doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.06.016

基于地震预警信息的地铁列车应急调度

向　滨[1]，李朝晖[1]，史可昕[2]，周奕成[2]，周达天[3]，王义惠[2]
（1. 昆明地铁建设管理有限公司，昆明 650051；2. 北京交通大学自动化与智能学院，北京 100044；
3. 北京交通大学电子信息工程学院，北京 100044）

摘　要：针对地震灾害导致部分地铁区间无法通行或限速通行的情况，提出基于地震预警信息的地铁列车应急调度优化模型，根据地震预警信息，在地震发生前提前对既有列车运行计划进行调整，模型考虑了到发时刻约束、安全间隔约束、车底周转约束、地震影响相关约束，目标函数为最小化列车实际间隔与计划间隔偏差、取消停站数量和地震后列车在危险区间运行时间，采用线性化方法将模型转化为混合整数线性规划模型。为证明所提出模型在面对不同地震场景时的有效性，基于昆明地铁 6 号线某工作日的实际运营数据构建算例进行验证。结果表明：该模型在不同地震烈度、不同地震影响范围时可以基于地震预警信息生成列车应急运行调整方案；列车在接收到地震预警信息时的位置不同，能采取不同的调整措施；地震导致限速时，站间运行时分增加比例越大，对列车运行影响越大。

关键词：城市轨道交通；地震预警；列车应急调度；混合整数线性规划；优化模型
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2025)06-0125-07

Metro Train Rescheduling Based on Earthquake Early Warning Information

XIANG Bin[1], LI Zhaohui[1], SHI Kexin[2], ZHOU Yicheng[2], ZHOU Datian[3], WANG Yihui[2]
(1. Kunming Metro Construction Management Co., Ltd., Kunming 650051; 2. School of Automation and Intelligence, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044; 3. School of Electronc and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: In response to seismic events that render certain metro sections impassable or subject to speed restrictions, this study proposes an optimization model for metro train emergency rescheduling based on Earthquake Early Warning (EEW) information. The model proactively adjusts existing train operation plans before the earthquake occurs, upon receiving EEW alerts. It incorporates constraints such as arrival and departure time constraints, headway constraints, rolling stock circulation constraints, and earthquake impact-related constraints. The objective function aims to minimize the deviation between actual and ideal train headways, the number of skipped station stops, and the time trains operate within hazardous zones after the earthquake. A linearization method is used to convert the model into a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) formulation. To verify the effectiveness of the proposed model under various earthquake scenarios, a case study is conducted using actual operational data from Line 6 of the Kunming Metro on a typical working day. The results show that the model can generate emergency train rescheduling plans based on EEW information under different earthquake intensities and affected areas. Different rescheduling strategies are adopted depending on the location of the train at the time of receiving the EEW alert. When speed restrictions are

收稿日期：2024-12-25　修回日期：2025-07-18
第一作者：向滨，男，本科，高级工程师，从事轨道交通建设管理与科技创新工作，525782347@qq.com
通信作者：史可昕，女，硕士研究生，研究方向为列车运行图优化，24120234@bjtu.edu.cn
基金项目：北京市自然科学基金资助项目(25JL010)；科学技术部基金项目(DT-Y000-e-JD-JS-2023-080)
引用格式：向滨，李朝晖，史可昕，等. 基于地震预警信息的地铁列车应急调度[J]. 都市快轨交通，2025，38(6)：125-131.
XIANG Bin, LI Zhaohui, SHI Kexin, et al. Metro train rescheduling based on earthquake early warning information[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(6): 125-131.

imposed due to the earthquake, a greater increase in inter-station running time leads to a more significant impact on train operations.
Keywords: urban rail transit; earthquake early warning; train emergency rescheduling; mixed-integer linear programming; optimization model

随着社会的不断发展，地铁作为基础交通设施的重要组成部分，日益凸显其在缓解城市交通压力、完善现代交通运输体系、促进社会经济发展以及满足公众多元化出行需求等方面的重要意义。然而，地铁的运营总会受到诸多不利因素的影响，如自然灾害、事故和安全威胁[1]。

近年来城市化进程加速，众多城市相继构建起地铁网络，加剧了中国地铁所面临的地震潜在风险[2]。以云南省昆明市为例，其位于小江南北向强震带、易门南北向中强地震带及普渡河南北向中强地震带的交汇区域，这 3 个地震带曾多次发生 6 级以上中强震，对昆明市日益发展的地铁系统构成了严峻的挑战。若无法有效保障地铁在地震等突发事件中的安全稳定运行，将造成不可估计的严重后果。为最大限度减轻地震灾害对地铁的影响，除对地铁事故的严重性进行评估并制定高效救援预案外，将地震监测预警技术融入地铁系统中也尤为重要。地震预警是指利用地震纵波(P 波)与破坏性更强的横波(S 波)及面波(L 波)之间的传播时间差，在 P 波到达地震监测点后，迅速反演地震的参数，并通过通信手段将预警信息尽快传达至尚未受到地震波影响的区域。地铁运营公司接收到由国家地震台网提供的预警信息后，需迅速采取调度应急处置措施，保障乘客的生命安全。通过预警系统的实时分析，能够快速探测地震事件的发生并精确判定其特性，随即触发警报机制，为运营安全提供有力保障[3]。鉴于此，部分学者针对地铁预警系统展开研究。温瑞智等[4]探索基于 P 波双参数阈值的即时地震预警预测技术，搭建了一套高效的地震预警信息接收技术系统，并据此研发了针对地铁行业的定制化地震预警应急处置系统。杨林等[5]提出了一种创新的系统架构设计方案，确保在地震发生时能够迅速触发预警机制并自动执行应急处置流程，从而提升地铁网络的安全防护能力与应急响应效率。

近年来，学术界对地震后列车调度优化问题给予了高度关注。LI 等[6]在分析地震应急响应机制、评估灾害破坏程度及预测中断恢复期间交通需求动态变化的基础上，构建了融合主线路中断、轨道与车站恢复及动态交通需求的混合整数线性规划模型，以增强交通系统抗震能力，通过优化地震后列车调度方案，最大限度缓解列车取消和延误带来的不利影响。TANG 等[7]提出了一种基于最优震后恢复能力的铁路运营恢复策略，将列车调度优化与乘客出行路径的重构相结合，生成震后列车运行图，确保在地震期间和震后整个恢复期内尽可能满足运输需求。然而，地震所引发的事故往往极具破坏性，对于铁路系统正常运营与乘客安全维护而言，仅局限于震后恢复策略的研究远远不够，因此，开展对地震预警系统应用的研究显得尤为重要。

在地铁的日常运营中，除地震这一特定事件外，多种不可预见的突发事件同样会对其实时运行造成影响，致使计划列车运行图不可行。为有效应对此类情况，及时且合理地调整列车运行计划成为关键。周玮腾等[8]建立了中断和恢复 2 阶段列车协同调整模型，对比单线列车时刻表调整、网络列车时刻表协同调整和不组织小交路运行的求解结果，得到采用小交路列车运行模式可以更有效应对运营区间双向中断情况。傅佳乐等[9]提出了一种根据线路运行条件的差异，灵活切换大交路与小交路的运营模式，正常情况下依托大交路保障全线贯通运输，而在特定区段通过小交路提升局部运能匹配度。

综上所述，众多学者针对突发事件下地铁列车调度方面的研究较为充分，但对于某一特定突发事件，尤其是地震灾害下列车运行调整的研究方兴未艾。针对地铁应急管理体系中地震预警机制的研究较少，且尚未将地震预警信息与地震发生时列车运行调整相结合。本文针对地震引发的地铁列车部分区间无法通行，或限速通行的情况，展开基于地震预警的列车调度调整研究，以响应国家“十四五”规划中关于建设韧性城市、增强城市安全韧性的号召。

1 问题描述及假设

地震会导致城市公共交通的中断运营，并造成大规模出行乘客的滞留，严重时会造成重大的财产损失甚至重大的伤亡事故。对此，本文基于地震预警，针对地铁线路列车在发生地震时区段运行受阻的情况考虑两端开行小交路策略，研究列车运行调整优化问题。在面对地震时，不同车站由于其自身结构与所处环境不同，即使处于相同地震烈度区域内，车站整体安全性也可能有所不同，因此本文将车站分为正常通行车

站、限速通行车站、禁止通行车站，并将与“限速通行车站”相邻的区间定义为限速区间，与“禁止通行车站”相邻的区间定义为危险区间[10]。

本文采取的调整策略为基于地震预警信息的列车运行调整机制，提出以下假设。

1) 在接收到地震预警信息之前，所有列车均严格按照计划运行图进行行车作业。

2) 一旦接收到地震预警信息，危险区间立即实施封锁措施，禁止列车驶入，限速区间立即实施限速策略，以保障列车及乘客的安全。

3) 在模型所考虑的时间范围内，若某一区间被判定为危险区间，则该状态将持续不变。

2 模型构建

本文考虑到发时刻约束、安全间隔约束、车底周转约束和地震影响相关约束，以列车实际间隔与计划间隔之间的偏差、取消停站数量和列车在危险区间的运行时间为目标函数，构建基于地震预警信息的地铁列车调度优化模型。

2.1 研究对象及变量含义

本文所有描述均基于典型地铁线路，如图 1 所示。列车从 1 号站到 S 号站的运行方向表示为上行方向，从 S 号站到 1 号站的运行方向表示为下行方向。

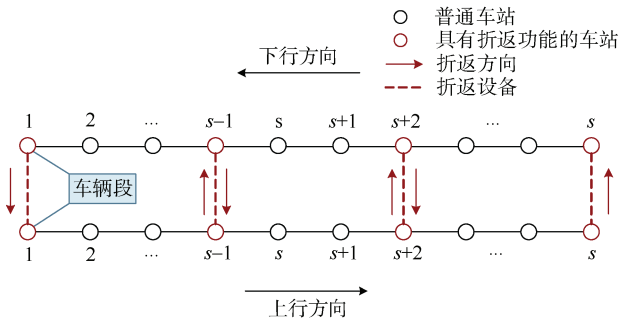


图 1 地铁线路布局

Figure 1 The layout of a metro line

鉴于上行和下行方向类似，仅定义上行方向的模型参数、实数决策变量、0-1 决策变量。

定义以下模型参数：$\boldsymbol{S}$ 为车站集合；s 为车站编号，$s\in\boldsymbol{S}$；$\boldsymbol{S}_{\mathrm{D}}$ 为连接车辆段的车站集合，$\boldsymbol{S}_{\mathrm{D}}\subset\boldsymbol{S}$；$\boldsymbol{S}_{\mathrm{T}}$ 为具有折返功能的车站集合，$\boldsymbol{S}_{\mathrm{T}}\subset\boldsymbol{S}$；$\boldsymbol{S}_{\mathrm{L}}$ 为处于限速区域的车站集合，$\boldsymbol{S}_{\mathrm{L}}\subset\boldsymbol{S}$；$\boldsymbol{S}_{\mathrm{R}}$ 为处于危险区域的车站集合，$\boldsymbol{S}_{\mathrm{R}}\subset\boldsymbol{S}$；$\boldsymbol{F}$ 和 $\boldsymbol{G}$ 分别为上、下行车次集合；f 和 g 分别为上、下行车次编号，$f\in\boldsymbol{F}$，$g\in\boldsymbol{G}$；$W_s^{\min}$ 和 $W_s^{\max}$ 分别为 s 站最小和最大停站时间；$R_s^{\mathrm{up,max}}$ 为上行列车从 s 站离站的最大区间运行时间；$R_s^{\mathrm{up,min}}$ 为上行列车从 s 站离站的最小区间运行时间；$T_s^{\min}$ 和 $T_s^{\max}$ 分别为列车在 s 站折返的最小和最大折返时间；$H^{\min}$ 为最小运行间隔；H^{ideal} 为地震发生后的计划运营间隔；$A_{f,s}^{\mathrm{up,plan}}$ 和 $D_{f,s}^{\mathrm{up,plan}}$ 分别为上行车次 f 在 s 站的计划到站时刻、发车时刻；$M_s^{\mathrm{up,min}}$ 为限速时上行车次从 s 站出发的区间最小运行时间；x 为列车从车辆段发出由车辆段运行至与之连接车站的运行时间；T^{W} 为收到地震预警信息的时刻；T^{E} 为地震发生的时刻；T^{end} 为研究时段结束的时刻。

定义以下实数决策变量：$a_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 为上行车次 f 在 s 站的到站时刻；$d_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 为上行车次 f 在 s 站的发车时刻；$w_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 为上行车次 f 在 s 站的停站时间；$r_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 为上行车次 f 在区间 s 的运行时间；$t_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 为上行车次 f 在 s 站的折返时间；$o_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 为上行车次 f 在 s 站由车辆段发出的时间。

定义以下 0-1 决策变量：$\gamma_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 表征上行车次在区间[S，S+1]是否开行，若上行车次 f 从 s 站运行至 s+1 站则取值为 1，否则取值为 0；$\alpha_{f,g,s}^{\mathrm{up}}$ 表征上行车次在 s 站是否折返，若上行车次 f 在 s 站折返至下行车次 g 则取值为 1，否则取值为 0；$\beta_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 表征上行车次在 s 站是否从车辆段发车，若上行车次 f 在 s 站从车辆段发出则取值为 1，否则取值为 0；$\theta_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 表征上行车次对应的车底在 s 站是否回车辆段，若回段则取值为 1，否则取值为 0；$\pi_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 表征上行车次是否在 s 站进行清客，若清客则取值为 1，否则为 0；$c_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 表征上行车次 f 在 s 站是否取消，若取消则取值为 1，否则为 0；$\lambda_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 表征上行车次在 s 站的发车时刻是否在地震发生之后，若在地震发生之后则取值为 1，否则为 0。

2.2 约束条件

为保障地震后地铁持续安全、高效运营，本文考虑以下约束。鉴于上行和下行方向的约束条件类似，仅给出上行方向的约束。

2.2.1 到发时刻约束

根据车站的不同类型，分析相应的到站方式和发车情况。针对不具备折返功能的普通车站，列车的到站方式仅为由同向前一车站驶来，到站时刻为从前一车站发车时刻与两站间运行时间之和；对于具有折返

功能但不与车辆段相连的车站，列车的到站方式需增加由对向折返而来，到站时间为列车在该站的反向发车时刻与完成折返作业所需时间之和；对于与车辆段相连且具备折返功能的车站，列车的到站方式增加由车辆段发出，到站时间为列车在车辆段的发出时间与车辆段运行至相连车站的时间之和。鉴于以上 3 种情况，上行车次的到站时间为

$$a_{f,s}^{\mathrm{up}}=\gamma_{f,s-1}^{\mathrm{up}}\left(d_{f,s-1}^{\mathrm{up}}+r_{f,s-1}^{\mathrm{up}}\right)+\beta_{f,s}^{\mathrm{up}}\left(o_{f,s}^{\mathrm{up}}+x\right)+\sum_{g\in G}\alpha_{g,f,s}^{\mathrm{dn}}\left(d_{g,s}^{\mathrm{dn}}+t_{g,s}^{\mathrm{dn}}\right)\quad\forall f\in\boldsymbol{F},s\in\boldsymbol{S}\tag{1}$$

列车的发车方式可以分为驶向同向下一车站、回段、折返接续至对向车次和在该站停靠进行清客，而列车一旦进行清客，将不再继续运行。鉴于以上 4 种情况，上行车次的发车时间为

$$d_{f,s}^{\mathrm{up}}=\gamma_{f,s}^{\mathrm{up}}\left(a_{f,s}^{\mathrm{up}}+w_{f,s}^{\mathrm{up}}\right)+\theta_{f,s}^{\mathrm{up}}\left(a_{f,s}^{\mathrm{up}}+w_{f,s}^{\mathrm{up}}\right)+\sum_{f\in F}\alpha_{f,g,s}^{\mathrm{up}}\left(a_{f,s}^{\mathrm{up}}+w_{f,s}^{\mathrm{up}}\right)+\pi_{f,s}^{\mathrm{up}}T^{\mathrm{end}}\quad\forall f\in\boldsymbol{F},s\in\boldsymbol{S}\tag{2}$$

2.2.2 安全间隔约束

根据假设(3)中规定某一危险区间的状态将持续至模型结束，则同一运行方向前车未能通过的区域后车也不能通过，约束为

$$c_{f,s}^{\mathrm{up}}\geqslant c_{f+1,s}^{\mathrm{up}}\quad\forall f\in\boldsymbol{F},s\in\boldsymbol{S}\tag{3}$$

在列车运营过程中，若某列车未在 s 站取消停靠，则需保证相邻 2 列车之间的运行间隔大于等于最小运行间隔，具体约束为：

$$c_{f,s}^{\mathrm{up}}\left(d_{f,s}^{\mathrm{up}}-d_{f-1,s}^{\mathrm{up}}\right)\geqslant c_{f,s}^{\mathrm{up}}H^{\min}\quad\forall f\in\boldsymbol{F},s\in\boldsymbol{S}\tag{4}$$

2.2.3 车底周转约束

车底周转约束用于描述车次之间的连接关系，具体约束为

$$\gamma_{f,s-1}^{\mathrm{up}}+\beta_{f,s}^{\mathrm{up}}+\sum_{g\in G}\alpha_{g,f,s}^{\mathrm{dn}}=c_{f,s}^{\mathrm{up}}\quad\forall f\in\boldsymbol{F},s\in\boldsymbol{S}\tag{5}$$

$$\gamma_{f,s}^{\mathrm{up}}+\theta_{f,s}^{\mathrm{up}}+\sum_{g\in G}\alpha_{f,g,s}^{\mathrm{up}}+\pi_{f,s}^{\mathrm{up}}=c_{f,s}^{\mathrm{up}}\quad\forall f\in\boldsymbol{F},s\in\boldsymbol{S}\tag{6}$$

其中，变量 $c_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 表示车次 f 在车站 s 是否取消，若未取消，则至少有 1 种到站方式和 1 种发车方式。对于没有折返功能的车站，不允许列车进行折返；对于不连接车辆段的车站，不允许列车进出段。

在上行车次衔接至下行车次过程中，任一上行方向车次最多仅能衔接至 1 个下行车次，任一下行方向车次最多仅能由 1 个上行车次衔接，下行车次衔接至上行车次过程同理，约束为

$$\sum_{g\in G}\alpha_{f,g,s}^{\mathrm{up}}\leqslant 1\quad\forall f\in\boldsymbol{F},s\in\boldsymbol{S}\tag{7}$$

$$\sum_{f\in F}\alpha_{f,g,s}^{\mathrm{up}}\leqslant 1\quad\forall g\in\boldsymbol{G},s\in\boldsymbol{S}\tag{8}$$

2.2.4 地震影响相关约束

收到地震预警信息后，为确保列车的运行安全，对于部分地震烈度达到或超过安全阈值的车站，必须严格禁止列车通行，即危险区间列车禁止通行，约束为

$$\gamma_{f,s}^{\mathrm{up}}\left(d_{f,s}^{\mathrm{up}}-T^{\mathrm{E}}\right)\leqslant 0\quad\forall f\in\boldsymbol{F},s\in\boldsymbol{S}_{\mathrm{R}}\tag{9}$$

地震发生后，对于地震烈度较高的车站实施限速措施，即限速区间列车缓行，约束为

$$\gamma_{f,s}^{\mathrm{up}}\left(r_{f,s}^{\mathrm{up}}-M_{s}^{\mathrm{up,min}}\right)\geqslant 0\quad\forall f\in\boldsymbol{F},s\in\boldsymbol{S}_{\mathrm{L}}\tag{10}$$

2.3 目标函数

本文从 3 方面构建地震预警情况下列车调度的目标函数，通过最小化目标函数值，提升列车运行安全性并实现运营效率最大化。

子目标 Z_{h} 为列车实际运行间隔与计划间隔之间的偏差，即

$$Z_{\mathrm{h}}=\sum_{f\in\boldsymbol{F}}\sum_{s\in\boldsymbol{S}}c_{f,s}^{\mathrm{up}}\left(d_{f,s}^{\mathrm{up}}-d_{f-1,s}^{\mathrm{up}}-H^{\mathrm{ideal}}\right)+\sum_{g\in\boldsymbol{G}}\sum_{s\in\boldsymbol{S}}c_{g,s}^{\mathrm{dn}}\left(d_{g,s}^{\mathrm{dn}}-d_{g-1,s}^{\mathrm{dn}}-H^{\mathrm{ideal}}\right)\tag{11}$$

式中，H^{ideal} 为震后列车计划运营间隔，可以通过震后运行车底数与小交路全周转时间计算得到。最小化目标 Z_{h} 可以使震后列车运行间隔更接近计划运行间隔，减少乘客等待时间的不确定性，优化乘客的出行体验。

子目标 Z_{c} 为取消停站的数量，即

$$Z_{\mathrm{c}}=\sum_{f\in\boldsymbol{F}}\sum_{s\in\boldsymbol{S}}\left(1-c_{f,s}^{\mathrm{up}}\right)+\sum_{g\in\boldsymbol{G}}\sum_{s\in\boldsymbol{S}}\left(1-c_{g,s}^{\mathrm{dn}}\right)\tag{12}$$

最小化目标 Z_{c} 意味着更多的列车能够遵循既定的停站方案，提升运营效率，满足乘客出行需求。

子目标 Z_{f} 为地震发生后列车在危险区间的运行时间，即

$$Z_{\mathrm{f}}=\sum_{f\in\boldsymbol{F}}\sum_{s\in\boldsymbol{S}_{\mathrm{R}}}\gamma_{f,s-1}^{\mathrm{up}}\lambda_{f,s}^{\mathrm{up}}\left(a_{f,s}^{\mathrm{up}}-T^{\mathrm{E}}\right)+\sum_{g\in\boldsymbol{G}}\sum_{s\in\boldsymbol{S}_{\mathrm{R}}}\gamma_{g,s+1}^{\mathrm{dn}}\lambda_{f,s}^{\mathrm{dn}}\left(a_{g,s}^{\mathrm{dn}}-T^{\mathrm{E}}\right)\tag{13}$$

最小化目标 Z_{f} 保证了行车安全最大化，即尽可能避免震后列车在危险区间运行，从而提升整体运营的安全性。参考 CHEN 等[11]采用系统相关参数作为风险评估指标，以评估系统的安全性能的方法，将该子目标函数值作为列车运行调整策略的风险评估依据，判

断模型安全性。

基于地震预警信息的地铁列车调度优化模型的目标函数由以上 3 个子目标组成，即

$$Z=\min\left(w_1\frac{z_{\mathrm{h}}}{z_{\mathrm{h,nom}}}+w_2\frac{z_{\mathrm{c}}}{z_{\mathrm{c,nom}}}+w_3\frac{z_{\mathrm{f}}}{z_{\mathrm{f,nom}}}\right) \tag{14}$$

式中，w_1、w_2 和 w_3 为多目标函数项的正权重，可根据地铁运营商的偏好和实际运营情况决定；$Z_{\mathrm{h,\,nom}}$、$Z_{\mathrm{c,\,nom}}$ 和 $Z_{\mathrm{f,\,nom}}$ 分别为各项子目标函数的归一化因子，其值可通过求解单目标优化问题计算得到。

2.4 求解方法

上述模型为混合整数非线性规划模型(MINLP)，本文按照 BEMPORAD 等[12]提出的线性化方法进行线性化，将其转化为混合整数线性规划模型。

线性变换时设定 $f(x)\leqslant 0$，其中 f：$\mathbb{R}^n\mapsto\mathbb{R}$ 是线性的，设 M 和 m 为 $f(x)$的上界和下界。对于乘积 $\delta f(x)$，可以用一个辅助实变量 $y=\delta f(x)$代替，需要满足 $[\delta=0]\rightarrow[y=0]$，$[\delta=1]\rightarrow[y=f(x)]$。此时，$y=\delta f(x)$可以等价为

$$\begin{cases} y\leqslant M\delta \\ y\geqslant m\delta \\ y\leqslant f(x)-m(1-\delta) \\ y\geqslant f(x)-M(1-\delta) \end{cases} \tag{15}$$

根据式(15)，以式(4)线性化为例，式(9)、式(10)的线性化方法同理，实数辅助变量 $\varphi_{f,s}^{\mathrm{up}}=c_{f,s}^{\mathrm{up}}\left(H^{\min}-d_{f,s}^{\mathrm{up}}+d_{f-1,s}^{\mathrm{up}}\right)$，设定 $\varphi_{f,s}^{\mathrm{up}}$ 的上界和下界分别为 M 和–M，则线性化后的形式为

$$\begin{cases} \varepsilon_{f,s}^{\mathrm{up}}\leqslant Mc_{f,s}^{\mathrm{up}} \\ \varepsilon_{f,s}^{\mathrm{up}}\geqslant -Mc_{f,s}^{\mathrm{up}} \\ \varepsilon_{f,s}^{\mathrm{up}}\leqslant\left(H^{\min}-d_{f,s}^{\mathrm{up}}+d_{f-1,s}^{\mathrm{up}}\right)-(-M)\left(1-c_{f,s}^{\mathrm{up}}\right) \\ \varepsilon_{f,s}^{\mathrm{up}}\geqslant\left(H^{\min}-d_{f,s}^{\mathrm{up}}+d_{f-1,s}^{\mathrm{up}}\right)-M\left(1-c_{f,s}^{\mathrm{up}}\right) \end{cases} \tag{16}$$

3 算例仿真

以昆明地铁 6 号线某工作日的实际运营数据为例进行仿真案例验证，如图 2 所示。在仿真实验方面，为验证本文所提出的模型与方法的有效性，使用 Matlab 中的 Yalmip 语言调用 Gurobi 求解器进行求解，运营环境为 Intel(R) Xeon(R) W-2245、CPU3.90 GHz、3.91 GHz 的计算机。

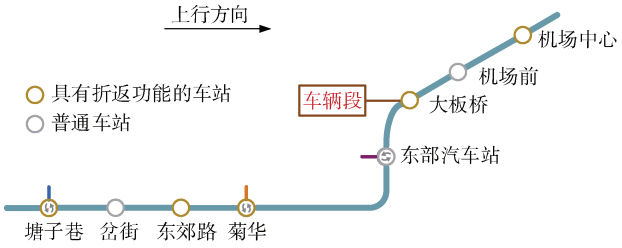


图 2 昆明地铁 6 号线线路结构

Figure 2 The layout of Kunming Metro Line 6

3.1 算例数据

昆明地铁 6 号线共有 8 座车站，包括 5 座具有折返能力的车站(塘子巷站、东郊路站、菊华站、大板桥站、机场中心站)，其中大板桥站连接有车辆段，塘子巷站和机场中心站为 2 个端点站且设有存车线。上下行车次数均为 30，列车最小折返时间为 5 min，最小运行间隔为 2 min，为维持有限度的运营服务，设定 9 种场景，震后场景 1～8 计划运营间隔为 11 min，场景 9 计划运营间隔为 30 min。求解目标函数值的多目标函数项正权重 w_1、w_2 和 w_3 均为 1，归一化因子 $Z_{\mathrm{h,\,nom}}$ 为 15 000，$Z_{\mathrm{c,\,nom}}$ 为 56，$Z_{\mathrm{f,\,nom}}$ 为 243。

为观察不同场景下基于地震预警的列车运行调整结果，进行了 9 个典型场景的算例仿真实验。

1) 场景 1、2、3、4：地震发生时刻均为 14:57，东郊路站至大板桥站之间 3 个运行区间为危险区间，4 个场景地震预警时间分别为 0、30、60 和 120 s。

2) 场景 5、6、7、8：地震发生时刻均为 14:57，预警时间 60 s，即地震预警时刻为 14:56，东郊路站与菊华站之间的区间为危险区间，塘子巷站至东郊路站和菊华站至大板桥站为限速区间，4 个场景限速不同，导致站间运行时分增加比例不同，分别为 25%、50%、75%和 100%。

3) 场景 9：地震发生时刻均为 14:57，预警时间 60 s，即地震预警时刻为 14:56，接收到预警信息后所有列车全线限速 25 km/h[10]。

3.2 算例结果分析

地震预警前列车运行图与计划运行图一致，且列车只在塘子巷站和机场中心站 2 座端点站进行折返，黑色虚竖线表示地震预警时刻，红色虚竖线表示地震发生时刻。由于设计小交路计划运营间隔时考虑到了可用车底的数量，因此图 3(a)～(c)中未出现列车回段的现象。

场景 1～4 求解结果见表 1 所示，4 个场景中除预警时间不同外其他因素均相同，结果表明预警时间越长，总目标函数值越小。场景 1 中预警时间为 0 s，如

图 3(a)所示，部分列车在收到预警时正处于危险区间，上行蓝色车次 106012 已经由东部汽车站发出，运行至大板桥站的剩余区间处于危险区间，下行红色车次 106011 也已经由东部汽车站发出，运行至菊华站的剩余区间处于危险区间，则立即在菊华站进行清客。场景 2 中预警时间为 30 s，在收到地震预警信息时，下行红色车次 106011 还未从东部汽车站发出，无法在地震发生前驶入安全区间，所以下行红色车次 106011 直接在东部汽车站停靠进行清客。此外，由于下行红色车次 106011 少运行 1 个区间，另外 2 项子目标函数值稍有偏差，但总目标值优于场景 1。场景 3 中预警时间为 60 s，如图 3(b)所示，此时上行蓝色车次 106012 的决策与场景 1、2 不同，在收到预警信息时列车刚刚驶离东部汽车站，并立即进行制动、换端、逆向行驶回东部汽车站进行清客。由于大板桥至机场中心的区间相比场景 1、2 少了 1 个车底，列车运行间隔偏差与取消停站数量 2 个目标值稍有增加。场景 4 中预警时间增加至 120 s，此时上行蓝色车次 106012 还未从东部汽车站发出，因此可以在该站直接进行乘客疏散，在危险区间运行时间为 0，使得总目标函数值进一步降低。整体而言，地震预警时间越长，列车提前进行调整的空间就越大，虽然可能会导致取消停站数量增加，但是列车运行的安全性越高，总目标函数值越小。

表 1　场景 1～4 求解结果对比

Table 1　Comparison of solution results for scenarios one, two, three, and four

场景	预警时间/s	总目标函数值	列车实际间隔与计划间隔之间的偏差/s	取消停站数量/座	地震后列车在危险区间运行时间/s	计算时间/s
场景 1	0	4.043 6	15 120	55	499	6.7
场景 2	30	3.004 0	15 060	56	243	7.1
场景 3	60	2.534 9	15 368	59	111	22.8
场景 4	120	2.078 1	15 368	59	0	41.27

场景 5、6、7、8 求解结果见表 2 所示，4 个场景中除限速比例不同外其他因素均相同。当限速比例增加时，对应站间运行时分等比例增加。由表 2 可知：随着限速比例增加，场景 5、6、7 中列车运行间隔与计划间隔偏差的子目标函数值增大，这是因为在刚开始限速时首列限速列车与前方正常运行的列车间隔较大，且受限速比例影响较大，随着时间推移，列车通过改变区间运行时间、停站时间以及折返时间修正列车运行间隔，使得所有列车运行间隔逐渐接近计划运营

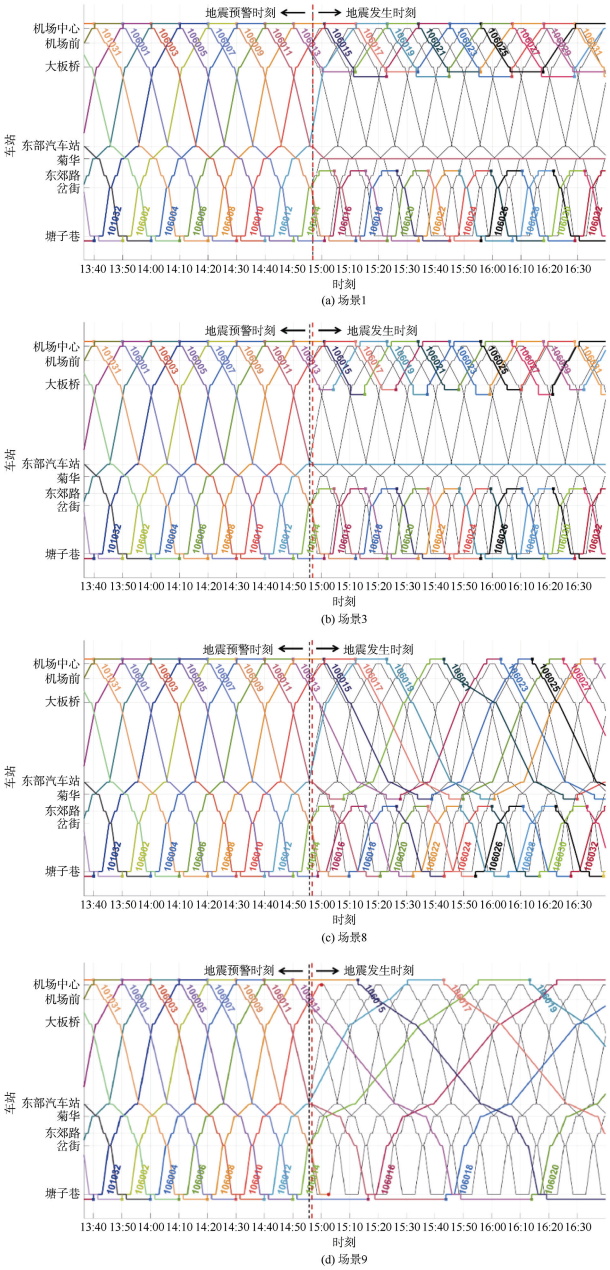


图 3　场景调整后列车运行图

Figure 3　The rescheduled timetable of scenario

表 2　场景 5～8 求解结果对比

Table 2　Comparison of solution results for scenarios five, six, seven, and eight

场景	预警时间/s	站间运行时分增加比例/%	总目标函数值	列车实际间隔与计划间隔之间的偏差/s	取消停站数量/座	地震后列车在危险区间运行时间/s	计算时间/s
场景 5	60	25	1.552 1	21 139	8	0	73.3
场景 6	60	50	2.076 0	28 997	8	0	208.8
场景 7	60	75	2.602 1	36 889	8	0	342.6
场景 8	60	100	2.979 2	34 510	38	0	368.2

间隔。在该场景下危险区间较短，所有列车收到预警信息后均可以在地震前避免进入且驶离危险区间，因此地震后列车在危险区间运行时间目标函数始终为0。在地震之后由于危险区间位于线路中部，列车以小交路的方式继续运营，受到车辆段位置的影响，在运营结束时被迫取消部分车次的部分停站，因此场景5～7的取消停站数始终为8不变。场景8中取消停站数量增加至38，同时列车运行间隔与计划间隔偏差的目标函数值降低，说明在限速比例达到一定程度后取消部分车次的部分停站以换取更好的列车运行间隔是更好的选择。表2结果表明限速比例越大，总目标函数值越大，对列车运行的影响越大，在限速比例超过75%之后，取消部分车次效果更好。受到目标函数中列车实际间隔与计划间隔之间的偏差的影响，列车运行间隔会趋于均匀，如图3(c)所示。

场景9中，在收到地震预警信息后，所有列车全线限速25 km/h，为进一步保障行车安全，维持有限度的运营服务，部分列车需通过回车辆段或存放至临近存车线的方式调整行车组织。如图3(d)所示，上行蓝色车次106012存放至机场中心站存车线，下行橘色车次106009存放至塘子巷站存车线。为了保证运营灵活性，本场景将列车存放在存车线，后续调度员可根据情况让列车返回大板桥车辆段或继续投入运营。

4 结论

本文研究了基于地震预警信息的地铁列车调度优化，并通过昆明地铁6号线的实际运营数据进行仿真验证，为构建更为完善细致的地铁应急调度体系提供理论支撑。主要结论如下：

1) 根据不同区间的地震烈度和影响范围，所构建的模型可采取区间封锁、限速等调度策略，生成相应的列车运行调整方案，以精准应对地震预警信息。

2) 当接收到地震预警信息时，需根据列车所处的位置采取相应的调整措施，若列车已驶入危险区间，应驶离危险区间前往就近车站，若列车刚出站，则可制动并换端尽快返回车站进行清客操作。

3) 在地震导致限速区段的限速较低时，线路通过能力会大幅降低，需根据具体情况适当取消部分车次，以保障列车的有序运行。

参考文献

[1] 郭玮，陈萌. 城市轨道交通车站突发事件处置研究[J]. 交通科技与管理，2024(15): 188-190.
GUO Wei, CHEN Meng. Study on emergency disposal of urban rail transit station[J]. Jiaotong keji yu guanli, 2024(15): 188-190.

[2] HU Jie, WEN Weiping, ZHAI Changhai, et al. Post-earthquake functionality assessment for urban subway systems: Incorporating the combined effects of seismic performance of structural and non-structural systems and functional interdependencies[J]. Reliability engineering & system safety, 2024, 241: 109641.

[3] ALLEN R M, MELGAR D. Earthquake early warning: advances, scientific challenges, and societal needs[J]. Annual review of earth and planetary sciences, 2019, 47: 361-388.

[4] 温瑞智，马强，张格明，等. 重大工程地震紧急处置技术研发与示范应用[J]. 地震科学进展，2020, 50(2): 1-15.
WEN Ruizhi, MA Qiang, ZHANG Geming, et al. The core technology of earthquake emergency management and practice for major engineering[J]. Progress in earthquake sciences, 2020, 50(2): 1-15.

[5] 杨林，闫璐，张格明. 城市轨道交通地震预警紧急处置系统设计研究[J]. 铁道运输与经济，2021, 43(7): 118-124.
YANG Lin, YAN Lu, ZHANG Geming. Research and design of earthquake early warning and emergency response system of urban rail transit[J]. Railway transport and economy, 2021, 43(7): 118-124.

[6] LI Shuang, TANG Yumeng, ZHAI Changhai. Earthquake resilience assessment and improving method of high-speed railway based on train timetable rescheduling[J]. International journal of disaster risk reduction, 2022, 82: 103361.

[7] TANG Yumeng, LI Shuang, ZHAI Changhai, et al. Railway operation recovery method of regional high-speed railway based on optimal resilience after earthquakes[J]. Reliability engineering & system safety, 2023, 238: 109400.

[8] 周玮腾，钱蕾，韩宝明，等. 运营区间双向中断下城市轨道交通列车运行调整[J]. 东南大学学报(自然科学版)，2022, 52(4): 770-779.
ZHOU Weiteng, QIAN Lei, HAN Baoming, et al. Train rescheduling of urban rail transit under bi-directional interruption in operation section[J]. Journal of southeast university (natural science edition), 2022, 52(4): 770-779.

[9] 傅佳乐，文静，徐纪康，等. 基于NSGA-Ⅱ的灵活编组大小交路开行方案优化研究[J]. 都市快轨交通，2025, 38(1): 44-52.
FU Jiale, WEN Jing, XU Jikang, et al. Optimization study of flexible train composition and full-length and short-turn routings based on NSGA-Ⅱ[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(1): 44-52.

[10] 交通运输部. 交通运输部关于印发《城市轨道交通行车组织管理办法》的通知[EB/OL]. (2025-04-07)[2025-04-21]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/xzgfxwj/202504/t20250414_4166929.html.

[11] CHEN Junfeng, LIU Chang, MENG Yangyang, et al. Multi-Dimensional evacuation risk evaluation in standard subway station[J]. Safety science, 2021, 142: 105392.

[12] BEMPORAD A, MORARI M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints[J]. Automatica, 1999, 35(3): 407-427.

（编辑：傅依萱）