

# 考虑回避点约束的 高速列车径路优化研究

石红国 罗 鑫 雷艳红

西南交通大学, 交通运输与物流学院, 成都 610031

**摘 要:**自然灾害对高速列车运行产生很高的危害,对于受到灾害影响的车站或区段,可以通过改变列车运行径路,回避受灾区段等方法疏通客流以减少损失。首先从这一调度调整思路出发,以高速铁路网的通过能力作为约束,确定整个路网的合理径路集。在径路中选择受灾车站作为回避点约束,建立了以时间、距离和运营成本最小的高速列车运行调整的多目标规划模型。然后构造了遗传算法,对算例进行求解,最后验证了模型的有效性。

**关键词:** 径路优化; 回避点; 高速列车

中图分类号: U292.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2016)01-0034-06

DOI: 10.3969/j.issn.1672-4747.2017.01.006

## Optimizing of High-speed Train Routes

### Considering the Avoidance Constraint

SHI Hong-guo LUO xin LEI Yan-hong

School of Transportation and Logistics,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

**Abstract:** Natural disasters are harmful to high-speed train running. For some railway stations or sections affected by disasters, you can change trains running pathways to avoid the disaster zone to clear the traffic and reduce losses. First, this paper started from the idea of scheduling adjustment. Then, taking the high-speed railway network capacity as a constraint, determining the reasonable path set of the whole road network and considering the affected stations as the avoidance point constraint, a multi-objective programming model for the high-speed train route, which has the minimum time, distance and operation cost, was established. After then, a genetic algorithm was used to solve the case. An example shows that the model and algorithm are effective.

收稿日期: 2016-05-18。

基金项目: 特殊地区高速铁路风致行车灾变控制准则、指挥预警机理及报警控制可靠性研究(U1334201)。

作者简介: 石红国(1974-),男,河南偃师人,博士,西南交通大学交通运输与物流学院副教授。

Key words: Route optimizing; avoidance points; high speed train

## 0 引言

我国高速铁路网分布十分广泛,其中不乏有穿过自然灾害高发区域的高速铁路<sup>[1]</sup>。灾害将严重危害高速铁路的安全,一方面及时进行灾害预警,可以避免或减少高速铁路的损失,另一方面,要从应急响应的角度考虑灾后的应对。目前,针对径路优化方面的研究主要有两类:一类是以军事运输为背景来进行关于列车必经点问题的研究,其代表成果有石玉峰等人做的基于遗传算法的军事运输路径优化研究<sup>[2]</sup>;一类是以列车开行方案为前提的列车径路优化研究,其代表人物有牛永涛、韩宝明等人<sup>[3]</sup>。本文主要从灾后响应出发,研究高速铁路部分车站或路段被灾害破坏后,如何在避开破坏地点的前提下迅速进行列车运行径路调整,对疏散滞留旅客,减少事故损失,具有较强的现实和理论意义。

## 1 问题描述与模型建立

### 1.1 问题描述

高速铁路受到灾害后,铁路网的连通性、通行能力与可靠性会降低。本文考虑到灾害后高速铁路网某区段或车站被破坏无法通行,为了运输疏散旅客和减少损失,临时调整路网上列车的运行径路,并在各项广义费用最少的前提下,保证铁路网上通过的列车数量不变。这一问题实质上是带有回避点约束的径路优化问题。

### 1.2 模型建立

高速铁路网络可以用  $G=(V,E,W,B)$  表示,  $V$  表示高速铁路网上车站的集合,  $E$  表示高速铁路网上弧集(路段),  $W$  表示弧集上的广义成本(包括时间成本、

距离成本和运输成本三部分),  $B$  表示高速铁路网上弧的能力约束集。

#### (1) 条件假设

其他未受影响区段和车站的通过能力不变;径路调整时尽量在原有径路基础上做出相应调整;区段和车站通过能力已知;列车区段运行时间和运行费用已知;中速动车和高铁列车的载客量相同;列车数量不受限制;运回径路尽量要求更多通过原有站点;未受灾列车不需要调整。

#### (2) 合理的径路集选择

设从车站  $i$  始发, 终到  $j$  车站的列车流径路集为

$$R_{ij} = \{\rho_{ij}^l | l=1, 2, \dots, \lambda(i, j)\}$$

式中,  $\lambda(i, j)$  为高速列车流可以选择的路径有  $\lambda(i, j)$  条。

定义弧-路关联矩阵如下:

$$a_{ij}^{ml} = \begin{cases} 1 & \text{若弧 } e_m \in \rho_{ij}^l \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

则沿路径  $\rho_{ij}^l$  运送一列列车所需成本  $w_{ij}^l$  为

$$w_{ij}^l = \sum_{m \in E} a_{ij}^{ml} w_m$$

对于本文研究的高速铁路网而言,一列高速列车只能选择  $R_{ij}$  中的一条路径运行,因此,定义 0-1 决策变量:

$$x_{ij}^l = \begin{cases} 1 & \text{若列车 } N_{ij} \text{ 选择路径 } \rho_{ij}^l \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中,  $N_{ij}$  为从车站  $i$  到车站  $j$  的高速列车,当  $N_{ij}$  选择  $\rho_{ij}^l$  时  $x_{ij}^l = 1$ , 则高速列车在径路上产生的费用为  $N_{ij}c_{ij}^l$ , 则所有列车在高速铁路网上产生的总成本为  $\sum N_{ij}w_{ij}^l x_{ij}^l$

#### (3) 模型的建立

目标函数

以所有高速列车在铁路路网上耗费的时间最小为目标, 则有

$$\min Z_1 = \sum N_{ij} T_{ij}^l x_{ij}^l \quad (1)$$

以所有高速列车在铁路路网上的行走距离最小为目标, 则有

$$\min Z_2 = \sum N_{ij} L_{ij}^l x_{ij}^l \quad (2)$$

以所有高速列车在铁路路网上发生的费用最小为目标, 则有

$$\min Z_3 = \sum N_{ij} C_{ij}^l x_{ij}^l \quad (3)$$

式中,  $T_{ij}^l$  为高速列车  $N_{ij}$  选择路径  $\rho_{ij}^l$  的时间消耗;  $L_{ij}^l$  为高速列车  $N_{ij}$  选择路径  $\rho_{ij}^l$  的行走距离;  $C_{ij}^l$  为高速列车  $N_{ij}$  选择路径  $\rho_{ij}^l$  的运输成本。

约束条件

$$\sum_l x_{ij}^l = 1 \quad \forall i, j \quad (4)$$

$$\sum_{i,j} N_{ij} a_{ij}^m x_{ij}^l \leq B_m \quad (5)$$

$$\sum N_{ij} x_{ij}^l \leq B_v^i \quad (6)$$

$$\sum_{i \in E_k^+} x_{ik} = 0 \quad \sum_{j \in E_k^-} x_{kj} = 0 \quad \forall k \in N \quad (7)$$

式(4)表示共同路径约束, 对于一列高速列车来说, 只能选择唯一运行径路; 式(5)为能力约束, 所有经过弧  $e_m$  列车数量不能超过  $e_m$  的限制能力约束; 式(6)为车站能力约束, 所有经过车站  $V_i$  的高速列车不能超过  $V_i$  的能力约束; 式(7)为回避点约束<sup>[4]</sup>,  $E_k^+$  和  $E_k^-$  表示进入和发出车站  $k$  的弧集合都为 0。

对于给定的高速铁路网络  $G=(V,E,W,B)$  和列车流, 当存在一定的“瓶颈”时, 可能会造成模型无解的情况。对此, 本文的处理方法是放弃其中一些列车流, 同时给每一支列车流设置一条虚拟径路  $\rho_{ij}^0(\rho_{ij}^k, k=0)$ , 并设其对应的  $W_{ij}^0(L)$ 、 $W_{ij}^0(T)$ 、 $W_{ij}^0(C)$

均为充分大的正数, 与之对应的  $B_m=0$  和  $B_v^i=0$ , 这样对于任意给定铁路网络, 总可以保证解不是空集。

## 2 算法

### 2.1 模型转换

根据上述分析, 该模型为多目标规划模型, 模型的目标函数可以表示为

$$Z = \omega_1 Z_1 + \omega_2 Z_2 + \omega_3 Z_3 = \sum N_{ij} x_{ij}^l (\omega_1 T_{ij}^l + \omega_2 L_{ij}^l + \omega_3 C_{ij}^l)$$

当  $i$ 、 $j$  的高速列车经过第  $l$  条径路时  $T_{ij}^l$ 、 $L_{ij}^l$ 、 $C_{ij}^l$  为定值, 权系数  $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 、 $\omega_3$  为定值, 因此可引用广义费用  $\lambda_{ij}^l$ , 其中

$$\lambda_{ij}^l = \omega_1 T_{ij}^l + \omega_2 L_{ij}^l + \omega_3 C_{ij}^l$$

则原模型可以转换为

$$\min Z = \sum N_{ij} \lambda_{ij}^l x_{ij}^l$$

s.t.

$$\sum_l x_{ij}^l = 1 \quad \forall i, j$$

$$\sum_{i,j} N_{ij} a_{ij}^m x_{ij}^l \leq B_m$$

$$\sum N_{ij} x_{ij}^l \leq B_v^i$$

$$\sum_{i \in E_k^+} x_{ik} = 0 \quad \sum_{j \in E_k^-} x_{kj} = 0 \quad \forall k \in N$$

### 2.2 模型求解

#### 2.2.1 权系数的确定

本文采用“拉开档次”法<sup>[5]</sup>, 这是一种突出整体差异的赋权法。如  $n$  个评价对象可以看成是由  $m$  个评价指标构成的  $m$  维评价空间中的  $n$  个点。寻求  $n$  个被评价对象的评价值就等于把这  $n$  个点向其中的某一维空间做投影, 选择指标权系数, 使得各被评价对象之间的差异尽量拉大, 即分散程度最大。

取极大型评价指标  $x_1, x_2, \dots, x_m$  的线性函数

$$y = \omega_1 x_1 + \omega_2 x_2 + \dots + \omega_m x_m = \omega^T x$$

式中,  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_m)^T$  为  $m$  的维权系数向量,

$x = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$  为被评价系统的状态向量。

将第  $i$  个系统的  $m$  标准观测值带入上式得到

$$y_i = \omega_1 x_{i1} + \omega_2 x_{i2} + \dots + \omega_m x_{im}$$

式中,  $i=1, 2, \dots, n$ 。

$$\text{定义 } y = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T, A = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

则  $y = A\omega$

确定权重系数向量  $\omega$  的准则, 为使评价指标间差异最大程度的显现出来, 即求得  $\omega^T x$ , 使得系统取值的分散程度或方差尽量大。  $y = \omega^T x$  按照  $n$  个系统取值构成的样本方差为:

$$s^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \frac{y^T y}{n} - \bar{y}^2$$

式中,  $\bar{y}=0$ 。

将  $y = A\omega$  带入上式可得

$$ns^2 = \omega^T A^T A \omega = \omega^T H \omega$$

式中,  $H = A^T A$

显然, 如果对于  $\omega$  的取值不加限定, 则上式的取值没有边界。因此, 限定  $\omega^T \omega=1$ , 求上式的最大值。即求  $\omega$  的取值, 使下面公式成立

$$\begin{aligned} & \max \omega^T H \omega \\ \text{s.t. } & \omega^T \omega=1 \\ & \omega > 0 \end{aligned}$$

本文用拉开档次法求得时间成本、距离成本跟运营成本的成本系数为  $\omega = (0.33 \ 0.34 \ 0.33)$ 。

### 2.2.2 求解方法

根据遗传算法的理论<sup>[6]</sup>, 结合本文模型, 构建遗传算法如下:

#### (1) 染色体编码

采用实数编码<sup>[7]</sup>方式对染色体进行编码。径路优化算法中的基因是路网上的车站, 这些车站的排列顺序需要从网络对应的邻接矩阵<sup>[8]</sup>中寻找, 排列顺序对应列车走行径路。

假设铁路网中的车站数为  $N$ , 则染色体基因数为  $N$ , 对于一对已给定 OD 起讫对, 染色体的第一个基因为 1, 接着是通过网络的邻接矩阵寻找其相连的节点, 如遇多个相连节点随机分配, 再接着是  $k$  个中间车站 ( $0 \leq k \leq N-2$ ), 然后才是  $N$ , 如果  $k < N-2$ , 还需要在后面加 0 基因, 使得基因总数为  $N$ 。

对算例中网络拓扑图所示的 12 个节点的铁路网, 给定 OD 点为  $V_2-V_{10}$ , 则图 1 所示的染色体合法。

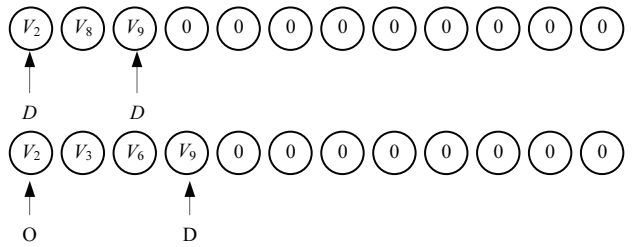


图 1 染色体编码示意

Fig. 1 Chromosome coding

#### (2) 初始种群的生成

原则上, 初始种群是随机生成的, 但随机生成的初始种群可能会导致本问题无可行解, 通过人工干预初始群体的方法能很好的生成具有可行解的初始种群。因此, 本文采用人工干预的方法得到初始种群。

#### (3) 适应度函数设计

本文的目标函数是求广义成本的最小值, 所以, 需要在目标函数前添加负号再作为适应度函数

$$\max Z^* = -\min Z$$

#### (4) 染色体选择

采用改进的轮盘赌选择法。在选择新个体时, 先在当前代的可行个体中选择最佳个体直接进入下一代(若有多个, 则随机选取一个), 后对其它个体依适

应度大小采用轮盘赌方式进行选择。

(5) 染色体交叉

对种群中的个体进行随机配对,随机寻找交叉点,然后以 $[0.6-0.8]$ <sup>[9]</sup>的概率互换两个个体的部分基因,从而产生新的个体。交叉后得到的必须是有效个体,即必须符合前面的染色体编码规则。

(6) 染色体变异

本文采取了两种变异方式:第一种方法是在 OD 点之间随机选择两点将他们交换位置从而产生新的个体;第二种方法是在 OD 点之间随机选出一个节点将它去掉从而产生新的个体。变异概率一般要低于 0.1。

### 3 算例

为了验证模型和算法,这里构造一个算例。高速铁路网中,因发生 11 级大风灾害,车站  $V_6$  被毁坏而中断,并在一段时间内不能恢复正常,为了尽量减少经过  $V_6$  的列车停车对路网各站旅客的影响,进行列车运行径路调整。铁路网如图 2 所示:

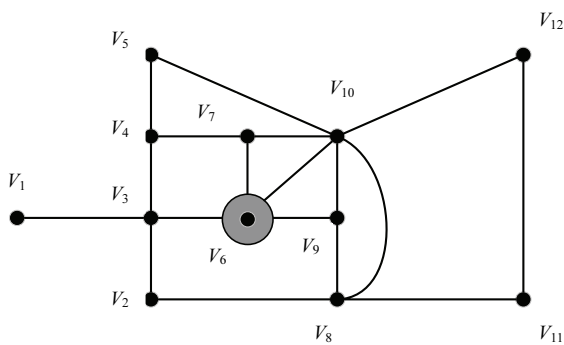


图 2 高速铁路网络拓扑图

Fig. 2 Topology of high-speed railway network

调整的原则如下:

(1) 路径:调整后经过各站的客流尽量满足 80% 以上;

(2) 费用:广义成本不增加或增加的尽量少于 10%;

(3) 方向:高铁都是双线铁路,只考虑单方向列车径路调整,另一方向列车与调整列车径路一致。

灾后该高速铁路网上各区段上的通过能力及求得各区段的广义成本如表 1 所示,各车站的通过能力如表 2 所示。灾害后,受到灾害影响的高速列车及原定线路信息如表 3 所示。

表 1 各区段通过能力

Tab. 1 Capacity of each section

| 线路         | 广义费用 | 剩余通过能力/对 | 线路          | 广义费用 | 剩余通过能力/对 |
|------------|------|----------|-------------|------|----------|
| $e_{1,3}$  | 96   | 12       | $e_{6,9}$   | 101  | 12       |
| $e_{2,3}$  | 86   | 9        | $e_{6,10}$  | 100  | 10       |
| $e_{2,8}$  | 182  | 10       | $e_{7,10}$  | 108  | 10       |
| $e_{3,4}$  | 108  | 6        | $e_{8,9}$   | 93   | 7        |
| $e_{3,6}$  | 91   | 17       | $e_{8,10}$  | 117  | 11       |
| $e_{4,5}$  | 164  | 3        | $e_{8,11}$  | 147  | 6        |
| $e_{4,7}$  | 148  | 4        | $e_{9,10}$  | 107  | 3        |
| $e_{5,10}$ | 159  | 6        | $e_{10,12}$ | 95   | 13       |
| $e_{6,7}$  | 110  | 4        | $e_{11,12}$ | 140  | 8        |

表 2 车站通过能力

Tab. 2 Station passing capacity

| 车站    | 剩余通过能力/对 | 车站       | 剩余通过能力/对 |
|-------|----------|----------|----------|
| $v_1$ | 3        | $v_7$    | 8        |
| $v_2$ | 19       | $v_8$    | 14       |
| $v_3$ | 21       | $v_9$    | 12       |
| $v_4$ | 7        | $v_{10}$ | 24       |
| $v_5$ | 10       | $v_{11}$ | 8        |
| $v_6$ | 18       | $v_{12}$ | 20       |

表 3 受灾害影响的列车及径路信息

Tab. 3 Information of trains and routes affected by disasters

| 车次  | 原定径路                    | 广义费用 | 车次   | 原定径路                        | 广义费用 |
|-----|-------------------------|------|------|-----------------------------|------|
| D1  | $V_1-V_3-V_2-V_8$       | 364  | G203 | $V_{12}-V_{10}-V_7$         | 203  |
| G25 | $V_3-V_6-V_{10}-V_{12}$ | 315  | D3   | $V_7-V_{10}-V_5$            | 267  |
| D31 | $V_5-V_{10}-V_9$        | 266  | D37  | $V_2-V_3-V_6-V_{10}-V_{12}$ | 372  |
| G5  | $V_4-V_3-V_6-V_9$       | 300  | D311 | $V_7-V_{10}-V_8$            | 225  |
| G51 | $V_3-V_2-V_8-V_{11}$    | 415  | G101 | $V_8-V_2-V_3$               | 268  |

原定径路的广义费用为  $364+315+266+300+415+203+267+372+225+268=2995$ 。

用 MATLAB 得出运行结果见表 4:

表 4 受灾害影响列车径路选择信息及广义费用

Tab.4 Train selection information affected by disasters and affected generalized costs

| 车次   | 灾后选择径路                      | 广义费用 |
|------|-----------------------------|------|
| D1   | $V_1-V_3-V_2-V_8$           | 364  |
| G25  | $V_3-V_4-V_7-V_{10}-V_{12}$ | 459  |
| D31  | $V_5-V_{10}-V_9$            | 266  |
| G5   | $V_4-V_7-V_{10}-V_9$        | 363  |
| G51  | $V_3-V_2-V_8-V_{11}$        | 415  |
| G203 | $V_{12}-V_{10}-V_7$         | 203  |
| D3   | $V_7-V_{10}-V_5$            | 267  |
| D37  | $V_2-V_8-V_{10}-V_{12}$     | 394  |
| D311 | $V_7-V_{10}-V_8$            | 225  |
| G101 | $V_8-V_2-V_3$               | 268  |

此时, 广义费用为  $z=364+459+266+363+415+203+267+394+225+268=3224$ 。大风灾害后, 高速铁路网上受影响的 10 列列车不重新调整运行径路, 则

该 10 列车只有 7 列能通过, G25、G5 和 D37 次列车将中断运行, 相关路段上的车站不可达。如大风灾害后高速铁路网上的列车按表 4 重新调整运行径路, 则 10 列列车可以全部通过。调整后各站的始发和终到流量满足未调整时的 100%, 通过流量满足大于未调整时的 80%; 调整后的广义费用增加 229, 小于未调整时的 10%, 故该优化有效。随着高速铁路网上列车对数增加, 本文的模型算法可解决这类问题。

## 4 结束语

自然灾害下高速列车径路优化的制约因素很多, 难度颇大, 本文建立了考虑回避点约束的大风灾害下径路优化模型, 并用 MATLAB 编写遗传算法程序对模型进行了求解, 并验证了模型的可行性, 为研究自然灾害下高速列车径路优化提供了理论参考。

## 参考文献

- [1] 雷 强. 自然灾害条件下列车运行径路调整优化 [D]. 成都: 西南交通大学.
- [2] 石玉峰, 粟 实, 彭其渊. 基于遗传算法的军事运输路径优化[J]. 西南交通大学学报, 2005, (2).
- [3] 牛永涛. 成网条件下客运专线列车开行方案编制理论与方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [4] 石玉峰. 基于战时模糊运输时间的路径优化[J]. 交通运输工程与信息学报, 2004, (3).
- [5] 郭亚军. 综合评价理论与方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [6] Holland J. H. Adaptation in natural and artificial system[M]. Cambridge, Mass, USA: Mit Press, 1975.
- [7] 景 玲, 黄席樾, 潘 娅. 基于遗传算法的动态路径诱导[J]. 重庆大学学报, 2002, (2).
- [8] 王荣彦. 城市交通流诱导系统动态路阻函数及最优路径算法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- [9] Dezong K. A. Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive system [D]. Ann Arbor. Mich. USA: Univ. of Michigan, 1975.

(中文编辑: 吴继屏)