

海洋桥梁工程抗风安全的难题及其对策思考

廖海黎^{1,2}, 李明水², 周强²

(1. 西南交通大学桥梁工程系, 成都 610031; 2. 西南交通大学风工程四川省重点实验室, 成都 610031)

摘要: 与近海、内陆大跨桥梁工程相比, 未来建设的深水海洋桥梁工程面临的风场环境将更加复杂, 其抗风安全问题也必然更加严峻。本文首先分析了大跨度海洋桥梁工程的抗风研究现状, 然后从海洋桥梁场址风场特性、抗风设计理论、风振控制技术和行车安全防风技术四方面, 重点梳理了海洋桥梁工程抗风安全面临的重点难点问题及技术发展方向。在此基础上, 探讨了海洋桥梁工程抗风的安全保障对策。

关键词: 海洋桥梁工程; 抗风安全; 强台风; 气动控制技术

中图分类号: U441 **文献标识码:** A

Wind Resistance Safety of Marine Bridge Engineering and Corresponding Guarantee Countermeasures

Liao Haili^{1,2}, Li Mingshui², Zhou Qiang²

(1. Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Key Laboratory for Wind Engineering of Sichuan Province, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Compared with that of the offshore and inland long-span bridges, the wind field of marine bridges will be more complicated, and their wind resistance safety will inevitably become tougher. This paper first analyzes the status quo of wind-resistance research of long-span bridges, and then focuses on the difficulties and technical problems regarding four aspects: wind field characteristics, wind-resistant design theories, countermeasures for wind-induced vibration, and windbreak technologies for driving safety. Based on these analyses, countermeasures for guaranteeing wind resistance safety of marine bridges are proposed.

Keywords: marine bridge engineering; wind resistance safety; typhoon; aerodynamic countermeasures

一、前言

随着经济社会的快速发展、互联互通需求的剧增, 人类跨越海湾海峡阻隔的现实需求逐步增多, 桥梁工程不断从内陆向近海延伸 [1~3]。随着东海

大桥、杭州湾大桥、港珠澳大桥等跨海桥梁相继建成以及平潭海峡大桥等跨海桥梁的建设, 近海桥梁建造技术取得了举世瞩目的成就。

未来随着国家公路、铁路网规划建设不断发展, 以及国家“海洋强国”战略、“交通强国”

收稿日期: 2019-04-26; 修回日期: 2019-05-15

通讯作者: 廖海黎, 西南交通大学土木工程学院教授, 主要研究方向为桥梁风工程; E-mail: hlliao@sjwtu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“海洋桥梁工程技术发展战略研究”(2016-XZ-13)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

战略、“一带一路”倡议等一系列重大战略决策的持续推进,我国正规划琼州海峡、渤海湾和中国台湾海峡等跨海通道,“一带一路”沿线国家也在规划建设如巽达(印度尼西亚)、里海(俄罗斯至伊朗)等深水海洋桥梁。然而,与近海、内陆大跨桥梁工程相比,未来海洋桥梁工程将面临复杂严酷的风场环境作用[4,5]。我国是世界上少数几个受风灾严重影响的国家之一(见图1),且从已有的研究成果和工程实践来看[6~8],风及其作用是未来海洋桥梁工程设计、施工、运营的控制性因素。因此,保障海洋桥梁在施工、运营阶段的抗风安全已成为广大科技工作者面临的严峻挑战和重大课题。

二、海洋桥梁工程抗风研究现状

(一) 海洋桥梁场址风场特性的研究现状

我国现行的桥梁抗风设计方法和规范都是基于良态气候风场模式,其风参数(阵风因子、风速与紊流度剖面、积分尺度、脉动风谱函数)主要是针对内陆地区的季风气候特征[9]。然而,近年来的现场实测表明,我国东临的西北太平洋地区是全球台风发生最多的地区(约占全球台风的36%,年均约35个,如图2所示),其风环境特性不同于良态气候模式,具有风剖面指数更大、阵风参数远大于现行规范规定值、地表粗糙度增大明显、风速非平稳特性显著等特点。另一方面,由于台风路径的强随机性和台风风场的强不均匀性,使得对台风近地层况的准确、精细实测十分困难,对各类地形地

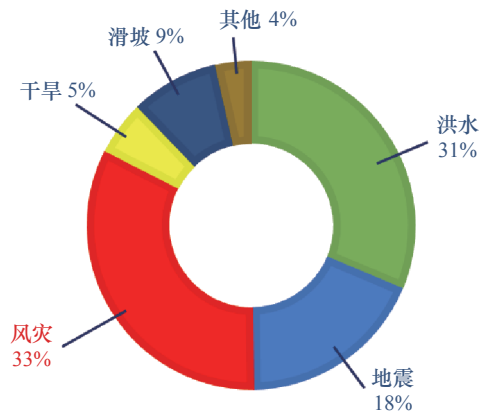


图1 我国各类自然灾害占比

表的台风特性,尤其是对湍流风特性的认识还很初步。此外,现有的近海及海上气象观测平台数量少、数据时距长、精度差,尚缺乏海洋桥梁桥址范围内的局部气象综合观测预报平台,无法对未来深海桥梁的建造及运营提供有力支撑。

国内外学者在台风风场模拟方面开展了大量的研究,建立了许多台风风场模型,以获取较准确的台风极值风速,如Batts模型[10]、Vickery模型[11]、Yan Meng模型[12]、CE(US Army Corps of Engineers)模型[13]等。虽然上述台风随机数值模拟模型比较成熟,能够有效评估台风风场的极值风速,但是其对我国沿海地区台风风场的适用性还有待研究检验。上述台风模型采用简化的动力方程求解台风风场,未考虑复杂的大气物理过程及下垫面的影响,模拟的近地层台风风场结构及分布与实际情况相差较大。为获得较准确的近地风场信息,国内外学者[14]基于天气研究和预测高级研究(WRF-ARW)模式,采用三维数值模拟方法对台风风场进行研究,获得了较精确的台风平均风场结构,然而其数据分辨率有限,且不能实现对脉动风场特性的有效模拟,仍无法完全满足海洋大跨桥梁设计、施工需求。

(二) 风对大跨桥梁结构作用的研究现状

针对风对桥梁结构的作用,现有的抗风理论与方法主要是将其分为平均风来流引起的静风力、脉动风来流引起的抖振力、断面旋涡脱落引起的涡激力和结构运动引起的自激力,并对它们分别建立理论计算模型、确定试验识别参数、分析结构灾变行为。

风对桥梁结构的静力效应是人类最早认识的

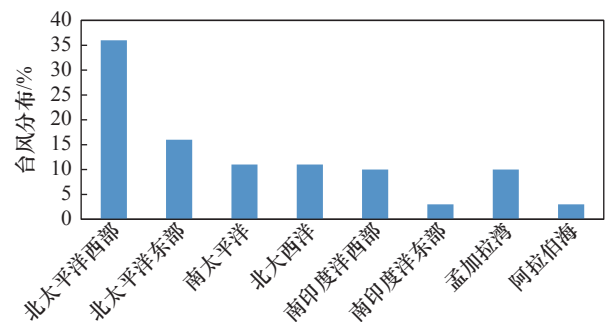


图2 全球各地区台风分布情况

问题，其对结构安全可能产生的问题主要是静风失稳问题。现有的迭代分析方法，可较准确地获得其在均匀流下静风失稳临界风速，然而对于台风等强湍流来流下海洋桥梁工程的静风稳定性还缺乏深入研究。

风的动力作用激发桥梁结构振动，振动结构反过来改变了流场运动的边界条件，从而影响流场和气动力，形成了风与结构的相互作用机制。当结构振动对空气力的影响较小时，空气的动力作用可以视为一种强迫振动荷载，主要导致桥梁结构的强迫振动——随机抖振；而当结构振动对空气力的影响较大时，同振动结构形成一个具有相互作用反馈机制的动力系统的空气力，其主要表现为一种自激力，导致桥梁结构的自激振动——颤振或驰振。近年来，随着针对这些作用力的各种气动力模型，特别是钝体桥梁断面的气动力参数（包气动力系数、颤振导数和气动导纳）风洞试验识别理论和技术方法的建立和发展，有效保证了良态风作用下大跨度桥梁的抗风稳定性、安全性和舒适性。然而，台风风场特性与常见良态风存在着很大差异，对桥梁结构的作用机理也不明晰；而且未来海洋桥梁跨度更大、结构体系更加复杂、刚度更加轻柔、阻尼更小、三维和非线性效应更加显著，现有桥梁抗风分析理论的精细化程度和适用范围均不能满足海洋桥梁的建造需求。

还应指出的是，目前的抗风设计规范对涡振、颤振等桥梁风致振动的评价标准单一，不适用于评价超大跨度海洋桥梁的抗风性能，亟待开展大量的基础研究工作。

（三）风振控制技术的研究现状

为确保大跨桥梁抗风安全性和舒适性，需对其风致振动进行控制，主要措施包括结构措施、气动措施和机械措施。

在结构控制措施方面，利用空间缆索系统和设置辅助索等方式提高桥梁的抗风性能，但采用空间缆索体系存在施工困难、施工过程受力复杂等问题，设置辅助索会破坏原有索面的景观、也存在设计复杂、安装困难等缺点；采用组合结构（见图3）[15]虽然从理论上能够满足未来超大跨桥梁的建设需求，但面临着结构受力复杂、造价昂贵、施工工艺复杂等问题，且缺乏相关建造经验，施工过程中的

关键抗风问题也不明确。

气动控制措施是目前采用最多的一种风振控制措施，通过改变主梁、桥塔、拉索等结构的气动外形或者在结构上附加稳定板、导流板等气动设施来改变其气动布局，从而达到提高气动性能的目的。但是未来海上大跨度桥梁面临的风速范围更广，需能同时控制多种风致振动的措施，然而相关研究却很少。

现有的机械措施主要采用被动、半主动和主动等三种方式实现对各种风致振动的控制，如调谐质量阻尼器（TMD）技术已经广泛用于桥塔、主梁等风振控制。同时黏性剪切阻尼器（VSD）及磁流变阻尼器（MR）技术控制拉索振动。相关研究表明，主动气动控制技术（见图4）在主梁的风振控制方面更加合理高效[16,17]，但目前多数处于研究阶段，尚无相关应用案例。

未来的桥梁工程步入了建设跨海连岛工程的新时期，施加风振控制措施的可能性和必要性更强。亟需发展新的、更加高效的抗风结构体系和新型风振控制技术。

（四）行车安全的研究现状

与内陆桥梁相比，海洋桥梁上的行车安全问题更加突出。目前主要防风措施为设置风障（见图5）[18]，在箱梁内部设置车道；主要的防风运营管理方法是结合桥位气象观测施行灾害天气下的车辆限速、限行的交通管制措施。相关成果结合特定的桥梁形式

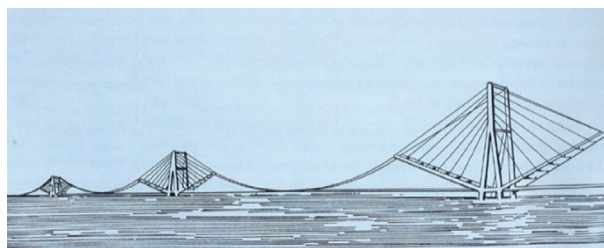


图3 直布罗陀海峽桥设计方案

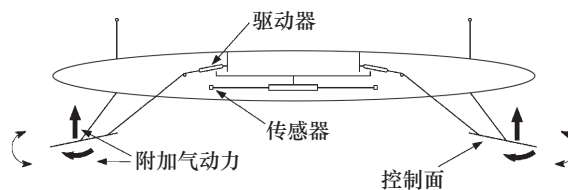


图4 Huynh 主动控制面附加气动力作用模型

初步揭示了风对桥面通行车辆安全性和舒适性的影响规律，建立了风致桥面行车安全与舒适性评价的基本方法，风屏障工程和交通运营管控措施的应用，在一定程度上提升了强风区大型桥梁的风天运营服务水平。然而，上述防风技术及管理方法均是针对内陆或近海桥梁的行车安全问题，有关深海桥梁工程行车安全的防风措施研究还较少。

三、海洋桥梁工程抗风的重点难点问题

大跨桥梁抗风研究已经取得了长足的进步，现行抗风计算理论和规范、控制措施能满足良态风场或内陆近海桥梁的抗风需求，但就未来大跨度海洋桥梁设计、施工、运营等而言，其重点难点问题主要体现在以下四个方面。

（一）海洋桥梁场址风场特性

海洋桥梁面临的风场环境更加复杂，主要表现在两个方面：一方面，相较于近海和内陆桥梁，海洋桥梁遭遇台风将更加频繁，但台风极值风速、平均风速剖面、近地湍流特性等关键风参数明显不同于一般良态气候的强风，且目前缺乏对描述台风风场合理的数学模型；另一方面，海上桥梁常遇风的风速更高、风向多变、非平稳特性显著、局部气候特性明显，而目前观测平台数量有限、数据精度差，相关研究还很少，距离实际工程应用仍存在较大差距。

海洋桥梁场址风场研究涉及气象学、流体力学、统计学等多种学科，面临的问题复杂，台风风场分布结构、场址局部气候特性等关键信息都不明晰，



图 5 嘉绍大桥风障

缺乏面向工程建设、运营的综合气象观测预报平台。因此，针对海洋桥梁场址风场特性，还需进行大量的研究工作。

（二）特大跨度海洋桥梁抗风设计理论与适用规范

由于海洋桥梁桥址风场的产生机理、时空特性均与常见季风等良态风场存在着很大差异，对桥梁结构的作用机理也不清晰，因此，基于均匀流场和常规紊流场中试验建立的气动力模型和抗风设计方法将无法说明台风作用下特大跨度海洋桥梁的气动行为，亟待针对台风环境下主梁气动参数的影响因素进行详细研究，进而确定合理的气动参数模型，提高其精度和适用范围。

建立海洋大跨桥梁抗风性能的科学评价标准是一个非常复杂的问题，尚需进行大量的研究工作。现行规范中的抗风安全评估主要是针对良态风场中的大跨度桥梁，标准单一，无法直接用于评价海洋大跨桥梁防风性能。而大跨度海洋桥梁在交通网络中所处的地位重要、所处风场环境复杂，因此，为确保大跨度海洋桥梁的安全性和舒适性，需综合考量各种因素，确定科学、合理的评价标准。

（三）面向结构安全和行车舒适性的桥梁风振控制技术

随着未来桥梁建设逐步向海上推进，对桥梁的跨越能力要求更高。从结构抗风的角度来讲，既有的桥梁结构形式和施工方法将面临新的挑战，传统的风致控制方法也存在诸多局限。采用空间缆索体系、新型组合结构等结构措施虽能在一定程度上提高桥梁的结构刚度、改善抗风能力，但结构受力复杂、传力机制不明，施工过程中存在多次体系转换，工艺复杂，施工过程中的关键抗风问题有待明确。因此，从结构抗风的角度来讲，既有的桥梁结构形式和施工方法将面临新的挑战，传统的风致控制方法也存在诸多局限，亟需发展新的、更加高效的风振控制措施。

未来海上桥梁面临的常遇风速高、风速范围广，大跨桥梁发生多种风振的概率大，各种被动气动措施之间兼容性差，需要提出可同时控制多种风致振动问题的优化气动措施。

主动气动控制技术在主梁的风振控制方面更加合理高效，是未来超大跨桥梁风振控制的发展方向，

但面临着作用机理不完全明确、可靠性差、能源供给依赖度高等问题。

（四）面向行车安全和通行能力的防风技术

未来，海上桥梁工程的服役环境更加恶劣。海面风力强、大风天气频发，导致的行车安全事故屡有发生，造成了比较严重的经济损失和社会影响。在强风等气候条件下，提出既不显著影响桥梁结构抗风性能也能够保障行车安全的防风安全措施是研究的难点之一。

建立完善的风气象预警系统，并结合结构形式、车型、路面条件形成一套完善、有效的智能交通运行管理系统，最终增强海上桥梁的通行能力是未来海上桥梁面临的又一难点。

四、海洋桥梁工程抗风的技术发展方向及策略

为了满足未来跨海桥梁建设的需求，抗风研究有必要开展如下四个方面的工作。

（一）开展海洋桥梁场址风场特性的研究

1. 开展面向工程的台风小尺度特性实测研究

近年来，我国台风实测研究发展迅速，获得了大量的大、中尺度气象数据，但海洋桥梁工程建造所需的小尺度数据仍很匮乏，故应开展面向工程的台风小尺度特性实测研究，以获取台风平均和湍流风场的时空特性。

2. 发展台风小尺度数值模拟技术

目前，基于天气预报模式（WRF）中尺度数值模式，利用嵌套技术，可获得较准确的平均风场数据，但分辨率较低，与实际工程需求还相差较大，因此，可在现有研究的基础上，采用计算流体动力学技术，建立台风小尺度的数值模型，以获取不同尺度下的风速时程、湍流特性和风剖面特征等关键信息。

（二）发展适用于特大跨度海洋桥梁的抗风设计理论和规范

1. 建立适用特大跨度海洋桥梁的抗风设计理论

针对海洋风场条件和特大跨度海洋桥梁自身结构特性，明确台风对特大跨桥梁的作用机理，发展更符合实际的三维台风风场模型，提出适用于特大

跨度海洋桥梁的静风稳定、涡振、颤振及抖振等抗风分析方法。

2. 提出适用特大跨度海洋桥梁的抗风性能评价标准

特大跨度海洋桥梁的抗风性能评价标准是海洋桥梁抗风性能评估的关键所在，其科学决策涉及面广、过程十分复杂，亟待开展大量基础性研究工作。

（三）开展面向结构安全和行车舒适性的桥梁风振控制技术研究

1. 发展满足海洋桥梁抗风安全和行车舒适性的新型结构体系

随着未来桥梁建设逐步向海上推进，传统的桥梁结构体系无法满足抗风需求，需要在桥梁的结构类型、主梁形式、缆索体系等方面开展研究，提出既能满足海洋桥梁抗风安全又可兼顾行车舒适性的新型结构体系。

2. 研发适用于海上桥梁建造的新型施工技术

海上大风天气多、风力强，桥梁的施工环境恶劣，传统的大跨度桥梁施工方法将面临新的挑战，应明确施工过程中存在的关键抗风问题，提出适用于海上桥梁的施工工艺和组织管理方法。

3. 发展主动气动控制技术

主动控制技术是未来超大跨桥梁风振控制的发展方向，在理论研究方面已取得了一定的进展。从未来工程应用的角度，需进一步明确作用机理、提高实际应用的可靠性、解决制振过程中的能源供给问题等。

（四）开展面向行车安全和通行能力的防风技术研究

1. 研发兼顾结构风振控制和行车安全的新颖防风措施

现有桥梁的防风安全措施往往起不到提高结构抗风性能的作用，有时甚至会使其结构抗风性能恶化。在海上强风等气候条件下，亟需提出既不显著影响桥梁结构抗风性能又能够保障行车安全的新颖防风措施。

2. 建立完善的风天智能交通运行管理系统

针对海洋桥梁工程面临的气候环境特点，建立完善的气候预警系统，并结合结构形式、车型和路

面条件形成一套完善、有效的智能交通运行管理系统,提高海上桥梁的通行能力。

五、结语

随着我国桥梁建设从内陆走向海洋,越来越多的海洋桥梁在我国沿海建成。工程师们大胆创新,大胆实践,严谨建设,在我国海洋桥梁建设史上谱写了辉煌的篇章。然而,海洋气候条件恶化、极端气象频繁,现有的桥梁抗风设计理论及方法尚无法完全满足海洋桥梁建设需要,保障海洋桥梁在施工、运营阶段的抗风安全性及舒适性仍是面临的严峻挑战。

应针对海洋复杂环境条件,开展海洋桥梁场址风场特性研究,研究海洋桥梁工程在强(台)风等极端作用下的致灾机理,建立海洋桥梁工程抗风安全设计方法,研究面向结构安全和行车舒适性的桥梁风振控制技术,提出面向行车安全和通行能力的防风技术,形成海洋桥梁工程抗风的设计规范,完善海洋桥梁工程抗风安全预警系统和运营管理策略。

致谢

谨向本课题组主要成员马存明教授、王骑副教授、孙延国讲师、商敬淼博士研究生的辛勤付出表示感谢!

参考文献

- [1] 董锁成,程昊,郭鹏,等.“一带一路”交通运输业格局及对策[J].中国科学院院刊,2016,31(6):663-670.
Dong S C, Cheng H, Guo P, et al. Transportation industry patterns and strategy of the Belt and Road [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(6): 663-670.
- [2] 秦顺全.海上长桥整孔箱梁预制架设技术[M].北京:中国铁道出版社,2006.
Qin S Q. Prefabrication and erection technology of whole-hole box girder of long offshore bridge [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2006.
- [3] 项海帆.21世纪世界桥梁工程的展望[J].土木工程学报,2000,33(3):1-6.
Xiang H F. Prospect of world's bridge project in 21st Century [J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(3): 1-6.
- [4] 欧进萍,段忠东,陆钦年,等.渤海海域的风特性统计分析[J].海洋通报,1997,16(1):20-28.
Ou J P, Duan Z D, Lu Q N, et al. Statistical analysis of wind characteristics in Bohai Sea Area [J]. Marine Science Bulletin, 1997, 16(1): 20-28.
- [5] 迺子龙,李永乐,秦顺全,等.海洋桥梁施工围堰的波浪压力实测与数值模拟[J].西南交通大学学报,2017,52(3):466-473.
Ti Z L, Li Y L, Qin S Q, et al. In-situ measurement and numerical simulation of wave pressure on marine bridge cofferdam [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(3): 466-473.
- [6] 陈政清,雷旭,华旭刚,等.大跨度悬索桥吊索减振技术研究与应用[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(1):1-10.
Chen Z Q, Lei X, Hua X G, et al. Research and application of vibration control method for hanger cables in long-span suspension bridge [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(1): 1-10.
- [7] 廖海黎,李明水.大跨度桥梁施工阶段抗风性能现场实测研究[R].北京:第十四届全国结构风工程学术会议,2009.
Liao H L, Li M S. Field measurement and research on wind resistance in construction stage of long-span bridges [R]. Beijing: Proceedings of 14th National Symposium on Structural Wind Engineering, 2009.
- [8] Ge Y J, Xiang H F. Bluff body aerodynamics application in challenging bridge span length [R]. Milano: Proceedings of 6th International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications, 2008.
- [9] 赵林,葛耀君,朱乐东.台风气候大跨度桥梁风振响应研究[J].振动工程学报,2009,22(3):237-245.
Zhao L, Ge Y J, Zhu L D. Investigation of wind-induced performance about long-span bridges under typhoon climate [J]. Journal of Vibration Engineering, 2009, 22(3): 237-245.
- [10] Batts M E, Simiu E, Russell L R. Hurricane wind speeds in the United States [J]. Journal of the Structural Division, 1980, 106(10): 2001-2016.
- [11] Vickery P J, Twisdale L A. Wind-field and filling models for hurricane wind-speed predictions [J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(11): 1700-1709.
- [12] Meng Y, Matsui M, Hibi K. An analytical model for simulation of the wind field in a typhoon boundary layer [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 56(2-3): 291-310.
- [13] Thompson E F, Cardone V J. Practical modeling of hurricane surface wind fields [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1996, 122(4): 195-205.
- [14] Davis C, Wang W, Chen S S, et al. Prediction of landfalling hurricanes with the advanced hurricane WRF model [J]. Monthly Weather Review, 2008, 136(6): 1990-2005.
- [15] Lin T Y, Chow P. Gibraltar strait crossing—A challenge to bridge and structural engineers [J]. Structural Engineering International, 1991, 1(2): 53-58.
- [16] 赵林,葛耀君,郭增伟,等.大跨度缆索承重桥梁风振控制回顾与思考——主梁被动控制效果与主动控制策略[J].土木工程学报,2015,48(12):91-100.
Zhao L, Ge Y J, Guo Z W, et al. Reconsideration of wind-induced vibration mitigation of long-span cable supported bridges: Effects of passive control and strategy of active control [J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(12): 91-100.
- [17] Körllin R, Starossek U. Wind tunnel test of an active mass damper for bridge decks [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2007, 95(4): 267-277.
- [18] 康小英,廖海黎.大跨度桥梁风障的设计、研究及应用[J].世界桥梁,2002(2):20-21.
Kang X Y, Liao H L. Design, research and application of wind barriers for long-span bridges [J]. World Bridges, 2002 (2): 20-21.