DOI：10.11835/j.issn.2096-6717.2021.203

桥梁风工程 2020 年度研究进展

廖海黎[a,b]，李明水[b]，马存明[a,b]，王骑[a,b]，孙延国[a,b]，周强[b]
（西南交通大学 a.桥梁工程系；b.风工程四川省重点实验室，成都 610044）

摘　要：随着土耳其恰纳卡莱大桥、中国张皋过江通道以及西堠门公铁两用大桥等超大跨度桥梁的建造，桥梁风工程研究面临新的挑战。继 2019 年研究进展后，聚焦桥梁颤振、桥梁涡激振动和桥梁抖振等桥梁抗风设计关键问题，通过对风工程领域主流学术期刊论文的梳理，介绍和评述了 2020 年以来相关领域主要研究进展。

关键词：桥梁抗风；颤振；抖振；涡激共振
中图分类号：U441　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：2096-6717(2022)01-0023-08

State-of-the-art review of bridge wind engineering in 2020

LIAO Haili[a,b], *LI Mingshui*[b], *MA Cunming*[a,b], *WANG Qi*[a,b], *SUN Yanguo*[a,b], *ZHOU Qiang*[b]
(a. Department of Bridge Engineering; b. Key Laboratory for Wind Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610044, P. R. China)

Abstract: With the construction of super-long span bridges, such as the Canakkale 1915 Bridge in Turkey, the Zhanggao River-crossing Corridor and the Xihoumen Highway-Railway Bridge in China, the wind engineering research of bridges is facing new challenges. Following the research progress of the previous year, this paper focuses on the key problems of bridge wind engineering, including bridge flutter, vortex-induced vibration and buffeting. Through sorting out the literatures of main academic journals in the field of wind engineering, the state-of-the-art focusing on the main aspects of wind-resistant of long-span bridges in 2020 was reviewed and discussed.

Keywords: wind-resistance of bridge; flutter; buffeting; vortex-induce vibration

桥梁风工程的主要研究内容是大跨度桥梁的风致振动、抗风安全性及舒适性。随着土耳其恰纳卡莱大桥(主跨 2 023 m 悬索桥)、我国张皋过江通道(主跨 2 300 m悬索桥，如图 1 所示)、西堠门公铁两用大桥(主跨 1 488 m吊拉协作体系桥，如图 2 所示)等超大跨度桥梁的建造，桥梁风工程研究面临新的挑战。如何确保超大跨度桥梁的抗风稳定性，同时规避危害行车的涡激振动？如何更为准确地把握风荷载？面对这些桥梁设计中迫切需要解决的实际问题，需要桥梁风工程研究者在抗风计算理论和抑振技术上不断创新。

继《桥梁风工程 2019 年度研究进展》发布以后，笔者聚焦桥梁颤振、桥梁涡激振动和桥梁抖振等桥梁抗风设计关键问题，通过对 2020 年本领域相关主流期刊，包括 *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, *Journal of Fluids and Structures*, *Journal of Sound and Vibration*, *Computers and Structures*, *Engineering Structures*, *Wind and Structures*、《土木工程学报》《中国公路学报》《振动与冲击》等论文的检索，简要评述桥梁风工程领域的研究动态及发展趋势。

图 1　张皋过江通道南汊悬索桥
(效果图，中交公路规划设计院有限公司提供)

收稿日期：2021-07-14
作者简介：廖海黎(1956-)，男，教授，博士生导师，主要从事大跨度桥梁抗风理论及工程应用、结构风致振动控制、桥梁风洞试验技术研究，E-mail：hlliao@swjtu.edu.cn。

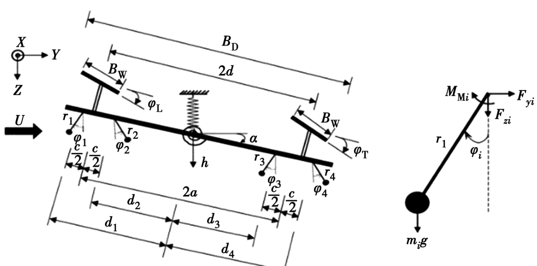
图2 西堠门公铁两用大桥

(效果图,中铁大桥勘测设计院集团有限公司提供)

1 大跨度桥梁颤振研究

2020年关于大跨度桥梁颤振的研究进展主要包括:大跨度桥梁颤振性能的提升措施;非线性颤振的研究;传统颤振的精细化计算。

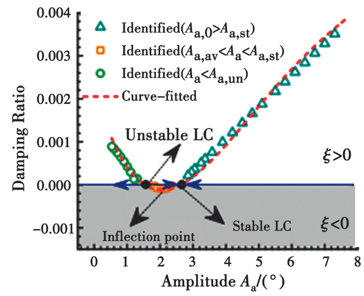
在颤振性能提升措施的研究方面,Sangalli等[1]采用二维LES模型,提出了一种流固耦合模型,并在此基础上开展了带分离式主动翼板的流线型箱梁颤振控制研究。Zhuo等[2]研究了主动结合式气动翼板对提升流线型箱梁颤振性能的影响。Bera等[3]提出了一种基于梁体内旋转质量阻尼器和梁外分离式气动翼板相结合的颤振性能提升措施(图3)。雷永富等[4]以杨泗港长江大桥为背景,研究了上下桥面中央稳定板和水平翼板对提升颤振性能的有利作用。董佳惠等[5]研究了边箱钢-混叠合梁的颤振特性,并发现中央稳定板对于提高其颤振临界风速作用有限,而水平导流板与裙板组合气动措施的提升作用效果明显。郭俊杰等[6]研究了不同形式下的稳定板对某桁架梁悬索桥颤振性能的影响,发现分离式竖向稳定板效果最好。Bai等[7]基于风洞试验提出了一种可提升倒梯形箱梁断面颤振和涡振性能的封闭防撞栏杆。Sun等[8]研究了某超大跨度双层桁架梁悬索桥的颤振性能和提升颤振临界风速的措施。Mei等[9]研究了不同高度中央稳定板对提升流线型箱梁颤振性能作用和机理。



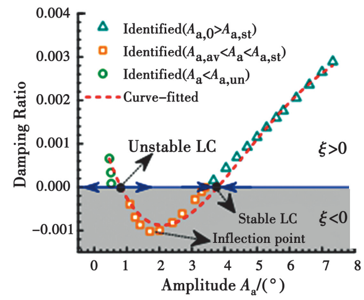
(a) (b)

图3 结合梁内旋转质量阻尼器和梁外分离式气动翼板的组合措施示意图[3]

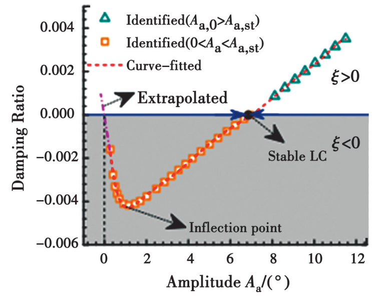
在非线性颤振计算方法的研究方面,Li等[10]基于长短期记忆神经网络,提出了一种描述不同断面非线性自激力的模型,并开展了极限环振动的预测。Gao等[11]提出了一种能够表述二维耦合颤振的非线性气动力模型,并开展了非线性颤振预测研究。Zhang等[12]开展了颤振后计算并提出了一种量化桥梁颤振后性能的评估方法。Wu等[13]研究了竖向运动对桁架梁断面软颤振性能的影响。Yuan等[14]研究了不同外界激励引起的初始条件对二维矩形断面非线性颤振的影响。Wu等[15]研究了某桁架梁非线性颤振中出现的迟滞环效应,并对其机理进行了解释(图4)。Zhou等[16]研究了不同紊流条件下竖向稳定板对闭口箱梁非线性颤振的影响。Li等[17]提出了利用深度长短周期网络的降阶模型描述桥梁非定常气动力的方法。Wang等[18]提出了可用于颤振和涡振过程中非线性气动力描述的振幅依存性模型。Zhang等[19]提出了用于桥梁非线性气动力的描述函数模型和量化颤振后性能的颤振后因子。Zhu等[20]综述了大跨度桥梁非线性颤振的研究进展、未来应用和研究挑战(图5)。



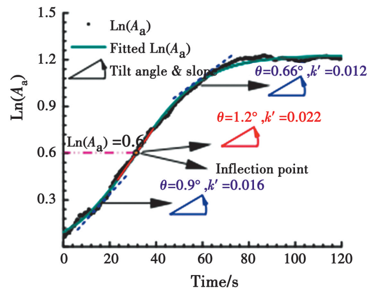
(a) U=5.16 m/s



(b) U=5.54 m/s



(c) U=6.68 m/s



(d) Logarithmic amplitude of Fig.6 (b) with initial amplitude $A_{a,un}<A_{a,0}<A_{a,st}$

图4 桁架梁总阻尼比(含非线性气动阻尼)随扭转幅度而变化情况[15]

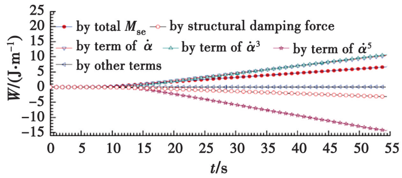
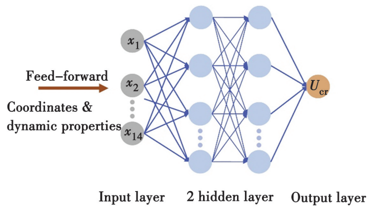


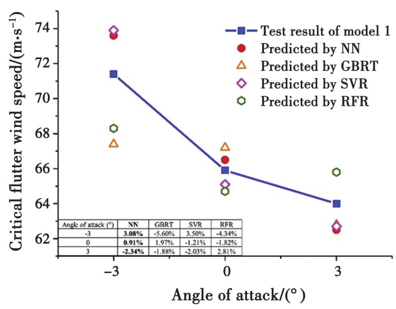
图 5　颤振后过程中非线性气动力矩不同谐波分量做功的时间历程[20]

在颤振精细化计算和颤振风速预测的研究方面，张新军等[21]通过某悬索桥施工阶段的颤振精细化计算，指出静风效应和风速空间非对称分布因素对颤振稳定性影响较大，应充分考虑。Chen 等[22]在现有的 SBS 颤振分析理论基础上，提出了一种表述更加简洁的修正 SBS 分析方法。Lin 等[23]基于 Lighthill 气动力模型提出了一种可用于大跨度桥梁初步设计阶段的颤振计算方法，并基于风洞试验进行了验证。Tao 等[24]开展了桥塔刚度和主缆矢跨比对四塔悬索桥颤振临界风速的影响研究。

综上可见，由于颤振是制约桥梁向更大跨度发展的首要因素，业界对颤振性能提升的研究持续活跃，非线性颤振计算理论及设计准则的研究则成为近年的新热点。由于传统颤振计算理论已趋于成熟，计算精细化的研究主要围绕如何更细致地考虑各种影响因素而开展。除了上述三个方面之外，一些学者在桥梁颤振的不确定分析方面也开展了相关研究。如 Fang 等[25]研究了试验中颤振导数的不确定性及其在颤振计算可靠度中的应用。Ji 等[26]开展了气动力和结构不确定性条件下桥梁颤振的可靠度研究。这些研究有助于发展基于可靠度的抗风设计方法。还有学者基于机器学习方法开展了颤振临界风速的预测工作，如 Rizzo 等[27]提出了一种基于神经网络的颤振临界风速预测方法；Abbas 等[28]提出了一种利用人工神经网络预测颤振风速的方法；Liao 等[29]采用 4 种机器学习方法（包含人工神经网络）开展了任意气动外形的流线型箱梁颤振临界风速的预测研究并取得了较好的结果，如图 6 所示。这些研究成果表明，人工智能技术应用于解决桥梁颤振复杂问题具有光明前景。



(a)神经网络结构



(b)不同方法获得颤振临界风速的比较

图 6　神经网络模型结构及不同方法预测颤振临界风速的对比

2　大跨度桥梁涡振研究

桥梁主梁涡激振动的主要危害在于影响行车舒适性及行车安全性，桥梁构件的涡激振动则会导致结构疲劳，因而桥梁涡激振动一直是桥梁风工程的研究重点。2020 年上半年，虎门大桥等大跨度桥梁涡激振动事件进一步推升了桥梁涡激振动研究的热度。本年度桥梁涡振方面的研究进展主要集中在两方面：涡激振动理论模型；主梁及其他桥梁构件的涡振特性和涡振控制。

在涡振理论模型方面，诸多学者从气动阻尼的角度着手建立涡振分析模型。Zhang 等[30]针对涡振研究中常见的 5 种气动阻尼模型，利用二维矩形断面和三维气弹圆柱对比分析了各模型的精度及适用范围（图 7）。Gao 等[31]指出了扭转涡振和软颤振具有相同的非线性阻尼机理，并将用于颤振分析的非线性自激力模型进一步扩展至解释扭转涡振问题。Wang 等[18]提出了一种可描述涡振和耦合颤振的非线性自激力模型。Noguchi 等[32]提出了在 CFD 中利用强迫振动识别颤振导数，进而计算涡振振幅的方法。Xu 等[33]对比分析了几种单自由度涡激力经验模型的精度，指出对模型中气动阻尼项的模拟越准确，对涡振的预测精度也越高。此外，Pagnini 等[34]提出了基于 Scruton 数计算涡振锁定区间及振幅的简化频域分析方法。

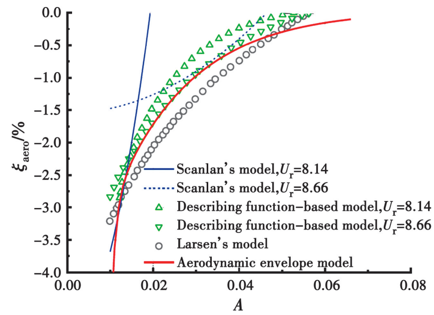
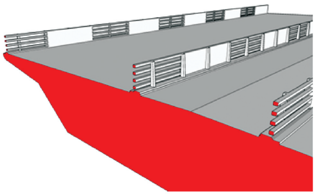


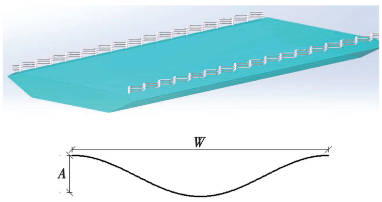
图 7　基于不同涡振模型的气动阻尼[30]

在主梁的涡振特性及涡振控制方面，潘韬等[35]研究了分体式三箱梁涡振性能及抑振措施。马凯等[36]研究了双幅5∶1矩形断面的涡振性能。温青等[37]研究了节段模型端部边界条件及长宽比对涡激振动的影响等，优化了用于高阶模态涡振试验的多点弹性支撑梁气弹模型试验方法[38]。Cao 等[39]改进了某大跨度悬索桥的动态监测系统，提出了涡激振动舒适性分级预警机制，并通过实测数据分析了涡振识别及预测系统的精度。Bai 等[40]研究了不同宽高比的 π 型叠合梁的涡振性能，对比了风嘴、L 型裙板等气动措施的抑振效率。Zhang 等[41]研究了箱型边主梁叠合梁桥的涡振性能，提出了微型三角形风嘴气动措施。Bai 等[7]提出了按照不同的规则封闭栏杆来提高大跨度桥梁颤振和涡振性能的气动措施（图 8(a)）。Zhan 等[42]利用波浪形栏杆对尾流造成的三维扰动来抑制主梁涡振（图 8(b)）。胡传新等[43]研究了栏杆抑流板抑制流线型箱梁涡激振动的机理。Yang 等[44]进一步研究了自喷流装置在不同风攻角下对主梁涡振的抑制效果。王修勇等[45]研究了单面碰撞调谐质量阻尼器（SS-PTMD）抑制主

梁涡激振动的方法。Dai 等[46]用等效阻尼比来表征 TMD 对涡振抑制的贡献,并通过鲁棒性分析发现自由振动设计方法的失效概率最小。对于斜拉索等构件,Liu 等[47]指出实际桥梁的斜拉索均呈微椭圆形,并通过风洞试验研究了微椭圆斜拉索的气动性能。刘宗杰等[48]基于现场监测数据分析了某跨长江特大桥拉索涡激振动问题。Chen 等[49]通过表面测压试验分析了自喷流装置对圆柱涡激振动的影响。陈东阳等[50]基于尾流振子模型和遗传算法,引入非线性能量阱(NES)减振装置,建立了用于抑制柱体结构涡激振动的仿真模型。Alvarez 等[51]在考虑分体双箱梁三维特性的基础上,采用 LES 方法对其气动特性和涡振性能进行了数值模拟研究。Shang 等[52]采用 DDES 模型研究了分体双箱梁的气动特性和涡振性能,并分析了其尾流结构,以揭示间距对断面气动特性的影响机理(图 9)。Noguchi 等[32]采用强迫振动方法识别闭口钢箱梁断面气动导数,分析了气动阻尼特性,在此基础上采用解析方法预测了断面的涡振振幅。



(a)部分封闭防撞栏杆抑振措施示意图[7]



(b)弧形栏杆抑振措施示意图[42]

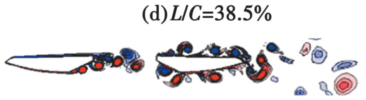
图 8　控制涡振的栏杆措施

(a)L/C=5.1%

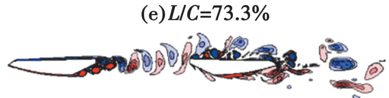
(b)L/C=12.8%

(c)L/C=25.6%

(d)L/C=38.5%



(e)L/C=73.3%



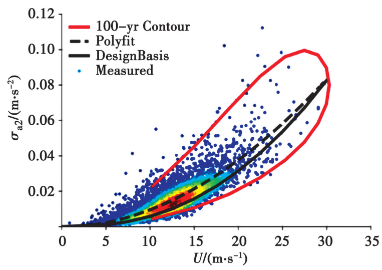
(f)L/C=102.8%

图 9　不同间距下分体双箱梁周围的瞬时涡量场[52]

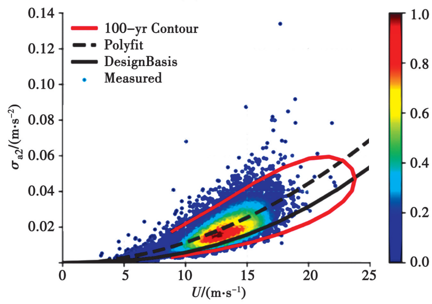
3　大跨度桥梁抖振研究

2020 年关于大跨度桥梁抖振的研究进展主要包括:桥梁主梁抖振响应精细化分析;极端及特异风场中的桥梁抖振响应预测。

关于抖振响应精细化分析,Lystad 等[53]提出了一种用于考虑湍流不确定性对桥梁抖振响应影响的概率模型(图 10)。Diana 等[54]通过时域抖振分析研究了作用于桥梁主梁气动力的非线性效应。Solari 等[55-56]基于本征正交分解法给出了细长结构在任意振型下气动导纳的一般形式闭合解。Liu 等[57]以太洪长江大桥为例,对抖振引起的桥梁主梁应力及疲劳破坏进行了研究。Wang 等[58]利用风洞试验研究了具有不同开槽宽度双箱梁的气动导纳及抖振力相关性。Zhou 等[59]考察了典型桥梁断面的抖振力在不同格栅湍流场中的相关性。沈正峰等[60]研究了气动力沿展向变化条件下不同槽宽比双箱梁的抖振响应特性。Jian 等[61]通过风洞试验研究了斜风作用及桥塔干扰条件下大跨度斜拉桥施工期的主梁抖振响应。雷永富等[62]通过风洞试验对宽幅混合梁斜拉桥的抖振性能进行了研究。向丹等[63]基于主动格栅脉动流场研究了典型钝体断面的抖振力及其相关性。



(a)西风向



(b)东风向

图 10　考虑湍流不确定性对桥梁抖振响应影响的概率模型

关于极端及特异风场下的桥梁抖振响应预测,Tao 等[64]针对以时变台风谱和相干性为输入条件的桥梁抖振响应进行了深入分析。Shen 等[65]研究了位于喇叭口形状峡谷中不同来流风向下的桥梁抖振响应。Wu 等[66]提出了一种适用于山地城市大跨度桥梁的抖振时域分析方法。Yan 等[67]通过现场实测研究了台风作用下大跨度桥梁施工期主梁的抖振响应。除以上两个方面外,一些学者在桥梁抖振设计及振动控制方面取得了新的进展。Cid Montoya 等[68]提出了一种同时兼顾桥梁主梁结构特性和气动特性的数值分析方法,如图 11 所示。Phan[69]通过数值分析和风洞试验研究了气动

翼板对桥梁抖振和颤振的控制作用。Yan 等[70]通过设置斜向抗风缆对施工期斜拉桥的竖向和扭转抖振响应进行控制，并取得了良好的抑振效果。

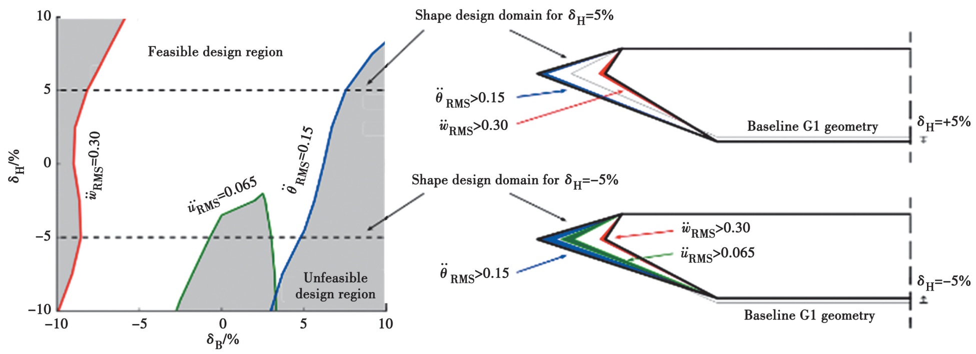


图 11　基于最大加速度根方差的可行设计域的定义[68]

4　研究热点与展望

1)随着超大跨度桥梁设计建造的推进，建立表征各类风致振动的非线性气动力模型(多聚焦于非线性气动阻尼)和分析方法、从流动特性深入探究流-固耦合作用机理是桥梁风工程领域的重点研究内容。同时，还需创新更为经济有效的风振控制技术、气动性能优良的桥梁外形及结构形式等，以适应超大跨度桥梁的发展。

2)随着人工智能技术的发展，基于数据驱动思路的桥梁风工程与人工智能的交叉研究成为本领域的热点。

3)目前下击暴流、龙卷风等特异风场的特性及其对桥梁结构作用的研究还较少，亟待进一步深入研究，进而丰富、完善桥梁抗风设计理论。

参考文献：

[1] SANGALLI L A, BRAUN A L. A fluid-structure interaction model for numerical simulation of bridge flutter using sectional models with active control devices. Preliminary results [J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 477: 115338.

[2] ZHUO L J, LIAO H L, LI M S. Flutter control of a streamlined box girder with active flaps [J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27(5/6): 662-674.

[3] BERA K K, CHANDIRAMANI N K. Aeroelastic flutter control of a bridge using rotating mass dampers and winglets [J]. Journal of Vibration and Control, 2020, 26(23/24): 2185-2192.

[4] 雷永富，李明，孙延国. 大跨度双层桁架梁悬索桥颤振性能试验研究[J/OL]. 西南交通大学学报，https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1277.U.20201111.1415.004.html

[5] 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.

[6] 郭俊杰，唐浩俊，李永乐，等. 下稳定板形式对兴康特大桥颤振性能的影响[J]. 振动与冲击，2020，39(19)：19-25.

[7] BAI H, JI N C, XU G J, et al. An alternative aerodynamic mitigation measure for improving bridge flutter and vortex induced vibration (VIV) stability: Sealed traffic barrier [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 206: 104302.

[8] SUN Y G, LEI Y F, LI M, et al. Flutter mitigation of a superlong-span suspension bridge with a double-deck truss girder through wind tunnel tests [J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27(13/14): 1584-1594.

[9] MEI H Y, WANG Q, LIAO H L, et al. Improvement of flutter performance of a streamlined box girder by using an upper central stabilizer [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(8): 04020053.

[10] LI W J, LAIMA S J, JIN X W, et al. A novel long short-term memory neural-network-based self-excited force model of limit cycle oscillations of nonlinear flutter for various aerodynamic configurations [J]. Nonlinear Dynamics, 2020, 100(3): 2071-2087.

[11] GAO G Z, ZHU L D, LI J W, et al. A novel two-degree-of-freedom model of nonlinear self-excited force for coupled flutter instability of bridge decks [J]. Journal of Sound and Vibration, 2020, 480: 115406.

[12] ZHANG M J, XU F Y, HAN Y. Assessment of wind-induced nonlinear post-critical performance of bridge decks [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 203: 104251.

[13] WU B, WANG Q, LIAO H L, et al. Effects of vertical motion on nonlinear flutter of a bridge girder [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(11): 04020093.

[14] YUAN W Y, LAIMA S J, CHEN W L, et al. External excitation effects on the flutter characteristics of a 2-DOF rigid rectangular panel [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021,

209: 104486.

[15] WU B, WANG Q, LIAO H L, et al. Hysteresis response of nonlinear flutter of a truss girder: Experimental investigations and theoretical predictions [J]. Computers & Structures, 2020, 238: 106267.

[16] ZHOU R, GE Y J, LIU S Y, et al. Nonlinear flutter control of a long-span closed-box girder bridge with vertical stabilizers subjected to various turbulence flows [J]. Thin-Walled Structures, 2020, 149: 106245.

[17] LI T, WU T, LIU Z. Nonlinear unsteady bridge aerodynamics: Reduced-order modeling based on deep LSTM networks [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 198: 104116.

[18] WANG Y F, CHEN X Z, LI Y L. Nonlinear self-excited forces and aerodynamic damping associated with vortex-induced vibration and flutter of long span bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 204: 104207.

[19] ZHANG M J, XU F Y, WU T, et al. Postflutter analysis of bridge decks using aerodynamic-describing functions [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25 (8): 04020046.

[20] ZHU L D, GAO G Z, ZHU Q. Recent advances, future application and challenges in nonlinear flutter theory of long span bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 206: 104307.

[21] 张新军，周于群，李旭民. 大跨度悬索桥施工阶段三维颤振精细化分析[J]. 浙江工业大学学报，2020，48(2)：227-236.

[22] CHEN G F, LI H, ZHANG Y Z. A new alternative revised step-by-step flutter analysis [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 196: 104027.

[23] LIN K, WEI M H, LIU H J, et al. A predictive critical flutter wind speed modeling for long-span bridges [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(9): 1823-1837.

[24] TAO T Y, WANG H, GAO Y Q. Parametric analysis on flutter performance of a long-span quadruple-tower suspension bridge [J]. Structures, 2020, 28: 1108-1118.

[25] FANG G S, CAO J X, YANG Y X, et al. Experimental uncertainty quantification of flutter derivatives for a PK section girder and its application on probabilistic flutter analysis [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(7): 04020034.

[26] JI X W, HUANG G Q, ZHAO Y G. Probabilistic flutter analysis of bridge considering aerodynamic and structural parameter uncertainties [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 201: 104168.

[27] RIZZO F, CARACOGLIA L. Artificial Neural Network model to predict the flutter velocity of suspension bridges [J]. Computers & Structures, 2020, 233: 106236.

[28] ABBAS T, KAVRAKOV I, MORGENTHAL G, et al. Prediction of aeroelastic response of bridge decks using artificial neural networks [J]. Computers & Structures, 2020, 231: 106198.

[29] LIAO H L, MEI H Y, HU G, et al. Machine learning strategy for predicting flutter performance of streamlined box girders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 209: 104493.

[30] ZHANG M J, XU F Y, ØISETH O. Aerodynamic damping models for vortex-induced vibration of a rectangular 4 : 1 cylinder: Comparison of modeling schemes [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 205: 104321.

[31] GAO G Z, ZHU L D, LI J W, et al. Application of a new empirical model of nonlinear self-excited force to torsional vortex-induced vibration and nonlinear flutter of bluff bridge sections [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 205: 104313.

[32] NOGUCHI K, ITO Y, YAGI T. Numerical evaluation of vortex-induced vibration amplitude of a box girder bridge using forced oscillation method [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 196: 104029.

[33] XU K, GE Y J, ZHAO L. Quantitative evaluation of empirical models of vortex-induced vibration of bridge decks through sectional model wind tunnel testing [J]. Engineering Structures, 2020, 219: 110860.

[34] PAGNINI L C, PICCARDO G, SOLARI G. VIV regimes and simplified solutions by the spectral model description [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 198: 104100.

[35] 潘韬，肖海珠，赵林，等. 大跨度桥梁超宽分体三箱梁抗风性能及控制措施研究[J]. 桥梁建设，2020，50(Sup2)：29-35.

[36] 马凯，胡传新，周志勇. 不同约束情况下双矩形断面的涡振性能分析[J]. 振动与冲击，2020，39(10)：141-147，205.

[37] 温青，华旭刚，池俊豪，等. 端部条件和长宽比对矩形

断面节段模型涡激振动的影响[J]. 振动工程学报，2020，33(4)：653-659.
[38] 温青，华旭刚，陈政清，等. 一种高阶模态涡振试验新气弹模型的模型参数优化设计[J]. 振动与冲击，2020，39(15)：103-108.
[39] CAO S G，ZHANG Y，TIAN H，et al. Drive comfort and safety evaluation for vortex-induced vibration of a suspension bridge based on monitoring data [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2020，204：104266.
[40] BAI H，LI R，XU G J，et al. Aerodynamic performance of Π-shaped composite deck cable-stayed bridges including VIV mitigation measures [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2021，208：104451.
[41] ZHANG T Y，SUN Y G，LI M S，et al. Experimental and numerical studies on the vortex-induced vibration of two-box edge girder for cable-stayed bridges [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2020，206：104336.
[42] ZHAN J，XIN D B，OU J P，et al. Experimental study on suppressing vortex-induced vibration of a long-span bridge by installing the wavy railings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2020，202：104205.
[43] 胡传新，赵林，周志勇，等. 流线型闭口箱梁抑流板抑制涡振机理研究[J]. 振动工程学报，2020，33(1)：1-11.
[44] 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]. Journal of Fluids and Structures，2020，96：103017.
[45] 王修勇，胡仁康，邬晨枫，等. 单面碰撞 TMD 及其桥梁涡激振动控制研究[J]. 振动与冲击，2020，39(1)：169-174.
[46] DAI J，XU Z D，GAI P P. Parameter determination of the tuned mass damper mitigating the vortex-induced vibration in bridges [J]. Engineering Structures，2020，221：111084.
[47] LIU Q K，SUN Y F，JIA Y Y，et al. Study on the characteristics and mechanisms of the wind-induced vibration of micro-elliptical section stay cables [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2020，206：104355.
[48] 刘宗杰，祝志文，陈魏，等. 跨长江特大桥拉索涡激振动与风特性观测[J]. 铁道科学与工程学报，2020，17(7)：1760-1768.
[49] CHEN W L，CHEN G B，XU F，et al. Suppression of vortex-induced vibration of a circular cylinder by a passive-jet flow control [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2020，199：104119.
[50] 陈东阳，顾超杰，朱卫军，等. 抑制柱体结构涡激振动的非线性能量阱减振装置优化设计[J]. 工程力学，2020，37(9)：240-247.
[51] ÁLVAREZ A J，NIETO F，KWOK K C S，et al. A computational study on the aerodynamics of a twin-box bridge with a focus on the spanwise features [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2021，209：104465.
[52] SHANG J M，ZHOU Q，LIAO H L，et al. Numerical study of wake and aerodynamic forces on a twin-box bridge deck with different gap ratios [J]. Wind and Structures，2020，30(4)：367-378.
[53] LYSTAD T M，FENERCI A，ØISETH O. Buffeting response of long-span bridges considering uncertain turbulence parameters using the environmental contour method [J]. Engineering Structures，2020，213：110575.
[54] DIANA G，OMARINI S. A non-linear method to compute the buffeting response of a bridge validation of the model through wind tunnel tests [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2020，201：104163.
[55] SOLARI G，MARTÍN P. Gust buffeting and aerodynamic admittance of structures with arbitrary mode shapes. Ⅰ：Enhanced equivalent spectrum technique [J]. Journal of Engineering Mechanics，2021，147(1)：04020142.
[56] SOLARI G，MARTÍN P. Gust buffeting and aerodynamic admittance of structures with arbitrary mode shapes. Ⅱ：A POD-based interpretation [J]. Journal of Engineering Mechanics，2021，147(1)：04020143.
[57] LIU S Q，CAI C S，HAN Y，et al. Stress-level buffeting analysis and wind turbulence intensity effects on fatigue damage of long-span bridges [J]. Journal of Aerospace Engineering，2020，33(6)：04020074.
[58] WANG J X，MA C M，LI Q S，et al. Influence of gap width on buffeting force spatial correlation and aerodynamic admittance of twin-box bridge deck [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics，2020，207：104392.
[59] ZHOU Q，ZHU L D，ZHAO C L，et al. Investigation on spanwise coherence of buffeting forces acting on bridges with bluff body decks [J]. Wind and

Structures, 2020, 30(2): 181-198.
[60] 沈正峰,李加武,王峰,等. 变槽宽比双主梁断面悬索桥抖振响应特性[J]. 振动工程学报, 2020, 33(4): 824-833.
[61] JIAN B, SU Y, LI M S. Buffeting response of cable-stayed bridge during construction under skew winds and pylon interference [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2020, 24(10): 2971-2979.
[62] 雷永富,张燕飞,韩金,等. 基于风洞试验的宽幅混合梁斜拉桥抖振性能研究[J]. 桥梁建设, 2020, 50(Sup1): 32-37.
[63] 向丹,朱立山,牛华伟. 基于主动格栅脉动流场的抖振力测试与相关性研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(8): 123-130.
[64] TAO T Y, XU Y L, HUANG Z F, et al. Buffeting analysis of long-span bridges under typhoon winds with time-varying spectra and coherences [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(12): 04020255.
[65] SHEN Z F, LI J W, GAO G Z, et al. Buffeting response of a composite cable-stayed bridge in a trumpet-shaped mountain pass [J]. Advances in Structural Engineering, 2020, 23(3): 510-522.
[66] WU B, ZHANG L L, YANG Y, et al. Refined time-domain buffeting analysis of a long-span suspension bridge in mountainous urban terrain [J]. Advances in Civil Engineering, 2020, 2020(1): 1-22.
[67] YAN L, REN L, HE X H, et al. Strong wind characteristics and buffeting response of a cable-stayed bridge under construction [J]. Sensors, 2020, 20(4): 1228.
[68] CID MONTOYA M, HERNÁNDEZ S, NIETO F, et al. Aero-structural design of bridges focusing on the buffeting response: Formulation, parametric studies and deck shape tailoring [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 204: 104243.
[69] PHAN D H. Aeroelastic control of bridge using active control surfaces: Analytical and experiment study [J]. Structures, 2020, 27: 2309-2318.
[70] YAN L, REN L, HE X H, et al. Experimental study of buffeting control of Pingtang bridge during construction [J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(8): 05020004.

(编辑 黄廷)