

文章编号:1673-2049(2010)03-0053-06

# 西堠门大桥主缆横断面温度场研究

俞明德<sup>1</sup>, 沈锐利<sup>1</sup>, 唐茂林<sup>1</sup>, 郭 健<sup>2</sup>

(1. 西南交通大学 桥梁工程系, 四川 成都 610031; 2. 浙江省舟山连岛工程建设指挥部, 浙江 舟山 316000)

**摘要:**为研究悬索桥主缆横断面温度场,以西堠门大桥为背景,设计了截面足尺主缆模型并进行了长期的观测。结果表明:晴天主缆表面昼夜温差很大,白天时,受太阳辐射强度和太阳高度角变化的影响较大,各表面测点温度变化存在明显的相位差;主缆横断面温度场为非均匀场,除圆心附近外,同一径向上,内层温度变化滞后于外层温度,越靠近圆心,温度幅值变化越小。

**关键词:**悬索桥;主缆;横断面;温度场;相位差

中图分类号:U448.25

文献标志码:A

## Research on Temperature Field of Main Cable Section of Xihoumen Bridge

YU Ming-de<sup>1</sup>, SHEN Rui-li<sup>1</sup>, TANG Mao-lin<sup>1</sup>, GUO Jian<sup>2</sup>

(1. Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. Zhejiang Provincial Construction Headquarters of Zhoushan Islands Link

Project, Zhoushan 316000, Zhejiang, China)

**Abstract:** In order to investigate the temperature field of main cable section of suspension bridge, taking Xihoumen Bridge as background, a main cable model with actual dimension section was designed and was observed for a long time. Results indicate that in sunny day, temperature difference between day and night is big. In daytime, temperature is influenced by solar radiation strength and solar altitude angle, temperature variation of each measuring point on the surface exists obvious phase difference. Temperature field of main cable section is unsymmetrical. The lag of temperature variation of inner layer to outer layer increases but temperature amplitude variation decreases in radial direction to the center point.

**Key words:** suspension bridge; main cable; section; temperature field; phase difference

## 0 引言

西堠门大桥是浙江舟山大陆连岛工程中的第四座大桥,由北向南走向,北接册子岛,南端连接金塘岛,横跨西堠门水道。西堠门大桥主桥为两跨全漂浮体系分离式钢箱梁悬索桥,跨度 578 m+1 650 m+485 m,全长 2 713 m,跨度居世界第二,中国第一。

主缆采用预制平行钢丝索股,每根主缆中,从北

锚碇到南锚碇的通长索股有 169 根,北边跨另设 6 根索股(背索)在北主索鞍上锚固,南边跨另设 2 根索股(背索)在南主索鞍上锚固。单根索股由 127 根 5.25 mm 的钢丝组成,中跨索股的缆径在索夹内为 845 mm,索夹外为 855 mm。

现场架设时主缆几何形状的控制目标是:在某个设计基准温度下,空缆状态主缆跨中点坐标、塔顶坐标达到设计值。但由于施工过程中存在诸多不确定因

收稿日期:2010-06-12

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAG07B05)

作者简介:俞明德(1984-),男,浙江舟山人,工学硕士,E-mail:yumingde02@163.com。

素,挂缆后主缆跨中点坐标、塔顶坐标等换算成设计基准温度时的值很难满足设计要求,这就是主缆施工误差。对于每座悬索桥,主塔、主缆的施工误差限值都有详细的规定,当前施工规范限定悬索桥索股线形绝对标高误差范围主跨一般为 $\pm 20\text{ mm}$ ,边跨一般为 $\pm 30\text{ mm}$ ;两索股相对标高误差为 $\pm 20\text{ mm}$ <sup>[1]</sup>。文献[2]中指出,对于1根长1 000 m、矢跨比为1/10的索股,其温度变化 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,对垂度的影响达 $30\text{ mm}$ ;文献[3]中指出,大岛大桥主缆施工时,主缆温度对中跨垂度的影响为 $-20\text{ mm}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。西堍门大桥的主跨达到了1 650 m,由此可知其主缆的温度效应势必更大。因此相对于主缆垂度的施工误差限值而言,温度效应将对主缆的几何形状产生重大影响。

计算主缆线形时,温度荷载通常采用主缆横断面的平均温度。主缆平均温度的计算一般直接采用主缆表面测点温度的平均值,但由于缺乏主缆横断面温度分布状况的支持,其合理性缺乏保障。为获得准确的主缆温度分布状况,必须首先研究主缆的热物性参数。事实上,对于由上万高强钢丝和分布其间的空隙所组成的主缆结构,可将主缆描述为纵向连续的导热材料,而横向可看做是松散的多空隙结构,因此,可主要研究其横截面上的热物性参数。由于主缆钢丝间空隙的影响,其横截面上的热扩散系数远远小于构成主缆的钢丝的热扩散系数。对于这个热扩散系数,一般都是通过试验的手段获得。文献[4]、[5]中介绍了日本学者完成的主缆温度测定试验,由试验结果可知:主缆的热扩散系数( $8.30\sim 15.99\text{ cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$ )远远比构成主缆的钢丝热扩散系数( $197\text{ cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$ )<sup>[6]</sup>要小;主缆表面温度变化的相位落后外界气温 $1\sim 2\text{ h}$ ,主缆轴线处的温度相位相对于外界气温落后 $12\text{ h}$ ,且轴线处温度波动较小,这种影响随直径的增大而增大。文献[7]中指出:当主缆直径较小时主缆平均温度的计算可直接采用主缆表面测点温度的平均值;当主缆直径大于 $600\text{ mm}$ 时,必须计算整个主缆横断面的温度,取整个横断面的平均值。以上试验测点较少,难以全面描述主缆横断面的温度分布<sup>[8-9]</sup>。

主缆暴露在环境中,在太阳辐射强度、太阳高度角、大气温度和风速等变化因素的作用下,其横断面温度场具有高度的非线性和不均匀性,这种非线性和不均匀性必然会对主缆的线形变化产生影响。主缆横断面在不均匀温度场的作用下会产生随时间变化的扭转,而这种扭转必然对结构产生影响,如索夹

在安装过程中的定位精度,因此,有必要研究主缆横断面不均匀温度场对主缆线形的影响。

为获得实际主缆截面的真实温度场,以西堍门大桥为背景,设计一截面足尺的主缆节段模型,在自然环境中,按与施工相同的过程进行模型安装,测试施工过程中和成缆后主缆的横截面温度分布情况,以确定主缆截面在自然环境中的实际温度场。主缆防护主要涉及悬索桥运营阶段,而在主缆架设、索夹安装及加劲梁吊装等重要阶段主缆均未防护。本文中主要介绍主缆温度场试验方案的设计、试验过程以及对主缆防护前横断面温度分布的初步测试结果。

## 1 试验概况

主缆横断面温度场试验选址在距离实桥不远的工地,其主缆朝向尽量与实桥平行。试验模拟的断面索股数为169根,与中跨索股数相同,采用与西堍门大桥相同的索股制成,在相同自然环境和相同截面下研究截面的温度场,以保证测试结果反映实桥的真实状况。

### 1.1 试件设计

试件的主体是主缆节段,由支架支承在基础之上,如图1所示,主缆节段长为 $4\text{ m}$ ,两索夹间的距离为 $1.9\text{ m}$ ,主缆中心线距底面为 $1.91\text{ m}$ 。试验用索股采用与西堍门大桥相同规格的索股制成,在制缆厂加工成 $4\text{ m}$ 长的索股后运至现场。试验主缆支架和索夹采用钢板加工而成,所采用索夹为上下闭合的形式,下索夹置于 $1\text{ m}$ 高的支架上,与支架焊接成整体。施工时,主缆索股按实桥的施工顺序逐层架设,索股架设完毕、紧缆后再盖上上索夹,形成成缆后的主缆温度场测试模型。



图1 主缆温度场试验模型

Fig. 1 Test Model of Temperature Field of Main Cable

### 1.2 温度场测试方案

#### 1.2.1 测点布置

为了能够较为全面地反映主缆横断面的温度分

布,在主缆节段上选取 4 个测试断面。断面 2 位于试验模型的中间,为观测主缆横断面温度分布的主要测试断面。另外,为了解热量在主缆节段内沿纵向的传递情况,设置断面 1、3、4 为纵向温度监测断面。其中断面 1 和断面 3 对称,位于索夹内侧,其观测结果可互为参考,也可同时作为断面 2 的参考断面;断面 4 位于索夹外侧,接近端部,可作为断面 2 和断面 3 的参考断面。

在断面 2 上,温度测点近似按  $30^\circ$  方向布置,共 12 条接线,由于主缆上部受阳光照射等因素的影响较多,昼夜温度变化较下部大,因此,对主缆横断面上部测点进行适当加密,测点布置见图 2(a),点划线表示主缆的折回,数字表示该主线的序号,整个断面共布设 80 个测点。

在断面 1、3、4 上,温度测点按近似  $45^\circ$  方向布置,如图 2(b)所示,每个断面有测点 42 个,3 个断面共计测点 126 个。

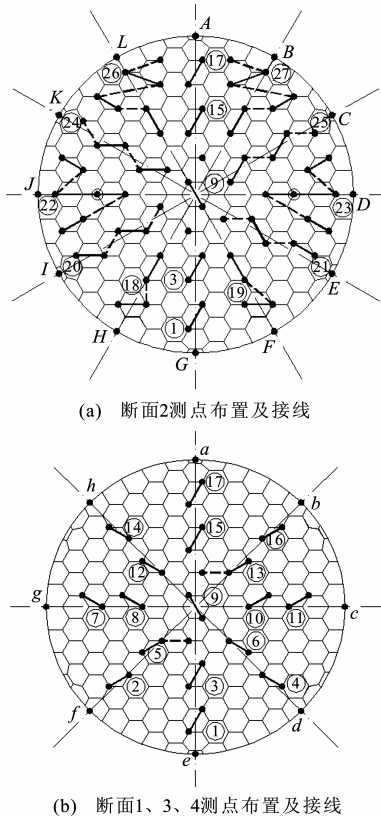


图 2 测点布置及接线

Fig. 2 Arrangements and Connections of Measuring Points

1.2.2 测试系统

温度场的测试系统由温度传感器、数据采集模块和计算机 3 个部分组成。各断面传感器通过延长线并联接入主线,由主线连接到各采集模块,最后将各采集模块的信号线接入计算机即可定时数据采

集,自动化程度高。传感器布线原则:为避免紧缆后挤断缆线,传感器延长线和主线应沿索股方向布置,主线穿到端部再折回,同一方向上的所有传感器并联到该主线上。各断面测点接线见图 2,实际布线过程中还需要对与主线并联的传感器进行编号,使传感器地址与编号对应,方便以后的数据处理。

### 1.3 模型的安装

主缆索股共有 29 层,为模拟施工,索股安装应分层进行,安装完 1 层索股后应根据测点布置安放有温度传感器的电缆,然后再安装下 1 层索股。索股安装完毕后应将主缆两端用 3 cm 厚泡沫塑料覆盖,以减少主缆纵向的热量传递,使试验接近实桥主缆,见图 3。主缆索股安装完成后,进行紧缆,将试验主缆节段挤压成与实桥空隙率相当的近似圆截面。



图 3 保温层的安装

Fig. 3 Installation of Insulation Layer

### 1.4 截面温度场的测试

试验数据采集采用自编软件,设定采集时间间隔为 30 min。紧缆后的测试从 2009 年 8 月 18 日开始,连续进行了将近 5 个月的测试,获得了夏天、秋天和冬天的测试数据。

## 2 试验结果分析

为检验日照、气温等天气变化对主缆横断面温度分布的影响,选取 2009 年 8 月 18 日 10:00 至 19 日 10:00 共 24 h 的温度测试结果进行分析研究,测试当天天气晴朗、气温较高,分析的时间间隔取为 1 h。

### 2.1 横断面表面及中心温度的变化

为便于分析和掌握横截面温度场的情况,将试验主缆的测点进行编号,图 4 为各测点编号。由于主缆模型水平放置,根据日照情况,可将主缆表面测点分为 4 个部分进行分析。测点 A、B、L 基本为水平布置,晴朗的天气下,一天中受到阳光照射最长,故主缆表面温度最高点应产生于此;测点 C、D、E

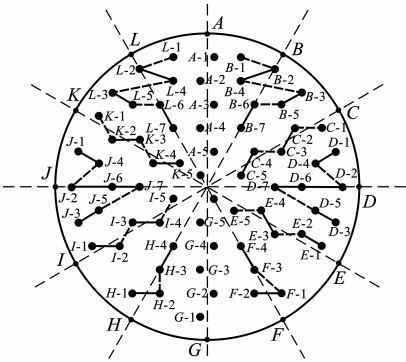


图 4 断面 2 的测点编号

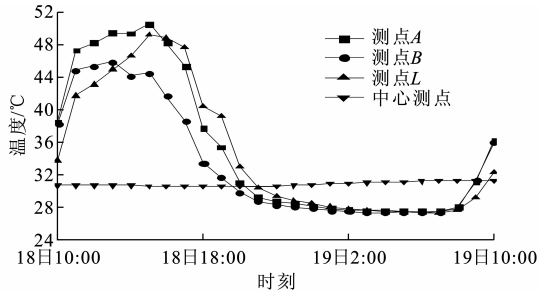
Fig. 4 Numbers of Measuring Points of the 2nd Section

水平朝向东面,一天中最先受到阳光照射,因此最快达到一天中的最高温度;测点 F、G、H 布置于主缆底部,一天中很少或基本没有阳光照射,主要受气温变化的影响,又因为其离地面较近,夜晚时会吸收地面散发的热量,因此其温度波动较其他测点小;测点 I、J、K 水平朝向西面,一天中最晚受到阳光照射,因此其达到最高温度的时间较晚。

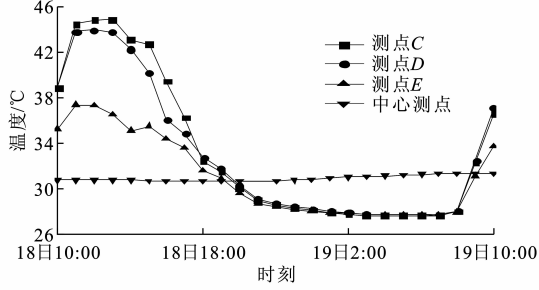
测试断面 2 表面及中心测点的温度变化曲线见图 5。由图 5 可知,2009 年 8 月 18 日 15:00 时主缆表面最高温度出现在主缆顶部的 A 点,其温度为 50.563 ℃,此时相应的最低温度出现于向阴面的 E 点,其温度为 35.500 ℃,两者相差 15.063 ℃。24 h 内 A 点最低温度为 27.563 ℃,最大温差达到了 23.000 ℃。而中心位置处的温度变化落后于主缆表面温度的变化,在 2009 年 8 月 19 日 10:00 时达到最大值,其最大值为 31.438 ℃,落后主缆表面最高温度 19 h,并且由于主缆直径较大,主缆中心处温度变化很小,其幅值仅为 0.75 ℃。

2.2 横断面各系列测点径向温度随时间的变化

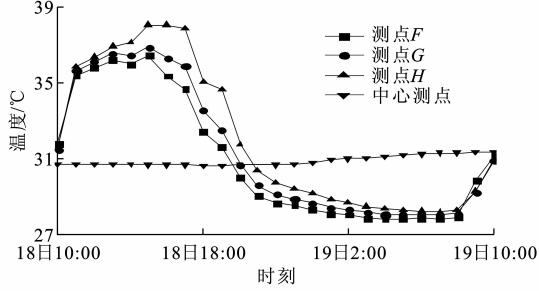
测试断面 2 温度传感器近似按 30°方向布置,共 12 个系列,为研究主缆热量的传递规律,选取 4 个具有代表性的系列进行研究。图 6 分别给出了 A-O、D-O、G-O 和 J-O 系列上各测点的温度随时间变化曲线。由图 6 可知,这些系列测点的共同特点是:越靠近圆心其温度变化越缓,即温度变化的相对值越小,并且远离主缆表面的温度变化落后于靠近主缆表面的温度变化,即每层温度变化存在着一个相位差,如 A-O 系列,表面测点 A 于 2009 年 8 月 18 日 14:30 时达到一天中的最大值,而测点 A-1 于 2009 年 8 月 18 日 17:30 时达到一天中的最大值,测点 A-1 落后于 A 测点 3 h,以此类推。但在近主缆中心的区域内,由于受到各方向热传递的影响,这种变化有所不同。



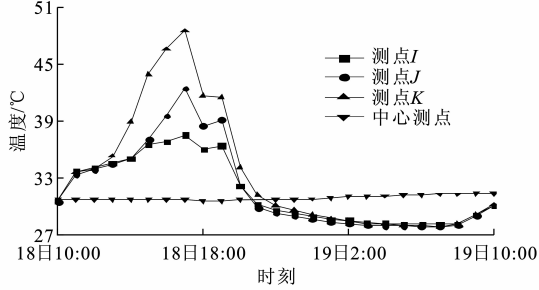
(a) 测点 A、B、L



(b) 测点 C、D、E



(c) 测点 F、G、H



(d) 测点 I、J、K

图 5 断面 2 表面及中心测点的温度变化曲线

Fig. 5 Temperature Variation Curves of the 2nd Section's Surface and Central Measuring Points

2.3 典型时刻横断面的温度场

图 7 为几个典型时刻主缆横断面等温线。由图 7(a)可知,10:00 时主缆中心温度达到了最大值(31.438 ℃),主缆断面上只有 1~2 条范围很小的闭合等温线,表明主缆横截面温度场的非线性特征最为明显。此时,由于向阳面受阳光照射,温度上升很快,因此温度梯度很大。

11:00~12:00 时[图 7(b)、(c)]主缆表面测点 E(37.375 ℃)和测点 D(43.938 ℃)分别达到了最大值,主缆断面出现了范围很大的闭合等温线,由于

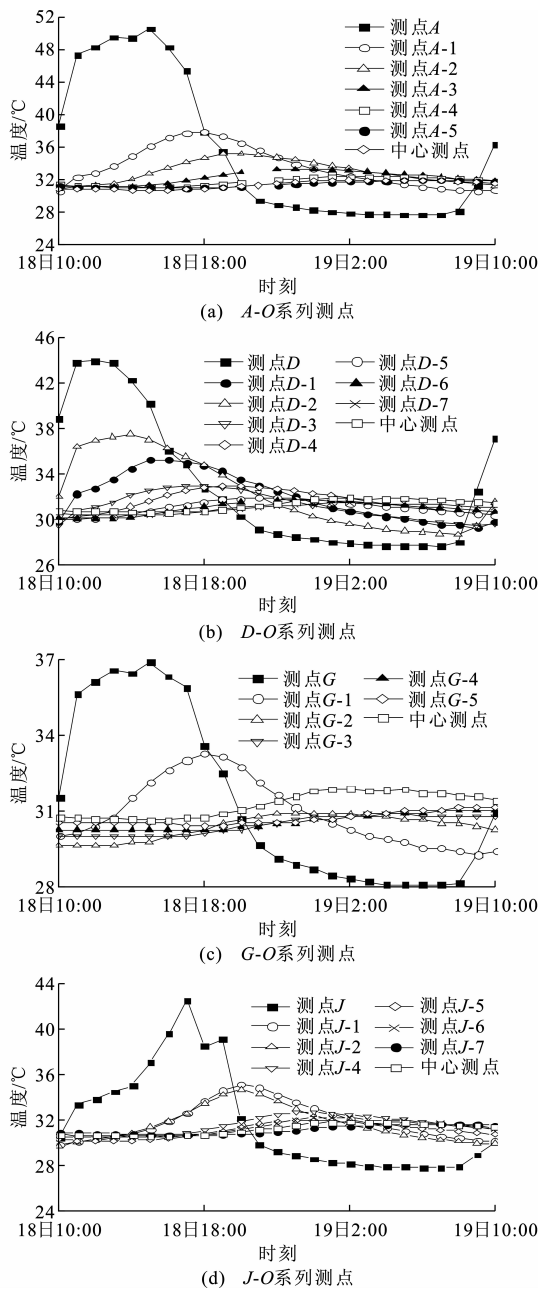


图 6 各系列测点的温度变化曲线

Fig. 6 Temperature Variation Curves of Different Series of Measuring Points

太阳高度角的增大,主缆顶部的温度上升很快,温度梯度最大的区域也逐渐上移。此时主缆最低温度开始下移。

13:00 时[图 7(d)]太阳高度角到达最大,主缆表面测点 B(45.938℃)、C(44.875℃)分别达到了最大值。此时温度梯度最大处转到主缆顶部。

15:00 时[图 7(e)]太阳西偏,由于受到日照作用,西面温度梯度大于东面温度梯度,温度梯度最大的区域移到了西面偏上。测点 A、F、G、H、L 都达到了最大值,其值分别为 50.563℃、49.188℃、

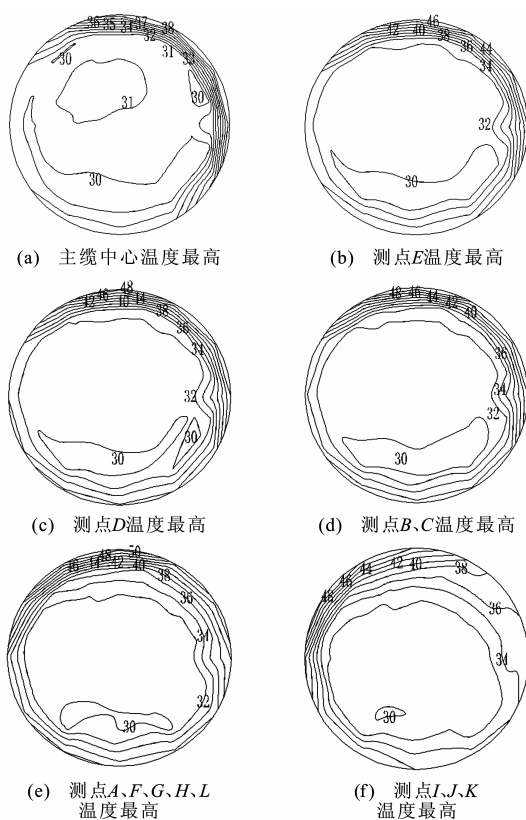


图 7 测点温度最高时的断面等温线(单位:℃)

Fig. 7 Sectional Isothermals when Temperatures of Measuring Points Are Maximal (Unit:℃)

36.438℃、36.875℃、38.063℃。另外,G、H、L 为主缆底部测点,由于基本上受不到日照,其温度随大气温度变化,气温一般在 14:00 时达到最大,主缆表面温度存在滞后,所以在 15:00 时达到最大值。

17:00 时[图 7(f)]太阳即将下山,此时日照基本水平,温度梯度最大的区域也处于西面水平的位置,西面测点 I、J、K 的温度达到最大值,其值分别为 37.563℃、42.438℃、48.500℃。由于日照的结束,随着气温的下降,主缆表面温度开始下降。

由图 8 可知,主缆表面温度在第 2 天 7:00 时达到最小值,最小值出现在主缆顶部向西的测点 L,温度为 27.375℃。此时主缆断面温度场分布虽较为均匀,但由于晚上地面的热辐射作用,使底部的温度下降较顶部小,出现了顶部温度梯度大于底部温度梯度的现象。由于主缆直径大,使温度由表面向中心传递严重滞后,主缆中心温度最小值出现在 18:00 时,为 30.625℃,落后于主缆表面温度达 11 h。

### 3 结 语

(1)试验所采用的试件设计是合适的,温度测试方案是合理的,整个试验工作是成功的。该试验采

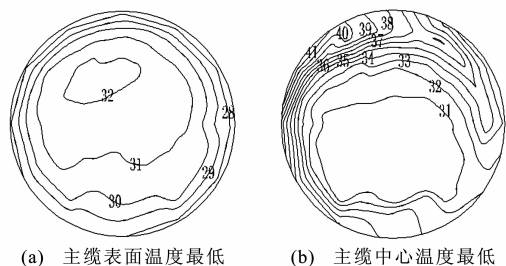


图 8 测点温度最低时的断面等温线(单位:℃)  
Fig. 8 Sectional Isothermals when Temperatures of Measuring Points Are Minimal (Unit:℃)

用断面足尺主缆节段模型,置于实桥环境中,其温度场与实桥有极大的相似性;试验中测点布置充足而且合理,能较准确反映主缆横断面温度分布;试验采用的测试系统自动化程度高,数据采集连续,能反映较长一段时间内主缆断面温度连续变化的规律。

(2)晴天时,由表面温度变化规律看,受太阳辐射强度和太阳高度角变化的影响,各测点温度变化存在相位差,一天中主缆东面测点温度最先达到最大值,其次是顶部和西面;一天中主缆表面最高温度出现在顶部,其最大温差为 23.000℃,但由于主缆直径较大,主缆中心处温度变化很小,其幅值仅为 0.75℃。

(3)主缆横断面温度场为非均匀场。同一径向上,越靠近圆心其温度幅值变化越小,且各层温度变化存在相位差,在近主缆中心的区域内,由于受到各方向热传递的影响,这种变化有所不同。

#### 参考文献:

#### References:

[1] 叶志龙. 悬索桥主缆架设误差影响分析及参数控制[D]. 成都:西南交通大学,2008.  
YE Zhi-long. The Effect Analysis of Errors and Parameters Control for Main Cable Erection of Suspension Bridge[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.

[2] KAWATA T. Modern Suspension Bridge[M]. Tokyo: Rikoh Tosho,1987.

[3] 黄铁生. 大岛大桥主缆施工[J]. 国外桥梁,1993(3): 175-180.  
HUANG Tie-sheng. Main Cable Construction of Oshima Bridge[J]. Foreign Bridges,1993(3):175-180.

[4] HASEGAWA T, OSHIO Y, HARADA Y. Main Cable Temperature Testing Experiment of Suspension Bridge[J]. Bridge and Foundation Engineering,1975,9(10): 42-47.

[5] HASEGAWA T, HARADA C. Presumption Methods on Main Cable Temperature of Suspension Bridge[J]. Yokogawa Technical Journal,1974(4):53-60.

[6] 章熙民,任泽濡,梅飞鸣. 传热学[M]. 5 版. 北京:中国工业出版社,2007.  
ZHANG Xi-min, REN Ze-ru, MEI Fei-ming. Heat Transfer[M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press,2007.

[7] 潘永仁,范立础. 悬索桥施工中主缆横截面平均温度实用算法[J]. 同济大学学报:自然科学版,1998,26(2):114-119.  
PAN Yong-ren, FAN Li-chu. Practical Method for Calculating the Mean Temperature of the Main Cable Section in the Construction Control of Suspension Bridges[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1998,26(2):114-119.

[8] 李枝军,韩晓林,李爱群,等. 悬索桥桥塔挂缆前后动态特性分析与测试[J]. 中国公路学报,2007,20(5):54-58.  
LI Zhi-jun, HAN Xiao-lin, LI Ai-qun, et al. Dynamic Analysis and Test of Bridge Tower of Suspension Bridge Before and After Cable Installed[J]. China Journal of Highway and Transport,2007,20(5):54-58.

[9] 刘来君,吴士义. 悬索桥张拉锚跨索股施工控制技术[J]. 长安大学学报:自然科学版,2008,28(6):36-40.  
LIU Lai-jun, WU Shi-yi. Construction Control Technique for Suspension Bridge Built by Drawing Anchorage Cable[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition,2008,28(6):36-40.