

# 基于小波神经网络的手足口病发病率预测研究

邱秀亮, 肖世校, 张保灿

(集美大学诚毅学院, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 结合气象因素, 提出了基于小波神经网络的手足口病(hand-foot-mouth disease, HFMD)发病率预测模型。为验证模型有效性, 进行了对比测试, 测试结果如下: 2014年7月至12月, 厦门市手足口病实际月发病率为 $(7.4, 4.7, 24.3, 21.1, 8.2, 2.8) \times 10^{-5}$ , 小波神经网络模型预测值为 $(4.3, 21.3, 15.9, 3.5, 5.1, 27.2) \times 10^{-5}$ , BP神经网络模型预测值为 $(20.1, 14.3, 1.7, 10.6, 68.2, 0.4) \times 10^{-5}$ , 灰色预测模型预测值为 $(49.7, 66.7, 89.6, 120.4, 161.6, 217.0) \times 10^{-5}$ 。通过实例分析表明, 相比其他的传统的手足口病预测模型, 小波神经网络模型具有收敛速度快、预测精度高、误差小的特点。

**[关键词]** 手足口病; 气象因素; 小波变换; 小波神经网络

**[中图分类号]** O 231.5

## Predicting the Incidence of Hand-foot-mouth Disease Based on Wavelet Neural Network

QIU Xiuliang, XIAO Shixiao, ZHANG Baocan

(Chengyi University College, Jimei University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** According to the research on the meteorological factors, a prediction model of incidence of HFMD was proposed based on wavelet neural network. In order to verify the validity of the model, a comparative test was carried out. The results were as follows: the actual monthly incidence of HFMD in Xiamen from July to December 2014 was  $(7.4, 4.7, 24.3, 21.1, 8.2, 2.8) \times 10^{-5}$ , and the predicted value of wavelet neural network was  $(4.3, 21.3, 15.9, 3.5, 5.1, 27.2) \times 10^{-5}$ , the predicted value of BP neural network was  $(20.1, 14.3, 1.7, 10.6, 68.2, 0.4) \times 10^{-5}$ , the predicted value of Grry prediction model was  $(49.7, 66.7, 89.6, 120.4, 161.6, 217.0) \times 10^{-5}$ . The results obtained from the simulator showed that the forecasting model of the wavelet neural network could evidently decrease prediction error and improve forecasting veracity compared with other models.

**Keywords:** HFMD; meteorological factors; wavelet transform; wavelet neural network

## 0 引言

手足口病(hand-foot-mouth disease, HFMD)是全球性的常见的传染病, 它是由多种人肠道病毒引起的, 主要发生于10岁以下的儿童, 其中5岁以下的婴幼儿发病人数最多。大多数的手足口病病人以手、足、口腔等部位皮肤或黏膜出现疱疹、溃疡, 并伴有全身性症状如发热、厌食、乏力、精神萎靡等特征<sup>[1]</sup>。为了有效地预防和控制 HFMD, 探讨并建立有效的预测模型就具有较强的现实意义。

**[收稿日期]** 2016-09-21

**[修回日期]** 2016-12-16

**[基金项目]** 福建省中青年教育教师科研项目(JAT160691); 厦门市科技计划项目(3502Z20139009)

**[作者简介]** 邱秀亮(1983—), 男, 讲师, 从事复杂网络方向研究。

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

目前，常用的 HFMD 预测方法主要有灰色系统模型、自回归移动平均模型（autoregressive integrated moving average model, ARIMA）等<sup>[2-3]</sup>。当传染病发病易受环境影响时，传统的 HFMD 预测方法往往精确度不高。小波神经网络（wavelet neural networks, WNN）除了具有自学习、自组织、容错性和分布式储存等一般神经网络所具有的优点之外，还具有小波函数时频局部特性和聚焦特性。WNN 强大的非线性映射能力使得它在预测领域具有很大的优势，目前被广泛应用于故障诊断、系统辨识、数据压缩、信号处理、经济建模等多个领域<sup>[4-8]</sup>。

本文结合气象因素，采用厦门市疾病预防控制中心的手足口病发病率数据以及厦门市的天气数据，利用小波神经网络建立手足口病发病率预测模型，对厦门市手足口病发病率进行了预测分析，仿真结果验证了模型的有效性。

# 1 小波神经网络

## 1.1 小波函数

产生于 20 世纪 80 年代中期的小波分析，是非平稳信号分析和处理的强有力工具。小波变换由于克服了傅里叶变换不能作局部分析的缺点，而被公认为是傅里叶发展史上的一个里程碑。因为小波变换在时频平面上的不同位置具有不同的分辨率，所以小波分析已经成为一种多分辨的信号分析方法。为方便引用，现将小波函数有关概念<sup>[9]</sup>简述如下。

**定义 1** 令  $\varphi(t) \in L^2(\mathbf{R})$ ，如果  $\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t) dt = 0$ ，那么  $\varphi(t)$  称为一个小波，也被称为基本小波或母小波。

**定义 2** 对基本小波  $\varphi(t)$  进行平移和伸缩，得到函数族

$$\varphi_{u,s}(t) = \varphi((t-u)/s)/\sqrt{s}, s > 0, u \in \mathbf{R},$$

(1)

那么  $\varphi_{u,s}(t)$  称为基本小波  $\varphi(t)$  的小波基函数。式 (1) 中： $u$  称为平移参数； $s$  称为尺度参数。

本文使用 Morlet 小波作为小波基函数，其表达式为  $h(t) = \cos(1.75t)\exp(-t^2/2)$ ，图形如图 1 所示。小波调整函数为  $h(t) = -1.75\sin(1.75t)\exp(-t^2/2) - t\cos(1.75t)\exp(-t^2/2)$ ，图形如图 2 所示。

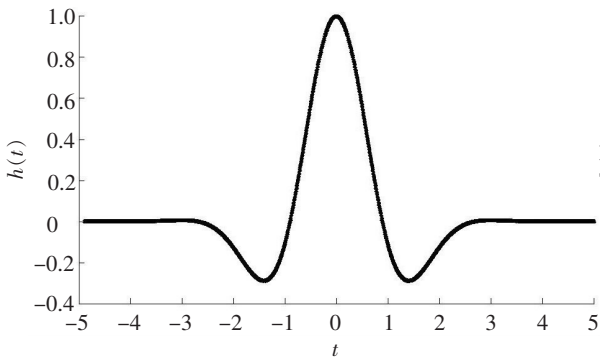


图 1 Morlet 小波基函数  
Fig.1 Morlet wavelet function

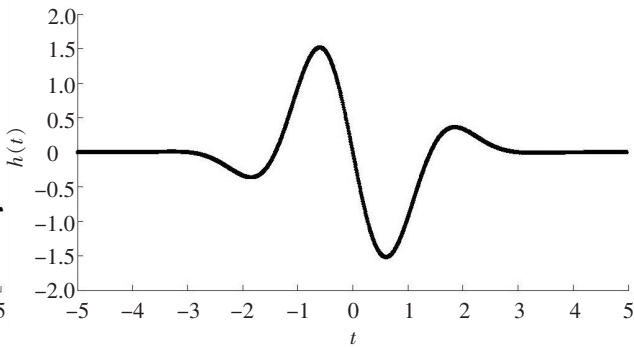


图 2 Morlet 小波调整函数  
Fig.2 Morlet wavelet adjustment function

## 1.2 WNN 的基本结构

WNN 主要有松散型 WNN 和紧致型 WNN 2 种<sup>[10]</sup>。松散型 WNN 如图 3 所示，先用小波分析对信号进行预处理，之后再送入神经网络，它已经被引入传染病预测的研究<sup>[11]</sup>；紧致型 WNN

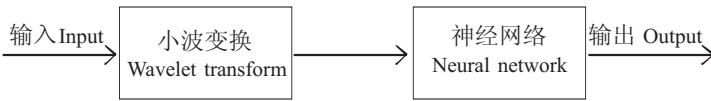


图 3 WNN 松散型结构  
Fig.3 Loose structure of WNN

如图 4 所示，其方法用小波函数来代替神经网络隐含层中神经元的传递激发函数。本文采用的是紧致

型 WNN 模型。

## 2 HFMD 发病率预测模型及仿真

### 2.1 预测模型

HFMD 的发病受气象条件的影响较大,传统的 HFMD 预测模型大多是基于 HFMD 历史数据的预测,忽视了气象因素的影响。本文将气象因素和发病率作为小波神经网络的输入端,对 HFMD 发病率进行建模。图 5 为基于 WNN 的 HFMD 发病率预测模型网络结构。

本文 WNN HFMD 发病率预测模型中,有 18 个输入节点、9 个隐层节点、1 个输出节点。小波网络的输入用向量  $\mathbf{X}$  表示,输出用  $\mathbf{Y}$  来表示,即:  $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_{18})^T, \mathbf{Y} = y$ 。

设  $x_k$  为输入层的第  $k(k = 1, 2, \dots, 18)$  个输入样本,  $y$  为输出层的输出值,  $w_{jk}$  为连接隐含层节点  $j$  和输入层节点  $k$  的权值,  $w_j$  为连接输出层和隐含层节点  $j$  的权值。  $a_j$  为第  $j$  个隐含层节点的伸缩因子,  $b_j$  为第  $j$  个隐含层节点的平移因子。  $h(t)$  是 Morlet 小波函数,  $f(t) = 1/(1 + \exp(-t))$ 。

小波神经网络的模型为  $y = f(\sum_{j=1}^9 w_j h(\sum_{k=1}^{18} (w_{jk} x_k)))$ , 模型算法的具体实现步骤如下:

1) 网络初始化 将网络连接权值  $w_{jk}$  和  $w_j$ 、学习率  $\eta$  以及动量因子  $\lambda$  和小波的尺度系数  $a_j$ 、平移系数  $b_j$  赋予相应的初值。置计数器  $p = 1$ 。

2) 输入学习样本及相应的期望输出  $d^p$  并计算隐含层及输出层的输出 隐含层的输出为  $O_j^p = h(\sum_{k=1}^{18} (w_{jk} x_k^p)/a_j)$ , 输出层的输出为  $y^p = f(\sum_{j=1}^9 (w_j O_j^p))$ 。

3) 计算误差和梯度向量 目标误差函数定义为  $E = \sum_{p=1}^p (d^p - y^p)^2/2$ , 能量函数梯度分别为:  $\delta_j = \partial E^p / \partial w_j = (d^p - y^p) y^p (1 - y^p)$ ;  $\delta_{jk} = \partial E^p / \partial w_{jk} = (\delta_j w_j) x_k^p \partial O_j^p / \partial a_j$ ;  $\delta_{aj} = \partial E^p / \partial a_j = (\delta_j w_j) \partial O_j^p / \partial a_j$ ;  $\delta_{bj} = \partial E^p / \partial b_j = (\delta_j w_j) \partial O_j^p / \partial b_j$ 。

4) 误差反向传播和修改网络参数 计算公式为:  $w_j^{\text{new}} = w_j^{\text{old}} + \eta \sum_{k=1}^p \delta_j + \lambda \Delta_1 w_j^{\text{old}}$ ;  $w_{jk}^{\text{new}} = w_{jk}^{\text{old}} + \eta \sum_{k=1}^p \delta_{jk} + \lambda \Delta_1 w_{jk}^{\text{old}}$ ;  $a_j^{\text{new}} = a_j^{\text{old}} + \eta \sum_{k=1}^p \delta_{aj} + \lambda \Delta_1 a_j^{\text{old}}$ ;  $b_j^{\text{new}} = b_j^{\text{old}} + \eta \sum_{k=1}^p \delta_{bj} + \lambda \Delta_1 b_j^{\text{old}}$ 。

5) 输入下一组数据即置  $p = p + 1$  判断预先设定的进度值  $\varepsilon (\varepsilon > 0)$  是否大于目标误差函数。当  $\varepsilon > E$  时, 停止网络的学习, 否则将  $p$  重置为 1, 并返回第 2) 步。

### 2.2 数据预处理及 WNN 预测仿真

以厦门市疾病预防控制中心法定报告的 HFMD 的发病率和气象数据为 WNN 训练和预测的原始数

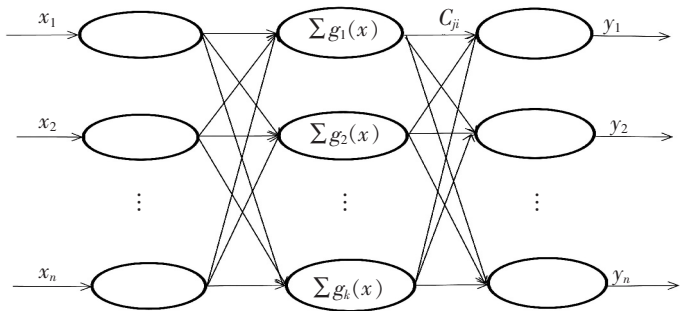


图 4 WNN 紧致型结构  
Fig.4 Compact structure of WNN

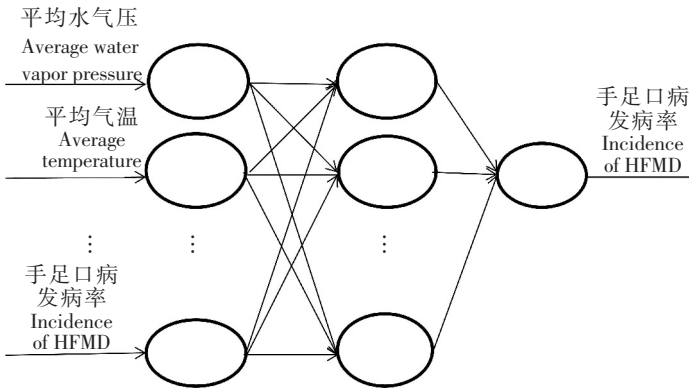


图 5 WNN HFMD 预测模型网络结构  
Fig.5 WNN structure of HFMD forecasting

据，气象数据来源于厦门市气象局。本研究采用 2009 年 6 月至 2014 年 6 月的数据作为 WNN 的训练或建模样本，以 2014 年 7 月至 12 月的数据作为检验样本。反映气象条件的气象因素有日最低气温、平均气温、日最高气温、日照时数、降水量、大型蒸发量、平均水气压、平均相对湿度、最小相对湿度、日最低本站气压、平均本站气压、日最高本站气压、极大风速、极大风速的风向、平均风速、最大风速、最大风速的风向共 17 项。

基于小波神经网络的 HFMD 发病率预测模型输入向量的维数是 18，分别是平均水气压、平均气温、日最高气温、日照时数、降水量、大型蒸发量、日最低气温、平均相对湿度、最小相对湿度、日最低本站气压、平均本站气压、日最高本站气压、极大风速、极大风速的风向、平均风速、最大风速、最大风速的风向的月平均值以及 HFMD 月发病率的归一化数据。输出值为 HFMD 月发病率，利用前一个月的数据预测第二月的 HFMD 发病率。

为了比较模型的优劣，分别用 WNN、BP 神经网络以及灰色预测 GM(1,1) 模型对 2014 年 7—12 月的数据进行预测，得到的结果见图 6。由图 6 可见，WNN 与 BP 神经网络预测方法的预测值与实际值非常接近，而灰色预测模型所得预测值与实际值误差较大。说明，WNN 与 BP 神经网络预测方法要优于灰色预测模型。

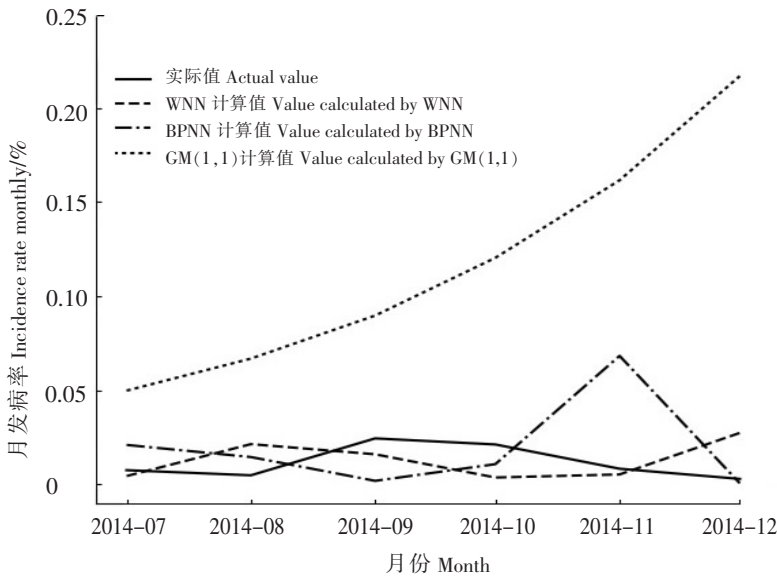


图 6 3 种方法对 HFMD 月发病率的预测结果

Fig.6 Three methods of predicting the incidence of HFMD

2.3 模型结果的比较

为了比较 WNN 与 BP 神经网络预测效果的优劣，利用 WNN 模型与 BP 神经网络模型所得预测值的平均绝对误差（mean absolute error, MAE）、平均绝对误差百分比（mean absolute percentage error, MAPE）和均方误差平方根（root of mean square error, RMSE）3 个指标来比较这两种方法之间的拟合效果及预测效果，比较结果如表 1 所示。

由表 1 可见，WNN 的拟合值及其预测值的 3 个指标均小于 BP 神经网络，说明小波神经

表 1 小波神经网络与 BP 神经网络预测结果的比较

Tab. 1 Comparison of prediction results of WNN and BP neural network

神经网络 Neural network	训练样本 Training sample			预测样本 Prediction sample		
	MAE	MAPE	RMSE	MAE	MAPE	RMSE
WNN	0.004 365	0.658 037	0.000 087	0.000 514	0.839 671	0.000 101
BP 神经网络 BP neural network	0.005 789	0.998 119	0.000 114	0.000 939	1.755 404	0.000 251

网络的预测效果优于BP神经网络。将HFMP实际发病率与WNN模型、BP神经网络模型拟合及预测的结果联合作图,结果见图7。

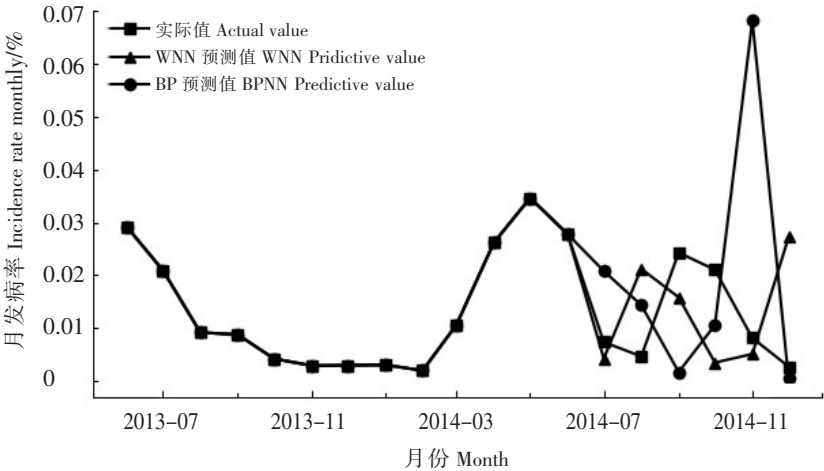


图7 WNN与BP神经网络对HFMD发病率趋势的拟合图  
Fig.7 Fitting chart of wavelet neural network and BP neural network for HFMD incidence trends

3 结论

本文探讨使用WNN对HFMD发病率进行预测,并与灰色预测GM(1,1)模型及BP神经网络模型预测结果进行比较。结果表明, HFMD发病率的预测中效果最好的是WNN。仿真结果为: 2014年7—12月, 厦门市HFMD实际月发病率为 $(7.4, 4.7, 24.3, 21.1, 8.2, 2.8) \times 10^{-5}$ , 小波神经网络模型预测值为 $(4.3, 21.3, 15.9, 3.5, 5.1, 27.2) \times 10^{-5}$ , BP神经网络模型预测值为 $(20.1, 14.3, 1.7, 10.6, 68.2, 0.4) \times 10^{-5}$ , 灰色预测模型预测值为 $(49.7, 66.7, 89.6, 120.4, 161.6, 217.0) \times 10^{-5}$ 。

[ 参考文献 ]

[1] 刘晶星. 现代医学微生物学 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1999: 1227-1242.

[2] 黄晓霞, 张顺先, 赵俊伟, 等. 采用自回归移动平均模型预测中国手足口病月发病率 [J]. 病理监测, 2013, 28(5): 396-399.

[3] 王文明, 王华, 胡文斌, 等. 灰色系统GM(1,1)模型在手足口病发病预测中的应用 [J]. 中国校医, 2013, 27(10): 769-770.

[4] 张坤, 郁湧, 李彤. 小波神经网络在黄金价格预测中的应用 [J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(27): 224-226.

[5] 任崇岭, 曹成铉, 李静, 等. 基于小波神经网络的短时客流量预测研究 [J]. 科学技术与工程, 2011, 11(21): 5099-5103.

[6] 薛鹏骞, 吴立锋, 李海军. 基于小波神经网络的瓦斯涌出量预测研究 [J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(2): 22-25.

[7] 边海龙, 陈光, 杜天军. 基于小波神经网络的时变谐波信号检测 [J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 104-109.

[8] 金瑜, 陈光, 刘红. 基于小波神经网络的模拟电路故障诊断 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(9): 1600-1604.

[9] 徐宗本, 柳重堪. 信息工程概论 [M]. 北京: 科学出版社, 2002: 97-98.

[10] 李洋. 小波过程神经网络相关理论及其应用研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.

[11] 张兴裕, 张韬, 刘元元, 等. 小波神经网络在肾综合症出血热发病率预测中的应用 [J]. 中国卫生统计, 2012, 29(6): 864-865.

(责任编辑 马建华 英文审校 黄振坤)