

## 温度作用对悬索桥成桥状态的影响分析

李修坤<sup>1</sup>, 沈伟<sup>2</sup>, 周伟<sup>2</sup>, 赖敏芝<sup>2</sup>

(1.湖北交通投资集团有限公司, 湖北 武汉 430074; 2.湖北交投智能检测股份有限公司, 湖北 武汉 430050)

**摘要:** 悬索桥刚度较小, 对荷载较敏感, 特别是温度荷载。文中以湖北棋盘洲长江公路大桥为背景, 分析温度作用对索塔偏位、主缆线形、主梁线形、梁端纵向位移、吊索索力的影响。结果表明, 温度作用对索塔偏位、主缆线形、主梁线形、梁端纵向位移的影响较大, 对吊索索力的影响较小。

**关键词:** 桥梁; 悬索桥; 温度作用; 成桥状态; 健康监测

**中图分类号:** U445.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1671-2668(2023)04-0103-03

悬索桥作为柔性缆索结构, 其几何非线性效应较大, 主缆伸长量的细微变化对主缆整体线形和内力有显著影响。国内外学者对温度作用对悬索桥的影响进行了一定研究, 如邓扬等以润扬大桥健康监测数据为基础, 分析了大跨度悬索桥梁端位移与温度的相关性, 采用六次多项式对梁端位移与温度进行统计建模, 并采用均值控制图法对梁端位移的异常变化进行了判别分类<sup>[1]</sup>; Xu Y. L. 等将数值分析和现场监测相结合, 分析了大跨度悬索桥的温度分布和相关响应<sup>[2]</sup>; Ding Y. L. 等提出一种改进的太阳辐射模型, 利用传热模型确定桥梁不同部位在不同时间的温度, 分析温度分布对悬索桥的影响<sup>[3]</sup>; Xia Y. 等通过数值分析和现场监测, 分析了大跨度悬索桥的温度分布和相关响应<sup>[4]</sup>; 陈策等以泰州长江公路大桥为例, 采用 ANSYS 软件建立有限元模型, 计算温度变化后杆件单元的内力及等效刚度, 并通过迭代方法分析环境温度变化对桥梁结构动力特性的影响, 考察温度变化与桥梁动力特性之间的相关性<sup>[5]</sup>; Xia Q. 等提出一种基于温度响应的结构损伤识别方法, 考虑温度荷载变化和温度诱导推导结构传递函数<sup>[6]</sup>, 同时基于某大跨度悬索桥健康监测数据分析温度对悬索桥应力、应变、挠度、频率等的影响, 并以此为基础判断大跨度悬索桥的健康状态<sup>[7]</sup>; 陈科旭认为悬索桥温度效应受环境温度影响最大, 最高温度每变化 30 °C, 悬索桥主塔塔顶顺桥向偏位变化量为塔高的 0.06%, 主梁跨中点挠度变化量为主跨跨度的 0.1149%<sup>[8]</sup>; 金耀等依托重庆万州驸马长江大桥建立有限元模型, 分析了大跨度悬索桥的温度效应<sup>[9]</sup>。本文以湖北棋盘洲长江公路大桥为背景, 分析温度作用对悬索桥索塔偏位、主缆线形、钢

箱梁线形、梁端纵向位移、吊索索力的影响, 为悬索桥成桥状态测量和后期健康分析提供基础资料。

## 1 工程概况

棋盘洲长江公路大桥位于黄石市和黄冈市境内, 桥跨布置为(340+1 038+305) m。主桥为双塔单跨钢箱梁悬索桥, 主跨 1 038 m, 锚碇之间距离为 1 683 m, 矢跨比为 1/9<sup>[10-12]</sup>。加劲梁采用流线型扁平钢箱梁, 梁高 3.0 m、宽 34.5 m。主缆采用预制平行钢丝索股(PPWS), 每根主缆中, 从黄石岸(南侧)锚碇到黄冈岸(北侧)锚碇的通长索股有 101 股, 北边跨另设 2 根索股(背索), 在北主索鞍上锚固。每根索股由 127 根  $\phi 5.30$  mm 高强度镀锌钢丝组成。全桥共 63 对吊索, 吊索顺桥向标准间距为 16 m。吊索分为两类, 分别为  $\phi^* 5.0$  mm、 $\phi^* 5.2$  mm 预制平行钢丝吊索, 外包双层 PE 防护。塔侧 2 根吊索采用  $\phi^* 5.2$  mm 平行钢丝(每根吊索由 127 根钢丝组成), 其余吊索采用  $\phi^* 5.0$  mm 平行钢丝(每根吊索由 115 根钢丝组成)。

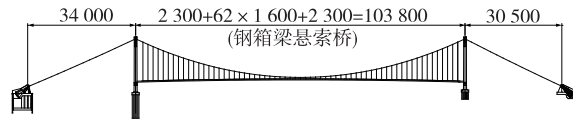


图 1 棋盘洲长江公路大桥主桥总体布置(单位: cm)

采用 MIDAS/Civil 空间杆系有限元软件进行仿真分析。其中: 索塔塔柱及横梁采用变截面 Timoshenko 梁单元模拟, 主梁采用 Timoshenko 梁单元模拟, 全桥共 284 个梁单元, 在吊杆、主梁节段分界及支承处设置节点; 主缆及吊索采用索单元模拟, 以吊杆和索套为分割主缆节点, 节点间的主缆采

用悬链线索单元模拟,全桥共322个索单元;散索鞍鞍座采用铰接杆单元模拟,地锚采用固定支撑;吊索与主缆通过共节点连接,模拟主缆与吊索之间的作用,主梁形心与吊索通过刚臂连接,模拟吊杆与主梁的锚固连接(见图2)。



图2 棋盘洲长江公路大桥主桥有限元模型

悬索桥的成桥状态测量项目有索塔偏位、主缆线形、主梁线形、梁端纵向位移、吊索索力。温度变化范围为 $[-20, 20]^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 温度变化对索塔偏位的影响

索塔塔顶纵向位移随温度的变化见图3。由图3可知:温度变化与索塔位移呈线性关系;温度升高,南北索塔均往江侧倾斜;温度每变化 $1^{\circ}\text{C}$ ,南索塔偏位3.67 mm,北索塔偏位3.33 mm;温度升高 $20^{\circ}\text{C}$ ,南索塔偏位达73 mm。温度对索塔偏位的影响很大,荷载试验或成桥状态测量应在晚上进行,以规避温度的影响;健康监测分析时,对索塔偏位数据必须剔除温度的影响。

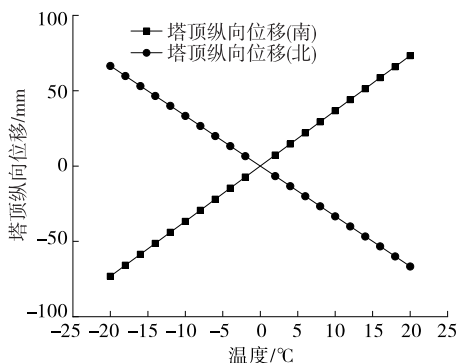


图3 索塔塔顶纵向位移随温度的变化

## 3 温度变化对主缆和主梁线形的影响

主梁跨中和主缆中跨跨中高程随温度的变化见图4。由图4可知:温度变化对主缆中跨跨中和主梁跨中高程的影响一致,均随温度呈线性变化,温度升高,主缆和主梁的高程降低;温度升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,高程下降约31.6 mm。温度对主梁和主缆线形的影响巨大,荷载试验应在晚上进行,成桥状态测量应在1:00—5:00时段进行,以规避温度的影响;健康监测分析

时,对主缆和主梁高程数据必须剔除温度的影响。

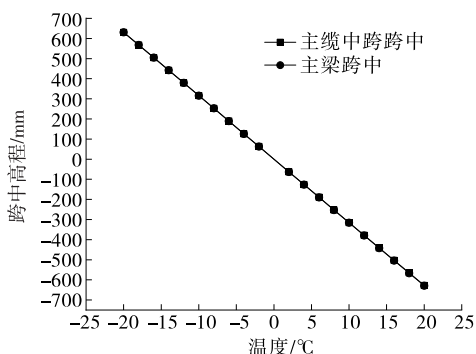


图4 主梁跨中和主缆中跨跨中高程随温度的变化

主缆边跨跨中位移随温度的变化见图5。由图5可知:温度变化对主缆边跨跨中竖向(Y向)位移的影响可以忽略;温度变化对主缆边跨跨中纵向(X向)位移略有影响,温度升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,南边跨跨中主缆纵向向江侧移动2.28 mm,北边跨跨中主缆纵向向江侧移动2.10 mm。

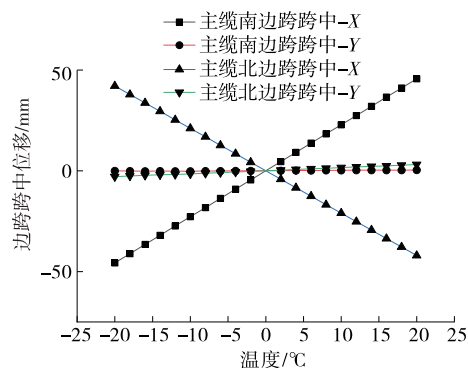


图5 主缆边跨跨中位移随温度的变化

主梁梁端纵向位移随温度的变化见图6。由图6可知:温度变化对梁端纵向位移有影响,温度升高 $1^{\circ}\text{C}$ ,主梁南端纵向位移6.47 mm,主梁北端纵向位移6.79 mm,方向均为岸侧。成桥状态评估测量应在晚上进行,且数据分析时应剔除温度的影响。

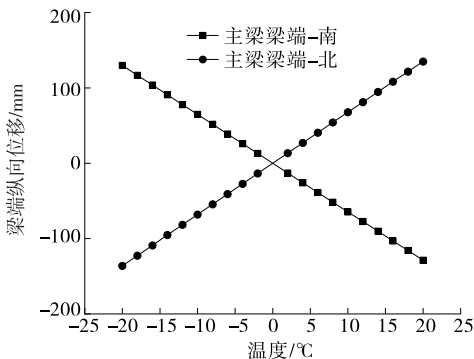


图6 主梁梁端纵向位移随温度的变化

4 温度变化对吊索索力的影响

基准温度和整体升温 20 ℃时吊索索力见表 1。由表 1 可知:温度变化对吊索索力几乎没有影响,仅

对 3 个端吊索有影响,升温 20 ℃时,端吊索索力最大下降 29.7 kN。如图 7 所示,端吊索索力随温度升高呈线性下降。荷载试验或成桥状态测量时可以不考虑温度对吊索索力的影响;健康监测分析时不

表 1 基准温度和整体升温 20 ℃时吊索索力 单位:kN

吊索 编号	吊索索力		索力变 化值	吊索 编号	吊索索力		索力变 化值	吊索 编号	吊索索力		索力变 化值
	基准温度	整体升温 20 ℃			基准温度	整体升温 20 ℃			基准温度	整体升温 20 ℃	
1	2 569.1	2 539.4	-29.7	12	1 921.5	1 921.7	0.2	23	1 914.6	1 914.5	-0.1
2	1 982.8	1 971.0	-11.8	13	1 920.8	1 920.9	0.1	24	1 914.3	1 914.2	-0.1
3	1 830.8	1 827.8	-3.0	14	1 919.6	1 919.7	0.1	25	1 914.1	1 914.0	-0.1
4	1 949.4	1 949.2	-0.2	15	1 919.4	1 919.5	0.1	26	1 913.7	1 913.6	-0.1
5	1 940.4	1 941.1	0.7	16	1 918.3	1 918.3	0.0	27	1 913.5	1 913.4	-0.1
6	1 923.8	1 924.7	0.9	17	1 917.7	1 917.7	0.0	28	1 913.5	1 913.4	-0.1
7	1 924.6	1 925.3	0.7	18	1 917.2	1 917.2	0.0	29	1 912.6	1 912.6	0.0
8	1 925.9	1 926.4	0.5	19	1 916.4	1 916.3	-0.1	30	1 913.9	1 913.8	-0.1
9	1 924.4	1 924.7	0.3	20	1 916.1	1 916.0	-0.1	31	1 911.4	1 911.2	-0.2
10	1 923.6	1 923.7	0.1	21	1 915.3	1 915.3	0.0	32	1 899.6	1 899.5	-0.1
11	1 922.3	1 922.4	0.1	22	1 914.9	1 914.8	-0.1				

注:索力变化值=整体升温 20 ℃时吊索索力-基准温度下吊索索力。

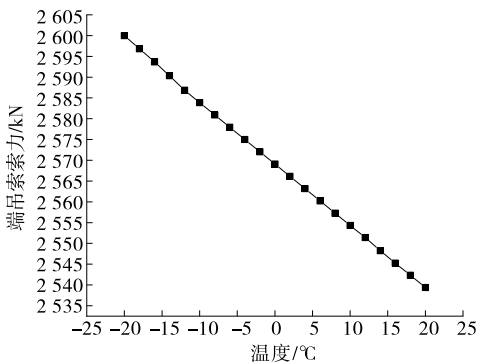


图 7 端吊索索力随温度的变化

必考虑温度的影响。

5 结论与建议

(1) 温度荷载对主缆高程、主梁高程、索塔偏位的影响非常大。荷载试验或成桥状态测量应在晚上进行,以规避温度的影响;健康监测分析时,对主缆和主梁高程、索塔偏位数据必须剔除温度的影响。

(2) 温度变化对梁端纵向位移有影响。成桥状态评估测量应在晚上进行,以规避温度的影响;健康监测分析时必须考虑温度的影响。

(3) 温度变化对吊索索力几乎没有影响。荷载试验或成桥状态测量时可以不考虑温度的影响;

健康监测分析时,对吊索索力数据不必考虑温度的影响。

参考文献:

[1] 邓扬,李爱群,丁幼亮.大跨悬索桥梁端位移与温度的相关性研究及其应用[J].公路交通科技,2009,26(5): 54—58.

[2] XU Y L,CHEN B,NG C L,et al.Monitoring temperature effect on a long suspension bridge[J].Structural Control and Health Monitoring,2010,17(6): 632—653.

[3] DING Y L,LI A Q.Temperature-induced variations of measured modal frequencies of steel box girder for a long-span suspension bridge[J].International Journal of Steel Structures,2011,11(2):145—155.

[4] XIA Y,CHEN B,ZHOU X Q,et al.Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma Suspension Bridge temperature behavior[J].Structural Control and Health Monitoring,2013,20(4):560—575.

[5] 陈策,史长华,缪长青.环境温度对三塔两跨悬索桥结构静动力特性的影响[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2014,38(4):744—748.

(下转第 110 页)

$5h_y + 2h_R = 750 + 5 \times 28 + 0 = 890 \text{ mm}$ ;  $a$  为载荷沿梁跨度方向的支撑长度,  $a = 750 \text{ mm}$ ;  $h_y$  为底板厚度;  $h_R$  为轨道高度;  $\sigma_{cr2}$ 、 $\tau_{cr2}$ 、 $\sigma_{c,cr2}$  为各种应力单独作用下的临界应力。

将各值代入式(1),得:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cr2}} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr2}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c,cr2}}\right)^2 = \frac{56.2}{295} + \left(\frac{9.9}{170}\right)^2 + \left(\frac{196.6}{295}\right)^2 = 0.65 < 1$$

计算结果表明,主梁下弦杆腹板局部稳定性满足要求。

#### 4 结论

(1) 选取合适工况对节点自适应步履式顶推工艺进行计算分析,找出最不利工况,得到临时墩最大支反力为 9 801 kN。

(2) 根据传力路径、板材材质、荷载扩展原则,选取腹板节点板作为反力作用板件,腹板下设置 750 mm × 300 mm 抄垫钢板扩展荷载。支反力偏距临界值为 1 m。应将这两项参数作为超危工况专项施工方案管理的关键参数并严格管控,保证顶推的顺利实施。

#### 参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(2):1-97.
- [2] 梁利文.单机 1 200 t 级超大吨位步履式顶推装置液压系统研究[J].装备制造技术,2016(6):76-79+83.
- [3] 姜松,吴芳,江湧,等.大吨位钢桁梁步履式顶推滑移施

工力学行为分析[J].桥梁建设,2021,51(1):66-73.

- [4] 黄群广.上跨繁忙干线钢桁梁拖拉式顶推和步履式顶推工艺比选[J].中国新技术新产品,2021(19):124-127.
- [5] 李兆峰,牛忠荣,方继,等.大型连续钢桁梁桥顶推施工中关键节点力学分析研究[J].铁道学报,2021,43(4):158-165.
- [6] 李兆峰,牛忠荣,丁仕洪,等.连续钢桁梁桥顶推施工过程整体式节点受力性能试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(2):182-190.
- [7] 卢丽娟.循环托举式步履机钢梁顶推施工质量控制[J].建材与装饰,2019(17):245-246.
- [8] 张奉春.柔性高墩大跨度钢桁梁顶推施工技术研究[J].公路,2021,66(3):148-152.
- [9] 潘强,吕牧.变宽变纵坡曲线钢梁超长距连续顶推施工关键技术[J].施工技术,2019,48(23):59-61.
- [10] 陈旭勇,汤杰,杨宏印,等.小循环步履式顶推钢桁梁施工关键技术与控制[J].施工技术,2018,47(15):139-142.
- [11] 武林.大跨度钢箱梁上跨铁路枢纽车站步履式顶推法施工技术[J].工程技术研究,2019,4(11):38-39.
- [12] 曲富强,王立峰,张振伟.顶推法架设桥梁施工控制技术分析与预测[J].山西建筑,2020,46(1):125-128.
- [13] 中华人民共和国住房和城乡建设部.建筑结构可靠性设计统一标准:GB 50068—2018[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB 50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2017.

收稿日期:2022-04-26

\*\*\*\*\*  
(上接第 105 页)

- [6] XIA Q, CHENG Y Y, ZHANG J A, et al. In-service condition assessment of a long-span suspension bridge using temperature-induced strain data[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(3): 04016124.
- [7] XIA Q, ZHANG J A, TIAN Y D, et al. Experimental study of thermal effects on a long-span suspension bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(7): 04017034.1-04017034.9.
- [8] 陈科旭.自然环境下大跨度悬索桥空间温度场和温度效应研究[D].天津:天津大学,2018.
- [9] 金耀,刘亮,韩飞杨,等.大跨度悬索桥温度效应监测与理论分析[J].公路,2020,65(4):111-118.
- [10] 周伟,夏雪莲,胡铁山,等.悬索桥索股架设参数敏感性分析[J].公路与汽运,2020(3):104-105+109.
- [11] 赖敏芝,周伟,罗明.悬索桥施工期间主索鞍顶推优化方案研究[J].中外公路,2021,41(3):122-125.
- [12] 周伟,李修坤,罗明.高温下大跨悬索桥锚跨张拉力的合理控制[J].公路与汽运,2021(5):100-102+110.

收稿日期:2022-05-05