析该系统的稳定性和鲁棒性,实现了 Max-plus 代数法在市域铁路快慢车运行系统上的应用,为快慢车运行计划编制和系统鲁棒性分析提供了一种新的分析模型。目前,所提 Max-plus 代数法模型仅限于在满足已知运行方案要素条件下生成快慢车运行时刻表和系统稳态特性评价,下一步还可深入分析 Max-plus 代数法在快慢车系统鲁棒性优化和列车运行调整方面的研究。

## 参考文献

- [1] 曹志超,袁振洲,李得伟,等.城市轨道交通列车运行图鲁棒性优化模型[J].中国铁道科学,2017,38(3):130.  
CAO Zhichao, YUAN Zhenzhou, LI Dewei, et al. Robust optimization model for train working diagram of urban rail transit[J].

时,绝对优先模式的优势呈下降趋势。

## 参考文献

- [1] 滕飞.城市轨道交通列车运行调整策略研究[J].现代城市轨道交通,2022(11):75.  
TENG Fei. Research on train operation regulation strategy of urban rail transit[J]. Modern Urban Transit, 2022(11):75.  
[2] 张海雷,屈龙,崔姗姗.基于随机性特征与组合仿真模型的有轨电车运行指标分析方法[J].城市轨道交通研究,2022,25(12):152.  
ZHANG Hailei, QU Long, CUI Shanshan. Tram operation indicator analysis method based on randomness feature and combined simulation model[J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(12):152.  
[3] 何利英.有轨电车旅行速度影响因素分析及提升实践[J].城市轨道交通研究,2022,25(9):208.  
HE Liying. Influencing factor analysis and improvement practice of tramway travel speed [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(9):208.  
[4] 刘宏祥,赵晓峰.严寒地区有轨电车冬季运行保障研究[J].城市轨道交通研究,2022,25(增刊1):74.  
LIU Hongxiang, ZHAO Xiaofeng. Tram winter operation safeguard in severe cold areas [J]. Urban Mass Transit, 2022, 25(S1):74.

(收稿日期:2023-04-07)

China Railway Science, 2017, 38(3):130.

- [2] 刘敏,韩宝明.列车运行图可恢复鲁棒性优化模型[J].铁道学报,2013,35(10):1.  
LIU Min, HAN Baoming. Recoverable robust timetabling models for railways[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(10):1.  
[3] 王彩璐,陶跃钢,李志军,等.具有极大时间约束的轨道交通系统的周期分析[J].控制理论与应用,2017,34(10):1380.  
WANG Cailu, TAO Yuegang, LI Zhijun, et al. Periodic analysis for railway transport systems with maximum timing constraints[J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(10):1380.  
[4] 韩云祥,黄晓琼.基于极大代数理论的交通系统稳态性能分析[J].交通运输系统工程与信息,2016,16(3):126.  
HAN Yunxiang, HUANG Xiaorong. Analysis of the steady state performance of traffic system based on max-plus theory[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2016, 16(3):126.  
[5] 瞿驰.基于延迟调整性能的地铁运行图综合质量评估方法[D].北京:北京交通大学,2015.  
QU Chi. Synthetic evaluating method for subway operating diagram based on delay adjusting performance[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.

(收稿日期:2021-04-05)