

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.01.012

基于性能的 π 型梁桥涡振响应概率性评价

邵亚会, 赵德胜, 赵彤, 翟奥博, 汪亦显

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:文章以某 π 型梁悬索桥为例,采用剪切应力输运(shear-stress transport, SST)湍流模型,基于大变形网格和有限体积法实现 π 型截面主梁涡激振动数值仿真;用最小二乘法对阻尼比和竖向涡振最大幅值进行拟合,使用Q-Q图检验阻尼比的概率分布,探究阻尼比与涡振的关系;用设计点法、多种蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)法拟合结构随阻尼比变化的损伤曲线,建立桥梁涡振损伤评价框架。研究发现: π 型主梁在相当广泛的阻尼比范围存在竖向涡振现象,当阻尼比为 5.67×10^{-3} 时,主梁的竖向涡振振幅超过限值;阻尼比在每年的8—12月服从对数正态分布,并逐年减小,结构的损伤概率随阻尼比不断减小而增加。文中成功拟合出不同阻尼比下涡振最大幅值、涡振区间的损伤概率曲线,提出基于行车舒适性的桥梁涡振概率性损伤评价方法。研究结果可为 π 型梁涡振行车舒适度概率性损伤评价提供参考。

关键词: π 型截面;涡振;阻尼比;损伤评价

中图分类号:U448.25

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)01-0073-08

Performance-based probabilistic evaluation of vortex-induced vibration response of π -beam bridges

SHAO Yahui, ZHAO Desheng, ZHAO Tong, ZHAI Aobo, WANG Yixian

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: This paper aims to investigate the vortex-induced vibration (VIV) of a suspension bridge with π -beam. Numerical tests of VIV were performed for the bridge deck by using shear-stress transport (SST) turbulence model, large deformation dynamic grid and finite volume method. The relationship between damping ratio and VIV was explored by fitting the maximum magnitude of damping ratio and vertical VIV using least squares, examining the probability distribution of the damping ratio using a quantile-quantile (Q-Q) plot. The damage curves of the structure with the damping ratio were fitted by the design point method and various Monte Carlo (MC) methods to establish a framework for the evaluation of bridge VIV damage. It is found that the π -beam has vertical VIV in a fairly wide range of damping ratio, and the peak vertical vortex amplitude of the bridge deck exceeds the limit when the damping ratio is 5.67×10^{-3} . The damping ratio obeys the lognormal distribution from August to December every year and decreases year by year. Damage probability of the structure increases as the damping ratio decreases continuously. Finally, damage probability curves of the VIV maximum amplitude and interval under different damping ratios were successfully fitted, and the probabilistic damage evaluation method of bridge VIV based on the driving comfort was proposed. The results of the study can provide reference for the probabilistic damage evaluation of π -beam VIV based on the driving comfort.

收稿日期:2021-11-29;修回日期:2022-03-28

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51308178)

作者简介:邵亚会(1982—),女,安徽合肥人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师;

汪亦显(1980—),男,湖北黄冈人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师。

Key words: π -section; vortex-induced vibration(VIV); damping ratio; damage evaluation

π 型梁结构广泛应用于悬索桥建造中,其截面为开口形式,风荷载作用下,尾流易产生周期性的涡旋脱落,加之其抗扭刚度差、质量轻,易产生较大幅度的涡激振动。目前对 π 型主梁涡振的相关研究成果较丰富。文献[1]整合风洞试验、数值模拟的数据样本,建立多种神经网络模型,对 π 型梁涡激振动性能进行智能识别;文献[2]基于结构设计,通过调整 π 型梁底板之间距离,探究 π 型梁与空气动力相关的特性;文献[3]以某斜拉桥为例,采用阶段模型方法,研究稳定板和扰流板对 π 型截面桥的影响;文献[4]通过风洞试验发现,扭转-竖弯频率比接近 1 时, π 型主梁在垂直和扭转方向上表现出耦合振动。

由于现场实测和风洞试验的代价昂贵,数值模拟是现阶段研究大跨度桥梁涡激振动的主要方法之一[5]。数值模拟用于桥梁涡振模拟及涡振机理研究时,结果准确度较高,且具有可视化的优点。随着桥梁跨度的不断增大,在概率背景下评估风振成为设计特大跨度桥梁需要考虑的问题。文献[5]结合 Scanlan 涡旋脱落半经验模型对拱桥的涡振发生概率进行评估;文献[6]使用多种一次二阶矩法进行颤振失稳的可靠性分析;文献[7]考虑到风流场、结构特性和风-桥相互作用的不确定性,对大跨度拱桥涡振进行可靠性评估。

涡振是自激、限幅振动,但会造成结构疲劳,严重影响行车的舒适性,当阻尼更低时,桥梁涡振危害更大;然而现有桥梁涡振损伤研究忽略了阻尼、风速等不确定性因素。本文采用概率方法评估阻尼、风速等不确定性因素的影响,以秋浦河大桥为例,使用数值模拟对 π 型梁悬索桥的涡振进行研究,考虑阻尼的随机性,拟合出不同阻尼与最大涡振振幅的函数曲线,用对数正态分布来拟合桥梁特定月份的概率密度,最后使用设计点法+重要抽样蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)法[8]、直接抽样 MC 法、Latin 超立方抽样 MC 法进行行车舒适度的概率性评估。

1 涡振模拟原理

将截面涡激振动系统简化为竖向、扭转的二维振动弹簧-质量-阻尼系统,如图 1 所示,基于此简化模型进行结构涡激振动模拟计算。首先固定模型进行计算,使模型截面的数值模拟进行充分绕流,然后突然释放模型,使其在气动力作用下运

动,流体和固体进一步相互作用,进而产生流固耦合。图 1 中: c_v 、 c_t 分别为竖弯、扭转阻尼; k_v 、 k_t 分别为竖弯、扭转刚度。



图 1 π 型梁桥截面二维振动简化模型

本文采用交错方法[9]进行流固耦合,此方法在传统方法基础上添加流场力的预测和修正 2 个步骤,免去迭代,且灵活性高,可以组合各种流体和固体求解器,本文使用数值模拟平台“小牛 CFD”[10],采用有限元法求解结构,有限体积法求解流体。在 1 个时间步里,该方法包括以下 4 个计算步骤。

(1) 预测。通过解得的流体表面力(表面压强+表面摩擦力) p_{n-1} 、 p_n ,预测当前时间步结束时的流体表面力 p_{n+1}^{pred} ,表达式为:

$$p_{n+1}^{\text{pred}} = \left(1 + \frac{\Delta t_n}{\Delta t_{n-1}}\right)p_n - \frac{\Delta t_n}{\Delta t_{n-1}}p_{n-1} \quad (1)$$

其中, Δt_n 、 Δt_{n-1} 为时间步。

(2) 求解结构。将预测的表面力 p_{n+1}^{pred} 施加到结构,求解时间步结束时刻的结构位移 x_{n+1} 。

(3) 求解流体。将解得的结构位移 x_{n+1} 施加到动网格边界,求解流体,同时获得时间步结束时刻的表面力 p_{n+1}^{solve} 。

(4) 修正。根据预测的表面力 p_{n+1}^{pred} 和解得的表面力 p_{n+1}^{solve} ,计算时间步结束时刻的表面力 p_{n+1} ,其计算公式为:

$$p_{n+1} = (1 - \beta)p_{n+1}^{\text{pred}} + \beta p_{n+1}^{\text{solve}} \quad (2)$$

其中, β 为模型参数。当结构与流体密度比很大时, β 取值为 0.5;当结构与流体密度比较小时, β 取值范围为 $0 < \beta \leq 0.5$ 。

数值模拟选用剪切应力输运(shear-stress transport, SST) $k-\omega$ (k 为湍流动能, ω 为特征耗散速度)湍流模型,采用 HOPE(High-order Potential Energy)动网格技术[11],对流固耦合进行求解,识别结构涡振响应。计算区域外边界为矩形,流场参数设置如下:流场左侧为速度入口条件,指定速度大小;流场右侧为出口边界条件,不指定速度(模拟自然流出的边界);上、下两侧为对

称边界条件,其法向速度值等于 0,不指定切向速度(模拟自然流出的边界)。网格划分方法:主梁截面周边及尾流附近采用密网格,计算域周边采用离散网格,中间区域进行合理过渡。网格采用三角形非结构化网格,满足近壁面网格尺寸 $Y^+ < 7$ 的要求。

2 π 型梁涡激振动模拟与分析

2.1 有限元建模及结构动力特性分析

在 ANSYS 平台建立秋浦河大桥三维有限元模型,主梁、桥塔采用两节点空间梁单元模拟,主缆、吊杆采用两节点三维杆单元模拟,桥面铺装、栏杆等荷载采用 Mass21 单元模拟,主梁横截面示意如图 2 所示(单位为 m)。

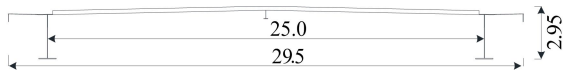


图 2 秋浦河大桥 π 型主梁横截面示意

桥梁结构自振特性分析是进行结构动力分析的基础,是检验结构模型正确与否的关键环节。本文采用子空间迭代法,获得该桥前 50 阶模态频率和振型,受篇幅限制,仅给出前 5 阶模态,见表 1 所列。

表 1 秋浦河大桥前 5 阶模态

阶次	频率/Hz	振型描述
第 1 阶	0.139	主梁纵飘
第 2 阶	0.293	主梁一阶反对称竖弯
第 3 阶	0.320	主梁一阶正对称竖弯
第 4 阶	0.438	主梁一阶扭转
第 5 阶	0.472	主梁二阶扭转

2.2 求解参数设置

进行网格的无关性研究,最小网格尺寸为 9.833×10^{-4} m,对应网格数量为 88 782,并以此为基础,算出各网格数量与基数的比值 K ,计算 0° 风攻角下截面的三分力系数 C_D 、 C_L 、 C_M ,结果如图 3 所示。由图 3 可知,在 $K > 0.4$ 时,三分力系数变化幅度都在 5% 以内,在保证计算精度和效率的前提下,确定 $K=1.0$ 最为合理。

设定计算风速区间为 0.25~3.50 m/s,对应该桥实际风速为 2~28 m/s。在计算风速为 0.25、0.50、1.00、1.50、1.75、2.00、2.25、2.50、3.00、3.50 m/s 下,进行竖向涡激振动模拟计算,计算参数见表 2 所列。

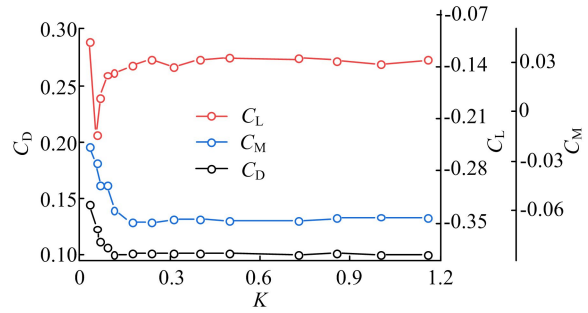


图 3 三分力系数随网格变化曲线

2.00 m/s 计算风速下, $Re = 6.66 \times 10^4$,网格形式及 Y^+ 分布如图 4 所示;三角形网格数为 88 782,节点数为 44 974,采用 4 层多重网格,最小网格尺寸为 9.833×10^{-4} m,边界条件如图 5 所示。

表 2 秋浦河大桥涡激振动模拟计算参数

参 数	实际值	模型值	缩尺比
截面宽度 B /m	29.50	0.492	1/60
截面高度 D /m	2.950	0.049	1/60
单位质量 m /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$)	35 366	9.824	$1/60^2$
单位质量惯矩 I_m /($\text{kg} \cdot \text{m}$)	2.613×10^6	0.202	$1/60^4$
竖弯频率 f_v /Hz	0.293	2.201	60/8
扭转频率 f_t /Hz	0.438	3.287	60/8
竖弯阻尼比 ξ_v /%	1.000	0.800	0.8
扭转阻尼比 ξ_t /%	1.000	0.800	0.8

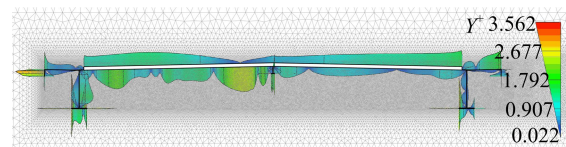


图 4 流场网格和 Y^+ 的分布

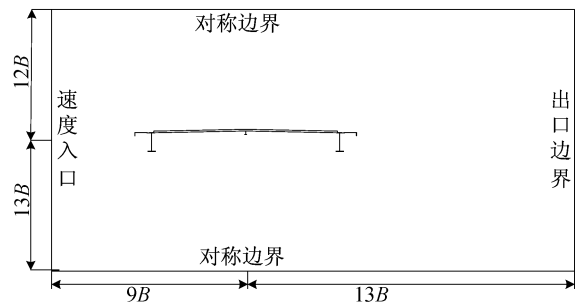


图 5 计算区域边界条件

本文 π 型主梁高跨比为 10,开口率为 84.7%,有较低的竖向涡振起振风速和较长的竖向涡振锁定区间,竖向涡振性能较差^[1];文献^[3]研究发现,高跨比 8.442、开口率 85.1% 的 π 型梁(与本文主梁截面相似)在试验过程中存在明显的

竖向涡激共振现象。因此,本文主要针对 π 型主梁竖向涡激振动机理进行探究。

2.3 结果分析

不同计算风速 v 下,无量纲竖向振幅 y_{\max}/D (y_{\max} 为竖向位移最大值)变化曲线如图 6 所示。图 6 中, f 为涡脱频率。为了数据的可视化,对各个计算风速的竖向位移曲线进行傅里叶变换,变换后的幅频曲线如图 7 所示(部分风速幅频曲线的振幅过小,振幅(A)需扩大一定倍数)。

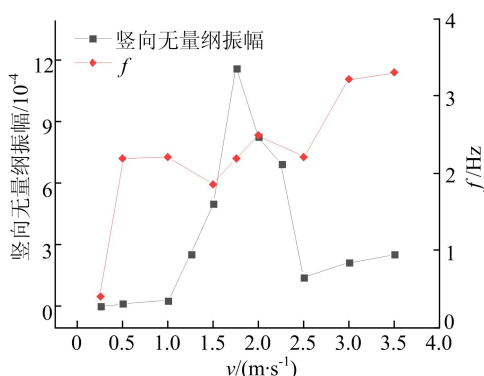


图 6 涡振竖向位移随风速变化曲线

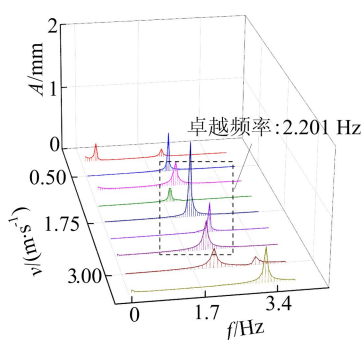


图 7 不同计算风速下幅频曲线

由图 6、图 7 可知:当计算风速低于 1.00 m/s 时,结构位移很小;计算风速在 1.00~2.50 m/s 区间时,随着计算风速增大,结构位移先快速增大然后减小;在计算风速等于 1.75 m/s 时,竖向位移达到最大值,为 1.16 mm;计算风速超过 2.50 m/s 时,结构位移很小。此现象说明,本文模拟结果中含有 1 个涡激锁定区间,锁定计算风速在 1.00~2.50 m/s。

旋涡脱落频率整体上随着风速增加而增加,在风速锁定区间内,旋涡脱落频率基本保持在 2.201 Hz 附近,说明此时结构自振频率捕获了旋涡脱落频率。

0.50 m/s 的计算风速下,存在涡旋脱落频率 2.202 Hz,但其竖向位移相比于同频率计算风速下的竖向位移小得多。为了解释上述现象,引入

动力放大系数 $\mu = y_{\max}/y_{st}$ (y_{st} 为静荷载下的位移),采用结构动力学里的共振放大系数进行计算,表达式为:

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{[1 - (f/f_n)^2]^2 + [2\xi(f/f_n)]^2}} \quad (3)$$

其中: f_n 为结构固有频率; ξ 为阻尼比。

在 0.50、1.75 m/s 计算风速下,对升力进行傅里叶变换后的功率谱如图 8 所示。由图 8 可知,达到竖弯振动频率时,0.50 m/s 时的功率远小于 1.75 m/s 时的功率。0.50 m/s 计算风速下的竖向位移较低,推测主要原因为计算风速低,输入的激励较小,导致主梁本身的静位移小。

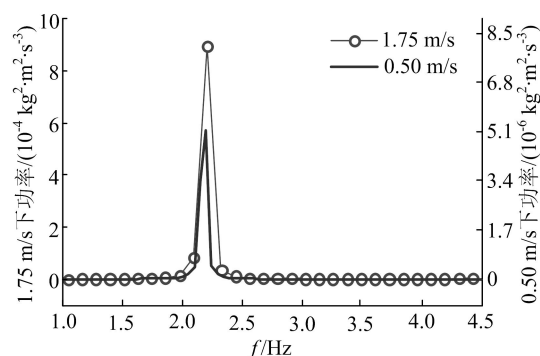


图 8 2 种计算风速下的功率谱曲线

根据文献[1], π 型主梁高跨比 10、开口率 84.7% 桥梁起振的折算风速 ($v/(fD)$) 应为 10, 对应涡振区间长度应为 14~18; 本文折算风速为 9.415, 对应涡振区间长度为 14.123, 与文献[1] 十分接近, 验证了本文数值模拟的可靠性。

3 桥梁涡振易损性曲线和概率评价

3.1 桥梁运营期阻尼与涡振的关系

为探究桥梁阻尼比随运营时间的变化规律, 本文采用汕头海湾大桥、钱塘江三桥、黄石长江大桥 3 座桥梁的多年监测数据[12], 绘制 3 座桥梁阻尼比 ξ 随时间变化曲线, 如图 9 所示。

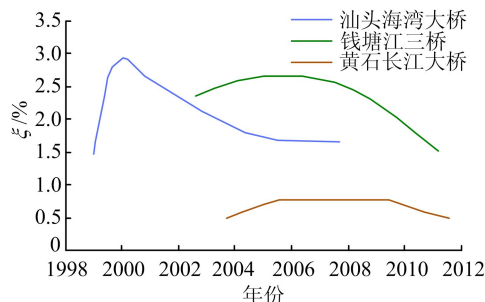


图 9 3 座桥梁阻尼比随时间衰减过程曲线

阻尼的存在让原先的物理振动系统随时间增加逐渐趋于静止,使系统能量逐渐消散,文献[13-14]研究发现,不同加载、不同测点等因素影响下,阻尼变化较大。从图 9 可以看出,随时间增长, ξ 呈先上升后下降、最后趋于稳定的趋势。阻尼比的改变会对桥梁涡振响应产生一定影响,因此本文对不同阻尼比下结构的涡激振动响应进行研究。

3.2 y_{\max} 随 ξ_v 变化规律

改变结构竖弯阻尼比 ξ_v ,其余参数不变,计算风速区间取 0.50~3.00 m/s,对应秋浦河大桥实际风速 u 为 4~24 m/s,计算步长为 0.50 m/s,将计算结果换算为该桥实际风速-振幅,如图 10 所示。

y_{\max} 随 ξ_v 变化计算参数见表 3 所列。

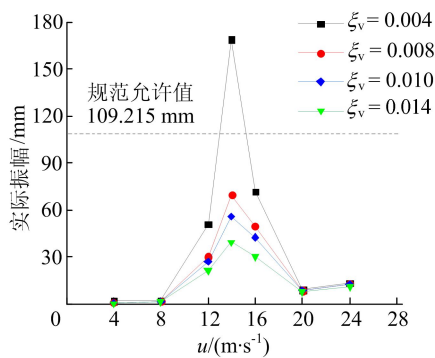


图 10 秋浦河大桥实际竖向涡振振幅变化曲线

表 3 y_{\max} 随 ξ_v 变化计算参数

ξ_v	$\ln \xi_v$	y_{\max}	$\ln y_{\max}$
0.004	-5.521	168.6	5.128
0.008	-4.828	69.6	4.243
0.010	-4.605	55.7	4.020
0.014	-4.269	39.5	3.676

从图 10 可以看出,在 4 种 ξ_v 下, π 型截面结构均发生涡激振动现象,实际发生涡激振动风速区间为 8~20 m/s,在 $u=14$ m/s 时,结构涡激振动振幅最大。根据文献[15],计算主梁竖向基频对应的涡激振动容许振幅为 109.215 mm。由图 10、表 3 可知:当 $\xi_v=0.004$ 时,结构最大位移超过规范允许值,涡激振动振幅过大;当 ξ_v 为规范建议值 0.010 时,结构最大位移为 55.7 mm;竖向涡振幅值随阻尼比增大而减小。

为探究竖弯阻尼比 ξ_v 与竖向涡振最大幅值 y_{\max} 的关系,使用 MATLAB 中 BP 神经网络和拟合函数命令,其中 BP 神经网络的完整训练需要

先传入数据给 input,通过隐含层的映射在输出层得到 BP 神经网络仿真值,将训练得到的仿真值与目标值进行对比和误差分析,修改权值和阈值,使仿真值不断逼近目标值,对最终结果进行拟合,得到表达式为:

$$y_{\max} = ae^{b\xi_v} + ce^{d\xi_v} \quad (4)$$

其中: $a = 575.30$; $b = -374.80$; $c = 48.16$; $d = -15.49$ 。

对(4)式两边取对数,使用最小二乘法再次拟合,得到 ξ_v 和 y_{\max} 的关系式为:

$$\ln y_{\max} = a_2 \ln \xi_v + b_2 \quad (5)$$

其中, a_2, b_2 为待定系数。

根据(5)式对表 3 中的 $\ln y_{\max}$ 和 $\ln \xi_v$ 进行最小二乘法拟合,得到拟合关系式为:

$$\ln y_{\max} = -1.167 \ln \xi_v - 1.343 \quad (6)$$

由(6)式可知, $\ln y_{\max}$ 和 $\ln \xi_v$ 呈线性关系,利用(6)式可以推算不同阻尼比下竖向涡激振动的最大振幅, $\ln y_{\max}$ 与 $\ln \xi_v$ 呈负相关,增大 ξ_v 可以减小 y_{\max} ,可得 $\xi_v = 5.67 \times 10^{-3}$ 时,实际结构位移达到规范允许幅值[15]。为验证该结论的准确性,在 $v=1.75$ m/s、 $\xi_v = 5.67 \times 10^{-3}$ 下进行计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟,结果如图 11 所示。由图 11 可知,模型振幅为 1.78 mm,对应实际竖向振幅为 106.8 mm,与允许振幅 109.215 mm 十分接近。

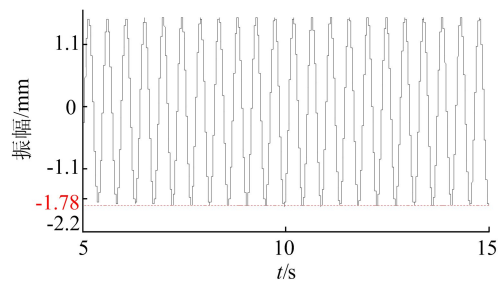


图 11 CFD 模拟位移时程曲线

3.3 ξ_v 的概率密度分布

桥梁的阻尼在 1 年中受气候等影响,出现很大程度变化。根据文献[12]中西墩门大桥连续 6 a 的监测数据,得到该桥不同月下的竖弯阻尼比 ξ_v 变化情况,如图 12 所示。

由图 12 可知,在每年的 8—12 月, ξ_v 变化较小,是具有代表性、偏保守的较低阻尼比。为研究桥梁阻尼的演变规律,取 ξ_v 分布为对数正态分布;对每年 8—12 月的 $\ln \xi_v$ 进行拟合,得到其概率分布的 Q-Q 图,如图 13 所示; ξ_v 概率密度函数

分布如图 14 所示。

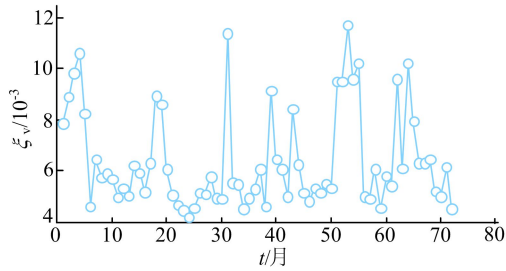


图 12 西堍门大桥 ξ_v 随时间演变情况

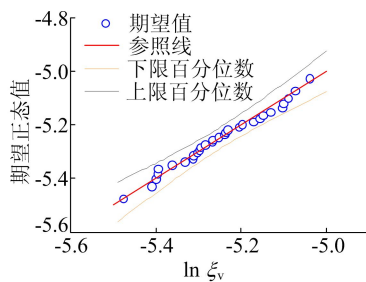


图 13 西堍门大桥 $\ln \xi_v$ 的 Q-Q 图

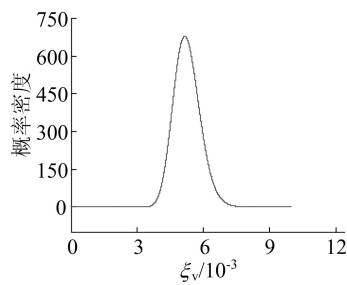


图 14 西堍门大桥 ξ_v 概率密度函数分布

从图 13 可以看出, $\ln \xi_v$ 的期望正态值总是围绕其参照线呈均匀分布, 基本符合一条直线, 由此可知, 西堍门大桥每年 8—12 月的 ξ_v 总是服从对数正态分布。本文 π 型梁桥与西堍门大桥在地理上位于相近纬度, 气候变化较为类似, 因此可将西堍门大桥阻尼比方差应用于本文 π 型梁桥。

3.4 概率损伤评价

结构的损伤概率定义为:

$$p_f = \int_{G(\xi_v) \leq 0} f(\xi_v) d\xi_v \quad (7)$$

其中: $f(\xi_v)$ 为影响结构性能的随机变量 ξ_v 的概率密度函数; $G(\xi_v)$ 为结构功能函数。极限状态面 $G(\xi_v) = 0$ 将 ξ_v 的设计空间分为失效域 $G(\xi_v) \leq 0$ 和安全域 $G(\xi_v) > 0$ 。

根据(5)式、(7)式, 定义功能函数 $G(\xi_v) = z_0 - (a_2 \ln \xi_v + b_2)$, 对于 p_f 较小的点, 通过采用设计点法+重要抽样 MC 法来估计结构的损伤概

率, 其余点使用直接抽样 MC 法估计结构的损伤概率; 其中, 通过设计点法可找出结构最可能失效的点, 通过重要抽样 MC 法确定选用正态分布概率密度函数抽样。

用 Sperling 稳定性指数评价驾驶舒适性, 评价标准见表 4 所列; 将 $(2\pi)^5 z_0^3 f_0^5$ 作为评价车辆行驶稳定性的测量标准, 建立车辆行驶稳定性^[16]的经验公式为:

$$W = 2.7 \sqrt[10]{z_0^3 f_0^5 F(f_0)} = 0.896 \sqrt[10]{a_0^3 F(f_0) f_0} \quad (8)$$

其中: z_0 为振幅; f_0 为桥梁振动频率, 本文取为结构固有频率; a_0 为加速度, $a_0 = z_0 (2\pi f_0)^2$; $F(f_0)$ 为与振动频率有关的加权系数。当 f_0 为 0.5~5.9 Hz 时, 有 $F(f_0) = 0.325 f_0^2$, 计算得到 W 值, 可以根据表 4 来评定行车舒适性。

表 4 Sperling 稳定性评价标准

W 取值	乘坐舒适度(对振动感觉)
2.00	明显感觉
2.50	更明显, 但并无不快
3.00	强烈, 不正常, 但还能忍受
3.25	很不正常
3.50	极不正常, 可厌, 烦恼, 不能长时间忍受
4.00	极可厌, 长时间承受有害

采用重要抽样 MC 法模拟 1×10^6 次, 可得 $p_f = 0.05$ 的误差有 99% 的概率小于 0.364%, 而使用直接抽样 MC 法, 需要模拟 9.5×10^6 次。设 N_1 为直接抽样 MC 模拟次数, N_2 重要抽样 MC 模拟次数, 求解最优化问题 $\min(N_1 - N_2)$, 有

$$\begin{cases} V_p = \sqrt{\frac{\Phi(-2\beta) \exp(\beta^2) - \Phi^2(-\beta)}{N_1 \Phi^2(-\beta)}}; \\ V_p = \sqrt{\frac{1-p_f}{N_2 p_f}}, \quad 0 < p_f < 1 \end{cases} \quad (9)$$

其中: $\beta = \Phi^{-1}(1 - p_f)$; $V_p = \epsilon / \mu_{\alpha/2}$, ϵ 为 p_f 的误差, $\mu_{\alpha/2}$ 为标准正态分布的上 $\alpha/2$ 分位点, $1 - \alpha$ 为小于 ϵ 的置信度。

当 $\alpha = 1\%$, $\epsilon = 0.364\%$ 时, 对 $p_f > 0.5005$ 的点, 重要抽样 MC 法模拟计算量大幅增加, 用直接抽样 MC 法效果更好。

本文 π 型梁桥最大振幅下 ξ_v 的损伤概率如图 15 所示。

从图 15 可以看出: 随着 ξ_v 不断减小, 结构的损伤概率不断增加; 当 $\xi_v = 7.78 \times 10^{-3}$, 桥梁涡振有 5% 的概率超过 $W = 2.00$ 下的允许振幅, 结构具有 95% 的可靠度; 当 $\xi_v = 8.00 \times 10^{-3}$ 时, 不同

W 取值下的损伤概率均小于 5%, 满足结构涡振抗风要求。

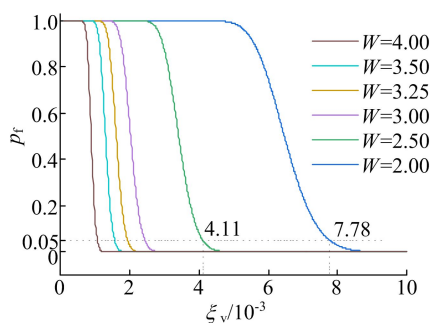


图 15 本文 π 型梁桥最大振幅下 ξ_v 的损伤概率变化曲线

以上损伤概率不考虑当地桥位风速, 可视为涡振最大幅值的损伤概率; 下面结合当地桥位风速发生概率, 分析涡振区间的损伤概率。

汇总 1979—2020 年安徽望江地区逐日最大风速, 得到对应拟合的非参数化概率密度, 如图 16 所示。根据功能函数 $14 \pm 6[\exp(a_2 \ln \xi_v + b_2) - \exp(z_0)] / \exp(a_2 \ln \xi_v + b_2)$, 使用 Latin 超立方抽样 MC 法, 计算在不同 W 、 ξ_v 下幅值超过评价标准的风速区间, 当 $W=2.00$ 时, y_{\max} 随 ξ_v 、 u 的变化规律如图 17 所示。

由图 17 可知, 超过评价标准的锁定风速区间随 ξ_v 增大而减小。

结合拟合风速的概率密度, 把风速区间代入累积概率密度中, 得到逐年 ξ_v 的损伤概率, 即考虑涡振区间的损伤概率 p_a , 如图 18 所示。

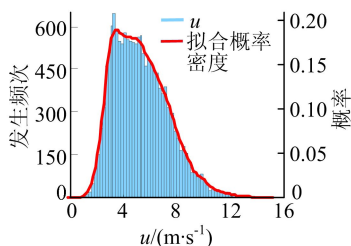


图 16 望江地区逐日最大风速概率密度

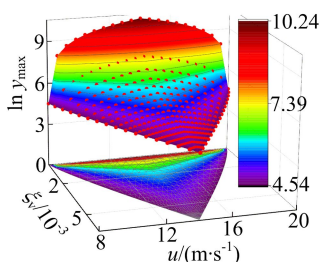


图 17 y_{\max} 随 ξ_v 、 u 变化规律

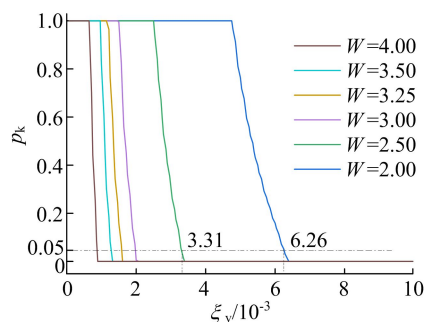


图 18 涡振区间下 ξ_v 的损伤概率变化曲线

基于表 4 中行车舒适度的评价标准, 本文将结构损伤程度分为 2 个等级: 等级 I, $W=2.00$ 对应损伤概率为 5% 的 ξ_v ; 等级 II, $W=2.50$ 对应损伤概率为 5% 的 ξ_v 。由图 15、图 18 可知, 与只考虑涡振最大幅值损伤概率 p_f 相比, 涡振区间下对应损伤概率 p_a 均有不同程度下降, 结果更加保守。

综上所述, ξ_v 在每年 8—12 月服从对数正态分布, 逐年有整体下降趋势; 对于本文 π 型梁桥, 建议每年 8—12 月测定 ξ_v , 当 ξ_v 降到等级 I 时, 加强监测频率, 当 ξ_v 进一步降到等级 II 时, 加强养护频率, 添加人工阻尼。

4 结 论

本文基于大变形动网格和有限体积法实现 π 型截面的流固耦合模拟, 可以准确识别涡激共振的发生区间和共振频率; 在此基础上, 研究 π 型梁涡激共振下的损伤评价。主要结论如下:

- (1) 通过 π 型主梁截面的涡激振动数值模拟可知, 涡脱频率整体上随着风速增加而增加, 涡脱频率在 2.201 Hz 被结构俘获; 竖向涡激振幅在锁定区间内先增大后减小。
- (2) π 型梁悬索桥的竖向涡激共振现象在相当广泛的阻尼比范围内均存在, 随着阻尼比减小, 结构竖向涡激振动振幅最大值逐渐增大, 但竖向涡振锁定风速区间不变; 增大阻尼比可以有效减小竖向涡激振幅。
- (3) 受气候等影响, 阻尼在 1 年中有较大变化, 每年 8—12 月竖弯阻尼比服从对数正态分布; 基于行车舒适性要求和阻尼比变化, 使用设计点法+重要抽样 MC 法、直接抽样 MC 法, 成功拟合了最大幅值的损伤概率曲线; 依据当地桥位风速, 使用 Latin 超立方抽样 MC 法, 拟合涡振区间的损伤概率曲线, 最后提出基于行车舒适度的涡振 2 级损伤评价方法。

[参 考 文 献]

- [1] 吴拓. 斜拉桥 π 型主梁截面涡激振动性能的人工智能识别[D]. 西安:长安大学, 2018.
- [2] KUBO Y, SADASHIMA K, YAMAGUCHI E, et al. Improvement of aeroelastic instability of shallow π section[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89:1445-1457.
- [3] 李欢, 何旭辉, 王汉封, 等. π 型截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(7):70-76.
- [4] WANG Z X, ZHANG Z T. VIV properties of π -shaped bridge sectional model; dependence on torsional-bending frequency ratio [J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(6):06021003-1-06021003-5.
- [5] GE Y J, XIANG H F. Recent development of bridge aerodynamics in China[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, 96:736-768.
- [6] GE Y J, XIANG H F, TANAKA H. Application of a reliability analysis model to bridge flutter under extreme winds [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 86:155-167.
- [7] LI L Y, WU T, HE X H, et al. Reliability evaluation of vortex-induced vibration for a long-span arch bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(5):05018002-1-05018002-5.
- [8] 张明, 金峰. 结构可靠性计算[M]. 北京:科学出版社, 2015:204-245.
- [9] KADAPA C. A second-order accurate non-intrusive staggered scheme for the interaction of ultra-lightweight rigid bodies with fluid flow [J]. Ocean Engineering, 2020, 217:107940.
- [10] 刘十一. 大跨度桥梁非线性气动力模型和非平稳全过程风致响应[D]. 上海:同济大学, 2014.
- [11] 祝卫亮, 刘十一, 周志勇, 等. 流固耦合数值模拟中的 HOPE 网格变形方法[C]//中国土木工程学会桥梁及结构工程分会风工程委员会, 中国空气动力学学会风工程和工业空气动力学专业委员会. 第十八届全国结构风工程学术会议暨第四届全国风工程研究生论坛论文集. 长沙:中南大学出版社有限责任公司, 2017:643-644.
- [12] 赵林, 刘丛菊, 葛耀君. 桥梁结构涡激共振的敏感性[J]. 空气动力学学报, 2020, 38(4):694-704.
- [13] 李湛, 李鹏飞, 姜震宇, 等. 不同激励模式下桥梁实测阻尼比差异[J]. 振动与冲击, 2016, 35(4):62-67.
- [14] 王卓, 闫维明, 秦栋涛, 等. 钢混筒支梁加载损伤后耗能特征试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(1):71-75, 123-124.
- [15] 同济大学. 公路桥梁抗风设计规范:JTJ/T 3360-01—2018[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司, 2019:79-80.
- [16] 罗东伟. 开槽箱梁涡激振动及其控制措施研究[D]. 上海:同济大学, 2013.
- [17] (责任编辑 张淑艳)
-
- (上接第 35 页)
- [18] LI C Y, SONG D, TONG R F, et al. Illumination-aware Faster R-CNN for Robust Multispectral Pedestrian Detection [J]. Pattern Recognition, 2018, 85:161-171.
- [19] WAN H H, SOTIRIOS G. Faster R-CNN for multi-class fruit detection using a robotic vision system [J]. Computer Networks, 2020, 168:107036.
- [20] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017, 39:1137-1149.
- [21] HUANG X P, HU Z L, WANG X R, et al. An improved single shot multibox detector method applied in body condition score for dairy cow[J]. Animals: An Open Access Journal From MDPI, 2019, 9(7):31340515.
- [22] PAN H D, JIANG J, CHEN G F. TDFSSD: top-down feature fusion single shot multibox detector[J]. Signal Processing Image Communication, 2020, 89(4):115987.
- [23] JEONG J, PARK H, KWAK N. Enhancement of SSD by concatenating feature maps for object detection [C]//British Machine Vision Conference. [S. l.]: arXiv, 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1705.09587>.
- [24] TIAN Y N, YANG G D, WANG Z, et al. Apple detection during different growth stages in orchards using the improved YOLO-V3 model [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 157:417-426.
- [25] HENDRY, CHEN R C. Automatic License Plate Recognition via sliding-window darknet-YOLO deep learning [J]. Image and Vision Computing, 2019, 87:47-56.
- [26] 张姝, 王昊天, 董骁翀, 等. 基于深度学习的输电线路螺栓检测技术[J]. 电网技术, 2021, 45(7):2821-2829.
- [27] 吕石磊, 卢思华, 李震, 等. 基于改进 YOLOv3-LITE 轻量级神经网络的柑橘识别方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17):205-214.
- [28] 赵德安, 吴任迪, 刘晓洋, 等. 基于 YOLO 深度卷积神经网络的复杂背景下机器人采摘苹果定位[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3):164-173.
- [29] 李维刚, 叶欣, 赵云涛, 等. 基于改进 YOLOv3 算法的带钢表面缺陷检测[J]. 电子学报, 2020, 48(7):1284-1292.
- [30] (责任编辑 胡亚敏)