

DOI: 10.7667/PSPC180513

考虑电压稳定性和充电服务质量的电动汽车充电站规划

程杉^{1,2}, 吴思源^{1,2}, 孙伟斌^{1,2}

(1. 新能源微电网湖北省协同创新中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 充电站的合理规划可有效降低其建设对电网产生的不利影响, 促进电动汽车(Electric Vehicle, EV)规模化应用及其产业发展。通过交通起止点分析确定充电需求点信息, 在满足充电可靠性的前提下确定候选站址方案。基于系统电压稳定性和充电服务质量, 建立了充电站规划的多目标优化模型。采用超效率数据包络分析方法确定各目标函数权重系数, 将多目标优化问题转化为单目标优化问题, 运用动态自适应粒子群优化算法求解。最后以IEEE33节点系统结合待规划区域为例进行仿真, 结果验证了所提方法的有效性。

关键词: 电动汽车; 充电站规划; 电压稳定指标; 服务质量指标; 交通起止点分析

Optimal planning of charging stations for electric vehicles considering voltage stability of distribution system and the quality of service

CHENG Shan^{1,2}, WU Siyuan^{1,2}, SUN Weibin^{1,2}

(1. Hubei Provincial Collaborative Innovation Center for New Energy Microgrid (CTGU), Yichang 443002, China;

2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Reasonable planning of charging stations enables to greatly reduce the reactive effect of its construction to the power system, and promote the large-scale application of the electric vehicle and its industry development. In this paper, charging demand is determined by Origin-destination (OD) analysis, and the candidate configuration solutions are derived with charging reliability satisfied. A Multi-objective Optimization (MOO) model of charging stations is established with consideration of the voltage stability and the service quality. To determine the appropriate weights for the MOO functions, the super-efficiency data envelopment analysis is adopted to convert the MOO problem into a single one that is solved by a dynamic adaptive particle swarm optimization. Finally, numerical simulation based on a planned area combined with the IEEE 33 system has been carried out and the corresponding results verify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607105).

Key words: electric vehicle; charging station planning; voltage stability index; quality of service index; origin-destination (OD) analysis

0 引言

电动汽车(Electric Vehicle, EV)具有零排放无污染等优点, 其规模化使用会进一步扩大^[1-2], 充电站的规划建设在很大程度上影响 EV 的推广^[3]。充电站的不合理规划 and 配置还会对电网运行的经济性、稳定性以及用户充电的方便可靠性等带来严重影响。因此, EV 的普及必须以科学合理的充电站规

划作为前提^[4]。

国内外学者从不同角度开展了 EV 充电站规划问题的研究。作为重要的商业设施, 充电站的规划需考虑经济性, 因此文献[5]考虑了充换电站的全寿命周期成本, 以规划年限内充换电站的净现值最大为目标进行最优规划; 而文献[6]考虑建站成本、运行维护费用、充电费用及 EV 数量分布的收益最大化建立了多等级充电站的选址和定容优化模型; 文献[7]以建设运营成本和用户在充电途中的空驶损耗之和最小为目标, 确定充电站的最优规划方案。

这些研究^[5-7]均是从经济性角度考虑, 没有分析

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607105); 湖北省教育厅科学技术研究(中青年人才)项目资助(Q20161203)

用户的出行行为, 忽视了 EV 使用者对充电便捷性的需求。作为基础服务设施, 充电站规划过程中还应该考虑 EV 用户的需求, 使需求者的效用最大化等, 从而加速 EV 产业的发展, 达到节能减排的目的^[8]。为此, 基于对长距离高速公路中行驶车流的复杂动态过程进行模拟, 文献[9]构建了以运营商与用户的综合效益最大化为目标的充电站优化规划模型; 通过对 EV 一周内的出行活动以及充电过程进行动态仿真, 文献[10]结合出行链的概念, 提出了基于用户出行需求的充电站优化规划模型。此外, 考虑道路网络对 EV 充电需求的影响, 文献[11]提出了充电站最优规划的两阶段方法; 而文献[12]从驾驶员选择充电站的行为模式和电动出租车的随机概率特性出发, 建立了充电站综合规划模型。

文献[9-12]均从用户的出行角度建立了充电站优化布局的数学模型, 但未考虑充电站对电网运行的经济性、稳定性等的影响。充电站作为负荷尤其是当大规模 EV 充电时, 不可避免地会对电网运行带来冲击, 严重时甚至会造成电网崩溃, 因此充电站的规划必须考虑其对电网的影响。如文献[13]就提出了一种考虑电力网络结构强度的充电站规划新方法; 文献[14]则建立了考虑节点电压偏移最小化的充电站多目标优化决策模型。然而文献[13-14]又未考虑对 EV 用户充电的便利性。

可见, 在满足 EV 充电需求、充电站规划和电网运行等约束条件下, 如何使充电站规划建设经济而且减少对配电系统的负面影响、为 EV 车主提供便利可靠的充电服务, 是充电站规划需要解决的关键问题之一^[12,14]。本文通过交通起止点(Origin-Destination, OD)分析结合蒙特卡洛模拟, 充分考虑 EV 用户的充电需求, 在满足 EV 用户充电可靠性的前提下确定候选站址方案; 全面考虑建设成本、系统电压稳定性和用户排队时间, 提出充电服务质量指标, 建立充电站规划的综合优化模型。该模型既考虑了 EV 用户充电的便利性和充电站规划建设经济性, 又考虑了充电站接入对电网稳定性的影响。为求解该优化模型, 提出具有寻优精度高、收敛速度快的动态自适应粒子群优化算法并应用于优化问题的求解。最后, 以 IEEE 33 节点系统与待规划区域结合为例, 证明了所提模型的有效性和合理性。

1 满足充电可靠性的候选站址确定方法

对于城市某主干道或高速公路等线状规划区域, 运用 OD 分析及蒙特卡洛模拟来确定充电需求点位置^[15], 在满足充电可靠性的前提下, 确定充电站的候选站址方案, 如图 1 所示, 具体过程如下:

- 1) 运用蒙特卡洛模拟对每辆 EV 生成电池容量 cap , 根据式(3)计算 Ran_{ac} 。
- 2) 由矩阵 P_{OD} 和 A_{nm} , 运用蒙特卡洛模拟确定用户出行的起点和终点。
- 3) 根据式(8)确定充电需求点位置和次数, 并记录需求次数较多的点。
- 4) 由 1.2 节对可靠性描述, 在所记录的点中, 依据式(9)一式(11)确定满足要求的点之间的距离 D 。
- 5) 输入规划要满足的置信水平(充电可靠性)。
- 6) 得出满足不同充电可靠性的点的集合, 并记录为候选站址方案。

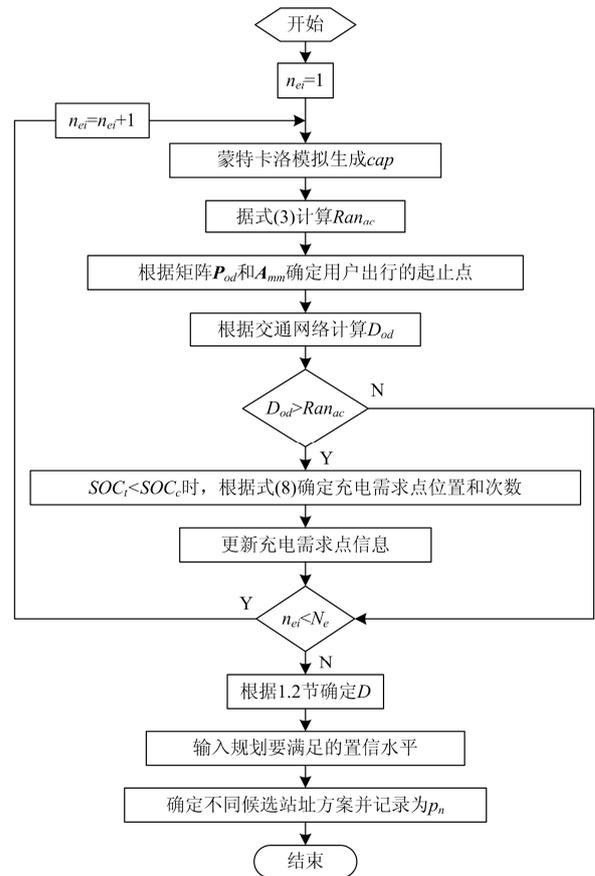


图 1 确定候选站址方案流程图

Fig. 1 Flow chart of determining alternative location plans

1.1 OD 分析

根据 EV 动力电池的基础数据, N1, N2 类 EV 电池容量的概率密度函数用式(1)表示^[15]。对于每辆 EV 动力电池的容量 cap , 由上述概率密度函数, 运用蒙特卡洛模拟方法来产生。如果抽取的电池容量超出了设定的上下限, 则重新取值直到满足要求。

$$f(cap, \mu_1, \sigma_1) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} e^{-(cap - \mu_1)^2 / 2\sigma_1^2} \quad (1)$$

式中, μ_1 和 σ_1 分别为标准正态分布函数的平均值和

标准差。

用户在行驶过程中,当动力电池荷电状态(State of Charge, SOC)达到阈值 SOC_c 时, EV 需要进行充电以保证完成后续行程。因此,需充电的条件为

$$SOC_i \leq SOC_c \quad (2)$$

式中, SOC_i 表示动力电池的实时 SOC。

设行驶距离和动力电池的 SOC 成线性关系。SOC 到达阈值前的可行驶里程记为 Ran_{ac} , 如式(3)所示。

$$Ran_{ac} = \eta \times (SOC_i - SOC_c) \times Ran_{mc} \quad (3)$$

式中: η 为能量转化效率; SOC_i 表示在道路入口电池 SOC 初始值, 取值范围为 0.8~0.9; Ran_{mc} 表示 EV 满电状态的续航里程。

因此, SOC 取 SOC_c 时的可行驶里程数 Ran_{sc} 表示为

$$Ran_{sc} = \eta \times SOC_c \times Ran_{mc} \quad (4)$$

OD 矩阵 A_{mm} : 对于在城市主干道或者高速公路路口, 每辆 EV 都会被成对地分配起点和终点。在蒙特卡洛模拟过程中, 用 OD 矩阵 A_{mm} 来模拟 EV 从道路入口到出口的流动。

概率 OD 矩阵 P_{OD} 中的元素 p_{IJ} (如式(5)) 表示 EV 从路口 I 进入、路口 J 驶出的概率。矩阵 A_{mm} 中的元素 a_{IJ} 表示从路口 I 进入、路口 J 驶出的 EV 数量。

$$p_{IJ} = a_{IJ} / N_I \quad (1 \leq I \leq m, 1 \leq J \leq m) \quad (5)$$

将矩阵 A_{mm} 的第 I 列元素相加, 表示从路口 I 进入道路的 EV 数量 N_I , 如式(6)所示。

$$N_I = \sum_{J=1}^m a_{IJ} \quad (1 \leq I \leq m, 1 \leq J \leq m) \quad (6)$$

EV 的总数用 N_e 表示, 如式(7)所示。

$$N_e = \sum_{I=1}^m N_I \quad (1 \leq I \leq m) \quad (7)$$

由起止点之间的距离 D_{od} 和 Ran_{ac} 来确定完成行程所需要的充电次数 N_{ct} , 公式为

$$N_{ct} = \text{fix}(D_{od} / Ran_{ac}) \quad (8)$$

式中, fix 表示向下取整。

计算规划区域一天内充电需求点位置和次数的过程, 以图 2 为例阐述说明。设 $D_{od}=AB$, $Ran_{ac}=Ad_1$,

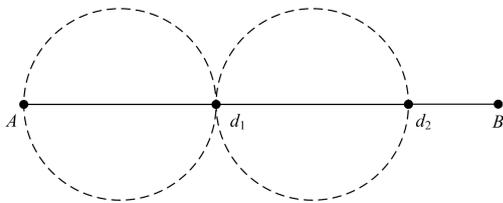


图 2 出行距离示意图

Fig. 2 Sketch map of travel distance

即用户 1 的出行距离为 AB , 续航里程为 Ad_1 , 因此用户 1 要完成从 A 到 B 的出行, 需要充电的位置为 d_1 点和 d_2 点, 次数为 2。由上述分析, 对每个用户的数据进行统计可得出规划区域一天内的充电需求点的位置和次数。

1.2 充电可靠性

根据中心极限定理, 基于正态拟合曲线, 可以确定动力电池 SOC 低于 SOC_c 值时的可行驶里程 Ran_{sc} [15]。

$$\theta(Ran_{sc}, \mu_2, \sigma_2) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} e^{-(Ran_{sc} - \mu_2)^2 / 2\sigma_2^2} \quad (9)$$

式中, μ_2 和 σ_2 分别为分布函数的平均值和标准差。

为方便 EV 充电, 应满足需充电汽车在不超过 Ran_{sc} 内有充电站可以充电; 同时, 应该避免相邻两充电站之间距离太近造成资源浪费、增加成本 [2]。根据 Ran_{sc} 在 $(1-a\%)$ 置信水平的正态分布确定充电服务半径 Sr 为

$$Sr = \mu_2 - b\sigma_2 \quad (10)$$

式中: $a\%$ 表示 $Ran_{sc} \leq Sr$ 的 EV 数量所占 EV 总量的比例; b 表示查找与 $(1-a\%)$ 所对应标准正态函数分布表所确定的系数, 换言之, 确保 $(1-a\%)$ 的 EV 可以以 SOC_c 的荷电状态行驶到充电服务半径 Sr 内的充电站。如图 3 所示。

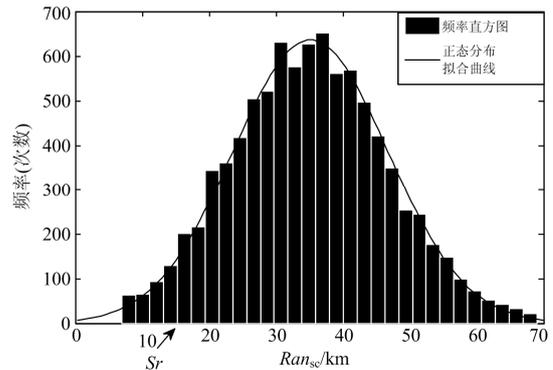


图 3 Ran_{sc} 分布图

Fig. 3 The Ran_{sc} distribution

因此任意两相邻充电站距离 D 满足式(11)。

$$Sr_1 \leq D \leq Sr_2 \quad (11)$$

式中, Sr_1 和 Sr_2 分别表示满足不同 b 值时对应的服务半径 Sr 。

要满足充电可靠性, 除满足式(11)之外, 还需满足以下约束。

1) 根据待规划区域和电网节点的重合情况, 充电站的位置选择应满足式(12)。

$$p_{ac} \in A \quad (12)$$

式中: p_{ac} 表示充电站的接入节点号; A 表示待规划区

域和电网重合部分所包含的系统节点号组成的集合。

2) 充电站的规划要满足充电可靠性, 即 Ran_{sc} 在 $(1-a\%)$ 置信水平大于所要求的最小值, 即

$$b \geq b_{\min} \quad (13)$$

2 选址定容规划模型

在第一部分规划模型已确定充电站候选站址方案的基础之上, 全面考虑建设成本及电力系统功率损耗费用、电压稳定指标、充电服务质量和排队时间等因素, 建立多目标综合优化模型, 运用超效率数据包络分析法(Data Envelopment Analysis, DEA) 确定各目标函数权重, 将其转化为单目标规划模型, 以其最小为目标确定充电站最优规划配置方案。

2.1 经济性指标

每个等级的充电站占地面积使用统一的建设标准, 建站年均土地成本 C_l 如式(14)。

$$C_l = \frac{1}{y_r} \sum_{l=1}^{L_e} \sum_{p=1}^q S_{le} c_p n_{sp} \quad (14)$$

式中: y_r 为回收周期; L_e 表示充电站等级总数; n_{sp} 表示占地类型为 p 的充电站的个数; S_{le} 表示等级为 l_e 的单座充电站占地面积; q 表示充电站的占地类型总数; c_p 表示土地类型 p 的单位面积价格。

充电机及其他配套设备成本为

$$C_{inv} = \sum_{h=1}^{n_s} F_h \left[\frac{k_r (1+k_r)^{y_r}}{(1+k_r)^{y_r} - 1} \right] \quad (15)$$

式中: n_s 表示充电站的个数; F_h 表示充电站 h 的充电机以及其他配套设备成本; k_r 表示回收率。

充电站的接入会使电网的功率损耗增加, 充电站接入的位置和功率不同, 系统功率损耗亦不相同, 如式(16)。

$$P_{loss} = \sum_{k=1}^k R_k \left(\frac{P_k^2 + Q_k^2}{V_{k0}^2} \right) \quad (16)$$

式中: k 表示支路数; P_k 和 Q_k 分别表示支路 k 上的有功功率以及无功功率; R_k 表示支路 k 的电阻值; V_{k0} 表示 k 支路末端的电压数值。

将网络损耗转化为成本, 如式(17)所示。

$$C_{loss} = 365eoP_{loss} \quad (17)$$

式中: e 表示电价; o 表示充电站一天的服务时间。将建设成本和网损费用之和最小化作为目标函数 f_1 , 如式(18)。

$$\min f_1 = C_l + C_{inv} + C_{loss} \quad (18)$$

2.2 系统电压稳定性指标

大功率负荷的接入会对配电网的电压稳定性产

生较大影响, 充电站的不合理配置和大规模集中接入时, 系统将面临电压质量差, 甚至发生崩溃的危险。因此系统的电压稳定性对于配电网安全稳定运行显得非常重要, 通常用电压稳定指标(Voltage Stability Index, VSI)来描述系统电压稳定性^[16]。

对于支路 k , VSI 计算公式为

$$VSI_k = \frac{4 \left[(X_{ij} P_j - R_{ij} Q_j)^2 + (X_{ij} Q_j + R_{ij} P_j) V_i^2 \right]}{V_i^4} \quad (19)$$

式中: R_{ij} 和 X_{ij} 分别表示支路 k 的电阻值和电抗值; P_j 和 Q_j 表示节点 j 的有功功率和无功功率; 节点 j 为支路 k 的功率接收端; V_i 为节点 i 的电压值。

配电网的电压稳定指标 f_{VSI} 定义为系统中所有支路电压稳定指标最大者, 如式(20)所示, 与之对应的支路称为该系统的最薄弱支路, 系统稳定时最薄弱支路所对应的 VSI 值一定小于 1, 如果系统发生电压崩溃, 必然从最薄弱支路开始, 系统电压的稳定程度可根据 f_{VSI} 的值与 1(临界值)的差值来判断。即 f_{VSI} 越小, 系统的电压稳定性越好, 反之越差。当 f_{VSI} 接近 1 时系统发生电压崩溃。

$$\min f_2 = f_{VSI} = \max \{VSI_1, VSI_2, \dots, VSI_k\} \quad (20)$$

2.3 充电服务质量指标

充电站不仅是充电基础设施, 同时也是一种服务设施, 因此可将接入点看做 EV 的服务点。EV 完成充电所需时间随充电站配置的充电机功率不同而不同, 目前研究一般只分析用户的充电排队时间, 而不考虑用户得到的充电服务质量。对于自由出行时间较短的用户, 对充电服务质量要求自然较高。本文分析充电服务质量(Quality of Service, QoS)的目的是使规划模型更全面更接近实际。因此, 现提出一个新的指标来评价用户得到的 QoS, 即

$$QoS_{n_{ei}} = \frac{T_{n_{ei}}}{L_{n_{ei}}} \quad \forall n_{ei} = 1, 2, \dots, N_e \quad (21)$$

式中, $T_{n_{ei}}$ 表示第 n_{ei} 辆 EV 完成行驶 $L_{n_{ei}}$ 长度距离所耗电量需要的充电时间。

QoS 指标与完成充电所需时间成正比关系, 因此, 配置的充电机功率越大, 充电时间越短, QoS 指标越小, 但相应的建设成本会增加。

需要指出的是, QoS(单位为 min/100 km)指标的物理意义是: 充电机对 EV 可行驶单位距离所需要的充电时间, 以下取倒数的目的是由于后续部分做归一化处理时, 需要一个最大量作为输出单元, 故而取倒数。

因此, 将所有 EV 的 QoS 指标倒数的平均数作为目标函数 f_3 , 如式(22)所示。

$$f_3 = \max(f_{p_n}) \quad p_n = 1, 2, \dots, P_n \quad (22)$$

式中: P_n 为满足充电可靠性的候选站址规划方案总数; f_{p_n} 为第 p_n 个候选站址配置充电机的平均服务质量指标, 其表达式为式(23)。

$$f_{p_n} = \frac{1}{N_{ch}} \sum_{n_{ei}=1}^{N_{ch}} QoS_{n_{ei}}^{-1} \quad (23)$$

式中, N_{ch} 为 N_e 辆 EV 中需要充电的车数量。

2.4 充电排队时间

如果充电站内的充电机数量配置较多时, 可以较好地满足用户的充电需求, 减少排队时间, 做到即到即充, 但会导致充电机的大部分时间处于空闲状态, 造成建设成本增加和资源的极大浪费。因此, 可用排队论来计算用户在充电站的排队时间。

由分析可知, EV 到达充电站的过程属于典型的 M/M/S 等待制排队模型, EV 的到站过程可用泊松分布来模拟。用户的平均排队时间 W_q 与站内充电机个数 n_c 的关系为^[17-18]

$$W_q = \frac{\rho^{n_c}}{n_c!(1-\rho_{n_c})} P_0 \int_0^{\infty} t d\left(-e^{-(1-\rho_{n_c})n_c t}\right) \quad (24)$$

式中: μ 为充电站的平均服务率; n_c 为充电站内充电机的个数; t 为单车充电时间; 充电机的服务强度为 ρ 。

充电机数量为 n_c 时, 排队模型的服务强度为

$$\rho_{n_c} = \frac{\gamma}{n_c \mu} \quad (25)$$

式中, γ 为泊松分布的参数, 在此表示单位时间内到达充电站的 EV 数量。

充电机全部空闲率 P_0 表示为

$$P_0 = \left[\sum_{i=0}^{n_c-1} \frac{\rho^i}{i!} + \frac{\rho^{n_c}}{n_c!(1-\rho_{n_c})} \right]^{-1} \quad (26)$$

将总排队时间作为目标函数 f_4 , 如式(27)。

$$\min f_4 = \sum_{n_{shev}=1}^{n_s} n_{shev} W_q \quad (27)$$

式中, n_{shev} 为第 h 座充电站服务的 EV 数量。

2.5 多目标模型转化为单目标模型

多目标优化问题往往通过加权法、理想点法、主要目标函数法等方式转化为单目标问题, 然后用数学规划的方法来求解, 如何确定适当的权重系数就是一个关键的问题。如果由决策者的经验决定, 这样主观性较强。因此出现了超效率DEA法、相对比较法、判断矩阵法、离差排序法等确定多目标权重系数的方法。判断矩阵法是对相对比较法的改进, 两者都属于经验评分法, 仍带有一定的主观性; 离

差排序法与超效率DEA方法原理上有相似之处, 但计算过程较为复杂。

超效率 DEA 法是一种通过数学规划, 比较多输入多输出的决策单元相对效率, 进而对决策单元进行效率评价(即评价决策单元优劣)的方法, 在提高决策对象效率值排序方面更具优势^[19]。

针对 EV 充电站规划的多目标优化转换为单目标优化问题, 采用超效率 DEA 法确定权重系数已有一定的研究基础^[14,20]。

设多目标规划问题的权重系数表示为

$$[\alpha_d, \beta_d] = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \beta_{11} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \beta_{21} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_{d1} & \alpha_{d2} & \alpha_{d3} & \beta_{d1} \end{bmatrix} \quad (28)$$

将模型的 4 个目标函数 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 做归一化处理, 即 $f_1/(\min f_1)$ 、 $f_2/(\min f_2)$ 、 $f_4/(\min f_4)$ 作为决策单元的输入量, 将 $\min(-f_3)/(-f_3)$ 作为决策单元的输量。基于超效率 DEA 模型评价该 d 个决策单元, 采用 Matlab 线性规划工具求解。根据它们相对效率的大小排序, 最大值所对应的决策单元(权重系数)更为有效。

采用线性加权将上述目标函数 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 转化为单目标优化问题。表达式为

$$\min f = \alpha_{k1} \frac{f_1}{\min f_1} + \alpha_{k2} \frac{f_2}{\min f_2} + \alpha_{k3} \frac{f_4}{\min f_4} + \beta_{k1} \frac{\min(-f_3)}{-f_3} \quad (29)$$

确定各目标函数权重的步骤如下所述。

第1步: 初始化参数, 分别求解上述4个目标函数的最优解, 分别求解时不考虑另外3个目标函数。

第2步: 采用伪随机数发生器产生一组权重向量, 把多目标优化问题转化为单目标问题并求解, 本文权重的步长设为0.1。

第3步: 将求得的优化变量值代入到4个目标函数中, 运用超效率 DEA 方法进行评价, 根据最终评价结果选取最有效的权重系数。

2.6 约束条件

1) 充电机总功率 P_T 不小于充电需求 P_D 。

$$P_T \geq P_D \quad (30)$$

2) 为避免资源浪费, 并考虑到 EV 用户所能接受的最长等待时间, 充电排队时间 W_q 应满足

$$W_{q\min} \leq W_q \leq W_{q\max} \quad (31)$$

本文 $W_{q\min}$ 取 3 min, $W_{q\max}$ 取 10 min。

3) 考虑所配置充电机功率, QoS 指标应满足

$$QoS_{\min} \leq QoS \leq QoS_{\max} \quad (32)$$

本文 QoS_{\min} 和 QoS_{\max} 分别取 15、30。

4) 任意支路的电压稳定指标 VSI_k 应满足

$$VSI_k < 1 \quad (33)$$

5) 系统潮流约束为

$$\begin{cases} P_i - P_{Li} = V_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i - Q_{Li} = V_i \sum_{j=1}^{N_{bus}} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (34)$$

式中: V_i 和 V_j 分别为节点 i 和 j 的电压; N_{bus} 表示系统的节点数; P_i 和 P_{Li} 分别表示节点 i 的有功功率和负载的有功功率; Q_i 和 Q_{Li} 分别为节点 i 的无功功率和负载的无功功率; G_{ij} 为节点导纳矩阵的实部; B_{ij} 为节点导纳矩阵的虚部; θ_{ij} 为节点 i 与 j 的相角差。

6) 电压偏差约束为

$$\begin{cases} f_{vd} = \frac{|V_i - V_0|}{V_0} \times 100\% \\ f_{vd} \leq f_{vd \max} \end{cases} \quad (35)$$

式中, V_0 为系统标称电压, 该配电网电压等级下所允许的最大偏差为 $f_{vd \max}$ 。

7) 线路 k 的电流应小于该线路允许承载的最大电流。

$$I_k < I_{\max} \quad (36)$$

式中: I_k 为线路 k 的电流; I_{\max} 表示该线路允许承载的最大电流。

8) 配电变压器所用容量应小于该变压器的最大容量。

$$S < S_{\max} \quad (37)$$

式中: S 表示配电变压器所用容量; S_{\max} 表示该变压器的最大容量。

3 优化算法及算例分析

3.1 优化算法

所提规划模型为含非线性目标函数和非线性约束条件的、复杂的多约束优化问题, 必须寻求有效的优化工具。

由于参数少、实现简单、收敛速度快等出色的特性, 使得 PSO 成为了最常用的优化算法之一。并且已经将其成功应用到了多变量的电力系统的问题当中, 且已经被证实 PSO 是一个强大的优化器。PSO 算法最重要的一个特性是它的收敛速度极快, 只要没有发生提前收敛的现象, 导致所有粒子陷入局部最优且无法跳出, 该特性将会是一个非常好的优势。

因此, 如何避免过早收敛以确保全局搜索能力是一个重要的问题, 必须加以解决。为此, 在前期研究^[21]中, 提出动态自适应粒子群优化算法, 将其应用于求解本文所提模型, 流程如图 4 所示。

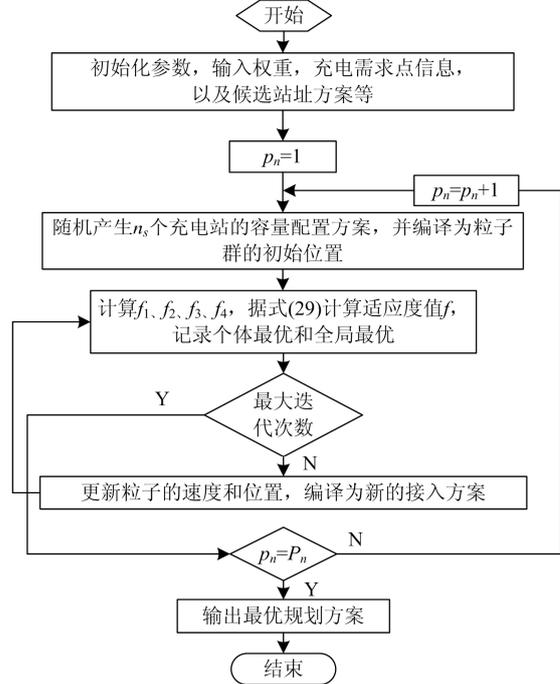


图 4 求解流程图

Fig. 4 Solving flow diagram

3.2 算例分析

设规划区域全长 80 km, 分为工业区、商业区和居民区, 如图 5, 其配电网以 IEEE33 节点系统 (图 6) 为例。未接入充电站时, 系统的电压稳定指标为 0.099 6, 有功损耗为 201.5 kW。本文假设配电系统的部分节点(支路)在地理上与交通网络重合。这里讲的“重合”是指两者位于偏差允许范围内的同一区域中, 未必严格重合在同一地理点上^[14]。33 节点系统中包含节点 1、2、3、...、18 的支路与本文

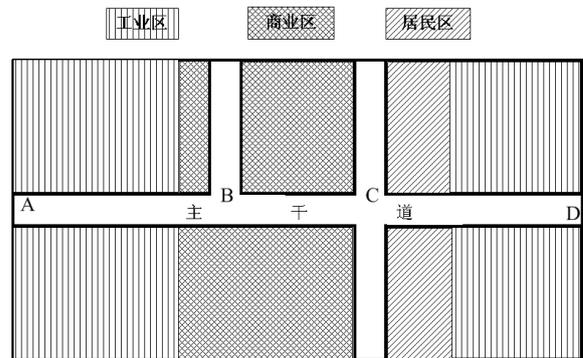


图 5 待规划区域示意图

Fig. 5 Sketch map of planning area

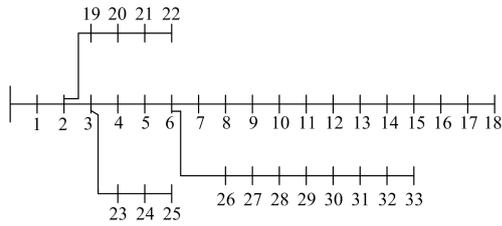


图 6 IEEE33 节点测试系统

Fig. 6 Modified 33-bus test system

的待规划区域“重合”。因此，将包含节点 1、2、3、…、18 的支路与待规划主干道相结合。本文中充电机功率分别取 30 kW、40 kW、50 kW 和 60 kW 4 种备选种类。

各路口之间距离如表 1 所示。

表 1 各路口之间距离

Table 1 Distance between intersections

km				
	A	B	C	D
A	0	30	50	80
B	30	0	20	50
C	50	20	0	30
D	80	50	30	0

概率 OD 矩阵 P_{OD} 表示为

$$P_{OD} = \begin{bmatrix} 0 & 0.2 & 0.2 & 0.6 \\ 0.2 & 0 & 0.6 & 0.2 \\ 0.3 & 0.5 & 0 & 0.2 \\ 0.5 & 0.3 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

根据 OD 分析，结合蒙特卡洛模拟，以及 1.2 节部分对充电可靠性阐述和在本文中的应用。在满足不同充电可靠性的要求下，确定对应 Ran_{sc} 在 $(1-\alpha\%)$ 不同置信水平的选址方案。如表 2 所示。

表 2 不同置信水平对应的最优选址方案

Table 2 Optimal location plans for different confidence levels

α 取值	置信水平	建站个数	充电站接入点
0	100%	10	2 3 5 6 8 10 11 13 15 17
2%	98%	9	3 5 6 8 10 12 14 16 18
4%	96%	8	2 4 6 9 11 13 15 17
7%	93%	7	3 6 8 11 14 16 18
8%	92%	6	2 5 8 11 15 17
10%	90%	5	2 5 9 13 16
15%	85%	4	4 8 12 16
35%	70%	3	4 10 15
40%	60%	2	6 13
60%	40%	1	10

由选址规划模型的求解结果可看出，当要求置信水平不小于 90% 时，表 2 中 1~6 行所对应方案满足要求。将此 6 种选址方案作为充电站的候选接入位置。当要求的置信水平改变时，可根据表 2 选取不同的选址方案。

各种类型的土地价格如表 3 所示；充电站等级及占地面积如表 4 所示。

表 3 各用地类型的土地成本

Table 3 Costs of different land

土地类型	工业用地	商业用地	居民用地
价格/ (万元·m ⁻²)	0.069 6	0.685 4	0.211 4

表 4 充电站等级及相应的占地面积

Table 4 Station levels and corresponding floor space

充电站级	1	2	3	4
占地面积/m ²	1 085	693	377	165

根据充电可靠性模型求得的充电需求点分布信息及表 3、表 4 等数据，不考虑另外 3 个目标函数，分别以 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 作为目标函数求解，可得到单目标函数的最优值。如表 5 所示。

表 5 各个单目标函数的最优值

Table 5 Optimal value of each single objective function

目标函数	min f_1 / (万元/年)	min f_2	max f_3 / (100 km/min)	min f_4 /h
取值	77.497 9	0.064 5	0.065 4	14.312 0

在得到上述数据的基础上，用 2.5 节所介绍方法将多目标模型转化为单目标问题，确定各目标函数的最优权重并求解。经计算可知，满足充电可靠性的 6 种选址方案所对应的最优权重均为 [0.1, 0.1, 0.1, 0.7]，每种方案对应的最优配置方案目标函数 f 及相应的单目标函数 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 取值如表 6 所示。

表 6 不同候选方案最优规划结果

Table 6 Results of optimal schedule for different alternative plans

方案编号	充电站数	f_1 / (万元/年)	f_2	f_3 / (100 km/min)	f_4 /h	f
1	5	110.900 3	0.088 9	0.065 4	20.622 2	1.122 7
2	6	117.072 2	0.151 1	0.064 8	25.328 0	1.265 8
3	7	131.154 7	0.169 8	0.064 8	20.857 3	1.281 1
4	8	121.250 7	0.145 9	0.062 5	25.867 3	1.292 3
5	9	148.754 0	0.091 2	0.049 3	26.713 3	1.446 7
6	10	145.876 6	0.151 3	0.060 9	25.065 3	1.353 5

本文所提规划模型具有较强的综合性, 全面考虑了各个目标函数以及各目标函数之间的相互影响。因此, 不同选址方案的最优规划方案相应的各目标函数值(表 6)不可能全部或大部分取表 5 中的最优值。

从表 6 第 7 列和图 7 可以明显看出, 在最有效权重系数相同的情况下, 方案 1 的目标函数值 f 最小, 为最优方案。同时, 由表 6 中第 3~6 列数据及图 8(a)—图 8(d)亦可看出, 按照方案 1 规划配置充电站时, 建站成本及网损费用之和, 系统电压稳定指标, 用户得到的充电服务质量和排队时间的取值均优于其他方案。

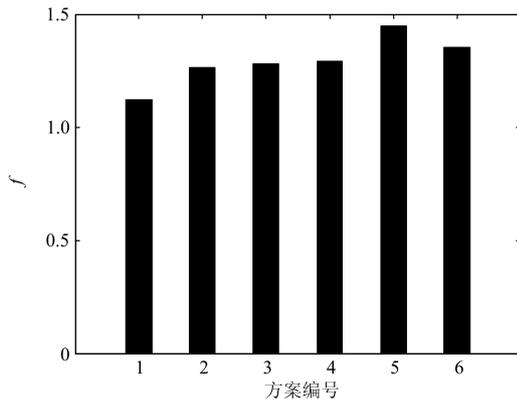
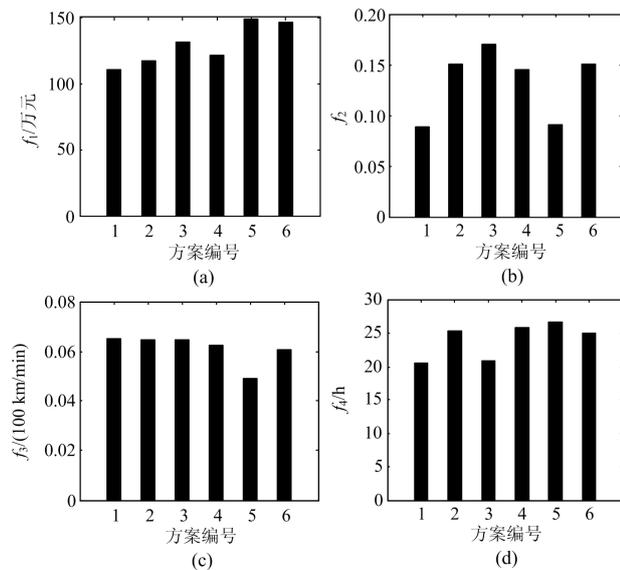
图 7 不同方案 f 值Fig. 7 Value f for different plans

图 8 不同方案各单目标函数值

Fig. 8 Objective function value corresponding to each solution

值得指出的是, 系统的电压稳定指标 f_2 在方案 1 中取得最优值, 这是由于该规划方案下充电站的接入节点原负荷较小造成的, 原系统的电压稳定指

标为 0.099 6, 按方案 1 规划时, 电压稳定指标为 0.088 9, 已经优于原系统且远远小于极限值 1。系统的节点电压标么值如图 9 所示, 不难发现 16 号节点的电压偏差最大为 1.35%, 小于所允许的最大偏差值 7%。因此, 系统的电压稳定性远远满足要求。更重要的是, 由表 8 可知, 方案 1 在每个充电站配置的充电机功率均为最大值, 所以用户得到的充电服务质量最好。

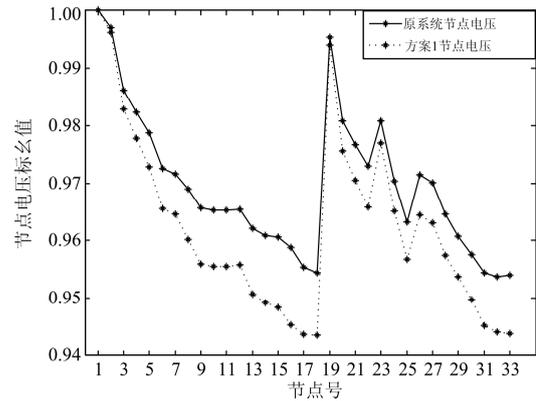


图 9 节点电压(标么值)比较

Fig. 9 Comparison of nodal voltage (per unit)

此外, 为验证超效率 DEA 方法所确定权重系数的有效性, 本文增加两组具有代表性的权重系数进行比较。第一组设为等值权重: 0.25、0.25、0.25、0.25; 第二组权重值带有一定的主观性, 偏向于经济性最好, 故设为 0.7、0.1、0.1、0.1。而按照上述两组权重进行规划得到的最优规划结果如表 9 所示, 对比表 8 可见, 按超效 DEA 的方法确定的权重系数 0.1、0.1、0.1、0.7 所得的规划结果具有明显的优越性。

综上所述, 规划方案 1 为最优配置方案具有可靠的理论依据。

充电站最优规划方案在待规划区域的地理分布示意图如图 10, 选址坐标如表 7 所示。

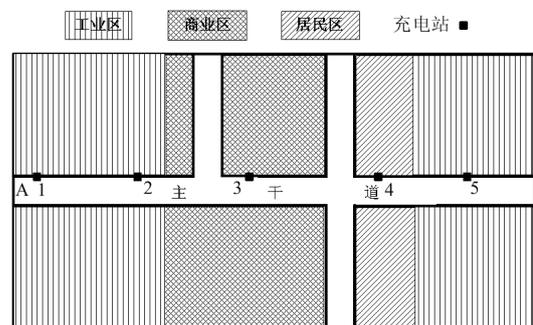


图 10 最优方案选址示意图

Fig. 10 Sketch map of optimal allocation planning

表 7 最优规划方案选址坐标
Table 7 Optimal schedule of location coordinates

充电站编号	1	2	3	4	5
充电站距 A 点 距离/km	2.94	20.52	38.22	60.84	66.54

充电站最优规划配置方案结果如表 8。

表 8 最优规划方案结果
Table 8 Results of optimal planning

接入系统节点	2	5	9	13	16
充电机个数	6	6	3	1	8
充电机功率/kW	60	60	60	60	60
权重 $[\alpha_d, \beta_d]$	0.1 0.1 0.1 0.7				
目标函数值 f	1.122 7				
f_1 /万元	110.900 3				
f_2	0.088 9				
f_3 /(100 km/min)	0.065 4				
f_4 /h	20.622 2				

表 9 部分代表性权重系数下的最优规划结果
Table 9 Optimal planning under representative weight factors

接入系统节点	2	5	9	13	16	2	5	9	13	16
充电机个数	6	6	4	2	8	4	6	4	2	4
充电机功率/kW	60	60	30	40	60	60	30	30	40	60
权重 $[\alpha_d, \beta_d]$	0.25 0.25 0.25 0.25					0.7 0.1 0.1 0.1				
目标函数值 f	1.413 2					1.329 0				
f_1 /万元	115.020 1					91.454 4				
f_2	0.081 3					0.079 3				
f_3 /(100 km/min)	0.050 7					0.050 5				
f_4 /h	25.201 5					35.851 5				

4 结论

综合考虑充电站作为用电设施和公共服务设施两方面属性，搭建了充电站规划多目标优化模型，该模型除考虑充电站建设和系统运行的经济性以及电网供电质量之外，还兼顾用户充电的高质、便利性。采用超效率 DEA 评价方法确定各目标权重，把多目标问题转化为单目标问题，并运用动态自适应粒子群算法求解。

算例的仿真结果显示，采用本文方法所得充电站规划方案在满足充电可靠性的前提下，使用户得到了高质量的充电服务和较短的排队时间，且对配电网运行的稳定性、经济性和电能质量影响最小。

目前，我国处于 EV 迅速发展和智能电网建设的关键时期，将可再生能源与 EV 充电设施相结合协同规划研究作为下一步的研究方向。

参考文献

- [1] CAI H, CHEN Q, GUAN Z, et al. Day-ahead optimal charging/discharging scheduling for electric vehicles in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 93-107. DOI: 10.1186/s41601-018-0083-3.
- [2] LIU H, HUANG K, YANG Y, et al. Real-time vehicle-to-grid control for frequency regulation with high frequency regulating signal[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 141-148. DOI: 10.1186/s41601-018-0085-1.
- [3] 段庆, 孙云莲, 张笑迪, 等. 电动汽车充电桩选址定容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 88-93. DUAN Qing, SUN Yunlian, ZHANG Xiaodi, et al. Location and capacity planning of electric vehicles charging piles[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 88-93.
- [4] 丁丹军, 戴康, 张新松, 等. 基于模糊多目标优化的电动汽车充电网络规划[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 43-50. DING Danjun, DAI Kang, ZHANG Xinsong, et al. Network planning for electric vehicle charging based on fuzzy multi-objective optimization[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 43-50.
- [5] ZHENG Y, DONG Z Y, XU Y, et al. Electric vehicle battery charging/swap stations in distribution systems: comparison study and optimal planning[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 29(1): 221-229.
- [6] 宋志成, 王勋, 伦利, 等. 基于收益最大化的电动汽车充电站选址规划[J]. 华东交通大学学报, 2014, 31(1): 50-55. SONG Zhicheng, WANG Xun, LUN Li, et al. Site planning of EV charging stations based on the maximum profits[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2014, 31(1): 50-55.
- [7] PHONRATTANASAK P, LEEPRECHANON N. Optimal location of fast charging station on residential distribution grid[J]. International Journal of Innovation, Management and Technology, 2012, 3(6): 675-681.
- [8] 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 Wenfeng, LI Zhenping, CUI Xiaojie, et al. Research on location problem of electric vehicle charging station[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2016, 46(11): 187-194.
- [9] 刘洪, 李荣, 葛少云, 等. 基于动态车流模拟的高速公路充电站多目标优化规划[J]. 电力系统自动化, 2015,

- 39(24): 56-62.
LIU Hong, LI Rong, GE Shaoyun, et al. Multi-objective planning of electric vehicle charging stations on expressway based on dynamic traffic flow simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(24): 56-62.
- [10] 陈静鹏, 艾芊, 肖斐. 基于用户出行需求的电动汽车充电站规划[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 34-39.
CHEN Jingpeng, AI Qian, XIAO Fei. EV charging station planning based on travel demand[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 34-39.
- [11] 舒隽, 唐刚, 韩冰. 电动汽车充电站最优规划的两阶段方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 10-17.
SHU Jun, TANG Gang, HAN Bing. Two-stage method for optimal planning of electric vehicle charging station[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 10-17.
- [12] 葛少云, 李荣, 韩俊, 等. 考虑电动出租车随机概率行为特性的充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(4): 50-58.
GE Shaoyun, LI Rong, HAN Jun, et al. Charging station planning considering probability behavior characteristic of electric taxi[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(4): 50-58.
- [13] PAN Z J, ZHANG Y. A novel centralized charging station planning strategy considering urban power network structure strength[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 136: 100-109.
- [14] 王辉, 王贵斌, 赵俊华, 等. 考虑交通网络流量的电动汽车充电站规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 63-69.
WANG Hui, WANG Guibin, ZHAO Junhua, et al. Optimal planning for electric vehicle charging stations considering traffic network flows[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 63-69.
- [15] DONG X, MU Y, JIA H, et al. Planning of fast EV charging stations on a round freeway[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1452-1461.
- [16] CHENG S, CHEN M Y, WAI R J, et al. Optimal placement of distributed generation units in distribution systems via an enhanced multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2014, 15(4): 300-311.
- [17] 董晓红, 穆云飞, 于力, 等. 考虑配网潮流约束的高速公路快速充电站校正规划方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 124-131.
DONG Xiaohong, MU Yunfei, YU Li, et al. Freeway FCS planning and correction considering power-flow constraints of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 124-131.
- [18] 段豪翔, 吕林, 向月. 计及分时充电电价激励的电动汽车充电站与配电网协同规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(1): 103-110.
DUAN Haoxiang, LÜ Lin, XIANG Yue. Coordinated planning for electric vehicle charging station and distribution network considering time-of-use charging price[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(1): 103-110.
- [19] SHI L B, DING H L, XU Z. Determination of weight coefficient for power system restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 1140-1141.
- [20] 李渊博, 蒋铁铮, 陈家俊, 等. 采用超效率 DEA 的电动汽车充电站多目标规划[J]. 电源技术, 2016, 40(4): 849-851.
LI Yuanbo, JIANG Tiezheng, CHEN Jiajun, et al. Multi-objective programming of electric vehicle charging station using super efficiency data envelopment analysis[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(4): 849-851.
- [21] CHENG S, HU G, QIN T Y. Application of quorum sensing to PSO and MOPSO for convergence promotion[C] // Chinese Control and Decision Conference, May 31-June 2, 2014, Changsha, China: 1106-1110.

收稿日期: 2018-05-03; 修回日期: 2019-01-04

作者简介:

程 杉(1981—), 男, 通信作者, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制、微电网协调运行与优化、电动汽车充放电调度等; E-mail: hpucquyzu@ctgu.edu.cn

吴思源(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车充电站最优规划; E-mail: 13986793067@163.com

孙伟斌(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车有序充放电优化。E-mail: 13117272039@163.com

(编辑 周金梅)