引文格式：庞正辉,庞正芳,张品超,等. 应用北斗的跨线斜拉桥实时变形监测系统实践[J]. 地理空间信息, 2025, 23(2): 98-102. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.02.022

应用北斗的跨线斜拉桥实时变形监测系统实践

庞正辉[1]，庞正芳[2]，张品超[3]，邓廷银[1]，吴小串[1]，李金涛[1]
（1. 中工武大设计集团有限公司，湖北 武汉 430070；2. 长江宜昌航道局，湖北 宜昌 443000；
3. 南昌市自然资源和规划局，江西 南昌 330038）

摘　要：桥梁作为重要的基础设施，承担着极其重要的运输和交通作用，对桥梁的健康状况进行实时、准确的监测可以及时发现和预防桥梁安全事故的发生，为桥梁的正常使用提供安全保障。而传统的桥梁变形监测方式往往需要耗费大量的人力、物力和财力，监测周期也往往较长，很难及时发现潜在的安全隐患。为更好地做好桥梁的运营、养护工作，顺应我国桥梁健康监测的发展趋势，通过实例介绍了一种基于高精度北斗卫星定位技术的跨铁路斜拉桥实时变形监测系统，实现了桥梁信息化的智慧管理养护。监测结果分析同时表明：应用北斗卫星定位技术的实时变形监测系统能够达到1~2 mm的解算精度，证实该系统可应用于大中型桥梁的高精度变形监测，具有较大的推广价值。

关键词：北斗；桥梁；健康监测；精度；变形
中图分类号：P228　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2025）02-0098-05

Practice of Real-time Deformation Monitoring System for Cable-stayed Bridge Based on Beidou

PANG Zhenghui[1], PANG Zhengfang[2], ZHANG Pinchao[3], DENG Tingyin[1], WU Xiaochuan[1], LI Jintao[1]
(1. Cewud Group Company Limited, Wuhan 430070, China;
2. Yichang Waterway Administration of Yangtze River, Yichang 443000, China;
3. Jiangxi College of Application Science and Technology, Nanchang 330038, China)

Abstract: As an important infrastructure, the bridge plays an important role in transportation and traffic. The real-time and accurate monitoring of health condition of bridge can detect and prevent the bridge safety accidents in time, for the normal use of bridges to provide security. The traditional bridge deformation monitoring methods often require a large amount of human, material and financial resources, and the monitoring cycle is often long, so it is difficult to detect potential security risks in a timely manner. In order to do a better job in the operation and maintenance of bridges and comply with the development trend of bridge health monitoring in our country, we introduced a real-time deformation monitoring system for cable-stayed bridge over railway based on high-precision Beidou satellite positioning technology. The monitoring results show that the real-time deformation monitoring system based on Beidou satellite positioning technology can achieve the calculation accuracy of 1~2 mm, which can prove that the system can be applied to the high-precision deformation monitoring of large and medium-sized bridges and have the big promotion value.

Key words: Beidou, bridge, health monitoring, accuracy, deformation

北斗卫星定位技术具有高精度、高可靠性和低成本等优点，可以实现对桥梁的实时监测和远程管理，提高桥梁的运营效率和安全性能。近年来，基于高精度北斗卫星定位技术的桥梁实时变形监测系统逐渐受到重视，成为桥梁变形监测的主要方法之一[1-4]。

本文将介绍一种基于高精度北斗卫星定位技术的跨铁路斜拉桥实时变形监测系统，该实践基于北斗的多卫星定位数据融合技术，自动化程度高，监测精度高且安全可靠，可全方位地实时掌握桥梁几何变形规律，科学评估桥梁的安全性、稳定性，完全满足桥梁健康监测的要求，为桥梁维修管理部门减灾防灾提供依据[5]。

1　监测系统概述

1.1　监测场地

本实践桥梁为武汉市黄埔大街至金桥大道快速通道工程跨京广铁路斜拉桥（以下简称金桥），主桥为独塔双索面，桥梁全长260 m，主跨138 m，塔高102 m，桥面最宽处51 m，为国内同类型跨铁路斜拉桥中桥面最宽、塔体最高、跨度最大，主梁采用双边箱梁截面，桥塔顺桥向为独柱式,横桥向为A字型。

第一作者简介：庞正辉（1980—），本科，正高级工程师，研究方向为卫星导航定位技术、大地测量和精密工程测量，E-mail：115821357@qq.com。

该桥梁位于一个复杂的地质环境中，塔柱承台处土质为杂填土、粘土及淤泥质粉质粘土，同时作为城市快速路武汉大道最重要的节点控制工程，其跨越京广铁路、合武铁路等11条铁路线，加上高耸的主塔、宽阔的桥面和极大的主跨，故存在着各类车辆震动、横纵向来风、季节温差等多种对桥梁稳定性产生影响的因素。

1.2　系统架构

系统主要由以下几个组成部分构成：基准站/监测站子系统，数据传输与存储、数据处理与分析子系统和应用服务子系统，其网络拓扑图如图1所示。

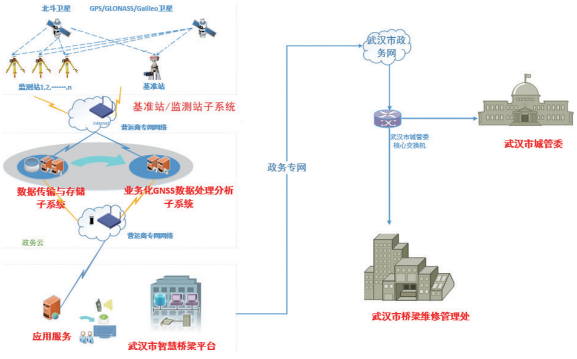


图1　监测系统网络拓扑图

1.3　系统功能及优势

系统提供以北斗系统为主、支持GPS、GLONASS等多系统的连续、稳定的高精度变形监测数据，支持对北斗（B1、B2、B3）、GPS（L1、L2）、GLONASS（L1、L2）三系统、七频点的联合解算能力，能够实现对桥梁变形数据实时监测，监测结果准确可靠，同时可根据桥梁变形数据的变化趋势和特点，对桥梁进行评估和判定，实时发现桥梁的变形和安全隐患，并及时向用户反馈桥梁的健康状况和安全状态，实现远程智能化管理和监测，提高桥梁运营效率和安全性能。

2　监测点位布置

金桥为独塔双索面预应力混凝土斜拉桥，根据相关桥梁检测规范，应测定桥塔顶的变形、主梁纵向线性、主要承重墩台的沉降、水平位移，亦即本项目的桥塔、主梁和抗拉墩是主要的几何监测对象。除了考虑桥梁本身结构外，还应考虑以下因素：①达到优于10 mm的实时精度需要监测站点更加密集；②桥面是一个平面，需要在适当的位置进行双边监测，以获得桥面三维倾斜状态、扭曲状态等；③桥梁含有大量金属器件，对电磁波信号的传播有较大的影响，为了降低多路径效应的影响，监测点上选用扼流圈天线。

基于以上要求确定了布点方案，监测点位分布示意图如图2所示。

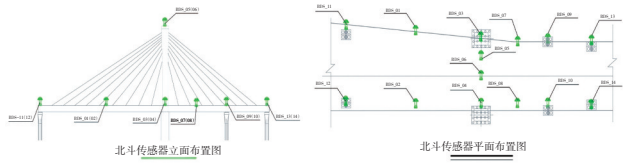


图2　监测点位分布示意图

表1　北斗变形监测系统主要监测内容表

监测类型	布设位置	合计
桥塔（墩台）三维位移变形监测	塔顶两侧及塔腰两侧各1个测点	4
主梁形变（挠度）监测	主跨跨中截面、次跨跨中两侧各布置1处测点	4
抗拉墩形变（水平/沉降速率）监测	抗拉墩以及桥头两侧各1个测点	6

由于已有网络RTK基准站距离桥梁均较远，采用网络RTK方式进行北斗实时定位及数据处理势必存在基线较长和气象差异等因素影响监测数据精度，故本项目在桥外1 km地质稳定处设置1个监测基准站，采用单基站RTK方式进行北斗实时定位及数据处理。

3　监测系统数据处理关键技术

本文结合各类型的桥梁监测特点开发了精密数据处理软件，通过接收基准站和监测站的包括北斗在内的多卫星导航系统24 h不间断观测数据，采用卡尔曼滤波的小波分析技术对测量结果中的高频信号进行了滤波处理，减少了测量噪声的影响，最终生成高精度变形监测数据[6–8]，用以揭示桥梁的长期变化规律；在精密数据处理中对关键的核心算法做了以下优化和改进。

3.1　敏感识别小周跳

当观测条件非常恶劣时，接收机信号跟踪性能会受到严重的影响，常常会出现小周跳。精细数据预处理算法能精确探测出1周的小周跳，探测完成率可达90%以上，并对探测出的周跳进行准确修复，进而减少模糊度参数，提高监测精度和稳定性。

3.2　改进传统基线解算算法提高精度

基线解算是变形监测系统最核心的部分，基线解算的精度直接决定了变形量探测的敏感程度。变形监测事后基线解算改用更加灵活的先单差后双差的处理算法，既能实现多种单差的灵活组合，又能简化卫星升降、参考星变换等一系列控制的复杂度，提高软件的容错能力，更能避免因参考星选取不当导致的部分模糊度无法固定的问题。

3.3　提升粗差识别能力

新增残差编辑后，可设定阈值发现剩余未探测出

来的小周跳，通过人工干预修复，有效解决少量小周跳问题，提高监测精度。

4 系统精度测试

4.1 测试方法

本文变形监测系统解算精度的评价，采用与已知基线比较的方法在国家光电检测中心综合检定场上进行，数据来源为GNSS接收机所采集的北斗和GPS双系统四频观测数据及联合解算结果。

采用检定场的2个监测墩模拟变形的基准站和监测站，在监测站上安装了平面导轨进行位移并采用千分尺测量（精确到1 mm），同时安置已知精准长度的连接环来模拟竖直形变量。

4.2 测试方案及结果

4.2.1 静态监测数据稳定性测试

连续观测基准站和监测站24 h后利用本软件进行超短基线数据处理，并进行北、东、高（ENU）3个方向的数据统计，主要验证监测解算结果的稳定性，检验数据的波动范围，多组数据的各方向解算结果不符值互差均不超过0.4 mm，证实24 h解算结果均满足稳定性指标要求。

4.2.2 监测数据对位移变化的敏感性测试

为了验证监测系统对变化的位置信息的响应情况，将监测站接收机天线在精密移动导轨平台上以人工位移的方式按预先设定的数值进行毫米量级的微小位置移动（即：时段1~6），并用本次测试的变形监测系统进行位移探测解算。其24 h解算时段长度的位置探测结果如表2所示，数据可证明监测系统位移探测精度平面和竖直方向均优于1 mm。

表2 人工位移调整与北斗/GPS实测结果/mm

时段	人工移动量	24 h解	不符值
1~2	+10.0（*Y*）	10.1	0.1（*Y*）
2~3	−10.0（*Y*）	−10.5	−0.5（*Y*）
	−30.0（*Z*）	−31.4	−0.4（*Z*）
3~4	+10.0（*Y*）	10.4	+0.4（*Y*）
4~5	−5.0（*Y*）	−4.9	0.1（*Y*）
5~6	+30.0（*Z*）	29.5	−0.5（*Z*）

5 监测结果分析

本文抽取大部分监测点数据，从桥塔、桥墩和主梁3个方面分析各个监测点在平面*OXY*和竖直*Z*方向的时间变化规律，然后根据各个监测点的监测结果分析桥梁整体在平面和竖直方向的空间变化规律。考虑到受力的相似性和空间近似对称性，本文将主梁两侧对称的监测点位进行同步分析，表明关于主梁对称的监测点之间的规律性非常强。

5.1 桥塔监测

BDS_03和BDS_04位于桥塔两侧塔腰处，与桥面基本平齐；而BDS_05和BDS_06位于桥塔塔顶两侧。

根据相关理论分析，桥塔受索拉力影响，分解力后为纵桥方向力与竖直方向力，导致桥塔在顺桥以及竖直方向位移变化比较大，同时主塔处塔墩梁固结，固结区的处理使在主塔传递巨大轴力荷载的作用下，塔梁墩固结区混凝土主梁、横梁及主塔的变形及相对位移较小，固结区有较好高的抗弯、抗剪刚度[9−10]；详细监测情况和分析如下。

5.1.1 塔梁墩固结区监测点（BDS_03、BDS_04）

位于塔腰处的独立监测点BDS_03、BDS_04在纵桥方向（*X*）和竖直变化（*Z*）一致性很高；横桥方向（*Y*）呈现相反方向变化趋势。3种方向中，竖直方向监测点位周期性变化绝对值均较小，分析为进入秋季后，温度降低主要影响了水平位移。

5.1.2 塔顶监测点（BDS_05、BDS_06）

如图3和图4，位于塔顶处的独立监测点BDS_05、BDS_06 3个方向，在整个监测时段内，以上监测点位均呈现高度一致的周期性的变化；在周期性变化绝对值上，3个方向先期呈上下波动趋势，后期呈放大趋势。

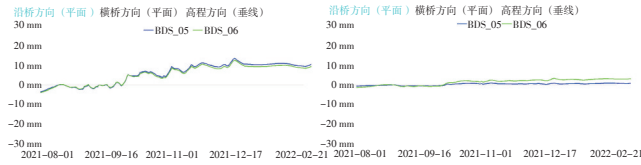


图3 BDS_05、BDS_06纵桥和横桥方向监测时间序列图

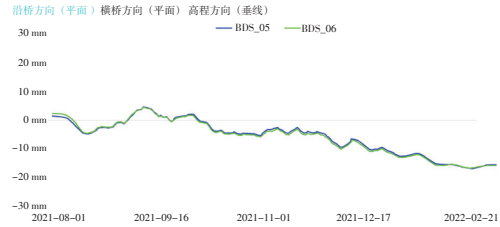


图4 BDS_05、BDS_06竖直方向监测时间序列图

5.1.3 监测对比分析

从以上监测结果可看出，位于桥塔塔腰处的监测点位其空间位置是动态变化的，特别是2021年10月初之后，纵桥方向变化已经达到公分级，竖直和横桥方向也存在较小量级的系统性波动。塔顶处的纵桥方向和竖直方向均出现了明显的小幅周期性波动，横桥方向变化趋势则小得多。

塔顶和固结区的位移相比较，从纵桥方向来说，

在日常荷载情况下，双侧索对塔顶的拉力在水平方向上可以较好地相互抵消，固结区较好的抗剪特性使其位移比塔顶更小；从横桥方向来说，塔本身受横桥方向力较小，塔顶横桥方向上的位移主要来源于塔梁墩固结体系固结区的形变带动其形变，因此塔顶在横桥方向上的位移较固结区的位移较小；从竖直方向来说（塔身在荷载的作用下出现了弹性变形），塔本身受到拉索向下的压力，扇形索更多的集中在塔的上部区域，而固结区较好的受压特性，在垂直方向的位移小于塔顶[9]。由于是塔梁墩固结体系，承受更多的温度应力，变形的主要部分也来源于温度的变化。整体来说，根据监测的特点，监测结果满足桥塔塔身和主梁受力变形的一般规律。

5.2　辅助墩监测

如图 5 所示，BDS_09 至 BDS_10 位于辅助墩上，与主梁固连。

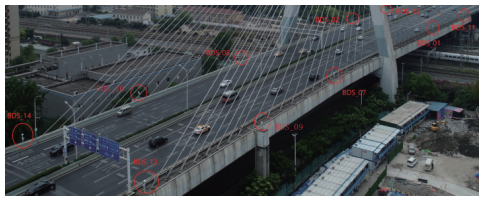


图 5　墩梁监测点位图

监测数据显示辅助墩和塔梁墩固结区监测点的水平方向变形趋势高度相似，这也和桥梁受季节性日照的温度变化有关。而辅助墩竖直方向，2 个监测点位在整个监测时段内趋势性变化不大，分析为辅助墩竖向设置活动盆式橡胶支座，极大程度上减小了上侧梁的在动载作用下的竖直位移[11]。

5.3　主梁跨中监测

如图 5 所示，BDS_01、BDS_02 和 BDS_07、BDS_08 分别位于主梁和副梁的跨中位置。从整个时间上的对比可知，主梁跨中点 BDS_01/02 在三维变形方向均存在较强的规律性以及较大的形变，而 BDS_07/08 的规律性和形变均较小，分析为主跨设计时为了考虑下方铁路的通行，左侧并未设置辅助墩而右侧设置了，跨长度的减小降低了跨中力的作用，故整体形变上左侧明显大于右侧[12-13]。

5.4　整桥三维时空综合分析

分析结果表明，变化规律随桥梁不同部位而存在较大的差异，但位于主梁两侧对称的监测点位变化趋势的相关性非常强。

首先对纵桥方向位移中心点所在垂线进行分析，如图 6 和图 7，BDS_03 和 BDS_09 在桥的同一横桥侧，纵桥方向分布于 BDS_07 的两侧，BDS_03 与 BDS_07 的距离较 BDS_09 相对近一些，在整个记录时间内，BDS_09 的位移变化程度也略大于 BDS_03，且通过图 11 可以看出 BDS_07 在整个监测时期内几乎未发生形变，即使温度降低后也只是少量的向 X 轴负向偏移，相较于塔顶（图 3）BDS05/06 的 X 轴正向的较大位移，BDS_07 左侧（X 轴负向）垂直于更符合纵桥方向位移的中心，如图 8 所示纵向红线。

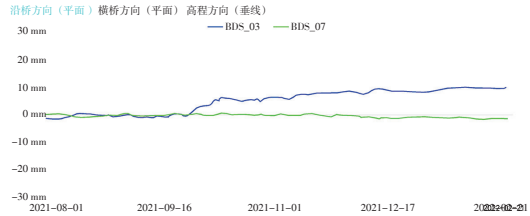


图 6　BDS03/09 纵桥方向位移

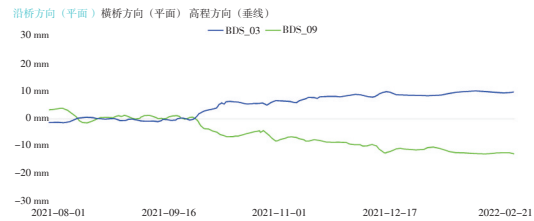


图 7　BDS03/07 纵桥方向位移

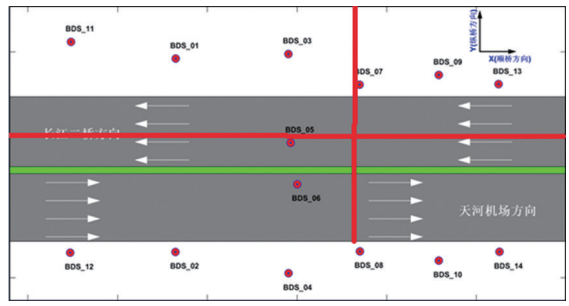


图 8　纵桥横桥位移中心线

对于横桥方向的中心点所在水平线，对比上述（图 3）BDS05_06 纵向均向同一方向位移，且 BDS_05 点的位移明显小于 BDS_06，同时对比 BDS_06 与 BDS07 的位移几乎为正负对称位移（图 9），所以，横桥方向位移的中心线大致位于 BDS_06 与 BDS_07 的纵桥方向对称轴上，这也满足靠近于 BDS_05，如图 8 所示横向红线。

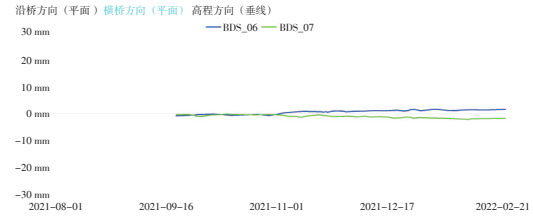


图 9　BDS06/07 横桥方向位移

整个桥面在平面上的变形中心即图 8 所示两条红线的交点。对于塔梁墩固结体系，位于城市内部的铁路上的桥，较小的受风的影响，亦无水流影响，其变

形的主要应力来源一般为温度以及车辆的动态荷载和桥本身的自重荷载，考虑到该桥自2013年即投入使用，在过去的年份中桥的自重带来的形变基本已经稳定，并且从整体来看，变形的主要趋势也并非是动态荷载的影响，动态荷载会导致一直向某一趋势移动，因此温度应力是导致大桥形变的主要原因[14-16]，整理每天的平均温度如图10所示。

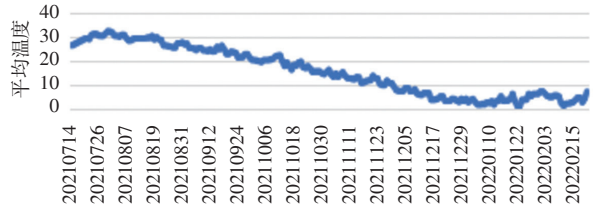


图10 监测时间内日平均温度

从整桥10个监测点位的三维时间和空间的变化特征，可发现以下规律：以2021年7月中的监测结果为参考，2021年8月初至9月底，由于温度的降低，平面上向外扩散的变形（热胀）开始收缩，至2021年9月底缩至与参考时间监测结果一致的形变，典型结果如图11所示；7月中的温度高于9月底，温度带来的形变并非恢复温度后即可变回原样，在这个阶段竖直上的形变大部分监测点的形变并不完全一致，各点所受压力情况不同并且对于力的消解不同，大部分点在9月底也恢复至参考时间的监测结果，从这种状态持续到10月初附近，如图12所示；10月初开始，所有监测点位在平面上出现了以上述中心点为中心向内收缩的趋势，这种趋势一直在发展，截至监测末期尚未达到最大，且变化的斜率在2021年10月初至10月中之间最大；竖直方向的变化也有一定的规律，随着温度的降低，并且变化弧度大部分很小，竖直方向变化最大是位于塔顶的BDS_05/06号点，监测末期达到了最大值；分析规律为温差比较大的时段导致桥体出现膨胀和收缩。

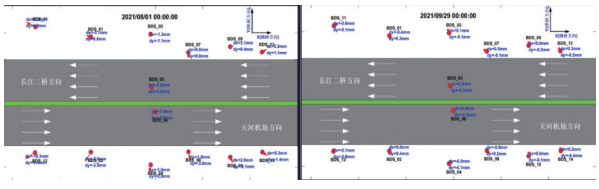


图11 2021.08.01与2021.09.29变化量



图12 2021.8.18累计三维变化量

6 结 语

本文基于北斗卫星导航定位技术开发了跨京广铁路斜拉桥几何结构实时变形监测系统，积累了历史观测数据，获得了桥梁结构的几何变形数据，科学评估了桥梁的安全性、稳定性；最终研究结果表明应用北斗卫星定位技术的实时变形监测系统能够达到1~2 mm的解算精度，证实该系统可应用于大中型桥梁的高精度变形监测，具有较大的推广价值。

参考文献

[1] 王里,孙伟,刘玲,等. 基于BIM和北斗的三维桥梁监测管理研究[J]. 地理空间信息,2018,16(7):5-7

[2] 王东,杨胜保. 桥梁变形监测技术方案探讨[J]. 地理空间信息,2016,14(6):72-74

[3] 刘志强,岳东杰,郑德华. 大跨径桥梁运营期GPS/BDS动态形变监测及分析[J]. 测绘通报,2018(10):107-112

[4] 余加勇,邵旭东,晏班夫,等. 基于全球导航卫星系统的桥梁健康监测方法研究进展[J]. 中国公路学报,2016,29(4):30-41

[5] 武汉市城市桥梁与隧道结构安全监测技术规程:DB 4201/T 624-2020[S].

[6] 熊春宝,王猛,于丽娜. 桥梁GNSS-RTK变形监测数据的多滤波联合去噪处理[J]. 测绘通报,2020(7):93-96,142

[7] 戴建彪,岳东杰,汤同旭,等. 桥梁索塔GPS监测信号的小波分析[J]. 测绘科学,2019, 44(9):151-157

[8] 吴杰,苗恒亚,左工,等. 大桥GPS动态监测去噪方法[J]. 测绘科学,2016,41(10):106-110

[9] 王敏. 刚构体系斜拉桥塔梁墩固结区受力特性研究[J]. 工程与建设,2017,31(6):730-731,736

[10] 龙俊贤. 黄浦大街:金桥大道快速通道工程跨京广铁路变宽度斜拉桥设计[J]. 铁道标准设计,2010(7):81-85

[11] 住房和城乡建设部. 建筑与桥梁结构监测技术规范:GB 50982-2014[S].

[12] 孙颖,卓卫东. 塔梁墩固结体系独塔混凝土斜拉桥地震反应分析[C]//第16届全国结构工程学术会议论文集(第Ⅲ册),2007:159-164

[13] 刘充. 斜拉桥塔梁固结处局部应力有限元分析[J]. 国防交通工程与技术,2022,20(1):22-25,73

[14] 刘永健,刘江,张宁. 桥梁结构日照温度作用研究综述[J]. 土木工程学报,2019, 52(5):59-78

[15] 祝伟. 大跨度连续刚构桥的环境影响因素分析[D]. 西安:西安理工大学,2016

[16] 孟庆领. 环境温度与车辆作用下预应力混凝土桥梁长期变形模拟与预测[D]. 天津:天津大学,2019