

中断情景下 EV 充电站与多类型充电桩联合布局优化^{*}

范志强¹, 师冉冉¹, 梁宁宁¹, 李姗姗²

(1. 河南理工大学 工商管理学院能源经济研究中心; 2. 河南理工大学 财经学院, 河南 焦作 454003)

摘要:考虑到现有研究多是对充电站的选址进行规划,较少讨论中断情景与电动汽车(electric vehicle, EV)用户充电距离。因此,在中断情景下将研究范畴拓展至充电站与充电桩联合布局优化,以成本最小和距离最短为目标构建了多目标规划模型。针对问题的 NP-困难特性,首先设计了基于 K-Means 聚类的启发式算法,以快速生成较好的初始可行解,然后提出改进遗传算法求解模型。通过算例分析,验证了模型的有效性。所建模型能够有效解决中断情景下的 EV 充电站与充电桩联合布局优化问题,所提算法在求解精度与稳定性方面要优于已有算法。

关键词:中断情景;多类型充电桩;多目标规划模型;K-Means 聚类;改进遗传算法

中图分类号:TP273

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2024)02-0119-10

“双碳”战略目标背景下,减少碳排放成为工作重点。交通运输作为碳排放的主要来源,所排放的二氧化碳量占全球二氧化碳排放量的 24%^[1],因此大力发展具有环保、节能高效且交通噪音小等特点的电动汽车(electric vehicle, EV)已是必然趋势。据公安部统计,截至 2022 年底,中国新能源汽车保有量达 1 310 万辆,同比增长 67.13%,呈高速增长态势,其中 EV 保有量 1 045 万辆,占新能源汽车总量的 79.78%^[2]。现阶段充电站等基础设施建设仍存在缺口,科学的选址布局对降低运营成本以及促进 EV 发展至关重要。随着 EV 产业的发展,目前充电基础设施类型多种多样,主要有私人充电桩(慢充)、公共充电站(慢充、快充)等^[3]。由此可见,在研究公共充电站时考虑多类型充电设施是符合现实需求的。另外,在现实中可能存在由于人为因素或者自然因素导致充电站被中断无法正常营业的情况,从而导致被中断充电站附近的充电需求无法满足。因此,深入研究中断情景下 EV 充电站与充电桩联合布局优化问题具有重要的理论与应用价值。

国内外学者对 EV 充电设施布局进行了大量的研究,但多集中于充电站规划这一层面,如文献[4-15]。此类研究只考虑单一类型的充电站规划,要么是快充,要么是慢充;也有少数学者同时将快充和慢充纳入研究范畴,例如, Zu 等人^[16]同时考虑了快速充电站和慢速充电站的布局问题。上述文献均以充电站的优化布局为研究对象,未进一步探讨充电站内充电桩的数量及类型对规划的影响,这是为了降低建模与求解难度,对现实问题做了简化处理。而充电“站-桩”的联合布局优化研究显然更符合现实需要,因此,严干贵等人^[17]分析了充电站内各充电桩的数量规划对充电站经营者和 EV 用户的经济性影响,但未考虑充电桩的类型;肖白等人^[18]也考虑了充电站内各充电桩的数量问题,构建了两阶段优化模型,但同样未考虑充电桩的类型;左逸凡等人^[19]考虑了“快充/慢充”2 种充电桩类型以及数量配置问题,构建了成本最小化模型。

现有研究可以分为单目标规划与多目标规划。关于单目标规划研究较多,优化目标多聚焦于经济性分析,如文献[6-10, 12-14, 17-19]均构建了成本最小化模型,也有研究以覆盖 EV 用户范围最大为目标进行了分析,如文献[4-5]。而关于多目标规划研究较少,一般在注重成本最小的同时兼顾到了用户满意度最大^[11, 16]、风险最低^[15],但正如前文所言,现有多目标规划均未将充电桩“快充/慢充”类型这一现实情况纳入研究范畴。

此外,充电站运行过程中还会受到停电、定期检修等中断因素影响,文献[15]考虑到了这一情况,但仅考虑了充电站的布局,没有进一步讨论充电站内充电桩的数量及类型。

^{*} 收稿日期:2023-08-08 修回日期:2023-12-21 网络出版时间:2024-05-21T10:17

资助项目:国家自然科学基金面上项目(No. 71502050);河南省哲学社会科学规划项目(No. 2022BJJ048);河南省高校基本科研业务费专项项目(No. SKJZD2020-01);河南理工大学青年骨干教师资助计划(No. 2019XQC-21)

第一作者简介:范志强,男,副教授,研究方向为物流系统优化与决策, E-mail: fanzhiqiang@hpu.edu.cn

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/50.1165.n.20240518.1919.002>

综上,现有研究取得了重要成果与进展,但在中断情景分析、EV 多类型充电“站-桩”联合布局以及考虑 EV 用户充电距离最短的目标规划方面仍需要进一步优化。本文以此为基础,同时考虑充电站的最大/最小数量、充电站内各类型充电桩的最大/最小数量、建站投资预算以及 EV 用户充电容忍距离约束,构建兼顾充电站经营者与 EV 用户利益的多目标规划模型。

1 问题描述及模型构建

考虑 EV 充电的现实特点,设定充电站建成后,每个充电站都会安装快速、慢速 2 种类型的充电桩,有且只有 1 个充电桩对 EV 服务, EV 在电池充满后离开充电站。同时,考虑充电站因停电、故障维修等导致无法提供服务的情况,即中断情景。

1.1 模型假设

- 1) 充电站中断服务后不能立即恢复;
- 2) 同一辆 EV 有且只有 1 个充电桩对它充电。

1.2 符号说明

1) 模型参数。 I 表示 EV 用户集合, $i=1,2,\dots,I$; J 表示充电站候选点集合, $j=1,2,\dots,J$; K 表示充电桩种类集合, $k=1,2,\dots,K$; c_j 表示在候选点 j 上建设充电站的固定建设成本; c_{jk} 表示在充电站 j 安装 k 型充电桩的单位安装成本; u_{jk} 表示在充电站 j 安装 k 型充电桩的最大数量; l_{jk} 表示在充电站 j 安装 k 型充电桩的最小数量; d_{ij} 表示 EV 用户 i 到充电站 j 的驾车距离; t_{ik} 表示 EV 用户 i 使用 k 型充电桩充电的时间; Q_{jk} 表示充电站 j 中的 k 型充电桩所能提供的最大充电时间; O_k 表示使用充电桩 k 充电的单位时间充电成本; d_i 表示 EV 用户 i 充电的最大可容忍距离; P 表示计划建立充电站的最小数量; H 表示计划建立充电站的最大数量; E 表示充电设施的最大投资预算; M 表示 1 个足够大的正数; A_j 表示充电站 j 是否处于可充电状态,可充电为 1,否则为 0;

2) 决策变量。 N_{jk} 表示在充电站 j 处安装 k 型充电桩的数量; x_j 是 0-1 变量,表示充电站 j 是否建立充电站,若建立则为 1,否则为 0; y_{ijk} 也是 0-1 变量,表示用户 i 是否在充电站 j 使用 k 型充电桩充电,若是则为 1,否则为 0。

1.3 数学模型

基于上述问题描述和符号说明,本文建立的数学模型如下:

$$\min Z_1 = \sum_j c_j x_j + \sum_j \sum_k c_{jk} N_{jk} + \sum_i \sum_j \sum_k t_{ik} y_{ijk} O_k, \quad (1)$$

$$\min Z_2 = \sum_i \sum_j \sum_k d_{ij} y_{ijk}, \quad (2)$$

$$\text{s. t. } N_{jk} \geq l_{jk} x_j, \forall j, k, \quad (3)$$

$$N_{jk} \leq u_{jk} x_j, \forall j, k, \quad (4)$$

$$\sum_j x_j \geq P, \quad (5)$$

$$\sum_j x_j \leq H, \quad (6)$$

$$\sum_k N_{jk} \leq M \times x_j, \forall j, \quad (7)$$

$$\sum_j \sum_k y_{ijk} = 1, \forall i, \quad (8)$$

$$\sum_i t_{ik} y_{ijk} \leq N_{jk} Q_{jk}, \forall j, k, \quad (9)$$

$$\sum_i \sum_k y_{ijk} \leq M \times x_j \times A_j, \forall j, \quad (10)$$

$$\sum_j c_j x_j + \sum_j \sum_k c_{jk} N_{jk} \leq E, \quad (11)$$

$$\sum_j \sum_k d_{ij} y_{ijk} \leq d_i, \forall i, \quad (12)$$

$$N_{jk} \geq 0, x_j = 0 \text{ 或 } 1, y_{ij} = 0 \text{ 或 } 1, \forall i, j, k. \quad (13)$$

其中:式(1)为成本目标,表示成本最小,包括固定建设成本、充电桩安装成本和 EV 充电成本;式(2)为距离目标,

表示距离最短,即EV用户充电便捷性最大;式(3)、(4)为充电桩数量约束,每个充电站的每类充电桩安装数量不少于最小值,不多于最大值;式(5)、(6)表示建站数量不能低于计划建站的最小数量,不得高于计划建站的最高数量;式(7)表示若建立充电站则设置充电桩,反之不设置;式(8)表示每辆EV有且只有1个充电桩对它服务;式(9)表示所有需求用户的充电时间不超过充电站所能提供的最大充电时间;式(10)表示只有建立充电站并且充电站处于可充电状态时才能充电;式(11)为最大预算约束,投资不能超过最大预算;式(12)为距离约束,EV用户在能接受的容忍距离内充电;式(13)为决策变量的0-1约束和非负约束。

1.4 多目标转化

模型的2个目标分别是成本和距离,计量单位与数量级均存在较大差异,不宜直接采用加权和法,本文采用以下步骤进行转化。

步骤1,分别对2个目标的最大值和最小值进行求解,得到 $(Z_1^{\min}, Z_1^{\max})$ 、 $(Z_2^{\min}, Z_2^{\max})$ 。

步骤2,归一化转换,将成本目标和距离目标转换为标准0-1区间域值,以剔除量纲和数量级干扰,转换公式

$$\text{为 } Z'_1 = \frac{Z_1 - Z_1^{\min}}{Z_1^{\max} - Z_1^{\min}}, Z'_2 = \frac{Z_2 - Z_2^{\min}}{Z_2^{\max} - Z_2^{\min}}。$$

步骤3,对2个目标设定不同的权重, $\beta(0 \leq \beta \leq 1)$ 和 $1-\beta$ 分别为成本目标和距离目标的权重系数(决策系数),使用加权和法将多目标转化为如下单目标:

$$\min Z_3 = \beta Z'_1 + (1-\beta) Z'_2。$$

2 求解算法

设施选址问题是典型的NP-困难问题,随着问题规模的增大,分支定界等精确算法以及常用的Cplex、Lingo、Gurobi等求解工具需要的时间会越来越长。本文围绕EV去哪个充电站最方便、充电站应在哪里选址、充电桩的建设数量是多少这3个关键问题,首先从距离远近的视角进行聚类分析,通过启发式算法快速生成较好的初始可行解,然后基于改进遗传算法求得最优方案。

2.1 基于K-Means聚类的启发式算法

步骤1,采用K-Means聚类方法,以各充电站候选点所在位置为初始类别中心 μ^j ,基于DATAMAP路径测距计算每辆EV到充电站的距离,将EV分配给距离最近的类别 G_j 。需要提到的是,本文基于DATAMAP路径测距计算出来的是真实的驾车行驶距离,而不是文献[14-16]中所采用的欧氏距离。

步骤2,将各个类别 G_j 按照所覆盖的EV数量从大到小降序排列,选择有效覆盖EV数量最多的充电站候选点 j ,在候选点 j 处建立充电站。

步骤3,对该充电站按照EV与充电站距离从近到远升序排列,优先为排序靠前的EV分配各类型充电桩,直至EV被分配完毕,更新信息并转步骤4;否则会出现EV超出现有充电站服务能力情况,即违背了约束(9),此时去掉已分配EV与该充电站,未分配的EV进入后续运算,更新信息并转步骤1。

步骤4,重复步骤2与3,直至所有EV被分配完毕。

2.2 改进遗传算法IAPGA

范志强^[20]提出了优先权编码的遗传算法(priority-based GA,PGA),刘兰芬等人^[21]提出了自适应交叉与变异概率机制的优先权遗传算法(adaptive PGA,APGA)。在此基础上,本文基于模拟退火Metropolis准则改进轮盘赌选择机制,运用多种群协同进化改良种群,提出改进的APGA(improved APGA,IAPGA)算法以提高搜索能力。为节约篇幅,下面重点对IAPGA算法的改进之处进行阐述,其它部分与文献[20-21]相同。

1) 基于Metropolis准则改进选择机制。遗传算法在选择方面常采用轮盘赌机制,容易导致优秀个体的丢失,使算法过早出现“早熟”现象。本文基于模拟退火Metropolis准则改进选择机制,以提高全局搜索能力。

步骤1,在种群中随机抽取2个个体 P_1 、 P_2 ,计算它们的目标函数值 $Z_3(P_1)$ 、 $Z_3(P_2)$ 。

步骤2,基于模拟退火Metropolis准则,若 $Z_3(P_1) < Z_3(P_2)$,依据准则第1条,选择个体 P_1 进入子代;否则,依据准则第2条,以概率 P_s 接收个体 P_1 进入子代,其中:

$$P_s = \exp\left(-\frac{Z_3(P_2) - Z_3(P_1)}{T}\right), Z_3(P_1) \geq Z_3(P_2),$$

上式中: T 为当前温度,随着算法迭代按降温速率衰减,计算公式为 $T = T_0 \times q^{\text{gen}}$, T_0 为初始温度, q 为降温速率, gen 为迭代次数。

步骤 3,重复步骤 1~2,直至子代种群达到既定规模。

2) 运用多种群协同进化改良种群。将种群划分为优良种群和非优良种群,各占种群规模的 $1/4$ 。其中,非优良种群的个体适应度值与精英个体适应度值相差较大,可加强前者探索额外解空间的能力;优良种群的个体适应度与精英个体适应度相差较小,可加强深度搜索能力。2 个种群各自进行遗传算子操作,分别产生 $1/4$ 的子代种群,同时 2 个种群相互进行遗传算子操作,协同进化产生 $1/2$ 的子代种群。

2.3 算法流程图

本文设计的算法流程如图 1 所示。

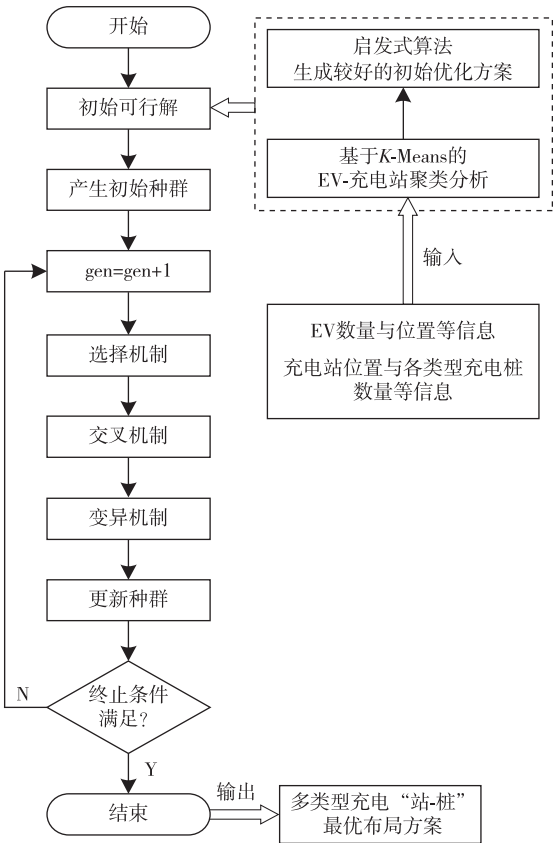


图 1 本文算法流程

Fig. 1 Algorithm flow chart

3 算例分析

3.1 问题描述

选取北京市东城区部分区域,共有 1 100 辆 EV 分布在 55 个区点,区域中的 20 个停车场作为充电站候选点,如图 2 所示。利用百度地图坐标拾取器得到每个充电站候选点和 EV 分布点的大致经纬度并通过 DATAMAP 生成各充电站候选点和各 EV 分布点之间的驾车距离,表 1、表 2 分别给出了充电站候选点和 EV 分布点的经度和纬度。

每个充电站都可以安装慢充和快充 2 种类型充电桩(分别与 $k=1$ 、 $k=2$ 相对应)。使用慢充和快充的充电成本分别为 $5 \text{ 元} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $60 \text{ 元} \cdot \text{h}^{-1}$,其余参数如表 3 所示。

3.2 模型求解

使用 Matlab 2019a 对提出的算法编程,参数设置如下:种群大小 100,迭代次数 200,最大、最小交叉概率 0.9 和 0.6,最大、最小变异概率 0.2 和 0.05,起始温度 1 000,降温速率 0.9,终止温度 0。在求解过程中对中断情景进行分析,并比较不同的决策系数、容忍距离对充电“站-桩”的布局影响。

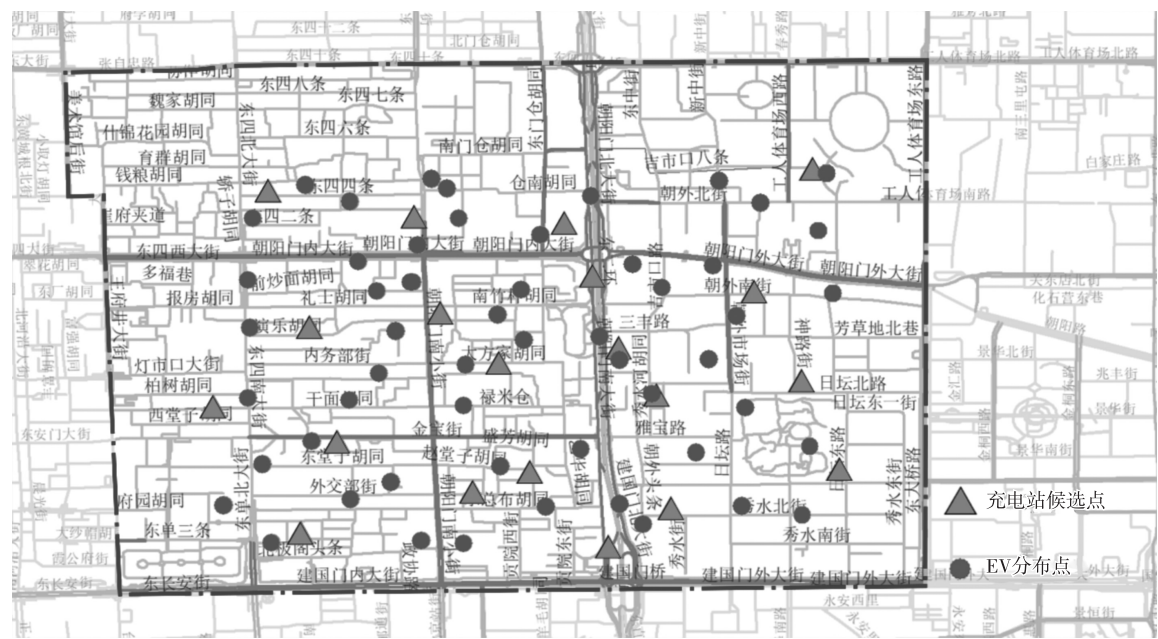


图 2 充电站候选点和 EV 分布点位置图

Fig. 2 Charging station candidate points and EV distribution point location map

表 1 充电站候选点经纬度

Tab. 1 The latitude and longitude of charging station candidate points

充电站 候选点	经度/(°)	纬度/(°)	充电站 候选点	经度/(°)	纬度/(°)	充电站 候选点	经度/(°)	纬度/(°)
1	116.412 515E	39.926 130N	8	116.435 916E	39.921 233N	15	116.425 136E	39.912 503N
2	116.419 540E	39.924 858N	9	116.429 403E	39.918 501N	16	116.440 030E	39.912 642N
3	116.426 789E	39.924 560N	10	116.423 618E	39.917 768N	17	116.422 352E	39.911 549N
4	116.438 737E	39.927 168N	11	116.438 216E	39.916 917N	18	116.431 946E	39.910 746N
5	116.428 155E	39.922 008N	12	116.409 829E	39.915 644N	19	116.414 069E	39.909 543N
6	116.420 807E	39.920 196N	13	116.415 812E	39.913 956N	20	116.428 909E	39.908 871N
7	116.414 500E	39.919 504N	14	116.431 245E	39.916 211N			

1) 中断情景分析。现实中,充电站会因各种情况而出现中断服务情景,对充电站与充电桩布局造成影响。设定 4 种情景,分别对应充电站中断的数量从 0 至 3,相应的充电站选址、充电桩类型及数量如图 3~6 所示。

中断情景 1 时,共需建立 10 个充电站,204 个充电桩,包含 52 个快速充电桩和 152 个慢速充电桩,充电站建立的序号及对应的充电桩类型如图 3 所示。中断情景 2 时,共需建立 228 个充电桩,包含 65 个快速充电桩和 163 个慢速充电桩,充电站建立的序号及对应的充电桩类型如图 4 所示,其中 8 号充电站为灰色,表示发生了中断。中断情景 3 时,共需建立 241 个充电桩,包含 72 个快速充电桩和 169 个慢速充电桩,充电站建立的序号及对应的充电桩类型如图 5 所示。中断情景 4 时,共需建立 251 个充电桩,包含 79 个快速充电桩和 172 个慢速充电桩,充电站建立的序号及对应的充电桩类型如图 6 所示。显然,随着充电站中断数量的递增,充电桩的数量需要随之增加才能有效满足 EV 充电需求。

中断情景下的总成本与总距离变化如图 7 所示,随着充电站中断数量的递增,2 个目标均呈增加趋势。具体来看,情景 1 时的成本为 4 493 056 元,情景 2~4 的成本分别增长了 6.03%、9.7%和 12.4%,进一步分析表明当充电站中断时,可通过在正常工作的充电站安装更多的充电桩来解决;情景 1 时的距离为 826.13 km,情景 2~4 的距离分别增长了 24.6%、32.3%和 46.4%,实验分析表明,当充电桩中断数量增加时,EV 用户需要到更远距离充电站,从而使得总距离增加。此外,还可以得出,当区域充电站中断 30%(10 个充电站,中断 3 个)的情况下,本文模型仍然能够满足该区域所有 EV 用户的充电需求,充分证明了本文所建模型的稳健性,能够很好地应

对中断情形的发生。

表 2 EV 分布点经纬度
Tab. 2 The latitude and longitude of EV distribution points

EV 分布点	经度/(°)	纬度/(°)	EV 分布点	经度/(°)	纬度/(°)	EV 分布点	经度/(°)	纬度/(°)
1	116.411 763E	39.924 807N	20	116.433 915E	39.922 511N	39	116.419 866E	39.909 188N
2	116.414 296E	39.926 412N	21	116.435 047E	39.920 062N	40	116.421 950E	39.909 050N
3	116.416 452E	39.925 624N	22	116.428 471E	39.919 094N	41	116.425 902E	39.910 848N
4	116.420 369E	39.926 716N	23	116.423 549E	39.920 145N	42	116.429 460E	39.910 959N
5	116.421 123E	39.926 260N	24	116.419 434E	39.921 695N	43	116.430 573E	39.909 963N
6	116.428 094E	39.925 886N	25	116.418 644E	39.919 343N	44	116.433 125E	39.913 477N
7	116.434 221E	39.926 606N	26	116.411 637E	39.919 509N	45	116.438 622E	39.913 754N
8	116.436 215E	39.925 554N	27	116.417 853E	39.917 296N	46	116.435 316E	39.910 876N
9	116.439 413E	39.926 993N	28	116.422 022E	39.917 711N	47	116.438 263E	39.910 433N
10	116.439 000E	39.924 199N	29	116.424 824E	39.918 900N	48	116.439 700E	39.921 169N
11	116.425 615E	39.923 991N	30	116.429 460E	39.917 960N	49	116.423 710E	39.912 813N
12	116.421 698E	39.924 780N	31	116.433 735E	39.917 987N	50	116.427 591E	39.913 643N
13	116.419 722E	39.923 493N	32	116.435 496E	39.915 608N	51	116.411 529E	39.921 806N
14	116.416 865E	39.922 705N	33	116.421 950E	39.915 718N	52	116.416 416E	39.915 995N
15	116.417 746E	39.921 266N	34	116.411 529E	39.916 078N	53	116.416 488E	39.911 208N
16	116.419 381E	39.921 695N	35	116.412 248E	39.912 896N	54	116.414 584E	39.914 003N
17	116.424 681E	39.921 349N	36	116.410 344E	39.910 904N	55	116.431 005E	39.916 272N
18	116.430 088E	39.922 566N	37	116.412 679E	39.909 077N			
19	116.431 508E	39.921 446N	38	116.418 428E	39.912 038N			

表 3 算例参数取值
Tab. 3 Parameter value of example

参数	取值
充电站单位建设成本 c_j /万元	$U(27,32)$
安装慢速充电桩的单位成本 c_{j1} /万元	$U(0.25,0.5)$
安装快速充电桩的单位成本 c_{j2} /万元	$U(1.5,2)$
充电站安装充电桩的最小数量 l_{jk} 个	3
充电站安装充电桩的最大数量 u_{jk} /个	18
EV 用户使用慢速充电桩充电时间 t_{i1} /h	6
EV 用户使用快速充电桩充电时间 t_{i2} /h	1
慢速充电桩能提供的最大充电时间 Q_{j1} /h	$U(20,24)$
快速充电桩能提供的最大充电时间 Q_{j2} /h	$U(8,12)$
EV 用户充电的最大可容忍距离 d_i /km	3
计划建立充电站的最小数量 P /个	10
计划建立充电站的最大数量 H /个	12
建立充电站的最大预算 E /万元	500

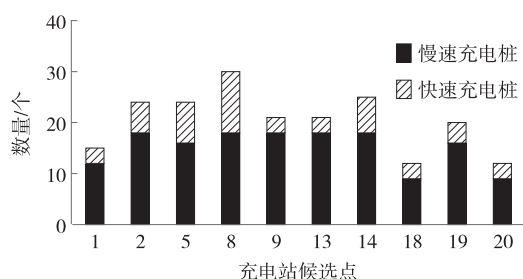


图3 中断情景1时的充电站与充电桩布局

Fig. 3 Charging station and charging pile layout when interrupting scenario 1

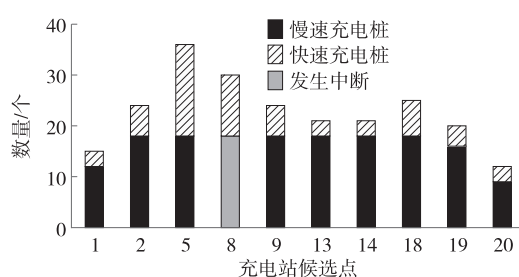


图4 中断情景2时的充电站与充电桩布局

Fig. 4 Charging station and charging pile layout when interrupting scenario 2

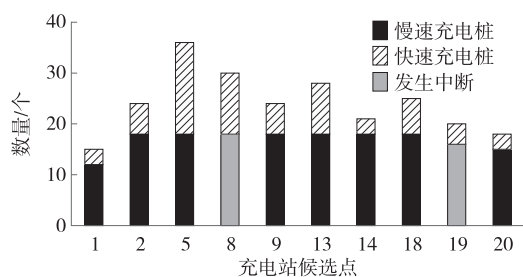


图5 中断情景3时的充电站与充电桩布局

Fig. 5 Charging station and charging pile layout when interruption scenario 3

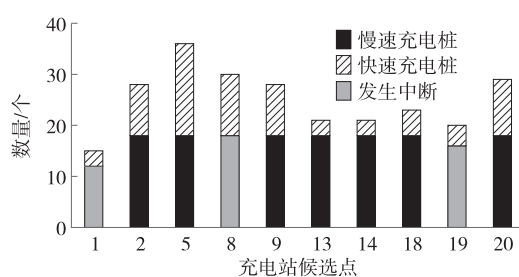


图6 中断情景4时的充电站与充电桩布局

Fig. 6 Charging station and charging pile layout when interruption scenario 4

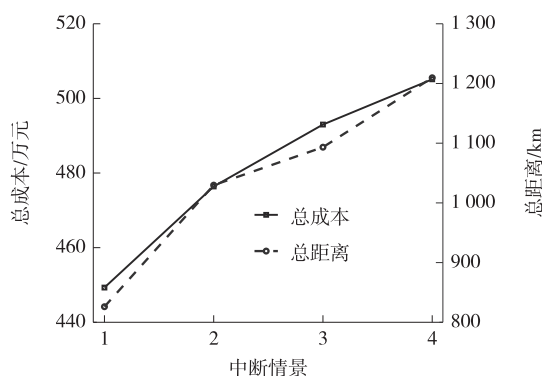


图7 中断情景下的成本与距离变化情况

Fig. 7 The change of cost and distance under the interruption scenario

2) 决策系数分析。决策者对成本和距离的重视程度对充电设施布局有着重要影响,为明确决策系数对模型的影响,设定 β 取值从0.1到0.9,依次递增0.1,共9种情形,相应决策系数下的成本与距离变化趋势见图8。由图8可知,当 $\beta=0.1$ 时,成本值最大,距离值最小。随着 β 的增加,决策者对成本目标越来越重视,此时成本逐渐降低,而距离逐渐增加,直至 $\beta=0.9$ 时,成本值降至最低,而距离值升至最高。对实验结果数据的分析表明,随着 β 的增加,充电站的数量有所下降,使得EV用户需要行驶更远的距离;就充电桩类型而言,随着 β 的增加,快速充电桩数量有所下降,而慢速充电桩有所上升。

3) 容忍距离分析。EV用户对充电路程的容忍距离也是充电设施布局优化的一项重要因素。设定容忍距离从2.6 km至3 km,依次递增0.1 km,共5组情形,相应容忍距离下的成本与距离变化趋势见图9。

从图9可以看出,随着容忍距离的增加,成本值逐渐降低,而距离值逐渐增加。实验结果数据分析表明,当容忍距离增加时,EV用户放弃了距离近、成本高的快速充电桩,选择了距离较远但在可容忍距离内、成本低的慢速充电桩,因此总成本略微有所下降,总距离有所增加。

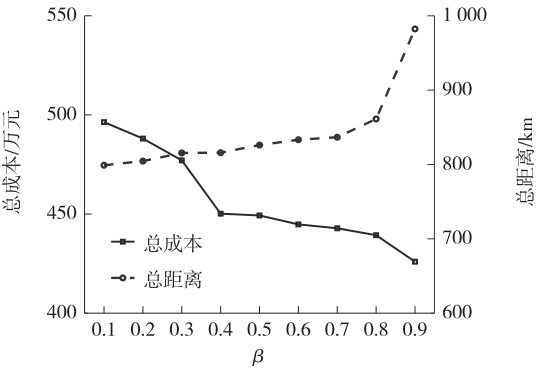


图 8 不同决策系数下的成本与距离变化情况

Fig. 8 The change of cost and distance under different decision coefficients

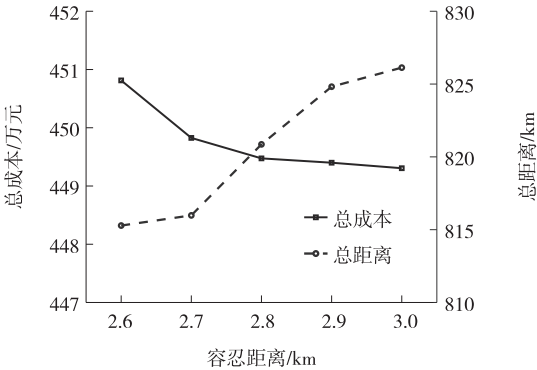


图 9 不同容忍距离下的成本与距离变化情况

Fig. 9 Cost and distance changes under different tolerance distances

3.3 算法对比

将本文算法与 APGA^[21]、PGA^[20] 这 2 种算法进行比较,以测试算法性能。3 种算法各单独运行 20 次,各算法的平均值、标准方差和最优值见表 4,显然本文算法在求解精度与稳定性方面均优于其它 2 种算法。

表 4 算法性能对比

Tab. 4 Algorithm performance comparison

算法	平均值	标准方差	最优值
本文	0.183 5	0.002 7	0.180 6
APGA	0.194 6	0.003 8	0.192 2
PGA	0.196 2	0.004 3	0.192 5

4 结语

本文研究了中断情景下的充电设施布局优化问题,以成本最小和距离最短为目标,以充电站的最大/最小数量、充电站内各类型充电桩的最大/最小数量、建站投资预算和 EV 用户充电容忍距离约束,建立了多目标规划模型。鉴于问题的 NP-困难特性,设计了智能优化算法求解,通过算例验证了模型与算法的有效性。本文的创新之处在于:一是模型方面同时考虑中断情景与 EV 用户充电距离,并将研究内容从已有文献的充电站选址问题拓展至充电站与多类型充电桩联合布局优化问题;二是针对模型的特点,设计了基于 K-Means 聚类启发式算法的改进遗传算法。

现实情况中,由于 EV 充电需要好几个小时,因此可以考虑在充电站周边增设休闲设施以提高 EV 用户对电路程的容忍距离,如咖啡厅、茶舍等,将这些休闲设施纳入研究范畴将是未来的一个方向。

参考文献:

[1] KINAY Ö B,GZARA F,ALUMUR S A. Full cover charging station location problem with routing[J]. Transportation Research Part B:Methodological,2021,144:1-22.

[2] 中华人民共和国公安部. 全国机动车保有量达 4.17 亿辆 驾驶人超过 5 亿人[EB/OL]. (2023-01-11)[2023-08-08]. <https://app.mps.gov.cn/gdnps/pc/content.jsp?id=8837602>.
Ministry of Public Security of the People's Republic of China. The number of motor vehicles in China reached 417 million, with more than 500 million drivers[EB/OL]. (2023-01-11)[2023-08-08]. <https://app.mps.gov.cn/gdnps/pc/content.jsp?id=8837602>.

[3] 王震坡,张瑾,刘鹏,等. 电动汽车充电站规划研究综述[J]. 中国公路学报,2022,35(12):230-252.
WANG Z P,ZHANG J,LIU P,et al. Overview of planning of electric vehicle charging stations[J]. China Journal of Highway and Transport,2022,35(12):230-252.

[4] 周文峰,李珍萍,崔晓洁,等. 电动汽车充电站选址问题研究[J]. 数学的实践与认识,2016,46(11):187-194.

- ZHOU W F, LI Z P, CUI X J, et al. Research on location problem of electric vehicle charging station[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(11): 187-194.
- [5] 孙智勇, 宁爱兵, 傅汤毅, 等. 充电站选址问题的降阶回溯算法[J]. 系统科学与数学, 2020, 40(7): 1133-1145.
- SUN Z Y, NING A B, FU T Y, et al. A backtracking algorithm with reduction for charging station location problem[J]. Journal of Systems Science and Mathematical, 2020, 40(7): 1133-1145.
- [6] XIA F, CHEN H, LI H, et al. Optimal planning of photovoltaic-storage fast charging station considering electric vehicle charging demand response[J]. Energy Reports, 2022, 8: 399-412.
- [7] 侯慧, 唐俊一, 王逸凡, 等. 城区电动汽车充电站布局规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 181-187.
- HOU H, TANG J Y, WANG Y F, et al. Layout planning of electric vehicle charging stations in urban areas[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 181-187.
- [8] ZHOU G, ZHU Z, LUO S. Location optimization of electric vehicle charging stations: Based on cost model and genetic algorithm [J]. Energy, 2022, 247: 123437.
- [9] CAI R, HUANG K, ZHENG S, et al. Including research on optimization planning of multi-energy complementary electric vehicle charging station[J]. Energy Reports, 2023, 9: 1037-1047.
- [10] 刘慧, 张迪, 冷凯君. 考虑服务半径的电动汽车充电设施选址问题[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(08): 2180-2189.
- LIU H, ZHANG D, LENG K J. Recharging infrastructure location problem for electric vehicles with service radius[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(08): 2180-2189.
- [11] 阙华坤, 冯小峰, 郭文翀, 等. 基于模糊双目标规划的充电站布局模型[J]. 计算机科学, 2022, 49(S1): 753-758.
- QUE H K, FENG X F, GUO W C, et al. Development of electric vehicle charging station distribution model based on fuzzy bi-objective programming[J]. Computer Science, 2022, 49(S1): 753-758.
- [12] 高治佳, 李星梅, 许传博, 等. 需求不确定下基于鲁棒优化的新旧充电站规划[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(6): 9-99.
- GAO Z J, LI X M, XU C B, et al. Planning of old and new charging stations based on robust optimization under uncertain demand[J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2023, 50(6): 9-99.
- [13] LI C, ZHANG L, OU Z, et al. Robust model of electric vehicle charging station location considering renewable energy and storage equipment[J]. Energy, 2022, 238: 121713.
- [14] 江岳, 李娜. 代客加电服务模式下的电动车充电站选址决策[J]. 工业工程与管理, 2023, 28(1): 89-97.
- JIANG Y, LI N. Decisions of electric car charging stations location with valet charging service[J]. Industrial Engineering and Management, 2023, 28(1): 89-97.
- [15] 孙秉珍, 杨佳楠, 白军成, 等. 充电中断情景下电动汽车充电站两阶段多目标区间选址优化决策[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 1005-1014.
- SUN B Z, YANG J N, BAI J C, et al. A two-stage multi-objective interval location optimization decision of electric vehicle charging station under charging interruption scenario[J]. Control and Decision, 2022, 37(4): 1005-1014.
- [16] ZU S, SUN L. Research on location planning of urban charging stations and battery-swapping stations for electric vehicles[J]. Energy Reports, 2022, 8: 508-522.
- [17] 严干贵, 刘华南, 韩凝晖, 等. 计及电动汽车时空分布状态的充电站选址定容优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6271-6284.
- YAN G G, LIU H N, HAN N H, et al. An optimization method for location and capacity determination of charging stations considering spatial and temporal distribution of electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6271-6284.
- [18] 肖白, 高峰. 含不同容量充电桩的电动汽车充电站选址定容优化方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(10): 157-166.
- XIAO B, GAO F. Optimization method of electric vehicle charging stations' site selection and capacity determination considering charging piles with different capacities[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(10): 157-166.
- [19] 左逸凡, 李伟豪, 杨伟. 考虑充电负荷时空分布特性的 EV 充电站规划[J/OL]. 电测与仪表, 2022: 1-10 [2022-08-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220818.1127.006.html>.
- ZUO Y F, LI W H, YANG W. EV charging station planning considering space-time distribution characteristics of charging load [J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022: 1-10. [2022-08-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220818.1127.006.html>.
- [20] 范志强. 考虑复杂需求特性的多级煤炭供应链网络优化[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(5): 21-28.
- FAN Z Q. Optimal design for multi-echelon coal supply chain network with complex demands[J]. Computer Engineering and

Applications, 2014, 50(5): 21-28.

[21] 刘兰芬, 杨信丰. 基于混合遗传算法的有效路径求解[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(11): 244-249.

LIU L F, YANG X F. Searching algorithm for efficient paths based on hybrid genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(11): 244-249.

Special Topics on Operations Research and Modern Intelligent Transportation

The Combination of EV Charging Station and Multi-Type Charging Piles under the Interruption Scenario

FAN Zhiqiang¹, SHI Ranran¹, LIANG Ningning¹, LI Shanshan²

(1. School of Business Administration Research Center of Energy Economy, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003;

2. School of Finance and Economics Administration, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China)

Abstract: Previous literature has less considered the interruption scenario and the convenience of charging for electric vehicle (EV) users, and more has focused on planning the location of charging stations. In view of this, the research scope is extended to the joint layout optimization of charging stations and multi type Charging station under the interruption scenario, and a multi-objective programming model is constructed with the goal of minimizing the cost and distance. In response to the NP hard characteristics of the problem, a heuristic algorithm based on K-Means clustering was first designed to quickly generate good initial feasible solutions, and then an improved genetic algorithm was proposed to solve the model. The validity of the model is verified by an example analysis. The model has good robustness and can effectively solve the joint layout optimization problem of EV charging station and Charging station under outage scenarios. The proposed algorithm is superior to existing algorithms in terms of solution accuracy and stability.

Keywords: interruption scenario; multi-type charging piles; multi-objective programming model; k-Means clustering; improved genetic algorithm

(责任编辑 黄 颖)