

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220823001

基于多层感知机的仪器地震烈度评估方法研究*

徐翠翠, 杨淑娟, 许卫晓

(青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 仪器地震烈度是指由仪器的观测记录计算而来的地震动强度,能直观反映地震的影响程度。建立高效准确的仪器地震烈度评估模型,在防震减灾和烈度速报中有着重要意义。以汶川地震的地震动记录以及与其对应的宏观调查烈度作为数据源,通过灰色关联分析确定了17种地震动参数与宏观调查烈度的关联程度。以与宏观烈度关联系数较高的谱烈度、累计绝对速度、均方根加速度等参数为模型的输入层,宏观烈度为输出层,网络迭代次数为1 000,损失函数选择均方误差,指标函数选择平均绝对误差,优化算法选择适应性矩估计,建立了基于多层感知机的仪器地震烈度预测模型。最后利用芦山地震为例验证该模型的准确性,并与其他方法进行比较。结果表明,该方法误差率较低,模型预测结果良好。

关键词: 仪器地震烈度; 地震动参数; 灰色关联分析; 多层感知机

中图分类号: P315.73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)05-0979-08

Research on Instrumental Seismic Intensity Evaluation Method Based on Multilayer Perceptron

XU Cuicui, YANG Shujuan, XU Weixiao

(School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: Instrumental seismic intensity refers to the intensity of ground motion calculated from the observation records of instruments, which can directly reflect the impact of an earthquake. Establishing an efficient and accurate instrumental intensity evaluation model is of great significance in earthquake prevention and mitigation, and rapid intensity reporting. In this paper, the ground motion records of Wenchuan earthquake and its corresponding macro investigation intensity are used as data sources, the correlation degree of 17 seismic parameters and investigation intensity is determined through grey correlation analysis. Spectral intensity, cumulative absolute velocity, root mean square acceleration and other parameters with high correlation coefficient with macroseismic intensity are selected as the input of the model, the macroscopic investigation intensity is taken as the output, with the number of model iterations is 1 000. Mean square error is selected for the loss function of the model, mean absolute error is selected for the indicator function, and adaptive moment estimation is selected for the optimization algorithm, and the instrumental seismic intensity prediction model based on multilayer perceptron is established. Finally, the Lushan earthquake is used as an example to verify

* 收稿日期:2022-08-23;修回日期:2022-12-02

基金项目:2021年度山东省重点研发计划(重大科技创新工程)第一批(2021CXGC011204)、山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME246)资助

作者简介:徐翠翠(1995—),女,硕士研究生。主要从事抗震研究。E-mail:2454636272@qq.com

the accuracy of the model and compare it with other methods. The result shows that the method has a low error rate and the model predicts well.

Keywords: instrumental seismic intensity; ground motion parameters; grey correlation analysis; multilayer perceptron

0 引言

地震是破坏性最大的突发性自然灾害,造成大量的人员伤亡损失。地震烈度反应某一地区的地面遭受一次地震影响的强弱程度,其快速评定能够确定地震灾害的影响程度,对救灾资源调配、减少人员伤亡和经济损失以及社会稳定具有重要意义。传统的地震烈度评估需要专业人员现场进行调查,耗费大量的人力、物力,同时由于人为主观因素的原因产生不同的评估结果,且震后现场调查很难满足时间上的需求。随着计算机技术与地震监测仪器的发展,专家学者开始将焦点从宏观烈度调查转向研究不同地震动特性与地震烈度间的定量关系,通过地震观测仪器记录的地面运动直接得出烈度。峰值加速度与结构受到的最大惯性力相关,峰值速度与结构输入能量相关,是常用的计算地震仪器烈度的参数。B.Gutenberg等^[1]、M.D.Trifunac等^[2]研究分析了峰值加速度与宏观烈度的关系。Y.M.Wu等^[3]选取美国、日本和中国台湾的强震数据集研究了宏观烈度与峰值加速度、峰值速度和谱烈度的相关关系。王玉石等^[4]基于假设检验方法,提出了利用谱烈度与宏观烈度的相关性快速判别地震动强度的方法。李敏^[5]通过多元线性回归的统计分析方法,得到宏观烈度与不同周期加速度反应谱值之间的对应关系。林淋等^[6]以国内外9次强震记录为数据源,建立了宏观烈度与地震动参数的多元回归模型。依据上述方法,许多学者进行了大量的关于仪器地震烈度的研究分析^[7-9]。

目前已有的仪器烈度计算方法研究多为建立单个或多个地震动参数与宏观地震烈度的回归关系,二者之间确实存在一定的线性关系,但离散性很大,仅依靠一个或两三个地震动参数计算仪器地震烈度有较大的不确定性^[10],这是由宏观地震烈度的全局性和模糊性决定的。本文基于汶川地震的数据,提出了利用机器学习算法实现基于多个地震动参数的仪器地震烈度快速评估方法,运用灰色关联分析法确定不同地震动参数与宏观烈度的相关

性,筛选出相关度较高的参数,并将参数输入多层感知机模型中,实现基于多层感知机的仪器地震烈度快速准确评估。将评估结果与中国地震烈度表评定法、美国 Shake Map 系统、日本气象厅计测烈度算法的结果进行对比。

1 数据选择

选择汶川地震动记录和对应的震后调查烈度为数据样本,强震记录台站分布情况见表1。本文选取的地震动记录对应的宏观烈度范围为VI~X,图1为汶川8.0级地震烈度分布图及所用强震记录台站在不同烈度区的分布情况。其中每个台站的强震动记录包括三个方向,即一个垂直方向和两个水平方向。

表1 汶川地震强震记录台站

Table 1 Strong earthquake recording station of Wenchuan earthquake

宏观烈度	VI度以外区	VI度	VII度	VIII度	IX度	X度
台站个数	333	54	20	7	5	1

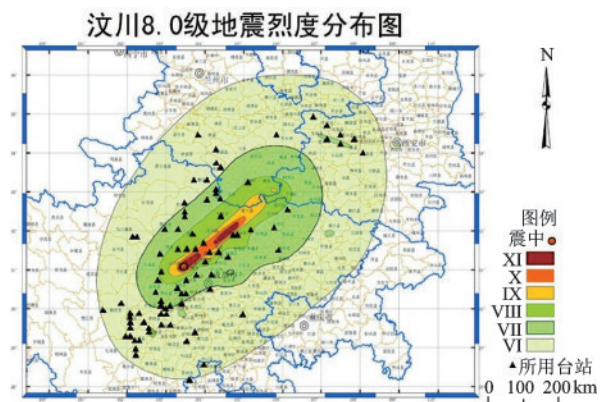


图1 汶川8.0级地震烈度及台站分布

Fig.1 Intensity and station distribution map of Wenchuan M 8.0 earthquake

注:资料来源:中国地震局(<https://www.cea.gov.cn/cea/xwzx/sxgz/5279998/index.html>)

2 地震动参数选取

本文选取了常用的峰值参数、频谱参数等17种

地震动参数建立与地震烈度之间的关系^[11-12]。

2.1 峰值参数

地震动峰值参数主要有峰值加速度PGA、峰值速度PGV、峰值位移PGD、日本气象厅提出的0.3秒持时对应的等效峰值加速度 $A_{0.3}$ 和福建仪器烈度计算方法中的0.5秒持时对应的等效峰值加速度 $A_{0.5}$ 。其中峰值加速度PGA、峰值速度PGV以及峰值位移PGD包括水平向合成和三分向合成。

2.2 频谱参数

反应谱峰值:地震动三分向的加速度反应谱峰值PSA、相对速度反应谱峰值PSV和相对位移反应谱峰值PSD。

有效峰值:1978年美国应用技术委员会(ATC)编制的抗震设计样板规范(ATC-3)中采用的有效峰值加速度EPA与有效峰值速度EPV来度量地震强度^[13]。有效峰值加速度与有效峰值速度的定义如式(1)、(2)所示:

$$EPA = \frac{S_a}{2.5} \quad (1)$$

$$EPV = \frac{S_v}{2.5} \quad (2)$$

式中, S_a 为阻尼比为5%的加速度反应谱在周期0.1~0.5s的平均值; S_v 为阻尼比为5%的速度反应谱在1s周期附近的平均值。

G.Housner^[14]定义的谱烈度计算方法如式(3)所示:

$$SI_h = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(T, \xi) dT \quad (3)$$

式中, T 为周期; ξ 为阻尼比,通常取0或0.2; S_v 为阻尼比为 ξ 时的单质点弹性体系的相对速度反应谱。

Clough定义的谱烈度计算方法如式(4)所示:

$$SI_c = \int_{0.1}^{1.0} S_v(T, \xi) dT \quad (4)$$

式中, T 为周期; ξ 为阻尼比,取0、0.05和0.10; S_v 为阻尼比为 ξ 时的单质点弹性体系的相对速度反应谱。

2.3 持时参数

Husid曾提出用 $\int_0^t a^2(t) dt$ 表示地震动能量随时间的增长,正规化后如式(5)所示^[15]:

$$I(t) = \frac{\int_0^t a^2(t) dt}{\int_0^T a^2(t) dt} \quad (5)$$

式中, $a(t)$ 为地震动加速度时程记录; T 为地震动总持时; $I(t)$ 为一个从0~1的函数。

能量持时为 $T_d = T_2 - T_1$,其中 T_1 、 T_2 由式(6)、(7)确定。式(6)为90%持时,式(7)为70%持时。

$$\left. \begin{aligned} I(T_1) &= 0.05 \\ I(T_2) &= 0.95 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} I(T_1) &= 0.15 \\ I(T_2) &= 0.85 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

2.4 其他参数

阿尔亚斯强度是由A.Arias^[16]于1970年提出,计算方法如式(8)所示。

$$I_A = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_0} a^2(t) dt \quad (8)$$

式中, $a(t)$ 为地震动加速度时程; T_0 为加速度时程的持续时间; g 为重力加速度。

累计绝对速度^[17]:

$$CAV = \int_0^{t_{\max}} |a(t)| dt \quad (9)$$

式中, $a(t)$ 为地震动加速度时程记录; t_{\max} 为记录的时间长度。

均方根加速度:

$$a_{\text{rms}} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt \right]^{1/2} \quad (10)$$

式中, $a(t)$ 为地震动加速度时程记录; T 为计算时所取时间窗。

3 基于多层感知机的地震烈度评估模型

3.1 地震动参数与宏观烈度的灰色关联分析

灰色关联分析是一种对系统发展态势定量描述和比较的方法,既可以描述不同因素之前变化方向的相似趋势,也可以描述各个因素间变化速度的相似性。简单来说,就是计算某一指标受其相关因素影响的相对强弱程度,并进行排序。适用于分布不规则以及小样本数据^[18]。具体计算步骤如下:

(1)确定分析数列,包括反映行为特征的参考数列和影响系统行为的比较数列。

(2)对数据进行无量纲化,各数据的量纲不同,不便于比较影响分析结果的准确性,因此在进行灰色关联分析时要进行无量纲处理,主要有以下两种方法:

初值化:

$$x_i(k) = \frac{x(i)}{x(1)} \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

均值化:

$$x_i(k) = \frac{x(i)}{\bar{x}_i} \quad k = 1, 2, \dots, n; \quad i = 0, 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

式中, k 为时间段; i 为比较数列中的一行。

计算关联系数:

$$\xi_i(k) = \frac{\min_i \min_k |y(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|}{|y(k) - x_i(k)| + \rho \max_i \max_k |y(k) - x_i(k)|} \quad (13)$$

(3)计算关联度,对各待评价对象或待比较序列分别计算各个指标与参考序列对应元素的关联系数的均值,以反映各序列之间的关联关系,并称

其为关联序。

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (14)$$

以选取的汶川地震的地震动参数为比较数列,宏观地震烈度作为参考数列,计算地震动参数与烈度的关联程度,运用python代码实现灰色关联分析过程并将分析结果可视化,得到的关联分析结果,如图2所示。选取关联度大于0.8的9个地震动参数并进行排序,见表2。

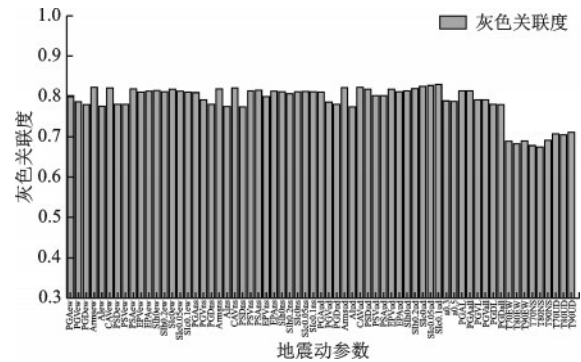


图2 灰色关联分析结果

Fig.2 Grey correlation analysis results

表2 关联度大于0.8的地震动参数排序

Table 2 Ranking of ground motion parameters with correlation degree greater than 0.8

地震动参数	灰色关联度	地震动参数	灰色关联度
垂直向阻尼比为0.1的Clough谱烈(SIc0.1ud)	0.829 79	水平向合成的峰值加速度(PGAL)	0.813 62
垂直向阻尼比为0.05的Clough谱(SIc0.05ud)	0.826 86	东西向阻尼比为0.05的Clough谱(SIc0.05ew)	0.813 45
垂直向阻尼比为0的Clough谱烈度(SIc0ud)	0.825 13	南北向有效峰值加速度(EPA _{ns})	0.813 34
垂直向累计绝对速度(CAV _{ud})	0.822 85	东西向有效峰值加速度(EPA _{ew})	0.813 18
东西向均方根加速度(Arms _{ew})	0.822 67	南北向阻尼比为0.05的Clough谱烈(SIc0.05ns)	0.811 85
南北向均方根加速度(Arms _{ud})	0.822 24	南北向阻尼比为0的Clough谱烈度(SIc0.1ns)	0.811 83
南北向累计绝对速度(CAV _{ns})	0.821 58	南北向阻尼比为0的Housner谱烈度(SIh0ns)	0.811 58
东西向累计绝对速度(CAV _{ew})	0.821 56	垂直向有效峰值加速度(EPA _{ud})	0.811 51
垂直向阻尼比为0.2的Housner谱(SIh0.2ud)	0.820 03	南北向阻尼比为0的Clough谱烈度(SIc0ns)	0.811 33
东西向加速度反应谱峰值(PSA _{ew})	0.819 15	东西向阻尼比为0.2的Housner谱烈(SIh0.2ew)	0.811 04
南北向均方根加速度(Arms _{ns})	0.818 93	东西向阻尼比为0的Clough谱烈度(SIc0.1ew)	0.810 64
南北向有效峰值速度(EPV _{ns})	0.818 15	东西向有效峰值速度(EPV _{ew})	0.810 46
东西向阻尼比为0的Clough谱烈度(SIc0ew)	0.818 08	垂直向峰值加速度(PGA _{ud})	0.810 35
垂直向有效峰值速度(EPV _{ud})	0.817 90	南北向峰值加速度(PGA _{ns})	0.809 98
南北向加速度反应谱峰值(PSA _{ns})	0.815 43	东西向相对速度反应谱峰值(PSV _{ew})	0.809 34
东西向阻尼比为0的Housner谱烈度(SIh0ew)	0.815 09	南北向阻尼比为0.2的Housner谱烈度SIh0.2ns	0.807 06
三分向合成的峰值加速度(PGA _{all})	0.814 15	东西向峰值加速度(PGA _{ew})	0.802 70
垂直向阻尼比为0的Housner谱烈度(SIh0ud)	0.813 87	垂直向相对速度反应谱峰值(PSV _{ud})	0.802 33
南北向相对速度反应谱峰值(PSV _{ns})	0.813 69	垂直向加速度反应谱峰值(PSA _{ud})	0.802 11

由图2和表2可知,不同阻尼比条件下的谱烈度与地震烈度关联度较高,三分向的峰值加速度、水平向合成和三分向合成的峰值加速度关联度较高,峰值速度、0.3 s持时和0.5 s持时的等效峰值加速度关联度较低,与其他研究的结果不同。文献[12]也对地震动参数和烈度之间的相关性进行了分析,以国内的8次地震动记录为样本数据,采用的方法为最小二乘法 and 加权最小二乘法。本文是以汶川强震动记录为样本,使用灰色关联分析计算关联度,因此本文结论与文献[12]存在不同。选取相关度大于0.8的地震动参数为多层感知机深度学习网络的输入层。

3.2 多层感知机

多层感知机(MLP, Multilayer Perceptron)是一种人工神经网络。其相邻神经元节点全连接,同层的神经元节点无连接。样本训练数据由输入层输入,通过一层或多层全连接层对数据进行拟合,最后由输出层输出。利用输出层与样本标签构建损失函数,通过各种优化算法降低损失函数并更新模型参数,直至损失函数达到最小。图3为只有一层隐含层的MLP,其中 $f(x)$ 代表激活函数,激活函数为非线性函数,通过计算加权和并加上偏置来确定神经元是否应该被激活,主要包括 Sigmoid、Tanh 和 ReLU。目前使用最广泛的是 ReLU 激活函数^[19]。

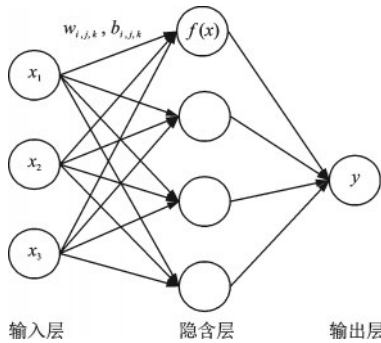


图3 多层感知机网络结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of multi-layer perceptron structure

多层感知机的工作原理如式(15)所示:

$$y_j = f \left[\sum_{i=1}^n (w_{i,j,k} x_i^{k-1} + b_{i,j,k}) \right] \quad (15)$$

式中, y_j 代表输出层第 j 个分量; x_i^{k-1} 为第 $k-1$ 个隐藏层第 i 个神经元的输入; $w_{i,j,k}$ 为第 $k-1$ 个隐含层上第 i 个分量与第 k 个隐含层上第 j 个神经元的连接权重。

权重 w 和偏置 b 是模型中需要确定的参数,深

度学习通过大量的监督数据训练,计算损失函数的最小值从而得出最符合现状的权重与偏移量。但当输入数据的特征很多时,损失函数的计算会十分复杂,为了简化计算过程提高运算速度,利用梯度计算损失函数的最小值。在本文使用的Tensorflow 2.0中通过model.compile(optimizer, loss, metrics)方法绑定损失函数和梯度计算,其中optimizer优化器包括SGD、AdaGrad、Adam、RMSProp等多种算法,loss损失函数包括均方误差(mse)、平均绝对误差(mae)等15种方法,metrics性能评价参数包括正确率(acc)和损失函数(losses)等^[20]。

3.3 多层感知机模型构建

3.3.1 数据预处理

深度学习网络对数据的分布非常敏感,通过我们获得的数据很难保证质量。为了加快训练,消除数据带来的负面影响,将数据进行标准化处理。即将分布范围不同的数据缩放在同一个范围内,一般要求标准化到均值为0,标准差为1的标准正态分布^[21]。均值为0使数据中心化,标准差为1使数据在各个维度呈现相同的单位向量,也就是把原来大小范围分布不同的数据缩放成统一量纲,防止模型梯度爆炸或梯度弥散。

本文选用最大最小值标准化方法标准化数据,如式(16)所示,利用数据的最大最小边界值将训练集和测试集数据缩放到 $[0, 1]$ 。

$$x = \frac{[x - \min(x)]}{[\max(x) - \min(x)]} \quad (16)$$

3.3.2 网络参数的确定

根据关联分析结果,将与地震烈度关联系数较高的谱烈度、累计绝对速度、均方根加速度等地震动参数作为多层感知机的输入,宏观地震烈度为输出,在tensorflow框架中建立多层感知机深度学习网络。通过对超参数的不断调整,最后确定模型选择4层隐藏层,确定模型的网络参数见表3。输入层与隐藏层之间、隐藏层与隐藏层之间的激活函数为分段线性函数relu,隐藏层与输出层之间为sigmoid。

3.3.3 网络的训练与验证

确定网络参数后,将训练数据输入到多层感知机深度学习网络模型中,训练次数为1 000,损失函数(loss)选择均方误差(mse),指标函数(metrics)选择平均绝对误差(mae),并选择适应性矩估计(Adam)优化算法,模型训练结果如图4所示。

图4为训练集和测试集的损失函数曲线,模型误

表3 模型网络参数
Table 3 Model parameters

Layer(type)	Output Shape	Param
dense(Dense)	(None, 8)	312
dense_1(Dense)	(None, 8)	72
dense_2(Dense)	(None, 16)	144
dense_3(Dense)	(None, 16)	272
dense_4(Dense)	(None, 1)	17

Total params:817
Trainable params:817
Non-Trainable params:0

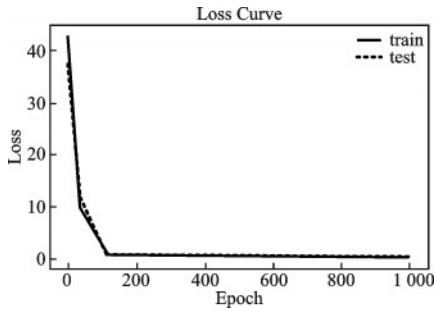


图4 模型损失函数曲线
Fig.4 Loss function curve

差随着训练次数的增加不断减小,迭代了200个epoch之后,训练集和测试集的loss曲线趋于平稳,训练误差和测试误差基本稳定在0.19左右,模型达到最优。由图4可以看出训练集和测试集损失函数曲线基本重合,表明多层感知机模型未产生过拟合现象。

图5、6为模型训练集和测试集的预测结果,其中训练样本61个,测试样本26个。

由图5、6可知,多层感知机深度学习网络预测的汶川地震仪器烈度与实际现场调查烈度基本一致。通过分析预测结果得到模型训练集的准确率为80.33%,测试集的准确率为80.77%,测试集预测误差在正负1度概率为19.23%。利用平均绝对百分误差(MAPE)评价模型,计算公式如式(17)所示。

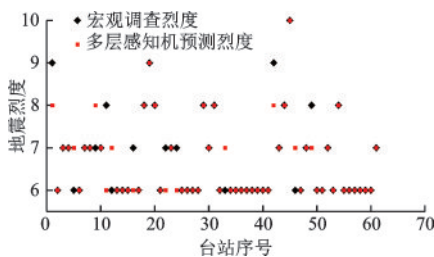


图5 模型训练集预测值与宏观调查烈度对比
Fig.5 Comparison between the predicted value of the model training set and the macroscopic survey intensity

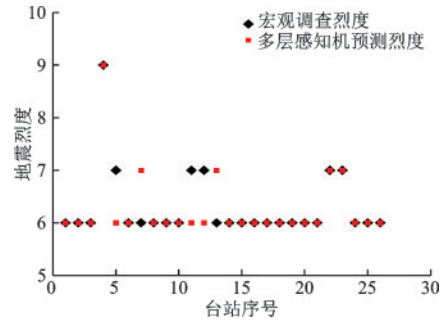


图6 模型测试集预测值与宏观调查烈度对比
Fig.6 Comparison between the predicted values of the model test set and the macroscopic survey intensity

$$MAPE = \frac{100\%}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \right| \quad (17)$$

式中, \hat{y}_i 表示预测值; y_i 表示真实值。

通过计算,得到训练集与测试集的平均绝对百分误差分别为3.01%、2.93%,模型的预测效果较好。

4 地震实例验证

芦山地震发生于2013年4月20日,震级7.0级,震源深度13 km,受灾范围约18 682 km²。本文选取芦山地震数据进行计算,将芦山地震中VI度以上的13个台站的9个地震动参数数据输入到多层感知机模型中进行预测,预测的结果四舍五入后与宏观烈度进行对比分析。将本文提出的方法与中国地震烈度表评定法、美国shake map、日本气象厅计测烈度算法进行比较。其中日本仪器烈度划分为6度,为了便于比较,通过公式(18)、(19)进行转化^[22]。不同方法计算结果见表4。

$$I_{MM} = 1.95 \times I_{JMA} - 2.91 \quad (18)$$

$$MMI = 1.00 \times I_{MM} + 0.11 \quad (19)$$

通过上述几种方法分析可知,宏观烈度与计算烈度的符合率分别为:日本JMA 26.7%、美国shake map 26.7%、中国地震烈度表评定法为33.3%,本文所使用的方法准确率达到60.0%,且该方法预测烈度与宏观烈度相差一度及以上的百分比为80%,不同方法预测结果准确率对比如图7所示。

由于受地形和场地条件等因素的影响使51BXD、51BXZ两个台站峰值加速度很高,峰值速度却相对偏低,宏观烈度判定偏低。分析台站的加速度反应谱(图8),在周期0.2 s时反应谱放大明显,而在周期0.3~0.6 s的谱加速度较低,与该台站周围

表4 芦山地震宏观烈度和不同方法的仪器烈度值

Table 4 Lushan earthquake macroscopic intensity and instrumental intensity values of different methods

台站	宏观烈度	多层感知机	中国地震烈度表评定法	美国 shake map	日本 JMA
51BXD	7	9	9	7	9
51BXZ	7	10	9	7	9
51YAD	8	7	9	7	9
51BXY	7	7	8	6	8
51YAM	8	7	8	6	8
51LSF	8	8	9	6	9
51BXM	7	7	9	7	8
51TQL	6	6	8	6	8
51HYY	6	6	7	5	6
51YAL	7	6	7	5	7
51PJD	6	6	7	4	7
51QLY	6	8	8	7	8
51HYQ	6	6	6	5	7
51HYT	6	6	6	5	6
51HYW	6	6	6	5	5

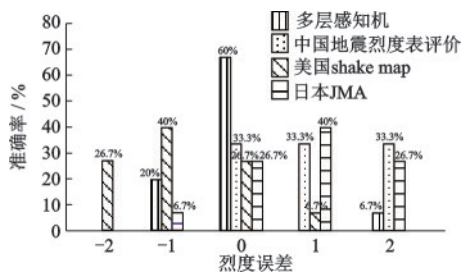


图7 不同方法预测结果准确率对比

Fig.7 Comparison of accuracy of prediction results by different methods

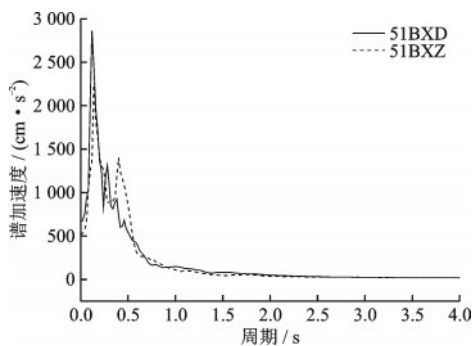


图8 台站 51BXD 和 51BXZ 加速度反应谱

Fig.8 Acceleration response spectra of stations 51BXD and 51BXZ

建筑结构的自振周期相对应,因此台站周围建筑结构破坏程度较相同峰值加速度轻,宏观烈度判定相对偏低,与多层感知机模型预测结果相差较大。已有相关研究对该台站的问题进行详细解释^[11]。

5 结论

以汶川地震数据为样本,提出了运用多层感知机的方法实现仪器烈度快速评估,通过灰色关联分析筛选出与宏观烈度关联系数较高的参数,将筛选后的参数作为多层感知机模型的输入层,以宏观烈度为输出,得出结论如下:

(1)不同阻尼比的谱烈度、累计绝对速度、均方根加速度等参数与宏观烈度的关联度较高,峰值加速度的关联度高于峰值速度,不同百分比的能量持时的关联度较低。

(2)利用多层感知机网络构建的多参数仪器烈度评估模型,以峰值加速度、均方根加速度、谱烈度等地震动参数为输入,宏观地震烈度为输出,计算得到测试样本的平均绝对百分误差为2.93%,模型训练效果良好。

(3)提出的多层感知机评估模型的误差较小,且预测结果迅速,能够达到更贴合实际的效果,实现快速准确评估地震仪器烈度。

基于多层感知机的仪器烈度的快速评估方法的准确率和评估速度大大提高,模型泛化能力更强,运用该方法能够快速确定地震灾害程度,对减少地震应急响应时间和指导震后救援工作有重要意义。由于本文提出的多层感知机模型的样本数量与多样性还存在进一步优化的可能,模型预测效果和适用性具有提升的潜力,同时应该考虑应用其他机器学习算法进行仪器地震烈度的评估,以期进一步提高预测精度。

参考文献:

- [1] Gutenberg B, Richter C F. Earthquake magnitude, intensity, energy, and acceleration[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1942, 32(3): 163-191.
- [2] Trifunac M D, Brady A G. On the correlation of seismic intensity scales with the peaks of recorded strong ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1975, 65(1): 139-162.
- [3] Wu Y M, Teng T, Shin T C, et al. Relationship between peak ground acceleration, peak ground velocity, and intensity in Taiwan[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2003, 93(1): 386-396.
- [4] 王玉石,周正华,王伟.基于假设检验的地震动强度(烈度)速报方法[J].地震工程与工程振动,2008,28(5): 49-54.

- Wang Y S, Zhou Z H, Wang W. Rapid report method of ground motion intensity (intensity) based on hypothesis test[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2008, 28(5): 49-54.(in Chinese)
- [5] 李敏.地震动加速度反应谱与地震烈度的关系研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2010.
Li M. Research on the relationship between seismic acceleration response spectrum and seismic intensity [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, 2010.(in Chinese)
- [6] 林淋,孙景江,廖洁,等.地震动参数与地震烈度的多元回归研究[J].地震工程与工程振动,2011,31(3): 33-38.
Lin L, Sun J J, Liao J, et al. Multiple regression study of ground motion parameters and earthquake intensity [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2011, 31(3): 33-38.(in Chinese)
- [7] 徐钦,田秀丰,王维欢,等.2013年甘肃岷县—漳县6.6级地震仪器烈度与宏观调查烈度比较分析[J].地震工程学报,2018,40(1):124-129.
Xu Q, Tian X F, Wang W H, et al. Comparison and analysis of instrument intensity and macroscopic investigation intensity of M_s 6.6 earthquake in Minxian Zhangxian County, Gansu Province in 2013[J]. Journal of Seismic Engineering, 2018, 40(1): 124-129.(in Chinese)
- [8] 朱永莉,黎大虎,龙承厚,等.不同仪器烈度算法在四川地区历次地震中的比较应用[J].地震学报,2015,37(2):335-346,370.
Zhu Y L, Li D H, Long C H, et al. Comparison and application of different instrument intensity algorithms in previous earthquakes in Sichuan[J]. Acta Seismologica Sinica, 2015, 37(2): 335-346, 370.(in Chinese)
- [9] 李亮,李山有,纪忠华,等.仪器烈度计算方法研究[J].震灾防御技术,2018,13(4):801-809.
Li L, Li S Y, Ji Z H, et al. Research on instrument intensity calculation method[J]. Earthquake Disaster Prevention Technology, 2018, 13(4): 801-809.(in Chinese)
- [10] Wald D J, Worden B C, Quitoriano V, et al. ShakeMap manual: technical manual, user's guide, and software guide[J]. USGS, doi:10.3133/tm12A1.
- [11] 李水龙.地震仪器烈度计算方法初步研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2014.
Li S L. Preliminary study on seismic instrument intensity calculation method [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, 2014.(in Chinese)
- [12] 马强,李水龙,李山有,等.不同地震动参数与地震烈度的相关性分析[J].地震工程与工程振动,2014,34(4):83-92.
Ma Q, Li S L, Li S Y, et al. Correlation analysis of different ground motion parameters and seismic intensity [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2014, 34(4): 83-92.(in Chinese)
- [13] 温瑞智,任叶飞,黄旭涛,等.芦山7.0级地震强震动记录及其震害相关性[J].地震工程与工程振动,2013,33(4):1-14.
Wen R Z, Ren Y F, Huang X T, et al. Strong motion records of Lushan M7.0 earthquake and its correlation with earthquake damage[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2013, 33(4): 1-14.(in Chinese)
- [14] Housner G. Intensity of ground motion during strong earthquakes[R]. Pasadena: Earthquake Research Laboratory, California Institute of Technology, 1952.
- [15] 胡聿贤.地震工程学[M].2版.北京:地震出版社,2006.
Hu Y X. Earthquake engineering [M]. 2nd ed. Beijing: Seismological Press, 2006.(in Chinese)
- [16] Arias A. A measure of earthquake intensity[J]. Seismic Design for Nuclear Power Plants, 1970:438-483.
- [17] Reed J W, Kassawara R P. A criterion for determining exceedance of the operating basis earthquake[J]. Nuclear Engineering and Design, 1990, 123(2/3): 387-396.
- [18] 王金岭.地震灾害经济损失预测研究[D].唐山:华北理工大学,2020.
Wang J L. Research on economic loss prediction of earthquake disaster [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2020.(in Chinese)
- [19] 卞文硕.基于多层感知机的集成学习网络流量数据预测应用研究[D].武汉:湖北工业大学,2021.
Bian W S. Research on application of integrated learning network traffic data prediction based on multi-layer perceptron[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021.(in Chinese)
- [20] Géron A. Hands-on machine learning with scikit-learn and tensorflow: concepts tools, and techniques to build intelligent systems [R]. Sebastopol: O'Reilly Media, 2017.
- [21] 马宁.基于机器学习算法的地震直接经济损失评估模型[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2020.
Ma N. Evaluation model of direct economic loss of earthquake based on machine learning algorithm [D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, 2020.(in Chinese)
- [22] 马鹏举.仪器地震烈度计算方法研究[D].哈尔滨:中国地震局工程力学研究所,2020.
Ma P J. Research on calculation method of instrumental seismic intensity[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Seismological Bureau, 2020.(in Chinese)

(本文编辑:池营营)