

电动汽车充电桩综合评价方法研究

随着规模化电动汽车充电负荷接入电网，电动汽车充电桩得到了广泛的应用，在建设充电站时，选择充电桩应考虑多个不同量纲的性能指标。提出将投影寻踪等级评价模型用于充电桩的综合评价，为充电桩的选择提供参考依据。根据电动汽车充电桩的性能指标确定评价指标，利用投影寻踪理论将多个评价指标投影为综合评价指标，采用量子粒子群优化算法（Quantum-behaved Particle Swarm Optimization, QPSO）找到最佳投影方向，根据最佳投影值及其对应的评价等级函数关系得到电动汽车充电桩的综合评价模型。实例计算证明该评估模型结构稳健性高，评估结果客观。

范建磊 刘 君/华北电力大学电气与电子工程学院



范建磊/硕士研究生

关键词/Keywords

电动汽车充电桩 ·
投影寻踪 ·
量子粒子群 ·
综合评价 ·
等级评价模型 ·

作为解决能源危机和环境污染的有效途径之一，电动汽车拥有广阔的市场前景。电动汽车充电桩作为电网与电动汽车蓄电池之间的功率转换器，也将得到愈来愈多的使用。选择充电桩时，应综合考虑各种性能指标，目前还没有一套电动汽车充电桩的评价体系和方法^[1 2]。

投影寻踪法（Projection Pursuit, PP）是用来分析和处理高维观测数据的一种数学方法。将高维数据按照某个最优投影方向投影到低维空间，以此来分析高维数据的结构特征，具有稳健性好、结果客观和分析过程不需要确定隶属度函数等优点。本文利用投影寻踪法将电动汽车充电桩多个评价指标投影为单一的综合评价指标，采用量子粒子群优化算法（Quantum-behaved Particle Swarm Optimization, QPSO）得到最优投佳方向，根据最佳投影值与其对应的

国家 863 高技术基金项目（2011AA05A109），
国家科技支撑计划重大项目（2011BAG02B14）。

等级关系建立电动汽车充电桩的综合评价模型。

构建投影寻踪等级评价模型

(1) 生成评估项的投影数据并进行标准化处理

设充电负荷评估等级和评估样本集分别为 $y(i)$ 和 $\{x(i, j) | i = 1 \sim n, j = 1 \sim m\}$ $x(i, j)$ 为样本集中第 i 个样本的第 j 个指标值， n 为样本集大小， m 评估项个数。为消除各评估项的量纲差别和统一评估项的变化范围，对其样本集进行标准化处理，即

$$x^*(i, j) = [x(i, j) - Ex(j)] / Sx(j) \quad (1)$$

式中， $Ex(j)$ 、 $Sx(j)$ 分别为原第 j 个评估指标的均值和标准差； $x^*(i, j)$ 为标准化后的样本值集合。

(2) 构建投影指标函数

将标准化后的评估样本 $\{x^*(i, j) | j = 1 \sim m\}$ 按照投影方向 a 投影为一维投影值 $z(i)$ ，其中 a 为 m 维的单位向量。投影方程为

$$z(i) = \sum_{j=1}^m a(j)x^*(i, j) \quad (2)$$

再根据 $z(i)$ 与 $y(i)$ 散点图建立等级评价数学模型。

从高维空间投影到低维空间时，要求 $z(i)$ 应尽可能体现 $\{x^*(i, j)\}$ 中的变异信息，因此 $z(i)$ 的标准差 S_z 应尽可能大，同时 $z(i)$ 与标准等级值 $y(i)$ 的相关系数的绝对值 $|R_{zy}|$ 也应尽可能大。投影指标函数可构造为

$$Q(a) = S_z |R_{zy}| \quad (3)$$

式中， S_z 和 R_{zy} 分别为

$$S_z = \left\{ \sum_{i=1}^n [z(i) - E_z]^2 / (n - 1) \right\}^{0.5} \quad (4)$$

$$R_{zy} = \frac{\sum_{i=1}^n [z(i) - E_z][y(i) - E_y]}{\left\{ \sum_{i=1}^n [z(i) - E_z]^2 \sum_{i=1}^n [y(i) - E_y]^2 \right\}^{0.5}} \quad (5)$$

(3) 优化投影指标函数

当评价等级与标准化后的评价样本集确定时，投影指标函数 $Q(a)$ 的大小只与投影方向有关。最佳投影方向可最大化地反应高维数据的变异信息。投影指标函数优化方程为

$$\max Q(a) = S_z |R_{zy}| \quad (6)$$

等式约束为

$$\sum_{j=1}^m a^2(j) = 1 \quad [-1.0 \leq a(j) \leq 1.0] \quad (7)$$

投影指标函数优化是以 $\{a(j) | j = 1 \sim m\}$ 为优化变量的非线性求解优化问题。本文提出利用 QPSO 求解最优投影方向。

(4) 构建投影寻踪等级评价模型

将 (3) 中解出的最优投影方向 a^* 代入公式 (2)，得到投影值 $z^*(i)$ ，根据 $z^*(i)$ 与 $y(i)$ 的散点图特征建立等级评价数学模型。

QPSO

投影寻踪等级评价模型建立的关键是找到最优投影方向，针对传统遗传算法、QPSO 易局部收敛的特点，文章提出采用 QPSO 求解最优投影方向。

1. QPSO 简介

PSO 中所有粒子根据个体最优位置和全体最优位置不断调整速度，朝个体最优和群体最优粒子飞行，但具有容易局部收敛的缺点。QPSO 将量子计算与 PSO 相融合，将量子的态矢量表达引入粒子编码，利用概率幅表示粒子的编码，使得粒子可以表达多个态的叠加，利用量子旋转门实现粒子的更新操作，引入变异操作增加种群多样性，比常规粒子群算法更容易寻找到全局最优解。

2. 量子态叠加原理

在 QPSO 中，粒子用量子比特位形式表达，即用随机概率方式表达，这种表达方式增加了种群多样性，迭代中的量子旋转更新、变异环节增

加了种群多样性，扩大了最优解的搜索空间，找到最优解的概率大大增加。

在量子力学中微观粒子的运动状态使用 Hilbert 空间中的波函数 ψ 来表示，体现了量子的波粒二象性。量子态 $|\psi\rangle$ 可用基态 $|0\rangle$ 态和 $|1\rangle$ 的线性叠加表示，如式 (8) 所示

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (8)$$

式中， α 、 β 为概率幅， $|\alpha|^2$ 表示量子坍缩到态 $|0\rangle$ 的概率， $|\beta|^2$ 表示量子坍缩到态 $|1\rangle$ 的概率，且 $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ 。量子态也可用量子相位表示为

$$|\psi\rangle = \cos\theta|0\rangle + \sin\theta|1\rangle \quad (9)$$

式中， θ 与概率幅 α 、 β 的关系可表示为

$$\theta = \arctan \frac{\beta}{\alpha} \quad (10)$$

3. QPSO 流程

应用 QPSO 求解最佳投影方向流程如图 1 所示。

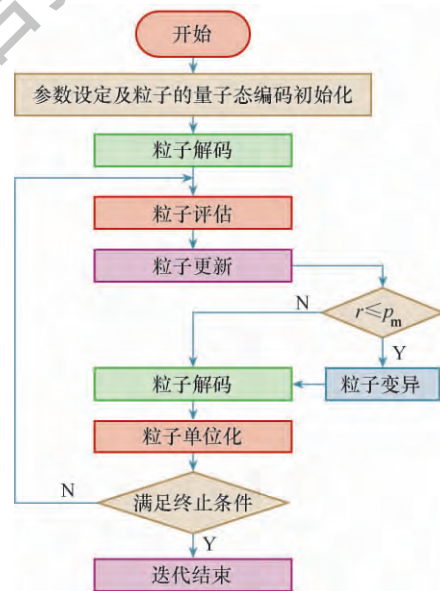


图 1 QPSO 流程图

QPSO 流程具体步骤如下。

(1) 粒子的量子态编码初始化

设种群粒子个数为 n ，粒子维数为 m ， P 为粒子概率幅组成的矩阵， P 矩阵初始化过程为

$$P(1 \ d \ j) = r \quad (11)$$

$$P(2 \ d \ j) = (1 - r^2)^{0.5} \quad (12)$$

式中， $P(1 \ d \ j)$ 、 $P(2 \ d \ j)$ 为第 j 个粒子的第 d

维坍塌到态 $|0\rangle$ 态、 $|1\rangle$ 态的概率幅； r 为 $(0, 1)$ 区间内的随机数。

(2) 粒子解码环节

若实际解的空间为 $[a, b]$ ，某量子态的概率在 $[0, 1]$ ，则需将概率解码到实际参数空间，解码方程为

$$\begin{cases} P_R(j, d) = P(1, d, j)^{2*} (b - a) + a, R < p \\ P_R(j, d) = P(2, d, j)^{2*} (b - a) + a, R \geq p \end{cases} \quad (13)$$

式中， $P_R(j, d)$ 为第 j 个粒子第 d 维的解码值； p 为状态表达的选择概率； R 为 $(0, 1)$ 区间内的随机数。

由式 (7) 可知投影向量 a 为单位向量，因此应对解码后的粒子进行单位化，即

$$P_R^*(j, d) = \frac{P_R(j, d)}{\sum_{t=1}^m \sqrt{P_R(j, t)^2}} \quad (14)$$

式中， m 为粒子维数； $P_R^*(j, d)$ 为单位化后第 j 个粒子的第 d 维的值。

(3) 粒子评估及更新环节

将投影指标函数 $Q(a)$ 作为粒子评估指标， $Q(a)$ 越大，适应度值越大，遴选出个体最优及群体最优粒子。利用式 (10) 将概率幅表示的粒子转化为量子相位形式的粒子，粒子位置更新为

$$\Delta\theta_{jd}^{k+1} = \omega\Delta\theta_{jd}^k + c_1r_1(\theta_{bjd} - \theta_{jd}) + c_2r_2(\theta_{gd} - \theta_{jd}) \quad (15)$$

式中， ω 为惯性权重； c_1, c_2 为加速常数； r_1, r_2 为 $(0, 1)$ 区间内的随机数； $\Delta\theta_{jd}^k, \Delta\theta_{jd}^{k+1}$ 为第 j 个粒子的第 d 维在第 k 次、第 $k+1$ 次迭代中的量子相位修正量； θ_{jd} 为第 j 个粒子的第 d 维量子相

位； θ_{bjd} 为第 j 个粒子的第 d 维的历史最优相位； θ_{gd} 为全局最优粒子的第 d 维的量子相位。

根据量子相位修正量得到量子旋转门，将粒子原始概率幅乘以量子旋转门更新概率幅，粒子更新方程为

$$\begin{pmatrix} \alpha_{jd}^{k+1} \\ \beta_{jd}^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \Delta\theta_{jd}^{k+1} & -\sin \Delta\theta_{jd}^{k+1} \\ \sin \Delta\theta_{jd}^{k+1} & \cos \Delta\theta_{jd}^{k+1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{jd}^k \\ \beta_{jd}^k \end{pmatrix} \quad (16)$$

(4) 变异处理

在 QPSO 中，通过量子非门实现变异操作，有助于增加种群的多样性，避免出现局部收敛现象。令变异概率为 p_m ，每个粒子在 $(0, 1)$ 区间内设定一个随机数 r_j ，若 $r_j \leq p_m$ ，则随机选择第 j 粒子上 $[m/2]$ 个量子位，用量子非门实现变异操作，该粒子自身最优位置保持不变。量子相位变异过程为

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{jd}^{k+1} \\ \sin \theta_{jd}^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \theta_{jd}^{k+1} \\ \cos \theta_{jd}^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{jd}^{k+1} \right) \\ \sin \left(\frac{\pi}{2} - \theta_{jd}^{k+1} \right) \end{pmatrix} \quad (17)$$

确定充电桩评价指标与等级划分

根据电动汽车充电桩的性能指标及有关标准规范。确定电动汽车充电桩评价指标如图 2 所示，指标包括技术、经济、环境及安全四个方面^[2]。按照能否通过测量得到将指标分为定性和定量指标，定量指标可通过测量仪表检测得到，各种定量指标具有不同的量纲；定性指标具有模糊性，可通过专家打分等主观方法得到，分数越高，表示性能越高。将定量指标和定性指标划分为 10 个等级，如表 1、表 2 所示。

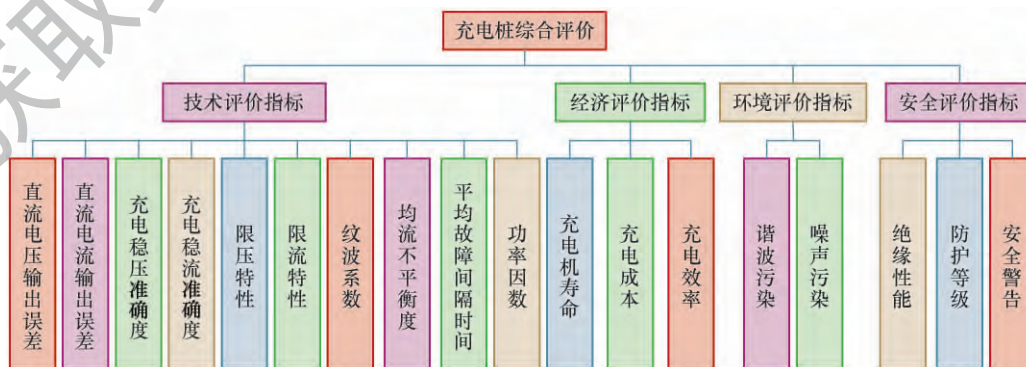


图 2 充电桩评价指标框图

表1 定量指标等级划分表

等级值	电压输出 误差 (%)	电流输出 误差 (%)	稳压准确度 (%)	稳流准确度 (%)	纹波系数 (%)	均流不平衡度 (%)	充电效率 (%)	功率因数	谐波污染 (%)	噪声污染 /dB
1	(0, 0.1]	(0, 0.06]	(0, 0.04]	(0, 0.2]	(0, 0.04]	(0, 1]	(98, 100]	(0.98, 1]	(0, 6]	(0, 12]
2	(0.1, 0.2]	(0.06, 0.12]	(0.04, 0.08]	(0.2, 0.4]	(0.04, 0.08]	(1, 2]	(96.5, 98]	(0.965, 0.98]	(6, 12]	(12, 24]
3	(0.2, 0.3]	(0.12, 0.18]	(0.08, 0.12]	(0.4, 0.6]	(0.08, 0.12]	(2, 3]	(95, 96.5]	(0.95, 0.965]	(12, 18]	(24, 36]
4	(0.3, 0.4]	(0.18, 0.24]	(0.12, 0.16]	(0.6, 0.8]	(0.12, 0.16]	(3, 4]	(93.5, 95]	(0.935, 0.95]	(18, 24]	(36, 48]
5	(0.4, 0.5]	(0.24, 0.3]	(0.16, 0.2]	(0.8, 1]	(0.16, 0.2]	(4, 5]	(92, 93.5]	(0.92, 0.935]	(24, 30]	(48, 60]
6	(0.5, 0.6]	(0.3, 0.36]	(0.2, 0.24]	(1, 1.2]	(0.2, 0.24]	(5, 6]	(90, 92]	(0.90, 0.92]	(30, 36]	(60, 72]
7	(0.6, 0.7]	(0.36, 0.42]	(0.24, 0.28]	(1.2, 1.4]	(0.24, 0.28]	(6, 7]	(88, 90]	(0.88, 0.90]	(36, 42]	(72, 84]
8	(0.7, 0.9]	(0.42, 0.52]	(0.28, 0.4]	(1.4, 1.65]	(0.28, 0.38]	(7, 8.5]	(86, 88]	(0.86, 0.88]	(42, 52]	(84, 100]
9	(0.9, 1.1]	(0.52, 0.62]	(0.4, 0.52]	(1.65, 1.9]	(0.38, 0.48]	(8.5, 10]	(84, 86]	(0.84, 0.86]	(52, 62]	(100, 116]
10	(1.1, 1.3]	(0.62, 0.72]	(0.52, 0.64]	(1.9, 2.15]	(0.48, 0.58]	(10, 11.5]	(82, 84]	(0.82, 0.84]	(62, 72]	(116, 132]

表2 定性指标等级划分表

等级值	限压特性	限流特性	故障间隔时间	充电机寿命	充电成本	绝缘性能	防护等级	安全警告
1	[10, 9)	[10, 9)	[10, 9)	[10, 9)	[10, 9)	[10, 9)	[10, 9)	[10, 9)
2	[9, 8)	[9, 8)	[9, 8)	[9, 8)	[9, 8)	[9, 8)	[9, 8)	[9, 8)
3	[8, 7)	[8, 7)	[8, 7)	[8, 7)	[8, 7)	[8, 7)	[8, 7)	[8, 7)
4	[7, 6)	[7, 6)	[7, 6)	[7, 6)	[7, 6)	[7, 6)	[7, 6)	[7, 6)
5	[6, 5)	[6, 5)	[6, 5)	[6, 5)	[6, 5)	[6, 5)	[6, 5)	[6, 5)
6	[5, 4)	[5, 4)	[5, 4)	[5, 4)	[5, 4)	[5, 4)	[5, 4)	[5, 4)
7	[4, 3)	[4, 3)	[4, 3)	[4, 3)	[4, 3)	[4, 3)	[4, 3)	[4, 3)
8	[3, 2)	[3, 2)	[3, 2)	[3, 2)	[3, 2)	[3, 2)	[3, 2)	[3, 2)
9	[2, 1)	[2, 1)	[2, 1)	[2, 1)	[2, 1)	[2, 1)	[2, 1)	[2, 1)
10	[1, 0)	[1, 0)	[1, 0)	[1, 0)	[1, 0)	[1, 0)	[1, 0)	[1, 0)

第1等级生成样本时，各评估项第1级的左端点值取其右端点值的1/2，第10级的右端点值取其左端点值的2倍。在每个等级区间内均匀随机生成100个样本 $x(i, j)$ 与对应的等级评估值 $y(i)$ ，对样本集按照式(1)进行标准化处理，采用QPSO得到最佳投影方向 $a^* = (-0.234, -0.2356, -0.2282, -0.2368, -0.2317, -0.2357, 0.2366, 0.2363, -0.2354, -0.2365, 0.2368, 0.2371, 0.2370, 0.2370, 0.2369, 0.2368, 0.2370, 0.2370)$ 。

将所有标准化后的样本按照最优投影方向投影，得到最优投影值集合 $z^*(i)$ 与等级评估值 $y(i)$ 函数关系图如图3所示。图3中10个的横坐标区间分别为 $[-7.374, -6.815]$ 、 $[-5.603, -4.964]$ 、 $[-3.825, -3.155]$ 、 $[-2.042, -1.624]$ 、 $[-0.739, -0.247]$ 、 $[0.754, 1.178]$ 、 $[2.077, 2.566]$ 、 $[3.418,$

$3.838]$ 、 $[4.744, 5.166]$ 、 $[6.157, 6.475]$ 。对图3中各区间端点值进行分段线性插值，得到电动汽车充电桩的分段插值评价模型，评价模型为 $y = k^*z + b$ ，评价模型在各段区间系数 k 、 b 的值如表3所示。

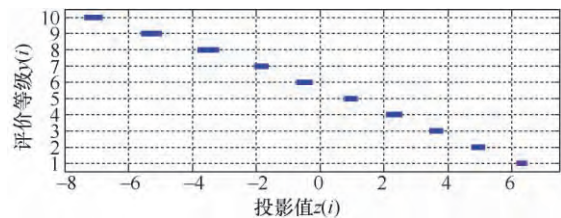


图3 投影值与等级评估值关系图

算例分析

文献[2]中电动汽车充电桩性能参数，其中定量、定性指标如表4、表5所示，用本文提出的投影寻踪等级评价模型进行等级评价。

表3 评价模型系数值

投影值 z	k	b	投影值 z	k	b	投影值 z	k	b
≤ -7.374	0	10	$(-2.042, -1.624]$	-1.129 9	5.165 3	$(3.418, 3.838]$	0	3
$(-7.374, -6.815]$	-0.825 4	4.374 8	$(-1.624, -0.247]$	0	6	$(3.838, 4.744]$	-1.103 4	7.234 2
$(-6.815, -5.603]$	0	9	$(-0.247, -0.739]$	-0.998 7	5.753 4	$(4.744, 5.166]$	0	2
$(-5.603, -4.964]$	-0.878 4	4.639 9	$(-0.739, 0.754]$	0	5	$(5.166, 6.157]$	-1.009 1	7.212 5
$(-4.964, -3.825]$	0	8	$(0.754, 2.077]$	-1.112 2	6.310 1	>6.157	0	1
$(-3.825, -3.155]$	-0.898 9	5.164 1	$(2.077, 2.566]$	0	4			
$(-3.155, -2.042]$	0	7	$(2.566, 3.418]$	-1.174 1	7.013 3			

表4 充电桩定量指标参数

充电桩	电压输出 误差 (%)	电流输出 误差 (%)	稳压准确度 (%)	稳流准确度 (%)	纹波系数 (%)	均流不平 衡度 (%)	充电效率 (%)	功率因数	谐波污染 (%)	噪声污染 /dB
甲	0.2	0.26	0.08	0.99	0.15	4	92.13	0.986	8	51.68
乙	0.35	0.75	0.18	0.76	0.13	3	95.50	0.991	8.5	55
丙	0.46	0.85	0.15	0.8	0.17	3.5	93.11	0.950	8	57

表5 充电桩定性指标参数

充电桩	限压特性	限流特性	故障间隔时间	充电机寿命	充电机成本	绝缘性能	防护等级	安全警告
甲	8.113 6	6.666 7	4.980 8	6.840 9	6.096 2	7.083 3	7.500 0	7.666 7
乙	8.083 3	6.477 3	4.305 6	7.068 2	6.785 7	4.865 4	8.194 4	8.083 3
丙	8.000 0	7.194 4	6.900 0	7.500 0	7.194 4	6.900 0	8.100 0	8.100 0

将表4、表5中的指标按照式(1)标准化处理后,利用最佳投影方向求得投影值 z^* ,分别为2.659、2.104和2.028。根据表3中各段函数系数可得到各个充电桩的评价等级值,并与文献[2]的评价结果作对比,文献[2]采用不确定层次分析法对充电桩进行评价,如表6所示。

表6 不同方法得到评价结果比较

评价方法	甲	乙	丙
文献 [2]	5.866 4	5.290 4	5.050 1
本文	3.891	4	4

文献[2]采用不确定层次分析法对充电桩进行评价时,等级值越高表示充电桩性能越好,本文采用投影寻踪等级评价模型进行评估,由表1、表2可知,等级值越低表示充电桩性能越优越,等级值越高表示充电桩性能越差。从表6的评价结果比较可知,本文与文献[2]评价结果相似,充电桩甲的性能最优秀,充电桩乙、丙性能大致相同,因此在充电桩选择时应着重考虑充电桩甲。

文献[2]在综合评价过程中,需人为确定

各单项评价指标的权重,评价结果易受主观因素影响。本文采用投影寻踪等级评价模型综合评价时,采用样本数据驱动,不需确定主观权重,评估结果更客观。

结束语

本文采用投影寻踪等级评价模型评价电动汽车充电桩,利用QPSO求解最佳投影方向,根据投影值及评价等级关系建立了充电桩综合评价插值模型,解决了单项评价指标不相容的问题,评价过程由样本数据驱动,误差较小,准确度较高,且不需确定权重、隶属度函数等主观性参数。

参考文献

[1] 胡泽春,宋永华,徐智威,等.电动汽车接入电网的影响与利用[J].中国电机工程学报,2012,32(4):1-10.
 [2] 刘锡正.电动汽车充电设备综合评价指标体系研究[D].北京:北京交通大学,2012.

(收稿日期:2013-07-30) EA