

# 不完全信息下高铁晚点与乘客选择 行为博弈模型

雷爱国<sup>1</sup>, 胡启洲<sup>1</sup>, 吴啸宇<sup>1</sup>, 曲思源<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学自动化学院, 南京 210094; 2. 中国铁路上海铁路局集团有限公司, 上海 200040)

**摘要:** 研究了高速铁路列车的到达状态对铁路乘客选择行为的具体影响因素。首先, 构建高速铁路列车到达状态与铁路乘客选择行为演化博弈模型。其次, 分析博弈双方的演化行为, 获得复制动态系统的演化均衡策略。最后, 进行仿真验证, 结果表明: 演化博弈行为最终有两个演化稳定状态, 当高速列车晚点时间在 30 min 以内, 高速列车趋于准时到达策略, 乘客趋于选择乘车策略; 当晚点时间大于 30 min, 列车趋于准时到达策略, 乘客趋于选择退票策略。改变博弈参数的值可以定向调整博弈双方的演化方向, 能有效提高高速列车晚点时的铁路乘客乘车比例。

**关键词:** 交通运输; 高铁晚点; 不完全信息; 演化博弈

**中图分类号:** U293 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2024)12-3496-09

**DOI:** 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230094

## Game model of high-speed railway delay and passenger choice behavior under incomplete information

LEI Ai-guo<sup>1</sup>, HU Qi-zhou<sup>1</sup>, WU Xiao-yu<sup>1</sup>, QU Si-yuan<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Science and Technology, School of Automation, Nanjing 210094, China; 2. China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

**Abstract:** The specific influencing factors of the arrival status of high-speed trains on railway passengers' choice behavior were studied. First, an evolutionary game model of the arrival status of high-speed trains and railway passengers' choice behavior was constructed. Then, the evolutionary behaviors of both players in the game were analyzed, and the evolutionary equilibrium strategies of the replicator dynamic system were obtained. Finally, simulation verification was carried out, and the results indicated that there are two evolutionary stable states. When the delay time of the high-speed train is within 30 minutes, the train tends to adopt a punctual arrival strategy, and passengers tend to choose to travel. When the delay time exceeds 30 minutes, the train tends to adopt a punctual arrival strategy, while passengers tend to choose to refund their tickets. The game parameters can be adjusted to direct the evolutionary direction of both players, which can effectively improve the proportion of railway passengers choosing to travel when the high-speed

**收稿日期:** 2023-02-02.

**基金项目:** 河南省重点科技攻关项目(182102310004); 中国铁路上海局集团有限公司科研项目(2022001).

**作者简介:** 雷爱国(1995-), 男, 博士研究生. 研究方向: 交通控制. E-mail: leiaiguo9601@163.com

**通信作者:** 胡启洲(1975-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 交通规划与管理. E-mail: qizhouhu@126.com

train is delayed.

**Key words:** transportation; high-speed railway delay; partial information; evolutionary gam

## 0 引言

2021年年底,中国已开通运营的高速铁路里程达4.0万km,占世界高铁总里程的70%,高速铁路具有安全、快速、舒适、环保等优点,但是也存在不足之处,如高速列车延误等。导致高速列车延误的原因可能是设备故障、交通事故、极端天气等<sup>[1]</sup>。高速列车延误时间也是乘客服务水平的一个重要评价因素<sup>[2]</sup>。

目前,国内外学者主要研究了列车晚点的影响因素、乘客对高速列车数量的影响<sup>[3]</sup>、列车初始晚点分布、晚点仿真<sup>[4,5]</sup>等。Briggs等<sup>[6]</sup>基于英国铁路列车运行数据进行了晚点分布统计,建立了全部晚点的 $q$ 指数分布模型。Arshad等<sup>[7]</sup>使用4种不同的机器学习方法对印度列车的延误历史数据进行对比分析,结果表明:随机森林回归准确率高达95.36%。Sara等<sup>[8]</sup>使用支持向量机和随机森林回归两种方法预测了法国火车延误时间,结果表明:这两种算法的预测结果较好。Hauck等<sup>[9]</sup>对监督机器学习模型进行训练,结果表明:神经网络方法可以取得良好的结果。刘岩等<sup>[10]</sup>分析了列车实际区间运行时分和列车停站时分与到站晚点之间的关系。Xu等<sup>[11]</sup>使用最大似然估计法确定了影响高铁延误原因的概率分布,绘制了高速列车晚点的分布曲线。Luca等<sup>[12]</sup>提出与延误相关的罚款成本。闫道锦等<sup>[13]</sup>引入晚点救济机制,对促进我国铁路运输网络与国际铁路旅客运输接轨具有积极意义。韩忻辰等<sup>[14]</sup>建立了以各站各列车延误时间总和最小为目标函数的高速铁路列车动态调度模型,验证了高铁动态调度Q-learning算法的有效性。石晶等<sup>[15]</sup>指出列车晚点属于正偏态分布,晚点时间集中于10min之内。

综上所述,国内外学者鲜有将演化博弈模型代入铁路乘客因高速列车到达状态而做出的行为选择研究中,若单一分析铁路乘客行为选择或列车晚点问题难以对其进行有效研究。本文首先建立了高速列车运行状态与铁路乘客选择演化博弈模型,研究了高速列车晚点到达状态中的监督惩罚效应,通过理论分析和仿真模拟,研究了不同条件下高速列车到达状态对铁路乘客行为选择演化

稳定策略的影响,并提出了提升铁路运输效率和服务水平的政策建议。

## 1 模型构建

演化博弈论是将博弈理论分析与动态演化过程分析相结合的一种理论,摒弃了传统博弈论完全理性和完全信息的假设<sup>[16,17]</sup>。在方法论上,它不同于博弈论将重点放在静态均衡和比较静态均衡上,强调的是一种动态的均衡。高速列车到达状态与乘客选择行为处于相互联系和相互依赖决策制定的错综复杂局面中,具有相互博弈态势,因此,本文采用博弈论研究双方的决策过程。

### 1.1 模型基本假设

将演化博弈论(即博弈理论)与动态演化过程结合,用于分析不完全信息演化的稳定性,因此,可以研究列车到达状态与铁路乘客选择问题。通过复制动态方程求解的演化稳定策略具有较强的预测能力,可用于分析列车到达状态与铁路乘客选择策略的变化趋势和稳定性。模型假设如下:

假设1 博弈参与群体是两个有限理性的铁路管理部门和铁路乘客群体,并且博弈一方对于另一方收益函数没有完全信息。在博弈过程中,通过最低的成本获得最大的收益。

假设2 铁路乘客的策略选择只考虑列车出发前的24h以内。

假设3 乘客改签对铁路管理部门收益没有影响。

假设4 在高速列车晚点30min及以内,铁路乘客有3种选择策略,即乘车、改签和退票,高速列车晚点时间大于30min,铁路乘客有两种选择策略,即改签和退票。

表1 变量说明

Table 1 Variables

参数	含义
$W$	列车准时到达,铁路乘客乘车,铁路管理部门收益
$M$	列车准时到达,铁路乘客退票,铁路管理部门收益
$T$	列车准时到达,铁路乘客选择乘车收益
$B$	列车晚点到达,铁路管理部门口碑损失
$V$	列车晚点到达,铁路乘客乘车损失
$G$	列车晚点到达,铁路乘客改签损失
$R$	列车晚点到达,铁路乘客退票损失

### 1.2 构建支付矩阵

根据相关假设以及表 1 设定的相关参数,本文在综合分析基础上提出了高速列车到达状态与铁路乘客选择行为的博弈模型  $H$ ,该模型包括 4 元组:

$$H = \{O, U, P, E\} \quad (1)$$

(1)  $O = \{O_1, O_2\}$  为博弈参与人集合,其中  $O_1$  为铁路管理部门,  $O_2$  为铁路乘客。

(2)  $U = \{U_1, U_2\}$  为博弈双方的策略选择集合,其中  $U_1$  为铁路管理部门的策略选择集合,  $U_1 = \{\text{准时}, \text{晚点}\}$ ;  $U_2$  为铁路乘客的策略集合,  $U_2 = \{\text{乘车}, \text{改签}, \text{退票}\}$ 。

(3)  $P = \{x, y\}$  为博弈信念集合,其中,  $x$  为高速列车准时到达的概率,  $x \in [0, 1]$ ;  $y$  为乘客选择选取策略的概率集合,  $y \in [0, 1]$ ,  $y = \{y_1, y_2, y_3\}$ ,  $y_1$  为铁路乘客选择乘车的概率,  $y_2$  为选择改签的概率,  $y_3$  为选择退票的概率。

(4)  $E = \{E_{\rho_1}, E_{d_2}\}$  为博弈方的收益函数集合,  $E_{\rho_1}$  为铁路管理部门期望收益函数,  $E_{d_2}$  为铁路乘客期望收益函数。

高速列车到达状态与铁路乘客选择行为的博弈支付矩阵如表 2 所示。

表 2 博弈双方支付矩阵

Table 2 Payment matrix of both sides of the game

博弈双方策略		铁路管理部门	
		准时( $x$ )	晚点( $1-x$ )
铁路乘客	乘车( $y_1$ )	( $T, W$ )	( $T-V, W-B$ )
	改签( $y_2$ )	( $0, W$ )	( $-G, -B$ )
	退票( $y_3$ )	( $-M, M-W$ )	( $-R, -B$ )

### 1.3 博弈模型

期望收益函数是指每个参与人在参与博弈时依据其所属类型和选择的行动可获得的收益,是参与者选择的最优策略,即策略集中能使其效用最大化的策略。本文期望收益函数包含两个方面:一方面是铁路管理部门收益期望函数;另一方面是铁路乘客收益期望函数。

(1) 铁路管理部门期望收益函数。铁路管理部门期望收益函数主要包括铁路管理部门选择准时到达策略期望收益函数、选择准时到达策略期望收益函数、平均期望收益函数。

铁路管理部门准时到达期望收益函数  $E_{\rho_{11}}$  为:

$$E_{\rho_{11}} = W y_1 + W y_2 + (M - W)(1 - y_1 - y_2) \quad (2)$$

铁路管理部门晚点策略期望收益函数  $E_{\rho_{12}}$  为:

$$E_{\rho_{12}} = (W - B) y_1 - B y_2 - B(1 - y_1 - y_2) \quad (3)$$

铁路管理部门平均期望收益函数  $\bar{E}_{\rho_1}$  为:

$$\bar{E}_{\rho_1} = x E_{\rho_{11}} + (1 - x) E_{\rho_{12}} \quad (4)$$

(2) 铁路乘客期望收益函数。铁路乘客期望收益函数主要包括铁路乘客选择乘车策略的期望收益函数、铁路乘客选择改签策略的期望收益函数、铁路乘客选择退票策略的期望收益函数、铁路乘客平均期望收益函数。

铁路乘客选择乘车策略的期望收益函数  $E_{d_{11}}$  为:

$$E_{d_{11}} = T x + (T - V)(1 - x) = V x + T - V \quad (5)$$

铁路乘客选择改签策略的期望收益函数  $E_{d_{12}}$  为:

$$E_{d_{12}} = 0 x + (-G)(1 - x) = G x - G \quad (6)$$

铁路乘客选择退票策略的期望收益函数  $E_{d_{13}}$  为:

$$E_{d_{13}} = (-M) x + (-R)(1 - x) = R x - M x - R \quad (7)$$

铁路乘客平均期望收益函数  $\bar{E}_{d_1}$  为:

$$\bar{E}_{d_1} = y_1 E_{d_{11}} + y_2 E_{d_{12}} + (1 - y_1 - y_2) E_{d_{13}} \quad (8)$$

由于铁路管理部门和铁路乘客的策略动态调整过程一般都是非线性的,与演化的次数和假设参与人的理性层次和学习速度有关,因此,本文结合系统科学中关于动态过程和动力机制的观点,采用动力系统方法分析不完全信息非对称演化博弈的稳定性。

## 2 演化模型稳定性求解

Smith<sup>[18]</sup>最早提出了演化稳定策略(Evolutionarily stable strategy, ESS)的概念,演化稳定策略指博弈群体中的大部分成员所采取的某种策略。本文铁路管理部门与铁路乘客博弈过程中,双方群体都会根据其既得利益不断地在边际上对其策略进行调整以追求自身利益的改善,最终达到一种动态平衡。

### 2.1 复制动态方程的演化求解

演化博弈选择机制通过演化博弈支付矩阵确定复制动态方程,复制动态方程是演化博弈论最基本的一种动态模型,能够比较合理、正确地反映有限理性参与人群的动作行为和变化趋势,并验证复制动态方程所求出的解是否为演化稳

定策略解<sup>[19]</sup>。

(1)演化模型的复制动态方程。由式(4)(8)可得铁路管理部门和铁路乘客选择策略的复制动态系统为关于  $x, y_1, y_2$  的微分方程,如下所示:

$$F_1(x, y_1, y_2) = \frac{dx}{dt} = x(E_{p11} - E_{p1}) \quad (9)$$

$$F_2(x, y_1, y_2) = \frac{dy_1}{dt} = y_1(E_{d11} - E_{d1}) \quad (10)$$

$$F_3(x, y_1, y_2) = \frac{dy_2}{dt} = y_2(E_{d12} - E_{d1}) \quad (11)$$

(2)演化模型的均衡点:博弈双方经过长期演化最终形成的稳定均衡状态是自治系统稳定的均衡点,对博弈双方而言,选择不同策略获得的总收益一般不相同。根据演化博弈中演化稳定策略的概念和微分方程的相关知识,令:

$$F_1(x, y_1, y_2) = 0 \quad (12)$$

$$F_2(x, y_1, y_2) = 0 \quad (13)$$

$$F_3(x, y_1, y_2) = 0 \quad (14)$$

求出高速列车到达状态与选择行为演化系统的均衡点,该系统有且仅有 8 个均衡点,分别为:  $A_1=(0, 0, 0), A_2=(0, 1, 0), A_3=(0, 0, 1), A_4=(1, 0, 0), A_5=(1, 1, 0), A_6=(1, 0, 1), A_7=(\frac{V-R-T}{V-R+M}, \frac{W-B-M}{W-M}, 0), A_8=(\frac{G-R}{G-R+M}, 0, \frac{W-B-M}{2W-M})$ 。

### 2.2 均衡点的稳定性分析

博弈双方经过长期演化最终形成的稳定均衡状态,对博弈双方而言,选择不同策略获得的总收益一般不相同,高阶微分方程自治系统为:

$$\frac{dX}{dt} = JX + O(X) \quad (15)$$

式中:  $J$  为常矩阵;  $O(X)$  为  $X$  的高次,满足

$$\lim_{|X| \rightarrow \infty} \frac{|O(X)|}{|X|} = 0。$$

若 Jacobi matrix 的全部特征根都具有负的实部,则该系统的零解是渐近稳定的;否则该系统的零解是不稳定的。高阶微分方程自治系统均衡点的稳定性可以通过系统在该点处的近似线性化方程组的稳定性进行判断和描述。微分方程式(15)在  $(x, y_1, y_2)$  处的近似线性化方程组可描述如下:

$$\frac{d(x, y_1, y_2)}{dt} = J(x, y_1, y_2)(x, y_1, y_2)^T \quad (16)$$

$$J(x, y_1, y_2) = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x} & \frac{\partial F_1}{\partial y_1} & \frac{\partial F_1}{\partial y_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x} & \frac{\partial F_2}{\partial y_1} & \frac{\partial F_2}{\partial y_2} \\ \frac{\partial F_3}{\partial x} & \frac{\partial F_3}{\partial y_1} & \frac{\partial F_3}{\partial y_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_4 & x(1-x)(2W-M) \\ a_2 & a_5 & y_1((R-M-G)x+G-R) \\ a_3 & a_6 & a_7 \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中:  $a_1=(1-2x)((W-M)y_1+(2W-M)y_2+M+B-W)$ ;  $a_2=y_1(y_2(R-M-G)+(1-y_1)(V+M-R))$ ;  $a_3=y_2((y_1(R-M-V)+(1-y_2)(G-R+M))$ ;  $a_4=x(1-x)(W-M)$ ;  $a_5=y_2((R-M-G)x+G-R)+(1-2y_1)((V+M-R)x+R+T-V)$ ;  $a_6=y_2((R-M-V)x-R-T+V)$ ;  $a_7=y_1((R-M-V)x-T+V)+(1-2y_2)((Gx-R+M)x-G+R)$ 。

通过 Lyapunov 判断  $(x, y_1, y_2)$  给定情况下  $J(x, y_1, y_2)$  平衡点的稳定性,将微分方程的平衡点分别代入雅可比矩阵  $J(x, y_1, y_2)$ ,分析各平衡点的稳定性及稳定条件。博弈双方均采取利己的策略,博弈参数存在如下不等式关系:

(1)铁路乘客博弈参数关系。对于铁路乘客,当高速列车晚点时间较短、车站拥挤度低、舒适度较高,铁路乘客乘车获得收益大于损失,即  $T > V$ ;铁路乘客选择退票策略的损失大于改签损失,即  $R > G$ ,因此,均衡点  $A_7$  不存在。

(2)铁路管理部门博弈参数关系。对于铁路管理部门,当列车准时到达铁路乘客选择退票,铁路管理部门收益为负,即  $W > M$ ;当铁路乘客选择乘坐晚点列车,铁路管理部门具有正收益,即  $W - B - M > 0$ 。

将均衡点代入式(17),分别求出其他对应的特征值,具体如表 3 所示。

由式(17)可得各均衡点的稳定性判断,如表 4 所示,可得该系统仅有一个 ESS,即  $(1, 1, 0)$  表明开始博弈双方无论如何选择,结果都趋向于高速列车准时,铁路乘客选择乘车策略演化。

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{tr}(J) \quad (18)$$

$$\prod_{i=1}^n \lambda_i = \det|J| \quad (19)$$

表 3 均衡点雅可比矩阵特征值

Table 3 Eigenvalues of Jacobian matrix at equilibrium point

均衡点	特征值
(0,0,0)	$M+B-W, R+T-V, R-G$
(0,1,0)	$B, V-T-R, R-T+V-G$
(0,0,1)	$W+B, G+T-V, G-R$
(1,0,0)	$W-M-B, M+T, M$
(1,1,0)	$-B, -M-T, R+M$
(1,0,1)	$-W-B, T, -M$
$(\frac{G-R}{G-R+M}, 0, \frac{W-B-M}{2W-M})$	$0, T+\frac{VR-VM+GM}{G-R+M}, 0$

表 4 均衡点的局部稳定性检验

Table 4 Local stability test of equilibrium point

均衡点	tr(J)	det(J)	稳定性
(0,0,0)	+	+	不稳定点
(0,1,0)	+	+	不稳定点
(0,0,1)	+	+	不稳定点
(1,0,0)	+	+	不稳定点
(1,1,0)	-	+	ESS
(1,0,1)	-	+	鞍点
$(\frac{G-R}{G-R+M}, 0, \frac{W-B-M}{2W-M})$	+	+	不稳定点

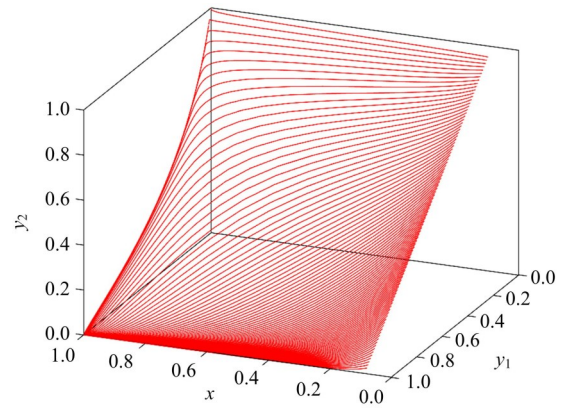
由表 4 可知,系统的演化稳定策略是(1, 1, 0),即高速列车选择准时到达,铁路乘客选择乘车策略,鞍点 $(\frac{G-R}{G-R+M}, 0, \frac{W-B-M}{2W-M})$ 是列车到达状态与铁路乘客选择行为交互行为的动态平衡点,显示当前列车到达状态和铁路乘客选择行为策略行为的比例。

### 3 演化博弈数值仿真分析

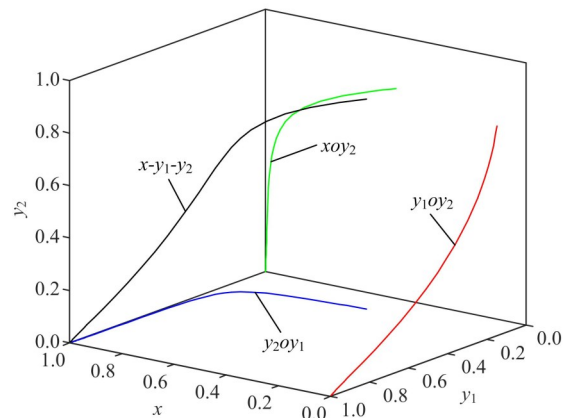
本文所需高速列车及铁路乘客信息量大,很多指标数据都难以获得,因此,对铁路管理部门和铁路乘客双方演化博弈模型采取理论验证,对建立的高速列车到达状态和铁路乘客选择行为策略演化博弈模型分两种情况进行讨论:①情形 1,在高速列车晚点 30 min 及以内,铁路乘客有 3 种选择策略,即乘车、改签和退票;②情形 2,高速列车晚点时间大于 30 min,铁路乘客有两种选择策略,即改签和退票。

#### 3.1 情形 1:高速列车晚点 30 min 内仿真分析

高速列车在晚点 30 min 内,铁路乘客退票的比例为 0.05,利用 Matlab 进行数值仿真分析,进一步验证不同博弈策略都会向 ESS 策略均衡点移动,初始值分别取  $W=6, T=6, M=2, B=3, V=6, G=2, R=3, V=3$ ;博弈双方动态演化过程如图 1 所示。



(a)系统整体演化趋势



(b)系统局部演化趋势

图 1 博弈系统演化轨迹

Fig. 1 Evolution trajectory of game system

由图 1(a)可知,高速列车到达状态和铁路乘客行为选择稳定点为(1, 1, 0),初始高速列车准点率为 0 时,铁路乘客选择改签,经过反复博弈,系统最终达成高速列车准点铁路乘客乘车的协调,且随着高速列车准点的比例升高,系统最终收敛于(1, 1)。由图 1(b)可知,任意选择一个三维动力系统的初始状态为(0.5, 0.8, 0.15),即高速列车准点到达的比例为 0.5,选择乘车的铁路乘客比例为 0.8,选择改签的铁路乘客比例为 0.15,最终演化稳定于(1, 1, 0),即无论博弈双方初始点的位置如何,系统最终演化的结果都趋向于并稳定于(1, 1, 0)。

当高速列车准点率为 0.2 时,选择乘车的铁路乘客概率由 0.1 到 0.9 逐渐增加时,高速列车到达状态与乘车行为选择演化结果如图 2 所示。

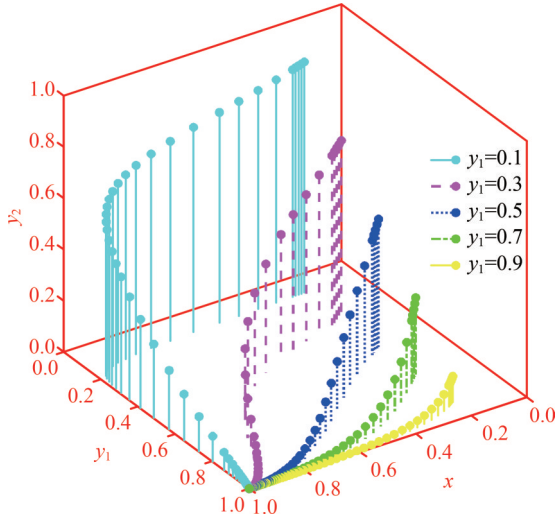


图 2 博弈双方局部演化趋势

Fig. 2 Local evolution trend of both sides of the game

由图 2 可知,当列车到达准点率为 0.2,选择乘车的铁路乘客比例为 0.2 时,这时提高高速列车准时率,选择改签铁路的乘客比例逐渐下降,选择乘车的铁路乘客比例缓慢上升,随着高速列车准点率的逐渐增加,选择乘车的铁路乘客比例提高,选择改签的铁路乘客比例降低,经过多次演化博弈后,最终演化结果趋于(1,1,0)。

### 3.2 情形 2:高速列车晚点超过 30 min 仿真分析

高速列车晚点时间超过 30 min,铁路乘客只有改签和退票两种选择,铁路管理部门与铁路乘客没有信息交流,仅根据通过概率决定其是否乘车,此时假设高速列车晚点 30 min 以内的概率为  $x_1$ ,晚点时间超过 30 min 的概率为  $1 - x_1$ ,铁路乘客选择改签的概率为  $y_4$ ,选择退票的概率为  $1 - y_4$ ,高速列车晚点 30 min 以内的概率为  $x_1 \cdot y_4$ ,铁路乘客选择退票,高速列车晚点超过 30 min 的概率为  $(1 - x_1)(1 - y_4)$ ,进而铁路乘客与铁路管理部门达成合作的概率  $z$  为上述两部分之和,如下所示:

$$z = x_1 y_4 + (1 - x_1)(1 - y_4) = 1 - x_1 - y_4 + 2x_1 y_4 \quad (20)$$

式中:  $0 \leq x_1 \leq 1, 0 \leq y_4 \leq 1$ 。

图 3 为  $z$  关于  $x_1, y_4$  的函数曲线,显然  $z$  关于平面  $x_1 = y_4$  对称。 $z$  值最大为 1,对应的  $(x_1, y_4)$  取值为(1,1)或(0,0),其他  $(x_1, y_4)$  取值越靠近这

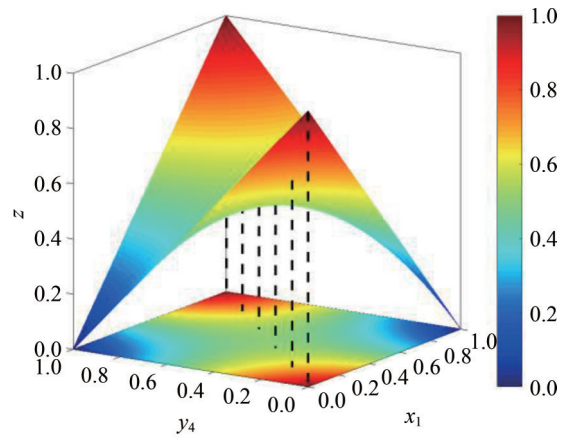


图 3 博弈双方合作概率

Fig. 3 Probability of cooperation both sides of the game  
两组值,对应的  $z$  值越大,且沿着  $(x_1, y_4)$  的平面, $z$  值从最高点下降的速率最慢。

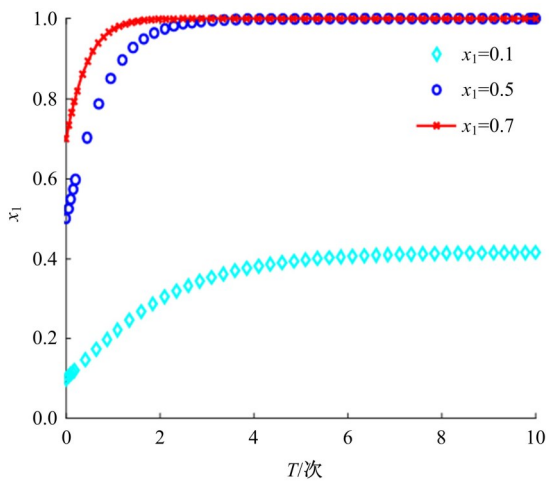
由图 3 可知,  $(x_1, y_4)$  为(1,1)时,表示铁路乘客选择改签的概率为 1,即铁路乘客在列车晚点 30 min 内不选择退票,  $(x_1, y_4)$  为(0,0)时,即全部选择退票。

在高速列车晚点的情况下,铁路乘客等待时间损失、改签损失及退票损失都会增加,铁路管理部门为争取获得最大利润,争取减少晚点时间,利用 Matlab 进行数值仿真分析,博弈双方动态演化过程如图 4 所示。

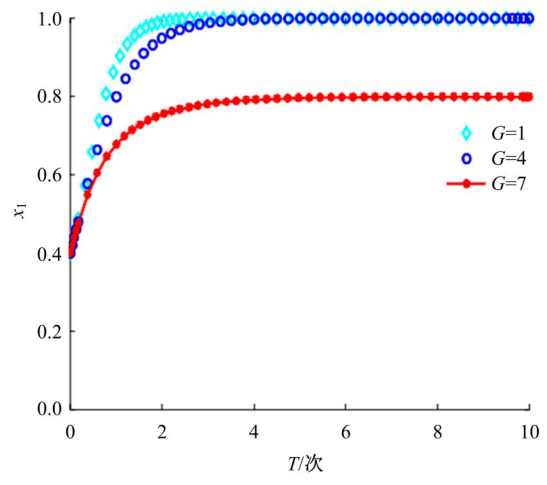
由图 4 可知,在高速列车晚点时,铁路乘客的等待环境会影响铁路乘客行为选择,当双方博弈演化系统初始状态为(0.1,0.3)时,最终的演化结果为(0,0),即高速列车晚点超过 30 min 的概率越大,铁路乘客选择退票的概率越大。当双方博弈演化系统初始状态为(0.5,0.5)时,最终的演化结果为(1,0.4),即最终的演化结果趋向于 1;铁路乘客已知高速列车经常晚点,系统经过两次博弈达到均衡状态,当双方博弈演化系统初始状态为(0.7,0.7)时,最终的演化结果为(1,0.68),由此可知铁路管理部门初始值越大,趋向于稳定状态速度越快,铁路乘客选择改签策略的比例越大。

在高速列车晚点的情况下,当列车晚点到达,铁路乘客改签损失逐渐增大时,博弈双方的演化路径如图 5 所示。

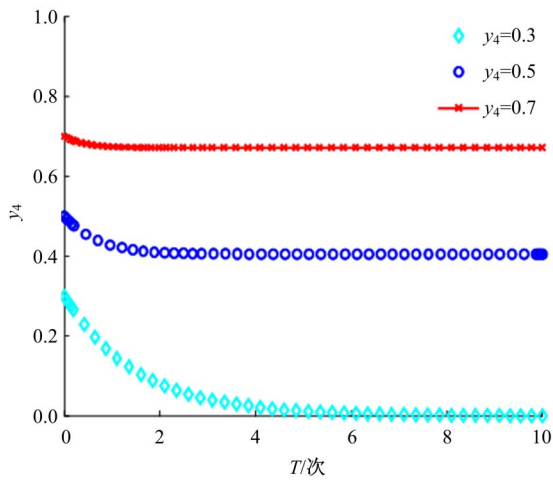
由图 5 可知,在高速列车晚点时,铁路乘客的改签损失会影响铁路乘客行为选择,当双方博弈演化系统初始状态为(0.4,0.5)时,随着改签损失增大,铁路管理部门选择策略会逐渐趋向于 1,即晚点时间在 30 min 内,铁路乘客的选择逐渐趋向



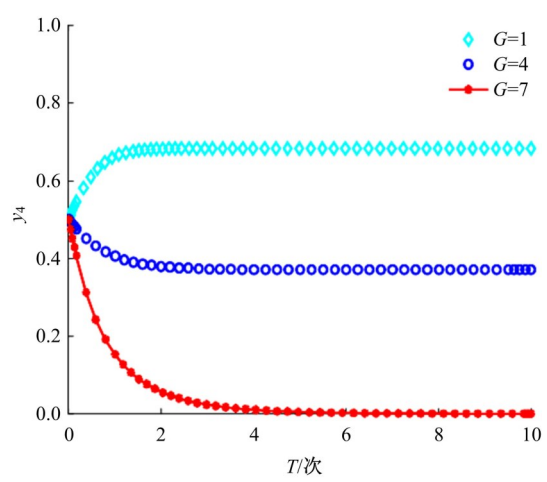
(a) 高速列车演化轨迹



(a) 高速列车演化轨迹



(b) 乘客选择行为演化轨迹



(b) 乘客选择行为演化轨迹

图4 不同条件下的演化轨迹

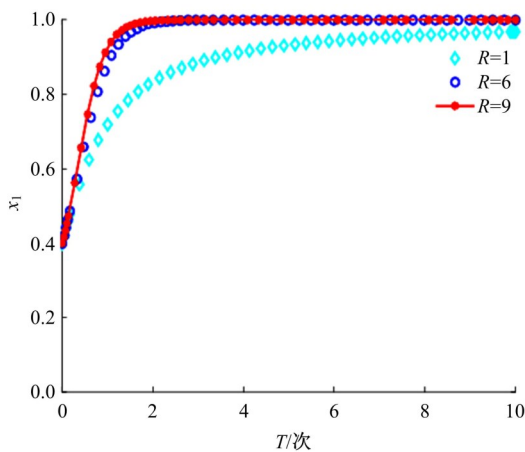
图5 不同改签损失的演化轨迹

Fig. 4 Evolution trajectories under different conditions

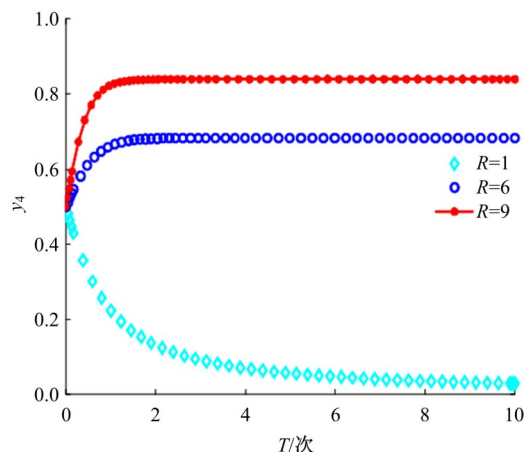
Fig. 5 Evolution trajectory of different change losses

于0,即选择退票,铁路管理部门可以采取降低铁路乘客的改签损失,以达到最佳收益。

在高速列车晚点的情况下,当列车晚点到达,考虑铁路乘客退票损失对双方演化博弈的影响,博弈双方的演化路径如图6所示。



(a) 高速列车演化轨迹



(b) 乘客选择行为演化轨迹

图6 不同退票损失的演化轨迹

Fig. 6 Evolution trajectory of different refund losses

由图 6 可知,在高速列车晚点时,铁路乘客的退票损失会影响铁路乘客行为选择,当双方博弈演化系统初始状态为(0.4,0.5)时,随着退票损失增大,铁路乘客选择改签策略的比例越大,仍有部分铁路乘客会选择退票,与现实相符,表明仿真结果具有一定真实性。为减少铁路乘客改签及退票现象,提出以下建议。

(1)提高高速列车的准点率,有助于提高乘车选择乘车的比例。

(2)减少铁路乘客的等待时间,有助于提高铁路乘客选择乘车的比例。

(3)提高乘客在车站的舒适度。因本次高速列车晚点,与乘坐其他车次高速列车的铁路乘客等待位置冲突,增加晚点等待通道可以有效提升晚点铁路乘客的舒适度。

(4)减少铁路乘客的改签损失。减少铁路乘客的改签损失,有利于提高改签的比例。

## 4 结 论

(1)高速列车晚点 30 min 以内,参与主体行为策略的演化博弈具有稳定中心点,且存在稳定的均衡点,当铁路管理部门采取准点到达策略时,铁路乘客越趋向于选择乘车的行为策略,随着高速列车准点率的提高,铁路乘客选择改签和退票的行为策略的概率会减小。

(2)高速列车晚点超过 30min,参与主体行为策略的演化博弈不具有稳定中心点,且不存在稳定的均衡点,铁路管理部门演化结果均趋向于 1,减少铁路乘客的改签损失,有利于提高铁路乘客选择改签策略的比例。

### 参考文献:

- [1] Hu Q Z, Bian L S, Tan M J. A data perception model for the safe operation of high-speed rail in rainstorms[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2020, 83: No. 102326.
- [2] 廉志斌,帅斌,许旻昊. 列车晚点下高速铁路车站到发线运用计划调整方法[J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(2): 1-7.  
Lian Zhi-bin, Shuai Bin, Xu Min-hao. Operation plan adjustment of arrival and departure tracks at high speed railway station in condition of train delay[J]. Railway Transport and Economy, 2022, 44(2): 1-7.
- [3] Khwanpruk S, Utapao C, Khwanpruk K, et al. Optimization-based train timetables generation with demand forecasting for thailand high speed rail system [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(9): 3502-3510.
- [4] Zhang D L, Peng Y J, Zhang Y M, et al. Train time delay prediction for high-speed train dispatching based on spatio-temporal graph convolutional network [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(3): 2434-2444.
- [5] Li Z, Huang P, Wen C, et al. Predictive models for influence of primary delays using high-speed train operation records[J]. Journal of Forecasting, 2020, 39(8): 1198-1212.
- [6] Briggs K, Beck C. Modelling train delays with qexponential functions[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2007, 378(2): 498-504.
- [7] Arshad M, Ahmed M. Train delay estimation in Indian railways by including weather factors through machine learning techniques[J]. Recent Advances in Computer Science and Communications, 2021, 14(4): 1300-1307.
- [8] Sara L, Houda J, Mohamed A. Predict France trains delays using visualization and machine learning techniques[J]. Procedia Computer Science, 2020, 175: 700-705.
- [9] Hauck F, Kliever N. Data analytics in railway operations: using machine learning to predict train delays [M]. Berlin: Springer, 2020.
- [10] 刘岩,郭竞文,罗常津,等. 列车运行实绩大数据分析及应用前景展望[J]. 中国铁路, 2015, 636(6): 70-73.  
Liu Yan, Guo Jing-wen, Luo Chang-jin, et al. Big data analysis and application prospects for the performance of train operation [J]. Chinese Railways, 2015, 636(6): 70-73.
- [11] Xu P J, Corman F, Peng Q Y. Analyzing railway disruptions and their impact on delayed traffic in Chinese high-speed railway[J]. IFAC-Papers On Line, 2016, 49(3): 84-89.
- [12] Luca O, Irene B, Alessandro L, et al. Dynamic, interpretable, and robust hybrid data analytics system for train movements in large-scale railway networks [J]. International Journal of Data Science and Analytics, 2020(9): 95-111.
- [13] 闫道锦,佟琼. 引入客运专线列车晚点救济的必要性分析[J]. 北京交通大学学报:社会科学版, 2008(2): 72-75,98.  
Yan Dao-jin, Tong Qiong. Analysis on necessity of introducing delay remedy system into dedicated pas-

- senger lines[J]. Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition), 2008(2): 72-75, 98.
- [14] 韩忻辰, 俞胜平, 袁志明, 等. 基于Q-learning的高速铁路列车动态调度方法[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(10): 1511-1521.
- Han Xin-chen, Yu Sheng-ping, Yuan Zhi-ming, et al. High-speed railway dynamic scheduling based on Q-learning method[J]. Control Theory & Applications, 2021, 38(10): 1511-1521.
- [15] 石晶, 彭其渊, 文超, 等. 铁路列车晚点时间预测方法研究[J]. 铁道运输与经济, 2020, 42(7): 33-39.
- Shi Jing, Peng Qi-yuan, Wen Chao, et al. Prediction method of passenger train delay propagation[J]. Railway Transport and Economy, 2020, 42(7): 33-39.
- [16] Zhang B Y, Shan P. Game theory and the evolution of cooperation[J]. Journal of the Operations Research Society of China, 2022, 10(2): 379-399.
- [17] 张维维, 何家峰, 高国旺, 等. 基于博弈论的无线Mesh网络路由与信道分配联合优化算法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2018, 48(3): 887-892.
- Zhang Wei-wei, He Jia-feng, Gao Guo-wang, et al. Wireless Mesh network routing and channel allocation union optimization algorithm based on game theory [J]. Journal of Jilin University Engineering and Technology Edition, 2018, 48(3): 887-892.
- [18] Smith J M. Evolution and the theory of games[J]. American Scientist, 1976, 64(1): 41-45.
- [19] 程刚, 郭磊善. 基于GIS的公交换乘网络构建及可达性分析[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2024, 45(2): 191-197.
- Cheng Gang, Guo Lei-shan. Bus transfer network construction and accessibility analysis based on GIS [J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2024, 45(2): 191-197.