

文章编号:1671-8879(2012)03-0053-05

# 基于改进响应面法的在役 PC 桥梁承载力可靠性

邬晓光<sup>1</sup>, 李冀弘<sup>2</sup>, 宋伟伟<sup>1</sup>

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省高速公路建设集团公司, 陕西 西安 710054)

**摘 要:**提出改进响应面法研究在役 PC 桥梁承载力可靠性问题。利用神经网络模型拟合功能函数, 采用 JC 法计算出桥梁结构构件的可靠指标, 并进行了可靠性分析。工程实例分析表明:该方法建立的神经网络模型能够显示化表示复杂的桥梁承载力功能函数;随着使用年限的增长, 桥梁上部结构的可靠指标计算值逐渐减小, 说明上部结构抗力出现衰减;应用改进响应面法对在役 PC 桥梁承载力的可靠性计算是可行的。

**关键词:**桥梁工程; PC 桥梁; 神经网络技术; 响应面法; 承载力; 可靠性

**中图分类号:**U446 **文献标志码:**A

## Reliability of existing PC bridge based on improved response surface method

WU Xiao-guang<sup>1</sup>, LI Ji-hong<sup>2</sup>, SONG Wei-wei<sup>1</sup>

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Province Freeway Construction Group Company, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract:** The method of improvement response surface was put forward to study the reliability assessment on existing PC bridge. By using the neural network model fitting function, the reliability index was calculated with JC method and the reliability analysis was done for bridge structure component. An engineering case analysis shows that the neural network model can express the complex bearing capacity function easily. The reliability index of the upper structure calculation value gradually decreases along with the increase of using years, which explains the bridge's resistance degradation. The reliability calculation of bearing capacity of PC bridge by using the method is feasible. 4 tabs, 1 fig, 9 refs.

**Key words:** bridge engineering; PC bridge; neural network technology; response surface method; bearing capacity; reliability

## 0 引 言

统计资料表明:近 20 年来,中国所建混凝土桥梁中,75%以上采用的是预应力混凝土结构;按照桥梁设计基准期 100 年计算,大量的预应力混凝土桥梁正逐渐步入“中年”或“老年”<sup>[1]</sup>。由于荷载、疲劳、

腐蚀、老化及环境等不利条件和因素的影响,预应力桥梁结构将不可避免地产生损伤积累、抗力衰减。因此,对在役 PC 桥梁的可靠性研究是目前可靠度理论研究的一个重要方向。张建仁等对结构可靠度理论及其在桥梁工程中的应用做了详细论述,但对预应力混凝土结构可靠性分析尚处于探索阶段,且

收稿日期:2011-05-12

基金项目:河北省交通科技计划重点项目(2007-Y080129)

作者简介:邬晓光(1961-),男,湖北英山人,教授,博士研究生导师, E-mail:wxgwst.cn@126.com。

统计资料不足<sup>[2-5]</sup>。为此,本文结合 PC 桥梁的特点,将神经网络技术的响应面法引入到在役预应力混凝土结构承载力可靠性分析中,利用神经网络代替多项式重构隐式极限状态函数,并考虑有效预应力等主要因素,通过神经网络的响应面法计算在役 PC 桥梁的可靠指标,并对其可靠性进行评估。

1 在役桥梁可靠性特点及评价标准

相对于桥梁可靠性设计而言,在役桥梁的可靠性主要有以下几个特点。

(1)对在役桥梁结构来说,规定时间为结构的后续使用期;而后续使用期则主要取决于结构的使用者和结构当前的技术状况,它可以是变化的。

(2)在役桥梁结构可靠性的规定条件主要指桥梁结构所处的现实环境,包括作用构成和人为因素,而设计、施工 2 个因素在桥梁建成、投入使用后就已经成为历史,这 2 个因素在可靠性分析时均反映在实测抗力的统计参数中。

(3)结构的预定功能具体以结构的极限状态表示,一般来说,在役桥梁结构的预定结构功能也是以桥梁的极限状态表示,在役桥梁结构的预定功能与结构设计时相同。

承载能力极限状态是对应于桥梁及其构件达到最大承载能力或出现不适于继续承载的变形或变位的状态。此状态下对应的可靠指标称为最小目标可靠指标  $\beta_{\min}$ ,根据文献[6]中桥梁技术状况评定等级,可认为  $\beta_{\min}$ 对应的状态为承载能力降低 25%时的状态。根据文献[7]建议,中国公路桥梁二级结构构件在设计基准期内,公路桥梁结构设计规范延性破坏构件和脆性破坏构件可靠指标的下限值分别为 4.2 和 4.7,一级、三级结构  $\beta_{\min}$ 相应增减 0.5。

对于某种类型的构件,可通过典型构件的统计计算得出,由于公路旧桥关于可靠指标与承载力等级划分的关系尚无规范可依,实际上可用概率密度函数  $f$  与可靠概率  $P_i$  的对数  $\lg(P_i)$ (可靠度)建立坐标系来划分桥梁评定等级,如图 1 所示。图 1 中,一类,二类,⋯,五类表示构件安全等级。

2 承载力计算模型的影响因素

桥梁结构的可靠性取决于主要承重构件的可靠性,而不同桥型的桥梁其构件的组成材料、受力方式不尽相同,现针对梁式预应力混凝土桥梁进行分析。在役桥梁的承载力计算模式可分为抗弯承载力计算、抗剪承载力计算以及构件的应力计算 3 种类型,

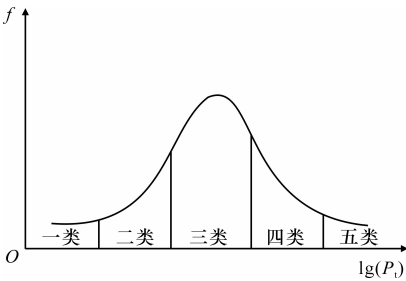


图 1 评定等级与可靠度的对应关系

且不考虑截面尺寸随机变量参数。不同的计算模型对应的抗力和荷载效应主要影响因素见表 1。工程中常用的可靠性模型可表示为

$$Z(t_0) = R(t_0) - S(t_0) \tag{1}$$

式中: $t_0$  为桥梁结构已使用时间或检测统计数据时刻; $R(t_0)$ 、 $S(t_0)$  分别为桥梁结构构件在  $t_0$  的抗力与作用效应; $Z(t_0)$  为承载能力极限状态功能函数<sup>[8]</sup>。

$Z(t_0) > 0$  时,表示结构处于可靠状态; $Z(t_0) < 0$  时,表示结构已失效或破坏; $Z(t_0) = 0$  时,表示结构处于极限状态。

表 1 各承载力计算模型的主要影响因素

功能函数 $Z$ 的分类	与荷载效应 $S$ 有关的因素	与抗力 $R$ 有关的因素
抗弯承载力	恒载 $S_G$ 、活载 $S_Q$	混凝土强度 $f_c$ 、普通受拉钢筋面积 $A_s$ 、预应力钢筋面积 $A_p$
抗剪承载力	恒载 $S_G$ 、活载 $S_Q$ 、预加应力 $\sigma_p$	普通受拉钢筋面积 $A_s$ 、箍筋面积 $A_{sv}$ 、预应力钢筋面积 $A_p$
混凝土正应力	一期恒载效应 $M_{G1}$ 、二期恒载效应 $M_{G2}$ 、活载效应 $M_Q$	普通受拉钢筋面积 $A_s$ 、预应力钢筋面积 $A_p$ 、有效预应力 $\sigma$

3 改进响应面法及可靠性指标

预应力混凝土桥梁结构的极限状态函数通常是根据有限元分析方法得到的一种隐式的数值关系,而不是一般的显式表达式。采用改进响应面法进行该类结构可靠度分析较其他方法比较更为简便,相比基于多项式的响应面法,神经网络拟合可以以任意精度逼近极限状态函数。由于极限状态函数中随机变量不全是正态分布的,故在实际工程中为了解决这一问题,在分析预应力混凝土桥梁可靠度时,最终采用 JC 法求解其可靠指标,提高了响应面法在预应力混凝土桥梁可靠度分析中的准确性<sup>[9]</sup>。

3.1 BP 神经网络的响应面法

基于 BP 神经网络的响应面法进行可靠性分析的一般思路是:利用 Matlab 程序的强大功能,建立

神经网络模型,确定网路层数、各层神经元的个数和传递函数等结构参数,运用神经网络工具箱进行网络训练,拟合真实的极限状态函数;采用一次二阶矩的验算点法计算可靠指标  $\beta$ 。

一般采用 3 层神经网络建立映射关系,包括输入层、隐含层和输出层,其表达式为

$$f_i^{(k)} = f^{(k)} \left( \sum_{j=1}^n \omega_{ij}^{(k)} x_j^{(k)} + \theta_i^{(k)} \right) \quad (2)$$

式中:  $x_j^{(k)}$  为第  $k$  层的输入值;  $\omega_{ij}^{(k)}$  为第  $k$  层神经元  $i$  与第  $k-1$  层神经元  $j$  之间的连接权值;  $\theta_i^{(k)}$  为第  $k$  层神经元  $i$  的阈值;  $f_i^{(k)}$  为第  $k$  层神经元的输出值;  $f^{(k)}(\cdot)$  为传递函数,常用的函数形式有 Sigmoid 函数(对数 S 形)和线性函数,具体表达形式为

$$f_1(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, f_1(x) \text{ 为 Sigmoid 函数} \quad (3)$$

$$f_2(x) = x, \quad f_2(x) \text{ 为线性函数} \quad (4)$$

确定输入样本  $x_1, x_2, \dots, x_n$  及对应的目标值  $z_1, z_2, \dots, z_n$ , 对训练(输入)样本进行归一化处理, 即有

$$q_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中:  $\mu_i, \sigma_i$  分别为训练样本  $x_i$  的均值和标准差;  $q_i$  为归一化处理后进入输入层的样本值。

本文隐含层传递函数选为对数 S 形函数, 输出层传递函数选为线性函数, 其输出层的计算值为  $y_i^{(2)}$ , 利用神经网络工具箱进行训练, 真实值  $z_i$  与计算值  $y_i^{(2)}$  的误差函数  $\Delta$  为

$$\Delta = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (z_i - y_i^{(2)})^2$$

沿误差函数梯度负方向调整权值和阈值, 即

$$\omega_{i+1} = \omega_i - \eta \frac{\partial \Delta}{\partial \omega_i}, \quad \theta_{i+1} = \theta_i - \eta \frac{\partial \Delta}{\partial \theta_i}$$

$\Delta$  对各层权值  $\omega_i$  和阈值  $\theta_i$  的梯度为

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \omega_{ij}^{(k)}} = -\delta_i^{(k)} y_j^{(k-1)}, \quad \frac{\partial \Delta}{\partial \theta_i^{(k)}} = -\delta_i^{(k)},$$

$$\delta_i^{(k)} = (z_i - y_i^{(k)}) y_i^{(k)} (1 - y_i^{(k)})$$

式中:  $\eta$  为学习率,  $0 < \eta < 1$ ;  $i = 1, 2, \dots, m$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ ;  $k = 1, 2$ ;  $y_i^{(k)}$  为第  $k$  输出层计算值。

当总体误差小于指定误差时, 迭代计算终止, 通过计算结果蕴含的函数关系进行推导, 得到极限状态函数表达式。

### 3.2 可靠指标计算

在役桥梁结构的可靠性分析是一定时间、条件和预定功能下的概率预测, 用以估计未来桥梁结构可靠或失效的可能性大小的度量。运用 BP 响应面法

进行 PC 桥梁结构可靠度计算的具体步骤如下。

(1) 统计各随机变量特征, 考虑结构抗力及荷载效应影响因素, 建立功能函数。

(2) 建立桥梁结构有限元模型, 计算样本点处的结构响应, 进而求得桥梁结构极限状态函数值, 该函数值与随机变量值组成神经网络的学习样本。

(3) 建立 BP 神经网络模型, 确定神经网络的结构参数, 利用学习样本对神经网络进行训练, 建立起输入与输出的关系。将训练好的神经网络的权值和阈值代入公式, 建立的极限状态函数表达式为

$$y_k = a_k + b_k f_2 \cdot$$

$$\left\{ \sum_{i=1}^h \left[ \omega_{2ki} f_1 \left( \sum_{j=1}^n \omega_{1ij} \frac{x_j - \mu_j}{\sigma_j} + \theta_{1i} \right) \right] + \theta_{2k} \right\} \quad (6)$$

式中:  $y_k$  为结构第  $k$  个响应量;  $x_j$  为第  $j$  个输入变量;  $a_k, b_k$  分别为训练样本集归一化时目标数据的均值和方差;  $f_1, f_2$  分别为隐含层和输出层传递函数;  $\mu_j, \sigma_j$  分别为输入变量  $x_j$  的均值和标准差;  $\omega_{1ij}$  为隐含层第  $i$  个神经元与输入层第  $j$  个神经元之间的连接权值;  $\omega_{2ki}$  为输出层第  $k$  个神经元与隐含层第  $i$  个神经元之间的连接权值;  $\theta_{1i}, \theta_{2k}$  分别为隐含层第  $i$  个神经元和输出层第  $k$  个神经元的阈值。

将训练好的神经网络权值和阈值代入式(6)可得显示表达式。

(4) 通过计算得出的承载能力极限状态表达式, 利用 JC 法的验算点法进行迭代计算, 得出结构在  $t_0$  时刻的可靠指标  $\beta(t_0)$ ; 将  $\beta(t_0)$  与桥梁承载力评估标准进行比较, 完成桥梁的可靠度分析。

## 4 工程应用分析

某桥梁全长 110 m, 为二类结构, 起点桩号为 K143+920.8, 终点桩号为 K144+139.20。上部结构为  $2 \times 30 \text{ m} + 40 \text{ m} + 2 \times 30 \text{ m}$  预应力混凝土连续梁桥, 桥面连续, 主梁为单箱双室等截面箱梁, 箱梁顶面宽 13.25 m, 底面宽 7.25 m, 梁高为跨中 1.8 m。本桥检测时已运营 15 年, 检测结果为: 梁跨中附近正裂缝宽度为 0.05~0.12 mm, 高度为 20~50 cm, 平均间距约 60 cm, 支点附近未见明显斜裂缝; 混凝土强度回弹值为 25.7 MPa, 钻芯取样测试值为 24.8 MPa; 混凝土碳化深度为 25.5 mm, 未达到钢筋表面。

采用 MIDAS 建立有限元模型, 可靠度分析时, 分别考虑正截面抗弯、斜截面抗剪以及应力计算 3 种失效模式, 建立承载力极限状态方程。针对不同的失效模式, 采用不同的随机变量, 极限状态函数  $Z$  (即功能函数) 可表示为

$$Z = R(x_1, x_2, \cdots, x_n) - S_G - S_Q \quad \text{或}$$
$$Z = [U] - U_{\max}(x_1, x_2, \cdots, x_n)$$

式中:  $x_i$  为各影响抗力因素的随机变量;  $R(\cdot)$  为抗力;  $[U]$  为正常使用极限状态下规范规定的限值;

$U(\cdot)$  为正常使用状态的作用效应计算值, 如变形、裂缝宽度和截面抗裂应力值, 可通过结构分析确定,  $U_{\max}(\cdot)$  为效应计算最大值。

将检测结果进行统计分析, 其统计特征见表 2。

表 2 随机变量统计参数表

失效模式	随机变量	均值 $\mu_1$	均值 $\mu_2$	变异系数 $\delta$	分布类型
正截面抗弯	恒载效应 $M_G/(\text{kN} \cdot \text{m})$	2 958.8	2 953.2	0.070	正态分布
	活载效应 $M_Q/(\text{kN} \cdot \text{m})$	1 650.20	1 663.58	0.220	极值 I 型分布
	混凝土强度 $f_c/\text{MPa}$	24.8	23.2	0.180	正态分布
	普通钢筋面积 $A_s/\text{mm}^2$	1 272.5	1 258.4	0.025	正态分布
	预应力钢束面积 $A_p/\text{mm}^2$	2 520	2 515	0.010	正态分布
斜截面抗剪	恒载效应 $V_G/\text{kN}$	197.30	196.93	0.070	正态分布
	活载效应 $V_Q/\text{kN}$	311.10	313.62	0.220	极值 I 型分布
	混凝土强度 $f_c/\text{MPa}$	24.8	23.2	0.180	正态分布
	普通钢筋面积 $A_s/\text{MPa}$	1 272.5	1 258.4	0.025	正态分布
	箍筋面积 $A_{sv}/\text{mm}^2$	157.08	155.60	0.025	正态分布
	预应力钢束面积 $A_p/\text{mm}^2$	2 520	2 515	0.010	正态分布
持久状况 正应力	普通钢筋面积 $A_s/\text{mm}^2$	1 272.5	1 258.4	0.025	正态分布
	预应力钢束面积 $A_p/\text{mm}^2$	2 520	2 515	0.010	正态分布
	有效预应力 $\sigma/\text{MPa}$	1 171.01	1 125.50	0.150	对数正态分布
	一期恒载效应 $M_{G1}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	2 261.3	2 255.7	0.070	正态分布
	二期恒载效应 $M_{G2}/(\text{kN} \cdot \text{m})$	697.5	697.5	0.070	正态分布
	活载效应 $M_Q/(\text{kN} \cdot \text{m})$	1 650.20	1 663.58	0.220	极值 I 型分布

注: 1. 均值  $\mu_1$ 、均值  $\mu_2$  分别为桥梁使用 5 年和 10 年的统计值; 2.  $\delta$  为统计参数的变异系数(量纲一)。

根据本桥实际情况,正截面抗弯承载力破坏取中跨跨中截面的失效模式,属于脆性破坏;斜截面抗剪承载力破坏取距离支点二分之一梁高处截面,属于脆性破坏;混凝土正应力计算取模型计算的最不利截面,属于延性破坏。对本桥,假定桥梁上部结构可靠度  $\beta$  与承载力等级的关系见表 3。

表 3 构件可靠度与评定等级划分的关系

构件安全等级	一类	二类	三类	四类	五类
可靠 指标	延性破坏 $\beta > 5.5$	$5.5 \leq \beta < 5.0$	$5.0 \leq \beta < 4.6$	$4.6 \leq \beta < 4.2$	$\beta \leq 4.2$
	脆性破坏 $\beta > 5.9$	$5.9 \leq \beta < 5.5$	$5.5 \leq \beta < 5.1$	$5.1 \leq \beta < 4.7$	$\beta \leq 4.7$

采用上述方法计算得弯矩失效模式下使用 5 年时的可靠指标为 5.680 6。同理,可计算剪力和持久状况下混凝土正应力失效模式下的可靠指标,计算结果见表 4。

表 4 动态可靠指标计算值

失效模式	可靠指标	
	5 年	10 年
抗弯承载力	5.680 6	5.406 2
抗剪承载力	5.414 7	5.384 3
混凝土正应力	4.328 4	4.192 7

由此可见,本桥正截面抗弯承载力失效模式下的可靠指标明显大于其他 2 种情况的可靠指标,即

混凝土持久状况正应力模式下得到的评定等级最小,通过其他检测方法(如外观检测、荷载试验等)验证后,得到的上部结构承载能力评判结论与之相符,证明了本方法的可行性。另外,随着使用年限的增长,截面可靠度指标有所减小,说明桥梁在使用过程中抗力产生了一定衰减,符合实际情况。

5 结 语

(1)对于 PC 桥梁结构这种极限状态函数无法显式表达的可靠度求解问题,利用 Matlab 强大的运算功能模拟极限状态函数,并将其显式化,较其他方法使用更为简便。

(2)极限状态函数拟合时,相比于多项式,神经网络优越的非线性映射能力能更好地逼近极限状态函数,精确地模拟桥梁结构的真实响应,从而提高了 PC 桥梁结构可靠度计算精度。

参考文献:

References:

[1] 刘自明,王邦楣. 桥梁工程检测手册[M]. 北京:人民交通出版社,2002.

[ 2 ] 张建仁,刘 扬,许福友,等. 结构可靠度理论及其在桥梁工程中的应用[M]. 北京:人民交通出版社,2003.

[ 3 ] 栗 洪,程 进. 神经网络技术在预应力混凝土桥梁可靠度分析中的应用[J]. 结构工程师,2009,25(2):71-75.

SU Hong,CHENG Jin. Application of neural network in reliability analysis of prestressed concrete bridges[J]. Structural Engineers,2009,25(2):71-75.

[ 4 ] 魏巍巍,贡金鑫,田 磊. 钢筋混凝土构件受剪承载力对比分析[J]. 建筑科学与工程学报,2010,27(2):25-37.

WEI Wei-wei,GONG Jin-xin,TIAN Lei. Comparative analysis of shear capacity for reinforced concrete members[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2010,27(2):25-37.

[ 5 ] 张柳煜,邬晓光,李启乾. 粘贴加固材料厚度与钢筋混凝土 T 梁极限承载力分析[J]. 筑路机械与施工机械化,2010,27(7):67-69.

ZHANG Liu-yu,WU Xiao-guang,LI Qi-qian. Analysis on thickness of reinforcement material and ultimate bearing capacity of RC T-section beams strengthened with steel plate and CFRP[J]. Road Machinery & Construction Mechanization,2010,27(7):67-69.

[ 6 ] JTG H11—2004,公路桥涵养护规范[S].

[ 7 ] GB/T 50283—1999,公路工程结构可靠度设计统一标准[S].

[ 8 ] 陈建英,张建仁. 神经网络与响应面法相结合分析既有混凝土桥梁的可靠性[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版,2004,1(3/4):13-17,22.

CHEN Jian-ying,Zhang Jian-ren. The reliability assessment of existing bridge based on neural network and response surface method[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science Edition,2004,1(3/4):13-17,22.

[ 9 ] 贡金鑫,魏巍巍,赵国藩. 工程结构可靠性设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,2007.

.....

(上接第 52 页)

[ 3 ] 崔洪军,陆 建,王 炜. 基于多目标灰关联投影法的道路建设项目排序模型[J]. 交通运输工程与信息学报,2004,2(3):83-87.

CUI Hong-jun,LU Jian,WANG Wei. Priority decision model of road construction project based on grey relation projection multi-criteria decision method[J]. Journal of Transportation Engineering and Information,2004,2(3):83-87.

[ 4 ] 梁 颖,陈艳艳,任福田. 基于单元重要度分析的公路网规划项目建设序列论证[J]. 北京工业大学学报,2005,31(3):284-287.

LIANG Ying,CHEN Yan-yan,REN Fu-tian. Project order decision of road planning based on the component importance analysis[J]. Journal of Beijing University of Technology,2005,31(3):284-287.

[ 5 ] 曹守华,袁振洲,沙 滨,等. 基于动态理论的公路建设项目序列安排[J]. 交通与计算机,2005,23(4):39-43.

CAO Shou-hua,YUAN Zhen-zhou,SHA Bin,et al. Highway constructive project sequencing based on dynamic theory[J]. Computer and Communications,2005,23(4):39-43.

[ 6 ] 王秉纲,周 伟. 公路建设项目的模糊排序和投资决策优化[J]. 中国管理科学,1997,5(2):28-31.

WANG Bing-gang,ZHOU Wei. Optimizing the fuzzy sequencing and investment decision on projects of highway construction[J]. Chinese Journal of Management Science,1997,5(2):28-31.

[ 7 ] 田 硕. 多目标决策下的公路建设项目优化排序研究[D]. 西安:长安大学,2007.

[ 8 ] 彭 力. 公路网规划评价指标体系与实施决策方法研究[D]. 南京:东南大学,2005.

[ 9 ] 李翠玲. 公路建设项目实施序列优化研究[D]. 长春:吉林大学,2006.

[10] 朱 辉. 区域干线公路网规划布局方案评价方法研究[D]. 长春:吉林大学,2006.

[11] 杜 栋,庞庆华. 现代综合评价方法与案例精选[D]. 北京:清华大学出版社,2006.

[12] 邱莞华. 管理决策与应用熵学[M]. 北京:机械工业出版社,2002.