

### 泵站进水流道施工期钢模板变形监测研究

包腾飞, 张兰兰, 胡雨菡, 王一兵, 李润鸣

#### Deformation monitoring of steel templates for suction boxes of pumping stations during construction

BAO Tengfei, ZHANG Lanlan, HU Yuhua, WANG Yibing, LI Jianming

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20220330001>

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### Articles you may be interested in

##### 基于传感光纤技术的堤坝分布式变形监测

Fibre-optical distributed monitor on the deformation of embankment

水利水电工程学报. 2021(5): 137 <https://doi.org/10.12170/20200828001>

##### 基于分布式光纤监测技术的板桩码头试验研究

Experimental study of sheet pile wharf based on distributed optical fiber monitoring technology

水利水电工程学报. 2021(4): 85 <https://doi.org/10.12170/20201106002>

##### 施工期台风浪作用下沉箱碰撞破坏分析

Pounding damage analysis of caissons during construction under action of storm wave

水利水电工程学报. 2018(4): 112 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.016>

##### 基于改进节点虚流量法的渠道工程施工期渗流场分析

Analysis of seepage field based on improved node virtual flow method in a large-scale canal project during construction period

水利水电工程学报. 2017(6): 22 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.004>

##### 特高拱坝运行初期变形监测预报模型及构建方法

Deformation forecasting model and its modeling method of super high arch dams during initial operation periods

水利水电工程学报. 2020(5): 63 <https://doi.org/10.12170/20190908001>

##### 基于施工循环的绞吸挖泥船疏浚作业平稳度分析

Smoothness analysis of dredging operation of cutter suction dredger based on construction cycles

水利水电工程学报. 2018(6): 98 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.06.013>



扫码进入官网，阅读更多精彩内容

关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI:10.12170/20220330001

包腾飞, 张兰兰, 胡雨菡, 等. 泵站进水流道施工期钢模板变形监测研究[J]. 水利水运工程学报, 2023(4): 114-121. (BAO Tengfei, ZHANG Lanlan, HU Yuhuan, et al. Deformation monitoring of steel templates for suction boxes of pumping stations during construction[J]. Hydro-Science and Engineering, 2023(4): 114-121. (in Chinese))

# 泵站进水流道施工期钢模板变形监测研究

包腾飞<sup>1,2</sup>, 张兰兰<sup>3</sup>, 胡雨菡<sup>1</sup>, 王一兵<sup>1</sup>, 李润鸣<sup>1</sup>

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098;  
3. 绍兴市水利水电勘测设计院有限公司, 浙江 绍兴 312099)

**摘要:** 在泵站施工过程中, 加强对进水流道钢模板的变形监测对保障泵站安全施工具有重要意义。针对传统变形监测方法难以适用于复杂异型曲面和易受环境因素制约等不足, 基于预泵浦布里渊光时域分析技术对泵站流道施工期钢模板进行变形监测, 提出一种温度补偿方法以解决布里渊频移对温度和应变交叉敏感的问题, 采用改进共轭梁法将温度补偿后的应变监测值转换为结构变形。将该方法成功应用于某排水泵站工程流道钢模板变形监测。监测结果表明, 钢模板顶部和两侧均监测到拉应变, 拉应变随混凝土浇筑逐渐增加, 并在浇筑完成一段时间后趋于稳定。该监测方法对异形结构变形监测的研究和应用具有借鉴意义。

**关键词:** 变形监测; 分布式光纤; 预泵浦布里渊光时域分析; 温度补偿; 泵站

**中图分类号:** TV67

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2023)04-0114-08

泵站进水流道是一种复杂的异型结构, 其浇筑是施工难点。通常采用钢模板进行流道施工, 以克服传统木模板和组合式钢模板常出现的漏浆、麻面、裂缝等缺陷, 避免流道混凝土脱落, 且曲面加工难度小, 接缝少, 更有利于确保流道结构精度。在流道施工过程中, 保证钢模板的平整度和准确性对水泵的安全运行至关重要<sup>[1]</sup>。若钢模板不平整或变形过大, 容易在流道表面形成涡带, 导致阻力增加, 进而改变水泵的能量和汽蚀特性, 影响其运行效率, 并伴生振动和噪声等问题。因此, 在施工过程中加强对泵站流道钢模板的变形监测意义重大。

现有的钢模板变形监测方法<sup>[2]</sup>主要包括全站仪法和多向应变片法。全站仪法通过观测若干控制点的位移值以计算钢模板变形, 虽操作简单, 但易受环境因素的制约, 如钢模板附近搭设满堂支架的情况, 由于视线遮挡难以进行监测, 且在阴雨天和夜间施工时基本无法观测。多向应变片法在一些关键部位布置多向应变片, 通过监测 3 个方向的应变值以计算钢模板变形。多向应变片仅能布置在相对平直的位置, 对弧度较大的曲面, 其测量精度不甚理想。为了进一步提升监测水平, 保证施工质量, 需研究一种受环境条件影响少并适用于泵站流道钢模板这种复杂异型曲面的变形监测方法。

分布式光纤传感技术以其耐久性好、灵敏度高、抗电磁干扰、便于分布式测量和远程长期监测等优势<sup>[3-5]</sup>受到土木和水利工程界的广泛关注<sup>[6-8]</sup>。作为一种新型的分布式光纤传感技术, 预泵浦布里渊光时域分析技术(pulse-prepump Brillouin optical time domain analysis, PPP-BOTDA)利用受激布里渊散射效应, 通过加入预泵浦脉冲光提高了测量的空间分辨率和精度, 越来越多地应用在结构裂缝和位移监测等方面。Chai 等<sup>[9]</sup>基于 PPP-BOTDA 通过模型试验研究了地下煤矿覆盖层变形与布里渊频移的关系; Su 等<sup>[10]</sup>研究

收稿日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51739003); 浙江省水利厅科技计划项目(RA2103)

作者简介: 包腾飞(1974—), 男, 湖北黄冈人, 教授, 博士, 主要从事水工结构安全监控理论研究。E-mail: baotf@hhu.edu.cn

了 PPP-BOTDA 混凝土应变监测的原理和实现方法, 并以此为基础试验研究了裂缝的发生和扩展过程; Zhao 等<sup>[11]</sup>应用 PPP-BOTDA 监测滑坡地表变形, 利用巴特沃斯滤波器去噪并采用应变面积差表征应变差异程度, 监测结果与 GPS 和野外实测位移规律一致且具有更高的精度; Ye 等<sup>[12]</sup>考虑光纤涂覆层的弹塑性提出了一种基于 PPP-BOTDA 的钢结构裂缝张开位移监测方法, 并通过试验加以验证。

本文基于 PPP-BOTDA 分布式光纤传感技术和改进共轭梁法对某排水泵站施工期流道模板的变形进行监测, 并提出了相应的温度补偿方法。首先在混凝土浇筑过程中对相应部位的应变进行监测, 然后基于应变数据, 进行温度补偿以消除温度影响, 最后采用改进的共轭梁法计算流道钢结构的变形。与传统监测技术相比, PPP-BOTDA 技术可实现流道钢模板选定断面变形的全范围监测, 且不受环境因素干扰, 对指导后续施工和减少经济损失意义重大。

## 1 基于 PPP-BOTDA 的结构变形监测原理

### 1.1 PPP-BOTDA 工作原理

光在光纤中传播时会发生瑞利散射、布里渊散射和拉曼散射。其中, 布里渊散射由光波与声波作用产生。当光纤的应变和温度等物理量发生变化时, 背向布里渊散射光中心频率会发生改变。通过时域或频域技术测定背向布里渊散射光的频移即可实现应变和温度的分布式监测<sup>[13-14]</sup>。布里渊散射分为自发和受激两种, 基于布里渊散射的分布式光纤传感时域技术相应地分为布里渊光时域反射 (Brillouin optical time domain reflectometer, BOTDR) 和布里渊光时域分析 (Brillouin optical time domain analysis, BOTDA) 等。由于自发布里渊背向散射光相对较弱, BOTDR 难以准确捕捉到布里渊频移。而 BOTDA 利用布里渊受激放大特性探测增益谱, 并将其作为沿光纤的距离函数, 相比 BOTDR 其空间分辨率和精度都得到了进一步提升。BOTDA 系统在光纤的两端分别注入连续探测光和泵浦脉冲光, 当两种光的频差和光纤某部位布里渊偏移量相等时, 会产生布里渊受激放大效应, 从而相互作用产生更大光强度<sup>[15]</sup>。PPP-BOTDA 则是在 BOTDA 输入泵浦光之前加入预泵浦脉冲光以激发声子, 从而实现更高的分辨率和精度<sup>[16]</sup>。预泵浦脉冲通常采用如下阶跃函数<sup>[16]</sup>描述:

$$A_p(t) = \begin{cases} C_p, & 0 \leq t < D_p - D \\ A_p + C_p, & D_p - D \leq t \leq D_p \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $C_p$  为泵浦脉冲的功率;  $D_p$  为预泵浦脉冲的持时;  $D$  为泵浦脉冲的持时;  $A_p + C_p$  为预泵浦脉冲的功率。

如图 1 所示, 当应变和温度发生变化时, 布里渊频移变化量为:

$$v_B(\varepsilon, T) = v_B(0) + C_\varepsilon \varepsilon + C_T \Delta T \quad (2)$$

式中:  $v_B(\varepsilon, T)$  为在应变  $\varepsilon$  和温度  $T$  时的布里渊频移值;  $v_B(0)$  为在无应变、温度为参考温度  $T_0$  时的布里渊频移值;  $C_\varepsilon = dv_B(\varepsilon)/d\varepsilon$  和  $C_T = dv_B(T)/dT$  分别表示应变和温度影响系数;  $\Delta T$  为温度变化量。

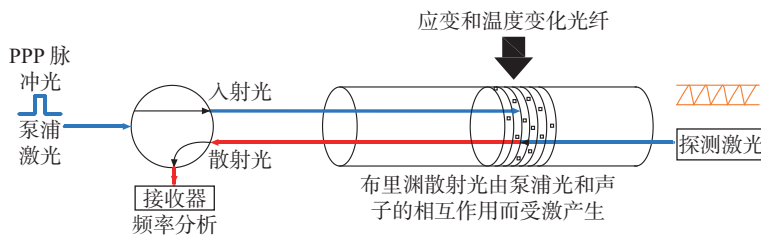


图 1 PPP-BOTDA 系统技术原理示意

Fig. 1 Schematic diagram of the technical principle of PPP-BOTDA systems

## 1.2 温度补偿方法

在使用感测光纤对泵站流道钢模板应变进行监测时,由于光纤中的布里渊散射光同时受温度和应变的影响,实测应变同时包含由钢结构形变和温度变化引起的应变。为得到钢模板在外荷载作用下的应变,应将温度应变剔除,即进行温度补偿。温度补偿通过在流道钢模板上布置应变传感光纤并平行布置温度传感光纤实现。采用复合织物将应变传感光纤和温度传感光纤附着成一体,组成复合基感测光纤。其中,温度传感光纤具有特制的松套包层结构,只能测量由温度引起的应变。将应变传感光纤测值减去温度传感光纤测值,即可得到流道钢模板由外荷载引起的应变。

由 PPP-BOTDA 原理可知,对于应变传感光纤有:

$$\varepsilon_1 = (\nu_B(\varepsilon, T) - \nu_B(0)) / C_{\varepsilon_1} \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_1$  为应变传感光纤的测量应变;  $C_{\varepsilon_1}$  为应变传感光纤的应变影响系数。

对于温度传感光纤有:

$$\varepsilon_2 = (\nu_B(\varepsilon, T) - \nu_B(0)) / C_{\varepsilon_2} \quad (4)$$

$$\Delta T = (\nu_B(0, T) - \nu_B(0)) / C_{T_2} \quad (5)$$

式中:  $\varepsilon_2$  为温度传感光纤中由温度变化引起的应变;  $C_{\varepsilon_2}$  为温度传感光纤的应变影响系数;  $C_{T_2}$  为温度传感光纤的温度影响系数。

将式(3)~(5)代入式(2),可得剔除温度影响后的应变为:

$$\varepsilon = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 C_{T_1} C_{\varepsilon_2} / (C_{\varepsilon_1} C_{T_2}) \quad (6)$$

式中:  $C_{T_1}$  为应变传感光纤的温度影响系数。式(6)中的  $\varepsilon$  在应变传感光纤实测应变曲线的基础上减去温度传感光纤实测应变曲线的  $C_{T_1} C_{\varepsilon_2} / (C_{\varepsilon_1} C_{T_2})$ , 可得到消除温度影响的应变。其中,应变和温度影响系数为光纤基本参数,一般由厂家测试确定。

## 1.3 基于改进共轭梁法的结构变形监测

通过 PPP-BOTDA 技术可以直接监测结构应变的空间分布,需通过进一步转换得到结构变形,通常通过挠度计算实现。现有方法包括应变二次积分法、欧拉-贝努利梁理论、共轭梁法等。本文采用改进共轭梁法。该方法可以克服应变二次积分法的误差累积、欧拉-贝努利梁理论不合理刚度假定和传统共轭梁法通用性不足等问题<sup>[17]</sup>,具有更高的计算精度。根据共轭梁法原理,梁的曲率分布与共轭梁的荷载分布等价,于是梁的曲率可由应变表示为:

$$k(x) = M(x) / (EI(x)) = \varepsilon(x) / y = q'(x) \quad (7)$$

式中:  $k(x)$  为实际梁曲率;  $M(x)$  为实际梁弯矩;  $E$  为弹性模量;  $I(x)$  为截面惯性矩;  $\varepsilon(x)$  为实际梁应变;  $y$  为光纤监测点和中性轴之间的距离;  $q'(x)$  为共轭梁的等效荷载分布。

若梁长度为  $L$ , 截面抗弯刚度为  $EI$ , 沿长度方向均匀划分  $n$  个单元,那么各单元长度为  $l = L/n$ , 如图 2 所示。将式(7)单元化得第  $i$  个单元的平均曲率为:

$$\bar{k}_i = \bar{M}_i / (EI_i) = \bar{\varepsilon}_i / y_i = q'_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

则共轭梁的第  $j$  和  $j+1$  单元分界点的变形  $v_j$ <sup>[18]</sup> 为:

$$v_j = M'_j = -\frac{L^2}{n^2} \left[ \frac{j}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\bar{\varepsilon}_i}{y_i} \left( n - i + \frac{1}{2} \right) - \sum_{i=1}^j \frac{\bar{\varepsilon}_i}{y_i} \left( j - i + \frac{1}{2} \right) \right] \quad (9)$$

同理可得第  $j+1$  单元中点处变形  $v_{j+1/2}$ :

$$v_{j+\frac{1}{2}}=-\frac{L^2}{n^2}\left[\frac{1}{n}\left(j+\frac{1}{2}\right)\sum_{i=1}^n\frac{\overline{\varepsilon}_i}{y_i}\left(n-i+\frac{1}{2}\right)-\sum_{i=1}^j\frac{\overline{\varepsilon}_i}{y_i}\left(j-i+\frac{1}{2}\right)\right]$$

(10)

对于连续梁,可按照支座位置拆分为若干段,每一段视为简支梁,分别由式(9)和(10)计算梁的变形。

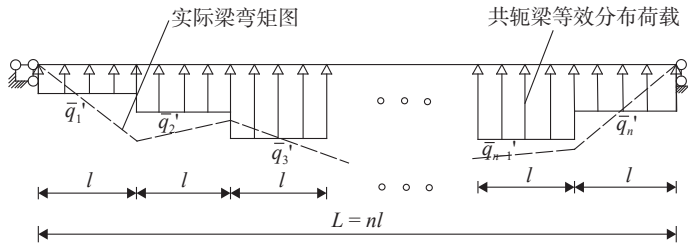


图 2 简支梁与其共轭梁示意

Fig. 2 Schematic diagram of simply supported beams and conjugate beams

2 泵站工程概况及现场测试

某排水泵站工程位于京杭运河二通道一线船闸东侧,为 I 等工程,设计排水流量为 200 m³/s。泵站均位于钱塘江北岸 1 级海堤上,系堤身式泵站。排水泵站(包括前池、出水池两侧岸墙)及其下游翼墙、与钱塘江海塘的连接堤等主要建筑物为 1 级建筑物;上游翼墙、引河、边坡等次要建筑物为 3 级建筑物。排水泵站工程主要建筑物包括上游引河、排水泵站和出水渠等,上游引河中心线长 1 256.12 m。泵站建筑物主要包括进水池、泵房及出水池,顺水流方向长度分别为 70.0、55.0 和 50.0 m,水泵采用 4 台斜 15°卧式轴流泵。下游排水箱涵前接出水池,后接挡潮排水闸,中心线长 170.90 m。泵站流道内模均采用钢模板,在流道混凝土浇筑后不拆模,主要起混凝土定形及保护作用,但流道钢模板不承担施工期荷载,采取满堂支架的支撑措施保证施工期钢模板不产生过大变形。

采用基于 PPP-BOTDA 的光纤传感器对该泵站进水流道的钢模板结构进行监测。采用碳纤维布织物条带编织的方式将应变传感光纤和温度传感光纤附着成一体,其应变光纤和温度光纤的基本参数如表 1 所示。PPP-BOTDA 测试设备为 NBX-6050A 光纳仪,其最大测量长度为 25 km,应变测量范围和精度分别为 -3%~4% 和±7.5×10<sup>-6</sup>。

表 1 应变光纤及温度光纤基本参数  
Tab. 1 Basic parameters of optical fibers for strain and temperature

| 光纤类型 | 参考温度/℃ | 频移初始值/GHz | 应变系数/(MHz·10 <sup>6</sup> ) | 温度系数/(MHz·℃ <sup>-1</sup> ) |        |       |
|------|--------|-----------|-----------------------------|-----------------------------|--------|-------|
|      |        |           |                             | 25~35℃                      | 35~45℃ | 45℃以上 |
| 应变光纤 | 25     | 10.826    | 0.049 98                    | 1.10                        | 1.10   | 1.10  |
| 温度光纤 | 25     | 10.863    | 0.050 00                    | 2.39                        | 1.60   | 1.10  |

在进水流道最大断面钢模板上布设复合传感光纤,该断面为矩形,尺寸为 9.6 m×5.6 m(宽×高),如图 3 所示。具体布设方法如下:首先在流道结构上绘制预定铺设线路,并进行清扫除尘。将复合传感光纤平铺在结构表面,并用夹具以定点的方式将复合光纤分段固定在表面。在固定时,应对复合光纤进行预拉,避免复合光纤松弛弯曲影响后期测试效果。然后用粘贴剂沿铺设线路将固定的复合光纤全面粘贴覆盖,再用电吹风机热化胶体,使复合光纤与表面充分粘结。为方便复合光纤接续,采用专用保护夹具在出线处将

纤芯引出。施工完毕后熔接引出的光纤,使用跳线将复合传感光纤接入仪器后进行测量。

采集数据前,连接光纤跳线后进行熔接,并加热连接点以加固效果。将采集接头接入光纳仪,系统启动正常后设置相关参数进行数据采集。采集过程中空间分辨率和采样间隔分别设为 0.1 和 0.05 m。记录重要的监控时间点,每隔 20 min 采集 1 次应变数据,并记录采集时间和环境温度。

3 监测结果分析

3.1 应变监测结果分析

流道混凝土在 2020 年 7 月 28 日 07:15 开始施工,选取浇筑前(07:00)、两侧完成浇筑(20:20)、完成浇筑(次日 02:30)、完成浇筑后的 6、16 和 28 h 几个典型监测时间点的应变监测结果进行分析,实测应变曲线见图 4,其中以拉应变为正,压应变为负。采用本文提出的温度补偿方法得到消除温度影响的应变曲线,如图 5 所示。比较图 4 和图 5 可以看出,顶部模板和两侧模板转角处光纤不贴合于钢衬,此部位由温度引起的应变值在温度补偿后为 0。这说明本文提出的温度补偿是有效的。由图 5 可以看出,施工过程中钢模板两侧和顶部均产生了拉应变,顶部的拉应变小于两侧的,且拉应变随混凝土浇筑呈不断增加的趋势,在浇筑完成 16 h 后趋于稳定。

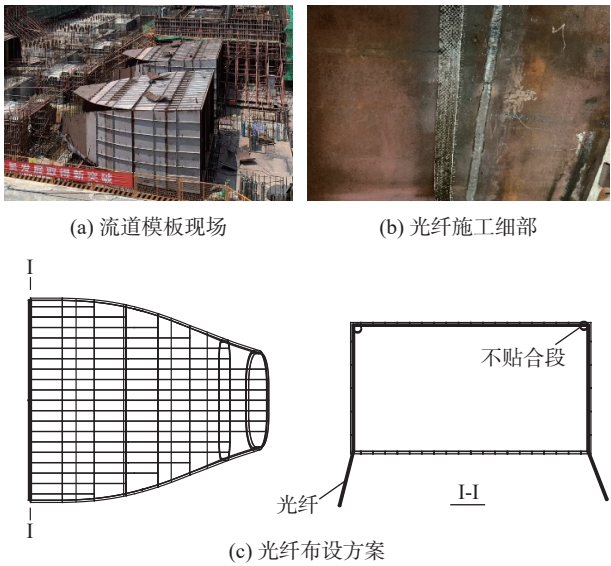


图 3 传感光纤现场布置示意

Fig. 3 Schematic diagram of site layout of optical cables

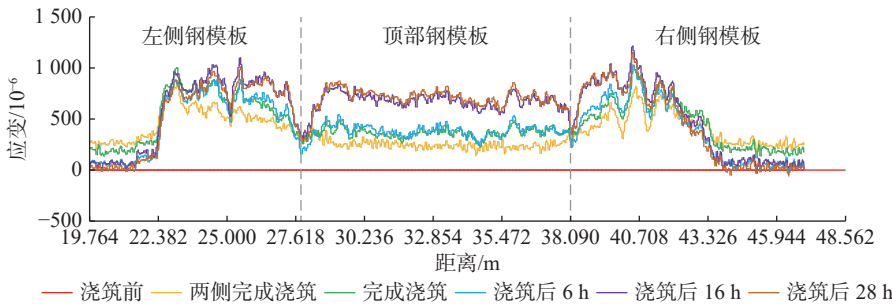


图 4 典型监测时间点实测应变曲线

Fig. 4 Measured strain curves at typical measuring time

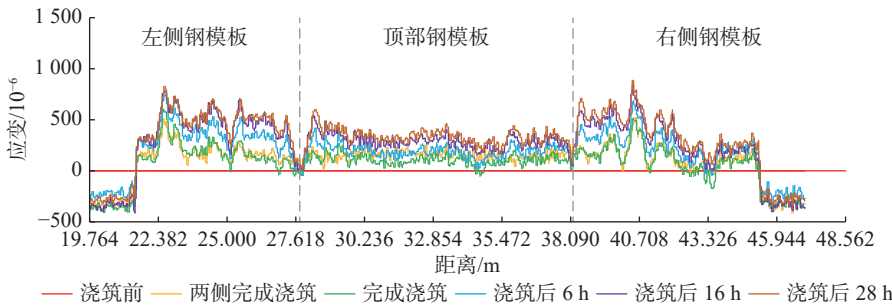


图 5 典型监测时间点温度补偿后的应变曲线

Fig. 5 Measured strain curves after temperature compensation at typical measuring time

3.2 变形监测结果分析

施工期泵站流道钢模板内部搭设了满堂支架, 将钢模板简化为连续梁模型以计算变形, 如图 6 所示。基于温度补偿后的应变监测数据, 采用前述改进共轭梁法得到钢模板挠度曲线, 如图 7 所示。规定垂直钢模板表面变形向外为正, 向内为负。可以看出, 钢模板各部分变形量随混凝土浇筑持续增加, 浇筑完成后, 由于混凝土凝结硬化, 对钢模板的压力增加, 变形量仍持续增加, 直到浇筑完成 16 h 后趋于稳定。由图 7 可知, 完成浇筑 16 h 后, 左侧钢模板变形最大值为 3.40 mm, 出现在 3 号简支梁段的跨中; 顶部钢模板挠度最大值为 2.20 mm, 出现在 14 号简支梁段的跨中; 右侧钢模板挠度最大值为 3.49 mm, 出现在 37 号简支梁段的跨中。施工期钢模板变形均未超过设计容许值 5 mm, 这表明流道施工平整度和准确性可以得到保证。

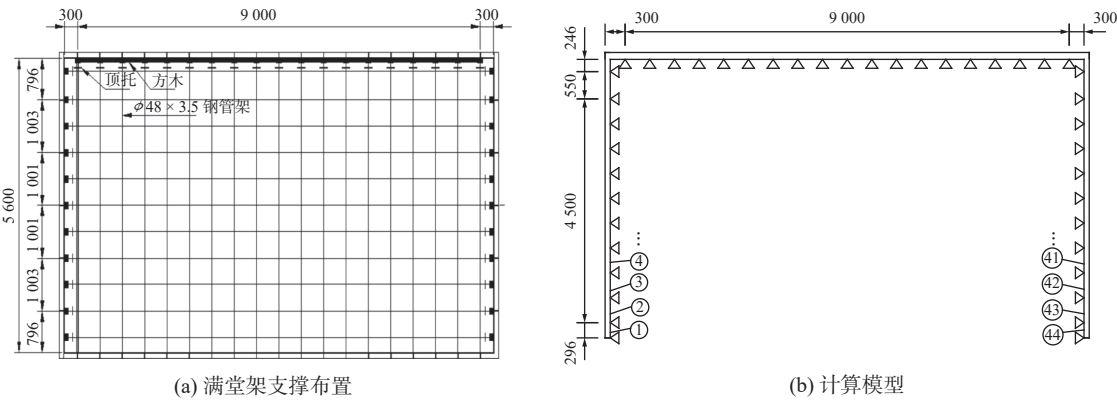


图 6 满堂支架布置图和钢模板简化计算模型(单位: mm)

Fig. 6 Layout of the full house supports and simplified computational model of the steel template (unit: mm)

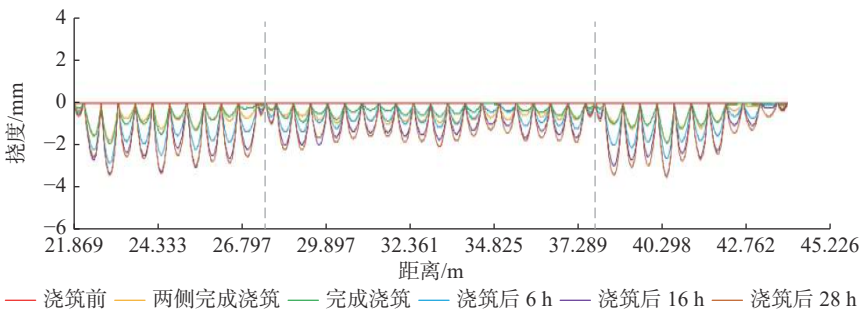


图 7 典型监测时间点钢模板挠度曲线

Fig. 7 Deflection curves of the steel template at typical measuring time

4 结 语

针对光纤传感器的布里渊频移对温度和应变交叉敏感的问题, 提出了一种基于 PPP-BOTDA 的温度补偿方法, 得到消除温度影响的结构应变。通过排水泵站流道钢模板施工期应变监测试验验证了方法的有效性。

采用 PPP-BOTDA 技术对某排水泵站流道钢模板施工期应变进行监测。结果表明, 钢模板两侧和顶部均产生了拉应变, 且顶部的拉应变小于两侧。随着混凝土浇筑, 拉应变逐渐增加, 浇筑完成约 16 h 后趋于稳定。基于应变监测数据, 采用改进共轭梁法计算钢模板变形。变形量随混凝土浇筑持续增加, 由于混凝土凝结硬化, 在浇筑完成后变形量仍持续增加, 直到浇筑完成约 16 h 后趋于稳定。左侧钢模板变形最大值为

3.40 mm, 出现在 3 号简支梁段的跨中; 顶部钢模板挠度最大值为 2.20 mm, 出现在 14 号简支梁段的跨中; 右侧钢模板挠度最大值为 3.49 mm, 出现在 37 号简支梁段的跨中。

## 参 考 文 献:

- [1] 陆林广. 泵站进水流道设计理论的新进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(1): 40-45. (LU Linguang. Progress in design theory for suction boxes of pumping stations[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2001, 29(1): 40-45. (in Chinese))
- [2] 岳建平, 田林亚. 变形监测技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. (YUE Jianping, TIAN Linya. Deformation monitoring techniques and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. (in Chinese))
- [3] 尚盈, 王昌. 分布式光纤传感技术综述[J]. 应用科学学报, 2021, 39(5): 843-857. (SHANG Ying, WANG Chang. Review of distributed optical fiber sensing technology[J]. Journal of Applied Sciences, 2021, 39(5): 843-857. (in Chinese))
- [4] 吴永红, 朱莎, 许蔚, 等. 分布式光纤裂缝传感工程应用研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(9): 15-28. (WU Yonghong, ZHU Sha, XU Wei, et al. Progress in distributed optical fiber crack sensing engineering[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(9): 15-28. (in Chinese))
- [5] 高磊, 陈晖东, 余湘娟, 等. 岩土与地质工程中分布式光纤传感技术研究进展[J]. 水利水电工程学报, 2013(2): 93-99. (GAO Lei, CHEN Huidong, YU Xiangjuan, et al. Advance of the distributed optical fiber technology in geotechnical and geological engineering[J]. Hydro-Science and Engineering, 2013(2): 93-99. (in Chinese))
- [6] 包腾飞, 赵津磊, 阎培林, 等. 一种新型大量程裂缝光纤传感器[J]. 中国科学: 技术科学, 2015, 45(9): 984-990. (BAO Tengfei, ZHAO Jinlei, YAN Peilin, et al. A novel cracking sensing fiber sensor with wide range[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2015, 45(9): 984-990. (in Chinese))
- [7] 何斌, 何宁, 张中流, 等. 基于传感光纤技术的堤坝分布式变形监测[J]. 水利水电工程学报, 2021(5): 137-143. (HE Bin, HE Ning, ZHANG Zhongliu, et al. Fibre-optical distributed monitor on the deformation of embankment[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(5): 137-143. (in Chinese))
- [8] 何宁, 马桂珍, 何斌, 等. 基于分布式光纤监测技术的板桩码头试验研究[J]. 水利水电工程学报, 2021(4): 85-91. (HE Ning, MA Guizhen, HE Bin, et al. Experimental study of sheet pile wharf based on distributed optical fiber monitoring technology[J]. Hydro-Science and Engineering, 2021(4): 85-91. (in Chinese))
- [9] CHAI J, MA Z, ZHANG D D, et al. Experimental study on PPP-BOTDA distributed measurement and analysis of mining overburden key movement characteristics[J]. Optical Fiber Technology, 2020, 56: 102175.
- [10] SU H Z, WEN Z P, LI P P. Experimental study on PPP-BOTDA-based monitoring approach of concrete structure crack[J]. Optical Fiber Technology, 2021, 65: 102590.
- [11] ZHAO M, YI X L, ZHANG J R, et al. PPP-BOTDA distributed optical fiber sensing technology and its application to the Baishuihe landslide[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 660918.
- [12] YE H W, LIU J L, ZHOU Y, et al. Monitoring of crack opening displacement of steel structure by PPP-BOTDA-distributed fiber optical sensors: theory and experiment[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 262: 108275.
- [13] HORIGUCHI T, SHIMIZU K, KURASHIMA T, et al. Development of a distributed sensing technique using Brillouin scattering[J]. Journal of Lightwave Technology, 1995, 13(7): 1296-1302.
- [14] BAO X Y, DEMERCHANT M, BROWN A, et al. Tensile and compressive strain measurement in the lab and field with the distributed Brillouin scattering sensor[J]. Journal of Lightwave Technology, 2001, 19(11): 1698-1704.
- [15] BAO Y, CHEN G D. Strain distribution and crack detection in thin unbonded concrete pavement overlays with fully distributed fiber optic sensors[J]. Optical Engineering, 2015, 55: 011008.
- [16] KISHIDA K, LI C. Pulse pre-pump-BOTDA technology for new generation of distributed strain measuring system[J]. Structural Health Monitoring and Intelligent Infrastructure, 2005, 1: 471-477.
- [17] LI S Z. Structural health monitoring strategy based on distributed fiber optic sensing[D]. Japan: Ibaraki University, 2007.
- [18] 沈圣, 吴智深, 杨才千, 等. 基于分布式光纤应变传感技术的改进共轭梁法监测结构变形分布研究[J]. 土木工程学报, 2023, 56(8): 123-130.

2010, 43(7): 63-70. (SHEN Sheng, WU Zhishen, YANG Caiqian, et al. An improved conjugated beam method for structural deformation monitoring based on distributed optical fiber strain sensing technique[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(7): 63-70. (in Chinese))

## Deformation monitoring of steel templates for suction boxes of pumping stations during construction

BAO Tengfei<sup>1,2</sup>, ZHANG Lanlan<sup>3</sup>, HU Yuhan<sup>1</sup>, WANG Yibing<sup>1</sup>, LI Jianming<sup>1</sup>

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Shaoxing Water Resources and Hydropower Survey and Design Institute Co., Ltd., Shaoxing 312099, China)

**Abstract:** During the construction of a pumping station, the deformation monitoring of the steel template for its suction boxes is of great importance to guaranteeing the safe operation of pumps. Pulse-prepump Brillouin optical time domain analysis (PPP-BOTDA) method is applied for the pump deformation monitoring to overcome the shortcomings of traditional methods with regard to poor adaptability to complicated shaped surfaces and the constraints of environmental factors. A temperature compensation method is proposed to solve the problem that the Brillouin frequency shift is sensitive to both temperature and strain. An improved conjugated beam method is then adopted to convert the strain after removing the temperature effect to structural deformation. The method is successfully applied to the deformation monitoring of steel templates for suction boxes of a drainage pumping station. The results show that tensile strain and deformation occurred on the top and both sides of the steel templates, and increased during concrete pouring and stabilized after completion. The feasibility and superiority of the proposed method is validated, which provides an important reference for the research and application of structural deformation monitoring.

**Key words:** deformation monitoring; distributed optical fiber; pulse-prepump Brillouin optical time domain analysis; temperature compensation; pumping station