

# 突发事件下高铁网络延误弹性

叶玉玲<sup>1,2</sup>, 周文涛<sup>1,2,3</sup>, 韩明初<sup>4</sup>, 罗晋<sup>1,2</sup>, 宋唯维<sup>1,2</sup>, 朱资岳<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 同济大学 交通学院, 上海 201804;

3. 中国铁路上海局集团有限公司 杭州站, 浙江 杭州 310000; 4. 华为技术有限公司, 深圳 518129)

**摘要:** 高铁一般性突发事件导致的网络短时能力损失可引发列车延误。引入弹复性的概念评价高铁网络应对延误的恢复能力, 提出高铁网络延误弹性。从恢复程度和恢复速度两个测度建立评价指标, 以评价高铁网络在一般性突发事件下的延误恢复能力。研究基于运行调整的路网延误弹性分析方法, 构建事件发生区段和相邻区段的延误弹性优化多目标混合整数规划模型, 并以华东局部高铁网络为例进行算例分析。最后对一般性突发事件下高速铁路延误传播特征进行分析, 为铁路调度管理部门在突发事件下的高铁网络运行调整提供依据。

**关键词:** 高速铁路; 弹性; 突发事件; 延误传播; 运行调整

中图分类号: U292.4

文献标志码: A

## Resilience of High-Speed Railway Network Delay During Emergencies

YE Yuling<sup>1,2</sup>, ZHOU Wentao<sup>1,2,3</sup>, HAN Mingchu<sup>4</sup>,  
LUO Jin<sup>1,2</sup>, SONG Weiwei<sup>1,2</sup>, ZHU Ziyue<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. College of Transportation, Tongji University, Shanghai 201804, China; 3. Hangzhou Railway Station, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 4. Huawei Technology Co., Ltd., Shenzhen 518129, China)

**Abstract:** This paper investigates the issue of network short-term capacity loss due to general emergencies on high-speed rail (HSR), which results in train delays. It introduces the concept of resilience to evaluate the recovery ability of HSR network from delays and proposes a definition for HSR network delay resilience. It establishes evaluation indicators based on two metrics, recovery degree and recovery speed, to assess the delay recovery ability of HSR network during general emergencies. Additionally, it explores methods for network delay resilience analysis and optimization

through operation adjustment, and develops a multi-objective mixed integer programming model for delay resilience optimization in the affected section and adjacent sections. Moreover, it conducts a case study using the partial HSR network of the East China Bureau. Finally, it analyzes the propagation characteristics of HSR delays during general emergencies, providing insights for HSR dispatching management in adjusting operations.

**Keywords:** high-speed rail (HSR); resilience; emergency; delay propagation; operation adjustment

近年来随着我国高速铁路的快速发展, 安全性和可靠性问题显得尤为突出。高速铁路突发事件具有突发性、紧急性和破坏性等特点, 日常运营中不可避免。统计显示, 70%以上的高速铁路突发事件为设备故障导致的列车运行短时中断事故, 这类事故不仅干扰区段内正常行车, 还可能通过网络传播, 引起更大范围的延误。因此, 研究并提高高铁网络应对突发事件造成的延误的恢复能力是实现我国高速铁路智能调度管理的重要内容。

研究高铁网络应对突发事件造成延误的恢复能力, 可借助弹性概念。系统弹性(resilience)是系统在故障、失效或破坏后恢复到正常状态的能力<sup>[1]</sup>, 自被提出后在生态学<sup>[2]</sup>、计算机<sup>[3]</sup>和物流<sup>[4-7]</sup>方面有较多应用。因其在评估网络可靠性和安全性中的优势, 被引入到交通领域<sup>[8-12]</sup>。围绕基于物理网络来计算路网弹性, 认为路网弹性为路网中所有节点的弹性的加权平均和, 而每个节点的弹性为该节点到其他所有节点的独立路径的可靠度和加权平均值<sup>[13]</sup>。也有研究构建运输网络弹性模型, 通过随机混合整数规划计算运输网络在自然或人为破坏之后的恢复能力, 以此作为弹性定量指标。

收稿日期: 2023-06-15

基金项目: 上海市自然科学基金(22ZR1465800); 浙江省交通运输厅科技计划(2023011)

第一作者: 叶玉玲, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为轨道交通规划、设计与管理。

E-mail: yyling71@163.com



论文  
拓展  
介绍

并针对多式联运网络提出了节点层面<sup>[14]</sup>或链路层面的弹性计算模型<sup>[15]</sup>。

加权平均法虽明确了计算方法,但弹性作为系统层面概念,以节点为基础计算网络稍显不妥。此方法未考虑突发事件对网络的干扰和恢复策略的影响,仅考虑内在冗余。计算模型法虽能较好测算网络弹性,但未有将其应用到高速铁路运输网络的研究。对于高速铁路网络,在突发事件发生后需同时兼顾运输量恢复和准时性。因此,基于列车延误运行调整问题,研究针对突发事件下高铁网络的弹性是本文的研究重点和创新所在。

## 1 高速铁路延误弹性

### 1.1 运行调整优化问题概述

高铁网络弹性指其遭到突发事件破坏后维持并恢复正常运行状态的能力。高速铁路突发事件分为一般、严重和恶劣突发事件。发生严重和恶劣突发事件时,事件影响范围大,持续时间长,往往需采取取消列车、迂回径路、调整开行方案等措施来解决<sup>[16]</sup>。此时对弹性的研究应侧重于运输量恢复的评价,即采取措施后运输需求的满足情况。而高铁日常运营中绝大多数为一般突发事件,影响范围和持续时间有限,不涉及大量列车停运和开行方案调整,原有运输量能被满足,仅列车计划时刻发生延误。此时弹性优化应该以控制列车延误时间,尽快恢复计划运行状态为目的。

### 1.2 高铁网络延误弹性内涵及影响因素解析

弹性的内涵有以下几点:

(1)弹性是系统在故障、失效或被破坏后表现出的能力,在不受到破坏时,无法评判弹性的好坏;此类破坏不包括微小扰动,面对外微小扰动而表现出良好特性,不属于研究范畴。

(2)系统要偏离正常的运行状态,如果系统在故障、失效或被破坏后没有任何改变,只能说明其非常强壮,但不能代表其具有良好的弹性。

(3)弹性评价是系统从偏离正常状态到恢复正常状态的过程,系统恢复是弹性最重要的特征,没有恢复就没有弹性。

因此,本文提出高铁网络延误弹性的概念,将其定义为发生一般突发事件,高速铁路网络遭到破坏后,为抵抗延误传播采取一定的应急调整策略,使列车尽量保持正点运行,并快速恢复计划状态的能力。

高铁网络延误弹性的影响因素主要包括网络

拓扑结构、网络能力与负荷、突发事件、应急调整4个方面,如图1所示。分析影响因素对于弹性的优化,其中路网的拓扑结构应在规划阶段分析,既有网络能力提升有限,负荷受限于客观存在的运输需求,突发事件本身也较难受人为控制。因此,对于既有高铁网络弹性的优化应主要围绕应急调整策略展开。

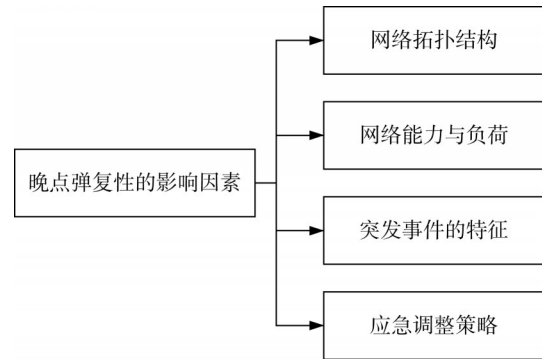


图1 高铁网络延误弹性影响因素

Fig. 1 Factors influencing the resilience of delays on HSR network

## 2 高铁网络延误弹性分析方法

### 2.1 高铁网络延误弹性评价指标

列车延误时间是评价高铁网络弹性的主要研究对象,其变化趋势如图2所示。

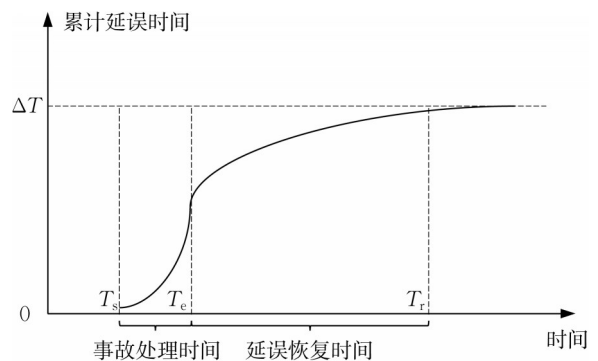


图2 突发事件下列车累积延误时间变化

Fig. 2 Changes in cumulative train delays during contingencies

图2的横坐标是自然时间,纵坐标是所有列车的累积延误时间即每列车在每个站的出发、到达延误时间之和, $T_s$ 为突发事件发生时刻, $T_e$ 为事件结束时刻。假设在事件发生时刻 $T_s$ 就采取了相应扣停或限速等安全限制措施,随即产生初始延误。随后初始延误在网络上传播,累积延误快速增长。直到 $T_r$ 时刻突发事件完全结束,高铁网络设施设备恢复正

常能力,之后列车延误依然存在,但由于网络能力已恢复,累积延误时间增速不断减小。 $T_r$ 时刻后在运行图缓冲时间和运行调整措施作用下,不再有新的延误出现, $T_r$ 之后的全部列车恢复计划运行,累积延误时间不再增加并保持在最大值 $\Delta T$ 。

系统受到破坏后的弹性可从恢复程度和恢复速度两个方面进行测度,高铁网络延误弹性评价指标也可从这两个方面建立。

#### (1) 恢复程度指标

恢复程度指系统恢复正常状态之后与原状态的差距。从高铁网络产生初始延误到所有列车恢复计划运行状态的整个过程,路网上全部列车的累积延误时间就是路网恢复正常状态之后与原状态的差距。因此延误弹性的恢复程度指标 $\alpha_d$ 可用最大的累积延误时间 $\Delta T$ 表示。

$$\alpha_d = \Delta T \quad (1)$$

#### (2) 恢复速度指标

恢复速度指系统恢复到正常状态所需时间。高速铁路延误恢复时间是从突发事件处理结束到路网上所有列车恢复计划运行状态所用的时间。

$$\alpha_r = T_r - T_e \quad (2)$$

在发生特定的突发事件高铁网络遭到破坏,采取应急调整策略后,指标 $\alpha_d$ 越小,表示延误恢复程度越高,恢复后与原状态的差距越小;指标 $\alpha_r$ 越小,表示路网延误恢复时间越短,恢复速度越快。

## 2.2 高速铁路延误弹性优化方法

高铁网络延误弹性优化主要围绕应急调整策略展开。虽然国内外在列车运行调整方面已有一定研究成果<sup>[17-19]</sup>,但我国现阶段运营应对突发事件造成的延误完全依赖于相关人员的自身经验、偏好和对行车策略的理解程度制定相应的调整策略,缺乏准确性和科学性。因此本文从延误产生后采取应急调整策略的角度,研究基于运行调整的路网延误弹性优化方法,并建立相应的优化模型。

基于运行调整的高铁网络延误弹性优化是在突发事件造成列车延误之后,通过采用相关运行调整策略减弱延误在网络上的传播,快速恢复计划运行状态的过程,具体的优化方法如图3所示,共包含4个阶段。

Step 1:首先在突发事件发生后迅速确定事件直接影响的车站和线路、处置方式对该区段能力的影响以及预估持续时间。

Step 2:针对事件区段进行延误弹性优化的模型建立与求解,得出该调度区段列车运行调整方案。

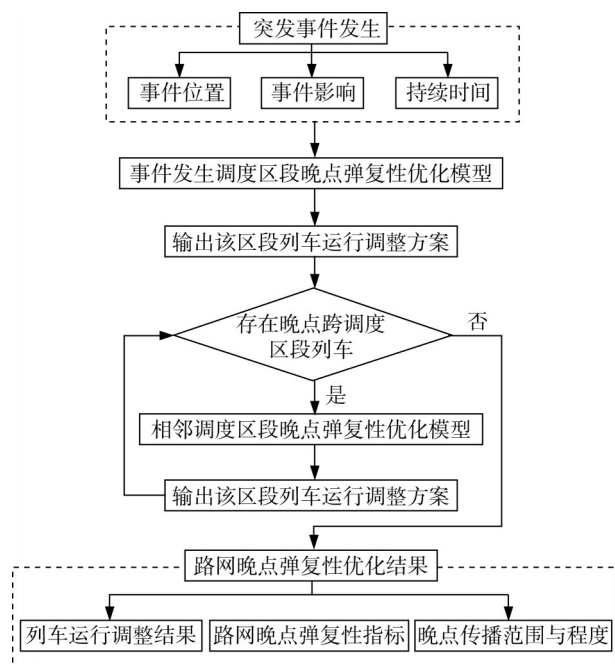


图3 基于运行调整的路网延误弹性优化方法

Fig. 3 Optimization of network delay resilience based on operational adjustments

Step 3:识别调整后是否存在从事件区段发出且仍延误的跨调度区段列车,将跨区段延误情况作为输入参数,代入相邻调度区段模型,得出调整方案。若此时跨调度区段列车延误仍存在,则反复迭代,直至延误疏解。

Step 4:延误停止在路网上传播,并得到了在该突发事件下全部列车的运行调整方案、路网的延误弹性指标以及延误传播范围和延误程度。

## 3 基于运行调整的高速铁路延误弹性分析模型

### 3.1 事件发生调度区段延误弹性分析模型

#### 3.1.1 问题描述

以某双线调度区段突发事件发生后区间的限速或中断为例,建立事件发生调度区段延误弹性分析混合整数规划(MIP)模型。对突发事件后,能使该区段延误弹性最优的运行调整策略进行求解。假设区间中断的持续时间在突发事件开始时可以预测,且上下行列车运行互不干扰,以一个方向为研究对象。

#### 3.1.2 目标函数

模型中 $E$ 为列车区间运行活动的集合,表示列车从一个站出发到前方站到达的整个过程,活动



$e \in E$ 。  $R$ 为列车的集合,列车  $r \in R$ 。  $S$ 为车站的集合,车站  $s \in S$ 。 区间运行活动  $e$ 从  $d(e)$ 站出发,在  $a(e)$ 车站到达,  $a(e), d(e) \in S$ 。 突发事件导致区间  $S_d$ 至  $S_{d+1}$ 限速或中断,  $S_d \in S$ 。

根据延误弹性定义和评价指标,事件发生调度区段延误弹性优化模型应以总延误时间最小和恢复时间最短为目标,目标函数如下。

(1) 目标1:总延误时间最小

总延误时间为事件发生调度区段内每个区间运行活动的列车出发与到达延误时间以及列车取消情况乘以各自的延误惩罚系数之和。

$$\min \sum_{e \in E} W_r^{\text{ad}} D_e + \sum_{e \in E} W_r^{\text{ad}} A_e + \sum_{r \in R} W_r^y Y_r \quad (3)$$

式中:  $D_e$ 和  $A_e$ 分别为区间运行活动  $e$ 的出发延误时间和到达延误时间; 0-1变量  $Y_r$ 表示列车是否被取消;  $W_r^{\text{ad}}$ 和  $W_r^y$ 分别为列车  $r$ 的到发延误惩罚系数与取消惩罚系数。

(2) 目标2:延误的恢复时间最短

恢复时间为运行图上所有列车恢复正点的时刻距突发事件导致区间中断结束的时间。

$$\min (T_r - T_c) \quad (4)$$

### 3.1.3 约束条件

事件发生调度区段延误弹性优化模型需满足以下约束。

(1) 约束1:事件发生前约束

$$A_e^x = A_e^p, \forall e \in E: A_e^p < T_s \quad (5)$$

式中:  $A_e^p$ 和  $A_e^x$ 分别为区间活动  $e$ 的计划和实际到达时间。式(5)表示突发事件发生之前所有的列车按计划时间到达。

(2) 约束2:到发时间约束

$$D_e^x \geq D_e^p + MY_r, \forall e \in E \quad (6)$$

$$A_e^x \geq A_e^p + MY_r, \forall e \in E \quad (7)$$

式中:  $D_e^p$ 和  $D_e^x$ 分别为区间活动  $e$ 的计划和实际出发时间。式(6)、(7)表示实际的到达和出发时间应大于计划的到达和出发时间,且  $M$ 为足够大的正数,保证被取消列车的实际到发时间在研究范围之外。

(3) 约束3:运行时间约束

$$A_e^x - D_e^x \geq R_e, \forall e \in E \quad (8)$$

式中:  $A_e^x - D_e^x$ 表示列车在每个区间的实际运行时间,应大于区间运行活动  $e$ 的最小运行时间  $R_e$ 。

(4) 约束4:停站时间约束

$$D_{v(e)}^x - A_e^x \geq S_e, \forall e \in E \quad (9)$$

式中:  $v(e)$ 为区间运行活动  $e$ 所对应的列车在后续区间的活动,即区间活动  $e$ 的到达站为活动  $v(e)$ 的出

发站,且  $e$ 与  $v(e)$ 为同一列车的区间运行活动。  $D_{v(e)}^x - A_e^x$ 表示列车在  $a(e)$ 车站的实际停站时间,应大于列车在  $a(e)$ 站的最小停站时间标准  $S_e$ 。

(5) 约束5:列车取消约束

$$Y_{r(e)} = 0, \forall e \in E: d(e) = S_{0,r(e)} \wedge D_c^p < T_s \quad (10)$$

$$Y_r = 0, \forall r \in R: K_r = 1 \quad (11)$$

式中:  $S_{0,r(e)}$ 为列车  $r(e)$ 在该调度区段的首发车站,如果列车在突发事件发生之前从该调度区段的首发车站出发,则该列车不能被取消。  $K_r$ 为 0-1变量,表示列车  $r$ 是否为跨调度区段列车,是为 1,不是为 0。式(11)表示跨调度区段列车不能被取消。

(6) 约束6:延误时间约束

$$D_e^x - D_e^p - MY_r \leq D_e \leq M(1 - Y_r), \forall e \in E \quad (12)$$

$$A_e^x - A_e^p - MY_r \leq A_e \leq M(1 - Y_r), \forall e \in E \quad (13)$$

式(12)和(13)描述了列车出发和到达的延误时间,同时保证了被取消列车的到达出发延误时间为 0。

(7) 约束7:到发间隔与区间不越行约束

$$(D_{e'}^x - D_e^x)(-1)^{Q_{e,e'}+1} \geq I_d, \forall e \in E \quad (14)$$

$$(A_{e'}^x - A_e^x)(-1)^{Q_{e,e'}+1} \geq I_a, \forall e \in E \quad (15)$$

$$Q_{e,e'} + Q_{e',e} = 1, \forall e \in E \quad (16)$$

式中:  $Q_{e,e'}$ 为 0-1决策变量,表示具有相同到站和发站的两个区间运行活动的顺序,活动  $e$ 在  $e'$ 之前时  $Q_{e,e'}$ 取 1。  $I_d$ 和  $I_a$ 为最小的车站出发和到达间隔时间。式(14)和(15)表示任意两列车在相同车站的到达和出发应满足相应的最小间隔时间,结合式(16)保证了列车在区间不能发生越行。

(8) 约束8:限速或中断区间约束

$$A_e^x - D_e^x \geq R_x,$$

$$\forall e \in E: d(e) = S_d \wedge D_e^p < T_s \wedge A_e^p > T_s \quad (17)$$

$$D_e^x > T_c, \forall e \in E: d(e) = S_d \wedge T_s < D_e^p < T_c \quad (18)$$

在突发事件发生、区间限速的情况下,式(17)表示若列车出发时间在该区间的限速时间段内,则其运行时间应满足限速后的最小运行时间  $R_x$ 。若列车出发时间在突发事件发生之前而到达时间在突发事件发生之后,则其运行时间也应满足限速后的最小运行时间  $R_x$ 。

在突发事件发生、区间中断的情况下,式(18)表示若列车出发时间在该区间的中断时间段内,则出发事件一定在突发事件结束之后,该约束表示事件发生期间不能向中断区间发车。若列车出发时间在

突发事件发生之前而到达时间在突发事件发生之后,则其运行时间应满足区间中断后的最小运行时间  $A_e^p + T_e - T_{so}$ 。

(9) 约束 9: 发到间隔约束

$$D_{v(e')}^x - A_e^x + M(1 - Q_{e,e'}^{ad}) \geq I_{ad}, \forall e \in E \quad (19)$$

式中: 0-1 决策变量  $Q_{e,e'}^{ad}$  表示任意列车  $r(e)$  到达  $a(e)$  站与任意列车  $r(e')$  从  $a(e)$  站出发是否满足最小的发到间隔事件, 1 表示满足, 0 表示不满足。当  $Q_{e,e'}^{ad} = 1$  时, 从一列车到达某车站到另一列车离开该车站的发到间隔时间至少满足  $I_{ad}$ ,  $I_{ad}$  为该车站的发到间隔时间标准。

(10) 约束 10: 车站线路数量约束

$$\sum_{e \neq e': a(e) = a(e')} Q_{e,e'} - \sum_{a(e) = d(v(e'))} Q_{e,e'}^{ad} \leq C_s - 1, \forall e \in E \quad (20)$$

式中:  $\sum_{e \neq e': a(e) = a(e')} Q_{e,e'}$  表示列车区间活动  $e$  到达  $a(e)$  站前已经到达该站的列车数量,  $\sum_{a(e) = d(v(e'))} Q_{e,e'}^{ad}$  表示列车区间活动  $e$  到达  $a(e)$  站前从该站出发的列车数量, 二者之差表示列车区间活动  $e$  到达  $a(e)$  站前停在该站的列车数量, 应该小于等于可用线路数量减 1, 表示此时车站至少有一条线路可用。

(11) 约束 11: 恢复时间约束

$$A_e^x \leq T_r, \forall e \in E: A_e > 0 \quad (21)$$

式(21)表示对于所有存在到达延误的区间运行事件, 其到达时间都小于运行图全部列车恢复正点的时刻  $T_r$ 。

## 3.2 相邻调度区段延误弹性分析模型

### 3.2.1 问题描述

对事件发生调度区段和相邻调度区段依次优化, 在以突发事件发生后区段的限速或中断为例, 建立事件发生区段优化模型基础上, 进一步建立相邻区段的延误弹性分析优化混合整数规划(MIP)模型, 并采用分层序列法求解, 以解决延误在不同调度区段间的传播问题。如图 4 所示, 突发事件引起限速或中断发生在调度区段 1, 先利用模型计算出调度区段 1 的调整结果。调整后, 可能仍有部分从调度区段 1 到调度区段 2 和 3 的跨区段列车延误, 对区段 2 和 3 的列车运行产生影响, 同样需要调整使其延误弹性达到最优。

### 3.2.2 目标函数

(1) 目标 1: 总延误时间最小

同 3.1.2 事件发生调度区段延误弹性分析模型目标 1。

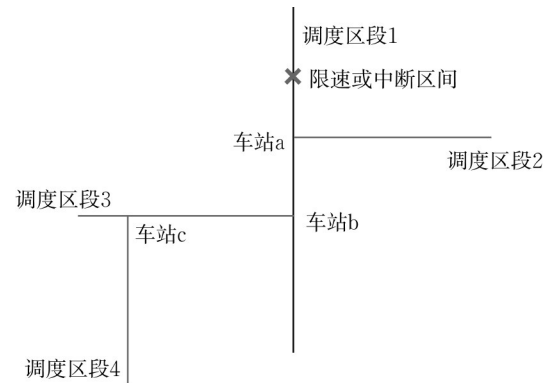


图 4 相邻调度区段延误弹性分析模型示意图

Fig. 4 Analytical model for delayed resilience of adjacent scheduling segments

(2) 目标 2: 延误的恢复时间最短

延误恢复时间为运行图上所有列车恢复正点时刻距该区段首次产生延误时刻  $T_{sw}$  的时间。

$$\min (T_r - T_{sw}) \quad (22)$$

### 3.2.3 约束条件

(1) 约束 1: 首发站延误时间约束

$$D_e^x \geq D_e^p + T_{r(e)}^w + MY_{r(e)}, \forall e \in E: d(e) = S_{0,r(e)} \quad (23)$$

列车  $r(e)$  在调度区段的首发站  $S_{0,r(e)}$  的实际出发时间  $D_e^x$  大于计划出发时间  $D_e^p$  和首发站延误时间  $T_{r(e)}^w$  之和,  $M$  为足够大的正数, 保证被取消列车的出发时间在研究范围之外。

(2) 约束 2: 列车取消约束

$$Y_r = 0, \forall r \in R: K_r = 1 \quad (24)$$

式(24)表示跨调度区段列车不能被取消。

(3) 其余约束

到发时间约束、运行时间约束、停站时间约束、延误时间约束、到发间隔与区间不越行约束、发到间隔约束、到发线能力约束、恢复时间约束同 4.2.3 对应约束

## 4 算例分析

### 4.1 算例描述与参数设置

为验证基于运行调整的路网延误弹性优化方法与模型的有效性, 以华东地区的京沪高铁、合蚌高铁、宁杭高铁和沪杭高铁组成的高速铁路网为例(图 5), 根据运行图和相关数据, 假设多个突发事件场景进行算例分析。

该算例中共有 4 个调度区段, 分别是京沪高铁的徐州东—上海虹桥、合蚌高铁的蚌埠南—合肥南、

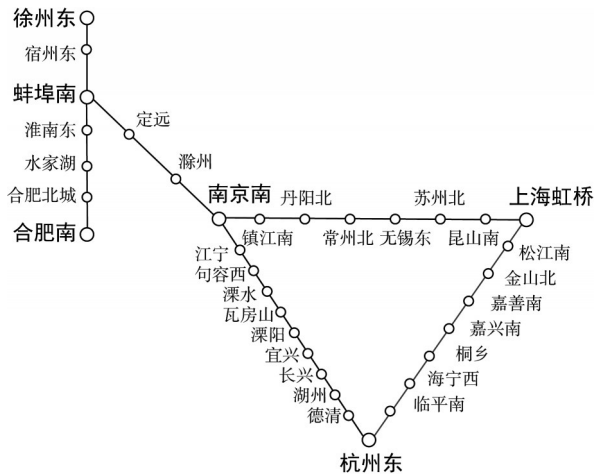


图 5 算例高速铁路网示意图  
Fig. 5 Example of an HSR network

宁杭高铁的南京南—杭州东以及沪杭高铁的上海虹桥—杭州东。在这 4 个调度区段中下行方向共存在 3 类跨调度区段列车,如表 1 所示。

表 1 跨调度区段列车表

Tab. 1 Inter-dispatch section train schedule

跨调度区段列车	调度区段 1	中间车站	调度区段 2
类型 1	徐州东—蚌埠南	蚌埠南	蚌埠南—合肥南
类型 2	徐州东—南京南	南京南	南京南—杭州东
类型 3	徐州东—上海虹桥	上海虹桥	上海虹桥—杭州东

算例中的最小车站出发和到达间隔时间  $I_a$  和  $I_d$  均取 4 min,最小车站发到时间间隔  $I_{ad}$  取 2 min,最小的停站时间  $S_c$  有停站时取 2 min,无停站时取 0。列车的延误惩罚系数和取消惩罚系数的具体取值需要大量的现场调查和计算才能确定,本文暂认为列车的等级越高,行驶里程越长,对运输的影响越大,因此高等级列车和跨调度区段列车的延误惩罚系数取值为 1.2,其他列车的惩罚系数为 1.0。参考其他相关文献<sup>[20]</sup>,取消一列车对整个路网服务质量的影响是列车延误一分钟造成影响的 1 000 倍,因此对应的取消惩罚系数分别为 1 200 和 1 000。模型中足够的正数  $M$  取 1 440。

#### 4.2 场景验证

论文假设了多组高速铁路突发事件场景进行仿真实验,选取了区间中断场景,演示模型的求解过程并对结果进行分析。两个模型均为多目标的混合整数规划(MIP)模型。论文采用分层序列法(stratified sequencing method)的求解思路,将总延误时间最小作为最主要目标,求出最优解后上下浮动 5% 作为最优解集,然后在此最优解集的基础上,以延误恢复时间最短为目标求出整个模型的最优解。求解利用

Matlab 工具包 yalmip 编写建模求解语言,调用 IBM ILOG CPLEX12.6 求解引擎,其中 CPLEX 各参数采用默认值。

场景信息:XX 年 XX 月 XX 日,京沪高铁徐州东—上海虹桥的蚌埠南一定远区间设备故障,造成上午 8:30 到 9:30 区间运行中断 60 min。

首先利用事件发生调度区段延误弹性分析模型计算出徐州东—上海虹桥调度区段调整后的运行计划,再利用相邻调度区段弹性分析模型计算出受影响的相邻区段。结果如图 6~8 所示,其中黑色实线表示列车按计划时间运行,虚线表示列车发生延误。

该场景的延误情况与弹性指标的统计结果如表 2 所示。

#### 4.3 延误时空传播特征分析

根据该场景的实验结果,对突发事件下延误在路网上的时间和空间传播特征进行分析。

##### 4.3.1 延误的时间传播特征

在延误产生和传播的过程中,每隔 10 min 统计一次路网和事件发生区段的总延误时间,可得到延误的时间传播特征如图 9 所示。可以看出,无论是路网还是事件发生区段,总延误时间的增加速度都是先变快后变慢。区间中断下事件发生区段率先恢复计划运行,而在限速条件下延误在事件发生区段和其他区段几乎同一时间停止传播。

##### 4.3.2 延误的空间传播特征

图 10 为该突发事件导致蚌埠南一定远站区间限速和中断的情况下,路网上各个站的延误情况,图中括号内的数字为车站下行方向全部到发列车的总延误时间,min。

从图 10 中得出区间中断下延误的空间传播有以下特征:

(1)整体上看,发生突发事件时,路网上突发事件发生区段的各站延误时间最大,受到的影响最大。其他相邻区段的车站延误时间较小,受到的影响较小。

(2)在突发事件发生的徐州东—上海虹桥区段,区间中断情况下,滁州站的延误时间最大为 423 min,往下行方向延误时间逐渐减小,到上海虹桥延误时间为 225 min。区间限速情况下,定远站的延误时间最大为 166 min,往下行方向延误时间逐渐减小,到上海虹桥延误时间为 29 min。

(3)南京南—杭州东和上海虹桥—杭州东区延误时间在向下行方向传播的过程中并未出现明显



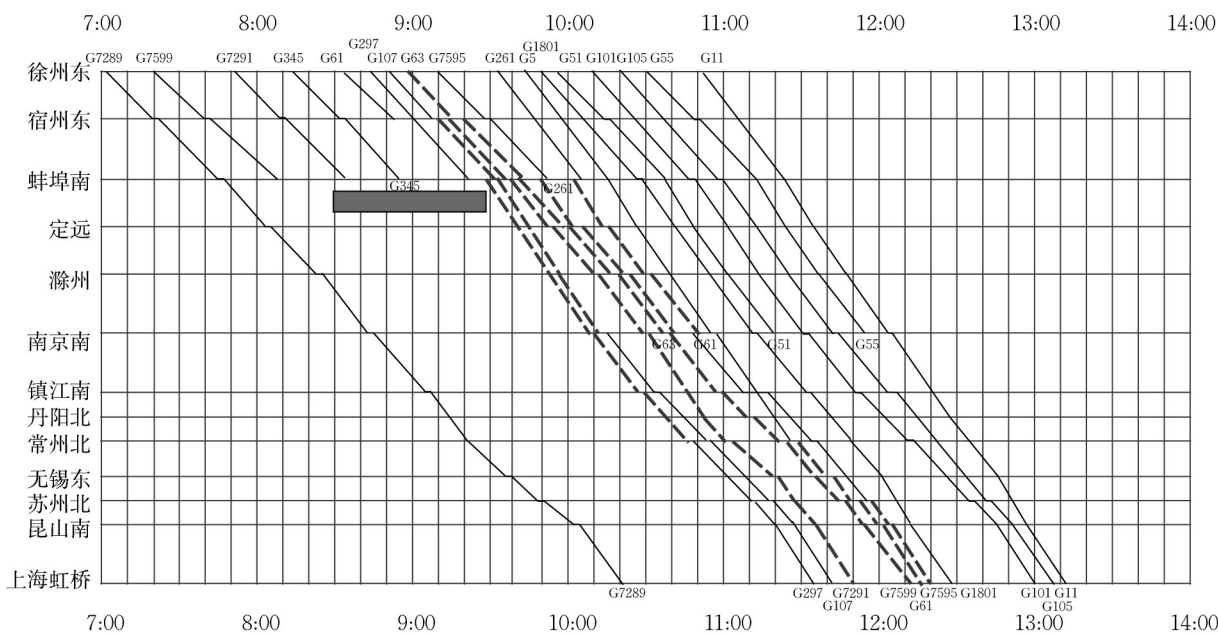


图 6 徐州东—上海虹桥调整后运行图

Fig. 6 Adjusted schedule for Xuzhou East Station to Shanghai Hongqiao Station

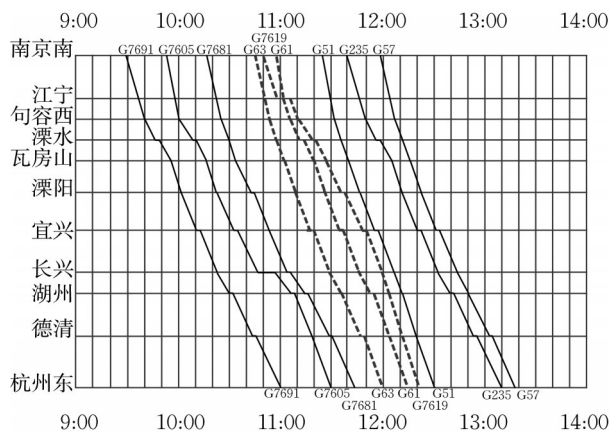


图 7 南京南—杭州东调整后运行图

Fig. 7 Adjusted schedule for Nanjing South Station to Hangzhou East Station

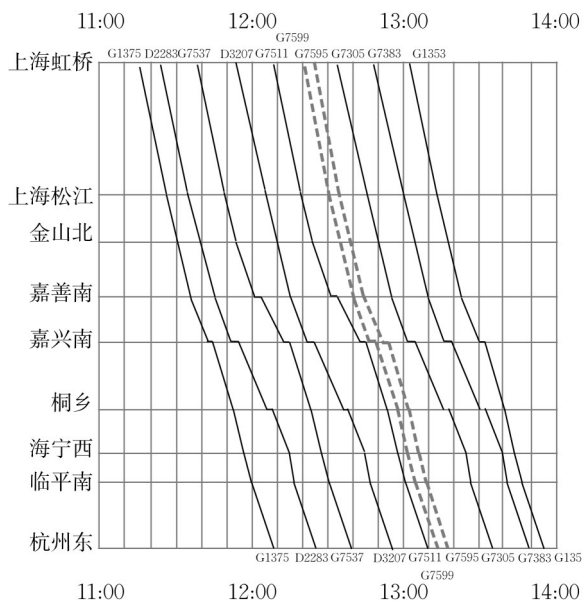


图 8 上海虹桥—杭州东调整后运行图

Fig. 8 Adjusted schedule for Shanghai Hongqiao Station to Hangzhou East Station

的减小趋势,甚至有增加的现象。说明在事件发生区段的相邻区段,如果计划运行图的区间运行时间和停站时间中没有设置足够的缓冲时间,那么延误的跨区段列车无法利用运行图冗余缩短延误时间,甚至可能在运行过程中和其他正点列车发生运行冲突造成新增的延误。

4.4 延误弹性特征分析

继续利用算例路网,在蚌埠南—定远区间设置了不同持续时间的突发事件,事件的开始时间均为 8:30,分析延误弹性的变化情况。

图 11 为路网的延误弹性恢复程度指标随突发事件持续时间变化的关系图。区间中断情况下,

表 2 延误情况与弹性指标统计

Tab. 2 Statistics on delay and resilience indicators

调度区段	总延误时间/min	恢复正常的时刻
徐州东—上海虹桥	3 676.2	12:21
南京南—杭州东	1 625.2	12:22
上海虹桥—杭州东	1 560.0	13:18
路网合计	6 861.4	13:18
恢复程度指标/min	6 861.4	
恢复速度指标/min	228.0	

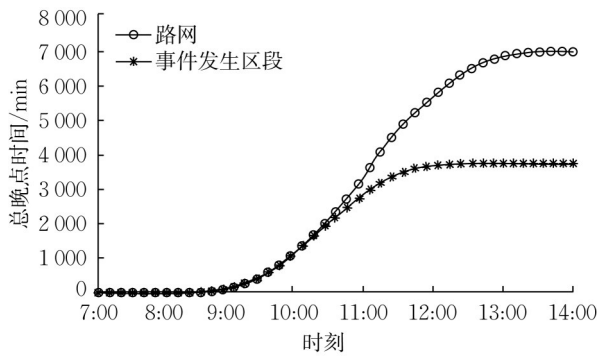


图 9 区间中断下延误的时间传播特征

Fig. 9 Time propagation characteristics of delays during interval disruption



图 10 区间中断下延误的空间传播特征

Fig. 10 Spatial propagation characteristics of delays during interval disruption

恢复程度指标与突发事件持续时间呈线性正相关关系,且增长明显,突发事件持续时间平均每增加 10 min,恢复程度指标增加 1 184.7 min。区间限速 100 km·h<sup>-1</sup>情况下,恢复程度指标虽然也呈增加趋势,但增长不明显,突发事件持续时间平均每增加 10 min,恢复程度指标增加 210.9 min,增速仅为区间中断的 17.8%。另外,限速情况下恢复程度指标的增长不连续,在突发事件持续时间 10~40 min 的范围内没有变化,说明限速情况下总延误时间只与受到限速的列车数量有关,如果限速 10 min 和限速 40 min 影响的列车数量不变,则总延误时间也相同。而中断情况下,持续时间决定了等待列车的发车时间,只要持续时间增加,总延误时间便会增加。

图 12 为路网的延误弹性恢复速度指标随突发事件持续时间变化的关系图。区间中断情况下,恢复速度指标随突发事件持续时间的增加呈微弱的增长趋势,区间中断的时间每增加 10 min,路网恢复到计划的运输网络层面。在研究高铁网络延误弹性时,除网络自身冗余外,还考虑了应急调整策略对延误恢

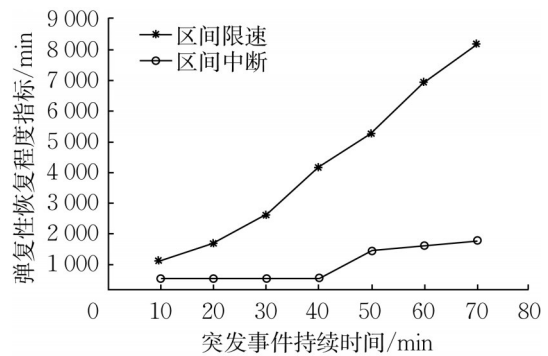


图 11 路网延误弹性恢复程度指标-突发事件持续时间关系图

Fig. 11 Indicator of resilient recovery from network delays: relationship map of emergency duration

100 km·h<sup>-1</sup>的情况下,限速时间每增加 10 min,恢复速度指标减少 10 min,因为决定路网恢复时间的是从徐州东—上海虹桥区段到上海虹桥—杭州东区段的 G7599 列车,该列车最先受到限速的影响,且其到达上海虹桥站的时间不随限速持续时间而发生变化。

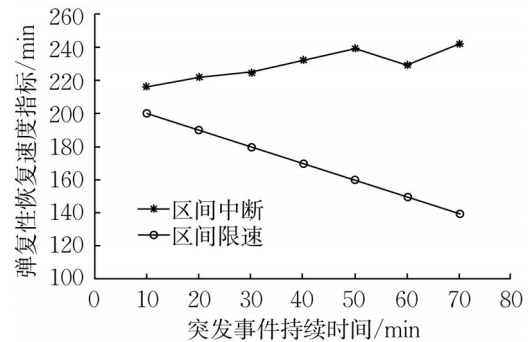


图 12 路网延误弹性恢复速度指标-突发事件持续时间关系图

Fig. 12 Network lateness elasticity recovery speed indicator: relationship map of contingency duration

## 5 结论

本文针对高速铁路一般性突发事件导致的网络短时能力损失,研究了延误的产生和传播机理,引入弹复性的概念评价高铁网络应对延误的恢复能力,研究基于运行调整的路网延误弹性优化方法与模型并进行了算例分析。对网络弹复性的研究没有仅仅停留在宏观的网络拓扑结构的层面,而是深入到包括运行计划的运输网络层面。在研究高铁网络延误弹性时,除网络自身冗余外,还考虑了应急调整策略对延误恢



复情况的影响,使路网弹复性能达到最优。研究延误传播和基于运行调整的弹性优化方法时将高铁网络作为对象,而不是单一区段,更具实际意义。

#### 作者贡献声明:

叶玉玲:实施方案研究,论文撰写及修改。  
周文涛:实施研究及论文修改。  
韩明初:实施研究及结论验证。  
宋唯维:数据采集及分析。  
朱资岳:数据分析与论文修改。

#### 参考文献:

- [1] GAO J, BARABASI B. Universal resilience patterns in complex networks[J]. *Nature*, 2016, 530(4):307.
- [2] FALK D A, MANTGEM P V, KEELEY J E, *et al.* Mechanisms of forest resilience [J]. *Forest Ecology and Management*, 2022, 512(5):120.
- [3] MITRA S, SEIFERT N, MING Z, *et al.* Robust system design with built-in soft-error resilience [J]. *Computer*, 2005, 38(2):43.
- [4] HOSSRONI S, IVANOV D, DOLGUI A. Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 125(5):285.
- [5] FAHIMNIA B, JABBAEZADEH A. Marrying supply chain sustainability and resilience: a match made in heaven [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2016, 91(2):306.
- [6] 李锐,黄敏,王兴伟.多周期的第四方物流弹性正逆向集成网络设计模型与算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(4):892.  
LI Rui, HUANG Min, WANG Xingwei. Model and algorithm for multi-period resilient integrated forward/reverse network design of fourth-party logistics[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2015, 35(4):892.
- [7] 田丹,唐加福,任悦.O2O模式下即时配送服务系统弹性的提升策略优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2021, 41(2):310.  
TIAN Dan, TANG Jiafu, REN Yue. Improving operation resilience of instant delivery service in online to offline business model[J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2021, 41(2):310.
- [8] REGGIANI A, NIJKAMP P, LANZI D. Transport resilience and vulnerability: the role of connectivity [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 81(11):4.
- [9] MILLER E, ZHANG X, FATURECHI R. Measuring and maximizing resilience of freight transportation networks [J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(7):1633.
- [10] JENELIUS E, MATTSSON L. Vulnerability and resilience of transport systems - a discussion of recent research [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2015, 81(6):16.
- [11] 李兆隆,金淳,胡畔,等.基于弹复性的交通网络应急恢复阶段策略优化[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(11):2828.  
LI Zhaolong, JIN Chun, HU Pan, *et al.* Resilience-based recovery strategy optimization in emergency recovery phase for transportation networks [J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2019, 39(11):2828.
- [12] 汪定伟,叶伟雄.交通网络弹复度与易碎度的测算与分析[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(7):849.  
WANG Dingwei, YE Weixiong. Evaluation and analysis of resilience and fragility for transportation networks [J]. *Control Theory and Applications*, 2010, 27(7):849.
- [13] CHEN L, MILLERE E. Resilience: an indicator of recovery capability in intermodal freight transport [J]. *Transportation Science*, 2012, 46(1):109.
- [14] NAIR R, AVETISYAN H, MILLERE E. Resilience framework for ports and other intermodal components [J]. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 2010, 2166(1):54.
- [15] HONG C, KEVIN C, NAN L. Developing a model for measuring the resilience of a port-hinterland container transportation network [J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 97(1):282.
- [16] 聂磊,张星臣,赵鹏,等.高速铁路列车运行调整策略的研究[J]. *铁道学报*, 2001, 23(4):1.  
NIE Lei, ZHANG Xingchen, ZHAO Peng, *et al.* Study on the strategy of train operation adjustment on high speed railway [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2001, 23(4):1.
- [17] 占曙光,赵军,彭其渊.高速铁路区间能力部分失效情况下列车运行实时调整研究[J]. *铁道学报*, 2016, 38(10):1.  
ZHAN Shuguang, ZHAO Jun, PENG Qiyuan. Real-time train rescheduling on high-speed railway under partial segment blockages [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2016, 38(10):1.
- [18] 叶玉玲,李文卿,张俊.高速铁路网络复杂特性及其传播动力学研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(5):655.  
YE Yuling, LI Wenqing, ZHANG Jun. Complex characteristics and propagation dynamics of high speed railway network [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(5):655.
- [19] BUKER T, SEYBOLD B. Stochastic modelling of delay propagation in large networks [J]. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2012, 2(1/2):34.
- [20] VEELANTURF L, KIDD M, CACCHIANI V, *et al.* A railway timetable rescheduling approach for handling large-scale disruptions [J]. *Erim Report*, 2016, 50(3):841.