π型加劲梁软颤振特性及下稳定板的影响研究

董国朝1, 许育升1, 韩 艳1, 李 凯1, 蔡春声1.2

(1.长沙理工大学桥梁工程安全控制教育部重点实验室,湖南长沙410114;2.路易斯安那州立大学,路易斯安那州巴吞鲁日LA70803)

摘要:基于数值模拟方法研究了π型加劲梁的软颤振特性及下稳定板对其的影响。通过对比风洞试验的颤振临界 风速验证数值方法的可靠性,分析了加劲梁的软颤振特性及1/4下稳定板的作用效果,探讨了π型加劲梁的软颤振 机理及1/4下稳定板的影响机理。结果表明:该π型加劲梁具有明显的软颤振现象,且负攻角下的软颤振特性更为 显著;某一风速下,振动系统的总能量先增大后保持稳定,而增设1/4下稳定板能减小振动总能量值,显著提升π型 加劲梁的颤振临界风速,降低软颤振的振幅;π型加劲梁无下稳定板设计断面旋涡的发展和脱落产生的升力矩方向 与主梁运动方向相同,促进扭转振动发散,而增设1/4下稳定板削弱了上表面旋涡的尺度,并在下表面形成了稳定 的负压区,减弱了气动力对扭转振动的促进作用,降低了扭转振幅。

关键词:斜拉桥;π型加劲梁;软颤振;下稳定板;数值模拟
 中图分类号:U448.27;U442.5⁺⁵
 文献标志码:A 文章编号:1004-4523(2022)06-1395-09
 DOI:10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2022.06.012

引 言

开口断面主梁因具有良好的受力性能、吊装简 便和造价低等优点,常用于大跨度斜拉桥和悬索桥, 如鄂东长江大桥、荆岳长江大桥、鹦鹉洲长江大桥和 宜昌庙嘴长江大桥等。其主要断面类型有主肋混凝 土板梁、π型钢-混凝土叠合梁及半封闭式钢箱梁等。 相对于线性颤振^[13],由于主梁的气动非线性和结构 非线性,一些学者^[47]在大振幅下观察到部分桥梁断 面存在极限环振荡(Limit Cycle Oscillation, LCO) 现象,表现为当风速超过某个"临界点"后,结构的振 动响应不会立刻发散,其振幅在某一风速下保持稳 定并随风速的增大而增大。为区别硬颤振,国内外 学者称其为"软颤振"(Soft Flutter)。

事实上,早期研究发现旧Tacoma桥在风毁前 大约经历了70min的扭转振动,振幅为30°~35°,这 一发现表明真实的颤振响应并非完全与线性颤振理 论预测的结果一样。许多学者通过风洞试验也发 现,由于空气动力学或结构的非线性,部分桥梁断面 可能存在极限环振荡现象。Amandolese等^[8]和Pigolotti等^[9]研究了薄板的后临界颤振行为,发现其存 在显著的竖弯-扭转耦合的LCO。Gao等^[10]通过风 洞试验发现了双侧悬挑箱梁表现出显著的后临界 LCO,且具有轻微的弯扭耦合效应。伍波等^[11]基于 武汉杨泗港长江大桥风洞试验,对比了不同动力参 数下桁架梁的软颤振特性。许福友等^[12]对印尼Suramadu大桥进行了风洞试验研究,发现钝体主梁断 面的软颤振特性,得出颤振形态与断面形式、模态频 率和质量相对比例有关。

部分学者在π型加劲梁断面也观察到了软颤振 现象^[13-17]。Kubo等^[14]在两个(板梁位置不同)π截面 上发现了其非线性颤振性能。董佳慧等[15]发现了边 箱钢-混叠合梁π型断面的软颤振表现为振动频率 单一且以扭转为主的弯扭耦合运动。方根深等[16]通 过风洞试验发现,π型梁断面存在软颤振现象且风 攻角效应明显。此外,由于其气动外形较钝,对风的 敏感性较强,在不进行气动优化情况下,易出现明显 的颤振现象^[18-22]。试验和实际工程中常采用气动措 施进行优化,其中,下稳定板是用于改善开口断面主 梁气动稳定性的有效气动措施之一。郑史雄等[18]分 析了不同角度的风嘴及稳定板对π型加劲梁断面的 软颤振的抑制效果,发现下中央稳定板对软颤振作 用效果不明显。Irwin^[19]介绍了底部隔板对开口断 面主梁的气动抑制效果。杨光辉等^[20]和战庆亮等^[21] 结合风洞试验和计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)发现下稳定板能改善π型开口 断面主梁的气动稳定性。杨詠昕等[22]发现中央稳定 板能显著提高三类主梁的颤振稳定性能且控制效果

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51678079,51778073,51978087)。

收稿日期: 2021-03-13; 修订日期: 2021-07-22

与稳定板的位置和高度有关。以上研究结果大部分 是基于风洞试验分析 π型加劲梁设计断面软颤振特 性,有关数值模拟及气动优化措施对软颤振的影响 报道较少。因此,借助可视化的计算流体动力学方 法,深入研究 π型加劲梁悬索桥的软颤振特性及下 稳定板的影响机理具有重要意义。

本文基于数值模拟方法并结合风洞试验,以某 π型钢-混凝土结合梁大跨悬索桥为研究背景,通过 对比风洞试验三分力系数验证网格和时间步长的无 关性,对比颤振临界风速结果验证数值模拟方法的 可靠性,并进一步通过数值模拟结果分析加劲梁的 软颤振特性及1/4下稳定板对π型加劲梁软颤振的 影响,探讨π型加劲梁的软颤振机理及1/4下稳定板 对其影响机理。

1 风洞试验概况

某加劲梁断面形式为开口钢-混凝土结合梁的 大跨悬索桥^[23],主跨为838m,桥型布置如图1所示。 加劲梁宽33.2m,高2.8m,加劲梁断面及优化措施 即下稳定板的位置如图2所示,1/4下稳定板(即桥 梁横断面开口宽度(1/4)L处,且下稳定板的下缘与 检修轨道底部平齐)在节段模型中的布置如图3所 示。对主梁进行节段模型颤振试验,试验风速比为 1:3.4,模型缩尺比为1:50,试验主要动力特性参数 如表1所示。

原设计加劲梁断面的颤振试验结果^[23]表明: +3°攻角下,原设计断面的颤振临界风速为31 m/s, 低于颤振检验风速,不满足抗风要求^[24]。采取多种 气动优化措施进行节段模型颤振试验后,发现在原 设计加劲梁断面下表面增设1/4下稳定板的气动措 施对加劲梁的颤振临界风速提高效果最明显。此



图1 桥型布置图(单位:cm) Fig.1 Layout of the bridge (Unit: cm)





Fig. 2 Cross section of stiffening beam and location of aerodynamic measures (Unit: cm)



图 3 节段模型 1/4 下稳定板布置图

Fig. 3 1/4 lower stabilizers layout of the segmental model

表 1 动力特性参数表 Tab. 1 Dynamic characteristic parameter table

参数名称	单位	实桥	缩尺比	模型值
主梁长度 L	m	77.0	1/50	1.540
主梁宽度B	m	33.2	1/50	0.664
主梁高度H	m	2.8	1/50	0.056
等效质量 m _{eq}	kg/m	40160	$1/50^{2}$	16.06
等效质量矩 J_{meq}	kg•m	3636000	$1/50^{4}$	0.582
竖弯基频 fh	Hz	0.118	14.9	1.76
扭转基频fi	Hz	0.243	14.9	3.71
竖弯阻尼比 <i>ζ</i> ,	0⁄0	0.7	1	0.60
扭转阻尼比ζ	0⁄0	0.7	1	0.65

外,文献[14-17]的研究结果表明π型加劲梁断面及 优化方案(增设1/4下稳定板)存在一定的软颤振现 象。为了进一步探明π型加劲梁的软颤振特性及下 稳定板对其的影响机理,建立二维两自由度(扭转和 竖弯)的数值模型进行计算,并借助CFD可视化流 场进一步分析。

2 数值模拟

2.1 网格及时间步长无关验证

Gao 等^[10]和董佳慧等^[15]在研究桥梁的软颤振试 验时,发现桥面的附属结构会增加软颤振响应,减小 软颤振的振幅增长速率,而且栏杆等附属结构能进 一步增强来流在桥断面附近的分离,增强自激力的 非线性特性。建模时保留栏杆和下检修道等附属结 构,以进一步准确模拟加劲梁断面附近的流场。数 值模型的尺寸与风洞试验模型保持一致,网格计算 域划分为"静网格域"、"刚性域"和"动网格域"。其 中,刚性域内包括边界层以及相应的网格加密,并与 加劲梁断面同步运动,目的是保证加劲梁断面周围 具有较高的网格精度,以更好地捕捉旋涡的分离和 再附。动网格域采用非结构化的三角形网格按一定 疏密填充,外部静网格域采用结构化的四边形网格。 湍流模型采用二维大涡模拟(Large Eddy Simulation-2D),速度压力耦合采用SIMPLEC求解。计算域及 近壁面网格如图4所示,网格阻塞率小于3%。





在保证计算准确的前提下,为提高计算效率,以 原设计加劲梁断面为例,对网格和时间步长进行了 无关性测试。采用三套增长疏密不同的网格 (Case1,Case2和Case3)及三种不同时间步长(T_1 = 0.001 s, T_2 =0.0005 s和 T_3 =0.0001 s)进行测试,网 格参数如表2所示。风洞试验中,桥梁主要发生扭 转自由度的颤振现象,因此,以原设计加劲梁断面0° 攻角的阻力系数和扭矩系数结果为参考值来验证网 格及时间步长的无关性。三分力系数定义如下:

$$C_{L} = \frac{F_{L}}{\frac{1}{2}\rho U^{2}B},$$

$$C_{D} = \frac{F_{D}}{\frac{1}{2}\rho U^{2}H},$$

$$C_{M} = \frac{F_{M}}{\frac{1}{2}\rho U^{2}B^{2}}$$
(1)

式中 C_D 为阻力系数; C_L 为升力系数; C_M 为扭转系数; F_D , F_L 和 F_M 分别代表桥梁断面受到的阻力、升力和扭矩。模型宽度 B=0.664 m;模型高度 H=0.056 m;U为来流风速;空气密度 $\rho=1.225$ kg/cm³。

表 2 网格参数 Tab. 2 Parameters of grid

网格	网格数量	结构化网格	非结构化网格
Case1	451415	199923	251492
Case2	309720	75302	234418
Case3	203996	72890	131106

0°攻角下,来流风速*U*=10 m/s时,原设计断面 的风洞试验与数值模拟的三分力系数结果对比如表 3所示。网格及时间无关性测试结果表明:Case1, Case2和Case3的网格在0.001,0.0005及0.0001 s的 时间步长下三分力系数计算结果与风洞试验值吻合 良好,表明网格的稳定性较好。兼顾计算精度和计 算效率的前提下,选取时间步长为*T*₁=0.001 s以及 数量为203996的网格Case3对各攻角下的颤振临界 风速计算,进一步验证数值模拟方法的可靠性。为保证精确捕捉近壁面的旋涡的产生和脱落,要求 Y_{Plus}具有足够的精度,网格近壁面 Y_{Plus}值如图 5 所示,Y_{Plus}值整体小于1。

表 3 网格及时间无关性验证结果 Tab. 3 Grid and time independent test results

方法	网格	时间步长/s	C_{L}	C_D	C_M
		1×10^{-3}	-0.155	1.211	-0.016
	Case1	5×10^{-4}	-0.164	1.234	-0.017
		1×10^{-4}	-0.163	1.230	-0.017
		1×10^{-3}	-0.171	1.198	-0.017
CFD Case	Case2	5×10^{-4}	-0.165	1.198	-0.017
		1×10^{-4}	-0.172	1.202	-0.018
Case3		1×10^{-3}	-0.178	1.215	-0.017
	5×10^{-4}	-0.167	1.311	-0.017	
		1×10^{-4}	-0.172	1.271	-0.018
试验	/	/	-0.052	1.266	-0.018



2.2 数值模拟方法可靠性验证

节段模型颤振试验结果表明原设计方案的颤振 稳定性能较差,不满足规范要求,且气动优化方案 (增设1/4下稳定板)能显著提高加劲梁的颤振临界 风速。为进一步验证数值模拟方法的可靠性,对各 攻角下原设计加劲梁及优化方案的颤振临界风速进 行计算。本文采用直接计算法^[25],借助Fluent自带 的动网格技术同时嵌入自编译的UDF二次开发程 序计算原加劲梁断面及优化方案在一3°,0°和+3°攻 角下的颤振临界风速。网格重构方法使用Soomthing和Remeshing功能。根据抗风规范^[24]:当颤振 "发散点"不明显时,若扭转位移标准差达到0.5°,则 认为发生颤振失稳。数值模拟与风洞试验的颤振临 界风速对比结果如表4所示。

风洞试验和数值模拟的颤振临界风速结果表明:数值模拟的原设计加劲梁断面及优化方案的颤振临界风速与风洞试验结果吻合较好,数值模拟的颤振临界风速值相比风洞试验的结果整体偏低,在原设计的+3°攻角上出现最大误差为5.7%。原设

表 4 原设计及优化方案的颤振临界风速结果 Tab. 4 Critical flutter wind speed of initial design and ontimization scheme

十字	中安	攻角/	颤振临界风速/(m•s ⁻¹)	
刀杀	内谷	(°)	风洞试验	数值模拟
原设计	/	+3	9.12	8.6
		0	10.0	10.5
		-3	13.5	12.5
优化方案	增设1/4下 趋空板	+3	14.65	15.0
		0	13.21	12.5
	际足似	-3	14.18	14.0

计断面+3°攻角相比0°攻角和-3°攻角的颤振稳定 性较差,与文献[18,21]结果的趋势一致。且风洞试 验和数值模拟的结果均表明1/4下稳定板能显著改 善加劲梁的颤振稳定性。颤振临界风速的对比结果 验证了数值模拟方法的可靠性,因此,下文基于数值 模拟结果对π型加劲梁的软颤振特性及下稳定板的 影响进一步研究。

3 软颤振分析

根据数值模拟和风洞试验结果,本文研究的加 劲梁主要振动形式为扭转振动,且在原设计断面上 增设1/4下稳定板能有效降低加劲梁的颤振临界风 速。数值模拟结果表明:当风速小于"临界点"时,加 劲梁的扭转振动表现为随机的小振幅振动;当风速 大于"临界点"时,加劲梁的扭转振动表现为振幅稳 定的极限环振荡,如图6为设计加劲梁断面+3°攻 角下风速为12 m/s时的极限环振荡图。



图 6 极限环振荡(原设计断面+3°攻角,风速:12.0 m/s) Fig. 6 Limit cycle oscillation (+3° attack angle of initial design, wind velocity: 12.0 m/s)

图 7 为原设计及优化方案在各风攻角下的扭转 角位移 RMS 值随风速的变化, U=12 m/s时原设计 断面在+3°攻角下的扭转角位移时程曲线见局部放 大图。原设计加劲梁断面及增设 1/4 下稳定板的优 化断面均出现了程度不一的软颤振现象, 且存在明 显的振幅"发散点"。在+3°攻角下, 当风速达到



Fig. 7 Variation of RMS values of torsional displacement with wind speed

12.0 m/s时,原加劲梁出现明显的扭转振动,但未发 散,振幅稳定在12°左右。加劲梁断面的稳定振幅随 风速增大而增大,与涡激振动的振幅增长和振幅限 制的现象相似。当风速大于振幅"发散点"时,加劲 梁断面的振幅迅速发散,表现出与硬颤振类似的现 象^[1-3],如0°攻角下原设计加劲梁断面风速达到16 m/s时出现了发散性颤振。对比图7中各攻角的扭 转位移随风速的变化,可以看出:正攻角的"发散点" 风速较低,负攻角的"发散点"风速较高,且振幅的增 长斜率随攻角减小呈减小趋势。负攻角的软颤振特 性比正攻角的更加显著,这一趋势与文献[13,18]的 结果一致。

图 7 中, 虚线和实线分别代表原设计加劲梁断 面和优化断面的扭转位移 RMS 值随风速变化曲线, 可以明显看出, 在原设计加劲梁断面上增设 1/4 下 稳定板有效地减缓了各个攻角的振幅增长斜率, 降 低软颤振的振幅, 增大了原设计加劲梁断面各个攻 角的起振风速和"发散点"的风速。1/4 下稳定板对 正攻角的改善效果最明显。增设了 1/4 下稳定板的 优化断面的软颤振特性相比原设计加劲梁断面的更 为明显。

由于原设计断面+3°攻角软颤振特性不明显, 而0°攻角相对于-3°攻角的颤振临界风速更小,因此,限于文章篇幅,选择0°攻角对主梁的原设计方案 和优化方案进行分析。图8给出0°攻角下原设计加 劲梁断面的部分扭转角位移时程曲线。

图 9 为原设计加劲梁断面和优化方案在0°攻角下的振幅稳定时间(达到最大振幅所需的时间)随风速变化趋势图。风速为13.0及16.0 m/s时0°攻角下优化方案的位移时程曲线如图 9 中的小图所示。风速为13.0 m/s对应的振幅稳定时间约为12 s;风速为16.0 m/s达到最大振幅所需的时间约为7.2 s,振幅稳定时间随风速呈现递减趋势。风速小于14.0 m/s时,增设1/4下稳定板降低了原设计加劲梁断面的振幅稳定时间。当风速大于等于14.0 m/s时,增设1/4下稳定板对原设计加劲梁断面的振幅







Fig. 9 Variation of amplitude stability time with wind speed

稳定时间优化不明显。可以看出,增设1/4下稳定 板能减少原设计断面在低风速下达到振幅稳定所需 的时间,对较高风速下振幅稳定时间的作用效果不 明显。

对各风速下的振动响应进行傅里叶变换,获得 其频域特性。图 10 给出了原设计加劲梁断面和优化 方案在 0°攻角下的振动频率随风速变化的趋势图。 原设计加劲梁断面和优化方案的振动频率减小斜率 近似,振动频率随风速的增大均呈减小趋势。与文 献[11]中桁架梁和文献[15]中π型梁发生软颤振时 颤振频率随风速增大而减小的特性相同。增设1/4 下稳定板后,小幅降低了0°攻角各风速下原设计加劲 梁的振动频率。图 10 中的小图给出了0°攻角下,原 设计加劲梁断面在13 m/s时和优化断面在16 m/s时 的频谱图。进一步对优化方案0°攻角下的竖向位移 时程进行频谱分析,如图 11 所示。加劲梁的竖向振 动的频率和扭转振动的频率一致,并与模型的第一 阶扭转固有频率接近,这一现象与文献[16]一致。



Fig. 10 Variation of frequency with wind speed



图 11 优化方案 0° 攻角下竖向位移时程及频谱图 (风速 13.0 m/s)



4 软颤振机理分析

4.1 振动系统能量分析

将自编译的UDF二次开发程序导入Fluent,通

过 UDF 宏命令找到加劲梁断面的形心,对加劲梁断 面壁面的压强积分计算得到每一个时间步长下加劲 梁断面的升力矩 *M*(*t*)。由于加劲梁的振动主要以 扭转模态为主,因此,忽略竖向气动力的影响可以更 清晰地分析 π型加劲梁断面软颤振过程中各能量的 变化。加劲梁振动过程中系统的总能量 *Q*、振动系 统从外流场吸收的能量 *Q*。和阻尼所消耗振动系统 的能量 *Q*,计算如下:

$$Q = Q_a - Q_c \tag{2}$$

$$Q_a = \int M(t)\dot{\alpha}(t)dt \tag{3}$$

$$Q_{c} = \int 2J_{\rm meq} \zeta_{t} \omega_{n} \dot{\alpha}^{2}(t) dt \qquad (4)$$

式中 M(t)为力矩; $\dot{a}(t)$ 为角速度; J_{meq} 为模型等效 质量矩,取 0.582 kg·m; ζ_t 为模型的扭转阻尼比取 0.7%; $\omega_n = 2\pi f_t$ 为扭转圆频率,取 23.31 rad/s。

图12为原设计方案中0°攻角在风速为13.0 m/s 下的系统的各能量随时间变化图。π型加劲梁的软 颤振振动过程可分为两个阶段:振幅扩散阶段和振 幅稳定阶段。在振幅扩散阶段中,加劲梁的扭转位 移由0增大到最大稳定振幅。如图12所示,这一阶 段中,振动系统从外流场吸收能量的速率明显大于 阻尼消耗系统能量的速率,系统从外界吸收的能量 大于阻尼消耗的能量,系统的能量增大,加劲梁的 扭转振幅达到了最大稳定振幅,且振幅呈近似等幅。 这一阶段中,振动系统从外界吸收能量的速率与阻 尼消耗振动系统能量的速率相近,系统从外界吸收 的能量近似等于阻尼所消耗的能量,系统的总能量 值稳定在某一个值附近。



图 12 振动系统各能量随时间变化图

Fig. 12 Component energy of vibration system varies with time

由0°攻角下原设计方案和优化方案在风速为 13.0 m/s的系统总能量可以发现:增设1/4下稳定 板后,系统总能量的稳定值降低了约86%,加劲梁 达到最大扭转振幅所需的时间缩短。加劲梁的扭转 振幅 RMS减小了63.7%,有效地改善了π型加劲梁 断面的颤振性能。为进一步分析风速对系统总功的 影响,增加优化方案在0°攻角、风速17.5 m/s时的工 况,与优化方案在0°攻角、风速13.0 m/s时的工况对 比可以发现:虽然高风速下振幅扩散阶段的时间缩 短了,但系统总功的增长速率明显大于低风速下系 统总功的增长速率。因此,稳定阶段高风速下系统 的总功大于低风速下系统的总功,高风速下扭转位 移的最大稳定振幅大于低风速下的最大稳定振幅。 图 13 中稳定阶段系统总功产生的较小波动是由于 最大稳定振幅位移时程的波动造成的,与计算所采 用的湍流模型有关。



4.2 流场分析

分别取原设计π型加劲梁及其优化方案在振幅 扩散段及振幅稳定段的一个典型运动周期的流场进 行分析,位移时程曲线如图14所示。着重分析T时 刻(平衡位置)、T+T/4时刻(最大扭转位移位置)、 T+3T/4时刻(平衡位置)和2T(最小扭转位移位 置)时刻桥断面附近的流场演变过程。



Fig. 14 Displacement time history curve in typical period

0°攻角、风速为14.0 m/s时原设计加劲梁断面 在振幅稳定阶段典型周期的压力云图如图15所示。 来流经原设计加劲梁断面,分别在上表面的上游栏 杆处和上游箱室、下检修道处分离形成的旋涡脱落, 并向下游发展,最终在尾部交替脱落。

T时刻,上表面形成的旋涡运动至桥断面下游。 下表面处,新的小涡在箱室及检修车轨道处产生并



图 15 原设计方案瞬时压力云图(0°攻角,风速 14.0 m/s) Fig. 15 Contours of static pressure of initial design(0° attack angle, wind velocity: 14.0 m/s)

向下游发展。同时,上一周期的旋涡在下游箱室出 现脱落,负压区逐渐远离桥面。下游下表面压力为 正,上表面压力为负,气动力的方向在下游方向为竖 直向上。此时桥梁断面处于平衡位置,气动力矩方 向为逆时针,与桥断面的运动方向相同,气动力做正 功,系统能量增大,促进振动发散。T+T/4时刻,上 表面的负压区较少,少量旋涡开始在栏杆处形成。 下表面的旋涡在中间靠近上游处融合,形成一个较 大的负压区,气动的方向竖直向下。此时,气动力矩 减小,方向为逆时针,与桥梁的运动方向相同,气动 力做正功,促进扭转振动的发散,桥梁断面达到最大 扭转位移位置。T+T/2时刻,下表面的主涡继续发 展,旋涡的尺度增大并在下游箱室尾部开始脱落,气 动力在下游方向为竖直向下。同时,新的旋涡开始 产生并在下表面中间靠近上游处盘旋,旋涡的尺度 较小。此时,桥梁断面处于平衡位置,气动力矩方向 为顺时针,与桥梁断面的运动方向相同,系统能量增 大,促进了振动发散。T+3T/4时刻,上表面小的旋 涡在上游融合形成了一个尺度较大的旋涡,生成了 较大的负压区,气动力的方向在桥断面上游方向为 竖直向上。下表面旋涡在下游箱室脱落,气动力的 方向竖直向下。此时,气动力矩方向为顺时针,与桥 梁断面的运动方向相同,促进了桥断面的振动发散。 在原设计桥梁断面的运动过程中,上、下表面旋涡的 运动交替主导着气动力的方向,在周期内做功为正, 促进桥梁断面的振动发散。

图 16 为 0° 攻角、风速为 14.0 m/s 时优化方案加 劲梁断面在振幅稳定阶段典型周期的压力云图。对 比 1/4 下稳定板和原设计方案的压力云图可以发 现:增设了 1/4 下稳定板后,整个流场趋于更稳定的 状态,桥断面表面附近的负压区面积缩小,负压区的 压强绝对值减小。在桥断面上表面,旋涡的尺度减 小,负压区的压强值增大。在桥断面下表面,两下稳





定板和上、下游的箱室之间形成了稳定的负压区,稳定了桥断面附近的流场。

在π型加劲梁断面增设了1/4下稳定板后,削弱了 桥断面上表面的旋涡的尺度,上、下表面的压力差减 小,减弱了对振动发散的促进作用,有效地降低原设计 π型加劲梁的振幅,改善了加劲梁的颤振稳定性能。

流场分析结果表明:相同风速下,原设计断面的 旋涡的形成、运动以及脱落产生的气动扭矩与桥梁 断面的运动方向相同,气动力做正功,增大了振动系 统的能量。而增设1/4下稳定板的加劲梁断面由于 上表面负压区的减弱和下表面稳定负压区的存在, 减弱了气动力对振动系统的输入能量值。因此,原 设计断面的气动力做功输入振动系统的能量值大于 优化断面的能量值,进一步验证了能量分析的结果。

5 结 论

基于数值模拟方法对某π型加劲梁的软颤振特 性及下稳定板的影响开展研究。通过数值模拟结果 分析加劲梁的软颤振特性及1/4下稳定板对加劲梁 的软颤振的影响,并探讨了机理。结论如下:

(1)当来流风速大于颤振临界风速时,π型加劲 梁断面出现典型的软颤振现象,表现为振幅随风速 增大而增大,振动频率随风速增大而减小。在某一 风速下振动频率单一且主要以扭转模态为主。负攻 角下π型加劲梁的软颤振特性相比其他攻角的软颤 振特性更为显著。

(2)在π型劲梁软颤振的振幅扩散阶段,振动系 统从外界吸收的能量大于系统消耗的能量,系统的总 能量增大,加劲梁扭转位移增大。而在软颤振的振幅 稳定阶段中,振动系统从外界吸收的能量近似等于阻 尼消耗的能量,振动系统的总能量达到稳定,π型加劲 梁的振幅趋于稳定,表现为极限环振荡现象。 (3)增设1/4下稳定板显著降低了振动系统的总能量值,有效地提升π型加劲梁的颤振临界风速,降低加劲梁的软颤振振幅,减小了各风攻角下扭转位移的增长速率。增设1/4下稳定板后的π型加劲梁的软颤振特性相比原设计的软颤振特性更为显著。

(4)来流流经π型加劲梁断面,在上表面栏杆处 和下表面的上游箱室、下检修道处分离,形成旋涡向 下游发展,最后在桥断面尾部交替脱落。旋涡的产 生和发展形成的升力矩与主梁的运动方向相同,气 动力做正功,增大了系统的能量。在下表面增设 1/4下稳定板后,削弱了上表面旋涡的尺度,并在桥 断面下表面形成了稳定的负压区,减弱了气动力对 扭转振动的促进作用,降低了扭转振幅,有效地改善 了π型加劲梁断面的颤振稳定性能。

参考文献:

- [1] 伍波,王骑,廖海黎,等.不同风攻角下薄平板断面颤振机理研究[J].振动工程学报,2020,33(4):667-678.
 Wu Bo, Wang Qi, Liao Hai-li, et al. Flutter mechanism of thin flat plates under different attack angles[J].
 Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(4):667-678.
- [2] Han Yan, Li Kai, Cai C S. Study of central buckle effects on flutter of long span suspension bridges [J].
 Wind and Structures, 2020,31(5):413-428.
- [3] 周志勇,陈艾荣,项海帆.涡方法用于桥梁断面气动 导数和颤振临界风速的数值计算[J].振动工程学报, 2002,15(3):83-87.

Zhou Zhi-yong, Chen Ai-rong, Xiang Hai-fan. Numerical assessment of aerodynamic derivatives and critical wind speed of flutter of bridge decks by discrete vortex method[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15 (3): 83-87.

- [4] Casalotti A, Arena A, Lacarbonara W. Mitigation of post-flutter oscillations in suspension bridges by hysteretic tuned mass dampers [J]. Engineering Structures, 2014, 69: 62-71.
- [5] Král Radomil, Pospíšil Stanislav, Náprstek Jiří. Wind tunnel experiments on unstable self-excited vibration of sectional girders [J]. Journal of Fluids and Structures, 2014,44:235-250.
- [6] Katsuchi Hiroshi, Yamada Hitoshi, Nishio Mayuko, et al. Improvement of aerodynamic stability of suspension bridges with H-shaped simplified stiffening girder [J]. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 2016, 10 (1): 93-102.
- [7] Li Kai, Han Yan, Cai C S, et al. Experimental investigation on post-flutter characteristics of a typical steel truss suspension bridge deck[J]. Jouanal of Wind Engi-

neering and Industrial Aerodynamics, 2021, 216: 104724.

- [8] Amandolese X, Michelin S, Choquel M. Low speed flutter and limit cycle oscillations of a two-degree-offreedom flat plate in a wind tunnel[J]. Journal of Fluids and Structures, 2013, 43:244-255.
- [9] Pigolotti Luca, Mannini Claudio, Bartoli Gianni. Experimental study on the flutter-induced motion of two-degree-of-freedom plates[J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 75: 77-98.
- [10] Gao Guangzhong, Zhu Ledong. Nonlinearity of mechanical damping and stiffness of a spring-suspended sectional model system for wind tunnel tests [J]. Journal of Sound and Vibration, 2015, 355; 369-391.
- [11] 伍波,王骑,廖海黎.双层桥面桁架梁软颤振特性风洞 试验研究[J].振动与冲击,2020,39(1):191-198.
 WU Bo, WANG Qi, LIAO Haili. Wind tunnel tests for soft flutter characteristics of double-deck truss girder
 [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(1): 191-198.
- [12] 许福友,陈艾荣.印尼Suramadu大桥颤振试验与颤振 分析[J].土木工程学报,2009,42(1):35-40.
 Xu Fuyou, Chen Airong. Flutter test and analysis for the Suramadu Bridge in Indonesia[J]. China Civil Engineering Journal, 2009,42(1):35-40.
- [13]朱乐东,高广中.典型桥梁断面软颤振现象及影响因素
 [J].同济大学学报(自然科学版),2015,43(9):1289-1294.

ZHU Ledong, GAO Guangzhong. Influential factors of soft flutter phenomenon for typical bridge deck sections[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015,43(9): 1289-1294.

- [14] Kubo Yoshinobu, Kimura Kichiro, Sadashima Kensuke, et al. Aerodynamic performance of improved shallow π shape bridge deck[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90(12): 2113-2125.
- [15] 董佳慧,周强,马汝为,等.边箱钢-混叠合梁颤振性能及气动措施研究[J].振动与冲击,2020,39(3):
 155-160.
 DONG Jia-hui, ZHOU Qiang, MA Ru-wei, et al. Flut-

ter performance and aerodynamic measures of a suspension bridge with side box steel-concrete composite girder [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(3): 155-160.

- [16] 方根深,杨詠昕,葛耀君.大跨度桥梁PK箱梁断面颤振 性能研究[J].振动与冲击,2018,37(9):25-31.
 FANG Genshen, YANG Yongxin, GE Yaojun. Flutter performance of PK section girders for long-span bridges[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018,37 (9):25-31.
- [17] Tang Y, Hua X G, Chen Z Q, et al. Experimental investigation of flutter characteristics of shallow II section at post-critical regime [J]. Journal of Fluids and Struc-

tures, 2019, 88:275-291.

 [18] 郑史雄,郭俊峰,朱进波,等.Ⅱ型断面主梁软颤振特性及抑制措施研究[J].西南交通大学学报,2017,52(3): 458-465.

ZHENG Shi-xiong, GUO Jun-feng, ZHU Jin-bo, et al. Characteristics and suppression measures for soft flutter of girder with Π -shaped cross section [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017,52(3):458-465.

- [19] Irwin P A. Bluff body aerodynamics in wind engineering[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 96(6-7):701-712.
- [20] 杨光辉,屈东洋,牛晋涛,等.π型截面涡激振动风洞试 验及气动抑制措施研究[J].石家庄铁道大学学报(自 然科学版),2015,28(1):34-39.
 YANG Guang-hui, QU Dong-yang, NIU Jin-tao, et

al. Researches on π -section vortex-induced vibration wind tunnel testing and aerodynamic suppression measures [J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University (Natural Science),2015,28(1):34-39.

[21] 战庆亮,周志勇,葛耀君.开口桥梁断面颤振及气动措施的数值与试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2017,45(4):466-471.

ZHAN Qing-liang, ZHOU Zhi-yong, GE Yao-jun. Numerical and experimental study of the mechanism of torsional flutter for open-cross-section composite beams [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(4):466-471.

 [22] 杨詠昕,周锐,葛耀君.大跨度桥梁实用颤振控制方法
 [J].同济大学学报(自然科学版),2014,42(7): 989-997.

YANG Yong-xin, ZHOU Rui, GE Yao-jun. Practical flutter control method for long span bridges [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(7): 989-997.

[23] 华旭刚,陈政清.宜昌庙嘴长江大桥抗风性能研究总研究报告[R].长沙:湖南大学风工程试验研究中心, 2013.

HUA Xu-gang, CHEN Zheng-qing. Study on wind-resistance of Miaozui Yangtze River Bridge in Yichang City [R]. Changsha: Wind Engineering Research Center, Hunan University, 2013.

- [24] 公路桥梁抗风设计规范: JTG/T 3360-01—2018[S]. 北京:人民交通出版社, 2019.
 Wind-resistant design specification for highway bridges: JTG/T 3360-01—2018[S]. Beijing: China Communications Press, 2019.
- [25] 刘小兵,陈政清,刘志文.桥梁断面颤振稳定性的直接 计算法[J].振动与冲击,2013,32(1):78-82.
 LIU Xiao-bing, CHEN Zheng-qing, LIU Zhi-wen. Direct computation method for flutter stability of a bridge deck[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(1): 78-82.

Soft flutter performance of π -shaped girder and the influence of lower stabilizers

DONG Guo-chao¹, XU Yu-sheng¹, HAN Yan¹, LI Kai¹, CAI C S^{1,2}

(1.Key Laboratory of Safety Control of Bridge Engineering, Ministry of Education, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2.Louisiana State University, Baton Rouge LA70803, USA)

Abstract: This study systematically investigates the soft flutter characteristics of the π -shaped girder and the influence caused by the lower stabilizers based on the numerical simulation method. The reliability of the numerical method is verified by comparing the aerodynamic coefficients of the wind tunnel test and the critical flutter wind speed. The soft flutter characteristics of the girder and the effect of the 1/4 lower stabilizers are analyzed. The mechanism of the soft flutter of π -shaped girder and the influence mechanism of 1/4 lower stabilizers are discussed. The results show that the π -shaped girder has obvious soft flutter characteristics, which is more remarkable under the negative angle of attack. At a certain wind speed, the total energy of the vibrating system first increases es and then remains constant approximately. The total energy of the vibrating system significantly increases after adding the 1/4 lower stabilizers, which enhances the critical flutter wind speed of the π -shaped girder and reduces the amplitude; The development and shedding of vortices in the initial design produce the same direction of moment as that of the main girder, which promotes the divergence of torsional vibration. The addition of 1/4 lower stabilizers weakens the scale of vortices on the upper surface and forms a stable negative pressure area on the lower surface, which weakens the promotion of aerodynamic force on torsional vibration and reduces the torsional amplitude. The results can provide a reference for wind resistance design and aerodynamic optimization of the same type of bridge.

Key words: cable-stayed bridge; π -shaped girder; soft flutter; lower stabilizers; numerical simulation

作者简介: 董国朝(1981—), 男, 讲师。电话: 18038079299; E-mail: dgccpu@163.com。 通讯作者: 韩 艳(1979—), 女, 教授。电话: 13508498346; E-mail: ce_hanyan@163.com。