

考虑最大用户满意度的新能源汽车换电站选址

赵礼强^{1,2}, 吴 洁¹

(1. 沈阳航空航天大学经济与管理学院, 沈阳 110136; 2. 沈阳师范大学管理学院, 沈阳 110034)

摘要: 随着新能源汽车保有量的快速增长,换电站作为重要的基础设施,其选址问题对于提升用户体验和推动电动汽车的普及至关重要。为探讨以最大用户满意度为目标的新能源汽车换电站选址策略,分析影响用户满意度的关键因素,包括服务费用、行驶时间、等待时间以及损耗电量。通过对这 4 个因素进行综合考虑,将多目标决策问题根据 CRITIC 权重法转化为单目标优化问题,构建了选址优化模型,并采用遗传算法进行算例分析获得最优的选址位置。

关键词: 新能源汽车; 换电站; 用户满意度; 选址

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)09-0107-07

中国新能源汽车产业的发展正在引领全球汽车产业的变革浪潮^[1]。近年来,全球范围内对气候变化的担忧和环境保护意识的提升,使得新能源汽车凭借其低碳、环保以及高效节能的特性,成为全球汽车产业转型升级的焦点。这一产业的迅猛扩张得益于电池、充电技术创新与 AI、大数据的融合,以及政府激励和消费者环保态度转变。新能源汽车产业的范畴广泛,不仅局限于电动汽车的制造与生产,还深入到动力电池的循环利用、智能网联技术的研发与推广等多个层面。目前,中国新能源电池回收产业已取得显著突破,形成了从生产到应用,再到回收利用的全产业链领先地位。应雄等^[2]研究了中国和全球电动汽车产业对锂、钴、镍需求的增长情况,预测了 3 种金属的回收潜力,从而对电动汽车回收体系提出了相关建议。张川等^[3]研究电动汽车动力电池制造商在碳配额交易政策下的回收模式选择与碳减排策略,提出了 4 种混合渠道回收模式。同时,随着电动化、网联化、智能化技术的不断演进,新能源汽车正逐步从单纯的交通工具转变为移动智能终端、储能单元和数字空间,带动能源、交通、信息通信基础设施的改造升级。然而在经济社会的高速增长下,新能源汽车产业的市场拓展会受到充换电设施普及的制约和影响。

充换电基础设施的不足是目前电动汽车面临的挑战,尤其在长途或高需求时段,充电便利性和

效率成为用户的关键考量。因此,电动汽车换电站作为新解决方案备受关注。换电站不同于传统的充电站,它能够有效解决用户在充电时间、续航里程、电池质量等方面的多个痛点问题,提高了用户的用车便捷性,也有利于提高电池寿命。然而换电站选址问题却是一个复杂的决策过程,它涉及用户需求、城市规划等多方面的因素,其中,用户满意度作为衡量换电站选址成功与否的关键指标,更是需要被充分考虑。用户满意度不仅反映了用户对换电站服务的整体评价,也直接影响了电动汽车的推广和普及。一个选址合理的换电站能够为用户提供便捷、高效的充电服务,提升用户体验。相反,选址不当的换电站可能导致用户充电不便、等待时间过长等问题,降低用户满意度,甚至影响电动汽车市场的健康发展。

在电动汽车行业迅猛发展的背景下,充电站选址问题成为国内外研究的热点。在优化目标方面,赵姣等^[4]以优化充电站选址和运输路径为目标,考虑了充电排队等待因素及电动车能耗碳排放成本,建立带时间窗的电动物流车选址-路径问题模型。孙健等^[5]提出了一种多等级充电站双目标优化选址模型,考虑了不同等级充电站的建设成本和服务能力,通过分析车辆运行轨迹大数据进行选址。梁露和韩飞^[6]考虑充电排队和充电绕行行为,分析电动汽车充电行为特征,充电站排队系统特征,构建了

收稿日期: 2024-11-14

作者简介: 赵礼强(1975—),男,甘肃会宁人,博士,教授,研究方向为电子商务、供应链优化;吴洁(2001—),女,四川成都人,硕士研究生,研究方向为电动汽车设施选址。

以里程焦虑、充电费用最小化为目标的改进充电站选址优化模型。Li 等^[7]提出了一种双层规划模型,在提高用户的服务满意度的同时,平衡投资者和 EV(electric vehicle, 纯电动汽车)用户的利益。Yi 等^[8]综合考虑了用户满意度的 3 个指标:充电便利性、充电成本和充电时间,综合考虑负荷和充电需求,建立电动汽车充电站选址定容模型。从需求点最大化方面考虑,王丽丽^[9]研究了以行驶时间最小为目标,综合考虑电动汽车、充电站、充电需求等因素,建立了动态智能体模型,运用复杂网络理论对充电网络进行深度解析。

现有文献关于新能源汽车充电站选址的研究都是充电模式,也有少数研究对换电模式进行了探索。首先是多目标规划。吴昊等^[10]构建多目标灰色局势决策模型对换电站选址的经济性进行分析,通过计算综合效果测度得到最终选址点。陈博文和陈建岭^[11]以换电站建设成本及用户出行成本最小化、用户覆盖率最大化为目标函数,建立双目标混合整数规划模型。其次是企业效益方面。张兆轩等^[12]用 Voronoi 图和改进的 Batman 算法相结合,计算了一种以年投资费用、电池换电站的总投资为目标函数的定容,并构建了一种新能源汽车充电站的选址决策模型。吕应龙^[13]设计了一种考虑实际的公交线路运营状况、换电站的建造成本和电网运行的选址模型,并采用遗传算法进行优化。Zhang 等^[14]建立了考虑客户满意度的无换电行为的电动汽车选址模型,并设计两阶段改进蚁群-遗传算法进行求解。贾林国等^[15]在考虑用户对便捷通行的需求以及运营商追求投资收益的基础上,实现换电站利润的最大化目标。Zhang 等^[16]提出了一种基于免疫优化算法、两种交叉算子以及可变交叉率和变异率的求解策略,以换电站总成本最小为目标,建立了合理选址换电站的整数规划问题模型。韩顺杰等^[17]构建以换电站年均综合费用最小化为目标的优化模型,采用改进量子粒子群算法求解,并通过自适应惯性权重、Logistic 混沌映射初始化、Levy 飞行与 Cauchy 变异策略提升搜索能力。交通流量方面,李艳波等^[18]将车辆行驶路线与初始剩余电量的随机性相结合,引入扩展网络理论,建立多路径情况下的潜在换电站选址模型,并将“精英主义”思想融入到遗传算法中。而在用户角度方面,行驶距离和换电成本是关键因素。王琪瑛等^[19]以耗损电量和行驶时间最小为目标,对车辆的行驶路线进行了优化,使得车辆的行驶路程最短。

综上,尽管当前关于电动汽车换电站和充电站选址问题的大量研究主要集中在如何最小化社会总成本和最大化利润上,却鲜少有文献从终端用户的实际体验和用户需求出发进行深入探讨。鉴于此,本文立足于新能源用户的视角,全面考量对用户满意度产生重要影响的关键因素,并采用分段函数来刻画用户满意度随关键因素变化而变化。此外,通过引入 CRITIC 权重法这一工具,将多目标决策问题转化为更为直观的单目标优化问题。最终,借助算例分析获得最优选址位置。

1 问题描述及假设

对于新能源汽车车主来说,传统的充电方式通常需要数小时,严重降低了其利用率。而采用换电模式后,车主只需在换电站中花费极少的时间进行电池更换,就可以大幅度提高电动汽车的续航能力。

本文的研究对象为新能源汽车用户,对于用户来说,如何选择电池更换点的最重要的决策标准是用户满意度,满意度越高,用户选择对其付费的意愿就越高,用户满意度会受路程因素和费用因素的影响^[20],主要包括换电池服务费用、用户到换电站行驶时间、换电池等待时间以及耗损电量这 4 个方面,这 4 个维度是基于对现有研究成果和相关文献综合分析后得出的,旨在全面反映新能源汽车用户的体验与需求。为了量化这种复杂关系,采用分段函数来描述用户满意度随着上述 4 个变量变化而变化的趋势,然后构建以最大用户满意度为目标的模型,同时做出以下假设:①每个用户群只能由一个电池更换点提供换电服务;②用户前往换电站时道路畅通,不考虑交通拥堵现象;③新能源汽车及其所需电池型号相同;④各电池更换点服务能力无差异。

2 模型构建

2.1 目标函数

2.1.1 服务费用

用户在选择电池更换点时,所需支付的总费用是一个关键影响因素,包括购置电池费和人工费。通常情况下,服务费用越低,用户的满意度就越高,从而增加了他们选择该更换点的可能性。

$$S_1(P_j) = \begin{cases} 1, & P_j \leq P_{\min} \\ \frac{P_{\max} - P_j}{P_{\max} - P_{\min}}, & P_{\min} < P_j \leq P_{\max} \\ 0, & P_j > P_{\max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $S_1(P_j)$ 为用户对换电池服务费用的满意度; P_j 为换电池服务点 j 的单次换点费用; $P_{\max}$ 为用户

期望服务费用的最大值; $P_{\min}$ 为用户期望服务费用的最小值。

2.1.2 行驶时间

用户在选择电池更换点时,其决策行为受到前往该地点所需路程时间的影响。在其他条件相同的情况下,路径的行驶时间越短,用户的满意度就越高。

$$S_2(T_{ij}) = \begin{cases} 1, & T_{ij} \leq T_{\min} \\ \frac{T_{\max} - T_{ij}}{T_{\max} - T_{\min}}, & T_{\min} < T_{ij} \leq T_{\max} \\ 0, & T_{ij} > T_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

$$T_{ij} = \frac{d_{ij}}{v} \quad (3)$$

式中: $S_2(T_{ij})$ 为用户到换电池服务点行驶时间的满意度; T_{ij} 为用户群 i 到换电池服务点 j 的行驶时间; $T_{\max}$ 为用户期望行驶时间的最大值; $T_{\min}$ 为用户期望行驶时间的最小值; d_{ij} 为用户群到换电站的距离; v 为市区内车辆的行驶速度。

2.1.3 等待时间

用户到达换电站时,可能会由于换电桩资源不够而面临排队问题,换电时间的长短会直接影响用户满意度。

$$S_3(W_j) = \begin{cases} 1, & W_j \leq W_{\min} \\ \frac{W_{\max} - W_j}{W_{\max} - W_{\min}}, & W_{\min} < W_j \leq W_{\max} \\ 0, & W_j > W_{\max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $S_3(W_j)$ 为用户到换电池服务点等待换电时间的满意度; W_j 为用户在换电服务点 j 的等待时间; $W_{\max}$ 为用户期望等待时间的最大值; $W_{\min}$ 为用户期望等待时间的最小值。

当电动汽车抵达换电站时,由于换电站资源有限,可能会遇到排队现象,这将对用户的满意度产生很大的影响。在电动汽车前往换电站更换电池的排队系统中,车辆到达换电站的规律通常可以用泊松分布来描述。总体上遵循先到先服务的原则,并且排队遵循多个服务台的等候制度,服务机构则通常是串联服务的形式^[6]。综合以上特点,可以将电动汽车换电的排队系统视为一个有限服务台的排队系统,即 M/M/C(一种排队模型,表示一个系统有无限个顾客和 C 个服务台)模型,其中 C 代表每个换电站内设置的换电桩数量。假定各换电站都配备了相同数量的换电桩,那么按照排队理论,换电站 j 的平均排队等待时间为

$$W_j = \frac{(C\rho_j)^C \rho_j}{C!(1-\rho_j)^2 \gamma} P_0 \quad (5)$$

$$P_0 = \left[\sum_{k=0}^C \frac{1}{k!} \left(\frac{\gamma}{\sigma} \right)^k + \frac{1}{C!} \frac{1}{1-\rho_j} \left(\frac{\gamma}{\sigma} \right)^C \right]^{-1} \quad (6)$$

$$\rho_j = \frac{\gamma}{\sigma} \quad (7)$$

式中: C 为换电桩数量,为换电站候选点 j 的繁忙程度,即换电站服务强度,且 $\in [0, 1]$; γ 为每小时每个换电桩的平均服务率; P_0 为换电站内所有换电桩全部都空闲的概率; σ 为每小时进入的车辆平均数; k 为换电桩被占用的数量。

2.1.4 耗损电量

在前往充电站的过程中,电动车会持续消耗剩余的电量,因此,为了减轻因担心电量不足而产生的焦虑感,用户通常会选择能耗最低、最为节省电量的路线。这样不仅可以保证顺利到达目的地,还能在一定程度上缓解续航里程带来的压力。

$$S_4(B_{ij}) = \begin{cases} 1, & B_{ij} \leq B_{\min} \\ \frac{B_{\max} - B_{ij}}{B_{\max} - B_{\min}}, & B_{\min} < B_{ij} \leq B_{\max} \\ 0, & B_{ij} > B_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $S_4(B_{ij})$ 为用户行驶到换电服务点耗损电量的满意度; B_{ij} 为用户群 i 到换电服务点 j 的耗损电量; $B_{\max}$ 为用户期望耗损电量的最大值; $B_{\min}$ 为用户期望耗损电量的最小值。

影响用户最大满意度 4 个因素分别为换电服务费用、行驶时间、等待时间以及耗损电量,对于用户来说,各因素都会影响其对换电路径的选择,但不同因素在决策过程中起到的影响作用程度不同,本文通过设定不同的权重值来体现其对总体满意度的影响程度。

综上,目标函数为

$$\max S = [\omega_1 S_1(P_j) + \omega_2 S_2(T_{ij}) + \omega_3 S_3(W_j) + \omega_4 S_4(B_{ij})] Y_{ij} \quad (9)$$

式中: Y_{ij} 为如果用户群 i 选择换电服务点 j 提供服务,则为 1,如果用户群 i 不选择换电服务点 j 提供服务,则为 0; $\omega_1 \sim \omega_4$ 为权重。

2.2 约束条件

(1) 各个电池更换点的电池储备量满足用户的充电需求:

$$\sum_{i \in I} Y_{ij} \leq Q_j, j \in J \quad (10)$$

式中: Q_j 为换电服务点的最大服务能力; $J = \{j | j = 1, 2, \dots, j\}$, 表示共有 j 个备选的换电服务点。

(2) 每个电池更换点至少要为一个用户群进行

服务:

$$\sum_{i \in I} Y_{ij} \geq 1, j \in J \quad (11)$$

(3) 每个用户群只能选一个电池更换点为其提供服务:

$$\sum_{j \in J} Y_{ij} = 1, i \in I \quad (12)$$

式中: $I = \{i | i = 1, 2, \dots, i\}$, 表示共有 i 个用户群。

(4) 函数中涉及所有有实际意义的变量需满足非负数约束:

$$P_j, P_{\max}, P_{\min}, T_{ij}, T_{\max}, T_{\min}, d_{ij}, v, W_j, \\ W_{\max}, W_{\min}, B_{ij}, B_{\max}, B_{\min}, Q_j \geq 0.$$

2.3 基于 CRITIC 权重法的多目标决策

在多目标决策问题的处理中, 直接分配变量权重或依赖专家评分来设定权重属于主观赋权方法。然而, 这种方法往往过于主观, 难以全面客观地考虑所有相关因素。另一方面, 虽然熵权法提供了一种客观的赋权手段, 但它主要通过每个目标的离散程度来授权, 而忽略了目标之间相关性产生的水平影响。CRITIC 加权方法是一种基于指标数据间的对比强度和冲突性来综合评估各指标重要性的客观赋权方法, 它考虑了指数相关性影响。CRITIC 权重法综合模型构建步骤如下。

(1) 评估矩阵。评估矩阵 Y 由 k 个评估对象和 m 个评估指标体系。

$$Y = [y_{ij}]_{k \times m} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1m} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y_{k1} & y_{k2} & \cdots & y_{km} \end{bmatrix} \quad (13)$$

(2) 原始指标数据处理。对评估矩阵的原始指标数据进行归一化处理后, 得到矩阵 $Z = [z_{ij}]_{k \times m}$

$$z_{ij} = \begin{cases} \frac{y_{ij} - \min y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}} \\ \frac{\max y_{ij} - y_{ij}}{\max y_{ij} - \min y_{ij}} \end{cases} \quad (14)$$

(3) 相关系数矩阵计算。

$$P = [p_{ij}]_{m \times m} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中: p_{ij} 为指标 i 和 j 之间的相关性系数。

$$p_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n (z_{im} - z_i)(z_{jm} - z_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n (z_{im} - z_i)^2 \sum_{k=1}^n (z_{jm} - z_j)^2}} \quad (16)$$

(4) 评价指标变异性和冲突性系数。标准差 σ_j 是评价指标变异性的表征量, 冲突性系数 c_j 计算公式为

$$c_j = \sum_{m=1}^n (1 - r_{mj}) \quad (17)$$

式中: r_{mj} 为指标之间的相关性系数。

(5) 权重系数矩阵。

$$\omega = [\omega_1 \quad \omega_2 \quad \cdots \quad \omega_n] \quad (18)$$

$$\omega_i = \frac{\sigma_j c_j}{\sum_{j=1}^n \sigma_j c_j} \quad (19)$$

因此, 通过应用 CRITIC 权重法, 可以将电动汽车换电站选址规划问题转化为单目标优化问题, 最终的目标函数为

$$S = \omega_1 S_1 + \omega_2 S_2 + \omega_3 S_3 + \omega_4 S_4 \quad (20)$$

3 遗传算法介绍

遗传算法是一种以自然选择和遗传理论为基础的优化搜索方法, 它的核心思想是模拟生物演化中的选择、交叉、变异机制, 求解最优问题。在遗传算法中, 每个潜在解被编码为一个“染色体”, 即所谓的“个体”。这些个体组成了一个“种群”, 而算法的目标是找到具有最高适应度的个体, 这一个体表示最佳或接近最佳的解决方案, 详细的步骤如下。

(1) 初始化群体: 通过随机产生一系列可能的方案(即个体), 每一个方案都包含一系列的基因(如二进制、实数等)。这些个体组成初始种群。

(2) 评估适应度: 对种群中的每个个体应用一个预先定义的适应度函数, 计算其适应度值。适应度函数根据问题的目标来设计, 用于衡量个体解的质量或“适应性”。

(3) 选择: 通过对其适应性值的筛选, 使其更容易被选入下一步的基因操作。常用的选择方式有轮盘选择, 比赛选择等。

(4) 交叉(杂交): 从当前种群中随机配对个体, 并按照一定的交叉概率交换它们部分基因, 以产生新的个体。这模仿了自然界中的繁殖过程, 有助于引入新的基因组合。

(5) 变异: 以较小的变异概率随机改变某些个体的部分基因, 引入新的遗传信息, 增加种群的多样性, 防止算法过早收敛到局部最优。

(6) 更新种群: 用新产生的个体取代现有群体中的某些或所有个体, 构成新一代的种群。

(7) 重复评估与进化: 返回步骤(2), 继续评估

新种群的适应度,并进行选择、交叉和变异操作,直到满足终止条件(如达到预设的迭代次数、适应度不再显著提高或找到了满意的解)。

(8)输出结果:最终,算法会输出具有最高适应度值的一个或多个个体作为问题的近似最优解。

4 算例分析

4.1 算例数据

实验在 CPU 为 Intel core i5-8250u1.60Hz 的计算机上进行,通过 MATLAB 编程实现。用户群和换电站备选点的位置坐标随机生成,详细数据见表 1 和表 2,位置分布情况如图 1 所示。

将遗传算法的参数设置为:种群规模为 200,最大迭代次数为 100,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1,选择保留的顶尖个体比例为 0.5。

设定模型参数如下:市区内的车辆行驶速度 v 为 40 km/h,用户服务费用期望 $P_{\min}$ 和 $P_{\max}$ 分别为 50 元和 60 元,行驶时间期望 $T_{\min}$ 和 $T_{\max}$ 分别为 0 h 和 0.3 h,等待时间期望 $W_{\min}$ 和 $W_{\max}$ 分别为 0 min 和 15 min,耗损电量期望 $B_{\min}$ 和 $B_{\max}$ 分别为 0.1 kW·h 和 1 kW·h。每个换电站都有 4 个换电桩,平均每小时

表 2 换电站备选点位置坐标

序号	横坐标/km	纵坐标/km	序号	横坐标/km	纵坐标/km
1	2.52	11.37	6	12.04	16.52
2	15.89	1.68	7	7.84	13.10
3	6.22	4.58	8	3.14	16.61
4	15.91	13.11	9	13.78	1.56
5	16.96	4.48	10	14.96	8.85

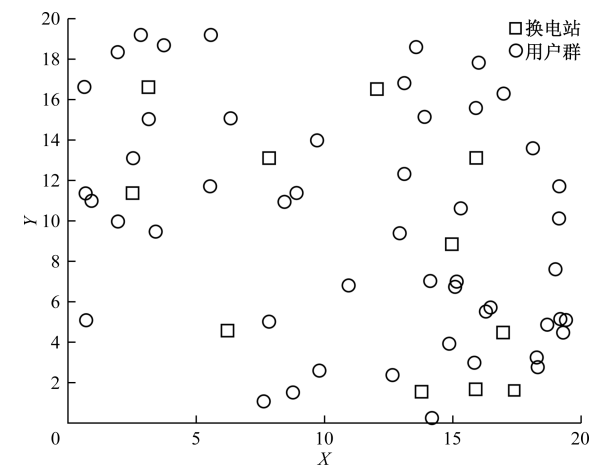


图 1 位置分布

有 10 辆车到达,每个换电桩服务率为 3 辆/h。各因素的影响权重 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 分别为 0.3、0.1、0.3、0.3。

4.2 算例结果分析

在表 3 中列出了用户满意度最高的前 5 个换电站选址方案。根据表中的数据,可以明显看出方案 2 具有最大的整体满意度值,因此被确定为最优选址方案(图 2)。根据表 4 可以看出在这 10 个换电站中,换电站 10 的平均满意度最高,说明其服务费用合理,地理位置有优势,使得用户行驶到该站行驶时间较短,同时,在高峰时段仍能保持较低的等待时间。此外,从图 3 中的算法收敛曲线可以看出,免疫优化算法能够迅速达到收敛状态,有效找到目标的最优解。这一过程不仅展示了算法的高效性,也验证了其在实际应用中的有效性和可靠性。

表 3 换电站最大满意度选址解决方案

方案	整体满意度值
1	0.726 9
2	0.731 5
3	0.722 3
4	0.725 0
5	0.725 9

表 1 用户群位置坐标

序号	横坐标/km	纵坐标/km	序号	横坐标/km	纵坐标/km
1	16.29	5.52	26	15.15	7.00
2	18.12	13.59	27	14.86	3.93
3	2.54	13.10	28	7.84	5.02
4	18.27	3.25	29	13.11	12.32
5	12.65	2.38	30	3.42	9.47
6	1.95	9.97	31	14.12	7.03
7	5.57	19.19	32	0.64	16.62
8	10.94	6.81	33	5.54	11.71
9	19.15	11.71	34	0.92	10.99
10	19.30	4.48	35	1.94	18.34
11	3.15	15.03	36	16.47	5.72
12	19.41	5.10	37	13.90	15.14
13	19.14	10.12	38	6.34	15.07
14	9.71	13.98	39	19.00	7.61
15	16.01	17.82	40	0.69	11.36
16	2.84	19.19	41	8.77	1.52
17	8.44	10.94	42	7.63	1.08
18	18.31	2.77	43	15.31	10.62
19	15.84	2.99	44	15.90	15.58
20	19.19	5.15	45	3.74	18.68
21	13.11	16.81	46	9.80	2.60
22	0.71	5.09	47	8.91	11.38
23	16.98	16.29	48	12.93	9.39
24	18.68	4.87	49	14.19	0.24
25	13.57	18.59	50	15.09	6.74

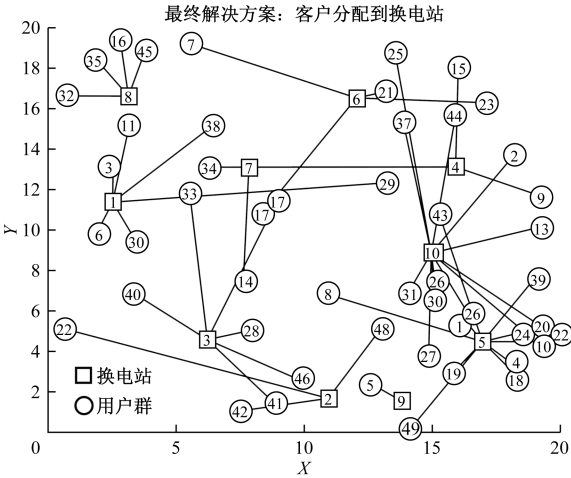


图 2 换电站最优选址点图

表 4 换电站的平均满意度

换电站编号	平均满意度	换电站编号	平均满意度
1	0.249 540	6	0.227 190
2	0.256 778	7	0.169 858
3	0.382 606	8	0.203 252
4	0.310 488	9	0.185 374
5	0.381 514	10	0.550 916

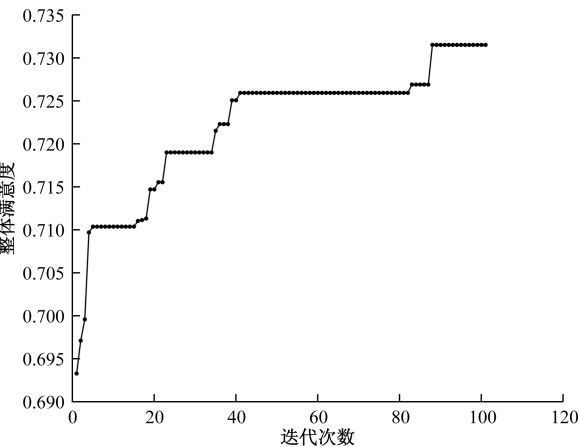


图 3 目标值收敛曲线

5 结论

从用户的角度出发,对换电站的选址问题进行了研究和分析,综合考虑换电池费用、用户到换电站行驶时间、换电池等待时间以及耗损电量 4 个因素,提出了以最大用户满意度为目标的选址模型。介绍了模型的构建思路与方法,利用遗传算法求解,验证了模型的有效性和可行性,并获得了最优选址位置分配。研究成果不仅为电池交换站的选址提供了科学的决策支持,也为相关领域的优化问题提供了新的思路和方法。在今后的研究中,将不断探索更多因素对换电站选址的影响,以进一步提升服务质量和用户满意度。

参考文献

[1] 罗丽莎, 庄越. 驱动新能源汽车产业发展的地方性政策比较分析[J]. 科技和产业, 2024, 24(20): 7-14.

[2] 应雄, 汪寿阳, 杨宇瑶. 能源转型下的锂、钴、镍资源需求及回收潜力分析: 基于电动汽车的视角[J]. 中国科学院院刊, 2024, 39(7): 1226-1234.

[3] 张川, 田雨鑫, 崔梦雨. 电动汽车动力电池制造商混合渠道回收模式选择与碳减排决策[J]. 中国管理科学, 2024, 32(6): 184-195.

[4] 赵姣, 杨倩倩, 胡大伟, 等. 基于排队模型的电动物流车充电站选址和运输路径问题[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(2): 47-59.

[5] 孙健, 宋茂星, 邱果, 等. 基于电动汽车大数据的多等级充电站选址与服务能力研究[J]. 中国公路学报, 2024, 37(4): 48-60.

[6] 梁露, 韩飞. 考虑排队时间和充电费用的电动汽车充电站选址模型[J]. 交通信息与安全, 2023, 41(4): 154-162.

[7] LI J, LIU C, WANG Y, et al. Bi-level programming model approach for electric vehicle charging stations considering user charging costs[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 214: 108889.

[8] YI T, CHENG X, ZHENG H, et al. Research on location and capacity optimization method for electric vehicle charging stations considering user's comprehensive satisfaction[J]. Energies, 2019, 12(10): 1915.

[9] 王丽丽. 基于复杂网络的电动汽车充电站布局优化研究[J]. 数学的实践与认识, 2024, 54(1): 152-163.

[10] 吴昊, 马成影, 董洪锋. 基于灰色局势决策的电动汽车换电站选址研究[J]. 九江学院学报(自然科学版), 2022, 37(1): 63-68.

[11] 陈博文, 陈建岭. 基于改进多目标遗传算法的电动汽车换电站选址研究[J]. 物流研究, 2024(1): 36-40.

[12] 张兆轩, 陈璟华, 赵炳耀, 等. 考虑集中充电站的电池换电站选址定容规划[J]. 广东工业大学学报, 2021, 38(5): 59-67.

[13] 吕应龙. 基于遗传算法的电动公交车换电站选址模型[J]. 电工技术, 2022(11): 40-44, 47.

[14] ZHANG Y, HE P, REN W, et al. A customer satisfaction-based optimization model for the charging and discharging path and battery swap stations' site selection of electric vehicles [J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12: 1353268.

[15] 贾林国, 周小琳, 姚博彬, 等. 基于最大利润模型的高速公路充换电站选址[J]. 物联网技术, 2020, 10(11): 50-52.

[16] ZHANG H, ZHANG K, ZHOU Y, et al. An immune algorithm for solving the optimization problem of locating the battery swap stations [J]. Knowledge-based Systems, 2022, 248: 108883.

[17] 韩顺杰, 于渲铎, 李东奇, 等. 基于改进量子粒子群算

- 法的新能源汽车换电站优化布局[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(27): 11720-11725.
- [18] 李艳波, 柳柏松, 姚博彬, 等. 考虑路网随机特性的高速公路换电站选址[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(5): 1364-1371.
- [19] 王琪瑛, 李英, 李惠. 带软时间窗的电动车换电站选址路径问题研究[J]. 工业工程与管理, 2019, 24(3): 99-106.
- [20] 邵书凡. 基于双层规划的新能源汽车充电站选址问题研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2023.

Location of New Energy Vehicle Battery Swap Station Considering Maximum User Satisfaction

ZHAO Liqiang^{1,2}, WU Jie¹

(1. School of Economics and Management, Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, Shenyang 110136, China;

2. School of Management, Shenyang Normal University, Shenyang 110034, China)

Abstract: With the rapid growth of the number of new energy vehicles, as an important infrastructure, the location of battery swap stations is crucial to improve the user experience and promote the popularization of electric vehicles. In order to explore the location strategy of new energy vehicle battery swap station with the goal of maximizing user satisfaction, the key factors affecting user satisfaction, including service cost, travel time, waiting time and power consumption were analyzed through the comprehensive consideration of these four factors. The multi-objective decision-making problem is transformed into a single-objective optimization problem according to the CRITIC weight method, and the site selection optimization model was constructed, and the genetic algorithm was used to analyze the example to obtain the optimal location location.

Keywords: new energy vehicles; battery swap stations; user satisfaction; site selection