

多类分类 SVM 在电能质量扰动识别中的应用

陈春玲, 许童羽, 郑伟, 姜凤利, 郭丹

(沈阳农业大学信息与电气工程学院, 辽宁 沈阳 110161)

摘要: 结合傅里叶变换良好的幅频特性、小波变换良好的时频特性和支持向量机优秀的统计学习能力, 采用多类分类支持向量机进行电能质量扰动的分类识别。对电压骤升、电压骤降、电压中断、谐波、电压波动、暂态振荡、瞬时脉冲、频率偏差等八种常见电能质量扰动进行数学建模, 利用傅里叶变换和小波变换对产生的样本波形进行特征提取, 将特征量输入到 osu_svm 进行电能质量扰动多类分类。算例表明该方案具有识别正确率高, 训练样本数少, 训练时间短, 实时性好, 对噪声不敏感等优点, 是电能质量扰动识别的有效方法。

关键词: 电能质量; 扰动识别; 支持向量机; 多类分类

Application of multi-class classification SVM in power quality disturbances classification

CHEN Chun-ling, XU Tong-yu, ZHENG Wei, JIANG Feng-li, GUO Dan

(School of Information and Electric Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

Abstract: This paper uses the multi-class classification for support vector machine and combines the good amplitude-frequency characteristic of Fourier transform, the good time-frequency characteristics of wavelet transform and the excellent statistical learning ability of support vector machine to make the classification and recognition to the disturbances of power quality. Mathematical modeling is done for the 8 kinds of common power quality disturbances, namely voltage swell, voltage sag, voltage interruption, harmonic, voltage fluctuation, transient oscillation, transient pulse and frequency deviation, and then Fourier transform and wavelet transform are used to extract the characteristics of the waveform of the generated samples, and the characteristic value is input to the osu_svm and the quality disturbances multi-class classification are done. The example shows that this method has a high recognition accuracy, a few training samples and a short training time, a good real-time performance, and is not sensitive to noise, etc. It is an effective method for power quality disturbances classification.

Key words: power quality; disturbances classification; support vector machine; multi-class classification

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)13-0074-05

0 引言

实际电网中往往同时存在多种电能质量扰动, 对这些扰动信号不仅要实现快速检测, 还需要准确识别, 这就需要对各种扰动进行正确的分类。而监测到的电能质量数据往往十分庞大, 因此实现各种扰动快速准确的自动分类, 已成为电能质量分析领域研究的热点问题^[1]。

目前, 应用于电能质量扰动识别的智能方法主要有小波变换、模糊技术、多维分型、人工神经网络、支持向量机 (Support Vector Machines, SVM) 等。人工神经网络是分类识别的重要方法, 具有结

构简单和求解问题能力强的优点, 但是它存在算法局部最优问题, 训练时间较长, 易发生过拟合等缺点。模糊技术通过简单明了的“IF-THEN”形式的知识规则形成判断, 识别效率较高, 但由于许多电能质量扰动, 例如谐波、振荡、电压波动等, 很难建立“IF-THEN”这样的明显知识规则, 因此限制了模糊技术的运用。支持向量机是建立在统计学习 VC 维理论和结构风险最小原理基础上的识别方法, 有效地解决了小样本、高维数、非线性等的学习问题, 并克服了人工神经网络学习合理结构难以确定和存在局部最优等缺点, 大大提高了学习方法的泛化能力^[2]。目前支持向量机已广泛应用于人脸识别、故障分类、非线性系统建模和辨识等领域, 在电力领域主要应用于系统负荷预测^[3-4]、故障诊

基金项目: 辽宁省教育厅高校科研 A 类项目 (2008635)

断^[5-6]以及扰动识别^[7-9]等领域。

文献[7-8]利用多级支持向量机进行分类,需构建 $N-1$ 个两类 SVM 分类树对 N 类电能质量扰动信号进行分类。而利用多类支持向量机进行分类,则只需构建一个 N 类多类分类器,有利于减少训练时间,提高分类效率。本文首先用 FFT、小波变换对扰动信号学习样本进行特征量提取,然后构造多类支持向量机分类树,对支持向量机进行学习,学习好的支持向量机分类树即可用于电能质量扰动分类。

1 多类分类支持向量机原理

支持向量机最先是针对两分类问题提出的,目标是从已知样本中推出一个函数来,对两类对象进行分类。而实际问题经常需要在多类 ($n>2$) 之间作出判断,因此需要将 SVM 推广到多分类问题上。

利用两类分类的方法,利用下列步骤构造一个 n 类分类器^[2]:

(1) 构造 n 个两类分类规则,其中规则 $f_k(x), k=1, \dots, n$ 将第 k 类的训练样本与其他训练样本分开(若向量 x_i 属于第 k 类,则 $\text{sign}[f_k(x_i)] = 1$, 否则 $\text{sign}[f_k(x_i)] = -1$)。

(2) 通过选取 $f_k(x)$ 中最大值所对应的类别:

$$m = \arg \max \{f_1(x_i), \dots, f_n(x_i)\} \quad (1)$$

构造出一个 n 类分类器。

对于支持向量机,我们可以直接求取多类问题。设已知训练数据:

$$x_1^1, \dots, x_{l_1}^1, \dots, x_1^n, \dots, x_{l_n}^n \quad (2)$$

其中 x_i^k 中的上标 k 表示向量属于第 k 类。

考虑线性函数集:

$$f_k(x) = (x \cdot w^k) + b_k, \quad k=1, \dots, n \quad (3)$$

目标是构造 n 个函数 (n 对 (w^k, b_k)), 使得规则:

$$m = \arg \max \{[(x \cdot w^1) + b_1], \dots, [(x \cdot w^n) + b_n]\} \quad (4)$$

将训练数据无错误地分开,即不等式:

$$(x_i^k \cdot w^k) + b_k - (x_i^m \cdot w^m) - b_m \geq 1 \quad (5)$$

对所有 $k=1, \dots, n, m \neq k$ 和 $i=1, \dots, l_k$ 成立。

如果有这样的一种解法,选取一系列点对 $(w^k, b_k), k=1, \dots, n$, 使得泛函:

$$\sum_{k=1}^n (w^k \cdot w^k) \quad (6)$$

取最小值。

如果训练数据不能被无错误地分开,则最小化泛函:

$$\sum_{k=1}^n (w^k \cdot w^k) + C \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^{l_k} \xi_i^k \quad (7)$$

约束条件为:

$$(x_i^k \cdot w^k) + b_k - (x_i^m \cdot w^m) - b_m \geq 1 - \xi_i^k \quad (8)$$

为了解上述最优化问题,采用带 Lagrange 乘子的最优化技术,得到:

(1) 函数 $f_k(x)$ 在支持向量机上有列展开式:

$$f_k(x) = \sum_{m \neq k} \sum_{i=1}^{l_k} a_i(k, m) (x \cdot x_i^k) - \sum_{m \neq k} \sum_{j=1}^{l_m} a_j(m, k) (x \cdot x_j^m) + b_k \quad (9)$$

(2) 展开式的系数 $a_i(k, m), k=1, \dots, n, m \neq k, i=1, \dots, l_k, j=1, \dots, l_m$ 需要最小化二次形式:

$$W(a) = \sum_{k=1}^n \sum_{m \neq k} \left[\sum_{i=1}^{l_k} a_i(k, m) - \frac{1}{2} \sum_{m^* \neq k} \left(\sum_{i,j=1}^{l_k} a_j(k, m^*) a_j(k, m) (x_i^k \cdot x_j^{m^*}) + \sum_{i=1}^{l_m} \sum_{j=1}^{l_{m^*}} a_i(m, k) a_j(m^*, k) (x_i^m \cdot x_j^{m^*}) - 2 \sum_{i=1}^{l_k} \sum_{j=1}^{l_{m^*}} a_i(k, m^*) a_j(m, k) (x_i^k \cdot x_j^{m^*}) \right) \right] \quad (10)$$

约束条件为:

$$0 \leq \sum_{m \neq k} a_i(k, m) \leq C \quad (11)$$

$$\sum_{m \neq k} \sum_{i=1}^{l_k} a_i(k, m) = \sum_{m \neq k} \sum_{j=1}^{l_m} a_j(m, k) \quad (12)$$

对于 $n=2$, 该问题的解等价于两类分类的解。

对于 $n>2$, 必须同时估计 $l(n-1)$ 个参数 $a_i(k, m), i=1, \dots, l_k, m \neq k, k=1, \dots, n$, 其中 $l = \sum_{k=1}^n l_k$, 因此需要估计 $n \times l$ 个参数,这样就利用两类分类规则构造了 n 类分类器。

2 基于多类 SVM 的电能质量扰动识别

电力系统中有许多种电能质量扰动信号,包括电网谐波、电压波动、电压骤降和电压骤升、电压中断、暂态振荡等。基于多类支持向量机的电能质量扰动识别过程,包括电能质量扰动信号的建模、特征提取、SVM 分类三个步骤构成。

2.1 电能质量扰动信号的数学模型建立

根据 IEEE 对各类电能质量扰动的定义,本文通过 Matlab 程序用代数方程随机生成电压骤升、电压骤降、电压中断、谐波、电压波动、暂态振荡、

瞬时脉冲、频率偏差扰动这八种扰动信号的参考信号和测试信号，仿真波形如图 1 所示。在实际电力系统中的电压信号总是受到不同程度噪声影响，因此在以上八种电能质量扰动信号模型中叠加信噪比 $SNR=50$ db 的高斯随机白噪声，用以验证支持向量机算法的鲁棒性。

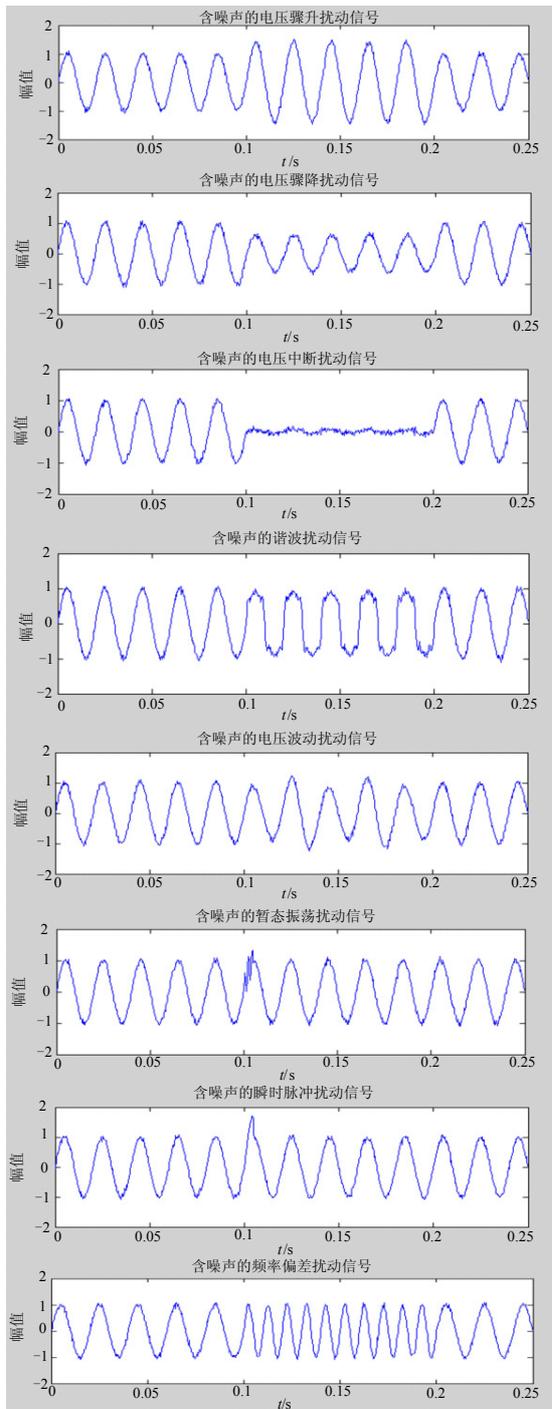


图 1 八种电能质量扰动信号的仿真波形

Fig.1 Simulation waveform of eight power quality disturbance signals

2.2 特征提取

电能质量扰动的分类是一个模式识别问题。在模式识别中，被观测的每个对象称为一个样本，对每个样本必须确定一些与识别有关的因素，作为研究的根据，每个因素称为一个特征。因此如何提取具有代表性而又有效的成分作为特征向量是模式识别的关键内容^[10]。

目前，对暂态振荡、骤升骤降等电能质量扰动波形的特征还没有统一认识，本文选择以下几个特征量^[9]进行分类：基波分量 (V_n)、相角偏移 (a_n)、总谐波畸变率 (THD_n)、低频谐波畸变率 (TS_n)、小波系数能量 (EW_n)。各特征量计算公式定义如下：

$$V_n = \sqrt{2} |V^n[1]| / N \quad (13)$$

$$a_n = \text{angle}(V^n[1]) - \text{angle}(V^1[1]) \quad (14)$$

$$THD_n = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\text{int}(N/2)} |V^n[k]|^2}}{|V^1[1]|} \quad (15)$$

$$TS_n = \frac{\sum_{k=2}^{10} |V^n[k]|^2}{|V^1[1]|} \quad (16)$$

$$EW_n = \sum_{k=1}^{le} |WC^n[k]| \quad (17)$$

上式中： $V^n[k]$ 是样本信号的傅里叶变换； WC^n 为采样信号每周波的小波系数； le 为 WC^n 的长度。

本文通过 Matlab 程序对采样后的扰动波形进行傅里叶变换，提取基波分量、相角偏移、总谐波畸变率、低频谐波畸变率的特征向量；采用小波对扰动信号进行两尺度小波变换提取特征向量-小波系数能量。

2.3 基于多类 SVM 的电能质量扰动分类

osu_svm 是 Ohio State University 的 Yi Zhao 和 Los Alamos National Lab 的 Junshui Ma 在台大林智仁教授的 LIBSVM 基础上开发的 SVM 软件，该软件可以解决两类分类、多类分类以及回归等问题，而且 osu_svm 是基于 Matlab 界面，可以方便地在 Matlab 环境下调用，是 SVM 最常用的软件。

基于 SVM 的电能质量扰动分类具体流程：

- 1) 建立训练数据库和测试数据库。训练数据和测试数据要同时构造，随机抽取。
- 2) 数据归一化。将特征输入量归一化到一个小的范围，一般为 $[-1, +1]$ 或者 $[0, 1]$ 范围。
- 3) 选择 SVM 的核函数及各参数。
- 4) 利用训练数据库的样本对 SVM 进行训练，得到训练模型。
- 5) 输入测试数据，利用训练好的模型进行分

类, 得到分类结果—分类正确率。

3 算例分析

在分类过程中, 扰动类型由数据的标识符确定, 电压骤升、电压骤降、电压中断、谐波、电压波动、暂态振荡、瞬时脉冲、频率扰动的标识符类型依次定义为 Y1、Y2、Y3、Y4、Y5、Y6、Y7、Y8, 每个扰动样本数据由提取出的特征代替, 训练时输入样本标识符和特征。根据八种电能质量扰动模型产生 2 000 个仿真扰动信号(其中每种扰动各 250 个), 通过 Matlab 特征提取程序, 得到包含前述八种电能

质量扰动特征信息的 2 000 个样本数据, 作为支持向量机的训练和测试样本数据。

大量实验数据表明, 训练样本必须多于测试样本, 随着训练样本的增加, 正确识别率有所增加; 但是训练样本增加到一定程度, 每种扰动所用的支持向量机数增加, 训练时间也随着增加, 识别率不再增加。因此, 选择合适的样本数是实际系统中的一个难题。

目前支持向量机常用的核函数有: 线性核函数、多项式核函数、高斯径向基核函数等。选用不同的核函数测试, 结果如表 1 所示。

表 1 不同核函数的分类结果比较

Tab.1 Comparison of different kernel function identification results

核函数 类型	分类正确率 / %							
	电压骤升	电压骤降	电压中断	谐波	电压波动	暂态振荡	瞬时脉冲	频率偏差
高斯径向基	100	100	100	90	100	100	100	100
线性	90	80	100	90	100	100	75	100
多项式	100	50	100	100	95	100	100	100

从表 1 识别结果可以看出, 同样的测试样本数据和训练样本数据, 采用不同的核函数结果不同, 其中利用高斯径向基核函数结果最理想。

抽取其中 800 个样本数据形成测试集(每种扰动各 100 个), 抽取 1 200 个样本数据形成训练集(每种扰动各 150 个), 选用高斯径向基核函数, σ 取 2, C 取 100 进行识别, 运行时间为 70 ms, 其识别结果见表 2。

表 2 高斯径向基核函数的识别结果

Tab.2 Gaussian radial basis kernel function of the identification results

扰动类型	分类结果 / %							
	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8
电压骤升	100	0	0	0	0	0	0	0
电压骤降	0	100	0	0	0	0	0	0
电压中断	0	0	100	0	0	0	0	0
谐波	0	0	0	100	0	0	0	0
电压波动	0	2	0	0	98	0	0	0
暂态振荡	0	0	0	0	3	97	0	0
瞬时脉冲	0	0	0	0	0	0	100	0
频率偏差	0	0	0	0	0	0	0	100

由表 2 可见, 利用多类支持向量机进行电能质量扰动识别, 速度快, 对噪声不敏感, 识别率高, 具有很高的识别精度。而且, 各种扰动信号参数都是在大范围内随机变化的, 这就证明了该识别方法具有较强的泛化能力, 同时本文特征向量的选取充分发挥了支持向量机良好的性能。

4 总结

电能质量扰动的自动识别可以及时反馈电网信息, 为进行电力系统电能质量分析和评估, 采取有效措施提高电能质量提供帮助。本文结合傅里叶变换良好的幅频特性、小波变换良好的时频特性和支持向量机优秀的统计学习能力, 利用支持向量机多类分类器对电能质量扰动分类进行了大量的实验, 算例结果表明该方案的突出优点是对噪声具有鲁棒性, 识别正确率高, 训练样本数少, 训练时间短, 实时性能良好, 可应用于电能质量扰动的在线识别。

参考文献

- [1] 程浩忠, 艾芊, 张志刚. 电能质量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
CHENG Hao-zhong, AI Qian, ZHANG Zhi-gang. Power quality[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [2] Vapnik V N. 统计学理论[M]. 许建华, 张学工, 译. 北京: 电子工业出版社, 2006.
Vapnik V N. Statistical learning theory[M]. XU Jian-hua, ZHANG Xue-gong, trans. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006.
- [3] 李云飞, 黄彦全, 蒋功莲. 基于 PCA-SVM 的电力系统短期负荷预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(5): 66-70.
LI Yun-fei, HUANG Yan-quan, JIANG Gong-lian. Short-term load forecasting based on PCA-SVM[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(5): 66-70.
- [4] 唐杰明, 刘俊勇, 杨可, 等. 基于灰色模型和最小二乘支持向量机的电力短期负荷组合预测[J]. 电网技术, 2009, 33(3): 46-52.

TANG Jie-ming, LIU Jun-yong, YANG Ke, et al. Short-term load combination forecasting by grey model and least square support vector machine[J]. Power System Technology, 2009, 33 (3): 46-52.

[5] 曹志彤, 陈宏平, 何国光. 电机故障诊断支持向量机[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25 (6): 738-741.
CAO Zhi-tong, CHEN Hong-ping, HE Guo-guang. Support vector machine for fault diagnosis of the rotor broken bare of IM[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2004, 25 (6): 738-741.

[6] 费胜巍, 苗玉彬, 刘成良, 等. 基于粒子群优化支持向量机的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2009, 35 (3): 509-513.
FEI Sheng-wei, MIAO Yu-bin, LIU Cheng-liang, et al. Fault diagnosis of transformer based on particle swarm optimization-based support vector machine[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35 (3): 509-513.

[7] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰, 等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 51-56.
ZHAN Yong, CHENG Hao-zhong, DING Yi-feng, et al. S-transform-based classification of power quality disturbance signals by support vector machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (4): 51-56.

[8] 吕干云, 程浩忠, 郑金菊, 等. 基于 S 变换和多级 SVM 的电能质量扰动检测识别[J]. 电工技术学报, 2006, 21 (1): 121-126.
Lü Gan-yun, CHENG Hao-zhong, ZHENG Jin-ju, et al.

Power quality disturbances detection and recognition based on S transform and multi-layer SVMs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21 (1): 121-126.

[9] 宋晓芳, 陈劲操. 基于支持向量机的动态电能质量扰动分类方法[J]. 电力自动化设备, 2006, 26 (4): 39-42.
SONG Xiao-fang, CHEN Jin-cao. Classification method of dynamic power quality disturbances based on SVM[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26 (4): 39-42.

[10] 吴晓朝, 方立新, 郭红霞. 一种基于小波变换的电能质量特征量提取及分类的方法[J]. 控制理论与应用, 2008, 25 (2): 325-328.
WU Xiao-chao, FANG Li-xin, GUO Hong-xia. An approach to the extraction and classification of feature vector for power quality based on wavelet[J]. Control Theory&Applications, 2008, 25 (2): 325-328.

收稿日期: 2009-08-12; 修回日期: 2009-10-04

作者简介:

陈春玲 (1971-), 女, 副教授, 博士, 主要从事电能质量检测与分析研究; E-mail: sncc1@163.com

许童羽 (1967-), 男, 副教授, 博士, 主要从事电能质量监测、电力信息化研究;

郑伟 (1981-), 男, 助教, 硕士, 主要从事电力信息化研究。

(上接第 73 页 continued from page 73)
电流传感器, 设计了完全对称的双臂结构, 对温度进行了一定的补偿, 在一定程度上降低了温度的影响。成功地实现了对高压电流的传感测量。由于被测电流线路和测量装置没有电气连接, 采用光纤进行信号传送, 因此传感器具有很强的绝缘能力和抗干扰能力。本实验对于探索电力系统测量技术的新途径, 具有重要意义。

参考文献

[1] 张健, 及洪泉, 远振海, 等. 光学电流互感器及其应用评述[J]. 高电压技术, 2007, 33 (5): 37-41.
ZHANG Jian, JI Hong-quan, YUAN Zhen-hai, et al. Optical current transducer and its application[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (5): 37-41.

[2] 孙圣和, 王廷云, 徐影. 光纤测量与传感技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002: 111-112.

[3] 安亚青, 薛剑, 李文田. 对基于马赫-曾德干涉仪的高压电流传感器的实验研究[J]. 电力系统通信, 2005, 26 (1): 31-32.
AN Ya-qing, XUE Jian, LI Wen-tian. Study on high-voltage current sensor based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Telecommunications for Electric Power

System, 2005, 26 (1): 31-32.

[4] 侯淑萍, 杨庆新, 陈海燕, 等. 超磁致伸缩材料的特性及其应用[J]. 兵器材料科学与工程, 2008, 31 (5): 99-102.
HOU Shu-ping, YANG Qing-xin, CHEN Hai-yan, et al. Characteristic and application of giant magnetostrictive material[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2008, 31 (5): 99-102.

[5] 魏光虎, 周王民, 刘德峰, 等. 基于 M-Z 干涉仪的光纤电流互感器应用研究[J]. 传感器与微系统, 2008, 27 (9): 34-36.
WEI Guang-hu, ZHOU Wang-min, LIU De-feng, et al. Application investigation of fiber-optic current sensors based on Mach-Zehnder interferometer[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27 (9): 34-36.

收稿日期: 2009-07-30; 修回日期: 2009-11-03

作者简介:

徐元哲 (1962-), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统自动化;

孙瑞丽 (1981-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: mysunmyhome@163.com

潘文明 (1981-), 男, 助理工程师, 从事电网规划工作。