引文格式：房新玉,解静,刘盾,等. 基于BP神经网络似大地水准面精化精度分析[J]. 地理空间信息, 2023, 21(11): 73-75. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2023.11.017

基于BP神经网络似大地水准面精化精度分析

房新玉[1,2]，解　静[1,2]，刘　盾[1,2]，崔　嘉[1,2]
（1. 交通运输部天津水运工程科学研究所，天津 300456；
2. 天津水运工程勘察设计院有限公司 天津市水运工程测绘技术重点实验室，天津 300456）

摘　要：针对BP神经网络似大地水准面精化在山区和平原等地形区域的差异，采用BP神经网络+残余高程异常的方法，建立残余高程异常与坐标的非线性函数关系，并以南方某山区和华北某平原为研究对象，对比分析了BP神经网络似大地水准面精化不同地形区域的精度。结果表明，在平原和山区均能达到较高的精度（±5 cm以内），且平原优于山区，因此BP神经网络可应用于大面积的不同地形区域的似大地水准面精化，精度可满足1∶500~1∶2 000大比例尺地形图测量的需求。

关键词：BP神经网络；似大地水准面精化；EGM2008模型；高程异常
中图分类号：P223　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）11-0073-03

Precision Analysis of Quasi Geoid Refinement Based on BP Neural Network

FANG Xinyu[1,2], XIE Jing[1,2], LIU Dun[1,2], CUI Jia[1,2]
(1. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;
2. Tianjin Key Laboratory of Surveying and Mapping for Waterway Transport Engineering, Tianjin Survey and Design Institute for Water Transport Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: Aiming at the differences of quasi geoid refinement based on BP neural network in mountainous and plains, we used a method combining BP neural network with residual elevation anomaly to establish the nonlinear function relationship between residual elevation anomaly and coordinates. Then, taking a southern mountain area and a plain in north China as the research objects, we compared and analyzed the precision of quasi geoid refinement based on BP neural network in different terrain regions. The results show that quasi geoid refinement based on BP neural network can reach a high precision within ±5 cm both in a mountain area and in a plain, and the precision in a plain is higher than that in a mountain area. Therefore, BP neural network can be further used for the quasi geoid refinement in different kinds of terrain, and its precision can meet the needs of 1∶500~1∶2 000 large-scale topographic map survey.

Key words: BP neural network, quasi geoid refinement, EGM2008 model, elevation anomaly

随着全球导航卫星系统（GNSS）的飞速发展和应用普及，在基于位置服务领域的应用越来越广泛，但其获得的高程是大地高，而不是正常高，需进行转化，即确定似大地水准面和参考椭球面的间距——大地水准面差距（或高程异常）[1-3]。BP神经网络属于自适应非线性动力学系统，通过在输入数据与输出数据之间建立非线性映射关系，解决复杂的非线性最佳逼近问题。测绘领域众多学者对神经网络在似大地水准面精化中的应用进行了研究，如杨小青[4]等利用BP神经网络+格网技术对江苏地区似大地水准面精化进行了研究；雷伟伟[5]等利用BP神经网络对焦作市似大地水准面精化进行了研究；宋雷[6]等利用BP神经网络+IGG05B重力场模型对整区似大地水准面精化进行了研究。这些研究均取得了一定成果，但未针对BP神经网络+残余高程异常在不同地形区域的似大地水准面精化精度进行对比分析，因此对BP神经网络+残余高程异常方法在山区和平原似大地水准面精化精度进行对比具有一定的现实意义。本文采用EGM2008重力场模型和GNSS/水准数据求取残余高程异常；再利用BP神经网络，以南方某山区和华北某平原为研究对象，对BP神经网络在山区和平原地区似大地水准面精化精度进行对比分析。

收稿日期：2022-05-31。
项目来源：中央级公益性科研院所基本科研业务费专项基金资助项目（TKS20220302）；天津水运工程勘察设计院有限公司科研创新基金（发展基金）资助项目（SJY202106）。
第一作者简介：房新玉（1983—），硕士，高级工程师，主要从事GNSS在水运测绘技术中的应用工作，E-mail：847832190@qq.com。

1 基本原理与方法

1.1 EGM2008地球重力场模型

地球重力场模型是地球重力位的数学表达式，通常用球谐函数的级数形式表示。EGM2008模型是美国国家地理信息空间情报局2008年4月发布的全球重力场模型，阶次为2 159（球谐系数的阶为2 190，次为2 159），以PGM2007B为参考模型，基于地面重力数据、卫星测高数据、卫星重力数据、全球重力异常数据，以先进算法和建模技术构建而成[7-8]。EGM2008模型具有较高的精度，北美洲大陆南部的美国区域可达7.1 cm，澳大利亚大陆区域可达26.6 cm[9]，在我国大陆地区的总体精度为20 cm[9-10]。

1.2 BP神经网络

BP神经网络（图1）由输入层、隐含层、输出层组成[6]，其中隐含层负责计算节点的组合输入，并通过阈值函数对信号输出进行抑制或激发[11]。BP神经网络计算过程分为输入信号的正向传递和误差的逆向传播两部分。

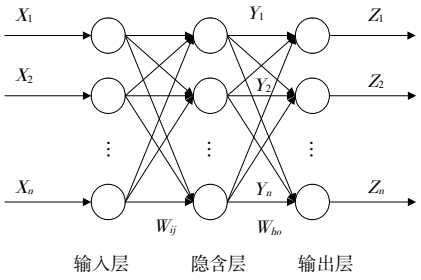


图1 BP神经网络结构

1.3 基于残余高程异常的BP神经网络模型构建

由参考文献[12]、[13]可知，EGM2008模型与我国似大地水准面之间并不吻合，该偏差（残余高程异常）可表示为：

$$\Delta\xi = H - H_r - \xi_M$$

式中，H为大地高；H_r为正常高；ξ_M为由EGM2008模型计算的高程异常。

本文以控制点坐标为输入，以高程异常偏差为输出，构建BP神经网络模型，则构建的神经网络模型结构为$2\times P\times 1$，P为隐含层数目，经试验，本文取15效果较好。因此，本文的神经网络模型结构为$2\times 15\times 1$。

1.4 基于BP神经网络的似大地水准面模型建立

基于BP神经网络的似大地水准面模型建立步骤为：①收集选定区域的控制点资料，包括精确的GNSS坐标（平面坐标、大地高）和水准高程；②计算已知控制点在EGM2008模型下的高程异常；③根据收集的控制点资料和高程异常，计算控制点的残余高程异常；④将残余高程异常分为学习样本、检验样本两部分；⑤利用BP神经网络算法建立坐标与残余高程异常的非线性关系，并用学习样本进行学习；⑥利用检验样本对学习后的BP神经网络模型进行检验。

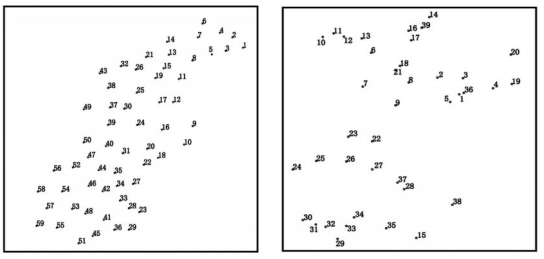
1.5 学习样本数的选择原则

根据参考文献[11]、[14]，学习样本和检验样本的选择原则为：①当样本数较多时，学习样本和检验样本数量可相等，当样本数量较少时，学习样本应大于检验样本数；②学习样本应具有一定的代表性和均匀性。

2 实例分析

2.1 资料收集

华北某平原地区的控制资料为：测区所在区域东西跨度40 km、南北跨度95 km，面积约为3 000 km^2；该区域具有59个C级控制点，控制点均含有大地高测量成果与水准成果，水准成果等级为三等[12]。南方某山区的控制资料为：3条河流自西向东贯穿该地区，河流之间为山区，东西跨度65 km，南北跨度78 km，面积约为3 400 km^2；该区域具有39个控制点，控制点均含有大地高测量成果与水准成果，水准成果等级为三等及以上[3]。控制点分布见图2。

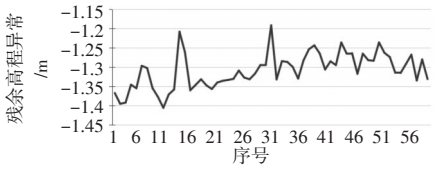


a 平原 b 山区

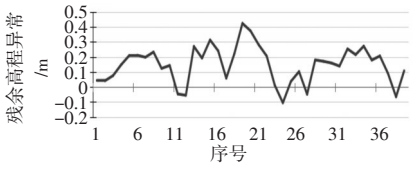
图2 平原、山区控制点分布图

2.2 残余高程异常计算

根据已知控制点的大地高和水准高计算GNSS/水准高程异常，并利用EGM2008模型计算控制点在EGM2008模型下的高程异常，进而求取各已知控制点残余高程异常。平原、山区控制点的残余高程异常见图3。



a 平原

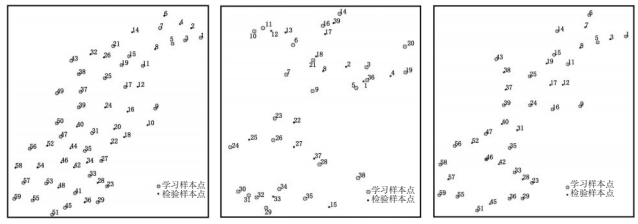


b 山区

图3 平原、山区残余高程异常

2.3　BP神经网络学习

平原地区已知控制点59个，通过多次试验，根据拟合结果，采用全体样本的3倍中误差来判断某点是否为粗差点。结果表明，其中两个点为粗差点，不参与神经网络的拟合。根据样本选择原则，利用剩余的57个点进行建模和检验，选择32个点作为学习样本，25个点作为检验样本。山区已知控制点39个，通过试验和粗差理论分析，样本中不存在粗差点。利用全体样本进行建模和检验，选择24个点作为学习样本，15个点作为检验样本。平原和山区的网形结构不一致，为了评估网形结构的影响，对平原地区按照山区网形结构进行点位选择和建模试验，选择其中的39个点进行建模和检验，根据样本选择原则，选取24个点作为学习样本，15个点作为检验样本（图4）。



a 平原　b 山区　c 平原地区（模拟山区网形结构）

图4　平原、山区、平原地区（模拟山区网形结构）建模点分布

学习样本的内符合精度和检验样本的外符合精度见表1，可以看出：①平原地区的网形结构对似大地水准面精化精度的影响较小；②采用BP神经网络精化的似大地水准面，平原和山区的内外符合精度基本一致，平原地区的内外符合精度均优于山区；③采用BP神经网络精化的似大地水准面，平原和山区的中误差均小于5 cm，说明该方法可用于平原和山区的似大地水准面精化。

表1　不同地区的拟合精度

指标	内符合精度			外符合精度		
	平原地区	山区	平原地区（模拟山区网形结构）	平原地区	山区	平原地区（模拟山区网形结构）
|Δ|最大值	0.055	0.086	0.044	0.060	0.085	0.051
|Δ|最小值	0.000	0.000	0.003	0.001	0.000	0.001
平均值	−0.006	0.035	0.020	0.017	0.035	0.021
中误差	0.027	0.044	0.025	0.024	0.044	0.026

注：平均值为 $m_{平}=\sum|\Delta|/n$；内符合精度为 $\mu=\pm\sqrt{[\Delta\Delta]/(n-1)}$；外符合精度为 $M=\pm\sqrt{[\Delta\Delta]/(n-1)}$；$\Delta$ 为经神经网络学习后的拟合值与已知值的差值；n 为参与学习或检验的样本数量。

3　结　语

本文通过数据试验和分析证明BP神经网络可应用于大面积不同地形区域的似大地水准面精化，并达到了较高的精度（±5 cm以内），可满足1∶500~1∶2 000大比例尺地形图测量的需求。采用BP神经网络精化似大地水准面，学习样本的选择、隐含层数目的确定是关键影响因素，后期需进行相关研究。

参考文献

[1]　刘大杰，施一民，过静珺. 全球定位系统(GPS)的原理与数据处理[M]. 上海:同济大学出版社,2006

[2]　周伟. 插值和拟合方法在高程异常模型建立中的应用[J]. 地理空间信息,2021,19(3):99-101

[3]　房新玉，陆伟，姚晓伟. 基于曲面拟合模型的山区GNSS水准精度分析[J]. 水道港口,2015,36(2):176-180

[4]　杨小青，胡伍生. 基于神经网络的似大地水准面模型精化方法研究[J]. 测绘工程,2008,17(4):8-11

[5]　雷伟伟，陈虎，郑红晓. BP神经网络在区域似大地水准面精化中的应用[J]. 地理空间信息,2009,7(5):81-83

[6]　宋雷，胡伍生. 整区拟合似大地水准面的BP神经网络方法[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2013,32(2):161-165

[7]　许双安. 基于EGM2008模型的GPS高程转换方法研究[J]. 铁道勘察,2012,38(5):31-34

[8]　马雷，田磊，刘汝伟，等. 基于地球重力场模型的GNSS高程转换与精度分析[J]. 地理空间信息,2020,18(1):47-50

[9]　章传银，郭春喜，陈俊勇，等. EGM2008地球重力场模型在中国大陆地区适用性分析[J]. 测绘学报,2009,38(4):283-289

[10]　方涛，张雪梅，洪斌，等. 城市级似大地水准面模型确定的优化方法研究[J]. 地理空间信息,2021,19(7):93-95

[11]　塔里克·拉希德(Tariq Rashid). Python神经网络编程[M]. 林赐，译. 北京:人民邮电出版社,2018

[12]　房新玉. 大区域城市测量高程实时获取方法探讨[J]. 铁道勘察,2018 ,44(5):21-24

[13]　饶才强，路利，郭慧娟，等. 浅谈省级似大地水准面精化[J]. 地理空间信息,2020,18(1):104-107

[14]　胡伍生. 神经网络理论及其工程应用[M]. 北京:测绘出版社,2006