

# 径向基神经网络用于钢-混 II 型梁原始断面涡振性能的预测

李加武<sup>1</sup>, 党嘉敏<sup>1</sup>, 吴 拓<sup>2</sup>, 高广中<sup>1</sup>

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 陕西省交通规划设计研究院, 陕西 西安 710068)

**摘要:** 钢-混 II 型梁主梁断面在大跨斜拉桥的主梁设计中被广泛采用, 此类断面易出现涡激振动现象, 引起桥梁结构安全问题且降低行车舒适性。首先利用既有风洞试验结果校核涡激振动响应的 CFD 计算模型, 并利用校核后的 CFD 方法得到学习样本数据库。利用学习样本对径向基(RBF)神经网络进行训练, 并优化神经网络的设置参数, 以此建立钢-混 II 型梁裸梁的开口率和宽高比 2 个形状参数与涡激振动响应的关系, 探索 II 型桥梁断面的涡振规律。研究表明, II 型梁涡振响应与 2 个形状参数均呈非线性关系; 2 个形状参数对涡振响应的的影响可进一步指导气动措施的选择及优化。

**关键词:** 斜拉桥; 涡激振动; 风洞试验; 人工神经网络; 数值模拟

**中图分类号:** U448.27; TU311.3 **文献标志码:** **文章编号:** 1004-4523(2021)01-0001-08

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2021.01.001

## 引 言

II 型主梁断面是一种典型的开口钝体断面, 梁体周围来流绕流情况复杂, 易引起涡激振动现象的产生。但 II 型梁可以充分发挥钢与混凝土两种桥梁建设常用材料的力学特性, 提高材料利用率, 减轻桥梁自重, 提高施工速度, 故在大跨桥梁的主梁选型中常常出现。

为了使得 II 型主梁断面方案在大跨桥梁中更具有竞争力, 因此研究并解决 II 型断面的风致振动问题是十分必要的。目前, 针对 II 型主梁断面的研究热点主要集中在对气动措施抑振效果对比及措施优化方面。钱国伟等<sup>[1]</sup>进行了 II 型梁原始断面涡激振动风洞试验, 总结了结构响应与结构振动阻尼的关系, 并对其气动控制措施进行比较和优化。段青松, 马存明<sup>[2]</sup>对 II 型主梁进行节段模型风洞试验, 研究发现主梁的竖弯及扭转涡振振幅均随阻尼比的增大而减小。王嘉兴等<sup>[3]</sup>通过风洞试验对稳定板的抑振效果进行研究, 发现不合理地布置上、下稳定板的位置, 可能会增大涡振振幅, 降低起振风速度。战庆亮等<sup>[4]</sup>通过数值风洞与物理模型试验对 II 型梁气动性能进行了对比试验研究, 总结了各气动措施的抑振效果, 并指出增加风嘴的抑振效果最佳。李春光等<sup>[5]</sup>对 II

型断面进行风洞试验, 研究表明气动减振措施中风嘴的抑振效果最佳, 并认为边主梁与桥面板连接处转角部位的漩涡脱落是诱发涡振的重要原因。李欢等<sup>[6]</sup>以某斜拉桥为背景, 对其施工阶段主梁节段模型进行风洞试验, 研究了隔流板和下稳定板气动减振措施的应用效果。陈应高等<sup>[7]</sup>通过风洞试验对比某山区斜拉桥拟采用的两种 II 型断面, 研究发现宽高比较大的主梁断面气动性能更优。已有的研究成果多以某一确定几何外形的 II 型桥梁断面为研究对象, 通过风洞试验技术进行气动措施的选择及优化。但是, 气动措施的作用机理尚不明朗, 且风洞试验研究方法所需时间及经济成本较高, 影响因素也较多。

人工智能技术可以针对一些没有理论解的非线性问题实现机器自动识别, 并已经在桥梁结构科学研究的诸多方面得以运用并初具成果。人工神经网络的方法被引入工程学科中研究结构涡激振动问题, 如对海洋工程中海洋立管涡振振幅的预测。在桥梁风工程领域, Wu 等<sup>[8]</sup>利用嵌入细胞自动机的人工神经网络实现了桥梁断面的非线性自激力的预测和识别。李林等<sup>[9-10]</sup>通过人工神经网络模型对桥梁断面静三分力系数和颤振导数进行了预测。但是, 针对大跨度桥梁涡激振动的人工智能研究, 目前还没有较为成熟的研究成果。

综合考量以上研究成果和解决工程实际需求, 本文首先基于 3 座 II 型梁原始断面的风洞试

收稿日期: 2019-04-28; 修订日期: 2020-04-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51978077); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(300102210212, 300102210208)

验数据,汇总并分析钢-混Ⅱ型裸梁的涡振特点;然后,基于Fluent软件中自定义函数进行涡振的程序编制,用风洞试验数据校核数值模拟技术,通过数值模拟技术获取充分的学习样本,建立径向基人工神经网络,达到输入Ⅱ型梁原始断面的2个形状参数,输出竖向涡振无量纲振幅、起振折减风速和涡振锁定区长度的人工智能识别效果。

## 1 径向基人工神经网络

径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络具有输出结果简单,计算收敛速度快,且能够逼近任意非线性函数的特点,相对于目前应用最广泛的误差反向传播算法(Error Backpropagation, BP),神经网络更适合对实时性要求高的场合。RBF神经网络是基于生物神经元局部响应原理构建的。

### 1.1 径向基函数

一般的,径向基函数记为

$$\Phi(x, y) = \Phi(\|x - y\|) \quad (1)$$

式中  $\|x\|$  为欧几里得范数。径向基函数具有一定使用条件:若  $\|x_1\| = \|x_2\|$ , 则  $\Phi(x_1) = \Phi(x_2)$ 。因此,径向基函数值只与自变量的范数有关。

可以证明,在一定条件下,径向基函数  $\Phi(\|x - c\|)$  可以逼近几乎任意函数( $c$ 为常数),从而将针对多元函数的复杂求解转化为对一元函数的求解问题。有学者对散乱数据做插值试验,证明了径向基函数插值结果最优。

### 1.2 径向基函数结构

径向基函数神经网络的理论基础是基于正则化问题的。第一层网络是输入层,输入节点的个数等于输入向量  $x$  的维数  $m$ 。第二层是隐含层,由于正则化,隐含节点与训练数据一一对应,因此隐含节点数量等于学习样本数量。第  $i$  个隐含节点的输出为  $\Phi(\|X - X_i\|)$ ,  $X_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im}]$  为基函数的中心。第三层是输出层,在径向基网络中输出单元为“线性”。这里的“线性”是指网络最终的输出是各隐含节点输出的线性加权之和。正则化网络有两个特点:(1)正则化网络可以逼近任何多元连续函数。(2)给定一个未知的非线性函数  $f$ , 则总可以得到一组系数对  $f$  的逼近是最优的。

广义径向基函数网络与严格径向基神经网络的不同之处是广义径向基神经网络中隐含层有  $I$  个节点,其中  $I < K$ ,  $K$  为学习样本个数。实质上,广义网络得到的结果是低维上的次优解,但是节省了大量的计算成本。

涡激振动问题是一种复杂的非线性问题,因此

可以依靠人工神经网络在处理非线性拟合方面具有的优势,进行钢-混Ⅱ型主梁断面的涡激振动性能识别。

## 2 Ⅱ型梁涡振试验与数值模拟

### 2.1 风洞试验与研究

本文首先针对3座斜拉桥的钢-混Ⅱ型主梁进行涡激振动风洞试验研究,其主跨分别是为565, 356, 350 m。对于钢-混Ⅱ型裸梁,选取宽高比和开口率2个无量纲参数对其气动外形进行基本描述。宽高比定义为Ⅱ型裸梁梁宽与梁高的比值( $\phi = B/D$ ),开口率  $\Omega$  定义为Ⅱ型梁两边主梁钢腹板中心间距与梁全宽比值( $\Omega = b/B$ ),钢-混Ⅱ型裸梁典型断面如图1所示。

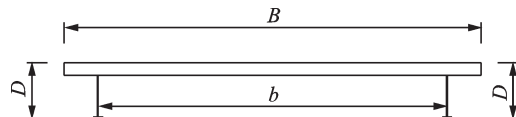


图1 Ⅱ型裸梁标准横断面

Fig. 1 Cross-section of prototype deck model

3座桥梁节段模型设计均依据相关相似准则,表1给出了3座桥例的节段模型相关参数。图2给出了置于风洞中的节段模型。3座桥例节段模型长度一致,均为1.50 m,且缩尺比相近,可以排除由于模型尺寸效应带来的影响,更好地针对斜拉桥钢-混Ⅱ型裸梁涡振性能进行对比性研究。需要说明,涡激振动对主梁断面细节十分敏感<sup>[11]</sup>,考虑桥面系附属结构的数值模拟结果与风洞试验结果存在较大的误差,因此本文仅针对钢-混Ⅱ型梁裸梁断面的涡激振动性能进行研究。

表1 裸梁节段模型相关设计参数

Tab. 1 Design parameters of sectional models with original cross-section

	开口率	宽高比	等效质量/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	等效质量 惯距/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ )
桥例1 (缩尺比1/50)	96.5%	7.84	18.96	0.82
桥例2 (缩尺比1/55)	95.7%	9.96	36.87	0.72
桥例3 (缩尺比1/50)	97.0%	10.50	18.05	1.32

由表2的风洞试验结果可知,3座斜拉桥桥例的裸梁断面均发生了涡激振动现象,并且集中在 $+3^\circ$



图 2 风洞试验示意图

Fig. 2 Diagram of model in wind tunnel test

表 2 节段模型试验结果

Tab. 2 Results of wind tunnel tests

风攻角/(°)	桥例 1		桥例 2		桥例 3	
	竖弯	扭转/(°)	竖弯	扭转/(°)	竖弯	扭转/(°)
-5	/	/	/	/	/	/
-3	/	/	/	/	/	/
0	/	/	/	/	/	/
+3	/	/	0.0598	/	0.0081	0.234
+5	0.0283	/	0.0639	0.101	0.0162	0.508

注:竖弯幅值均为实桥响应无量纲振幅

和+5°风攻角下,其中竖弯涡振现象明显。本文以桥例 3 为研究目标,研究在+5°风攻角下不同开口率和宽高比 2 个形状参数对钢-混 II 型梁竖弯涡激振动性能的影响。

## 2.2 CFD 数值模拟技术校核

### 2.2.1 II 型梁竖向涡振数值模拟

基于 Newmark- $\beta$  数值求解思想,运用 Fluent 流体力学计算软件中的自定义函数 (User-defined Function, UDF) 宏,编制 II 型梁竖弯涡振模拟程序。程序的功能是提取 Fluent 软件计算得到每一时刻的升力系数,通过 Newmark- $\beta$  法迭代,得到下一时刻速度、位移响应。本文选用经典的升力振子模型

$$F_y(t) = \frac{1}{2} \rho U_\infty D C_L(t) \quad (2)$$

式中  $F_y(t)$  为模型受到的升力;  $\rho$  为空气密度;  $U_\infty$  为流场中来流风速,与风洞试验风速一致;  $D$  为断面特征尺寸,取 II 型梁梁高;  $C_L(t)$  为升力系数。对于单自由度的荷载非线性振动方程采用 Newmark- $\beta$  数值解法。其计算原理是逐步积分的线性加速度法。关于 Newmark- $\beta$  法中的 2 个参数,取  $\beta = 0.50$ ,  $\gamma = 0.25$ 。

本文数值模拟均选用 SST  $k-\omega$  模型进行 II 型梁竖弯涡振模拟。并在 SST  $k-\omega$  模型中使用非平衡壁面函数对压力梯度和分离流流动计算进行改进。

UDF 宏的计算思路如图 3 所示,通过上一时刻

或者初始时刻的速度响应和竖向位移响应,利用 Newmark- $\beta$  数值解法求出经过时刻的位移响应、速度响应以及涡激力。将位移以及速度响应通过 UDF 宏赋予流场中的刚体模型,得到经过  $t$  时刻的涡激力。重复此过程,直至位移、速度以及涡激力稳定后,进入下一时间步长进行计算。通过编制的用户自定义函数,可以模拟钢-混 II 型梁在数值风场中的竖向涡激振动。

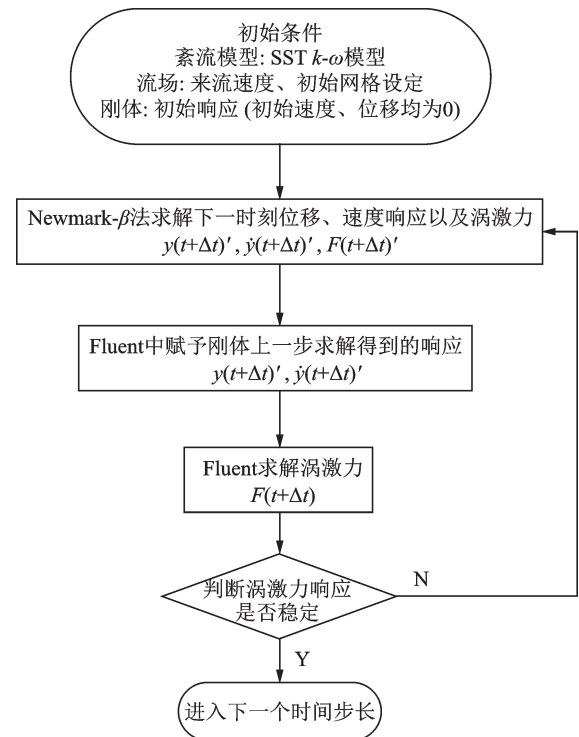


图 3 涡激振动的 Fluent-UDF 二次开发

Fig. 3 The flow chart of the Fluent-UDF secondary development program of VIV

### 2.2.2 数值模拟结果校核

选取桥例 3 的动力特性参数,进行+5°风攻角下的竖弯涡激振动数值模拟。上游入口边界为速度入口边界 (Velocity-inlet); 湍流强度  $I_u = 0.5\%$ ; 湍流黏性比为 10%; 下游出口边界采用 Pressure-outflow; 上下采用对称边界条件 (Symmetry)。CFD 计算域长  $26B$ , 宽  $10B$ 。数值模拟计算域设置如图 4 所示,将其划分为刚性运动区域、动网格区域以及静止网格区域,其中刚性运动区域及静止网格区域采用

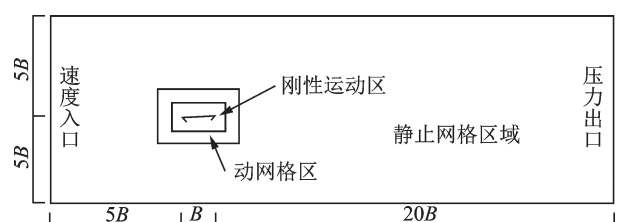


图 4 计算域示意

Fig. 4 Diagram of computational field



结构性四边形网格,动网格区域采用三角形网格。

对近壁面的流动、分离、转捩的准确模拟,初步设定  $y^+ = 1$ 。

对于  $y^+$  的定义<sup>[12]</sup>,由第一层网格高度  $y$ ,流体密度  $\rho$ ,动力黏度  $\mu$ ,壁面剪切应力  $\tau_w$  为估算速度  $U_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$

$$y^+ = \frac{y \rho U_\tau}{\mu} \quad (3)$$

根据式(3)求近壁面第一层网格高度

$$y = \frac{y^+ \mu}{U_\tau \rho} \quad (4)$$

雷诺数为 50000 附近时,第一层网格高度为  $y = 0.002B$ ,  $B$  为节段模型梁宽。图 5 所示为  $y^+$  值的分布情况,可知多数工况下  $y^+$  值在 1.0 以下,部分壁面位置  $y^+$  值接近 1.5,满足黏性子层内求解 ( $y^+ < 5$ )。

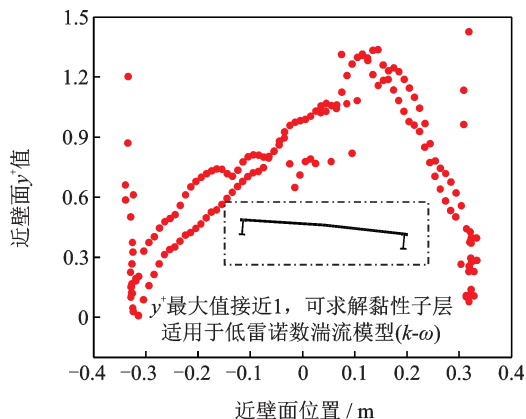


图 5 近壁面  $y^+$  值分布图

Fig. 5 Distribution of the  $y^+$

针对桥例 3 裸梁断面,进行  $+5^\circ$  风攻角下的竖向涡激振动数值模拟。折减风速范围为 2~40,图 6 蓝色散点为涡振的时程序列,折减风速为 30,位移时程开始成发散状态,后趋向于等幅振动,最大振幅接近 0.23;红色散点为未出现涡振的时程序列,此时折减风速为 12,振幅接近 0。数值模拟与风洞试验的结果对比如图 7 所示,表明桥例 3 竖向涡振数值模拟结果与风洞试验结果接近,且数值模拟的竖弯涡振幅值略微偏大。因此,竖弯模拟程序可靠。

### 2.2.3 不同形状参数下 II 型裸梁涡振性能研究

经统计,钢-混 II 型裸梁宽高比多集中在 10 左右,因此宽高比范围取 5~16。为保证结果的实用性,计算时在宽高比为 10 附近局部加密样本数量。

将进行数值模拟研究的不同宽高比和开口率的钢-混 II 型裸梁断面形状参数汇总至表 3,共 45 组。由于篇幅限制,仅具体显示开口率为 78%,宽高比为 6~18 范围内的数值模拟结果,如图 8 所示,为开口

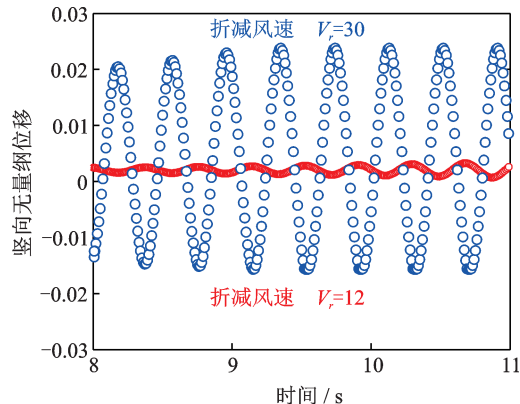


图 6 不同折减风速下无量纲幅值时程

Fig. 6 Time-histories curve of vertical dimensionless VIV amplitude

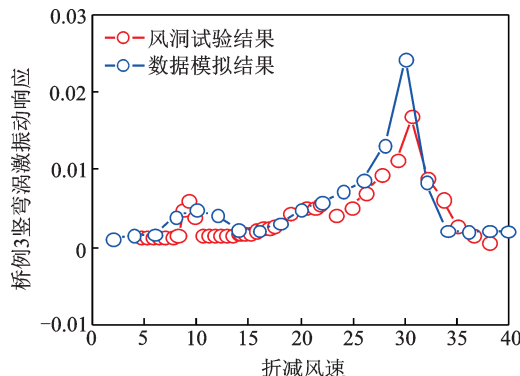


图 7 风洞试验与数值模拟结果对比

Fig. 7 Results of wind tunnel tests and CFD

表 3 典型 II 型裸梁断面工况参数表

Tab. 3 Learning samples of prototype II-shape cross-section

宽高比	开口率/%				
	78	80	82	84	96
6.0	L-78-6.0*	L-80-6.0	L-82-6.0	L-84-6.0	L-96-6.0
8.0	L-78-8.0	L-80-8.0	L-82-8.0	L-84-8.0	L-96-8.0
9.0	L-78-9.0	L-80-9.0	L-82-9.0	L-84-9.0	L-96-9.0
9.5	L-78-9.5	L-80-9.5	L-82-9.5	L-84-9.5	L-96-9.5
10.0	L-78-10.0	L-80-10.0	L-82-10.0	L-84-10.0	L-96-10.0
10.5	L-78-10.5	L-80-10.5	L-82-10.5	L-84-10.5	L-96-10.5
12.0	L-78-12.0	L-80-12.0	L-82-12.0	L-84-12.0	L-96-12.0
14.0	L-78-14.0	L-80-14.0	L-82-14.0	L-84-14.0	L-96-14.0
16.0	L-78-16.0	L-80-16.0	L-82-16.0	L-84-16.0	L-96-16.0

\*: L-78-6.0 表示 II 型裸梁-开口率 78%-宽高比 6

率 78% 与不同宽高比组合下 II 型裸梁断面的涡激振动特性随折减风速的变化情况。由图 8 可知,随着形状参数的改变,涡振的锁定区间、竖弯最大振幅及起振风速均有较大的变化。因此,可认为开口率和宽高比这 2 个形状参数对涡激振动性能的影响较大。汇总数值模拟得到的 45 组不同形状参数下的

钢-混 II 型裸梁断面的涡激振动锁定区间,竖弯最大振幅及起振风速如表 4 所示。

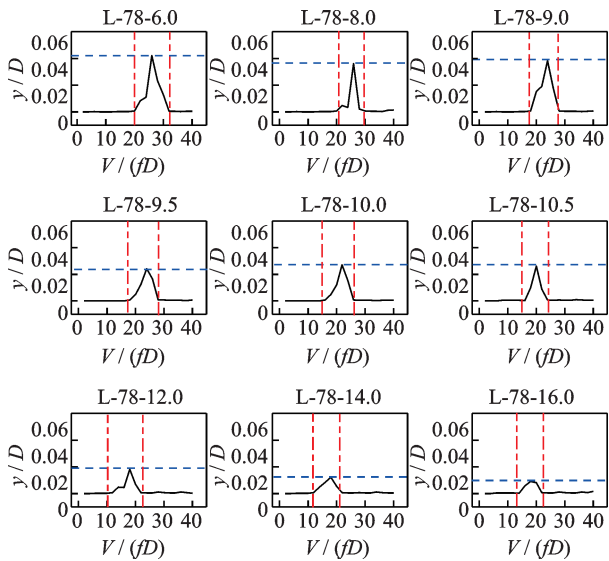


图 8 学习样本汇总(开口率 78%,宽高比 6.0-16.0)

Fig. 8 Summary of learning samples (78% opening ratio & 6.0-16.0 width to height ratio)

表 4 II 型裸梁学习样本数据汇总

Tab. 4 Summary of learning samples of prototype II-shape deck

序号	宽高比	开口率	无量纲涡振振幅	起振折减风速	涡振锁定区长度
1	6.0	78%	0.0422	20.0	12.0
2	6.0	80%	0.0389	20.0	12.0
.....	.....	.....	.....	.....	.....
45	16.0	96%	0.0319	18.0	10.0

基于不同形状参数组合下的钢-混 II 型裸梁数值模拟结果,可以得到进阶数据,绘制二维云图,钢-混 II 型裸梁竖向涡振幅值、起振折减风速、涡振锁定区长度分别随不同开口率、宽高比的变化规律如图 9-11 所示。

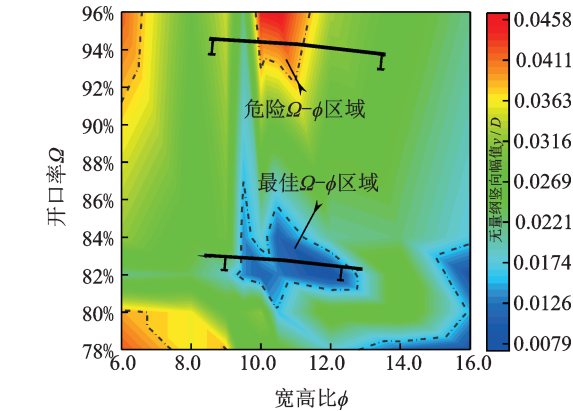


图 9 形状参数对竖向无量纲涡振幅值的影响

Fig. 9 Nephogram of vertical VIV amplitude as the function of  $\Omega$  &  $\phi$

由图 9 可见,对于钢-混 II 型裸梁,竖向无量纲涡振幅值不是随着宽高比或者开口率线性变化的,当宽高比为 10-12,开口率为 92%-94% 时,幅值最大,对应的学习样本也出现了明显的涡激振动现象,这说明此时需要对 II 型裸梁原始断面进行气动外形优化。保持开口率(92%-94%)不变,增大或者减小宽高比都可以降低竖向无量纲幅值;保持宽高比不变,减小开口率至 82%-86%,可以将涡振幅值降至最低。因此,采取气动措施减小 II 型裸梁的开口率,可达到减小涡振振幅的目的。

由图 10 可见,起振折减风速与宽高比、开口率之间具有较明显的规律。起振折减风速基本上是随着宽高比的增大而减小,较高的起振风速对桥梁结构有利。开口率、宽高比越大,起振折减风速越低。因此,采取气动措施降低 II 型裸梁断面的开口率可以达到降低涡振振幅的目的。

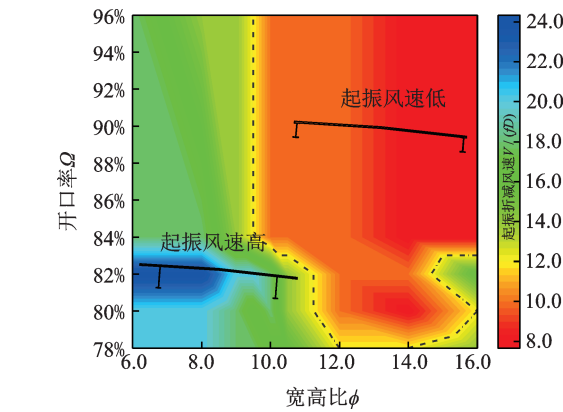


图 10 形状参数对起振折减风速的影响

Fig. 10 Nephogram of critical conversion wind speed as the function of  $\Omega$  &  $\phi$

由图 11 可见,宽高比为 10-12,开口率为 92%-94% 的 II 型裸梁涡振风速区长度最大。锁定区长度越大,对桥梁结构越不利。

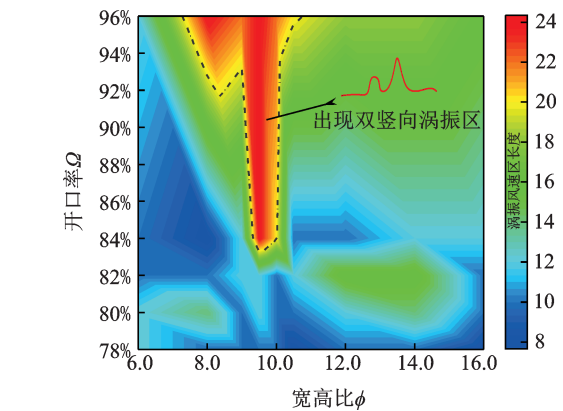


图 11 形状参数对竖向涡振风速区长度的影响

Fig. 11 Nephogram of length of VIV wind tunnel locking zone as the function of  $\Omega$  &  $\phi$

当涡振锁定区长度超过 20 时,认为出现双涡振区。降低开口率至 82%,可以有效降低涡振风速区长度。

根据工程经验和结构受力情况,Π 型裸梁的开口率一般在 92%~96%。根据上述规律,此时的 Π 型裸梁的涡振性能较差,涡振振幅大、起振风速低、锁定风速区间长。因此风嘴等抑振措施的作用是通过降低开口率有效提升 Π 型裸梁的涡振性能。

3 RBF 神经网络模型建立与训练

3.1 RBF 神经网络模型建立

RBF 网络分为严格 RBF 网络(正则化)和广义 RBF。且广义 RBF 可以通过严格 RBF 转化得到。

用 MATLAB 程序进行编译,首先设计一个严格 RBF 网络,即隐含层节点数等于输入向量的个数。扩散因子初值设为 20。具体参数如表 5 所示,神经网络结构如图 12 所示。

表 5 严格径向基函数神经网络参数表

Tab. 5 Parameters of strict RBF artificial neural network

神经网络类型	训练样本	隐含层节点数	扩散因子 spread	误差容限
严格 RBF	100	100	20	$1 \times 10^{-5}$

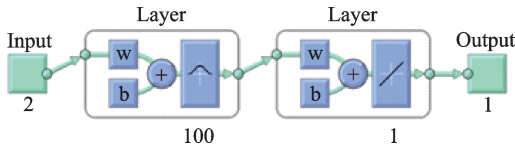


图 12 严格径向基函数神经网络结构图  
Fig. 12 Structure of strict RBF artificial neural network

图 12 中,输入层(Input)为二维向量,分别为钢混 Π 型裸梁宽高比和开口率。隐含层选用高斯分布函数,神经元个数为 100 个,等于训练样本个数;输出层采用线性函数输出。值得提出的是,当输入向量维数大于输出向量维数时,神经网络收敛速度更快更精确,因此无量纲涡振幅值、起振折减风速和涡振锁定风速区长度 3 个输出量采用分别识别的方式,故每次输出层(Output)维度为 1。随机选取 10 组测试样本,输入已经建立的严格径向基函数神经网络,进行预测值与真实值的误差对比分析,如图 13 所示。计算出无量纲涡振幅值、起振折减风速和涡振锁定风速区长度 3 个指标的相对误差,平均相对误差分别控制在 27.9%,11.0%,8.5%。个别测试样本识别效果不佳,相对误差达到 79.4%。说明初步建立的神经网络参数需要进一步优化。

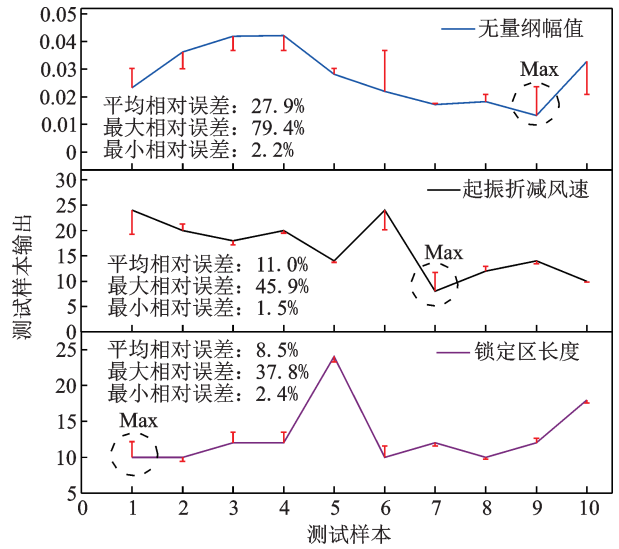


图 13 测试值与真实值误差对比图  
Fig. 13 Comparison of error between test value and true value

3.2 网络参数优化

RBF 网络可优化的参数为隐含层神经元个数和扩散因子。隐含层神经元数量体现了 RBF 网络的非线性映射能力。一般来说,隐含层节点与网络的非线性映射能力呈正相关关系,但是,到达“恰当”的节点个数时,增加的神经元节点不仅对网络精度的提高影响不大,反而会增加运算成本。因此需要通过实验和经验确定隐含层的神经元个数。扩散因子(spread)作为一个标量,表示径向基函数的扩展速度,其值需要针对具体的问题灵活选择。对于变化较快的函数,若 spread 取值过大,可能使逼近的结果过于粗糙;对于变化较慢的函数,spread 如果取值过小,可能使逼近的函数不够光滑,造成过度学习,从而降低了推广能力。

将严格 RBF 网络转化为广义 RBF 网络时,需对隐含层神经元个数和扩散因子 spread 这 2 个重要参数进行搜索,寻找最优组合,确保 Π 型裸梁测试样本中无量纲竖弯涡振幅值、起算折减风速、锁定风速区长度 3 个输出向量平均误差最小。

隐含层神经元个数搜索范围为 20~100,步长为 1;扩散因子 spread 搜索范围为 0~50,其中 0~1 搜索步长为 0.1,1~50 搜索步长为 1。基于 RBF 神经网络的分类原则,当隐含层神经元个数为 100 时,广义 RBF 网络转化为严格 RBF 网络。由图 14 可见,当隐含层神经元个数为 80,扩散因子 spread 为 15 时,3 个涡振性能指标平均误差达到最小值 6.5%。因此,有理由认为,经过参数优化的 RBF 网络能够较准确地预测 Π 型裸梁的涡振性能。有理由认为,经过参数优化的 RBF 网络能够较准确地预测 Π 型裸梁的涡振性能。



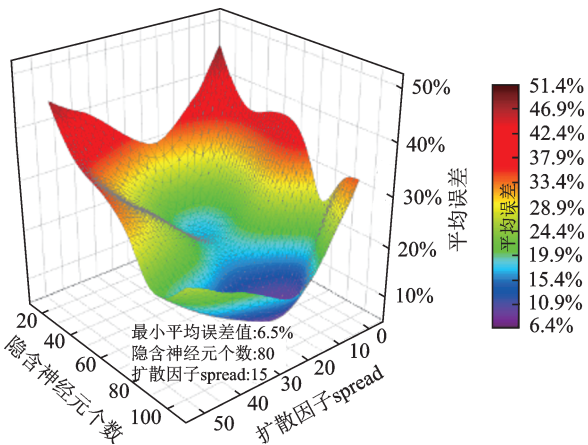


图 14 RBF 函数参数优化结果图  
Fig. 14 Parameter optimization result

3.3 神经网络模型训练

涡激振动问题属于求解复杂的非线性、随机系统问题。Ⅱ型梁裸涡激振动问题的影响因素众多。本文选用宽高比和开口率作为学习样本的二维输入向量,对无量纲竖弯涡振振幅、起振折减风速、涡振锁定风速区长度这 3 个输出向量分别进行识别,作为表征钢-混Ⅱ型梁原始断面涡振性能的指标。

将 45 组数值模拟得到的样本数据划分为输入向量和目标输出向量,输入向量定义为  $2 \times 45$  的矩阵,目标输出值定义为  $3 \times 45$  的矩阵。随机抽取 35 组数据为训练样本,剩余 10 组数据为测试样本。

为了得到足够的学习样本,对 35 组训练样本进行二维插值,将样本数量增加至 100 组。具体操作是运用 MATLAB 的二维三次插值函数 interp2,将 30 组训练样本输入向量与对应的目标输出合并为一个  $5 \times 30$  矩阵,再通过插值得到一个  $5 \times 100$  矩阵,最后再将其拆分为  $2 \times 100$  矩阵作为训练样本输入,  $3 \times 100$  矩阵作为训练样本的期望输出。

3.4 涡振性能预测

在 10 组测试样本中任选 3 组样本,选用隐含层神经元个数为 80,扩散因子 spread 为 15 的广义 RBF 网络进行涡振性能预测。将数值模拟的涡振性能作为真值,来验证神经网络预测结果,如表 6 所示。预测结果与真值的相对误差绝对值保持在 5% 之内。最大竖弯无量纲振幅、锁定区间长度及起振风速与真值均较为接近。因此,神经网络的识别结果可较好地识别钢-混Ⅱ型梁裸断面的竖弯涡振特性,为Ⅱ型梁初期的主梁设计提供参考。

表 6 基于广义 RBF 网络Ⅱ型梁裸涡振性能预测结果  
Tab. 6 Prediction of VIV performance of Ⅱ-shape deck with generalized RBF network

输入向量		预测输出向量								
$\phi$	$\Omega$	最大无量纲幅值			起振折减风速			锁定区长度		
		真值	预测结果	相对误差	真值	预测结果	相对误差	真值	预测结果	相对误差
10.5	96%	0.0458	0.0441	-3.74%	10	10.3	2.58%	22	22.3	1.31%
10	96%	0.0448	0.0424	-5.43%	12	11.7	-2.65%	24	22.9	-4.48%
9	84%	0.0292	0.0275	-5.77%	14	14.4	3.05%	12	12.3	2.26%

4 结 论

本文针对目前应用普遍、容易出现涡振的钢-混Ⅱ型叠合梁裸梁断面,通过风洞试验和数值模拟收集学习样本,建立径向基神经网络模型,利用人工神经网络对Ⅱ型裸梁的涡振性能(竖向涡振幅值、起振折减风速、锁定区长度)进行预测。

根据本文的研究成果,得到以下结论:

- (1)3 个典型桥例试验结果表明:Ⅱ型裸梁容易发生涡激振动,且涡激振动现象多集中在  $+3^\circ$  和  $+5^\circ$  风攻角下,竖弯涡振现象明显。
- (2)利用径向基神经网络建立钢-混Ⅱ型裸梁形状参数与涡振性能的关系,验证结果显示合理优化后的神经网络模型具有高效、高准确率的特点。
- (3)宽高比和开口率存在最佳取值范围(开口率

82%-84%;宽高比 10-12)使钢-混Ⅱ型裸梁具有最好的气动稳定性。

参考文献:

[1] 钱国伟,曹丰产,葛耀君.Ⅱ型叠合梁斜拉桥涡振性能及气动控制措施研究[J].振动与冲击,2015,34(02):176-181.  
QIAN Wei-guo, CAO Fengchan, GE Yaojun. Vortex-induced vibration performance of a cable-stayed bridge with Ⅱ shaped composite deck and its aerodynamic control measures [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015,34(02):176-181.

[2] 段青松,马存明.边箱叠合梁涡振性能及抑振措施研究[J].桥梁建设,2017,47(05):30-35.  
DUAN Qingsong, MA Cunming. Study of vortex-induced vibration performance and vibration suppression measures for composite girder with edge boxes [J].

- Bridge Construction, 2017, 47(05):30-35.
- [3] 王嘉兴, 牛华伟, 靳俊中, 等. 钢-砼叠合边主梁斜拉桥稳定板气动措施研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(08): 48-54.  
WANG Jiaying, NIU Huawei, JIN Junzhong, et al. Study on stabilizer aerodynamic measure of a cable-stayed bridge with a steel-concrete composite edge girder [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(08):48-54.
- [4] 战庆亮, 周志勇, 葛耀君. 开口叠合梁断面气动性能的试验研究[J]. 桥梁建设, 2017, 47(01):17-22.  
ZHAN Qingliang, ZHOU Zhiyong, GE Yaojun. Experimental study of aerodynamic performance of open cross sections of composite girders [J]. Bridge Construction, 2017, 47(01):17-22.
- [5] 李春光, 黄静文, 张 记, 等. 边主梁叠合梁涡振性能气动优化措施风洞试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(17):86-92.  
LI Chunguang, HUANG Jingwen, ZHANG Ji, et al. Aerodynamic optimization measures for VIV performances of a side girder composite beam based on wind tunnel tests [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(17):86-92.
- [6] 李 欢, 何旭辉, 王汉封, 等.  $\pi$ 型断面超高斜拉桥涡振减振措施风洞试验研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(07):62-68.  
LI Huan, HE Xuhui, WANG Hanfeng, et al. Wind tunnel tests for vortex-induced vibration control measures of a super high cable-stayed bridge with  $\pi$ -cross section [J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(07):62-68.
- [7] 陈应高, 吴 骏, 李 欢. 山区超高塔斜拉桥主梁断面气动选型风洞试验研究[J]. 交通科技, 2017, (05):8-11.  
CHEN Yinggao, WU Jun, LI Huan. Wind tunnel test for aerodynamic selection of deck section of cable-stayed bridge with super high tower in mountain area [J]. Transportation Science & Technology, 2017, (05): 8-11.
- [8] Wu Teng, Kareem Ahsan. Modeling hysteretic nonlinear behavior of bridge aero-dynamics via cellular automata nested neural network [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99:378-388.
- [9] 李 林, 李 乔, 廖海黎. 桥梁断面静力三分力系数的人工神经网络识别[J]. 西南交通大学学报, 2004, 39(6):740-743.  
LI Lin, LI Qiao, LIAO Haili. Identification of Static Coefficients of Bridge Section with Artificial Neural Network [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2004, 39(6):740-743.
- [10] 李 林. 桥梁断面气动参数的人工神经网络识别[D]. 成都:西南交通大学, 2003.  
LI Lin. Identification of aerodynamic parameters of bridge section using artificial neural network [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [11] 赵 林, 李 珂, 王昌将, 等. 大跨桥梁主梁风致稳定性被动气动控制措施综述[J]. 中国公路学报, 2019, 32(10):34-48.  
ZHAO Lin, LI Ke, WANG Changjiang, et al. Review on passive aerodynamic countermeasures on main girders aiming at wind-induced stabilities of long-span bridge [J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(10):34-48.
- [12] 王福军. 计算流体力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.  
WANG Fujun. Computational Fluid Dynamics Analysis—Principles and Applications of CFD Software [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

## Radial basis function networks used in prediction of vortex-induced vibration of $\Pi$ -shape bridge-decks

LI Jia-wu<sup>1</sup>, DANG Jia-min<sup>1</sup>, WU Tuo<sup>2</sup>, GAO Guang-zhong<sup>1</sup>

(1.School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2.Shaanxi Provincial Transport Planning Design and Research Institute, Xi'an 710068, China)

**Abstract:** Steel-concrete  $\Pi$ -shaped cross-section is prevalent in the design of cable-stayed bridges. Nevertheless, the vortex-induced vibration (VIV) is prone to occur for this section type, which can cause structural safety problems and reduce the driving comfort. In this paper, the results of the wind tunnel tests of  $\Pi$ -shape prototype deck are used to certify the script in numerical simulation of vertical VIV. Then, the data set could consist of the results from wind tunnel tests and computational fluid dynamics (CFD), which is used to describe the relationship between the two shape parameters—aspect ratio and aperture ratio, and responses of vibration. The radial basis function artificial neural network is trained by the learning sample, and the setting parameters of artificial neural network should be optimized to improve the precision to study the mechanism of the VIV in the  $\Pi$ -shape prototype deck. The results indicate that the responses of VIV have non-linear relationship with two shape parameters. And the relationship can be used to guide the selection and optimization of the aerodynamics control measures.

**Key words:** cable-stayed bridge; vortex-induced vibration; wind tunnel test; artificial neural network; numerical simulation

**作者简介:** 李加武(1972-),男,教授。电话: 15809287272; E-mail: ljw@gl.chd.edu.cn