

基于 BP 法的拱桥拱圈温度场研究

应明¹, 郑一峰¹, 王德军²

(1. 吉林大学 建设工程学院, 130026 长春, whlhitb@163.com; 2. 哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨)

摘要:在现代桥梁施工控制中,为依据现场温度测试数据模拟复杂的温度场计算,采用人工神经网络的 BP 算法解决该问题. 基于葫芦山湾跨海大桥的现场实测温度数据,运用较为成熟的 BP 网络模型,通过 MATLAB 对采集数据进行模拟和对比,不断修改输入因素,建立输入与输出的映射关系. 分析了温度场的关键影响因素,并重点研究减少输入节点数提高运算速度的方法. 求解出来的温度场可以作为下一阶段的预测或参考,也可以以此为背景进行全桥温度场的模拟预测.

关键词:桥梁施工控制; BP 网络模型; 温度场

中图分类号: TH133; TP183

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2011)02-0134-04

Research of arch bridge arch ring temperature field based on BP method

YING Ming¹, ZHENG Yi-feng¹, WANG De-jun²

(1. Civil Engineering Department, Jilin University, 130026 Changchun, China, whlhitb@163.com;

2. School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: In the modern bridge construction control, the application of artificial neural network BP algorithm is practically used to solve the calculation of temperature field, with the On-site temperature test data. Based on the measured temperature data of the HU LU WAN Bridge, and by using mature BP network model and MATLAB, the mapping relationship between input and output is established. Some key factors on temperature field are analyzed and a method with less number of input nodes and high calculating speed is studied. The calculated temperature field is significant for the temperature field simulation of the whole bridge and its construction.

Key words: bridge construction control; back propagation (BP) algorithm; temperature field

拱桥由于线形美观和跨越能力强等优势已跻身于大跨径桥梁的行列. 拱桥主要受力构件是拱圈,系统温度场和局部温度的变化都可能引起结构的变化,从而引起温度应力,会使结构处于一种不利工作状态,影响施工阶段安全生产或竣工后的使用阶段,甚至导致桥梁整体或者局部破坏. 影响温度场的主要因素是太阳辐射、气温变化、风速等外界因素,结构物对这些不确定因素的变化在时间上还有明显的滞后性,它们之间是一种复杂的高度非线性映射关系,传统算法很难得到令人满意的结果,所以借助日趋成熟的人工神经网络理论,用多组影响因素数据和温度值训练出能够

描述温度场的网络,直接建立起二者之间的映射关系,简化了原本复杂的求解过程^[1]. 本文采用理论上较为成熟的 BP 神经网络模型试算了桥梁中的温度场,并以葫芦山湾跨海大桥拱肋温度场实测数据为背景建立了温度场网络.

1 人工神经网络原理

1.1 BP 算法(反向传播算法)

BP 算法是多层映射网络,采用最小均方差学习方法,适用于输入值与输出值任意非线性映射. 感知器神经网络只对线性可分的向量集合进行分类,能解决简单的模式分类问题^[2]. 径向基函数网络与 BP 法相比较,适用于函数局部逼近,虽然收敛速度快,但是并不适合施工控制中的实际应用. BP 算法学习过程,由正向传播和反向传播组

成. 正向传播过程中,输入信息从输入层经过隐单元层处理,并传向输出层,每一层神经元的状态影响下一层神经元状态. 当输出层得不到期望的输出,则转入反向传播,原路返回,通过修改各层神经元权值,使误差信号最小. 如果节点数较少,可以不必做过多的改进,如果输入信息不准确或者过多,会导致训练速度下降,甚至误导训练. 整个过程可以简化理解为输入值从输出层一对多地映射到隐含层里,经过训练,再映射到输出层.

1.2 BP 网络模型建立^[3-4]

设有 n 个节点的任意网络,节点传递函数通常选取 S 型函数:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}.$$

结合本文求解温度,设网络只有一个输出 y ,任一节点 i 的输出为 O_i ,并设有 N 个样本 (x_k, y_k) , $k = 1, 2, \cdots, N$,对某一输出 x_k ,网络输出为 y_k , ω_{ij} 为前一层第 i 个神经元输入到后一层第 j 个神经元的权重,节点 i 的输出为 O_{ik} ,节点 j 的输入:

$$net_{jk} = \sum_i \omega_{ij} O_{ik}.$$

使用平方型误差函数:

$$E = \frac{1}{2} \sum_1^N (y_k - \hat{y}_k)^2,$$

其中 $\hat{y}_k$ 为网络实际输出,定义:

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_1^N (y_k - \hat{y}_k)^2,$$

$$net_{jk} = \sum_i \omega_{ij} O_{ik},$$

$$\delta_{jk} = (y_k - \hat{y}_k) = \frac{\partial E_k}{\partial net_{jk}},$$

$$O_{ik} = f(net_{jk}),$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial \omega_{ij}} = \frac{\partial E_k}{\partial net_{jk}} \frac{\partial net_{jk}}{\partial \omega_{ij}} =$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial net_{jk}} O_{jk} = \delta_{jk} O_{jk}.$$

当 j 为输出节点时,

$$O_{jk} = \hat{y}_k,$$

$$\delta_{jk} = \frac{\partial E_k}{\partial \hat{y}_k} \frac{\partial \hat{y}_k}{\partial net_{jk}} = -(y_k - \hat{y}_k) \cdot f'(net_{jk}).$$

当 j 不是输出节点时,则

$$\delta_{jk} = \frac{\partial E_k}{\partial net_{jk}} = \frac{\partial E_k}{\partial O_{jk}} \frac{\partial O_{jk}}{\partial net_{jk}} =$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial O_{jk}} \cdot f'(net_{jk}),$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial O_{jk}} = \sum_m \frac{\partial E_k}{\partial net_{mk}} \frac{\partial net_{mk}}{\partial O_{jk}} =$$

$$\sum_m \frac{\partial E_k}{\partial net_{mk}} \omega_{mj} = \sum_m \delta_{mk} \omega_{mj}.$$

修正权值:

$$\omega_{ij} = \omega_{ij} - \mu \sum_{k=1}^N \frac{\partial E_k}{\partial \omega_{ij}}.$$

2 工程实例

2.1 工程概况

葫芦山湾跨海大桥位于辽宁省大连市西南部,为长兴岛疏港高速公路跨越葫芦山海湾的一座大型桥梁,主桥布置见图 1. 主桥采用 30 m + 100 m + 30 m 飞鸟式中承式拱桥,引桥采用 30 m 先简支后连续 T 梁,下部结构采用柱式墩及实体墩,钻孔桩基础. 桥面以上拱肋采用钢箱结构,断面形式采用带倒角的单箱 3 室箱形截面,截面高度 1.5 m,横向宽度为 3.5 m;钢箱中的所有构件均使用 Q345q - E 制作. 钢箱拱肋在与箱梁相交处做钢筋混凝土连接段. 此段钢拱肋长 767 cm,其中 263 cm 钢拱肋伸入箱梁,593 cm 长的钢拱肋内浇筑小石子混凝土,通过开孔加劲肋和焊钉使钢箱拱肋与混凝土箱梁连接在一起.

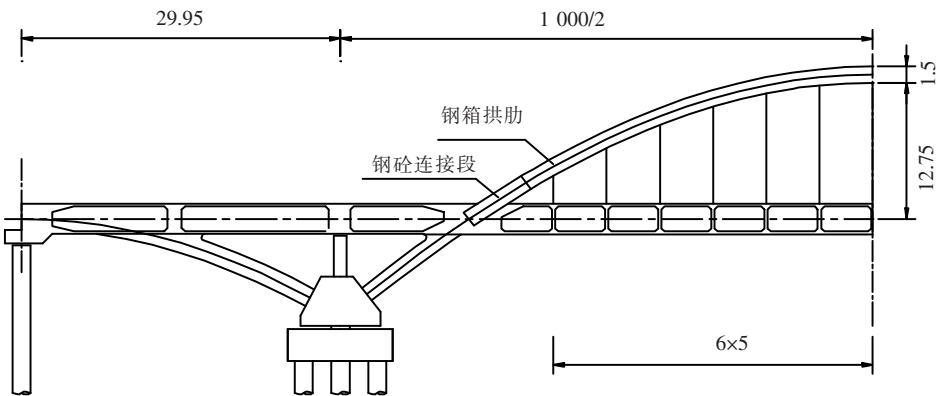


图1 主桥布置图(m)

2.2 网络训练

输入层节点数取决于影响温度场因素的数量,对桥梁结构而言,可分为内部因素和外部因素,温度场主要由外部因素决定. 通过对各种影响

量,对桥梁结构而言,可分为内部因素和外部因素,温度场主要由外部因素决定. 通过对各种影响

因素的分析并综合考虑神经网络对训练范例集的要求,将以下 4 种主要影响因素作为输入:日照时间、大气温度值、钢箱导热系数、风速. 这样输入层为 4 个节点. 输出层节点必须能够反映温度场实质,因此,取相应时刻计算点的温度值作为输出,节点数为 1. 隐层节点数的确定也十分重要,节点数太少,网络逼近效果差不容易收敛,有时还会出现振荡;增加节点数能改善对已有离散点集的逼近效果,提高网络的预测能力,但节点数的增加必然导致训练速度减慢,网络的容错能力和敏感性均会下降. 输入层节点数对隐层的影响更不容忽视^[5-8],所以,重点应该先确定输入层节点个数. 求隐层节点个数可以使用一些经验公式试算,例如: $m = \sqrt{n + 1} + a$; 或者根据 Kolmogorov 定理式: $m = 2n + 1$, m 为隐层节点数, n 为输入节点个数, 1 为输出节点个数, a 为 1~10 的常数,经过综合权衡并考虑精度、速度等网络本身的性能要求,从训练和拟合结果确定隐层节点数取 9 时,逼近效果最佳,满足一定的映射能力.

2.3 训练样本和训练结果

根据施工情况,取 2009 年 12 月,2010 年 2、4 月份某天(全天晴,保证日照时间)中午 12 时的实测值与计算值对比. 再取拱肋同一截面的 4 个监控点,如图 2,总计 12 套实际输入样本数据. 在每月随机选取 3 个点,3 个月共计 9 套数据作为培训样本参加培训,另 3 套作为检验样本. 训练时首先对这些待定参数赋初始值,一般为较小的随机数,以 $[-1, 1]$ 之间为佳. 然后将这些处理后的输入输出的值,即 N 个样本 $(x_k, y_k) (k = 1, 2, \cdots, N)$ 代入网络中进行训练,求出隐层、输出层各单元输出,得到目标值和实际输出的偏差,求出误差梯度,重新确定权值,再重复计算过程,反复过程之后,误差在容许范围内,求得的输出值接近真实值.

最初的设计采用 `sinitff` 进行初始化,求得神经元的单层神经网络的权值和阈值. `Learnlm`(levenberg-marquardt) 作为学习规则进行训练,因为这种算法训练速度比梯度下降法快. `Simuff` 函数作为前向网络仿真^[3]. 这种设计过程比较过时,但实用性强,设计、初始化、训练和仿真过程的函数组合很多,需要试算次数较多. 多种函数在可行情况下组合后,得到最优组合,便于验证和预测.

如果使用 MATLAB7.0,可直接使用神经网络工具箱,对于 BP 网络的实现,可以通过已有的基本函数来完成. 本文参考已有文献利用 `newff`、`init`、`trainlm` 和 `sim` 4 个基本函数来完成. 在可视界

面下进行调整,方便快捷. 同时高版本 MATLAB 已经在后台进行优化处理,在解决工程实际问题中表现出更强的适用性.

拱肋截面监测点布置如图 2,右上角为 1#传感器,左上角为 2#传感器,右下角为 3#传感器,左下角为 4#传感器. 右侧偏向东南方,日照时间长.

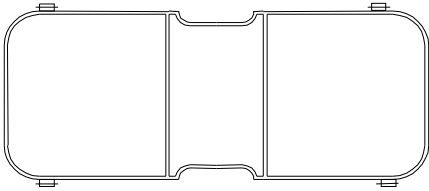


图 2 拱肋各应变监测断面传感器布置图

检验过程是在一个成熟的网络里进行的,运算过程一样. 最佳检验应该采取随机性. 这次控制中计算值和实测值的对比结果见表 1.

表 1 神经网络计算值与实测值对比结果

时间	监控点位置	实测值/℃	计算值/℃	误差/%
2009-12-08	1#	8.9	8.871	0.33
	2#	7.3	7.220	1.10
	3#	7.8	7.783	0.22
	4#	7.8	7.790	0.13
2010-02-02	1#	-2.0	-1.893	5.35
	2#	-6.0	-5.887	1.88
	3#	-1.3	-1.260	3.08
	4#	-5.4	-5.387	0.24
2010-04-27	1#	18.4	18.355	0.24
	2#	10.9	10.691	1.92
	3#	16.9	16.754	0.86
	4#	11.6	11.543	0.49

2.4 BP 法在算例中的改进

根据以往经验,通过改进激活函数、调整网络拓扑结构、修改参数、寻找合理的权值和阈值等方法来减少迭代次数,提高计算精度和运算速度^[9-12].

但在实际工程中,可以通过调整输入值的个数和参与训练的有效节点个数,作为提高运算速度最有效的方法. 如前例所述,输入节点中,取消导热系数、膨胀系数等常数输入,由原来的 4 个输入节点变为 3 个输入节点,根据经验公式隐层节点数变为 7 个进行试算. 同时,文中的输入因素改为太阳辐射 $I(t)$ 、荫蔽温度和风速,重新带入输入值,其余步骤同上,取隐层节点数为 7,进行逼近. 误差精度取相同值,试算次数减少,迭代次数也会大幅度减少. 太阳辐射强度计算公式^[13]如下:

$$I(t) = \frac{2S}{T}\sin^2\left(\frac{\pi t}{T}\right).$$

式中: S 为日太阳辐射总量,7 950 W/m²; T 为太阳日照时长.

如果训练参数采用相同的默认值,进行同一组训练会有接近的结果,如表 2 所示.

表 2 神经网络第一、二次计算值与对比结果 ℃			
时间	监控点位置	第一次计算值	第二次计算值
2009-12-08	1#	8.871	8.881
	2#	7.220	7.263
	3#	7.783	7.788
	4#	7.790	7.787
2010-02-02	1#	-1.893	-1.933
	2#	-5.887	-5.888
	3#	-1.260	-1.267
	4#	-5.387	-5.401
2010-04-27	1#	18.355	13.587
	2#	10.691	10.787
	3#	16.754	16.768
	4#	11.543	11.637

3 结 论

- 1) 通过输入与输出复杂的函数映射,得到的预测结果可以作为温度场的计算依据.
- 2) 建立的人工神经网络 BP 模型在 MATLAB 中直接调用已有函数,减少了编程及程序修改时间,提高了工作效率.
- 3) 利用已有测试数据的拟合去预测和检验其余数据的准确性,有助于施工监控的校准和预测,保证结构安全.

参考文献:

[1] 刘耀东,陈祥宝. 采用人工神经网络求解箱梁温度场算法研究[J]. 中国公路学报,2000,13(1):23-35.

[2] 楼顺天,施洋. 基于 MATLAB 的系统分析与设计:神经网络[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1999:36-77.

[3] 焦李成. 神经网络系统理论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1990:34-35.

[4] CHOI S U, CHEONG S. Predietion local scour around bridge piers using artificial neural networks[J]. Journal of the American Water Resources Association (JAWRA),2006,42(2):457-494.

[5] 胡星. 改进自适应遗传算法的 BP 神经网络在桥梁施工控制中的应用[D]. 武汉:武汉理工大学交通学院,2009.

[6] HUGAR L H, POWELL B A, KAMENS S N. Adaptive networks for fault diagnosis and process control[J]. Computer Chem Eng,1990,24(4/5):561-572.

[7] 雷敏. BP 神经网络在大型钢箱梁斜拉桥施工控制中的应用研究[D]. 四川:西南交通大学土木工程学院,2008.

[8] YAMAMOTO V V, VAIDYANATHAN R. Proeess fault detection and diagnosis using neural networks:I, steady-state process[J]. Computer Chem Eng,1990,14(7):699-712.

[9] CYBERKL G. Continuous value neural networks with two hidden layers are suffieient[J]. Math Contr Signal and Sys, 1989,2:303-314.

[10] ZHANG S H, LYONS L P R. A thin-walled box beam finite element for curved bridge analysis[J]. Computers & Structures, 1984, 18(6):1035-1 046.

[11] NAKAI H,C YOO H. Analysis and design of curved steel bridges[M]. [S.l.]: Mc Graw Hill Book Company, 1988: 143-168.

[12] 李传习,刘 扬,张建仁. 基于人工神经网络的混凝土大跨度桥梁主梁参数实时估计[J]. 中国公路学报,2001,14(3):74-80.

[13] 盛洪飞. 桥梁结构温度影响评价[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学交通科学与工程学院,2004:38-48.

(编辑 刘 彤)