

学校代号 10532  
分类号 TU399

学 号 S200100085  
密 级 公开



湖南大学  
HUNAN UNIVERSITY

## 硕士学位论文

# 基于气象大数据的大跨桥梁温度效应 预测方法研究

学位申请人姓名 郑佳缘  
培 养 单 位 土木工程学院  
导师姓名及职称 周云教授  
学 科 专 业 土木工程  
研 究 方 向 结构健康监测  
论文提交日期 2023年5月18日

学校代号：10532  
学 号：S200100085  
密 级：公开

湖南大学硕士学位论文

# 基于气象大数据的大跨桥梁温度效应 预测方法研究

国家自然科学基金（52278306）  
湖南省重点研发计划项目（2022SK2096）  
湖南省交通厅科技进步与创新项目（201912）

学位申请人姓名： 郑佳缘  
导师姓名及职称： 周云教授  
培 养 单 位： 土木工程学院  
专 业 名 称： 土木工程  
论文提交日期： 2023 年 5 月 18 日  
论文答辩日期： 2023 年 5 月 20 日  
答辩委员会主席： 易伟建教授

**Research on temperature effect prediction method of long-span  
bridges based on meteorological big data**

by

ZHENG Jiayuan

B.E. (Hunan University)2020

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the degree of

Master of Engineering

in

Civil Engineering

in the

Graduate School

of

Hunan University

Supervisor

Professor ZHOU Yun

May, 2023



# 湖南大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：

日期： 年 月 日

## 学位论文授权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

- 1、保密，在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。
- 2、不保密.

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

## 摘 要

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。当前桥梁温度效应的分析计算方法依赖现场监测数据,其监测的成本较高,难以实现量大面广普通桥梁的温度效应分析。针对如今面大量广城市桥梁群结构温度效应分析的需求,建立一种轻量化以及可持续性的桥梁结构温度效应分析评估方法十分必要。因此,本文深入开展大跨度桥梁结构温度场计算方法的研究,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,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。本文开展了以下几方面的研究:

(1) 桥址气象参数预测方法研究。基于空间插值法提出了根据气象站大数据信息计算桥址处气象信息的方法,包括桥址处的气温、风速和太阳辐射强度预测方法。利用空间插值计算方法计算桥址处气温和风速;利用幂指数辐射计算模型计算桥梁结构表面太阳辐射强度。以黑龙江、海南、西藏、四川、重庆和江苏为例,通过气象数据平台获取各地范围内地面气象站记录的逐小时气温和风速数据。对空间插值方法中的梯度距离平方反比法和克里金法在不同经纬度、地势以及气象站点疏密程度情况下用于计算桥址处气温和风速值的适用性和准确性进行了讨论验证,分析了气温和风速插值结果的误差影响因素。基于验证分析结果提出了本文中对于桥址处气温和风速取值的具体做法。

(2) 气象大数据支持的桥梁结构温度效应预测方法研究。结合热交换传递理论和有限元分析方法提出了一种气象大数据支持的桥梁结构温度场预测方法,为基于气象大数据的大跨桥梁结构温度场及温度效应预测的工程应用提供了理论基础和基本方法。在计算得到桥址处气象参数的基础上,基于热交换传递理论计算桥梁结构的热分析边界条件。将结构热分析边界条件输入目标桥梁关键构件的有限元模型,进行结构瞬态热分析,从而获得桥梁结构的时变温度场。该结果温度场计算方法适用于混凝土和钢结构桥梁,可实现轻量化和可持续性的大跨桥梁结构温度场计算。

(3) 大跨桥梁结构温度场计算方法的工程实例验证。以某大跨钢拱桁架桥和某大跨钢混组合式刚构-连续组合梁桥为对象,分别验证了所提结构温度场计算方法用于钢结构桥梁和混凝土桥梁结构的可行性。利用所提出的气象大数据支持的桥梁结构温度场预测方法计算两座桥梁关键构件的时变温度场,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。基于桥梁结构上健康监测系统测得的实际数据分别分析计算温度测点的温度计算值以及支

座纵向位移计算值的误差。验证了所提结构温度场计算方法用于桥梁结构温度效应计算的可行性。

**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

## Abstract

The changes in the environmental temperature field will cause changes in the temperature field of the bridge structure. The temperature effect makes the bridge structure thermal expansion. The connection of complex structures and the constraint of boundary conditions lead to the mutual restriction of structural deformation and internal force, restrict the change relationship or have adverse effects on the bridge structure. The current analysis and calculation methods for temperature effects on bridges rely on on-site monitoring data, which incurs high monitoring costs and makes it difficult to achieve temperature effect analysis for large and widespread ordinary bridges. It is necessary to establish a lightweight and sustainable temperature effect analysis and evaluation method for bridge structures in response to the demand for temperature effect analysis of a large number of urban bridge clusters. Therefore, this paper has carried out in-depth research on the calculation method of temperature field of long-span bridge structure, and proposed a method to calculate the time-varying temperature field of long-span bridge structure based on the weather station big data by fully mining and using the weather station big data information, combining the heat exchange transfer theory of computation and the finite element analysis method. This article conducted research on the following aspects:

(1) The research on the prediction method of meteorological parameters at the bridge site. Based on the spatial interpolation method, a method is proposed to calculate the meteorological information at the bridge site according to the big data information of the meteorological station, including the prediction method of temperature, wind speed and solar radiant intensity intensity at the bridge site. Calculate the air temperature and wind speed at the bridge site using spatial interpolation calculation method; The power exponent radiation calculation model is used to calculate the solar radiant intensity intensity on the surface of the bridge structure. Taking Heilongjiang, Hainan, Tibet, Sichuan, Chongqing, and Jiangsu as examples, hourly temperature and wind speed data recorded by ground meteorological stations in various regions are obtained through meteorological data platforms. The applicability and accuracy of the gradient distance inverse square method and the Kriging method used in spatial interpolation methods for calculating the temperature and wind speed values at the bridge site under different longitude, latitude, terrain,

and density of meteorological stations were discussed and verified. The error influencing factors of temperature and wind speed interpolation results were analyzed. Based on the verification analysis results, a specific approach for determining the air temperature and wind speed at the bridge site in this article has been proposed.

(2) The research on temperature effect prediction methods for bridge structures supported by meteorological big data. A temperature field prediction method for bridge structures supported by meteorological big data is proposed by combining heat exchange transfer theory and finite element analysis method. This provides a theoretical basis and basic method for the engineering application of temperature field and temperature effect prediction for long-span bridge structures based on meteorological big data. On the basis of calculating the meteorological parameters at the bridge site, the thermal analysis boundary conditions of the bridge structure are calculated based on the heat exchange transfer theory. Input the boundary conditions of structural thermal analysis into the finite element model of the key components of the target bridge, conduct transient thermal analysis of the structure, and obtain the time-varying temperature field of the bridge structure. The temperature field calculation method based on this result is applicable to concrete and steel structure bridges, and can achieve lightweight and sustainable temperature field calculation for large-span bridge structures.

(3) Engineering example verification of temperature field calculation method for large-span bridge structures. Taking a long-span steel arch truss bridge and a long-span steel-concrete composite rigid frame continuous composite beam bridge as objects, the feasibility of the proposed structural temperature field calculation method for steel structure bridges and concrete bridges is verified respectively. Using the proposed meteorological big data supported temperature field prediction method for bridge structures, the time-varying temperature fields of key components of two bridges are calculated. The calculated structural temperature is applied to the overall finite element model of the bridge structure to obtain the temperature deformation of the bridge structure. Based on the actual data measured by the health monitoring system on the bridge structure, analyze and calculate the temperature calculation values of the temperature measurement points and the errors in the longitudinal displacement calculation values of the supports. Verified the feasibility of the proposed structural temperature field calculation method for calculating the temperature effect of bridge structures.

**Key Words:** Structural health monitoring; Temperature field calculation; Numerical simulation; Long-span bridges; Meteorological big data; Temperature distortion

## 目 录

学位论文原创性声明和学位论文授权使用授权书 .....	I
摘要 .....	II
Abstract .....	IV
插图索引 .....	IX
附表索引 .....	XII
<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 研究背景及选题意义 .....	1
1.2 桥梁结构温度效应分析方法研究进展 .....	2
1.2.1 基于实测温度数据的结构温度场及温度效应分析方法 .....	3
1.2.2 基于气象信息的结构温度场及温度效应分析方法 .....	5
1.3 基于气象大数据的桥梁结构温度场预测方法 .....	7
1.3.1 气象数据平台 .....	7
1.3.2 桥址气象参数计算方法 .....	8
1.4 本文研究内容 .....	11
<b>第 2 章 桥址气象参数预测方法研究</b> .....	13
2.1 引言 .....	13
2.2 气温和风速的空间分布计算方法 .....	13
2.2.1 空间插值方法 .....	13
2.3 空间插值结果验证方法 .....	15
2.4 空间插值方法初选 .....	18
2.5 桥址气温预测方法 .....	19
2.6 桥址风速预测方法 .....	22
2.7 太阳辐射计算 .....	26
2.7.1 目标桥梁结构表面辐射强度计算方法 .....	26
2.7.2 太阳辐射计算参数 .....	26
2.7.3 幂指数辐射计算模型 .....	28
2.8 本章小结 .....	32
<b>第 3 章 气象大数据支持的桥梁结构温度场预测方法</b> .....	33
3.1 引言 .....	33
3.2 桥梁结构温度场计算理论基础 .....	33
3.2.1 热传导基本理论 .....	33
3.2.2 结构温度场数值计算方法 .....	34

3.3 桥梁结构热分析边界条件 .....	35
3.3.1 对流换热 .....	36
3.3.2 辐射换热 .....	37
3.3.3 综合换热边界条件 .....	37
3.4 桥梁结构温度效应预测方法 .....	37
3.5 本章小结 .....	39
<b>第 4 章 某大跨钢拱桁架桥梁温度效应计算实例 .....</b>	<b>40</b>
4.1 引言 .....	40
4.2 桥梁概况 .....	40
4.3 桥梁结构温度场计算 .....	40
4.3.1 场地气象参数计算 .....	40
4.3.2 桥梁关键构件温度场分析计算 .....	45
4.3.3 温度场计算误差分析 .....	49
4.4 桥梁结构温度变形计算 .....	51
4.4.1 支座纵向位移计算结果分析 .....	51
4.4.2 支座纵向位移计算误差分析 .....	53
4.4.3 支座绝对位移计算 .....	54
4.5 本章小结 .....	55
<b>第 5 章 某大跨钢混组合式桥梁温度效应计算实例 .....</b>	<b>56</b>
5.1 引言 .....	56
5.2 桥梁概况 .....	56
5.3 桥梁结构温度场计算 .....	57
5.3.1 场地气象参数计算 .....	57
5.3.2 桥梁关键构件温度场分析计算 .....	60
5.3.3 温度场计算误差分析 .....	65
5.4 桥梁结构温度变形计算 .....	66
5.4.1 支座纵向位移计算结果分析 .....	66
5.4.2 支座纵向位移计算误差分析 .....	67
5.5 本章小结 .....	68
<b>结论与展望 .....</b>	<b>69</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>71</b>
<b>致谢 .....</b>	<b>78</b>
<b>附录 A (攻读学位期间所发表的学术论文) .....</b>	<b>79</b>

## 插图索引

图 1.1 桥梁结构温度病害和垮塌事故案例 .....	2
图 1.2 全球地面气象站 .....	7
图 1.3 全球气象卫星云图 .....	8
图 1.4 本文研究思路 .....	12
图 2.1 各地地形图 .....	16
图 2.2 交叉验证法 .....	17
图 2.3 西藏自治区气温预测结果 .....	20
图 2.4 江苏省气温预测结果 .....	20
图 2.5 重庆市气温预测结果 .....	21
图 2.6 四川省气温预测结果 .....	21
图 2.7 海南省气温预测结果 .....	21
图 2.8 黑龙江省气温预测结果 .....	22
图 2.9 西藏自治区风速预测结果 .....	24
图 2.10 江苏省风速预测结果 .....	24
图 2.11 重庆市风速预测结果 .....	24
图 2.12 四川省风速预测结果 .....	25
图 2.13 海南省风速预测结果 .....	25
图 2.14 黑龙江省风速预测结果 .....	25
图 2.15 太阳辐射计算参数 .....	27
图 2.16 3 月 13 日某桥梁上关键构件日照情况 .....	29
图 2.17 桥梁结构辐射计算 .....	29
图 3.1 结构热分析初始条件 .....	35
图 3.2 桥梁结构热量交换途径 .....	36
图 3.3 基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法 .....	38
图 4.1 目标桥梁概况 .....	41
图 4.2 目标桥梁周边气象站 .....	42
图 4.3 气象数据 .....	43
图 4.4 3 月份太阳-桥梁相对位置 .....	44
图 4.5 3 月 13 日关键构件辐射强度分布情况 .....	44
图 4.6 PLANE55 单元 .....	45
图 4.7 关键构件有限元模型 .....	46
图 4.8 截面 A 测点温度时程曲线 .....	46

图 4.9 截面 B 测点温度时程曲线 .....	46
图 4.10 截面 C 测点温度时程曲线 .....	47
图 4.11 截面 D 测点温度时程曲线 .....	47
图 4.12 截面 D 位置 .....	47
图 4.13 3 月 13 日桥梁典型竖向温度梯度 .....	48
图 4.14 各测点温度计算误差分布 .....	49
图 4.15 钢结构桥梁的气象参数灵敏度分析 .....	50
图 4.16 桥梁结构有限元模型 .....	51
图 4.17 桥梁支座纵向位移 .....	52
图 4.18 1#支座纵向位移计算-实测值对比 .....	52
图 4.19 2#支座纵向位移计算-实测值对比 .....	52
图 4.20 3#支座纵向位移计算-实测值对比 .....	53
图 4.21 6#支座纵向位移计算-实测值对比 .....	53
图 4.22 7#支座纵向位移计算-实测值对比 .....	53
图 4.23 1#支座绝对-相对位移 .....	54
图 4.24 2#支座绝对-相对位移 .....	54
图 4.25 3#支座绝对-相对位移 .....	54
图 4.26 6#支座绝对-相对位移 .....	54
图 4.27 7#支座绝对-相对位移 .....	54
图 5.1 目标桥梁概况 .....	56
图 5.2 目标桥梁周边气象站 .....	58
图 5.3 气温数据 .....	58
图 5.4 风速数据 .....	58
图 5.5 7 月份太阳-桥梁相对位置 .....	59
图 5.6 7 月 11 日关键构件辐射强度分布情况 .....	59
图 5.7 箱梁有限元模型 .....	61
图 5.8 结构初始温度场 .....	61
图 5.9 W-1 测点温度时程曲线 .....	62
图 5.10 W-2 测点温度时程曲线 .....	62
图 5.11 W-3 测点温度时程曲线 .....	62
图 5.12 W-4 测点温度时程曲线 .....	63
图 5.13 箱梁腹板不同深度处温度分布情况 .....	63
图 5.14 7 月 11 日 6 时箱梁温度场 .....	64
图 5.15 7 月 11 日 9 时箱梁温度场 .....	64
图 5.16 7 月 11 日 12 时箱梁温度场 .....	64

图 5.17 7 月 11 日 16 时箱梁温度场 .....	64
图 5.18 7 月 11 日 19 时箱梁温度场 .....	64
图 5.19 7 月 11 日 22 时箱梁温度场 .....	64
图 5.20 混凝土箱梁桥的气象参数灵敏度分析 .....	65
图 5.21 桥梁结构有限元模型 .....	66
图 5.22 P1 支座纵向位移计算-实测值对比 .....	67
图 5.23 P2 支座纵向位移计算-实测值对比 .....	67

## 附表索引

表 1.1 气象数据平台汇总 .....	8
表 2.1 各地概况 .....	17
表 2.2 空间插值方法计算误差对比 .....	18
表 2.3 各地逐小时气温空间插值结果误差 .....	19
表 2.4 不同距离下逐小时气温空间插值结果误差 .....	20
表 2.5 各地逐小时风速空间插值结果误差 .....	23
表 2.6 不同距离下逐小时风速空间插值结果误差分析 .....	23
表 2.7 海拔气压对照表 .....	30
表 2.8 大气浑浊因子 .....	30
表 2.9 典型地表地表反射率 .....	31
表 2.10 典型地表地表环境辐射系数 .....	32
表 3.1 ANSYS 中温度场和结构场单元的对应关系 .....	35
表 4.1 目标桥梁周边气象站 .....	42
表 4.2 材料热工参数 .....	45
表 4.3 温度计算误差 .....	50
表 4.4 支座纵向位移误差 .....	53
表 5.1 目标桥梁周边气象站 .....	57
表 5.2 材料热工参数 .....	60
表 5.3 温度计算误差 .....	65
表 5.4 支座纵向位移误差 .....	67

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 研究背景及选题意义

桥梁是国家交通建设和战略发展中的重要基础设施。截至 2021 年年底，我国公路桥梁总数达到 96.11 万座、7380.21 万米，其中特大桥梁 7417 座、大桥 13.45 万座，全国公路桥梁的数量和规模分别比上年末增加 5.3%和 11.3%<sup>[1]</sup>。与此同时，恶劣的服役环境和逐年增加的交通流量使我国公路路网中踏入维修期的在役桥梁数量日益增多，大多数桥梁“带病”运营存在巨大的安全隐患，可能引发严重的事故灾难和人员财产损失。我国桥梁正处于“以建为主”向“建养并举”的转型阶段，大跨度桥梁结构安全运维是保障“交通强国”战略和构建现代化综合交通运输体系实现的重大需求。

桥梁在承受繁重交通运输荷载的同时，还要经受外部环境荷载的作用，其所引起的结构温度场变化以及温度效应或对桥梁结构产生不利影响。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和内力相互制约，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它荷载和已有损伤等，导致桥梁结构严重变形和开裂甚至垮塌事故的发生，如维也纳 Danube 大桥腹板屈曲变形<sup>[2]</sup>、深圳黄木岗立交桥严重错位事故<sup>[3]</sup>和美国 I-35W 密西西比河大桥垮塌事故<sup>[4]</sup>等，造成了严重的生命财产损失。若桥梁结构温度变形不能及时有效得到释放，容易导致桥梁支座和伸缩缝发生损伤，如威尔士 Cleddau 桥的滚轴支座损伤<sup>[5]</sup>、江苏润扬长江大桥和江阴长江公路大桥伸缩缝损伤<sup>[6]</sup>等，导致高昂的维护成本。图 1.1 显示了桥梁结构温度损伤和垮塌事故的现场图片。有研究表明<sup>[7, 8]</sup>温度效应会使桥梁的损伤识别工作复杂化，因结构的温度响应可能掩盖结构损伤所引起的响应。故深化桥梁结构温度场计算方法的相关研究，对于及时发现、分析和评估桥梁结构的温度损伤，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。

当前对于桥梁温度效应的计算分析主要基于现场监测信息进行，一些重要的桥梁建立了桥梁健康监测系统，如香港青马大桥<sup>[9]</sup>、黄河公路大桥<sup>[10]</sup>、润扬大桥<sup>[11]</sup>、东海大桥<sup>[12]</sup>和西堍门大桥<sup>[13]</sup>等。但是此种基于健康监测系统的桥梁温度效应分析手段由于监测成本高等制约因素难以普及到所有桥梁。目前的桥梁温度效应研究和工程应用主要面临以下两大问题：（1）桥梁温度效应的计算分析离不开现场监测系统的支持，其监测的成本较高，难以满足当前大量普通桥梁对温度效应评估的需要；（2）对桥梁结构温度分布的假设过于简化，实际工程设计中往往考虑最

不利温度荷载的影响，未考虑温度分布的不均匀性、非线性和时变性等实际情况。因此，针对如今量大面广城市桥梁群结构温度效应分析的需求，以及传统桥梁结构温度效应研究方法存在的痛点，建立一种轻量化、可持续性的桥梁结构温度效应的快速分析评估方法十分必要。

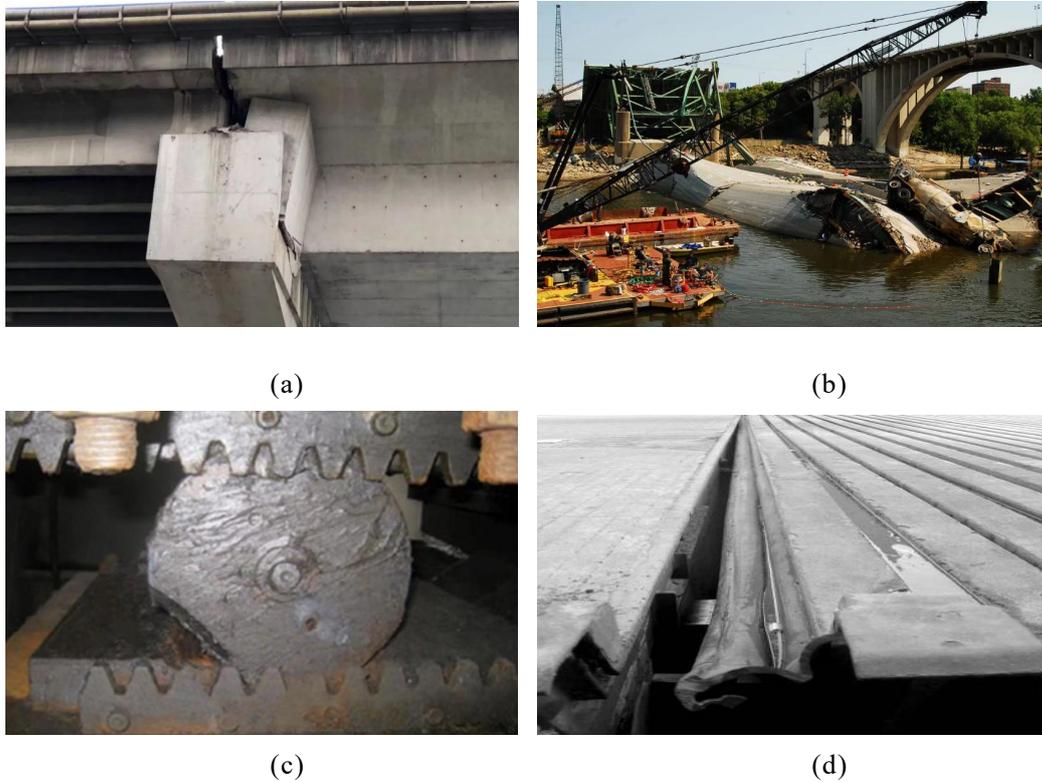


图 1.1 桥梁结构温度病害和垮塌事故案例

(a) 东莞寒溪河桥开裂<sup>[14]</sup>; (b) 美国 I-35W 密西西比河大桥垮塌事故<sup>[15]</sup>; (c) 威尔士 Cleddau 桥的滚轴支座损伤<sup>[5]</sup>; (d) 江苏江阴长江公路大桥伸缩缝损伤<sup>[16]</sup>

近十年来，各气象数据平台的建设和运行极大的方便了社会公众查询和获取历史气象数据。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。本文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实现了基于气象站大数据的大跨度桥梁结构温度场及温度效应计算，为结构健康监测的轻量化发展提供新思路和技术支持。

## 1.2 桥梁结构温度效应分析方法研究进展

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转变为非线性<sup>[17, 18]</sup>，从一维发展到多维<sup>[19, 20]</sup>。得益于 20 世纪末桥梁结构健康监测系统的应用，大量桥梁温度场的实测数据使得各种桥梁结构温度效应分析方法开始发展起来。随着数值模拟技术的发展，逐渐形成理论基础催生数值模拟方法<sup>[21, 22]</sup>。基于现场实测温度数据的温度效应分析方法和基

于气象信息的温度效应分析方法是日前对桥梁结构进行温度效应分析评估的两种主要手段。

### 1.2.1 基于实测温度数据的结构温度场及温度效应分析方法

国内外学者先是基于在特定桥梁结构上进行的长期现场观测和试验研究，利用结构实测温度数据进行桥梁结构温度效应的分析方法研究。通过监测数据总结出桥梁的温度分布模式，利用差分法、有限元法、近似解析法和人工神经网络等研究建立桥梁结构温度场和温度效应的计算方法。

1978年，M.J.N. Priestley<sup>[23]</sup>对某混凝土箱梁桥的温度场进行了长时期的监测分析，基于实测数据总结了箱梁沿高度方向的温度分布规律，进而根据平截面假定提出了结构温度应力的计算方法。

1985年，刘兴法<sup>[24]</sup>对九江长江大桥和红水河铁路桥的温度分布和温差应力持续进行了5年的观测和现场试验工作，总结得到混凝土箱梁的温度分布模式，提出了混凝土箱梁竖向和横向温度梯度计算的公式，并在此基础上利用静力学原理求解了混凝土箱梁的温度应力和位移。

1990年，Enrique Mirambell等<sup>[25]</sup>将混凝土箱型梁桥结构的温度分布求解简化为二维瞬态温度场问题，利用二维有限差分法建立了混凝土箱型梁截面时变温度场和温度应力的数值解析模型，并基于实测数据验证了该模型的可靠性。在此基础上进行了几何参数分析，研究箱梁截面几何形状对其温度效应的影响。

1996年，葛耀君等<sup>[26]</sup>对甬江斜拉桥上的温度分布进行了长期的现场观测，利用热交换传导理论建立了混凝土桥梁结构温度场的二维差分计算方程，并提出了适用于工程应用的简便计算混凝土斜拉桥箱梁、桥塔和拉索的短期温差和长期温差的公式。

2000年，刘耀东等<sup>[27]</sup>利用神经网络进行了桥梁结构温度场算法的相关研究。基于兰州黄河桥箱梁温度场实测数据以及现场实测太阳辐射强度和气温等数据，利用反向传播算法和三层前向BP网络建立了箱梁结构温度场的网络模型，该算法可用于实时求解箱梁温度场。

2002年，叶见曙等<sup>[28]</sup>对南京长江大桥第二大桥的混凝土箱梁进行了长期实地温度场观测，提出箱梁竖向温度梯度非线性分布，通过最小二乘法对箱梁的竖向温度分布和温差进行了回归分析，在此基础上利用指数函数和线性函数组合的方式提出了混凝土箱梁竖向温度梯度的简便计算方法。

2008年，张元海等<sup>[22]</sup>以某预应力混凝土箱梁桥为例，推导了其日照温度应力的计算表达式，编制了温度次内力的电算程序STSAP，根据国家规范规定的折线温度梯度模式分析了箱梁的温度次内力，同时还根据实际工程案例研究了斜度与弯扭刚度比对箱梁日照温度次内力的影响。

2010年, Xu等<sup>[29]</sup>利用香港青马大桥健康监测系统测量的一年监测数据建立了包含气温、桥梁结构温度以及结构温度变形数据的数据库。利用该数据库统计分析气温、桥梁结构有效温度以及桥梁温度变形响应间的变化规律, 基于此提出了桥梁有效温度与支座平均位移之间的线性表达式。

2013年, 丁幼亮等<sup>[30, 31]</sup>依托润扬大桥上的监测系统, 对扁平钢箱梁的温度疲劳效应进行了研究。基于长期监测数据, 总结了钢箱梁截面温度分布以及温差的日变化和季节变化规律, 利用通过 Weibull 分布和正态分布的加权和定义的概率分布模型建立了箱梁温差的概率密度函数。利用极值分析预测了桥梁设计工作寿命回归期的极值温差, 在此基础上提出了计算热应力的截面临界温差模型。

2015年, Wang等<sup>[32]</sup>基于大胜关长江大桥上的健康监测系统, 通过极值分析、相关特征分析和概率统计分析对大桥钢桁拱梁上各杆件截面的温差进行了监测和研究。通过蒙特卡罗模拟和牛顿迭代法模拟了各构件的年温差极值, 利用广义极值分布函数计算了温差标准值, 分析结果表明温差计算标准值与监测极值的相关散点图呈现良好的线性关系。

2015年, 王达等<sup>[33]</sup>对钢混组合桥面系的温度场以及温度效应开展了深入研究。将某大跨钢桁加劲梁悬索桥作为研究对象, 基于实测温度场数据建立了钢混组合桥面系温度梯度的计算模型。在此基础上通过有限元分析方法计算其竖向温度应力并与实测值进行对比, 验证模型准确性。

2017年, 刘扬等<sup>[34]</sup>根据南溪长江大桥健康监测系统的长期监测资料, 提出使用分段函数表示钢箱梁的日温度变化曲线, 采用高斯混合模型统计得到钢箱梁年温差极值分布模型, 通过外推设计基准期模型计算温差标准值。最终得到顶板和腹板的温差模式并与规范中钢混结构温差设计值进行对比验证。

2019年, 赵品等<sup>[35]</sup>基于某波形钢腹板连续箱梁桥的长期温度效应监测数据, 通过最小二乘法建立了波形钢腹板箱梁的温差计算模型。在此基础上分别应用结构力学方法和有限元方法计算箱梁桥面板的横向内力, 两者结果相吻合, 从而验证了所建立的温差计算模型的可靠性。

2020年, Zhu等<sup>[36]</sup>基于南京大胜关长江大桥的长期温度监测数据, 研究了结构整体有效温度和结构温差的联合概率分布。分布使用正态分布函数和两个对数正态分布的加权和表示结构整体有效温度和结构温差的概率分布。利用最高密度等高线法得到了桥梁 50 年重现期的极端温差。

2020年, 周浩等<sup>[37]</sup>基于望东长江公路大桥为期一年的结构温度监测数据, 进行了桥梁结构温度分布规律以及温度效应分析研究。总结了该桥箱梁、桥塔和斜拉索的温度梯度分布规律, 将实测温度梯度输入全桥 MIDAS 模型计算桥梁跨中挠度, 利用 EMD 法提取实测桥梁挠度中的温度响应部分, 并与挠度计算值进行对比。

2022年,刘江等<sup>[38]</sup>基于组合梁节段模型的长期试验开展了钢-混组合梁桥的温度场研究。考虑结构不同部位的日照差异提出了三种适用于多主梁组合梁桥的竖向温度梯度模式,并通过有限元分析方法研究了铺装厚度、桥面板板厚、钢梁形状、钢材表面吸收率以及桥面板悬臂宽度等对结构温度分布的影响。

2023年,梁建军等<sup>[39]</sup>基于某钢-混组合弯梁桥的长期结构温度监测数据,对其结构温度场和温度效应分析方法进行了研究。利用三次多项式和指数函数拟合得到桥梁结构温度梯度,并将结构温度梯度输入全桥的ABAQUS模型,计算桥梁结构温度应力和温度变形。

综上,在基于现场实测温度数据的桥梁结构温度效应分析方法研究方面,学者们做了大量的现场试验和总结工作。学者们依托桥梁上的健康监测系统和大量实测温度数据,从直接总结结构温度分布的经验公式发展到建立结构温度场的二维差分计算方程。随着监测数据的累积和新的分析方法的应用,学者们从利用简单的回归拟合方法发展到利用概率统计分析方法、有限元法和神经网络等手段研究桥梁结构温度场和温度效应的计算方法。上述方法多以得到结构温差极值为目标,且该种基于某特定桥梁长期观测数据的总结性结论,高度依赖于现场监测系统的搭建运作,对于其他桥梁结构的适用性也尚待验证。

### 1.2.2 基于气象信息的结构温度场及温度效应分析方法

基于气象信息的温度效应分析方法是指通过桥梁所处环境的气象信息,基于热交换传递计算理论,应用有限元分析方法等模拟计算桥梁结构与外部环境的热量交换以及结构内部热量传递的过程,计算得到桥梁的温度场,进而计算桥梁结构的温度响应。

1989年,魏光坪<sup>[40]</sup>利用伽辽金加权余量法提出构建了混凝土箱梁日照温度场以及温度应力的计算模型。利用气象站观测的气温和太阳辐射数据,基于热传导理论推导结构换热边界条件,通过伽辽金法推导计算结构温度场和温度应力。并编制了TTSGM程序对九江大桥的温度场及温度应力进行了验证计算。

2005年,陈焕新等<sup>[41]</sup>基于钢-混凝土结合梁试件的室内升降温试验,采用控制容积法对其温度分布进行数值计算,建立了用于计算组合梁温度场的离散化微分方程,在此基础上分析了气温和太阳辐射对结构温度分布的影响。

2006年,孙国晨等<sup>[42]</sup>基于热传导理论,利用现场实测气温和气象部门提供的太阳辐射强度数据计算结构热分析边界条件,通过ANSYS有限元分析软件对哈尔滨四方台大桥钢-混凝土叠合梁的日照温度场进行时程仿真计算。通过对比实测结构温度数据验证了计算方法的合理性。

2012年,顾斌等<sup>[43]</sup>利用现场实测气象资料,通过苏通大桥混凝土箱梁的有限元模型计算其温度分布情况。经过与结构实测温度数据的对比验证,该模型的精

确性得到了充分的验证。进而分析了气温和风速对箱梁温度的影响，基于分析结果提出分析箱梁日照温度场时应考虑气象要素的影响，从而获得更适合当地桥梁的梯度温度模式。

2012年，苏靖海等<sup>[44]</sup>对某钢-混凝土双面连续组合梁桥的日照温度场进行了研究。基于实测资料总结了箱梁的温度分布规律，并采用多项式模拟计算结构的竖向温度梯度。通过正弦函数拟合计算当地气温，利用 Elbadry 提出的辐射模型计算日照辐射量，从而对组合梁的 ANSYS 有限元模型进行结构热分析计算得到结构温度场。

2013年，Xia 等<sup>[45]</sup>基于数值分析方法对青马大桥的温度分布及温度效应进行了研究。建立了桥面板、主梁、杆件以及桥塔的精细有限元模型，基于实测气温和太阳辐射模型对各构件的时变温度场进行有限元仿真模拟。通过结构温度场监测数据验证了数值计算结果的正确性，将温度场计算结果输入到桥梁结构的结构模型中，得到桥梁各构件的位移和应变响应。

2016年，赵人达等<sup>[46]</sup>对最优混凝土箱梁日照温度场边界条件计算公式进行了讨论研究。以基于现场实测气象数据的齐甘嫩江大桥箱梁日照温度场数值计算为例，研究了不同太阳辐射计算模型、对流换热系数、辐射换热系数以及箱梁不同位置处气温取值对结构温度场计算结果的影响规律。基于对各公式的综合对比分析结果提出了最适宜的混凝土箱梁日照温度场边界条件计算方法。

2017年，Zhou 等<sup>[47]</sup>提出了利用气象共享数据实现桥梁结构温度场的数值模拟方法。根据桥梁附近机场观测的气象资料计算结构热分析边界条件，利用有限元分析软件对某大跨悬索桥箱梁典型截面进行结构瞬态热分析，计算得到结构温度场并与实测温度场进行对比验证。

2020年，Lu 等<sup>[48]</sup>基于现场实测气象数据，应用热分析软件 TAITHERM 建立了某三跨连续钢箱梁的时空温度场模型，对比实测温度场验证了所提时空温度模型的可靠性。并以中国武汉市 100 年回归期极端气象参数的代表值为热分析边界条件，进一步研究了钢箱梁的温度分布规律。

2021年，Lu 等<sup>[49]</sup>基于现场实测气象资料，利用 ANSYS 有限元分析软件对箱梁的温度场进行了分析计算。采用广义极值分布对 1990 - 2020 年桥址气象资料数据进行拟合，得到混凝土箱梁的极端热分析条件，进而分析计算了极端条件下箱梁的温度效应。

2022年，Wang 等<sup>[50]</sup>提出了一种基于多种气象变量的大跨度桥梁扁钢箱梁截面有效温度综合预测模型。基于苏通大桥现场实测的气温、太阳辐射、湿度、风速、风向等多种气象变量，利用多因素随机森林模型建立了扁钢箱梁截面有效温度和垂直温差的回归模型。

2022年，Fan 等<sup>[51]</sup>结合太阳辐射物理计算方程和热传导理论建立了钢-混凝土

组合桥梁结构的垂直离散数值模型，进而提出了可将计算效率提高近千倍的基于 Matlab 求解的一维高效数值模型。进行了室外日照实验和精细化有限元模型仿真验证了垂直离散数值模型的有效性。

综上，近年来各国学者在基于气象参数的桥梁结构温度效应分析方面开展了大量研究工作。学者们基于气象监测数据，从直接建立结构温度的离散化微分方程转变为依托有限元软件实现对桥梁结构温度场及温度效应的计算分析，近年来一些学者利用回归拟合和机器学习等方法研究快速计算桥梁结构温度场的方法。其研究成果可实现桥梁结构时变温度场的计算分析，但仍需在现场设置监测气象信息的相应传感器，难以满足量大面广城市桥梁群温度效应快速评估的工程需求。

### 1.3 基于气象大数据的桥梁结构温度场预测方法

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热交换传导理论为基于气象大数据的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。通过气象数据平台获取气象站大数据信息，利用空间插值法处理气象站气温和风速数据计算得到桥址处的气温和风速，利用幂指数辐射模型计算桥梁关键构件各表面上的太阳辐射强度，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得到结构温度场，从而实现基于气象大数据的桥梁结构温度场预测。

#### 1.3.1 气象数据平台

处于人工智能和大数据发展的时代，如何有效利用大数据成为各行各业发展的新方向。近十年来，各气象数据平台的建设和运行极大的方便了社会公众查询和获取历史气象数据。从气象数据平台可以获得国内外各地面气象站（图 1.2）以及气象卫星观测的气象数据（图 1.3），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。如上所述，气象站大数据具有易获得、可追溯、全覆盖等特点。

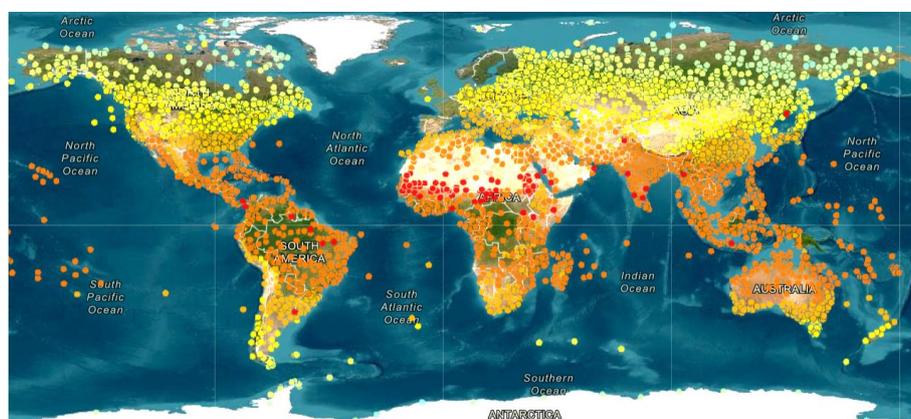


图 1.2 全球地面气象站<sup>[52]</sup>

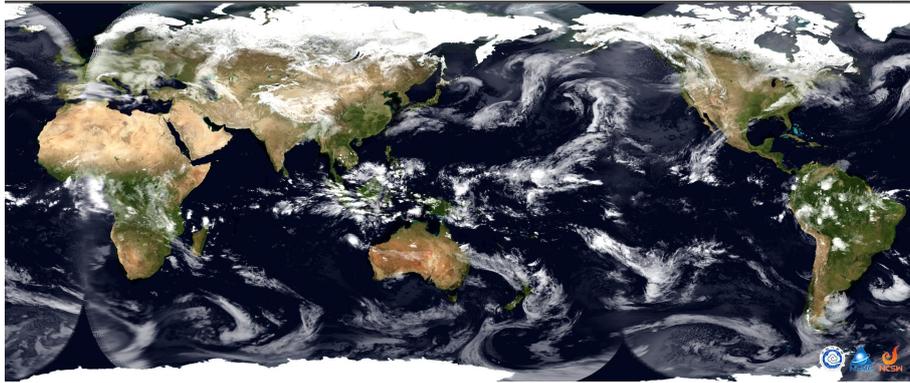


图 1.3 全球气象卫星云图<sup>[53]</sup>

将各气象数据平台汇总整理于表 1.1 中。通过气象数据平台可以查阅下载国内外地面气象站和各民用机场气象站观测的历史气象数据。通过气象数据平台可获得的气象信息包括气温、风速、天气情况和部分降雨量等。

表 1.1 气象数据平台汇总

名称	气象要素	数据来源	时间范围/频率	网址
国家气象科学数据中心	风速、风向、气温、湿度、降雨量	国内地面气象站	近七天/逐小时	<a href="http://data.cma.cn">http://data.cma.cn</a>
National Centers for Environmental Information	风速、风向、气温、湿度、降雨量	全球地面气象站	气象站建站至今/逐日	<a href="https://www.noaa.gov">https://www.noaa.gov</a>
资源环境科学数据中心	风速、风向、气温、湿度、降雨量	国内地面气象站	气象站建站至今/逐日	<a href="https://www.resdc.cn">https://www.resdc.cn</a>
Reliable Prognosis	风速、风向、气温、湿度、降雨量	全球机场气象站	气象站建站至今/逐小时	<a href="https://rp5.ru">https://rp5.ru</a>
Weather Spark	风速、风向、气温	全球机场气象站	气象站建站至今/逐小时	<a href="https://zh.earthspark.com">https://zh.earthspark.com</a>

### 1.3.2 桥址气象参数计算方法

#### 1.3.2.1 气温空间插值计算方法

具有不均匀位置分布特征的空间样本点被称为离散样本点，空间插值方法基于已知离散样本点的统计规律，通过定量化样本点之间的空间自相关性，可实现对样本点的空间结构模型的构建。国内外学者利用梯度距离平方反比法、克里金法和样条插值法等空间插值方法开展了气温空间分布预测的相关研究。

1998 年，Nalder 等<sup>[54]</sup>在多元线性回归方法和反距离权重插值法的基础上，提出了考虑海拔高程和经纬度对气象要素影响的梯度距离平方反比法，并以加拿大 30 年的月平均气温和降雨量数据为例，验证了梯度距离平方反比法优于克里金法

和反距离权重插值法。

2002年,林忠辉等<sup>[55]</sup>利用全国725个气象站观测的1951-1990年旬平均气温数据对比了距离平方反比法、梯度距离平方反比法和克里金法的精确性,结果显示梯度距离平方反比法的平均绝对误差最小。

2006年,刘宇等<sup>[56]</sup>基于最近邻域法和反向权重插值法,结合空间卷积算法提出了一种气温空间插值方法。以中国300多个地面气象站1950~2000年观测的逐日历史气温数据为例,将各气象站点位置的截断高斯滤波算子作为距离权重取值的判断依据,并通过交叉验证法验证了所提方法的准确性。

2009年,Hutchinson等<sup>[57]</sup>考虑海拔对气象要素的影响,基于样条函数插值法提出了薄板光滑样条插值法,利用1961-2003年期间加拿大日最低、最高气温和降水量数据验证所提方法的准确性,并开发了相应的气象要素插值计算软件ANUSPLIN。

2013年,蒋友严等<sup>[58]</sup>利用GIS技术建立了甘肃省的气温场。利用甘肃省内80个地面气象站1970~2009年观测的历史气温数据,基于高分辨率的高程模型和多元回归方法实现气温数据的空间化,通过交叉验证法验证了所提方法的准确性高于反距离加权法和克里金法。

2017年,贾洋等<sup>[59]</sup>采用薄板光滑样条插值法分别对地形起伏较大的横断山区的年、季、月和日气温数据进行空间插值研究。利用某山区内地面气象站1960~2014年观测的历史气温数据,通过交叉验证法计算不同时间尺度气温插值结果的精度。根据分析结果提出对气温的空间分布情况进行预测时要考虑气温的海拔梯度性差异。

2019年,李框宇等<sup>[60]</sup>基于经验气温垂直递减规律,在梯度距离平方反比法的基础上提出了一种适用于地势起伏较大地区的改进的梯度距离平方反比法(GIDS-EAR法)。并基于1981-2010年四川及其周边省份共计219个地面气象站观测的月平均气温,利用GIDS-EAR法、反距离加权法、梯度距离平方反比法和克里金法进行空间插值研究,交叉验证结果表明GIDS-EAR法的误差最小。

2020年,曹端广等<sup>[61]</sup>提出了一种考虑风速和风向的气温空间插值方法。基于气象站的风向和风速数据生成连续的风场表面,通过高斯扩散模型构建成本表面,将观测点与待求点的累计移动成本最短路径作为协变量进行气温的薄盘光滑样条插值计算。以山东省、江苏省和贵州省内气象站观测的样本数据验证了该方法的可行性。

2023年,Hou等<sup>[62]</sup>利用长短期记忆卷积神经网络提出了一种改进的克里金插值方法用于估算宁夏回族自治区的气温空间分布。利用长短期记忆卷积神经网络提取气温的时空特征以及气温与其他气象要素之间的相关性,以宁夏若干个地面气象站2000~2015年的气象资料为训练集;以2016~2020年的气象资料为验证

集，分析验证了所提方法的准确性。

综上，各国学者对气温场的空间插值方法进行了大量研究。传统空间插值方法中用于气温场预测表现较好的方法有梯度距离平方反比法、克里金法和样条插值法，其中普适性强、操作简便且精度较高和稳定的空间插值方法是梯度距离平方反比法，且梯度距离平方反比法的准确性和适用性在各国多地均得到了验证。但当前大部分学者仅利用梯度距离平方反比法对月/旬平均气温进行插值计算研究及计算误差分析，该方法对于逐小时气温插值计算的适用性有待验证。

### 1.3.2.2 桥址处风速计算方法

为实现基于离散气象站风速数据的连续风场空间分布预测，国内外学者利用反距离权重插值法、多项式插值法、样条法和克里金法等空间插值方法开展了风场空间分布预测的相关研究。

2014年，Ye等<sup>[63]</sup>基于加拿大共计235个气象站20年以上的历史风速数据，对比了反距离权重插值法、多项式插值法、样条法和克里金法用于极端风速插值计算的准确性。根据交叉验证结果提出样条法和克里金法为首选插值方法。

2015年，蔡彦枫等<sup>[64]</sup>基于广东地区26个国家级气象站、101个自动气象站和6个海洋站的极值风速数据，利用反距离加权法、Cressman法和克里金法等进行空间插值研究，交叉验证结果表明克里金法更适用于广东沿海地区极值风速的计算。

2015年，杨城等<sup>[65]</sup>考虑地形特征对风速的影响，提出了提高风场空间插值计算精度的方法。基于海坛岛2013年10月的风速实测数据，利用数字高程模型和指数律风速换算公式对不同海拔高度上的风速进行修订；基于地形划分结果以及具体坡向和坡位条件对水平方向上的风速进行修订。利用反距离加权插值法对修订后的风速进行空间插值计算，以气象站风速数据为验证集验证了该方法的准确性。

2016年，Emre Ozelkan等<sup>[66]</sup>结合反距离权重插值法、风廓线模型和幂律分布提出了一种改进的反距离权重插值法用以估算风场的空间分布，该模型可以考虑地表覆盖情况和地形对风速的影响。利用土耳其色雷斯东部地区27个气象站1970~2014年的月均风速数据进行交叉验证，结果显示所提方法的精度高于反距离权重插值法和克里金法。

2017年，魏士俨等<sup>[67]</sup>利用时空克里金算法进行了海面风场融合方法研究。基于散射计海面风场数据的规律特征构建了新的时空变异函数，提出了时空克里金插值算法，实现了多源星载散射计海面风场数据的时空融合。利用SCAT/HY-2A和ASCAT/MetOp-A观测的2011~2012年中国东部海域的海面风场数据进行时空风场计算，并基于NCEP风场数据进行了对比验证。

2020年,高珂等<sup>[68]</sup>基于时间序列法和空间相关性原理提出了一种三维风场预测方法。利用地理信息系统分析方法中的克里金法进行风速空间插值计算,通过模型生成器对预测时间尺度建模,从而建立了三维空间内的模拟风场。基于内蒙古某风电场内33台风电机组某日观测的风速实测数据验证了该方法的可行性。

2022年,龙远等<sup>[69]</sup>开展了基于PSO-BP神经网络的平流层风场预测方法研究。利用BP神经网络和粒子群优化算法对风场进行预测建模以及优化处理,通过Biharmonic样条曲面插值法计算研究区域内的预测风场。基于南海地区5年的历史风场数据,对比验证了模型的准确性。

综上,传统空间插值方法中用于风场预测表现较好的方法有克里金法。一些学者考虑地形特征对风速的影响,结合数字高程模型、风廓线模型、神经网络或粒子群算法等建立了新的风速空间插值方法。新的风速空间插值方法大多操作程序复杂,且其普适性还待验证。

## 1.4 本文研究内容

本文的选题依托于国家自然科学基金项目——《基于星载InSAR变形测量和信息共享平台数据的大跨度桥梁结构状态评估方法》。该项目以实现量大面广的大跨度桥梁的“高效率”“低成本”“轻量化”“可持续性”测量为目标,研究通过星载InSAR遥感影像获取大跨度桥梁结构长期变形演化规律,结合开放共享信息平台下气象和交通大数据的利用,形成以大跨度桥梁长周期变形观测与预警为核心的理论体系。本研究针对该项目中的关键科学问题二——信息共享平台数据支持的大跨度桥梁温度和车载作用模型建立理论,开展了基于气象大数据的大跨桥梁结构温度效应预测方法研究。

本文进行了基于气象大数据的大跨桥梁结构温度效应预测方法研究。在前人基于气象信息的桥梁结构温度场预测方法研究成果的基础之上,开展了根据气象站大数据信息计算桥址处气象信息的方法研究,进而提出了基于气象大数据的桥梁结构温度场预测方法。其具体实现思路为:通过气象数据共享平台获取所需时间段内桥址附近气象站的气象数据,利用所提出的桥址处气象信息计算方法对获取的气象站大数据进行计算处理得到桥址处的气象数据。建立目标桥梁结构的有限元模型,将基于场地气象数据计算结构的热分析边界条件并施加到结构的有限元模型上,通过结构瞬态热分析得到桥梁结构的时变温度场。

本研究旨在实现一种气象数据平台支持的,“轻量化”、“低成本”、“可持续性”的大跨度桥梁结构温度效应的快速评估方法。研究关键环节如图1.4所示,具体研究内容如下:

研究一:桥址气象参数预测方法研究。应用幂指数辐射计算模型计算桥梁结构表面太阳辐射强度;利用空间插值方法计算桥址处气温和风速。以黑龙江、海

南、西藏、四川、重庆和江苏为例，对空间插值方法中的梯度距离平方反比法和克里金法在不同经纬度、地势以及气象站点疏密程度情况下用于计算桥址处气温和风速值的适用性和准确性进行了讨论验证，基于验证分析结果提出了根据气象站大数据信息计算桥址处气温和风速的预测方法。

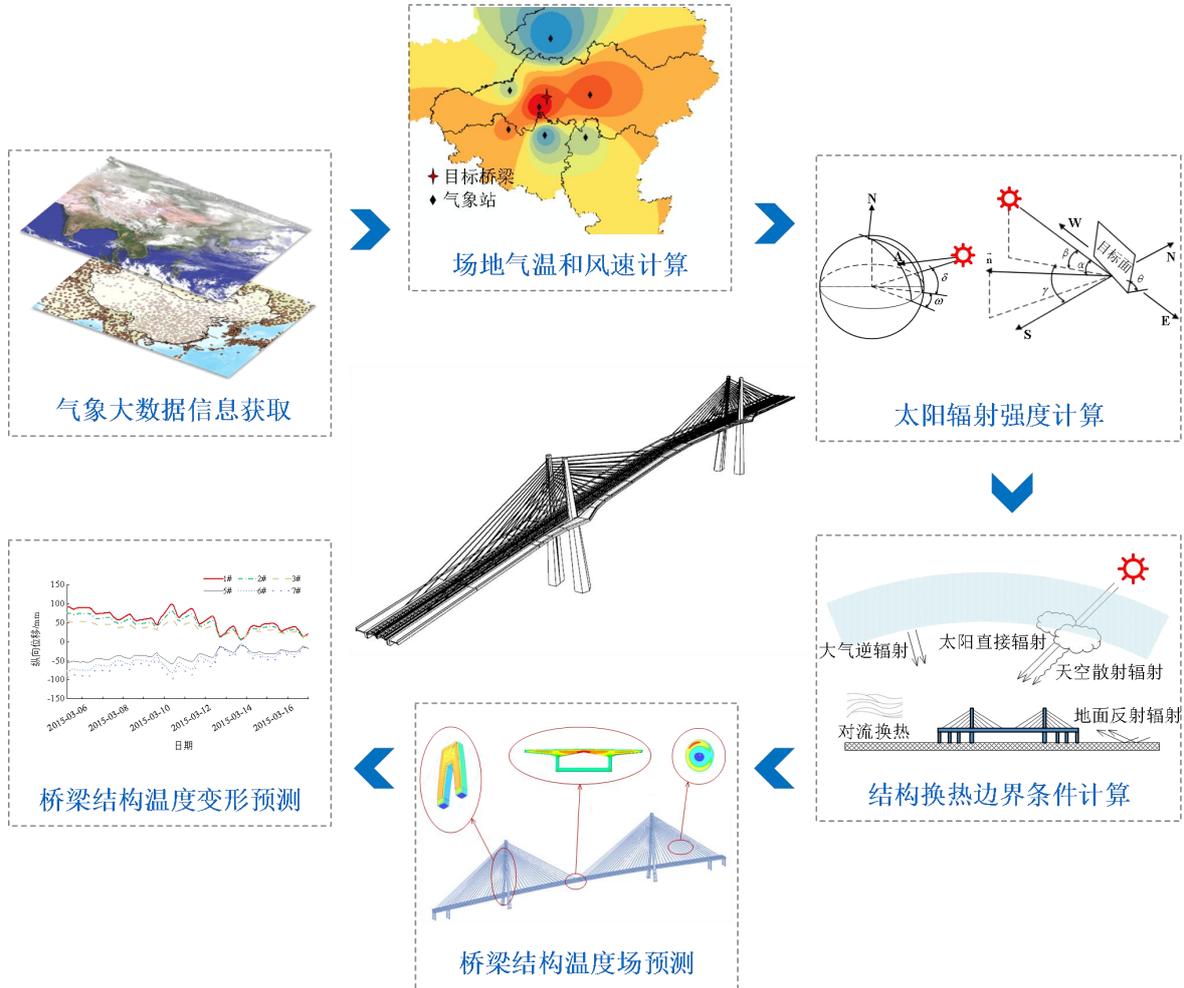


图 1.4 本文研究思路

研究二：气象大数据支持的桥梁结构温度效应预测方法研究。结合热交换传递理论和有限元分析方法提出了一种气象大数据支持的桥梁结构温度场预测方法，在计算得到桥址处气象参数的基础上，基于热交换传递理论计算桥梁结构的热分析边界条件。将结构热分析边界条件输入目标桥梁结构的有限元模型，进行结构瞬态热分析，从而获得桥梁结构的时变温度场。

研究三：基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法工程实例验证。以某大跨钢拱桁架桥和某大跨钢混组合式刚构-连续组合梁桥为研究对象，利用所提出的气象大数据支持的桥梁结构温度场预测方法计算两座桥梁关键构件的时变温度场，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，计算得到桥梁结构的温度变形。基于桥梁结构上健康监测系统的实际数据验证所提桥梁结构温度场计算方法以及其用于钢结构和混凝土桥梁温度效应计算的可行性。

## 第 2 章 桥址气象参数预测方法研究

### 2.1 引言

在轻量化监测的大前提之下，为了实现桥梁结构长期温度效应的预测，首先需要实现桥梁结构温度场的预测，拟通过有限元分析方法计算桥梁结构的温度场。为了实现桥梁结构温度场数值模拟计算，需要获得的必要条件是桥梁结构的换热边界条件，换热边界条件则可由桥址处气象信息计算得到。本章首先介绍了用于计算桥址处气温和风速值的空间插值方法，并以黑龙江、江苏、海南、四川、西藏和重庆为例，基于各地已知气象站点记录的逐小时气温和风速数据，分别对空间插值方法在不同经纬度、地势以及气象站点疏密程度情况下的适用性和准确性进行了讨论验证。其次本章介绍了应用幂指数辐射计算模型计算桥梁结构表面太阳辐射强度的方法。在此基础上进行了由气象站点处气象值到桥址处气象值的计算方法研究，为后文气象大数据支持的桥梁结构温度场预测方法研究提供前提和基础。

### 2.2 气温和风速的空间分布计算方法

为实现桥梁结构温度场的数值模拟计算，所需要的气象参数有桥址处的气温、风速和辐射强度。在没有配备现场气象监测设备的情况下，可从气象数据平台获取桥址附近地面气象站测量的气温和风速数据信息，则需要探究一种由气象站点处气象信息到桥址处各气象信息的计算方法。

#### 2.2.1 空间插值方法

具有不均匀位置分布特征的空间样本点被称为离散样本点，空间插值方法基于已知离散样本点的统计规律，通过定量化样本点之间的空间自相关性，实现对样本点的空间结构模型的构建，从而预测未知样本点的值。空间插值方法的基本原理遵循地理学第一定律：对于空间位置上越靠近的样本点，其特征值相似的可能性越大；反之距离越远的样本点，其特征值相似的可能性越小。

空间插值法最初被应用于地质统计学领域，近年来各国学者把各种空间插值算法运用到气象学领域中，探究适用于各气象参数的最佳插值方法。然而研究显示<sup>[70~73]</sup>，根据所求区域的气象站点疏密程度、地势起伏以及经纬度范围差异等，使用同一空间插值方法所得到的结果精度各异。各种基础空间插值方法以及改进优化的空间插值方法都有各自的优缺点和适用范围，还未有绝对的最佳插值方法。常用于气象领域的空间插值法有反距离权重插值法、样条函数插值法、梯度距离

平方反比法和克里金插值法。下面对各种空间插值方法作简要介绍。

### 1. 反距离权重插值法

反距离权重插值法由美国国家气象局提出<sup>[74]</sup>，较为简单的仅考虑样本点间的距离进行权重插值计算。距离值越小，其所占权重越大。其表达式为：

$$Z = \sum_{j=1}^m \frac{Z_j}{d_j^r} / \sum_{j=1}^m \frac{1}{d_j^r} \quad (2.1)$$

式中： $Z$ 为待求样本点 $i$ 数值； $Z_j$ 为已知样本点 $j$ 数值； $m$ 为已知样本点数量； $d_j$ 为样本点 $i$ 与样本点 $j$ 间的距离； $r$ 为指定的幂数。 $r$ 的取值需满足插值结果的平均绝对误差最小。当 $r$ 取2时，称为距离平方反比法。

反距离权重插值法计算简便，当已知样本点分布较为均匀和密集时，该方法的表现较好。因待求样本点受到最近已知样本点的显著影响，当样本点分布不均匀时，可能产生“牛眼”现象<sup>[74]</sup>。“牛眼”现象指以某些数据偏大/小的样本点为圆心，插值计算结果形成的圈状现象。

### 2. 样条函数插值法

样条函数插值法<sup>[74]</sup>的原理是基于离散已知样本点拟合出一个光滑曲面（通过多项式拟合构建分段函数），从而实现未知样本点数据的预测，其表达式为：

$$Z = \sum_{j=1}^m \beta_j d_j^2 \log d_j + a + bL_j + cB_j \quad (2.2)$$

$$\sum_{j=1}^m \beta_j = 0 \quad (2.3)$$

$$\sum_{j=1}^m \beta_j L_j = 0 \quad (2.4)$$

$$\sum_{j=1}^m \beta_j B_j = 0 \quad (2.5)$$

式中： $Z$ 为待求样本点数值； $m$ 为已知样本点数量； $d_j$ 为待求样本点与样本点 $j$ 间的距离； $\beta_j$ 、 $a$ 、 $b$ 和 $c$ 为方程系数，通过式(2.3)~(2.5)求解。

样条函数插值法计算较为简单，且能考虑海拔的影响。但难以计算误差，在样本点分布稀疏或小范围内样本点数据变化剧烈的情况下的插值结果不理想。

### 3. 梯度距离平方反比法

梯度距离平方反比法由Nalder等<sup>[54]</sup>于多元线性回归和反距离权重插值法提出，可综合考虑经纬度和海拔高程对气象要素的影响，常用于月/旬平均气温和降水量的空间分布计算。其表达式为：

$$Z = \left( \sum_{j=1}^m \frac{Z_j + (L - L_j)C_L + (B - B_j)C_B + (U - U_j)C_H}{d_j^2} \right) / \sum_{j=1}^m \frac{1}{d_j^2} \quad (2.6)$$

式中： $Z$  为待求样本点数值； $Z_j$  为已知样本点  $j$  数值； $m$  为已知样本点数量； $L$ 、 $B$  和  $H$  分别为待求样本点的经度、纬度和海拔高程； $L_j$ 、 $B_j$  和  $U_j$  分别为已知样本点  $j$  的经度、纬度和海拔高程； $C_L$ 、 $C_B$  和  $C_H$  分别为气温与经度、纬度和海拔高程的回归系数； $d_j$  为样本点  $i$  与样本点  $j$  间的距离。

梯度距离平方反比法在反距离权重插值法的基础上考虑了经纬度和海拔的影响，但在一定程度上也具有反距离权重插值法的缺点。

#### 4. 克里金插值法

克里金法最初由 D.G.Krige 用于寻找金矿时提出，而后 G. Matheron 将其理论化和系统化<sup>[74]</sup>。该方法基于结构分析以及变异函数理论，是一种用于实现待求区域化变量无偏最优估计的方法，其中“无偏”指预测值与实际值差值的数学期望为 0；“最优”指预测值与实际值差值的方差最小。该方法基于已知离散样本点的相关信息，包括样本点空间方位、形状、大小以及各样本点间的空间关系等，考虑变异函数所提供的结构信息实现对未知样本点特征值的预测。其表达式为：

$$Z = \sum_{j=1}^m \lambda_j Z_j \quad (2.7)$$

$$\sum_{j=1}^m \lambda_j = 1 \quad (2.8)$$

式中： $Z$  为待求样本点数值； $Z_j$  为已知样本点  $j$  数值； $\lambda_j$  为  $Z_j$  的权重值。

权重值  $\lambda_j$  需满足插值结果无偏和最优条件，即满足下式：

$$\sigma^2 = \sum_{j=1}^m \lambda_j \gamma(\mu_j, \mu) + \varphi \quad (2.9)$$

$$\sum_{i,j=1}^m \lambda_j \gamma(\mu_j, \mu_i) + \varphi = \gamma(\mu_j, \mu) \quad (2.10)$$

式中： $\gamma(\mu_j, \mu_i)$  为已知样本点  $j$ 、 $i$  间的半方差； $\gamma(\mu_j, \mu)$  为已知样本点  $j$  和待求样本点间的半方差； $\varphi$  为拉格朗日算子。

克里金法综合考虑了样本点之间的空间相关性，并给出待求样本点的无偏最优估计，但其计算过程较为复杂。

## 2.3 空间插值结果验证方法

空间插值方法计算得到的插值结果精度与所求区域的气象站点疏密程度、地势起伏以及经纬度范围差异等因素有关。本章选取了不同经纬度范围以及不同地形地势的有代表性的若干地区，对空间插值法用于逐小时气温和风速插值计算的可行性进行验证。选取的地区有黑龙江省、江苏省、海南省、四川省、西藏自治区和重庆市。各地地形图如图 2.1 所示。黑龙江省、江苏省、海南省、四川省、

西藏自治区和重庆市的相关情况见表 2.1。

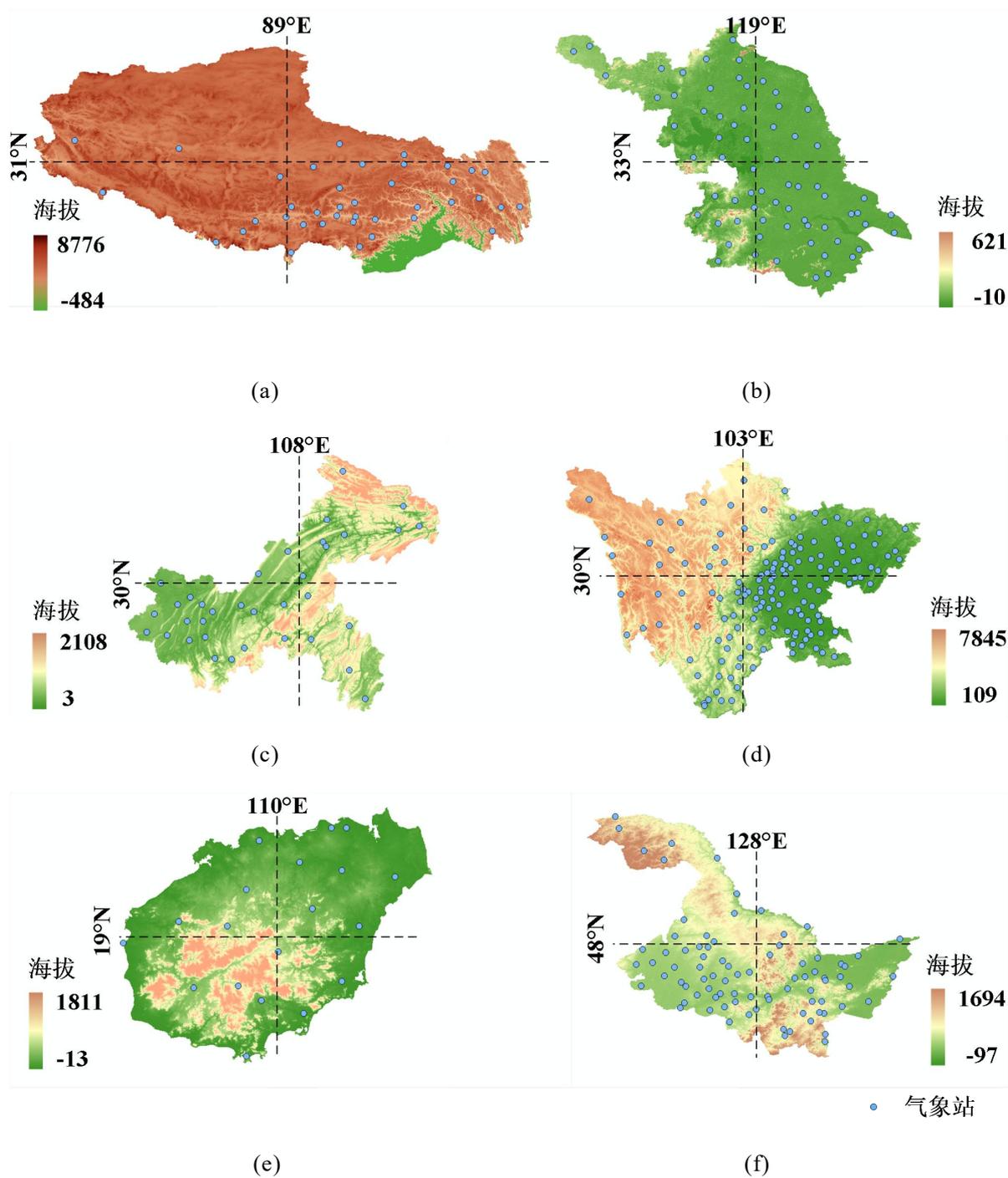


图 2.1 各地地形图（单位：m）

(a) 西藏自治区; (b) 江苏省; (c) 重庆市; (d) 四川省; (e) 海南省; (f) 黑龙江省

选取的区域经纬度范围从  $18^{\circ}$  N 至  $53^{\circ}$  N；从  $78^{\circ}$  E 至  $135^{\circ}$  E，基本覆盖了中国的最南、北、东和西端。涵盖了中国五大基本地形类型：高原、山地、盆地、平原以及丘陵。其中西藏自治区的气象站分布较为稀疏，平均 3.1 万平方公里的区域内分布有 1 个气象站；江苏省的气象站分布则较为密集，平均 0.1 万平方公里的区域内分布有 1 个气象站。本节中以上述地区为代表，分析讨论距离平方反比法、样条函数插值法、梯度距离平方反比法和克里金法用于逐小时气温和

风速值计算的精度。

通过国家气象科学数据中心查阅下载各省市和自治区内各地面气象站观测的气温和风速数据。国家气象科学数据中心为了满足国家和社会发展对于气象数据的获取的需要，通过整合数据资源，搭建共享平台，总计研制了 599 个涵盖大气科学领域的数据集产品，建立了全国覆盖的分布式气象数据服务网络体系，公众可通过该气象数据共享平台在线下载需要的气象数据。

表 2.1 各地概况

名称	地形	经度范围	纬度范围	面积/10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>	气象站数
黑龙江省	山地、平原	121°-135°E	43°-53°N	47.3	83
江苏省	平原	116°-121°E	30°-35°N	10.3	69
海南省	山地、丘陵	108°-111°E	18°-20°N	3.5	19
重庆市	山地、丘陵	105°-110°E	28°-32°N	8.2	35
四川省	高原、山地、丘陵、盆地	97°-108°E	26°-34°N	48.6	156
西藏自治区	高原	78°-99°E	26°-36°N	122.8	39

本章中利用 2023 年 2 月 15 日至 2023 年 2 月 25 日期间黑龙江省、江苏省、海南省、四川省、西藏自治区和重庆市范围内地面气象站的气温和风速数据，并应用了交叉验证法的基本方法，来分析讨论插值计算结果的准确性。交叉验证法（图 2.2）是一种统计分析方法，常用于验证机器学习中模型的模型参数。交叉验证的基本思路是对原始样本数据集加以分组，一部分作为训练集，另一部分则作为检验集。经过若干次的分组后可以得到不同的训练集及相应的检验集，某次分组中训练集里的某数据样本在下一次分组中则可能进入检验集，即所谓的“交叉”。将训练集用于训练模型；检验集用于检验所建模型得到预测结果的准确情况。

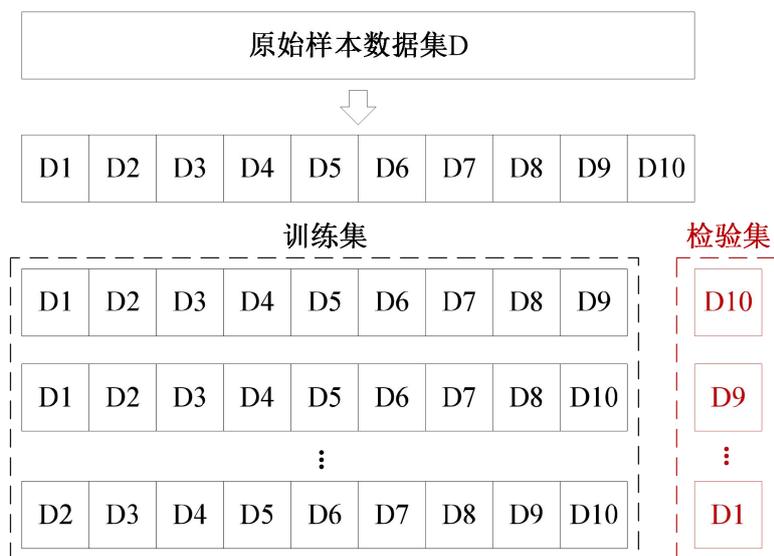


图 2.2 交叉验证法

本章中随机将各地区内的地面气象站所测气象数据分为 10 组,依次选取其中 1 组作为验证集,将验证集内气象站称为目标气象站。选取目标气象站周围临近的 5 个气象站所测气象数据进行空间插值计算,使用空间插值法计算目标气象站位置处的气温和风速预测值,再将计算所得气象参数预测值与目标气象站观测的真实值进行对比分析插值结果的误差。通过平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 这两个指标来评价各种空间插值方法用于预测目标地点处气象参数的准确情况。MAE 和 RMSE 越小,表明预测值与真实值越接近,即计算误差越小,两者的计算公式如下所示:

$$MAE = \sum_{i=1}^n |N_i - M_i| / n \quad (2.11)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (N_i - M_i)^2 / n} \quad (2.12)$$

式中:  $N_i$  为真实值;  $M_i$  为预测值;  $n$  为总样本量。

## 2.4 空间插值方法初选

基于 2023 年 2 月 15 日至 2023 年 2 月 25 日期间黑龙江省、江苏省、海南省、四川省、西藏自治区和重庆市范围内共计 401 个地面气象站观测的逐小时气温和风速数据,分别利用距离平方反比法、样条函数插值法、梯度距离平方反比法和克里金插值法对各地的离散气温和风速样本数据进行空间插值计算,通过交叉验证法计算气温和风速预测值的误差。对四种空间插值方法的精度进行比较分析,将计算得到的误差结果汇总于表 2.2 中。

由四种空间插值方法的计算结果误差对比分析可知,梯度距离平方反比法用于逐小时气温插值计算的精度高于其他三种方法;而克里金法用于逐小时风速插值计算的精度高于其他三种方法。故下文分别利用梯度距离平方反比法和克里金法计算桥址处的逐小时气温和风速值。

表 2.2 空间插值方法计算误差对比

空间插值方法	气温 (°C)		风速 (m/s)	
	MAR	RMSE	MAR	RMSE
距离平方反比法	1.50	2.01	2.29	3.45
样条函数法	1.72	2.43	1.68	2.12
梯度距离平方反比法	0.97	1.30	1.36	1.71
克里金法	0.99	1.36	1.01	1.34

## 2.5 桥址气温预测方法

基于 2023 年 2 月 15 日至 2023 年 2 月 25 日期间黑龙江省、江苏省、海南省、四川省、西藏自治区和重庆市范围内地面气象站观测的逐小时气温数据，利用梯度距离平方反比法分别对各地的离散气温样本数据进行空间插值计算，通过交叉验证法计算各地区气温预测值的计算误差。将计算得到的误差结果总结于表 2.3 中。各地区 MAR 均小于 2，即气温预测值与真实值平均差距在 2°C 以内。观察得到气象站密度与 MAR 及 RMSE 成反比，具体表现为：气象站密度较大的江苏省、海南省、四川省和重庆市的 MAR 及 RMSE 分别在 0.9 和 1.2 以内；气象站密度较小的黑龙江省和西藏自治区的 MAR 及 RMSE 略大一些。

表 2.3 各地逐小时气温空间插值结果误差

名称	经度中值	纬度中值	气象站数	气象站密度	MAR	RMSE
黑龙江省	128°E	48°N	83	1.75	1.53	2.05
江苏省	119°E	33°N	69	6.70	0.50	0.72
海南省	110°E	19°N	19	5.43	0.53	0.71
重庆市	108°E	30°N	35	4.27	0.61	0.90
四川省	103°E	30°N	156	3.21	0.83	1.11
西藏自治区	89°E	31°N	39	0.32	1.81	2.28

注：表中的气象站密度为表 2.1 中气象站数与面积的比值

由梯度距离平方反比法的计算公式可得气温预测值受距离目标地点最近气象站的气温值影响最大。为简便于工程实际的应用，下文基于 2023 年 2 月 15 日至 2023 年 2 月 25 日期间各地区地面气象站观测的逐小时气温数据，对无需进行空间插值计算的最大气象站距离进行分析讨论。把目标气象站与最近气象站的距离  $d_{\min}$  作为分类标准，将各地区内总计 401 个地面气象站分为 A~F 共 6 组：

A 组：  $0\text{km} < d_{\min} \leq 15\text{km}$

B 组：  $15\text{km} < d_{\min} \leq 20\text{km}$

C 组：  $20\text{km} < d_{\min} \leq 25\text{km}$

D 组：  $25\text{km} < d_{\min} \leq 30\text{km}$

E 组：  $30\text{km} < d_{\min} \leq 35\text{km}$

F 组：  $35\text{km} < d_{\min}$

选取目标气象站周围临近的 5 个气象站所测气温数据进行空间插值计算，并通过交叉验证法计算各组的气温插值结果误差，将 A~E 组的误差计算结果汇总于表 2.4。

由梯度距离平方反比法的计算公式以及表 2.3 可推测，气温预测值的 MAR

及 RMSE 与气象站间距离和分布情况有关，包括目标地点与最近气象站的距离  $d_{\min}$  和目标地点与周围用于插值计算的气象站的平均距离  $\bar{d}$ ， $d_{\min}$  和  $\bar{d}$  越小，气温预测值的误差越小。当  $d_{\min}$  小于 20km 时，由距目标气象站最近气象站的气温值代入计算  $MAE_{\min}$  小于由气温预测值代入计算 MAR，换言之即当目标地点与最近气象站的距离小于 20km 时，无需进行空间插值计算，可直接使用距目标地点最近气象站的气温值作为目标地点的气温预测值。

表 2.4 不同距离下逐小时气温空间插值结果误差

类别	$d_{\min}$ /km	$\bar{d}$ /km	MAR	$MAE_{\min}$	RMSE	$RMSE_{\min}$
A	0-15	36.5	0.63	0.61	0.94	0.94
B	15-20	26.5	0.44	0.38	0.60	0.54
C	20-25	40.5	0.66	0.95	0.90	1.20
D	25-30	56.9	1.06	1.61	1.39	2.03
E	30-35	44.6	0.73	1.05	1.02	1.46

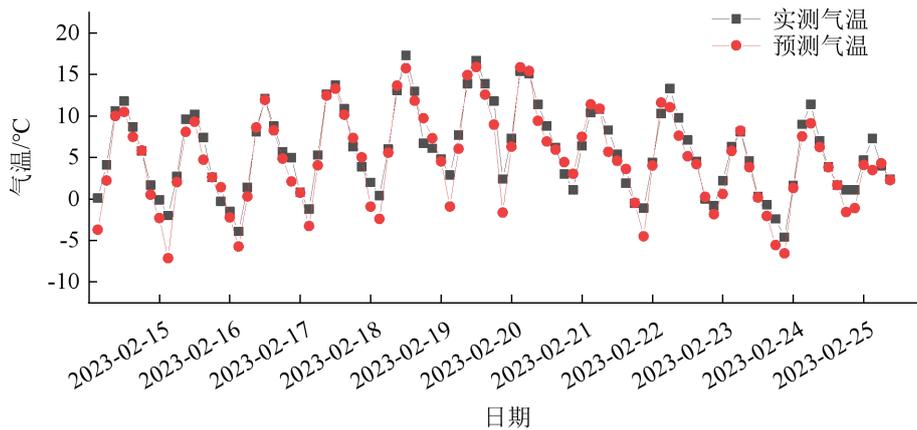


图 2.3 西藏自治区气温预测结果

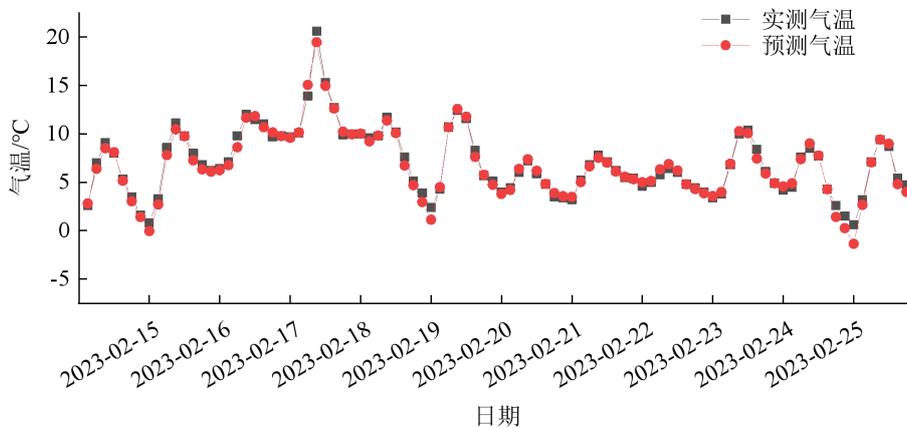


图 2.4 江苏省气温预测结果

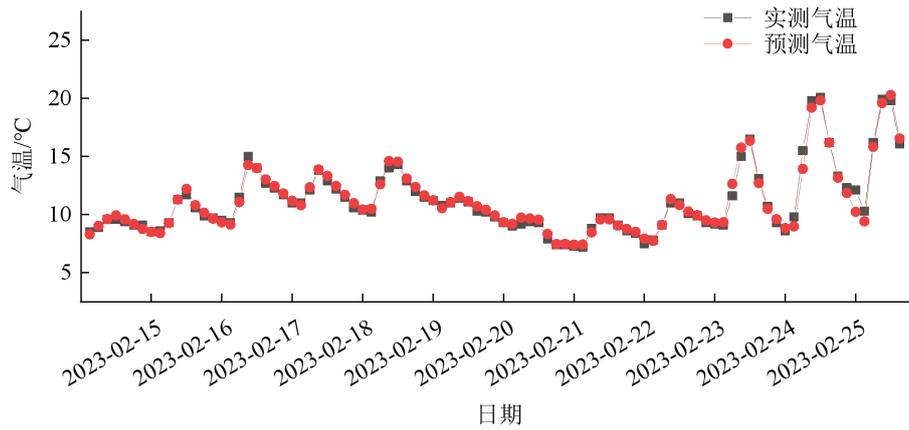


图 2.5 重庆市气温预测结果

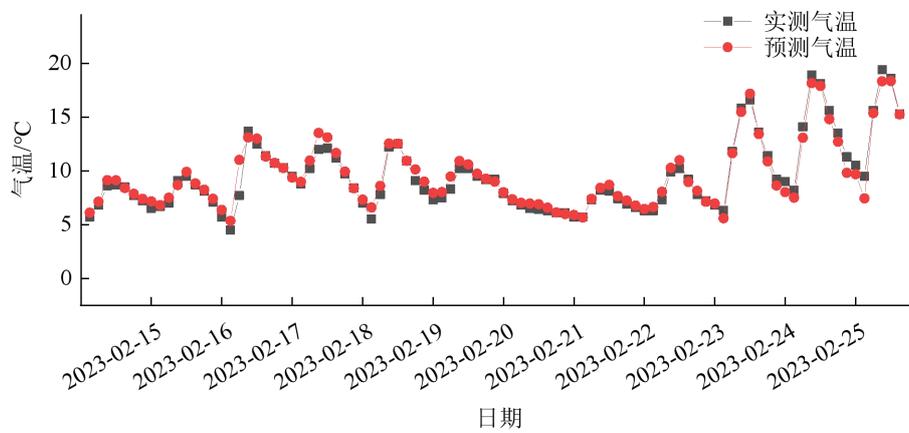


图 2.6 四川省气温预测结果

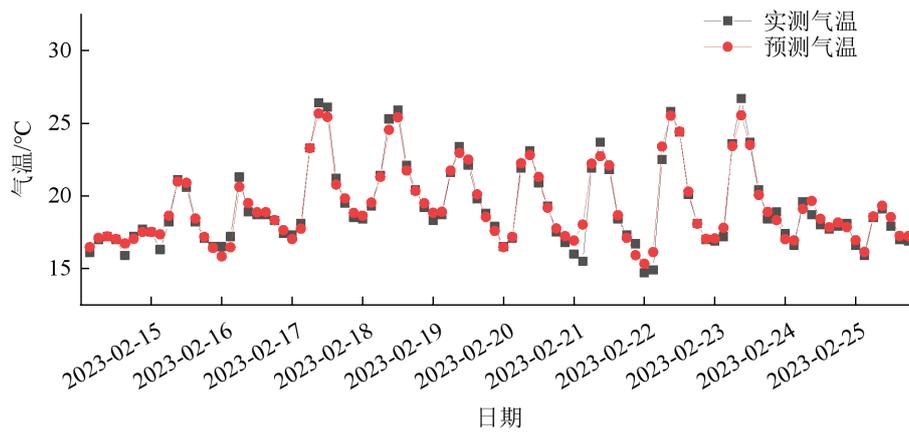


图 2.7 海南省气温预测结果

分别随机选取黑龙江省、江苏省、海南省、四川省、西藏自治区和重庆市中的 1 个目标气象站，2023 年 2 月 15 日至 2023 年 2 月 25 日期间基于梯度距离平方反比法的逐小时气温预测值与气温实测值如图 2.3~图 2.8 所示。各地气温预测值均与实测值符合良好。在气象站分布密集的地区如江苏省、海南省和重庆市，气温预测值与实测值基本一致；在气象站分布稀疏的地区如黑龙江省和西藏自

区，气温预测值与实测值略有偏差。推测存在局部地区降雨等因素影响着局部气温变化，若此时仍然使用距离较远的气象站气温数据进行插值计算，则可能导致气温预测值与实测值偏差较大的情况。

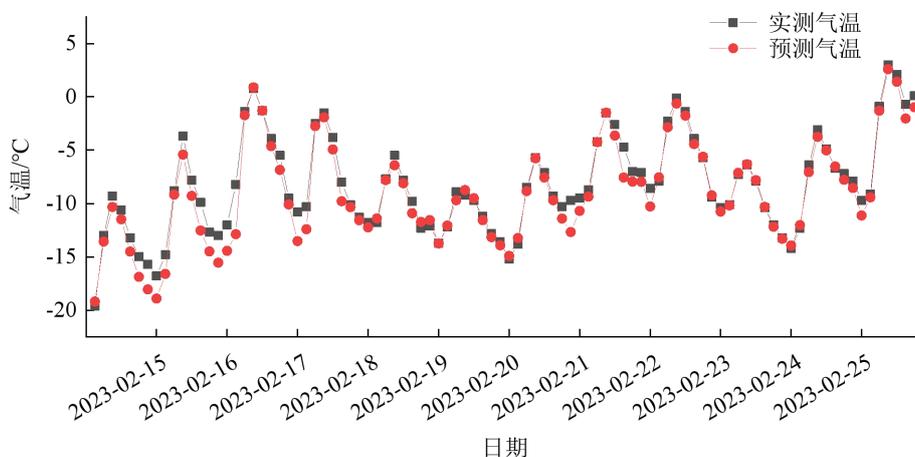


图 2.8 黑龙江省气温预测结果

综上，梯度距离平方反比法基本适用于中国各地的逐小时气温预测，且具有较高的精度。当目标地点与最近气象站的距离大于 20km 时，可使用梯度距离平方反比法对目标地点临近气象站气温进行空间插值计算，得到目标地点处的气温预测值，本节以黑龙江省、江苏省、海南省、四川省、西藏自治区和重庆市为代表，计算其气温预测值的平均绝对误差在 2℃ 以内。当目标地点与最近气象站的距离小于 20km 时，使用梯度距离平方反比法可能会放大误差，建议此时直接使用距目标地点最近气象站的气温值作为目标地点的气温预测值。

## 2.6 桥址风速预测方法

基于 2023 年 2 月 15 日至 2023 年 2 月 25 日期间黑龙江省、江苏省、海南省、四川省、西藏自治区和重庆市范围内地面气象站观测的逐小时风速数据，利用克里金法分别对各地的离散风速样本数据进行空间插值计算，通过交叉验证法计算各地区风速预测值的计算误差。

将计算得到的误差结果总结于表 2.5 中。各地区 MAR 在 2 以下，即风速预测值与真实值平均差距在 2m/s 以内，误差较大（作为参考：4m/s 为微风；12m/s 为强风）。根据表 2.4 的结果推测风速预测值的误差与气象站密度以及地形复杂程度有关。具体表现为：地势平坦开阔且气象站密度较大的江苏省误差相对较低，地形情况复杂和四川省和气象站密度较低的西藏自治区误差则相对较高。

同时对气象站距离对风速插值结果的误差进行分析，基于 2023 年 2 月 15 日至 2023 年 2 月 25 日期间各地区地面气象站观测的逐小时风速数据，对无需进行

空间插值计算的最大气象站距离进行分析讨论。把目标气象站与最近气象站的距离  $d_{\min}$  作为分类标准，将各地区内总计 401 个地面气象站分为 A~F 共 6 组：

A 组：  $0\text{km} < d_{\min} \leq 15\text{km}$

B 组：  $15\text{km} < d_{\min} \leq 20\text{km}$

C 组：  $20\text{km} < d_{\min} \leq 25\text{km}$

D 组：  $25\text{km} < d_{\min} \leq 30\text{km}$

E 组：  $30\text{km} < d_{\min} \leq 35\text{km}$

F 组：  $35\text{km} < d_{\min}$

与上文一致，选取目标气象站周围临近的 5 个气象站所测气温数据进行空间插值计算，并通过交叉验证法计算各组的气温插值结果误差。将 A~E 组的误差计算结果汇总于表 2.6，可得各距离范围的风速计算误差相差不大。当目标地点与最近气象站的距离  $d_{\min}$  小于 20km 时，由距目标气象站最近气象站的风速值代入计算的  $\text{MAE}_{\min}$  与由风速预测值代入计算的 MAR 相差不大，换言之即当目标地点与最近气象站的距离小于 20km 时，使用空间插值方法计算风速意义不大。

表 2.5 各地逐小时风速空间插值结果误差

名称	经度中值	纬度中值	气象站数	气象站密度	MAR	RMSE
黑龙江省	128°E	48°N	83	1.75	0.98	1.22
江苏省	119°E	33°N	69	6.70	0.57	0.73
海南省	110°E	19°N	19	5.43	0.81	1.07
重庆市	108°E	30°N	35	4.27	0.72	0.92
四川省	103°E	30°N	156	3.21	1.19	1.49
西藏自治区	89°E	31°N	39	2.04	1.81	2.61

注：表中的气象站密度为表 2.1 中气象站数与面积的比值

表 2.6 不同距离下逐小时风速空间插值结果误差分析

类别	$d_{\min} / \text{km}$	$\bar{d} / \text{km}$	MAR	$\text{MAE}_{\min}$	RMSE	$\text{RMSE}_{\min}$
A	0-15	36.5	0.90	0.94	1.13	1.19
B	15-20	26.5	0.65	0.65	0.81	0.86
C	20-25	40.5	0.82	1.00	1.05	1.26
D	25-30	56.9	0.80	1.00	1.03	1.28
E	30-35	44.6	0.72	0.86	0.92	1.10

分别随机选取黑龙江省、江苏省、海南省、四川省、西藏自治区和重庆市中的 1 个目标气象站，2023 年 2 月 15 日至 2 月 25 日期间基于克里金法的逐小时风速预测值与风速实测值如图 2.9~图 2.14 所示，对于地势平坦开阔且气象站密度较

大的江苏省其风速预测值与实测值符合良好，其余地区的风速预测效果欠佳。

因风速时变性较强，且易受局部温差、下垫面条件、地形地势和构筑物等影响，经克里金法处理后得到的风速预测值与实测值走势基本一致，但两者仍存在一定的偏差（如表 2.5 中的风速空间插值计算结果平均绝对误差达到了 2m/s）。故本文中参考桥址周围气象站采集的风速数据，采用当地的平均风速进行相关计算。

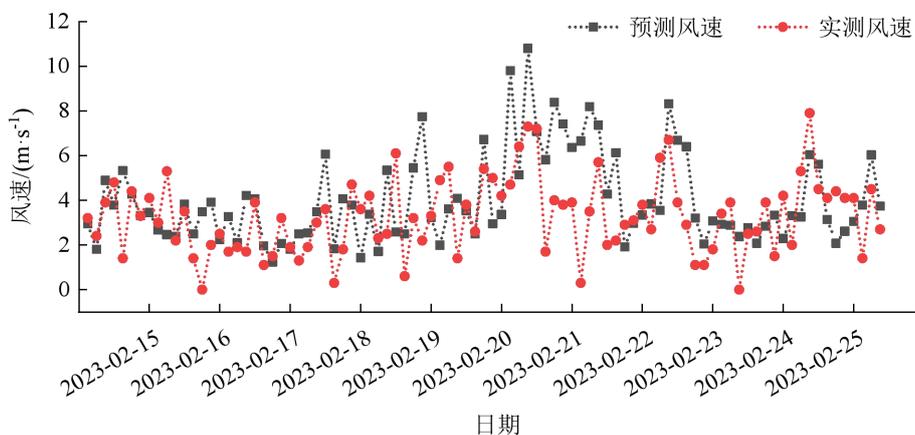


图 2.9 西藏自治区风速预测结果

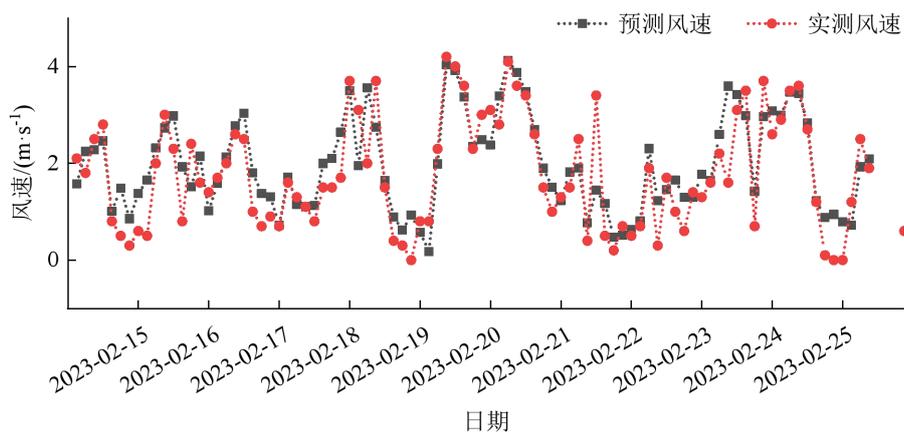


图 2.10 江苏省风速预测结果

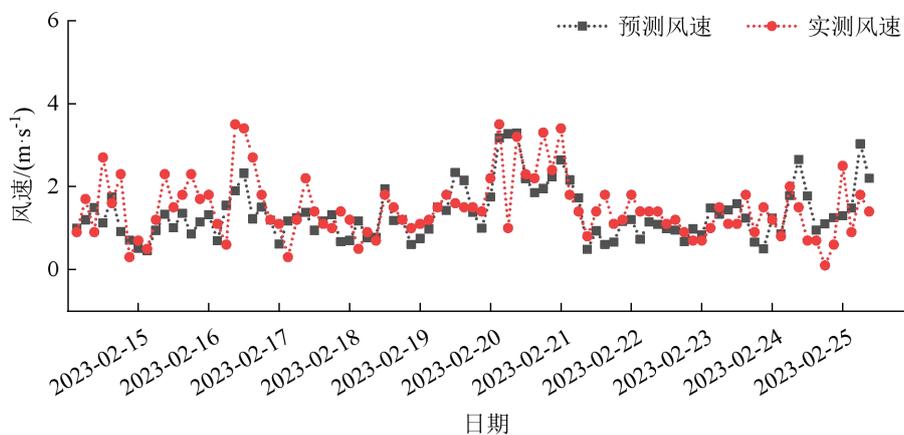


图 2.11 重庆市风速预测结果

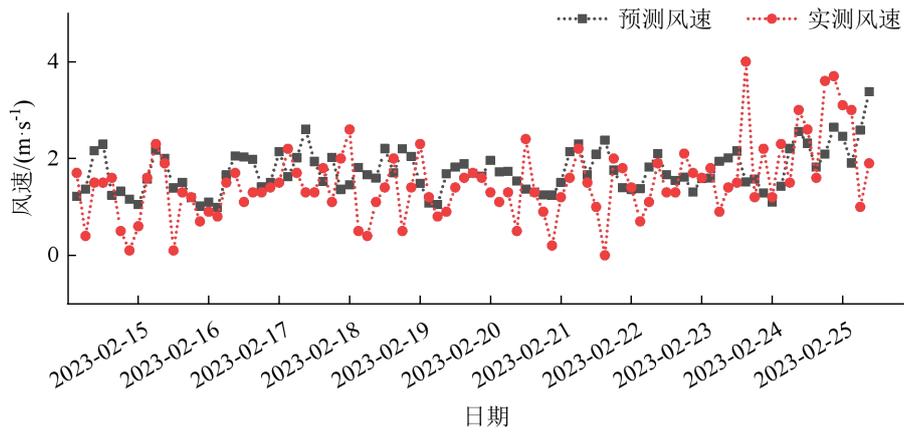


图 2.12 四川省风速预测结果

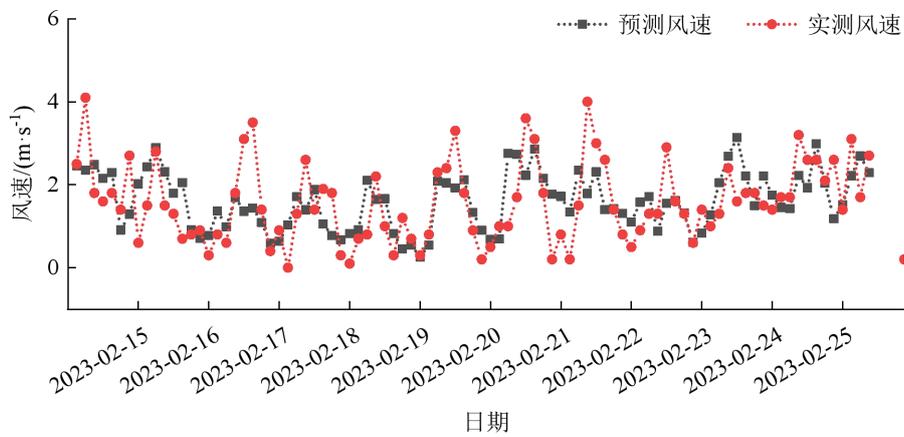


图 2.13 海南省风速预测结果

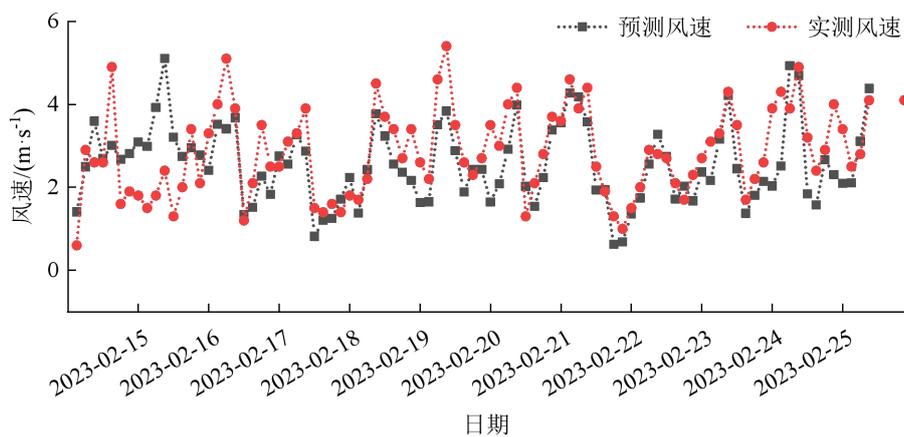


图 2.14 黑龙江省风速预测结果

综上，本文中对于桥址处风速取值的具体方法为：当目标地点与最近气象站的距离大于 20km 时，使用克里金法对目标地点临近气象站风速进行空间插值计算，得到目标地点处的风速预测值，最终取风速预测值的平均值进行相关计算。当目标地点与最近气象站的距离小于 20km 时，直接使用距目标地点最近气象站测得的风速平均值进行相关计算。

## 2.7 太阳辐射计算

太阳辐射是影响桥梁结构温度场变化的主要气象要素之一。本节内容重点阐述了桥梁结构表面所受到的太阳辐射强度计算方法。

### 2.7.1 目标桥梁结构表面辐射强度计算方法

当前常用的辐射计算模型有幂指数模型、Hottel 模型和 ASHRAE 模型。根据美国采暖、制冷和空调协会的建议，ASHRAE 模型<sup>[75]</sup>以美国地区的长期太阳辐射实测数据为依据，利用统计得到的 3 个经验系数来估算太阳辐射强度，具体表达式如下：

$$I_{bN} = Ae^{-B/\sin h} \quad (2.13)$$

$$I_{dH} = CI_{bN} \quad (2.14)$$

式中： $I_{bN}$  和  $I_{dH}$  分别为法向和水平太阳散射辐射强度； $h$  为太阳高度角； $A$ 、 $B$  和  $C$  为 3 个经验系数。

Hottel<sup>[76]</sup>提出了一种通过太阳直射和散射透射比表达的太阳辐射计算模型，称为 Hottel 模型，其主要表达式如下：

$$I_{bH} = \tau_b I_0 \quad (2.15)$$

$$I_{dH} = \tau_d I_0 \quad (2.16)$$

式中： $I_{bH}$  为水平太阳直接辐射强度； $I_0$  为太阳常数； $\tau_d$  和  $\tau_b$  分别为太阳直射和散射透射比，考虑美国海拔和气候通过经验公式计算得到。

Kehlbeck<sup>[77]</sup>基于 Bouguer-Lambert 定律提出了幂指数模型，其主要表达式如下：

$$I_{bN} = I_0 P^m \quad (2.17)$$

式中： $P$  为复合大气透明系数； $m$  为大气质量。

由上所述，ASHRAE 模型和 Hottel 模型中的经验系数取值主要适用于美国地区，相较而言幂指数模型则具有更强的普适性，故国内外大量学者<sup>[19, 20, 78~80]</sup>均采用幂指数模型进行太阳辐射强度的计算。本文中也采用幂指数模型进行太阳辐射强度的计算。

### 2.7.2 太阳辐射计算参数

在使用幂指数模型来估算太阳辐射强度之前，必须先确定太阳常数、赤纬角、太阳时角、太阳高度角、太阳方位角以及太阳入射角等太阳辐射计算参数<sup>[77]</sup>。各参数间关系如图 2.15 所示，下文对各太阳辐射参数的定义和计算方法进行了介绍和说明。

#### 1. 太阳常数

太阳常数指地球大气顶界处垂直于太阳光束方向上，单位面积和单位时间内

接受到的太阳辐射能量总值，太阳常数随着一年中日地距离变化而变化。太阳常数可由下式计算：

$$I_{sc} = 1367 \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{2\pi N}{365} \right) \right] \quad (2.18)$$

式中： $I_{sc}$  为太阳常数； $N$  为日序数。

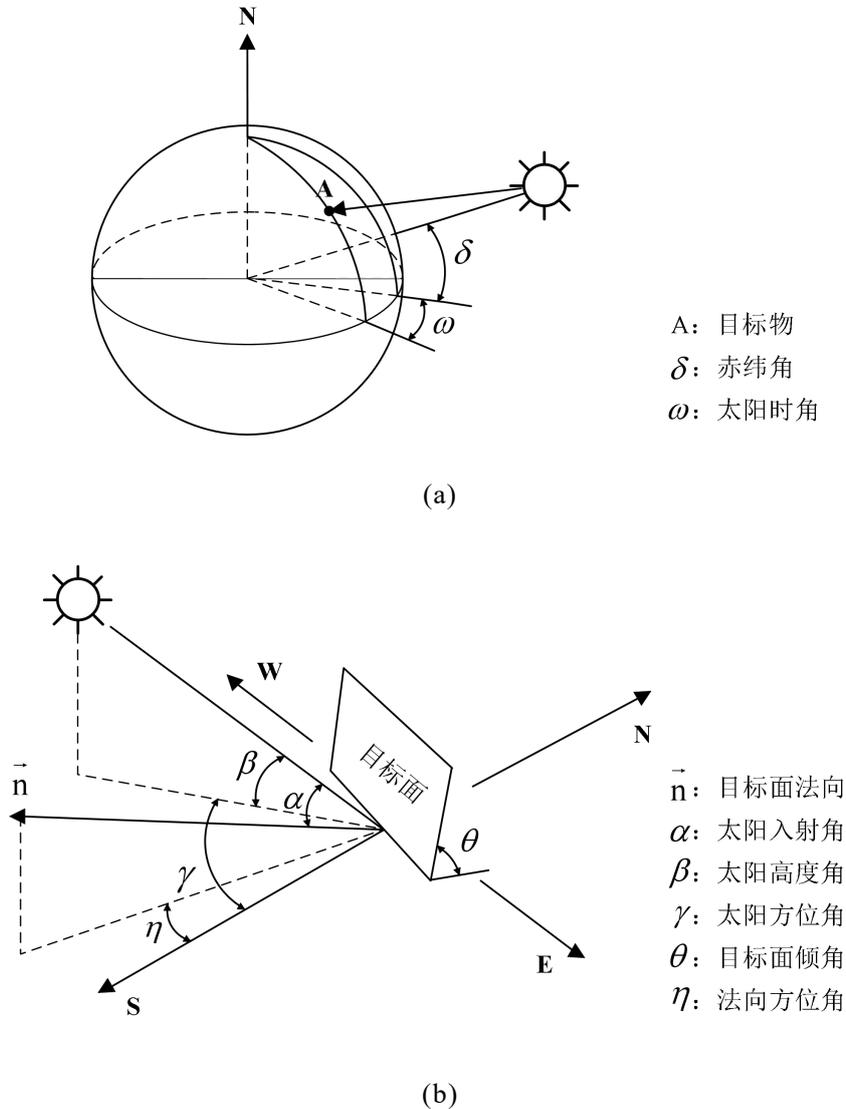


图 2.15 太阳辐射计算参数

(a) 太阳-地球间位置关系; (b) 太阳-目标物间位置关系

## 2. 赤纬角

赤纬角指日地连线与地球赤道面之间的夹角。随地球绕太阳公转，赤纬角在  $+23^{\circ}26'$ （夏至日）至  $-23^{\circ}26'$ （冬至日）之内，以年为周期缓慢变化。赤纬角可由下式计算：

$$\delta = 23.45 \sin \left[ \frac{2\pi(284 + N)}{365} \right] \quad (2.19)$$

式中： $\delta$  为赤纬角。

### 3. 太阳时角

太阳时角指日面中心的时角，即日地连线所经过的子午线平面与目标物所在子午线平面之间的夹角。太阳时角可由下式计算：

$$\omega = 15(12 - T) \quad (2.20)$$

式中： $\omega$ 为太阳时角； $T$ 为真太阳时。

### 4. 太阳高度角

太阳高度角指目标物所在地表切面与太阳入射方向之间的夹角。太阳高度角可由下式计算：

$$\sin \beta = \cos \omega \cos \delta \cos L + \sin L \sin \delta \quad (2.21)$$

式中： $\beta$ 为太阳高度角； $L$ 为观测点纬度。

### 5. 太阳方位角

太阳方位角指太阳与目标物连线的投影与正南方向间的夹角。太阳方位角可由下式计算：

$$\sin \gamma = \frac{\sin \omega \cos \delta}{\cos \beta} \quad (2.22)$$

式中： $\gamma$ 为太阳方位角。

### 6. 太阳入射角

太阳入射角指太阳光线与目标面法向方向之间的夹角。太阳入射角可由下式计算：

$$\cos \alpha = \cos \theta \sin \beta + \sin \theta \cos \beta \cos(\gamma - \eta) \quad (2.23)$$

式中： $\alpha$ 为太阳入射角； $\eta$ 为目标面法线投影与正南方向的夹角。

对于地球上已知地点（经纬度）以及法向方向的某物体平面，其在某时刻的太阳常数、赤纬角、太阳时角、太阳高度角、太阳方位角以及太阳入射角等太阳辐射计算参数可由式(2.18)~式(2.23)计算得到，将上述太阳辐射计算参数代入太阳辐射计算模型即可计算目标物体平面上受到的太阳辐射强度。

## 2.7.3 幂指数辐射计算模型

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。SketchUp 中的 Curic Sun 插件可根据设定的时间和目标地点地理位置等参数，模拟特定时间特定地点处太阳照射物体形成的光照面和阴影面情况，同时可以查看一天中太阳的运动轨迹以及被照射物体影子变化的动态过程。以 2015 年 3 月 13 日某桥梁上关键构件为例，通过该插件可以更直观的看到该关键构件受到的日照情况如图 2.16 所示。

结构表面的日照情况差异可量化为辐射强度值，处于自然环境中的桥梁结构受到的主要辐射如图 2.17 所示。前文已对常用的太阳辐射计算模型进行了简单介

绍，并对 ASHRAE 模型、Hottel 模型以及幂指数模型三种太阳辐射计算模型的适用范围和局限进行了说明和讨论。本章中采用普适性较强的幂指数模型进行目标桥梁结构所受太阳辐射强度的计算。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，可利用辐射计算模型实现结构各表面的辐射强度计算。下面对幂指数模型中各辐射强度的计算方法<sup>[77~81]</sup>进行简要说明。

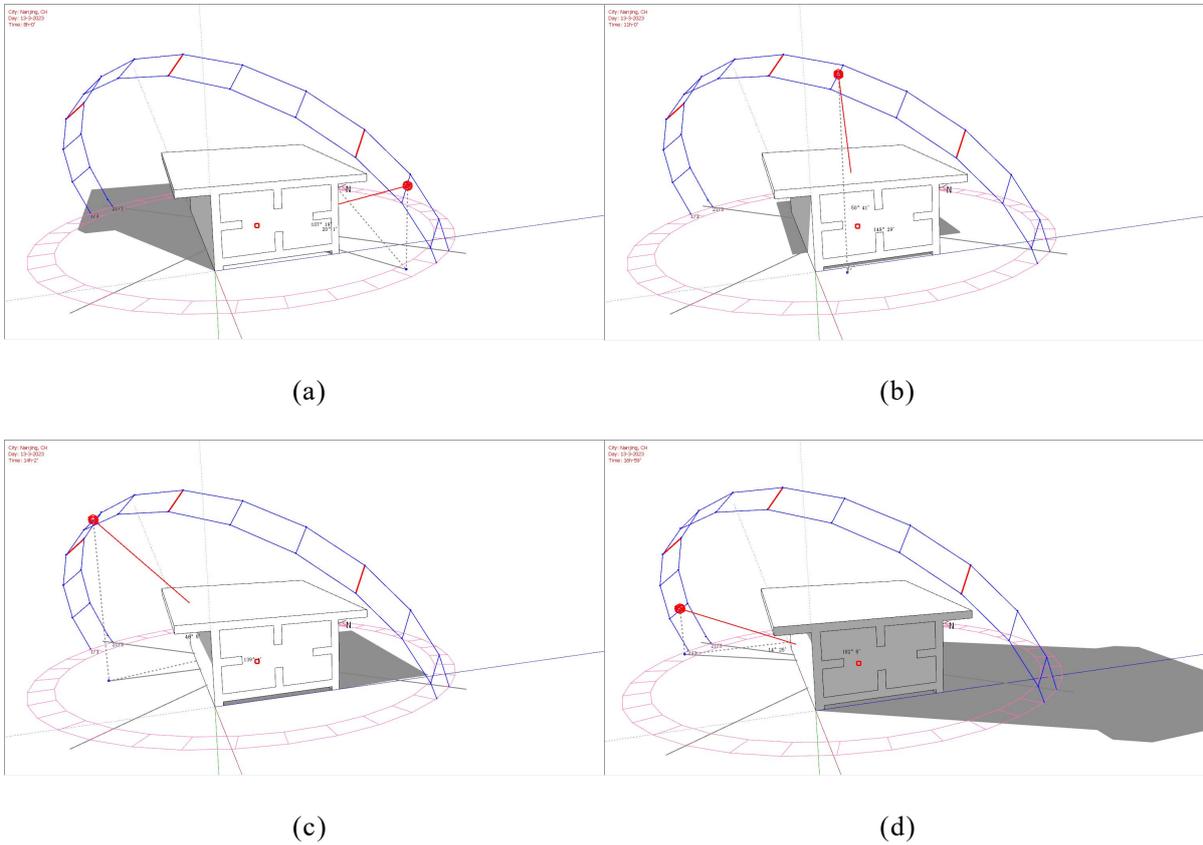


图 2.16 3 月 13 日某桥梁上关键构件日照情况

(a) 8 时; (b) 11 时; (c) 14 时; (d) 17 时

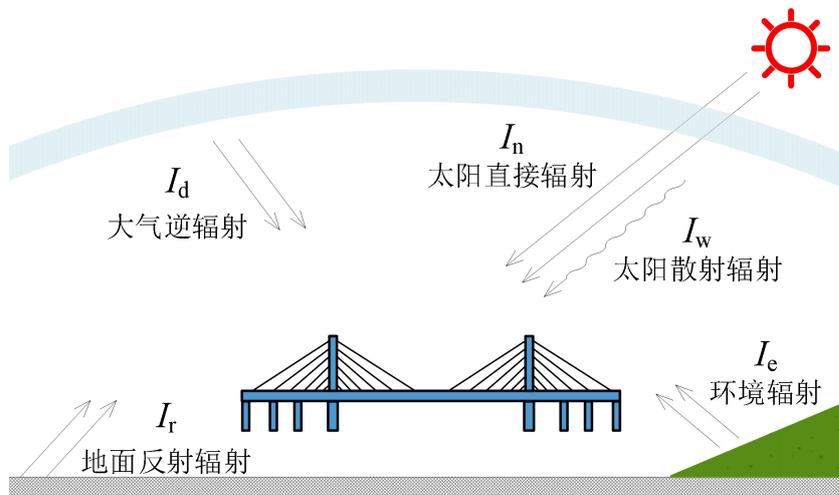


图 2.17 桥梁结构辐射计算

### 1. 太阳直接辐射

太阳照射到地平面上的辐射由两部分组成——太阳直接辐射和太阳散射辐射。太阳直接辐射指直接由太阳以平行光线投射到地面，其辐射方向不发生改变的那一部分辐射。根据目标面倾角不同，目标物体水平底面处的太阳直接辐射为 0，目标物体水平顶面处的太阳直接辐射强度最大。目标面上所受太阳直接辐射强度可由下式计算：

$$I_n = I_{sc} P^h \cos \alpha \quad (2.24)$$

$$P = 0.9^{t_u k_a} \quad (2.25)$$

$$h = \frac{1}{\sin \beta} \quad (2.26)$$

$$t_u = A - B \cos \frac{2\pi N}{365} \quad (2.27)$$

式中： $I_n$  为太阳直接辐射强度； $P$  为复合大气透明度系数； $t_u$  为林克氏浑浊度系数； $k_a$  为大气相对气压； $h$  为光线路程； $A$ 、 $B$  为大气浑浊因子。

不同海拔高程处的大气相对气压可由多元大气压高公式推导计算得到<sup>[82]</sup>。为方便使用，给出了海拔气压对照表如表 2.7 所示，不同海拔高程处的大气相对气压可按表 2.7 通过线性插值得到。

表 2.7 海拔气压对照表

海拔高程/m	-400	0	400	800	1200	1600	2000	2400	2800
大气相对气压	106.2	101.3	96.6	92.1	87.7	83.5	79.5	75.6	71.9
海拔高程/m	3200	3600	4000	4400	4800	5200	5600	6000	6400
大气相对气压	68.3	64.9	61.6	58.5	55.5	52.6	49.8	47.2	44.6
海拔高程/m	7000	7400	7800	8200	8600	9000	9400	9800	10200
大气相对气压	41.1	38.8	36.6	34.6	32.6	30.7	29.0	27.3	25.6

大气浑浊因子  $A$  和  $B$  分别表示在不同大气情况下林克氏浑浊度系数的年均值和变化幅度<sup>[83]</sup>，其具体取值见表 2.8。

表 2.8 大气浑浊因子

地区分类	山区	乡村	城市	工业区
$A$	202	2.8	3.7	3.8
$B$	0.5	0.6	0.5	0.6

## 2. 太阳散射辐射

太阳辐射在作用到地面上物体之前，受大气中空气、水蒸气和尘埃等的吸收、反射和散射作用，其辐射强度将会受到不同程度的削减，其辐射方向和光谱分布

也会发生改变。太阳散射辐射即为发生了上述改变的太阳辐射部分。目标面上所受太阳散射辐射强度可由下式计算：

$$I_w = 0.25I_{sc} \sin \beta \frac{1-P^h}{1-1.4 \ln P} (1 + \cos \theta) \quad (2.28)$$

式中： $I_w$  为太阳散射辐射强度。

### 3. 地面反射辐射

地面在吸收来自太阳的辐射之后，又将接收到的大部分能量再次通过辐射的方式传递给大气和周围的物体，这部分辐射被称为地面反射辐射。根据目标面倾角不同，目标物体水平顶面处的地面反射辐射为 0，目标物体水平底面处的地面反射辐射强度最大。目标面上所接收到的地面反射辐射强度可由下式计算：

$$I_r = 0.5r_e (I_n + I_w) (1 - \cos \theta) \quad (2.29)$$

式中： $I_r$  为地面反射辐射强度； $r_e$  为地表反射率<sup>[83]</sup>，取值见表 2.9。

表 2.9 典型地表地表反射率

地表类型	一般地面	草地	水面	雪地	冰面
地表反射率	0.08-0.20	0.14-0.26	0.20	0.81	0.69

### 4. 大气逆辐射

大气在吸收地面辐射的同时又向外发出辐射，称为大气辐射。大气辐射中向下放射的那一部分称为大气逆辐射，大气逆辐射是地面物体获得热量的重要来源。目标面上所受大气逆辐射强度可由下式计算：

$$I_d = E_a C_s (T_k + T_a)^4 0.5(1 - \cos \theta) \quad (2.30)$$

$$E_a = 1 - 0.216e^{(-7.776 \times 10^{-4} \times T_a^2)} \quad (2.31)$$

式中： $I_d$  为大气逆辐射强度； $E_a$  为大气逆辐射系数； $C_s$  为黑体辐射系数，其值为  $5.6689 \times 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； $T_k$  用于换算摄氏度和绝对温度，其值为 273.15K； $T_a$  为气温。

### 5. 地表环境辐射

自然环境中的所有介质均会向四周以辐射的形式发射能量，该辐射强度主要与介质自身的温度以及发射率有关。对于桥梁结构主要表现为周围地表环境的热辐射，称为地表环境辐射。目标面上所受环境辐射强度可由下式计算：

$$I_e = (E_u / E_a - E_u + 1) I_d \quad (2.32)$$

式中： $I_e$  为大气逆辐射强度； $E_u$  为地表环境辐射系数<sup>[83]</sup>，取值见表 2.10。

综上，自然环境中的桥梁结构所受总辐射强度可由下式计算：

$$I = I_n + I_w + I_r + I_d + I_e \quad (2.33)$$

式中： $I$ 为总辐射强度。

表 2.10 典型地表环境辐射系数

地表类型	一般地面	草地	水面	雪地	冰面
地表反射率	0.92-0.98	0.98	0.96	1.00	0.97

上述幂指数太阳辐射计算模型（式(2.24)~式(2.33)）适用于晴朗天气情况下的桥梁结构表面太阳辐射强度计算。到达地面的太阳辐射受大气层的削弱作用，厚度越大的大气层，其对太阳辐射的吸收、反射和散射现象就越严重，最终到达地面的太阳辐射就越少。此外大气的质量对最终到达地面的辐射强度也有影响。当天空乌云密布见不到太阳时，太阳直接辐射强度为零，本研究中不计多云和阴雨天气时的太阳直接辐射强度。

## 2.8 本章小结

本章提出了根据气象站大数据信息计算桥址处气象信息的方法，包括桥址处的气温、风速和太阳辐射强度预测方法。本章中由气象站点处气象值到桥址处气象值的计算方法研究为后文气象大数据支持的桥梁结构温度场预测方法研究提供前提和基础。本章的主要内容如下：

(1) 基于黑龙江、江苏、海南、四川、西藏和重庆各地气象站点记录的逐小时气温和风速数据，验证了空间插值法中梯度距离平方反比法和克里金法分别用于逐小时气温和风速空间分布计算的可行性。验证结果表明梯度距离平方反比法基本适用于中国各地的逐小时气温预测；克里金法对于中国各地的逐小时风速预测有一定的参考价值。分析了气温和风速插值结果的误差影响因素。气温预测值误差主要与气象站点疏密程度有关；风速预测值误差主要与气象站点疏密程度和地势复杂程度有关。

(2) 提出了本文中对于桥址处气温和风速取值的具体做法。当桥址与最近气象站的距离大于 20km 时，使用梯度距离平方反比法计算得到桥址处的气温预测值；当桥址与最近气象站的距离小于 20km 时，直接将距桥址最近气象站测得的气温值作为桥址处的气温预测值。当桥址与最近气象站的距离大于 20km 时，使用克里金法计算得到桥址处的风速预测值，最终取风速预测值的平均值进行相关计算。当桥址与最近气象站的距离小于 20km 时，直接使用距桥址最近气象站测得的风速平均值进行相关计算。

(3) 介绍了应用幂指数辐射计算模型计算桥梁结构表面太阳辐射强度的方法。对辐射计算模型中涉及的各天文参数进行了简要介绍。对桥梁结构表面的太阳直接辐射、太阳散射辐射、大气逆辐射、地面反射辐射和周围环境辐射的计算方法进行了详细介绍和说明。

## 第3章 气象大数据支持的桥梁结构温度场预测方法

### 3.1 引言

本章的目的在于提出一种气象站大数据支持的桥梁结构温度场预测方法。上文的研究内容已经实现了桥址处气象参数的预测，为了实现桥梁结构温度场数值模拟计算，还需将桥址处气象参数转换为桥梁结构的换热边界条件。因此本章首先介绍了桥梁结构温度场数值模拟计算的理论基础，其次介绍了用于确定桥梁结构热分析边界条件的综合气温以及综合换热系数的计算方法，在此基础上结合有限元方法实现气象站大数据支持的桥梁结构温度场预测。本章内容为后文基于气象大数据的大跨桥梁结构温度场及温度效应预测的工程应用提供了理论基础和基本方法。

### 3.2 桥梁结构温度场计算理论基础

#### 3.2.1 热传导基本理论

结构的温度场即结构温度在时间和空间上的分布情况，可表示为时间  $t$  和空间坐标  $x$ 、 $y$ 、 $z$  的函数： $T = T(t, x, y, z)$ 。物体内部热量传导过程遵从傅里叶导热基本定律——单位时间内通过某截面的热量，与截面面积以及该截面法线方向上的温度变化率成正比例关系，并且温度升高的方向与热量传递的方向相反。处于自然环境中的结构受外界气象条件等的影响，其温度场时刻发生着变化，属于瞬态传热问题。三维瞬态热传导偏微分方程<sup>[84]</sup>的一般形式为：

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \phi = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

式中： $\lambda$ 、 $\rho$ 、 $c$ 分别为目标结构材料的导热系数、密度和比热容； $\phi$ 为目标结构内部热源在单位时间、单位体积中产生的热量。

对于一般桥梁，建造完成后处于正常服役状态下的桥梁结构内部无热源，即 $\phi$ 为0。此时若忽略沿结构构件长度方向的热量传导，式(3.1)可简化为二维形式：

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.2)$$

上式为其结构内部热量传导计算的基础形式。在已知结构内部热量传导规律的基础上，若能再给出结构热分析的定解条件，即可对瞬态热传导偏微分方程进行求解，得到结构温度场。需要的定解条件有初始条件和边界条件，其中初始条件指结构在初始状态下的温度场，可表示为：

$$T(t, x, y)|_{t=0} = T_0(x, y) \quad (3.3)$$

边界条件即结构边界（表面）的温度分布情况或热量交换情况。结构瞬态传热问题的边界条件<sup>[85]</sup>有以下三种：

1. 第一类边界条件，已知结构边界上温度分布情况：

$$T(t)|_s = T_s(t) \quad (3.4)$$

式中： $s$  为结构边界。

2. 第二类边界条件，已知结构边界外的热流密度：

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = q(t) \quad (3.5)$$

式中： $n$  为结构边界的外法线方向； $q$  为结构边界外部的热流密度。

3. 第三类边界条件，已知结构边界外流体的温度和对流换热系数：

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_s = h_\zeta(t) [T_\zeta(t) - T_s(t)] \quad (3.6)$$

式中： $h_\zeta$ 、 $T_\zeta$  分别为结构边界外流体的对流换热系数和温度。

自然环境中的桥梁结构以热对流和热辐射的方式与外部环境进行热量交换，其边界条件为第二类和第三类边界条件的组合。

### 3.2.2 结构温度场数值计算方法

对于工程实践应用，通过直接求解瞬态热传导偏微分方程得到结构温度场的方法在实际工程设计中难以操作和实现，为了简化求解过程，结构温度场的数值计算方法在工程设计和科研工作中被广泛应用。计算机技术的发展和有限元软件的开发更是为数值计算方法提供了广阔平台和相关支持。当前有限元分析软件如 ANSYS 和 ABAQUS 等能实现结构与外界环境的热量交换以及结构自身的热量传导模拟，计算得到结构的温度场<sup>[86, 87]</sup>。国内外众多学者<sup>[42~47]</sup>通过 ANSYS 有限元分析软件对桥梁结构关键构件的日照温度场进行时程仿真计算，本研究也借助有限元分析软件 ANSYS 进行目标桥梁上关键构件的温度场数值模拟计算。

桥梁结构的温度场计算问题可通过 ANSYS 中的热分析模块进行求解。结构热分析的目的在于获得结构的温度分布情况或是获得结构的热物理参数。ANSYS 热分析模块中可实现热辐射、热传导和热对流三种热传递方式，能完成六种热边界条件的设置，包括热辐射率、热流率、生热率、对流、热流密度以及温度。通过 ANSYS 可进行稳态传热和瞬态传热问题分析，此外还可以进行与热相关的耦合场分析计算，如热-结构耦合和热-流体耦合等。

使用 ANSYS 进行结构热分析的步骤与其他分析类似，可分为建模、加载求解和后处理这三步。在建模阶段需要选取支持温度场分析的单元类型，若在完成结构温度场分析后还需进行结构温度效应分析，可在建模时选择支持热-应力耦合

分析的单元类型。当从热分析模块切换到结构分析模块时，该类单元可从支持温度场分析的单元自动转换为支持结构分析的单元，即由原本的热分析模型自动转换为结构分析模型，在结构分析模型上施加通过热分析得到的结构温度场后进行结构分析，即可计算得到结构的温度效应。ANSYS 中常用的支持热-应力耦合分析的单元类型见表 3.1。

表 3.1 ANSYS 中温度场和结构场单元的对应关系

温度场	LINK32	SHELL57	PLANE77	PLANE55	SOLID87	SOLID70	MASS71
结构场	LINK1	SHELL63	PLANE82	PLANE42	SOLID92	SOLID45	MASS21

在加载阶段首先需要定义瞬态热分析的初始条件，即结构的初始温度分布情况。学者们对于桥梁结构瞬态热分析初始条件的设定通常采取两种方式：第一种方式是对整个结构施加均匀的温度场，即以桥梁结构上温度分布较为均匀的时刻为初始时刻。一般认为经过一个晚上的降温，在日出前的时刻（早上 6 时）整个桥梁结构温度分布最为均匀，且此时结构的温度最接近于外界环境的温度。第二种是通过多次循环施加第一天的热载荷，即重复施加等幅变化的热载荷，直至结构输出等幅周期变化的温度时程曲线（如图 3.1 所示），并将此作为结构热分析的初始条件。过渡时间的长短与结构材料的导热系数以及板件尺寸有关，一般认为混凝土桥梁的过渡时间为 3-5 天，钢桥的过渡时间则更短。综上，本文中对于钢结构桥梁结构瞬态热分析中初始条件的设定采用第一种方式；对于混凝土桥梁则采用第二种方式。

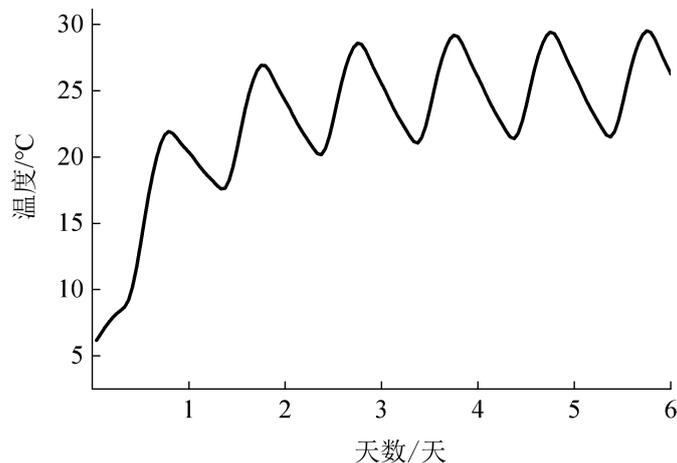


图 3.1 结构热分析初始条件

### 3.3 桥梁结构热分析边界条件

上节内容对结构温度场计算的理论基础和计算手段进行了介绍。与通过求解热传导偏微分方程得到结构温度场相同，依托有限元分析软件的结构温度场数值计算方法也需要给定结构热分析的初始条件和边界条件。上节内容已经对桥梁结

构进行热分析所需的初始条件进行了说明，本节主要对结构热分析的边界条件进行阐述。桥梁结构与外部环境进行热量交换的途径包括对流换热和辐射换热，桥梁结构的热量交换途径如图 3.2 所示。

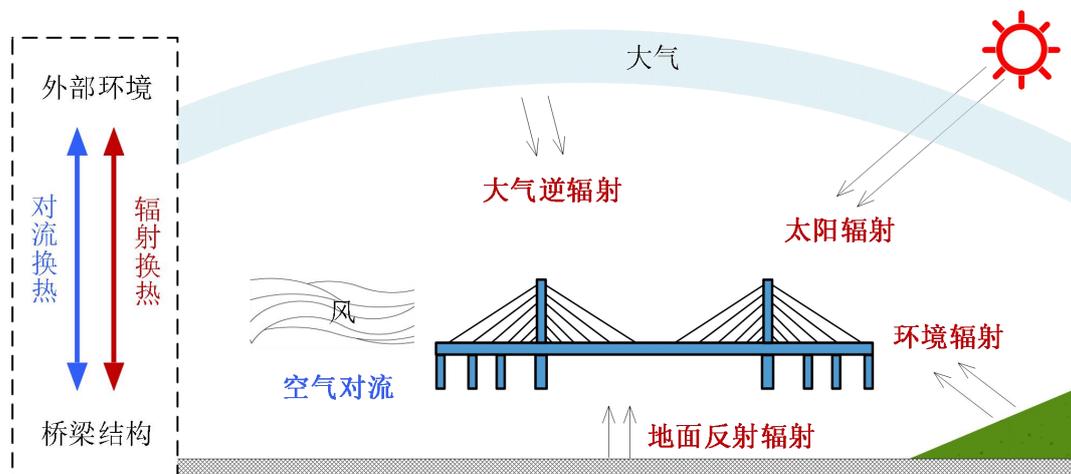


图 3.2 桥梁结构热量交换途径

### 3.3.1 对流换热

对流换热指物体外界流体在流动进程中和物体表面接触后发生的热量交换现象，对于桥梁结构主要表现为空气对流换热。流体与固体壁面间的对流换热热流密度与流固两者的温差成正比，对流换热热流密度可通过牛顿冷却定律计算<sup>[85]</sup>：

$$q_c = h_c (T_a - T) \quad (3.7)$$

式中： $q_c$ 为对流换热热流密度； $h_c$ 为对流换热系数。

牛顿冷却定律是传热学的基本定律之一：当物体与周围环境之间存在温度差时，物体在单位时间内单位面积上散失的热量与温度差成正比。牛顿冷却定律可用于计算对流换热热流密度。

ANSYS 中可通过设定目标结构周围流体的温度和对流换热系数实现热对流荷载的施加。对流换热系数的取值与风速、气温和结构表面粗糙程度等因素有关，不同学者基于现场试验总结提出了多种经验公式以计算对流换热系数，其通常形式为： $h_c = a + bv$ ，常数  $a$  为由结构表面和大气间温差造成的自由对流部分；常数  $b$  和风速  $v$  的乘积  $bv$  为风引起的强制对流部分。本研究中采用应用广泛的凯尔别克公式计算对流换热系数<sup>[85]</sup>：

$$h_c = 5.8 + 4v \quad (3.8)$$

式中： $h_c$ 为对流换热系数； $v$ 为风速。

式(3.8)最初被广泛用于计算混凝土箱梁桥的对流换热系数，而后也被应用于钢结构桥梁的对流换热系数计算。

### 3.3.2 辐射换热

辐射换热指若干个不同温度物体之间通过电磁波的方式产生的换热过程，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。辐射换热热流密度与物体表面绝对温度的四次方成正比，辐射换热系数的取值主要与物体温度有关，辐射换热系数可用 Fernando A. Branco 提出的经验公式<sup>[88]</sup>进行计算：

$$h_r = \varepsilon [4.8 + 0.075(T_a - 5)] \quad (3.9)$$

式中： $h_r$ 为辐射换热系数； $\varepsilon$ 为结构材料的发射率。

ANSYS 中提供了用于热辐射分析的单元类型，其中辐射单元 LINK31 可用于分析两点或多点之间的热辐射过程；表面效应单元 SURF151、SURF152 可用于分析点对面或面和空气间的热辐射过程。另外，还可使用辐射矩阵生成器 AUX12，通过定义辐射面，生成辐射矩阵来分析多个面之间的辐射换热。

### 3.3.3 综合换热边界条件

若在 ANSYS 中对结构的有限元模型依次施加对流荷载和辐射荷载，软件仅会采用后施加的荷载进行分析计算，且 ANSYS 中对于热辐射分析的操作和计算过于复杂和繁琐：热辐射分析单元需要多若干实常数和参数进行设定，一些参数难以确定；辐射矩阵生成器的操作程序较复杂且计算耗时较长。因此对于桥梁结构的热分析问题，在需要同时考虑辐射和对流荷载的情况下，可操作性较强的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，计算结构外部假定等效流体的综合温度（本文中称为综合气温）和综合换热系数，称为综合换热边界条件<sup>[85]</sup>：

$$h_k = h_c + h_r \quad (3.10)$$

$$T_k = T_a + \varepsilon I / h_k \quad (3.11)$$

式中： $h_k$ 为综合换热系数； $T_k$ 为综合气温。

综上，先通过式(3.8)和式(3.9)计算结构与周围环境间的对流换热系数和辐射换热系数，再通过式(3.10)和式(3.11)计算综合换热边界条件（综合气温和综合换热系数）。至此即得到了进行桥梁结构温度场数值计算所需的边界条件。将综合气温和综合换热系数作为对流荷载的设定参数输入桥梁结构的有限元模型，进行在该综合换热边界条件下桥梁结构的瞬态热分析，计算得到结构的时变温度场。

## 3.4 桥梁结构温度效应预测方法

上文对目标桥梁所在场地的气象参数预测方法进行了说明，包括气温、风速

和太阳辐射强度；并对基于气象参数的桥梁结构温度场数值计算方法进行了阐述，包括理论基础、依托有限元分析软件分析计算的注意要点和结构热分析所需的定解条件。汇总以上内容，形成了基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法，其主要步骤如下：

1. 气象数据获取

从气象数据平台查阅下载目标桥梁附近气象站观测的气象数据，包括气温、风速数据及天气情况。可供使用的气象数据平台相关信息见表 1.1。

2. 场地气象参数计算

利用目标桥梁附近气象站的气温数据，通过梯度距离平方反比法（式(2.6)）计算场地气温；通过克里金法（式(2.7)~式(2.10)）计算场地风速，具体计算方法详见 2.2 节。通过幂指数辐射计算模型（式(2.18)~式(2.33)）计算桥梁结构表面的总辐射强度，具体方法详见 2.7 节。

3. 换热边界条件计算

根据场地气象参数计算桥梁结构的对流换热系数和辐射换热系数（式(3.8)~式(3.9)），将辐射换热热流等效转换为对流换热热流，得到结构热分析的假定换热边界条件（式(3.10)~式(3.11)）。具体计算方法详见 3.3 节。

4. 桥梁结构温度场计算

在 ANSYS 软件中建立桥梁结构的有限元模型，给定初始条件后将换热边界条件输入到结构有限元模型中，进行结构瞬态热分析得到结构的时变温度场。

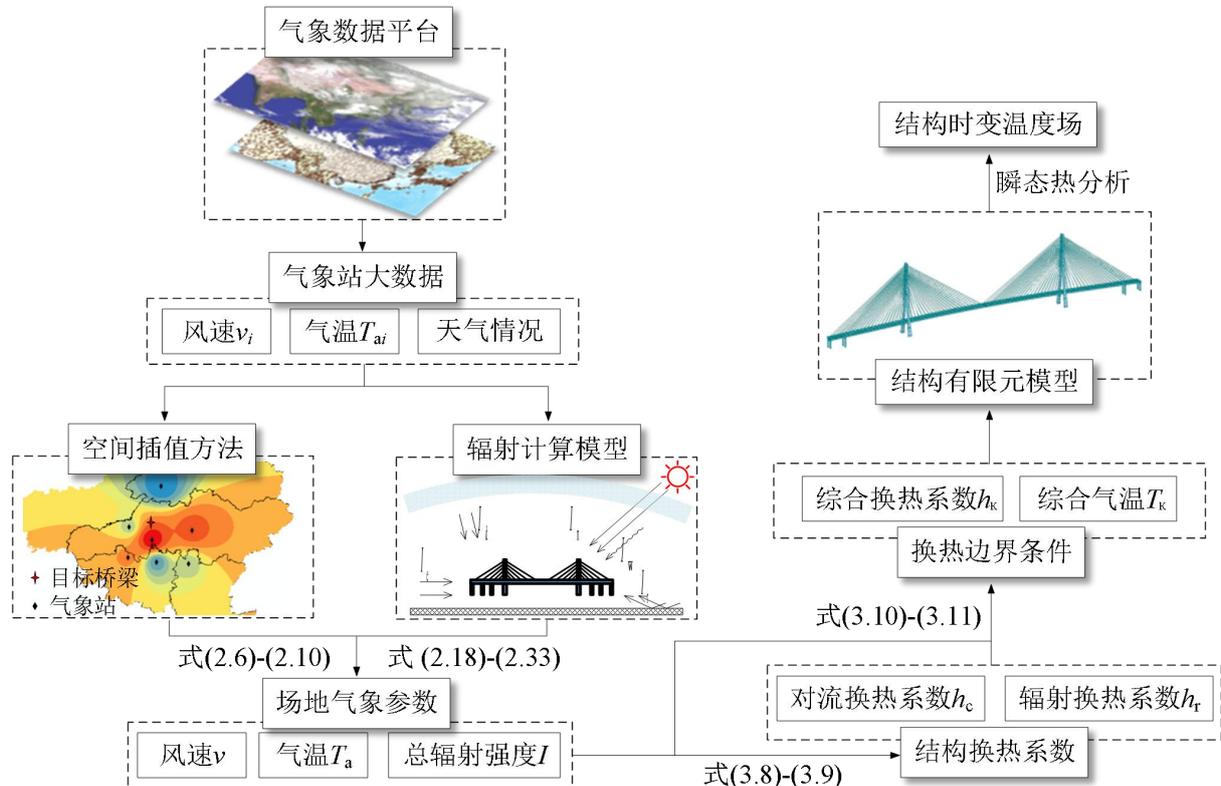


图 3.3 基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法

基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法流程图如图 3.3 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(3.8)和式(3.9)进行相应修改。

### 3.5 本章小结

本章首先介绍了桥梁结构温度场计算的理论基础。其次基于上一章的场地气象参数计算方法，阐述了将桥址处气象参数转换为桥梁结构的换热边界条件的方法，并依托有限元分析软件提出了一种基于气象大数据的桥梁结构温度场数值计算方法。本章内容为后文基于气象大数据的大跨桥梁结构温度场及温度效应预测的工程应用提供了理论基础和基本方法。

(1) 介绍了桥梁结构温度场计算的理论基础，阐述了瞬态热传导偏微分方程求解所需的初始条件和三类边界条件。并对依托有限元分析软件的结构热分析中的要点和难点进行了讨论说明。介绍了桥梁结构进行瞬态热分析所需要的初始条件和边界条件计算方法。

(2) 提出了一种基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法。利用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计算理论，依托有限元分析软件对桥梁结构进行瞬态热分析，得到桥梁结构时变温度场。该方法适用于混凝土和钢结构桥梁，可实现轻量化和可持续性的大跨桥梁结构温度场计算。

## 第 4 章 某大跨钢拱桁架桥梁温度效应计算实例

### 4.1 引言

为了验证前文提出基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法用于计算钢结构桥梁温度场的可行性，以某大跨钢拱桁架桥为研究对象，应用该温度场计算方法得到目标桥梁关键构件的温度场，将温度场计算结果与桥梁上温度实测值分别在时间历程和结构竖向分布上进行对比，分析计算误差。并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，对比桥梁支座纵向位移的计算值与实测值分析计算误差。从而验证所提基于气象站大数据的桥梁结构温度场预测方法的可行性，利用该方法还可进一步对桥梁结构的温度效应进行预测计算。

### 4.2 桥梁概况

本章以某大跨钢拱桁架桥为研究对象，该桥的信息来自文献[89~92]，桥梁结构几何外形见图 4.1。该桥位于长江下游，浅水区边孔为两联连续钢桁梁，主桥为六跨连续钢桁拱桥，总体由三片主桁架和连接系杆组成。整体钢桥面采用多横梁体系，桥上布有六线铁路：两线铁路 I 级干线、两线高速铁路和两线城市轻轨铁路。其桥面结构采用的钢材型号为 Q370qE；主桁构件采用的钢材型号为 Q420qE。

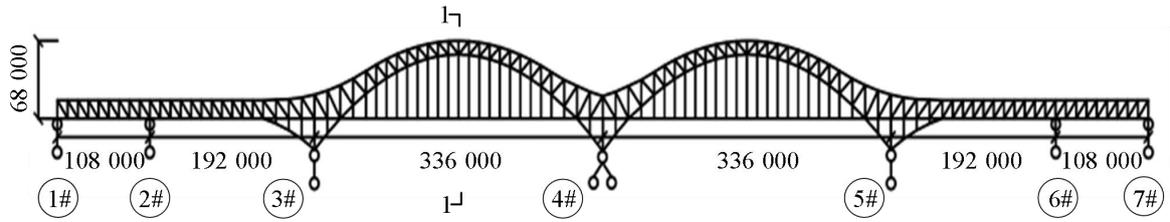
桥上布有健康监测系统，总计 21 个监测截面、116 个测点，监测内容有结构温度、应力、变形和振动等。其中在 1-1 监测截面（图 4.1）安装有若干个光纤光栅温度传感器，温度传感器布置情况如图 4.1 所示。1#-3#和 5#-7#支座处分别安装有纵向位移传感器。

### 4.3 桥梁结构温度场计算

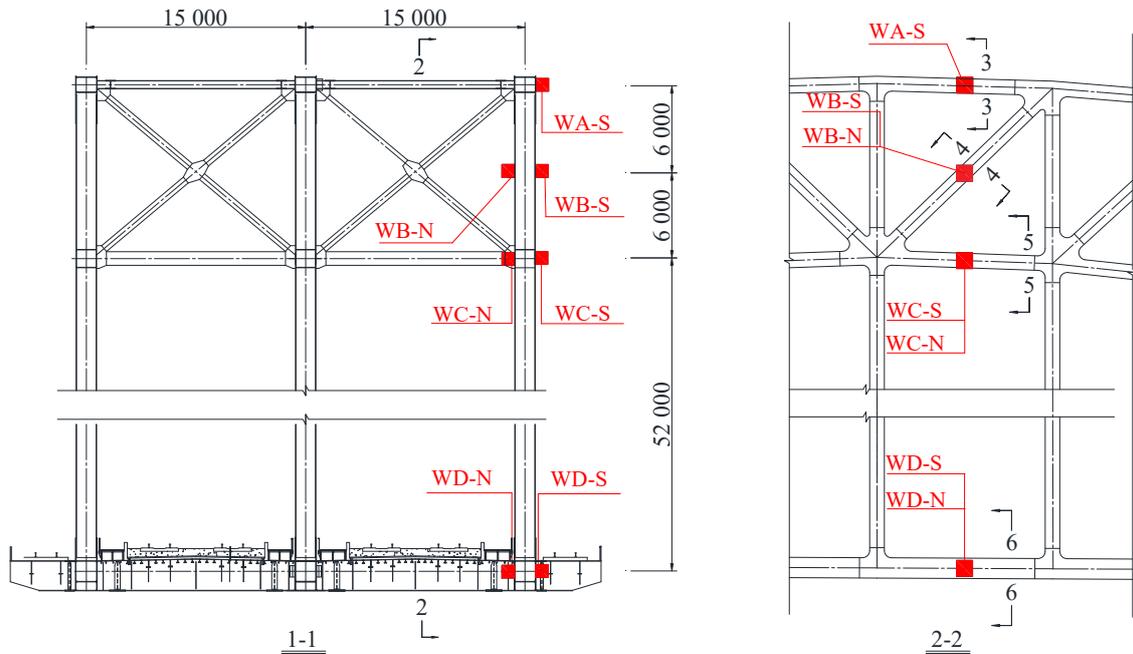
本节对该大跨钢拱桁架桥于 2015 年 3 月 5 日至 2015 年 3 月 16 日期间的结构温度场进行了计算分析。基于所提出的桥梁结构温度场计算方法，通过气象数据获取、场地气象参数计算和换热边界条件计算最终计算得到桥梁关键构件的温度场。

#### 4.3.1 场地气象参数计算

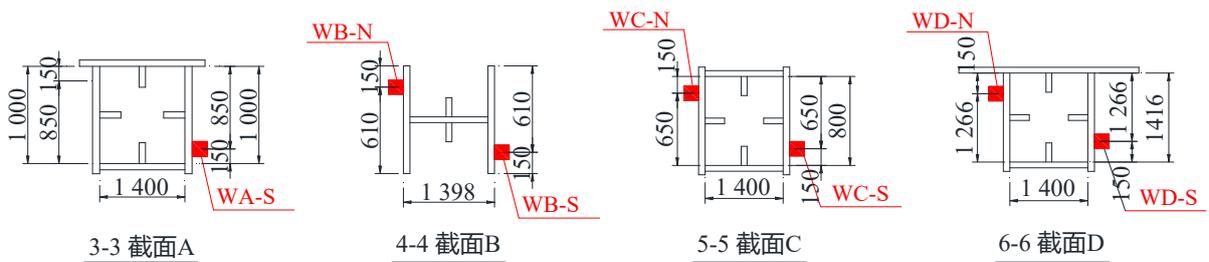
目标桥梁所在的江苏省位于长江中下游平原，地势起伏平缓，江苏省内气象站分布较为密集。通过对各气象数据平台所能提供的气象数据以及气象站分布情况进行筛查，整理得到目标桥梁周边气象站如图 4.2 和表 4.1 所示。



(a)



(b)



(c)

图 4.1 目标桥梁概况 (单位: mm)

(a) 桥梁几何外形; (b) 温度测点布置图; (c) 关键构件截面概况

第一步: 气象数据获取, 从气象数据平台查阅下载目标桥梁附近气象站站大数据。与目标桥梁距离最近的气象站为南京大校场机场内的气象站, 直线距离仅为 15.8km。根据第 2 章的研究结论, 当桥址与最近气象站的距离小于 20km 时, 直接将距桥址最近气象站测得的气温值作为桥址处的气温预测值, 可以使用距桥址最近气象站测得的风速平均值进行相关计算。故本算例中直接使用与目标桥梁最近的南京大校场机场气象站的气温值和风速平均值作为桥址处的气温和风速预

测值。

表 4.1 目标桥梁周边气象站

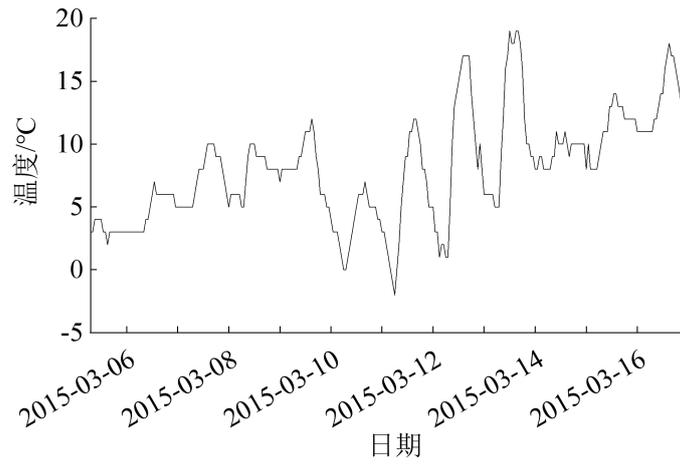
名称	坐标（经度，纬度）	海拔/m	与目标桥梁距离/km
浦口	(118.58, 32.07)	46.6	16.1
南京	(118.90, 31.93)	35.2	28.9
和县	(118.37, 31.73)	22.5	43.8
全椒	(118.28, 32.12)	26.5	45.2
大校场机场气象站	(118.82, 32.00)	31.7	15.8
禄口国际机场气象站	(118.88, 31.74)	28.3	34.2



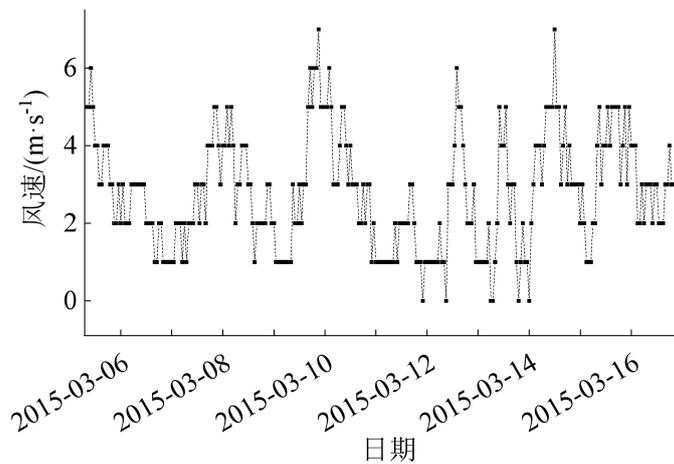
图 4.2 目标桥梁周边气象站

南京大校场机场气象站观测记录的历史气象数据可从 WeatherSpark 气象数据平台（网址：<http://zh.weatherspark.com>）查询和下载。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 145449 个地点详细的天气报告，从该平台能够获取国内外部分机场气象站自建站至今的逐小时气象数据。

与需要计算的目标桥梁结构温度场的时间对应，下载该气象站 2015 年 3 月 5 日至 2015 年 3 月 16 日的气象数据，包括气温、风速和天气情况。气温和风速详情如图 4.3 所示，其中 3 月 5 日~3 月 9 日、3 月 14 日~3 月 16 日为阴天或多云天气；3 月 10 日~3 月 13 日为晴朗天气。2015 年 3 月 5 日~3 月 16 日该气象站测量的风速在 0-7m/s 内变化，平均风速为 3.5m/s。



(a)



(b)

图 4.3 气象数据

(a) 气温数据; (b) 风速数据

第二步，场地气象参数计算。上文已经确定了气温和风速的场地预测值，还需要确定的是桥梁结构上的太阳辐射强度。工程算例中 3 月份时的太阳-桥梁相对位置如图 4.4 所示，通过幂指数辐射计算模型（公式(2.18)-(2.33)）计算桥梁结构关键构件各表面的总辐射强度。以 3 月 13 日的桥梁关键构件截面 A 为例，桥梁关键构件各表面的辐射强度计算情况如图 4.5 所示。当日南京站测得的日累计太阳辐射强度为  $14.98 \text{ MJ/m}^2$ ，计算所得桥梁关键构件顶面的日累计太阳辐射强度为  $12.97 \text{ MJ/m}^2$ ，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。

根据辐射计算模型可得 3 月 13 日目标桥梁所在地的日出、日落时间分别为 6 时 18 分和 18 时 05 分。日间桥梁关键构件各表面的太阳直接辐射强度从高到低依次为：Top（水平顶面）、South（南侧面）和 North（北侧面），无法受到太阳直射

的 Bottom（水平底面）太阳直接辐射强度为 0。

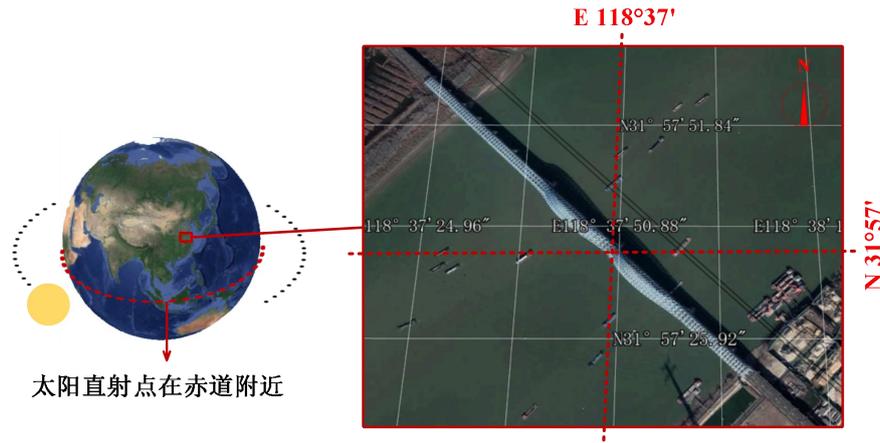
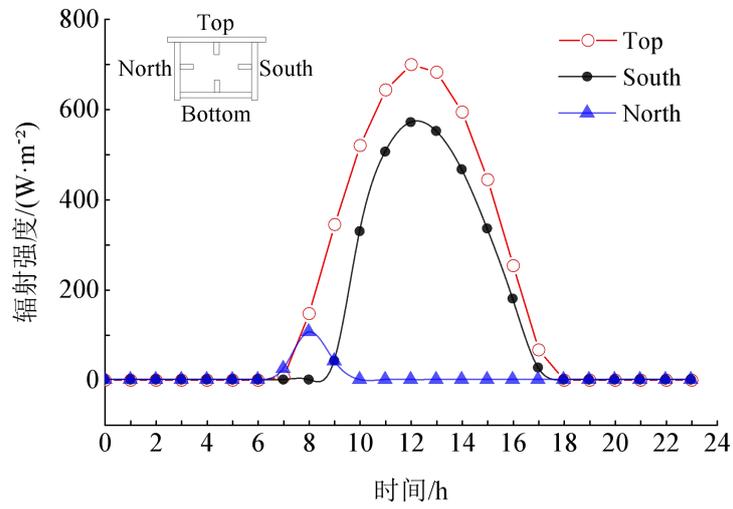
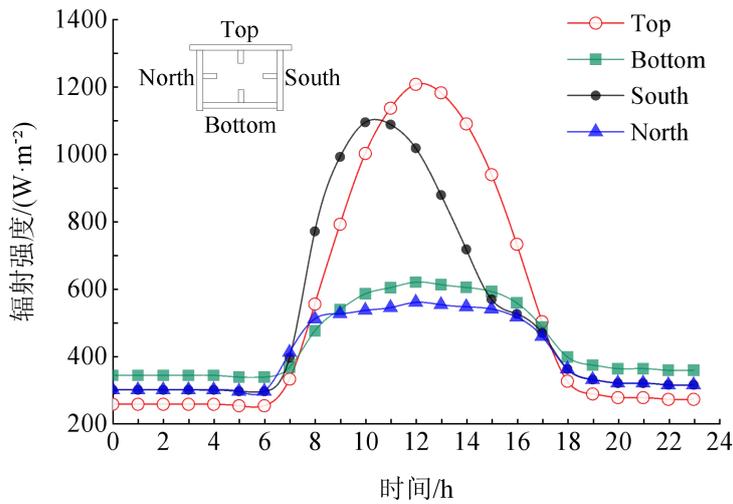


图 4.4 3 月份太阳-桥梁相对位置



(a)



(b)

图 4.5 3 月 13 日关键构件辐射强度分布情况

(a) 太阳直接辐射强度; (b) 总辐射强度

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，该关键构件的北侧面仅在上 6 时 18 分至 9 时 23 分能够受到太阳直射，故在当日的 9 时 23 分之后，北侧面上的太阳直接辐射强度为 0。对应于桥梁上温度测点测得的实际温度值，南侧测点温度值普遍高于北侧测点，且晴朗白天时南北侧点温差更大。

第三步，换热边界条件计算，利用计算得到的各场地气象参数计算桥梁结构的对流换热系数和辐射换热系数（公式(3.8)~式(3.9)），再将辐射换热热流等效转换为对流换热热流，得到结构热分析的假定换热边界条件（公式(3.10)~式(3.11)）。最后将结构材料特性和结构换热边界条件输入到有限元模型中，即可进行结构瞬态热分析，计算得到结构的温度场。依托有限元分析软件 ANSYS 的桥梁结构关键构件温度场数值计算详见下节。

### 4.3.2 桥梁关键构件温度场分析计算

第四步，桥梁结构温度场计算，对桥梁结构的有限元模型进行瞬态热分析得到结构的时变温度场。在 ANSYS 中选用 PLANE55 单元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，该单元可支持热-应力耦合分析。PLANE55 单元的详情如图 4.6 所示。建立目标桥梁上关键构件的有限元模型如图 4.7 所示。各关键构件采用的钢材型号均为 Q345qD，其热工参数如表 4.2 所示。

表 4.2 材料热工参数

材料	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	导热系数 (W/m·°C)	比热容 (J/kg·°C)
Q345qD 钢材	7515	60.5	434

本算例中研究构件的主要材料为钢材，且构件截面尺寸不大，根据本文 3.2.2 节中对桥梁结构瞬态热分析初始条件设定方式的讨论，本节中算例选取第一种初始条件设定方式：以第一天（3 月 5 日）6 时的气温为初始温度，施加于整个构件截面。再对关键构件各边界处施加以相应的综合边界条件，完成瞬态热分析后输出有限元模型中对应于桥梁结构上实际温度测点位置处节点的温度时程曲线如图 4.8~图 4.11 所示。

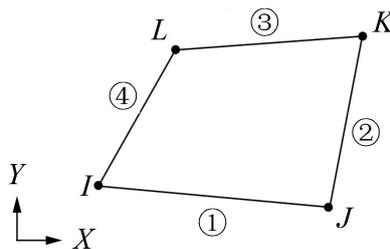


图 4.6 PLANE55 单元

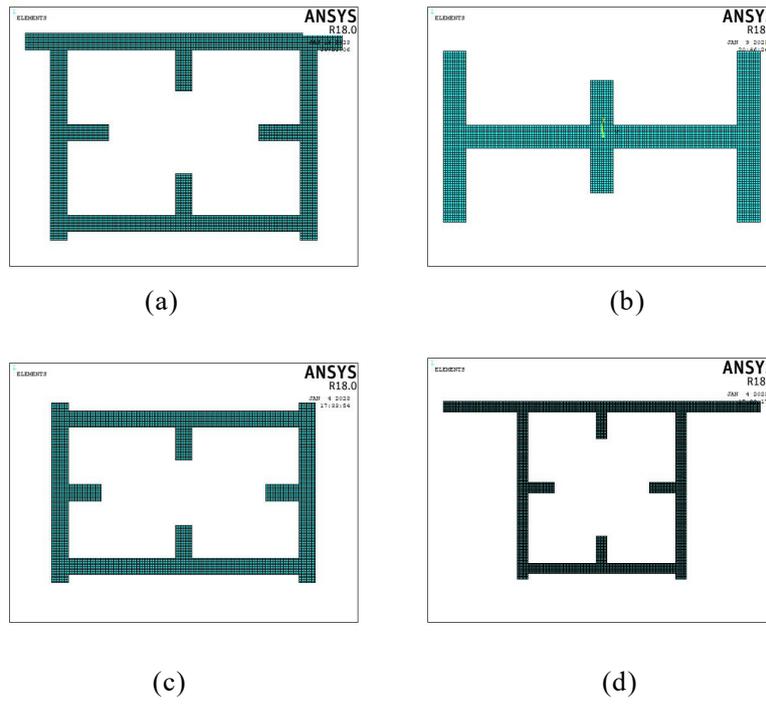


图 4.7 关键构件有限元模型

(a) 关键构件 A; (b) 关键构件 B; (c) 关键构件 C; (d) 关键构件 D

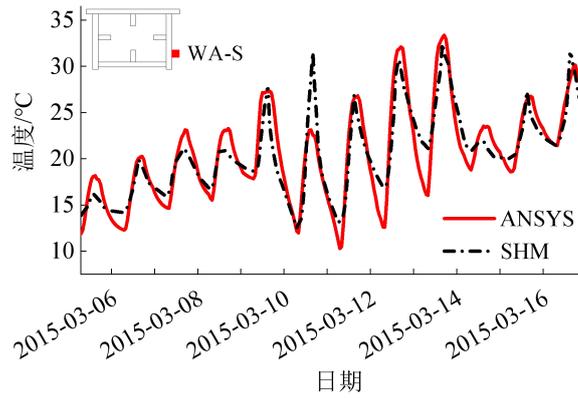


图 4.8 截面 A 测点温度时程曲线

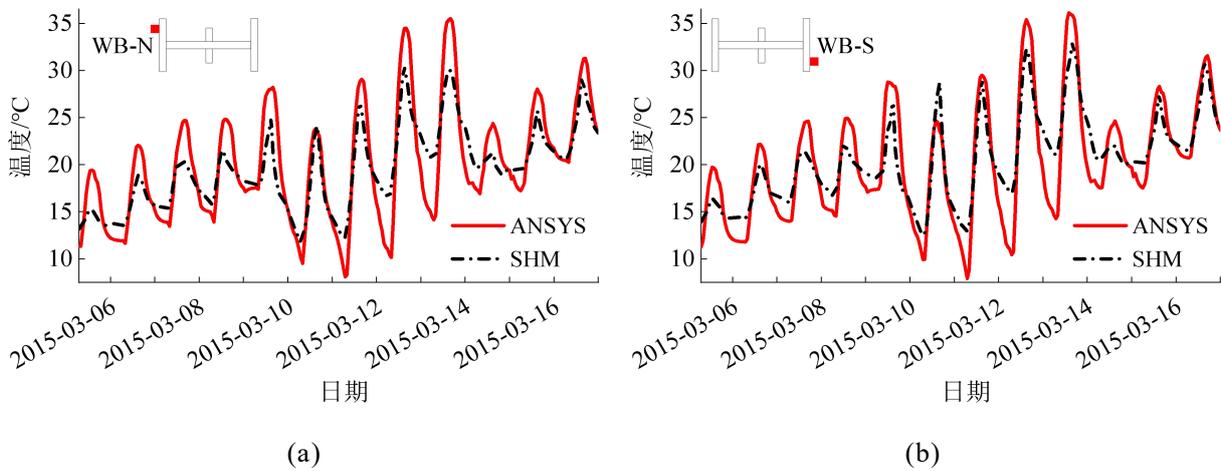


图 4.9 截面 B 测点温度时程曲线

(a) WB-N 测点; (b) WB-S 测点

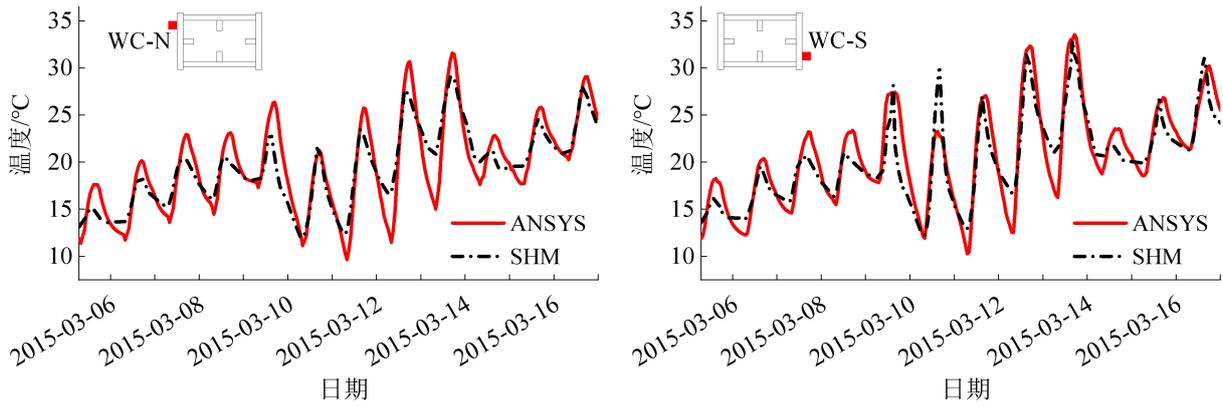


图 4.10 截面 C 测点温度时程曲线

(a) WC-N 测点; (b) WC-S 测点

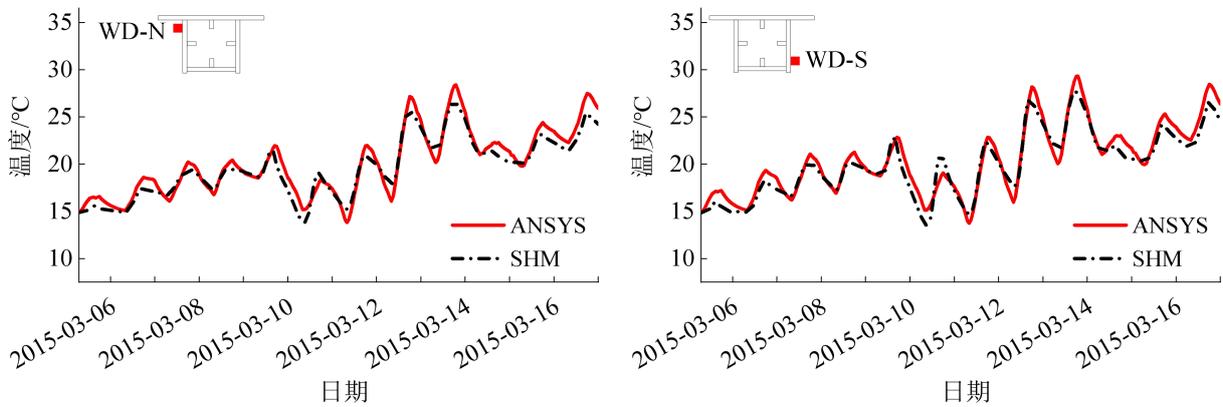


图 4.11 截面 D 测点温度时程曲线

(a) WD-N 测点; (b) WD-S 测点

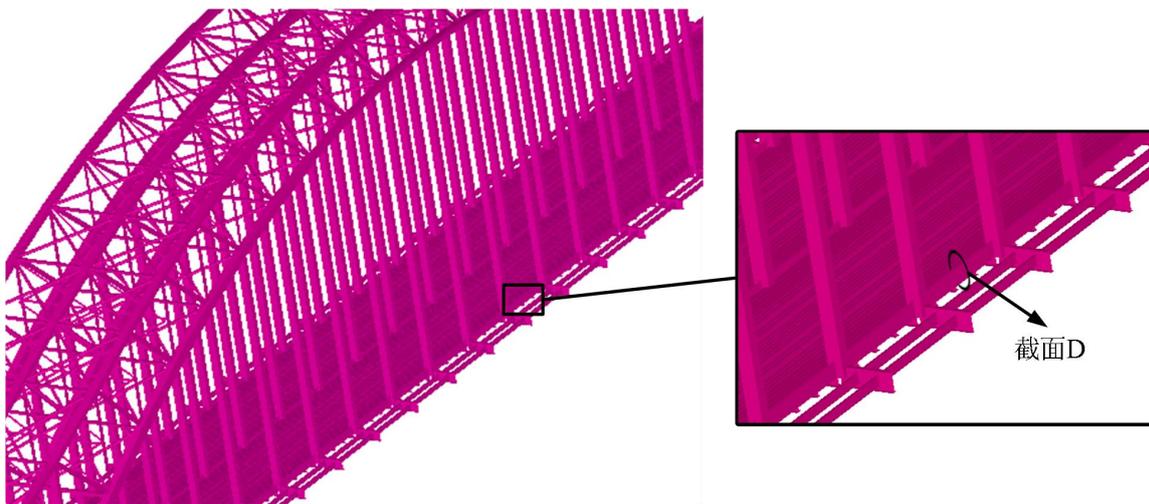


图 4.12 截面 D 位置

对比位于上部拱圈中各温度测点的温度计算值和温度实测值(图 4.8-图 4.10), 计算得到的每日最低温度低于实测值, 晴朗夜间尤甚, 究其原因可能是实际夜间风速低于日间风速。有资料显示: 一天中从清晨至午后再到夜间, 风速呈现先增

后减的变化规律，本章中展示的南京大校场机场气象站的风速数据（图 4.3(b)）也基本符合该规律。各测点的温度计算结果显示：阴天以及多云天气时白天的温度计算值普遍高于实测值，推测其原因是风速和辐射强度计算值与实际情况有偏差。

桥梁结构下部钢架受周围结构遮挡（图 4.12），处于半封闭位置，根据对该桥梁关键构件与周围构件的位置情况分析，周围构件可能挡住了大部分气流，即该处风速应远低于开敞位置。按 3.5m/s 的风速计算得该处温度值远低于实测值，若减小风速至 1m/s，得到的温度计算值与实测值非常接近，如图 4.11 所示。

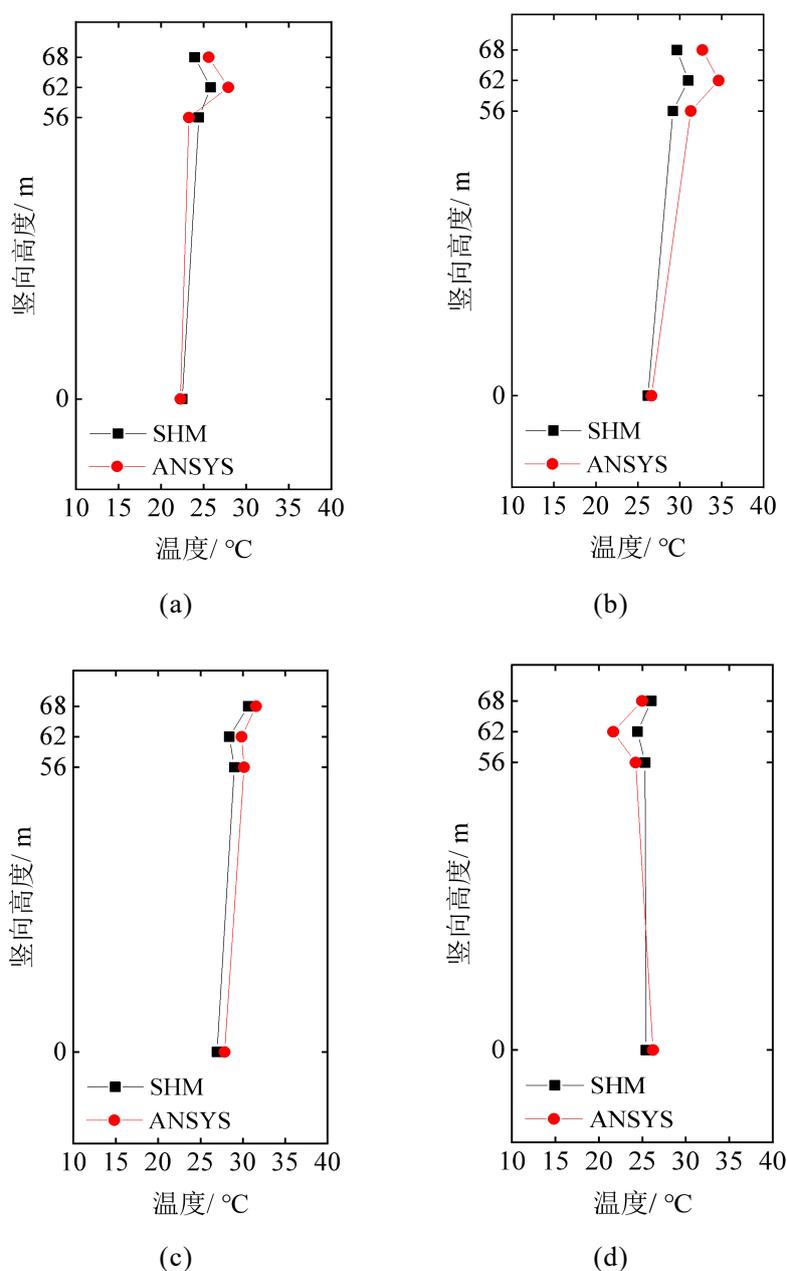


图 4.13 3 月 13 日桥梁典型竖向温度梯度（将截面 D 中心高度定为 0m）

日出时刻-7 时; (b) 日温度梯度最大时刻-15 时; (c) 日落时刻-18 时; (d) 夜间-22 时

由于 3 月 13 日结构的平均温度最高，对该日结构温度场计算结果的准确性进

行进一步验证。选取一天中有代表性的四个时刻：日出时刻、日温度梯度最大时刻、日落时刻和夜间，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 4.13 所示。基于有限元模型计算得到的桥梁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。

### 4.3.3 温度场计算误差分析

为进一步验证所提出的基于气象大数据的结构温度计算方法用于钢结构桥梁温度场计算的可行性，对各温度测点的温度计算值进行误差分析。各测点温度计算值的误差计算情况如图 4.14 和表 4.3 所示，平均绝对误差和均方根误差通过式 (2.11)和式(2.12)计算。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。

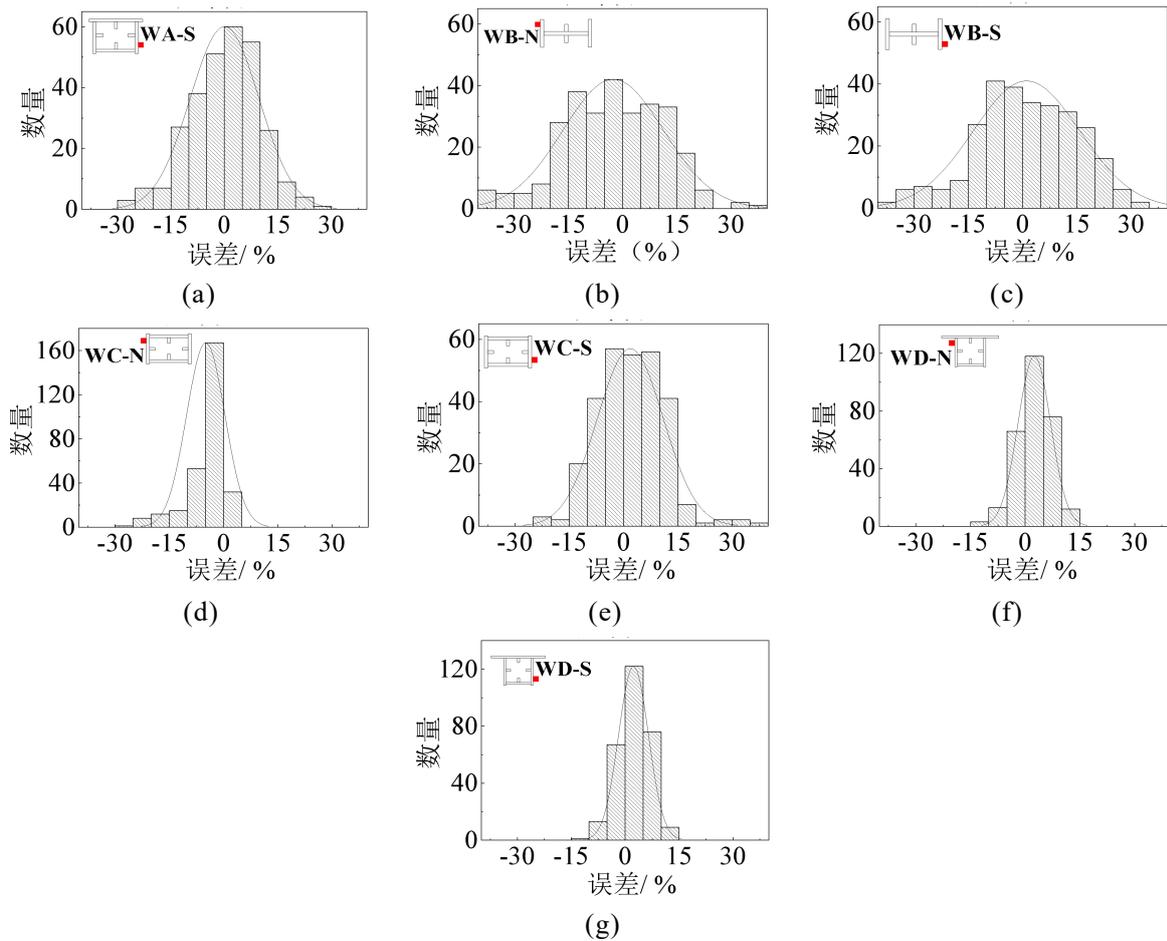


图 4.14 各测点温度计算误差分布

(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

从误差分布情况来看，截面 B 两个测点的温度计算值误差分布较为分散，且其最大误差达到 40%。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 温度计算值误差较大的原因。从表 4.3 的结果来看，各测点温度计算值的平均绝对误差和均方根误差均较小，其最大值分别为 2.3℃ 和 2.9℃。

表 4.3 温度计算误差

	WA-S	WB-N	WB-S	WC-N	WC-S	WD-N	WD-S
平均绝对误差/℃	1.6	2.3	2.3	1.3	1.5	0.8	0.7
均方根误差/℃	2.0	2.9	2.8	1.7	1.9	1.0	0.9

为探究各气象参数取值偏差对钢结构桥梁温度场计算结果的影响，进行了气象参数灵敏度分析，分析结果如图 4.15 所示。对目标桥梁结构关键构件 A 施加以不同的气象条件（太阳辐射强度、气温和风速），利用有限元分析软件 ANSYS 对关键构件的有限元模型进行不同气象条件下的结构热分析计算，得到结构的平均温度。各气象参数的基准值取为当年气象站测得的平均值，对各气象参数取值变化与结构平均温度间的变化规律进行了总结分析，结果显示气温和辐射强度与结构温度近似成正比线性关系，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%。风速与结构温度近似成反比例函数关系，当风速低于 3m/s 时，其对结构温度的影响甚至大于辐射强度。

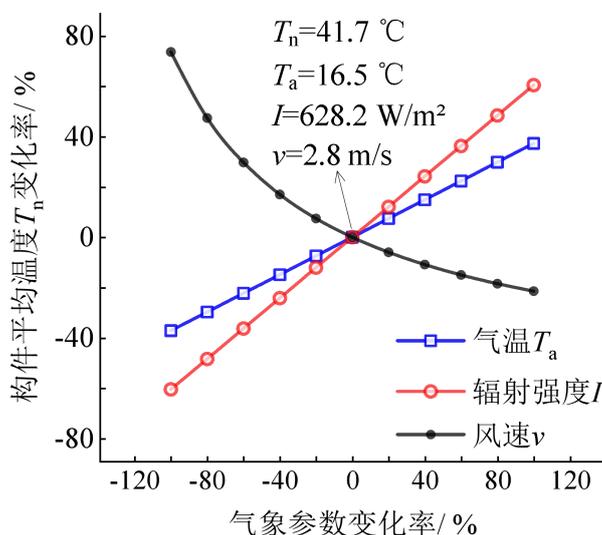


图 4.15 钢结构桥梁的气象参数灵敏度分析

综上，辐射强度和风速的取值极大的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，需要进一步明确桥梁结构上各位置处的风速分布情况，同时需要进行不同天气状况下的辐射强度计算方法研究。

## 4.4 桥梁结构温度变形计算

上节内容完成了对桥梁结构关键构件温度场的计算，本节将基于温度场计算结果，在 ANSYS 中建立目标桥梁的整体有限元模型，对模型施加以计算所得的结构温度，进行结构分析得到目标桥梁的温度变形。大跨桥梁结构的纵向位移主要由结构温度变化引起，故本节基于桥梁各支座的纵向位移实测值，对位移计算值进行误差分析，从而验证所提出的基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法用于桥梁温度效应计算的可行性。

### 4.4.1 支座纵向位移计算结果分析

在 ANSYS 中建立桥梁的有限元分析模型如图 4.16 所示。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，每个节点有 6 或 7 个自由度，适用于分析细长梁结构，基于 Timoshenko 梁理论可考虑剪切变形影响；SHELL181 单元为具有 4 个节点的壳单元，每个节点有 6 个自由度，适用于分析薄的壳体结构或有一定厚度的壳体结构。全桥共计 59918 个节点，112706 个单元，其中梁单元 58370 个，壳单元 54336 个。

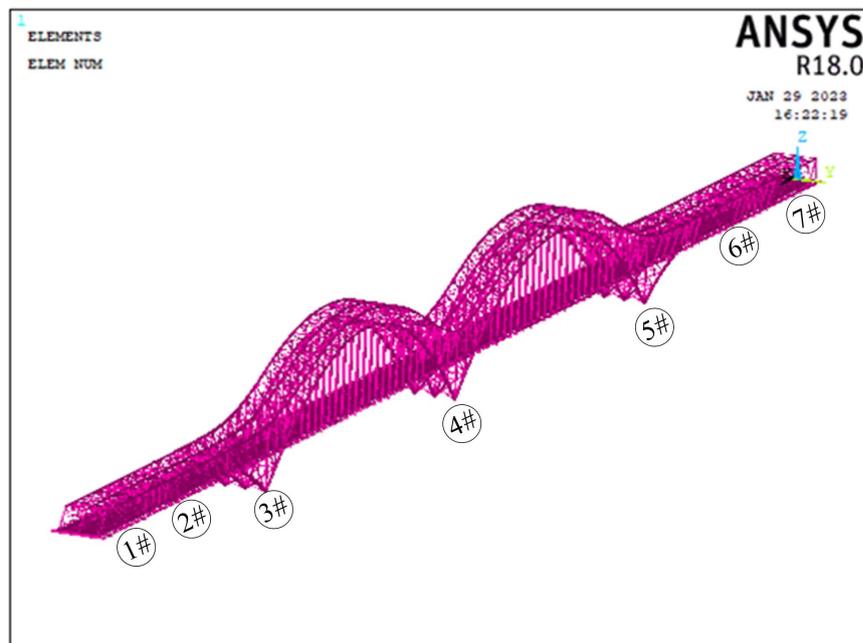


图 4.16 桥梁结构有限元模型

通过文献资料可知，目标桥梁的支座采用球面钢轴承，4#为铰接支座，限制了其纵向位移；其余支座则安装了纵向活动支座。故将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  $1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ 。

将计算得到的截面 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。根据各截面温度场计算结果，输出截面上所有节点的温度并计算截面平均温度。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气温，得到桥梁各支座的纵向位移计算值如图 4.17 所示。

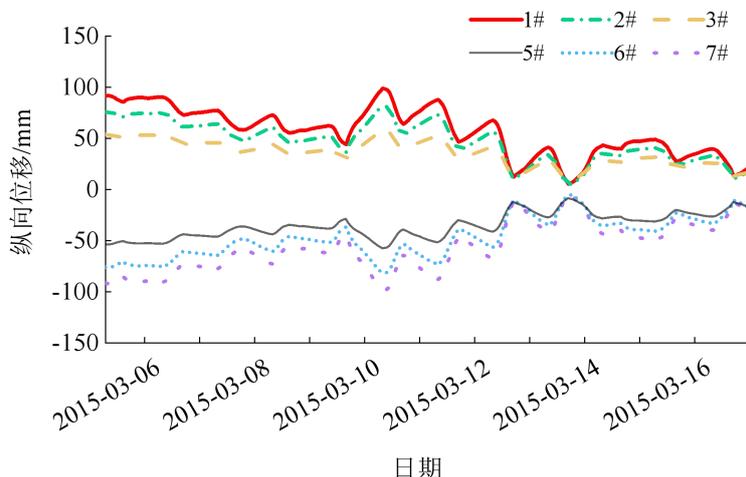


图 4.17 桥梁支座纵向位移

该桥以 4# 支座为中心两边结构对称。且施加的温度荷载沿桥纵向一致，故计算得到两侧支座的纵向位移呈对称分布。各支座纵向位移在一天内的变化类似单周期的正弦曲线。支座的纵向位移与温度有明显的相关性。温度升高时，桥梁结构整体“伸长”；温度降低时，桥梁结构整体“缩短”。以桥梁合龙时的温度为零点，当结构温度低于合龙时温度时，1#、2#、3# 支座的纵向位移表现为正值；相应的 5#、6#、7# 支座的纵向位移表现为负值。同一时刻，距离中间支座越远的支座，其纵向变形值越大。这与桥梁设置的中间固定支座，两端滑动支座对应的变形特征相符。

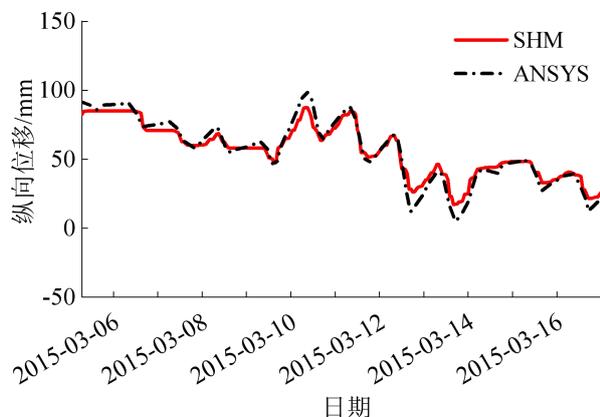


图 4.18 1# 支座纵向位移计算-实测值对比

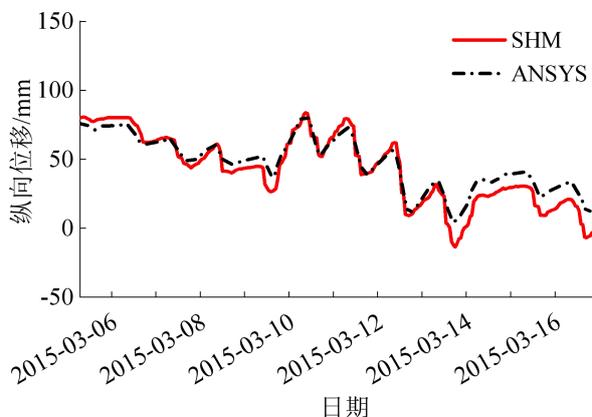


图 4.19 2# 支座纵向位移计算-实测值对比

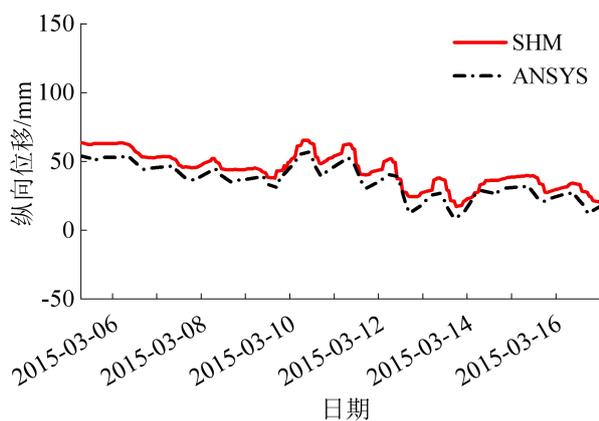


图 4.20 3#支座纵向位移计算-实测值对比

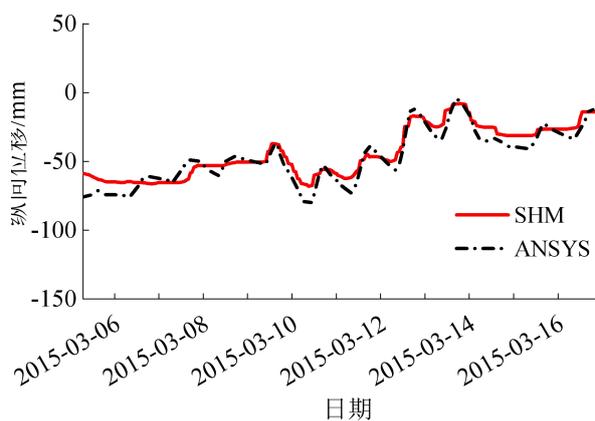


图 4.21 6#支座纵向位移计算-实测值对比

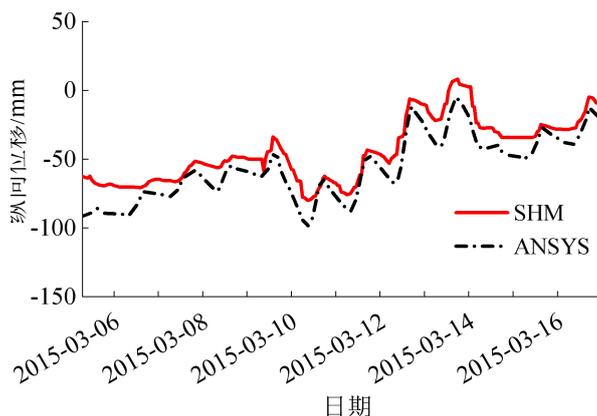


图 4.22 7#支座纵向位移计算-实测值对比

整理得到桥梁各支座纵向位移的计算值和实测值如图 4.18~图 4.22 所示, 1#、2#和 6#支座位移计算值与实测值吻合良好。3#和 7#支座位移的计算值则与实测值略有偏差, 其中 3#支座纵向位移的计算值整体略小于实测值; 7#支座纵向位移的计算值整体略大于实测值。

#### 4.4.2 支座纵向位移计算误差分析

对各支座纵向位移的计算-实测值进行误差分析, 平均绝对误差通过式(2.11)计算; 最大绝对误差指最大误差的绝对值, 误差计算结果如表 4.4 所示。从平均绝对误差来看, 1#、2#和 6#支座的误差较小, 分别在 7mm 和 9mm 以内。正如图 4.20 和图 4.22 已经呈现出的问题, 3#和 7#支座的误差较大。

表 4.4 支座纵向位移误差

支座编号	1#	2#	3#	6#	7#
平均绝对误差/mm	4.2	6.8	13.0	5.8	12.6
最大绝对误差/mm	16.5	22.5	21.0	17.3	29.5

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移应关于主跨固定支座呈反对称分布。由于 3#支座对称位置处的 5#支座的纵向位移测量结果缺失, 无法对其进行对照分析, 但由现有测量结果可知 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。

综上，利用所提出的基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法计算桥梁温度效应是可行的。

### 4.4.3 支座绝对位移计算

本节对桥梁结构的实际温度变形开展了进一步研究。因桥梁自合龙时刻起各支座开始发生位移，而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）的气温，计算得到桥梁各支座的绝对纵向位移。

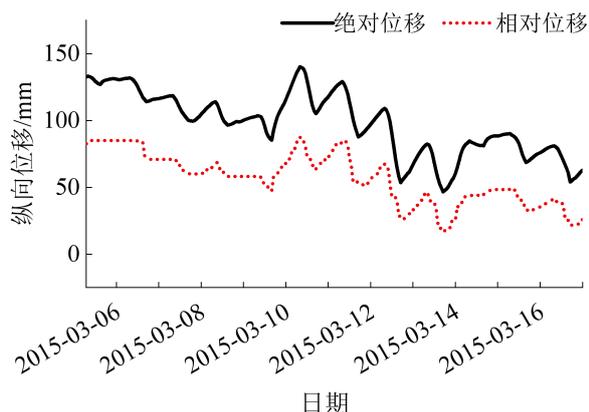


图 4.23 1#支座绝对-相对位移

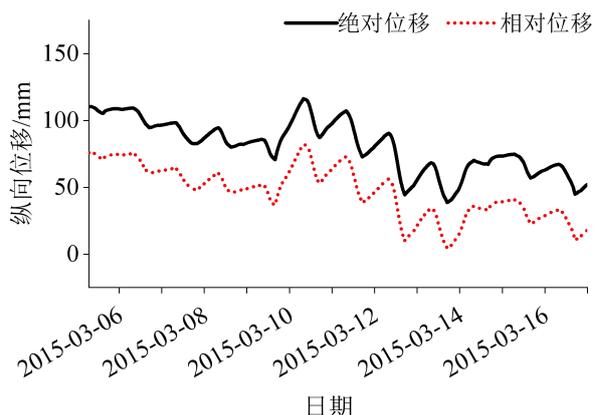


图 4.24 2#支座绝对-相对位移

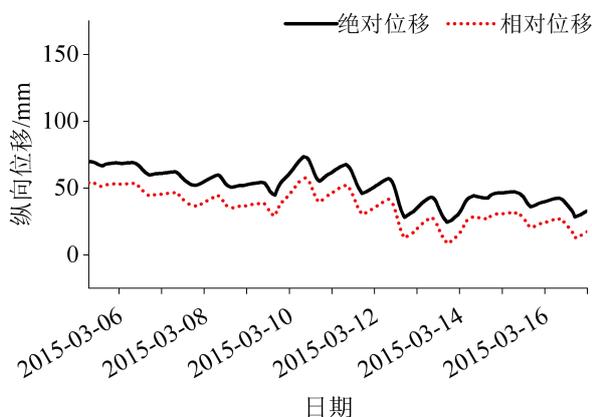


图 4.25 3#支座绝对-相对位移

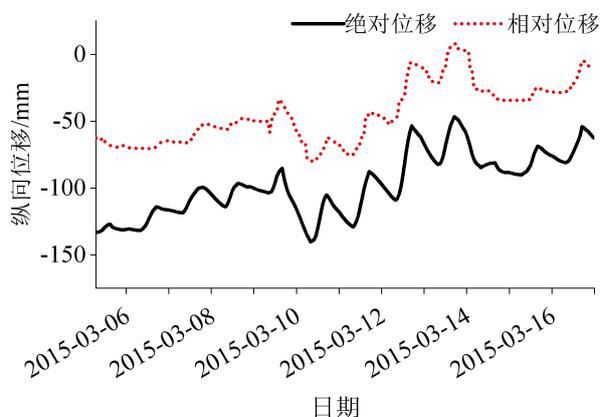


图 4.26 6#支座绝对-相对位移

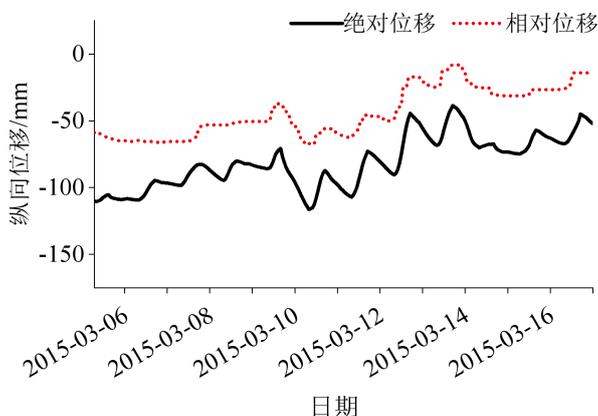


图 4.27 7#支座绝对-相对位移

整理得到桥梁各支座纵向位移的绝对位移和相对位移如图 4.23~图 4.27 所示,各支座的相对位移均远小于计算得到的绝对位移值。其中实测支座相对位移的最大值为 87mm,发生在 1#支座处;而计算得到的 1#支座绝对位移最大值为 140mm,远大于实测值(图 4.23)。因目标桥梁支座上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。

## 4.5 本章小结

本章通过工程算例验证了所提基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法用于钢结构桥梁的可行性。以某大跨钢拱桁架桥为研究对象,应用第 3 章提出的温度场计算方法得到目标桥梁关键构件的温度场,并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。基于实测数据分别分析了温度测点的温度计算值以及支座纵向位移计算值的误差。验证了该方法用于钢结构桥梁结构温度效应计算的可行性。主要内容如下:

(1) 验证所提出的基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法用于钢结构桥梁的可行性。基于第 3 章提出的温度场计算方法,依次计算了场地气象参数和换热边界条件,最终计算得到桥梁关键构件的时变温度场。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,各测点温度计算值的平均绝对误差在 2.3℃ 以内。

(2) 验证了利用所提出的基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法计算钢结构桥梁温度效应的可行性。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。得到各支座的纵向位移计算值与实测值吻合良好,各支座纵向位移计算值的平均绝对误差在 13mm 以内。

(3) 分析了各气象参数变化对钢结构桥梁结构温度的影响。辐射强度对结构温度的影响大于气温,气温和辐射强度与结构温度近似成正比关系;风速与结构温度近似成反比例函数关系。风速低于 3m/s 时,其对结构温度的影响甚至大于辐射强度。并以桥梁合龙时刻为零点设置结构的初始温度,计算桥梁各支座的绝对纵向位移。

## 第 5 章 某大跨钢混组合式桥梁温度效应计算实例

### 5.1 引言

为了验证所提出基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法用于计算混凝土桥梁温度场的可行性，以某大跨钢混组合式刚构-连续组合梁桥为研究对象，应用该温度场计算方法得到目标桥梁混凝土箱型梁的时变温度场。将温度场计算结果与桥梁上温度实测值在时间历程上进行对比，分析其计算误差。在验证所提结构温度场计算方法用于混凝土桥梁准确性的基础上，基于箱梁温度场数值计算结果阐述说明了混凝土箱梁的温度分布规律。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，对比桥梁支座纵向位移的计算值与实测值分析计算误差。最终验证了所提基于气象站大数据的桥梁结构温度场预测方法以及其用于混凝土桥梁结构温度效应计算的可行性。

### 5.2 桥梁概况

为了验证所提基于气象站大数据的桥梁结构温度场预测方法的可行性，本章以某大跨钢混组合式刚构-连续组合梁桥为研究对象，计算其温度场和温度变形。该桥的相关信息来自文献[93~97]，桥梁结构的立面布置图如图 5.1(a)所示。

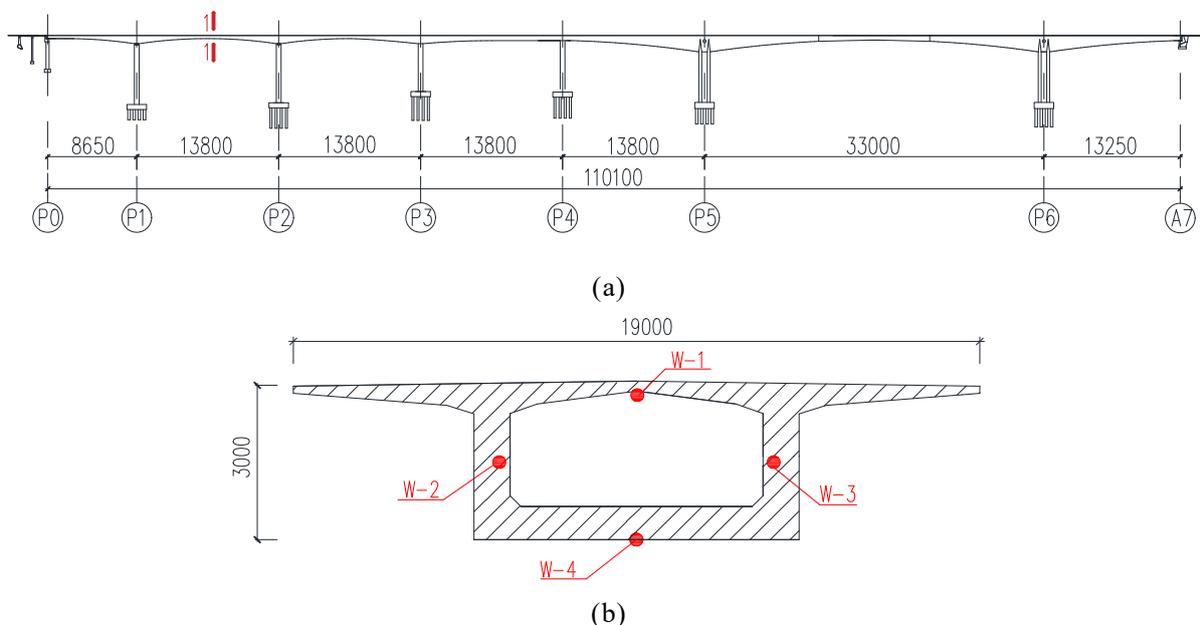


图 5.1 目标桥梁概况（单位：mm）

(a) 目标桥梁立面布置图; (b) 1-1 断面温度测点布置图

该桥位于长江中游，是重庆市连接渝中区和南岸区的过江通道，大桥全长 1103.5m，共有 7 跨，桥上布有单向四线车道。该桥采用了长联大跨径钢混组合式

钢构-连续组合梁桥的结构体系,为了降低结构自重同时满足经济和技术要求,在主跨跨中区域采用了总长为 108m 的钢箱梁,其余部分以及边跨均采用预应力混凝土箱型梁,钢箱梁和混凝土箱梁均采用单箱单室箱型截面。全桥主梁部分的混凝土型号为 C50 和 C60。桥上布有健康监测系统,总计 23 个监测截面,210 个测点,监测内容有结构温度、应变、挠度和位移等。如图 5.1 所示,在 1-1 断面位置处设置有若干个温度测点,混凝土箱梁监测断面的温度传感器布置情况如图 5.1(b)所示。

### 5.3 桥梁结构温度场计算

本节对该大跨钢混组合式刚构-连续组合梁桥于 2017 年 6 月 26 日至 2017 年 7 月 15 日期间的混凝土箱梁的结构温度场进行了计算分析。通过所提出的桥梁结构温度场计算方法,通过气象数据获取、场地气象参数计算和换热边界条件计算最终计算得到桥梁关键构件的温度场。

#### 5.3.1 场地气象参数计算

目标桥梁所在的重庆市地形多为丘陵和山地,重庆市内气象站分布较为密集。通过对各气象数据平台所能提供的气象数据以及气象站分布情况进行筛查,整理得到目标桥梁周边气象站如图 5.2 和表 5.1 所示。与目标桥梁距离最近的气象站为重庆九龙坡机场内的气象站,直线距离仅为 4.1km,故本算例中直接使用与目标桥梁最近的九龙坡机场气象站的气温值和风速平均值作为桥址处的气温和风速预测值。

表 5.1 目标桥梁周边气象站

名称	坐标 (经度, 纬度)	海拔/m	与目标桥梁距离/km
沙坪坝	(106.47, 29.58)	259.1	9.0
渝北	(106.62, 29.73)	464.7	17.9
巴南	(106.50, 29.33)	506.1	23.2
璧山	(106.22, 29.58)	331.5	30.6
九龙坡机场气象站	(106.53, 29.53)	356.5	4.1

第一步,气象数据获取,从气象数据平台查阅下载目标桥梁附近气象站大数据。重庆九龙坡机场气象站观测记录的气象数据可从 Reliable Prognosis 气象数据平台(网址: <https://rp5.ru>) 查询和下载。Reliable Prognosis 气象数据平台致力于为访问者提供准确的天气情况,提供全世界 245 个国家历史以及未来 7 天的天气报告,其气象数据来自各地机场气象站。

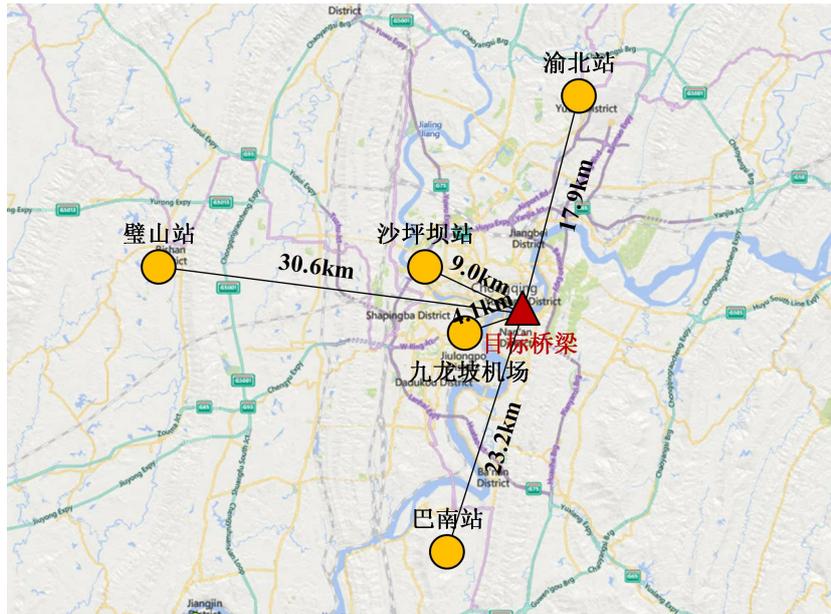


图 5.2 目标桥梁周边气象站

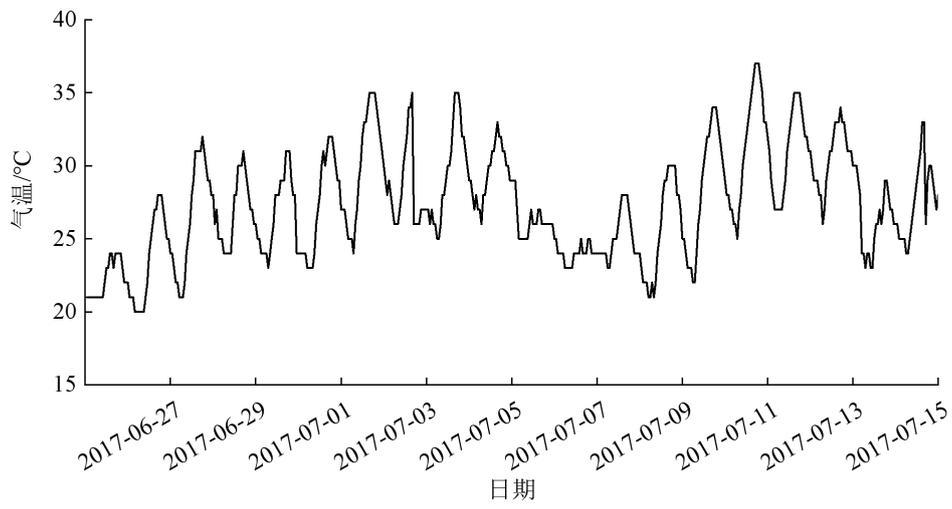


图 5.3 气温数据

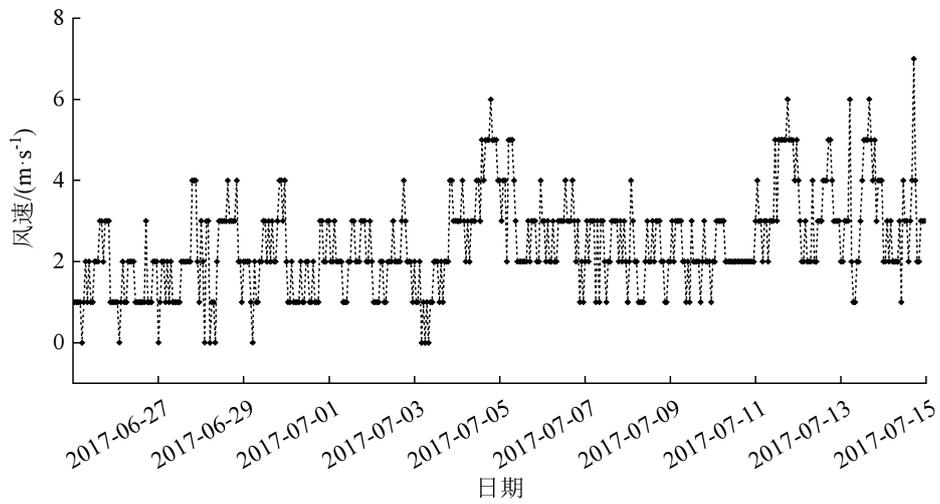


图 5.4 风速数据

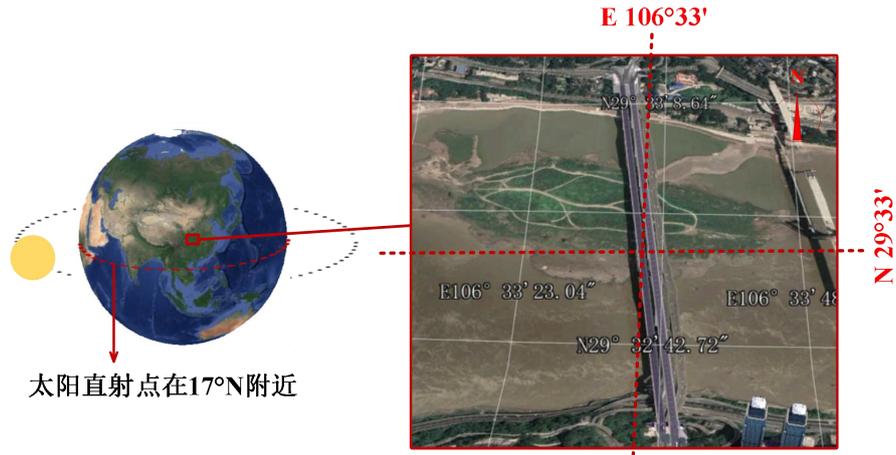
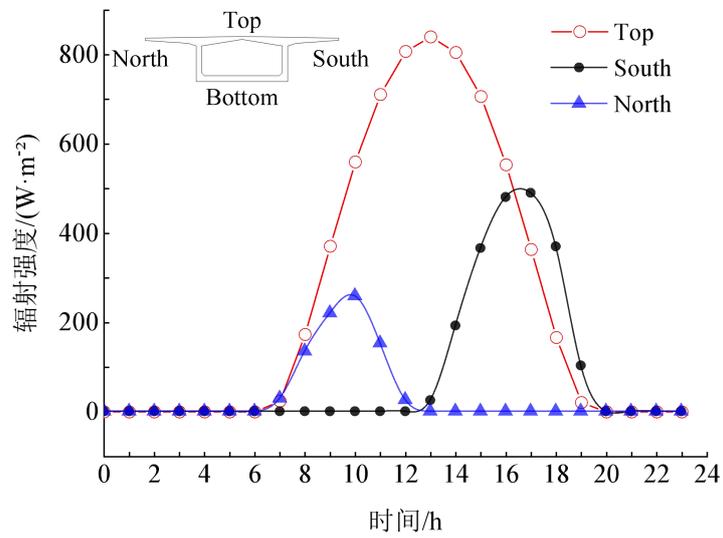
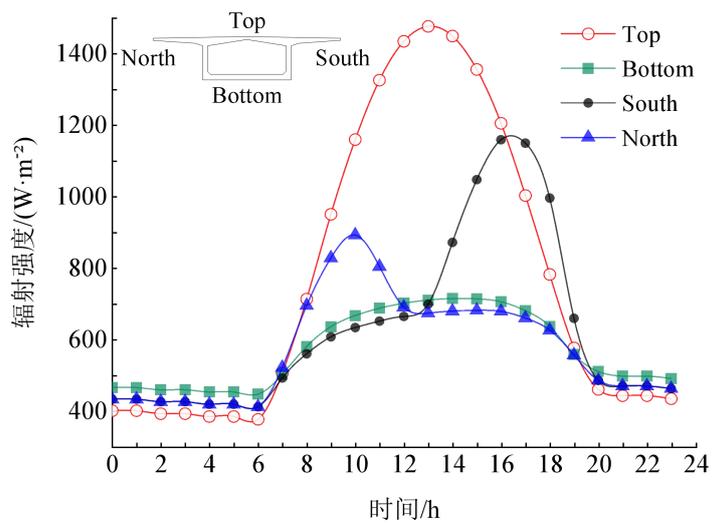


图 5.5 7 月份太阳-桥梁相对位置



(a)



(b)

图 5.6 7 月 11 日关键构件辐射强度分布情况

(a) 太阳直接辐射强度; (b) 总辐射强度

为了和算例中目标桥梁结构温度场计算时间对应，下载该气象站 2017 年 6 月 26 日至 2017 年 7 月 15 日的气象数据，包括气温、风速和天气情况。气温和风速详情如图 5.3 和图 5.4 所示，其中 6 月 26 日为晴转多云、7 月 6 日~7 月 7 日为阴天；6 月 27 日~7 月 5 日、7 月 8 日~7 月 15 日为晴朗天气。2017 年 6 月 26 日至 2017 年 7 月 15 日该气象站测量的风速在 0-7m/s 内变化，平均风速为 2.5m/s。

第二步，场地气象参数计算。上文已经确定了气温和风速的场地预测值，还需要确定的是桥梁结构上的太阳辐射强度。本工程算例中 7 月份时的太阳-桥梁相对位置如图 5.5 所示，通过幂指数辐射计算模型计算桥梁结构关键构件各表面的总辐射强度。以 7 月 11 日为例，箱梁各表面的太阳辐射强度计算情况如图 5.6 所示。

根据辐射计算模型可得 7 月 11 日目标桥梁所在地的日出、日落时间分别为 6 时 02 分和 19 时 57 分。日间箱梁各表面的太阳直接辐射强度累计值从高到低依次为：Top（水平顶面）、South（南侧面）和 North（北侧面）。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，箱梁北侧面在 6 时 18 分至 13 时 02 分能够受到太阳直射；箱梁南侧面在 13 时 02 分至 19 时 57 分能够受到太阳直射。对应于桥梁上温度测点测得的实际温度值，上午北侧测点温度值高于南侧；而下午北侧测点温度值则低于南侧，且晴朗白天时南北侧点温差更大。

第三步，换热边界条件计算。利用计算得到的各场地气象参数计算桥梁结构的对流换热系数和辐射换热系数，再将辐射换热热流等效转换为对流换热热流，得到结构热分析的假定换热边界条件。最后将结构材料特性和结构换热边界条件输入到有限元模型中，即可进行结构瞬态热分析，计算得到结构的温度场。依托有限元分析软件 ANSYS 的桥梁结构关键构件温度场数值计算详见下节。

### 5.3.2 桥梁关键构件温度场分析计算

第四步，桥梁结构温度场计算，对桥梁结构的有限元模型进行瞬态热分析得到结构的时变温度场。在 ANSYS 中选用 PLANE55 单元建立桥梁结构关键构件的二维有限元模型，PLANE55 单元的相关信息已在第 4 章中进行了介绍，此处不再赘述。本例中考虑了箱梁上铺装层对结构温度场的影响，参考文献[98~100]在箱梁顶板外侧设定 120mm 厚的沥青铺装层，建立目标桥梁上混凝土箱梁的有限元模型如图 5.7 所示。混凝土和沥青材料的热工参数如表 5.2 所示。

表 5.2 材料热工参数

材料	密度 (kg/m <sup>3</sup> )	导热系数 (W/m·°C)	比热容 (J/kg·°C)
混凝土	2500	2.4	950
沥青	2100	1.3	920

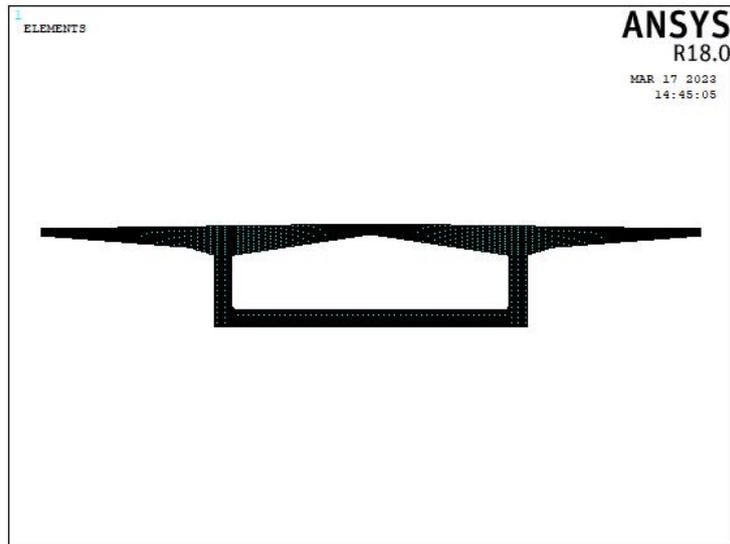


图 5.7 箱梁有限元模型

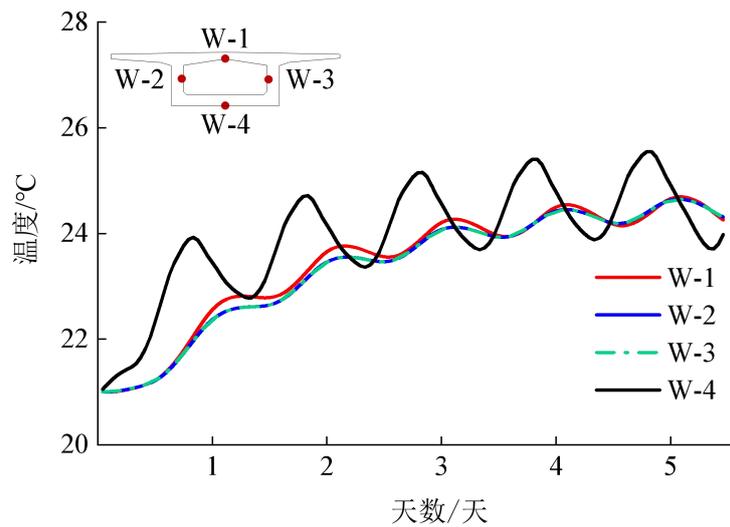


图 5.8 结构初始温度场

因本算例中研究构件的主要材料为混凝土，根据本文 3.2.1 节中对桥梁结构瞬态热分析初始条件设定方式的讨论，本节中算例选取第二种初始条件设定方式：通过 5 次循环施加第一天（6 月 26 日）的热载荷，直至结构输出等幅周期变化的温度时程曲线，并将此作为结构热分析的初始条件（如图 5.8 所示）。完成瞬态热分析后输出有限元模型中对应于桥梁结构上实际温度测点位置处节点的温度时程曲线如图 5.9~图 5.12 所示，各测点温度计算结果与实测值较为接近。

对比箱梁上各测点的温度计算-实测值，其中 6 月 26 日~6 月 27 日各测点的温度计算值均低于实测值，因该期间天气为晴转多云，但在计算时统一按多云天气处理，计算总辐射强度时未计入太阳直接辐射强度。对比位于箱梁顶板处温度测点 W-1 的温度计算值和实测值（图 5.9），晴朗天气时全天温度计算值均高于实

测值，综合其他测点的温度计算情况，推测 W-1 测点温度计算值偏高的主要原因是计算得到的太阳直接辐射强度相较于实际情况偏高。

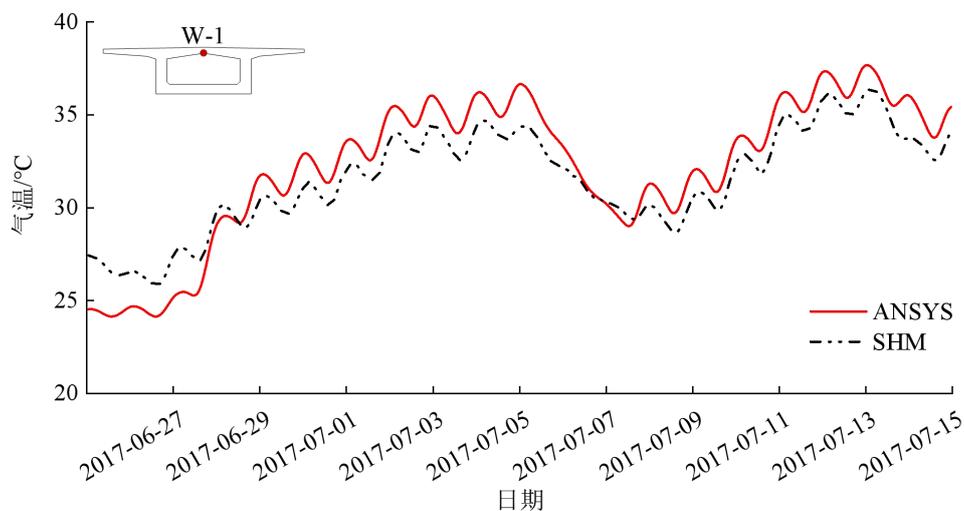


图 5.9 W-1 测点温度时程曲线

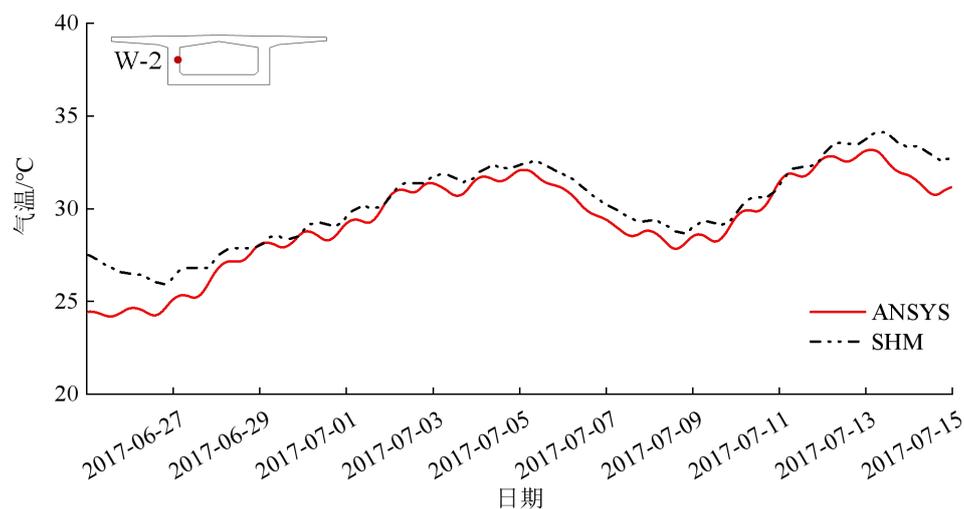


图 5.10 W-2 测点温度时程曲线

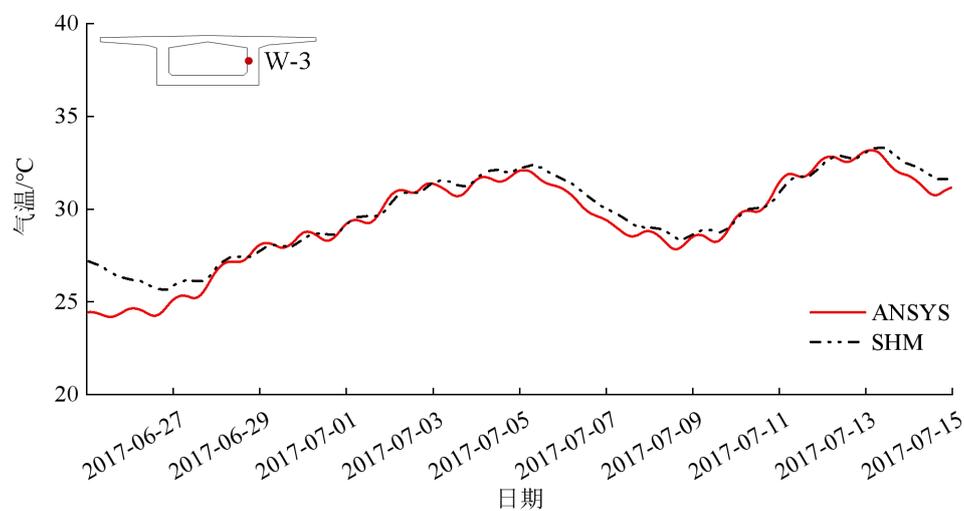


图 5.11 W-3 测点温度时程曲线

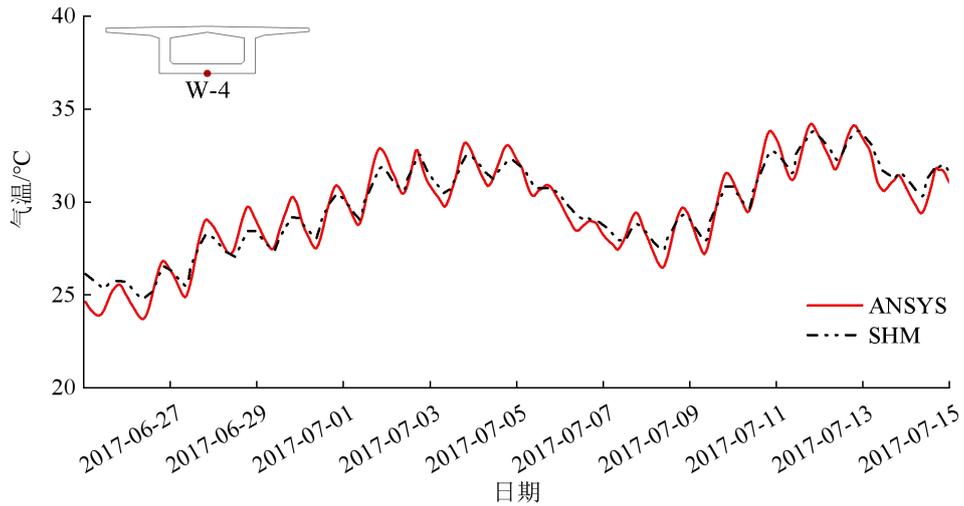
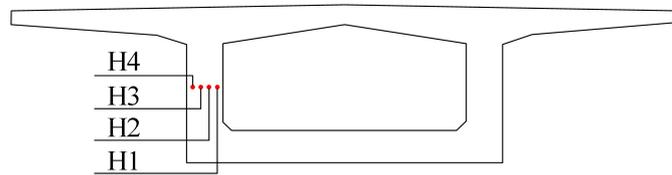
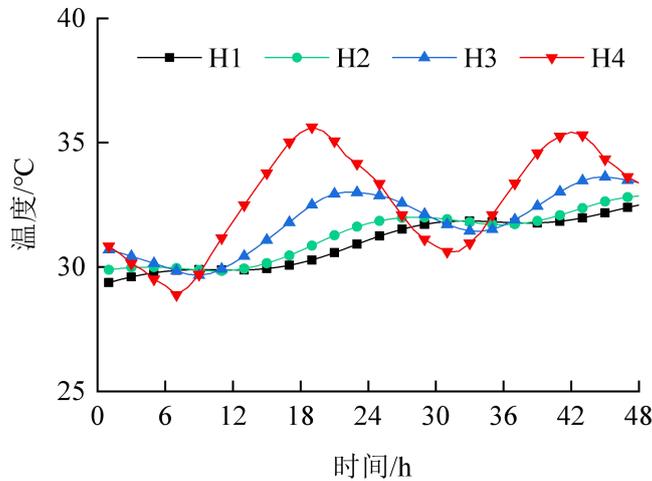


图 5.12 W-4 测点温度时程曲线



(a)



(b)

图 5.13 箱梁腹板不同深度处温度分布情况

(a) 节点位置; (b) 温度时程曲线

对于箱梁腹板处的测点 W-2 和 W-3，其计算得到的温度时程曲线与实际曲线存在一定的“错位”——两者每日温度峰值出现的时间存在一定的偏差，因工作人员在桥上安装传感器的实际位置与图纸上标注的位置存在偏差，或为 W-2 和 W-3 温度时程曲线“错位”的主要原因。图 5.13 给出了 7 月 11 日~7 月 12 日沿腹板厚度方向不同深度位置处的温度分布情况，越靠近箱内位置，其一天内温度峰

值出现的时间越迟，同时其在一天内的温度变化也越平缓。如图 5.13 中 H4 的日最高温出现在 18 时，而 H3、H2 和 H1 日最高温的出现时间相较于 H4 则分别滞后 3、9 和 14 个小时。

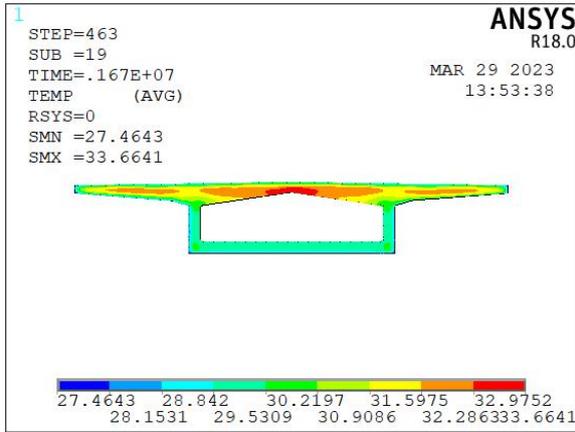


图 5.14 7 月 11 日 6 时箱梁温度场

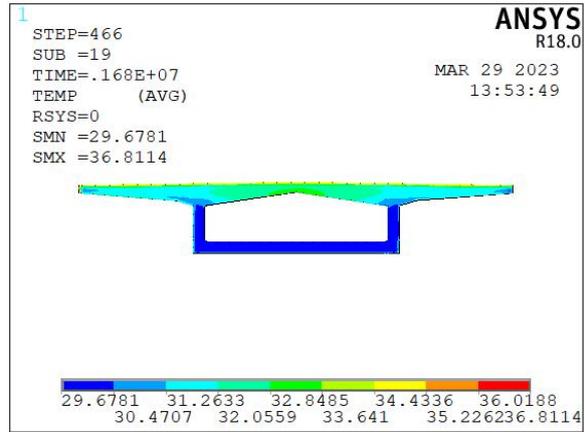


图 5.15 7 月 11 日 9 时箱梁温度场

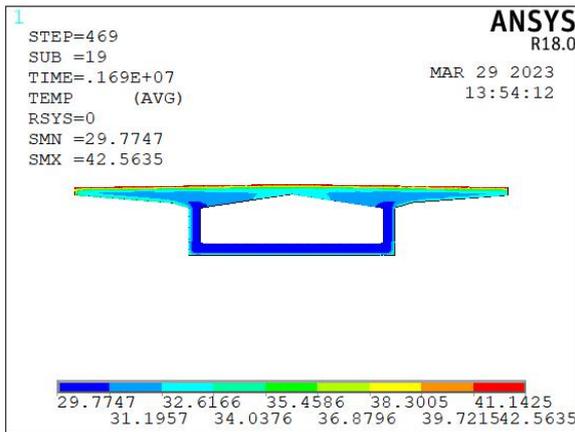


图 5.16 7 月 11 日 12 时箱梁温度场

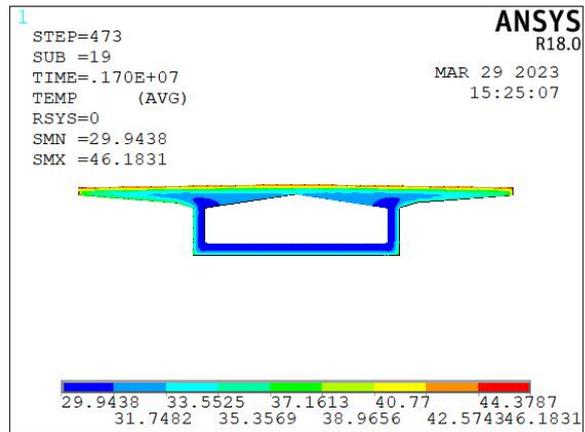


图 5.17 7 月 11 日 16 时箱梁温度场

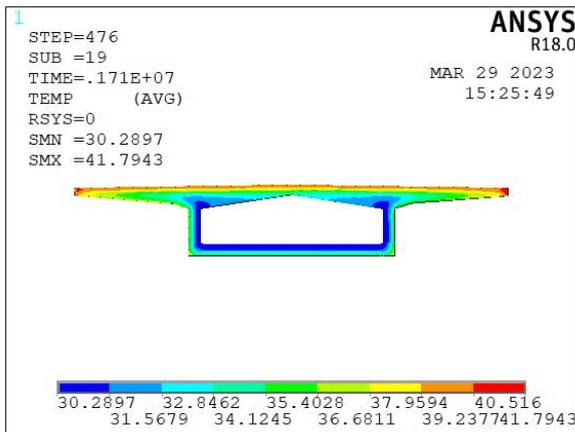


图 5.18 7 月 11 日 19 时箱梁温度场

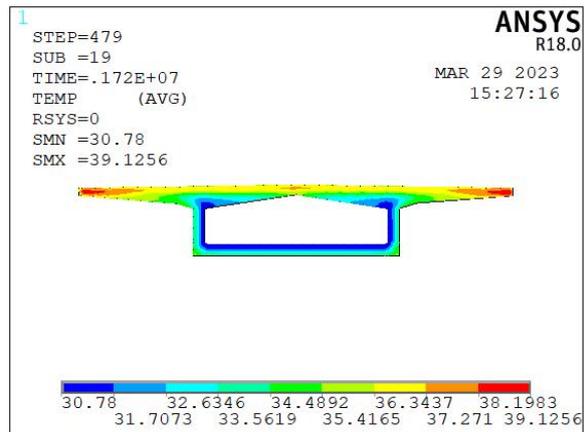


图 5.19 7 月 11 日 22 时箱梁温度场

基于有限元分析软件的结构温度场计算方法的一个优势是可以获得结构上任意位置处的温度变化情况。如图 5.14~图 5.19 所示，列出了 7 月 11 日箱梁一天中

几个重要时刻的温度云图。受外界气象因素作用以及结构自身热传导属性，箱梁各部位的温度变化规律略有不同。由于箱梁顶板受阳光直射，日间箱梁顶板的温度最高，其最高温出现在午后 16 时，达到了 46℃，而同一时刻箱梁底板内最低温仅为 30℃（图 5.17），顶板和底板的温差达到了 16℃。因混凝土的导热性能较差，箱梁内部热量传导较慢，其内测温度场较为稳定，温度变化幅度较小。结构温度场总体变化规律为：日间由外至内升温；夜间由外至内降温，故凌晨至日出前会出现箱梁内部温度高于外侧的情况（图 5.14）。

### 5.3.3 温度场计算误差分析

为进一步验证所提出的基于气象大数据的结构温度计算方法用于混凝土箱梁桥温度场计算的可行性，对各温度测点的温度计算值进行误差分析，平均绝对误差和均方根误差通过式(2.11)和式(2.12)计算。各测点温度计算值的误差计算情况如表 5.3 所示。各测点温度计算值的平均绝对误差和均方根误差均较小，其最大值分别为 1.3℃和 1.4℃。

表 5.3 温度计算误差

	W-1	W-2	W-3	W-4
平均绝对误差/℃	1.3	0.9	0.5	0.5
均方根误差/℃	1.4	1.1	0.7	0.6

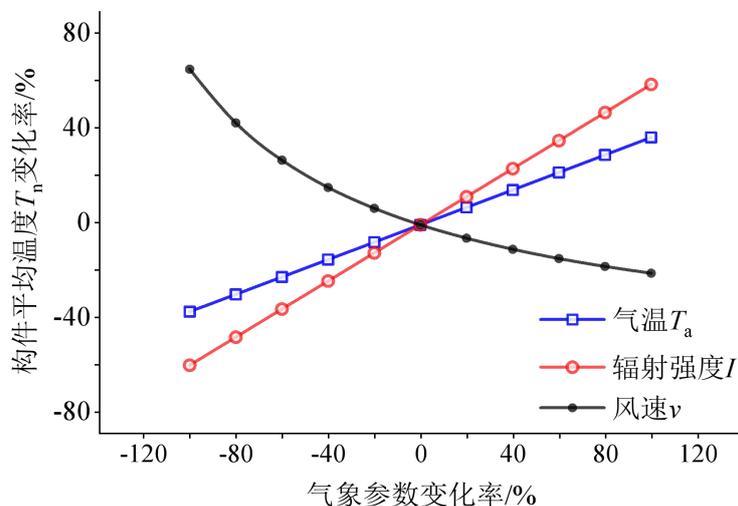


图 5.20 混凝土箱梁桥的气象参数灵敏度分析

为探究各气象参数取值偏差对混凝土箱梁桥结构温度场计算结果的影响，进行了气象参数灵敏度分析，分析结果如图 5.20 所示。为与第 4 章中钢结构桥梁的气象参数灵敏度分析结果进行对比，各气象参数的基准值以及变化率与第 4 章保持一致。得到混凝土箱梁桥的气象参数灵敏度分析结果与钢结构桥梁基本一致：气温和辐射强度与结构温度近似成正比线性关系，辐射强度对结构温度的影响大于气温；风速与构件平均温度成反比例函数关系。相较于钢结构桥梁结构，各气

象参数对混凝土箱梁桥结构温度的影响幅度略小一些。

## 5.4 桥梁结构温度变形计算

上节内容完成了目标桥梁箱梁温度场的计算，本节将基于温度场计算结果，在 ANSYS 中建立目标桥梁的整体有限元模型，对模型施加以计算所得的结构温度，进行结构分析得到目标桥梁的温度变形。进而基于桥梁各支座的纵向位移实测值，对位移计算值进行误差分析，从而验证所提出的基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法用于桥梁温度效应计算的可行性。

### 5.4.1 支座纵向位移计算结果分析

在 ANSYS 中建立桥梁的有限元分析模型如图 5.21 所示。为了提高运算效率，桥梁结构各构件均采用 BEAM4 单元，BEAM4 单元是一种可承受拉、压、弯、扭的三维弹性梁单元，每个节点有 6 个自由度，可用于计算应力硬化和大变形问题。通过文献资料可知，目标桥梁的 P1 和 P2 桥墩上部安装了纵向活动支座，其余桥墩则均与桥梁主梁固结。目标桥梁结构采用的主要材料为混凝土和钢材，其热膨胀系数分别取为  $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$  和  $1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。

将计算得到的箱梁截面的平均温度施加于桥梁结构有限元模型上，计算分析桥梁结构的温度位变形，整理得到桥梁各支座纵向位移的计算值和实测值如图 5.22 和图 5.23 所示。对应上节箱梁温度场的计算结果及误差情况，晴朗天气时 P1 和 P2 支座的位移计算值均与实测值较为接近，非晴朗天气时各支座纵向位移的计算值与实测值偏差较大。

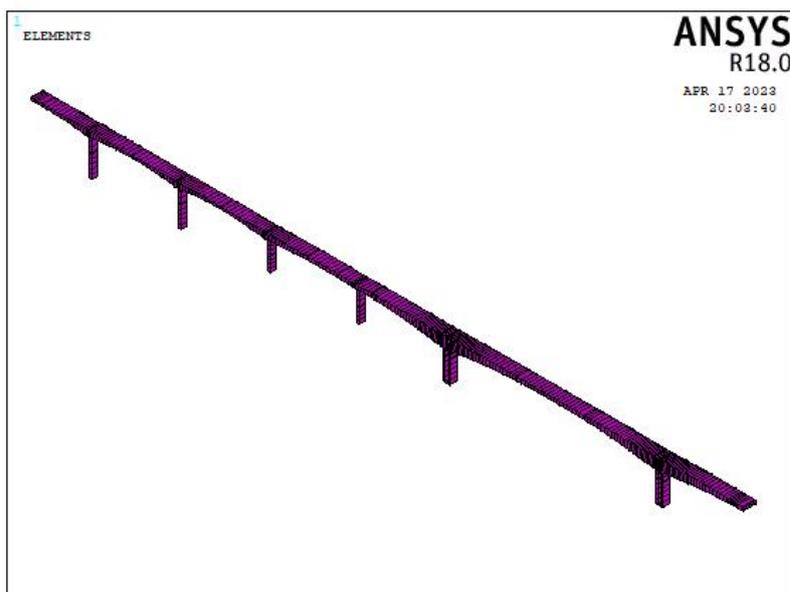


图 5.21 桥梁结构有限元模型

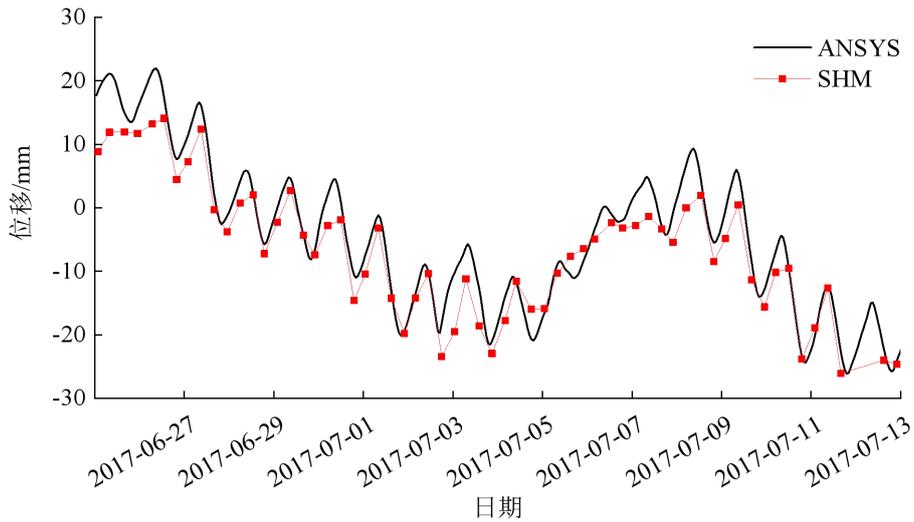


图 5.22 P1 支座纵向位移计算-实测值对比

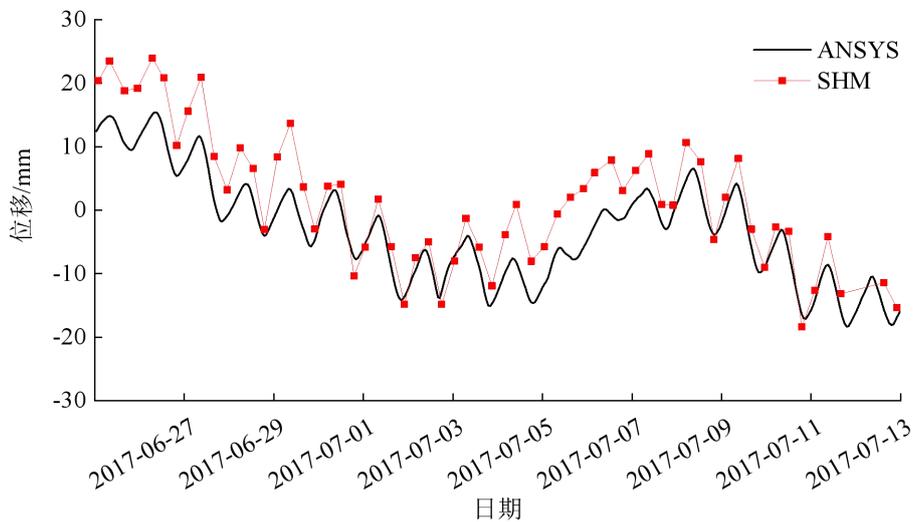


图 5.23 P2 支座纵向位移计算-实测值对比

### 5.4.2 支座纵向位移计算误差分析

对各支座纵向位移的计算-实测值进行误差分析，平均绝对误差通过式(2.11)计算；最大绝对误差指最大误差的绝对值，误差计算结果如表 5.4 所示。P1 和 P2 支座的误差均较小，其绝对平均误差分别在 3mm 和 6mm 以内。综合本章以及第 4 章对于两座大跨桥梁结构温度变形的分析结果，可以认为利用所提出的基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法计算桥梁温度效应是可行的。

表 5.4 支座纵向位移误差

支座编号	P1	P2
平均绝对误差/mm	3.0	5.1
最大绝对误差/mm	9.7	13.1

## 5.5 本章小结

本章通过工程算例验证了所提基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法用于混凝土箱梁桥温度场计算的可行性。以某大跨钢混组合式刚构-连续组合梁桥为研究对象，应用第3章提出的温度场计算方法得到目标桥梁关键构件的温度场，并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。并基于实测数据分别分析计算了温度测点的温度计算值以及支座纵向位移计算值的误差。验证了该方法用于桥梁结构温度效应计算的可行性。主要内容如下：

(1) 验证所提出的基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法的可行性。基于第3章提出的温度场计算方法，计算了某大跨钢混组合式刚构-连续组合梁桥混凝土箱梁的时变温度场。将温度场计算结果与桥梁上实测温度进行对比，两者在时间历程上吻合良好，各测点温度计算值的平均绝对误差在 $1.3^{\circ}\text{C}$ 以内。

(2) 分析讨论了混凝土箱梁各测点温度计算值误差形成原因。除需进一步提高桥址处气象参数计算精度外，还需明确传感器的具体安装位置。分析了各气象参数变化对结构温度的影响。对比第3章中钢结构桥梁以及本章中混凝土箱梁桥的气象参数灵敏度分析结果，结果显示混凝土箱梁桥的气象参数灵敏度分析结果与钢结构桥梁基本一致。

(3) 验证了利用所提出的基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法计算桥梁温度效应的可行性。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。得到各支座的纵向位移计算值与实测值吻合良好，各支座纵向位移计算值的平均绝对误差在 $6\text{mm}$ 以内。

## 结论与展望

本文深入开展大跨度桥梁结构温度场计算方法的研究，目的在于建立一种轻量化以及可持续性的桥梁结构温度效应的快速分析评估方法。本文基于“易获得”“可追溯”“全覆盖”的气象站大数据，提出了一种基于气象站大数据的大跨度桥梁结构时变温度场计算方法。该方法无需现场监测系统支持，可实现面大量广城市桥梁群的结构温度效应分析，为结构健康监测轻量化发展提供了新思路和技术支持。主要研究成果总结如下：

(1) 基于黑龙江、江苏、海南、四川、西藏和重庆共401个气象站点的气象数据，验证了空间插值法用于逐小时气温和风速空间分布计算的可行性。验证结果表明梯度距离平方反比法基本适用于中国各地的逐小时气温预测；克里金法对于中国各地的逐小时风速预测有一定的参考价值。讨论了气象站点疏密程度、气象站点间距离以及地势复杂程度对气温和风速插值结果的影响，分析结果显示当目标地点与最近气象站的距离小于20km时，使用空间插值法可能会放大误差。

(2) 提出了根据气象站大数据信息计算桥址处气象信息的方法，利用空间插值方法计算桥址处的气温和风速；利用幂指数模型计算太阳辐射强度。当桥址与最近气象站的距离大于20km时，利用梯度距离平方反比法计算桥址处气温；利用克里金法计算桥址处风速，最终取计算风速的平均值进行相关计算。当桥址与最近气象站的距离小于20km时，直接将最近气象站测得的气温作为桥址处气温预测值；将最近气象站测得的风速平均值作为桥址处风速预测值进行相关计算。

(3) 提出了一种基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法。利用气象大数据计算桥址处气象信息，基于热交换理论将桥址处气象参数转换为桥梁结构的换热边界条件，依托有限元分析软件对桥梁结构进行瞬态热分析，得到桥梁结构时变温度场。该方法适用于混凝土和钢结构桥梁，可实现轻量化和可持续性的大跨度桥梁结构温度场计算。

(4) 验证了所提基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法用于钢结构和混凝土桥梁的可行性。利用所提方法计算目标桥梁关键构件的温度场，并将温度场计算结果与桥梁上实测温度进行对比验证，两者在时间历程上吻合良好。本文以某大跨钢拱桁架桥和某大跨钢混组合式刚构-连续组合梁桥为研究对象，其各测点温度计算值的平均绝对误差分别在 $2.3^{\circ}\text{C}$ 和 $1.3^{\circ}\text{C}$ 以内。

(5) 验证了利用所提出的基于气象大数据的桥梁结构温度场计算方法计算桥梁温度效应的可行性。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。得到各支座的纵向位移计算值与实测值吻合良好，本文中某大跨钢拱桁架桥和某大跨钢混组合式刚构-连续组合梁桥纵向位移计算值

的平均绝对误差分别在13mm和6mm以内。

然而，受理论研究和现实原因的限制，本文在以下问题的研究上还有待进一步的改进和完善：

(1) 本文所提的桥址处气象参数预测方法对于桥址处气温预测结果有较高的精度，但对于桥址处风速和太阳辐射强度预测结果欠佳。因风速时变性较强，且易受局部温差、下垫面条件、地形地势和构筑物等影响；太阳辐射强度与大气质量、云层厚度、天气情况等因素相关，目前还未有能够准确计算任意时间目标地点处风速以及太阳辐射强度的方法。因此，未来需要进一步完善场地风速以及太阳辐射强度计算方法的研究，以提高本文所提结构温度场计算方法的准确性。

(2) 本文仅对桥梁结构关键构件的温度场进行了分析计算，未来可以考虑建立桥梁结构的整体精细化模型，实现整桥的温度分布计算，进而得到更准确的结构温度变形。未来或可基于天气预报信息实现桥梁结构温度效应的预测。

(3) 本文仅通过某大跨钢拱桁架桥和某大跨钢混组合式刚构-连续组合梁桥为例，验证了所提结构温度场计算方法的可行性，该方法在不同结构形式桥梁上的适用性还有待进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国交通运输部. 2021 年交通运输行业发展统计公报. [http://www.gov.cn/xinwen/2022-05/25/content\\_5692174.htm](http://www.gov.cn/xinwen/2022-05/25/content_5692174.htm), 2022-5-25
- [2] 湖图. 维也纳 Danube 桥腹板屈曲事故. <https://www.zhizhen.com/detail,1990-11-6>
- [3] 中国新闻网. 深圳立交桥严重错位事故原因查明与腐败无关. <https://news.sina.com.cn/c/265054.html>, 2001-5-30
- [4] Zhu S J, Levinson D, Liu H X, et al. The traffic and behavioral effects of the I-35W Mississippi River bridge collapse. *Transportation Research Part A*, 2010, 44(10): 771-784
- [5] Kromanis R, Kripakaran P, HARVEY B. Long-term structural health monitoring of the Cleddau bridge: evaluation of quasi-static temperature effects on bearing movements. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 12(10): 1342-1355
- [6] 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. *Journal of Bridge Engineering*, 2018, 23(7): 04018043
- [7] 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. *Shock and Vibration*, 2016, 2016(5): 4792786
- [8] 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. *振动与冲击*, 2009, 28(10): 99-105+228
- [9] Wong K, Chan W Y K, Man K L. Monitoring of wind load and response for cable-supported bridges in Hong Kong. *Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems*. International Society for Optics and Photonics, 2001, 4337: 292-303
- [10] 李惠, 欧进萍. 斜拉桥结构健康监测系统的设计与实现(I):系统设计. *土木工程学报*, 2006, 2006(04): 39-44
- [11] 李爱群, 缪长青, 李兆霞等. 润扬长江大桥结构健康监测系统研究. *东南大学学报(自然科学版)*, 2003, 2003(05): 544-548
- [12] Sun L M, Dan D H, Sun Z. Health monitoring system for Donghai Bridge in Shanghai. In: *Proceedings of the Asia-Pacific Workshop on Structural Health*

- Monitoring. Japan, 2006, 280-287
- [13] 刘志强, 李娜, 郭健等. 西埃门大桥结构监测系统的设计与实现(II): 系统实现. 中国工程科学, 2010, 12(07): 101-106
- [14] 澎湃新闻. 东莞回应“寒溪河大桥桥墩开裂”: 挡块倾斜开裂, 不影响安全. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1636589268243230172&wfr=spider&for=pc>, 2019-6-17
- [15] 工程建设联盟. 13 人死亡, 145 人受伤, 美国密西西比河大桥垮塌事故. [https://mp.weixin.qq.com/s?\\_\\_biz=MzI1NDczMTA4OQ==&mid=2247485405&idx=5&sn=5507de7d31667d9b7ed23f5d347e9753&chksm=e9c1f1e3deb678f5190548a6babe83f2085ab4114a4667a2d5078bb5df5a08e28621505e0fcc&scene=27](https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzI1NDczMTA4OQ==&mid=2247485405&idx=5&sn=5507de7d31667d9b7ed23f5d347e9753&chksm=e9c1f1e3deb678f5190548a6babe83f2085ab4114a4667a2d5078bb5df5a08e28621505e0fcc&scene=27), 2018-5-25
- [16] Sun Z, Zhang Y F. Failure mechanism of expansion joints in a suspension bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 2016, 21(10): 1-13
- [17] Zuk W. Thermal behaviour of composite bridges-insulated and uninsulated. *Highway Research Record*, 1965, 76(1): 231-253
- [18] Priestley M N. Design of concrete bridges for temperature gradients. *Journal Proceedings*, 1978, 75(7): 209-217
- [19] Elbadry M M, Ghali A. Temperature variations in concrete bridges. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(10): 2355-2374
- [20] Dilger W H, Ghali A, Chan M, et al. Temperature stresses in composite box girder bridges. *Journal of Structural Engineering*, 1983, 109(6): 1460-1478
- [21] 吴关良, 颜东煌, 袁明. 混凝土厚壁箱形墩温度场观测与数值模拟. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2007(03): 34-39+96
- [22] 张元海, 李乔. 斜支承箱梁的日照温度次内力研究. 土木工程学报, 2008, 2008(05): 46-51
- [23] Priestley M J N. Design of concrete bridges for temperature gradients. *Journal Proceedings*, 1978, 75(5): 209-217
- [24] 刘兴法. 混凝土桥梁的温度分布. 铁道工程学报, 1985, 1985(01): 107-111
- [25] Mirambell E, Aguado A. Temperature and stress distributions in concrete box girder bridges. *Journal of Structural Engineering*, 1990, 116(9): 2388-2409
- [26] 葛耀君, 翟东, 张国泉. 混凝土斜拉桥温度场的试验研究. 中国公路学报, 1996, 9(2): 76-83
- [27] 刘耀东, 陈祥宝. 采用人工神经网络求解箱梁温度场算法研究. 中国公路学报, 2000, 2000(01): 72-75
- [28] 叶见曙, 贾琳, 钱培舒. 混凝土箱梁温度分布观测与研究. 东南大学学报,

- 2002, 32(5): 788-793
- [29] Xu Y L, Chen B, Ng C L, et al. Monitoring temperature effect on a long suspension bridge. *Structural Control and Health Monitoring*, 2010, 17(6): 632-653
- [30] Ding Y L, Zhou G D, Li A Q, Wang GX. Thermal field characteristic analysis of steel box girder based on long-term measurement data. *International Journal of Steel Structures*, 2012, 12(2): 219-232
- [31] 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. *土木工程学报*, 2013, 46(05): 129-136
- [32] Wang G X, Ding Y L. Research on monitoring temperature difference from cross sections of steel truss arch girder of Dashengguan Yangtze Bridge. *International Journal of Steel Structures*, 2015, 15(3): 647-660
- [33] 王达, 张永健, 刘扬. 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. *中国公路学报*, 2015, 28(11): 29-36
- [34] 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. *中国公路学报*, 2017, 30(03): 56-64
- [35] 赵品, 叶见曙. 波形钢腹板箱梁桥面板横向温度效应分析. *哈尔滨工程大学学报*, 2019, 40(05): 974-978
- [36] Zhu Q X, Wang H, Xu Z D, et al. Mapping temperature contours for a long-span steel truss arch bridge based on field monitoring data. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2021, 11(3): 725-743
- [37] 周浩, 易岳林, 叶仲韬等. 大跨度结合梁斜拉桥温度场及温度效应分析. *桥梁建设*, 2020, 50(05): 50-55
- [38] 刘江, 刘永健, 马志元等. 钢-混凝土组合梁桥的温度梯度作用——作用模式与极值分析. *中国公路学报*, 2022, 35(09): 269-286
- [39] 梁建军, 刘来君, 张帅帅等. 寒冷地区钢—混组合弯桥的温度场及温度效应分析. *公路*, 2023, 68(02): 74-82
- [40] 魏光坪. 单室预应力混凝土箱梁温度场及温度应力研究. *西南交通大学学报*, 1989, 24(4): 90-97
- [41] 陈焕新, 刘蔚巍. 钢-混结合梁试件温度分布的研究. *中国铁道科学*, 2005, 2005(01): 43-48
- [42] 孙国晨, 关荣财, 姜英民等. 钢-混凝土叠合梁横截面日照温度分布研究. *工程力学*, 2006, 2006(11): 122-127+138
- [43] 顾斌, 陈志坚, 陈欣迪. 基于气象参数的混凝土箱梁日照温度场仿真分析. *东南大学学报(自然科学版)*, 2012, 42(05): 950-955

- [44] 苏靖海, 段树金. 钢-混凝土双面组合箱梁日照温度场研究. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2012, 25(02): 6-10+80
- [45] Xia Y, Chen B, Zhou X Q, et al. Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma Suspension Bridge temperature behavior. *Structural Control and Health Monitoring*, 2013, 20(4): 560 - 575
- [46] 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. 中国公路学报, 2016, 29(7): 53-61
- [47] Zhou L R, Liang C F, Chen L, et al. Numerical simulation method of thermal analysis for bridges without using field measurements. *Procedia Engineering*, 2017, 210: 240-245
- [48] Lu H, Hao J, Zhong J, et al. Analysis of sunshine temperature field of steel box girder based on monitoring data. *Advances in Civil Engineering*, 2020, 2020(3): 1-10
- [49] Lu Y, Li D, Wang K, et al. Study on solar radiation and the extreme thermal effect on concrete box girder bridges. *Applied Sciences*, 2021, 11(14): 6332
- [50] 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. *Journal of Bridge Engineering*, 2022, 27(3)
- [51] Fan J S, Li B L, Liu C, et al. An efficient model for simulation of temperature field of steel-concrete composite beam bridges. *Structures*, 2022, 43
- [52] National Centers for Environmental Information. Daily observational. <https://www.ncei.noaa.gov/maps/daily/>, 2023-5-9
- [53] 国家卫星气象中心. FY-3D MERSI 全球影像. [http://fy4.nsmc.org.cn/nsmc/cn/image/index.html?id=FY3D\\_MERSI\\_GLOBAL](http://fy4.nsmc.org.cn/nsmc/cn/image/index.html?id=FY3D_MERSI_GLOBAL), 2023-5-9
- [54] Ian A N, Ross W W. Spatial interpolation of climatic Normals: test of a new method in the Canadian boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 92(4): 211-225
- [55] 林忠辉, 莫兴国, 李宏轩等. 中国陆地区域气象要素的空间插值. 地理学报, 2002, 2002(01): 47-56
- [56] 刘宇, 陈泮勤, 张稳等. 一种地面气温的空间插值方法及其误差分析. 大气科学, 2006, 2006(01): 146-152
- [57] Hutchinson, Michael F, McKenney, et al. Development and testing of Canada-wide interpolated spatial models of daily minimum-maximum temperature and precipitation for 1961-2003. *Journal of Applied Meteorology*

- and Climatology, 2009, 48(4): 725-741
- [58] 蒋友严, 黄进. 基于 GIS 技术的甘肃省气温空间分布特征. 干旱气象, 2013, 31(01): 206-211
- [59] 贾洋, 崔鹏. 高山区多时间尺度 Anusplin 气温插值精度对比分析. 高原气象, 2018, 37(03): 757-766
- [60] 李框宇, 周梅, 陈玖英等. 一种适用于气温空间插值的改进梯度距离平方反比法. 中国科学院大学学报, 2019, 36(04): 491-497
- [61] 曹端广, 张子民, 王海等. 顾及风向和风速的气温空间插值方法. 地理与地理信息科学, 2021, 37(01): 47-52
- [62] Hou J W, Wang Y J, Hou B, et al. Spatial simulation and prediction of air temperature based on CNN-LSTM. Applied Artificial Intelligence, 2023, 37(1): 2166235
- [63] Ye W, Hong H P, Wang J F. Comparison of Spatial Interpolation Methods for Extreme Wind Speeds over Canada. Journal of Computing in Civil Engineering, 2014, 29(6): 1-11
- [64] 蔡彦枫, 张灿亨, 黄勇. 广东沿海地区极值风速空间插值方法的对比研究. 南方能源建设, 2015, 2(S1): 187-192
- [65] 杨城, 林广发, 李清远等. 顾及下垫面特征的海坛岛近地面风场模拟. 福建师范大学学报(自然科学版), 2015, 31(04): 31-37+62
- [66] Ozelkan E, Chen G, Ustundag, et al. Spatial estimation of wind speed: a new integrative model using inverse distance weighting and power law. International Journal of Digital Earth, 2016, 9(8): 733-747
- [67] 魏士俨, 杨燕明, 许德伟. 海面风场数据时空融合方法研究. 计算机仿真, 2017, 34(11): 25-28
- [68] 高珂, 汪尧, 贾彦. 基于 ArcGIS 的山地地形风速模拟研究. 内蒙古工业大学学报(自然科学版), 2020, 39(01): 23-28
- [69] 龙远, 邓小龙, 杨希祥等. 基于 PSO-BP 神经网络的平流层风场短期快速预测. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(10): 1970-1978
- [70] 苏世亮, 李霖, 翁敏. 空间数据分析. 北京: 科学出版社, 2019: 33-36
- [71] 金君, 彭思岭, 刘启亮等. 中国陆地区域气象要素空间插值方法比较研究. 工程勘察, 2010, 38(11): 48-51
- [72] Ashraf M, Loftis J C, Hubbard K G. Application of geostatistics to evaluate partial weather station networks. Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 84(3): 255-271
- [73] Bartier P M, C. Keller P. Multivariate interpolation to incorporate thematic

- surface data using inverse distance weighting (IDW). *Computers and Geosciences*, 1996, 22(7): 795-799
- [74] 侯景儒, 尹镇南, 李维明等. 实用地质统计学. 北京: 地质出版社, 1998, 8-9
- [75] American Society of Heating, Refrigerating, Air Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook of Fundamentals. Atlanta: Ashrae Handbook of Fundamentals, 1972, 22-23
- [76] Hottel H C. A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy*, 1976, 18(2): 129-134
- [77] Kehlbeck F. 太阳对桥梁辐射的影响. 刘兴法译. 北京: 中国铁道出版社, 1981, 189-193
- [78] Robert W, Koo K Y, James B. Effect of solar radiation on suspension bridge performance. *Journal of Bridge Engineering*, 2014, 20(5): 1-12
- [79] 刘永健, 刘江, 张宁. 桥梁结构日照温度作用研究综述. *土木工程学报*, 2019, 52(05): 59-78
- [80] 和清华, 谢云. 我国太阳总辐射气候学计算方法研究. *自然资源学报*, 2010, 25(02): 308-319
- [81] 姚万祥, 李峥嵘, 张志刚. 太阳辐射模型及其应用. 北京: 科学出版社, 2022, 78-79
- [82] 中央气象局. 高空气象观测手册. 北京: 中央气象局, 1976, 45-46
- [83] 中国气象局. 气象辐射观测方法. 北京: 气象出版社, 1996, 23-24
- [84] 傅立叶. 热的解析理论. 桂质亮译. 北京: 北京大学出版社, 2008, 112-113
- [85] 张兴中. 传热学. 北京: 国防工业出版社, 2011, 55-62
- [86] 蔺鹏臻, 刘世忠. 桥梁结构有限元分析. 北京: 科学出版社, 2008, 18-19
- [87] 凌桂龙. ANSYS 14.0 热力学分析从入门到精通. 北京: 清华大学出版社, 2013, 16-17
- [88] Branco F A, Mendes P A. Thermal actions for concrete bridge design. *Journal of Structural Engineering*, 1993, 119(8): 2313-2331
- [89] 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. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2015, 30(4)
- [90] 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. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 2015(Pt.4): 1-12

- [91] Huang Q, Crosetto M, Monserrat O, et al. Displacement monitoring and modelling of a high-speed railway bridge using C-band Sentinel-1 data. *Isprs Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2017, 128(JUN): 204-211
- [92] Xia C Y, Zhong T Y. Numerical analysis of the Nanjing Dashengguan Yangtze River Bridge subjected to non-uniform seismic excitations. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2011, 25(5): 1297-1306
- [93] 王俊如, 阵伟民, 刘纲等. 重庆石板坡长江大桥复线桥的受力分析及健康监测系统设计. *现代交通技术*, 2008, 2008(05): 37-40
- [94] 岳笛, 刘纲, 杨溥等. 重庆石板坡长江大桥复线桥温度效应分析. *重庆建筑大学学报*, 2007, 2007(05): 119-122+129
- [95] 解增银. 重庆石板坡长江大桥复线桥健康监测数据处理及安全评估应用研究: [重庆大学硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学土木工程学院, 2007, 9-10
- [96] 翟影. 重庆石板坡长江大桥复线桥健康监测系统方案研究: [重庆大学硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学土木工程学院, 2006, 10-11
- [97] 邓文中, 代彤. 重庆石板坡长江大桥复线桥总体设计. *桥梁建设*, 2006, 2006(06): 28-32
- [98] Piotr P, Piotr R, Michał S. Study of high-temperature properties of asphalt mixtures used for bridge pavement with concrete deck. *Materials*, 2021, 14(15)
- [99] He Z Q, Ma Z, Zhang S X, et al. Temperature gradients and stress distributions in concrete box-girder bridges during hot-mix asphalt paving. *Structures*, 2021(33): 1954-1966
- [100] 钱振东, 胡靖, 刘龔等. 浇注式沥青混凝土摊铺温度对钢箱梁力学响应及变形效应影响. *土木工程学报*, 2015, 48(02): 96-102

## 致 谢

时光如水，毕业将至。回首往昔求学道路，多有坎坷，幸得良师益友相助，乃至今日。满腔谢忱难于启齿，故借此别离之际提笔致辞表谢。

感谢恩师周云教授一路指引，授我以文，传我以道。周老师严谨求实亦风趣幽默，学识渊博，诲人不倦。本人愚钝，多有困惑停滞之时，幸得周老师谆谆教导，言传身教不止于学术，为人处世受益颇多。

感谢同门一路相伴，低落之时互相激励，快意之事互相分享，困难之际互相帮助，三年间有此佳缘实为本人之幸。麓山南路的日子难以忘怀，愿今后有缘再相聚。

感谢母校湖南大学，作为学生时期大半荣誉的前缀，给予本人继续前行的底气和信心。“惟楚有材，于斯为盛”，湖大海纳百川，本人七年间畅游其中，多有收获与成长。

感谢刘纲教授对本文提供的指导和支持，言辞有尽而谢意无穷，感谢父母恩，朋友义，同学情。

感谢各位专家评委于百忙中参与本文的评审和答辩，祝各位老师身体健康，诸事顺利。

感谢此程同行，预祝各位下一程风顺水。

郑佳缘

2023年5月12日于湖南大学

## 附录A （攻读学位期间所发表的学术论文）

- [1] 周云, 郑佳缘, 郝官旺等. 基于气象大数据的大跨桥梁温度效应预测方法. 湖南大学学报（自然科学版）