

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.09.021

# 基于 Elman 和实测风速功率数据的短期风功率预测

王一珺, 贾 嵘

(西安理工大学水利水电学院, 西安 710048)

**摘要:** 为提高风电场发电功率预测的精度,提出一种基于 Elman 神经网络和实测风速功率数据的短期风功率预测方法。根据风速和风电功率历史数据来拟合风电机的风速功率曲线;建立基于 Elman 神经网络的短期风功率预测模型,并利用遗传算法对网络参数进行优化。最后,将文中预测模型应用到实测数据验证模型的有效性,结果表明了模型的先进性。

**关键词:** Elman 神经网络; 短期风功率预测; 风功率曲线; 遗传算法

## Short-term Wind Power Forecasting Based on Elman Neural Network and Measured Wind Speed Power Data

WANG Yijun, JIA Rong

(Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to improve the precision of forecasting wind power, a short-term wind power forecasting method based on Elman neural network and measured wind speed power data is proposed. The wind power curve of wind turbine can be fitted with the measured data of wind speed and power, which can be applied to short-term wind power forecast. The forecasting method based on Elman neural network is built, and GA is applied to optimize the key parameters of Elman neural network. Finally, the wind power prediction is carried out combining the forecasting wind speed and the fitting wind speed power curve. The proposed model is validated by applying this modeling process to the measured data.

**Key words:** Elman neural network; short-term wind power prediction; wind power curve; GA

## 0 引言

风能是一种非常重要的自然能源,风能以其可再生性、无污染及其蕴量巨大等优点,得到世界各国的重视和开发利用。风能利用的最重要的形式是风力发电,它在全世界电力系统中扮演着越来越重要的角色,风力发电技术也日益成熟。由于风能随机性大,为了合理利用风能,对风电场输出功率进行准确的预测显得尤为重要<sup>[1-2]</sup>。

风功率按照预测周期分类,电力系统负荷预测分为超短期风功率预测、短期风功率预测和中长期风功率预测。其中,短期风功率预测是电力系统风功率预测研究中的一项目研究重点<sup>[3-5]</sup>,它主要是针对未来一天到一周内每天各时段的风功率预测的研究。

其精度直接影响到电力系统安全稳定地运行,提高短期风功率预测的精度可以实现电网的科学管理和调度。目前,在短期功率预测研究方面,国内外主要有神经网络法<sup>[6-12]</sup>、时间序列法<sup>[13]</sup>、支持向量机、组合预测法<sup>[14-15]</sup>、时间序列法<sup>[16]</sup>等。其中时间序列法和神经网络法预测精度较高,是当前的研究热点。

文中提出一种基于 Elman 神经网络和实测风速功率曲线拟合的短期风功率预测方法。根据风速和风电功率历史数据来拟合风电机的风速功率曲线,并与基于 Elman 神经网络的短期风功率预测结果进行对比。

## 1 Elman 神经网络预测模型

### 1.1 Elman 神经网络

Elman 神经网络是由 J L Elman 于 1990 年为了

收稿日期:2017-03-07; 修回日期:2017-05-11

解决语音处理问题而提出的。Elman网络具有与多层前向网络相似的多层结构,Elman网络可以看作是一个具有局部记忆单元和局部反馈连接的前向神经网络。

Elman神经网络一般分为输入层、隐含层、关联层和输出层4层,网络结构示意图见图1。输入层的神经元具有信号传输的作用;隐含层的基函数可以选用线性函数或非线性函数;关联层能够接收来自隐含层的反馈信号,并把该反馈信号作为当前隐含层的新的输入,起到延时算子的作用;输出层对隐含层神经元进行线性加权。单层感知器只能解决简单的问题,如果要提高神经网络解决问题的能力,最有效的办法就是增加隐含层的层数。在神经网络中引入关联层神经元,神经网络分类能力和记忆能力会更加有效。关联层能够使神经网络考虑当前梯度方向和前一时刻梯度方向,能够有效降低参数调整对网络性能的敏感度,有效抑制局部极小等现象的出现<sup>[17]</sup>。

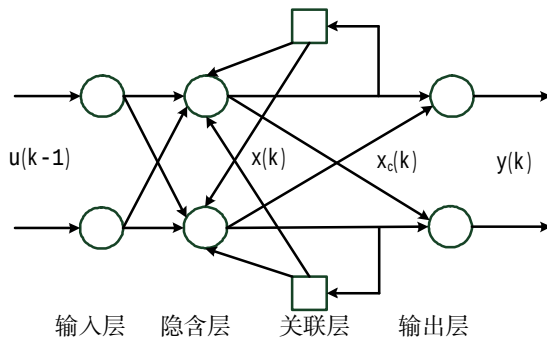


图1 Elman神经网络框图

Fig. 1 Framework of Elman neural network

Elman神经网络隐含层、关联层和输出层的数学表达式分别为

$$x(k)=f[W^1x_c(k)+W^2u(k-1)]; \quad (1)$$

$$x_c(k)=x(k-1); \quad (2)$$

$$y(k)=f[W^3x(k)]. \quad (3)$$

式(1)-(3)中: $y(k)$ 为隐含层节点输出向量; $x_c(k)$ 为关联层节点输出向量; $u(k)$ 为输入层节点输入向量; $y(k)$ 为输出层节点输出向量; $W^1$ 为连接关联层节点和隐含层节点的权值矩阵; $W^2$ 为连接输入层节点和隐含层节点的权值矩阵; $W^3$ 为连接隐含层节点和输出层节点的权值矩阵;函数 $f(*)$ 为隐含层神经元的激活函数,常取为sigmoid函数;函数 $g(*)$ 为输出神经元的激活函数。

## 1.2 网络参数的优化

Elman神经网络中利用下降梯度法对网络参数进行修正和更新,存在收敛速度慢、容易陷入局部极小值等缺点。遗传算法作为一种进化算法,具有多点并行搜索的特点,具有较强的搜索能力。因此,文中

利用遗传算法对Elman神经网络的参数进行寻优,利用遗传算法对Elman神经网络的参数进行优化的流程图见图2。

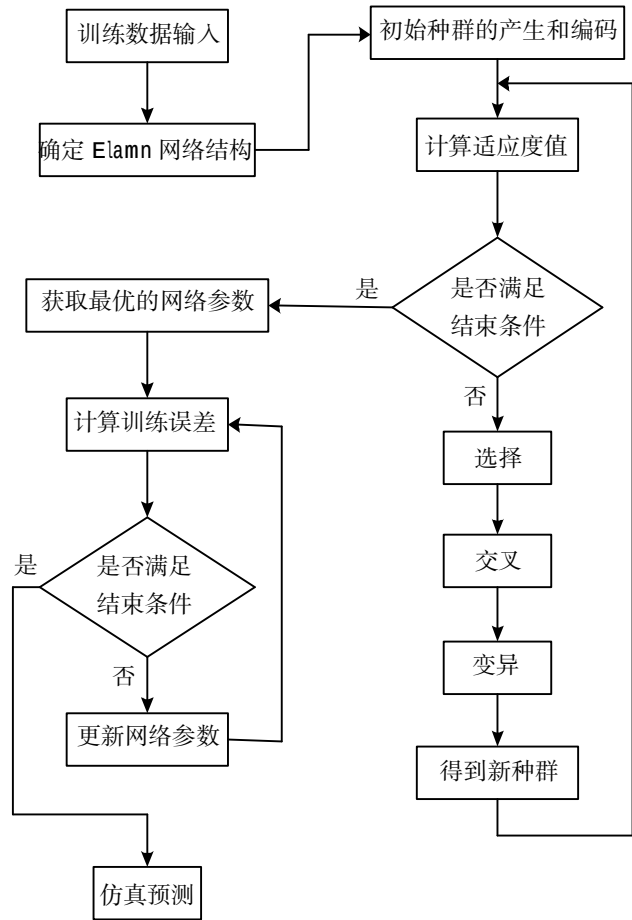


图2 GA-Elman神经网络框图

Fig. 2 Framework of GA-Elman neural network

## 1.3 风功率预测误差评估指标

对于风电功率预测一般选用绝对百分比误差(APE)、平均绝对百分比误差(MAPE)和均方根误差(RMSE)来对风电功率的预测效果进行评价。设 $W(i)$ 表示风电功率实际值, $W_p(i)$ 表示风电功率预测值,共取 $n$ 组实际值和预测值数据,上述误差指标的计算公式如下:

$$APE(i)=\frac{|W(i)-W_p(i)|}{W(i)}; \quad (4)$$

$$MAPE=\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n APE(i); \quad (5)$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [W(i)-W_p(i)]^2}。 \quad (6)$$

## 2 基于历史数据的风电功率预测

风力发电机组的功率特性曲线是用来描述风速与发电机组的发电功率之间的关系。理想的风电机功率特性曲线是发电机组在理想情况下的发电功率

和风速之间的关系曲线, 不考虑风的湍流特性和风机安装地区的实际情况。因此, 理想的风电机功率特性曲线不能准确的反映风速和发电功率之间的实际对应关系<sup>[18]</sup>。根据 IEC 61400 规定, 风电机功率特性曲线应该通过实测的方式获得<sup>[19-20]</sup>。该节利用平滑函数对风电场历史数据中的坏点进行筛选和剔除, 并对风电机功率特性曲线进行拟合。剔除风速—功率数据中坏点的操作流程见图 3。

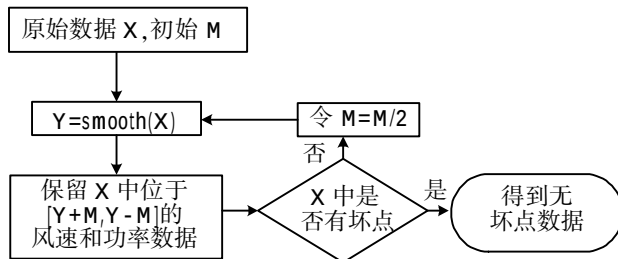


图 3 剔除坏点流程

Fig. 3 Framework of picking out the bad points

剔除坏点前后的风电机功率特性拟合曲线见图 4。风电机功率特性曲线的拟合函数为 8 阶正弦函数。拟合函数的表达式为

$$h(x) = \sum_{n=1}^8 a_n \sin(b_n x + c_n). \quad (7)$$

式(7)中,  $a_n$ 、 $b_n$ 、 $c_n$  共 24 个参数的取值有待估计。

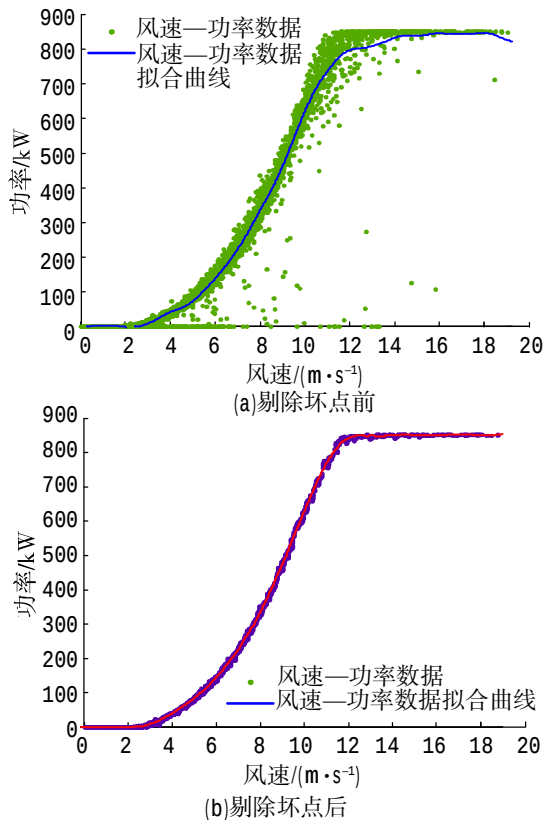


图 4 剔除坏点前后风速—功率拟合曲线

Fig. 4 Wind-power fitted curves before and after picking out the bad points

剔除坏点前后的风电机功率特性曲线拟合结果见图 4, 图 4(b)中 8 阶正弦函数的各个系数见表 1。

表 1 拟合函数参数

| Table 1 The parameters of fitting functions |               |                |
|---------------------------------------------|---------------|----------------|
| $a_1-a_8$                                   | $b_1-b_8$     | $c_1-c_8$      |
| 1 464.400, 1 411.700,                       | 0.111, 0.133, | 0.993, 4.443,  |
| 22.318, 108.868,                            | 1.069, 0.543, | 2.137, 1.490,  |
| 4.529, 0.457,                               | 1.568, 4.783, | 2.617, 2.503,  |
| 1.292, 0.585                                | 3.184, 5.830  | -4.296, -3.637 |

根据拟合得到的风电功率特性曲线和风电场 SCADA 系统记录的 144 个风速数据对风电功率进行预测, 并将预测结果与实际功率进行对比见图 5。

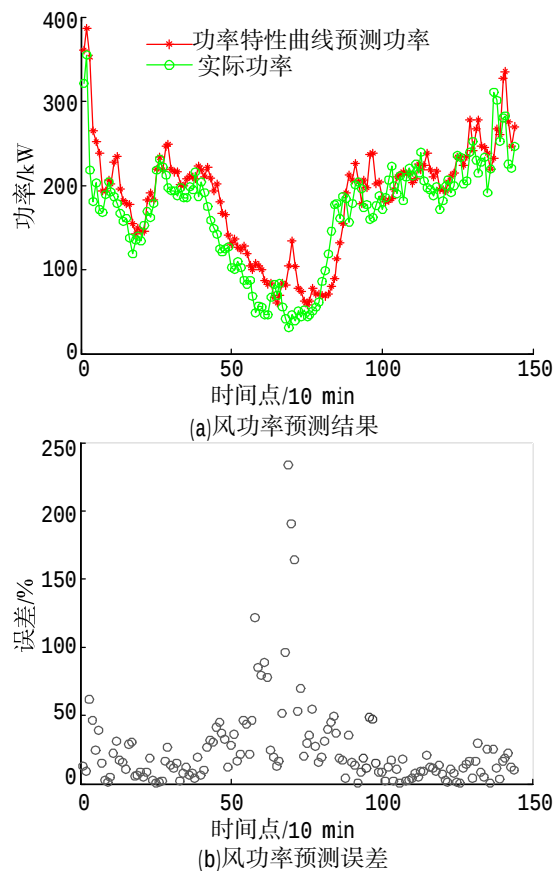


图 5 基于风电机功率特性曲线的风功率预测

Fig. 5 Short-term wind power prediction results based on wind power curve

利用功率特性曲线转换法的风功率预测结果见图 5, 预测结果的 MAPE 为 25%, RMSE 为 36.5 kW。可见, 仅仅利用风速数据难以对风电功率进行准确预测, 下面将考虑利用 Elman 神经网络对短期风电功率进行预测。

### 3 基于 Elman 神经网络的风功率预测

风力发电机捕获的风电功率的大小主要取决于风速、风向、温度和大气压强这 4 个指标。因此, 利用

Elman 神经网络进行风电功率预测时,输入层的神经元个数为 4,分别代表风速、风向、温度和大气压强数据作为神经网络的输入;输出层的神经元个数为 1,代表风电机的发电功率。

神经网络输入层的一个维度代表一个特征变量,当神经网络的输入为多维时,就表示有多个特征变量需要识别,当多个特征变量的数据变化范围很大时,就需要提前对输入数据进行归一化处理。经过归一化处理的数据被限制在特定的范围内,不仅便于后面的数据处理,还有利于程序的快速收敛。将神经网络的输入数据和输出数据分别进行归一化处理,然后对神经网络进行训练,训练结束后将输出结果反映到归一化前的数据范围进行分析研究。

文中选取中国甘肃某风力发电场 2014 年的风速、风向、温度、大气压强和风电功率的 1 440 组数据点作为样本(采样间隔为 10 min),选取风电机停机时间尽可能短的区间作为研究对象。利用前 1 296 组数据作为训练集来对 Elamn 神经网络进行训练,并利用遗传算法来对网络参数进行寻优,利用后 144 组数据作为测试集对预测模型的预测效果进行检验,见图 6。

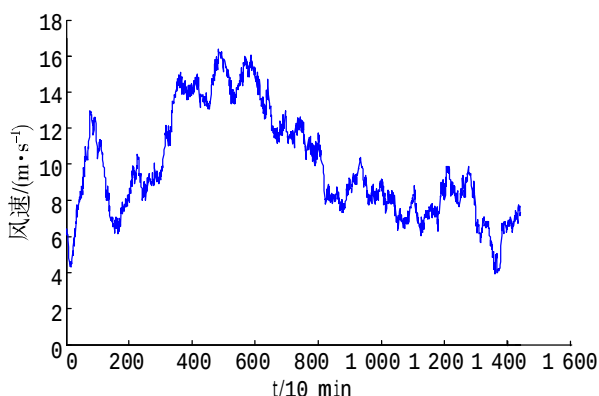


图 6 原始风速曲线

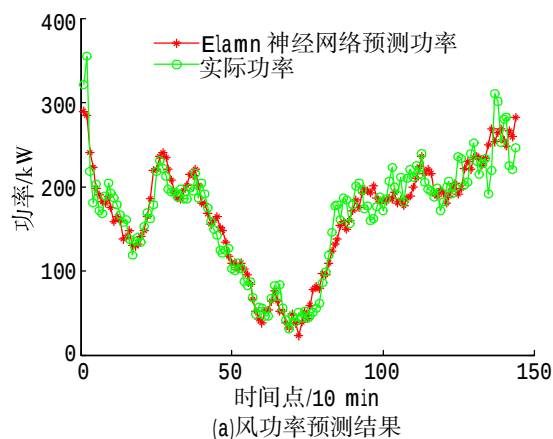
Fig. 6 Curves of pure wind speed

基于 Elman 神经网络的风功率预测结果见图 7。由图 7 可知,预测点数为 144 个,预测误差小于 10% 的点数为 87 个,占总预测点数的 60.4%;预测误差大于 15% 的数据有 30 个,占总预测数据的 20.8%。基于 Elman 神经网络的风功率预测的 MAPE 为 10.8%,RMSE 分别为 21.38 kW。

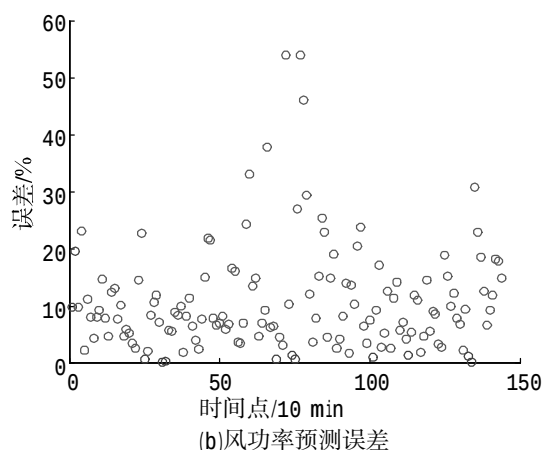
文中两种预测方法的预测误差对比结果见表 2。由表 2 可知,由于考虑到了风速、风向、温度和大气压强的影响,基于 Elamn 神经网络的短期风功率预测方法能够获得较好的预测效果。

#### 4 结语

文中提出了基于 Elman 神经网络和实测风速



(a) 风功率预测结果



(b) 风功率预测误差

图 7 基于 Elman 神经网络的风功率预测

Fig. 7 Short-term wind power prediction results based on Elman neural network

表 2 预测误差比较

Table 2 Error comparison between two methods

| 参数             | MAPE/% | RMSE/kW |
|----------------|--------|---------|
| 功率特性曲线转换法      | 25.0   | 36.50   |
| Elamn 神经网络预测方法 | 10.8   | 21.38   |

功率历史数据拟合曲线的方法进行风功率短期预测的研究,并且利用遗传算法对 Elman 神经网络的网络参数进行优化。通过实例仿真发现,基于遗传算法的 Elman 神经网络的预测精度显著高于功率特性曲线转换法。

#### 参考文献:

- [1] 张文秀,武新房,陆豪乾.风电功率预测技术综述与改进建议[J]. 电力与能源, 2014, 35(4):436-441.  
ZHANG Wenxiu, WU Xinfang, LU Haoqian. Review of wind power prediction technology and improved suggestions[J]. Power & Energy, 2014, 35(4):436-441.
- [2] 国家电网公司调度通信中心.风电功率预测系统功能规范[M]. 北京:中国电力出版社, 2011.  
China State Grid Corp Dispatch and Communication Center. Wind power prediction system function standard[M]. Beijing: China Power Press, 2011.

- [3] 南晓强. 风电预测技术及其运行分析[D]. 成都:西南交通大学, 2012.  
NAN Xiaoliang. Analysis of technology and operation of wind power forecast[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [4] 谷兴凯, 范高峰, 王晓蓉, 等. 风电功率预测技术综述[J]. 电网技术, 2007, 31(s2): 335-338.  
GU Xing kai, FAN Gaofeng, WANG Xiaorong, et al. Summarization of wind power prediction technology[J]. Power System Technology, 2007, 31(s2): 335-338.
- [5] 符金伟, 马 进, 周榆晓, 等. 风电功率预测研究方法[J]. 华东电力, 2012, 40(5): 888-892.  
FU Jinwei, MA Jin, ZHOU Yuxiao, et al. Wind power prediction research method ensemble[J]. Journal of East China Power, 2012, 40(5): 888-892.
- [6] 何 东, 刘瑞叶. 基于主成分分析的神经网络动态集成风功率超短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 50-54.  
HE Dong, LIU Ruiye. Ultra-short-term wind power prediction using ANN ensemble based on the principal components analysis[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 50-54.
- [7] 张 超. 基于神经网络的风电场短期风速预测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.  
ZHANG Chao. Research on short-term wind speed forecasting based on neural networks[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [8] 张 涛, 张新燕, 王维庆. 基于神经网络的风功率预测问题研究[J]. 四川电力技术, 2013, 36(1): 16-18.  
ZHANG Tao, ZHANG Xinyan, WANG Weiqing. Research on the problem of wind power prediction based on neural network[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2013, 36(1): 16-18.
- [9] 潘玉民, 邓永红, 张全柱. 小波神经网络模型的确定性预测及应用[J]. 计算机应用, 2013, 33(4): 1001-1005.  
PAN Yumin, DENG Yonghong, ZHANG Quanzhu. Deterministic prediction of wavelet neural network model and its application[J]. Journal of Computer Applications, 2013, 33(4): 1001-1005.
- [10] 范高峰, 王伟胜, 刘 纯. 基于人工神经网络的风电功率短期预测系统[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 72-76.  
FAN Gaofeng, WANG Weisheng, LIU Chun. Artificial neural network based wind power short term prediction system[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 72-76.
- [11] 张靠社, 杨 剑. 基于 Elman 神经网络的短期风电功率预测[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(28): 87-91.  
ZHANG Kaoshe, YANG Jian. Short-term wind power prediction based on Elman neural network[J]. Power Grid and Clean Energy, 2012, 28(12): 87-91.
- [12] 石黄霞, 何 颖, 董晓红. 基于 Elman 神经网络的电力负荷预测模型研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2013(1): 85-87.  
SHI Huangxia, HE Ying, DONG Xiaogong. Based on the Elman neural network power load prediction model[J]. Industrial Instrumentation and Automation Devices, 2013(1): 85-87.
- [13] 刘 纯, 吕振华, 黄越辉, 等. 长时间尺度风电出力时间序列建模新方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 7-13.  
LIU Chun, LYU Zhenhua, HUANG Yuehui, et al. A new method to simulate wind power time series of large time scale[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 7-13.
- [14] 张国强, 张伯明. 基于组合预测的风电场风速及风电机功率预测[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 92-95.  
ZHANG Guoqiang, ZHANG Boming. Wind speed and wind power prediction based on combination forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 92-95.
- [15] 胡 倩, 周辛南, 易 伟, 等. 多频率尺度下的风电场短期风速预测融合算法[J]. 陕西电力, 2014, 42(1): 27-36.  
HU Qian, ZHOU Xinnan, YI Wei, et al. A short-term wind speed forecasting method based on multi-frequency analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2014, 42(1): 27-36.
- [16] 李俊芳, 张步涵, 谢光龙, 等. 基于灰色模型的风速—风电功率预测研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 151-159.  
LI Junfang, ZHANG Buhuan, XIE Guanglong, et al. Grey predictor models for wind speed-wind power prediction[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 151-159.
- [17] 周 品. MATLAB 神经网络设计与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.  
ZHOU Pin. The design and application of MATLAB neural network[M]. Beijing: Tsinghua University press, 2013.
- [18] 王伟娜. 基于实测风功率曲线的风机控制方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.  
WANG Weina. Control of wind power systems based on measured power conversion curve[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [19] 柯拥勤. 风电场风速及风电功率预测研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.  
KE Yongqin. Studies on the wind speed and wind power forecasting in wind farm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [20] 马 平, 刘昌华. 风力发电机组功率曲线的验证[J]. 可再生能源, 2008, 26(6): 82-84.  
MA Ping, LIU Changhua. Validation on the power curve of wind power unit[J]. Renewable Energy Resources, 2008, 26(6): 82-84.

王一珉(1989—), 女, 硕士, 研究方向电力系统测量、保护与控制。

贾 嵘(1971—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统自动化装置。