



湖南大学学报(自然科学版)

Journal of Hunan University(Natural Sciences)

ISSN 1674-2974,CN 43-1061/N

《湖南大学学报(自然科学版)》网络首发论文

题目： 基于气象大数据的大跨桥梁温度效应预测方法
作者： 周云, 郑佳缘, 郝官旺, 危俊杰, 李剑, 朱正荣
收稿日期： 2023-03-04
网络首发日期： 2023-05-18
引用格式： 周云, 郑佳缘, 郝官旺, 危俊杰, 李剑, 朱正荣. 基于气象大数据的大跨桥梁温度效应预测方法[J/OL]. 湖南大学学报(自然科学版).
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/43.1061.N.20230517.1825.003.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

基于气象大数据的大跨桥梁温度效应预测方法

周云^{1,2}, 郑佳缘^{1†}, 郝官旺¹, 危俊杰¹, 李剑³, 朱正荣⁴

1. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙 410082;
2. 工程结构损伤诊断湖南省重点实验室(湖南大学), 湖南长沙 410082;
3. 中建三局第一建设工程有限责任公司, 湖北武汉 430020;
4. 长沙市建设工程质量安全监督站, 湖南长沙 410016)

摘要: 为了提高结构健康监测的经济性, 扩大其应用范围, 提出了一种基于气象站大数据信息的大跨度桥梁结构温度场预测方法, 从而实现轻量化和可持续性的桥梁温度场及温度变形计算. 以某大跨钢拱桁架桥为研究对象, 通过气象数据平台获取气象站大数据信息(包括天气、气温和风速信息), 利用 Elbdry 改进的凯尔别克辐射模型计算桥梁关键构件各表面受到的辐射强度, 基于热交换传递理论计算结构热分析边界条件, 结合有限元分析方法进行结构瞬态热分析, 从而获得目标桥梁关键构件的时变温度场. 温度场的计算结果与桥梁上实测温度在时间历程和结构竖向分布上均吻合良好, 平均误差在 3% 以内. 将计算得到的结构温度施加到桥梁结构整体有限元模型上, 得到桥梁结构的温度变形, 桥梁支座纵向位移的计算值与实测值吻合良好, 平均误差在 13 mm 以内. 验证了所提出的基于气象站大数据的桥梁结构温度场预测方法是可行的, 利用该方法可进一步得到桥梁结构的温度变形.

关键词: 结构健康监测; 温度场计算; 数值模拟; 大跨桥梁; 气象大数据; 温度变形

中图分类号: U441

文献标志码: A

A Temperature Effect Prediction Method for Long-Span Bridges Based on Meteorological Big Data

ZHOU Yun^{1,2}, ZHENG Jiayuan^{1†}, HAO Guanwang¹, WEI Junjie¹, LI Jian³, ZHU Zhengrong⁴

1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Key Laboratory for Damage Diagnosis of Engineering Structures of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China;
3. China Construction Third Bureau First Engineering Co., LTD, Wuhan 430020, China;
4. Changsha Construction Project Quality and Safety Supervision Station, Changsha 410016, China)

Abstract: In order to improve the economy and application scope of structural health monitoring, a temperature field prediction method of long-span bridges based on big data information of weather stations was proposed, so as to realize lightweight and sustainable bridge temperature field and temperature deformation calculation. Taking a large-

* 收稿日期: 2023-03-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52278306), National Natural Science Foundation of China(52278306); 湖南省重点研发计划项目(2022SK2096), Key Research and Development Program of Hunan Province (2022SK2096); 湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(201912), Science and Technology Progress and Innovation Project of Department of Transportation of Hunan Province (201912)

作者简介: 周云(1979—), 男, 湖南长沙人, 湖南大学教授, 博士

† 通信联系人, E-mail: jiayuan@hnu.edu.cn

span steel arch truss bridge as the research object, the big data information of the weather station (including weather, temperature and wind speed information) was obtained through the meteorological data platform, the radiation intensity of each surface of the key components of the bridge was calculated by Elbadry's improved Kelbek radiation model, the boundary conditions of structural thermal analysis were calculated based on the heat exchange transfer theory, and the structural transient thermal analysis was carried out in combination with the finite element analysis method, so as to obtain the time-varying temperature field of the key components of the target bridge. The calculation results of the temperature field are in good agreement with the measured temperature on the bridge in terms of time history and vertical distribution of the structure, and the average error is within 3%. The calculated structural temperature was applied to the overall finite element model of the bridge structure, the temperature deformation of the bridge structure was obtained, and the calculated value of the longitudinal displacement of the bridge support is in good agreement with the measured value, the average error is within 13mm. The analysis verifies that the proposed bridge temperature field prediction method based on weather station big data is feasible, the temperature deformation of the bridge structure can be further obtained by using this method as well.

Key words: structural health monitoring; temperature field calculation; numerical simulation; long-span bridges; meteorological big data; temperature distortion

环境温度场的变化将引起桥梁结构温度场的变化. 温度作用使桥梁结构发生热胀冷缩, 复杂结构的连接和边界条件的约束导致结构变形-内力相互制约, 制约变化关系或对桥梁结构产生不利影响. 日照辐射导致的温差效应以及异常温度影响耦合其他荷载和已有损伤等, 导致桥梁结构严重变形、开裂甚至倒塌事故的发生^[1]; 若温度变形不能及时有效地得到释放, 容易导致桥梁支座和伸缩缝发生损伤^[2-3]; 温度效应还增加了桥梁损伤识别和状态评估的难度, 温度响应可以掩盖甚至远大于结构损伤引起的响应^[4-5]. 因此深入开展大跨度桥梁结构温度场计算方法的研究, 对于及时发现、评估和控制桥梁的温度病害和损伤, 从而确保桥梁安全运营、降低维护费用和保障服役寿命具有重要的意义.

自 20 世纪 60 年代起, 国内外学者针对桥梁结构温度效应进行了大量现场观测和理论研究, 对桥梁结构温度场的认识从线性到非线性^[6-7], 从一维发展到多维^[8-9]. 得益于桥梁结构健康监测和数值模拟方法的发展, 逐渐形成理论基础催生数值模拟方法的局面^[10-11]. 叶见曙等^[12]、王达等^[13]、丁幼亮等^[14]、Xu 等^[15]、刘扬等^[16]利用桥梁结构监测数据分析桥梁的温度场特性, 研究建立桥梁结构温度场的计算方法. Lu 等^[17]、赵人达等^[18]基于实测数据, 结合物理学理论和光线遮挡算法判断结构的迎光面, 开展桥梁结构日照温度场的相关研究. 近年来, Abid 等^[19]、Lu

等^[20]基于模型或实桥试验, 利用现场实测气象数据, 结合热传导交换理论和有限元数值计算理论研究气象参数与桥梁结构温度场的关系. 在此基础上, Zhou 等^[21]提出了利用气象大数据信息实现桥梁结构温度场的数值模拟方法. Wang 等^[22]基于现场实测气象数据建立了桥梁结构离散数值模型; Fan 等^[23]基于现场实测气象参数, 结合机器学习方法, 研究桥梁结构平均温度以及温度荷载快速计算的方法. 综上, 当前桥梁温度效应的工程分析和评估严重依赖于现场监测数据, 难以满足量大面广的桥梁温度效应快速评估的工程需求. 因此, 本文针对传统桥梁温度效应分析方法的弊端, 基于气象大数据实现桥梁结构温度场以及温度效应的预测.

处于人工智能和大数据发展的时代, 有效地利用大数据成为各行业发展的新方向. 来自各地气象站的气象大数据具有易获得、可追溯、全覆盖等特点. 近十年来, 各气象数据平台的建设和运行极大地方便了社会公众查询和获取历史气象数据. 例如国家气象科学数据中心、NOAA 全球气象数据平台 (National Centers for Environmental Information) 以及 WeatherSpark 气象数据平台等, 可以用于查阅下载国内外的地面气象站和各民用机场气象站的历史气象数据. 其涉及的气象站点遍布全球, 可以覆盖国内外绝大多数桥梁. 通过气象数据平台可获得的气象数据包括天气情况、气温、风速和部分降水量等. 较

为完备的、可追溯的气象站大数据信息和较为成熟的结构温度场数值分析理论为桥梁结构温度场的快速计算和温度效应的评估预测提供了可能。

本研究通过充分挖掘和利用气象站大数据信息,结合热交换传递计算理论和有限元分析方法获得桥梁结构关键构件的温度场,将模拟计算得到的结构温度场输入桥梁结构整体的有限元模型中,进而计算得到桥梁结构的温度变形。为实现结构健康监测轻量化的目标,本文提出了一种基于气象站大数据计算大跨度桥梁结构时变温度场的方法,该方法可进一步用于桥梁结构温度效应分析。

1 结构温度场计算理论基础

桥梁结构时刻以热对流和热辐射的方式与外部环境进行热量交换,如图 1 所示。辐射传热指物体间相互发射辐射能和吸收辐射能的传热过程,对于桥梁结构主要表现为太阳直接辐射、太阳散射辐射、大气逆辐射、地面反射辐射和周围环境辐射。目前获取辐射强度的方式通常是利用经验公式进行计算。对流传热指流体流动进程中发生的热量传递的现象,对桥梁结构主要表现为空气对流换热。

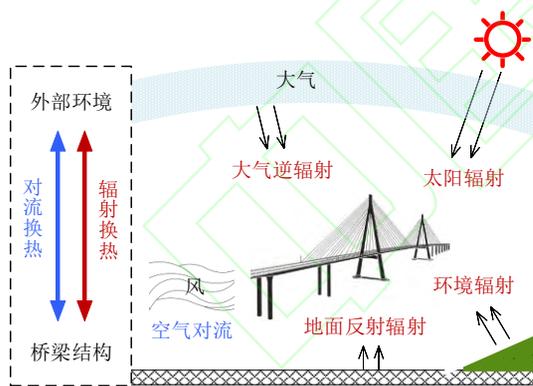


图 1 桥梁结构热量交换示意

Fig.1 Schematic of heat exchange in bridges

1.1 气象参数的确定

计算结构温度场所需的气象参数有气温、风速和辐射强度,气温和风速数据可从气象大数据平台获取,辐射强度则可通过计算得到。

太阳照射角度在一天中的变化造成结构表面的光照面和阴影面的变化,日照情况的差异可量化为辐射强度值。若已知时间、地点、结构材料特性及目标结构各表面法向角度,即可利用辐射计算模型实现结构各表面的辐射强度计算。桥梁结构关键构件

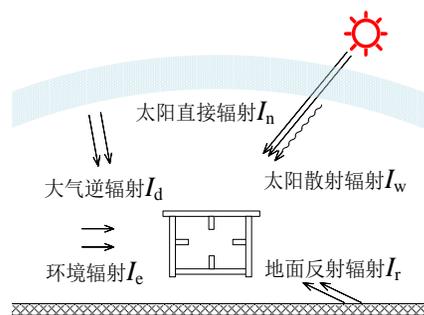


图 2 桥梁关键构件辐射计算

Fig.2 Radiation calculation of key component on bridge

受到的辐射如图 2 所示。

当前常用的辐射计算模型有凯尔别克模型、Hottel 模型和 ASHRAE 模型。ASHRAE 模型和 Hottel 模型以美国地区的长期太阳辐射实测数据为依据,通过经验公式计算太阳辐射强度;凯尔别克模型^[24]由凯尔别克基于 Bouguer-Lambert 定律提出,其普适性更强。Elbadry 对凯尔别克模型进行了改进^[8],使其更便于使用,故被国内学者广泛用于中国各地区的太阳辐射强度计算^[20-22],其具体表达式如下:

$$I = I_n + I_w + I_r + I_d + I_e. \quad (1)$$

$$I_n = I_{sc} 0.9^{(t_u k_a / \sin \beta)}, \quad (2)$$

$$I_w = 0.5 I_{sc} \sin \beta \frac{1 - (0.9 t_u k_a)^{(\sin \beta)^{-1}}}{1 - 1.4 \ln(0.9 t_u k_a)}; \quad (3)$$

$$I_r = 0.5 r_e (I_n + I_w) (1 - \cos \theta); \quad (4)$$

$$I_d = E_a C_s (T_k + T_a)^4 0.5 (1 - \cos \theta); \quad (5)$$

$$I_e = (E_u / E_a - E_u + 1) I_d. \quad (6)$$

式中: I_n 、 I_w 、 I_r 、 I_d 、 I_e 分别为太阳直接辐射、太阳散射辐射、地面反射辐射、大气逆辐射和环境辐射强度; I_{sc} 为太阳常数; t_u 为林克氏浑浊度系数; k_a 为大气相对气压; β 为太阳高度角; r_e 为地面反射系数; θ 为所求面与水平面的夹角; E_a 、 E_u 分别为大气逆辐射和环境辐射系数; C_s 为黑体辐射系数; T_k 用于换算摄氏度和绝对温度,取 273.15 K; T_a 为气温。

式(1)~式(6)适用于晴朗天气时的辐射强度计算。多云、阴雨天气等情况下,云层会对太阳辐射产生不同程度的削弱作用,故本研究中不计多云和阴雨天气时的太阳直接辐射强度。

1.2 综合换热边界条件

关于对流换热系数,不同学者提出了多种经验公式,本研究中采用应用广泛的凯尔别克公式^[24],辐射换热系数采用 Branco 等提出的经验公式^[25]计算:

$$h_c = 5.8 + 4v, \quad (7)$$

$$h_r = \varepsilon [4.8 + 0.075(T_a - 5)] \quad (8)$$

式中: h_c 、 h_r 分别为对流换热系数和辐射换热系数; v 为风速; ε 为结构材料的发射率.

对于只存在对流换热的结构, 结构表面的热流密度可通过第三类换热边界条件^[26]计算:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = h_b(T_b - T_s) \quad (9)$$

式中: n 为边界 s 上所求点的外法线方向; T_s 为结构表面温度; T_b 和 h_b 分别为结构周围流体的温度及换热系数.

基于式(9), 同时因为利用 ANSYS 模拟太阳辐射存在局限, 对于需要同时考虑辐射和对流荷载的一般做法是将辐射换热热流密度等效转换为对流换热热流密度, 计算结构边界处流体的综合温度(本文中称为综合气温)和综合换热系数^[26]:

$$h = h_c + h_r \quad (10)$$

$$T = T_a + \varepsilon I / h \quad (11)$$

式中: h 为综合换热系数; T 为综合气温; I 为总辐射强度.

以上式(7)~式(11)适用于混凝土和钢结构桥梁. 将计算所得的综合换热边界条件, 包括综合气温和综合换热系数作为对流荷载施加到结构有限元模型上, 即可进行桥梁结构温度场计算.

1.3 结构温度场计算方法

基于 1.1 节、1.2 节, 将基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法总结如下:

1) 气象数据获取: 从气象大数据平台获取目标桥梁附近气象站的气温、风速数据及天气情况.

2) 辐射强度计算: 将气温数据、桥址经纬度、时间、桥梁结构材料参数(包括辐射率和辐射吸收系数)输入辐射计算模型[式(1)~式(6)]后计算得到结构表面辐射强度.

3) 换热系数计算: 将所得气温和风速代入式(7)~式(8), 计算对流换热系数和辐射换热系数.

4) 换热边界条件计算: 将换热系数以及气象参数代入式(10)~式(11)计算结构换热边界条件.

5) 桥梁结构温度场计算: 将结构材料特性(包括热导率和比热容)和换热边界条件输入建立的结构有限元模型中, 计算结构温度场.

结构温度场计算方法如图 3 所示, 该方法适用于混凝土和钢结构桥梁的温度场计算. 对于其他材料建造的桥梁结构, 或需进一步研究其换热系数计算方法, 即对式(7)和式(8)进行改进. 对于箱型梁桥或需进一步考虑箱梁内空气传热和保温作用, 可在

有限元建模中建立相应的空气单元.

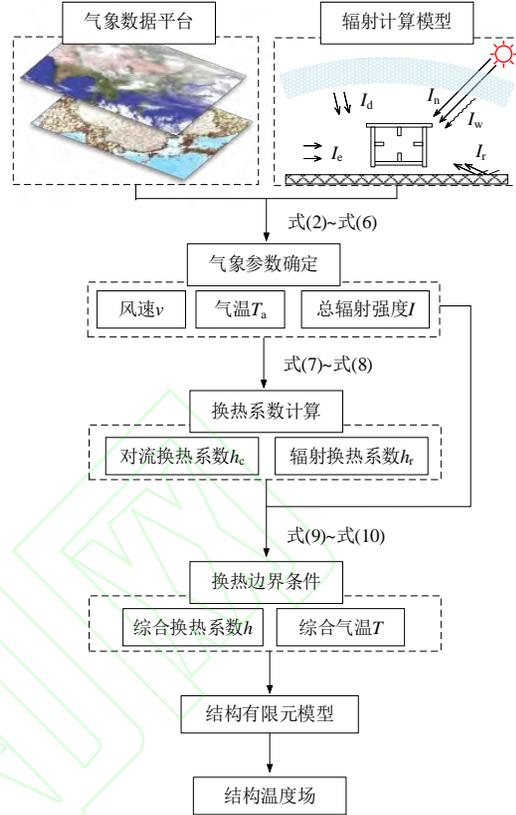


图 3 基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法
Fig.3 Temperature field calculation method of the bridge based on meteorological big data

2 工程算例

2.1 工程背景

本节以某高速铁路大桥为研究对象, 该桥的相关信息来自文献[27-30]. 桥梁结构几何外形见图 4. 该桥位于长江下游的南京大胜关河段, 浅水区边孔为两联连续钢桁梁, 主桥为六跨连续钢桁拱桥. 支座采用球面钢轴承, 4#为铰接支座, 限制其纵向位移; 其余支座则安装了纵向活动支座. 跨中位置安装有 8 个光纤光栅温度传感器, 如图 4(b)和(c)所示.

2.2 桥址气象参数计算

本研究采用 WeatherSpark 气象数据平台(网址: <http://zh.weatherspark.com>)提供的南京某机场的逐小时天气、气温和风速数据. WeatherSpark 气象数据平台基于为游客提供出行参考的初衷, 提供全世界 145 449 个地点详细的天气报告, 气象数据来自各地机场或地面气象站. 在通过各气象数据平台能够获取到逐小时历史气象信息的气象站中, 该机场气象

站是距离目标桥梁最近的气象站.该机场与目标桥梁的直线距离为 16 km,假定两地气温相同.值得指出的是,有研究表明两地风速可能存在一定差异,故风速数据仅供参考,不直接用于计算.因气温是在时间和空间上连续变化的变量,而风速的时变性较强,且易受局部温差、下垫面条件、地形地势和构筑物等

影响,目标桥梁所在地区为丘陵地形,地势起伏较大.故取该机场气象站测得的气温以及平均风速对结构温度场进行计算.本研究利用 2015 年 3 月 5 日—3 月 16 日的气象数据,如图 5、图 6 所示.其中 3 月 5 日—3 月 9 日、3 月 14 日—3 月 16 日为阴天或多云; 3 月 10 日—3 月 13 日为晴天.

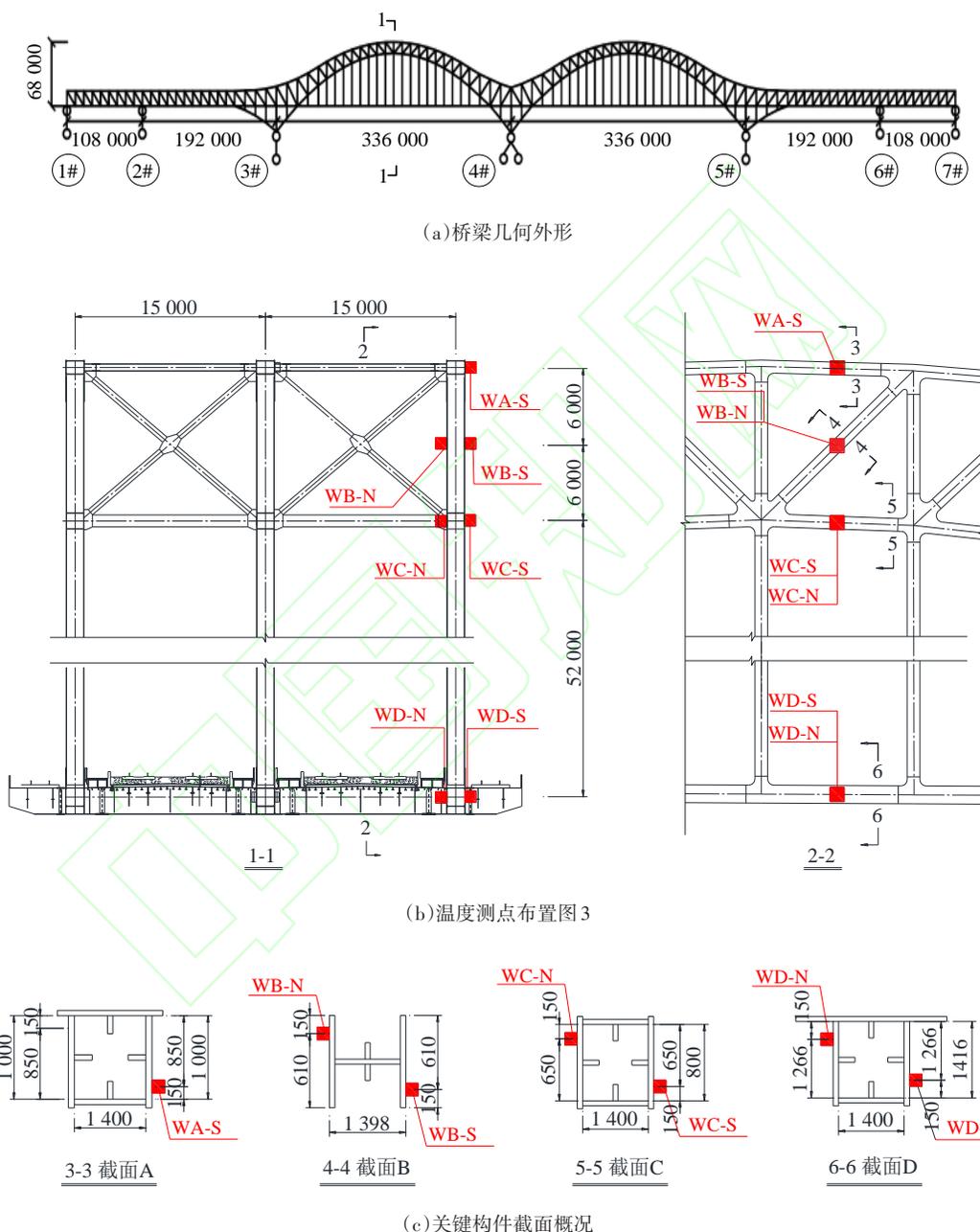


图 4 目标桥梁概况(单位:mm)

Fig.4 Overview of the target bridge (unit: mm)

算例中的太阳-桥梁相对位置如图 7 所示,桥上某关键构件受到的日照情况如图 8 所示.3 月中下旬该构件北侧面仅在 7:00—9:00 能够受到太阳直射;南侧面则几乎全天受到太阳直射.对应于实测温度

值,南侧测点温度值普遍高于北侧,且在晴朗白天南北侧点温差更大.

根据基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法第二步,利用辐射强度计算模型[式(1)~式(6)]计

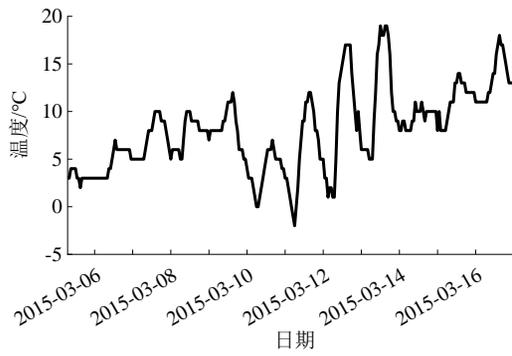


图5 气温数据
Fig.5 Temperature data

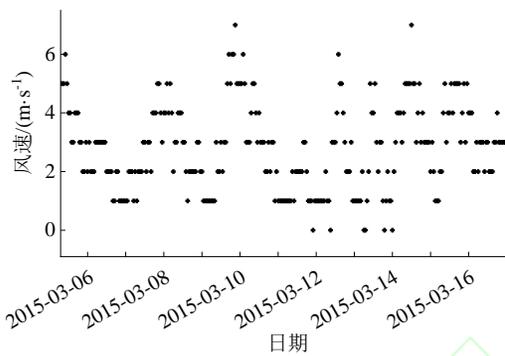


图6 风速数据
Fig.6 Wind speed data

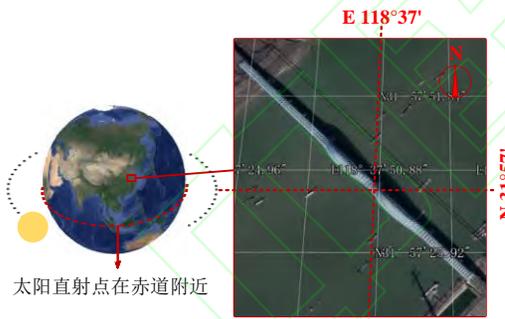
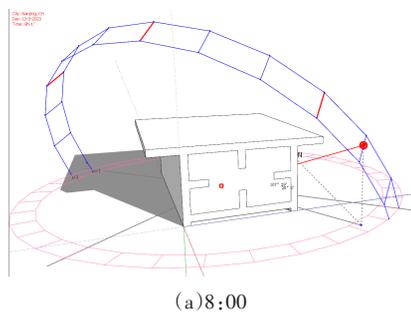
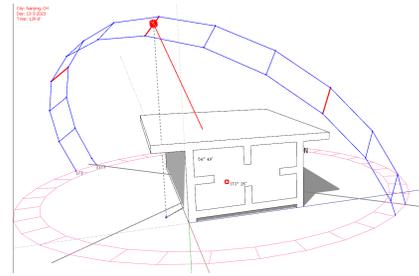


图7 3月份太阳-桥梁相对位置
Fig.7 The sun-bridge relative position in March

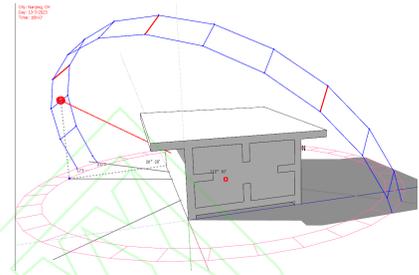
算构件各表面的辐射强度. 其中3月13日的辐射强度计算情况见图9, 当日南京站测得的日累计太阳辐射强度为 14.98 MJ/m², 计算所得桥梁关键构件顶面



(a)8:00



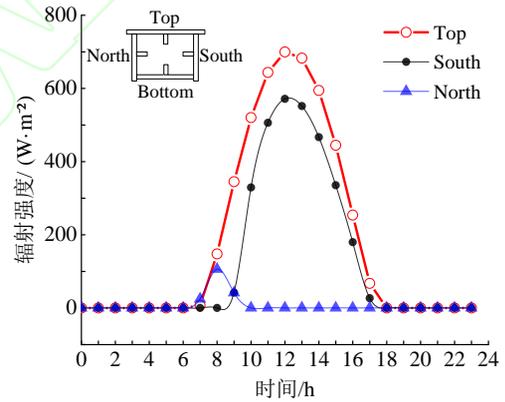
(b)12:00



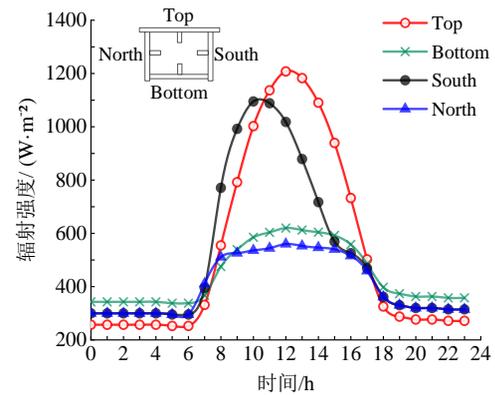
(c)16:00

图8 3月13日关键构件日照情况

Fig.8 Sun exposure of the key component on March 13



(a)太阳直接辐射强度



(b)总辐射强度

图9 3月13日关键构件辐射强度分布情况

Fig.9 Distribution of radiation intensity of the key component on March 13

的日累计太阳辐射强度为 12.97 MJ/m^2 , 目标桥梁所处位置在南京站的北边, 其 3 月份的太阳辐射强度应略小于南京站, 故可以认为所计算的辐射强度与实际情况基本相符.

2.3 有限元模型建立

在 ANSYS 中选用 PLANE55 单元(图 10)建立桥梁结构关键构件的二维有限元模型. PLANE55 单元具有四个有单一温度自由度的节点, 常用于二维热传导稳态或瞬态分析问题. 建立的有限元模型见图 11. 算例中构件的钢材为 Q345qD, 其热导率为 $60.5 \text{ W/(m}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$; 比热容为 $434 \text{ J/(kg}\cdot\text{}^\circ\text{C)}$.

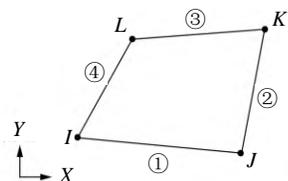


图 10 PLANE55 单元
Fig.10 UNIT PLANE55

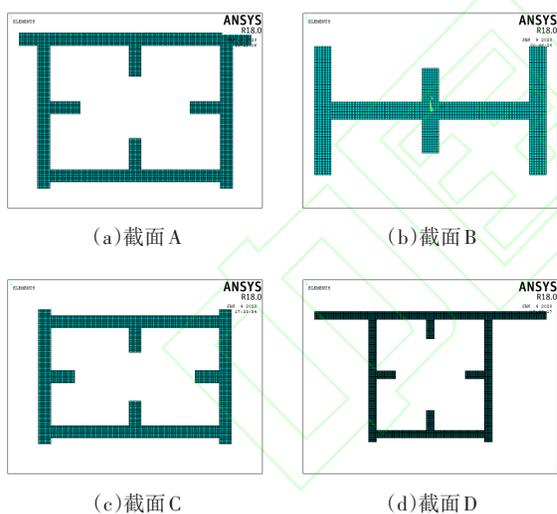


图 11 关键构件有限元模型

Fig.11 Finite element model of key components

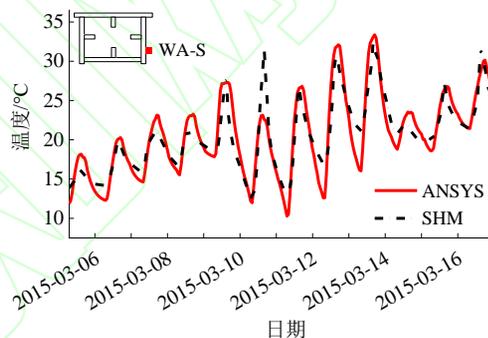
根据基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法第三和第四步, 将计算得到的各气象参数依次代入式(7)~式(8)和式(10)~式(11), 计算结构换热边界条件. 再将结构材料特性和结构换热边界条件输入有限元模型, 计算结构温度场. 大量研究表明, 6:00 时左右桥梁结构各部分的温度分布最均匀. 且研究构件截面尺寸不大, 故以第一天(3月5日)6:00 的综合气温为初始温度, 施加于整个构件截面. 关键构件温度场模拟结果详见下节.

3 结构温度场模拟结果分析

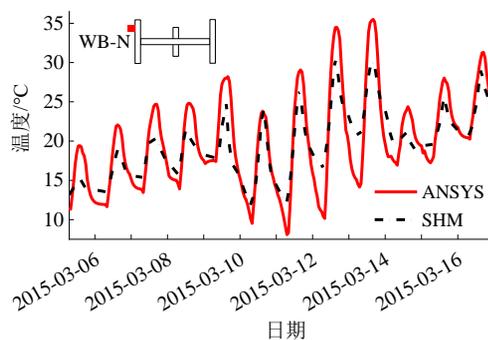
3.1 结构温度场模拟结果

2015 年 3 月 5 日—3 月 16 日气象站测量的风速在 $0\sim 7 \text{ m/s}$ 内变化, 平均风速为 3.5 m/s . 由于缺少现场实际风速数据, 计算时取气象站测得的平均风速.

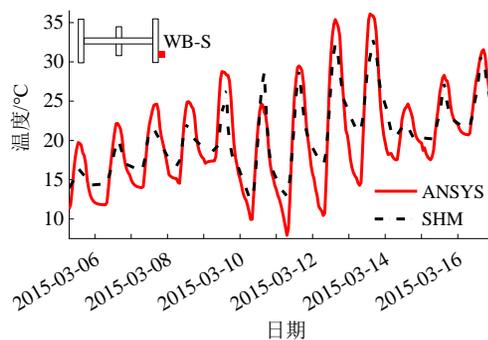
通过基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法第五步, 得到各温度测点的温度时程曲线如图 12 所示. 对比上部拱圈中测点的模拟结果和实测情况 [图 12(a)~(e)], 得到的每日最低温度低于实测值, 晴朗夜间为甚, 究其原因可能是实际夜间风速低于日间风速. 有资料显示: 从清晨至午后到夜间, 风速



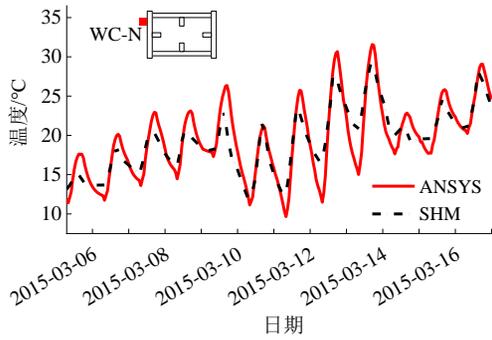
(a)WA-S 测点



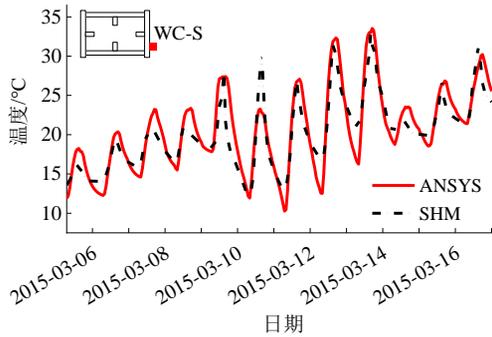
(b)WB-N 测点



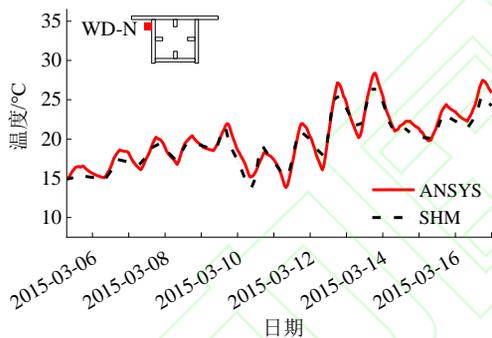
(c)WB-S 测点



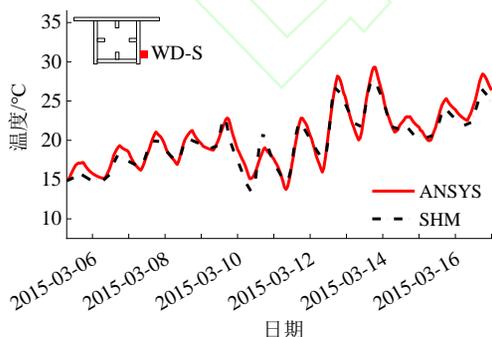
(d) WC-N 测点



(e) WC-S 测点



(f) WD-N 测点



(g) WD-S 测点

图 12 温度时程曲线

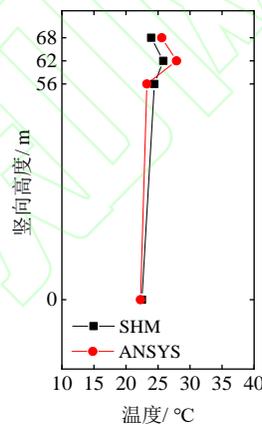
Fig.12 Temperature time history curves

呈现先增后减的变化规律. 模拟结果显示, 阴天及多云时白天的计算温度值普遍高于实测值. 推测其原因

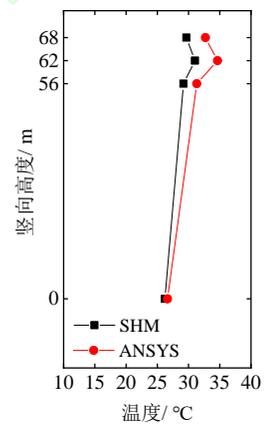
是风速和辐射强度计算值与实际情况有偏差. 下部钢架受周围结构遮挡, 处于半封闭位置, 周围结构或挡住了大部分气流, 则该处风速应远低于开敞位置. 按 3.5 m/s 的风速计算得该处温度值远低于实测值, 若减小风速至 1 m/s, 得到的温度计算值与实测值吻合良好, 如图 12(f)(g) 所示.

由于平均温度最高, 对 3 月 13 日的结构温度场模拟结果准确性进行进一步验证. 将各计算截面上两个温度测点的平均温度记为该截面的平均温度, 绘制桥梁结构的典型竖向温度梯度如图 13 所示. 基于有限元模型计算的结构竖向温度分布结果与实测结果吻合良好.

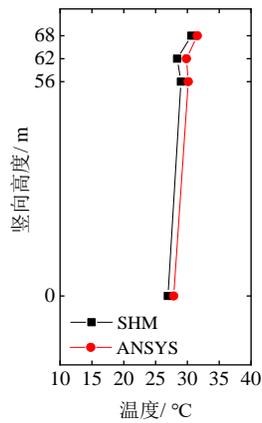
综上, 本节从各测点的温度时程曲线和桥梁结构典型竖向温度梯度两个方面, 对结构温度计算值



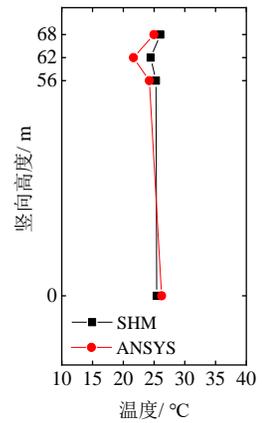
(a) 日出时刻—7:00



(b) 日温度梯度最大时刻—15:00



(c) 日落时刻—18:00



(d) 夜间—22:00

图 13 3 月 13 日桥梁典型竖向温度梯度

(将截面 D 中心高度定为 0 m)

Fig.13 Typical vertical temperature gradient of the bridge on March 13 (set the center height of section D to 0 m)

在时间历程和结构竖向上分布的准确性进行了验证.对比分析结果显示,应用所提出的基于气象大数据的结构温度计算方法进行桥梁结构温度场计算是可行的.

3.2 温度场误差分析

对各温度测点的计算-实测值进行误差分析,如图 14 所示.

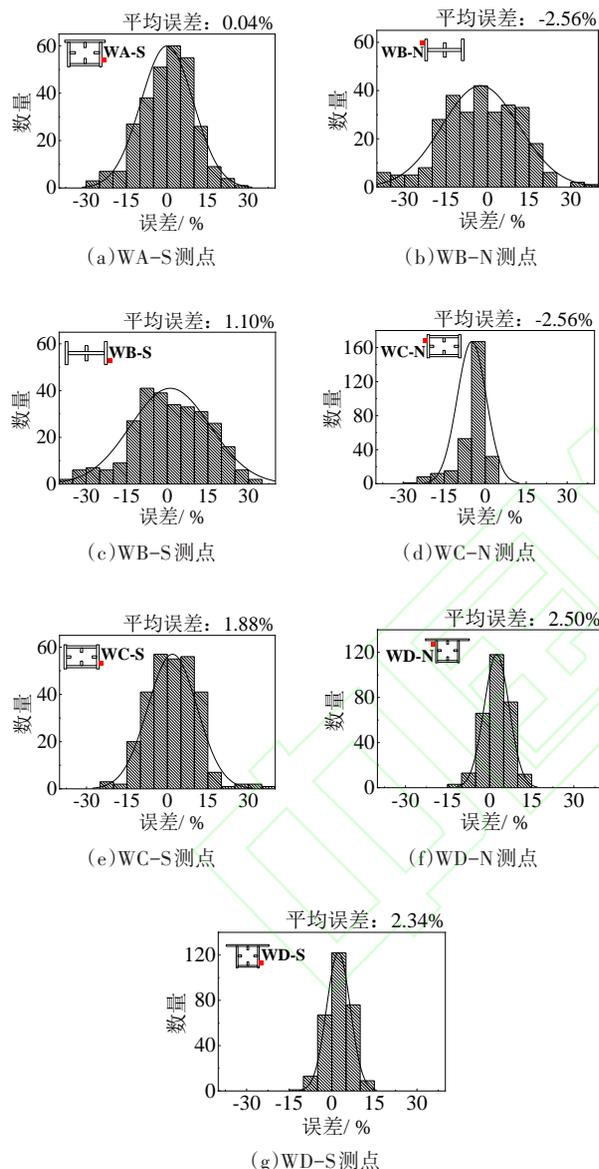


图 14 模拟温度值误差分析

Fig.14 Analog temperature value error analysis

其中 WA-S 和 WC-S 测点的误差基本控制在 15% 以内;WC-N 和 WD-N 测点的误差基本在 5% 以内;截面 B 两个测点的温度计算值误差均较大.截面 B 与算例中其他截面形式不同,计算其温度场时未考虑其自身对风的阻挡作用,或为截面 B 温度计算

值误差过大的原因.

为探究各气象参数取值偏差对结构模拟温度值的影响,利用 ANSYS 计算目标桥梁上关键构件 A 在不同气象条件下的平均温度,对关键构件进行了气象参数灵敏度分析(图 15).各气象参数的基准值取为当年气象站测得的平均值.对各气象参数与结构平均温度间的变化规律进行分析、总结,得到气温和辐射强度与结构温度近似成正比例线性关系.辐射强度对结构温度的影响大于气温.气温和辐射强度每变化 10%,构件平均温度分别相应变化 3.5% 和 6%.风速与构件平均温度近似成反比例函数关系.风速低于 3 m/s 时,其对结构温度的影响甚至大于辐射强度.

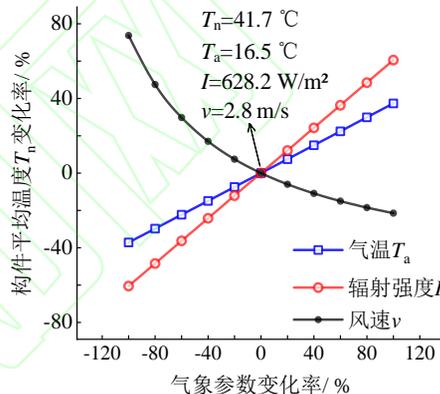


图 15 气象参数灵敏度分析

Fig.15 Sensitivity analysis of meteorological parameters

辐射强度和风速的取值极大影响着结构温度场计算结果.为了提高基于气象大数据的桥梁结构温度计算方法的计算精度,需要明确桥梁结构上各位置处的风速,同时需要进一步研究不同天气情况下的辐射强度计算方法.

4 桥梁结构温度变形计算

4.1 支座纵向位移计算

大跨桥梁结构的纵向位移主要由温度变化引起.在 ANSYS 中建立桥梁的有限元分析模型(图 16).桥梁桁架拱、横向连接杆件、主梁加劲大小纵梁和吊杆采用 BEAM188 单元;主梁桥面系和主梁横隔板采用 SHELL181 单元. BEAM188 单元为具有 2 个节点的三维线性梁单元,适用于分析细长梁结构; SHELL181 单元为具有 4 个节点的壳单元,适用于分析薄的壳体结构或有一定厚度的壳体结构.

模型的边界条件设置为:中间支座处施加纵向和竖向约束;中心节点再多施加横向约束.其余支座

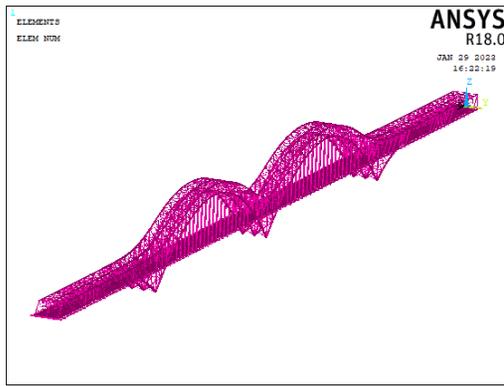
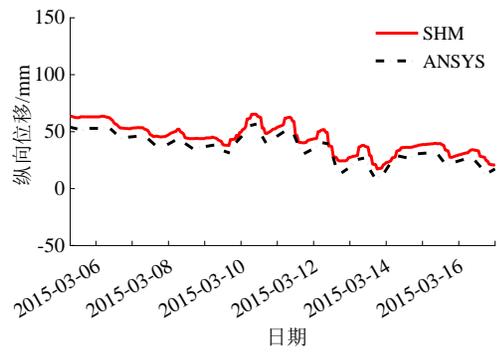


图 16 桥梁结构有限元模型

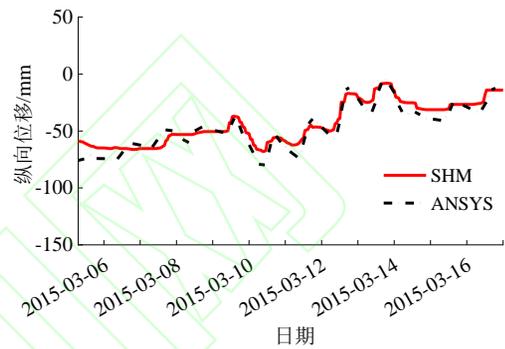
Fig.16 Finite element model of the bridge

处施加竖向约束;中心节点再多施加横向约束.目标桥梁结构采用的主要材料为钢材,钢材型号包括 Q420qE、Q370qE 和 Q345qD,其热膨胀系数均取为 $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$.

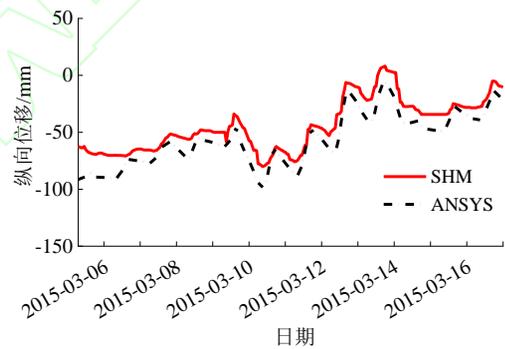
将计算所得截面 B 的平均温度施加于有限元模型中桥面板底面以及桥面板下纵横梁节点,对应桥梁结构上始终无法受到日照的部位.将上部钢拱圈中截面 A、B、C 三者的平均温度施加于其他节点.将整个结构的初始温度设置为桥梁支座位移传感器安装后投入使用时的综合气温.桥梁各支座纵向位移的计算值和实测值如图 17 所示,3#和 7#支座位移的计算值与实测值略有偏差,其余支座位移计算值与实测值吻合良好.



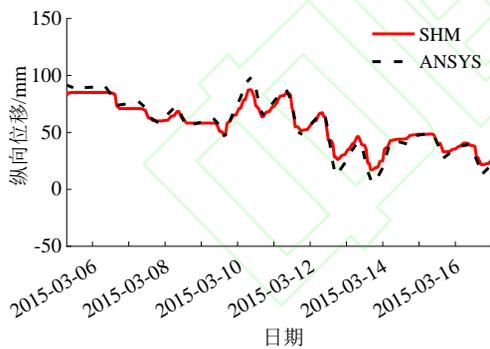
(c)3#支座



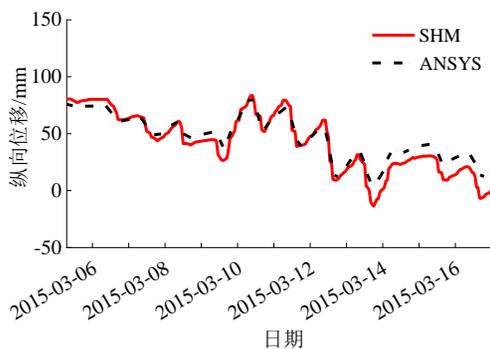
(d)6#支座



(f)7#支座



(a)1#支座



(b)2#支座

图 17 桥梁支座位移纵向位移

Fig.17 Longitudinal displacement of bridge bearings

考虑到以传感器投入使用时刻为零点计算桥梁结构温度变形,其跨越的时长较长,或导致计算结果误差的增加,故对 3 月 13 日一天中各支座的相对增量位移值进行了验证,如图 18 所示. 2# 支座夜间相对增量位移计算值低于实测值,其余支座相对增量位移计算值与实测值均吻合良好.

4.2 支座位移误差分析

对各支座位移的计算-实测值进行误差计算,如表 1 所示.

除 7# 支座外,其余支座位移的最大误差均在 22 mm 内;平均误差均在 13 mm 内.该桥梁结构以 4# 支座为中心两边对称布置,其两侧支座的纵向位

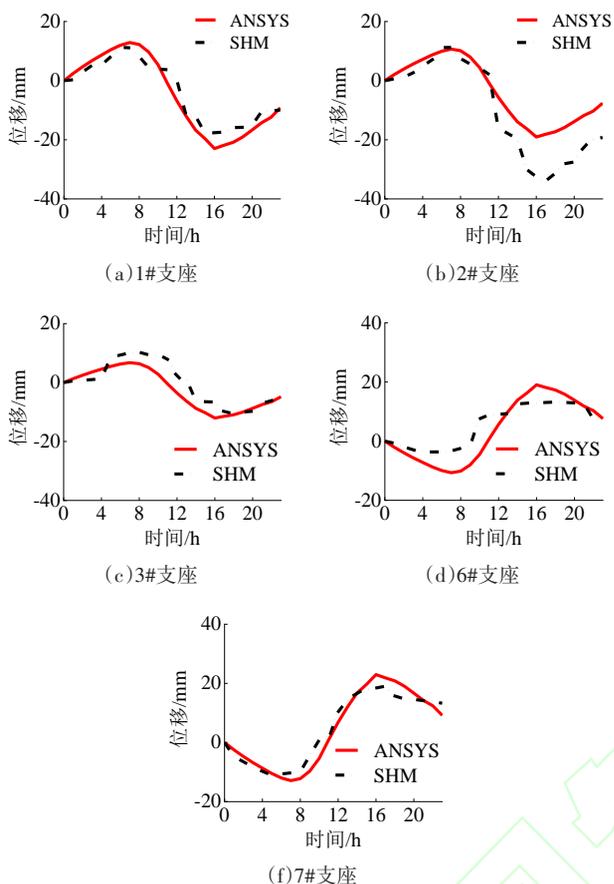


图 18 桥梁支座纵向相对增量位移

Fig.18 Longitudinal relative incremental displacement of bridge bearings

表 1 支座纵向位移误差

Tab.1 Longitudinal displacement error of the bearings

纵向位移误差	1#	2#	3#	6#	7#
最大误差/mm	16	22	-21	-17	-29
平均误差/mm	0	4	-13	-4	-13

移应关于主跨固定支座呈反对称分布,但7#支座的实测位移值远小于其对称位置的1#支座.或存在其他因素影响了该支座的纵向位移.

4.3 支座绝对位移计算

实际上,桥梁自合龙时刻起各支座开始发生位移,该桥梁健康监测系统测得的支座位移值是以传感器投入使用时刻为零点的相对位移值.将整个结构的初始温度设置为该桥合龙时(2009年9月28日上午)的综合气温,计算得到桥梁各支座的绝对纵向位移如图19所示.

实测支座相对位移的最大值为87 mm,计算得到的支座绝对位移最大值为140 mm,远大于实测值(图20).因目标桥梁支座位移传感器所测得的位移值从投入使用时刻从零计起,而该时刻桥梁各支

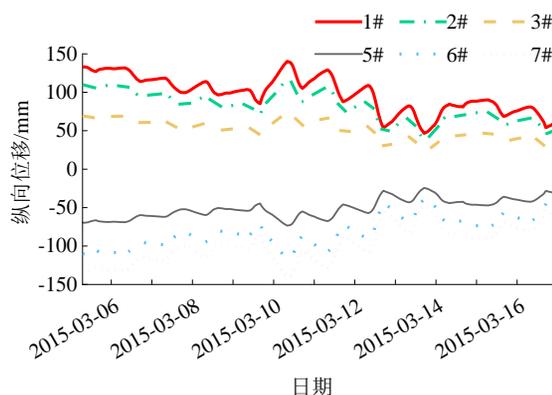


图 19 支座绝对纵向位移

Fig.19 Absolute longitudinal displacement of the bearings

座已存在一定的位移,其实际位移并不为零.故以桥梁合龙时刻为零点计算得到的各支座位移会出现大于位移传感器实测位移值的情况.

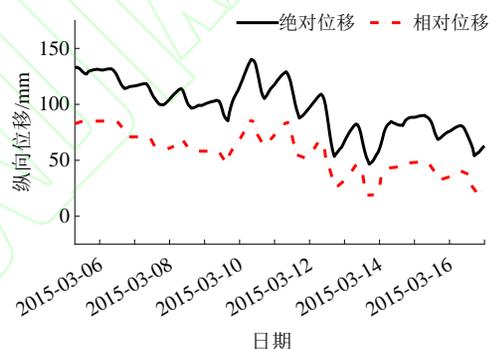


图 20 1#支座绝对位移和相对位移

Fig.20 Absolute displacement and relative displacement of 1#

5 结论

本文旨在探究直接利用气象大数据分析桥梁结构时变温度场以及温度变形的的方法,以实现轻量化和可持续性的桥梁结构健康监测.通过研究、分析,得到以下主要结论:

1)提出了一种基于气象站大数据的桥梁结构温度场计算方法.将温度场计算结果与桥梁上实测温度进行对比,两者在时间历程和结构竖向分布上均吻合良好,平均误差在3%以内.

2)提出了结构温度场数值模拟时风速的取值方法.缺少桥址处实测风速数据时,可参考桥址附近气象站测得的风速,取平均风速计算.计算夜间结构温度场时视情况可适当降低风速.

3)分析了各气象参数变化对结构温度的影响.

辐射强度对结构温度的影响大于气温,风速与结构温度成反比例函数关系.风速低于 3 m/s 时,其对结构温度的影响甚至大于辐射强度.

4) 基于计算温度场得到桥梁的温度变形.各支座纵向位移计算值与实测值吻合良好,平均误差在 13 mm 内.以桥梁合龙时刻为零点,计算得到各支座的绝对位移远大于实测的相对位移.

参考文献

- [1] ZHU S J, LEVINSON D, LIU H X, et al. The traffic and behavioral effects of the I-35W Mississippi River bridge collapse [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2010, 44(10):771-784.
- [2] KROMANIS R, KRIPAKARAN P, HARVEY B. Long-term structural health monitoring of the Cleddau bridge: evaluation of quasi-static temperature effects on bearing movements [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 12(10):1342-1355.
- [3] HUANG H B, YI T H, LI H N, et al. New representative temperature for performance alarming of bridge expansion joints through temperature-displacement relationship [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(7):04018043.
- [4] LIU H B, WANG X Q, JIAO Y B. Effect of temperature variation on modal frequency of reinforced concrete slab and beam in cold regions [J]. *Shock and Vibration*, 2016, 2016:1-17.
- [5] 闵志华, 孙利民, 淡丹辉. 影响斜拉桥模态参数变化的环境因素分析 [J]. *振动与冲击*, 2009, 28(10):99-105.
MIN Z H, SUN L M, DAN D H. Effect analysis of environmental factors on structural modal parameters of a cable-stayed bridge [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2009, 28(10):99-105. (in Chinese)
- [6] ZUK W. Thermal behaviour of composite bridges-insulated and uninsulated [J]. *Highway Research Record*, 1965, 76(1):231-253.
- [7] PRIESTLEY M N. Design of concrete bridges for temperature gradients [J]. *ACI Journal Proceedings*, 1978, 75(5):209-217.
- [8] ELBADRY M M, GHALI A. Temperature variations in concrete bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(10):2355-2374.
- [9] DILGER W H, GHALI A, CHAN M, et al. Temperature stresses in composite box girder bridges [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(6):1460-1478.
- [10] 葛耀君, 翟东, 张国泉. 混凝土斜拉桥温度场的试验研究 [J]. *中国公路学报*, 1996, 9(2):76-83.
GE Y J, ZHAI D, ZHANG G. Temperature gradient test and research of RC cable-stayed bridges [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 1996, 9(2):76-83. (in Chinese)
- [11] 张元海, 李乔. 斜支承箱梁的日照温度次内力研究 [J]. *土木工程学报*, 2008, 41(5):46-51.
ZHANG Y H, LI Q. Study on the secondary internal forces in skew box girders induced by sunshine temperature gradient [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(5):46-51. (in Chinese)
- [12] 叶见曙, 贾琳, 钱培舒. 混凝土箱梁温度分布观测与研究 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2002, 32(5):788-793.
YE J S, JIA L, QIAN P S. Observation and research on temperature distribution in concrete box girders [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2002, 32(5):788-793. (in Chinese)
- [13] 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):29-36.
WANG D, ZHANG Y J, LIU Y, 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):29-36. (in Chinese)
- [14] 丁幼亮, 王高新, 周广东, 等. 基于现场监测数据的润扬大桥斜拉桥钢箱梁温度场全寿命模拟方法 [J]. *土木工程学报*, 2013, 46(5):129-136.
DING Y L, WANG G X, ZHOU G D, et al. Life-cycle simulation method of temperature field of steel box girder for Runyang cable-stayed bridge based on field monitoring data [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2013, 46(5):129-136. (in Chinese)
- [15] XU Y L, CHEN B, NG C L, et al. Monitoring temperature effect on a long suspension bridge [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2010, 17(6):632-653.
- [16] 刘扬, 张海萍, 邓扬, 等. 基于实测数据的悬索桥钢箱梁温度场特性研究 [J]. *中国公路学报*, 2017, 30(3):56-64.
LIU Y, ZHANG H P, DENG Y, et al. Temperature field characteristic research of steel box girder for suspension bridge based on measured data [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2017, 30(3):56-64. (in Chinese)
- [17] LU Y, LI D J, WANG K, et al. Study on solar radiation and the extreme thermal effect on concrete box girder bridges [J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(14):6332.
- [18] 赵人达, 王永宝. 日照作用下混凝土箱梁温度场边界条件研究 [J]. *中国公路学报*, 2016, 29(7):52-61.
ZHAO R D, WANG Y B. Studies on temperature field boundary conditions for concrete box-girder bridges under solar radiation [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(7):52-61. (in Chinese)
- [19] ABID S R, TAYŞI N, ÖZAKÇA M. Experimental analysis of tem-

- perature gradients in concrete box-girders [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 106:523-532.
- [20] LU H L, HAO J, ZHONG J W, et al. Analysis of sunshine temperature field of steel box girder based on monitoring data [J]. *Advances Civil Engineering*, 2020, 2020:1-10.
- [21] ZHOU L R, LIANG C F, CHEN L, et al. Numerical simulation method of thermal analysis for bridges without using field measurements [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 210:240-245.
- [22] WANG Z W, ZHANG W M, ZHANG Y F, et al. Temperature prediction of flat steel box girders of long-span bridges utilizing *in situ* environmental parameters and machine learning [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2022, 27(3):04022004.
- [23] FAN J S, LI B, LIU C, et al. An efficient model for simulation of temperature field of steel-concrete composite beam bridges [J]. *Structures*, 2022, 43: 1868-1880.
- [24] 凯尔别克. 太阳辐射对桥梁结构的影响 [M]. 刘兴法, 译. 北京: 中国铁道出版社, 1981.
- KEHLBECK F. Effects of solar radiation on bridge structures [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1981. (in Chinese)
- [25] BRANCO F A, MENDES P A. Thermal actions for concrete bridge design [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1993, 119(8):2313-2331.
- [26] 张兴中, 黄文, 刘庆国. 传热学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011:55-6.
- ZHANG X Z, HUANG W, LIU Q G. Heat transmission science [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011:55-62. (in Chinese)
- [27] WANG G X, DING Y L, SONG Y S, et al. Detection and location of the degraded bearings based on monitoring the longitudinal expansion performance of the main girder of the Dashengguan Yangtze bridge [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2016, 30(4):04015074.
- [28] WANG G X, DING Y L, SUN P, et al. Assessing static performance of the Dashengguan Yangtze bridge by monitoring the correlation between temperature field and its static strains [J]. *Mathematical Problems Engineering*, 2015, 2015:1-12.
- [29] HUANG Q H, CROSETTO M, MONSERRAT O, et al. Displacement monitoring and modelling of a high-speed railway bridge using C-band Sentinel-1 data [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 128:204-211.
- [30] XIA C Y, ZHONG T Y. Numerical analysis of the Nanjing Dashengguan Yangtze River Bridge subjected to non-uniform seismic excitations [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(5):1297-1306.