

# 高风速区钢箱梁桥施工过程抗风稳定性分析

张建龙<sup>1,2</sup>, 骆佐龙<sup>1</sup>, 董峰辉<sup>3</sup>, 刘陆平<sup>4</sup>

1. 长安大学公路学院, 西安 710064
2. 河南省交通运输厅高速公路管理局, 郑州 450000
3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092
4. 安徽省交通规划设计研究院有限公司, 合肥 230000

**摘要** 对大跨度钢箱连续梁桥施工过程最大悬臂状态进行非线性气动稳定性分析。提出基于风荷载非线性及结构几何非线性的气动稳定性分析理论。以某跨海大桥为工程背景, 进行静风效应及风致抖振效应计算, 明确钢箱梁最大悬臂状态位移响应均方根最大值, 并以结构一期恒载作用下的位移为初始缺陷, 静风力与抖振力作为荷载进行主梁最大悬臂状态非线性气动稳定性验算。结果表明, 随着桥位处风速的增加, 主梁悬臂端和跨中水平及竖向位移均呈现非线性增长趋势; 结构的位移响应随着风攻角的正负变化而产生变化, 风荷载的影响不容忽视。由于主梁刚度较大, 在  $120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  风速范围内并没有出现失稳临界状态, 但悬臂端水平及竖向位移变化幅度较大, 为了保证人员安全及合龙顺利进行, 提出3种抗风措施。

**关键词** 桥梁工程; 高风速区; 气动稳定性; 风致抖振

**中图分类号** U448.22

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.01.013

## Analysis for wind resistant stability of steel box girder bridge in the construction process in high wind speed region

ZHANG Jianlong<sup>1,2</sup>, LUO Zuolong<sup>1</sup>, DONG Fenghui<sup>3</sup>, LIU Luping<sup>4</sup>

1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. Expressway Administration of Henan Provincial Communications Department, Zhengzhou 450000, China
3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China
4. Anhui Transport Consulting & Design Institute Co., Ltd., Hefei 230000, China

**Abstract** Nonlinear aerodynamic stability of the maximum cantilever state of long-span continuous steel box bridge in the construction process was analyzed. Aerodynamic stability analyses based on wind load nonlinearity and geometry nonlinearity were proposed. A cross-sea bridge was taken as the subject, and the effects of static wind force and buffeting force were calculated and the maximum RMS of displacement response in the longest cantilever state was determined. The nonlinear aerodynamic stability analysis of the maximum cantilever state was carried out taking static wind force and buffeting force as the external load and the displacement under the dead load as initial defect. The results show that with the increase of wind speed, the horizontal and vertical displacement of the cantilever end and mid-span of the steel box girder both had a nonlinear increasing trend; the displacement response changed with the positive and negative transformation of wind attack angle, so the influence of wind load should not be ignored. Due to high stiffness of the steel box girder, the buckling critical state did not appear within the wind speed of  $120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , but the horizontal and

收稿日期: 2014-06-26; 修回日期: 2014-10-13

基金项目: 交通运输部西部交通建设科技项目(2011812318970); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012JC001)

作者简介: 张建龙, 博士研究生, 研究方向为大跨度桥梁设计, 电子邮箱: 945939132@qq.com

引用格式: 张建龙, 骆佐龙, 董峰辉, 等. 高风速区钢箱梁桥施工过程抗风稳定性分析[J]. 科技导报, 2015, 33(1): 75-80.

vertical displacement of the cantilever end were relatively large. Three measures for wind resistance were proposed to ensure safety of the personnel and smooth closure process.

**Keywords** bridge engineering; high wind speed region; aerodynamic stability; buffeting force

随着中国交通事业的快速发展,跨海大桥建设逐渐兴起。钢箱连续梁桥以其自重轻、刚度大、施工进度快等特点,逐渐成为海湾大桥广泛采用的桥型。然而,由于钢箱连续梁桥质量小、桥面宽度大、自身阻尼比小,因此气动性能差,受气旋及季风等风荷载的影响,可能出现钢箱连续梁桥施工阶段抗风稳定性不足,合龙困难的现象。Hirai<sup>[1]</sup>在1976年首次观察到悬索桥模型在风洞试验中出现失稳的现象。程进等<sup>[2]</sup>对斜拉桥的非线性静风稳定问题进行了研究。方明山等<sup>[3]</sup>对缆索承重桥梁的非线性静风稳定理论进行了阐述。陈峰等<sup>[4]</sup>也对钢管混凝土拱桥的非线性静风稳定问题进行了分析。目前大跨度钢箱连续梁桥向着“长”且“柔”的方向发展,传统的静风失稳模型已不能准确描述钢箱连续梁桥在风场中的响应,需要考虑风荷载的动力效应。

桥梁结构的风致振动是指风和桥梁结构的相对运动引起的桥梁结构气动弹性作用,主要包括驰振、颤振、涡振和抖振。通常前3种形态的风致振动可以通过主梁断面气动性能优化进行控制,而抖振是由风的脉动分量产生的,因此不可避免。在施工阶段,由于结构刚度比成桥阶段小<sup>[5]</sup>,风致抖振可能会引起结构共振,使结构丧失稳定性,危及人员安全,造成合龙困难。并且风荷载在与桥梁结构相互作用的过程中,随着结构形态的改变其荷载量值也发生相应的改变,其量变具有非线性变化的特点,因此,对大跨度钢箱连续梁桥施工阶段进行非线性气动稳定性分析十分必要。

## 1 稳定分析计算荷载

### 1.1 一期恒载

桥梁结构在进行气动稳定性<sup>[6-8]</sup>分析之前,由于一期恒载施加,结构已产生一定的变形。在考虑结构的几何非线性时,已有变形会导致结构几何刚度矩阵及应力刚度矩阵发生改变,进而对结构稳定性分析产生影响。桥梁结构非线性气动稳定性分析中,首先将一期恒载产生的位移作为初始缺陷引入结构中,然后进行风荷载作用下的结构非线性稳定性计算。

### 1.2 风荷载

桥梁结构主要受近地风荷载的影响,近地风本质上是随机风,为方便研究,可以将其分解为平均风和脉动风<sup>[9]</sup>。平均风产生风荷载的静力效应,脉动风产生风荷载的抖振效应。此外,桥梁结构与风场的气动耦合产生自激效应。这3种效应对应于作用在桥梁结构上的3种力:静风力、抖振力及气动自激力。

在风轴坐标系下,桥梁结构单位长度静风力可表示为

$$D_0 = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D(\alpha_0) B \quad (1)$$

$$L_0 = \frac{1}{2} \rho U^2 C_L(\alpha_0) B \quad (2)$$

$$M_0 = \frac{1}{2} \rho U^2 C_M(\alpha_0) B^2 \quad (3)$$

式中,  $D_0$ 、 $L_0$ 、 $M_0$  分别为桥梁断面单位长度所受的阻力、升力及升力矩;  $U$  为设计基准风速;  $\rho$  为空气密度;  $C_D(\alpha_0)$ 、 $C_L(\alpha_0)$ 、 $C_M(\alpha_0)$  分别为静风阻力系数<sup>[10]</sup>、升力系数及升力矩系数,可参考有关风洞试验取值<sup>[11]</sup>;  $\alpha_0$  为平均风攻角;  $B$  为桥面宽度。

气动导纳函数取1,桥梁结构单位长度抖振力可表示为

$$D_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[ 2C'_D \frac{u(t)}{U} + C''_D \frac{w(t)}{U} \right] \quad (4)$$

$$L_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B \left[ 2C'_L \frac{u(t)}{U} + (C'_L + C''_D) \frac{w(t)}{U} \right] \quad (5)$$

$$M_b(t) = \frac{1}{2} \rho U^2 B^2 \left[ 2C'_M \frac{u(t)}{U} + C''_M \frac{w(t)}{U} \right] \quad (6)$$

式中,  $D_b(t)$ 、 $L_b(t)$ 、 $M_b(t)$  分别为抖振阻力分量、升力分量以及升力矩分量;  $u(t)$ 、 $w(t)$  分别为水平向及垂直向的脉动风速;  $C'_D$ 、 $C'_L$ 、 $C'_M$  分别为抖振阻力系数、升力系数、升力矩系数对攻角  $\alpha$  的导数。

气动自激力是由于弹性体本身的振动引起,气体边界条件的改变进而会使弹性体产生新的变形或振动,可分为准定常气动自激力与非定常气动自激力。准定常竖向气动自激力的解析表达式如式(7)所示。非定常气动自激力由Scanlan颤振理论计算,如式(8)、式(9)所示。

$$F_y(\alpha) = -\frac{1}{2} \rho U^2 B \left( \frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \right) \Big|_{\alpha=0} \cdot \frac{\dot{y}}{U} \quad (7)$$

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B) \left\{ KH_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KH_2^* \frac{\dot{\alpha} B}{U} + K^2 H_3^* \alpha + K^2 H_4^* \frac{h}{B} \right\} \quad (8)$$

$$M = \frac{1}{2} \rho U^2 (2B^2) \left\{ KA_1^* \frac{\dot{h}}{U} + KA_2^* \frac{\dot{\alpha} B}{U} + K^2 A_3^* \alpha + K^2 A_4^* \frac{h}{B} \right\} \quad (9)$$

式中,  $F_y(\alpha)$  为准定常竖向气动自激力;  $\dot{y}$  为结构垂直于来流方向的振动速度;  $K = \omega B/U$ ,  $\omega$  为结构自振频率;  $H_i^*$ 、 $A_i^*$  为结构8个无量纲颤振导数;  $\dot{\alpha}$  为结构扭转角速度;  $h$  为结构竖向振动位移;  $\dot{h}$  为结构竖向振动速度。

## 2 桥梁非线性气动稳定理论

桥梁结构的稳定问题大都表现为第二类稳定问题,因此,本研究主要分析钢箱连续梁桥施工过程第二类稳定问题。

结构的第二类稳定问题本质上是非线性问题,随荷载增

加,结构刚度不断发生变化,当荷载增加到使结构切线刚度矩阵趋近于奇异时,结构开始丧失平衡,即使有一微小扰动,也会导致结构变形迅速增加,使结构失去正常使用的性能。

由风荷载引起的桥梁结构非线性效应主要包括风荷载本身的非线性效应与风荷载引起的桥梁结构几何非线性。风荷载本身的非线性效应包括两个方面:风荷载与风速的非线性关系;及由风荷载引起的结构扭转角的改变引起结构静力三分力系数的改变,进而导致风荷载量值的非线性变化。大跨度钢箱连续梁桥通常采用闭口箱梁截面,截面扭转刚度大,由风荷载引起的扭转角很小,并且由于风荷载作用下气动非线性分析的复杂性,本研究主要讨论风荷载与风速的非线性关系及由于风荷载的施加引起的结构几何非线性。

求解风荷载引起的桥梁结构第二类非线性稳定问题,可以归结为求解式(10)所示的线性增量方程:

$$[K_0(u_k, \sigma_k) + K_\sigma(u_k, \sigma_k)]\{\Delta u_{k+1}\} = F_{k+1}(D, L, M) - F_k(D, L, M) \quad (10)$$

式中,  $K_0(u_k, \sigma_k)$  为第  $k$  荷载步时,由此时结构构型所确定的线弹性刚度矩阵<sup>[12]</sup>;  $K_\sigma(u_k, \sigma_k)$  为第  $k$  荷载步时,由外荷载作用引起的单元应力刚度矩阵,  $\Delta u_{k+1}$  为节点位移列向量;  $F_k(D, L, M)$  为第  $k$  荷载步相应的风荷载量值。

### 3 工程实例

某跨海大桥采用连续梁体系,联跨布置为 110 m+150 m+110 m=370 m,为三跨变截面钢箱连续梁桥,桥梁立面布置见

图1,横截面布置见图2。钢箱梁顶面宽 33.1 m,中墩墩顶 5 m 区段钢箱梁高 6.5 m,墩顶等高梁段两侧各 37.5 m 区段梁高从 6.5 m 线性变化至 4.5 m,其余区段梁高为 4.5 m。跨中梁高与跨径之比为 1/33.3,中墩支点梁高与跨径之比为 1/23.1。

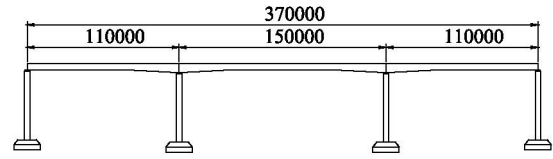


图1 某跨海大桥立面布置(mm)

Fig. 1 Elevation layout of a cross-sea bridge (mm)

钢箱梁工厂制造时采用“长线法”施工工艺:先组拼钢箱梁小节段,再由小节段拼装大节段,最长拼装节段为 152.6 m。

钢箱梁架设采用以下施工工序:首先浮吊吊装第一跨梁段,其次浮吊吊装第三跨梁段,最后浮吊吊装第二跨梁段,调整至设计高程,将第二跨与第一、三跨梁段连接,全桥合龙。

由于第一、三跨钢箱梁悬臂长度较长(悬臂长度为 43 m),并且桥位处于伶仃洋海域,受亚热带气旋影响,风速常年维持在较高水平,因此风荷载对合龙过程影响显著。为确保合龙过程安全,合龙精度满足要求,需要对某跨海大桥最大悬臂状态进行非线性气动稳定性验算。钢箱梁施工阶段最大悬臂状态如图3所示。

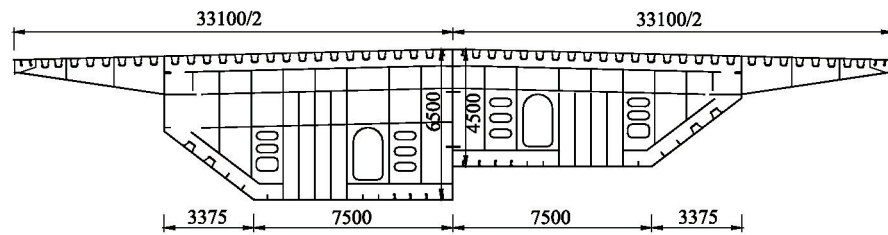


图2 钢箱梁横截面布置(mm)

Fig. 2 Cross-section layout of the steel box girder (mm)

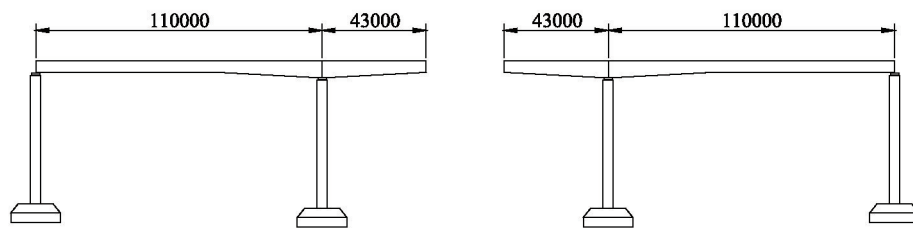


图3 施工阶段最大悬臂状态示意(mm)

Fig. 3 Layout of the longest cantilever state in the construction process (mm)

#### 3.1 非线性气动稳定性验算

为明确初始风攻角及风速大小对主梁最大悬臂状态气动稳定性的影响,选取6种荷载工况进行非线性气动稳定性

验算。工况1:风速为设计风速  $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,初始风攻角在  $-6^\circ \sim 6^\circ$  变化;工况2:初始风攻角为  $0^\circ$ ,风速在  $10 \sim 120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  变化;工况3:初始风攻角为  $4^\circ$ ,风速在  $10 \sim 120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  变化;工况4:

初始风攻角为 $6^\circ$ , 风速在 $10\sim 120\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 变化; 工况5: 初始风攻角为 $-4^\circ$ , 风速在 $10\sim 120\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 变化; 工况6: 初始风攻角为 $-6^\circ$ , 风速在 $10\sim 120\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 变化。风荷载计算参数取值如表1所示。

表1 风荷载计算参数取值

Table 1 Values of parameters for wind load calculation

参数	取值	参数	取值
设计基准风速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	40	桥面距平均海面高度/m	42
单位展长迎风面积/ ( $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-1}$ )	7	钢箱梁阻尼比	0.005
桥面宽/m	33.1	空气密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	1.225
桥梁跨度/m	153	地面粗糙度长度/m	0.01
竖向一阶振型频率/Hz	0.865	横向一阶振型频率/Hz	1.934

采用非线性有限元软件 Abaqus 进行主梁动力特性分析及风荷载抖振响应分析。全桥采用板壳单元建模, 假定风荷载的脉动分量为准定常气动分量, 偏安全地忽略气动导纳对结构的影响, 有限元模型如图4所示。

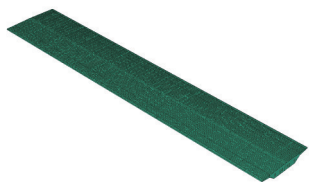


图4 最大悬臂状态有限元模型

Fig. 4 Finite element model of the maximum cantilever state

### 3.2 主要计算结果

在风速为 $10\sim 120\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的情况下, 结构对风荷载的抖振位移响应均方根最大值如表2所示。

为了探究初始风攻角对结构气动稳定性的影响, 在风速一定的情况下, 采用不同的初始风攻角作用于结构上进行气动稳定性计算。图5为在设计风速 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风荷载作用下, 主梁跨中及悬臂端截面水平及竖向位移随初始风攻角的变化曲线。从图5可看出, 在初始风攻角绝对值相同的情况下, 正攻角作用下结构水平位移稍大于负攻角作用下结构的水平位移, 水平位移近似以 $0^\circ$ 攻角为对称轴对称分布; 而竖向位移在正攻角范围内的数值远小于负攻角范围内的数值, 这是由于在正攻角范围内, 结构在静风荷载作用下的变形与结构由风致抖振引起的变形方向相反, 二者互相抑制; 而在正攻角范围内二者产生的变形方向相同, 导致水平及竖向位移增加。

在明确风致抖振位移响应均方根的最大值后, 将风荷载的静力效应与抖振效应叠加作为最终风荷载, 以结构一期恒载产生的位移作为初始缺陷施加到结构上进行非线性气动

表2 抖振位移响应均方根最大值

Table 2 Maximum RMS values of buffeting displacement response

风速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	响应 方向	抖振位移响应均方根最大值/mm				
		$-6^\circ$ 攻角	$-4^\circ$ 攻角	$0^\circ$ 攻角	$4^\circ$ 攻角	$6^\circ$ 攻角
10	横风向	2	2	1	0	1
	顺风向	0	0	0	0	0
20	横风向	8	6	3	1	2
	顺风向	1	1	1	1	2
30	横风向	19	15	7	1	5
	顺风向	3	3	3	3	4
40	横风向	35	27	12	3	9
	顺风向	6	5	5	6	7
50	横风向	57	43	19	5	15
	顺风向	9	8	8	9	10
60	横风向	85	64	29	7	23
	顺风向	13	12	11	13	15
70	横风向	120	91	41	10	32
	顺风向	18	16	15	17	20
80	横风向	163	123	56	14	44
	顺风向	23	21	20	22	27
90	横风向	214	161	73	19	58
	顺风向	29	27	25	28	34
100	横风向	274	206	94	24	74
	顺风向	36	33	31	35	41
110	横风向	344	258	117	31	92
	顺风向	44	40	38	42	50
120	横风向	423	318	144	38	113
	顺风向	52	48	45	50	60

稳定性验算。图6和图7分别为各个荷载工况下, 钢箱梁悬臂端与跨中截面水平向及竖向位移(峰值因子取3.5, 水平向位移顺风向为正, 竖向位移向下为正)随风的速度变化曲线。

从图6和图7可以看出, 在任一初始风攻角作用下, 结构水平及竖向位移随着风速的增加呈现非线性增长的趋势, 且风速越大, 非线性特征越明显。对于水平位移, 在攻角为 $0^\circ$ 时, 水平位移取极小值,  $-6^\circ\sim 0^\circ$ 攻角范围内, 水平位移随着攻角绝对值的增加而增加,  $0^\circ\sim 6^\circ$ 攻角范围内, 水平位移随着攻角的增加而增加; 对于竖向位移, 在攻角为 $4^\circ$ 时, 竖向位移取极小值,  $-6^\circ\sim 4^\circ$ 攻角范围内, 竖向位移随着攻角绝对值的增加而增加,  $4^\circ\sim 6^\circ$ 攻角范围内, 竖向位移随着攻角的增加而增加。但由于钢箱梁各向刚度较大(桥面宽 $33.1\text{ m}$ , 梁高由 $6.5\text{ m}$ 至 $4.5\text{ m}$ 线形变化), 在 $120\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速范围内, 水平及竖向

位移曲线并没有表现出突然发散的特点,因此可以确定在设计风速  $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的情况下,结构是稳定的。但结构跨中及悬臂端位置处水平及竖向位移变化幅度均较大(在设计风速

$40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  范围内,最大变化幅度为  $15 \text{ cm}$ ),因此,需要采取有效的抗风措施确保人员安全及合龙工序的顺利进行。

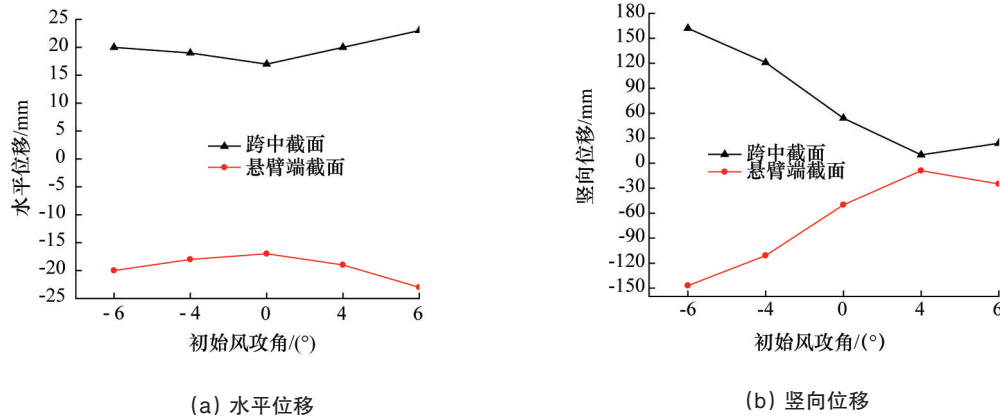


图5 不同初始风攻角作用下水平及竖向位移变化曲线

Fig. 5 Variation of horizontal and vertical displacement with different initial wind attack angles

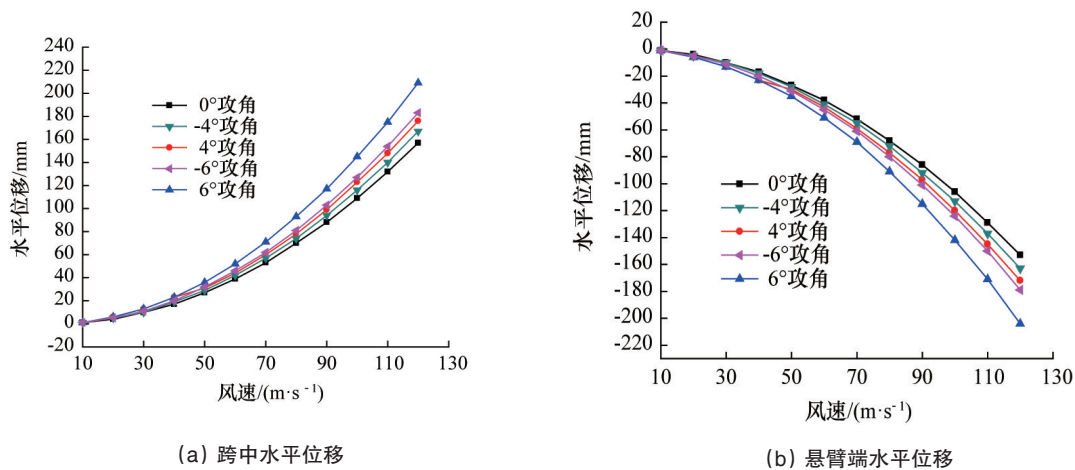


图6 跨中及悬臂端水平位移随风速变化曲线

Fig. 6 Variation of horizontal displacement at the mid-span and cantilever end with different wind speeds

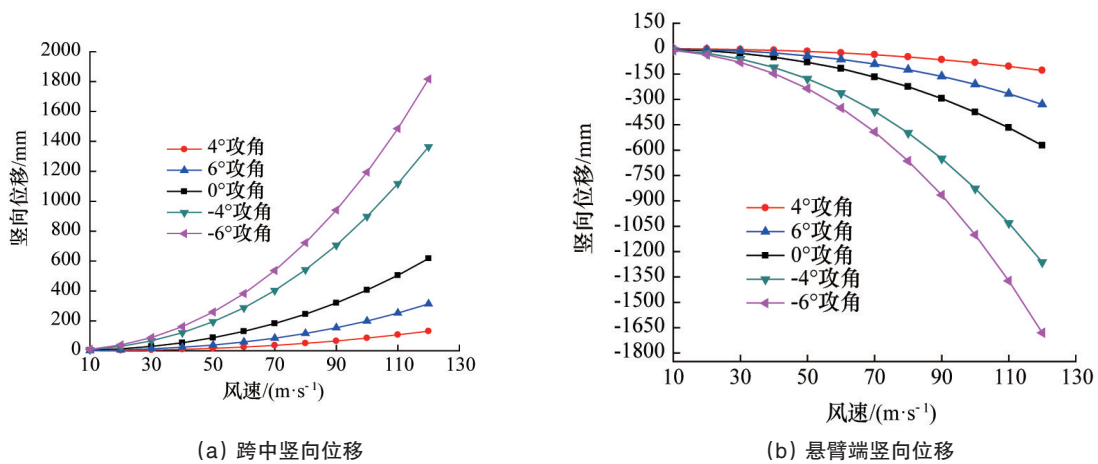


图7 跨中及悬臂端竖向位移随风速变化曲线

Fig. 7 Variation of vertical displacement at the mid-span and cantilever end with different wind speeds

### 3.3 相应抗风措施

施工过程中的临时抗风措施应能提高结构低阶固有频率及增加结构阻尼<sup>[13-15]</sup>,以抑制结构振动及减小风荷载与结构共振。因此,建议在钢箱梁最大悬臂状态采取抗风措施:

- 1) 加强主墩处钢箱梁与桥墩临时固结措施,控制主梁的面内及竖向转动变形。
- 2) 采用风缆连接主墩及边跨一侧钢箱梁,提高结构抵抗竖向振动的能力,如图8所示。
- 3) 在钢箱梁护栏位置处设置施工临时风障,减弱风荷载对桥梁结构的作用。

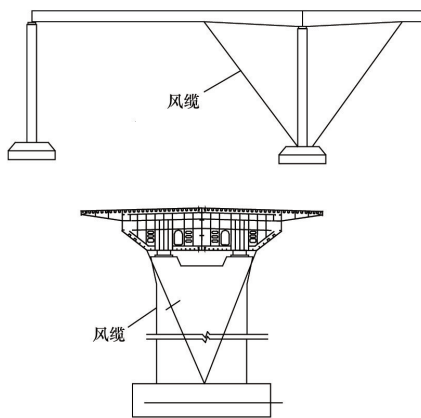


图8 施工阶段最大悬臂状态风缆布置示意

Fig. 8 Wind cable layout of the longest cantilever state in the construction process

## 4 结论

1) 在初始风攻角一定的情况下,随着风速的增加,结构的位移响应呈现非线性增长趋势。由于某跨海大桥主梁抗扭刚度较大,在不考虑扭转的条件下,在 $120\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 风速范围内水平及竖向位移没有出现失稳临界状态,但悬臂端水平及竖向位移变化幅度均较大。因此,仍需采取有效抗风措施保证人员安全及合龙精度满足要求。

2) 初始风攻角对于结构对风荷载的位移响应有显著影响,且对于水平及竖向位移的影响程度不同:在任一风速作用下,对于水平位移,在攻角为 $0^\circ$ 时,水平位移取极小值, $-6^\circ\sim 0^\circ$ 攻角范围内,水平位移随着攻角绝对值的增加而增加, $0^\circ\sim 6^\circ$ 攻角范围内,水平位移随着攻角的增加而增加;对于竖向位移,在攻角为 $4^\circ$ 时,竖向位移取极小值, $-6^\circ\sim 4^\circ$ 攻角范围内,竖向位移随着攻角绝对值的增加而增加, $4^\circ\sim 6^\circ$ 攻角范围内,竖向位移随着攻角的增加而增加。

3) 在 $-6^\circ\sim 6^\circ$ 风攻角范围内,在风攻角绝对值相等的情况下,由于结构横向刚度较大,由风致抖振效应引起的水平位移差异很小。但竖向位移差异较大:负攻角(风从桥面上方吹向下方)作用下结构竖向位移大于正攻角(风从桥面下方吹向上方)。这是由于在正攻角范围内,结构在静风荷载作用下的变形与结构由风致抖振引起的变形方向相反,二者互

相抑制;而在负攻角范围内二者产生的变形方向相同,导致水平及竖向位移增加。

### 参考文献(References)

- [1] Boonyapinyo V, Yamadah H, Miyata T. Wind-induced nonlinear lateral-torsional buckling of cable-stayed bridges[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 1994, 120(2): 486-506.
- [2] 程进, 肖汝诚, 项海帆. 大跨径斜拉桥非线性静风稳定性全过程分析[J]. 中国公路学报, 2000, 13(3): 25-29.  
Cheng Jin, Xiao Rucheng, Xiang Haifan. Full range nonlinear aerostatics analysis for long-span cable-stayed bridge[J]. China Journal of Highway and Transport, 2000, 13(3): 25-29.
- [3] 方明山, 项海帆, 肖汝诚. 大跨径缆索承重桥梁非线性空气静力稳定理论[J]. 土木工程学报, 2000, 33(2): 73-79.  
Fang Mingshan, Xiang Haifan, Xiao Rucheng. Nonlinear aerostatic stability theory of large-span cable-stayed bridge[J]. China Civil Engineering Journal, 2000, 33(2): 73-79.
- [4] 陈峰, 胡大琳. 大跨径钢管混凝土拱桥非线性静风稳定性[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(2): 43-46.  
Chen Feng, Hu Dalin. Aerostatics stability of long-span concrete-filled steel tube arch bridge[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2006, 26(2): 43-46.
- [5] 张茜, 周旭红, 狄瑾, 等. 大跨度钢箱梁斜拉桥施工过程风致抖振时域分析及抗风措施[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2013, 33(1): 47-49.  
Zhang Qian, Zhou Xuhong, Di Jin, et al. Time-domain analysis of wind-induced buffet and wind-resistant measures for cable-stayed bridge with steel box girder at construction stage[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2013, 33(1): 47-49.
- [6] Fujino Y, Yoshida Y. Wind-induced vibration and control of Trans-Tokyo Bay crossing bridge[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2002, 128(8): 1012-1024.
- [7] Ren D B, Qu Y, Yang L L. The analysis of wind vibration coefficient of long-span dome structures with different thickness[J/OL]. Proceedings, ASCE, 2012: 1196-1204. [2013-11-12]. <http://dx.doi.org/10.1061/9780784412190.130>.
- [8] 陈政清. 工程结构的风致振动、稳定与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
Chen Zhengqing. The wind-induced vibration, stability and control of engineering structure[M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [9] 陈政清. 桥梁风工程[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
Chen Zhengqing. The bridge wind engineering[M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [10] 中交公路规划设计院. JTG D60—2004 公路桥梁抗风设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.  
China Highway Planning and Design Institute. JTG D60—2004 Wind-resistant design specification for highway bridges[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.
- [11] Scanlan R H. The action of flexible bridges under wind buffeting theory[J]. Journal of Sound and Vibration, 1978, 60(2): 201-211.
- [12] 曾攀. 有限元分析及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.  
Zeng Pan. Finite element analysis and applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [13] 葛耀君. 大跨度悬索桥抗风[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.  
Ge Yaojun. Wind resistance of long span suspension bridges[M]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [14] 项海帆. 现代桥梁抗风理论与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.  
Xiang Haifan. Modern theory and practice on bridge wind resistance [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [15] Li H N, Jing Q Y, Wang G X. Control of tuned liquid dampers for wind-induced skyscraper vibration[J]. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2006, 188(155): 1-8.

(责任编辑 王媛媛)