

地铁列车到发均衡与节能协同优化模型

徐培娟¹, 曹冉¹, 王旭东², 秦阳¹, 彭辉¹

(1. 长安大学运输工程学院, 西安 710064; 2. 南京地铁运营有限责任公司, 南京 210046)

摘要:【目的】随着轨道交通运营环境的改变,列车运行延误事件频发,不仅增加乘客旅行时间和列车能耗,也影响列车在车站的到发均衡性。针对轨道交通列车实时调整问题,研究列车区间晚点情况下的列车均衡到发调整与列车节能优化策略。【方法】以列车到发均衡性偏差和终点到达时间偏差最小、总能耗最小为双目标函数,综合考虑列车区间运行约束、车站运行约束和列车牵引特性等约束条件,建立列车运行调整与节能控制协同优化模型。在模型求解过程中,首先采用通用化铁路仿真软件获取不同区间运行时间下的列车能耗数据集;然后改进设计 NSGA-II 算法,得到列车运行“总能耗-运行图总偏差”的 Pareto 前沿;最后以南京地铁某线路为实例进行验证,得出晚点干扰下不同能耗和总偏差的调整方案。【结果】与传统赶点运行图调整方案相比,本文所提方案的列车运行能耗降低 18.93%,列车到发均衡性提高 8.65%,终点站晚点时间减少 4.48%,均优于赶点方案。研究表明,基于双目标优化的列车运行调整与节能控制协同模型,能够有效平衡列车运行能耗与运行图偏差,在保证运行图秩序的同时实现节能优化。【结论】该方法可为轨道交通列车晚点恢复过程中的运行调整与节能控制提供理论依据和技术支持。

关键词:城市轨道交通; 节能运行; 到发均衡; 列车延误; NSGA-II 算法; 时刻表优化

中图分类号:U231.92 **文献标识码:**A **DOI:**10.13238/j.issn.1004-2954.202410120007

Collaborative Optimization Model of Metro Train Arrival-Departure Equilibrium and Energy Saving

XU Peijuan¹, CAO Ran¹, WANG Xudong², QIN Yang¹, PENG Hui¹

(1. School of Transportation Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Nanjing Metro Operation Limited Liability Company, Nanjing 210046, China)

Abstract: [Objective] As the operating environment of rail transit changes, train delays occur frequently, which not only increase passenger travel time and train energy consumption but also affect the equilibrium of train arrivals and departures at stations. To address real-time train operation adjustment in rail transit, this study investigates balanced arrival-departure operation adjustment and energy-saving optimization strategies for train delays in sections. [Methods] A collaborative optimization model for train operation adjustment and energy-saving control was established with the dual objectives of minimizing the deviation in train arrival-departure equilibrium and terminal arrival time, as well as minimizing total energy consumption. The model comprehensively considered constraints including section operation, station operation, and train traction characteristics. In the model solution process, a generalized railway simulation software was first used to obtain an energy consumption dataset under different section running times. Then, an improved NSGA-II algorithm was designed to obtain the Pareto

front of “total energy consumption-total timetable deviation”. Finally, a metro line in Nanjing was used as a case study to derive adjustment schemes with different energy consumption levels and total deviations under delay disturbances. [Results] Compared with the conventional timetable

收稿日期:2024-10-12; 修回日期:2024-12-27; 网络首发日期:2025-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(52072044); 陕西省自然科学基金项目(2023-JC-YB-496); 大学生创新创业训练计划项目(S202410710375)

作者简介:徐培娟(1989—),女,副教授,2017年毕业于西南交通大学交通运输规划与管理专业,工学博士,主要从事轨道交通运营组织优化、轨道交通安全与管理等方面研究工作,E-mail:peijuan-xu@chd.edu.cn。

adjustment scheme with the minimum delay, the proposed method reduced train energy consumption by 18.93%, improved arrival-departure equilibrium by 8.65%, and reduced terminal delay by 4.48%, all outperforming the minimum-delay scheme. The study shows that the collaborative model for train operation adjustment and energy-saving control based on dual-objective optimization can effectively balance train energy consumption and timetable deviation, achieving energy-saving optimization while maintaining timetable order. [**Conclusion**] This method can provide a theoretical basis and technical support for train operation adjustment and energy-saving control during delay recovery in rail transit.

Key words: urban rail transit; energy-saving operation; arrival-departure equilibrium; train delay; NSGA-II algorithm; timetable optimization

引言

截至2023年年底,我国城市轨道交通运营线路总长度为11 224.54 km,地铁运营占比76.11%,但列车运行延误事件时有发生。据统计,2023年共发生5 min及以上延误事件839次^[1]。运行延误导致列车偏离原计划运行图,大大降低运行图均衡性与旅客服务质量,增加旅客在站候车时间。同时,运行延误引起的列车“赶点”行为,又增加列车因快速启停导致的非节能驾驶行为次数。因此,针对轻微运行延误事件,如何制定兼顾均衡到发间隔时间和实现列车区间运行节能双目标,是进一步提高企业服务水平、降低企业运营成本的新问题。

随着城市轨道交通网络规模扩大,列车运行调整与节能优化研究日益深入。在延误恢复研究方面,HOU等^[2]分析列车运行数据,利用GBRT算法构建延误恢复预测模型。针对线路故障问题,寇蕊蕊等^[3]构建以最小化总晚点时间为目标的混合整数规划模型,并提出两阶段求解方法。在智能算法应用方面,王荣笙等^[4]基于列车运行图,采用MCTS-RL方法实现列车运行智能调整。SHAKIBAYIFAR等^[5]将多目标变邻域搜索与强化学习相结合,提升解决方案的帕累托最优性。董傲冉等^[6]首次将列车运行特征、旅客出行特征和延误时间三类因素整合到双目标优化模型中。王雪鑫^[7]则将延误恢复时间和乘客平均等待时间作为评价指标进行优化。

在节能优化研究方面,褚心童等^[8]通过优化速度曲线和改进ATO驾驶策略相结合的方式实现节能驾驶。ZHONG等^[9]提出基于MPC的速度曲线在线生成方法,有效处理临时限速等实时调度问题。伍成城等^[10]的离散-连续动态规划方法实现了准点运行和精准停站的双重目标。NING等^[11]将DDPG算法应用于速度曲线优化,结合离线训练与在线生成的方式提升了系统的适应性。李兰鹏^[12]基于蚁群算法建立求解模型匹配的区间最优运行速度曲线。繆鹄等^[13]将单

区间离散为等距微区间,求解合适的工况组合方案。黄江平等^[14]将萤火虫算子引入PSO算法,提出双层结构一体化优化控制方法。钟杰等^[15]在单个区间站间操纵策略的基础上,建立多车协同时刻表优化模型。NOVAK等^[16]提出考虑牵引系统能效的预测控制策略。

相比而言,以均衡性为目标的研究较少,柏赞等^[17]针对列车晚点问题,考虑列车总晚点和到发均衡性。

在多目标协同优化方面,闫璐等^[18]提出改进的 ϵ -约束法求解双目标优化模型,实现列车总晚点时间和到发时刻调整次数的协同优化。LI等^[19]针对不同初始延误条件,提出最小化延误时间和能耗的双目标优化模型。SCHEEPMaker^[20]同时考虑运行时间、能耗、基础设施占用和时刻表稳健性。SASITHONG等^[21]实现了乘客等待时间和运营成本的平衡优化。LEUTWILER等^[22]基于Benders分解和MPC提出新的优化算法,推动多目标协同优化方法的进一步发展。LUAN等^[23-24]对列车延误恢复问题进行实时列车调整,并引入节能目标,研究列车延误和能源消耗之间的权衡。

综上所述,列车延误运行调整研究已较为成熟,虽然部分学者将延误与节能运行协同优化,但缺乏考虑乘客出行满意度的到发均衡性研究。本文构建以列车到发均衡性偏差和终点到达时间偏差最小、总能耗最小为双目标函数的城市轨道交通列车运行调整模型,并采用非支配排序遗传算法(NSGA-II)进行求解和验算,进一步丰富城市轨道交通在调控一体化方面的理论。

1 城市轨道交通列车运行调整模型

1.1 问题描述

在现代地铁系统中,列车延误会对后续运行计划产生连锁反应,若使总延误时间最小,通常采用加速行驶缩短区间运行时间,但往往忽视列车到发间隔的均衡性,同时也增大运行能耗。图1(a)为第1列车在第

1个区间运行晚点时调整后的列车运行图,其中绿色线代表考虑到发均衡性的列车调整方案,而黄色线代表列车总晚点时间最小的列车调整方案(简称“赶点时刻表”),对比可见,绿色线的调整方案在均衡性方面优于黄色线的调整方案。进一步分析两种策略下区间列车时间-速度曲线,如图1(b)所示。图中相较于绿色线(对应图1(a)中均衡策略时刻表),黄色线(对应图1(a)中赶点时刻表)虽然在区间运行时间上节省,但能耗较高。因此可见,绿色线对应的均衡性调整方案不仅能提高列车到发均衡性,也能实现列车节能运行。综上可知,如何在延误情况下有效平衡到发均衡性、减少晚点时间并实现节能运行,对城市轨道交通实际生产具有积极效益。

为解决上述问题,在列车延误发生时,不仅考虑列车的节能运行,同时考虑到发均衡性并减少列车在终点站的晚点时间,从而维持系统服务水平稳定,提高乘客满意度。

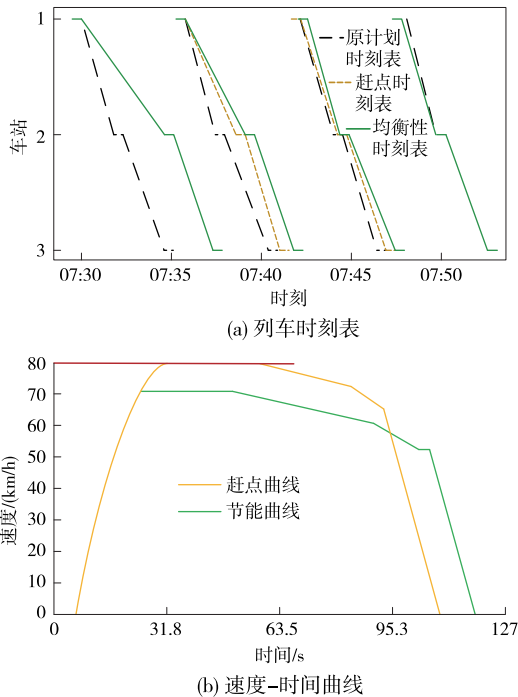


图1 列车时刻表与速度-时间曲线

Fig. 1 Train timetable and speed-time curves

1.2 模型建立

1.2.1 目标函数

设定列车集合为 R ,索引为 $r: R = \{1, \dots, r, \dots, n\}$; 车站集合为 J ,索引为 $j: J = \{1, \dots, j, \dots, l\}$; 区间集合为 K ,索引为 $k: K = \{1, \dots, k, \dots, l-1\}$ 。

目标函数在减少列车终点站晚点时间的同时,构建最小化列车能耗和最小化运行图总偏差的双目标优化模型,其中运行图总偏差指列车到发均衡性指标和

所有列车在终点站晚点时间偏差指标组成的总度量,目标函数如式(1)所示。

$$\min \begin{cases} E_{\text{总}} = \sum_{r=1}^n \sum_{k=1}^{l-1} E_k^r \\ D_{\text{总}} = \sqrt{S_d} + D \end{cases} \quad (1)$$

式中, $E_{\text{总}}$ 为所有列车在整条线路的总能耗; $D_{\text{总}}$ 为运行图总偏差; E_k^r 为第 r 辆车在第 k 个区间的总能耗; S_d 为所有列车在所有车站的到发间隔偏差方差; D 为所有列车到终点站晚点时间的绝对值。

前后两辆列车的到发间隔偏差方差为

$$S_d = \frac{1}{2nl} \left\{ \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^l (a_j^r - a_j^{r-1} - I_j)^2 + \sum_{r=1}^n \sum_{j=1}^l (d_j^r - d_j^{r-1} - I_j)^2 \right\} \quad (2)$$

式中, a_j^r 为第 r 辆列车在 j 站实际到站时间; a_j^{r-1} 为第 $r-1$ 辆列车在 j 站实际到站时间; d_j^r 为第 r 辆列车在 j 站实际出发时间; d_j^{r-1} 为第 $r-1$ 辆列车在 j 站实际出发时间; I_j 为计划到 j 站的时间间隔。

n 辆列车在终点站到达时间与原计划到达时间的偏差绝对值为

$$D = \sum_{r=1}^n |a_l^r - A_l^r| \quad (3)$$

式中, a_l^r 为第 r 辆列车在终点站实际到站时间; A_l^r 为第 r 辆列车在终点站计划到站时间。

1.2.2 约束条件

(1) 能耗类相关约束

列车在区间运行会经历牵引、巡航、惰行、制动4种工况,4种工况下的能耗计算方式如下。

① 牵引阶段

牵引工况指在启动或者加速阶段列车受牵引力和阻力,牵引力做功用于克服阻力和增加动能,故牵引阶段牵引能耗为

$$E_1 = \int_0^{T_1} F_w^r \cdot v_r dt, \forall r \in R \quad (4)$$

式中, E_1 为牵引阶段能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$; F_w^r 为第 r 辆列车所受牵引力, kN ;按牵引特性曲线取值; v_r 为第 r 辆列车实时速度, km/h ; T_1 为牵引阶段截止时间, s 。

② 巡航阶段

巡航阶段时列车一直匀速前进,牵引力用于克服阻力。列车巡航阶段所受牵引力为

$$F_w^r = W = W_o + W_i + W_c + W_s \quad (5)$$

式中, W 为列车总阻力, kN ; W_o 为列车基本阻力, kN ; W_i 为列车坡道阻力, kN ; W_c 为列车曲线阻力, kN ; W_s 为列车隧道阻力, kN 。

故巡航阶段牵引能耗为

$$E_2 = \int_{T_1}^{T_2} F_w^r v_r dt, \quad \forall r \in R \quad (6)$$

式中, E_2 为巡航阶段能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$; T_1 为牵引阶段的截止时间, s ; T_2 为巡航阶段的截止时间, s 。

③惰行阶段

列车不受牵引力, 牵引能耗为 0。

④制动阶段

在制动阶段, 需要操纵列车进行制动来减速进入车站。制动力是与列车运行方向相反的力, 由于其远远大于自然阻力, 故在制动减速过程中起主要作用。在列车制动时, 电机按照制动特性曲线提供制动力, 使列车靠站停车。与惰行阶段类似, 列车运行不受牵引力, 牵引能耗为 0。

综上所述, 第 r 辆车在第 k 个区间运行产生的总能耗为

$$E_k^r = E_1 + E_2, \quad \forall r \in R, k \in K \quad (7)$$

式中, E_k^r 为第 r 辆列车在第 k 个区间总能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

为满足安全运行要求, 列车最高运行速度应低于线路限速。

$$0 \leq v_r \leq v_{\text{lim}}^k, \quad \forall r \in R, k \in K \quad (8)$$

式中, v_{lim}^k 为列车在区间的最大运行速度, km/h 。

由上述公式可知, 可通过提高列车区间运行的惰行比例、增大区间运行时间、减小列车运行速度等措施实现列车节能运行。

(2) 列车运行调整类相关约束

列车起动时间约束: 为保证乘客出行, 规定每辆列车在首站不得提前发车。

$$d_1^r \geq D_1^r, \quad \forall r \in R \quad (9)$$

式中, d_1^r 为第 r 辆列车在首站实际出发时刻; D_1^r 为第 r 辆列车在首站计划出发时刻。

区间运行时间约束: 列车运行时, 受线路条件和牵引能力限制, 区间运行时需满足最小运行时分约束, 同时考虑运行图弹性, 本文也设置了最大运行时间约束。

$$T_{k0}^{\min} \leq a_j^r - d_{j-1}^r \leq T_{k0}^{\max}, \quad \forall r \in R, \forall j \in J \quad (10)$$

式中, $T_{k0}^{\min}$ 为区间最小运行时间, s ; a_j^r 为第 r 辆列车在 j 站实际到站时刻; d_{j-1}^r 为第 r 辆列车在 $j-1$ 站实际出发时刻; $T_{k0}^{\max}$ 为区间最大运行时间, s 。

最小停站时间约束为

$$T_j^{\min} \leq d_j^r - a_j^r \leq T_j^{\max}, \quad \forall r \in R, \forall j \in J \quad (11)$$

式中, $T_j^{\min}$ 为最小停站时间, s ; d_j^r 为第 r 辆列车在 j 站实际出发时刻; $T_j^{\max}$ 为最大停站时间, s 。

为保证行车安全, 列车运行应满足最小追踪间隔要求, 即相邻列车发车间隔和到站间隔不应小于最小追踪间隔, 相邻列车在同一车站发到间隔不应小于最

小发到间隔。故最小追踪间隔应满足

$$d_j^r - d_j^{r-1} \geq I_{\min}, \quad \forall r \in R, \forall j \in J \quad (12)$$

$$a_j^r - a_j^{r-1} \geq I_{\min}, \quad \forall r \in R, \forall j \in J \quad (13)$$

式中, $I_{\min}$ 为最小追踪间隔, s 。

最小发到间隔应满足

$$a_j^r - d_j^{r-1} \geq I_{\min}^{\text{da}}, \quad \forall r \in R, \forall j \in J \quad (14)$$

式中, $I_{\min}^{\text{da}}$ 为最小发到间隔, s 。

2 模型求解

为保证行车安全, 列车运行应满足最小追踪间隔要求, 针对地铁延误情况下列车运行调整优化问题, 基于非支配排序遗传算法 (NSGA-II), 以最小化总能耗和运行图总偏差为目标, 获取“总能耗-运行图总偏差”Pareto 前沿。

2.1 模型求解流程

模型求解基本流程如图 2 所示。

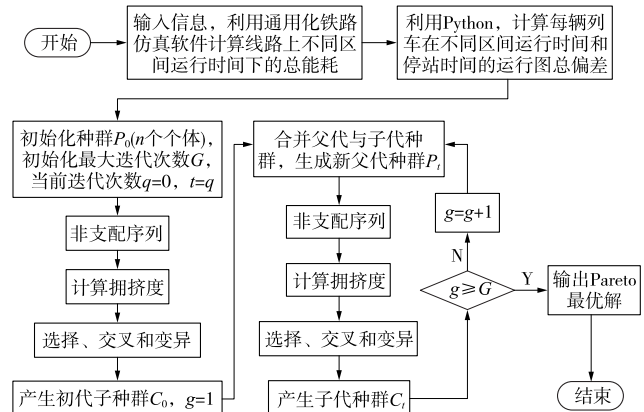


图2 模型求解流程

Fig. 2 Model solution process

步骤 1: 输入线路、列车以及时刻表等信息, 利用通用化铁路仿真软件计算列车能耗, 得到线路上不同区间运行时间下的总能耗。

步骤 2: 利用 Python 语言计算延误时所有列车运行图总偏差和晚点时间。

步骤 3: 利用 NSGA-II 算法求解线路上列车运行“总能耗-运行图总偏差”Pareto 前沿。NSGA-II 算法设计思想如下。

(1) 根据原始运行图和随机扰动生成一个包含 n 个个体的初始种群, 每个个体代表一种调整方案。此处, 个体由每辆列车在各区间的运行时间和停站时间组成。为了确保初始方案可行, 在个体生成中引入约束条件。

(2) 根据 NSGA-II 选择机制, 选择非支配层级较小、拥挤距离较大的个体进行交叉与变异, 生成下一代子种群。此处, 定义两个适应度函数: 总能耗和运行图

总偏差,目的是同时使总能耗和运行图总偏差最小,以此来评估个体优劣。

(3)合并父代和子代种群生成新父代种群,对新父代种群进行非支配排序,并根据拥挤度值选择新子代种群。

(4)判断是否满足 $g \geq G$,若是,输出 Pareto 最优解集;否则,返回(3)继续迭代。

2.2 列车区间运行能耗求解

列车区间能耗分析采用商业化软件——通用化铁路仿真软件计算列车能耗。首先建立线路模型,绘制节点及路径,根据已知线路数据添加路径信息(长度、限速、坡度等);然后建立车辆模型,按实际情况设置车辆信息(车厢数、长度、质量等)并设置车站信息;随后在线路模型上添加轨旁设备,生成轨道电路、进路及信号机脚本;最后绘制时刻表,仿真运行后可得到对应列车能耗。软件仿真运行界面如图 3 所示。

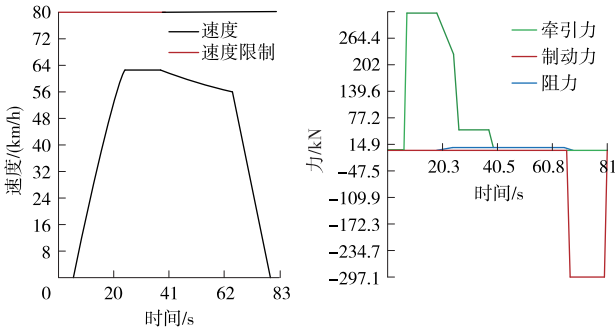


图 3 通用化铁路仿真软件运行界面

Fig. 3 Running interface of generalized railway simulation software

3 案例分析

3.1 算例参数及求解过程

以南京地铁某号线为例,线路由南到北共 9 个车站,由 1 到 9 依次编号,根据实地调研,07:19:10 到 08:31:33 共有 10 辆列车在该线路开行。晚点延误场景为第 2 辆列车在第 3 个区间晚点 180 s。

采用通用化铁路仿真软件计算列车能耗,根据线路基础数据和车辆性能绘制部分区间运行时间-能耗曲线,如图 4 所示。

然后,使用 Python 利用 NSGA-II 算法求解列车运行“总能耗-运行图总偏差”Pareto 前沿。

求解算法中 NSGA-II 算法参数取值如表 1 所示,模型相关参数取值如表 2 所示。由于交叉概率和变异概率相互作用,影响了算法的整体性能。对参数选择方面,进行多组对比试验和分析,选取解的质量和算法稳定收敛最佳的参数设置,具体为:交叉概率设置为

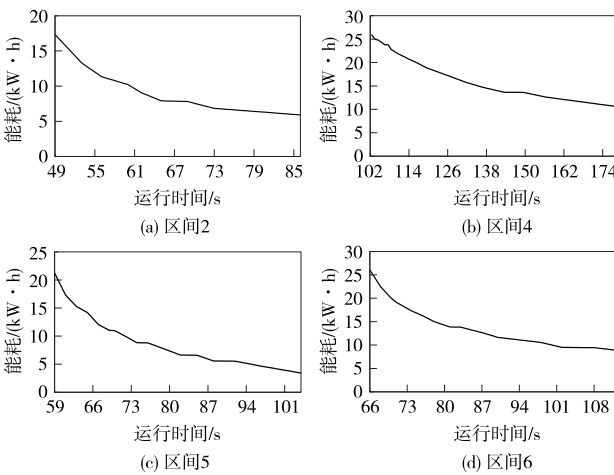


图 4 运行时间-能耗曲线

Fig. 4 Running time-energy consumption curves

0.7,变异概率设置为 0.2,后续结果分析均基于此参数计算的解值进行分析论证。

表 1 NSGA-II 算法参数设置

Tab.1 NSGA-II algorithm parameter settings

NSGA-II 算法参数	取值
种群大小	500
终止迭代次数	60
交叉概率	0.7
变异概率	0.2

表 2 模型参数设置

Tab.2 Model parameter settings

模型参数	取值	模型参数	取值
I_j/s	360	T_{k0}^{min}	$0.9T_{k0}$
I_{min}/s	180	T_{k0}^{max}	$1.3T_{k0}$
I_{min}^{la}/s	120	T_j^{min}/s	30
$v_{lim}^k/(km/h)$	80	T_j^{max}/s	50

最后,经过 Python 模型计算后,求解得到该条线路上列车运行“总能耗-运行图总偏差”Pareto 前沿,如图 5 所示。

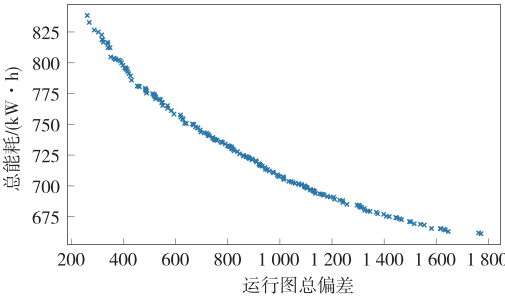


图 5 “总能耗-运行图总偏差”Pareto 前沿

Fig.5 Pareto front of “total energy consumption-total timetable deviation”

图 5 为总能耗与运行图总偏差之间的关系,呈现出典型的 Pareto 前沿特征。图 5 中每个点代表一种列

车调整方案,其中左上角的点表示高能耗、低偏差方案,而右下角的点对应低能耗、高偏差方案。由图 5 可知,随着运行图总偏差增加,总能耗逐步降低。这表明,当允许列车在运行过程中有更多总偏差时,地铁系统可以采用更加节能的调整策略,从而有效减少总能耗。然而,总偏差增大也会导致列车均衡性下降,因此在调度优化中需要在节能和均衡性之间进行权衡。

3.2 求解方案分析

为进一步对比分析运行方案的优劣,考虑在晚点延误时多被采用的提高列车运行速度压缩区间运行时间这种“赶点”调度策略,该策略以所有列车在各站总延误时间最小为目标,并利用遗传算法进行求解。

图 6 为两种方法的运行调整方案,其中灰色虚线代表未受故障干扰的原计划时刻表,黄色虚线代表调整后的赶点时刻表,绿色实线代表本文所提出的新方案时刻表。对比可知,延误发生后的前两辆列车,黄色虚线分布间隔较小,而后行几辆列车,黄色虚线分布间隔较大,致使黄色虚线整体分布不均。绿色实线由于考虑前行列车到发时间,延误发生后两辆列车与后行列车的分布间隔相差不大,使绿色实线整体分布较为均匀,进而均衡列车在车站的到发间隔时间。故图 6 中绿色实线分布均衡性优于黄色虚线分布均衡性。为了进一步对比“赶点”方案和本文提出新方案在能耗和运行图总偏差两个方面的效果,提取图 6 中的相关指标,如表 3 所示。

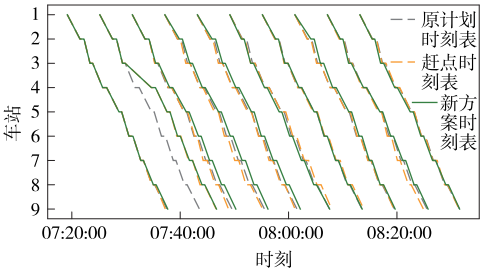


图 6 列车运行调整方案
Fig. 6 Train operation adjustment schemes

表 3 优化效果
Tab. 3 Optimization effect

调整方案	能耗/(kW·h)	到发均衡性	终点站晚点时间/s
赶点方案	982.06	65.52	357
新方案	796.13	59.85	341

由表 3 可知,赶点时刻表总能耗为 982.06 kW·h,新方案时刻表总能耗为 796.13 kW·h,列车总能耗减少 18.93%。赶点时刻表到站间隔偏差方差为 65.52,新方案时刻表到站间隔偏差方差为 59.85,列车到发均衡性改善 8.65%。赶点时刻表终点站晚点时间为 357 s,新方案时刻表终点站晚点时间为

341 s,列车在终点站晚点时间减少 4.48%。对比可知,本文所提方案可在降低列车运行能耗的同时,兼顾列车到发均衡性和终点站晚点时间,对于列车工作人员实行决策具有显著支持作用。

4 结论

针对列车运行延误问题,提出延误恢复、节能运行和到发均衡性的协同优化思路。基于列车运行约束和牵引特性等约束条件,构建以总能耗最小和运行图总偏差最小为双目标的地铁列车运行调整模型。采用通用化铁路仿真软件求解能耗,为列车节能运行问题提供新的求解工具,并利用改进设计的 NSGA-II 算法求解模型。通过实例验证,本文提出的优化方案相比传统“赶点”方案具有显著优势,主要结论如下。

- (1) 在经济效益方面,列车运行能耗降低 18.93%,体现了显著的节能效果。
- (2) 在服务质量方面,到发均衡性提高 8.65%,终点站晚点时间减少 4.48%,实现列车系统运行品质的整体提升。
- (3) 在应用价值方面,本文提出的列车运行调整模型可在降低列车总能耗的同时较大幅度地改善列车到发均衡性,成功实现节能运行与服务质量提升协同优化,具有重要实践意义。

尽管本文在理论和实践上都取得了一定进展,但仍存在一些不足之处,未来加强针对多列车短时延误进行研究,考虑更复杂的延误类型及其对列车运行的综合影响。

利益冲突声明/Conflict of Interests:
所有作者声明不存在利益冲突。

作者贡献/Authors' Contributions:

徐培娟确定了研究思路与总体框架,指导并修改论文;曹冉完成了模型构建、算法设计、程序实现及论文撰写;王旭东指导案例分析,提供数据支持并评估结果;秦阳指导算法设计;彭辉资助项目并建设平台。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

参考文献:

[1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2023 年度统计和分析报告 [EB/OL]. (2024-03-29) [2024-10-09]. <https://qian. camet. org. cnxytjtjxx/14894. shtml>.

[2] HOU Y F, WEN C, HUANG P, et al. Delay Recovery Model for High-speed Trains with Compressed Train Dwell Time and Running Time[J]. Railway Engineering Science, 2020,28(4):424-434.

[3] 寇蕊蕊,李海军. 区间线路故障下高速铁路列车运行调整方法[J]. 铁道运输与经济,2023,45(6):1-7,14.

KOU Ruirui, LI Haijun. Train Operation Adjustment Method of High Speed Railway under Section Line Fault[J]. Railway Transport and Economy, 2023,45(6):1-7,14.

- [4] 王荣笙,张琦,张涛,等. 基于蒙特卡罗树搜索-强化学习的列车运行智能调整方法[J]. 中国铁道科学,2022,43(5):146-156.
WANG Rongsheng, ZHANG Qi, ZHANG Tao, et al. Intelligent Adjustment Approach for Train Operation Based on Monte Carlo Tree Search-reinforcement Learning[J]. China Railway Science, 2022, 43(5):146-156.
- [5] SHAKIBAYIFAR M, SHEIKHOLESLAMI A, JAMILI A. A Multi-objective Decision Support System for Real-time Train Rescheduling[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2018, 10(3):94-109.
- [6] 董傲冉,刘斌,田志强,等. 考虑旅客满意度的高速列车运行调整优化研究[J]. 铁道科学与工程学报,2025,22(3):1004-1015.
DONG Aoran, LIU Bin, TIAN Zhiqiang, et al. Study on the Optimization of High-speed Train Timetable Rescheduling Considering Passenger Satisfaction[J/OL]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025,22(3):1004-1015.
- [7] 王雪鑫. 延误条件下城市轨道交通列车运营调整方法研究[J]. 铁道运输与经济,2024,46(4):193-200.
WANG Xuexin. Research on Operation Adjustment Strategy of Urban Rail Trains under Delayed Conditions[J]. Railway Transport and Economy, 2024,46(4):193-200.
- [8] 褚心童,张亚东,郭进,等. 基于蚁群算法的列车节能驾驶策略优化算法研究[J]. 铁道标准设计,2021,65(2):159-164.
CHU Xintong, ZHANG Yadong, GUO Jin, et al. An Optimization Algorithm for Train Energy-saving Driving Strategy Based on Ant Colony Algorithm[J]. Railway Standard Design, 2021,65(2):159-164.
- [9] ZHONG W F, LI S K, XU H Z, et al. On-line Train Speed Profile Generation of High-speed Railway with Energy-Saving: a Model Predictive Control Method[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022,23(5):4063-4074.
- [10] 伍成城,纪学斌,石红国,等. 基于离散-连续动态规划的城市轨道交通列车速度曲线优化研究[J]. 铁道标准设计,2025,69(9):9-15,38.
WU Chengcheng, JI Xuebin, SHI Hongguo, et al. Optimization Study of Train Speed Profile of Urban Rail Transit Based on Discrete-Continuous Dynamic Planning[J]. Railway Standard Design, 2025,69(9):9-15,38.
- [11] NING L B, ZHOU M, HOU Z P, et al. Deep Deterministic Policy Gradient for High-speed Train Trajectory Optimization[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(8):11562-11574.
- [12] 李兰鹏. 基于蚁群算法的城市轨道交通列车节能运行优化模型仿真分析[J]. 城市轨道交通研究,2023,26(2):11-15.
LI Lanpeng. Simulation Analysis of Urban Rail Transit Train Energy-saving Operation Optimization Model Based on Ant Colony Algorithm[J]. Urban Mass Transit, 2023,26(2):11-15.
- [13] 缪鵬,王介源,曹宇. 基于离散微区间工况选择的列车节能运行优化方法[J]. 中国铁道科学,2023,44(2):211-220.
MIAO Kun, WANG Jieyuan, CAO Yu. Optimization Method for Train Energy-saving Operation Based on Working Condition Selection in Discrete Micro-interval[J]. China Railway Science, 2023,44(2):211-220.
- [14] 黄江平,郑帅沁. 基于 FAPSO 的地铁列车节能运行优化研究[J]. 铁道标准设计,2024,68(1):25-31.
HUANG Jiangping, ZHENG Shuaiqin. Research on Optimization of Energy Saving Operation of Subway Train Based on FAPSO[J]. Railway Standard Design, 2024,68(1):25-31.
- [15] 钟杰,黄育斌,胡华,等. 面向全自动运行系统的地铁列车时刻表节能优化方法[J]. 铁道标准设计,2025,69(4):34-41,72.
ZHONG Jie, HUANG Yubin, HU Hua, et al. Energy Saving Optimization Method for Subway Train Timetable of the Fully Automatic Operation System[J]. Railway Standard Design, 2025, 69(4):34-41,72.
- [16] NOVAK H, LEŠIČ V, VAŠAK M. Energy-efficient Model Predictive Train Traction Control with Incorporated Traction System Efficiency[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(6):5044-5055.
- [17] 柏赟,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):104-110.
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):104-110.
- [18] 闫璐,张琦,丁舒忻,等. 基于双目标优化的高速铁路列车运行调整[J]. 中国铁道科学,2022,43(2):161-171.
YAN Lu, ZHANG Qi, DING Shuxin, et al. High-speed Railway Train Operation Adjustment Based on Bi-objective Optimization[J]. China Railway Science, 2022,43(2):161-171.
- [19] LI W X, PENG Q Y, WEN C, et al. Joint Optimization of Delay-recovery and Energy-saving in a Metro System: a Case Study from China[J]. Energy, 2020,202:117699.
- [20] SCHEEPMAKER G, GOVERDE R. Multi-objective Railway Timetabling Including Energy-efficient Train Trajectory Optimization[J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2021, 21(4):1-42.
- [21] SASITHONG P, PARNIANIFARD A, SINPAN N, et al. Simulation-based Headway Optimization for the Bangkok Airport Railway System under Uncertainty[J]. Electronics, 2023,12(16):3493.
- [22] LEUTWILER F, BONET FILELLA G, CORMAN F. Accelerating Logic-based Benders Decomposition for Railway Rescheduling by Exploiting Similarities in Delays[J]. Computers and Operations Research, 2023,150:106075.
- [23] LUAN X J, WANG Y H, DE SCHUTTER B, et al. Integration of Real-time Traffic Management and Train Control for Rail Networks-Part 1: Optimization Problems and Solution Approaches[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018,115:41-71.
- [24] LUAN X J, WANG Y H, DE SCHUTTER B, et al. Integration of Real-time Traffic Management and Train Control for Rail Networks-Part 2: Extensions towards Energy-efficient Train Operations[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018,115:72-94.

(编辑:邓帅)