

文章编号: 1001-4632 (2023) 06-0221-11

引用格式: 李宁海, 毛保华, 陈焱, 等. 城际轨道交通定期票对通勤旅客的影响及其效果 [J]. 中国铁道科学, 2023, 44 (6): 221-231.

Citation: LI Ninghai, MAO Baohua, CHEN Yao, et al. Influence and Impact of Intercity Rail Transit Periodical Ticket on Commuters [J]. China Railway Science, 2023, 44 (6): 221-231.

城际轨道交通定期票对通勤旅客的影响及其效果

李宁海, 毛保华, 陈焱, 黄俊生, 温芳

(北京交通大学 综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044)

摘要: 为研究城际轨道交通定期票对通勤旅客的影响及其对客流和票款收入的综合效果, 先分析定期票有效期内最大可用次数 K 和折扣系数 β 与旅客平均单程票价关系; 然后, 建立基于旅客出行频率的多项 Logit 模型, 引入定期票下客流量与票款收入的价格弹性系数, 设置兼顾客流量和运营企业票款收入的最优定期票目标函数; 最后, 设置算例, 探讨定期票的综合效果以及最优定期票。结果表明: 随着 K 的增加, 定期票对城际轨道交通弱通勤旅客分担率的影响下降, 对中、强通勤旅客分担率的影响先增后降, 而随着 β 的增加, 通勤旅客分担率持续下降; 实行定期票制会降低运营企业的票款收入, 但会提升旅客周转量; 通道内出行频率高的旅客占比较大时, 实施定期票的效果更好, 在以强、中、弱通勤旅客为主的 3 种情景下, 最优定期票下的目标函数值比现行定期票下的依次高 2.20%, 2.17% 和 1.96%; 通勤距离较长时定期票的效果更好, 通勤距离为 50 km 时实行定期票会降低目标函数值, 而 90 km 时则会有效提升目标函数值。

关键词: 城际轨道交通; 定期票; 通勤旅客; 客流; Logit 模型

中图分类号: U293.22 文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2023.06.22

随着我国城市群建设的不断推进, 跨区域工作居住现象日益显著, 城市间通勤出行需求增加, 各大城市群积极发展城际轨道交通这一城市间的大容量快速交通方式。为鼓励城市间通勤旅客使用城际轨道交通出行, 部分城市的城际轨道交通系统实行定期票优惠票制。现行定期票普遍采用在 30 d 有效期内最多可使用 60 次的优惠票制, 相比于常规票其票价优惠 30% 左右。这一定期票形式相对单一, 较难适应不同线路旅客出行频率差异; 同时最大可使用次数偏大, 间接导致通勤旅客难以享受到所有优惠。定期票对通勤旅客出行方式选择的影响、定期票票制设计的客流量及运营企业票款收入综合效果、最优定期票决策等问题均有待进一步研究。

既有研究在票价对居民出行方式选择影响机理上开展了大量工作, 且多从旅客出行目的、年龄、收入等特征入手, 探索票价对不同类别旅客的影响

差异。姚恩建等^[1]考虑通勤者有无小汽车的属性, 构建了地铁和小汽车出行选择巢式 Logit 模型, 认为提高地铁票价、降低公交票价可以有效解决地铁高峰期满载率过高的问题。Matas 等^[2]以巴塞罗那大都市区为对象, 估计了不同类型旅客公共交通需求的价格弹性, 认为通勤旅客公共交通需求的价格弹性低于非通勤旅客, 并进一步分析了单一票制和多方式组合票制的效果, 得出票制对客流量影响较小、对运营企业票款收入影响较大的结论。Losada-Rojas 等^[3]调研了不同出行距离下旅客对乘车属性的评价, 调研数据表明通勤距离越长, 旅客对舒适度和票价的关注度上升、对时间的关注度下降。Limtanakool 等^[4]指出时间和票价对通勤旅客城际出行选择具有显著影响。程谦等^[5]针对短途高铁的旅客出行选择行为进行了问卷调查, 论证得出: 旅行时间因素对旅客短途高铁列车选择行为的影响

第44卷,第6期
2023年11月

中国铁道科学
CHINA RAILWAY SCIENCE

Vol. 44 No. 6
November, 2023

基金项目：国家自然科学基金资助项目（71971021，72101019）

第一作者：李宁海（1997—），男，四川攀枝花人，博士研究生。E-mail：20114067@bjtu.edu.cn

通讯作者：陈 垚（1993—），男，江西抚州人，副教授，博士。E-mail：chenyao@bjtu.edu.cn

比票价因素更为显著；低收入群体对票价的敏感性高于高收入群体。

近年来利用优惠票制调控客流时空结构的研究逐渐兴起。Simma等^[6]利用结构方程模型，结合英国、德国、瑞士的实证数据，分析了旅客是否拥有小汽车、是否拥有季票对出行方式选择的影响，认为季票虽能有效提高公共交通的出行率，对小汽车拥有者的影响却不大，但文章并未深入探讨优惠方案对公共交通出行分担率的影响。Tang等^[7]为解决高峰期轨道交通拥挤问题，从利用非高峰时段奖励优惠策略引导乘客错峰出行的角度，建立了以奖励时段和高峰时段平衡状态下旅客总出行广义费用最小为目标的双层规划模型，在最优奖励策略下，通勤旅客在奖励时段和高峰时段的客流量相近，均衡状态下的总旅客出行成本降低7.46%。马思雍等^[8]结合刷卡数据和问卷调查分析了优惠票价下旅客错峰出行的意愿，得出折扣力度越大旅客意愿转移率越高、票价优惠截止时间越靠近高峰期旅客意愿转移率越高的结论，但文章并未分析不同类型旅客意愿转移率的差异。目前国内对轨道交通优惠票制的研究仍处于起步阶段，部分研究考虑利用优惠票制引导旅客出行行为，但少有研究探讨针对通勤旅客的优惠票制设计及效果。

票制优化的研究大多以解决拥堵、提高企业收益为目标。Tabuchi^[9]为充分利用轨道交通解决道路拥堵问题，探讨了小汽车和轨道交通客流与票价的关系，提出轨道交通平均成本、边际成本和最小化社会总成本3种定价思路，指出轨道交通价格低于成本才具有足够的吸引力使小汽车用户向轨道交通转移，但文章并未探讨2种交通工具分担率随票价的变化趋势。邓连波^[10]建立了基于广义费用的城市轨道交通客流弹性需求模型，考虑运营成本并以运营收益和客流量加权和最大为目标构建了优化模型，探索了单一票制、计程票制和计站票制的最优票价率，对比3种票制的实际运营效果后指出，计站票制和计程票制能够更好地适应不同出行距离的旅客，综合效果较好。Chou等^[11]指出我国台湾地区高铁票价过高的问题，并以运营收益、客流量及旅客满意度最大化为目标建立双层规划模型，按照出行距离越长对应的最优票价率越低的原则分别为短途、中途中途和长途旅客给出最优票价率，算例表明基于旅客出行距离的票制能够实现企业票款收益的上升。目前多数研究着眼于常规票，并以运营企业票款收入最大为目标进行优化，缺乏为优惠票制

方案提供针对性指导的研究。

针对既有文献中鲜见优惠票制对不同出行频率通勤旅客影响的研究现状，本文考虑不同出行频率旅客享受到定期票优惠的差异及旅客对时间、票价的感知差异，先应用多项Logit模型，探索定期票影响下城际通道不同交通方式分担率的变化；再分析定期票票制设计对城际轨道交通不同出行频率通勤旅客分担率及运营企业票款收入的影响；最后设计兼顾客流量和运营企业票款收入的目标函数，探讨定期票综合效果和不同客流需求情景、不同通勤距离场景下的最优定期票，并与我国现行定期票进行对比。

1 问题描述

定期票指在一定有效期内，为购买定期票的旅客在指定OD间提供一定次数的旅客列车服务，其票制通常根据OD间常规票价、最大可使用次数和折扣系数确定。

按照我国城际轨道交通现行的按里程计价常规票，若用 K 表示定期票在有效期内的最大可使用次数，用 β 表示定期票的折扣系数，则定期票价格 $P_{K,\beta}$ 可表示为

$$P_{K,\beta} = p_0 K \beta \quad (1)$$

其中，

$$p_0 = L p_v$$

式中： p_0 为常规单程票价，元； p_v 为单位里程票价率，元·km⁻¹； L 为OD间距离，km。

我国城际轨道交通现行票制中多采用30d(1个月)定期票，最大次数为60次，折扣系数在0.6~0.7。以二等座价格为例的部分城际线路车次现行定期票见表1。

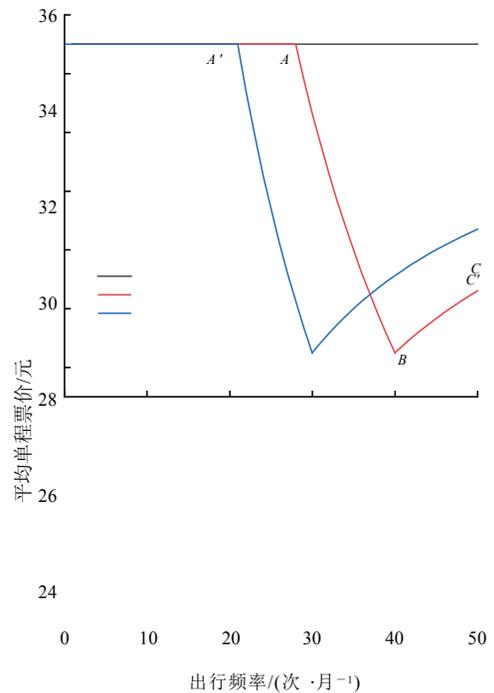
按照表1，本文限定定期票以30d为有效期，且有效期内每位旅客只能购买1张定期票。并非所有旅客都会在有效期内按定期票的最大次数出行，所以不同出行频率旅客实际享受到的定期票优惠有所不同。当每月旅客出行频率 k 不大于 $K\beta$ 时，使用定期票的平均票价大于单程票价，此时旅客更倾向于使用常规票；当 k 大于 $K\beta$ 、不大于定期票最大次数 K 时，旅客购买定期票即可实现其全部出行需求；当 k 大于 K 时，旅客购买定期票无法满足其需求，超出部分须使用常规票。由此，当旅客出行频率为 k 次·月⁻¹时，平均单程票价 $p_{k,1}$ 为

表 1 我国部分城际轨道交通线路车次现行定期票

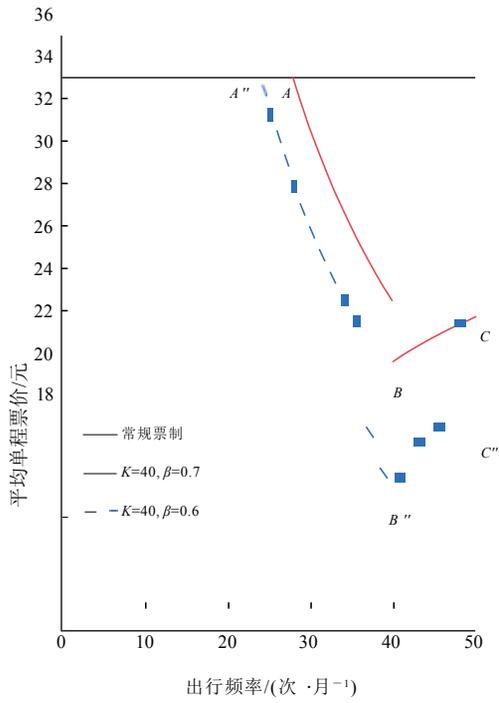
OD	车次	单程票价/元	票价率/(元·km ⁻¹)	最大次数/次	定期票价/元	折扣系数	里程/km
南昌—丰城东	G1383	24.5	0.366	60	968	0.60	67
成都东—资阳北	G8731	40.0	0.554	60	1 540	0.64	83
广州东—东莞	C7077	45.5	0.641	60	1 862	0.68	71
北京南—天津	C2009	54.5	0.454	60	2 244	0.69	120
广州南—中山	C7601	40.0	0.571	60	1 637	0.68	70
上海—太仓	G123	21.0	0.402	60	880	0.70	52

$$p_{k,1} = \begin{cases} p_0 K^\beta & k \leq K\beta \\ P_K & K\beta < k \leq K \quad (2) \\ \frac{P_{K,\beta}}{k} + \frac{(k-K)p_0}{k} & k > K \end{cases}$$

通常情况下，1 个月 22 个工作日，通勤旅客在每个工作日出行 2 次，共计出行 44 次。在此基础上结合当前定期票设计经验，并从更好适应通勤旅客出行需求的角度，设置基准案例的参数为： $K=40$ ， $\beta=0.7$ ，城际通道长 70 km。不同的 K 和 β 取值组合与不同出行频率旅客平均单程票价的关系如下图所示。图中： A 、 B 和 C 分别为旅客适用定期票的最低出行频率点、出行频率与定期票最大次数平衡点、高于定期票最大次数的出行频率点；上标“'”和“''”分别表示定期票票制取 $K=30$ ， $\beta=0.7$ 和 $K=40$ ， $\beta=0.6$ 的 2 种不同场景。由图 1 可知： A 、 B 和 C 三点与常规票曲线围成的面积表示不考虑客流条件时的定期票优惠力度，这三点的位置由 K 和 β 共同决定，即 K 和 β 决定了定期票的优惠效果； A 点水平位置由 $K\beta$ 计算， K 越大、适用定期票的最低出行频率越高 ($A' \rightarrow A$)， β 越大、适用定期票的最低出行频率越高 ($A'' \rightarrow A$)； B 点对应的平均单程票价为 $p_0 \beta$ ，此出行频率下旅客享受到的



(a) 不同最大次数 K



(b) 不同最大次数β

图 1 不同出行频率旅客平均单程票价

优惠力度最大；C 点对应的平均单程票价主要受到 K 值影响， K 越大、平均单程票价越低 ($C' \rightarrow C$)， β 越大、平均单程票价越低 ($C'' \rightarrow C$)。综上， K 和 β 的设置决定了定期票的服务范围和对不同出行频率旅客的服务水平，并通过旅客选择行为最终作用于城际轨道交通客流量和运营企业票款收入，而不同通道客流需求下定期票对二者的影响，尚需进一步探讨。

2 城际轨道交通定期票对通勤旅客影响及其效果分析模型

为探究城际轨道交通对通勤旅客的影响并分析采用定期票后的客流和票款收入效果，首先建立基于旅客出行频率的多项 Logit 模型；其次，为便于探讨城际轨道交通客流量与运营企业票款收入的关系，引入价格弹性系数；然后，以运营企业票款收入和城际轨道交通旅客周转量最大化为目标，构造得到可用于决策最优定期票的目标函数。

2.1 旅客出行效用及多项 Logit 模型

城际间短途通勤交通主要依赖城际轨道交通、

小汽车及城际巴士 3 种方式^[12]。为反映上述 3 种方式的出行效用，引用文献 [13] 定义的经济性、快捷性费用与文献 [14] 定义的舒适性费用，并设置调节参数表示其他影响因素^[15]。各项费用的负值之和构成出行效用函数。出行频率为 k 的旅客选择交通方式 m ($m=1, 2, 3$ 分别表示城际轨道交通、城际巴士及小汽车) 单次出行的效用 $U_{k,m}$ 为

$$U_{k,m} = -(\alpha_1 P_{k,m} + \alpha_2 T_m + \alpha_3 A_m + C_m) + \varepsilon_{k,m} \quad (3)$$

式中： α_i 为费用的权重系数， $i=1, 2, 3$ ； $P_{k,m}$ ， T_m ， A_m 和 C_m 分别为出行频率为 k 的旅客采用交通方式 m 单次出行的经济性、快捷性、舒适性费用和调节参数； $\varepsilon_{k,m}$ 为出行者选择交通方式 k 的随机误差项。

1) 经济性费用

经济性费用用旅客出行所花费的经济费用表示。 $P_{k,1}$ ， P_2 和 P_3 分别表示城际轨道交通、城际巴士及小汽车的经济性，按式 (4) 一式 (6) 计算。

$$P_{k,1} = p_{k,1} + P_1^c \quad (4)$$

$$P_2 = p_2 + P_2^c \quad (5)$$

$$P_3 = P_0 + P_h + P_3^c \quad (6)$$

式中： p_2 为城际巴士票价； P_0 为小汽车在城际通道内的油耗费用，元； P_h 为小汽车高速公路通行费用，元； P_1^c ， P_2^c 和 P_3^c 为对应交通方式的市内交通费用，元。

2) 快捷性费用

快捷性费用用旅客出行所花费的时间乘旅客出行的单位时间成本表示。旅客出行时间又包括城际通道内的在车时间、城际通道外的市内出行时间与站内时间。小汽车出行不包含站内换乘过程，其站内时间为 0。

$$T_m = Q(t_m + t_m^c + t_m^s) \quad (7)$$

其中，

$$t_m = 60 \frac{L}{v_m}$$

式中： Q 为旅客出行的单位时间成本，元·min⁻¹； t_m ， t_m^c 和 t_m^s 分别为交通方式 m 的在车时间、市内交通时间和站内时间，min； v_m 为交通方式 m 的平均旅行速度，km·h⁻¹。

3) 舒适性费用

舒适性与旅客乘车环境直接相关，反映了拥挤度、噪音和座椅等外部环境对旅客乘车过程心理和生理的综合影响。考虑到舒适性难以直接量化为

时间或经济费用，本文引用既有研究成果，采用旅客出行后的疲劳恢复时间间接衡量，并通过时间价值计算舒适性的价值^[14]。舒适性越高，所需要的疲劳恢复时间也越短，即

$$A_m = \frac{60QT_H}{1 + \delta_m \exp(-\rho_m t_m)} \quad (8)$$

式中： T_H 为恢复疲劳所需的最长时间，h； δ_m 为交通方式 m 的最小出行疲劳恢复时间系数，即 $t_m=0$

时的疲劳恢复时间为 $\frac{60}{1} + \delta_m$ ，其值越大表示交通

方式 m 的最小出行疲劳恢复时间越短、舒适性越好， $\delta_m > 0$ ； ρ_m 为交通方式 m 在单位出行时间下的疲劳恢复时间强度系数，取值越大表示疲劳恢复时间越长， $\rho_m > 0$ 。

多项 Logit 模型下，出行频率为 k 的旅客选择交通方式 m 的概率，根据该交通方式的经济性、快捷性、舒适性等费用及随机误差项 $\varepsilon_{k,m}$ 的随机分布决定。假设 $\varepsilon_{k,m}$ 相互独立且服从 Gumbel 分布，同时为避免传统 Logit 模型中交通方式选择概率由效用的绝对差决定而导致的不合理结果^[15]，本文

采用改进相对效用差的多项 Logit 模型。出行频率

为 k 旅客选交通方式 m 率 $\theta_{k,m}$ 为

$$\theta_{k,m} = \frac{\exp\left(-\frac{U_{k,m}}{\sum_{m=1}^M U_{k,m}}\right)}{\sum_{m=1}^M \exp\left(-\frac{U_{k,m}}{\sum_{m=1}^M U_{k,m}}\right)} \quad (9)$$

式中： $\theta_{k,m}$ 为出行频率为 k 的旅客在交通方式 m 的分担率， $\theta_{k,m} \in (0, 1)$ ； M 为可选择交通方式数量，本文 $M=3$ 。

2.2 定期票下不同出行频率旅客的价格弹性系数

某城际通道内，城际轨道交通分担的出行频率为 k 的旅客客流量 D_k 为

$$D_k = d_k \theta_{k,1} \quad (10)$$

式中： d_k 为城际通道内出行频率为 k 的旅客的客流需求，人次； $\theta_{k,1}$ 为出行频率为 k 的旅客在城际轨道交通的分担率，基于多项 Logit 模型求得。

为便于分析定期票对不同出行频率旅客的影响，按照出行频率的弱、中、强将旅客划分为弱通勤、中通勤和强通勤 3 类，各类旅客在城际通道内的客流需求为 $d_n (n = I, II, III)$ ，对应的出行频

率位于 $[\gamma_n, \eta_n]$ 范围内，其中 γ_n 和 η_n 分别表示该类通勤旅客出行频率的下界和上界。

定期票下，城际轨道交通第 n 类旅客的分担率

$\theta_{n,1}$ 、客流量 D_n 及平均单程票价 P_n 分别为

$$\theta_{n,1} = \frac{\sum_{k=y_n}^{\eta_n} \theta_{k,1}}{\eta_n} \quad (11)$$

$$D_n = \sum_{k=y_n}^{\eta_n} d_k \theta_{k,1} \quad (12)$$

$$P_n = \frac{\sum_{k=y_n}^{\eta_n} d_k p_{k,1}}{\sum_{k=y_n}^{\eta_n} d_k} \quad (13)$$

引入价格弹性系数，分析定期票及其引起的客流量变化对运营企业票款收入的影响机理。价格弹性系数绝对值可以反映价格微小波动所引起的需求变动比例，正数则价格和需求同向变化，负数则价格和需求反向变化^[16]。第 n 类旅客的价格弹性系数 σ_n 为

$$\sigma_n = \frac{(D_n^{\circ} - D_n^{\circ}) / D_n^{\circ}}{(P_n^{\circ} - P_n^{\circ}) / P_n^{\circ}} \quad (14)$$

式中： D_n° 为常规票下城际轨道交通分担的第 n 类旅客客流量，人次； P_n° 为常规票下第 n 类旅客的平均单程票价，元。

2.3 最优定期票目标函数

定期票的制定须兼顾旅客与运营企业双方的利益，即客流量与票款收入 2 个不同的目标。为综合评价定期票效果，定义决策最优定期票的目标函数 Z 为城际轨道交通分担的运营企业票款收入与旅客周转量的加权和，即

$$Z = \max (R + \phi DL) \quad (15)$$

其中，

$$R = \sum D_k p_{k,1}$$

式中： R 为运营企业票款收入，元； D 为定期票下城际轨道交通分担的通勤客流总量，人次； ϕ 为权重参数，反映运营企业的偏好， $\phi > 0$ 。

3 算例分析

基于前述模型设置算例。首先，从定期票对城际轨道交通分担率的影响出发，分析特定通勤客流

需求下，定期票对城际轨道交通客流量、票款收入的影响；其次，探讨不同客流条件、通勤距离下的定期票效果与最优定期票设置。

3.1 算例设置

选取某城市群两城际站点之间通勤出行链为研究对象，如图 2 所示。城际轨道交通出行链包括 SI 、 JE 的市内出行及 IJ 站间 $L=70$ km 的城际通道出行。小汽车出行链无须经过站点，由 S 点直达 E 点，中间经过高速公路。城际巴士出行链包括 $S'I'$ 及 $J'E$ 的市内出行及 $I'J'$ 站间的城际高速公路出行。为控制变量，假设 IJ 站间、 $I'J'$ 站间以及小汽车高速公路区段的长度均等于 L 。

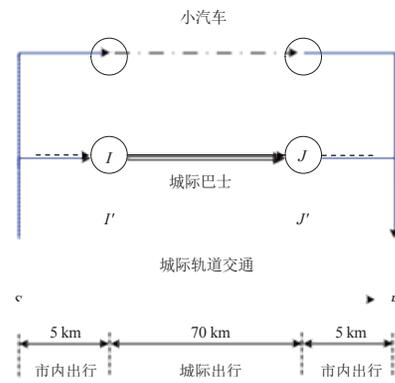


图2 某城市群城际通道通勤出行链

算例中的参数设定如下。结合 12306 售票信息调研结果和相关参考文献，城际轨道交通常规票单位里程票价率 $p_0=0.5$ 元 \cdot km⁻¹；按平均 8 L \cdot km⁻¹、6 元 \cdot L⁻¹ 算得小汽车城际通道内油费率为 0.48 元 \cdot km⁻¹，高速公路收费率取 0.5 元 \cdot km⁻¹，得到 $P_0=33.6$ 元， $P_1=35.0$ 元； $I'J'$ 站间城际巴士票价率设为 0.8 元 \cdot km⁻¹，则 70 km 通勤距离下票价 $p_2=56.0$ 元；城际轨道交通站点周边 5 km 的潜在客流需求较大，为控制变量，按此假设出行链两端各方

式市内出行距离为 5 km，市内出行费用 $P_1^c=3$ 元

$P_2^c=2$ 元；考虑市内交通速度较低， P_3^c 按照 0.6

元 \cdot km⁻¹ 的油费计算^[17]， $P_3^c=6$ 元；旅客时间成

本 $Q=0.27$ 元 \cdot min⁻¹^[12]；恢复疲劳所需的最长时间 $T_H=15$ h^[14]。3 种交通方式其他参数设定见表 2。

按 1 个月通勤 22 个工作日计算通勤旅客的出行频次。以每日出行 2 次，即月出行 44 次为强通勤，以每日出行 1 次，即月出行 22 次为弱通勤，

表2 模型参数

出行方式	市内交通 费用/元	旅行速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	市内交通时间/min	站内时间/min	最小出行疲劳恢复 时间系数/ $\text{min}^{[14]}$	疲劳恢复时间 强度系数 $^{[14]}$	调节参数
城际轨道交通	3	120	60	16	59	0.28	4.5
小汽车	6	80	40	0	55	0.30	2.7
城际巴士	3	60	60	11	48	0.33	8.6

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/607201065030006101>