



工业工程与管理
Industrial Engineering and Management
ISSN 1007-5429, CN 31-1738/T

《工业工程与管理》网络首发论文

题目：考虑乘客爽约行为的网约车个性化司乘双边匹配决策方法
作者：包伊宁，陈希，张文博
收稿日期：2023-05-21
网络首发日期：2024-04-12
引用格式：包伊宁，陈希，张文博. 考虑乘客爽约行为的网约车个性化司乘双边匹配决策方法[J/OL]. 工业工程与管理.
<https://link.cnki.net/urlid/31.1738.t.20240409.0956.003>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

考虑乘客爽约行为的网约车个性化司乘双边匹配决策方法

包伊宁, 陈 希*, 张文博

(西安电子科技大学 经济与管理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 针对网约车服务中普遍存在的各种乘客爽约行为, 提出了一种考虑乘客爽约行为的个性化司机与乘客双边匹配决策分析方法。首先, 针对乘客在网约车平台呼叫预约车辆的过程中频繁存在的取消订单行为, 建立了乘客选择模型以测算乘客爽约概率; 其次, 建立了基于语言标度的属性关联矩阵, 计算司机在网约车匹配过程中的各个属性权重; 进一步的, 考虑乘客的心理期望与感知, 依据前景理论计算出乘客对司机满意度的综合前景值; 在此基础上, 构建了司机和乘客匹配服务的多目标优化模型, 并通过模型求解获得了司机和乘客匹配的结果; 最后, 通过平台乘客预约网约车的匹配实例, 进一步验证了提出方法的有效性和可行性。

关键词: 司乘双边匹配; 乘客爽约行为; 前景理论; 多目标优化

中图分类号: C934 **文章标识码:** A

A Personalized Driver-Passenger Two-Sided Matching Decision Method for Online Taxi Platforms Considering Passengers' No-Show Behavior

BAO Yining, CHEN Xi*, ZHANG Wenbo

(School of Economics & Management, Xidian University, Xi'an Shaanxi 710071, China)

Abstract: A personalized two-sided driver-passenger matching decision analysis method is proposed, which has taken passengers' no-show behavior, frequently existing in online taxi services, into consideration. Firstly, on the basis of the process of calling a reserved vehicle on the online taxi platform, a passenger selection model is developed to measure the probability of passengers' no-show behavior. Secondly, an attribute correlation matrix based on linguistic scales is established to calculate the weight of drivers' every attribute in the process of online taxi matching. Furthermore,

收稿日期: 2023-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71974154); 陕西省省级青年人才支持计划项目; 陕西省高校杰出青年人才支持计划项目。

作者简介: 包伊宁 (1993—), 黑龙江大庆人, 博士生, 主要研究方向为平台运营管理。Email: ynbao@stu.xidian.edu.cn。

*通讯作者: 陈希, 教授, 博士, 主要研究方向为医疗运作管理。E-mail: xchen@xidian.edu.cn。

considering passengers' psychological expectations and perceptions, the comprehensive prospect value of passengers' satisfaction with the driver is calculated on account of the prospect theory. On this basis, a multi-objective optimization model driver-passenger matching is constructed, and the matching results are obtained by solving the model. Finally, the effectiveness and feasibility of the proposed method are further verified through the matching example of an online taxi platform.

Keywords: driver-passenger two-sided matching; passengers' no-show behavior; prospect theory; multi-objective optimization

1 引言

为引导网约车、共享单车、汽车等网络货运平台的健康发展,完善交通运输新业态监管规则 and 标准,引导平台企业提升服务水平,2021 年 12 月国务院印发《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》,试图打造“互联网+”高效物流新模式、新业态。网约车平台作为共享经济驱动下的互联网虚拟平台已取得了迅速的发展^[1],截至 2021 年 12 月,中国网约车市场用户规模达到 4.53 亿,较 2020 年 12 月增长 8 733 万。与此同时,中国网约车市场渗透率也在快速增长,2020 年我国网约车市场规模达到 3 000 亿元左右,2021 年国内网约车市场规模达到 3 265 亿元,到 2025 年我国网约车市场规模预期将达到 4 200 亿元。在网约车市场快速发展的时期,网约车平台上的运营管理也迎来了一系列挑战。首先,人们出行方式呈现个性化的特征,如何考虑乘客的个性化需求并为其提供满意的出行服务是网约车平台所面临的挑战;其次,由于人们出行选择的多样化,在平台派单过程中,乘客往往会因一些不确定因素而取消事先已指派好的订单,导致司机运力的浪费,降低了网约车平台的供应量,也增加了其他乘客的等待时间^[2-3]。如何考虑乘客的这种爽约行为,并进行合理的司乘匹配服务设计是当前网约车平台运营面临的难题。基于此,考虑网约车平台上乘客的个性化需求和不确定爽约行为,设计合理有效的订单分配模式以满足不同乘客的个性化需求,已成为缓解网约车平台供需矛盾的一个关键挑战。

在网约车平台上的司乘服务匹配过程中,如何根据司机和乘客的需求进行快速、有效、合理地匹配设计,是一个值得关注的重要研究问题。已有研究大多关注于模型和算法的设计,建立司乘匹配模型来研究共享平台下匹配服务设计问题。ZUO 等^[4]提出了一种基于聚类的路径规划算法,通过缩短行驶距离来满足乘客的乘车需求。LU 等^[5]通过优化乘车共享过程中的行程和运营模式,提出了两阶段模型来解决司乘匹配问题。ÖZKAN 和 WARD^[6]考虑了乘客到达率、等待时间等多个影响因素,建立了网约车司乘动态匹配模型来生成司乘匹配策略。TAFRESHIAN 和 MASOUD^[7]采用基于二分图的动态规划算法来解决一对一的司乘匹配问题,并将其进一步扩展到更复杂的动态规划匹配问题中。随着人们出行方式的多样性,如何为乘客提供个性化的出行服务也成为了一个新的研究热点。ZHAO 等^[8]针对共享乘车平台下的司乘双边匹配问题,提出了考虑双边主体心理行为的稳定双边匹配方法。LIU 等^[9]针对共享乘车服务的特点,考虑了司机和乘客对时间和成本的心理偏好,建立了司乘匹配模型。

CAO 等^[10]考虑了乘客的个性化需求, 提出了一种可扩展且高效的乘车共享服务模型来提高乘客的乘车服务质量。

在现实的司乘服务匹配过程中, 乘客往往会因为一些不确定因素而临时取消订单, 这种爽约行为造成了大量的资源浪费, 但已有考虑乘客爽约行为的司乘匹配问题的相关研究还所见不多。WANG 等^[2]从大量的滴滴出行数据中测算出乘客取消订单的概率, 将其引入到司乘匹配模型中来生成司乘匹配方案。孙中苗等^[11]构建了网约车平台动态服务决策模型, 对影响用户取消订单行为的多个因素进行了分析研究。HE 等^[12]考虑了乘客的取消预约订单行为, 采用网络均衡模型研究网约车平台的定价策略。SUN 等^[3]同时考虑了乘客排队和取消订单的行为, 并研究了平台利润最大化的最优定价和匹配问题。

网约车平台下的司乘匹配问题的研究已经取得了一些进展, 但已有成果较为有限。现实网约车平台中, 乘客的个性化偏好、频繁取消订单的行为, 以及乘客对司机的心理感知行为都会给网约车司乘匹配带来挑战。因此, 如何考虑乘客出行中的个性化复杂因素, 探讨爽约要素对出行的影响, 生成减少乘客爽约行为及兼顾司乘双边满意度的匹配方案, 是当前需要解决的重要研究问题。基于此, 本文聚焦于网约车平台下的司乘个性化匹配问题, 考虑乘客的爽约行为和个性化需求, 提出了一种网约车个性化司乘双边匹配决策方法。

2 问题描述

与传统的线下出行模式不同, 网约车平台为乘客和司机在灵活的时间建立了一个方便的沟通平台。乘客在线发布乘车需求订单, 平台通过分析乘客的需求特征和司机的多种因素, 将合适的司机匹配给乘客, 进而形成司机和乘客之间的服务匹配。合理的司乘匹配不仅可以减少乘客的等待时间, 还可以提高乘车服务质量。然而, 随着人们出行方式的个性化和多样化, 乘客在出行过程中往往会有一些个性化的需求, 例如有的乘客偏向于乘坐经济舒适性的车型, 有的乘客要求司机是男性、驾龄长等。此外, 现实决策环境的复杂性也可能导致一些突发状况, 如乘客临时取消已预订好的订单, 这均为网约车平台下的司乘服务匹配设计带来了挑战。因此, 如何在网约车司乘服务匹配过程中, 考虑乘客个性化需求和不确定爽约行为, 实现司机和乘客之间的合理匹配, 是本研究的核心问题。下面给出本文研究问题的具体描述:

在网约车平台下的司乘匹配设计过程中, 记网约车司机集合为 $D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, 其中 d_j 表示第 j 个司机; 乘客集合为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\}$, 其中 p_i 表示第 i 个乘客。平台对司机进行评价的属性集合为 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_f\}$, 其中, c_h 表示第 h 个属性, 评价属性可以为司机的服务分值、等待时间、性别等。司机属性集合 C 所对应的权重向量为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_f)$, 其中 w_h 为 c_h 的权重, 且满足 $0 \leq w_h \leq 1$, $\sum_{h=1}^f w_h = 1$ 。设 o_{jh} 为平台给出的司机 d_j 关于属性 c_h 的客观评价, e_{ih} 为乘客 p_i 给出的关于属性 c_h 的期望值。现实生活中, 乘客针对司机进行评价的属性有多种类型, 文中主要考虑如下三种类型: 清晰数、语言评价、无序枚举型。例如,

乘客对司机的“服务分值”给出的评价信息为清晰数类型；乘客对司机的“性别”给出的评价信息为无序枚举类型；乘客对“车内环境”给出的评价信息为语言评价价值类型。

本文要解决的问题是：针对网约车服务中普遍存在的乘客爽约行为，考虑了乘客个性化的需求与期望，提出一种个性化的司乘匹配方法从而帮助平台设计司乘匹配服务方案，提高乘客乘车的满意度。考虑乘客爽约行为的网约车司乘双边匹配决策问题如图 1 所示。

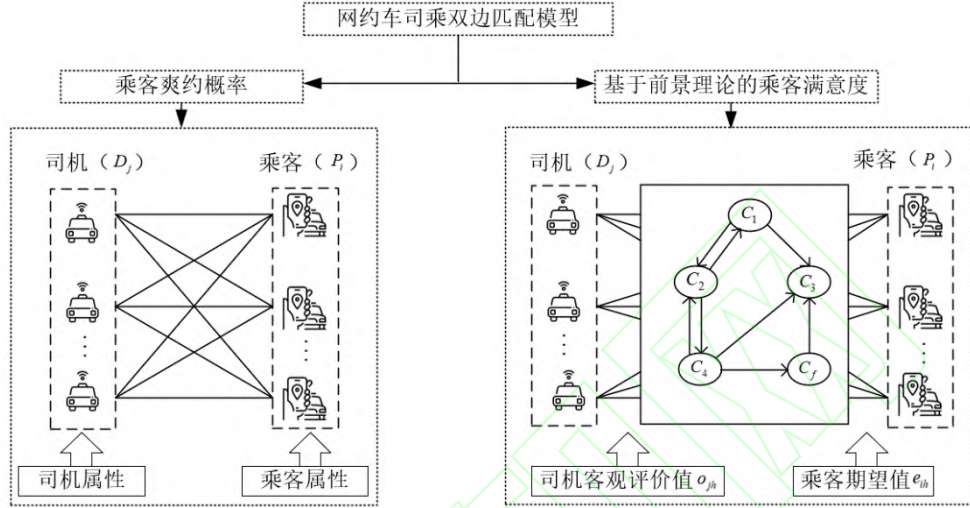


图 1 考虑乘客爽约行为的网约车司乘双边匹配决策问题

3 考虑乘客爽约行为的司乘双边匹配模型

为解决网约车平台下的司乘服务匹配问题，本文提出了一种考虑乘客爽约行为的司乘双边匹配模型。首先，针对网约车平台上乘客取消订单的行为，建立模型测算乘客爽约概率；然后考虑到属性之间的关联性，使用 DEMATEL 方法确定属性权重；进一步，考虑乘客的心理参考依赖行为，基于前景理论计算乘客对司机的综合满意度；最后，构建司机和乘客之间的多目标双边匹配模型来生成最佳服务匹配方案。

3.1 计算乘客爽约概率

在网约车平台的运作管理过程中，每天都会接收到数以万计的乘客乘车订单，平台通过分析乘客的需求、司机的位置等信息，为乘客匹配合适的司机。然而，现实决策环境的复杂性往往导致乘客出现取消订单的行为，例如在网约车到达乘客上车地点之前，乘客会因遇到出租车而选择取消已经匹配好的网约车订单，这造成了一定的资源浪费。因此，如何对乘客的爽约行为进行量化，准确测算乘客取消订单的概率，并基于此进行司乘匹配设计对网约车平台运营有着重要的现实意义。

假设乘客于 0 时刻在网约车平台上发布订单，且乘客在始发地等待网约车到达。乘客在确认订单后会收到平台给出的预计到达时刻 t_{ij}^1 。乘客可能在等待时间内遇到空载出租车。假设空载出租车的到达时刻为 t_{ij}^2 ， t_{ij}^2 服从 $[0, T]$ 上的均匀分布，且网约车的到达时刻不晚于 T 。当乘客在 T 时刻前遇到空载出租车时，乘客会考虑相应的乘车成本做出是否改乘出租车的决

策。记 p_e 和 p_t 分别为网约车和出租车的单位距离乘车费率， l_{ij} 和 p_w 分别表示乘车距离和单位时间等待成本。平台规定，乘客早于 t_0 时刻取消订单无需承担违约责任，本文记 t_0 为免责取消时刻。但乘客取消订单会产生愧疚感等，本文引入取消订单产生的心理成本 \hat{p}_c 来对其进行量化。若乘客早于 t_0 时刻取消订单，乘客因取消订单所产生的心理成本为 \hat{p}_c ；若乘客晚于 t_0 时刻取消订单，则平台会向乘客收取一定的取消费用（违约金） p_c ，因为乘客晚于 t_0 时刻取消订单已经受到违约处罚，所以不考虑乘客取消订单所带来的心理成本，设 $\hat{p}_c \leq p_c$ 。

为了分析不同情境下乘客改乘决策所带来的订单取消概率，下面分别从早于免责取消时刻和晚于免责取消时刻出现空载出租车两种情况出发，对乘客改乘决策下的成本进行分析，进一步给出乘客取消订单的概率。

情况 1：若早于免责取消时刻 t_0 出现一辆空载出租车，即 $t_{ij}^2 < t_0$ 。

在这种情况下，如果乘客选择继续等待网约车，则额外等待时间为 $t_{ij}^1 - t_{ij}^2$ ，乘客选择等待网约车的成本为 $p_w(t_{ij}^1 - t_{ij}^2) + p_e l_{ij}$ 。反之，如果乘客选择改乘出租车，虽然节省了额外的等待时间，但产生额外的心理成本 \hat{p}_c ，乘客选择改乘出租车的成本为 $p_t l_{ij} + \hat{p}_c$ 。两种选择的无差异点为：

$$t' = t_{ij}^1 - \frac{(p_t - p_e)l_{ij} + \hat{p}_c}{p_w}$$

若 $t_{ij}^2 < t'$ ，乘客选择取消订单改乘出租车，若 $t_{ij}^2 > t'$ ，乘客选择继续等待网约车。

情况 2：若晚于免责取消时刻 t_0 出现一辆空载出租车，即 $t_0 < t_{ij}^2 < t_{ij}^1$ 。

在这种情况下，乘客选择继续等待网约车的成本为 $p_w(t_{ij}^1 - t_{ij}^2) + p_e l_{ij}$ ，选择改乘空载出租车的成本为 $p_t l_{ij} + p_c$ ，则两种选择的无差异点为：

$$t'' = t_{ij}^1 - \frac{(p_t - p_e)l_{ij} + p_c}{p_w}$$

若 $t_{ij}^2 < t''$ ，乘客选择取消订单改乘出租车，若 $t_{ij}^2 > t''$ ，乘客选择继续等待网约车。

基于上述讨论，假设乘客总会选择成本最小的出行方式，乘客选择取消订单需同时满足的两个条件为：（1）乘客遇见空载出租车的时刻 t_{ij}^2 早于网约车的到达时刻 t_{ij}^1 ；（2）取消订单的成本小于继续等待网约车的成本。因此，取消订单的概率分为以下六种情况：

（1）当 $t' < 0$ 时，必有 $t'' < 0$ ，乘客取消订单概率为 0。

（2）当 $0 < t' < t_0$ 时，必有 $t'' < t_0$ ，若出租车晚于免责取消时刻到达，那么乘客会选择继续等待网约车，因此乘客取消订单概率为：

$$p(0 < t_{ij}^2 < t') = \int_0^{t'} \frac{dt}{T} = \frac{t_{ij}^1 p_w - (p_t - p_e)l_{ij} + \hat{p}_c}{T p_w} \quad (1)$$

(3) 当 $t_0 < t' < t_{ij}^1$ 且 $t'' < t_0$ 时, 若出租车早于免责取消时刻到达, 乘客必会取消订单, 而晚于免责取消时刻便不会取消订单, 因此乘客取消订单概率为:

$$p(0 < t_{ij}^2 < t_0) = \int_0^{t_0} \frac{dt}{T} = \frac{t_0}{T} \quad (2)$$

(4) 当 $t_0 < t' < t_{ij}^1$ 且 $t_0 < t'' < t_{ij}^1$ 时, 乘客取消概率为:

$$p(0 < t_{ij}^2 < t'') = \int_0^{t''} \frac{dt}{T} = \frac{t_{ij}^1 p_w - (p_t - p_e) l_{ij} + p_c}{T p_w} \quad (3)$$

(5) 当 $t' > t_{ij}^1$ 且 $t_0 < t'' < t_{ij}^1$ 时, 乘客取消概率为:

$$p(0 < t_{ij}^2 < t'') = \int_0^{t''} \frac{dt}{T} = \frac{t_{ij}^1 p_w - (p_t - p_e) l_{ij} + p_c}{T p_w} \quad (4)$$

(6) 当 $t' > t_{ij}^1$ 且 $t'' > t_{ij}^1$ 时, 若出租车在网约车之前到达, 乘客一定会取消订单, 因此乘客取消订单概率为:

$$p(0 < t_{ij}^2 < t_{ij}^1) = \int_0^{t_{ij}^1} \frac{dt}{T} = \frac{t_{ij}^1}{T} \quad (5)$$

综上, 乘客取消订单概率为:

$$p_{ij} = \begin{cases} 0, & t' < 0 \\ \frac{t_{ij}^1 p_w - (p_t - p_e) l_{ij} + \hat{p}_c}{T p_w}, & 0 < t' < t_0 \\ \frac{t_0}{T}, & t_0 < t' < t_{ij}^1 \text{ 且 } t'' < t_0 \\ \frac{t_{ij}^1 p_w - (p_t - p_e) l_{ij} + p_c}{T p_w}, & t_0 < t' < t_{ij}^1 \text{ 且 } t_0 < t'' < t_{ij}^1 \text{ 或 } t' > t_{ij}^1 \text{ 且 } t_0 < t'' < t_{ij}^1 \\ \frac{t_{ij}^1}{T}, & t' > t_{ij}^1 \text{ 且 } t'' > t_{ij}^1 \end{cases} \quad (6)$$

3.2 考虑属性关联的属性权重确定方法

在网约车平台下的司乘匹配问题中, 平台会通过分析乘客的多种个性化需求, 例如对司机性别的要求、对车内环境的要求等, 来为其匹配最合适的司机。通常不同需求对匹配结果的影响不同, 如何合理量化司机的多个属性的重要度对匹配结果有着重要的影响。现实中, 评价司机的多个属性之间往往存在一定的关联性^[13-14], 例如司机的性别和有无烟车有着直接的关联, 司机的服务分和顾客投诉次数也存在相互影响。基于此, 本文通过 DEMATEL 方法识别属性之间的影响关系, 从而确定属性权重^[15]。

考虑到决策环境的复杂性, 本文引入语言变量来对属性之间的关联性进行评价, 进而采用 DEMATEL 方法计算属性权重。首先给出语言变量的相关介绍。假设 $Z = \{z_0, z_1, \dots, z_U\}$ 是

一组有序语言术语集, $z_u \in Z$, $u = 0, 1, \dots, U$, 其中 z_u 表示第 u 个语言短语, $U+1$ 表示 Z 的粒度。为了便于计算, 可通过如下转化函数将语言变量进行精确化:

$$I(z_u) = u \quad (7)$$

其中, 函数 I 为语言术语集 z_u 的下标转化函数。

为了获取不同属性的权重, 本文考虑了属性之间的关联性, 引入语言变量刻画属性之间的关联性, 进而采用 DEMATEL 方法确定属性权重^[16], 具体如下:

(1) 构造语言型直接关联矩阵 Y

依据网约车行业相关专家的丰富经验, 给出属性间直接关联矩阵 $Y = [y_{ab}]_{f \times f}$ 。

$$Y = [y_{ab}]_{f \times f} = \begin{bmatrix} z_0 & y_{12} & \cdots & y_{1f} \\ y_{21} & z_0 & \cdots & y_{2f} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ y_{f1} & y_{f2} & \cdots & z_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, y_{ab} 表示专家针对司机的属性集合中属性 c_a 影响属性 c_b 程度的语言术语评价值, 例如, 专家针对司机的属性集合中, 属性“服务分值”影响属性“顾客投诉次数”的程度为“强”。特别地, 直接关联矩阵中, 主对角线上元素 y_{aa} 均使用语言术语集中语言术语的下限 z_0 , 其表示各评价属性对自身无影响, 根据公式(7), $I(z_0) = 0$ 。

(2) 计算标准化直接影响矩阵 S

通过语言术语集下标转化函数 I 可将属性间语言型直接关联矩阵 Y 转化为精确数直接关联矩阵 $Y = [y_{ab}]_{f \times f}$, 计算公式为:

$$y_{ab} = \begin{cases} I(z_{u^{ab}}) = u^{ab} & a \neq b \\ 0 & a = b \end{cases} \quad (9)$$

对矩阵 \tilde{Y} 进行规范化处理得到指标关联规范化矩阵 $S = [s_{ab}]_{f \times f}$, 规范化处理如下:

$$s_{ab} = \frac{y_{ab}}{\max_{1 \leq a \leq f} \left(\sum_{b=1}^f y_{ab} \right)} = \frac{I(z_u)}{\max_{1 \leq a \leq f} \left(\sum_{b=1}^f I(z_u) \right)} \quad (10)$$

(3) 采用公式(11)计算综合影响矩阵 $W = [w_{ab}]_{f \times f}$

$$W = \lim_{r \rightarrow \infty} (S + S^1 + S^2 + \cdots + S^r) = S(E - S)^{-1} \quad (11)$$

其中, $\lim_{r \rightarrow \infty} S^r = O$, O 为零矩阵, E 为单位矩阵。

(4) 计算属性的影响度 α_a 和被影响度 β_b

$$\alpha_a = \sum_{b=1}^f w_{ab} \quad (12)$$

$$\beta_b = \sum_{a=1}^f w_{ab} \quad (13)$$

令 $a=b=h$ ，则属性 c_h 的重要度 γ_h 为：

$$\gamma_h = \sqrt{(\alpha_a + \beta_b)^2 + (\alpha_a - \beta_b)^2} \quad (14)$$

其中， $\alpha_a + \beta_b$ 表示中心度，反应属性 c_h 在整个司机属性集合中的影响力， $\alpha_a - \beta_b$ 表示原因度，反应属性 c_h 与司机其他属性间的因果逻辑强度。

(5) 计算属性权重

$$w_h = \gamma_h / \sum_{a=1}^f \gamma_a \quad (15)$$

式中， w_h 为属性 c_h 的权重，满足 $w_h \in [0,1]$ ， $\sum_{h=1}^f w_h = 1$ 。为不失一般性，记属性权重向量为 $W = (w_1, w_2, \dots, w_f)^T$ 。

3.3 考虑乘客参考心理依赖行为的满意度计算

本节针对乘客参考依赖的心理行为特征，基于前景理论来计算乘客关于司机的满意度^[17]。首先选择乘客 p_i 对司机 d_j 的各属性期望值 e_{ih} 作为参考点计算乘客 p_i 对司机 d_j 关于属性 c_h 的收益 R_{ij}^h 和损失 L_{ij}^h 。下面分别给出属性的评价信息为清晰数、语言评价值和无序枚举型三种类型属性的收益和损失计算方法：

(1) 当属性的评价信息为清晰数类型时，平台对司机的评价值 o_{jh} 和乘客对司机的期望参考点 e_{ih} 之间有两种可能的关系，即 $o_{jh} \geq e_{ih}$ 和 $o_{jh} < e_{ih}$ 。本文仅考虑效益型属性，对于成本型属性，可将其转化为效益型进行处理。属性的收益和损失计算公式如下：

$$R_{ij}^h = \begin{cases} 0, & o_{jh} < e_{ih} \\ o_{jh} - e_{ih}, & o_{jh} \geq e_{ih} \end{cases} \quad (16)$$

$$L_{ij}^h = \begin{cases} o_{jh} - e_{ih}, & o_{jh} < e_{ih} \\ 0, & o_{jh} \geq e_{ih} \end{cases} \quad (17)$$

(2) 当属性的评价信息为语言评价值类型时，属性值与参照点均为语言短语形式。首先采用如下公式将语言评价信息 z_u 转化为三角模糊数^[18] $Z = (z^1, z^2, z^3)$ ：

$$Z = (z^1, z^2, z^3) = \left(\max \left\{ \frac{u-1}{U}, 0 \right\}, \frac{u}{U}, \min \left\{ \frac{u+1}{U}, 1 \right\} \right), \quad u = \{0, 1, \dots, U\} \quad (18)$$

设属性值 o_{jh} 对应的语言短语为 z_u^v ，参考点对应的语言短语为 z_u^w ，平台对司机的评价值 o_{jh} 和乘客对司机的期望参考点 e_{ih} 之间有三种可能的关系，即 1) 若 $z_u^v \succ z_u^w$ ，则 $o_{jh} > e_{ih}$ ；2) 若 $z_u^v \prec z_u^w$ ，则 $o_{jh} < e_{ih}$ ；3) 若 $z_u^v = z_u^w$ ，则 $o_{jh} = e_{ih}$ 。将语言短语 o_{jh} 和 e_{ih} 转化成三角模糊数形式，即 $o_{jh} = (o_{jh}^1, o_{jh}^2, o_{jh}^3)$ ， $e_{ih} = (e_{ih}^1, e_{ih}^2, e_{ih}^3)$ ，进而给出属性的收益和损失的计算公式：

$$R_{ij}^h = \begin{cases} 0, & o_{jh} \leq e_{ih} \\ \sqrt{\frac{1}{3} \left[(o_{jh}^1 - e_{ih}^1)^2 + (o_{jh}^2 - e_{ih}^2)^2 + (o_{jh}^3 - e_{ih}^3)^2 \right]}, & o_{jh} > e_{ih} \end{cases} \quad (19)$$

$$L_{ij}^h = \begin{cases} -\sqrt{\frac{1}{3} \left[(o_{jh}^1 - e_{ih}^1)^2 + (o_{jh}^2 - e_{ih}^2)^2 + (o_{jh}^3 - e_{ih}^3)^2 \right]}, & o_{jh} < e_{ih} \\ 0, & o_{jh} \geq e_{ih} \end{cases} \quad (20)$$

(3) 当属性的评价信息为无序枚举类型时, 属性值与参照点均为无序枚举形式, 平台对司机的评价值 o_{jh} 和乘客对司机的期望参考点 e_{ih} 之间有两种可能的关系, 即 $o_{jh} \in e_{ih}$ 和 $o_{jh} \notin e_{ih}$, 下面给出属性的收益和损失的计算公式:

$$R_{ij}^h = \begin{cases} 0, & o_{jh} \notin e_{ih} \\ 1, & o_{jh} \in e_{ih} \end{cases} \quad (21)$$

$$L_{ij}^h = \begin{cases} -1, & o_{jh} \notin e_{ih} \\ 0, & o_{jh} \in e_{ih} \end{cases} \quad (22)$$

基于此, 建立乘客对司机相对于参考点的收益矩阵 $R^h = [R_{ij}^h]_{m \times n}$ 和损失矩阵 $L^h = [L_{ij}^h]_{m \times n}$, 显然, $R_{ij}^h \geq 0$, $L_{ij}^h \leq 0$ 。

然后, 根据收益矩阵 $R^h = [R_{ij}^h]_{m \times n}$ 和损失矩阵 $L^h = [L_{ij}^h]_{m \times n}$, 考虑乘客对待收益和损失不同的风险态度, 设 $V^h = [V_{ij}^h]_{m \times n}$ 为乘客关于司机的前景值决策矩阵, 其中 V_{ij}^h 为乘客对司机的各属性的前景值, 由前景理论计算得到乘客对司机的属性前景值为:

$$V_{ij}^h = (R_{ij}^h)^\alpha + [-\eta(-L_{ij}^h)^\beta] \quad (23)$$

其中, α 和 β 分别表示价值函数的收益区域和损失区域的凹凸程度, 其反映了乘客对待收益和损失的不同风险态度, $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < 1$, α 和 β 越大, 表明乘客越倾向于冒险, η 表示乘客的损失规避程度 $\eta > 1$, η 越大, 表明乘客的损失规避程度越大。

为了消除不同物理量纲对决策结果的影响, 需将决策矩阵 $V^h = [V_{ij}^h]_{m \times n}$ 进行规范化, 具体的规范化公式为:

$$V_{ij}^{*h} = \frac{V_{ij}^h - \max_j \{V_{ij}^h\}}{\max_j \{V_{ij}^h\} - \min_j \{V_{ij}^h\}} \quad (24)$$

最后, 依据简单加权原则, 计算乘客对司机满意度的综合前景值为:

$$U_{ij} = \sum_{h=1}^f V_{ij}^{*h} w_h, i=1, 2, \dots, m, j=1, 2, \dots, n \quad (25)$$

其中, U_{ij} 表示乘客 p_i 关于司机 d_j 满意度的综合前景值, U_{ij} 越大, 说明乘客 p_i 对司机 d_j 的满意度就越高。

3.4 司乘双边匹配模型

根据以上分析获得的乘客 p_i 对司机 d_j 的满意度的综合前景值 U_{ij} ，乘客的取消概率 p_{ij} 以及司机的收入，可以建立一个使双方匹配主体满意度最大的决策模型，尽量使得司乘匹配双方都达到满意的结果。网约车平台有平台派单和司机选择性接单两种模式。在司机自行接单模式中，司机往往只重视短视的利益，倾向于选择价格高的长途订单，而这种选择模式可能出现局部最优，不能实现长期收入最大化。因此，本文只考虑平台派单模式，即平台通过匹配模型派给司机最优订单，使得区域内所有提供服务的司机收入总和最大化，并使得乘客对司机满意度的综合前景值之和最大，例如缩短乘客整体的预估等待时间，优先分配给乘客服务分值高、顾客投诉次数少、车内环境好的司机，实现全局最优。引入 0-1 变量 x_{ij} ， $x_{ij} = 1$ 表示司机 d_j 与乘客 p_i 匹配， $x_{ij} = 0$ 表示司机 d_j 与乘客 p_i 不匹配。根据获得的综合前景值，建立如下优化模型：

$$\max Z_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n U_{ij} (1 - p_{ij}) x_{ij} \quad (26)$$

$$\max Z_2 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p_e l_{ij} (1 - p_{ij}) x_{ij} \quad (27)$$

$$s.t. \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1 \quad (28)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1 \quad (29)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \quad (30)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (31)$$

目标函数(26)表示最大化乘客对司机满意度的综合前景值，目标函数(27)表示最大化区域内所有提供服务的司机收入总和，约束条件(28)表示每个司机最多与一个乘客相匹配，约束条件(29)表示每个乘客最多与一个司机相匹配，约束条件(30)表示决策变量的取值约束。该优化模型能够形成稳定匹配解，稳定匹配可以被转化并描述为最大化线性目标函数的线性规划问题^[19]。

为了消除量纲对结果的影响，对目标函数 Z_1 和 Z_2 进行了归一化处理，具体如下所示：

$$\begin{cases} Z'_1 = \frac{Z_1 - \min\{Z_1\}}{\max\{Z_1\} - \min\{Z_1\}} \\ Z'_2 = \frac{Z_2 - \min\{Z_2\}}{\max\{Z_2\} - \min\{Z_2\}} \end{cases} \quad (32)$$

对上述由式(26)~(31)构成的多目标线性优化模型，通过使用线性加权的方法，可将式(26)和(27)转化为单目标函数。设定目标函数的权重参数为 v_1 和 v_2 ，其中， $v_1 + v_2 = 1$ 。这里，假设司机与乘客的需求在匹配过程中具有同等的重要性，即设定 $v_1 = 0.5$ ， $v_2 = 0.5$ 。进一步，可将式(26)~(27)转化为如下的单目标线性规划模型：

$$\max Z = v_1 \times Z'_1 + v_2 \times Z'_2 \quad (33)$$

$$\text{s.t. } \sum_{i=1}^m x_{ij} \leq 1 \quad (34)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq 1 \quad (35)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ 或 } 1 \quad (36)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (37)$$

上述由式(33)至(37)构成的单目标线性规划模型，可通过线性规划的方法进行求解。最后使用优化软件包或者优化算法编程来求解该线性规划模型。针对本文实际数据的特征驱动，采用 MATLAB 进行求解能够快速得到匹配结果，但当扩展解决其他类似的研究问题时，如果数据规模较大，则可以使用智能优化算法来进行编程求解。

4 算例

以 D 网约车平台的司机和乘客匹配为例，设有 30 名乘客 $\{p_1, p_2, \dots, p_{30}\}$ ，在中午 12:00 到 12:10 在西安市某医院附近在 D 平台上呼叫网约车，周边可被呼叫的车辆有 100 辆， $\{d_1, d_2, \dots, d_{100}\}$ 。网约车平台给出司机的 7 个属性，司机的服务分值(c_1)，司机的性别(c_2)，有无烟车(c_3)，车内环境(c_4)，顾客投诉次数(c_5)，驾龄(c_6)，预估等待时间(c_7)。其中，属性 c_1 、 c_5 、 c_6 和 c_7 的评价信息为清晰数类型，属性 c_1 和 c_6 是效益型属性，属性 c_5 和 c_7 是成本型属性；属性 c_4 的评价信息为语言评价类型，本文构建 7 标度语言评价术语集来对车内环境进行评价，具体为 $Z = \{z_0 = \text{AP}, z_1 = \text{VP}, z_2 = \text{P}, z_3 = \text{M}, z_4 = \text{G}, z_5 = \text{VG}, z_6 = \text{AG}\}$ ，其中 AP 表示非常差，VP 表示很差，P 表示差，M 表示中等，G 表示好，VG 表示很好，AG 表示非常好。属性 c_2 和 c_3 的评价信息为无序枚举类型。此外，模型中主要参数设定如下： $p_e = 1.8$ ， $p_i = 2$ ， $p_c = 3$ ， $T = 10$ 。平台对司机的评价信息和乘客关于司机的期望水平信息如表 1 和表 2，乘客和司机的其他属性信息如表 3。为了刻画属性之间的关联性，本文构建如下 7 粒度语言评价术语集来帮助专家对属性之间的关联性进行分析： $Z = \{z_0, z_1, z_2, z_3, z_4, z_5, z_6\}$ ，其中 z_0, \dots, z_6 分别表示属性之间的影响关系强度：非常弱、很弱、弱、中、强、很强和非常强。属性间直接关联矩阵 $Y = [y_{ab}]_{f \times f}$ 如表 4。为了解决上述匹配决策问题，下面简要说明使用给出方法的计算过程。

表 1 司机关于各属性的评价信息

c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7	t_0
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

d_1	86	男	无烟	VP	4	3	3	12:03
d_2	81	男	无烟	P	2	18	3	12:03
d_3	96	女	无烟	G	6	8	3	12:03
d_4	86	男	无烟	G	6	24	6	12:03
d_5	94	男	有烟	G	7	18	3	12:03

表 2 乘客关于司机各属性的期望水平信息

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
p_1	89	女、男	无烟	P	4	9	4
p_2	86	女、男	无烟	G	6	5	4
p_3	82	女、男	有烟	G	0	3	2
p_4	86	男	有烟	M	5	5	2
p_5	93	男	无烟	P	8	4	6

表 3 乘客的属性信息

	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	p_8	p_9	p_{10}
l	20	10	9	10	14	15	6	6	8	15
\hat{p}_c	1.1	2.4	0.2	0.5	2.2	0.5	2.1	1.0	0.2	3.0
p_w	0.8	0.8	0.8	0.9	0.8	1.6	1.9	2.0	1.7	1.0

表 4 属性间的直接关联矩阵 Y

	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5	c_6	c_7
c_1	z_0	z_0	z_3	z_5	z_6	z_0	z_0
c_2	z_3	z_0	z_4	z_4	z_3	z_0	z_0
c_3	z_4	z_0	z_0	z_5	z_4	z_0	z_0
c_4	z_4	z_0	z_5	z_0	z_3	z_0	z_0
c_5	z_6	z_0	z_1	z_0	z_0	z_0	z_0
c_6	z_0	z_0	z_0	z_0	z_2	z_0	z_0
c_7	z_1	z_0	z_0	z_0	z_6	z_0	z_0

首先，计算乘客 p_i 对司机 d_j 的爽约概率，前 10 位乘客关于 10 位司机的爽约概率如表 5 所示。

然后，得到评价司机的属性权重为: $W = (0.23, 0.19, 0.19, 0.2, 0.16, 0.01, 0.02)$ 。

进一步，设定参数 $\alpha = \beta = 0.88$ ， $\eta = 2.25^{[20]}$ ，计算乘客 p_i 对司机 d_j 满意度的综合前景值，前 10 位乘客关于 10 位司机的满意度综合前景值如表 6 所示。

最后，建立双目标优化模型，将模型转化为单目标线性规划模型。设 $v_1 = 0.5$ ， $v_2 = 0.5$ ，通过 MATLAB 软件进行求解，得到司机和乘客之间的匹配结果如图 2 所示：

表 5 乘客的爽约概率

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}
p_1	0	0	0	0.6	0	0	0	0	0	0

p_2	0.3	0.3	0.3	0.6	0.3	0	0	0	0.3	0.3
p_3	0.3	0.3	0.3	0.6	0.3	0	0	0	0.3	0.3
p_4	0.3	0.3	0.3	0.6	0.3	0	0	0	0.3	0.3
p_5	0	0	0	0.6	0	0	0	0	0	0
p_6	0.3	0.3	0.3	0.6	0.3	0	0.2	0.2	0.3	0.3
p_7	0.35	0.35	0.35	0.6	0.35	0	0.2	0.2	0.35	0.35
p_8	0.29	0.29	0.29	0.6	0.29	0	0.2	0.2	0.29	0.29
p_9	0.22	0.22	0.22	0.6	0.22	0	0.2	0.2	0.22	0.22
p_{10}	0.3	0.3	0.3	0.6	0.3	0	0	0	0.3	0.3

表 6 乘客关于司机满意度的综合前景值

	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8	d_9	d_{10}
P_1	0.73	0.74	0.72	0.74	-	0.73	0.74	0.69	0.73	0.72
P_2	0.74	0.7	0.75	0.79	-	0.73	0.73	0.68	0.74	0.71
P_3	0.46	0.45	0.67	0.51	-	0.45	0.48	0.61	0.47	0.46
P_4	0.57	0.54	0.56	0.6	-	0.57	0.58	0.51	0.56	0.54
P_5	0.73	0.75	0.56	0.76	-	0.73	0.75	0.53	0.75	0.73
P_6	0.82	0.83	0.84	0.85	-	0.82	0.86	0.8	0.85	0.82
P_7	0.63	0.62	0.4	0.62	-	0.62	0.62	0.38	0.58	0.64
P_8	0.75	0.72	0.72	0.75	-	0.75	0.73	0.7	0.7	0.74
P_9	0.84	0.85	0.83	0.84	-	0.84	0.84	0.82	0.83	0.86
P_{10}	0.43	0.43	0.45	0.44	-	0.42	0.43	0.42	0.44	0.43

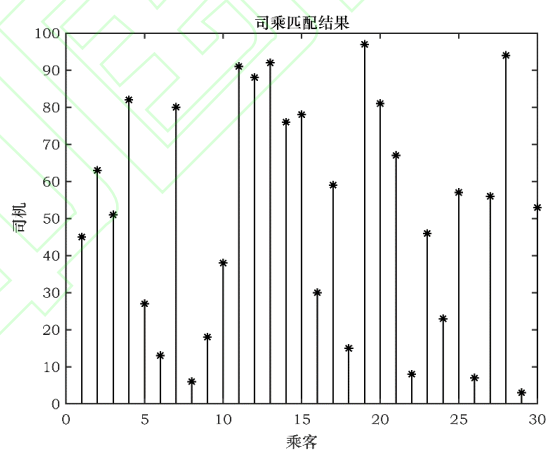


图 2 网约车司机和乘客匹配情况

图 2 给出了 30 位乘客与 100 位司机之间的匹配结果，例如乘客 1 和司机 45 匹配成功，乘客 6 和司机 13 匹配成功，乘客 29 和司机 3 匹配成功等等。进一步，我们对已匹配成功的乘客和司机做了如下图 3 所示的分析，探讨匹配结果与乘客满意度和司机收入之间的关系。

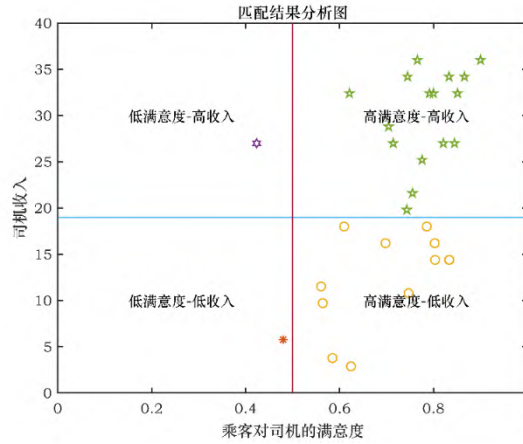


图 3 网约车司机—乘客匹配结果分析

在图 3 中，我们根据乘客对司机的满意度和司机的收入将匹配结果分为四类：低满意度-低收入、低满意度-高收入、高满意度-低收入、高满意度-高收入。可以明显发现，仅有 2 个成功匹配的乘客和司机位于低满意度-低收入、低满意度-高收入两类结果中；在高满意度-低收入中，有 11 个成功匹配的结果；在高满意度-高收入中，有 17 个成功匹配的结果。图三也从另一个视角体现出，平台再为司机和乘客之间提供服务中，更多是去优先考虑乘客的满意度，其次是司机的收入。

5 结论

本文针对网约车司机和乘客的个性化双边匹配问题，提出了一种考虑乘客爽约行为的决策分析方法。首先，给出考虑属性优先性的网约车司机和乘客双边匹配问题的描述和司乘双边匹配的定义；考虑到乘客在网约车平台呼叫预约车辆的过程中的爽约行为，给出计算乘客爽约概率模型；进一步地，根据专家提供的基于语言标度的属性间直接关联矩阵，计算出司机的属性权重；在此基础上，考虑乘客的心理期望与感知，依据前景理论计算出乘客对司机满意度的前景值，进而计算乘客关于司机的综合前景值，并进一步构建多目标优化模型；最后，构建了获得考虑乘客爽约概率的司乘匹配方案的多目标优化模型，使用 MATLAB 求解得到匹配结果。与已有的研究成果相比，所给出的方法进一步考虑了乘客爽约和心理行为，使得关于网约车司乘供需匹配的研究更贴近现实情景，对解决网约车平台中的司乘匹配决策问题具有重要的理论指导价值。

参考文献

- [1] TAFRESHIAN A, MASOUD N, YIN Y. Frontiers in service science: Ride matching for peer-to-peer ride sharing: A review and future directions[J]. Service Science, 2020, 12(2-3): 44-60.
- [2] WANG X, LIU W, YANG H, et al. Customer behavioural modelling of order cancellation in coupled ride-sourcing and taxi markets[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2020, 132: 358-378.
- [3] SUN Z, XU Q, ZHANG G, et al. Pricing and matching for on-demand platform considering customer queuing and order cancellation[J]. INFOR: Information Systems and Operational Research, 2022, 60(2): 244-282.
- [4] ZUO H, CAO B, ZHAO Y, et al. High-capacity ride-sharing via shortest path clustering on large road networks[J]. The Journal of Supercomputing, 2021, 77(4): 4081-4106.

- [5] LU W, LIU L, WANG F, et al. Two-phase optimization model for ride-sharing with transfers in short-notice evacuations[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 114: 272-296.
- [6] ÖZKAN E, WARD A R. Dynamic matching for real-time ride sharing[J]. *Stochastic Systems*, 2020, 10(1): 29-70.
- [7] TAFRESHIAN A, MASOUD N. Trip-based graph partitioning in dynamic ridesharing[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 114: 532-553.
- [8] ZHAO R, JIN M, REN P, et al. Stable two-sided satisfied matching for ridesharing system based on preference orders[J]. *The Journal of Supercomputing*, 2020, 76: 1063-1081.
- [9] LIU X, TITHERIDGE H, YAN X, et al. A passenger-to-driver matching model for commuter carpooling: Case study and sensitivity analysis[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2020, 117: 102702.
- [10] CAO B, HOU C, ZHAO L, et al. SHAREK*: A scalable matching method for dynamic ride sharing[J]. *GeoInformatica*, 2020, 24: 881-913.
- [11] 孙中苗, 徐琪, 史保莉. 考虑用户取消订单行为的网约车平台动态服务策略[J]. *工业工程与管理*, 2022, 27(3): 106-116.
- [12] HE F, WANG X, LIN X, et al. Pricing and penalty/compensation strategies of a taxi-hailing platform[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 86: 263-279.
- [13] 徐选华, 余艳粉, 陈晓红. 基于属性关联的不完全风险偏好信息大群体应急决策方法[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(9): 1-8.
- [14] 刘政敏, 徐洪雪, 刘培德, 等. 考虑多元关联关系和语义变换的直觉不确定语言多属性决策方法[J]. *运筹与管理*, 2021, 30(2): 45-52.
- [15] 索玮岚, 冯博. 关联型决策分析方法研究综述[J]. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(10): 2449-2464.
- [16] 索玮岚, 张劲. 多元化集成模式下交通基础设施建设融资风险识别研究[J]. *中国管理科学*, 2022, 30(10): 25-34.
- [17] 张晓, 樊治平. 基于前景理论的风险型混合多属性决策方法[J]. *系统工程学报*, 2012, 27(6): 772-781.
- [18] JIANG Y P, FAN Z P, MA J. A method for group decision making with multi-granularity linguistic assessment information[J]. *Information Sciences*, 2008, 178(4): 1098-1109.
- [19] ROTH A E, ROTHBLUM U G, VANDE VATE J H. Stable matchings, optimal assignments, and linear programming[J]. *Mathematics of Operations Research*, 1993, 18(4): 803-828.
- [20] TVERSKY A, KAHNEMAN D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty[J]. *Journal of Risk and Uncertainty*, 1992, 5(4): 297-323.