

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2026.03.012

区间中断下考虑节能的列车运行调整与速度管理一体化优化

袁也¹, 史凌源², 杨欣²

(1. 北京城市轨道交通咨询有限公司, 北京 100068; 2. 北京交通大学系统科学学院, 北京 100044)

摘要: 针对城市轨道交通区间中断场景下列车运行调整与速度管理一体化优化问题, 以列车区间运行时间、区间加速时间、额外停留时间以及列车是否受中断事故影响作为决策变量, 以最小化列车牵引能耗和列车到达终点站的延误时间为目标, 构建混合整数非线性规划(mixed integer nonlinear programming, MINLP)模型, 为应急场景下列车运行恢复提供多目标协同优化框架, 以实现突发事件下列车运行图与速度曲线的快速调整, 保证城市轨道交通系统安全与稳定运行。针对模型中存在的二次非凸约束, 通过泰勒近似方法将 MINLP 模型重构为混合整数二次规划(mixed integer quadratic programming, MIQP)模型, 从而实现商业求解器的有效求解。以北京地铁亦庄线为例, 通过数值实验验证 MIQP 模型在减少列车延误时间和降低列车牵引能耗方面的有效性, 为轨道交通管理者在中断事故下开展列车调度优化与运行控制提供理论依据。

关键词: 城市轨道交通; 列车运行调整; 速度管理; 列车节能运行; 泰勒近似

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2026)03-0093-08

Integrated Optimization of Train Rescheduling and Speed Management Considering Energy Efficiency Under Section Disruption

YUAN Ye¹, SHI Lingyuan², YANG Xin²

(1. Beijing Metro Consultancy Co., Ltd., Beijing 100068;

2. School of Systems Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: To address train rescheduling and speed management under section disruptions for urban rail transit, this study constructs a mixed integer nonlinear programming (MINLP) model with decision variables including section running time, section acceleration time, additional dwell time, and whether a train is affected by a disruption, aiming to minimize train traction energy consumption and terminal arrival delay times, providing a coordinated multi-objective optimization framework for restoring train operations in emergency scenarios, and thereby enabling rapid optimization of train rescheduling and energy-efficient speed profiles and ensuring the safe and stable operation of urban rail transit systems. Considering the quadratic non-convex constraints in the model, we reformulate the MINLP into a mixed integer quadratic programming (MIQP) model through Taylor approximation method, enabling effective solutions via commercial solvers. Utilizing operational data from Beijing Subway Yizhuang Line, numerical experiments validate the effectiveness of the MIQP in reducing train terminal delay time and traction energy consumption. This research provides a theoretical basis for rail transit operators to optimize train dispatching and operational control during disruptions.

Keywords: urban rail transit; train rescheduling; speed management; energy-efficient train operation; taylor approximation

收稿日期: 2025-07-24 修回日期: 2025-12-25

第一作者: 袁也, 男, 硕士, 工程师, 研究方向为城市轨道交通行车组织, yuanye@bii.com.cn

通信作者: 史凌源, 女, 博士研究生, 研究方向为城市轨道交通运营管理, 23111570@bjtu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(72331001)

引用格式: 袁也, 史凌源, 杨欣. 区间中断下考虑节能的列车运行调整与速度管理一体化优化[J]. 都市快轨交通, 2026, 39(3): 93-100.

Yuan Ye, Shi Lingyuan, Yang Xin. Integrated optimization of train rescheduling and speed management considering energy efficiency under section disruption[J]. Urban rapid rail transit, 2026, 39(3): 93-100.

城市轨道交通系统具有运量大、频次高、安全准时等优势,已成为城市公共交通的核心组成部分^[1-3]。随着线路网络的持续扩张,城市轨道交通的列车运行呈现高密度和高速度的特征。这种情况下,一旦发生中断事故,极易导致列车偏离正常运行状态,造成非正常停车与大范围的列车延误。此外,随着城市轨道交通运行里程的增加,其能耗过高的问题也日益突出^[4]。因此,为了提升轨道交通应急管理运营能效,研究中断场景下列车运行调整与速度管理具有重要意义。

近年来,围绕城市轨道交通列车调度与速度管理优化,国内外学者开展了一系列的研究。Yang等^[5]以最小化列车净能耗、乘客总等待时间以及二者的均方误差为目标,构建了整数规划模型,通过优化列车到发时间来实现列车的节能运行。Su等^[6]通过决策列车的运行时间、停站时间与发车间隔,构建了列车时刻表与驾驶策略协同优化模型,并基于北京地铁亦庄线验证了方法的有效性。Ning等^[7]通过调整列车停站时间与发车间隔以实现多列车的协同牵引与制动,从而降低列车的能耗,并使用遗传算法进行求解。刘硕等^[8]考虑单列车多站间的节能优化,以最小化列车运行能耗为目标,基于遗传算法实现不同区间的运行时间的优化。柏赞等^[9]提出一种基于滚动优化的列车协同控制方法,将整体问题分解为逐一区间局部优化,通过优化停站列车在下一区间的驾驶策略,实现列车的净能耗最小。在干扰场景下列车运行调整与速度曲线优化的研究中,Yin等^[10]提出面向地铁线路意外干扰下列车运行调整模型,考虑乘客时变动态特征与能耗,设计了动态近似规划求解模型。

综上所述,对城市轨道交通列车调度与速度曲线一体化问题的研究,学者们主要关注常规运营调整下的列车能耗最小化目标,鲜有研究在区间中断场景下列车牵引能耗与延误时间的多目标协同。而关于突发事件下运营调整优化问题,现有研究未能充分考虑在应急中断场景下匹配运行调整策略的列车节能潜力。针对以上两方面研究不足,亟须在城市轨道交通系统的应急中断场景中同时优化列车运行调整策略与速度管理方案。因此,本文研究中断场景下列车运行调整与速度管理一体化优化问题,构建多目标的混合整数非线性模型(mixed integer nonlinear programming, MINLP),为应急场景下列车运行恢复提供多目标协同优化框架,以提高城市轨道交通系统的韧性与能源效率。

1 问题描述

本文考虑一条包含 $K+1$ 个车站的城市轨道交通线路,除起始站之外共包含 K 个区间和车站。列车从起始站发车后,途径下一个列车区段与下一个停站均用 k 来表示。本文定义 l_k 为区间 k 的长度; I 为列车的集合; i 为列车的索引。列车在车站区间运行是采用“牵引-惰行-制动”的三阶段运行模式,列车牵引能耗受列车加速时间的影响,具体如图1所示。

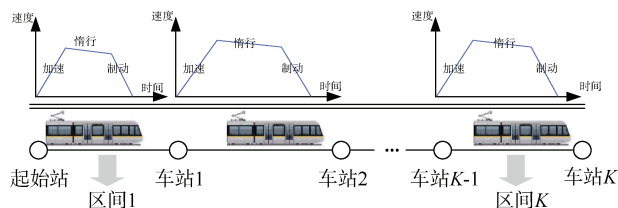


图1 线路布局与列车速度曲线示意

Figure 1 Illustration of the line layout and train speed profile

列车运行过程中可能会遇到干扰,引发区间中断事故。在此期间,列车在中断区段无法通行,需在对应车站停靠等待,直至事故结束之后才可通行。假设中断发生在车站 $\bar{k}$ 与车站 $\bar{k}+1$ 之间,中断起始时刻与结束时刻分别为 W_1 与 W_2 ,中断持续时间为 $\bar{W}$,列车时刻表调整如图2所示。其中,本文研究的是列车2与列车3受中断事故影响,需要在车站 $\bar{k}$ 停留。

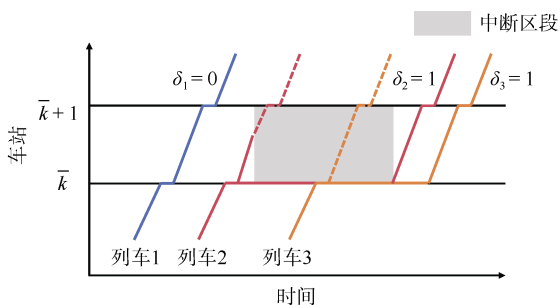


图2 列车调整的时刻表示意

Figure 2 Illustration of the rescheduled train timetable

区间中断事故发生后需要及时调整列车时刻表,以减少中断事故对列车运营的负面影响。本文在保证列车总区间运行时间不变的前提下,重新分配各个站间运行时间,以最小化列车总牵引能耗与列车到达终点站的延误时间为目标,研究城市轨道交通列车在区间中断场景下列车时刻表与速度曲线一体化优化问题。具体假设如下:① 列车运行的加速度、阻力系数、减速度与电力转换系数为固定常数。② 列车在非中断

事故车站的停留时间为固定常数, 列车总区间运行时间及发车时间间隔为固定常数。③ 列车在区间运行的速度曲线采用以“牵引-惰行-制动”模式运行。

2 数学模型

本节构建了中断场景下列车运行调整与速度管理一体化优化模型。模型的决策变量包括:

- 1) 连续决策变量 $T_{i,k}$, 表示列车 i 在区间 k 的运行时间。
- 2) 连续决策变量 $t_{i,\bar{k}}$, 表示列车 i 在中断区间的起始车站 $\bar{k}$ 的额外停留时间。
- 3) 二元决策变量 δ_i , 表示列车 i 是否受中断事故的影响, 如果是则为 1, 反之为 0。
- 4) 连续决策变量 $t_{i,k}^a$, $t_{i,k}^b$ 与 $t_{i,k}^c$, 分别表示列车 i 在区间 k 的加速时间、制动时间与惰行时间。

2.1 模型目标函数

在城市轨道交通列车运行调整与速度管理问题中, 为降低中断事故带来的负面影响与列车能耗, 本文考虑以最小化牵引能耗与最小化列车到达终点站的延误时间作为目标函数。

- 1) 最小化牵引能耗。为了减少列车运行的牵引能耗, 将目标所有列车在所有区间的牵引能耗之和 E 设为

$$E = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \frac{ma^2(t_{i,k}^a)^2}{2\theta} \quad (1)$$

式中, m 为列车质量; θ 为电能转为动能的转换系数; a 为列车的加速度。

- 2) 最小化列车到达终点站的延误时间。在区间运行中断场景中, 调整后的列车时刻表需要在防止列车之间的运行冲突的基础上, 同时最小化列车到达终点站的延误时间。由于假设列车的总区间运行时间与非中断事故车站的停留时间保持不变, 仅需要考虑最小化列车在事故车站的额外停留时间 $t_{i,\bar{k}}$ 。本文采用额外停留时间的二次项作为目标函数, 主要基于其在应急调度中的优化特性考量。与线性函数相比, 二次目标函数实质上是一个加权最小二乘问题, 其优化过程会优先分配计算资源以削减数值较大的列车延误。这与应急场景下减少大规模延误以快速恢复运行秩序的目标高度一致。此外, 当模型存在多个延误水平相近的可行解时, 二次目标函数因其严格的凸性, 能自然导向其中牵引能耗更低的方案, 从而在确保运营恢复的前提下, 兼顾能源效率的优化。因此, 为了最小化

列车到达终点站的延误, 将列车在事故车站产生的额外停留时间的二次项之和 D 设为

$$D = \sum_{i \in I} t_{i,\bar{k}}^2 \quad (2)$$

为实现列车牵引能耗与延误时间的多目标协同优化, 本文采用线性加权法将上述两个子目标转化为单一的目标函数。由此, 总目标函数 Z 可表示为

$$\min Z = w_1 \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \frac{ma^2(t_{i,k}^a)^2}{2\theta} + w_2 \sum_{i \in I} t_{i,\bar{k}}^2 \quad (3)$$

式中, w_1 与 w_2 分别为牵引能耗与列车额外停站时间的权值系数。

2.2 约束条件

模型的约束条件包括速度曲线约束、周期运行时间约束、中断事故相关约束与区间运行时间约束。

2.2.1 速度曲线约束

列车在任一区间采用“牵引-惰行-制动”三阶段运行模式。定义 a 为列车的加速度; b 为列车的减速度; r 为阻力系数。定义中间变量 $v_{i,k}^a$ 为列车 i 在区间 k 的加速转惰行的速度; $v_{i,k}^b$ 为列车 i 在区间 k 的惰行转制动的速度。具体而言, 列车在区间内以加速度 a 从速度 0 加速至 $v_{i,k}^a$, 经过惰行一段距离后速度降为 $v_{i,k}^b$, 并以减速度 b 制动直至速度为 0。为确保列车三阶段运行模式的物理可行性, 其运行时间、速度变化及区间距离需满足以下运动学关系, 具体表达式为

$$T_{i,k} = t_{i,k}^a + t_{i,k}^b + t_{i,k}^c \quad \forall i \in I \quad k \in K \quad (4)$$

$$at_{i,k}^a = bt_{i,k}^b + rt_{i,k}^c \quad \forall i \in I \quad k \in K \quad (5)$$

$$l_k = \frac{a(t_{i,k}^a)^2}{2} + \frac{b(t_{i,k}^b)^2}{2} + \frac{(at_{i,k}^a)^2 - (bt_{i,k}^b)^2}{2r} \quad \forall i \in I \quad k \in K \quad (6)$$

式(4)表示列车 i 在区间 k 的运行时间 $T_{i,k}$ 等于列车在该区间的加速时间、惰行时间与制动时间之和; 式(5)表示列车加速转惰行的速度等于列车在惰行的速度损失与惰行转制动的速度之和; 式(6)表示区间的长度等于列车加速、惰行与制动距离之和。

2.2.2 周期运行时间约束

在城市轨道交通的单向运行过程中, 列车在所有区间的运行时间、站点停靠时间与折返作业之和等于列车周期运行时间的一半, 即

$$\sum_{k \in K} (T_{i,k} + \bar{p}_{i,k}) + t_{\zeta} = \frac{C_T}{2} \quad \forall i \in I \quad (7)$$

式中, t_{ζ} 为列车折返时间; $\bar{p}_{i,k}$ 为列车 i 在车站 k 的计划停留时间; C_T 为列车周期运行时间。约束式(7)表示在正常运行情况下列车运行时间之和应为定值, 旨在最小化列车运行能耗为目标前提下, 防止列车运行时间无限增加。区间通行中断场景仅影响事故车站的额外停留时间, 该约束仍成立。此外, 列车周期运行时间是根据乘客需求计算得到的。

2.2.3 中断事故相关约束

为确保列车运行安全, 列车运行区段与中断区段不得重叠。列车 i 到达事故车站的 3 种情况如图 2 所示。已知中断区段在车站 $\bar{k}$ 与 $\bar{k}+1$ 之间, 起止时间分别为 W_1 与 W_2 。由图 2 可知, 列车 1 的运行区段与中断区段没有冲突, 不受中断区段影响, 列车调度方案可行, 即 $\delta_1=0$; 列车 2 到达车站 $\bar{k}$ 时中断尚未开始, 但在车站 $\bar{k}$ 与 $\bar{k}+1$ 区间运行时会与中断事故发生冲突, 仍然受中断事故影响, 即 $\delta_2=1$; 列车 3 到达事故车站 $\bar{k}$ 时, 中断事故已经开始, 需要等待事故结束方可通行, 此时 $\delta_3=1$ 。对于后 2 种情况, 为防止列车运行区段与中断区段之间的冲突, 列车需要在车站 $\bar{k}$ 等待, 直至中断事故结束。

根据上述分析, 列车运行区段与中断区段的无冲突约束可定义为

$$d_i + \sum_{k=1}^{\bar{k}} (T_{i,k} + \bar{p}_{i,k}) + t_{i,\bar{k}} \geq W_2 - (1 - \delta_i) \cdot M \quad \forall i \in I \quad (8)$$

$$d_i + \sum_{k=1}^{\bar{k}} (T_{i,k} + \bar{p}_{i,k}) + t_{i,\bar{k}} \leq W_1 + \delta_i \cdot M \quad \forall i \in I \quad (9)$$

$$d_i + \sum_{k=1}^{\bar{k}+1} T_{i,k} + \sum_{k=1}^{\bar{k}} \bar{p}_{i,k} + t_{i,\bar{k}} \leq W_1 + \delta_i \cdot M \quad \forall i \in I \quad (10)$$

式中, d_i 为列车 i 在起始站的出发时间; 车站 $\bar{k}$ 与 $\bar{k}+1$ 为中断区段的起止车站; M 为足够大的常数。

式(8)表示列车 i 受中断事故影响, 即 $\delta_i=1$, 则强制要求列车 i 在事故车站 $\bar{k}$ 的出发时刻不小于中断结束时间 W_2 ; 反之, 如果列车 i 不受中断事故影响, 则该约束不起作用。式(9)表示如果列车 i 不受中断事故影响, 即 $\delta_i=0$, 则列车 i 从事事故车站 $\bar{k}$ 的出发时刻不大于中断开始时间 W_1 ; 反之, 该约束不起作用。同理, 式(10)表示当列车 i 不受中断事故影响, 列车 i 到达事故车站 $\bar{k}+1$ 的时刻不大于中断开始时间 W_1 。

2.2.4 区间运行时间约束

列车在各区间运行时间应满足

$$\bar{L}_k \leq T_{i,k} \leq \bar{U}_k \quad \forall i \in I \quad k \in K \quad (11)$$

式中, $\bar{L}_k$ 为区间 k 的最短运行时间; $\bar{U}_k$ 为区间 k 的最长运行时间。约束式(11)表示列车 i 在区间 k 的运行时间应在运行时间的上界 $\bar{U}_k$ 与下界 $\bar{L}_k$ 之间。

2.2.5 列车运行间隔约束

为保证列车运行安全, 相邻两个列车在同一车站发车的发车间隔应不小于最小发车间隔, 同理相邻车次到达同一车站的到达时间应不小于最小到达时间间隔。由于列车运行时间仅与区间加减速度、区段长度有关, 意味着不同列车在同一区间的运行时间相同, 所以需要保证列车在中断车站处发车间隔与到站间隔满足安全发车距离 h_{ad} , 即

$$d_{i+1} + \sum_{k=1}^{\bar{k}} (T_{i+1,k} + \bar{p}_{i+1,k}) + t_{i+1,\bar{k}} - d_i - \sum_{k=1}^{\bar{k}} (T_{i,k} + \bar{p}_{i,k}) - t_{i,\bar{k}} \geq h_{ad} \quad \forall i, i+1 \in I \quad (12)$$

$$d_{i+1} + \sum_{k=1}^{\bar{k}+1} T_{i+1,k} + \sum_{k=1}^{\bar{k}} \bar{p}_{i+1,k} + t_{i+1,\bar{k}} - d_i - \sum_{k=1}^{\bar{k}+1} T_{i,k} - \sum_{k=1}^{\bar{k}} \bar{p}_{i,k} - t_{i,\bar{k}} \geq h_{ad} \quad \forall i, i+1 \in I \quad (13)$$

约束式(12)表示在事故车站 $\bar{k}$, 相邻两辆列车的发车间隔大于等于安全发车间隔 h_{ad} 。约束(13)表示相邻两辆列车在事故车站 $\bar{k}+1$ 的到站间隔应大于等于安全到站间隔 h_{ad} 。

2.3 模型构建

根据上述优化目标与约束条件描述, 本文构建了列车运行调整与速度管理模型, 即

$$\begin{aligned} \min w_1 \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \frac{ma^2 (t_{i,k}^a)^2}{2\theta} + w_2 \sum_{i \in I} t_{i,\bar{k}}^2 \\ \text{s.t.} \quad \text{式(4)~式(13)} \end{aligned} \quad (14)$$

模型式(14)是一个 MINLP 模型, 目标函数与约束均呈现非线性的特性, 属于 NP-hard 问题, 且存在二次非凸约束, 难以直接使用商业求解器求解。模型式(14)的非线性特性主要来自约束中关于加速时间、惰行时间与制动时间的计算, 以及目标函数中加速时间与延误时间的二次项。

3 模型重构

本节将模型式(14)重构为混合整数二次规划(mixed

integer quadratic programming, MIQP)模型, 具体如下。

模型式(14)中速度管理的非线性特性来自加速时间 $t_{i,k}^a$ 。根据约束式(4)~式(6), 加速时间 $t_{i,k}^a$ 与减速时间 $t_{i,k}^b$ 可由区间运行时间 $T_{i,k}$ 与惰行时间 $t_{i,k}^c$ 表示, 即

$$t_{i,k}^a = A_k^a T_{i,k} - B_k^a t_{i,k}^c \quad (15)$$

$$t_{i,k}^b = A_k^b T_{i,k} - B_k^b t_{i,k}^c \quad (16)$$

其中, A_k^a 、 B_k^a 、 A_k^b 和 B_k^b 的具体表达式分别为

$$\begin{aligned} A_k^a &= \frac{b}{a+b} & B_k^a &= \frac{a+r}{a+b}-1 \\ A_k^b &= \frac{a}{a+b} & B_k^b &= \frac{a+r}{a+b} \end{aligned} \quad (17)$$

进一步, 列车惰行时间 $t_{i,k}^c$ 与区间运行时间 $T_{i,k}$ 之间存在非线性关系。定义 $f_{i,k}(\cdot)$ 来表征列车 i 在区间 k 上惰行时间 $t_{i,k}^c$ 随区间运行时间 $T_{i,k}$ 调整的非线性映射关系的函数, 结合区间长度 l_k , $t_{i,k}^c$ 具体表达为

$$t_{i,k}^c = f_{i,k}(T_{i,k}) = \sqrt{\frac{2rl_k}{C_k} - \frac{A_k}{C_k} T_{i,k}^2} \quad (18)$$

其中, A_k 与 C_k 的表达式分别为

$$A_k = (A_k^a)^2(ar+a^2) + (A_k^b)^2(br-b^2) \quad (19)$$

$$C_k = (ar+a^2)(B_k^a)^2 + (br-b^2)(B_k^b)^2 \quad (20)$$

利用泰勒近似方法^[11]对式(18)线性化处理, 可得

$$\begin{aligned} t_{i,k}^c &= f_{i,k}(T_{i,k}^0) + (T_{i,k} - T_{i,k}^0) \cdot f'_{i,k}(T_{i,k}^0) \\ &= (1-p_k) \times T_{i,k} + q_k \end{aligned} \quad (21)$$

式中, $T_{i,k}^0$ 为列车 i 在区间 k 进行泰勒展开的初始标称运行时间, 具体为区间运行时间的上界 $\bar{U}_k$ 与下界 $\bar{L}_k$ 的中值点, 即 $T_{i,k}^0 = (\bar{U}_k + \bar{L}_k)/2$; $f'_{i,k}(\cdot)$ 为非线性函数 $f_{i,k}(\cdot)$ 对区间运行时间变量的一阶导数; p_k 和 q_k 为泰勒展开后已知的线性化系数, 具体表示为 $p_k = 1 - f'_{i,k}(T_{i,k}^0)$, $q_k = f_{i,k}(T_{i,k}^0) - f'_{i,k}(T_{i,k}^0) \times T_{i,k}^0$ 。

由此, 模型式(14)中关于列车牵引能耗的目标函数 E 可推导得

$$E = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (\pi_{2,k} T_{i,k}^2 + \pi_{1,k} T_{i,k} + \pi_{0,k}) \quad (22)$$

其中, 列车 i 在区间 k 二次、一次与常数系数可分别表示为

$$\pi_{2,k} = \frac{ma^2[A_k^a - B_k^a(1-p_k)]^2}{2\theta} \quad (23)$$

$$\pi_{1,k} = \frac{ma^2 B_k^a q_k [B_k^a(1-p_k) - A_k^a]}{\theta} \quad (24)$$

$$\pi_{0,k} = \frac{ma^2 (B_k^a q_k)^2}{2\theta} \quad (25)$$

由此, 模型式(14)可重构为

$$\begin{aligned} \min w_1 \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} (\pi_{2,k} T_{i,k}^2 + \pi_{1,k} T_{i,k} + \pi_{0,k}) + w_2 \sum_{i \in I} t_{i,k}^2 \\ \text{s.t.} \quad \text{式(7)~式(13)} \end{aligned} \quad (26)$$

重构模型式(26)为 MIQP 模型, 其中目标函数为二次函数, 约束条件为线性约束, 可以使用商业求解器直接求解。

4 算例分析

以北京地铁亦庄线作为实验算例, 如图 3 所示。亦庄线全长 23.23 km, 除起始站外共有 13 座车站与 13 个区段。设置列车停站时间为 30 s, 列车安全发车间隔 h_{ad} 为 120 s, 非高峰列车发车间隔为 300 s。亦庄线的线路参数如表 1 所示, 列车运行参数如表 2 所示^[11]。



图 3 亦庄线示意

Figure 3 Illustration of the Yizhuang Line

表 1 地铁亦庄线的线路基本参数

Table 1 Line parameters of the Yizhuang Line

区间	长度/ m	最小运行 时间/s	最大运行 时间/s	p_k	q_k
宋家庄—肖村	2 631	165.00	195.00	0.251	-71.104
肖村—小红门	1 275	90.00	116.00	-0.099	-88.455
小红门—旧宫	2 366	143.00	169.00	0.152	-83.566
旧宫—亦庄桥	1 982	132.00	156.00	0.164	-74.762
亦庄桥—文化园	993	88.00	104.00	0.060	-63.164
文化园—万源东	1 728	108.00	135.00	-0.051	-97.216
万源东—荣京东	1 090	98.00	120.00	0.190	-52.612
荣京东—荣昌东	1 355	98.00	122.00	0.014	-78.935
荣昌东—同济南	2 337	143.00	169.00	0.161	-81.687
同济南—经海	2 301	146.00	174.00	0.202	-74.554
经海—次渠南	2 055	132.00	156.00	0.138	-79.969
次渠南—次渠	1 281	100.00	119.00	0.069	-70.743
次渠—火车站	1 334	103.00	122.00	0.084	-70.636

表 2 其他参数信息

Table 2 Other parameters information

参数	数值
m/kg	287 080
t_c/s	180
C_T/s	4 572
h_{ad}/s	120
θ	0.7
$a/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.5
$b/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.8
$r/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	0.05

在北京地铁亦庄线中,假设区间中断事故发生亦庄桥站至亦庄文化园站,事故持续时间为 5 min。中断发生在非高峰期,列车数为 36 辆。表 3 展示事故发生后实际区间运行时间与优化的区间运行时间对比。其中 Δ 为优化后的运行时间相比于实际运行时间的变化幅度,计算式为 $\Delta=100\%\times(T_{\text{优化}}-T_{\text{实际}})/T_{\text{实际}}$ 。

由表 3 可知,在周期运行时间为 4 572 s 的情况下,列车总牵引能耗降低 3.50%,线路中区间运行时间实现不同程度的调整,如宋家庄至肖村站的区间运行时间减少 25 s,在万源东与荣京东站的区间运行时间增加 12 s。MIQP 模型通过优化分配给线路某些区间的列车运行时间,进而调整列车的加速时间,实现列车速度曲线的优化。

表 3 实际和优化后列车运行时间对比

Table 3 Comparison of actual and optimized train running times for each section

区间	实际运行时间/s	优化后运行时间/s	$\Delta/\%$
宋家庄—肖村	190.00	165.00	-13.16
肖村—小红门	108.00	116.00	7.41
小红门—旧宫	157.00	144.75	-7.80
旧宫—亦庄桥	135.00	140.60	4.15
亦庄桥—文化园	98.00	104.00	6.12
文化园—万源东	124.00	131.15	5.77
万源东—荣京东	108.00	120.00	11.11
荣京东—荣昌东	110.00	122.00	10.91
荣昌东—同济南	154.00	144.55	-6.14
同济南—经海	162.00	146.00	-9.88
经海—次渠南	146.00	140.95	-3.46
次渠南—次渠	110.00	119.00	8.18
次渠—火车站	114.00	122.00	7.02
列车牵引能耗/(10 ⁹ J)	191.57	184.87	-3.50

为探究不同中断持续时间对列车运行的影响,在高峰时段与非高峰时段下进行不同中断持续时间下列车牵引能耗与列车延误时间的对比实验,如表 4 所示。

高峰时段列车发车间隔为 180 s。

表 4 不同中断持续时间对列车运行的影响对比

Table 4 Comparison of impacts on train operation under different disruption durations

中断发生时间	中断持续时间/s	列车总牵引能耗/(10 ⁹ J)	列车到达终点站延误时间/s	求解时间/ms
高峰	150	184.71	0.25	9
	300	184.89	48.99	10
	450	185.31	398.82	9
	600	185.69	1 143.02	10
	750	186.01	2 267.43	9
	900	186.28	3 787.22	11
	1 200	186.67	7 978.86	9
	1 800	186.82	21 009.04	9
非高峰	150	184.71	0.00	10
	300	184.87	35.91	9
	450	184.97	211.72	9
	600	185.11	501.68	10
	750	185.23	916.06	10
	900	185.31	1 480.38	10
	1 200	185.44	2 987.56	11
	1 800	185.48	7 522.44	9

由表 4 可知,列车到达终点站的延误时间随着中断持续时间的延长而增加,并且当中断持续时间超过 750 s 后,延误时间急剧增加。列车总牵引能耗亦随中断持续时间增加,但增幅低于列车延误时间的变化。相比于非高峰时段,中断事故对高峰时段列车运行的影响更大,延误时间平均是非高峰时段的 2.29 倍,列车牵引能耗相比于非高峰时段平均增加 0.23%。由此可知,高峰时段对列车延误时间的影响更大,而列车牵引能耗更多受列车区间运行时间的影响,与列车发车间隔无关。此外,根据表 4 可知,MIQP 模型的求解时间基本在 10 ms 左右,表明本文的重构方法可以满足中断场景下对调度决策的高实时性要求,验证了本文方法的有效性。

为直观展示 MIQP 模型在中断场景下应急调度效果,本文选取非高峰时段下中断持续时间为 1 800 s 的场景,对原始列车运行图与调整后的列车运行图进行对比,如图 4~5 所示。图中灰色矩形区域表示发生在亦庄桥站与亦庄文化园站之间的区间中断事故。与图 4 所示的原始列车运行图相比,图 5 调整后的列车运行图同步优化了列车区间运行时间与受影响列车的停留时间。具体而言,受中断影响的列车将在中断车站进行必要等待,直至中断事故结束,从而避免列车运行区段与中断区段发生重叠。

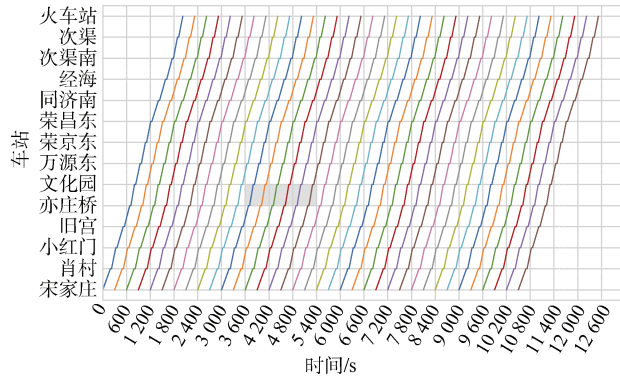


图4 原始列车运行图

Figure 4 Original train timetable

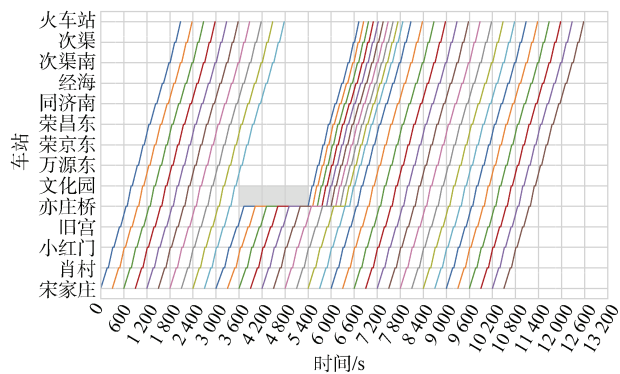


图5 调整后列车运行图

Figure 5 Rescheduled train timetable

对于轨道交通管理者, 权衡列车延误时间与列车牵引能耗至关重要。采用加权求和法分析二者之间的关系, 目标函数归一化处理之后可重新表述为

$$\min w_1 \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} + w_2 \frac{D - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (27)$$

式中, w_1 与 w_2 均为权值系数; $E_{\max}$ 与 $E_{\min}$ 分别为列车牵引能耗的最大值与最小值, 最大值为极端情况下列车加速时间接近列车最大运行时间, 最小值为加速时间趋于 0; $D_{\max}$ 与 $D_{\min}$ 分别为列车到达终点站延误时间的最大值与最小值, 最小值为列车准点到达的零延误, 最大值为每一个列车均受中断影响产生的延误时间。将 w_1 从 0.1 增加到 0.9, w_2 从 0.9 减少到 0.1, 步长为 0.1, 通过加权求和法获得帕累托最优点。以非高峰时段下中断持续时间为 1 800 s 的场景为例, 得到帕累托前沿曲线如图 6 所示。

图 6 展示了在不同权值组合(w_1, w_2)下, 列车牵引能耗与到达终点站延误时间之间的帕累托权衡关系。帕累托前沿上的最优解分布并不均匀, 反映了目标之间的权衡关系存在非线性特征。表 5 量化了上述权衡关系, 通过对比不同权重组合下的优化结果与未

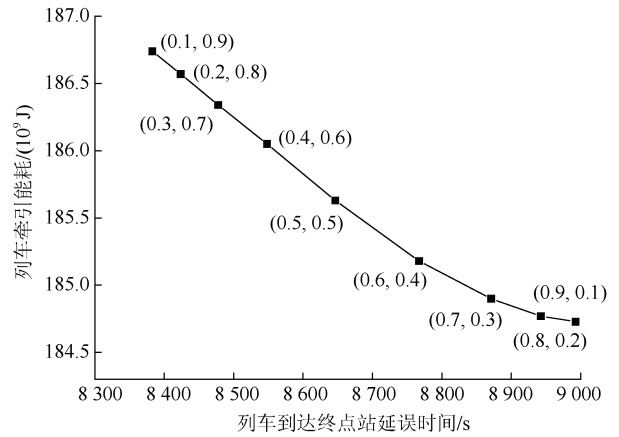


图6 不同权值组合的帕累托前沿曲线

Figure 6 Pareto frontier under different weight combinations

表5 不同权值组合下与未优化结果对比

Table 5 Comparison with unoptimized results under different weight combinations

权值组合	相对初始列车牵引能耗/%	相对初始列车延误时间/%
(0.1, 0.9)	↓ 2.52	↓ 53.43
(0.2, 0.8)	↓ 2.61	↓ 53.20
(0.3, 0.7)	↓ 2.73	↓ 52.90
(0.4, 0.6)	↓ 2.88	↓ 52.50
(0.5, 0.5)	↓ 3.10	↓ 51.96
(0.6, 0.4)	↓ 3.34	↓ 51.29
(0.7, 0.3)	↓ 3.48	↓ 50.72
(0.8, 0.2)	↓ 3.55	↓ 50.32
(0.9, 0.1)	↓ 3.57	↓ 50.04
平均	↓ 3.08	↓ 51.82

优化时的列车牵引能耗及延误时间, 直观呈现了在不同优化侧重点下能耗和延误时间变化的百分比。当决策者高度关注恢复准点率时, 即在权值组合(0.1, 0.9)下, MIQP 模型将倾向于减少延误时间, 其降幅达到最大值 53.43%, 而列车牵引能耗同步降低 2.52%; 当权值策略明显偏向节能目标时, 如权值组合(0.9, 0.1), 目标函数则会主要致力于降低牵引能耗, 其降幅最大值达 3.57%, 同时列车延误时间降低 50.04%。由表 5 可知, 相比于优化前, 列车牵引能耗平均降低 3.08%, 延误时间平均减少 51.82%。由此可见, 运营管理者可通过调整权值参数, 结合实际运营需求(如中断严重程度或能源成本等), 在延误控制与能耗节约之间实现合理权衡, 进而找到最适合当前应急场景的优化策略。

5 结论与展望

本文针对区间中断场景下列车运行调整与速度管

理一体化问题,构建了多目标优化框架,通过实例分析得出以下结论:

1) 提出了高实时性的模型重构方法。针对原模型中的二次非凸约束,采用泰勒近似将其重构为混合整数二次规划模型。实验表明,该方法求解时间稳定在10 ms左右,满足应急场景下高实时性的决策要求。

2) 实现了能耗与延误的高效协同优化。模型通过微调区间运行时间重塑列车速度曲线。相较于未优化方案,该模型使列车牵引能耗平均降低了3.08%,到达终点站的延误时间平均大幅减少了51.82%,提升了轨道交通系统的应急恢复效率。

3) 构建了基于帕累托前沿的量化决策框架:通过多目标加权分析发现,侧重准点率时最高可减少53.43%的延误,偏重节能时最大可降低3.57%的能耗。该框架可辅助运营管理者在安全、准点、节能等实际需求下,选择系统最优应急恢复方案。

在未来的研究中,考虑进一步把多列车再生制动能的优化纳入到中断场景下列车运行调整模型中,通过构建多列车协同运行优化模型,深入挖掘应急管理下列车节能的潜力。此外,城市轨道交通系统是一个复杂的系统,时刻受外界随机的干扰,未来研究可以探究在随机中断场景下列车运行调整与速度管理问题,以生成鲁棒的列车时刻表与速度曲线方案,提高城市轨道交通系统的韧性。

参考文献

[1] 侯秀芳, 冯晨, 燕汉民, 等. 2024年中国内地城市轨道交通运营线路概况[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(1): 13-19.
Hou Xiufang, Feng Chen, Yan Hanmin, et al. Overview of urban rail transit operations in Chinese China's mainland in 2024[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(1): 13-19.

[2] 袁也, 徐皓, 王悉, 等. 基于量子计算的城市轨道交通网络末班车衔接优化[J]. 都市轨道交通, 2024, 37(2): 139-145.
Yuan Ye, Xu Hao, Wang Xi, et al. Quantum computing-based optimization for the last-train connection planning problem in urban rail transit networks[J]. Urban rapid rail transit, 2024, 37(2): 139-145.

[3] 袁也, 徐皓, 卢学永, 等. 基于量子计算的灵活编组列车大小交路混合运行优化方法[J]. 山东科学, 2024, 37(6): 94-103.
Yuan Ye, Xu Hao, Lu Xueyong, et al. Quantum computing-based optimization method for train short-turn routing with flexible composition[J]. Shandong science, 2024, 37(6):

94-103.

- [4] 王若愚, 周慧娟, 秦勇, 等. 基于再生制动能高效利用的列车运行方案优化[J]. 铁道运输与经济, 2024, 46(12): 76-87.
Wang Ruoyu, Zhou Huijuan, Qin Yong, et al. Optimization of train operation plans based on efficient utilization of regenerative braking energy[J]. Railway transport and economy, 2024, 46(12): 76-87.
- [5] Yang Xin, Wu Jianjun, Sun Huijun, et al. Performance improvement of energy consumption, passenger time and robustness in metro systems: a multi-objective timetable optimization approach[J]. Computers & industrial engineering, 2019, 137: 106076.
- [6] Su Shuai, Wang Xuekai, Cao Yuan, et al. An energy-efficient train operation approach by integrating the metro timetabling and eco-driving[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2020, 21(10): 4252-4268.
- [7] Ning Jingjie, Zhou Yonghua, Long Fengchu, et al. A synergistic energy-efficient planning approach for urban rail transit operations[J]. Energy, 2018, 151: 854-863.
- [8] 刘硕, 刘旭, 谢浩, 等. 城轨列车运行时分节能优化方法[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(5): 145-150.
Liu Shuo, Liu Xu, Xie Hao, et al. Optimization of train running time for saving energy in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2019, 32(5): 145-150.
- [9] 柏赞, 袁博, 李佳杰, 等. 基于滚动优化的地铁列车节能运行协同控制方法[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(3): 163-170.
Bai Yun, Yuan Bo, Li Jiajie, et al. Cooperative control strategy for energy saving operation of metro train based on rolling optimization[J]. China railway science, 2020, 41(3): 163-170.
- [10] Yin Jiateng, Tang Tao, Yang Lixing, et al. Energy-efficient metro train rescheduling with uncertain time-variant passenger demands: an approximate dynamic programming approach[J]. Transportation research part B: methodological, 2016, 91: 178-210.
- [11] Yang Songpo, Wu Jianjun, Yang Xin, et al. Energy-efficient timetable and speed profile optimization with multi-phase speed limits: Theoretical analysis and application[J]. Applied mathematical modelling, 2018, 56: 32-50.

(编辑: 王艳菊)