基于涡动力学的大跨度桥梁风效应流动控制

高东来^{1,2}, 陈文礼^{1,2*}, 杨文瀚^{1,2}, 陈冠斌^{1,2}, 李惠^{1,2}

1. 哈尔滨工业大学土木工程智能防灾减灾工业与信息化部重点实验室, 哈尔滨 150090;

2. 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 哈尔滨 150090

* E-mail: cwl_80@hit.edu.cn

收稿日期: 2020-09-04; 接受日期: 2021-01-19; 网络版发表日期: 2021-04-26

国家自然科学基金优秀青年基金项目(批准号: 51722805)和国家自然科学基金面上项目(批准号: 51978222, 51578188)资助

摘要 主梁和拉/吊索是大跨度桥梁的关键结构构件, 通常具有较小的刚度和阻尼比, 在来流风作用下, 易在结构尾部形成周期性旋涡脱落, 进而诱发涡激振动等多种形式的风致振动. 主梁和拉/吊索结构的风致振动会加重结构疲劳, 甚至影响桥梁运营安全. 因此, 发展大跨度桥梁风振控制方法, 不仅可以丰富大跨度桥梁空气动力学理论, 还具有重要的理论意义和工程价值. 本文从涡动力学出发, 提出基于稳定吸/吹气的主、被动流动控制方法, 消除主梁和拉/吊索结构尾流区的周期性旋涡脱落, 实现减小非定常气动力与风致振动响应的控制目标.

关键词 大跨度桥梁, 风致振动, 涡动力学, 流动控制

1 引言

近30年来, 伴随着国民经济快速发展所带来的强烈需求, 我国交通事业蓬勃发展, 大跨度桥梁建设取得了举世瞩目的成就. 随着经济建设进一步持续发展, 我国大跨度桥梁建设还会进一步突破既有桥梁的跨径, 使大跨度桥梁技术水平迈上新的台阶. 大跨度缆索承重体系桥梁刚度小、阻尼小, 属于风敏感结构, 其风效应突出且十分复杂, 已经成为控制大跨度桥梁极限跨越能力、使用性、舒适性和安全性最重要的因素之一. 随着桥梁跨径突破, 大跨度桥梁风效应将变得更加复杂, 甚至出现人类尚未认知的风效应. 此外, 我国大跨度桥梁多位于沿海地区, 这些地区经常遭受强台风袭击, 大跨度桥梁抗风形势十分严峻^[1].

主梁和拉/吊索是大跨度缆索承重桥梁的关键构件, 大跨度桥梁的风效应问题也主要发生于这两个构件. 对于大跨度桥梁的主梁, 前缘分离与尾缘分离会诱发如颤振与涡激振动等不同形式的风致振动, 在脉动风作用下, 主梁还可能发生抖振. 斜拉桥斜拉索和悬索桥吊索均具有圆形结构, 由于长度很大, 通常具有较小的刚度和阻尼比, 在风荷载作用下极易发生风致振动.

主梁和拉索属于几何形状不同的两类构件, 且二者的风致振动形式不完全相同. 因此, 针对这两类构件, 发展相应的大跨度桥梁风振控制方法, 对特大跨度桥梁工程的建设以及进一步实现桥梁跨度极限的突破都具有十分重要的意义. 机械阻尼措施, 是应用较为广泛的大跨度桥梁风致振动控制方法. 典型的阻尼器

引用格式: 高东来, 陈文礼, 杨文瀚, 等. 基于涡动力学的大跨度桥梁风效应流动控制. 中国科学: 技术科学, 2021, 51: 517–529

Gao D L, Chen W L, Yang W H, et al. Vortex dynamics-based flow control of wind effects on long-span bridges (in Chinese). Sci Sin Tech, 2021, 51: 517–529, doi: 10.1360/SST-2020-0374

包括磁流变阻尼器、黏滞阻尼器以及黏弹性阻尼器等。机械阻尼控制方式受阻尼器/控制器的安装限制, 只有安装到一定高度才能给拉索提供有效的阻尼比。随着桥梁跨度越来越大, 对于大跨度桥梁的吊索/斜拉索, 由于安装位置限制, 采用机械阻尼器/控制器的方法, 往往不能提供足够大的阻尼比。

除了机械阻尼控制方法之外, 还有基于结构绕流场调控与气动外形优化的流动控制方法。流动控制方法可分为两类: 主动流动控制和被动流动控制。主动控制需要外界持续输入能量来保持控制过程; 而被动控制通常是预设的, 一旦实施就不再需要外部能量输入来维持控制过程。被动控制方法具有简单、能量经济的优势, 而主动控制方法的主要优点在于可控性和可适应性^[2], 通过适当的主动控制输入可以实现最佳的控制效果。主动控制技术利用流动的内在性质, 通过局部的小能量输入来实现显著的流动控制效果。例如, 在翼型的分离点附近施加边界层吸气可以显著提高升力。主动控制的可适应性是指, 可以主动调整控制方案以适应复杂和动态的流动发展过程。

主动流动控制的实现形式主要包括稳定吸气与吹气控制^[3-5]、合成射流^[6-8]、等离子体控制^[9]、流场中施加旋转小圆柱控制^[10,11]和电磁控制^[12]等方法。Chen等人^[3]采用分布式稳定吸气来抑制拉索节段模型涡激振动。风洞试验结果表明, 稳定吸气方法显著降低了脉动风荷载和涡振振幅。Chen等人^[4]随后在风洞中进行了精细的流场测试, 研究主动吸气对拉索模型尾流中旋涡脱落的影响, 揭示了尾流脱落模式的改变是拉索模型上脉动升力大幅度降低的内在机理。Posdziech等人^[12]在圆柱表面缠绕电极和磁铁条纹, 发现由此产生的电磁力(洛伦兹力)可以有效地减小气动力, 延迟流动分离, 使流场更加稳定。Lecordier等人^[13]提出通过对圆柱进行加热改变圆柱尾流的不稳定流场结构。其实验结果表明加热可以改变流动分离点的位置, 抑制圆柱尾流的不稳定漩涡脱落过程, 得到更为稳定的圆柱尾流场。

被动流动控制不依赖于外界能量输入, 主要通过改变流动环境达到流动控制的目的。最常见的被动控制手段是优化、调节钝体表面几何形状并达到控制流动的目的, 例如导流板、螺旋线、凹坑、表面褶皱等。Larsen等人^[14]采用导流板成功抑制了丹麦大贝尔特桥出现的涡激振动。许福友等人^[15]通过施加抑流板改变

了桥梁主梁的绕流场分布, 有效抑制了主梁的涡激振动。Xin等人^[16]在大跨度桥梁主梁上沿着展向布置被动旋涡发生器, 通过旋涡发生器产生的小尺度离散涡抑制主梁的涡激振动。

从旋涡动力学的角度出发, 大跨度桥梁结构(拉索、主梁)的风致振动是由来流风在其尾部形成非定常旋涡脱落引起的。因此, 可以通过控制尾部的周期性旋涡脱落抑制绕流场作用在结构上的非定常气动力, 从而达到控制振动的目的。本文采用主、被动吸/吹气方法对大跨度桥梁拉索与主梁两类关键构件风效应实施流动控制。通过主动流动控制研究其控制机理, 然后将主动吸/吹气流动控制方法通过其被动形式(即被动吸/吹气控制)实现了拉索和主梁两类关键结构构件的风振控制。

2 大跨度桥梁拉索风效应的流动控制

大跨度桥梁斜拉索、吊索等柔性索结构构件, 容易发生涡激振动、风雨激振、桥塔尾流致振等形式复杂的风致振动^[1]。作为本文的基础, 本节首先提出一种主动WSLB吸/吹气控制方法, 即迎风侧主动吸气背风侧主动吹气(windward suction and leeward blowing, WSLB), 对拉索节段模型(圆柱)绕流场进行控制并研究其控制机理^[17]。在主动控制机理研究的基础上, 提出一种被动吸/吹气套环流动控制方法, 抑制索结构的风致振动。

2.1 主动吸/吹气流动控制

试验在哈尔滨工业大学大气边界层风洞与浪槽联合实验室2号闭口回流风洞(SMC-WT2)中进行。试验段尺寸为800 mm(宽)×1200 mm(高)×3000 mm(长), 试验段四面墙体均为透明玻璃。试验段风速稳定, 具有较小的湍流度(0.40%)。试验中, 拉索结构节段模型沿风洞中心线水平固定, 如图1所示。节段模型是具有光滑表面的有机玻璃管(聚甲基丙烯酸甲酯), 模型总展向长度(L)为800 mm, 直径(D)为100 mm。4个内径为10 mm的吸气孔和4个相同尺寸的吹气孔, 对称布置在模型的迎风侧和背风侧的驻点处, 两个相邻的吸/吹气孔之间的展向间距 $L_0=L/8$ 。迎风侧主动吸气和背风侧吹气均平行于来流方向。通过两个流量计(Omega FMA-2613A)控制主动吸/吹气流量, 保证每个吸/吹气

图 1 (网络版彩图)风洞试验模型及试验布置^[17]. (a) 索结构节段模型和WSLB主动控制; (b) 测压环截面示意图; (c) 二维PIV流场测试系统示意图

Figure 1 (Color online) Experimental model and setup in the wind tunnel [17]. (a) Sectional cable model and WSLB active control; (b) schematic of the pressure measurement ring; (c) sketch of the 2D PIV flow measurement system.

孔中的流速保持恒定. 在风洞试验中, 吸/吹气流量(Q)从0 L/min以7.5 L/min为步长增加到97.5 L/min. 引入无量纲的等效吸/吹气动量系数(C_μ)的概念, C_μ 定义为吸/吹气流量动量与自由来流动量之比. 计算不同WSLB控制工况下的吸/吹气流量, 吸/吹气速度以及对应的吸/吹气动量系数 C_μ 列于表1中. 试验中, 来流风速固定为5.0 m/s, 对应的雷诺数(Re)为 3.33×10^4 .

在模型跨中截面布置厚度为8 mm的3D打印测压环测试不同工况下节段模型的表面压力分布. 36个内径1 mm的测压孔均匀排列在测压圆环上, 如图1(a)所示. 试验中, 每个工况的瞬态表面压力测试采样时间为32 s, 采样频率为312.5 Hz. 将测得的表面压力信号积分, 可得到气动系数(升、阻力)时程, 进而计算阻力系数的平均值 $\bar{C}_D$ 和升力系数时程的均方根值 C'_L , 可定量比较WSLB方法对圆柱气动特性的控制作用.

采用二维PIV (particle image velocimetry)系统(图1(b))对拉索节段模型绕流场进行定量测量, 分析无控和WSLB控制下模型尾部的旋涡脱落过程及尾流模式的动态演化规律. PIV试验中, 示踪粒子为约1 μm 大小的油滴, 照明系统为双脉冲Nd:Yag激光器, 激光能量为425 mJ, 激光波长为532 nm, 激光脉冲重复频率为8 Hz. CCD相机为14位高分辨率双曝光的相机(PCO 1600), 信号延迟发生器(Berkeley Nucleonics, Model 575)通过脉冲信号对激光器和相机实施同步控制. 图像采集完毕后, 对流场图像进行互相关处理即可得到索节段模型尾流场的速度与涡量分布^[18].

基于表面压力测试结果, 无控圆柱和不同工况WSLB控制下圆柱模型的平均与脉动压力系数分布如图2所示. 从图2(a)中可以看出, 对于无控圆柱, 在 $90^\circ \sim 270^\circ$ 之间(背风侧)其压力系数分布存在较宽的平稳

段, 约 $67.5^{\circ}\sim 90^{\circ}$ 之间为逆压力梯度区, 因此圆柱流动的分离点应该在 90° 和 270° 附近. 在主动WSLB控制作用下, 圆柱背风侧的压力“平台”明显上升. 因为圆柱的阻力主要来源于迎风侧和背风侧之间的压力差, 所以在WSLB主动控制作用下圆柱背风侧压力系数的这种改变可有效减小阻力系数.

图2(b)给出了不同工况下脉动(均方根, root mean square, RMS)压力系数分布. 试验中, 来流条件和模型均对称布置在风洞中, 因此脉动压力分布亦表现出良好的对称性. 在无控圆柱的背风面上, 脉动压力分布的幅值较大, 表明很强的脉动风荷载作用在无控圆柱表面上. 这种压力脉动会导致圆柱表面剧烈的非定常气动力变化, 诱发涡激振动. 控制工况中, 圆柱背风侧RMS压力分布显著减小, 表明圆柱模型上的非定常风荷载大幅度降低. 从图中还可以观察到, 随着 C_{μ} 增加,

RMS压力分布逐渐减小, WSLB控制对非定常风荷载的控制效果逐渐增强.

$\overline{C_D}$ 和 C'_L 是衡量作用在索结构上平均风荷载和脉动风荷载的重要参数. 因此, 这两个参数可定量评估WSLB控制方法减少结构风荷载的控制效果, 其结果如图3所示. 对于无控圆柱($C_{\mu}=0$), $\overline{C_D}$ 和 C'_L 分别为1.13和0.36. 当施加WSLB主动控制后, $\overline{C_D}$ 和 C'_L 均出现下降趋势, 表明WSLB主动控制方法可以有效减小作用在圆柱模型上的升、阻力. 同时, 随着 C_{μ} 增加, WSLB流动控制方法对 C'_L 的抑制作用逐渐增强. 当 C_{μ} 达到0.1345时, 升力系数的RMS值降低了78.6%. 此时, 作用在圆柱模型上的脉动升力大幅度减小, WSLB主动流动控制取得良好效果. 另一方面, 当 C_{μ} 较小时, 平均阻力系数随 C_{μ} 增大而减小, 在 $C_{\mu}=0.0796$ 时, WSLB主动控制达到最佳减阻效果(13.68%). 之后, C_{μ} 继续增大,

表 1 不同工况下的吸/吹气流量及系数

Table 1 Suction/blowing flow rates and their corresponding suction/blowing momentum coefficients of different test cases

工况	吸/吹气流量 (L/min)	吸/吹气速度 (m/s)	C_{μ}	工况	吸/吹气流量 (L/min)	吸/吹气速度 (m/s)	C_{μ}
1	0	0	0	8	52.5	11.1405	0.0390
2	7.5	1.5915	0.0008	9	60	12.732	0.0509
3	15	3.1830	0.0032	10	67.5	14.3235	0.0645
4	22.5	4.7745	0.0072	11	75	15.915	0.0796
5	30	6.3660	0.0127	12	82.5	17.5065	0.0963
6	37.5	7.9575	0.0199	13	90	19.098	0.1146
7	45	9.5490	0.0287	14	97.5	20.6895	0.1345

图 2 (网络版彩图)不同等效动量系数 C_{μ} 控制作用下索结构模型表面压力系数分布^[17]. (a) 平均压力系数; (b) 脉动压力系数
Figure 2 (Color online) Surface pressure distributions around the cable structure model controlled with different equivalent momentum coefficients [17]. (a) Mean pressure coefficient and (b) fluctuating pressure coefficient.

平均阻力系数却呈逐渐变大趋势, 表明阻力控制的效果反而开始降低.

采用PIV系统测量得到拉索节段模型在无控和有控条件下的时均尾流场如图4所示. 图4(a)中, 无控时圆柱近尾迹区存在两个沿着中心线($Y=0$)对称的旋涡, 它们的焦点约在 $X=(0.75\sim 0.8)D$. 时均流线在 $X=1.35D$ 位置处发展成接近零的速度, 该点被称为鞍点. 同时, 当圆柱尾流远离壁面并接近最大值时, 尾流中的湍动能(turbulence kinetic energy, TKE)分布逐渐增强. 之后, TKE分布往往会在下游位置处变弱. 与无控圆柱相比, 控制工况(图4(b))中, 主动射流与尾流相互作用下导致尾迹区变宽; 总体TKE分布受到抑制且峰值明显降低. TKE是表征尾流涡动力学特性的重要参数, 也

是圆柱绕流流动的不稳定特征及气动力脉动幅度的指标. WSLB控制的圆柱尾流中的TKE分布显著降低. 这表明, 主动WSLB流动控制方法可以稳定圆柱尾流区并有效抑制作用在结构上的脉动风载荷.

采用POD (proper orthogonal decomposition) 流场重构技术得到无控和有控工况下拉索节段模型的瞬态尾流场结构, 如图5所示. 瞬态涡量等值线图表明无控圆柱的尾流结构为典型的“2S”结构, 一对反对称旋涡从圆柱壁面的两侧交替脱落, 并在尾流中彼此分离. 这种在圆柱尾流中按照一定频率形成的周期性旋涡脱落, 常被称为卡门涡街. 同时, 圆柱表面发生剧烈的压力脉动并产生周期性的非定常气动力. 如果圆柱的结构频率与旋涡脱落频率接近并发生锁定, 则可能会导

图3 (网络版彩图)不同控制工况下索节段模型气动力系数^[17]. (a) 平均阻力系数; (b) 脉动升力系数

Figure 3 (Color online) Aerodynamic coefficients of the sectional cable model at various control cases [17]. (a) Mean drag and (b) fluctuating lift coefficients.

图4 (网络版彩图)PIV系统获得的无控及WSLB控制索结构的时均流场^[17]. (a) 无控状态; (b) $C_\mu=0.1146$ 控制状态

Figure 4 (Color online) Time-averaged flow structures of the baseline and WSLB-controlled cable structures obtained by PIV system [17]. (a) Baseline case and (b) controlled case with $C_\mu=0.1146$.

致涡激振动. 在WSLB控制作用下, 圆柱的近尾迹区形成了一对具有相反旋转方向的对称吹气涡. 这对反向小尺度旋涡阻止了圆柱壁面剪切层的相互作用, 减小了近尾迹区的非定常脉动. 此外, 吹气涡对剪切层的夹带作用导致剪切层尾部发生涡量集中, 旋涡生成区域向下游发展. 在射流涡作用下, 圆柱尾部交替脱落的旋涡被强烈的吹气涡分离成两列近似平行涡, 卡门涡街无法在近壁面形成, 作用在模型上的脉动风荷载受到明显抑制.

2.2 被动吸/吹气流动控制

抑制柔性拉索风致振动的关键是抑制其尾部的周期性旋涡脱落. 在WSLB主动流动控制的研究基础上, 考虑适应不同风攻角的情形, 在圆柱体表面安装中空套环^[1], 在套环的外表面设置等间距分布的气孔, 如图6

所示. 其控制原理是: 气流从迎风侧吹入中空套环内部, 然后从背风侧的气孔吹出, 出气孔吹出的气流与圆柱尾流交替脱落的旋涡相互作用, 抑制或完全消除圆柱尾部的卡门涡街, 从而减小圆柱受到的脉动风荷载作用, 抑制柔性拉索风致振动. 由于套环的气孔是沿着中心对称布置的, 该控制方法可适用于不同方向来流的拉索风效应流动控制.

采用与主动吸/吹气相同的研究方法, 以圆柱节段模型来模拟桥梁工程中的拉索结构. PIV瞬态结果表明, 圆柱后驻点处也出现了明显的射流, 在近尾迹区形成了与顺流向旋涡方向相反的小尺度旋涡, 如图7(a)所示^[19]. 在该小尺度旋涡的作用下, 近尾迹区原本交替脱落的旋涡被拉伸和分离. 从PIV时均流场(图7(b))中可以清楚地观察到尾部吹气孔的射流作用. 在射流作用下, 圆柱尾部回流区变窄, 尾迹区湍动能(TKE)

图5 (网络版彩图)PIV系统获得的无控及WSLB控制索结构的瞬态涡量场^[17]. (a) 无控状态; (b) $C_\mu=0.1146$ 控制状态

Figure 5 (Color online) Instantaneous vorticity fields of the baseline and WSLB-controlled cable structures obtained by PIV system^[17]. (a) Baseline case and (b) controlled case with $C_\mu=0.1146$.

图6 (网络版彩图)适用于桥梁工程的被动吸/吹气控制套环示意图^[1]

Figure 6 (Color online) Schematic of the passive jet control pipe that can be applied in bridge engineering^[1].

分布受到抑制, 流场控制取得良好效果. 可见, 被动套环控制能实现主动WSLB控制作用, 便于进行工程应用.

基于图6的概念设计和图7的流场控制试验结果, 被动吸/吹气套环控制方法已经成功应用于某大跨度桥梁提篮拱吊杆的风致振动控制工程中(如图8所示), 且控制效果显著.

3 大跨度桥梁主梁风效应的流动控制

不同于拉索结构, 桥梁主梁的外形变化较大, 复杂

外形所引起的气动不稳定问题值得重视. 大跨度桥梁由于整体结构的阻尼及刚度较低, 低风速下易发生低模态涡激振动. 2020年5月, 广东虎门大桥发生了多次较大幅值的涡激振动事件, 因此大跨度桥梁的气动特征及控制措施仍需重视并进一步研究.

研究并揭示主梁涡激振动的机理是施加合理气动控制措施的重要依据. 主跨1624 m的丹麦大贝尔特桥主梁为单箱梁结构, 但其宽高比较小, 结构较钝, 来流经过箱梁时, 尾缘存在明显旋涡脱落, 从而诱发明显的涡激振动. Larsen和Poulin^[20]对该桥主梁涡振的尾流涡发展进行研究, 指出下游转角处为上下边界层分离的

图7 (网络版彩图)PIV测试获得的被动吸/吹气控制作用下索结构的瞬态涡量场(a)和时均流线与湍动能分布(b)^[19]

Figure 7 (Color online) Instantaneous vorticity field (a) and time-averaged streamlines and turbulence kinetic energy distribution (b) of the cable structure controlled with passive jet obtained by PIV system [19].

图8 (网络版彩图)应用于某大跨度桥梁吊杆风致振动控制的被动吸/吹气套环装置

Figure 8 (Color online) The passive jet control pipe that is applied to controlling the wind induced vibration of vertical cables of a long-span bridge.

重要位置. 常见单箱梁结构由于功能原因在尾缘风嘴下部会出现较大的死水区, 下脱落涡尺寸要明显大于上脱落涡结构. 因此对于大跨度桥梁箱型主梁, 其尾缘下脱落涡是主要的控制对象.

3.1 主动吸/吹气流动控制

大跨度桥梁由于其体积、能源输入等多种原因, 较少采用主动流动控制方式, 基于流动控制的主动振动控制方法仍处于研究探索阶段. 辛大波等人^[21]在主梁前缘底部设置主动连续吸气装置(图9)进行主梁边界层控制. 前缘分离对桥梁阻力影响较大, 因此该方式可以有效减弱桥梁阻力, 但对升力与扭矩影响不大. Zhang等人^[22]则通过在桥梁尾缘处间隔布置主动吸气孔进行桥梁尾流控制. 该方式改变了桥梁的气动外形, 激发尾流二次不稳定性, 生成Mode-A流向涡, 使得大尺度卡门涡展向相关性减小, 进而减弱桥梁所受气动力的脉动成分, 十分有效地控制了主梁所受静力风效应. 进一步, Zhan等人^[23]对该控制措施进行主梁颤振性能验证, 并表明该方法可以有效提高气动阻尼, 增强桥梁颤振稳定性. 此外, 通过在桥梁主梁上设置安装位置较为灵活的主动翼板^[24]进行桥梁气动控制, 同样是一个较为合理的主动控制方案.

本文提出一种与拉索类似的单箱梁主梁涡振的主动吸/吹气控制方法, 即在主梁前缘处连续吸气, 且在尾缘处连续吹气进行涡振控制(如图9所示). 试验在哈尔滨工业大学大气边界层风洞与浪槽联合实验室的1号闭口回流式风洞(SMC-WT1)中进行. 该试验段腔体为透明有机玻璃制作而成的, 其几何尺寸为505 mm(高)×505 mm(宽)×1050 mm(长). 风洞试验段的来流均

匀, 湍流度低于0.4%. 试验模型以丹麦大贝尔特桥为原型, 几何缩尺比为1:125, 采用高精度的3D打印技术制作而成, 其使用的材料为8000型树脂. 模型展向长度(L)为480 mm, 高度(D)为34.72 mm, 宽度(B)为248 mm(图9(b)). 模型由8根刚性弹簧悬挂于风洞中, 通过自由振动测得竖向和扭转的振动频率分别为7.477和10.834 Hz, 对应的阻尼比分别为0.133%和0.061%. 方形吸/吹气孔的高度为1.5 mm, 展向方向的长度为17.36 mm(图9(c)), 孔口位于单箱梁截面形心高度处. 主动吸/吹气方向与来流平行, 吸/吹气量由质量体积流量计控制, 且速率恒定. 试验中, 同样引入等效吸/吹气动量系数 C_μ 来定义吸/吹气的强度, 其值定为0, 0.0139, 0.0898, 对应吸/吹气流量 Q 分别为0, 15.6和39.6 L/min.

通过激光位移计对单箱梁发生涡激振动时的位移响应进行测量, 不同折算风速对应的单箱梁模型竖向和扭转振动响应如图10所示. 对于竖向涡振, 两种控制工况都表现出较好的控制效果, 其中最佳控制工况 $C_\mu=0.0898$ 使竖向涡振锁定区间内振动响应幅值降低83.8%; 同时, 对于扭转涡振, 该控制方法使得锁定区间内振动响应幅值降低了86.2%. 涡振控制试验表明该主动吸/吹气能有效抑制单箱梁的竖向和扭转涡激振动.

3.2 被动吸/吹气流动控制

被动流动控制方法无需能量输入, 且可灵活布置安装位置, 逐渐成为大跨度桥梁风效应最为主要的控制方式. 大跨度桥梁被动气动控制措施中, 最为常见的控制措施为导流板, 即通过在箱梁转角位置处安装导流部件对涡生成位置进行干扰, 从而使其向下游推

图9 (网络版彩图)主梁主动吸/吹气流动控制措施. (a) 三维示意图; (b) 截面几何信息; (c) 吸/吹气孔尺寸

Figure 9 (Color online) Active jet flow control for main girder. (a) Three-dimensional schematic; (b) geometric scale for section; (c) geometric scale for suction/jet hole.

移并弱化大尺度涡, 起到削弱涡振的目的.

对于服役期间的桥梁主梁, 其附属结构如风障、栏杆、风嘴、检修车道等都对桥梁风致稳定性产生重要影响. 此外, 优化桥梁主梁附属结构以控制结构气动特性同样被视为较为有效的控制方法. 应当指出, 由于不同桥梁外形各异, 在进行主梁风效应控制时, 需要对具体桥梁进行附属构件气动性能优化分析, 进而选择较为合适的控制方法. Li 等人^[25]综合分析桥梁风障、导流板等对主梁涡振的控制效果, 指出检修车道及栏杆极易导致主梁竖向涡振, 并应用展向正弦干扰方法^[26]通过在栏杆间隔附加挡板的方式成功抑制了桥梁竖向涡振. Zhan 等人^[27]以丹麦大贝尔特桥为原型对箱梁两侧栏杆进行波浪型优化进行涡振控制, 指出上

表面转角处为最佳栏杆安装位置, 且波浪型栏杆在波形为 0.5~1 倍梁高时能完全单箱梁控制竖向与扭转涡振.

本文在主梁主动吸/吹气流动控制方法的基础上, 发展主梁风效应的被动吸/吹气流动控制方法, 如图 11 所示. 结合来流情况下大跨度桥梁绕流场变化特点及桥梁表面压力分布情况, 在桥梁表面设置导流通道改变流动干扰位置, 以最大压差情况进行前缘引流, 使得来流通过布置在下底面的孔道流入死水区, 直接影响尾缘绝对不稳定区, 通过干扰及延迟尾流生成, 进而影响到整个绕流场^[28,29]. 试验在哈尔滨工业大学大气边界层风洞与浪槽联合实验室的 SMC-WT2 风洞中进行. 模型缩尺比为 1:60, 质量比 $m^*=159.6$. 由 8 根刚

图 10 (网络版彩图)无控与主动吸/吹气控制工况下涡振响应. (a) 竖向涡振响应; (b) 扭转涡振响应

Figure 10 (Color online) Vortex-induced vibration (VIV) response for uncontrolled and controlled cases. (a) Vertical VIV response and (b) torsional VIV response.

图 11 (网络版彩图)被动吸/吹气孔道及流场测量设置示意图^[28]

Figure 11 (Color online) Layout of passive suction/jet channels and flow field measurement^[28].

图 12 (网络版彩图)不同控制工况下,主梁位移响应(a)及尾流能量谱密度(b)随折算风速变化情况^[29]

Figure 12 (Color online) Amplitude of displacement (a) and power spectra density of normalized vortex-shedding (b) versus reduced velocity for different control cases [29].

性弹簧模拟振动系统,并通过自由衰减法测得模型竖向及扭转频率分别为7.36和9.51 Hz,对应阻尼比均为0.1%.

通过风洞试验验证该流动控制方法对单箱梁桥梁涡激振动的控制效果,主梁竖向与扭转响应在不同折算风速下的变化规律如图12(a)所示.结果表明,被动吸/吹气流动控制方法可完全抑制桥梁竖向涡激振动;对于扭转涡振,其控制效果达到45.5%,并且扭转涡振锁定区间3.2~3.9缩减至3.1~3.5.针对主梁发生涡振全过程中尾流变化,采用热线系统获得尾流速度变化并对其进行频域分析,如图12(b)所示.无控工况尾流频谱结果如图12(b)左侧子图所示,竖向与扭转锁定区间较为清晰,并且通过不同折算风速下的功率谱密度分布得到 $St=0.28$;当采用被动吸/吹气引流的方式进行涡振控制,相同折算风速下功率谱密度大幅度减小,竖向涡振锁定区间消失,且 St 数增加至0.33. St 数的变化表明桥梁气动外形发生较大的改变,且尾流脱落涡所携带能量减小,大大减弱了主梁与尾流之间的流固耦合作用.

采用PIV系统对主梁尾缘处流场进行定量分析,一个振动周期内尾流涡变化如图13所示.其中图13(a)

表明吸/吹气位置处竖向流场变化情况,最低位置处的吹气孔出现明显的射流现象,且在射流上游处出现较为稳定的附着涡.该涡处于射流孔与桥梁下转角之间,并不发生脱落现象,因此起到减小该处表面气压脉动变化,延迟下缘边界层脱落作用.在被动吹气的作用下,主梁尾缘死水区尾流结构发生较大改变,尾流脱落旋涡的生成及发展位置由桥梁下缘转角推迟至射流下游处,进而大大减弱了其脉动特性对桥梁主梁结构的影响.图13(b)表明射流位置展向流场漩涡强度空间分布云图.展向结果表明间隔布置的吸/吹气孔出现的射流现象,激发尾迹区出现交替分布的流向涡结构;从涡距及空间分布特征可知,该情况下,被动吹气破坏大尺度卡门涡的展向相关性,同时激发尾流二次不稳定性生成Mode-B流向涡,改变尾流拓扑结构,有效抑制桥梁主梁的竖向涡振,并大幅度减弱扭转涡振响应.

4 结论

针对大跨度桥梁风效应,本文基于涡动力学,分别提出主、被动吸/吹气流动控制方法,抑制主梁及拉吊

图 13 (网络版彩图)一个振动周期内,被动吹气作用下主梁尾部竖向流线(a)及展向涡量云图(b)^[28,29]

Figure 13 (Color online) Evolution of wake vortex shedding at each phase in a vibration period for the main deck under self-issuing jets: (a) streamlines; (b) swirling strength contours [28,29].

索结构尾部的周期性旋涡脱落,达到风振控制目的. 本文主要研究结论如下.

主动WSLB流动控制方法可以有效抑制拉索近尾迹区中的旋涡脱落. WSLB在结构尾部形成一对具有相反旋转方向的对称吹气涡,阻止壁面剪切层的相互作用,减小近尾迹区的非定常脉动,抑制脉动风荷载.

基于WSLB方法发展的被动吸/吹气套环控制方法取得了主动WSLB流动控制相近的控制效果,且更适

合于不同来流风偏角下的实际工程应用. 被动吸/吹气套环控制方法已经成功应用于某大跨度桥梁提篮拱吊杆的风振控制.

对于大跨度桥梁的主梁结构,采用基于前缘吸气、尾缘吹气的主、被动流动控制方法可以有效抑制其尾迹区的非定常旋涡脱落,有效减小主梁断面的竖向及扭转涡激振动响应. 该流动控制方法具有良好的工程应用前景.

参考文献

- Gao D L. Mechanism of complex wind-induced-vibrations of cable structures of long-span bridges and flow control (in Chinese). Dissertation for Doctoral Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. 1–2 [高东来. 大跨度桥梁柔性索结构的复杂风致振动机理与流动控制. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. 1–2]
- Jahanmiri M. Active flow control: A review. Technical Report. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2010
- Chen W L, Xin D B, Xu F, et al. Suppression of vortex-induced vibration of a circular cylinder using suction-based flow control. *J Fluids Struct*, 2013, 42: 25–39
- Chen W L, Li H, Hu H. An experimental study on a suction flow control method to reduce the unsteadiness of the wind loads acting on a circular cylinder. *Exp Fluids*, 2014, 55: 1707
- Gao D, Chen G, Chen W, et al. Effects of steady wake-jets on subcritical cylinder flow. *Exp Thermal Fluid Sci*, 2019, 102: 575–588

- 6 Feng L H, Wang J J, Pan C. Effect of novel synthetic jet on wake vortex shedding modes of a circular cylinder. *J Fluids Struct*, 2010, 26: 900–917
- 7 Feng L H, Wang J J. Circular cylinder vortex-synchronization control with a synthetic jet positioned at the rear stagnation point. *J Fluid Mech*, 2010, 662: 232–259
- 8 Feng L H, Wang J J. Synthetic jet control of separation in the flow over a circular cylinder. *Exp Fluids*, 2012, 53: 467–480
- 9 Benard N, Moreau E. Response of a circular cylinder wake to a symmetric actuation by non-thermal plasma discharges. *Exp Fluids*, 2013, 54: 1467
- 10 Wong K W L, Zhao J, Jacono D L, et al. Experimental investigation of flow-induced vibration of a rotating circular cylinder. *J Fluid Mech*, 2017, 829: 486–511
- 11 Chan A S, Dewey P A, Jameson A, et al. Vortex suppression and drag reduction in the wake of counter-rotating cylinders. *J Fluid Mech*, 2011, 679: 343–382
- 12 Posdziech O, Grundmann R. Electromagnetic control of seawater flow around circular cylinders. *Eur J Mech - B/Fluids*, 2001, 20: 255–274
- 13 Lecordier J C, Hamma L, Paranthoen P. The control of vortex shedding behind heated circular cylinders at low Reynolds numbers. *Exp Fluids*, 1991, 10: 224–229
- 14 Larsen S V, Smitt L W, Gjelstrup H, et al. Investigation of vortex-induced motion at high Reynolds numbers using large scale section model. In: *Proceedings of the 5th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications*. Ottawa, 2004. 273–276
- 15 Xu F Y, Lin Z X, Li Y N, et al. Vortex resonance depression mechanism of a bridge deck with aerodynamic measures (in Chinese). *J Vib Shock*, 2010, 29: 73–76 [许福友, 林志兴, 李永宁, 等. 气动措施抑制桥梁涡振机理研究. *振动与冲击*, 2010, 29: 73–76]
- 16 Xin D, Zhang H, Ou J. Experimental study on mitigating vortex-induced vibration of a bridge by using passive vortex generators. *J Wind Eng Industrial Aerodyn*, 2018, 175: 100–110
- 17 Gao D, Chen G, Chen W, et al. Active control of circular cylinder flow with windward suction and leeward blowing. *Exp Fluids*, 2019, 60: 26
- 18 Chen W L, Li H. Multi-dimensional velocity recognition software v1.0 for structural displacement and flow field based on machine vision V1.0. 2020SR0136057, 2019.10.18 [陈文礼, 李惠. 基于机器视觉的结构位移与流场多维速度识别软件V1.0. 2020SR0136057, 2019.10.18]
- 19 Chen W L, Gao D L, Yuan W Y, et al. Passive jet control of flow around a circular cylinder. *Exp Fluids*, 2015, 56: 201
- 20 Larsen A, Poulin S. Vortex-shedding excitation of box-girder bridges and mitigation. *Struct Eng Int*, 2005, 15: 258–263
- 21 Xin D B, Ou J P. Numerical investigation in improving aerodynamic performances of drag force of cross section for bridge box girders by steady air suction (in Chinese). *J Shengyang Jianzhu Univ Nat Sci*, 2008, 24: 1–5 [辛大波, 欧进萍. 定常吸气改善桥梁断面风致静力特性的数值. *沈阳建筑大学学报*, 2008, 24: 1–5]
- 22 Zhang H F, Xin D B, Ou J P. Wake control of vortex shedding based on spanwise suction of a bridge section model using delayed detached eddy simulation. *J Wind Eng Industrial Aerodyn*, 2016, 155: 100–114
- 23 Zhan J, Zhang H, Liu Z, et al. Steady-suction-based flow control of flutter of long-span bridge. *Appl Sci*, 2020, 10: 1372
- 24 Li K, Ge Y J, Zhao L. An active vibration suppression method for the flutter of long-span suspension bridges based on posture-adjustable aerodynamic winglets (in Chinese). *China Civil Eng J*, 2019, 52: 93–103 [李珂, 葛耀君, 赵林. 基于可调姿态气动翼板的大跨度悬索桥颤振主动抑振方法. *土木工程学报*, 2019, 52: 93–103]
- 25 Li M, Sun Y, Jing H, et al. Vortex-induced vibration optimization of a wide streamline box girder by wind tunnel test. *KSCE J Civ Eng*, 2018, 22: 5143–5153
- 26 El-Gammal M, Hangan H, King P. Control of vortex shedding-induced effects in a sectional bridge model by spanwise perturbation method. *J Wind Eng Industrial Aerodyn*, 2007, 95: 663–678
- 27 Zhan J, Xin D, Ou J, et al. Experimental study on suppressing vortex-induced vibration of a long-span bridge by installing the wavy railings. *J Wind Eng Industrial Aerodyn*, 2020, 202: 104205
- 28 Chen W L, Yang W H, Li H. Self-issuing jets for suppression of vortex-induced vibration of a single box girder. *J Fluids Struct*, 2019, 86: 213–235
- 29 Yang W H, Chen W L, Li H. Suppression of vortex-induced vibration of single-box girder with various angles of attack by self-issuing jet method. *J Fluids Struct*, 2020, 96: 103017

Vortex dynamics-based flow control of wind effects on long-span bridges

GAO DongLai^{1,2}, CHEN WenLi^{1,2}, YANG WenHan^{1,2}, CHEN GuanBin^{1,2} & LI Hui^{1,2}

¹ Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters of the Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

² Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

Main girders and cable structures are critical components of long-span bridges and usually have relatively low stiffness and damping ratios. When they are subjected to incoming wind, periodic vortex shedding develops near the wake and causes wind- and vortex-induced vibration. Wind-induced vibration can lead to severe problems such as fatigue and corrosion, which can affect the bridge operation safety. Therefore, developing control methods for wind-induced vibration in long-span bridges will enrich the aerodynamics theory of large-span bridges and has important scientific significance and engineering value. The present study employs steady active/passive suction and blowing methods based on vortex dynamics to attenuate the periodic vortex shedding in the wake region of main girders and cable structures. The results indicate successful suppression of unsteady aerodynamic forces and mitigation of wind-induced vibration.

long-span bridges, wind induced vibrations, vortex dynamics, flow control

doi: [10.1360/SST-2020-0374](https://doi.org/10.1360/SST-2020-0374)