

文章编号:1671-1637(2012)03-0028-09

# 大角度 V 撑蝶形拱式连续梁桥施工风险分析

王立峰,肖子旺,张振伟,贾艳敏,孙 勇

(东北林业大学 土木工程学院,黑龙江 哈尔滨 150040)

**摘 要:**基于 HGMFN 综合评价方法,分析了桥梁工程施工过程风险问题,提出了定量研究 V 撑施工风险因素的实用方法。根据层次分析法并结合灰色理论,确定了施工过程最大的风险因素,进行了施工方案比选。运用 ANSYS 有限元软件,对 V 撑应力状态进行了数值模拟。根据蒙特卡洛原理,采用径向基函数人工神经网络进行风险概率分析。研究结果表明:当结构应力状态仿真次数超过 200 万次时,V 撑顶部与主梁相接处失效风险比斜腿根部大 8.5%,为施工过程中主要的结构失效风险发生部位;HGMFN 综合评价法可以实现对风险因素的定量分析,具有较高的风险分析计算精度和效率。

**关键词:**桥梁工程;蝶形拱式连续梁桥;人工神经网络;风险分析;层次分析法;灰色理论;蒙特卡罗原理

中图分类号:U448.215

文献标志码:A

## Construction risk analysis of butterfly arch continuous girder bridge with large angle V-shaped pier

WANG Li-feng, XIAO Zi-wang, ZHANG Zhen-wei, JIA Yan-min, SUN Yong

(School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin 150040, Heilongjiang, China)

**Abstract:** The risk analysis problem of bridge construction was studied based on HGMFN comprehensive evaluation method, and a practical approach was proposed for V-shaped pier in construction process. The highest risk factor in V-shaped pier construction was confirmed by using AHP and grey theory, and construction plan comparison was carried out. Numerical simulation of stress state for V-shaped pier was done by using ANSYS software. Risk factor analysis was carried out on the basis of Monte Carlo theory and radial basis function artificial neural network technology. Analysis result indicates that when the simulation of structural stress state is more than two million times, the connection between V-shaped pier top and main beam has 8.5% higher failure risk than root of slant leg, which is the main structure failure risk location. HGMFN comprehensive evaluation method can analyze risk factors quantitatively, and has higher risk analysis accuracy and efficiency. 11 tabs, 7 figs, 21 refs.

**Key words:** bridge engineering; butterfly arch continuous girder bridge; artificial neural network; risk analysis; analytic hierarchy process; grey theory; Monte Carlo theory

**Author resumes:** WANG Li-feng(1971-), male, associate professor, doctoral student, +86-451-82191545, computerwlf@126.com; JIA Yan-min (1962-), female, professor, PhD, +86-451-82191377, yanminjia2008@126.com.

收稿日期:2011-12-28

基金项目:黑龙江省科技计划项目(GZ06A601)

作者简介:王立峰(1971-),男,黑龙江哈尔滨人,东北林业大学副教授,工学博士研究生,从事大跨度桥梁的健康监测与诊断研究。

导师简介:贾艳敏(1962-),女,内蒙古牙克石人,东北林业大学教授,工学博士。

## 0 引言

随着中国经济快速发展,社会对交通领域工程建设的要求也越来越高。人们对桥梁结构实现跨越的基本功能的同时,对线形简洁、外形美观、行车平顺、舒适等方面提出了更加严格的要求。为了兼具实用性与美观性的双重特点,近年来大跨度桥梁和新型组合形式层出不穷,这就造成桥梁施工过程中的不确定性因素<sup>[1]</sup>显著增多,且新颖结构的施工往往缺乏详尽的同类工程经验做参考。2011年5月5日,交通运输部发布的《关于开展公路桥梁和隧道工程施工安全风险评估试行工作的通知(交质监发[2011]217号)》中强调采用新材料、新结构、新工艺、新技术的特大桥、大桥工程以及施工环境复杂、施工工艺复杂等桥梁结构需要进行施工安全风险评估。国内学者对V撑连续梁桥的设计及施工技术分别进行了研究分析,如龚俊虎等以中山小欖水道特大桥工程为依托,对大跨V构拱桥的静动力特性、稳定性及V撑于不同施工阶段的应力状态进行了研究<sup>[2-3]</sup>;王战国等对V形墩结构构件局部的应力、疲劳以及稳定等方面进行了分析<sup>[4-5]</sup>;曹峰对V撑进行局部分析时,发现有限元空间分析与按初等理论分析的结果之间存在一定差异<sup>[6]</sup>。

风险的概念最早出现在西方经济领域中,随后在水坝结构<sup>[7]</sup>、海洋工程、环境工程等诸多领域中迅速发展,相比之下风险理论和方法在桥梁工程的应用还处于起步阶段,同济大学阮欣以建立桥梁风险评估研究的理论和实用方法体系为目标,在基本理论体系、关键基础问题、基本评估方法等方面开展了研究。

以上学者针对V撑进行了结构性能及计算方法等方面的研究,然而V撑结构在施工阶段的风险因素的识别与分析并未引起充分的重视。大夹角V撑连续梁桥的施工是一项综合性很强的系统性工程,由于结构的新颖性,在此期间存在多方面的风险因素,但对V撑施工阶段风险分析的研究成果较

少。将HGMFN(AHP-Gray Theory-Monte Carlo-FEM-ANN)风险问题综合评价方法与大角度V撑蝶形拱式连续梁桥施工过程紧密结合,对V撑施工期间的风险问题展开分析,提出可以对V撑结构进行施工过程定量风险分析的实用方法。

## 1 工程概况

大黑河岛蝶形拱式连续梁桥包括左、右两幅拼宽桥,左幅主桥跨径为(53.02+53.02+48.02)m,右幅主桥跨径为(50.21+53.02+53.02)m,主桥的一个中墩立面为V字形布置,与拱肋曲线契合。主桥与引桥的其他桥墩横向均呈V字形布置,宽度(顺桥向)均为1.60m,外侧面(横向)为曲线造型,内侧为直线,全桥立面见图1。

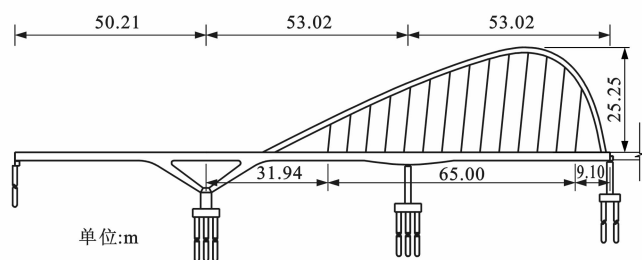
此桥V撑结构主要特点为:V撑斜腿呈115.60°夹角,目前在同类工程中较为少见;双向V撑,即桥梁纵横向的投影都为V形结构,横桥向V撑斜腿呈27.60°夹角;主梁上方有一个外倾8°的蝶形拱,在其自重作用下,V撑内力分布复杂程度较高。以上导致此桥V撑结构在施工期间涉及到较大风险,由于缺乏同种结构形式的V撑施工经验,为降低施工风险,需要对其进行风险分析。

V撑为钢筋混凝土构件,采用C40混凝土和HRB335钢筋,因两幅桥结构形式完全一致,故本文以右幅桥V撑为研究对象。V撑与主梁形成的倒三角区域高为7.7m,主梁梁高为2m,斜腿长为14m。在纵桥向,斜腿根部宽为1.2m,斜腿顶部倒角过渡区下边缘最宽为2m;在横桥向,斜腿根部宽为3.37m(纵桥向),斜腿顶部与主梁梁底同宽,为7.7m,主要尺寸见图2,配筋见图3。

## 2 V撑施工过程模拟分析

### 2.1 有限元分析模型

本文利用大型有限元分析软件ANSYS建立V



(a) 右幅桥布置



(b) 效果

图1 蝶形拱式连续梁桥

Fig. 1 Butterfly arch continuous girder bridge

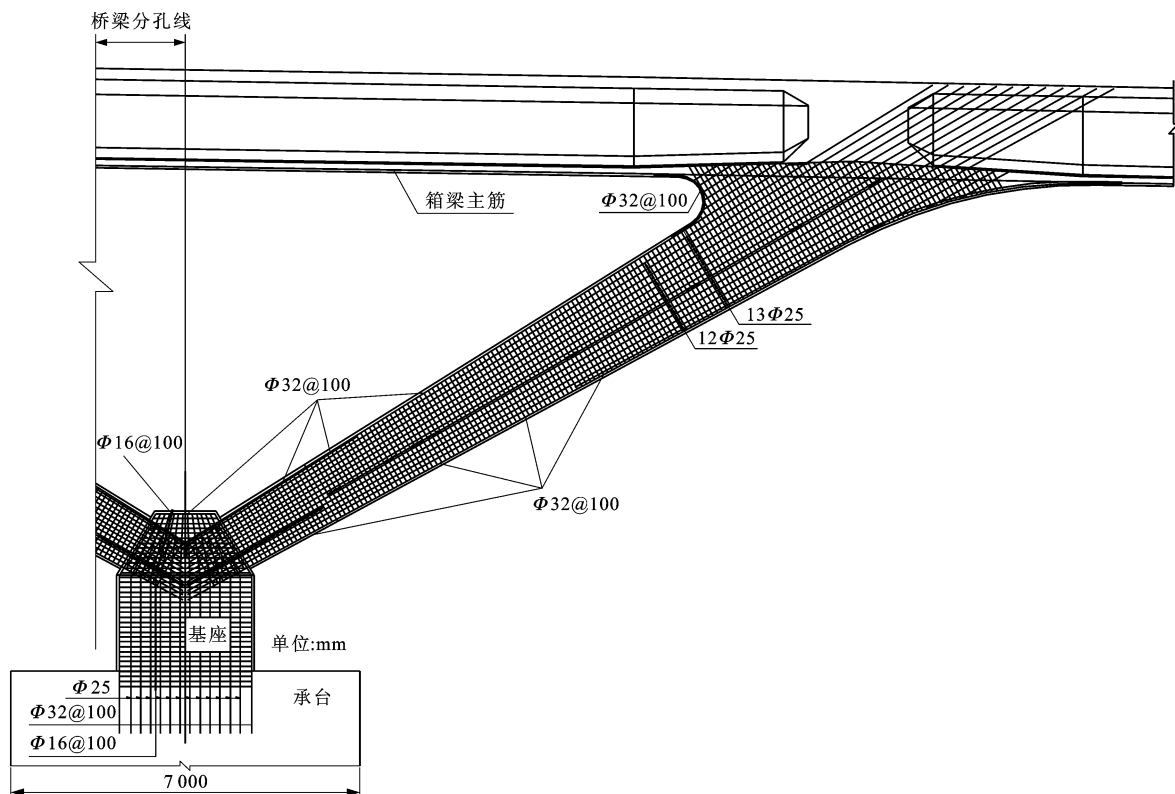


图2 V撑主要尺寸

Fig. 2 Main sizes of V-shaped pier

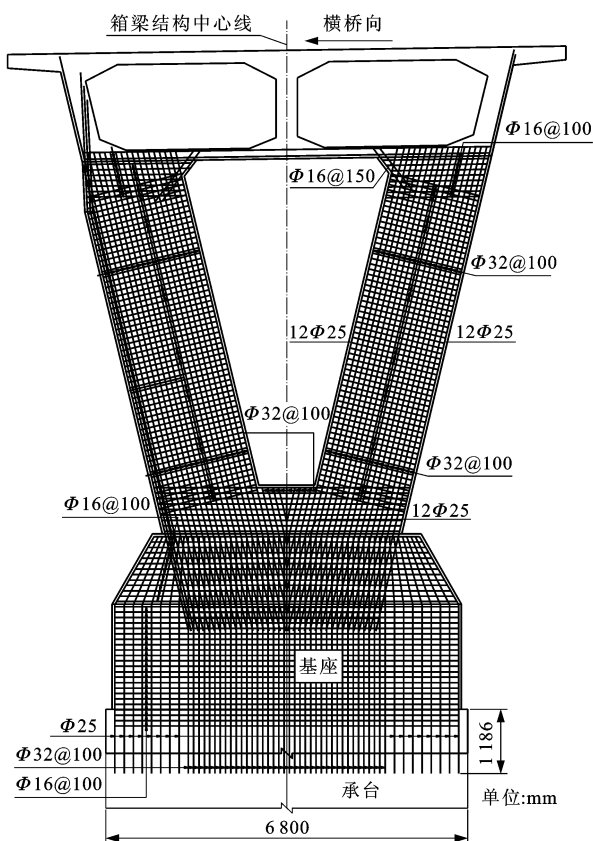


图3 V撑配筋

Fig. 3 Steel bar distribution of V-shaped pier

撑局部三维分析模型,根据圣维南原理,取V撑两侧1.5倍梁高与梁宽比作为主梁传力段。设V撑基座底部中心处为整体坐标系原点,基础承台顶面所处平面为XZ平面。设纵桥向为X方向,横桥向为Z方向,竖直向上为Y方向。模型共有72 958个单元,其中混凝土用Solid65单元模拟,主梁内的预应力钢筋均采用Link8模拟,V撑内普通钢筋通过定义单元参数,将其弥散在实体单元中,见图4。

## 2.2 计算工况

根据施工阶段划分,考虑整体落架时V撑受自重、预应力以及其他部位梁体对其作用,将四处受力最不利位置处的应力值作为强度检验值。

有限元局部分析模型由Solid65、Solid93和Link8单元组成,局部计算模型端部的结构内力利用同济大学桥梁博士软件进行整桥分析得出,并将此内力以附加反力的形式,通过刚域施加到V撑局部模型上。反力数值与作用方向见图5。

## 2.3 计算参数

根据工程实际和计算精度的需要,在分析模型中采用的材料参数见表1。

## 2.4 计算结果

根据以上计算参数,得到V撑落架阶段各计算截面的最大应力数值,见表2。

表 1 材料参数  
Tab. 1 Material parameters

构件名称		混凝土强度等级	弹性模量/GPa	等效弹性模量/GPa	泊松比	重度/(kN·m <sup>-3</sup> )	等效重度/(kN·m <sup>-3</sup> )
混凝土	主梁	C50	34.5	35.8	0.20	26.00	27.03
	V 撑	C40	32.5	35.7	0.20	26.00	27.23
	承台	C25	28.0	28.7	0.20	26.00	26.20
预应力钢束		—	195.0	—	0.30	78.50	—
钢板		—	181.0	—	0.30	78.50	—
拉索		—	181.0	—	0.30	78.50	—

表 2 各截面最大应力值  
Tab. 2 Maximum stress of each section

截面	A-A	B-B	C-C	D-D
应力值/MPa	-1.41	1.38	0.30	1.74



图 4 V 撑局部有限元分析模型  
Fig. 4 Local FE analysis model of V-shaped pier

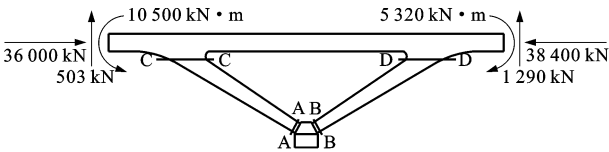


图 5 V 撑结构加载与计算截面  
Fig. 5 Loading and calculation sections of V-shaped pier structure

通过有限元结构分析,可得到结构在以某种工况与特定材料参数为前提条件的结构响应。但对于施工过程风险研究而言,需要考虑材料参数的变异性,同时样本数量要达到统计规律的要求。此时若作大规模有限元结构分析,将付出巨大的计算代价,且没有可操作性。

3 风险分析基本流程

3.1 利用层次分析法确定风险因素指标权重

经过对 V 撑施工基本资料的调查研究,将复杂问题层次化<sup>[8]</sup>,并征求专家意见之后,确定结构抵抗风险能力为最终分析目标。排除风致风险、船撞等在该工程项目中可忽略的风险因素,将自然因素、工人素质、结构特殊性、设备安全、资金到位情况、施工

工艺确定为基本风险因素,上述没有提到的风险事态归为其他风险因素,构成的层次模型结构见图 6。

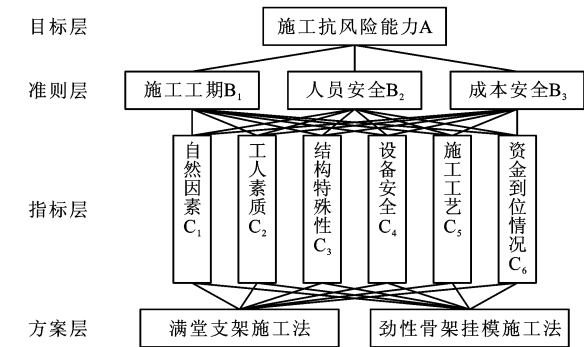


图 6 施工风险分析层次模型  
Fig. 6 Hierarchical model of construction risk analysis

通过专家调查问卷的形式,完成判断矩阵的输入。问卷调查了施工、科研和设计单位的 20 位专家,要求其按照表 3 中的标准填写风险评估矩阵,用矩阵元素  $a_{ij}$  的值将这种相互关系量化表达。对于一个判断矩阵,其最大特征值对应的特征向量经归一化处理后即为该层次风险权重<sup>[9-10]</sup>。为消除人们对风险因素判断尺度不一致的影响,需要按下式进行一致性检验,即

$$C_1 = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$
$$C_R = C_1 / R_1$$

式中: $C_1$  为一致性指标; $C_R$  为一致性比率; $R_1$  为平均随机一致性系数<sup>[6]</sup>; $n$  为该层次所含的因素个数; $\lambda_{\max}$  为最大特征根。 $C_R < 0.1$ , 则一致性检验通过,否则应对判断矩阵进行适当修正。

表 3 风险因素比较标度  
Tab. 3 Comparison standards of risk indicators

比较标度	含义
1	2 个因素重要性相同
3	2 个因素中前者比后者略微重要
5	2 个因素中前者比后者明显重要
7	2 个因素中前者比后者强烈重要
9	2 个因素中前者比后者极端重要
2、4、6、8	上述两判断的中间值

根据回收的调查问卷,经过数据整理,通过一致性检验,得到的评估矩阵与各风险因素对其上一层次目标的权重值见表 4~7。

表 4 平均随机一致性系数

Tab. 4 Mean random consistency coefficients

$n$	1	2	3	4	5	6	7
$R_1$	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32

表 5 评估矩阵对总目标的相对权重

Tab. 5 Relative weights of assessment matrix to final target

指标	$B_1$	$B_2$	$B_3$
权重 $Q_A$	0.285 7	0.142 8	0.571 5

表 6 评估矩阵对各子目标的相对权重

Tab. 6 Relative weights of assessment matrix to each subgoal

指标	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$
权重 $Q_{B_1}$	0.075 5	0.268 4	0.302 2	0.059 0	0.156 6	0.138 3
权重 $Q_{B_2}$	0.056 6	0.158 3	0.185 2	0.079 0	0.171 5	0.349 5
权重 $Q_{B_3}$	0.075 5	0.053 3	0.246 4	0.199 0	0.159 0	0.266 7

表 7 风险指标权重排序

Tab. 7 Rank ordering of risk index weights

风险 指标	结构 特殊性	资金到位 情况	施工 工艺	设备 安全	工人 素质	自然 因素
权重	0.253 6	0.241 8	0.160 0	0.141 9	0.129 7	0.072 8

### 3.2 灰色关联综合评价

灰色系统理论最早由邓聚龙教授提出,适用于对部分信息未知的小样本、贫信息、不确定性系统的研究。灰色关联分析法是分析指标序列关联关系的一种系统分析方法,通过分析各指标曲线的几何形状来判断其相似程度的紧密性。

邀请专家根据各风险因素对 2 种备选施工方案的重要性,对其按照从“没有影响”到“极为重要”的 10 分制进行打分,见表 8。

表 8 施工风险指标对不同施工方案影响程度评分

Tab. 8 Ratings of construction risk indicator impact on different working schemes

风险指标	满堂支架施工法 $D_1(i)$			劲性骨架挂模施工法 $D_2(i)$		
	成本 安全	施工 工期	人员 安全	成本 安全	施工 工期	人员 安全
结构特殊性	7.8	8.1	8.5	7.7	7.9	8.3
资金到位情况	8.1	8.3	8.7	8.1	8.2	8.6
施工工艺	8.3	8.6	8.8	8.1	9.1	8.4
设备安全	8.6	8.8	8.9	8.6	8.5	9.1
工人素质	8.7	9.1	9.2	8.7	8.7	9.2
自然因素	9.4	9.4	9.7	9.6	9.5	9.6

根据专家评分结果,得到比较向量  $D_1(i)$  和  $D_2(i)$ ,由于按评分标准满分为 10 分,分数越高越接

近最优解,故令参考向量中的元素均为满分 10 分,即

$$D_0(i) = (10, 10, 10, 10, 10, 10)$$

对  $B_i, C_j$  层次指标进行评价,最优指标集与评判对象原始指标组成的矩阵  $D$  称为指标评价矩阵,即

$$D = \begin{bmatrix} j_1^* & j_2^* & \cdots & j_n^* \\ j_1^1 & j_2^1 & \cdots & j_n^1 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ j_1^m & j_2^m & \cdots & j_n^m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $j_k^i (i=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, n)$  为第  $i$  个评判对象中第  $k$  个指标的原始数值;  $j_k^*$  为最优指标元素。由  $j_k^*$  组成的单行向量  $D^* = (j_1^*, j_2^*, \dots, j_n^*)$  为最优指标集。

由式(1)得  $B_i, C_j$  层次各指标的评价指标矩阵分别为

$$D_1 = \begin{bmatrix} 10 & 7.8 & 7.7 \\ 10 & 8.1 & 8.1 \\ 10 & 8.3 & 8.1 \\ 10 & 8.6 & 8.6 \\ 10 & 8.7 & 8.7 \\ 10 & 9.4 & 9.6 \end{bmatrix}^T$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 10 & 8.1 & 7.9 \\ 10 & 8.3 & 8.2 \\ 10 & 8.6 & 9.1 \\ 10 & 8.8 & 8.5 \\ 10 & 9.1 & 8.7 \\ 10 & 9.4 & 9.5 \end{bmatrix}^T$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} 10 & 8.5 & 8.3 \\ 10 & 8.7 & 8.6 \\ 10 & 8.8 & 8.4 \\ 10 & 8.9 & 9.1 \\ 10 & 9.2 & 9.2 \\ 10 & 9.7 & 9.6 \end{bmatrix}^T$$

式中:  $D_1$  为成本安全指标评价矩阵;  $D_2$  为施工工期指标评价矩阵;  $D_3$  为人员安全指标评价矩阵。将  $D_1 \sim D_3$  矩阵进行量纲为 1 处理<sup>[11]</sup>,并按式(2)求解关联系数<sup>[12]</sup>,得关联系数矩阵  $P_1, P_2, P_3$  分别为

$$p_i(k) = \frac{\min_i \min_k |C_k^* - C_k^i| + \rho \max_i \max_k |C_k^* - C_k^i|}{|C_k^* - C_k^i| + \rho \max_i \max_k |C_k^* - C_k^i|} \quad (2)$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.547 1 & 0.512 3 \\ 1.785 5 & 1.863 0 \\ 3.733 4 & 1.863 0 \\ 5.866 7 & 5.123 3 \\ 3.159 0 & 2.927 6 \\ 0.746 7 & 0.602 7 \end{bmatrix}^T$$

$$P_2 = \begin{bmatrix} 0.458 & 1 & 0.404 & 3 \\ 1.148 & 8 & 1.055 & 6 \\ 4.102 & 8 & 1.055 & 6 \\ 5.743 & 9 & 3.166 & 7 \\ 1.248 & 7 & 9.500 & 0 \\ 0.700 & 5 & 0.558 & 8 \end{bmatrix}^T$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 0.522 & 4 & 0.463 & 5 \\ 1.640 & 5 & 1.622 & 2 \\ 2.624 & 8 & 0.927 & 0 \\ 6.562 & 0 & 1.854 & 0 \\ 1.874 & 9 & 1.297 & 8 \\ 0.596 & 5 & 0.589 & 9 \end{bmatrix}^T$$

式中: $\rho \in (0, 1)$ 为分辨率,一般取为0.5; $C_k^*$ 为最优指标评价矩阵; $C_k^i$ 为经过量纲为1处理后的指标评价矩阵; $p_i(k)$ 为表征矩阵之间关联程度的关联系数。

将由层次分析法得出的风险指标权重向量与评价向量相乘,得到 $B_i$ 、 $C_j$ 层次指标评价结果为

$$R_1 = (2.533 \ 3, 1.942 \ 6)$$

$$R_2 = (2.592 \ 9, 1.945 \ 8)$$

$$R_3 = (1.823 \ 8, 1.029 \ 9)$$

$$D = \begin{bmatrix} 2.533 \ 3 & 1.942 \ 6 \\ 2.592 \ 9 & 1.945 \ 8 \\ 1.823 \ 8 & 1.029 \ 9 \end{bmatrix}$$

式中: $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 分别为成本安全、施工工期、人员安全关联向量。由上式得总的评价结果向量为(2.136 3, 1.421 4)。

从灰色关联评价的结果可知,满堂支架施工法作为第1方案,无论从施工工期、人员安全、成本安全等3个子目标,还是总体目标而言,均较第2方案有明显优势,由此建议采用满堂支架施工法进行施工。

### 3.3 蒙特卡洛原理

蒙特卡洛原理<sup>[13]</sup>是根据随机分布概率的方法模拟工程的实际问题,当样本数量达到一定量值时,就能得到所求问题的统计规律,进而获得与之相应的数值解。基本求解过程需要先建立求解的判别方程,生成相应参数样本的随机向量,再将随机向量带入功能函数,判别系统的状态。

### 3.4 RBF神经网络

RBF神经网络由输入层、隐含层、输出层组成三层前向网络<sup>[14-18]</sup>,网络结构见图7。隐含层采用径向基函数作为激励函数,其具有训练速度快,识别能力高,具有高度非线性映射能力和大规模并行分布处理能力的特点。

图7中, $P$ 为输入向量; $R$ 为 $P$ 中元素数量; $n^1$ 为隐含层神经元输入向量; $n^2$ 为输出层神经元输入向量; $s^1$ 为隐含层中的神经元数量; $s^2$ 为输出层中的神经元数量; $a^1$ 为隐含层输出向量; $a^2$ 为输出层输入向量; $b^1$ 为隐含层阈值矩阵; $b^2$ 为输出层阈值矩阵; $\|d\|$ 为权值向量和阈值向量的间距; $W^1$ 为隐含层的权值矩阵; $W^2$ 为输出层的权值矩阵。若 $N$ 为传递函数向量个数,则径向基网络传递函数为

$$r(N) = e^{-N^2} \quad (3)$$

输出层输入向量是线性函数,即

$$a^2 = \sum_{i=1}^N r(i') W^2$$

## 4 结构失效风险概率分析

利用HGMFN(AHP-Gray Theory-Monte Carlo-FEM-ANN)综合评价方法对大角度V撑蝶形拱式连续梁桥施工过程进行风险分析的基本流程是先通过层次分析法,确定风险控制最优的施工方案,再通过

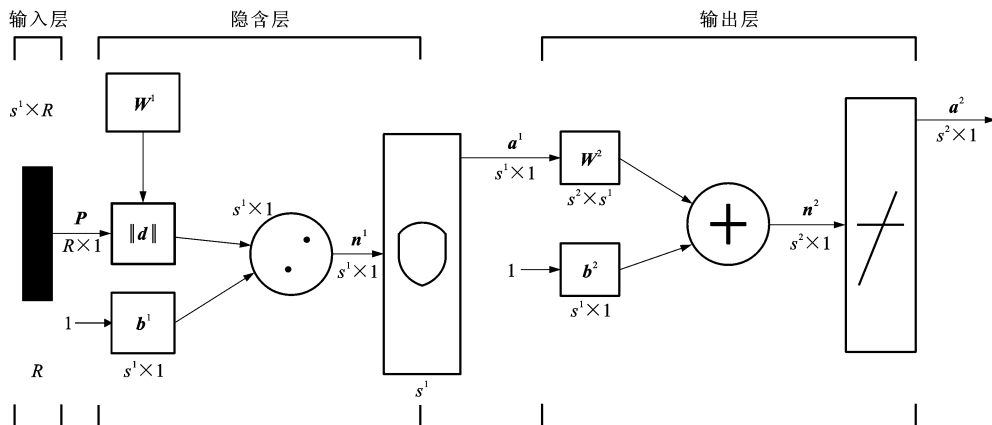


图7 RBF网络结构

Fig. 7 RBF network structure

过灰色关联法确定该施工方案的风险因素的影响因子,为施工方案提供决策参考。在确定施工方案后,根据蒙特卡洛原理,以人工神经网络代替有限元程序进行有统计意义的数据分析,最终得到结构施工过程中最大风险因素对结构的量化影响效果。

#### 4.1 神经网络训练样本的获取

对 V 撑的斜腿和主梁的结合部位,由于受力的集中性与复杂性<sup>[19-20]</sup>,结构风险可确定为强度失效。本文依据可靠度理论,将极限状态定义为 V 撑的斜腿和主梁的结合部的应力值接近材料应力的极限值,再依据施工现场的真实情况,将材料的弹性模量与重度以及 0# 梁段的预加力确定为分析中的基本变化量<sup>[1,21]</sup>,其概率分布均是正态分布,参数见表 9。同时结合蒙特卡洛原理,生成参

数变量对应的随机数,再应用有限元分析软件计算并提取相应数值。

表 9 参数变量随机分布

Tab. 9 Random distribution of parameter variables

参数变量	均值	变异系数值
钢筋混凝土重度/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	26.00	0.06
材料弹性模量/GPa	32.5	0.10
直线束预加力值/kN	1 745.00	0.05
曲线束预加力值/kN	2 372.00	0.05

#### 4.2 建立并检验 RBF 神经网络

随机生成 20 组样本数据,通过有限元程序计算出控制截面最大应力,将数据归一化,结果见表 10。前 16 组数据为计算的训练样本,后 4 组数据为计算的检验样本。

表 10 神经网络样本训练数据

Tab. 10 Training data of neural network samples

序号	弹性模量/ MPa	材料重度/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	曲线筋预应力/ kN	直线筋预应力/ kN	计算截面最大应力/MPa			
					A-A	B-B	C-C	D-D
1	32 500	26.0	2 372.0	1 745.0	-1.41	1.38	0.30	1.74
2	34 231	26.3	2 375.0	1 781.4	-1.52	1.30	0.33	1.80
3	32 637	26.1	2 376.2	1 698.3	-1.45	1.16	0.31	1.82
4	32 014	25.1	2 536.5	1 732.5	-1.39	1.13	0.41	1.86
5	36 250	24.2	2 262.5	1 936.1	-1.26	1.83	0.60	2.13
6	37 166	23.1	2 472.3	1 962.4	-1.16	2.16	0.64	2.81
7	36 286	25.2	2 601.0	1 596.0	-1.17	1.94	0.06	2.03
8	26 959	26.9	2 147.8	1 759.7	-1.49	0.77	0.46	2.13
9	38 317	25.4	2 271.3	1 724.6	-1.26	1.58	0.25	1.74
10	30 268	24.9	2 492.6	1 925.2	-1.53	1.17	0.28	1.25
11	35 392	25.2	2 649.3	1 473.6	-1.24	1.63	0.40	2.06
12	29 415	24.9	2 383.1	1 896.2	-1.25	1.47	0.53	2.25
13	33 139	27.6	2 185.0	1 704.6	-1.60	0.91	0.42	1.85
14	42 462	28.9	2 247.8	1 452.6	-1.27	1.57	0.49	1.84
15	28 274	26.2	2 418.2	1 687.4	-1.26	1.25	0.54	2.33
16	34 015	22.5	2 478.3	1 639.5	-1.37	2.43	1.86	2.64
17	29 742	22.6	2 457.4	1 635.3	-1.85	0.55	0.44	2.36
18	31 641	24.2	2 360.6	1 907.5	-1.86	1.36	0.75	1.60
19	32 526	24.6	2 374.6	1 837.7	-1.26	1.65	0.37	2.97
20	29 453	25.7	2 474.7	1 853.6	-1.54	0.95	0.45	1.70

RBF 网络有优良的自适性,Newrbe 函数建立的精确的神经网络可自行确定隐含层层数,令误差趋于 0,例如在计算 A-A 截面的网络训练时,调节 Spread 参数,由循环试算得 Spread 参数值为 1.0 时网络误差最小。

#### 4.3 利用训练完毕的神经网络进行风险分析

对输入数据进行随机化处理,并重复计算,结构失效概率预测结果见表 11。在三维实体结构分析中,应力分布比一维和二维单元更复杂,通常需要利用材料力学中的强度理论来表示结构中某一点的应

力数值,此应力数值应考虑该点各个方向上应力数值的贡献,对于研究结构的薄弱部位和整体受力状态很有必要。由于钢筋混凝土结构为脆性材料,应采用第一强度理论,即当第一主应力达到材料单向拉伸强度值时,认为其发生断裂破坏。

表 11 结构失效概率预测结果

Tab. 11 Prediction results of structural failure probabilities

计算次数/ $10^6$	截面			
	A-A	B-B	C-C	D-D
0.5	$<10^{-5}$	0.006 1	$<10^{-5}$	0.054 3
1.5	$<10^{-5}$	0.008 6	$<10^{-5}$	0.094 1
2.0	$<10^{-5}$	0.008 9	$<10^{-5}$	0.093 9

#### 4.4 结果分析

当计算次数超过 200 万时,所求问题失效概率相对稳定。由分析结果可知,A-A 截面以受压为主,C-C 截面以受拉为主,且压应力和拉应力均很小,远低于 C40 混凝土抗拉强度,这 2 个截面发生强度失效的概率很低,故在施工过程中可不作为应力控制截面。B-B 截面和 D-D 截面受拉应力较大,通过神经网络预测得到的失效概率值也较高,说明 B-B 截面和 D-D 截面处在施工过程中有较高的强度破坏风险,且 D-D 截面破坏风险高于 B-B 截面。

根据本工程具体情况,提出对同类型工程施工过程风险处理建议措施如下:D-D 截面 V 撑与梁底接触部位,受力复杂,且分布有较大拉应力,为减小应力集中的可能性,降低发生开裂破坏的风险,建议此处设计倒角,并采取较大的曲率半径,以大于 0.5 m 为宜;B-B 截面位于 V 撑根部,与承台接触处,施工过程中容易因产生较大拉应力而对结构不利,建议此处选择较大的设计截面或配筋加密,以达到增加应力安全储备的目的。

## 5 结 语

(1)在夹角较大的 V 撑施工过程中,往往斜腿根部应力较大,通过本文的研究,得出大黑河岛大角度 V 撑蝶形拱式连续梁桥 V 撑顶部与主梁相接处失效风险比根部大,说明新颖结构的力学性能与经验有所不同,结构特殊性往往成为最主要的风险因素,对其进行定量的风险分析有助于保障施工安全。

(2)单一的风险分析方法更注重对整个项目的全局评价,无法确定在施工过程中构件在某个截面的失效风险。本文采用综合方法,将定性问题转化为可以用结构分析表征的定量问题,提高了风险评价与决策的客观性,并通过神经网络使定量计算具

有统计意义,进一步增强了风险分析在实际工程中的可行性。

(3)在桥梁施工过程风险分析中,HGMFN 综合法既可完成方案决策,也可得到具体的风险概率数值,能直观反映结构风险指标,其以定量分析为主,分析步骤简单明确,有较高的实用价值,在桥梁风险分析中有较广泛的应用前景。

(4)综合使用层次分析法与灰色理论,可在准确识别出风险影响因素的同时,避免人为因素的影响,更精准地确定诸多风险因素对桥梁结构的多方面影响。

#### 参 考 文 献 :

#### References :

- [1] 牛 宏. 大跨度连续刚构桥建设期风险分析研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.  
NIU Hong. Risk analysis research for long-span continuous rigid-frame bridge during construction[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)
- [2] 龚俊虎, 王华成, 黄北平. V 形刚构拱组合桥的梁拱组合效应分析[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(6): 61-64, 78.  
GONG Jun-hu, WANG Hua-cheng, HUANG Bei-ping. Analysis of combination effect of beam-arch of V-shaped rigid-frame and arch structure combined bridge[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(6): 61-64, 78. (in Chinese)
- [3] 龚俊虎. 大跨度 V 形墩连续刚构与拱组合桥受力特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.  
GONG Jun-hu. Research on mechanical characteristics of combined bridge of V-shaped pier rigid-frame and arch structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009. (in Chinese)
- [4] 王战, 俞亚南, 偶昌宝. 大跨度预应力 V 形墩连续刚构桥线形施工控制[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2006, 30(3): 504-507.  
WANG Zhan-guo, YU Ya-nan, OU Chang-bao. A lignment control analysis of a prestressed-concrete V-shape pier continuous rigid frame bridge[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2006, 30(3): 504-507. (in Chinese)
- [5] 陈后军. 高速铁路 V 形钢箱连续梁桥设计研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.  
CHEN Hou-jun. Research on designing scheme for V-shaped continuous steel box girder bridge in high-speed railway[D]. Shanghai: Tongji University, 2006. (in Chinese)
- [6] 曹 峰. V 型支撑预应力钢筋混凝土连续刚构桥空间效应分析及试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.  
CAO Feng. V-supported prestressed concrete continuous rigid frame bridge spatial analysis and experimental study[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009. (in Chinese)



- [7] 黄海燕,麻荣永.大坝安全模糊风险分析初探[J].广西大学学报:自然科学版,2003,28(1):14-18.  
HUANG Hai-yan, MA Rong-yong. Preliminary study on fuzzy risk analysis of dam safety[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2003, 28(1): 14-18. (in Chinese)
- [8] WANG Ying-ming, ELHAG T M S. A comparison of neural network, evidential reasoning and multiple regression analysis in modelling bridge risks[J]. Expert Systems with Applications, 2007, 32(2): 336-348.
- [9] WANG Ying-ming, LIU Jun, ELHAG T M S. An integrated AHP-DEA methodology for bridge risk assessment[J]. Computers and Industrial Engineering, 2008, 54(4): 513-525.
- [10] ERTAY T, RUAN D, TUZKAYA U R. Integrating data envelopment analysis and analytic hierarchy for the facility layout design in manufacturing systems[J]. Information Sciences, 2006, 176(3): 237-262.
- [11] 包龙生,刘克同,于玲,等.基于灰色层次分析法的桥梁施工方案多目标风险分析及评价[J].沈阳建筑大学学报:自然科学版,2009,25(4):663-669.  
BAO Long-sheng, LIU Ke-tong, YU Ling, et al. Multi-objective risk analysis and documents assessment of bridge construction based on AHP-GRAY[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2009, 25(4): 663-669. (in Chinese)
- [12] 孙方田,马一太,李敏霞.基于灰色-层次理论的水热器综合评价研究[J].太阳能学报,2008,29(2):204-208.  
SUN Fang-tian, MA Yi-tai, LI Min-xia. Comprehensive evaluation of water heater based on the grey-analytic hierarchy theory[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2008, 29(2): 204-208. (in Chinese)
- [13] 单德山,李乔,张吉刚.蒙特卡罗法在桥梁损伤识别中的应用[J].重庆交通大学学报:自然科学版,2009,28(5):844-847.  
SHAN De-shan, LI Qiao, ZHANG Ji-gang. Application of Monte-Carlo method to bridge damage identification[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2009, 28(5): 844-847. (in Chinese)
- [14] 冯清海,袁万城.BP神经网络和RBF神经网络在墩柱抗震性能评估中的比较研究[J].结构工程师,2007,23(5):41-47,69.  
FENG Qing-hai, YUAN Wan-cheng. Comparative study on BP neural network and RBF neural network in performance evaluation of seismic resistance for pier columns[J]. Structural Engineers, 2007, 23(5): 41-47, 69. (in Chinese)
- [15] 刘兆惠.基于灰色-径向基函数神经网络的交通事故多元预测模型[J].交通运输工程学报,2009,9(5):94-98.  
LIU Zhao-hui. Multifactor prediction model for traffic accident based on grey-radial basis function neural network[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(5): 94-98. (in Chinese)
- [16] 张涛,赵登福,周琳,等.基于RBF神经网络和专家系统的短期负荷预测方法[J].西安交通大学学报,2001,35(4):331-334.  
ZHANG Tao, ZHAO Deng-fu, ZHOU Lin, et al. Short-term load forecasting using radial basis function networks and expert system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(4): 331-334. (in Chinese)
- [17] 王立峰,肖子旺,王子强.基于RBF神经网络的V撑施工过程中风险分析[J].武汉理工大学学报,2011,33(5):137-141.  
WANG Li-feng, XIAO Zi-wang, WANG Zi-qiang. Risk analysis of V-shaped pier in construction process by means of RBF artificial neural network[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2011, 33(5): 137-141. (in Chinese)
- [18] 王峙,范飞.工程机械融资租赁的风险控制[J].筑路机械与施工机械化,2012,29(1):82-84.  
WANG Zhi, FAN Fei. Risk control of financial leasing of construction machinery[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2012, 29(1): 82-84. (in Chinese)
- [19] 黄玲玉.大跨度V形墩连续刚构拱组合桥结合部模型试验研究[D].成都:西南交通大学,2006.  
HUANG Ling-yu. Model testing study on the node of combined bridge of V-shaped pier rigid-frame and arch structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006. (in Chinese)
- [20] 邹纪民.浙江东阳江大桥V形墩施工[J].公路,2002(12):14-15.  
ZOU Ji-min. V-shaped pier construction of Dongyang River Bridge of Zhejiang[J]. Highway, 2002(12): 14-15. (in Chinese)
- [21] 李国亮,刘钊.V形刚构桥施工中倒三角区域支架的拆除时机分析[J].公路交通科技,2005,22(8):95-97,101.  
LI Guo-liang, LIU Zhao. Study on the demolition sequence of scaffolds for the inverted-triangle area of the rigid-frame bridges with V-piers[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22(8): 95-97, 101. (in Chinese)