

基于光纤测温传感器的坝前水库和升船机塔柱监测资料分析

刘勇军¹, 丁琦华², 耿峻¹

(1.中国长江三峡集团有限公司流域枢纽运行管理中心, 湖北宜昌 443133;

2.中国长江三峡集团有限公司湖北能源集团股份有限公司, 湖北武汉 430077)

摘要: 本文简要介绍了分布式光纤和光栅光纤测温传感器原理及在三峡坝前水库、三峡升船机塔柱的埋设应用。通过对光纤测温传感器在坝前库水温的资料分析, 得出了三峡坝前水库基本无水温分层现象的结论, 光纤测温传感器也为在不同高程空间上的库水温度连续监测和坝前水库淤积监测提供了新的方法。同时光纤光栅技术成功应用在升船机塔柱施工期及运行期的混凝土温度监测, 为该类监测仪器的应用积累了宝贵的工程经验。

关键词: 分布式光纤; 光纤光栅; 温度传感器; 坝前水库; 升船机塔柱

中图分类号: TV691

文献标识码: A

1 概述

三峡升船机是三峡水利枢纽的永久通航设施之一, 为齿轮齿条爬升式垂直升船机, 设计最大过船吨位为 3000 吨级客货轮, 年单向通过能力 350 万吨, 最大垂直升降高度 113m, 上、下游通航水位变幅分别为 30m 和 11.8m, 具有工程规模大、升降高度高、提升重量重、上下游水位变幅大及下游水位变化快等特点, 是目前世界上规模最大、技术难度最高的通航建筑物。升船机由上游引航道、上闸首、船厢室、下闸首和下游引航道组成, 总体布置情况见图 1。主要由船厢室混凝土底板、四个混凝土承重塔柱、剪力墙、连接梁和顶部机房等组成。

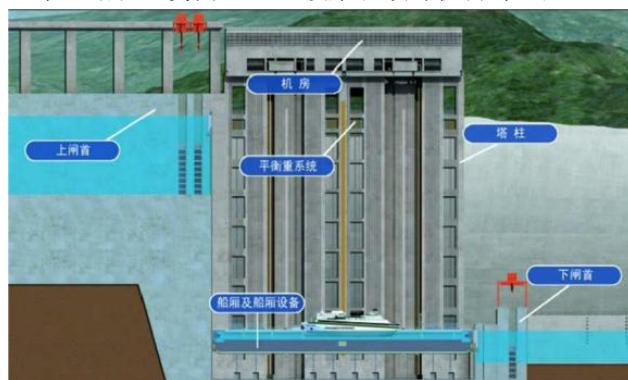


图 1 三峡升船机总体布置图

三峡升船机每个承重塔柱的底板为实体混凝土, 板底高程为 48.0m, 板顶高程为 63.0m, 63.0m 至 194.5m 高程范围内为具有 4 个竖井的“双日字”空心箱体结构^[1]。因此, 三峡升船机塔柱为混凝土高耸薄壁结构, 塔柱变形与应力应变等受温度变化影响较大, 需对三峡升船机塔柱温度的分布及变化进行系统观测。同时为了解三峡大坝库水温度及其变化规律, 对蓄水后的坝前库水温度进行系统观测。

2 光纤温度传感器种类及其原理

光纤温度传感器种类繁多, 主要有分布式、光栅式、辐射式、半导体吸收式、光纤热色、光纤液体、光纤荧光、外差干涉、光纤偏振、干涉型、利用热双金属片构成等多种类型^[2]。因其种类繁多, 光纤温度传感器在大坝安全、建筑、隧洞、边坡、桥梁、航空、电力、交通等众多领域均有应用。光纤温度传感器采用的原理、结构、式样最多, 其潜在的优点是测量精度高、抗电磁干扰、安全防爆、可绕性好, 但现有光纤温度传感器不宜用于易燃易爆场合。

收稿日期: 2020-05-18

基金项目: 复杂工程力学高性能应用软件系统研制 (2016YFB0201005);

作者简介: 刘勇军 (1993-), 男, 湖北孝感人, 助理工程师, 硕士研究生, 主要从事安全监测管理工作。E_mail:

liu_yongjun1@ctgpc.com.cn

坝前库水温度监测分布式光纤测温系统采用定制的 2 芯多模双护套铠装光缆，使用美国 SensorTran 公司生产的 DTS5100-M10 光纤解调仪进行数据采集。升船机塔柱光纤光栅光纤温度传感器及坝前 18 个光栅光纤温度传感器规格和型号为 BGK-FBG-4700 型光纤光栅温度计，双护套单模单芯铠装光缆连接，使用 BGK-FBG-8210 调制解调器进行数据采集。下面结合本文应用简要介绍分布式光纤和光纤光栅温度传感器的原理。

2.1 分布式光纤测温原理

分布式光纤集传感测温与信号传输于一体，采用特定频率的光照射光纤内的玻璃芯，随着光在玻璃芯内传输会产生瑞利（Rayleigh）散射、布里渊（Brillouin）散射和拉曼（Raman）散射等类型的辐射散射。其中拉曼散射式的分布式光纤测温具有较成熟的产品。

分布式光纤测温原理主要利用 OTDR 技术和拉曼散射温度效应。OTDR 技术（光时域反射技术）是利用反射光功率与返回时间的关系检验出光纤线路沿线的损耗及故障，以探测出光纤沿线位置的温度、应变的变化。拉曼散射是入射光光子与光纤中分子发生碰撞作用发生能量交换而产生的，碰撞造成入射光反射，反射光强度与反射点的温度有关，反射点温度越高，发射光强度越大。分布式光纤系统能连续、实时测量温度，具有实时在线、测温精度高、安全和不受电磁干扰等优点。

2.2 光纤光栅测温原理

光纤由芯层和包层组成，主要成分为 SiO_2 ，在芯层特殊掺杂下使芯层折射率 n 大于包层折射率 n_2 大，通过光反射使光在芯层传播。光纤沿线芯层有着大小不同的折射率 n_1 ，从而形成光栅。入射光在具有特定折射率的光栅处反射特定波长（布拉格波长）的光。若光栅处温度改变，受热胀冷缩影响，光栅处反射光波长也会变化，通过测量反射光波长可知光栅处温度变化。光纤光栅分布式传感器系统原理如图 2 所示。

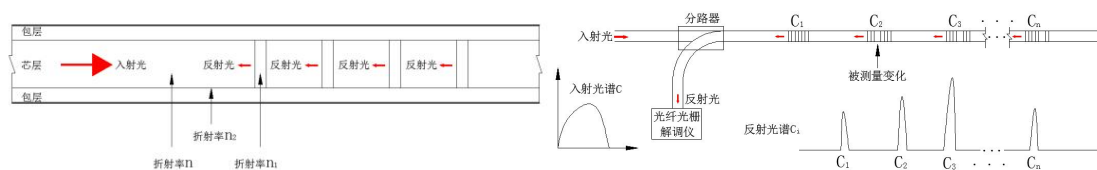


图 2 分布式光纤光栅传感器原理图

光纤光栅传感系统中串接有多个光栅，各光栅常数不同，入射光在光栅处反射不同波长的光，反射光经分路器进入光纤光栅解调仪，解调仪信号探测处理器可探测到反射光波长及变化，经过处理，能得到各光栅处的实际温度。

光纤光栅传感器除了具有普通光纤传感器的许多优点外，还有一些明显优于光纤传感器的地方，其中最重要的就是它的信号为波长调制。这一传感机制的好处^[3]在于：（1）测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗、连接损耗和探测器老化等因素的影响；（2）避免了一般干涉型传感器中相位测量的不清晰和对固有参考点的需要；（3）能方便地使用波分复用技术在一根光纤中串接多个布拉格光栅进行分布式测量。另外，光纤光栅很容易埋入材料中对其内部的应变和温度等进行高分辨率和大范围地测量。

3 光纤传感器埋设实施

3.1 坝前水库温度监测布置

为了解三峡大坝库水温度及其变化规律，在大坝浇筑施工期间，在坝体内部靠近上游面虽埋设有点式温度计用来测量库水温度，但点式温度计数量不多，只能测量库水相应高程局部温度，难以取得空间上连续的温度分布资料。且因埋设点位于坝体内，所测温度受坝体混凝土温度影响，与实际库水温度存在误差。

根据三峡工程质量专家组的意见，对蓄水后的坝前库水温度进行系统观测。结合库水温度观测的实际现状，在左厂 14-2#坝段坝前布设一条从库底到坝顶的测温线，采取分布式光纤和光栅光纤共两套测温光缆进行观测。

分布式光纤测温系统采用 2 芯多模双护套铠装光缆，从 44.05m 高程到 176.55m 高程，每 0.5m 一个测点，共计 270 个测点。光纤光栅温度传感器测点布置上密下疏，即从正常蓄水位，175m 到防洪限制水位以下 10m 处即高程 135m，每 5m 布置一个测点，从高程 135m 至库底淤积层 44.05m 高程每 10m 布置一个测点，共计 18 个温度测点。光纤光栅温度计传感器光缆采用 1 芯单模双护套铠装光缆连接，按回路布置。两套光缆系于同一根受力钢缆上，仪器详细布置见图 3.1。

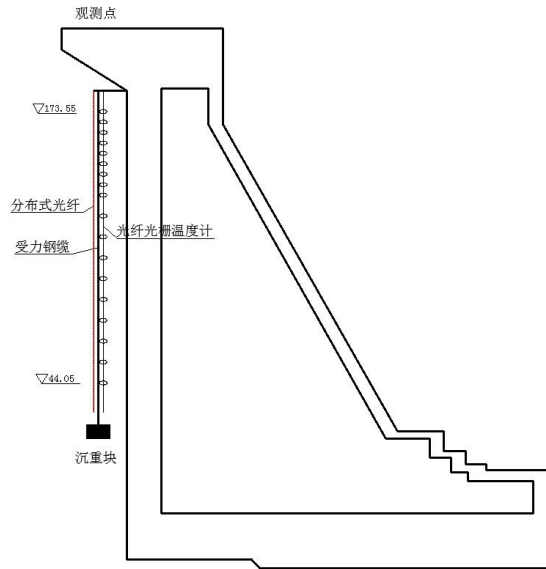


图 3.1 14-2#坝段坝前库水测温光纤布置示意图

3.2 升船机塔柱温度监测布置

升船机船厢室段塔柱为钢筋混凝土高耸薄壁结构，壁厚为 1.0m。为监测塔柱的温度及其变化情况，考虑到各塔柱在温度下的差异，在 3#塔柱和 4#塔柱选择一个监测断面，在该断面筒体内、外侧墙按 20m 左右间距从 62m 高程至 186m 高程范围内共埋设 7 层温度测点，每个层面在墙壁的内外表面上及中间处各埋设 1 个测点。两个塔柱共布设 84 个测点，测点布置高程分别为 3#塔柱：62.0m、84.0m、104.0m、125.0m、144.0m、169.0m、186.0m；4#塔柱：62.0m、79.0m、94.0m、114.0m、134.0m、156.0m、176.0m。仪器详细布置见图 3.2。

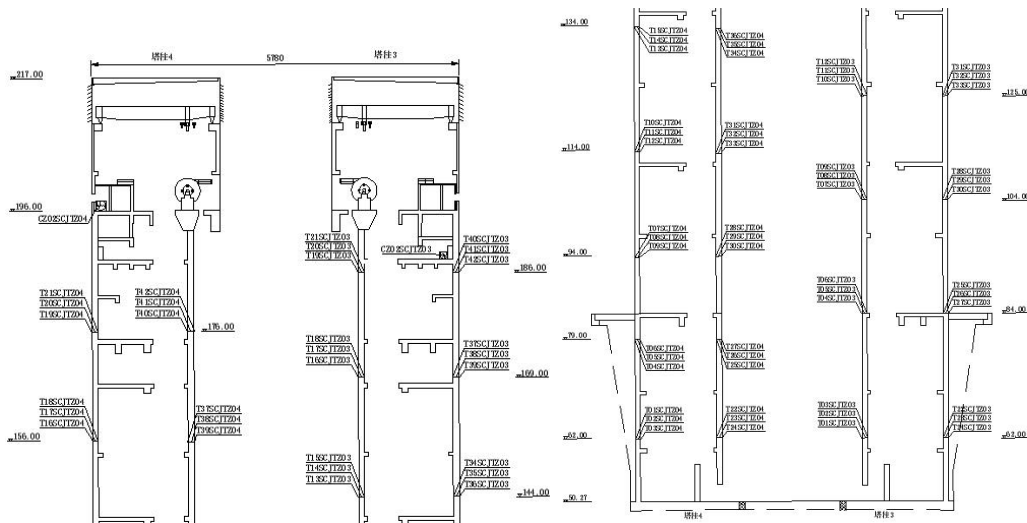


图 3.2 升船机塔柱光纤光栅温度计布置图

4 安全监测结果分析

4.1 坝前光纤库水温安全监测主要成果

(1) 坝前库水温度分布

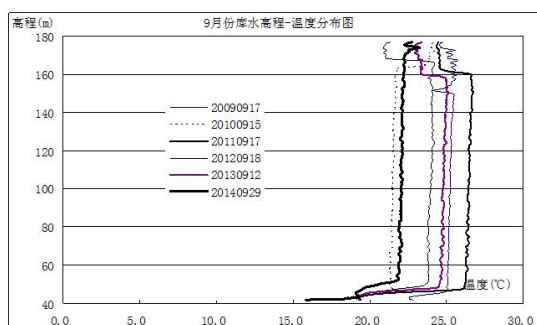


图 4.1 9 月份库水温度~高程分布图

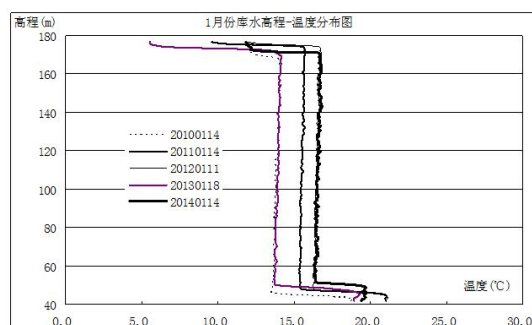


图 4.2 1 月份库水温度~高程分布图

2009~2014 年共计观测 154 测次, 各高程库水温度温差 $<0.5^{\circ}\text{C}$ 有 130 测次; 温差 $0.5^{\circ}\text{C}\sim 1.0^{\circ}\text{C}$ 有 12 测次, 温差 $>1.0^{\circ}\text{C}$ 有 12 测次, 温差最大值 2.7°C (库水温度温差: 同一次观测, $60.05\text{m}\sim 140.05\text{m}$ 各高程库水温度的最大值减去最小值)。监测成果显示, 库水最高温度为 26.8°C , 最低温度 10.2°C , 在水面以下至库底淤积层以上范围内, 水温基本一致, 未见明显的温度梯度。

从图 4.1 可知, 高程 $53.0\text{m}\sim 145.0\text{m}$ 均位于水下, 高程 145.0m 上部曲线转折处, 位于水面以上为气温; 高程 53.0m 以下曲线转折处, 为库底淤积层, 淤积层高程逐年有所上升, 2009 年 9 月库底淤积层高程约 42m , 2014 年 9 月, 淤积层高程约 52.5m 。结合图 4.1 和图 4.2 可知, 库水温度受季节影响较大, 库水温度全年无明显分层现象。

(2) 库水温度变化过程

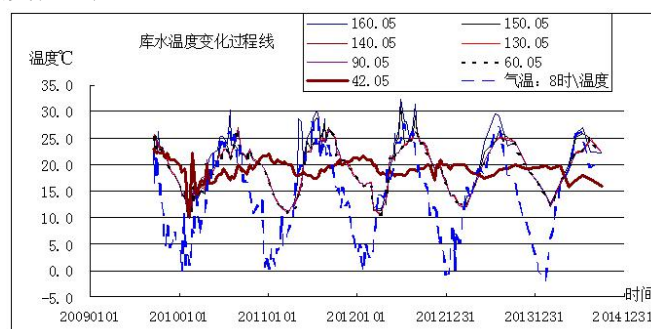


图 4.3 部分高程分布式光纤温度~时间过程线

选取部分高程分布式光纤各次温度测值, 绘制温度~时间过程线图 4.3。从图 4.3 可知, $60.05\text{m}\sim 140.05\text{m}$ 高程各次温度测值基本一致, 表现为温度~时间过程线重叠, 反映了同时间各高程库水温度基本一致。

150.05m 及 160.05m 高程部分温度测值达到 30°C 以上, 与 8 时的气温比较, 温差 $-2.2^{\circ}\text{C}\sim 9.4^{\circ}\text{C}$ 。汛期库水位为防洪限制水位 145.0m , 位于 150.05m 及 160.05m 高程测点高于水位线, 受气温影响明显。

42.05m 高程温度测值波动幅度明显小于其他高程测点测值的波动幅度, 库底淤积层温度相对稳定, 变化幅度小。

(3) 与坝体上游面常规温度计对比

1) 同部位对比

从库底到坝顶的分布式光纤测温线布置在左厂 14-2[#]坝段坝前, 左厂 14[#]坝段坝体内部靠近上游面埋设有常规温度计, 二者部位接近。

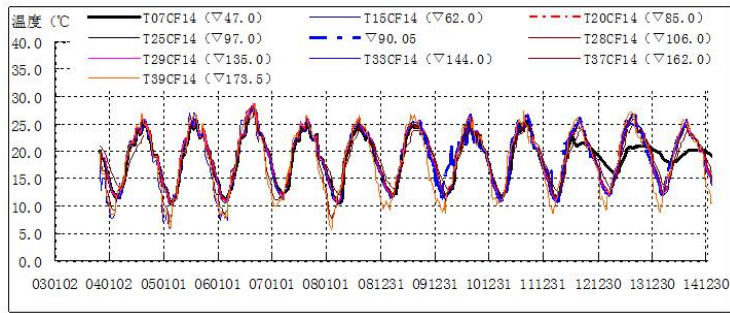


图 4.4 左厂 14#坝段坝面温度~时间过程线

从图 4.4 可知，62.0m~144.0m 高程各测点测值温度~时间过程线基本重叠，反映同时间各高程库水温度基本一致。▽90.05 为分布式光纤 90.05m 高程处的测值，与 62.0m~144.0m 高程各测点测值温度基本一致。

162.0m、173.5m 高程 2 个测点，部分时段位于水面以上，受气温影响，与 62.0m~144.0m 高程各测点测值有所差别。47.0m 高程 1 个测点，2012 年下半年之后，测点测值变幅小于其他测点。表明 2012 年 7 月份之后，该测点位于库底淤积层以下。

2) 与其他部位对比

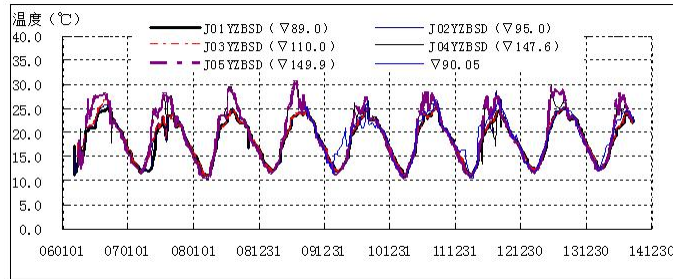


图 4.5 右厂纵向围堰坝段上游面测缝计温度~时间过程线

从图 4.5 可知，各测点高程 89.0m~110.0m，各测点测值温度~时间过程线基本重叠，反映同时间各高程库水温度基本一致。147.6m、149.9m 高程 2 个测点，部分时段位于水面以上，受气温影响明显，与 89.0m~110.0m 高程各测点测值有所差别。

(4) 分布式光纤温度计与光栅温度计对比

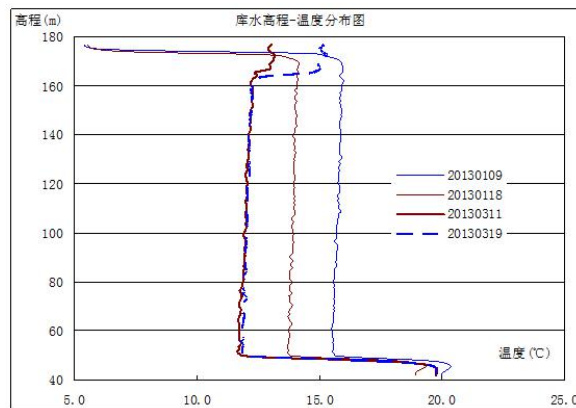


图 4.6 分布式光纤温度与光栅温度~高程分布图对比

共安装光栅温度计 18 支，为点式温度计。从图 4.6 可知，库水温度光栅温度计测值 11.7°C~15.3°C，分布式光纤温度 12.0°C~15.7°C，二者测值沿高程分布情况基本一致，温差最大值 0.4°C。

4.2 升船机塔柱安全监测主要成果

(1) 入仓温度及水化热最高温度

2009 年 12 月 9 日开始，至 2012 年 2 月 5 日止，完成了升船机塔柱 84 支光纤光栅温度计的

安装埋设工作。仪器埋设时间有低气温的1月~3月份，也有高温季节的7月~9月份。

监测成果显示，混凝土入仓温度 4.7°C （2012年2月5日）~ 22.8°C （2011年7月27日），低温季节混凝土入仓温度控制较好，高温季节浇筑的混凝土入仓温度偏高；混凝土覆盖后，由于水化热温升，仪器埋设部位的混凝土最高温度 28.8°C （2012年2月5日）~ 57.3°C （2011年7月27日）；混凝土覆盖后28小时~75小时，达到峰值温度，低温季节浇筑的混凝土水化热温升最高温度低，高温季节浇筑的混凝土最高温度高。水化热温升 15.3°C ~ 37.5°C 。典型水化热温升过程线见图4.7。

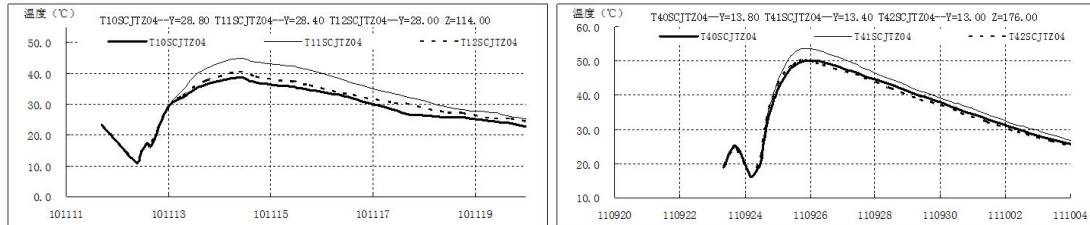


图 4.7 典型水化热温升过程线

从图 4.7 可知，混凝土覆盖后，由于水化热温升，仪器测值明显升高，达到峰值温度后开始明显下降。由于塔柱为薄壁结构，混凝土厚度仅 1m，每层的 3 支温度计按照“中间 1 支、两边各 1 支”的布设方式埋设。埋设在同一塔柱同一侧墙内的 3 支仪器中，中间的温度计测值较两边的温度测值略高，且越接近峰值时温差越明显。塔柱两侧临空，受气温影响，混凝土温度下降较快。

(2) 塔柱混凝土温度变化范围

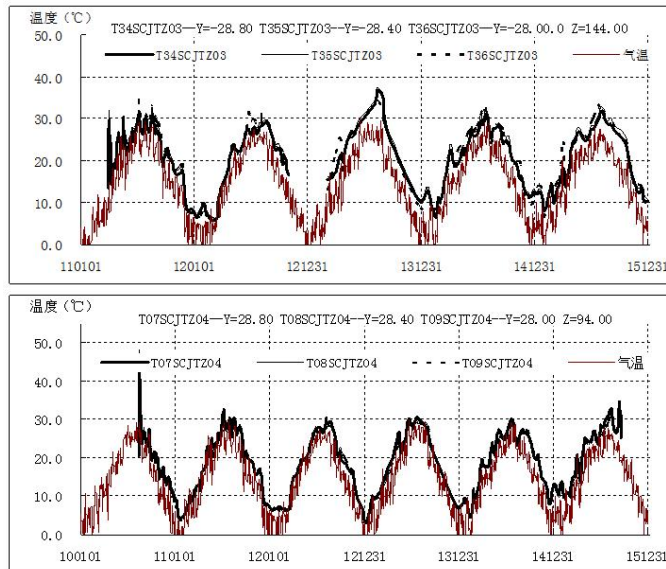


图 4.8 塔柱混凝土温度典型过程线

仪器埋设初期受水化热作用达到最高温度后，塔柱混凝土温度主要受气温影响，统计塔柱混凝土温度特征值不包括水化热最高温度。塔柱各部位混凝土实测最高温度 27.9°C ~ 40.8°C ，最低温度 0.3°C ~ 6.5°C 。最高温度出现在高温季节，最低温度出现在低温季节，塔柱混凝土温度受气温影响明显。三峡坝区 8 时气温 -3.4°C （2011 年 1 月 8 日）~ 30.2°C （2013 年 6 月 19 日），由于常规观测频次为 1 次/旬，且基本为上午 10 时左右进行观测，因此塔柱混凝土最高温度与坝区 8 时气温最高温度出现的时间并不完全相同。从图 4.8 可知，塔柱混凝土温度与坝区 8 时气温变化规律基本一致。

(3) 塔柱混凝土温度分布

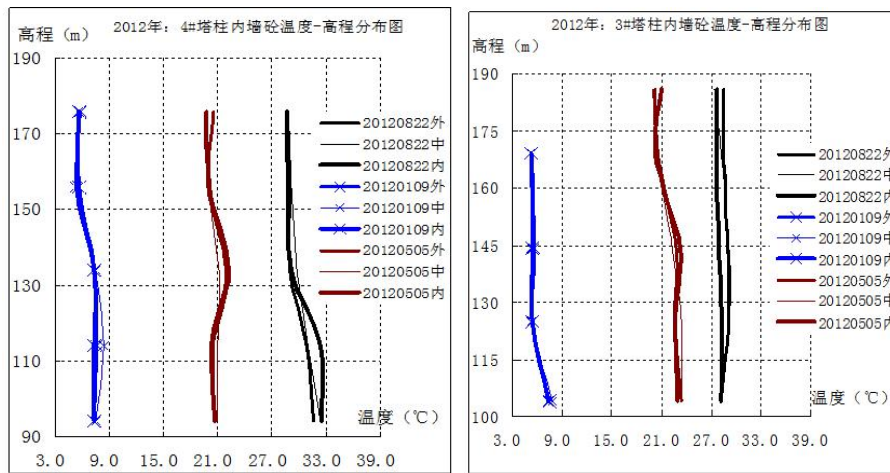


图 4.9 2012 年塔柱内墙温度~高程分布图

从图 4.9 可知，塔柱内墙 2012 年温度分布图看，2012 年 1 月 9 日，3#塔柱、4#塔柱内墙 130m 以上高程的温度基本相同，下部温度较上部温度高。2012 年 5 月 5 日，3#塔柱、4#塔柱内墙 150m 以上高程的温度基本相同，3#塔柱下部温度较上部温度高，比 4#塔柱温度高。2012 年 8 月 22 日，4#塔柱内墙 100m 以下高程的温度比上部高，且内侧比中间及外侧温度高，也比 3#塔柱温度高。塔柱下部空气流通较上部缓，有保温效应。升温阶段，3#塔柱温升较 4#塔柱快。

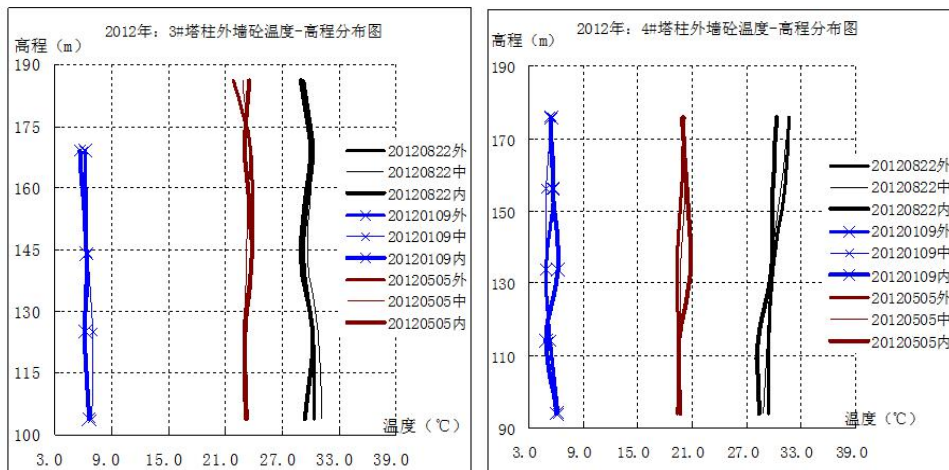


图 4.10 2012 年塔柱外墙温度~高程分布图

从图 4.10 可知，2012 年 1 月 9 日，3#塔柱外墙各高程温度基本相同、4#塔柱外墙温度比 3#塔略低。130m 以上高程的温度基本相同，下部温度较上部温度高。2012 年 5 月 5 日，3#塔柱外墙温度高于 4#塔柱。2012 年 8 月 22 日，3#塔柱 130m 以下高程温度比 4#塔柱 130m 以下高程温度高，130m 以上高程温度接近。

(4) 与同部位埋设温度计相比

3#塔柱在 84m、144m 和 186m 三个高程共埋设有 18 支点式温度计，每层 6 支温度计分别与对应高程的光纤光栅温度测点位置一致。现选取 186m 高程的光纤光栅测点 (T40SCJTZ03、T41SCJTZ03、T42SCJTZ03) 与同位置埋设的点式温度计测点 (T58SCJTZ03、T59SCJTZ03、T60SCJTZ03) 从埋设至进入运行期间的数据比较，见图 4.11。

从图 4.11 可知，塔柱从浇筑混凝土水化热阶段进入运行期间，光纤光栅和埋设点式温度计之间的温度数据及规律基本一致，说明了光纤光栅监测技术在混凝土温度监测中的适用性和可靠性。但受施工和光纤自身脆弱性影响，光纤在施工埋设安装容易被损坏，应注意土建施工中对光缆的保护。

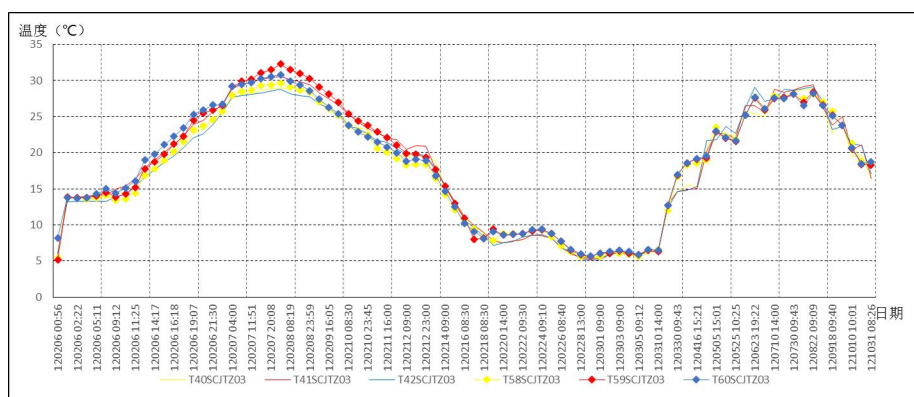


图 4.11 同部位光纤光栅与埋设点式温度计温度对比

5 结论与展望

(1) 受三峡大坝发电泄水及坝前水库狭窄河道地形影响，三峡大坝坝前库水基本为动水，库水温度分层现象不明显。

(2) 在坝体内部靠近上游面埋设有点式温度计用来测量库水温度，测值基本反映库水温度变化，但由于点式温度计数量不多，只能测量库水相应高程局部温度，难以取得空间上连续的温度分布资料。光纤温度传感器为解决在不同高程空间上的库水温度连续监测和水库坝前淤积监测提供了新方法。

(3) 混凝土覆盖后 28 小时~75 小时，达到峰值温度，水化热温升 15.3℃~37.5℃，混凝土最高温 57.3℃。中间部位的温度较两侧略高。

(4) 埋设后，塔柱混凝土最高温度 40.8℃，最低温度 0.3℃。最高温度出现在高温季节，最低温度出现在低温季节，塔柱混凝土温度受气温影响明显。升温阶段，3#塔柱因受阳光照射，温度较塔柱内侧及 4#塔柱高，阳光照射对塔柱温度影响明显。

(5) 本工程光纤光栅监测技术的成功应用，说明了光纤光栅监测技术在混凝土温度监测中的适用性和可靠性，但同时应重视土建施工中对光缆的保护等重要环节，为该类型监测仪器的应用积累了宝贵的工程经验。

参考文献:

- [1] 钮新强.三峡升船机结构关键技术研究[D].华中科技大学,2005.
- [2] 黄燕平,裴丽.光纤温度传感器综述[J].光通信技术,1996,020(001):19-25.
- [3] 姜德生,何伟.光纤光栅传感器的应用概况[J].光电子·激光,2002(04):420-430.
- [4] 黄祥,李端有,耿峻.基于波分复用技术的 FBG 传感器线性阵列测温系统应用研究[J].长江科学院院报,2012,29(09):98-102.

Analysis of Monitoring Data of Dam Front Reservoir and Ship Lift Tower Based on Optical Fiber Temperature Sensor

Yongjun Liu¹, Qihua Ding², Jun Geng¹,

(1. CTG Operation and Administration Center for River Basin Hydro Complex, Yichang Hubei, 443133;

2. CTG Hubei Energy Group Co., Ltd, Wuhan Hubei, 430077)

Abstract: This paper briefly introduces the principles of distributed optical fiber and fiber

Bragg grating temperature sensor and their application in the embankment of the Three Gorges Dam upstream reservoir and the Three Gorges ship lift tower. Based on the data analysis of the optical fiber temperature sensor in upstream reservoir, it is concluded that there is basically no water temperature stratification phenomenon in the Three Gorges Dam upstream reservoir. The optical fiber temperature sensor also provides a new method for continuous monitoring of reservoir water temperature at different elevation spaces and sedimentation monitoring of the upstream reservoir. At the same time, the successful application of fiber Bragg grating Technology in the construction and operation period of the ship lift tower has accumulated valuable engineering experience for the application of optical fiber temperature sensors.

Key words: distributed optical fiber; fiber Bragg grating; temperature sensor; dam upstream reservoir; ship lift tower

作者简介：刘勇军（1993-），男，湖北孝感人，助理工程师，硕士研究生，主要从事安全监测管理工作。E_mail:liu_yongjun1@ctgpc.com.cn

地址：湖北省宜昌市夷陵区三峡坝区三峡水利枢纽运行管理中心

电话：0717-6765683 13477836007