

考虑客户满意度的电动汽车充电站运营状态评估

黄小庆, 杨 奔, 肖 波, 刘易珠, 曹一家

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 提出了一种考虑客户满意度的电动汽车充电站运营状态评估方法。首先运用 DS/G₂ 法将客户对电动汽车充电站语言服务评级和充电站运行状况信息进行证据融合, 以确定单个客户对某一电动汽车充电站的运营状态评估结果量化值; 然后引入证据冲突的概念, 对多个客户评估结果量化值的权重进行综合优化, 基于 D-S 证据理论融合多个客户的评估结果, 对多个充电站的运营水平进行比较。算例验证了该方法的可行性。

关键词: 电动汽车; 充电站; D-S 证据理论; 客户满意度; 运营状态; 评估

中图分类号: U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.016

0 引言

发展电动汽车产业是应对化石能源枯竭以及环境污染日趋严重的有效解决途径^[1]。电动汽车充电站是电动汽车配套设施的重要组成部分。未来大规模电动汽车的运行势必需要大量的电能供给场所提供支撑作用。目前对于电动汽车充电站的研究主要集中在电动汽车充电站规划^[2]、电动汽车充电站负荷建模^[3]、电动汽车充电站自动化管理^[4]、电动汽车充电站优化控制^[5]等方面, 较少从电动汽车充电站运营管理角度分析充电站的相关问题。对于电动汽车充电站运营机构(如电网公司、第三方代理公司等)提升营销服务水平、增强市场竞争力, 需要有效地评估充电站的运营状况, 保持充电站健康、高效运行。电动汽车充电站运营状态评估是提升充电站营销服务水平的前提。目前应用较多的综合评估方法主要有基于模糊数学理论的方法^[6]、基于概率统计学原理的方法^[7]和基于人工智能算法^[8]三大类。

电动汽车充电站运营尚处于起步阶段, 还没有相应的国家或行业标准和政策指导。在此背景下, 本文根据相关研究过程中获取的资料及经验, 提出了一种充电站运营状态评估的指标体系。考虑到电动汽车充电站的运营状况与客户服务质量有很大关系, 在指标体系中不仅考虑了充电站本身的运行状况, 也考虑到客户的服务满意度, 能更好地反映充电站的运营状况。

由于客户满意度评价具有主观性, 多个客户对多个充电站的评估问题, 属于不确定多属性群决策问题。D-S 证据理论在处理不确定性问题上具有显

著的优势^[9]。文献[10]针对不同属性下各方案的部分偏好集结问题, 将 D-S 证据理论与层次分析法(AHP)相结合, 提出了 DS/AHP。该方法能够较好地处理不确定多属性决策问题, 降低了主观因素的影响, 但是存在不足。由于 AHP 需要建立判断矩阵, 对于一个 n 阶矩阵, 仅建立判断矩阵就要进行 $n(n-1)/2$ 次的两两元素的比较判断, 计算量较大; 并且 AHP 的正确性是建立在判断矩阵是一致矩阵的基础上的, 而在实际应用中所建立的判断矩阵往往都不是一致矩阵^[11]。因此, 本文利用结合 D-S 证据理论及 G₂ 法的 DS/G₂ 法对充电站的运营状态进行评估, 与 DS/AHP 相比有较快的计算速度, 更加适用于工程应用。进一步地, 为了解决群决策过程中客户之间意见冲突的问题, 对各客户意见在评估过程中的权重进行了优化。

1 电动汽车充电站运营状态评估概述

1.1 充电站运营状态评估问题的描述

客户在电动汽车充电站运营状态评估过程中, 既要表达决策者(客户)对不同决策对象(充电站)上不同属性(指标)的偏好信息, 又要融合不确定情况下(如评价信息不完整)的评估结果。

设需要对 P 个充电站进行运营状态评估, 记为 $C=\{c_1, c_2, \dots, c_P\}$; 需要对 M 个技术指标进行评价, 记为 $Z=\{z_1, z_2, \dots, z_M\}$; 有 N 个客户参与评估, 记为 $E=\{e_1, e_2, \dots, e_N\}$ 。客户 $e_k(k=1, 2, \dots, N)$ 用一个语言评价等级给出对充电站 $c_i(i=1, 2, \dots, P)$ 在指标 $z_j(j=1, 2, \dots, M)$ 下的语言评价 $y_k(c_i, z_j)$ 。语言评价等级集合表示为 $Y=\{\text{优, 良, 中, 合格, 不合格}\}$ 。

1.2 充电站运营状态评估指标体系

由于目前针对电动汽车充电站运营相关的国家或行业标准及规范较少, 很多指标没有相关的规定。本文通过对现有电动汽车充电站的调研并参考相关文献资料^[12-14], 从电动汽车充电站的结构、功能角度,

收稿日期: 2014-02-26; 修回日期: 2014-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61104090); 国家科技计划支撑项目(2013BAA01B01)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61104090) and the National Key Technology R & D Program of China(2013BAA01B01)

分析影响充电站运营状态的主要因素。将充电站运营状态评估分成 3 个组成部分:可靠性、经济性及客户满意度。其中可靠性和经济性反映充电站本身的运行状态;客户满意度部分是充电站的营销服务指标,反映客户对充电站运营的评价。对于指标的确定,遵循了全面性、真实性、可操作性、合理性、开放性 & 可比较性等准则。

可靠性指标的二级指标主要考虑了充电站的 3 个主要组成部分,即供电系统、充电系统及辅助用电系统的可靠性。供电系统中主要考虑了配电变压器、配电线路及无功补偿装置可靠性;在充电系统中主要考虑了直流充电机、交流充电桩及电池更换装置的可靠性;辅助用电系统中主要考虑了监控、照明、计量、办公等系统的可靠性。

经济性指标的二级指标主要考虑了投资收益率、电能质量及能源利用率指标。投资收益率指充电站投资收益占投资成本的比率,反映充电站建设运营的经济效益;电能质量指标包括电压偏移、频率偏移、三相不平衡及谐波污染等;能源利用率指标指充电站的电能等能源的有效利用量占总的能源消耗的比率。

在客户满意度部分,将充换电等待时间、员工服务态度、收费合理度及售后服务质量作为考核指标,反映用户对充电站运营服务的评价。具有 3 个层次的电动汽车充电站运营状态评估指标体系如图 1 所示。该体系包含 1 个目标层即运营状态评估,3 个准则层即可靠性、经济性和客户满意度,以及因素层 10 个指标。该指标体系能够较真实、全面地反映电动汽车充电站的运营水平。

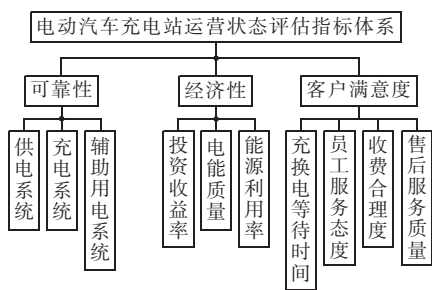


图 1 充电站运营状态评估指标体系

Fig.1 Index system of operating state evaluation for charging station

对于指标体系中各个指标的具体评价方法,限于篇幅,本文未详细说明。针对充电站中各个指标的状态评价,可以借鉴现有研究的一些成果,例如对于充电站供电系统的可靠性评价,可以参考牵引供电系统可靠性研究的一些成果^[15-16]进行计算和评价。

1.3 充电站运营状态评估流程

充电站运营状态评估的流程如图 2 所示。具体步骤描述如下:

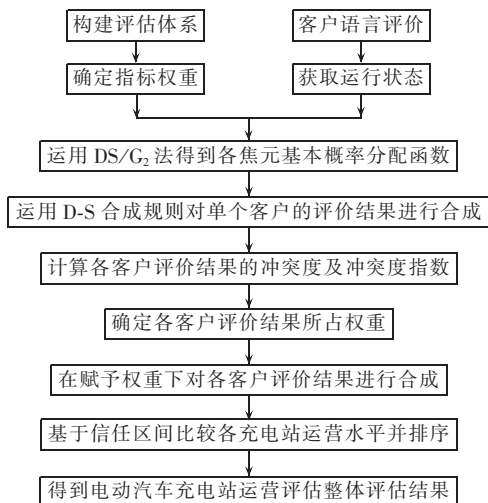


图 2 充电站运营状态评估流程图

Fig.2 Flowchart of operating state evaluation for charging station

- 客户对各充电站的客户满意度指标进行评价;
- 通过充电站状态监测系统,获取充电站运行状况;
- 基于 DS/G₂ 法合成单个客户对所有充电站所有运营状态评估指标的评价结果的量化值;
- 对多个客户的评估结果进行权重优化;
- 运用 D-S 证据理论的合成规则合成多个客户的评价结果的量化值,得到所有充电站整体评估结果的优劣比较。

2 基于 DS/G₂ 法的充电站个体评估

2.1 D-S 证据理论的基本概念

D-S 证据理论是一种广义的贝叶斯推理方法。其基本思想是:将证据集合划分成多个不相关的部分,然后基于证据合成规则,用一个抽象证据聚焦多个具体证据的共同支持点。证据理论已经逐步发展为一种重要的不确定性推理方法。

在 D-S 证据理论中,定义人们所认识到的可能结果的集合为识别框架,用 Θ 表示;将 Θ 内任意子集称为一个焦元,用 β 表示;对 Θ 内任意 β 的精确信任程度用基本概率分配函数 $m(\beta)$ 表示。对于 D-S 证据理论的详细内容可参考文献^[17]。

2.2 G₂ 法的基本概念

设客户在评价指标集 $\{z_i\} (i=1,2,\dots,M)$ 中挑选出他认为最(不)重要的一个指标作为唯一参照物,记为 z_{im} 。将 M 个指标 $z_1, z_2, \dots, z_M$ 重新标记为 $z_{i_1}, z_{i_2}, \dots, z_{i_M}$, 其中 z_{i_t} 为 $\{z_i\}$ 中的某一个指标。

设客户根据有关信息对评价指标 z_{i_t} 与指标 z_{i_M} 关于某准则的重要性程度之比 r_{tM} 做出理性判断^[11], 即令:

$$r_{tM}=a_t \quad t=1,2,\dots,M-1 \quad (1)$$

其中, $a_i > 0; a_M = 1$ 。

当 a_i 赋值准确时, 评价指标 z_i 的权重系数 x_i 为:

$$x_i = a_i / \sum_{i=1}^M a_i \quad i = 1, 2, \dots, M \quad (2)$$

2.3 基于 DS/G₂ 法的单个客户评估过程

客户 $e_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 根据指标 $z_1, z_2, \dots, z_M$ 对充电站 $c_1, c_2, \dots, c_P$ 做出偏好判断。

DS/G₂ 法应用的基本步骤如下。

a. 用 G₂ 法确定评估指标的权重。

b. 将客户对所有充电站运营状态评估指标的集合评价结果的集合作为识别框架 Θ 。

c. 将不同指标下的决策与识别框架 Θ 进行比较, 并按表 1 给出的语言评价等级进行评价。语言评价等级的量化值采用两级比例法^[18]并参考文献[10]确定。

表 1 语言评价等级及量化值

Table 1 Levels of linguistic assessment and corresponding quantified evaluations

评价等级	量化值	归一化值	评价等级	量化值	归一化值
优	9	0.36	合格	3	0.12
良	7	0.28	不合格	1	0.04
中	5	0.20			

d. 令 β_k 表示客户 e_i 在指标 z_j 下的第 k 个决策 (即焦元), β_k 由 $\{c_1, c_2, \dots, c_P\}$ 及其子集构成, 用 n 表示焦元的数量。 b_k 表示 β_k 与识别框架 Θ 比较的评价等级量化值的归一化值, 如表 1 所示。 q_{ij} 表示客户 e_i 下指标 z_j 的权重, 由 G₂ 法求得。

$$\sum_{j=1}^M q_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

根据 G₂ 法, 将识别框架 Θ 选为唯一参照物, 令 $a_i = b_k q_{ij}$, 代入式 (2), 将求得的价值作为客户 e_i 对指标 z_j 各个决策 (即焦元) 的基本概率分配函数值:

$$m_{ij}(\beta_k) = \frac{b_k q_{ij}}{\sum_{i=1}^n b_i q_{ij} + 1} \quad (4)$$

若客户对某指标未给出评价等级信息, 则将未知信息归入 Θ 中, 焦元 Θ 的基本概率分配函数值:

$$m_{ij}(\Theta) = 1 - \sum_{k=1}^n m_{ij}(\beta_k) \quad (5)$$

e. 将不同指标下的评估信息视为相互独立的证据, 对不同指标下焦元的基本概率分配函数用 Dempster 规则合成^[17], 得到一个客户在综合指标下的基本概率分配函数。合成公式为:

$$m_i(\beta_k) = \begin{cases} 0 & \beta_k = \emptyset \\ \frac{\sum_{\beta_1 \cap \beta_2 \cap \beta_3 \dots \beta_s = \beta_k} [m_{ij}(\beta_k) m_{ip}(\beta_l) m_{iq}(\beta_s) \dots]}{1 - k} & \beta_k \neq \emptyset \end{cases} \quad (6)$$

其中, 要求 k 满足:

$$k = \sum_{\beta_1 \cap \beta_2 \cap \beta_3 \dots \beta_s = \emptyset} [m_{ij}(\beta_k) m_{ip}(\beta_l) m_{iq}(\beta_s) \dots] < 1 \quad (7)$$

对于多个证据的合成, 合成顺序不受影响。

通过上述方法, 即可完成单个客户对各个充电站的运营状态评估。

3 电动汽车充电站整体运营状态评估

在上节介绍单个客户对各充电站运营状态评估过程后, 本节介绍融合各个客户意见的充电站整体运营状态评估。

3.1 充电站整体运营状态评估流程

在对多个客户的评估信息 (即各焦元的基本概率分配函数) 赋予权重之后, 再利用式 (6) 所列的 D-S 证据合成规则进行合成, 就可得到综合所有客户意见及各个充电站所有指标的评价结果; 最后, 引入 D-S 证据理论中信任区间^[19]的概念对各充电站的运营水平进行优劣比较。

3.2 客户评价冲突的度量

由于客户之间在知识范畴、工作领域和判断方法等方面存在差异, 可能导致客户在进行评价过程中产生不一致的甚至相悖的评估结果, 导致整体的评估结果受到很大的影响。因此需要解决客户之间评价结果的一致性。本文利用冲突度分析法^[19]来反映客户之间意见的冲突程度。

定义任意 2 个客户 e_i 和 e_j 之间的冲突度 k_{ij} 为:

$$k_{ij} = \sum_{\beta_k \cap \beta_l = \emptyset} m_i(\beta_k) m_j(\beta_l) \quad (8)$$

冲突度向量表示为:

$$\mathbf{k}_i = (k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{iN}) \quad (9)$$

其中, β_k 和 β_l 分别为客户 e_i 和 e_j 在单一客户评估结果中的焦元。

从该冲突度的定义可以看出, 证据合成过程中相互独立的焦元之间才会产生冲突。相互独立焦元的基本概率分配函数值越大, 证据间的冲突程度越大。

综合单个客户与其他客户间的冲突度, 得到衡量单个客户与群体间评价冲突程度的冲突度指数向量为:

$$\boldsymbol{\varphi} = (\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_i, \dots, \varphi_N) \quad (10)$$

$$\varphi_i = f(k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{iN}) \quad (11)$$

$$f(k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{iN}) = \sum_{j=1}^N \omega_j b_{ij} \quad (12)$$

其中, f 为 OWA 算子^[20]; ω_j 为与 f 相关联的加权向量 $\boldsymbol{\omega}$ (即下文中的位置权向量) 的第 j 个元素; b_{ij} 为集合 $\{k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{iN}\}$ 中第 j 大的元素。

3.3 多客户评价结果融合的权重优化

多个客户的评价结果冲突时, 应该遵循“少数服从多数”的原则, 才能得到较为准确的整体评价结果。因此, 赋予冲突度指数较大的客户评价结果较小的权重, 而赋予冲突度指数较小的评价结果较大的权重。

基于这种思想,引入位置权向量 ω 作为式(12)中的加权向量来体现采纳大多数人意见的群组评价思想,计算公式如下:

$$\omega=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_i,\cdots,\omega_N)$$

(13)

$$\omega_i=Q\left(\frac{i}{N}\right)-Q\left(\frac{i-1}{N}\right)$$

(14)

其中, $0\leq\omega_i\leq 1, \sum_{i=1}^N \omega_i=1; Q(r)=\sqrt{r}$ 为模糊语义量化算子, $r\in[0,1]$ 。

设 $\omega_{\max}=\max\{\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_N\}$, 得相对权重向量 $\omega^*=(\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_N)/\omega_{\max}$; 进而得到证据的基本概率分配值的“折扣率” $\alpha_i=\omega_i/\omega_{\max}(i=1,2,\cdots,N)$ 。利用折扣率调整客户的基本概率分配值:

$$m_i^*(\beta_k)=\alpha_i m_i(\beta_k) \quad k=1,2,\cdots,n$$

(15)

$$m_i^*(\Theta)=1-\sum_{k=1}^n m_i^*(\beta_k)$$

(16)

根据客户 e_i 的冲突度指数 φ_i 的大小,将折扣率最小的值赋予冲突度指数最大的客户,依此类推。

3.4 充电站整体运营状态评估方法

在对评价结果的分析过程中,引入 D-S 证据理论中信任区间的概念来进行优劣比较。 $[B_{cl}(c_i),P_{ls}(c_i)]$ 表示认可充电站 c_i 的运营水平的信任区间,其中, $B_{cl}(c_i)$ 、 $P_{ls}(c_i)$ 分别称为信度函数和似真函数。其定义分别为:

$$B_{cl}(c_i)=\sum_{\beta\subseteq c_i} m(\beta) \quad \forall \beta, c_i\subseteq \Theta$$

(17)

$$P_{ls}(c_i)=\sum_{\beta\cap c_i\neq\emptyset} m(\beta) \quad \forall \beta, c_i\subseteq \Theta$$

(18)

由定义可以看出,信度函数 $B_{cl}(c_i)$ 反映了证据支持充电站 c_i 运营水平的精确信度的总和;似真函数 $P_{ls}(c_i)$ 反映了证据不否定充电站 c_i 的运营水平的信度总和。

对于充电站集合 $\{c_1,c_2,\cdots,c_p\}$ 中任意 2 个充电站 c_i,c_j , 设其信任区间分别为 $[B_{cl}(c_i),P_{ls}(c_i)]$ 和 $[B_{cl}(c_j),P_{ls}(c_j)]$, 则充电站 c_i 优于充电站 c_j 的程度表示为式(19)。

$$P(c_i>c_j)=\frac{\max[0,P_{ls}(c_i)-B_{cl}(c_j)]-\max[0,B_{cl}(c_i)-P_{ls}(c_j)]}{[P_{ls}(c_i)-B_{cl}(c_i)]+[P_{ls}(c_j)-B_{cl}(c_j)]}$$

(19)

其中, $P(c_i>c_j)\in[0,1]$ 。

当 $P(c_i>c_j)>0.5$ 时,表示充电站 c_i 的运营水平优于充电站 c_j ; 当 $P(c_i>c_j)<0.5$ 时,表示充电站 c_j 的运营水平优于充电站 c_i ; 当 $P(c_i>c_j)=0.5$ 时,表示充电站 c_i 与充电站 c_j 的运营水平相当。

4 算例分析

利用本文所提出的电动汽车充电站运营状态评估方法,以 3 位客户对 4 个电动汽车充电站 10 项运营状态指标的语言评价信息及充电站运行状态为基础,进行综合运营状态评估。

客户的语言评价信息及充电站运行状态如表 2 所示。从该表可以看出,客户对各个充电站的运营状态指标的评价结果不尽相同,部分指标评价结果差距很大;而且有部分指标没有给出评价信息。

首先由客户利用 G_2 法确定各指标的权重,3 位客户确定的权重如表 3 所示;然后以客户 e_1 为例介绍客户对 4 个充电站的运营状态评估过程。

由表 2,客户 e_1 评价时,4 个充电站“供电系统”可靠性分别为 2 个“优”、1 个“良”、1 个“中”的评价。根据式(4)、(5)将相同评价结果的充电站归入一个焦元 β_k , 得到:

$$m_{11}(\{c_1,c_3\})=0.0671, \quad m_{11}(\{c_4\})=0.0522$$

$$m_{11}(\{c_2\})=0.0373, \quad m_{11}(\Theta)=0.8434$$

同理,可以得到客户 e_1 评价时其他指标评价情况下焦元的基本概率分配函数值。然后将 10 个指标下的焦元的基本概率分配函数用式(6)进行合成。合成后的结果为:

$$m_1(\{c_1\})=0.0473, \quad m_1(\{c_2\})=0.0693$$

$$m_1(\{c_3\})=0.0072, \quad m_1(\{c_4\})=0.1144$$

$$m_1(\{c_1,c_3\})=0.0971, \quad m_1(\{c_3,c_4\})=0.0039$$

$$m_1(\{c_2,c_3\})=0.0387, \quad m_1(\{c_2,c_4\})=0.0213$$

表 2 客户语言评价信息及充电站设备运行状态等级

Table 2 Information of customers' linguistic assessment and operating state levels of charging station equipment

指标	e ₁ 评价信息				e ₂ 评价信息				e ₃ 评价信息			
	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄
供电系统	优	中	优	良	中	优	良	中	良	良	优	中
充电系统	*	合格	中	中	合格	合格	良	良	中	不合格	良	良
辅助用电系统	良	良	良	中	中	良	*	良	良	*	良	中
投资收益率	中	优	优	*	良	良	中	中	良	中	*	中
电能质量	良	*	良	优	良	中	中	优	良	中	合格	良
能源利用率	合格	良	合格	中	不合格	中	合格	中	中	良	中	良
充换电等待时间	中	中	中	合格	合格	合格	良	*	中	合格	优	合格
员工服务态度	良	合格	合格	中	优	中	中	中	*	不合格	良	中
收费合理度	合格	中	*	中	*	中	中	合格	中	合格	中	中
售后服务质量	中	良	中	良	中	中	良	良	合格	良	合格	良

注: * 表示未获得评价信息。

表 3 客户对电动汽车充电站运营状态评估指标的权重

Table 3 Weights of customers' evaluations for different operating state indexes of EV charging station

指标	权重		
	e_1	e_2	e_3
供电系统	0.221	0.184	0.208
充电系统	0.033	0.043	0.025
辅助用电系统	0.012	0.024	0.032
投资收益率	0.142	0.126	0.163
电能质量	0.133	0.167	0.183
能源利用率	0.184	0.202	0.230
充换电等待时间	0.023	0.034	0.017
员工服务态度	0.105	0.021	0.132
收费合理度	0.072	0.099	0.005
售后服务质量	0.075	0.100	0.005

$$m_1(\{c_1, c_2, c_3\}) = 0.0047, \quad m_1(\Theta) = 0.5959$$

同样地对于客户 e_2, e_3 计算方法相同,限于篇幅,本文不再罗列。

根据 3 位客户评价时的评估信息(即上文合成得到的基本概率分配函数值),利用式(8)、(9)计算客户间的冲突度向量得到:

$$k_1 = (0, 0.0360, 0.0382)$$

$$k_2 = (0.0360, 0, 0.0361)$$

$$k_3 = (0.0382, 0.0361, 0)$$

进而根据式(10)——(12)得到冲突度指数向量为:

$$\varphi = (0.03066, 0.02945, 0.03069)$$

由此可知,客户 e_3 与整体的评估结果冲突最大,客户 e_2 与整体的评估结果一致度最高。分别对 3 位客户的评估结果进行权重优化,权重向量及折扣率由式(13)——(16)计算得,结果如表 4 所示。

表 4 各客户评价结果的权重优化
Table 4 Optimized weights of customers' evaluations

客户	权重	折扣率
e_1	0.2391	0.4141
e_2	0.5774	1
e_3	0.1835	0.3178

对赋权重后的 3 位客户的评估结果再次运用式(6)进行合成,得到充电站运营状态的整体评估结果。运用式(17)、(18),求得各充电站信任区间分别是: c_1 为 $[0.0678, 0.6341]$, c_2 为 $[0.0781, 0.6688]$, c_3 为 $[0.0809, 0.6572]$, c_4 为 $[0.0966, 0.6697]$ 。运用式(19)对各充电站进行优劣比较,得到比较结果为:

$$c_4 > c_2 > c_3 > c_1$$

由此可以得到,充电站 c_4 最优,充电站 c_2, c_3 次之,充电站 c_1 最差。应当以充电站 c_4 明显趋优的指标为标准对充电站 c_1, c_2, c_3 进行运营优化,以提高充电站的运营水平。

5 结论

为指导电动汽车充电站营销服务,本文提出了一种考虑客户满意度的充电站运营状态评估方法。算例分析表明,该方法不仅能够对多个充电站运营状态的各个指标进行快速评估,并且在评价信息不完整的情况下较好地融合多个客户的评价意见,得到一个可信度高的综合评估结果。该方法具有一定的实际应用价值。在充电站的服务网络中,不同的充电站其运营水平具有差异。无论从充电站运营方、客户还是电网公司的角度,通过对充电站的运营状态进行综合评估,对于为充电站运营方提供决策指导、提高客户服务质量、减小对电网的冲击等都具有重要意义。随着电动汽车产业的发展,充电站的运营状态评估指标及评估标准还需根据国家后续出台的相关标准和政策进行相应的调整及优化。

参考文献:

- [1] BOULANGER A G, CHU A C, MAXX S, et al. Vehicle electrification: status and issues[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(6): 1116-1138.
- [2] 冯超,周步祥,林楠,等. Delphi 和 GAHP 集成的综合评价方法在电动汽车充电站选址最优决策中的应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 25-29.
FENG Chao, ZHOU Buxiang, LIN Nan, et al. Application of comprehensive evaluation method integrating Delphi and GAHP in optimal siting of electric vehicle charging station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 25-29.
- [3] 张振夫,黄小庆,曹一家,等. 考虑分时电价的电动汽车负荷计算[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 24-29.
ZHANG Zhenfu, HUANG Xiaoqing, CAO Yijia, et al. Charging load calculation considering TOU for electric vehicles[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 24-29.
- [4] 刘玉娇,蒋传文,王旭,等. 采用随机约束和多目标算法的电动汽车换电站能量管理[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 59-63.
LIU Yujiao, JIANG Chuanwen, WANG Xu, et al. Energy management with stochastic constraint and multi-objective optimization algorithm for electric vehicle battery swap station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 59-63.
- [5] 阳岳希,胡泽春,宋永华. 电动公交充电站的优化运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 35-42.
YANG Yuexi, HU Zechun, SONG Yonghua. Research on optimal operation of battery swapping and charging station for electric buses[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 35-42.
- [6] FARGHAL S A, KANDIL M S, ELMITWALLY A. Quantifying electric power quality via fuzzy modeling and analytic hierarchy proceedings[J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(1): 44-49.
- [7] 熊以旺,程浩忠,王海群,等. 基于改进 AHP 和概率统计的电能质量综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 48-52.
XIONG Yiwang, CHENG Haozhong, WANG Haiqun, et al. Synthetic evaluation of power quality based on improved AHP and probability statistics[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 48-52.

- [8] 张蔓,林涛,曹健,等. 2 种电能质量评估方法的分析比较[J]. 电力系统自动化,2008,32(21):37-40.
ZHANG Man,LIN Tao,CAO Jian,et al. A comparative study on two methods for synthetic evaluation of power quality[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(21):37-40.
- [9] DEMPSTER A P. Upper and lower probabilities induced by a multivalued mapping[J]. Annals of Mathematical Statistics,1967,38(2):325-339.
- [10] BEYNON M J. DS/AHP method;a mathematical analysis,including an understanding of uncertainty[J]. European Journal of Operational Research,2002,140(1):148-164.
- [11] 郭亚军. 综合评价理论与方法[M]. 北京:科学出版社,2002:34-56.
- [12] 王倩. 电动汽车充电站对电网的影响与运营经济性研究[D]. 济南:山东大学,2012.
WANG Qian. Influence of electric vehicle charging station on power grid and operation economy study[D]. Ji'nan:Shandong University,2012.
- [13] 栾卫. 飞轮储能式电动汽车充电站关键技术研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2011.
LUAN Wei. Research on key techniques of EV charging station with flywheel energy storage system[D]. Hangzhou:Zhejiang University of Technology,2011.
- [14] 胡勇,郭子健,刘奇峰,等. 基于 IEC61970/61850 的电动汽车充电站监控系统建模方案[J]. 电力系统自动化,2012,36(13):91-96.
HU Yong,GUO Zijian,LIU Qifeng,et al. Modeling scheme of supervisory control system for electric vehicle charging station based on IEC61970 and IEC61850[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(13):91-96.
- [15] 陈绍宽,毛保华,何天健,等. 基于事故树分析的铁路牵引供电系统可靠性评价[J]. 铁道学报,2006,28(6):123-129.
CHEN Shaokuan,MAO Baohua,HE Tianjian,et al. Reliability evaluation of railway traction power systems by fault tree analysis[J]. Journal of the China Railway Society,2006,28(6):123-129.
- [16] 谢将剑,吴俊勇,吴燕. 牵引供电系统可靠性建模方法[J]. 交通运输工程学报,2008,8(5):23-26.
XIE Jiangjian,WU Junyong,WU Yan. Modelling method for reliability of traction power supply system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2008,8(5):23-26.
- [17] SHAFFER G. A mathematical theory of evidence[M]. Princeton, USA:Princeton University Press,1976:56-130.
- [18] 李荣均. 模糊多准则决策理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2002:24-30.
- [19] 何禹清,彭建春,毛丽林,等. 考虑客户不同需求的电能质量综合评估[J]. 电力系统自动化,2010,34(12):48-51.
HE Yuqing,PENG Jianchun,MAO Lilin,et al. Comprehensive evaluation of power quality considering customer demands[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(12):48-51.
- [20] YAGER R R. Quantifier guided aggregation using OWA operators[J]. International Journal of Intelligent Systems,1996,11(1):49-73.

作者简介:



黄小庆

黄小庆(1981—),女,湖南岳阳人,讲师,博士,主要研究方向为电动汽车与电网互动、智能变电站、电力信息集成(E-mail: huang_xq@126.com);

杨 夯(1990—),男,山东泰安人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充电站规划以及运营技术(E-mail: yh19901018@126.com);

肖 波(1989—),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向为电动汽车充电站规划。

Operating state evaluation considering customer satisfaction for electric vehicle charging station

HUANG Xiaoqing, YANG Hang, XIAO Bo, LIU Yizhu, CAO Yijia

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: A method of operating state evaluation considering customer satisfaction is presented for EV (Electric Vehicle) charging station. The evidences of an EV charging station, such as its operating states and the linguistic assessments of its services by a customer, are integrated based on the DS/G₂ method for obtaining his quantified evaluation of its operating states. The concept of evidence conflict is introduced to synthetically optimize the weights of various customers' evaluations. Multiple customers' evaluations are fused based on the D-S evidence theory for comparing the operational level among multiple charging stations. The feasibility of the proposed method is verified by the example.

Key words: electric vehicles; charging station; D-S evidence theory; customer satisfaction degree; operating state; evaluation