

文章编号: 1674—8247(2021)05—0031—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2021.05.006

## 基于双层规划模型的高速铁路社会定价方法研究

丁昌星<sup>1</sup> 许旺土<sup>1</sup> 杨成和<sup>2</sup>

(1. 厦门大学, 福建 厦门 361000; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

**摘要:** 票价是旅客选择出行方式的决定因素之一,合理定制高速铁路票价具有重大意义。本文在高速铁路定价的双层规划模型中考虑社会因素,把社会福利因素添加至上层规划模型中,将社会福利最大化作为上层规划的目标,将旅客广义出行费用最低作为下层规划的目标,并采用灵敏度分析法求解,得到使社会福利最大化的票价。然后采用模型对成渝通道内成渝中线高速铁路二等座的社会定价水平进行分析,为成渝中线高速铁路开通运营后的票价定制提供参考。

**关键词:** 高速铁路; 双层规划模型; 社会定价水平

**中图分类号:** F532.5      **文献标志码:** A

## Study on Social Pricing Method for High-speed Railway based on Bi-level Programming Model

DING Changxing<sup>1</sup> XU Wangtu<sup>1</sup> YANG Chenghe<sup>2</sup>

(1. Xiamen University, Xiamen 361000, China;

2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The fare is a determinant for the passengers to choose the travel mode, and it is of great significance to reasonably make decisions on the fare of high-speed railway passenger services. In this paper, social considerations are taken into the bi-level programming model of high-speed railway pricing, where social welfare is added to the upper-level programming model by regarding maximizing social welfare as the goal of the upper-level programming, and minimizing the generalized travel cost of passengers as the goal of the lower-level programming. Then sensitivity analysis is used to determine the fare that maximizes social welfare. Then, the model is used to analyze the social pricing level of the second-class seat of the Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway in Chengdu-Chongqing Passage, which provides a reference for making decisions on fare after the opening and operation of this railway.

**Key words:** high-speed railway; bi-level programming model; social pricing level

近年来,随着高速铁路的飞速发展,越来越多的旅客将高速铁路作为出行交通工具的首选。相对于其他交通出行方式,高速铁路具有速度较快、安全性高的特点。在竞争激烈的交通市场中,票价是旅客选择出行方式的重要决定因素,自2016年以后,铁路票价的定

价权就由政府下放到了各铁路公司,目前,我国高速铁路票价是以成本为基础,按照高速铁路时速进行分档定价的,并遵循“递远递减”的票价定制原则。

近年来,不少学者对高速铁路的定价模型进行了研究。四兵锋<sup>[1]</sup>等通过建立三层规划模型得到最优

收稿日期:2021-03-01

作者简介:丁昌星(1996-),男,硕士研究生。

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司科技开发计划(KSNQ202053)

引文格式:丁昌星,许旺土,杨成和. 基于双层规划模型的高速铁路社会定价方法研究[J]. 高速铁路技术,2021,12(5):31-35.

DING Changxing, XU Wangtu, YANG Chenghe. Study on Social Pricing Method for High-speed Railway based on Bi-level Programming Model[J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5):31-35.

票价,保证在旅客出行费用最低的同时,客运公司能获得最大的利益;孙熙庆<sup>[2]</sup>等提出采用动态票价保证铁路收益最大化;杨宇航<sup>[3]</sup>等根据旅客对票价的敏感程度对高速铁路票价进行差别定价;卜伟<sup>[4]</sup>等提出根据乘车方向、乘车区间、订票时间等因素进行差别定价,使铁路部门收益最大化;徐彦将<sup>[5]</sup>旅客根据出行时间和价格敏感度进行分类,建立使高速铁路收益最大化的动态票价模型;杨同庆<sup>[6]</sup>利用双层规划模型求得使铁路公司经济收益最大化的铁路开行方案;吴昊<sup>[7]</sup>等提出高速铁路票价应根据弹性需求对同一通道的民航票价实行折扣。

上述制定高速铁路票价的模型基本都是从铁路公司经济收益最大化的角度来分析的,然而高速铁路作为公共交通产品,票价模型应考虑高速铁路本身的公益属性。因此,本文在高速铁路定价的双层规划模型中加入社会福利因素,在高速铁路票价定制过程考虑社会福利因素,并采用灵敏度分析法求解,得到社会福利最大化的票价。

## 1 考虑社会福利的双层规划模型

### 1.1 双层规划模型

高速铁路票价的定制可看作是一个双层决策系统,上层决策者一般为高速铁路公司,下层决策者为旅客。上层决策者对收益有要求,会对票价进行变动,下层决策者通过对当前已有交通方式优劣的判断,选择符合自己需求的交通方式。因此,双层规划模型符合高速铁路市场旅客购票选择的行为。

双层规划的一般形式为:

$$\begin{aligned} & (U) \max F(x, y) \\ & \text{s. t. } G(x, y) \leq 0 \\ & (L) \min f(x, y) \\ & \text{s. t. } g(x, y) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

本文中,上层规划(U)的目标是使上层决策者的社会福利最大,下层规划(L)的目标是使旅客群体在多种交通工具中选择广义出行费用最低的出行方式。

### 1.2 高速铁路社会定价水平双层规划模型

#### 1.2.1 上层规划模型

根据双层规划一般的形式建立基于社会福利最大化的高速铁路票价双层规划模型。上层规划模型的目标为社会福利最大化,本文采用社会剩余来表示社会福利,社会剩余指的是消费者剩余与生产者剩余的总和。在高速铁路市场中,消费者剩余是旅客愿意支付的最高票价与实际票价的差额,生产者剩余是高速铁

路公司的利润,因此上层规划模型可表示为:

$$\begin{aligned} \max U(p_{\text{高铁}j}) = & \alpha \times (p_{\text{高铁}j} - c_{\text{高铁}j}) \times q_{\text{高铁}j}(p_{\text{高铁}j}) + \\ & \beta \times (p_{\text{高铁}j\text{max}} - p_{\text{高铁}j}) \times q_{\text{高铁}j}(p_{\text{高铁}j}) \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $U(p_{\text{高铁}j})$ ——政府在高速铁路 $j$ 坐席上获得的社会福利;

$p_{\text{高铁}j}$ ——高速铁路 $j$ 坐席的票价;

$c_{\text{高铁}j}$ ——高速铁路 $j$ 坐席运送每个旅客的平均成本;

$q_{\text{高铁}j}$ ——乘坐高速铁路 $j$ 坐席的客流量;

$p_{\text{高铁}j\text{max}}$ ——旅客乘坐高速铁路 $j$ 坐席愿意支付的最大价格;

$\alpha$ ——生产者剩余权重参数, $\alpha$ 越高则社会福利中生产者的利润占比越大;

$\beta$ ——消费者剩余权重参数, $\beta$ 越高则社会福利中消费者的收益占比越大。

因此,在考虑创造最大社会福利的情况下,高速铁路社会定价水平的上层规划模型为:

$$\begin{aligned} \max U(p_{\text{高铁}j}) = & \alpha \times (p_{\text{高铁}j} - c_{\text{高铁}j}) \times q_{\text{高铁}j}(p_{\text{高铁}j}) + \\ & \beta \times (p_{\text{高铁}j\text{max}} - p_{\text{高铁}j}) \times q_{\text{高铁}j}(p_{\text{高铁}j}) \\ \text{s. t. } & p_{\text{高铁}j} \geq 0 \end{aligned} \quad (3)$$

#### 1.2.2 下层规划模型

双层规划模型的下层规划模型描述旅客选择广义出行费用最小交通方式的行为,因此,建立高速铁路票价下层规划的一般形式为:

$$\begin{aligned} \min D(q, Q) = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \int_0^{q_{ij}} f_{ij}(x) dx \\ \text{s. t. } & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{ij}(p_{ij}) = Q \\ & q_{ij} \geq 0, i \in I, j \in J \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $f_{ij}(x)$ ——广义费用函数;

$Q$ ——运输通道内旅客出行需求总量;

$q_{ij}$ ——乘坐 $i$ 交通工具 $j$ 坐席的客流量;

$I$ ——不同交通工具的集合;

$J$ ——不同坐席的集合。

当广义费用减少时,运输通道的需求增加,但因运输通道连接城市的人口有限,运输需求不会无限制的增加,因此在下层规划中需考虑弹性需求<sup>[8]</sup>。弹性需求问题求解困难,本文通过增加冗余线路使弹性需求问题变成固定需求问题<sup>[9-10]</sup>。当运输通道内供给量与需求量相同时,下层规划模型可变转化为:

$$\begin{aligned} \min D(q, Q) &= \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \int_0^{q_{ij}} f_{ij}(x) dx \\ \text{s. t. } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} q_{ij} &= Q^* \\ q_{ij} &> 0, i \in I, j \in J \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $Q^*$ ——各运输方式的旅客出行需求之和。

本文将旅客的广义费用函数<sup>[11]</sup>设置为:

$$f(q_{ij}) = a(q_{ij})^b + V_{ij} \quad (6)$$

式中:  $a, b$ ——服务属性参数;

$f_{ij}$ ——旅客选择  $i$  客运方式  $j$  坐席的广义出行费用;

$q_{ij}$ ——旅客乘坐  $i$  客运方式  $j$  坐席的客流量;

$V_{ij}$ ——旅客乘坐客运方式  $i$  坐席  $j$  的可观测费用。

由此得到广义出行费用函数:

$$f_{ij}(q_{ij}) = aq_{ij}^b + (\theta_1 T_{ij} + \theta_2 E_{ij} + \theta_3 con_{ij} + \theta_4 com_{ij}) / s_i \quad (7)$$

式中:  $T_{ij}, E_{ij}, Con_{ij}, Com_{ij}$ ——旅客选择第  $i$  种客运方式坐席  $j$  的快速性、经济性、方便性、舒适性费用;

$\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ ——对应的权重;

$S_i$ ——安全性;

$I$ ——不同运输方式的集合;

$J$ ——不同坐席的集合。

### 1.3 模型的求解算法

本文使用灵敏度分析法<sup>[12-13]</sup>对模型求解,具体步骤为:

(1) 设定  $p_{ij}^n (n=0)$  为票价的初始值。

(2) 将初始票价代入下层规划模型,求出客流分配量。

(3) 采用灵敏度分析法得到票价和客流量的近似线性关系。

(4) 将客流量与票价的近似关系代入上层规划,求出上层规划的最优票价。

(5) 用新得到的最优票价反复迭代求得最优解。

## 2 成渝中线高速铁路二等座社会定价

### 2.1 定价水平

本文以成渝通道的铁路出行为例,对成渝中线高速铁路二等座的社会定价水平进行分析。当前成渝通道旅客铁路出行主要通过成渝高速铁路和成遂渝铁路,其中成渝高速铁路设计速度 350 km/h,是成渝两城间的重要客运通道,客流需求旺盛;成遂渝铁路设计

速度 200 km/h,是成渝两城间的辅助客运通道。成渝中线高速铁路是成渝两城间待建高速铁路,开通初期运营速度为 350 km/h,后期有望提速至 400 km/h。

假设成渝两城的乘客主要乘坐成渝中线高速铁路、成渝高速铁路和成遂渝铁路出行,采用《成渝中线高速铁路可行性研究总说明书》<sup>[14]</sup>的数据计算成渝中线高速铁路二等座的社会定价水平。设成渝中线高速铁路一等座、二等座的定价水平分别为 0.99 元/人公里和  $p_2$  元/人公里,成渝中线高速铁路、成渝高速铁路和成遂渝铁路各坐席的可观测费用如表 1 所示。

表 1 各高速铁路不同坐席可观测费用表(元/人公里)

属性	成渝中线高速铁路		成渝高速铁路		成遂渝铁路	
	一等座	二等座	一等座	二等座	一等座	二等座
快速性费用	0.18	0.11	0.23	0.14	0.41	0.25
经济性费用	1.05	$p_2 + 0.05$	0.94	0.61	0.59	0.39
方便性费用	0.40	0.24	0.42	0.25	0.44	0.27
舒适性费用	0.07	0.04	0.07	0.04	0.09	0.06
安全性	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99	0.99

本文采用孙朝苑<sup>[15]</sup>对高速铁路服务特性的研究结果,使用长途旅行服务属性权值,将各高速铁路快速性费用、舒适性费用、经济费用、方便性费用的权重分别设为 0.409 0、0.211 0、0.161 2、0.209 7,得到旅客乘坐不同高速铁路不同坐席的可观测出行费用值如表 2 所示。

表 2 各高速铁路不同坐席的可观测出行费用表(元/人公里)

成渝中线高速铁路		成渝高速铁路		成遂渝铁路	
一等座	二等座	一等座	二等座	一等座	二等座
0.34	$0.1628p_2 + 0.11$	0.35	0.22	0.38	0.23

设成渝两城间每日的高速铁路运输总人次为 11 万人次,则需求函数  $d = 110\,000 - \lambda u$ ,取  $\lambda = 10^{[16]}$ ,可得虚拟客流量  $q_0, f_0(q_0) = 0.1q_0$ ,下层规划模型的弹性需求问题由此变成了固定需求问题。广义出行费用函数的服务属性参数  $a, b$  分别取 2 和 0.4<sup>[17]</sup>,将表 2 中各高速铁路不同坐席的可观测费用乘以各高速铁路线路长度,便可建立成渝中线高速铁路二等座的社会定价双层规划模型:

$$\begin{aligned} \max U(P_2) &= [\alpha \times (p_2 \times L - c_2) \times q_2(p_2 \times L) + \\ &\quad \beta \times (p_{2\max} - p_2 \times L) \times q_2(p_2 \times L)] \\ \text{s. t. } p_2 &\geq 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \min D(q) &= \int_0^{q_0} 0.1q dq + \int_0^{q_1} (2q^{0.4} + \\ &\quad 100.30) dq + \int_0^{q_2} (2q^{0.4} + 0.1628p \times L + \\ &\quad 32.89) dq + \int_0^{q_3} (2q^{0.4} + 103.70) dq + \end{aligned}$$

$$\int_0^{q_4} (2q^{0.4} + 64.17) dq + \int_0^{q_5} (2q^{0.4} + 100.73) dq + \int_0^{q_6} (2q^{0.4} + 68.13) dq$$

$$\text{s. t. } q_0 + q_1 + q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 110\,000$$

$$q_j > 0, j = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 \quad (8)$$

式中: $p_2$ ——成渝中线高速铁路二等座社会定价水平;

$L$ ——成渝中线全线长度;

$c_2$ ——成渝中线高速铁路二等座每运送1个乘坐全程的旅客的平均成本;

$q_2$ ——成渝中线高速铁路二等座的客流量;

$q_j$ ——不同高速铁路不同坐席的客流量,其中 $j=0,1,2,3,4,5,6$ 分别表示虚拟路径、成渝中线高速铁路一等座、成渝中线高速铁路二等座、成渝高速铁路一等座、成渝高速铁路二等座、成遂渝铁路一等座、成遂渝铁路二等座。

考虑到当前成渝通道内各高速铁路一等座票价约为二等座票价的1.6倍,旅客心理接受的二等座最高票价不会超过一等座的票价,也不会低于二等座的票价,即 $1.6p_2 \geq p_{2\max} \geq p_2$ ,故取二者的均值,设旅客能接受的成渝中线高速铁路二等座最高价格 $p_{2\max}$ 为票价的1.3倍,即 $p_{2\max} = 1.3p_2$ 。《成渝中线高速铁路可行性研究总说明书》在保本微利情况下设置的票价水平为0.62元/人公里(全程181元),取成渝中线高速铁路二等座每运输一个旅客的平均成本为0.58元/人公里(全程169.4元)。为保证上层规划模型的社会福利能同时兼顾生产者与消费者利益,取上层规划模型的 $\alpha$ 为0.4, $\beta$ 为0.6。此时,社会福利中消费者剩余的权重略大于生产者剩余的权重,表明该权重参数的计算结果会更偏重于消费者的利益。采用灵敏度分析法对模型求解,通过matlab计算,求得成渝中线高速铁路二等座的社会定价水平为0.578元/人公里(全程168.69元)。

## 2.2 结果分析

作为中国第一条预留400 km/h的高速铁路,成渝中线高速铁路对成渝经济圈和中国铁路的发展都具有重大意义。因此,成渝中线高速铁路票价的定制不只要考虑高速铁路公司的收益,更要考虑适当对乘客让利,以创造更大的社会福利,更能体现高速铁路的公益性质。《成渝中线高速铁路可行性研究总说明书》拟定的成渝中线高速铁路二等座市场定价水平为0.62元/人公里(全程180元),通过社会福利最大化双层规划票价模型计算出的成渝中线高速铁路二等座

社会定价水平为0.578元/人公里(全程168.69元),略低于市场定价水平。这是因为本文对成渝中线高速铁路二等座的定价相对更加重视消费者剩余,更符合高速铁路作为公共交通产品的定价原则,可为成渝中线高速铁路开通运营后的票价定制提供参考。

## 2.3 参数变动对计算结果的影响

上层规划模型中, $\alpha$ 是生产者剩余的权重参数, $\beta$ 是消费者剩余的权重参数,当参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 变化时,成渝中线高速铁路二等座的社会定价水平也随之变化。不同 $\alpha$ 、 $\beta$ 迭代计算的成渝中线高速铁路二等座社会定价水平如表3所示。

表3 参数 $\alpha$ 、 $\beta$ 对社会定价水平的影响表

$\alpha$	$\beta$	社会定价水平/(元/人公里)
1	0	0.73
0.9	0.1	0.72
0.8	0.2	0.70
0.7	0.3	0.68
0.6	0.4	0.65
0.5	0.5	0.62
0.4	0.6	0.58
0.3	0.7	0.53
0.2	0.8	0.46
0.1	0.9	0.37
0	1	0.24

从表3可以看出,随着 $\alpha$ 的增大及 $\beta$ 的减小,高速铁路的社会定价水平会逐渐增大,而随着 $\alpha$ 的减小及 $\beta$ 的增大,高速铁路的社会价格会逐渐减少。这是因为 $\alpha$ 在上层规划模型中代表生产者剩余在社会剩余中的比重, $\beta$ 代表消费者剩余在社会剩余中的比重,本文所求的是社会福利水平最大化的票价,但从生产者也就是高速铁路公司的角度来看,票价越高,高速铁路公司获得的利润也就越高,对于旅客来说,票价越低,则旅客获得的额外净收益越大,生产者与消费者之间是存在矛盾的。当 $\alpha=0.4$ 、 $\beta=0.6$ 时,本文求得的社会定价水平略低于设定成本,高速铁路公司会处于略微亏损的状态,表明成渝中线高速铁路二等座的定价相对更加侧重消费者利益,考虑到成渝中线高速铁路的公益属性,该定价也较为合理。若高速铁路公司想获得更高利润,则通过增大生产者剩余的权重,便可得到更高票价。同理,若高速铁路公司想创造更大的消费者剩余,则可增大消费者剩余的权重,但票价也会降低。

## 2.4 最高接受价格 $p_{\max}$ 变动对计算结果的影响

对旅客能接受的最高票价进行灵敏度分析,结果如图1所示。

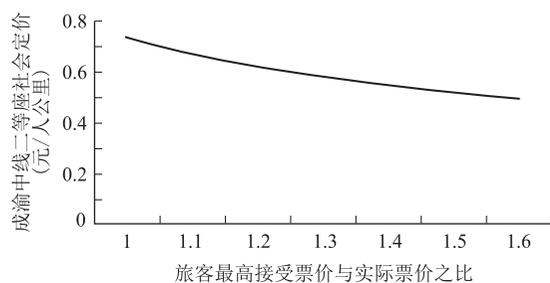


图1 旅客最高接受票价  $p_{\max}$  对社会定价水平的影响

从图1可以看出,旅客所能接受的票价越高,社会定价水平就越低,这是因为当旅客所能接受的最高票价变高时,票价越低产生的消费者剩余就越大,从而产生的社会福利也越大。当旅客所能接受的最高票价为实际票价时,社会定价水平最高,这是因为当旅客所能接受的最高票价为实际票价时,按照消费者剩余的概念,社会福利中的消费者剩余为0,上层规划模型只考虑企业利润的最大化,当 $\alpha = 1$ 且 $\beta = 0$ 时,上层规划模型同样也只考虑企业利润,因此这两种情况下的定价水平会相同。在消费者剩余权重 $\alpha$ 与生产者剩余权重 $\beta$ 相等的情况下,当旅客能接受的最高票价小于票价的1.3倍时,票价大于成本,高速铁路公司有盈利;当旅客所能接受的票价大于等于票价的1.3倍时,票价低于成本,高速铁路公司处于亏损状态,但旅客所能得到的消费者剩余更大。

### 3 结束语

本文通过对制定高速铁路票价的双层规划模型进行改进,得到使社会福利最大化的双层规划定价模型,并采用模型对成渝中线高速铁路二等座的社会定价水平进行分析。结果表明,高速铁路社会定价水平会随生产者剩余与消费者剩余权重参数的变化而变化,若生产者剩余的权重变高,则高速铁路的社会定价水平也高,企业可获得更多的利润;若消费者剩余的权重变高,则高速铁路的社会定价水平会变低,消费者可享受更多的收益。高速铁路作为一种重要的公共交通工具,其票价的制定必然要考虑社会因素,遵从公益性原则,因此本文模型及分析结果可为铁路票价制定提供参考。

### 参考文献:

[1] 四兵锋,高自友. 市场竞争条件下的客运价格优化策略模型及算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(1): 73-79.  
SI Bingfeng, GAO Ziyou. Optimal Model for Passenger Transport Pricing in Market Competition[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(1): 73-79.

[2] 孙熙庆,孙熙安. 铁路客票动态票价控制及销售策略探讨[J]. 铁道运输与经济, 2012, 34(10): 33-36.  
Sun Xiqing, Sun Xi'an. Discussion on Railway Dynamic Ticket Price Control and Selling Strategies[J]. Railway Transport and Economy, 2012, 34(10): 33-36.

[3] 杨宇航,张琦. 京沪高速铁路票价调整与优化策略研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(10): 2043-2049.  
YANG Yuhang, ZHANG Qi. Research on Ticket Price Adjustment and Optimization Strategy of the Beijing-Shanghai High Speed Railway [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(10): 2043-2049.

[4] 卜伟,王若雅,芮光伟. 高铁差别定价研究[J]. 北京交通大学学报(社会科学版), 2019, 18(1): 67-74.  
BU Wei, WANG Ruoya, RUI Guangwei. Research on Differential Pricing of High-speed Rail[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2019, 18(1): 67-74.

[5] 徐彦. 基于收益管理的高铁动态定价方法[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(2): 319-325.  
XU Yan. Dynamic Pricing Method for High-speed Railway Based on Revenue Management [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(2): 319-325.

[6] 杨同庆. 基于双层规划模型的城际铁路开行方案研究[J]. 高速铁路技术, 2017, 8(3): 63-67.  
YANG Tongqing. Study on Train Operation Scheme for Intercity Railway Base on Bi-Level Planning Model[J]. High Speed Railway Technology, 2017, 8(3): 63-67.

[7] 吴昊,程楠. 我国高速铁路运价差异化策略研究:基于需求弹性的分析[J]. 价格理论与实践, 2017(10): 56-59.  
WU Hao, CHENG Nan. Differentiated Price Tactics of High Speed Railway Transportation in China-Analysis Based on the Demand Elasticity[J]. Price: Theory & Practice, 2017(10): 56-59.

[8] 宗小波. 竞争导向的铁路客票定价研究[D]. 成都:西南交通大学, 2014.  
ZONG Xiaobo. Research on Railway Ticket Pricing Based on Competition among Different Transportation Models [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

[9] 李明琨,鹿艳,张佳玮. 基于市场细分的我国高速铁路客运定价方法与策略[J]. 价格月刊, 2015(7): 12-15.  
LI Mingkun, LU Yan, ZHANG Jiawei. Pricing Method and Strategies for China's High-speed Rail in Differentiated Market Segmentation [J]. Prices Monthly, 2015(7): 12-15.

[10] 陈建华,高自友. 多模式条件下需求变动时铁路客票价格制定的优化模型及算法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2001, 1(4): 299-305.  
CHEN Jianhua, GAO Ziyou. A Bi-Level Model and Solution Algorithm for Passenger-Ticket Pricing Problem under the Condition of Multi-Model Transportation with Elastic Demands[J]. Communication and Transportation Systems Engineering and Information, 2001, 1(4): 299-305.

[11] 张琦. 竞争视角下高铁定价方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2019.  
ZHANG Qi. Research on High-speed Rail Pricing Method from the Perspective of Competition [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

(2)两个牵引变电所测距装置接收两个供电臂所有AT所、分区所和对侧牵引变电所故障测距装置的故障数据。

(3)两个牵引变电所测距装置根据各自供电臂上牵引变电所、AT所、分区所的馈线电压、T线电流、F线电流等电气参数判断故障是否发生在本供电臂,然后由判断在本供电臂的牵引变电所故障测距装置判别故障类型和故障行别。

(4)故障供电臂的牵引变电所故障测距装置对TR、FR型故障采用故障区段的AT中性点吸上电流比法或横联线电流比法进行故障测距,对TF型故障,采用横联线电流比法进行故障测距。

## 5 结束语

本文介绍了基于分区所实现双边供电的3种电流比测距方法,并基于Matlab/Simulink仿真平台,建立了双边全并联AT供电方式牵引网模型。仿真分析结果表明,吸上电流比法依然适用于TR型和FR型故障测距,横联线电流比依然适用于TR型、FR型和TF型故障测距,上下行电流法已不再具备适用性。最后提出了相邻牵引变电所测距装置协同的双边全并联AT供电方式下的故障测距策略。本文的研究成果对丰富我国牵引供电系统故障测距理论具有重要的现实意义。

## 参考文献:

- [1] 林国松,李群湛,陈小川. 电气化铁道供电牵引网故障测距综述[C]//中国电气化铁路两万公里学术会议论文集. 北京, 2005: 203-207.
- LIN Guosong, LI Qunzhan, CHEN Xiaochuan. Summary of Fault Location of Electrified Railway Power Supply Traction Network [C]// Proceedings of the Academic Conference on 20,000 km of Electrified Railway in China Railway Track. Beijing, 2005: 203-207.
- [2] 王继芳. 全并联AT供电牵引网故障测距研究[D]. 成都:西南交通大学, 2006.
- WANG Jifang. Research on Fault Location of All-Parallel at Traction System [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [3] 郭明杰,林国松,陈小川. 基于横联线电流比原理的全并联AT牵引网故障测距装置[J]. 继电器, 2006, 34(22): 36-39.
- GUO Mingjie, LIN Guosong, CHEN Xiaochuan. Fault Locator of All-Paralleling AT Traction Power Supply Based on the Theory of the Current Ratio of Paralleling Lines [J]. Relay, 2006, 34(22): 36-39.
- [4] Q/CR 686-2018 电气化铁路AT供电方式故障测距装置[S]. Q/CR 686-2018 Fault Location Device for Electrical Railway of AT Feeding System [S].
- [5] 智慧,袁勇,李剑,等. 双边供电模式下高速铁路AT供电系统供电能力计算与分析[J]. 中国铁路, 2017(12): 66-71.
- ZHI Hui, YUAN Yong, LI Jian, et al. Calculation and Analysis of the Power Supply Capacity of the AT Power Supply System for High-speed Railway under the Two-Way Feeding Model [J]. China Railway, 2017(12): 66-71.
- [12] 张敏,刘国山,吴乐可,等. 双层运输问题及其算法[J]. 应用数学学报, 2008, 31(1): 17-23.
- ZHANG Min, LIU Guoshan, WU Leke, et al. Model and Algorithm for Bilevel Transportation Problem [J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2008, 31(1): 17-23.
- [13] 任刚. 交通管理措施下的交通分配模型与算法[M]. 南京:东南大学出版社, 2007.
- REN Gang. Traffic Assignment Model and Algorithm under Traffic Management Measures [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2007.
- [14] 中铁二院工程集团有限责任公司. 成渝中线高速铁路可行性研究总说明书[R]. 成都:中铁二院工程集团有限责任公司, 2020.
- China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd. General Specification for the Feasibility Study of the Second Chengdu-Chongqing High-speed Railway [R]. Chengdu: China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 2020.
- [15] 孙朝苑. 客运专线对沿线城市铁路客运量分流问题的研究[J]. 铁道经济研究, 2004(3): 44-46.
- SUN Chaoyuan. Study on Passenger Traffic Diversion of Passenger Dedicated Lines to Cities along the Line [J]. Railway Economics Research, 2004(3): 44-46.
- [16] 赵飞. 基于多阶段双层规划模型的高速铁路票价体系优化研究[D]. 北京:北京交通大学, 2017.
- ZHAO Fei. Research on the Railway Pricing System Optimization Based on the Multi-Stage Bi-Level Programming Model [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.
- [17] 刘玉敬. 基于旅客出行选择行为的高铁客票定价方法研究[D]. 北京:北京交通大学, 2015.
- LIU Yujing. Research on the Railway Optimal Pricing Based on the Passenger Travel Choice Behavior [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2015.