

基于因子回归分析和分层雷达图法的 电动汽车运行状态评估

蒲松林¹,周念成²,郭胤¹,王强钢²,张静³,李题印³

(1. 国网四川省电力公司遂宁供电公司,四川 遂宁 629000;

2. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044;

3. 国网浙江杭州市余杭区供电公司,浙江 杭州 311100)

摘要: 为优化电动汽车的检修策略,有必要利用监测数据对其运行状态进行综合评估。选取蓄电池、电机传动和充放电过程的26个特征量作为电动汽车运行状态指标,利用因子分析法提取指标的公共因子,利用公共因子间的独立性对电动汽车状态指标进行分类;再结合逐步回归分析对各个分类的指标进行筛选,删除对评估结果影响小的指标,由此建立电动汽车运行状态综合评估指标体系。将针对电动汽车评估的层次递阶结构,采用分层雷达图法对电动汽车运行状态进行综合评估。根据某电动公交车充电站的监测数据进行计算,结果表明所提方法能够反映电动汽车各组成部分及整体运行状态,所提出的评估模型和方法是正确和有效的。

关键词: 电动汽车; 状态评估; 指标选择; 特征量; 因子分析; 雷达图

中图分类号: TM 61;U 469.72

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.06.007

0 引言

电动汽车在促进节能减排、降低运行费用和推广新能源利用等方面,具有常规汽车不可比拟的优势^[1]。电动汽车的大量普及,会对电网安全稳定运行产生影响,同时也将给电动汽车的检修和维护带来困难^[2-3]。相比于常规汽车,电动汽车蓄电池、电动机等的状态易受到复杂工况的影响,适时准确地监测和评估电动汽车的运行状态,有助于故障的及时发现和处理,对优化电动汽车的检修策略具有重要意义。但目前电动汽车运营管理尚处于起步阶段,亟需建立电动汽车运行状态综合评估体系,为电动汽车检修维护计划的制定提供指导。

电动汽车运行工况具有时间和空间双重属性的不确定性,这使得其经常在多种工作模式之间切换,特别是混合动力电动汽车有电量消耗、电量保持和充电3种模式,导致电动汽车各机构运行性能的相关性和随机性更加显著。针对电动汽车的运行监测分析,文献[4-6]分别从电动汽车行驶状态^[4]、动力电池状态^[5]、电池能量管理^[6]等方面设计在线监测系统,但缺少有效的电动汽车综合评估方法,无法对其运行状态进行及时评估。电机传动和动力电池是电动汽

车开发的2个核心部件,文献[7]和文献[8]分别针对动力电池、电机驱动提出2个单项性能的评价方法,但仅可用于电动汽车研发时的方案设计,无法对电动汽车实时状态进行评估;文献[9]从客户满意度的角度提出充电站运营状态评估方法;文献[10]则评估配电网接入充电站的承载能力。目前鲜见通过监测数据对电动汽车进行状态评估的研究,仅文献[11]利用支持向量机对燃料电池汽车健康状况进行诊断,但只是主观给出了评价指标,未对指标进行分类筛选,所建评价模型不能有效反映其运行状态,也无法用于纯电动汽车和混合动力电动汽车的状态评估。基于神经网络、模糊评判、灰色关联和物元理论等综合评判法已逐渐应用于变压器、发电机等电气设备的状态评估和检修决策,但是这些方法在实际应用时仍存在指标冗余、无法进行可视化显示和权值不合理等问题。

基于可视化技术的电动汽车状态综合评估不仅可直观显示各指标之间的关系,还可以图形方式引导检修决策,其须解决多个指标的分类降维处理和评估结果的图形化显示^[12]。本文针对蓄电池、电机传动和充放电过程选取能全面、客观反映电动汽车状态的指标,利用因子分析法对指标进行分类,采用逐步回归剔除评估体系中贡献率小的指标,建立电动汽车运行状态综合评估指标体系;利用分层雷达图法对电动汽车运行状态进行评估,将不同层级的电动汽车多维状态指标直观地表示在雷达图平面。通过某电动公交车充电站的实测数据,验证本文所建立的评估模型和方法的正确性和有效性。

收稿日期:2014-08-10;修回日期:2015-05-14

基金项目:输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512711209);国家自然科学基金资助项目(51277184)

Project supported by the Scientific Research Foundation of State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology(2007DA10512711209) and the National Natural Science Foundation of China(51277184)

1 电动汽车运行状态指标选取及计算

1.1 电动汽车运行状态指标选取

电动汽车的电气部分结构如图 1 所示,包含功率变换器、蓄电池组和电动机等部件。通过车载或非车载充电机为蓄电池组充电,再由蓄电池组为电动汽车提供动力,并为车内其他负载提供能量,图中影响电动汽车运行性能的主要为蓄电池及其变换器、电动机及其变换器 2 个部分。将电动汽车分为蓄电池组、电动机和充电机 3 个模块,根据电动汽车运行过程中每个模块的状态特征,选取能分别反映每个模块的状态指标,由此构成电动汽车运行状态的 26 个指标,如表 1 所示。

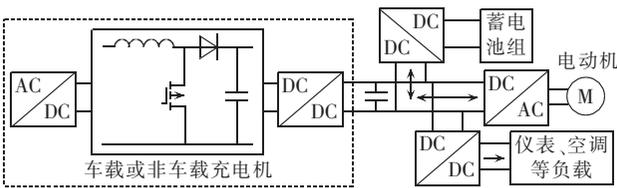


图 1 电动汽车电气结构图

Fig.1 Electrical structure of electric vehicle

表 1 电动汽车运行状态指标

Table 1 Operating status indexes of electric vehicle

序号	指标	名称	序号	指标	名称
1	v_1	充电电压偏差	14	v_{14}	电池终止电压
2	v_2	充电频率偏差	15	v_{15}	持续放电时间
3	v_3	充电电压闪变	16	v_{16}	电池输出功率
4	v_4	充电电压不平衡度	17	v_{17}	自放率
5	v_5	充电电压波动	18	v_{18}	电池循环寿命系数
6	v_6	充电功率因数	19	v_{19}	电池温度匹配系数
7	v_7	充电电流谐波	20	v_{20}	初始 SOC 匹配系数
8	v_8	能量损耗	21	v_{21}	电池电压匹配系数
9	v_9	放电效率	22	v_{22}	电机温度
10	v_{10}	单位里程能耗	23	v_{23}	平均故障间隔里程
11	v_{11}	放电深度	24	v_{24}	最高车速
12	v_{12}	充放电次数	25	v_{25}	行驶里程
13	v_{13}	电池组容量	26	v_{26}	电机过载系数

表 1 中,1~7 项为充电机模块指标,8~21 为蓄电池组模块指标,22~26 为电机模块指标。表 1 中部分指标可直接由电动汽车电池管理和充电站监测系统的测量数据得到,另一部分指标则需测量数据进一步计算。指标向量 $V=[v_1, v_2, \dots, v_{26}]^T$ 中,直接测量的指标包括 v_1 至 $v_9, v_{11}, v_{12}, v_{14}$ 至 v_{17}, v_{22} 至 v_{25} 共 19 项,其余 7 项将通过计算得到。下面将给出各项指标的计算方法。

1.2 电动汽车运行状态指标计算

a. 单位里程能耗 v_{10}

纯电动汽车(BEV)的能耗仅由蓄电池组提供,而对于混合动力电动汽车(HEV),其能耗由电能消耗与燃油消耗构成。HEV 的单位里程能耗为:

$$V_b = V_b + V_f = \frac{3600 E_b}{D_f Q_f \eta_e \eta_g} + V_f \quad (1)$$

其中, V_f 和 V_b 分别为单位里程的燃油消耗和电能的等效燃料消耗; V_b 为 HEV 单位里程综合能耗,对于纯电动汽车仅需考虑电能消耗部分; E_b 为单位里程的电能消耗,需转换至燃料消耗量^[13]; D_f 为燃料密度; Q_f 为燃料燃烧的低热值; η_e 和 η_g 分别为发动机和发电机的平均工作效率。在每次充电时不一定充满,则 E_b 为:

$$E_b = \sum_{i=0}^n (SOC_i \times C \times U_i - SOC'_{i+1} \times C \times U'_{i+1}) \quad (2)$$

其中, n 为单位里程的等效充电次数; SOC_i 和 U_i 分别为第 i 次充电后的电池荷电状态和电压; SOC'_{i+1} 和 U'_{i+1} 分别为第 $i+1$ 次充电前的电池荷电状态和电压(2 次充电时段内汽车可能行驶耗电使 $SOC_i \geq SOC'_{i+1}$)。

单位里程的燃油消耗量 V_f 为^[14]:

$$V_f = \frac{k}{100D} (0.866 M_{HC} + 0.429 M_{CO} + 0.273 M_{CO_2}) \quad (3)$$

其中, D 为 15℃ 试验燃料密度; M_{HC} 、 M_{CO} 和 M_{CO_2} 分别为碳氢、一氧化碳和二氧化碳排放量; 常数 k 取 0.1154(汽油机)或 0.1155(柴油机)。

b. 电池组容量 v_{13}

设电池组的最大和最小放电电流分别为 I_1 和 I_2 , 对应的放电时间分别为 t_1 和 t_2 。在任意放电电流下, 电池放电电流 I 与放电时间 t 满足 Peukert 方程^[15]:

$$\begin{cases} I^h t = I_1^h t_1 = I_2^h t_2 \\ h = \frac{\lg(t_2/t_1)}{\lg(I_1/I_2)} \end{cases} \quad (4)$$

则在不同放电电流 I 下的电池组容量为:

$$C = I_1^h t_1 I^{(1-h)} \quad (5)$$

c. 电池循环寿命系数 v_{18}

电池循环寿命与充电深度相关,需要考虑不同放电深度下电池循环寿命差异。因此,将电池在不同充放电深度 d 的充放电次数 $N(d)$, 等效为完全放电条件下的充放电次数 $\mu(d)$ ^[16], 再累计电池的历史等效充放电次数, 得到电池循环运行寿命系数 ρ 。设电池充放电次数为 g , 对应放电深度为 d_1, d_2, \dots, d_g , 则电池循环运行寿命系数为:

$$\rho = \frac{1}{N(1)} \sum_{k=1}^g \mu(d_k) = \frac{1}{N(1)} \sum_{k=1}^g \frac{N(1)}{N(d_k)} \quad (6)$$

其中, 放电深度 $d \in [0, 1]$; $N(1)$ 为 $d=1$ 时电池的最大循环次数。

d. 电池匹配系数 v_{19}, v_{20} 和 v_{21}

电池匹配系数是指电动汽车单体电池电压、温度、初始状态等参数的不一致性,其值为电池组单体电池的温度(或初始荷电状态、电压)标准差与均值的比值,单体电池匹配系数包括电池温度匹配系数 v_{19} 、初始荷电状态匹配系数 v_{20} 和电池电压匹配系数

v_{21} 。电池匹配系数 ϕ 的计算式为:

$$\phi = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{cell}}} (\theta_i - \bar{\theta})^2}{\bar{\theta}}} \quad (7)$$

其中, n_{cell} 为蓄电池组中单体电池个数; θ_i 为第 i 个单体电池的温度(或初始荷电状态、电压); $\bar{\theta}$ 为单体电池温度(或初始荷电状态、电压)的平均值。

e. 电机过载系数 v_{26} 。

电动汽车在启动、突然加速的情况下,电动机容易过载,其过载系数 φ 为电动机最大加速转矩与额定转矩的比值^[17]:

$$\varphi = \frac{T_{\text{max}}}{T_N} = \frac{3U^2}{2\Omega_s T_N (X_{1\sigma} + X_{2\sigma})} \quad (8)$$

其中, T_N 和 T_{max} 分别为电动机的额定转矩和最大加速转矩; U 为电动机输入电压; Ω_s 为同步角速度; $X_{1\sigma}$ 和 $X_{2\sigma}$ 分别为电动机定子和转子漏抗。

利用状态特征指标值可得到蓄电池、电动机等不同模块的运行状态,也可通过综合评估得到电动汽车的整体性能。由于电动汽车不同模块之间以及同一模块的指标本身存在相关性,这将严重影响整体运行状态的评估效果。因此,需重新对表中给出的电动汽车状态指标集分类和筛选,建立电动汽车状态综合评估指标体系,并对其运行状态进行评估。

2 基于因子回归分析的电动汽车运行状态指标分类和筛选

2.1 电动汽车运行状态指标分类

考虑到电动汽车运行状态的各指标具不同的量纲和变化趋势,指标间不具有可比性,需将逆向化(指标越小越好)和适度(指标越接近某个值越好)指标转化为正向指标,再对各个指标进行标准化处理,以消除指标间的量纲差异。设电动汽车运行状态的样本个数为 q , 指标个数 $m=26$, 其中逆向化和适度指标集合为 V_1 和 V_2 , 第 i 个样本的第 j 个指标值同趋化为:

$$x'_{ij} = \begin{cases} \max_{1 \leq i \leq q} \{x''_{ij}\} - x''_{ij} & v_j \in V_1 \\ \max_{1 \leq i \leq q} \{ |x''_{ij} - x'_j| \} - |x''_{ij} - x'_j| & v_j \in V_2 \end{cases} \quad (9)$$

其中, x''_{ij} 和 x'_j 分别为同趋化前后的指标值; x'_j 为第 j 个指标的适度值(对于适度指标 x''_{ij} 越接近 x'_j 越好)。再计算标准化的状态指标值 x_{ij} :

$$x_{ij} = \frac{x'_{ij} - \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x'_{ij}}{\sqrt{\frac{1}{q-1} \sum_{i=1}^q \left(x'_{ij} - \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q x'_{ij} \right)^2}} \quad (10)$$

通过对状态指标样本数据进行因子分析^[18]可得到状态指标的公共因子,该因子将包含多个关系紧密的状态指标,由此对电动汽车运行状态指标进行分类。利用因子分析的指标分类流程如图 2 所示,由标准化状态指标计算 $m \times m$ 阶的相关系数矩阵 R , 其第

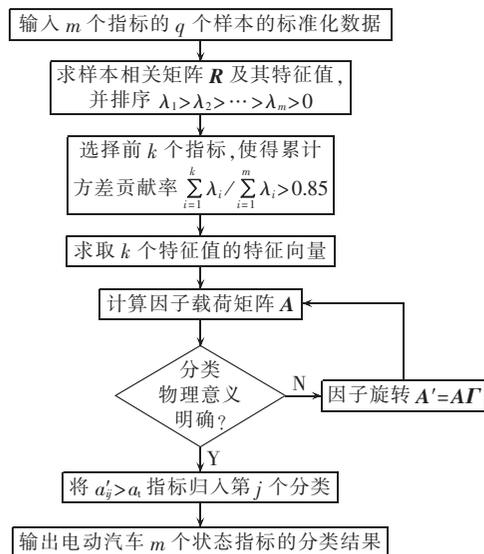


图 2 状态指标分类流程

Fig.2 Flowchart of status indexes classification

i 行和第 j 列的相关系数 r_{ij} 为:

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^q \left(x_{ki} - \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m x_{kl} \right) \left(x_{kj} - \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m x_{jl} \right)}{\sqrt{\sum_{k=1}^q \left(x_{ki} - \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m x_{kl} \right)^2 \sum_{k=1}^q \left(x_{kj} - \frac{1}{m} \sum_{l=1}^m x_{jl} \right)^2}} \quad (11)$$

再计算相关系数矩阵的 m 个特征值,按大小降序排列,选择前 k 个特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ 使对应的累计方差贡献率大于 0.85,则 m 个指标即可划分为 k 个类型。

利用因子载荷矩阵 A 可得各分类与 m 个指标的关联关系,将特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k$ 的特征向量单位化后得到 e_1, e_2, \dots, e_k , 则 $m \times k$ 阶的因子载荷矩阵 A 为:

$$A = [e_1 \sqrt{\lambda_1}, e_2 \sqrt{\lambda_2}, \dots, e_k \sqrt{\lambda_k}] \quad (12)$$

其中矩阵元素 a_{ij} 为指标 x_i 在公共因子 f_j (即第 j 个分类)的载荷系数,系数越大即说明第 i 个指标对第 j 个分类贡献越高,据此可确定不同分类下包含的原始指标。因子载荷矩阵 A 不具有唯一性,为了使各分类具有更明确的物理意义,可利用任意 $k \times k$ 阶正交矩阵 Γ ,对原始矩阵进行因子旋转得到新的因子载荷矩阵 $A' = A\Gamma$ 。本文采用方差最大因子旋转^[19],以使因子载荷矩阵 A' 的各个元素向 0 或 1 两极分化,再将 $a'_{ij} > a_i$ (载荷系数取值范围 0~1,因子阈值 $a_i = 0.8$,小于 0.8 则认为不属于该分类)的指标归入第 j 个分类,建立电动汽车运行状态指标的分类体系。

根据某电动公交车站实际监测数据,对各项状态指标数据进行标准化处理后,得到样本数据相关系数矩阵的特征值,其中大于 0 的前 12 项特征值及累计方差贡献率见表 2。状态指标的前 5 个特征值累计方差贡献率达到 89.561%,大于设定值 85%,故将 26 项电动汽车运行状态指标归结为 f_1 至 f_5 5 个类型

(公共因子),即电池组效率、电池组寿命、电池组充放电特性、单体电池一致性和电机运行状态。

由式(12)计算得到载荷矩阵,所得的 5 个公共因子在多个指标上都有较高的载荷,但是部分指标的载荷值小于设定的阈值 α_i ,不能对其进行分类。采用方差最大旋转法,使指标在旋转后的公共因子轴上投影向最大和最小两极分化,旋转后的因子载荷如表 3 所示。由表 3 可知,每个指标中有且仅有一个公共因子对应的载荷系数大于设定阈值 0.8,由此得到 5 个分类下的电动汽车运行状态指标。其中电池

组效率包含 v_8 至 v_{10} 共 3 个指标,电池组寿命包含 v_{11} 至 v_{13} 、 v_{17} 和 v_{18} 共 5 个指标,电池组充放电包含 v_1 至 v_7 、 v_{14} 和 v_{15} 共 9 个指标,单体电池一致性包含 v_{19} 至 v_{21} 共 3 个指标,电机运行状态包含 v_{16} 、 v_{22} 至 v_{26} 共 6 个指标。

2.2 电动汽车运行状态指标筛选

指标选取个数过少将加大电动汽车运行状态评估误差,而指标数量过多又会增加模型复杂度且减小其实用性。考虑到电动汽车运行状态指标选取具有一定的冗余性,因此,需要进一步对 f_1 至 f_5 的 5 个分类指标子集进行筛选。设第 i 个分类 f_i 包含 m_i 个指标, v_1, v_2, \dots, v_{m_i} 共有 p 组样本数据,以 $p \times m_i$ 阶指标数据矩阵 X_i 为自变量,各组样本对应第 i 个分类的状态评估向量 y_i 为因变量,建立多元线性回归模型^[18]:

$$\begin{cases} y_i = X_i \beta_i + \mu_i \\ \beta_i' = (X_i^T X_i)^{-1} X_i^T y_i \end{cases} \quad (13)$$

其中, β_i 和 β_i' 分别为 $m_i \times 1$ 阶的回归模型系数及估计值; μ_i 为 $p \times 1$ 阶随机误差。本文采用逐步回归法筛选第 i 个分类的指标,从仅含常数项的回归方程出发,逐步引入或删除状态指标,将对回归贡献大的指标选入子集中,使残差平方和尽可能小。通过 F 显著性检验计算第 j 个指标的贡献率 F_j 为:

$$\begin{cases} F_j = \frac{S_{j-1} - S_j}{S_j / (p - l - 1)} \\ S_j = y_i^T y_i - \beta_i'^T X_i^T y_i \end{cases} \quad (14)$$

其中, S_{j-1} 和 S_j 分别为第 j 个指标引入前、后的残差平方和; l 为第 j 个指标引入后回归模型的非常数项个数。为避免指标间的复共线性问题(部分指标可由其他指标近似线性表示),还需确保矩阵 $X_i^T X_i$ 可逆,即使其逆矩阵的分母 $D = |X_i^T X_i|$ 大于给定的容许值水平界限。

逐步回归分析中,以引入阈值 F_{in} 和删除阈值 F_{out} 作为指标被引入或删除回归方程的标准,由指标样本数据的统计分析结果^[18]可得到 $F_{in} = 3, F_{out} = 2.8$; 同时利用容许值水平界限 Tol 来避免引入分母 D 为 0 或近似为 0 的情况,可避免 $X_i^T X_i$ 矩阵出现复共线性, Tol 的取值范围为 $10^{-7} \sim 10^{-2}$, 本文取 Tol = 0.001; 采用逐步回归分析进行指标筛选的流程,如图 3 所示。根据逐步筛选后的第 i 个分类指标集合 V_c , 计算各指标的贡献率 F_j 。若第 j_{max} 个指标的 $F_{j_{max}} = \max(F_j) > F_{in}$ 且容许水平 $D > Tol$, 则该项引入指标集 V_c , 否则不引入; 若第 j_{min} 个指标 $F_{j_{min}} = \min(F_j) < F_{out}$, 则该项从 V_c 删除, 否则不删除。当指标集 V_c 中所有指标贡献率均大于 F_{out} , 指标集 V_c 外所有指标贡献率均小于 F_{in} 时, 没有可引入或删除的指标, 则筛选结束, 输出最优指标集。

以电池组充放电特性 f_3 为例, 其包含 v_1 至 v_7 、 v_{14} 和 v_{15} 共 9 个指标, 采用逐步回归法得到其筛选后的

表 2 特征值及累计方差贡献率
Table 2 Eigenvalues and accumulative contribution rates

序号	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	2.1320	24.146	24.146
2	2.0140	22.809	46.955
3	1.4260	16.150	63.105
4	1.2340	13.975	77.080
5	1.1020	12.481	89.561
6	0.1942	2.199	91.760
7	0.1624	1.839	93.599
8	0.1520	1.721	95.320
9	0.1438	1.629	96.949
10	0.1023	1.159	98.108
11	0.0969	1.097	99.205
12	0.0702	0.795	100

表 3 正交旋转后因子载荷
Table 3 Factor loading after orthogonal rotating

指标	因子载荷				
	f_1	f_2	f_3	f_4	f_5
v_1	0.169	0.213	0.953	0.112	0.132
v_2	0.155	0.109	0.948	0.189	0.117
v_3	0.185	0.128	0.866	0.275	0.183
v_4	0.332	0.155	0.920	0.197	0.094
v_5	0.171	0.162	0.965	0.261	0.104
v_6	0.112	0.226	0.906	0.225	0.104
v_7	0.232	0.187	0.971	0.135	0.112
v_8	0.924	0.368	0.112	0.171	0.130
v_9	0.909	0.167	0.273	0.219	0.154
v_{10}	0.896	0.272	0.107	0.193	0.189
v_{11}	0.283	0.883	0.130	0.192	0.266
v_{12}	0.322	0.965	0.218	0.143	0.166
v_{13}	0.197	0.891	0.130	0.223	0.102
v_{14}	0.193	0.105	0.871	0.269	0.109
v_{15}	0.275	0.249	0.954	0.306	0.178
v_{16}	0.188	0.154	0.180	0.262	0.944
v_{17}	0.271	0.903	0.283	0.268	0.253
v_{18}	0.101	0.859	0.193	0.256	0.119
v_{19}	0.272	0.125	0.180	0.899	0.189
v_{20}	0.178	0.288	0.189	0.951	0.226
v_{21}	0.197	0.134	0.143	0.907	0.172
v_{22}	0.151	0.269	0.139	0.161	0.913
v_{23}	0.189	0.151	0.177	0.183	0.881
v_{24}	0.295	0.112	0.192	0.166	0.974
v_{25}	0.178	0.156	0.178	0.137	0.937
v_{26}	0.174	0.118	0.133	0.143	0.952

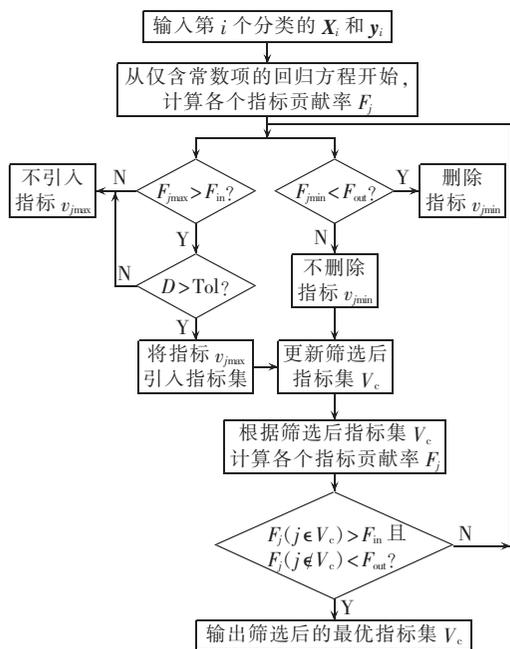


图 3 状态指标筛选流程

Fig.3 Flowchart of status index screening

指标集 V_c 及贡献率如表 4 所示。表中 V_c 外指标 v_3 贡献最大,但 $F_3=0.392 < F_{in}$,不引入; V_c 内 v_1 贡献最小,但 $F_1=10.758 > F_{out}$,不删除。此时既无删除项,也无引入项。因此,在 f_3 分类中可将充电电压闪变 v_3 、充电电压不平衡度 v_4 和充电电压波动 v_5 这 3 个贡献小的指标删除。同理,可分别对电池组效率 f_1 、电池组寿命 f_2 、单体电池一致性 f_4 和电机运行状态 f_5 下的指标进行逐步回归分析,删除电池输出功率 v_{16} 和自放电率 v_{17} 共 2 个对评估贡献率小的指标。

表 4 筛选后状态指标贡献率

Table 4 Contribution rate of status indexes after screening

指标	贡献率 F_j	容许值 D	
v_1	10.758	—	
v_2	19.340	—	
集合 V_c 内	v_6	25.852	—
	v_7	18.258	—
	v_{14}	37.537	—
	v_{15}	19.292	—
集合 V_c 外	v_3	0.392	0.392
	v_4	0.046	0.046
	v_5	0.171	0.171

通过电动汽车运行状态指标的选取、分类和筛选,建立其状态综合评估指标体系,如图 4 所示。图中包括目标层、分类层和指标层 3 个层次,目标层划分为 5 个分类,并进一步细化到各分类下的指标,为便于分析,将不同分类下的指标重新进行编号。

3 基于分层雷达图法的电动汽车运行状态综合评估

采用前述方法可将电动汽车运行状态综合评估

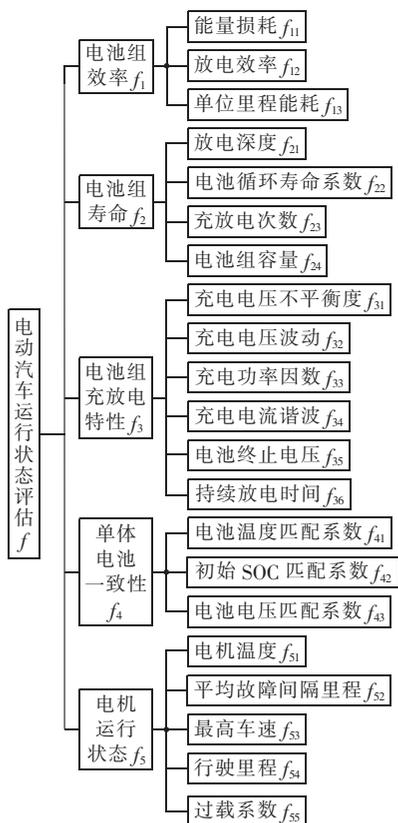


图 4 电动汽车运行状态评估指标体系

Fig.4 Evaluation index system of electric vehicle operating status

分解成 3 个层次的分析结构模型,将图 4 的层次递阶结构与雷达图评估法^[20-21]相结合,可实现电动汽车运行状态的分层评估。分层雷达图法综合评估流程如图 5 所示,首先利用指标层的样本数据分别得到分类层 5 个分类的雷达图,根据图像特征得到各分类

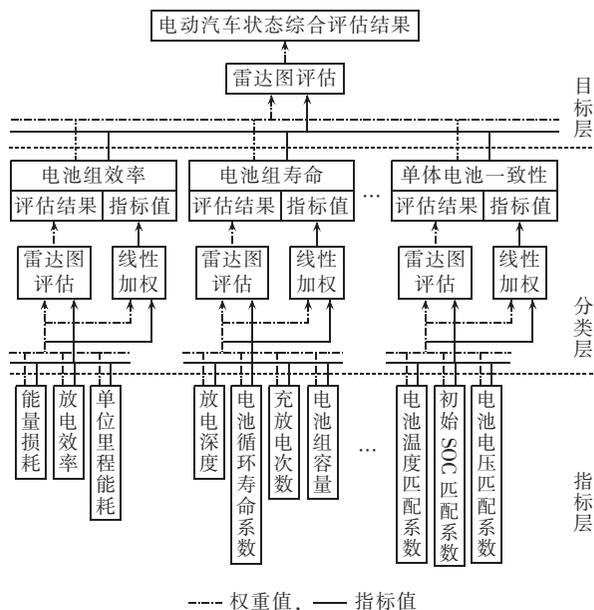


图 5 分层雷达图综合评估示意图

Fig.5 Schematic diagram of comprehensive evaluation based on layered radar map

的雷达图评估值;再由分类层 5 个分类的评估值,得到目标层电动汽车运行状态的评估结果。分层雷达图法的评估步骤如下。

步骤 1:结合改进 AHP 主观赋权和客观熵权法^[22],计算指标层和分类层的各项综合权重。

步骤 2:以圆心为起点,垂直向上引出第 1 条单位长度线段 OA ,将第 1 个指标权重转换为角度值^[21],绘制第 2 条单位长度线段 OB ,同理绘制其余线段。

步骤 3:以圆心为起点,作每个扇形的角平分线,将各归一化指标作为角平分线的长度;依次连接前述外围点形成雷达图,利用雷达图多边形总面积 S 和周长 C ,得到定量评估值 \sqrt{SC} 。

步骤 4:重复步骤 2 和步骤 3,得到 5 个分类的雷达图及其评估值。

步骤 5:根据分类层的 5 个评估值,由步骤 2 和步骤 3 得到电动汽车运行状态雷达图和综合评估值,再由不同等级的标准样本数据,确定待评估样本的电动汽车运行状态综合水平。

4 算例分析

以某电动公交车站实际监测数据为基础,对电动汽车状态进行评估。将评估等级分为“优质”、“良好”、“合格”和“较差”4 级,由标准样本 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 计算各级评估结果的取值区间。由式(9)和式(10)对监测数据进行标准化处理,各级别的标准样本如表 5 所示,表中还给出电动汽车指标层中各项指标的样本数据 N 。根据分层雷达图评估流程,利用改进 AHP 主观赋权和客观熵权法,得到电动汽车状

表 5 电动汽车状态指标标准化样本数据

Table 5 Unified sample data of electric vehicle status indexes

指标	M_1	M_2	M_3	M_4	N
f_{11}	0	0.06	0.39	1	0.32
f_{12}	0	0.04	0.28	1	0.61
f_{13}	0	0.07	0.38	1	0.19
f_{21}	0	0.08	0.37	1	0.43
f_{22}	0	0.05	0.32	1	0.35
f_{23}	0	0.07	0.37	1	0.32
f_{24}	0	0.06	0.35	1	0.86
f_{31}	0	0.07	0.29	1	0.36
f_{32}	0	0.05	0.34	1	0.27
f_{33}	0	0.08	0.37	1	0.18
f_{34}	0	0.06	0.39	1	1.26
f_{35}	0	0.04	0.32	1	0.21
f_{36}	0	0.08	0.34	1	0.41
f_{41}	0	0.07	0.37	1	0.56
f_{42}	0	0.05	0.36	1	0.67
f_{43}	0	0.06	0.28	1	0.43
f_{51}	0	0.04	0.37	1	1.17
f_{52}	0	0.08	0.29	1	0.42
f_{53}	0	0.05	0.34	1	0.68
f_{54}	0	0.09	0.36	1	0.26
f_{55}	0	0.06	0.38	1	0.48

态综合评估指标体系各层次的权值,如表 6 所示。

表 6 评估体系各层次权值

Table 6 Weights of evaluation system for different layers

目标层	分类层	ω_{fi}	ω_{fij}
	f_1	0.183	{0.101, 0.225, 0.674}
	f_2	0.171	{0.532, 0.268, 0.134, 0.066}
f	f_3	0.152	{0.123, 0.144, 0.075, 0.422, 0.102, 0.134}
	f_4	0.293	{0.157, 0.594, 0.249}
	f_5	0.201	{0.231, 0.068, 0.145, 0.080, 0.476}

利用表 5 中 4 个级别的标准样本数据和各层权值系数,由分层雷达图评估得到标准化样本的综合评估值,将其作为评估等级区间的上、下限值,即可得表 7 所示的不同等级综合评估值区间。图 6 为由样本数据 N 分别做出电池组效率、电池组寿命等分类层 5 个分类状态的雷达图和电动汽车整体运行状态的雷达图,相应评估结果如表 8 所示。结合评估等级表可知,电池组效率状态为良好,电池组寿命、单体电池一致性、电机运行状态为合格,而电池组充

表 7 电动汽车评估等级

Table 7 Electric vehicle evaluation classification

层次	等级区间			
	优质	良好	合格	较差
f_1	[0, 0.79)	[0.79, 1.84)	[1.84, 3.16)	[3.16, ∞)
f_2	[0, 1.10)	[1.10, 2.33)	[2.33, 3.71)	[3.71, ∞)
f_3	[0, 1.39)	[1.39, 2.94)	[2.94, 4.08)	[4.08, ∞)
f_4	[0, 0.85)	[0.85, 1.96)	[1.96, 3.49)	[3.49, ∞)
f_5	[0, 1.19)	[1.19, 2.68)	[2.68, 3.91)	[3.91, ∞)
f	[0, 1.47)	[1.47, 4.82)	[4.82, 7.82)	[7.82, ∞)

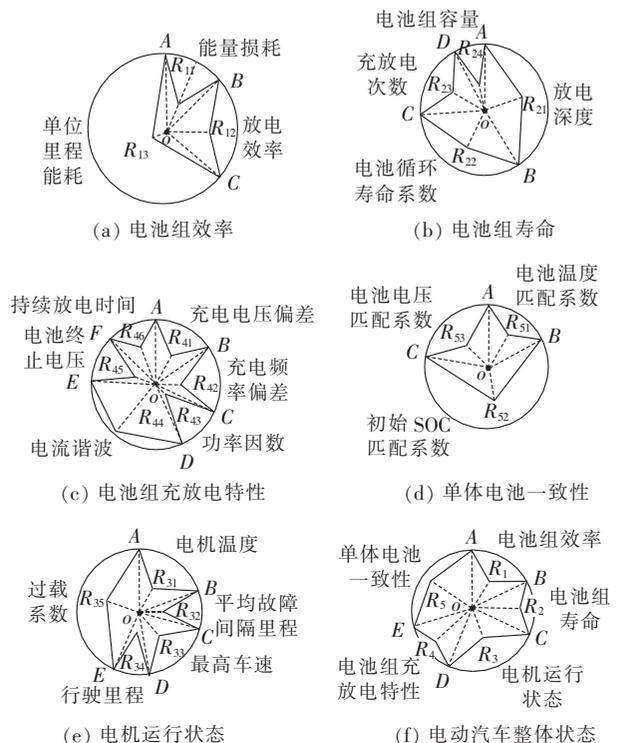


图 6 电动汽车运行状态综合评估结果

Fig.6 Results of comprehensive electric vehicle operating status evaluation

表 8 电动汽车综合评估值

Table 8 Comprehensive evaluation values

图号	综合评估值	等级
图 6(a)	1.81	良好
图 6(b)	2.40	较差
图 6(c)	4.24	合格
图 6(d)	2.55	合格
图 6(e)	3.56	合格
图 6(f)	5.08	合格

放电特性状态为较差,由此对电动汽车整体状态评估的结果为合格。

5 结论

根据电动汽车的电气结构,本文选取了电动汽车的 26 个运行状态指标,通过某电动公交车站实际监测数据得到各项指标的样本值,利用因子分析对本数据进行处理,将运行状态指标分为电池组效率、电池组寿命、电池组充放电特性、单体电压一致性和电机运行状态 5 个类型,再由逐步回归将各分类的冗余指标删除,建立了全面、实用的电动汽车运行状态综合评估指标体系。采用分层雷达图评估方法分别对分类层和目标层进行综合评估,通过对实际监测数据的评估结果可知,电动汽车快速充、放电过程对电池性能的影响较大;本文的电动汽车状态综合评估体系,能较好地反映出电动汽车的真实运行状态,评估结果可为电动汽车检修提供技术参考。

参考文献:

- [1] 王锡凡,邵成成,王秀丽,等. 电动汽车充电负荷与调度控制策略综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(1):1-10.
WANG Xifan,SHAO Chengcheng,WANG Xiuli,et al. Survey of electric vehicle charging load and dispatch control strategies[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(1):1-10.
- [2] YILMAZ M,KREIN P T. Review of battery charger topologies, charging power levels,and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013,28(5):2151-2169.
- [3] 周念成,熊希聪,王强钢. 多种类型电动汽车接入配电网的充电负荷概率模拟[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):1-7.
ZHOU Niancheng,XIONG Xicong,WANG Qianggang. Simulation of charging load probability for connection of different electric vehicles to distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):1-7.
- [4] 陈燕虹,沈帅,刘宏伟,等. 多辆电动汽车远程监控系统[J]. 吉林大学学报:工学版,2013,43(2):285-290.
CHEN Yanhong,SHEN Shuai,LIU Hongwei,et al. Remote monitoring system for electric vehicles[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2013,43(2):285-290.
- [5] 连湛伟,石欣,克潇,等. 电动汽车充换电站动力电池全寿命周期在线检测管理系统[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(12):137-142.
LIAN Zhanwei,SHI Xin,KE Xiao,et al. The whole life cycle on-line detection and management system of power battery in

- the electric vehicle charging and exchanging station[J]. Power System Protection and Control,2014,42(12):137-142.
- [6] 薛飞,雷宪章,张野鹰,等. 基于物联网的电动汽车智能充换电服务网络电池管理[J]. 电力系统自动化,2012,36(21):41-46.
XUE Fei,LEI Xianzhang,ZHANG Yebiao,et al. Battery management of smart charging and swapping service network for electric vehicle based on internet of things[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(21):41-46.
 - [7] 何洪文,余晓江. 电动车辆动力电池的性能评价[J]. 吉林大学学报:工学版,2006,36(5):659-663.
HE Hongwen,YU Xiaojiang. Performance evaluation of electric vehicle power battery[J]. Journal of Jilin University:Engineering and Technology Edition,2006,36(5):659-663.
 - [8] 黄宜山,张文军,张昌凡,等. 电动汽车用驱动电机系统评价体系的研究[J]. 大功率变流技术,2013(2):47-52.
HUANG Yishan,ZHANG Wenjun,ZHANG Changfan,et al. Study on evaluation model of drive motor system for electric vehicle[J]. High Power Converter Technology,2013(2):47-52.
 - [9] 黄小庆,杨夯,肖波,等. 考虑客户满意度的电动汽车充电站运营状态评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(10):96-101.
HUANG Xiaoqing,YANG Hang,XIAO Bo,et al. Operating state evaluation considering customer satisfaction for electric vehicle charging station[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10):96-101.
 - [10] 陈卫,杨波,张兆云,等. 计及电动汽车充电站接入的配电网承载能力评估与优化[J]. 电工技术学报,2014,29(8):27-35,45.
CHEN Wei,YANG Bo,ZHANG Zhaoyun,et al. Distribution networks supportability evaluation and optimization considering electric vehicles charging stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(8):27-35,45.
 - [11] 方竹. 基于支持向量机的新能源汽车状态评估[J]. 佳木斯大学学报:自然科学版,2011,29(2):228-231.
FANG Zhu. State assessment of new energy vehicle based on support vector machines[J]. Journal of Jiamusi University: Natural Science Edition,2011,29(2):228-231.
 - [12] 王德青,万永波,王翔,等. 基于主成分的改进雷达图及其在综合评价中的应用[J]. 数理统计与管理,2010,29(5):883-889.
WANG Deqing,WAN Yongbo,WANG Xiang,et al. Improved radar chart based on principal component and its application in comprehensive evaluating[J]. Journal of Applied Statistics and Management,2010,29(5):883-889.
 - [13] 全国汽车标准化技术委员会. GB/T 12545.1—2008 汽车燃料消耗量试验方法 第 1 部分:乘用车燃料消耗量试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
 - [14] 全国汽车标准化技术委员会. GB/T 19754—2005 重型混合动力电动汽车 能量消耗量试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2005.
 - [15] 全猛,邵静玥,卢兰光,等. 基于二阶段放电试验的磷酸铁锂电池的 Peukert 模型[J]. 清华大学学报:自然科学版,2010,50(2):295-298.
TONG Meng,SHAO Jingyue,LU Languang,et al. Peukert models of lithium iron phosphate batteries based on the two stage discharge test[J]. Journal of Tsinghua University:Science and Technology,2010,50(2):295-298.
 - [16] 严干贵,朱星旭,李军徽,等. 内蕴运行寿命测算的混合储能系统控制策略设计[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):110-114.
YAN Gangui,ZHU Xingxu,LI Junhui,et al. Control strategy design for hybrid energy storage system with intrinsic operation

- life measurement and calculation[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(1):110-114.
- [17] 汤蕴璆. 电机学[M]. 北京:机械工业出版社,2009:187-190.
- [18] 张忠占,谢田法,杨振海. 应用数理统计[M]. 北京:高等教育出版社,2011.
- [19] 陈锐,郭庆来,孙宏斌,等. 自动电压控制中的中枢母线选择方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):111-116.
CHEN Rui, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Pilot bus selection in automatic voltage control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 111-116.
- [20] 乔鹏程,吴正国,李辉. 基于改进雷达图法的电能质量综合评估方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):88-92.
QIAO Pengcheng, WU Zhengguo, LI Hui. Power quality synthetic evaluation based on improved radar chart[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 88-92.
- [21] 李国栋,李庚银,杨晓东,等. 基于雷达图法的电能质量综合评估模型[J]. 电力系统自动化,2010,34(14):70-74.
LI Guodong, LI Gengyin, YANG Xiaodong, et al. A comprehensive power quality evaluation model based on radar chart method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(14): 70-74.
- [22] 周念成,池源,王强钢,等. 并网光伏电站在线监测与状态评估系统[J]. 电力自动化设备,2012,32(10):6-11.
ZHOU Niancheng, CHI Yuan, WANG Qianggang, et al. On-line monitoring and state evaluation system for grid-connected PV generation station [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(10): 6-11.

作者简介:



蒲松林

蒲松林(1987—),男,四川南充人,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化和电能质量(E-mail: jsfpu@cqu.edu.cn);

周念成(1969—),男,重庆人,教授,博士生导师,博士,从事电力系统自动化和电能质量方面的教学和研究工作(E-mail: cee_nczhou@cqu.edu.cn)。

Electric vehicle operational status evaluation based on factor regression analysis and layered radar map method

PU Songlin¹, ZHOU Niancheng², GUO Yin¹, WANG Qianggang², ZHANG Jing³, LI Tiyin³

(1. Suining Power Supply Company of State Grid Sichuan Electric Power Company, Suining 629000, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing 400044, China; 3. Yuhang Power Supply Company of State Grid Zhejiang Hangzhou

Electric Power Company, Hangzhou 311100, China)

Abstract: In order to optimize the maintenance strategy of EV (Electric Vehicle), its monitoring data are used to comprehensively evaluate its operating status. 26 eigenvalues of battery, motor transmission and charge/discharge process are selected as the EV operating status indexes and the factor analysis is applied to extract their common factors. The independency of common factors is used to classify the EV status indexes and the stepwise regression analysis is applied to screen out the indexes with little contribution to the evaluation results. A comprehensive evaluation index system of EV operating status is thus established. According to its hierarchical structure, the layered radar map is applied to comprehensively evaluate the operating status of EV. The monitoring data of an EV charging station are used and the calculative results show that, the operating status of an EV or its component can be properly reflected, proving the proposed method is correct and effective.

Key words: electric vehicles; status evaluation; index selection; eigenvalues; factor analysis; radar map