

# 遗传投影寻踪插值模型在 电能质量综合评估中的应用

周林, 栗秋华, 张凤

(高电压与电工新技术教育部重点实验室(重庆大学), 重庆市沙坪坝区 400030)

## Application of Genetic Projection Pursuit Interpolation Model on Power Quality Synthetic Evaluation

ZHOU Lin, LI Qiu-hua, ZHANG Feng

(Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology(Chongqing University), Ministry of Education,  
Shapingba District, Chongqing 400030, China)

**ABSTRACT:** The synthetic quantified evaluation of power quality is one of the principal foundations in power quality appraisal and electricity energy pricing. It is firstly proposed by the authors to apply the projection pursuit theory based on genetic algorithm in power quality evaluation, i.e., to transform multi-indices problem into single projection index problem by use of projection pursuit method. The projection direction is optimized by genetic algorithm speeded up by global convergent Gray code, and according to the relation between optimal projection values and corresponding grades a genetic projection pursuit interpolation model (GPPIM) for synthetic evaluation of power quality is built. Case study results show that the synthetic evaluation result of power quality from the built model is more objective and rational, so the correctness and superiority of the built model are verified.

**KEY WORDS:** synthetic evaluation of power quality; interpolation technique; genetic algorithm; projection pursuit

**摘要:** 对电能质量进行综合量化评估是衡量电能质量优劣和制定电价的主要依据之一。文章提出将基于遗传算法的投影寻踪理论应用于电能质量评估, 利用投影寻踪理论将多指标问题转化为单一投影指标问题, 采用全局收敛的格雷码加速遗传算法优化投影方向, 根据最佳投影值及其对应等级的关系构建了用于电能质量综合评估的遗传投影寻踪插值模型。实例计算结果表明运用该模型得到的电能质量综合评估结果更客观、合理, 证明了该模型的正确性和优越性。

**关键词:** 电能质量综合评价; 插值; 遗传算法; 投影寻踪

基金项目: 重庆市自然科学基金资助项目(2006BB6219)。

Project Supported by Science and Technology Project Foundation of Science Committee of Chongqing(2006BB6219).

## 0 引言

对电能质量进行综合量化评估是衡量电能质量优劣和制定电价的主要依据, 也是建立公平电力市场的必要条件, 具有深刻的理论和现实意义<sup>[1-2]</sup>。目前的电能质量综合评估方法主要是模糊综合评估法<sup>[1-6]</sup>。文献[1]提出了评估电能质量的模糊模型和基于模糊原理的综合指标, 实现了对电能质量的综合评估, 但该方法需要指定隶属度样本集合, 没有给出各指标间的量化关系。文献[3-4]提出的模糊综合评判的二级评判法难以在评判过程中准确确定各项指标的权重。文献[5]将模糊综合评判法与层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)相结合, 但采用 AHP 确定的权重缺少客观性。文献[6]对文献[5]进行了修正和改进, 通过可变的综合权重增强了电能质量综合评估结果的客观性, 但无法改变由 AHP 得到的权重本身的主观性。

投影寻踪法(projection pursuit, PP)具有逼近一般非线性映射和分类的能力, 但 PP 在处理小样本问题时易产生模型误差, 处理多元数据问题时很难找到最优投影方向<sup>[7-8]</sup>。目前的遗传算法具有全局搜索能力强、信息处理的隐并行性和鲁棒性强、可规模化等优点, 是解决投影优化问题的新方法<sup>[9-13]</sup>。本文利用 PP 把多指标问题转化为单一投影指标问题, 利用全局收敛的格雷码加速遗传算法优化投影方向<sup>[14-15]</sup>, 根据最佳投影值与对应等级的关系建立了用于电能质量综合评估的遗传投影寻踪插值模型(genetic projection pursuit interpolation model, GPPIM)。

### 1 基于 GPPIM 的电能质量综合评估步骤

PP 的基本思想是利用计算机技术把高维数据通过某种组合投影到低维子空间, 通过优化投影指标函数求出最能反映原始高维数据结构或特征的投影向量, 通过在低维空间分析数据结构达到研究和分析高维数据的目的<sup>[15]</sup>。其中投影目标函数的构造、优化方法的选择、数学模型的建立是应用 PP 解决实际问题的关键。传统的 PP 计算过程复杂, 在一定程度上限制了 PP 的深入研究与广泛应用。

基于 GPPIM 的电能质量综合评估步骤如下:

(1) 建立投影数据。某次电能样本的标准电能等级及其电能指标分别为  $y(i)$  和  $\{x(i, j) | j = 1 - m\}$ , 其中  $i = 1 - n$ ;  $m$ 、 $n$  分别表示电能质量指标的数目和样本容量, 此处  $m = 9$  表示 9 项电能质量评估指标, 即电压偏差指标、电压暂降指标、三相电压不平衡指标、电压波动指标、电压闪变指标、电压谐波指标、频率偏差指标、可靠性指标和服务性指标。电能质量越差, 电能等级越高。最低电能等级为 1, 最高电能等级为 5。为消除电能质量指标量纲的影响, 对电能指标进行标准化处理, 即

$$x^*(i, j) = \{x(i, j) - E[x(j)]\} / S[x(j)] \quad (1)$$

式中:  $E[x(j)]$ 、 $S[x(j)]$  分别为第  $j$  个原始电能指标值  $\{x(i, j) | j = 1 - 9\}$  的均值和标准差;  $x^*(i, j)$  为标准化的电能指标。

(2) 计算投影值。设  $a = \{a(1), a(2), \dots, a(9)\}$  为投影方向, PP 将  $x^*(i, j)$  投影到  $a$  上的一维投影值为

$$z(i) = \sum_{j=1}^9 a(j)x(i, j) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

(3) 建立投影目标函数。在综合投影值时, 要求  $z(i)$  的标准差  $S_z$  尽可能大、 $z(i)$  与  $y(i)$  的相关系数绝对值  $|R_{zy}|$  尽可能大<sup>[16-17]</sup>, 因此本文取投影目标函数为

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

(4) 用格雷码加速遗传算法优化投影方向<sup>[8]</sup>。投影目标函数值随投影方向变化, 通过求解投影目标函数最大值可估计出最优投影方向, 即

$$\max f(a) = S_z |R_{zy}|$$

其约束条件为

$$\sum_{j=1}^9 a^2(j) = 1 \quad (-1.0 \leq a(j) \leq 1.0) \quad (4)$$

为提高 GPPIM 的实际应用能力和计算效率, 本文采用格雷码加速遗传算法求出最优投影方向<sup>[19-20]</sup>。在单位超球面中随机抽取若干个初始投影方向作

为初始群体, 用格雷码加速遗传算法优化投影目标函数, 建立与投影目标函数大小相适应的适应度函数, 通过选择、杂交、变异等遗传操作, 使最大适应度函数值对应的个体与最大投影目标函数对应的最佳投影方向  $a^*$  相对应<sup>[18-20]</sup>。

(5) 建立电能质量综合评估的数学模型。由式(4)求得最佳投影方向  $a^*$ , 代入式(2)得到第  $i$  个样品的最优投影值  $z^*(i)$ , 根据  $z^*(i)$  与  $y(i)$  的散点图建立电能质量综合评估的投影寻踪模型。

### 2 电能质量综合评估指标体系

基于 GPPIM 的电能质量评估指标体系<sup>[6]</sup>见图 1。

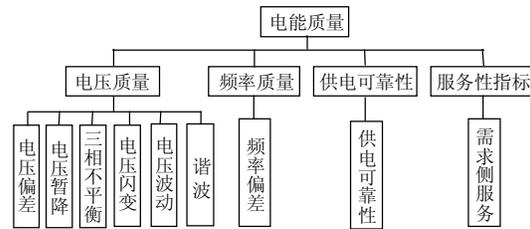


图 1 电能质量评估指标体系

Fig. 1 The index system for power quality evaluation

对图中每个电能质量指标进行等级评定<sup>[1,4,6]</sup>, 按照其质量优劣, 分为优、良、中、合格、不合格 5 个等级, 分别用  $Q_1$ 、 $Q_2$ 、 $Q_3$ 、 $Q_4$ 、 $Q_5$  表示。电能质量评估指标的等级界限如表 1 所示。

表 1 电能质量评估指标的等级界限

Tab. 1 The grade limit of power quality evaluated index

指 标	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	
电 压 指 标	电压偏差%	$\leq 1.20$	$\leq 3.00$	$\leq 4.50$	$\leq 7.0$	$\geq 7.00$
	电压暂降%	$\geq 0.90$	$\geq 0.80$	$\geq 0.50$	$\geq 0.10$	$\leq 0.10$
	三相不平衡%	$\leq 0.50$	$\leq 1.00$	$\leq 1.50$	$\leq 2.00$	$\geq 2.00$
	电压波动%	$\leq 0.50$	$\leq 1.00$	$\leq 1.50$	$\leq 2.00$	$\geq 2.00$
	电压闪变%	$\leq 0.20$	$\leq 0.50$	$\leq 0.80$	$\leq 1.00$	$\geq 1.00$
	电压谐波%	$\leq 1.00$	$\leq 2.00$	$\leq 3.00$	$\leq 5.00$	$\geq 5.00$
频率指标	频率偏差	$\leq 0.05$	$\leq 0.10$	$\leq 0.15$	$\leq 0.20$	$\geq 0.20$
供电可靠性指标		$\geq 0.95$	$\geq 0.85$	$\geq 0.80$	$\geq 0.70$	$\geq 0.70$
服务性指标		$\geq 0.90$	$\geq 0.80$	$\geq 0.70$	$\geq 0.60$	$\geq 0.60$

用均匀随机产生的 1000 个指标样本  $x(i, j)$  与其对应的等级  $y(i)$  组成样本序列, 对  $x(i, j)$  进行归一化处理后得到  $x^*(i, j)$  ( $i = 1, 2, \dots, 5000$ ;  $j = 1, 2, \dots, 9$ )。根据式(1)~(4)求得最佳投影方向为  $a^* = (0.4025, 0.4796, -0.6873, -0.4633, 0.5782, 0.6483, -0.3246, 0.7453, 0.2249)$ 。一维最佳投影值为  $z^*(i) = 0.4025 x^*(i, 1) + 0.4796 x^*(i, 2) - 0.6873 x^*(i, 3) - 0.4633 x^*(i, 4) + 0.5782 x^*(i, 5) + 0.6483 x^*(i, 6) - 0.3246 x^*(i, 7) + 0.7453 x^*(i, 8) + 0.2249 x^*(i, 9)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) (5)

因此最大投影目标函数值  $f(a^*) = 0.7883$ 。最佳

投影值  $z^*(i)$  与等级评估值  $y(i)$  的散点图如图 2 所示。图中点 A、B、C、D、E、F、G 和 H 的坐标分别为(-2.7317, 4)、(-2.3286, 4)、(-1.9328, 3)、(-1.3347, 3)、(-1.1436, 2)、(-0.7758, 2)、(-0.6439, 1)和(0.3217, 1)。由图 2 可知,  $z^*(i)$  与  $y(i)$  的图形为阶梯形下降曲线。

根据点 A、B、C、D、E、F、G 和 H 进行分段线性插值, 本文得到的电能质量综合评估数学模型为

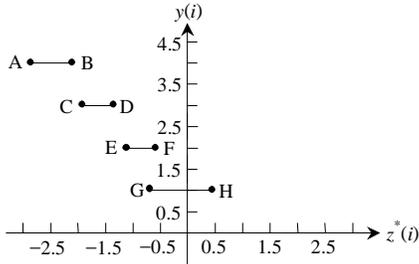


图 2 最佳投影值与经验等级的散点图  
Fig. 2 Scatter diagram of optimal projection value and versus empirical grade

$$y^*(i) = \begin{cases} 4, & z^*(i) \leq -2.2682 \\ 4 + \frac{3-4}{-1.9328+2.2682} [z^*(i) + 2.2682], & -2.2682 < z^*(i) \leq -1.9328 \\ 3, & -1.9328 < z^*(i) \leq -1.3347 \\ 3 + \frac{2-3}{-1.1436+1.3347} [z^*(i) + 2.2682], & -1.3347 < z^*(i) \leq -1.1436 \\ 2, & -1.1436 < z^*(i) \leq -0.7758 \\ 2 + \frac{1-2}{-0.6439+0.7758} [z^*(i) + 0.7758], & -0.7758 < z^*(i) \leq -0.7758 \\ 1, & z^*(i) \leq -0.6439 \end{cases} \quad (6)$$

### 3 实验分析

基于上述模型, 根据重庆市沙坪坝区某观测站 5 个观测点的电能质量实测数据进行算例分析。该地区 5 个观测点的电能质量实测数据见表 2。

表 2 观测站的电能质量实测数据  
Tab. 2 Practical values of index at the observation station

观测点	电压偏差/%	电压暂降/%	三相不平衡/%	电压波动/%	电压闪变/%	电压谐波/%	频率偏差	可靠性指标	服务性指标
观测点 1	3.212	79.63	0.83	1.33	47.3	1.72	0.092 2	0.833	0.832
观测点 2	6.68	15.89	1.36	1.53	84.7	4.28	0.156 2	0.762	0.713
观测点 3	4.35	51.56	1.35	1.95	63.4	2.67	0.118 0	0.796	0.864
观测点 4	5.33	58.56	1.74	1.37	82.6	3.36	0.178 7	0.740	0.684
观测点 5	4.22	48.63	1.83	1.58	82.8	4.57	0.189 2	0.764	0.783

将表中数据按式(1)归一化处理后, 将式(5)中的  $a^*$  代入式(2)得到最佳投影值, 根据式(6)即可得到各个观测点的电能质量等级值。基于 GPPIM 得到的 5 个观测点的电能质量综合评估结果见表 3。

表 3 基于 GPPIM 的电能质量综合评估结果  
Tab. 3 Results of power quality evaluation based on GPPIM

评估指标	观测点 1	观测点 2	观测点 3	观测点 4	观测点 5
最佳投影值	-1.152 3	-2.776 6	-1.922 4	-2.087 6	-2.314 2
等级值	2.045 5	4	3	3.461 5	4

为便于比较, 本文的评估结果与文献[4]和[6]的评估结果如表 4 所示。

表 4 采用不同方法得到的评估结果比较  
Tab. 4 The evaluation results of different methods

评估方法	观测点 1	观测点 2	观测点 3	观测点 4	观测点 5
文献[4]	2 级	4 级	3 级	3 级	4 级
文献[6]	2 级	4 级	3 级	4 级	4 级
本文	2.045 5 级	4 级	3 级	3.461 5 级	4 级

由表 4 可知, 本文提出的评估方法较文献[4]和[6]更为合理、准确。对于观测点 1, 采用文献[4]和[6]的方法对上述观测站电能质量进行综合评估, 得到的评估等级均为 2 级, 采用本文的方法得到的评估等级为 2.0455 级。对于观测点 4, 采用文献[4]

的方法得到的评估等级为 3 级, 采用文献[6]的方法得到的评估等级为 4 级, 采用本文的方法得到的评估等级为 3.4615 级。综上可知, 本文提出的 GPPIM 不仅可以用等级值判定电能质量的级别, 而且可以利用最佳投影值进一步判断处于该等级的程度, 分辨率更高, 评估结果更客观、合理。

### 4 结论

(1) GPPIM 模型可以把电能质量综合评估的多维评估指标综合为 1 维评估指标, 根据电能质量等级值进行电能质量综合评估, 解决了单项评估指标结果不相容的问题。

(2) GPPIM 采用大样本数据、误差较小、精度较高。由于整个评估过程由样本数据驱动, 该电能质量综合评估方法属于非函数模式类评估方法, 克服了模糊综合评判等函数模式类评估方法构造指标集与评估等级之间函数关系的困难, 适用性较强。

(3) GPPIM 既可以利用等级值从整体上判别电能质量的级别, 又可以利用最佳投影值对某一等级的电能质量进行细致地评估, 分类能力和排序能力较强。

## 参考文献

- [1] 贾清泉, 宋家骅, 兰华, 等. 电能质量及其模糊方法评价[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 46-49.  
Jia Qingquan, Song Jiahua, Lan Hua, et al. Power quality and fuzzy method evaluation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 46-49(in Chinese).
- [2] 金广厚, 李庚银, 周明. 电能质量市场理论的初步探讨[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(12): 1-6.  
Jin Guanghou, Li Gengyin, Zhou Ming. Primary study of power quality market theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(12): 1-6(in Chinese).
- [3] Cai Liang, Chen Hongkun. Fuzzy studies on power quality-part I: index and evaluation[C]. 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Brasil, 2002.
- [4] 唐会智, 彭建春. 基于模糊理论的电能质量综合量化指标研究[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 85-88.  
Tang Hui zhi, Peng Jianchun. Research on synthetic and quantified appraisal index of power quality based on fuzzy theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 85-88(in Chinese).
- [5] Farghal S A, Kandil M S, Elmitwally A. Quantifying electric power quality via fuzzy modeling and analytic hierarchy processing[J]. IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution, 2002, 149(1): 44-49.
- [6] 赵霞, 赵成勇, 贾秀芳, 等. 基于可变权重的电能质量模糊综合评价[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 11-16.  
Zhao Xia, Zhao Chengyong, Jia Xiufang, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power quality based on changeable weight[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 11-16(in Chinese).
- [7] 李寿德, 安凯. 投影寻踪在机会约束中的应用研究[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 9(9): 72-78.  
Li Shoude, An Kai. Application studies of projection pursuit in the chance constrained programming[J]. System Engineering Theory and Practice, 2005, 9(9): 72-78(in Chinese).
- [8] Cheng Ping. Optimum initial condition of projection pursuit approximation[J]. Acta Mathematic Application Sinica, 1995, 2(3): 269-280.
- [9] 代姚, 周泉, 雷绍兰, 等. 基于稳定参数控制的改进遗传算法在配电网规划中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 50-54.  
Dai Yao, Zhou Quan, Lei Shaolan, et al. Improved genetic algorithm on evolutionarily stable strategy applied in distribution network planning[J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 50-54(in Chinese).
- [10] 顾庆文, 陈刚, 朱蕾蕾, 等. 基于遗传算法和径向基函数神经网络的短期边际电价预测[J]. 电网技术, 2006, 30(7): 18-22.  
Gu Qingwen, Chen Gang, Zhu leilei, et al. Short-term marginal price forecasting based on genetic algorithm and radial basis function neural network[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 18-22(in Chinese).
- [11] 孙力勇, 张焰, 蒋传文. 基于矩阵实数编码遗传算法求解大规模机组组合问题[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 83-88.  
Sun Liyong, Zhang Yan, Jiang Chuanwen. A solution to the unit commitment problem based on matrix real-coded genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 83-88(in Chinese).
- [12] 刘方, 颜伟. 基于遗传算法和内点法的无功优化混合策略[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 67-72.  
Liu Fang, Yan Wei. A hybrid strategy based on GA and IPM for optimal[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 67-72(in Chinese).
- [13] 冯丽, 邱家驹. 基于模糊多目标遗传优化算法的节假日电力负荷预测[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 29-34.  
Feng Li, Qiu Jiaju. Short-term load forecasting for anomalous days based on fuzzy multi-objective genetic optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 29-34(in Chinese).
- [14] 金菊良, 洪天求, 李如忠. 巢湖流域生态环境质量动态综合评价的客观赋权法[J]. 水利发电学报, 2005, 24(5): 99-103.  
Jin Juliang, Hong Tianqiu, Li Ruzhong. Objective weighted model for evaluating dynamic eco-environmental comprehensive quality of chao hu lake basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(5): 99-103(in Chinese).
- [15] 杨晓华. 格雷码加速遗传算法及其理论研究[J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(3): 100-106.  
Yang Xiaohua. Gray coding based accelerating genetic algorithm and its theory[J]. System Engineering Theory and Practice, 2003, 23(3): 100-106(in Chinese).
- [16] 项静恬, 史久恩. 非线性系统中数据处理的统计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [17] 李世玲. 基于投影寻踪和遗传算法的一种非线性系统建模方法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 4(4): 22-25.  
Li Shiling. A nonlinear system modeling method based on projection pursuit and genetic algorithm[J]. System Engineering Theory and Practice, 2004, 4(4): 22-25(in Chinese).
- [18] 方必和, 程志宏, 刘慧萍. 投影寻踪模型在国民经济综合评价中的应用[J]. 运筹与管理, 2005, 14(5): 85-88.  
Fang Bihe, Cheng Zhihong, Liu Huiping. Application of projection pursuit model in integrated evaluation of national economy[J]. Operations Research and Management Science, 2005, 14(5): 85-88(in Chinese).
- [19] 张世华, 睢刚. 一种实数编码的自适应遗传算法及其在热工程辨识中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 210-214.  
Zhang Shihua, Ju Gang. A real-coded adaptive genetic algorithm and its application research in thermal process identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 210-214(in Chinese).
- [20] 朱红霞, 沈炯, 李益国. 一种动态模糊聚类算法及其在热工过程模糊建模中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 34-40.  
Zhu Hongxia, Shen Jiong, Li Yigu. A novel dynamic clustering algorithm and its application in fuzzy modeling for thermal processes[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(7): 34-40(in Chinese).

收稿日期: 2006-09-04.

作者简介:

周林(1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事 FACTS 及电能质量方面的研究;

栗秋华(1983—), 男, 硕士研究生, 主要从事 FACTS 和电能质量方面的研究, E-mail: liqihua831118@yahoo.com.cn;

张凤(1982—), 男, 硕士研究生, 主要从事 FACTS 和电能质量方面的研究。

(编辑 杜宁)