

基于模糊神经网络的大跨悬索桥安全评估研究

刘旭政, 黄平明, 张永健

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 将模糊理论与神经网络技术结合起来, 建立用于大跨度悬索桥安全性评估的模糊神经网络. 确定大跨度悬索桥的7种评估指标, 并通过样本学习对网络进行训练, 使网络获取桥梁专家的经验知识和直觉思维. 将训练好的网络用于宜昌长江大桥的安全性评估, 并与《公路桥涵养护规范》的评估结果相比较. 结果表明: 采用模糊神经网络对大跨度悬索桥进行评估是一种客观、可行的评估方法.

关键词: 桥梁工程; 安全性评价; 模糊神经网络; 悬索桥; 评估指标

中图分类号: U 448.25; U 447

文献标识码: A

0 引言

随着大跨度桥梁设计的轻柔化、结构形式与功能的日趋复杂化, 大跨度桥梁的安全运营逐渐成为国内外学者研究的热点问题. 目前存在多种桥梁安全评估方法, 所采用的理论主要集中在可靠度理论, 层次分析法, 模糊理论^[1], 神经网络及专家系统等. 文献[2]将遗传算法和神经网络应用于斜拉桥的可靠度研究; 文献[3]采用层次分析法建立斜拉桥的评价指标体系; 文献[4]将模糊理论与神经网络相结合应用于钢管混凝土拱桥的安全评估; 文献[5]引入模糊理论和神经网络开发大型斜拉桥安全性与耐久性评价系统. 此外, 还有学者将灰色理论用于对斜拉索构件的评估^[6]. 从国内外研究现状来看, 对于桥梁结构的安全性评估大多集中在中、小跨径桥梁或桥梁的单个构件的评估^[7], 对于大型桥梁的整体安全性评估很少, 而对于大跨度悬索桥的整体安全性评估研究则更少. 作者将模糊理论与神经网络相结合应用于大跨度悬索桥的安全性评估, 提出一种基于模糊神经网络的大跨度悬索桥评估方法, 并应用于宜昌长江大桥的评估中.

1 安全性评估模型

1.1 评估模型指标层的确定

首先根据评估对象的特点确定所有的评估指标. 悬索桥结构是以主缆受拉为主要承重构件的

桥梁结构, 因而主缆的线形和受力状态对于整体结构的安全性是非常重要的; 桥塔承受巨大的轴力和弯矩, 同时在塔顶与主缆相互作用, 因此索塔的塔顶偏位与索塔应力也是悬索桥安全性评估的重要指标; 此外, 加劲梁的线形、吊索的内力以及表观检查也是重要的评估指标. 大跨度悬索桥结构的安全性评估模型可由表观检查、索塔偏位、索塔应力、加劲梁线形、吊索内力、主缆线形以及锚跨张力这7个评估指标确定, 建立大跨度悬索桥安全评估模型见图1. 上述7个评估指标分别用 $F_1 \sim F_7$ 表示.

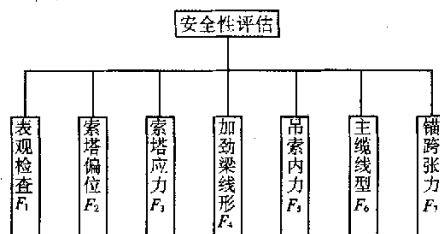


图1 安全评估模型

Fig.1 Safety assessment model

1.2 评估指标的确定

评估指标有定性描述和定量描述两种. 为了准确地评估桥梁的安全性, 所有评估指标均采用定量描述. F_1 按满分100分评分, 其得分为该指标的数值; $F_2 = (1/n_2) \sum (|\Delta - [\Delta]| / [\Delta])$, 式中: Δ 为实测塔顶偏位, $[\Delta]$ 为理论塔顶偏位; $F_3 = (1/n_3) \sum (\sigma / [\sigma])$, 式中: σ 为实测索塔应力, $[\sigma]$ 为理论索塔应力; $F_4 = (1/n_4) \sum (\Delta\delta / [\delta])$,

式中: $\Delta\delta$ 为实测各测点挠度与理论各测点挠度差的绝对值, $[\delta]$ 为加劲梁允许偏差值; $F_5 = (1/n_5) \sum (1N - [N]1/[N])$,式中: N 为实测吊索内力, $[N]$ 为理论吊索内力; $F_6 = (1/n_6) \sum (\Delta v/[v])$,式中: Δv 为实测主缆跨中挠度与理论主缆跨中挠度差的绝对值, $[v]$ 为主缆跨中允许挠度差值; $F_7 = (1/n_7) \sum (1T - [T]1/[T])$,式中: T 为实测锚跨张力, $[T]$ 为理论锚跨张力。对输入的7项评估指标模糊化,隶属度函数采用高斯函数^[8],其定义为

$$\mu_i(x_i) = e^{-\frac{1}{2}(\frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i})^2} \quad (1)$$

式中: μ_i 是隶属函数的中心, σ_i 决定隶属函数的宽度。

μ_i 的确定采用K均值聚类算法确定。即将所有样本的各评估指标按照K均值聚类算法分为优、良、中、差、劣5等。该项评估指标分为优等的所有样本的均值即为该指标优等的 μ_i 取值;该指标优等的隶属函数宽度 σ_i 取值:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n}(x_i - \mu_i)^2} \quad (2)$$

应该注意的是,当该聚类只有一个样本时, $\sigma_i = 0$,为满足高斯函数参数的数学定义,这时取 $\sigma_i = E^{-5}$ 。

2 模糊神经网络模型

2.1 模型的建立

结合大跨度悬索桥安全性评估的特点,构建一个5层的模糊神经网络见图2;第1层是输入层,它的每1个节点代表1个输入变量(评估指标),共有7个节点;第2层是量化输入层,作用是将输入变量模糊化,使其成为BP神经网络的输入层,该层共有35个节点;第3层为BP网络的隐含层,其作用为实现输入变量模糊值到输出变量模糊值之间的映射(虚线框内为BP神经网络),根据Kolmogorov定理^[9],由于量化输入层有35个节点,则该层共有71个节点;第4层为量化输出层,其输出是模糊化数值;第5层是反模糊化层,依据一定的反模糊化原则,实现输出的清晰化。以上5层模糊神经网络具有很强的学习能力。

2.2 学习算法

BP算法是目前神经网络中使用最多的算法,但其存在着网络收敛速度慢,可能会使权值收敛于局部最小值等缺点。该网络的训练中采用改进梯度下降动量BP算法^[10]。网络误差函数 E_p 为:

$$E = \sum_{i=1}^T E_p, \quad E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^M (Y_k - y_k)^2 \quad (3)$$

式中: y 为实际输出; Y 为理想输出; T 为训练样本个数; M 为网络层数(不包括输入层)。

输出层权值的加权调节公式:

$$\omega_{jk}(n+1) = \omega_{jk}(n) + \eta \Delta \omega_{jk} + \alpha (\omega_{jk}(n) - \omega_{jk}(n_1 - 1)) \quad (4)$$

式中: $\Delta \omega_{jk} = \pi_j (Y_k - y_k) / \sum \pi_j$; n 为迭代次数; η 是学习速率; α 是冲量系数。

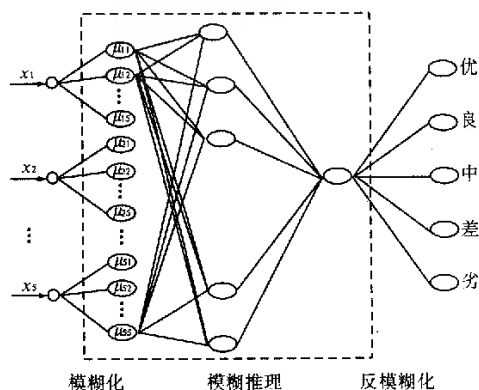


图2 模糊神经网络

Fig. 2 Fuzzy-neural network

3 评价实例

将上述评估方法运用于宜昌长江公路大桥的安全性评估。宜昌长江公路大桥主桥净跨960 m,全长1 187.489 m,桥面全宽30 m,桥型采用双塔单跨钢箱梁悬索桥,是首座完全依靠我国技术建造的跨径千米的悬索桥。该大桥于2001年9月18日通车运营,至今已有5年的运营时间,对该大桥进行安全性评估步骤如下。

3.1 学习样本

为使样本较全面地覆盖各种评估情况,在各评估指标向量范围内均匀取值,由计算机自动赋值生成20组标准理论样本输入网络。样本输出采用专家评分确定,即由多位专家给出各评估指标的权值,然后将各指标折算成百分制分数再与权值相乘,将得出的分数分为优、良、中、差、劣5等。即得出专家的评估结果。样本输入、输出见表1。

其中:专家给出的各评估指标的权值向量为:

$$\omega = [0.08, 0.105, 0.175, 0.114, 0.144, 0.174, 0.208]$$

3.2 网络训练

将上述20组样本输入模糊神经网络进行训

练,网络误差 $E < 0.000\ 01$, 经过 244 次学习, 确定了网络各层参数值, 从而建立了大跨度悬索桥安全评估的模糊神经网络. 为验证该网络, 另取由

计算机随机赋值的 5 组验证样本输入网络, 网络输出结果与专家打分结果比较见表 2.

表 1 网络样本训练数据
Tab.1 Network training sample data

样本	表观检查 (F_1)	主塔偏位 (F_2)	主塔应力 (F_3)	主梁线形 (F_4)	吊杆内力 (F_5)	主缆线形 (F_6)	锚跨张力 (F_7)	评估 结果
1	100	0.05	0.7	0.65	0.01	0.75	0	优
2	100	0.02	0.6	0.65	0	0.8	0.01	优
3	95	0.1	0.7	0.7	0.02	0.75	0.01	优
4	90	0.1	0.65	0.8	0.025	0.85	0.02	优
5	85	0.1	0.85	0.9	0.03	1	0.02	良
6	88	0.12	0.9	0.82	0.028	0.95	0.03	良
7	80	0.15	0.75	0.95	0.04	1.05	0.035	良
8	85	0.22	0.95	1.05	0.055	1.12	0.048	良
9	81	0.28	0.9	1.1	0.065	1.13	0.055	中
10	72	0.3	1.1	1.15	0.07	1.1	0.052	中
11	75	0.28	1.2	1.2	0.075	1.15	0.055	中
12	72	0.3	1.2	1.25	0.08	1.15	0.065	中
13	70	0.32	1.25	1.22	0.077	1.25	0.078	差
14	60	0.34	1.25	1.24	0.075	1.31	0.081	差
15	62	0.35	1.24	1.27	0.081	1.35	0.085	差
16	65	0.35	1.35	1.32	0.076	1.45	0.098	差
17	62	0.42	1.38	1.4	0.085	1.45	0.12	劣
18	50	0.55	1.45	1.5	0.095	1.42	0.115	劣
19	20	0.6	1.55	1.62	0.1	1.55	0.128	劣
20	0	1	1.6	1.7	0.15	1.8	0.15	劣

表 2 校验样本评估结果
Tab.2 Assessment results of verifying sample

样本	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	F_7	评估结果	网络输出
21	81	0.2	0.95	1.3	0.02	1.05	0.028	良	[0.02,0.97,0.02,0,0]
22	83	0.09	0.81	0.75	0.033	0.89	0.022	良	[0.07,0.71,0,0,0.01]
23	91	0.06	0.77	0.81	0.022	0.79	0.021	优	[0.95,0.03,0,0,0]
24	70	0.35	1.15	1.21	0.075	1.35	0.074	差	[0,0,0,0.97,0]
25	35	0.85	1.55	1.61	0.131	1.59	0.122	劣	[0,0,0,0,1]

根据最大隶属度原理, 可以看出, 5 个验证样本专家评估结果与训练好的网络输出评估结果是一致的. 由此, 可知训练好的模糊神经网络很好地获得并储存了评价专家的知识、经验和判断, 可将网络应用于大跨度悬索桥的安全评估.

3.3 评估结果

该桥在通车运营一年内, 进行了 4 次健康观测. 对大桥外观、主缆标高、桥面标高、主要结构内力、应力等进行监测. 取一组数据输入: $X = [84, 0.13, 0.97, 0.92, 0.048, 0.94, 0.021]$, 网络输出

为 $Y = [0, 0.99, 0, 0, 0]$; 根据最大隶属度原则, 得出宜昌长江大桥的评估结果为良.

JTG H11 - 2004《公路桥涵养护规范》中桥梁总体技术状况的评定采用分部件的综合评定方法进行. 评定等级分为一类、二类、三类、四类、五类. 根据宜昌大桥健康观测所测数据, 采用上述方法计算出宜昌大桥技术状况得分为 82 分, 属于二类桥梁. 即桥梁总体状况较好, 重要部件功能良好, 承载能力和桥面行车条件达到设计标准. 这一评估结果与模糊神经网络评估结果是相符的.

4 结束语

建立了大跨度悬索桥安全性评价模型,确定外观检查、索塔偏位、索塔应力、加劲梁线形、吊索内力、主缆线形和锚跨张力7项评估指标,引入智能领域的模糊理论和神经网络技术,提出基于模糊神经网络的大跨度悬索桥安全性评价方法,通过网络来完成评价的推理过程,克服传统桥梁安全性评价方法指标体系不完整、评价结果较为粗糙、评价过程较为依赖专家经验等缺点。输入宜昌长江大桥桥梁健康观测数据,得出该大桥评估结果为良。这一结果与依据 JTG H11-2004《公路桥涵养护规范》计算出的结果是相符的。评价结果再现了专家的经验知识和直觉思维,降低了评价过程中人为因素的影响,保证评价结果的客观性。

参考文献:

- [1] 周任军,徐志生,杨洪明.模糊优选在电网规划综合决策中的应用[J].郑州大学学报(工学版),2005,26(2):23-26.
- [2] 张建仁,刘 杨.遗传算法和人工神经网络在斜拉桥可靠度分析中的应用[J].土木工程学报,2001,34(1):7-13.
- [3] 兰 海,史家均.灰色关联分析与变权综合法在桥梁评估中的应用[J].同济大学学报(自然科学版),2001,29(1):50-54.
- [4] 刘沐宇,袁卫国.基于模糊神经网络的大跨度钢管混凝土拱桥安全性评价方法研究[J].中国公路学报,2004,17(4):55-58.
- [5] 胡 熊,吉 祥,陈兆能,等.拉索桥梁安全性与耐久性评估的专家系统设计[J].应用力学学报,1998,15(4):122-126.
- [6] 尚 鑫,徐 岳.基于灰色理论的斜拉桥拉索安全性评价[J].长安大学学报(自然科学版),2004,24(1):52-55.
- [7] 吕颖钊,贺栓海.缺损钢筋混凝土梁桥模糊可靠性评价模型[J].交通运输工程学报,2005,5(4):58-62.
- [8] 诸 静.模糊控制原理与应用[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [9] 张 铃,张 钹.人工神经网络理论及应用[M].浙江:浙江科学技术出版社,1997.
- [10] 赵振宇,徐用懋.模糊理论和神经网络的基础与应用[M].北京:清华大学出版社,1996.

Research on Safety Assessment of Long-span Suspended Bridges Based on Fuzzy-neural Network

LIU Xu-zheng, HUANG Ping-ming, ZHANG Yong-jian

(College of Road, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In combination with the fuzzy theory with the neural network, a fuzzy - neural network for safety assessment of the long - span suspended bridges is set up. Seven evaluative indexes of long - span suspended bridges are proposed, and the expert experience is included in this model by training the fuzzy-neural network. The approach is illustrated for the assessment of the Yichang Yangtze river highway bridge and compared with the assessment results of Code for Maintenance of Highway Bridges and Culvers. The results show that the assessment results of long-span suspended bridges by fuzzy-neural network are objective and feasible.

Key words: bridge engineering; safety assessment; fuzzy-neural network; suspended bridge; evaluative index