

• 水利与土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201900565



本刊网刊

混凝土坝分段连续测温光纤测点精准定位方法研究

梁志鹏¹, 周华维^{1*}, 赵春菊^{1,2}, 刘 全³, 周宜红^{1,2}, 龚 攀⁴

(1.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡大学 湖北省水电工程施工与管理重点实验室, 湖北 宜昌 443002;
3.武汉大学 水利水电学院, 湖北 武汉 430000; 4.中国三峡建设管理有限公司, 四川 成都 610000)

摘 要:分布式测温光纤连续监测大坝多仓混凝土温度时存在测温位置定位不准确的问题, 精准定位光纤测点对获取混凝土坝真实温度分布具有非常重要的意义。为准确识别连续测温功能区间和定位有效测温光纤段, 首先, 结合混凝土坝分布式光纤双股绑扎埋设施工工艺, 分析了光纤测温数据的结构特征; 其次, 建立了基于翻转、平移和曲线拟合的数据对称分析数学模型, 确定了新浇仓双股光纤原始监测数据的对称中心; 最后, 结合浇筑仓埋设光纤关键测点米标记录值、每段有效测温光纤的实际埋设长度、混凝土平均浇筑温度、收仓后 24 h 内光纤测温原始数据及现场实测气温数据, 确定了新浇仓有效测温光纤测点数量、光纤玻璃芯感温位置(Length)与仓内监测位置的对应关系, 从而实现了新浇仓有效测温光纤段每个测点空间位置的精准定位。白鹤滩工程应用结果表明, 利用该方法可准确确定新浇仓有效测温光纤测点空间位置, 并利用点温度计与同位置光纤测点监测温度数据对比验证, 结果表明 21 d 龄期内两者绝对差值基本在 0.8 °C 以内, 同一位置处光纤测与点温度计测温值吻合较好, 验证了本文提出的精准定位结果精度和可靠性高。目前已成功完成白鹤滩大坝 5 个典型坝段共计 161 仓光纤测点的精准定位, 为获取精确可靠的混凝土坝光纤测温原始数据提供了技术保障。

关键词:混凝土坝; 有效测温光纤; 双股埋设; 数据对称分析; 精准定位

中图分类号:TV512

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2020)03-0052-10

Precise Localization of Segmental and Continuous Temperature-measuring Optical Fiber in a Concrete Dam

LIANG Zhipeng¹, ZHOU Huawei^{1*}, ZHAO Chunju^{1,2}, LIU Quan³, ZHOU Yihong^{1,2}, GONG Pan⁴

(1.College of Hydraulic & Environmental Eng., China Three Gorges Univ., Yichang 443002, China; 2.Hubei Key Lab. of Construction and Management in Hydropower Eng., China Three Gorges Univ., Yichang 443002, China; 3.School of Water Resources and Hydropower Eng., Wuhan Univ., Wuhan 430000, China; 4.China Three Gorges Projects Development Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: The spatial positioning of temperature-measuring optical fibers is of great significance for accurately grasping the real temperature distribution of a concrete dam. To solve the difficult positioning problem of a single optical fiber in the process of continuous monitoring temperature in a concrete dam, a mathematical model of data symmetry analysis based on mirroring and shifting and curve fitting of data was established and proposed to confirm the symmetry center of original data monitored by bifilar embedded optical fiber through combining with temperature measuring principle of distributed temperature sensing (DTS) system, bifilar embedded construction technology of optical fiber and characteristics of optical fiber temperature measuring data in a concrete dam. On that basis, the number of measuring points of valid temperature-measuring optical fibers and the corresponding relationship between monitoring length and embedded optical fiber meter identification can be confirmed. Then a space-location method of valid temperature-measuring fiber for new pouring block was proposed. The engineering application result indicated that the temperature-measuring section of valid temperature-measuring optical fiber and space position corresponding to each measurement points could be accurately determined by using the space-location method. The comparative analysis results indicated that the differences of monitoring temperature value between three temperature measuring points of optical fiber and thermometers were mostly within 0.8 °C, and the space-

收稿日期:2019-06-05

基金项目:国家自然科学基金项目(51779131); 中国博士后科学基金面上项目(2018M642885); 三峡大学博士学位论文培优基金项目(20202BSPY010)

作者简介:梁志鹏(1986—), 男, 博士生. 研究方向: 施工组织与管理; 大体积混凝土温控防裂. E-mail: liangzhipeng2552@163.com

* 通信联系人 E-mail: zhouhuawei1988@163.com

网络出版时间:2020-04-20 09:28:43

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20200417.1612.003.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

location result was accurate and reliable. Up to now, the method has been successfully applied to more than 160 warehouses of 5 typical dam monoliths for Baihetan arch dam. The proposed precise localization method provided the accurate and reliable original data for the research work of temperature state analysis and safety evaluation of Baihetan arch dam.

Key words: concrete dam; VTMOF; bifilar embedded; data symmetry analysis; accurate space-location

光纤测温技术应用于结构安全监测已经有30多年^[1],美国、加拿大、日本、英国、德国、中国等国家逐步推动了该技术在土木、水利工程中的应用^[2-7]。光纤测温技术在中国水利工程中的应用源于1999年新疆石门子碾压混凝土拱坝^[8-9]。经过近20年的发展,光纤测温技术以其分布式测量、高精度、抗干扰及长距离实时监测等优势被越来越广泛地应用于大体积混凝土温度监测领域,先后被应用于三峡^[10-11]、景洪^[12]、小湾^[13]、光照^[14]等混凝土坝温度监测中,取得了一定的研究成果,但也出现了诸如监测数据精度不高、监测数据不稳定、光纤成活率低等问题。

自2009年起,作者所在研究团队在溪洛渡工程的4个典型坝段及泄洪洞等结构中开展了分布式光纤温度监测应用研究^[15],累计埋设光纤33.27 km^[16],光纤埋设成活率达90%,建成了一套稳定、精度和分辨率高、使用寿命长的分布式光纤测温系统,并基于光纤测温数据,开展了混凝土真实热学参数反演^[17-20]、坝体施工期温度预报及预警^[21-23]、温控效果评价及反馈^[24-28]等研究工作,为施工现场温控措施的动态调整提供了辅助决策支撑^[29]。分布式光纤测温技术在溪洛渡工程中的应用,无论是光纤埋设工程量和埋设成活率,还是监测周期、测量精度和应用效果等各方面,均处于国际领先水平。

然而,上述工程中单个浇筑仓内光纤埋设长度一般在20 m以内,光纤测温数据提取时多采用均化处理的方式,以获取单个浇筑仓的混凝土平均温度,未考虑仓内不同空间位置混凝土温度的差异性。

近年来,部分学者^[30-33]将分布式光纤测温技术应用于混凝土结构裂缝监测和土石坝渗流诊断中,旨在通过温度数据的突变发现安全隐患,取得了较好的应用效果。但研究成多关注介质温度突变位置的确定,并未涉及连续监测时段内不同空间位置温度数据精准获取方法的研究。

随着混凝土坝智能建造理念的提出和不断发展,对混凝土坝温控的智能化水平也提出了更高的要求。尽可能多的获取单个坝体浇筑仓内不同空间位置混凝土温度监测数据成为基本需求,分布式光纤测温技术以其实时线性监测的优势成为混凝土温度数据大范围智能采集的首选手段。

在建白鹤滩工程中,分布式光纤布设范围和长度由溪洛渡工程中的单仓局部双股埋设20 m左右增至通仓双股埋设100~180 m左右,首次实现了单个

浇筑仓通仓埋设光纤,实时监测各部位混凝土温度,以准确掌握坝体真实温度分布。近年来,作者针对混凝土坝工程光纤测温数据的精度提高方法开展了相关研究,取得了一些研究成果^[34]。在研究过程中发现,传统的短距离测温数据平均化处理的方式已经无法满足混凝土坝精准测温需求。然而,由于光纤是一种连续线性温度传感介质,测温系统按设定时间间隔不断获取单根长度3~6 km光纤沿程的所有温度数据,因此,如何正确识别埋入单个浇筑仓内的有效测温光纤并实现测点空间位置的精准定位,是获取精确可靠原始温度监测数据的关键,目前针对此问题的研究成果未见相关报道,尚无成熟理论。

为此,作者提出了混凝土坝新浇仓有效测温光纤精准定位方法。结合光纤双股埋设施工工艺下测温数据的对称性特征,建立了基于翻转、平移和曲线拟合的数据对称分析数学模型;结合浇筑仓埋设光纤关键测点米标值、每段有效测温光纤的实际埋设长度、混凝土平均浇筑温度、收仓后24 h内光纤测温原始数据及现场实测气温数据,确定了新浇仓有效测温光纤测点数量、光纤玻璃芯感温位置(Length)与仓内监测位置的对应关系,实现了新浇仓有效测温光纤段每个测点空间位置的精准定位;以白鹤滩大坝某新浇仓光纤测温数据为例,利用特征点温度计实测数据验证了方法的科学性和可靠性。

1 光纤测温原始数据特征分析

1.1 测温光纤双股绑扎埋设施工工艺

光纤需要埋入混凝土内,以获取埋设线路上的温度监测数据。由于光纤本身的脆弱性和混凝土坝施工现场条件的复杂性(如混凝土粗骨料对光纤的破坏风险、浇筑施工和模板提升作业对跨模板光纤的破坏风险等)之间存在矛盾,因此,为了提高已埋光纤及沿程光纤的安全性,确保温度监测数据的稳定性和连续性,需要采用铠装光纤。铠装光纤外保护套上每隔1 m印制的标识称为“米标”,一般以0为始,单根光纤总长为终。

为了实现混凝土坝24 h不间断实时测温目标,一般将单根光纤主测头(铠装光纤米标小值端)通过尾纤与施工现场监测房内的DTS测温主机相连,并从监测房引线至监测坝段仓面光纤安置房,单根光纤待埋设部分全部放置于安置房内。根据坝体浇筑施工进度,在监测坝段拟浇仓开仓前,严格按照设计埋

设方案,计算本仓光纤埋设工程量(包括有效测温光纤和引线段光纤),从仓面光纤安置房内整理出拟浇筑仓预埋光纤,并将其每隔0.5 m用扎丝双股绑扎。绑扎过程中严格对准光纤外保护套上的米标大值和米标小值,并在该仓浇筑过程中采用铁叉控位结合人工振捣的方式将双股光纤埋入设计坯层指定深度处。这种施工工艺一方面可以提高光纤的埋设成活率;另一方面,若某一仓已埋光纤被意外打断,可将备用测头(铠装光纤米标大值端)引入监测房内与DTS测温主机相连,监测打断点以上部位光纤埋设仓的混凝土温度,而主测头可以继续监测打断点以下已埋仓混凝土温度。图1为测温光纤双股绑扎埋设平面示意图。其中,与埋设方案一致的仓内埋设光纤为有效测温光纤,需要准确获取埋设线路上所有的温度数据,沿程引线光纤、仓内引线光纤及相邻仓垂直向连接光纤是实现单根光纤连续测温不可缺少的引线段光纤,但在进行有效测温数据提取时需要将其排除在外。光纤双股绑扎和埋设施工现场作业分别如图2、3所示。

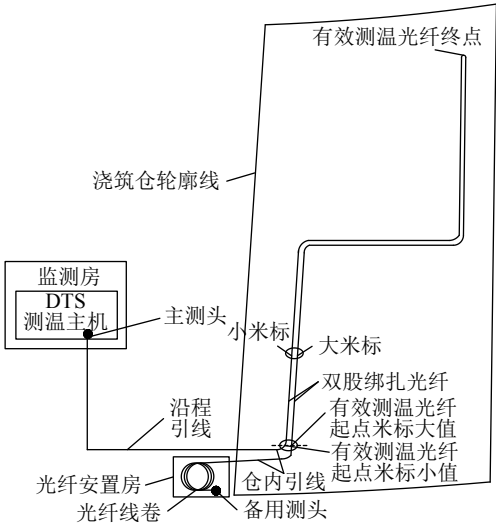


图 1 测温光纤双股绑扎埋设平面示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bifilar embedded construction of optical fiber



图 2 开仓前待埋光纤双股绑扎施工
Fig. 2 Bifilar binding construction of optical fiber



图 3 光纤埋设施工
Fig. 3 Embedding construction of optical fiber

1.2 光纤测温原始数据特征分析

DTS测温系统工作时,激光发射器按照设置的监测时间间隔发射激光脉冲。由于分布式光纤具有线性监测的特点,每打点1次,将得到整根光纤在该时刻点的沿程原始温度监测数据。原始数据中包含系统运行参数、首段无效数据及光纤沿程温度数据,数据结构如图4(a)、(b)所示。

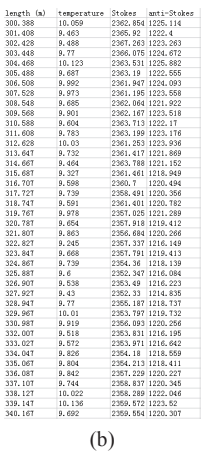


图 4 光纤测温原始数据
Fig. 4 Original monitoring data of optical fiber

DTS系统监测数据实时显示界面与时刻点原始温度监测数据中显示的均是光纤玻璃芯感温位置 (Length) 与温度值的对应关系, 系统无法自动识别并区分光纤沿程温度数据中的有效测温段数据和引线段测温数据, 且由于光纤与DTS主机之间一般由一根4~5 m的尾纤连接, Length值与光纤外保护套上的米标值不可能完全一致。因此, 为了得到定位准确的已埋仓有效测点的光纤测温数据, 首先需要确定每个浇筑仓有效测温光纤的Length区间、测点数量及埋设线路上空间特征点的米标与Length之间的对应关系。分布式光纤测温原始数据的上述特征也决定了现场光纤埋设施工时开展严格的空间定位、关键位置米标记录及埋设施工工艺质量控制等工作的重

要性, 现场实施细节对有效测温光纤空间定位结果的可靠性有直接影响, 必须综合考虑。综上, 有效测温光纤空间定位是混凝土坝分布式光纤测温数据处理过程中需要解决的关键技术问题。

作者从DTS系统监测数据实时显示界面与时刻点原始温度监测数据中发现, 由于在混凝土坝光纤埋设施工中采用了双股绑扎埋设施工工艺, 已埋仓有效测温光纤段的监测数据在结构上呈现明显的对称性, 且受混凝土浇筑温度与外界环境温度差异较大的影响, 在新浇仓收仓后24 h内, 该仓有效测温数据的对称性尤其明显, 如图5所示, A~D区域为历史已埋仓光纤测温段, E区域为新浇仓光纤测温数据, F区域为放置于仓面安置房内剩余待埋设光纤段的测温数据。

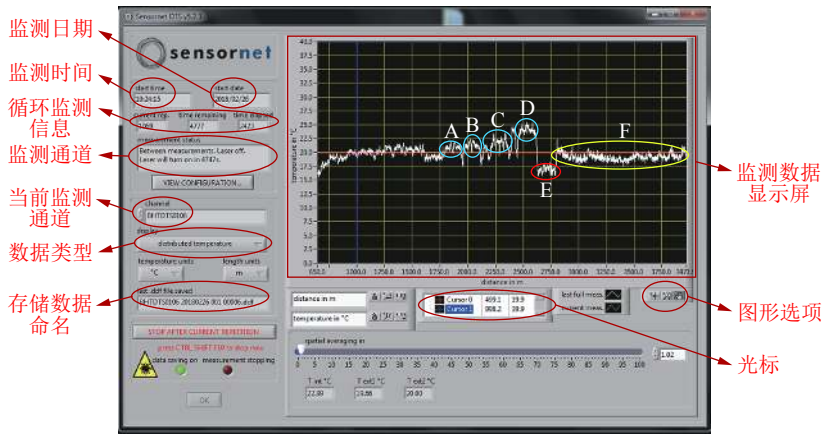


图5 DTS系统监测数据实时显示界面
Fig. 5 Monitoring interface of DTS system

2 数据对称分析数学模型

结合混凝土坝分布式光纤测温原始数据的上述特征和新浇仓光纤埋设方案, 按照包含新浇仓所有有效测点且前后有一定扩展的原则, 选择新浇仓收仓后24 h内某时刻点的光纤测温原始数据作为分析对象, 对其进行初步识别和筛选, 以缩小数据对称分析的区间, 即确定图5中的E区间。筛选完成之后, 假设E区间上有 $N(N=2n-1$ 或 $2n)$ 个温度测点, 这些测点应包含埋入混凝土内的引线段测点和新浇仓有效测温段测点。根据原始监测数据的对称性及数据分析目标, 提出了如下数据对称分析数学模型。

首先确定E区间段上 N 组数据 $(x_i, y_i)(i=1, 2, 3, \dots, N)$ 的虚拟对称中心1, 其中, x_i 表示第 i 个测点, y_i 表示第 i 个测点的温度值。假设虚拟对称中心1的对称位置在第 i 个测点, 将虚拟对称中心1左、右侧实测数据对称两两乘积平方根的计算方式得到新的温度数据(可以有效降低或避免异常点对数据对称分析和计算的影响, 提高计算精度), 并置于对称中心1的左侧。按照下列公式组成新的温度数据集:

$$Y_k = \begin{cases} Y_0 = y_i, \\ Y_1 = \sqrt{y_{i-1}y_{i+1}}, \\ Y_2 = \sqrt{y_{i-2}y_{i+2}}, \\ \vdots \\ Y_{i-2} = \sqrt{y_2y_{2i-2}}, \\ Y_{i-1} = \sqrt{y_1y_{2i-1}} \end{cases} \quad (1)$$

因此, 可得到关于虚拟对称中心1的组温度数据 $(x_k, y_k)(k=0, 1, 2, \dots, i-1)$ 。采用曲线拟合的最小二乘法, 其满足虚拟对称中心1的 i 组温度数据的拟合曲线为^[35]:

$$Y_m(X) = a_0 + a_1X + a_2X^2 + \dots + a_m(X^m) = \sum_{j=0}^m a_jX^j \quad (2)$$

式中, $Y_m(X)$ 为对称中心左侧数据的 m 次多项式拟合曲线。

在任意测点 x_k , $Y_m(X)$ 与实测数据之间均存在一定偏差, 偏差 R_k 可表示为:

$$R_k = Y_m(X) - y_k \quad (3)$$

基于最小二乘法原理, 数据拟合曲线的偏差平

方和 Φ_1 可表示如下,并将其作为处理后的对称数据与原始监测数据拟合曲线重合度误差的评价指标 E_1 ,计算公式如下:

$$E_1 = \Phi_1 = \sum_{k=0}^{i-1} R_k^2 = \sum_{k=0}^{i-1} [Y_m(X_k) - y_k]^2 \quad (4)$$

完成虚拟对称中心1的数据对称重合度误差分析后,分别将虚拟对称中心1向左和右平移一个测点位,得到虚拟对称中心2和虚拟对称中心3。按照上述思路,并剔除首或尾多余的一个测点,分别得到关于虚拟对称中心2的 $i-1$ 组温度数据 (x'_k, y'_k) ($k' = 0, 1, 2, \dots, i-2$)和虚拟对称中心3的 $i-1$ 组温度数据 (x''_k, y''_k) ($k' = 0, 1, 2, \dots, i-2$),其中 Y'_k 和 Y''_k 分别计算如下:

$$Y'_k = \begin{cases} Y'_0 = y_{i-1}, \\ Y'_1 = \sqrt{y_{i-2}y_i}, \\ Y'_2 = \sqrt{y_{i-3}y_{i+1}}, \\ \vdots \\ Y'_{i-3} = \sqrt{y_2y_{2i-4}}, \\ Y'_{i-2} = \sqrt{y_1y_{2i-3}} \end{cases} \quad (5)$$

$$Y''_k = \begin{cases} Y''_0 = y_{i+1}, \\ Y''_1 = \sqrt{y_iy_{i+2}}, \\ Y''_2 = \sqrt{y_{i-1}y_{i+3}}, \\ \vdots \\ Y''_{i-3} = \sqrt{y_3y_{2i-3}}, \\ Y''_{i-2} = \sqrt{y_2y_{2i-2}} \end{cases} \quad (6)$$

基于上述曲线拟合计算原理,确定左、右平移一个测点位后两组拟合曲线重合度误差的评价指标 E_2 和 E_3 ,计算公式分别如下:

$$E_2 = \Phi_2 = \sum_{k'=0}^{i-2} R_{k'}^2 = \sum_{k'=0}^{i-2} [Y'_{m-1}(X'_{k'}) - y_{k'}]^2 \quad (7)$$

$$E_3 = \Phi_3 = \sum_{k'=0}^{i-2} R_{k'}^2 = \sum_{k'=0}^{i-2} [Y''_{m-1}(X''_{k'}) - y_{k'}]^2 \quad (8)$$

式(7)~(8)中: $Y'_{m-1}(X'_{k'})$ 为将对称中心左移一位后两侧数据乘积的平方根处理后的 $(m-1)$ 次多项式拟合曲线; $Y''_{m-1}(X''_{k'})$ 为对称中心右移一位后,两侧数据乘积的平方根处理后的 $(m-1)$ 次多项式拟合曲线; Φ_2 和 Φ_3 分别为两组数据拟合曲线的偏差平方和; $R'_{k'}$ 和 $R''_{k'}$ 分别为两组数据拟合曲线的偏差。

最后,比较 E_1 、 E_2 和 E_3 ,确定拟合曲线重合度误差的评价指标的最小值,由此确定监测数据对称中心,计算式如下:

$$E = \min(E_1, E_2, E_3) \quad (9)$$

3 新浇仓有效测温光纤精准定位方法

图6为两连续浇筑仓混凝土光纤埋设位置3维示

意图。图中 $P-O-O_1-O-A-B-C-D$ 段为埋入新浇仓混凝土内的双股光纤, P 为上一浇筑仓光纤出仓面点, O_1 为新浇仓光纤出仓面点,同理,下一浇筑仓光纤从此点开始向上引线至仓内光纤埋设高程并完成该仓光纤的双股绑扎埋设施工,如此循环,实现单坝段单根光纤连续监测多仓混凝土的目标。以图中新浇仓为例: $P-O-O_1$ 为新浇仓沿横缝面钢筋垂直向引线段; $O-A$ 为垂直向引线段与有效测温段的连接段,即仓内埋设光纤引线段; $A-B-C-D$ 为有效测温光纤段,这两段光纤均采用双股绑扎埋设施工工艺,实际监测位置大小米标绑扎在一起,每一个测点对应两个米标。因此,同一个空间位置点上可以获取两组混凝土内部温度数据,DTS原始测温数据中体现为这一部分以Length为横坐标,温度值关于某一个Length值对应的轴具有对称性。在埋设实施中,施工人员准确记录有效测温段光纤关键点大小米标值。

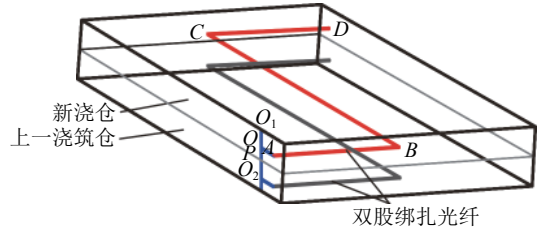


图 6 连续浇筑仓光纤埋设示意图

Fig. 6 Schematic diagram of embedding optical fiber in continuous warehouses

在实际应用时,由于双股绑扎光纤测温数据存在对称性,且分布式光纤温度原始监测数据量庞大,为降低数据处理的难度,在数据分析时进行了适当简化处理。此时,拟合曲线重合度误差的评价指标可简化为:

$$E'_1 = \sum_{k=0}^{i-1} [Y_k - y_{i-k}]^2 \quad (10)$$

$$E'_2 = \sum_{k=0}^{i-2} [Y'_k - y_{i-k-1}]^2 \quad (11)$$

$$E'_3 = \sum_{k=0}^{i-2} [Y''_k - y_{i-k+1}]^2 \quad (12)$$

最后,比较 E'_1 、 E'_2 和 E'_3 ,确定对称度误差最小值,由此确定监测数据对称中心,计算式如下:

$$E' = \min(E'_1, E'_2, E'_3) \quad (13)$$

基于光纤埋设方案、新浇仓平均浇筑温度、收仓后24 h内某一时刻点的混凝土温度原始监测数据和现场实测气温数据,利用本文提出的数据对称分析数学模型,确定双股光纤原始监测数据的对称中心,在此基础上,结合有效测温段光纤米标记录值和每段有效测温光纤的实际埋设长度,确定混凝土坝新

浇仓有效测温光纤测点数量、Length与监测位置的对应关系,从而实现混凝土坝新浇仓有效测温光纤的空间定位,确保所有有效测点温度数据的准确获取。

4 实例分析

4.1 实例简介

以白鹤滩大坝19[#]-018仓光纤测温数据为例,利用本文提出的新浇仓有效测温光纤空间定位方法,确定该仓有效测温测点区间段及每个测点对应的实际空间位置,同时在光纤埋设线路的上游面、仓中部及下游面分别埋设3支点温度计,利用对应位置点温度计实测数据验证定位结果的可靠性。19[#]-018仓光纤与点温度计埋设方案如图7所示,仅包含有效测温光纤段,其中,A和D点为埋设起点和终点,B和C点分别为靠上、下游面转折点,E、F和G点为与3支点温度计空间位置一致的测点。

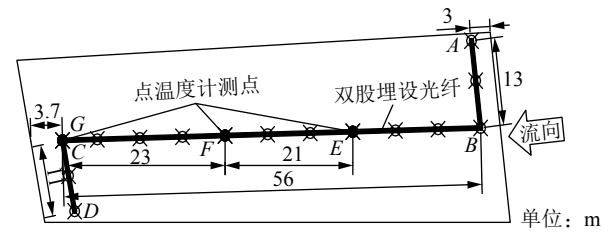


图 7 19[#]-018仓光纤与点温度计埋设方案示意图
Fig. 7 Schematic diagram of embedding optical fiber and thermometers in 19[#]-018

19[#]-018仓混凝土浇筑层厚3 m,分6个坯层连续浇筑施工,于2017-12-12 08:46:00开仓浇筑,2017-12-13 04:49:00收仓,浇筑历时20 h,混凝土平均浇筑温度11.43℃。分布式光纤和点温度计按上述方案埋设在第3坯层以下25 cm处,远离布置在第1和第4坯层的冷却水管,确保温度监测数据真实反映该仓混凝土内部温度变化情况。依据埋设施工记录文件,上述7个关键测点的光纤大、小米标值如表1所示。

表 1 19[#]-018仓7个关键测点米标

Tab. 1 MI of 7 key measuring points of optical fiber in 19[#]-018

测点	A	B	C	D	E	F	G
光纤小米标/m	1 767	1 780	1 836	1 847	1 792	1 813	1 836
光纤大米标/m	1 927	1 914	1 858	1 847	1 902	1 881	1 858

监测19[#]坝段的单根光纤总长4 000 m,19[#]-018仓埋设有效测温光纤160 m,引线15 m,DTS系统激光器每隔两小时打点1次,获取光纤沿程温度监测数据,生成一个.ddf格式的光纤测温原始数据文件。

4.2 数据对称处理结果分析

选择2017-12-13 11:00的19[#]坝段单根光纤原始监测数据进行分析,包含埋入19[#]-018仓混凝土内的光纤及前后扩展段光纤上的215个测点。原始数据主要表达了光纤玻璃芯Length与混凝土温度的一一对应关系。

结合白鹤滩大坝混凝土温度变化规律,浇筑完成后0.5 d龄期时,混凝土温度与平均浇筑温度相比,一般上升3℃左右,二级配混凝土适当再高1℃左右;同时,根据施工现场气象资料,当天的外界环境气温在17~23℃之间,且白天太阳辐射较强。另一方面,由于DTS空间分辨率为1.02 m,因此,160 m长的有效测温光纤对应的有效测点数量不会超过160个。对原始数据筛选并确定埋入混凝土内部的光纤测温区间段应遵循以下原则:1)在埋设的光纤米标区间扩大范围内,选取低于常温数据的Length测温区间段;2)埋入混凝土内部的光纤测温区间段起点和终点的温度数据差距不大,一般在1℃以内;3)光纤测温区间段起点和终点均在上升通道内,通常选择上升通道内的第一个点。

综上,可以确定埋入混凝土内的光纤段对应的Length区间如图8所示,测点总数为174个。区间段第1个测点的Length和温度值分别为1 776.298 m、14.724℃,依据本文提出的数据对称分析数学模型,

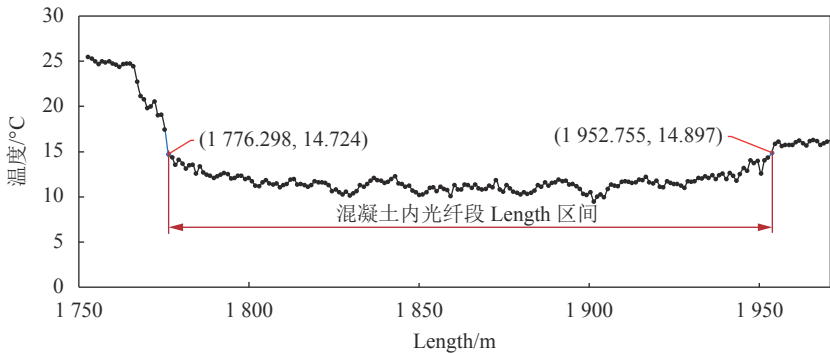


图 8 19[#]-018仓混凝土内光纤段对应的Length区间示意图

Fig. 8 Schematic diagram of Length interval corresponding to optical fiber interval embedded in 19[#]-018

可表示为(1,14.724);同理,区间段第174个测点的Length和温度值分别为1 952.755 m、14.897 ℃,可表示为(174,14.897)。

19[#]-018仓可参与对称分析的原始数据的Length区间为(1 776.298, 1 952.755),对应数据序号区间为(1, 174)。基于本文提出的数据对称分析数学模型,首先以测点(87, 11.274)与(88, 11.024)的中点为虚拟对称中心,将右侧数据对称翻转至左侧并计算两组数据的拟合曲线重合度误差评价指标 E'_1 、

E'_2 和 E'_3 ,随后将虚拟对称中心分别向左、右平移一个测点,即分别以测点(87, 11.274)、(88, 11.024)为虚拟对称中心,将右侧数据对称翻转至左侧并计算两组数据的拟合曲线重合度误差评价指标 E'_2 、 E'_3 ,示意图如图9所示。拟合曲线重合度误差评价指标计算结果如表2所示。由此可以得出 $E' = E'_1$,测点(87, 11.274)和(88, 11.024)的中点为19[#]-018仓光纤测温数据的对称中心,选取Length值1 864.5 m更为靠近实际监测位置的Length值1 864.017为对称中心。

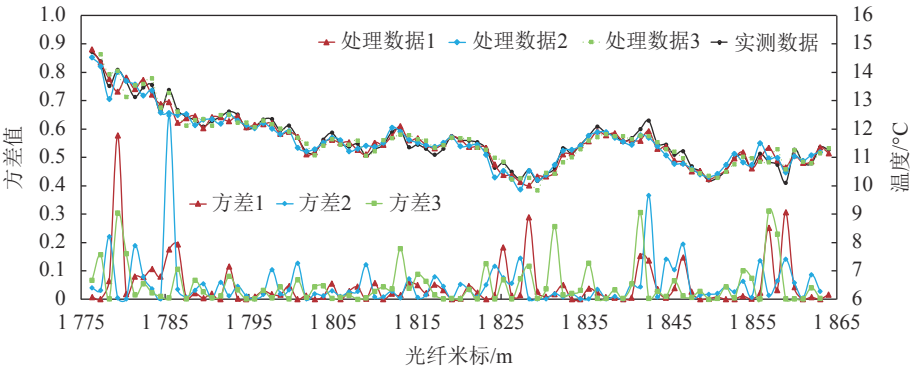


图 9 19[#]-018仓混凝土内光纤段测温数据对称拟合过程示意图

Fig. 9 Schematic diagram of symmetrical fitting of optical fiber temperature measuring data in 19[#]-018

表 2	19 [#] -018仓光纤测温数据对称度误差计算结果		
Tab. 2	Calculation results of symmetry error of temperature measuring data of optical fiber embedded in 19 [#] -018		
对称度误差	E'_1	E'_2	E'_3
计算值	4.124	4.581	4.163

余,选择靠近DTS系统的一半Length范围的监测数据作为后期有效测温数据提取的依据,最后确定有效测点编号及对应Length值,有效测点数量79个,其中测点DTS19018-01、DTS19018-14、DTS19018-26、DTS19018-46、DTS19018-69、DTS19018-69、DTS19018-79分别对应埋设线路上的A~G关键测点。

4.3 有效测温光纤定位结果分析

确定了19[#]-018仓光纤测温数据的对称中心,即确定了图7中有效测温光纤D点对应的Length值。根据实际埋设有效测温光纤长度、DTS系统的空间分辨率和测点的对称性,确定有效测温光纤测点总数为161个,7个关键测点的大小米标与Length的对应关系如见表3。由于大小米标绑扎在一起,两个Length处监测的是光线埋设路线上的同一位置,为了尽量减少数据冗

表 3 19[#]-018仓7个关键测点米标与Length对应关系

Tab. 3	MI of 7 key measuring points and corresponding relationships between MI and Length values of 19 [#] -018			
测点	小米标 /m	小米标对应 Length/m	大米标 /m	大米标对应 Length/m
A	1 767	1 784.458	1 927	1 943.575
B	1 780	1 797.718	1 914	1 931.335
C	1 836	1 853.817	1 858	1 875.237
D	1 847	1 864.017	1 847	1 864.017
E	1 792	1 809.958	1 902	1 918.076
F	1 813	1 830.357	1 881	1 897.676
G	1 836	1 853.817	1 858	1 875.237

4.4 定位结果可靠性检验

基于埋设在E、F和G这3个测点的3支点温度计Z19-1、Z19-2和Z19-3的实测数据,验证3个测点光纤测温数据的可靠性和精度,从而实现上述空间定位结果可靠性的检验。选择19[#]-018仓21 d龄期内以0.5 d为采样间隔的实测数据作为数据源,两种方式下3个测点处混凝土温度过程曲线如图10(a)、(b)和(c)所示,3个测点光纤测温数据与点温度计测温数据随龄期动态变化,反映出的混凝土温度变化趋势基本一致,且同一测点混凝土温度变化趋势吻合得更好。

在此基础上,计算同一龄期下3个测点光纤测值与点温度计测值的绝对差值 ΔTE 、 ΔTF 和 ΔTG ,统计原始数据及计算结果,21 d龄期内光纤与点温度计测温绝对差值分布如图11所示。从图11表中可以发现,3个测点光纤与点温度计测值之差绝大多数在0.5 ℃以内,整体在1 ℃以内。由于DTS系统测量精度为1 ℃,点温度计测温精度为 ± 0.5 ℃,上述对比分析结果可以说明同一位置处光纤测温值与点温度计测值吻合

测点	小米标 /m	小米标对应 Length/m	大米标 /m	大米标对应 Length/m
A	1 767	1 784.458	1 927	1 943.575
B	1 780	1 797.718	1 914	1 931.335
C	1 836	1 853.817	1 858	1 875.237
D	1 847	1 864.017	1 847	1 864.017
E	1 792	1 809.958	1 902	1 918.076
F	1 813	1 830.357	1 881	1 897.676
G	1 836	1 853.817	1 858	1 875.237

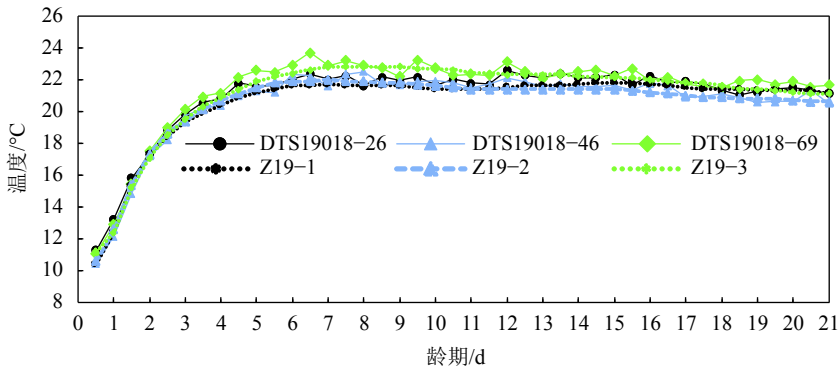


图 10 19#-018仓E、F和G3个测点21 d龄期内混凝土温度过程曲线

Fig. 10 Concrete temperature process curve of three measuring points within 21 d age of 19#-018

良好,进而证明利用本文提出的数据对称分析数学模型和新浇仓有效测温光纤空间定位方法,能够准确确定有效测温光纤测点数量、Length与监测位置的对应关系,从而实现混凝土坝新浇仓有效测温光纤的空间定位,确保准确获取混凝土坝浇筑仓有效测温光纤温度监测数据,为坝体混凝土温度状态分析、安全性评价等研究工作的开展提供精确可靠的原始

数据。本文针对单根光纤连续监测多仓混凝土温度时出现的不易定位问题,结合DTS系统测温原理、光纤双股绑扎埋设施工工艺及分布式光纤通仓埋设施工方案的特点,提出了科学合理的解决方案。研究成果被成功应用于在建的白鹤滩大坝工程中,截至2019年5月,已经实现了7#、11#、17#、19#、27#坝段共计161仓混凝土有效测温光纤的空间定位工作。

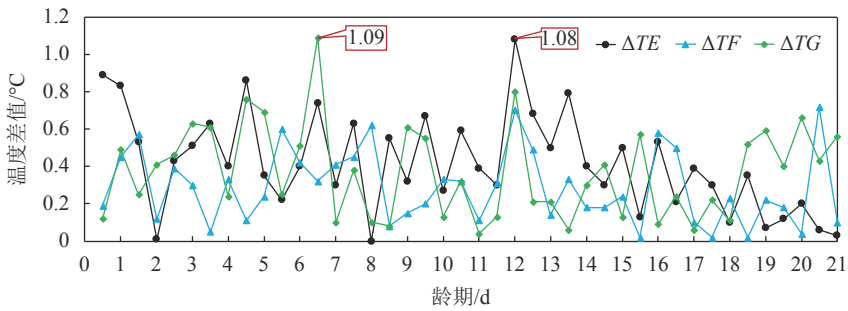


图 11 19#-018仓光纤与点温度计测温绝对差值分布

Fig. 11 Distribution of absolute differences between fiber and thermometers temperature measuring data of 19#-018

5 结 论

1)结合混凝土坝分布式测温光纤双股绑扎埋设施工工艺,分析了单仓埋入混凝土内部的光纤测温数据,明确了双股埋设光纤测温数据存在的对称特征。

2)基于双股光纤测温数据的对称特性,建立了一种基于数据翻转、平移和曲线拟合的数据对称分析数学模型,通过3次数据翻转、2次对称中心平移和3次多项式曲线拟合,采用拟合曲线重合度误差最小值作为评价指标,以此确定新浇仓双股光纤原始监测数据的对称中心;在此基础上,结合有效测温段光纤米标记录值和每段有效测温光纤的实际埋设长度,确定混凝土坝新浇仓有效测温光纤测点数量、Length与监测位置的对应关系,依据数据对称分析数学模型及最终计算拟合曲线重合度误差指标,实现混凝土坝新浇仓有效测温光纤的精准定位。

3)以白鹤滩大坝19#-018仓光纤测温数据为例,

利用本文提出的新浇仓有效测温光纤空间定位方法,确定该仓有效测温测点区间段及每个测点对应的实际空间位置,同时在光纤埋设线路的上游面、仓中部及下游面分别埋设3支点温度计,利用对应位置点温度计实测数据验证定位结果的可靠性。对比分析结果表明,3个测点光纤与点温度计测值之差绝大多数在0.5℃以内,整体在1℃以内,同一位置处光纤测温值与点温度计测值吻合较好,证明本文提出的数据对称分析数学模型和新浇仓有效测温光纤空间定位方法能够准确确定有效测温光纤测点数量、Length与监测位置的对应关系,从而实现混凝土坝新浇仓有效测温光纤的空间定位,确保准确获取混凝土坝浇筑仓有效测温光纤温度监测数据。

4)本文研究成果已成功应用于在建白鹤滩大坝工程中,确保了典型坝段浇筑仓有效测温光纤温度监测数据的准确获取,为坝体混凝土温度状态分析、安全性评价等研究工作的开展提供了精确可靠的原

始数据支撑。截至2019年5月,已完成7[#]、11[#]、17[#]、19[#]、27[#]坝段共计161个混凝土浇筑仓有效测温光纤的空间定位工作。

参考文献:

- [1] Villalba S,Casas J R.Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures[J].*Mechanical Systems and Signal Processing*,2013,39(1/2):441–451.
- [2] Thévenaz L,Niklès M,Fellay A,et al.Truly distributed strain and temperature sensing using embedded optical fibers[C]//*International Society for Optics and Photonics:5th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials*,San Diego:SPIE,1998,301–314.
- [3] Broennimann R,Nellen P M,Anderegg P,et al.Application of optical fiber sensors on the power dam of Luzzzone[C]//*International Conference on Applied Optical Metrology*,Balatonfured:SPIE,1998.
- [4] Bettzieche V.Temperature measurement in a masonry dam by means of fibre optical sensors[J].*Transactions of the International Congress on Large Dams*,2000,3:211–232.
- [5] Markus A,Marco C,Matthias G,et al.Innovative dam monitoring tools based on distributed temperature measurement[J].*Jordan Journal of Civil Engineering*,2007,1(1):29–37.
- [6] Zhang Dan,Zhang Pingsong,Shi Bin,et al.Monitoring and analysis of overburden deformation and failure using distributed fiber optic sensing[J].*Chines Journal of Geotechnical Engineering*,2015,37(5):952–957.[张丹,张平松,施斌,等.采场覆岩变形与破坏的分布式光纤监测与分析[J].*岩土工程学报*,2015,37(5):952–957.]
- [7] Xu Xingyu,Zhu Honghu,Zhang Wei,et al.Development of fiber optic monitoring-based visualization system for strain fields of slopes[J].*Chines Journal of Geotechnical Engineering*,2017,39(Supp1):96–100.[许星宇,朱鸿鹄,张巍,等.基于光纤监测的边坡应变场可视化系统研究[J].*岩土工程学报*,2017,39(增刊1):96–100]
- [8] Aufleger M,Conrad M,Strobl Th,et al.Distributed fibre optic temperature measurements in RCC-dams in Jordan and China[C]//*RCC Dams-Roller Compacted Concrete: Proceedings of the IV International Symposium on Roller Compacted Concrete Dams*,Madrid,2003.
- [9] Malkawi A I H,Aufleger M,Al-Jammal M R.Temperature Distribution in Al-mujib Roller Compacted Concrete (RCC) Gravity Dam[J].*Irbid:Geo Jordan Conference*,ASCE,2004: 35–48.
- [10] Cai Desuo,Dai Huichao,Cai Shunde,et al.Monitoring the temperature in concrete structure of Three Gorges dam by using distributed optical fiber sensor[J].*Journal of Hydraulic Engineering*,2003(5):88–91.[蔡德所,戴会超,蔡顺德,等.分布式光纤传感监测三峡大坝混凝土温度场试验研究[J].*水利学报*,2003(5):88–91.]
- [11] Dai Huichao,Cai Desuo.Application of temperature distribution and crack monitoring optical fiber sensing technology in the Three Gorges project[J].*Water Power*,2003(12): 59–61.[戴会超,蔡德所.温度分布式及裂缝监测的光纤传感技术在三峡工程中的应用[J].*水力发电*,2003(12):59–61.]
- [12] Xu Weijun,Hou Jianguo,Li Duanyou.Application research on temperature monitoring in concrete of Jinghong hydropower station by distributed optical fiber temperature measurement system[J].*Journal of Hydroelectric Engineering*,2007(1):97–101.[徐卫军,侯建国,李端有.分布式光纤测温系统在景洪电站大坝混凝土温度监测中的应用研究[J].*水力发电学报*,2007(1):97–101.]
- [13] Tang Rongping.Application of distributed optical fiber temperature measurement system in temperature monitoring of Xiaowan arch dam[J].*Dam and Safety*,2007(6):43–46.[汤荣平.分布式光纤测温系统在小湾拱坝温度监测中的运用[J].*大坝与安全*,2007(6):43–46.]
- [14] Jiang Jian,Guo Fawang.Application discussion on distributed optical fiber temperature measurement in Guangzhao RCC dam[J].*Water Power*,2008(3):55–58.[蒋剑,郭法旺.分布式测温光纤在光照大坝碾压混凝土中的应用探讨[J].*水力发电*,2008(3):55–58.]
- [15] Zhou Yihong,Gong Jingwei,Huang Yaying,et al.Site tests of temperature monitoring bu DOF for lining concrete of spillway tunnel during construction period[J].*Journal of Huazhong University of Science and technology (Natural Science Edition)*,2013,41(7):15–20.[周宜红,宫经纬,黄耀英,等.泄洪洞衬砌混凝土施工期光纤测温现场试验[J].*华中科技大学学报(自然科学版)*,2013,41(7):15–20.]
- [16] Jin Feng,Zhou Yihong.Application of distributed optical-fiber temperature measurement system to monitoring true temperature field of super-high arch dam[J].*Engineering Journal of Wuhan University*,2015,48(4):451–458.[金峰,周宜红.分布式光纤测温系统在特高拱坝真实温度场监测中的应用[J].*武汉大学学报(工学版)*,2015,48(4):451–458.]
- [17] Jiang Kai,Gao Xiangze,Shen Dongsheng,et al.Inverse of thermal expansion coefficient of mass concrete[J].*Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*,2011,33(6): 17–19.[江凯,高祥泽,谌东升,等.大体积混凝土热膨胀系数反演分析[J].*三峡大学学报(自然科学版)*,2011,33(6):17–19.]
- [18] Jiang Kai,Huang Yaoying,Zhou Yihong,et al.Inverse analysis for thermal parameters of mass concrete based on fiber temperature monitoring[J].*Yangtze River*,2012,43(2):50–53.[江凯,黄耀英,周宜红,等.基于光纤测温的大体积混凝土热学参数反演分析[J].*人民长江*,2012,43(2):50–53.]
- [19] Jiang Kai,Zhou Jianbing,Huang Yaoying,et al.An inverse analysis of thermal diffusivity of mass concrete based on fiber temperature monitoring[J].*China Rural Water and Hydropower*,2012(3):91–93.[江凯,周建兵,黄耀英,等.基于光纤测温的大体积混凝土导热系数反演分析[J].*中国农村水利水电*,2012(3):91–93.]
- [20] Tian Kaiping,Zheng Xiaohui,Huang Yaoying,et al.HBC

- concrete temperature monitoring and thermal parameter inversion based on optical fiber sensing technology[J]. *Water Power*, 2014(4):50–53. [田开平,郑晓晖,黄耀英,等.基于光纤传感技术的低热水泥混凝土温度监测及热学参数反演[J]. *水力发电*, 2014(4):50–53.]
- [21] Li Xiuwen, Tang Guoqing, Zhou Yihong, et al. Diversion bottom outlet equivalent surface heat transfer coefficient of spray polyurethane inversion based on fiber optic temperature detection[J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(9): 107–110. [李秀文,汤国庆,周宜红,等.基于光纤测温反演喷涂聚氨酯的导流底孔等效表面放热系数[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(9):107–110.]
- [22] Huang Dahai, Chen Yanyu, Wang Xiangfeng, et al. Study on prediction of temperature control of super-high concrete arch dam with fiber-optic based distributed temperature sensing[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2010, 41(9):42–46. [黄达海,陈彦玉,王祥峰,等.基于分布式光纤测温的特高拱坝温控预报研究[J]. *水利水电技术*, 2010, 41(9):42–46.]
- [23] Zhou Yihong, Huang Yaoying, Qu Lixin, et al. Study on drafting and pre-warning of double-control index for concrete pouring surface temperature in cold seasons[J]. *Water Power*, 2012, 38(8):48–50. [周宜红,黄耀英,瞿立新,等.低温季节混凝土浇筑仓温度双控指标拟定及预警研究[J]. *水力发电*, 2012, 38(8):48–50.]
- [24] Huang Yaoying, Zhou Shaowu, Fu Xuekui, et al. Dynamic forecasting model of concrete casting warehouse in middle-late cooling age[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2013, 45(4):34–38. [黄耀英,周绍武,付学奎,等.中后期冷却期间混凝土浇筑仓温度动态预测模型[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2013, 45(4):34–38.]
- [25] Qu Lixin, Zhou Yihong, Huang Yaoying, et al. Multi-objective fuzzy synthetic evaluation of temperature status of concrete dam[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2012, 40(6):641–647. [瞿立新,周宜红,黄耀英,等.混凝土大坝温度状态的多目标模糊综合评价[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2012, 40(6):641–647.]
- [26] Zhou Yihong, Zhou Jianbing, Huang Yaoying, et al. Monitoring of temperature gradient on concrete surface by distributed optical fiber and feedback analysis[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2012, 29(9):42–45. [周宜红,周建兵,黄耀英,等.基于分布式光纤的混凝土表面温度梯度监测试验及反馈研究[J]. *长江科学院院报*, 2012, 29(9):42–45.]
- [27] Zheng Xiaohui, Zhou Yihong, Huang Yaoying, et al. Feedback analysis of the insulation effect of insulation pads on pouring cube surface based on distributed optical fiber[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013, 39(8):112–115. [郑晓晖,周宜红,黄耀英,等.基于光纤测温的浇筑仓顶面保温被保温效果反馈分析[J]. *中国农村水利水电*, 2013, 39(8):112–115.]
- [28] Zhou H W, Zhou Y H, Zhao C J, et al. Feedback design of temperature control measures for concrete dams based on real-time temperature monitoring and construction process simulation[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(5):1584–1592.
- [29] Fan Qixiang, Zhou Shaowu, Lin Peng, et al. Construction intelligent control packaged technology and its application for a large hydropower project[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(7):916–923. [樊启祥,周绍武,林鹏,等.大型水利水电工程施工智能控制成套技术及应用[J]. *水利学报*, 2016, 47(7):916–923.]
- [30] Henault J M, Quiertant M, Delepine-Lesoille S, et al. Quantitative strain measurement and crack detection in RC structures using a truly distributed fiber optic sensing system[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 37:916–923.
- [31] Chapeleau X, Blanc J, Hornych P, et al. Assessment of cracks detection in pavement by a distributed fiber optic sensing technology[J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2017, 7(4):459–470.
- [32] Huaizhi S, Shiguang T, Yeyuan K, et al. Monitoring water seepage velocity in dikes using distributed optical fiber temperature sensors[J]. *Automation in Construction*, 2017, 76:71–87.
- [33] Barrias A, Casas J R, Villalba S. Embedded distributed optical fiber sensors in reinforced concrete structures—A case study[J]. *Sensors*, 2018, 18(4):980.
- [34] Zhou H W, Pan Z G, Liang Z P, et al. Temperature field reconstruction of concrete dams based on distributed optical fiber monitoring data[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(5):1911–1922.
- [35] 杜廷松,沈燕军,覃太贵.数值分析及试验[M].北京:科学出版社,2006.

(编辑 张 琼)

引用格式:Liang Zhipeng, Zhou Huawei, Zhao Chunju, et al. Precise localization of segmental and continuous temperature-measuring optical fiber in a concrete dam[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2020, 52(3):52–61. [梁志鹏,周华维,赵春菊,等.混凝土坝分段连续测温光纤测点精准定位方法研究[J]. *工程科学与技术*, 2020, 52(3):52–61.]