doi：10.11835/j.issn.1000-582X.2020.282

基于 BP 神经网络的悬垂绝缘子串风偏角预测模型

眭嘉里[1]，严　波[1]，林　翔[1]，伍　川[2]，吕中宾[2]，张　博[2]
（1.重庆大学 航空航天学院，重庆 400044；2.河南省电力公司电力科学研究院，郑州 450052）

摘要：利用有限元方法模拟不同导线型号、导线初始应力、档距、高差等结构参数的输电线路在随机风作用下的动力响应，得到悬垂绝缘子串的风偏角。进而基于有限元模拟结果和 BP 神经网络构建风偏角的预测模型，将导线型号、档距、高差、导线初始应力、基本风速、保证系数作为模型的输入，悬垂绝缘子串的风偏角作为输出，通过机器学习，并采用评价指标评估其准确性，对模型进行优化。该模型可以方便快捷地预测悬垂绝缘子串的风偏角，为线路塔头绝缘设计提供依据。

关键词：输电线路；风偏角；随机风；BP 神经网络；预测模型

中图分类号：TM74；TM77　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000-582X(2021)08-114-11

BP neural network model for dynamic swing angle of suspended insulator string

SUI Jiali[1]，*YAN Bo*[1]，*LIN Xiang*[1]，*WU Chuan*[2]，*LYU Zhongbin*[2]，*ZHANG Bo*[2]
(1.College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, P. R. China)

Abstract: The dynamic swing angles of suspended insulator strings of transmission lines with different parameters including conductor type, initial stress in conductor, span length and height difference, under stochastic wind field are numerically simulated by means of the finite element method. Based on the finite element simulation results and the BP neural network, a prediction model for the swing angle is constructed. In the model, the conductor type, span length, height difference, initial stress, wind speed and guarantee factor are taken as the input parameters, and the swing angle as the output parameter. The model is optimized by machine learning and accuracy evaluation with specific evaluation indicators. Swing angles of suspended insulator string in stochastic wind field can be predicted conveniently and fast with this model, which provides a basis for the insulation design of tower head in transmission lines.

Keywords: transmission line; swing angle; stochastic wind filed; BP neural network; prediction mode

输电线路悬垂绝缘子串在风荷载作用下会发生偏摆，若风偏角度太大，绝缘子串悬挂的导线与杆塔之间的间隙可能小于绝缘间隙容许值，从而导致风偏闪络、跳闸和导线烧伤等事故[1,2]。在输电线路设计时，计算

收稿日期：2020-03-29　　**网络出版日期：**2020-04-16
基金项目：国家电网公司科技项目(52170217000U)；国家自然科学基金(51277186)。
Supported by the Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(52170217000U), and the National Natural Science Foundation of China(51277186).
作者简介：眭嘉里(1994—)，男，硕士研究生，从事工程力学研究。
通讯作者：严波(1965—)，男，教授，博士，主要从事工程力学和固体力学研究，(E-mail)boyan@cqu.edu.cn。

悬垂绝缘串在设计风速下的风偏角极为重要。

我国架空高压输电线路设计中，通常采用将悬垂绝缘子串简化为刚性直杆，按静力平衡计算悬垂绝缘串的风偏角[3]。该方法计算简单，但是忽略了实际风场脉动风的动态特性对绝缘子串风偏角的影响。

Annestrand 等[4]在真型试验线路中对悬垂绝缘子串的风偏角进行了实测记录，基于这些实测结果 Hileman[5]通过曲线拟合方式，给出了与风速相关的风偏角计算公式，该公式于 1999 年引入了 IEEE 标准中[6]。另外，澳大利亚和新西兰的设计标准中也给出了一个类似于我国规程中的计算公式[7]，该公式也没有考虑动态风载荷对风偏角的影响。严波等[8-9]考虑脉动风的影响，采用有限元数值方法模拟了不同结构参数两档线路在随机风场作用下的响应，得到悬垂绝缘子串风偏角的随机响应时程，通过引入风载荷调整系数给出了考虑脉动风惯性影响的风偏角计算公式，然而风载荷调整系数的确定需要求解非线性方程，且该系数受线路结构因素影响明显，使用不便。

近年，机器学习算法在不同工程领域的应用研究日益受到关注。Xu 等[10]提出了一种基于微观模型和 BP 神经网格预测三维多相和多层编制复合材料弹性模量的方法，并利用实验验证了模型和方法的正确性。Wang 等[11]利用支持向量机和 AdaBoost 二级分类器研究了输电线路舞动早期预警方法。廖峥等[12]将输电线路预警问题归结为有监督机器学习方法的分类预测问题，提出了一种基于 BP 神经网络的舞动预警模型，构建了以风速、风向与线路的夹角、相对湿度以及温度为输入特征量的 BP 神经网络学习算法。李哲等[13]提出了一种基于 Adaboost 算法的舞动预警模型。Tang 等[14]结合有限元仿真模拟和并行随机森林算法，建立了基于机器学习的列车碰撞预测模型，可以快速确定任意速度下机车碰撞的力-位移关系。淡淑恒等[15]建立了盆式绝缘子串的有限元模型，进行了电场计算，并利用神经网络算法优化了结构参数。

笔者采用有限元数值方法，模拟研究输电线路在不同导线型号、导线初始应力、档距和高差等参数条件下，线路在不同基本风速随机风场中的动态响应，获得不同参数下悬垂绝缘子串风偏角的随机响应，得到在不同保证率下的风偏角。进而构建基于 BP 神经网络的悬垂绝缘子串风偏角预测模型，将线路结构参数和基本风速等作为网络模型的输入，风偏角作为输出。利用数值模拟得到的数据对预测模型进行训练和验证，该模型可以非常方便和快速地确定悬垂绝缘子串的风偏角，为线路绝缘设计提供重要的手段，且可为在役线路风偏闪络事故提供预警。

1　现有悬垂绝缘子串风偏角算法

基于实测数据的拟合，IEEE 标准给出了如下悬垂绝缘子串风偏角的计算公式[6]

$$\varphi = \arctan\left(1.138 \times 10^{-4} \frac{d/W}{l_{\mathrm{V}}/l_{\mathrm{H}}} v^{1.6}\right), \tag{1}$$

式中：d 是导线的直径，cm；W 是导线单位长度的重量即自重，kg/m；l_{V} 为垂直档距，m；l_{H} 为水平档距，m；v 为风速，km/h。

我国输电线路现行设计中，假设悬垂绝缘子串为受均布荷载作用的刚性直杆，采用静力学平衡方法按下式近似地计算悬垂绝缘子串的风偏角[3]

$$\varphi = \arctan\left(\frac{0.5P_{\mathrm{I}} + W_{\mathrm{H}}}{0.5G_{\mathrm{I}} + W_{\mathrm{V}} l_{\mathrm{H}} + qT}\right), \tag{2}$$

式中：G_{I} 为悬垂绝缘子串的重力，kN；P_{I} 为作用在其上的风压，kN；W_{V} 和 W_{H} 分别为电线作用于绝缘子串末端的垂直和水平荷载，kN；q 为塔位的高差系数；T 为电线中的张力，kN。根据我国输电线路设计规范[16,17]，垂直作用于导线和地线上的风荷载按式(3)计算

$$W_{\mathrm{H}} = \alpha \frac{v^2}{1\,600} \mu_{\mathrm{Z}} \mu_{\mathrm{SC}} \beta_{\mathrm{C}} d l_{\mathrm{H}} B_1 \sin^2\theta \quad (\mathrm{kN}), \tag{3}$$

式中：α 为风压不均匀系数，考虑风沿线路方向分布的非均匀性；μ_{SC} 为导线和地线的体型系数；β_C 为作用于导线和地线上的风荷载调整系数，但在计算风偏角时不予考虑，即不考虑脉动风的冲击效应；B_1 为导、地线覆冰后风载荷增大系数；θ 为风向与导线或地线方向之间的夹角；μ_{Z} 为风压高度系数；v 为基本设计风速，m/s。

澳大利亚和新西兰的设计标准中也给出了一个类似于我国规程的计算公式[7]，该两公式和 IEEE 标准

中的公式(1)都没有考虑动态风对悬垂绝缘子串风偏角的影响。文献[9]针对典型四分裂线路,采用数值模拟方法,模拟随机风场中线路的动力响应,得到悬垂绝缘子串风偏角的统计量

$$\varphi' = \bar{\varphi} + \mu\delta, \tag{4}$$

式中:$\bar{\varphi}$ 与 δ 分别为风偏角的均值与根方差,μ 为保证系数,表示结构分析的安全度。根据我国可靠度指标规定,保证系数的取值在 2.2,其对应的保证率为 98.61%左右。对于大跨越结构,建议取保证系数为 2.0～2.5(对应的保证率:97.73%～99.38%)[18]。根据数值模拟结果,通过引入风荷载调整系数 β_C 对风偏角按下式进行修正

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{0.5\beta_C P_I + \beta_C W_H}{0.5G_I + W_V l_H + qT(\beta_C)}\right)。 \tag{5}$$

利用该公式计算悬垂绝缘子串风偏角,需确定风荷载调整系数 β_C,其计算过程详见文献[9],需要求解非线性方程。已有的研究表明,不同线路参数计算得到的风荷载调整系数不同,这为工程设计带来了不便。因此,有必要研究新的计算方法,考虑不同的线路因素对风偏角的影响。机器学习算法为其提供了一个新的途径。

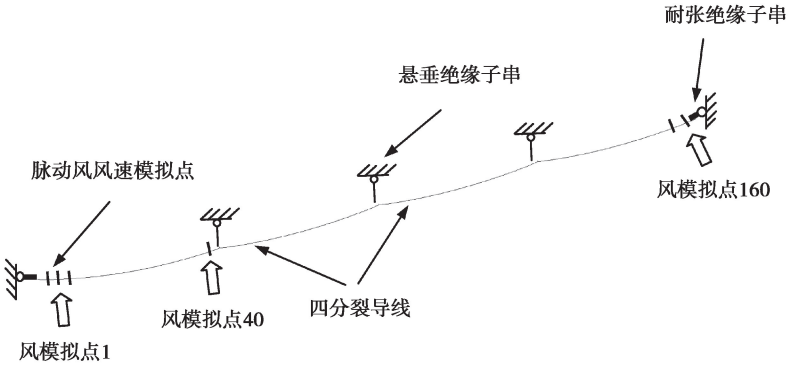
2 输电线路风偏响应参数分析

输电线路悬垂绝缘子串的风偏角与线路结构和风载荷有关。通常选择偶数档等档距线路作为计算对象,且将处于线路段中点悬垂绝缘子串的风偏角作为电气绝缘设计的依据。如前所述,确定悬垂绝缘子串的风偏角需要考虑随机风场的动态作用。本节中采用有限元方法模拟各种线路结构参数和风荷载对悬垂绝缘子串风偏角的影响,为预测模型的建立提供基础。

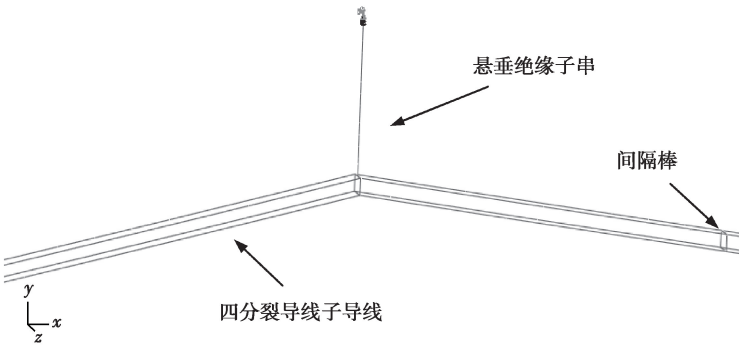
2.1 稳态风作用下的输电线路的风偏

为了确定连续档档数的影响,并考虑到计算规模,首先模拟 2、4、6、8 档连续档线路在稳定风作用下中间悬垂绝缘子串的风偏角,以确定连续档档数对风偏角的影响。分别以档距 300 m 和 700 m 线路为对象。导线的型号为 JL/G1A-300/40,其杨氏模量为 65.9 GPa,泊松比取 0.3。悬垂绝缘子串的长度为 3.1 m,重量为 90 kg。采用有限元方法模拟线路在风载荷作用下的偏摆,计算稳定风作用下的风偏时,取基准风速分别为 20,25,30 m/s。

如图 1 所示为四分裂 4 档连续档线路有限元模型。导线用三维空间梁单元模拟,计算表明,导线单元长度取 0.5 m 时可得到收敛结果。悬垂绝缘子串简化为直径为 0.15 m 的圆截面杆,用梁单元。线夹和间隔棒均简化为边长为 0.45 m 的正方形框架,构成该框架的圆截面梁半径为 0.05 m。悬垂绝缘子串、线夹和间隔棒的弹性模量取 200.0 GPa,泊松比取 0.3,各构件的等效密度通过其对应型号的质量与几何模型的尺寸确定。假设间隔棒和线夹与导线之间连接完好,悬垂绝缘子串上端线位移约束,但可以自由转动,其下端通过线夹将导线悬挂起来。导线的阻尼与其材料和结构有关,要准确获得导线的阻尼非常困难。Roshan Fekr 等[19]根据大量的数值分析试验,提出裸导线的黏性阻尼系数取临界阻尼的 2%较合适。



(a)整体有限元模型

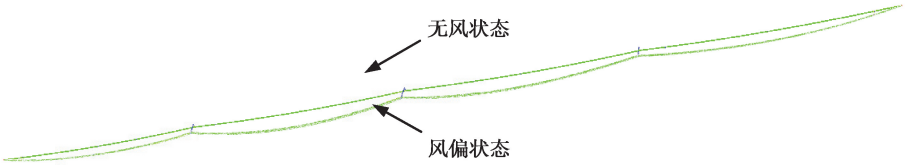


(b)局部有限元模型

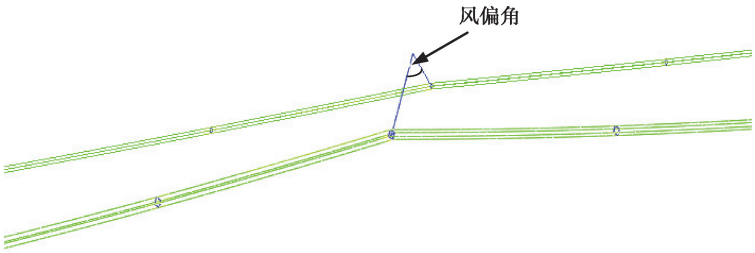
图 1　典型四分裂导线 4 档连续档输电线路有限元模型

Fig. 1　Finite element model of a typical 4-spans continuous transmission line with 4 bundle conductors

图 2 所示为典型四分裂导线 4 档线路在风速为 20 m/s 稳定风作用下的风偏状态。图 3 所示为不同风速稳定风作用下，不同档距线路中间悬垂绝缘子串的风偏角随连续档档数的变化规律，图中同时给出了有限元模拟结果和按我国输电线路设计规程中的公式(2)的计算结果。由图可见，规程给出的悬垂绝缘子串风偏角的大小与连续档的档数几乎没有关系，而有限元数值模拟得到的风偏角在档数为 2 时与公式由较明显的差别，档数大于 4 档时，风偏角几乎不受档数的影响，且和规程计算公式结果吻合较好。因此，后面选择 4 档连续档线路为对象，模拟不同参数条件下线路在随机风场中的风偏。



(a)不同状态下的导线示意



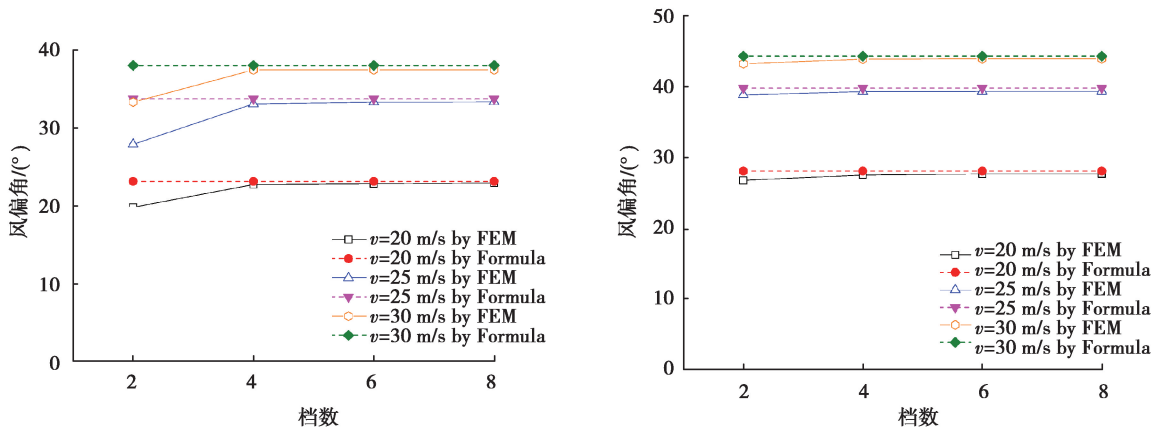
(b)风偏角示意

图 2　稳定风作用下四分裂导线连续档线路的风偏(档距：300 m；风速：20 m/s)

Fig. 2　Swing of suspended insulator strings of 4-bundle transmission lines under stable wind field (span：300 m；wind speed：20 m/s)

2.2　随机风作用下风偏角参数分析

根据 2.1 节的分析可知，当连续档档数大于等于 4 档时，中间悬垂绝缘子串的风偏角几乎不随档数的增加而变化，因此本节参数分析时均以 4 档连续档为对象，模拟不同参数条件下线路在随机风场作用下的风偏响应，进而得到中间悬垂绝缘子串的风偏角响应。这些参数包括导线型号、档距、高差、导线初始应力和基本风速等。分别考虑 3 种型号的导线 JL/G1A-300/40、JL/G1A-500/45 和 JL/G1A-630/45，档距分别为 300，400，500，600，700，800 m，高差比范围取 0.1～0.5，不同型号导线的初始应力不同。随机风场 10 m 高处的基



(a)档距300 m (b)档距700 m

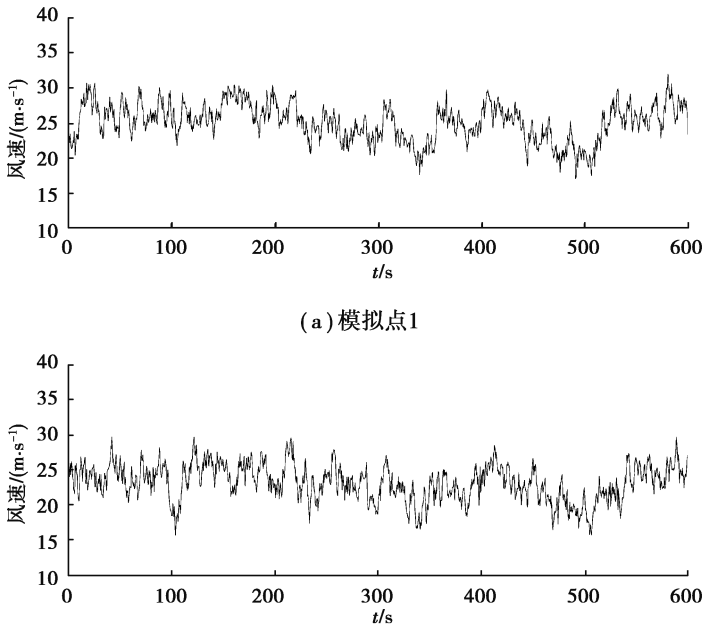
图 3 稳定风作用下四分裂导线的档数对悬垂绝缘子串风偏角的影响

Fig. 3 Effect of the number of spans of the 4-bundle conductors on the swing angle of suspended insulator strings under stable wind field

本风速分别为 20,25,30 m/s,共计 753 种参数组合情况。

假设线路段经过的地形为 B 类地貌,地面粗糙系数取 0.16,地面粗糙长度取 0.03。模拟时程总长 600 s,时间步长取 0.5 s,频率的截取范围取 0.0～6.28 rad/s,频率范围等分为 3 000。采用考虑随高度变化的 Kaimal 风速谱和 Davenport 相干函数,利用谐波分解法数值模拟风速时程,在导线顺线路方向每隔 10 m 选择一个风速点。随机风场的数值模拟方法详见文献[9]。

以档距 800 m、高差 100 m,JL/G1A-300/40 四分裂导线 4 档线路为例,图 4 所示为基本风速为 20 m/s 时,数值模拟得到的模拟点 1 和 4 的随机风速时程曲线。图 5 为模拟点 1 的模拟脉动风速功率谱与 Kaimal 目标谱的比较,可见两者吻合得较好。图 6 给出了模拟点 1 的自相关函数以及模拟点 1 和 4 的互相关函数的比较。可见模拟得到的随机风速时程是合理的,可以用于线路的风偏模拟。



(a)模拟点1

(b)模拟点4

图 4 典型线路在基本风速 20 m/s 时模拟得到的典型点处随机风速时程曲线

(四分裂 JL/G1A-300/40 导线,档距 800 m,高差 100 m)

Fig. 4 Simulated time histories of wind speeds at typical points when velocity is 20 m/s

(JL/G1A-300/40 quad bundle conductor; span length:800 m; height difference:100 m)

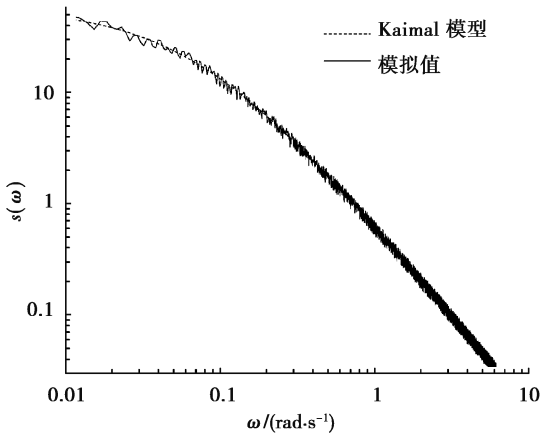
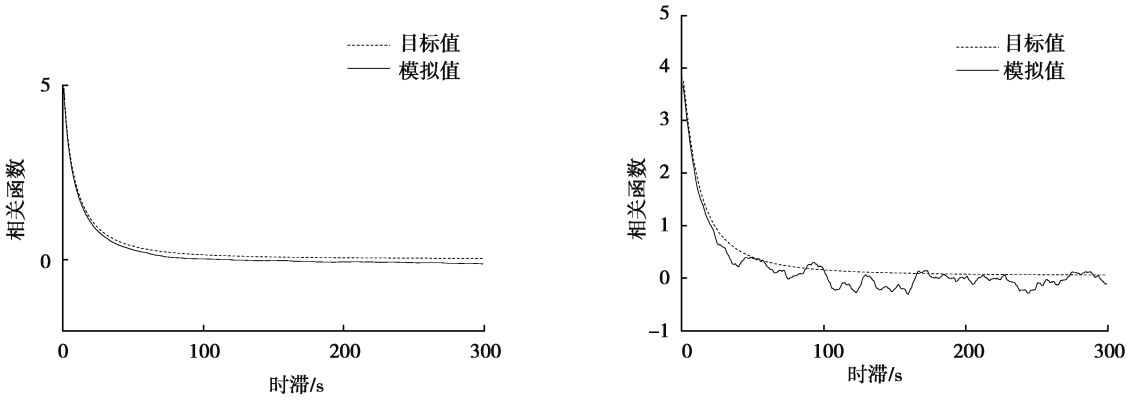


图 5　典型线路在基本风速 20 m/s 时风速点 1 脉动风速功率谱与目标谱比较

(四分裂 JL/G1A-300/40 导线,档距 800 m,高差 100 m)

Fig. 5　Power spectra of simulated wind speeds and Kaimal model at typical points when velocity is 20 m/s

(JL/G1A-300/40 quad bundle conductor; span length:800 m; height difference:100 m)



(a) 点1的自相关函数　　(b) 点1和4的互相关函数

图 6　典型线路在基本风速 20 m/s 时典型点模拟风速的相关函数与目标相关函数

(四分裂 JL/G1A-300/40 导线,档距 800 m,高差 100 m)

Fig. 6　Correlation functions of wind speeds at typical points when velocity is 20 m/s

(JL/G1A-300/40 quad bundle conductor; span length:800 m; height difference:100 m)

图 7 所示为线路在基本风速 20 m/s 时,中间悬垂绝缘子串风偏角的时程曲线。从图中可见,在随机风场作用下风偏角响应也是随机的。将按式(4)计算得到的风偏角作为绝缘设计的依据,该式与风偏角随机响应的均值、根方差和保证系数有关。计算了保证系数分别取 2.0,2.2,2.5 时对应的风偏角。

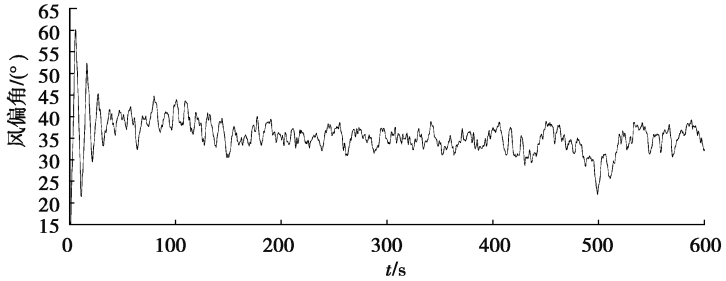


图 7　典型线路在基本风速 20 m/s 随机风作用下中间悬垂绝缘子串风偏角时程

(四分裂 JL/G1A-300/40 导线,档距 800 m,高差 100 m)

Fig. 7　Simulated time histories of swing angles at typical points when velocity is 20 m/s

(JL/G1A-300/40 quad bundle conductor; span length:800 m; height difference:100 m)

对各种参数条件下数值模拟得到的随机风偏角进行统计分析，可以得到不同保证率下的风偏角。如图 8 所示为高差比取 0.1 时，JL/G1A-500/45 四分裂线路在随机风作用下保证系数取 2.2 时的风偏角随档距的变化规律。可以看出，风偏角总体趋势随档距的增大而增大，但由于风的随机性，其变化规律不是简单的线性关系。图 9 为相同保证系数同型号导线四档线路的统计风偏角随高差的变化规律，可以看出在其他参数相同时，风偏角一般随高差的增大呈减小趋势，这是由于在计算导线的平均高度时，假设地面与导线两端的连线平行导致的。在此假设下高差相距较大的两种工况折算出的平均高度相差很小，因此施加的风荷载大小也很相近。另一方面，在建立有限元模型时，相同档距不同高差的初始水平应力相同，因此高差较大的工况沿线方向的初始应力越大，通常在相同随机风下的沿风方向的位移均方差较小，统计风偏角也越小，风速较大时这种现象越明显。图 10 为保证系数取 2.2，高差比为 0.1，不同型号四分裂导线组成的四档 500 m 线路在不同风速下统计风偏角的变化，可以看出不同的导线型号也会影响风偏角的大小。这里仅给出了典型参数条件下的变化规律，限于篇幅未给出所有参数条件下的计算结果。

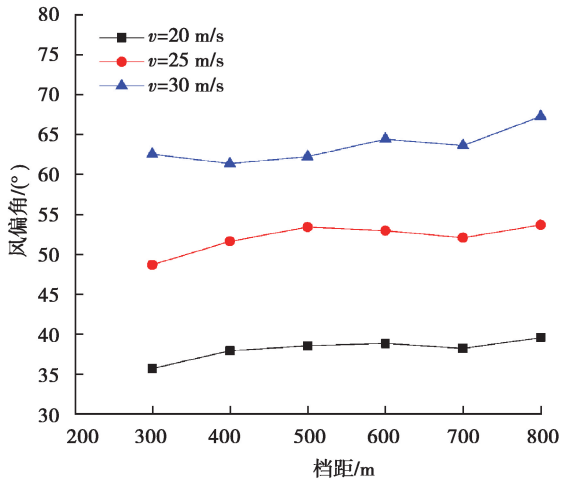
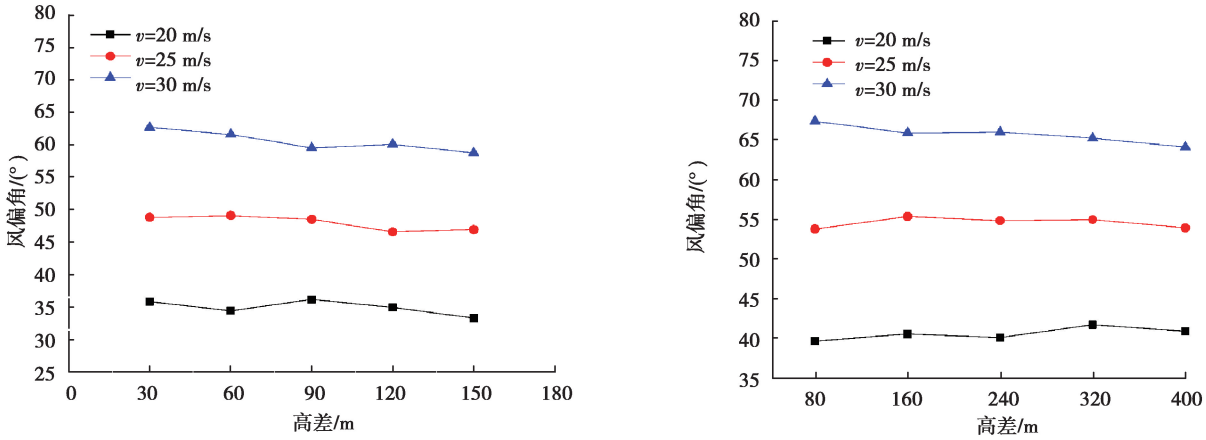


图 8 风偏角随档距的变化规律(JL/G1A-500/45 四分裂线路，保证系数 2.2，高差比 0.1)

Fig. 8 Variation of swing angle with span length

(JL/G1A-500/45 quad bundle conductor; guarantee factor:2.2; ratio of height difference to span length:0.1)



(a) 档距300 m (b) 档距800 m

图 9 风偏角随高差的变化规律(JL/G1A-500/45 四分裂线路，保证系数 2.2)

Fig. 9 Variation of swing angle with height difference

(JL/G1A-500/45 quad bundle conductor; guarantee factor:2.2)

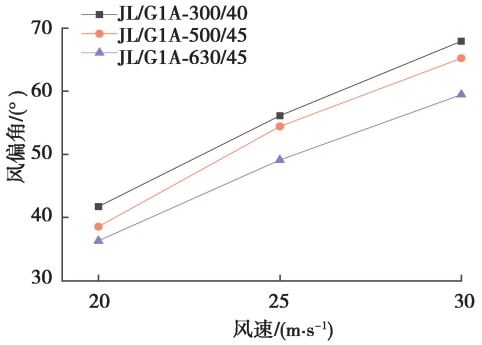


图 10　导线型号对风偏角的影响(档距 500 m，高差 50 m，保证系数 2.2)

Fig. 10　Variation of swing angle with conductor type

(span length：500 m；height difference：50 m；guarantee factor：2.2)

3　悬垂绝缘子串风偏角预测模型

3.1　BP 神经网络构建

BP 神经网络算法具有很强的非线性映射能力以及较强的泛化能力，这里将采用这一算法建立悬垂绝缘子串风偏角预测模型。BP 神经网络基本结构如图 11 所示，其包含一个输入层、至少一个隐藏层和一个输出层，每层之间的连线称为权重线。BP 神经网络的学习过程由信号的正向传播与误差的反向传播 2 个过程组成。正向传播时，输入样本从输入层传入，经隐藏层逐层处理后，传向输出层。若输出层的实际输出与期望输出不符，则转向误差的反向传播阶段。误差的反向传播是将输出误差以某种形式通过隐藏层向输入层逐层反传，来修正各单元的权重。通过不断的修正，使得输出值逼近期望值，达到预测的目的。

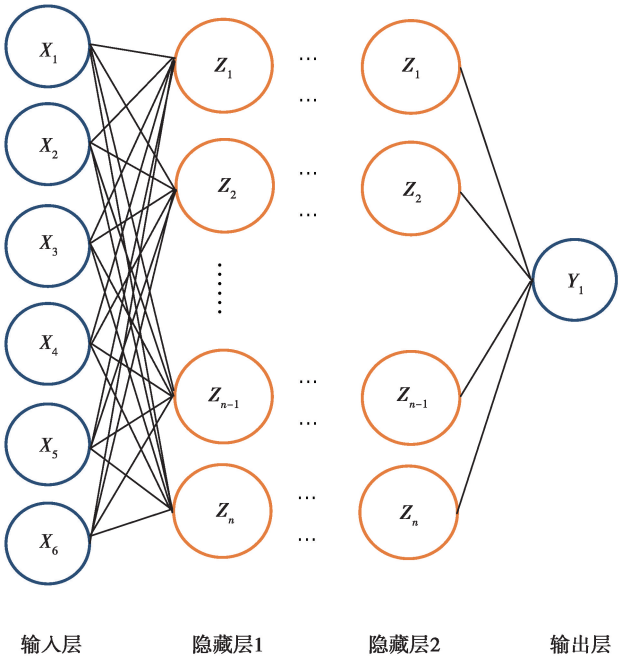


图 11　三层 BP 神经网络基本结构图

Fig. 11　Basic structure of three-layer BP neural network

根据第 3 节随机风场中悬垂绝缘子串风偏角的参数模拟结果，选择导线型号、档距、高差、导线初始应力，基本风速、保证系数这 6 个变量作为输入参数，与之对应的风偏角为输出。其次需要选择合适的激励函数，随机风偏角预测是个非线性问题，激励函数的引入能够在网络里增加非线性，有助于神经网络的收敛。

常用的激励函数有阶跃函数、单极性 S 型函数、双曲正切 S 型函数。经过对比，这里选用双曲正切 S 型函数作为激励函数。将隐藏层层数设置为 2，每层 64 个单元。

3.2 模型训练

训练前先将输入数据预处理，进行归一化处理。若不进行数据归一化，目标数据不能映射到激活函数的值域，且由于输入数据的单位不一样，有些数据的范围可能特别大，导致的结果是神经网络收敛慢、训练时间长且预测结果不佳。本文中使用归一化中的离差标准化将输入数据落入[0，1]的范围内，具体公式为：

$$x^{*}=\frac{x_{0}-x_{\min}}{x_{\max}-x_{\min}}, \tag{6}$$

式中：x_0 为需要归一化的数据，$x_{\max}$ 与 $x_{\min}$ 分别为同一类别的输入数据中的最大值与最小值，x^* 为归一化后的数据。

将数值模拟得到的 753 个有效数据结果作为样本集，随机抽取样本集并进行分类，获得训练集 648 个，验证集 130 个，测试集 105 个样本。评估指标包括解释方差得分、平均绝对误差、均方差和拟合优度，这些指标用于指导调参过程。在训练次数为 5 000 时，损失函数已经趋近于 0，说明该 BP 神经网络模型已经收敛，如图 12 所示，Train loss 为训练集上的损失函数值。

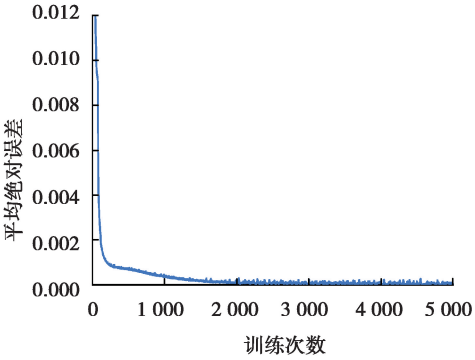
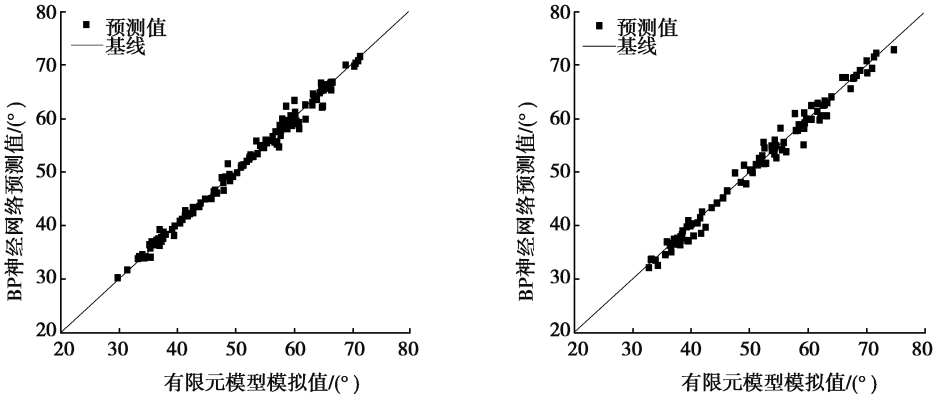


图 12 BP 神经网络损失函数收敛结果

Fig. 12 Convergence result of BP neural network loss function

3.3 风偏角预测

验证集样本指导模型的训练调参过程，将验证集样本的参数输入 BP 神经网络模型，可以得到对应的风偏角，将其与有限元数值模拟结果进行比较，如图 13(a)所示。可见，由 BP 神经网络模型预测的验证集样本的风偏角与有限元模拟得到的结果吻合较好。针对测试集中 105 个样本，将每个样本的 6 个输入参数输入训练后的 BP 神经网络预测模型，计算得到风偏角，并将预测结果与由有限元模拟得到的结果进行比较，如图 13(b)所示。从图中结果可以看出，测试集的风偏角预测结果与有限元模拟结果也吻合较好。表 1 列出了利用 BP 神经网络模型预测得到的验证集和测试集风偏角与有限元模拟结果比较的准确度。从表 1 中结果可以看出，所有验证集样本的相对误差均在 6%内，仅有 9 个样本的相对误差在 4%～6%之间，其余样本均在 4%以下。测试集的最大相对误差为 7%，其中 3 个样本的相对误差在 6%～7%之间，12 个样本在 4%～6%之间，剩余样本都在 4%以下。可见，得到的风偏角 BP 神经网络模型具有较强的泛化能力。



(a) 验证集预测结果　　(b) 测试集预测结果

图 13 BP 神经网络模型预测风偏角与数值模拟结果对比

Fig. 13 Comparison of BP neural network model for predicting swing angle and numerical simulation

表 1　BP 神经网络模型预测风偏角准确度

Table 1　Accuracy of BP neural network model to predict swing angle

相对误差	样本占比/%		样本个数/个	
	验证集	测试集	验证集	测试集
4%以下	93.08	84.91	121	90
5%以下	96.15	90.57	125	96
6%以下	100.00	96.23	130	102
7%以下	100.00	100.00	130	105

以前的研究结果表明，设计规程中风偏角计算公式(2)没有考虑脉动风的动力效应，计算结果偏小，导致较多的风偏闪络事故发生。而按修正公式(5)计算，其中的风荷载调整系数 β_C 对不同的线路其取值不同，工程设计不便。本文中建立的 BP 神经网络预测模型直接将线路结构参数作为输入，使用方便，便于工程设计。此外，目前可以容易地对线路的风速实现在线监测，将实时监测到的风速和线路的结构参数及保证系数作为输入，利用该 BP 神经网络模型可以快速预测悬垂绝缘子串的风偏角，再结合绝缘间隙容许值判断是否会发生风偏闪络，从而实现风偏闪络事故的预警。

值得一提的是，在利用数值方法进行参数分析时，参数的取值范围有限，可以进一步进行扩展，使之适用于更广泛的线路结构和风速范围等。

4　结　论

利用有限元法对不同参数下的输电线风偏响应进行模拟，得到了不同参数下输电线路悬垂绝缘子串风偏角，基于数值模拟结果和 BP 神经网络建立了风偏角的预测模型，得到如下结论：

1)利用有限元方法对输电线不同参数下的风偏进行数值模拟，得到 753 个数据样本，参数分析表明，线路结构参数和风载荷参数对悬垂绝缘子串风偏角的影响呈较复杂的非线性关系。

2)构建了基于 BP 神经网络的输电线悬垂绝缘子串风偏角的预测模型，通过训练测试与优化调参，得到了学习效率与泛化能力较强的预测模型。

3)通过对比 BP 神经网络风偏角的预测结果和数值模拟结果，验证了 BP 神经网络预测模型的准确性。

4)本文中所得到的风偏角 BP 神经网络预测模型，相较于设计规程中的模型，考虑了脉动风的冲击效应；相对于文献[9]提出的引入风荷载调整系数的计算公式更方便和准确，可用于线路杆塔塔头的电气绝缘设计。

5)结合线路结构参数和在线监测风速，利用该 BP 神经网络模型可以快速预测悬垂绝缘子串的风偏角，根据绝缘间隙要求和保证系数，可以实现风偏事故发生的预警。

参考文献：

[1] 张禹芳. 我国 500kV 输电线路风偏闪络分析[J]. 电网技术，2005，29(7)：65-67，73.
Zhang Y F. Analysis on flashover between tower and conducting wires in domestic 500 kV transmission lines caused by windage yaw [J]. Power System Technology，2005，29(7)：65-67，73. (in Chinese)

[2] 胡毅. 500kV 输电线路风偏跳闸的分析研究[J]. 高电压技术，2004，30(8)：9-10.
Hu Y. Study on trip caused by windage yaw of 500kV transmission line[J]. High Voltage Engineering，2004，30(8)：9-10. (in Chinese)

[3] 国家电力公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 第二版. 北京：中国电力出版社，2003.
Northeast Electric Power Design Institute of State Power Corporation. Design manual of high voltage transmission line for power engineering [M]. 2nd edition. Beijing：China Electric Power Press，2003. (in Chinese)

[4] Annestrand S，Bossuyt E F，Reppen N D. Insulation performance analysis of a 500-kV transmission line design[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1970，PAS-89(3)：429-437.

[5] Hileman A R. Weather and its effect on air insulation specifications[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS-103(10): 3104-3116.

[6] IEEE guide for the application of insulation coordination 1313.2-1999[S]. IEEE, 1999. DOI:10.1109/ieeestd.1999.90576.

[7] Overhead line design part 1: detailed procedures, DR 08170[S]. Australia: Standards Australia, 2008.

[8] 严波，林雪松，罗伟，等. 绝缘子串风偏角风荷载调整系数的研究[J]. 工程力学，2010，27(1)：221-227.
Yan B, Lin X S, Luo W, et al. Research on dynamic wind load factors for windage yaw angle of suspension insulator strings[J]. Engineering Mechanics, 2010, 27(1): 221-227.(in Chinese)

[9] Yan B, Lin X S, Luo W, et al. Numerical study on dynamic swing of suspension insulator string in overhead transmission line under wind load[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 248-259.

[10] Xu Y J, You T, Du C L. An integrated micromechanical model and BP neural network for predicting elastic modulus of 3-D multi-phase and multi-layer braided composite[J]. Composite Structures, 2015, 122: 308-315.

[11] Wang J, Xiong X F, Zhou N, et al. Early warning method for transmission line galloping based on SVM and AdaBoost bi-level classifiers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(14): 3499-3507.

[12] 廖峥，熊小伏，李新，等. 基于 BP 神经网络的输电线路舞动预警方法[J]. 电力系统保护与控制，2017，45(19)：154-161.
Liao Z, Xiong X F, Li X, et al. An early warning method of transmission line galloping based on BP neural network [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 154-161.(in Chinese)

[13] 李哲，王建，梁允，等. 基于 Adaboost 算法的输电线路舞动预警方法[J]. 重庆大学学报，2016，39(1)：32-38，97.
Li Z, Wang J, Liang Y, et al. An early warning method of transmission line galloping based on Adaboost algorithm [J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(1): 32-38, 97.(in Chinese)

[14] Tang Z, Zhu Y R, Nie Y Y, et al. Data-driven train set crash dynamics simulation[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(2): 149-167.

[15] 淡淑恒，吴娜，李昊东，等. 基于有限元和神经网络方法对 220kV 盆式绝缘子均压环结构优化设计[J]. 高压电器，2018，54(3)：79-85.
Dan S H, Wu N, Li H D, et al. Optimization design of grading ring for 220 kV basin-type insulator based on finite element method and neural network method[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 79-85.(in Chinese)

[16] 110kV～750kV 架空输电线路设计规范 GB 50545—2010[S]. 北京：中国计划出版社，2010.
Code for design of 110kV -750kV overhead transmission line GB 50545-2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010.6. (in Chinese)

[17] 1000kV 架空输电线路设计规范 GB 50665—2011[S]. 北京：中国计划出版社，2012.
Code for design of 1000kV overhead transmission line GB 50665-2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012. (in Chinese)

[18] 张相庭. 结构风工程：理论·规范·实践[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2006.
Zhang X T. Structural wind engineering [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2006.

[19] Roshan Fekr M, McClure G. Numerical modelling of the dynamic response of ice-shedding on electrical transmission lines[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1/2): 1-11.

（编辑　郑　洁）