

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201711115

悬索桥太阳辐射效应的环境因素影响规律

朱劲松^{1,2}, 陈科旭¹, 孟庆领¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

摘要: 为研究自然环境下悬索桥太阳辐射效应变化规律以及最不利活载效应与环境温度效应的关系, 首先建立了某在建大跨度悬索桥精细化模型, 然后对太阳辐射效应的环境因素进行参数敏感性分析, 同时研究了太阳辐射效应与最不利活载效应的关系. 研究表明: 悬索桥太阳辐射效应受环境温度影响最大、风速次之. 风速对悬索桥太阳辐射效应的影响呈非线性关系; 日序数和纬度对太阳辐射效应影响较小, 但太阳辐射效应变化规律与纬度变化规律不一致, 受多种环境因素影响. 最不利活载引起的主梁跨中点挠度数值上是热辐射引起最大挠度的2倍, 塔顶偏位数值上与热辐射引起的偏位相等. 研究结果可以为悬索桥施工阶段误差分析和健康监测数据的温度影响剔除提供理论依据和技术支撑.

关键词: 悬索桥; 环境因素; 太阳辐射; 温度效应; 最不利活载

中图分类号: U448.25

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)03-0127-08

Change characteristics of environmental factors on suspension bridge's solar radiation effects

ZHU Jinsong^{1,2}, CHEN Kexu¹, MENG Qingling¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: This research focuses on the change rules of solar radiation effects and the relationship between most unfavorable live load effect and temperature effect of suspension bridges under natural environment. The fine model of an under-construction long-span suspension bridge was established, the parameter sensitivity analysis of environmental factors of solar radiation effects was carried out, and the relationship between the solar radiation effects and the most unfavorable live load effect was investigated. Results showed that the solar radiation effects of suspension bridge were mainly affected by ambient temperature, followed by the wind speed, the influence of which is nonlinear. Daily ordinal number and latitude had little influence on the solar radiation effects. The change of solar radiation effects was not consistent with that of latitude, but was affected by many environmental factors. The maximum deflection of the main beam caused by the most unfavorable live load was twice the maximum deflection caused by thermal radiation, and the offset of the tower top was equal to that of thermal radiation. These results could provide theoretical basis and technical support for the error analysis of the construction phase of suspension bridges and eliminate the temperature influence of the health monitoring data.

Keywords: suspension bridge; environmental factors; solar radiation; temperature effects; most unfavorable live load

悬索桥属于温度敏感柔性结构, 在太阳辐射、空气散射、地面反射等环境辐射作用下, 各构件辐射效应间相互影响, 使得大跨度悬索桥太阳辐射作用下环境温度效应分析更加复杂. 关于大跨度桥梁温度场和温度效应的研究, 近年来得到快速发展, 文献[1-2]对自然环境下 Tamar 桥温度效应进行数值模拟, 并通过实测数据验证了有限元方法计算温度效应的有效性; 文献[3-5]从数值分析和现场实测的角度对香港青马大桥温度场和温度效应进行了研

究; 文献[6]基于现场实测数据和数值模拟结果分析了 Humber 桥桥面系温度场分布规律; 文献[7]基于健康监测数据分析了自然环境下大跨度悬索桥箱梁的模态频率变化规律; 文献[8]采用光学仪器采集 4 月 25 日大桥的温度效应并分析了环境温度对大跨度悬索桥各向位移的影响; 文献[9]进行了大跨度混凝土箱梁数值模拟, 得到了太阳辐射下混凝土箱梁桥段悬臂施工过程中的温度梯度效应变化规律; 文献[10]研究了钢-混组合桥面系竖向温度梯度模型和温度梯度应力变化规律; 文献[11]基于湛江海湾大桥健康监测数据分析了自然环境下该桥的温度效应; 文献[12]对多塔连跨悬索桥非漂移体系的温度效应进行了研究; 文献[13-14]以润扬大桥

收稿日期: 2017-11-23

基金项目: 天津市科技支撑计划重点项目(16YFZCSF00460);

天津市自然科学基金(16JCZDJC40300)

作者简介: 朱劲松(1975—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 朱劲松, jszhu@tju.edu.cn

健康监测数据为基础分析了大跨度悬索桥梁端位移和模态频率与温度的相关性;文献[15]研究了非均匀温度作用下结构的模态频率变化规律.综上所述,目前国内外学者对悬索桥太阳辐射作用下温度效应的研究都非常重视,但还是以对健康监测数据的分析为主,基于数值分析的研究只能依靠温度沿桥梁跨度方向保持不变的线性假设或只考虑环境中的单一因素影响,无法揭示大跨度悬索桥太阳辐射效应受环境因素影响的内在机理.

本文基于传热学和太阳辐射三维遮挡理论,依托某在建的大跨度悬索桥,研究了自然环境下悬索桥太阳辐射效应变化规律以及悬索桥太阳辐射效应受日序数、风速、纬度、环境温度等因素的影响规律,并将太阳辐射效应与最不利活载效应进行对比.研究结果可以为悬索桥施工阶段误差控制和健康监测数据的全寿命周期预测模型中温度效应剔除提供理论依据和技术支撑.

1 太阳辐射效应分析理论

1.1 热力学理论

某时刻悬索桥构件内部温度场三维瞬态热流传输可由泊松公式模型^[16]表示为

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (1)$$

式中: T 为由桥梁构件某点的笛卡尔坐标 (x, y, z) 和热传导率 k 的函数表示的温度, ρ 为构件密度, c 为构件材料比热容, t 为时间.

桥梁结构在自然环境中受太阳直接辐射、散射辐射、大气逆辐射、地面反射辐射以及其它结构辐射,构件表面的热流密度^[4]为

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y + \frac{\partial T}{\partial z} n_z \right) + q = 0. \quad (2)$$

式中: n_x, n_y, n_z 分别为构件外表面单位向量的方向余弦; q 为构件表面的热流密度,包括对流换热热流密度 q_c 、构件表面辐射热流密度 q_r 、太阳辐射热流密度 q_s , 即

$$q = q_c + q_r + q_s = -\alpha I_0. \quad (3)$$

式中: α 为桥梁构件材料的辐射吸收系数, I_0 为自然环境下到达构件表面的总辐射, 1 a 中任意时刻的环境热辐射可由文献[17]计算得到.

构件表面由于对流换热散失的热流密度^[4]为

$$q_c = h(T_{\text{sur}} - T_{\text{air}}). \quad (4)$$

式中: h 为对流换热系数, $T_{\text{sur}}, T_{\text{air}}$ 分别为构件表面温度和大气温度.

构件表面向外辐射的热流密度 q_r ^[16] 取决于构件的辐射系数 ε , 即

$$q_r = \varepsilon \sigma T^4. \quad (5)$$

式中 σ 为 Stefan-Boltzmann 常数, 表示黑体单位面积、单位时间内辐射的总能量.

1.2 环境因素影响分析

1.2.1 日序数和纬度影响分析

在风速和环境温度等条件一定的情况下, 太阳辐射常数和悬索桥构件表面的太阳入射角随日序数和纬度的变化而变化.

太阳辐射常数^[18]为

$$A_{10} = 1367 \left(1 + 0.033 \cos \frac{2\pi N}{365} \right). \quad (6)$$

式中 N 为日序数(自 1 月 1 日起算天数).

构件外表面的太阳入射角^[19]为

$$\phi = \arccos \left((\sin \varphi \sin \beta_n - \cos \varphi \cos \alpha_n \cos \beta_n) \cdot \sin \delta + (\cos \varphi \sin \beta_n + \sin \varphi \cos \alpha_n \cos \beta_n) \cdot \cos \delta \cos \tau + \sin \alpha_n \cos \beta_n \cos \delta \sin \tau \right). \quad (7)$$

式中: φ 为悬索桥所处纬度, α_n 为悬索桥构件方位角, β_n 为悬索桥构件倾斜角, τ 为真太阳时, δ 为太阳倾角, $\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right]$.

由式(6)、(7)可知, 日序数影响太阳辐射常数和悬索桥构件外表面太阳入射角; 纬度仅影响悬索桥构件外表面的太阳入射角.

1.2.2 风速与环境温度影响

风速和环境温度的不同引起悬索桥与环境间对流换热强度以及大气逆辐射强度的差异, 具体表现在对流换热系数的区别.

悬索桥构件外表面对流换热系数^[4]为

$$h = 2.6 \left(\sqrt[4]{|T_f - T_s|} + 1.54v \right). \quad (8)$$

式中 T_f 为周围环境温度, T_s 为悬索桥构件表面温度.

悬索桥构件吸收的大气逆辐射强度为

$$D_{\text{AI}} = E_{\text{sa}} \cdot C_s \cdot (T_f + 273.15)^4 \cdot X_{\text{sl}} - E_s \cdot C_s \cdot T_s^4. \quad (9)$$

式中: E_{sa} 为大气辐射系数, C_s 为黑体辐射常数, E_s 为材料发射率, X_{sl} 为材料长波辐射吸收率.

由式(8)、(9)可以看出, 风速影响悬索桥与周围环境的对流换热强度; 环境温度影响悬索桥与周围环境的对流换热强度和大气逆辐射强度.

2 工程算例

2.1 桥梁概况

某在建的主跨 720 m 单跨悬索桥立面布置如图 1 所示. 该桥位于东经 115.2°、北纬 40.4°, 方位角为北偏西 52°. 桥面总宽 33.6 m, 主缆矢跨比为 1/9.5, 由 91 根高强镀锌平行钢丝预制索股组成, 每根索股由 127 丝 $\Phi 5.25$ mm 的镀锌高强钢丝组成. 主塔为

高 107.8 m 的混凝土门式框架结构. 桥址处年平均风速为 2.6 m/s,设计基准温度为 15 °C.

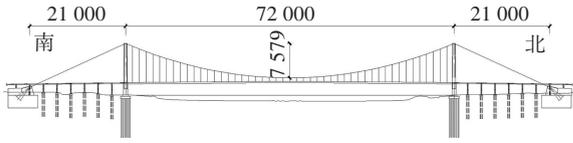


图1 实例悬索桥立面 (cm)

Fig.1 Elevation of the example suspension bridge (cm)

2.2 计算模型

采用通用有限元软件 ABAQUS 建立实例悬索桥精细有限元模型,如图 2 所示. 为保证悬索桥太阳辐射效应分析的精度和计算效率,主塔、桥面板、砂浆层以及沥青层采用实体单元 C3D8R;加劲梁采用壳单元 S4R;为考虑温度对悬索桥缆索系统的影响,主缆与吊杆均采用 B31 梁单元模拟. 全桥有限元模型各类单元总数为 432 868 个.

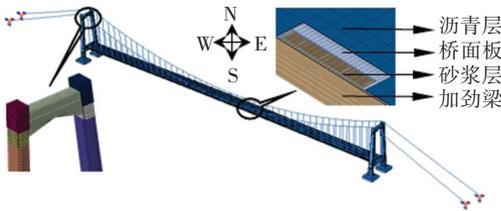


图2 实例悬索桥有限元模型

Fig.2 Finite-element model of the example suspension bridge

2.3 分析条件

2.3.1 分析工况

根据中国大陆地区的地理条件和气候条件,对实例悬索桥太阳辐射温度效应进行时程仿真分析,分析涉及的地理及环境条件见表 1.

表 1 太阳辐射效应分析工况

Tab.1 Case analysis of solar radiation effects

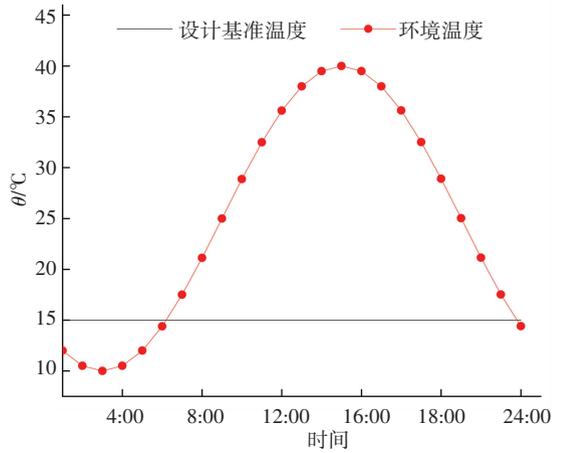
日序数	环境温度/°C	风速/(m · s ⁻¹)	纬度/(°)
105	10~40	2.6	40
182	10~40	2.6	40
195	10~40	2.6	40
285	10~40	2.6	40
195	10~40	6.0	40
195	10~40	12.0	40
195	10~40	18.0	40
195	10~40	24.0	40
195	10~40	2.6	20
195	10~40	2.6	30
195	10~40	2.6	50
15	-25~10	2.6	40

由于本文旨在研究环境因素对悬索桥温度效应

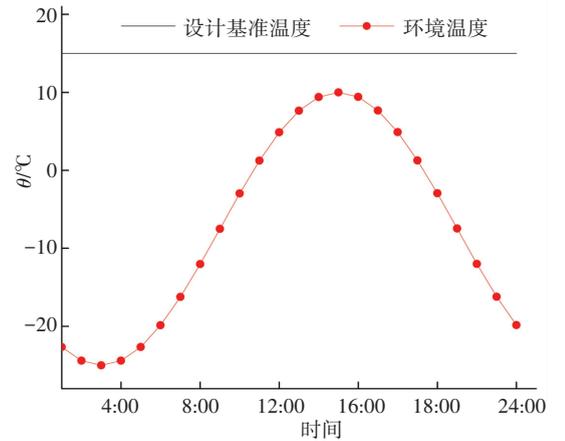
大小和变化规律的影响,风向对悬索桥温度效应数值影响较小且受许多偶然现象支配,所以未考虑风向的影响,分析不考虑悬索桥构件各面的风速折减.

2.3.2 气温日过程

悬索桥桥址处气温受多种因素影响,但晴天的气温日变化过程却有较好的规律性. 1 d 中环境温度大致按正弦曲线变化,本文采用最低温度出现在凌晨 3:00、最高温度出现在 15:00 的环境温度变化模型,1 d 中各时刻气温如图 3 所示.



(a) 环境温度为 10~40 °C (夏季)



(b) 环境温度为 -25~10 °C (冬季)

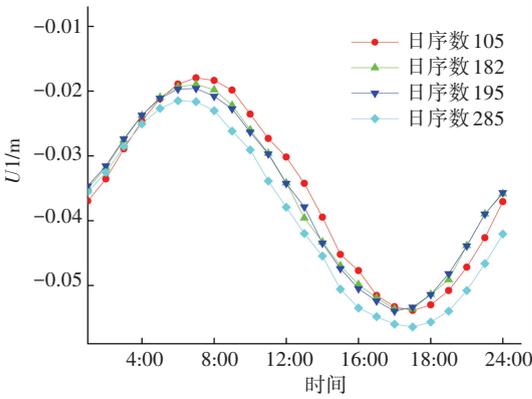
图3 气温日过程

Fig.3 Daily environmental temperature

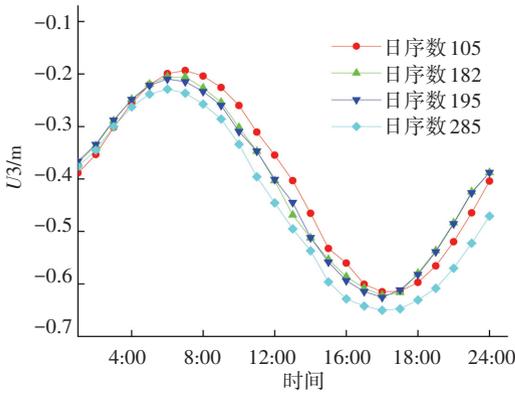
2.4 分析结果

2.4.1 日序数对悬索桥太阳辐射效应的影响

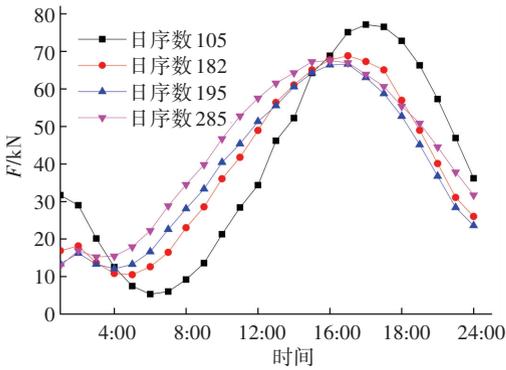
1 a 中不同日期地球大气层外部太阳辐射常数各不相同,悬索桥构件表面的太阳入射角随日序数的变化而变化,使得构件接受的太阳辐射能量不同,造成了悬索桥太阳辐射效应的差异. 图 4 给出了不同日序数情况下太阳辐射效应在 1 d 内的变化规律. 图中所有位移均是相对基准温度的位移,塔顶偏位为正表示向边跨偏移;主梁跨中点挠度为正表示向上移动,后文规定与此相同.



(a) 主塔塔顶顺桥向偏位



(b) 主梁跨中点挠度



(c) 跨中吊杆力

图 4 日序数对实例悬索桥太阳辐射效应影响

Fig.4 Influence of daily ordinal number on solar radiation effects of the example suspension bridge

由图 4 可见,环境温度为 10~40 ℃、风速为 2.6 m/s 时,主塔塔顶向中跨偏移、主梁跨中点有向下位移,且变化规律与环境温度变化趋势相反,达到最值的时刻比最高环境温度达到时间晚 3 h 左右. 不同日序数下塔顶偏位和主梁跨中点竖向位移差异不大,达到最值的时间基本相同. 日序数为 105、182、195 时,主塔塔顶顺桥向最大偏位几乎一致,都向中跨偏移 5 cm 左右;主梁跨中点相对基准温度下坐标均下挠了 60 cm 左右. 日序数为 285 的塔顶偏位比日序数为 105、182、195 时的偏位大 5 mm 左右,比主梁跨中点竖向位移大 5 cm 左右.

日序数不同,悬索桥跨中吊杆力变化趋势与环境温度变化趋势相同. 究其原因,这是由中央扣和主梁所致,温度升高造成主梁刚度减小、跨中斜杆(即中央扣)内力减小,使得跨中吊杆的吊杆力增大. 同时可以看出,1 d 内实例悬索桥跨中吊杆力变化幅度较小,仅为 2.78% 左右,所以环境因素对吊杆力的影响可忽略不计.

2.4.2 风速对悬索桥太阳辐射效应的影响

风不仅通过改变对流换热强度影响悬索桥温度效应,也作为荷载影响悬索桥的静力效应. 表 2 列出了不同风速的风荷载对悬索桥主梁跨中点挠度和塔顶偏位的影响. 此处暂不考虑风荷载对主缆的作用,仅考虑风荷载对主塔的作用.

表 2 不同风速下悬索桥风力效应

Tab.2 Wind effect of suspension bridge under different wind speeds

风速/(m · s ⁻¹)	主梁跨中挠度/μm	塔顶顺桥向偏位/mm
6	3.45	-0.5
12	2.39	-1.3
18	0.43	-3.0
24	-2.20	-5.4

由表 2 可见,处于成桥或运营状态的悬索桥,风荷载对主梁跨中点挠度和主塔塔顶顺桥向偏位影响极小,可以忽略不计,所以影响悬索桥主梁竖向位移的主要因素主要为恒荷载、最不利活载和热辐射作用.

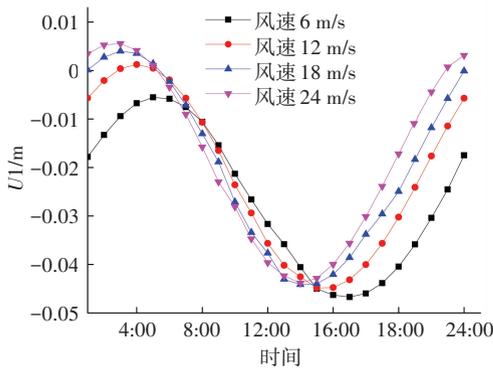
风速通过改变对流换热强度影响悬索桥太阳辐射效应. 不同风速条件下悬索桥与周围环境的对流换热强度差异较大,风速越高,对流换热强度越大,悬索桥温度越低. 图 5 给出了不同风速下实例悬索桥主塔塔顶顺桥向偏位和主梁跨中点竖向位移变化规律.

从图 5 可以看出,不同风速下悬索桥太阳辐射效应差异较大. 风速从 6 m/s 提高到 24 m/s,主塔塔顶向中跨的最大偏位值逐渐减小,最大相差 0.7 cm;达到最大偏位的时刻逐渐提前,风速为 6 m/s 时,主塔塔顶向中跨位移达到最大的时刻 17:00 时,比风速为 24 m/s 时的 14:00 时延迟 3 h 左右. 究其原因,这是由于风速的增加使得悬索桥与周围环境的对流换热强度增大,主缆温度降低,在热胀冷缩作用下,主塔两侧主缆垂度改变使得主塔受力发生变化,导致塔顶位移发生较大变化;达到最大偏位时的较大时间差主要是由风速不同导致的悬索桥主缆降温速度差异造成.

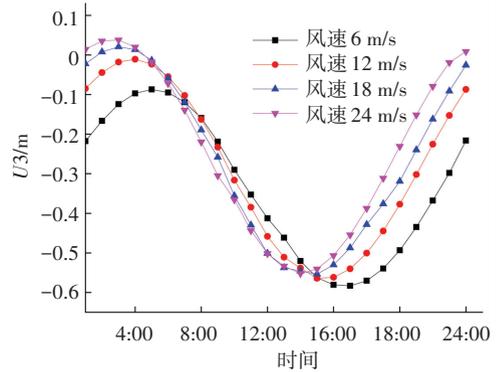
值得注意的是,14:00~18:00 时段内,风速从 6 m/s 提高到 24 m/s,主塔塔顶最大顺桥向偏位和主梁跨中点最大下挠值分别减小 6.54% 和 7.76%. 00:00~6:00 时段两种最大位移相差达 119.6% 和

79.31%。主塔塔顶顺桥向偏位和主梁跨中点挠度在白天达到最大前,各时刻位移较为接近;达到最大值

后,各时刻位移差异增大。



(a) 主塔塔顶顺桥向偏位



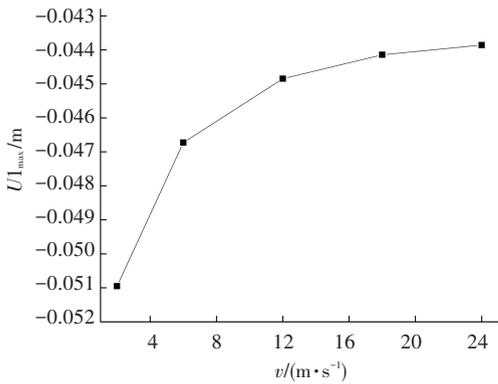
(b) 主梁跨中点挠度

图5 风速对实例悬索桥太阳辐射效应影响

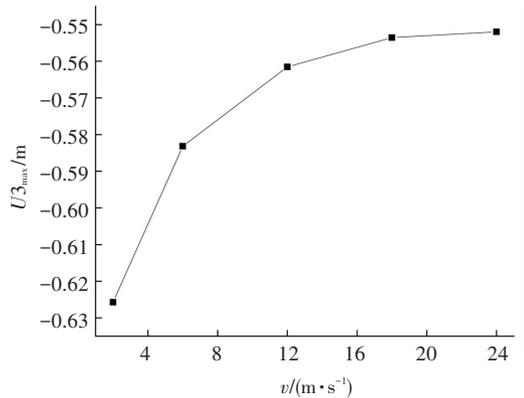
Fig.5 Influence of wind speed on solar radiation effects of the example suspension bridge

图6为实例悬索桥太阳辐射效应最大值与风速的关系,图中给出了2~24 m/s风速时实例悬索桥塔顶最大偏位和主梁最大挠度与风速的关系.由图6可见,风速对实例悬索桥太阳辐射效应的影响呈非线性变化规律,主塔塔顶顺桥向最大偏位、主梁跨中点最大挠度与风速呈对数函数关系.风速较低时,风速对

悬索桥太阳辐射效应的影响较为剧烈,随着风速的增加,太阳辐射效应曲线斜率逐渐减小.风速对塔顶偏位的影响比其对主梁跨中点竖向位移移略大,主塔塔顶顺桥向偏位在2~24 m/s风速时变化达15.69%,主梁竖向位移变化12%。



(a) 主塔塔顶顺桥向偏位与风速关系



(b) 主梁跨中点挠度与风速关系

图6 实例悬索桥太阳辐射效应与风速关系

Fig.6 Relationship between solar radiation effects of example suspension bridge and wind speed

2.4.3 纬度对悬索桥太阳辐射效应的影响

纬度主要通过改变构件表面的太阳入射角影响桥梁太阳辐射效应.在日序数、风速和环境温度等条件一定的情况下,悬索桥所处纬度不同引起构件表面温度变化速度的差异,导致太阳辐射效应的差异.图7给出了实例悬索桥在20°、30°、40°、50°4种纬度条件下的太阳辐射效应变化规律。

从图7可以看出,不同纬度条件下实例悬索桥太阳辐射效应变化规律相同.无论是悬索桥主塔塔顶偏位还是主梁跨中点挠度,受纬度影响均较小.纬度为30°时,实例悬索桥主梁跨中点挠度达到最大,为-0.630 m,比纬度为50°时的-0.614 m大

1.6 cm;主塔塔顶向中跨最大偏位达到最大,为0.051 m.纬度为50°时,悬索桥主塔塔顶向中跨最大偏位较其他小1 mm左右,达到最大偏位的时间较其他纬度早1 h左右,这是因为纬度为50°时,太阳入射角最小,悬索桥构件温差相对于其他构件较小,所以太阳辐射效应达到最值所需时间也较短。

同时可以看出,在日序数为195、风速为2.6 m/s、环境温度为10~40 °C的条件下,实例悬索桥主塔塔顶偏位和主梁跨中点竖向挠度的最大值均在纬度为30°的地区出现,而非纬度为20°的地区,这说明,悬索桥最大太阳辐射效应的最大值出现的纬度与日序数等环境条件相对应。

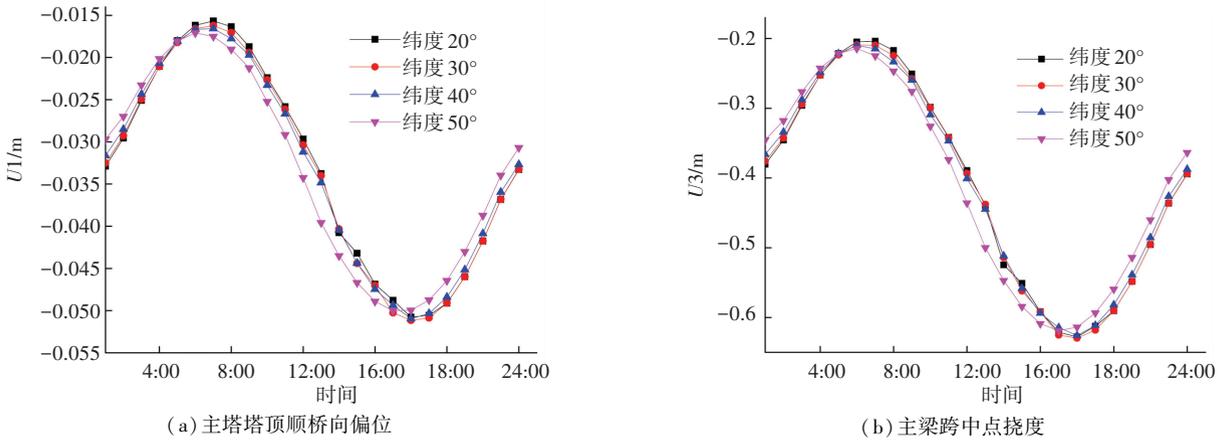


图 7 纬度对实例悬索桥太阳辐射效应影响

Fig.7 Influence of latitude on solar radiation effects of the example suspension bridge

2.4.4 环境温度对悬索桥太阳辐射效应的影响

环境温度对悬索桥太阳辐射效应的影响主要表现在两个方面,一是对悬索桥与周围环境间对流换热强度的影响;二是对大气逆辐射强度的影响.表 3 列出了环境温度为 $-25\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 两种情况下实例悬索桥主梁跨中点最大竖向位移、主塔塔顶顺桥向最大位移以及各自达到最大位移的时刻.

表 3 环境温度对实例悬索桥太阳辐射效应的影响

Tab.3 Influence of ambient temperature on solar radiation effects of the example suspension bridge

环境 温度/ $^{\circ}\text{C}$	主梁跨中点 最大挠度/m	主塔塔顶 最大偏位/m	时刻
$-25\sim 10$	0.196	0.007	23:00
$10\sim 40$	-0.627	-0.051	18:00

由表 3 可见,当环境温度为 $-25\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,主梁跨中点有向上最大位移 19.6 cm,主塔塔顶向边跨方向最大位移为 7 mm,最大位移均出现在夜间 23:00 时;当环境温度为 $10\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,主梁跨中点有向下的最大位移 62.7 cm,主塔塔顶向中跨方向最大位移为 5.1 cm,最大位移出现时刻均为下午 18:00 时.由此可见,环境温度对悬索桥太阳辐射效应影响较大,环境最高温度相差 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$,实例悬索桥主梁跨中点最大竖向位移相差 82.3 cm,主塔塔顶顺桥向最大位移相差 5.8 cm,太阳辐射效应达到最大的时刻相差 5 h.究其原因,这是因为环境温度较低时,大气逆辐射强度较小,悬索桥与环境间对流换热强度较大,随着环境温度的升高,大气逆辐射强度增大,悬索桥与环境间对流换热强度减小.

从以上分析可以看出,不同环境因素对悬索桥太阳辐射效应的影响差异较大.环境热辐射作用下,对于单跨悬索桥,悬索桥主塔塔顶在温度升高时有向中跨移动趋势;温度降低时向边跨移动.环境温度对悬索桥太阳辐射效应的影响最大,风速影响次之,且随着风速的增加,悬索桥太阳辐射效应的增大程度逐渐减小,达到最大太阳辐射效应的时刻逐

渐提前.纬度和日序数对悬索桥太阳辐射效应的影响较小,对吊杆力的影响仅为 2.78%,但悬索桥太阳辐射效应变化规律与纬度变化规律不一致.由此可见,自然环境中对悬索桥太阳辐射效应大小起决定作用的是桥址处环境温度和地表风速,所以在悬索桥施工阶段采取措施控制温度效应误差和健康监测数据分析的全寿命周期预测模型中剔除温度效应过程中,需要更多地考虑环境温度和风速的影响.

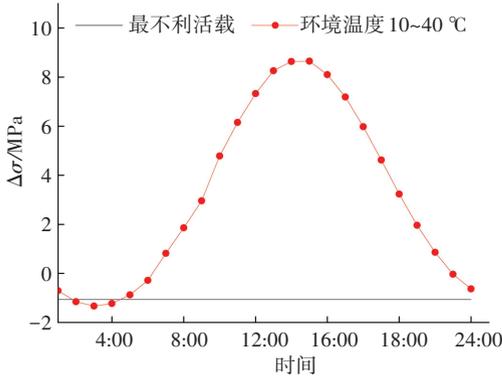
2.4.5 最不利活载效应与太阳辐射效应对比

大跨度悬索桥在日常运营过程中,同时受最不利活载和太阳辐射作用,因此,本文基于城市桥梁设计规范^[20],研究了悬索桥太阳辐射效应与最不利活载效应的关系.图 8 为最不利活载引起的塔根部最不利节点应力与辐射导致的应力对比图.由图 8 可见,最不利活载引起的拉应力远小于环境热辐射引起的拉应力.在夏季,随着 1 d 中环境温度的升高,热辐射造成的节点应力由压应力向拉应力方向转化,且在数值上与最不利活载引起的应力相差越来越大,并于 15:00 时达到 9.6 MPa;在冬季,悬索桥塔根受力最不利节点变为靠近边跨一侧,热辐射引起的应力变化规律与环境温度变化趋势相反.随着环境温度的升高,热辐射引起的拉应力逐渐减小,并于 15:00 时产生 1.5 MPa 的最大压应力,数值上与最不利活载在该点产生的 0.45 MPa 拉应力相差 1.95 MPa.但是,热辐射所致的最大拉应力比最不利活载所致应力大 16 MPa 左右.由此可见,无论夏季还是冬季,温度变化引起的拉应力均大于最不利活载导致的拉应力,二者产生的压应力相差较小.

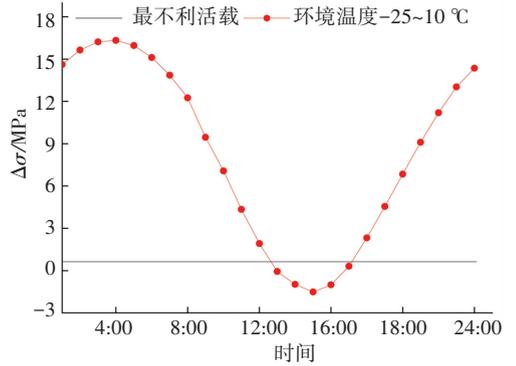
图 9 为按悬索桥竖向位移影响线进行最不利活载加载所得的主梁跨中点挠度和环境热辐射所致挠度对比图.从图 9 可知,最不利活载作用下,悬索桥主梁跨中点最大下挠 0.957 m.环境温度从 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,主梁跨中点下移 0.45 m,是最不利活载引起挠度的一半左右;环境温度为 $-25\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,

环境热辐射所致的主梁跨中最大上挠 0.45 m, 将抵消最不利活载引起下挠的一半左右. 由此可见,

无论冬季还是夏季, 最不利活载引起的主梁跨中点挠度数值上是热辐射引起的最大挠度的 2 倍.



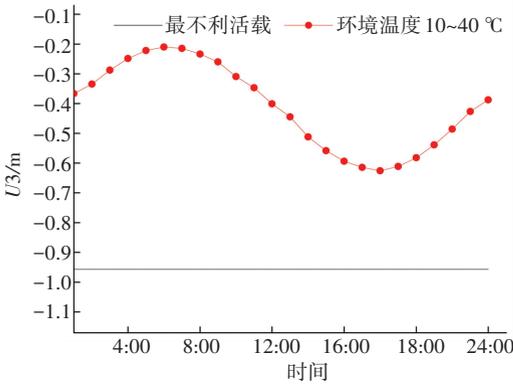
(a) 环境温度为 10~40 °C (夏季)



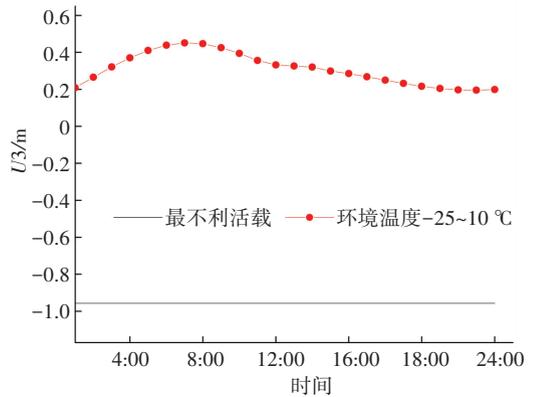
(b) 环境温度为 -25~10 °C (冬季)

图 8 整幅最不利活载下塔根应力与辐射所致塔根应力对比

Fig.8 Comparison of tower bottom stress induced by the most unfavorable live load and radiation



(a) 环境温度为 10~40 °C



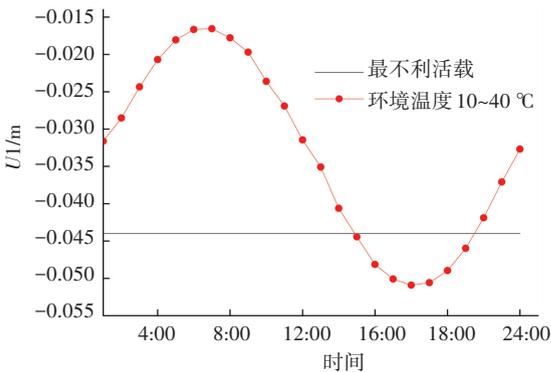
(b) 环境温度为 -25~10 °C

图 9 整幅最不利活载下主梁挠度与辐射所致挠度对比

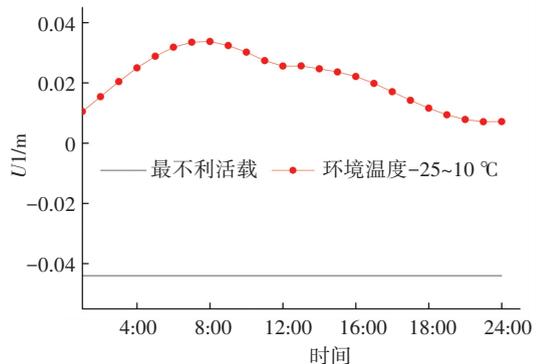
Fig.9 Comparison of mid-girder displacement induced by radiation and the most unfavorable live load

图 10 为最不利活载造成的主塔塔顶偏位和热辐射所致的偏位对比图. 由图 10 可见, 最不利活载作用下, 悬索桥主塔塔顶向中跨偏移 0.044 m. 在夏季, 环境热辐射导致塔顶向中跨偏移最大 0.052 m, 与最不利活载所致的偏位相差较小, 为 0.008 m; 在冬季, 悬索桥主塔塔顶向边跨最大偏位为 0.035 m, 与最不利

活载所致位移绝对值相差 0.009 m. 由此可见, 热辐射所致的悬索桥塔顶偏位与最不利活载造成的塔顶偏位数值上较为接近. 夏季环境温度较高时, 热辐射所致偏位与最不利活载所致偏位相互叠加, 加剧主塔偏位; 冬季温度较低时, 环境热辐射所致塔顶偏位可以大幅度抵消最不利活载引起的主塔偏位.



(a) 环境温度为 10~40 °C



(b) 环境温度为 -25~10 °C

图 10 整幅最不利活载下塔顶偏位与辐射所致偏位对比

Fig.10 Comparison of main tower top deflection caused by radiation and the most unfavorable live load

3 结 论

1) 通过对不同日序数情况下悬索桥太阳辐射效应的研究,发现日序数仅较小程度地影响悬索桥太阳辐射效应,各日序数下最大太阳辐射效应均在 7:00、18:00 时出现。

2) 风速对悬索桥太阳辐射效应的影响呈非线性关系,随着风速的增加,悬索桥太阳辐射效应最值变化幅度逐渐减小,达到最值的时刻逐渐提前。风速提高 20 m/s,最大太阳辐射效应变化 10% 以上,太阳辐射效应达到最值的时间提前 3 h 左右。

3) 纬度对悬索桥太阳辐射效应影响较小,但悬索桥最大太阳辐射效应的最值变化规律与纬度变化规律不一致,不同纬度下悬索桥太阳辐射效应的最大值出现在与日序数及风速等环境条件相对应的某一特定纬度。

4) 悬索桥太阳辐射效应受环境温度的影响最大,环境温度变化 30 °C,悬索桥主塔塔顶顺桥向偏位变化量为塔高的 0.06%,主梁跨中点竖向位移变化量为主跨跨度的 0.114%。

5) 悬索桥最不利活载所致的主梁跨中点挠度远大于热辐射所致的挠度;最不利活载所致拉应力大于辐射所致拉应力;最不利活载所致塔顶偏位与辐射所致偏位数值上较为接近,夏季相互叠加、冬季相互抵消。

参 考 文 献

[1] WESTGATE R, KOO K Y, BROWNJOIN J. Effect of solar radiation on suspension bridge performance [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2015, 20(5): 1

[2] WESTGATE R, KOO K Y, BROWNJOIN J. Environmental effects on a suspension bridge's dynamic response [C]// *Proceedings of the 8th International Conference on Structural Dynamics, EURO-DYN 2011*. Leuven: European Association for Structural Dynamics, 2011: 1208

[3] XIA Yong, CHEN Bo, LIN You. Temperature monitoring of Tsing Ma Suspension Bridge: numerical simulation and field measurement [J]. *Earth and Space 2010: Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments*, 2010, 2535

[4] XIA Yong, CHEN Bo, ZHOU Xiaoqing. Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma Suspension Bridge temperature behavior [J]. *Structure Control Health Monitoring*, 2013, 20: 560

[5] XU Youlin, CHEN Bo, NG C L, et al. Monitoring temperature effect on a long suspension bridge [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2010, 17: 632

[6] ZHOU Liren, XIA Yong, BROWNJOIN J, et al. Temperature analysis of a long-span suspension bridge based on field monitoring and numerical simulation [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(1): 1

[7] DING Youliang, LI Aiqun. Temperature-induced variations of measured modal frequencies of steel box girder for a long-span suspension bridge [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2004, 11(2): 145

[8] MARTINS L L, RIBEIRO A S, NUNES J M, et al. Thermal influence on long-distance optical measurement of suspension bridge displacement [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2014, 35(3/4): 693

[9] SONG Xuming, MELHEM H, LI Jun, et al. Effects of solar temperature gradient on long-span concrete box girder during cantilever construction [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(3): 1

[10] 王达, 张永健, 刘扬, 等. 基于健康监测的钢桁加劲梁钢-混组合桥面系竖向温度梯度效应分析 [J]. *中国公路学报*, 2015, 28(11): 29

WANG Da, ZHANG Yongjian, LIU Yang, et al. Vertical temperature gradient effect analysis of steel-concrete composite deck system on steel truss stiffening girder with health monitoring [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2015, 28(11): 29

[11] CAO Yinghong, YIM J, ZHAO Yang, et al. Temperature effects on cable stayed bridge using health monitoring system: a case study [J]. *Structural Health Monitoring*, 2010, 5(10): 523

[12] 殷永高, 郭佳. 多塔连跨悬索桥非漂移体系温度效应研究 [J]. *公路交通科技*, 2016(2): 175

YIN Yonggao, GUO Jia. Research on temperature effects of multipylon non-drift system suspension bridge [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2016(2): 175

[13] 邓扬, 李爱群, 丁幼亮. 大跨悬索桥梁端位移与温度的相关性研究及其应用 [J]. *公路交通科技*, 2009, 26(5): 54

DENG Yang, LI Aiqun, DING Youliang. Research and application of correlation between beam end displacement and temperature of long-span suspension bridge [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26(5): 54

[14] 孙君, 李爱群, 丁幼亮, 等. 润扬大桥悬索桥模态频率-温度的季节相关性研究及其应用 [J]. *工程力学*, 2009, 26(9): 50

SUN Jun, LI Aiqun, DING Youliang, et al. Research on correlation of modal frequency and seasonal temperature of Runyang Suspension Bridge [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(9): 50

[15] XIA Yong, XU Youlin, WEI Zelong, et al. Variation of structural vibration characteristics versus non-uniform temperature distribution [J]. *Engineering Structures*, 2011, 33(1): 146

[16] MINHOTO M J C, PARIS J C, PEREIRA P A, et al. Predicting asphalt pavement temperature with a three-dimensional finite element method [J]. *Journal of the Transportation Research Board*, 2005, 1919(1): 96

[17] ZHU Jinsong, MENG Qingling. Effective and fine analysis for temperature effect of bridges in natural environments [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2017, 22(6): 1

[18] 吴咏双. 日照条件下公路箱形组合梁桥温度场与温度应力分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2015

WU Yongshuang. Analysis of temperature field and thermal stress of highway box composite bridge under solar condition [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015

[19] 张伟. 基于日照辐射的悬索桥主缆热应力理论及结构温度效应研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2015

ZHANG Wei. Study on thermal stress theory and structure temperature effect of main cable of suspension bridge based on solar radiation [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015

[20] 上海市市政工程设计研究总院. 城市桥梁设计规范: CJJ 11—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011

Shanghai Municipal Engineering Design Institute. Code for design of the municipal bridge: CJJ 11—2011 [S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2011