



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.03.029

蔡云丽, 秦忠国, 黄天. 涵闸工程施工期混凝土温度监测系统与水化热参数反演[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(3): 177-182. CAI Yun li, QIN Zhong guo, HUANG Tian. Automatic monitoring system for concrete temperature and inversion analysis of hydration heat parameters in culvert projects[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(3): 177-182. (in Chinese)

涵闸工程施工期混凝土温度监测系统与水化热参数反演

蔡云丽¹, 秦忠国¹, 黄天²

(1. 河海大学 力学与材料学院, 南京 210000; 2. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 针对涵闸工程混凝土温控防裂需要, 研制了全自动化数字测温系统。该系统的硬件部分由数字式温度传感器、采集单元、GPRS DTU 组成, 软件部分包括中心服务器软件和客户端软件。系统实现了 GPRS 公用无线网络覆盖范围内无人值守、多测点远程测量和数据实时共享, 具有体积小、无需布线、运行稳定、精度高等特点。经过实际工程多次应用, 系统运行稳定可靠, 达到预期性能。基于以上系统的测量数据, 结合三维非稳态温度场数值计算, 对特定工程的水化热参数进行了反演。规范给出普硅 42.5 水泥水化热参数为 $m=0.69, n=0.56$; 而根据实测数据反演的结果为 $m=1.85, n=0.79$ 。根据两组参数分别进行了三维温度应力计算, 得到完全不同的计算结果, 前者温度应力未超标, 后者多处超标需要采用温控防裂措施才能保证结构防裂安全。因此对实际工程进行温度监测和水化热参数反演是非常必要的。

关键词: 涵闸工程; 温控防裂; 自动化数字测温系统; 混凝土绝热温升; 水化热参数

中图分类号: TU 755 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)03-0177-06

Automatic monitoring system for concrete temperature and inversion analysis of hydration heat parameters in culvert projects

CAI Yun li¹, QIN Zhong guo¹, HUANG Tian²

(1. College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 210000, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: To control the temperature and prevent cracks of concrete in culvert projects, we developed a fully automatic digital temperature measurement system. The hardware was composed of digital temperature sensors, an acquisition unit, and GPRS DTU. The software part included the central server and client software. The system has realized unattended operation, multi point remote measurement, and real time data sharing within the coverage of GPRS public wireless network. It is small in size, requires no wiring, runs steadily, and has high accuracy. Through several practical applications, it was proved to be stable and reliable. Based on the measured data and the numerical calculation of 3D unsteady temperature field, we retrieved the hydration heat parameters of a specific project. The specifications for P. O 42.5 were: $m=0.69, n=0.56$; and the inverted results were: $m=1.85, n=0.79$. According to these two groups of parameters, we calculated the 3D temperature stress, and obtained completely different results. The former did not exceed the standards, but the latter exceeded several standards and required crack control measures to ensure the safety of the structure. Therefore, temperature monitoring and parameter inversion are very necessary for practical projects.

Key words: culvert project; temperature control and crack prevention; automatic digital temperature measurement system; adiabatic temperature rise of concrete; hydration heat parameter

收稿日期: 2016-07-21 修回日期: 2017-02-23 网络出版时间: 2017-07-05
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170507.0917.002.html>

基金项目: 江苏省 2015 交通科技项目; 江苏省 2015 水利科技项目资助

Funds: 2015 Jiangsu Traffic Science and Technology Project; 2015 Jiangsu Science and Technology of Water Conservancy Project

作者简介: 蔡云丽(1989), 女, 江苏泰州人, 从事工程数值仿真、测试技术开发方面研究。E-mail: 1603373198@qq.com

通讯作者: 秦忠国(1961), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士, 主要从事计算力学及工程仿真、有限元软件开发等方面研究。E-mail: zgqin@hhu.edu.cn

中型水工涵闸工程面广量大,经常出现混凝土施工期温度裂缝^[13]。此类工程温控防裂经费投入非常有限,一般没有条件针对具体工程进行绝热温升试验,温度场温度应力计算所需要的绝热温升曲线一般采用规范公式^[4]。近年来,由于水泥生产工艺的改进,水泥细度和比表面积增加,使得水化热释放速度加快,与规范推荐的计算公式相比较偏差很大。对于土基上的涵闸工程,底板部位一般不会出现裂缝,裂缝一般出现在底板以上具有强约束的墩墙部位^[5]。为了准确确定混凝土绝热温升,一般对先期浇筑的底板进行混凝土温度监测,记录其温度变化过程,由此反推混凝土绝热温升,作为后期墩墙不稳定温度场和温度应力的计算条件。因此,开发高精度、高性价比的自动化测温系统对涵闸温控防裂设计是非常必要的。

自动化测温系统在大坝工程中已经普遍采用,一般由后方服务器、通讯光纤、信号转换设备、NDA 数据采集模块、自动化监测专用电源线等组成^[6-8],但是这类系统并不适用于中型涵闸工程。大坝测温系统服役时间长,往往需要数年的运行时间。为了确保传感器的高可靠性,使用的传感器多为热敏电阻感温元件^[9],一般是模拟信号输出,在采集单元中进行模/数转换,精度较低。此类系统可靠性高,但结构复杂^[10-12],铺设线路工作繁琐,投资大,对一般涵闸工程没有条件也没有必要。

涵闸工程施工期一般为 1~2 年,混凝土结构的壁厚一般在 0.8~2.5 m 范围内,温度变化过程从浇筑温度上升到最高温度再下降到准稳定温度一般在一个月左右,最长不超过三个月。本文针对涵闸工程的测温需求,成功开发了一种高精度、高密度、高性价比的全自动测温系统,并在工程中得到成功应用。根据测量数据反演得到水化热参数,在此基础上温控防裂数值模拟,根据数模结果采用相应的温控措施,取得了预期的防裂效果。

1 混凝土温度自动监测系统

本项目研制的混凝土全自动测温系统由温度传感器,数据采集模块,GPRS 数据传输模块,中心服务器软件,桌面客户端软件构成,系统结构见图 1。

1.1 数字温度传感器

DS18B20 数字温度传感器(图 2)在数字测温计、测温仪、仓库温度采集系统中广泛应用^[13-15],但用于混凝土温度测量尚不多见。选用该传感器的理由是其性能指标符合混凝土短期温度测量要求,高精度温度测量范围在 -10~+85℃ 之间,恰好在

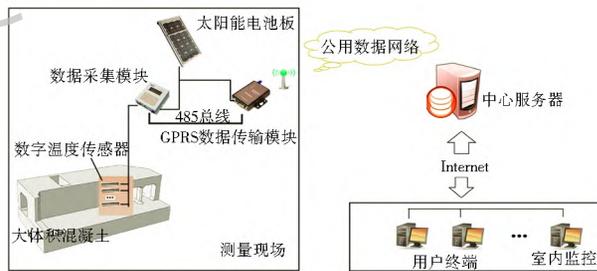


图 1 混凝土测温系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of concrete temperature measurement system

混凝土温度变化范围之内,精度为,高于常用的热电阻和热电偶。另一优势是其内部适配了微处理器,可将温度信号直接转换为数字信号,实现了与单片机的直接接口,从而省去了复杂模/数转换电路,避免了线缆电阻对精度的影响。因此选用 DS18B20 数字温度传感器组成混凝土测温系统的一部分是比较理想的一个选择。

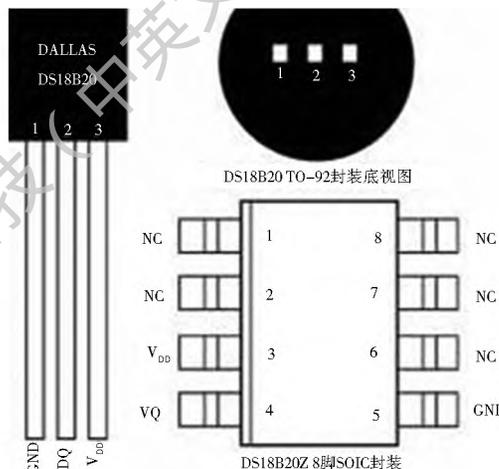


图 2 DS18B20 的外形及引脚排列

Fig. 2 DS18B20's shape and pin arrangement

1.2 温度数据采集模块和 GPRS 数据传输单元

温度数据采集模块采用 51 系列单片机,模块拥有 LED 四数字码管(图 3),可以循环显示传感器相关信息,包括传感器总数量,有效编号传感器数量,各个传感器的编号及采集的温度值等,现场也可以通过数码管查看所测数据。数据采集模块提供了 RS485 总线接口,可以达到多个模块通过 485 总线共同组网的应用,并且能够实现 500 m(或更远距离)单总线数据传输,同时驱动 30 个单总线温度传感器。

GPRS 数据传输单元(GPRS DTU)是通过 GPRS 网络将串口数据和 IP 数据互换进行长距离传送数据的无线终端设备。后台不需要计算机支持,充分发挥了 GPRS 网络永远在线、快速接入的优势,性价比很高,稳定可靠。GPRS DTU 的构造见图 4。



图3 数据采集模块内部结构

Fig. 3 Internal structure of data acquisition module

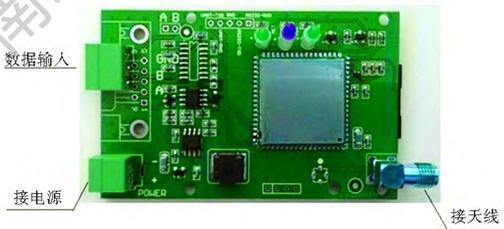


图4 GPRS 数据传输模块内部结构

Fig. 4 Internal structure of GPRS DTU

1.3 中心服务器软件

自主开发的中心服务器软件 TCP Water 是一个 TCP 转发程序,它运行在一个具有公网 IP 地址的服务器上(项目长期租用阿里云的一台云服务器)。TCP Water 在监测期间一直保持运行状态,等待现场数据传输模块和桌面客户端程序的主动连接。其功能是在现场采集单元和客户端之间起到中间人作用,其本身不存储数据,来自客户端的测量指令立即发往现场采集单元。采集单元返回的温度数据立即发往客户端。

1.4 桌面客户端软件

测温系统的客户端软件界面见图 5,具有以下功能。(1) 发送测量指令,可以设置随时测量和自动测量,测量间隔 5 min 到 24 h 任选。(2) 接受现场温度数据,以表格形式进行显示,表头可以设置传感器的名称位置等信息。(3) 以图形显示温度变化过程线,数据保存,打开,编辑功能(图 5)。(4) 一对多连接模式。一个现场监测点的所有数据可以在不同的地点进行查看和管理,项目业主、施工单位、工程监理可以同时查看现场数据。不受距离的限制,实现现场无人值守的远程监测。

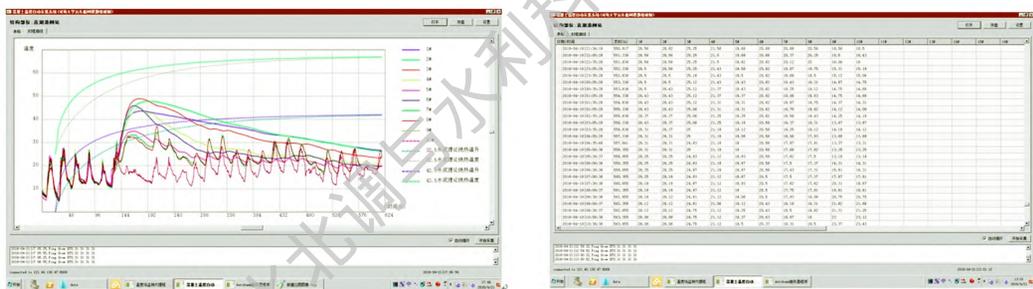


图5 测温系统客户端软件界面

Fig. 5 Client software interface of temperature measurement system

2 工程应用与混凝土水化热参数反演

此测温系统在江苏省东运船闸、西直湖港泵站等工程进行了多次实际应用,分别对船闸上、下闸室底板、输水廊道、流道侧墙,顶板等部位进行测温。在使用中每个采集模块接入 5~ 10 个温度传感器用于测量一个断面上的温度分布和大气温度的变化过程。结果表明系统运行稳定可靠,测量间隔设置在 10 min/次,准确获得了浇筑后温度上升和下降的过程。建设单位、施工单元和科研单位可以同时查看实时的测量结果。

以下根据实测数据对混凝土实际水化热参数进行反演分析。

2.1 规范指数式绝热温升曲线

根据《水工混凝土结构设计规范 SL191-2008》,混凝土在龄期 t 时的绝热升温 T_t 可用式(1)计算

$$T_t = \frac{Q_t W (1 - 0.75p)}{cp} \quad (1)$$

式中: W 为包括水泥及粉煤灰的胶凝材料用量(kg/m^3); p 为粉煤灰掺量的百分数; Q_t 为龄期 t (d) 时的累积水化热(kJ/kg),按式(2)计算

$$Q_t = Q_0 (1 - \exp(-mt^n)) \quad (2)$$

式中: Q_0 为最终水化热(kJ/kg); m 、 n 为常数,可按表 1 取值。

工程采用普通硅酸盐水泥 42.5 级水化热参数和工程实际配合比,每立方米凝胶材料用量为 340 kg ,

表 1 水泥水化热参数

Tab. 1 Cement's hydration heat parameters

水泥品种	$Q_0 / (kJ \cdot kg^{-1})$	m	n
普通硅酸盐水泥 42.5 级	340	0.69	0.56
普通硅酸盐水泥 32.5 级	340	0.36	0.74

掺入 20% 粉煤灰; 取比热 $C = 0.017 kJ / (kg \cdot ^\circ C)$, 密度 $\rho = 2400 kg / m^3$ 。计算得到的绝热温升曲线见图 6:

可见规范计算得到的温升曲线较平缓, 在龄期 2 d 时温升接近绝热总温升的 60%, 6 d 达到 90%, 30 d 温度基本稳定, 最大温升为 42 $^\circ C$ 。

2.2 实测混凝土核心温升曲线

采用本文开发的测温系统对运东船闸底板和侧墙浇筑前后的温度进行监控。运东船闸几何模型及

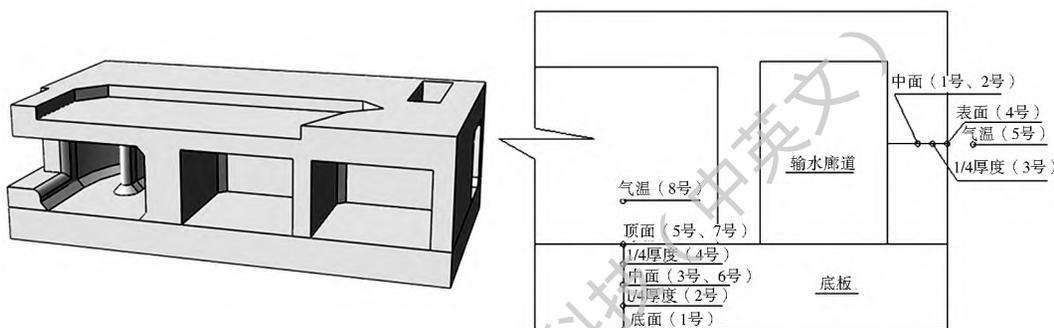


图 7 上闸首输水廊道几何模型与测点布置示意图

Fig. 7 Geometrical model of conveyance culvert of head bay and diagram of measuring points

由于实际工程中混凝土存在表面散热, 显然实测温度曲线在升温阶段的任何时刻都不应该陡于绝热温升曲线。但是通过本文监测数据, 发现混凝土实际温升曲线在浇筑后一段时间内大幅超过规范参数计算的绝热温升, 说明规范的水化热参数和工程实际数值偏离较大。监测结果显示, 水泥水化热在短时间内大量产生, 温度急剧升高, 浇筑后大约 12 h 温度即释放水化热的 60% (根据规范公式需要 48 h), 温升幅值 (约) 和规范公式基本一致。浇筑 72 h 后温度开始下降, 浇筑 30 d 后, 混凝土内部热量基本散发完成, 温度接近气温。

浇筑初期由于混凝土温度高于环境温度, 混凝土一定存在热量散发, 实测温度最大应不超过 (浇筑温度 + 绝热温升)。如果实测温度大于浇筑温度 + 同期绝热温升, 说明绝热温度曲线是不符合实际情况的。本例发现在浇筑后 12 h, 实测温升超过 20 $^\circ C$ 以上。说明绝热温升严重偏离实际情况, 必须进行水化热参数的反演分析。

2.3 水泥水化热参数反演

运东船闸底板厚度为 2.5~ 3 m, 由于混凝土体积较大加之放热迅速, 其核心温度在早期较短的时间

测点布置见图 7。实测底板的温度曲线见图 8 (测温系统在浇筑开始前 24 h 开机, 浇筑温度为 25 $^\circ C$), 虚线是根据规范参数计算的温度 (浇筑温度 + 绝热温升) 曲线。

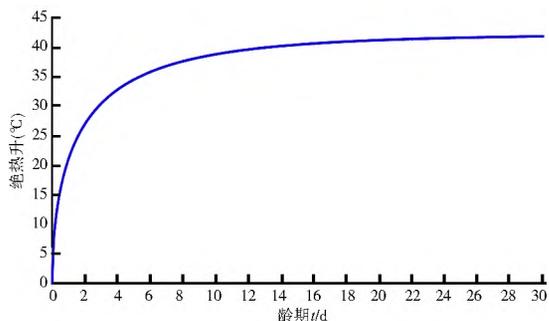


图 6 规范计算的混凝土绝热温升曲线

Fig. 6 Adiabatic temperature rise curve of concrete

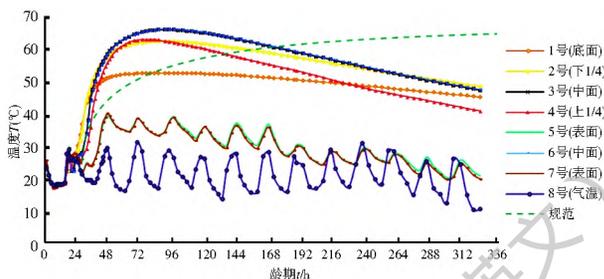


图 8 运东船闸闸室混凝土底板实测温度曲线 (浇筑温度 25 $^\circ C$)

Fig. 8 Measured temperature curve of concrete floor of Yundong lock chamber

内受环境温度影响较小, 数值计算结果显示, 48 h 内底板中面 (即 3 号和 6 号测点) 的温度曲线和绝热温升非常接近。利用式 (2), 根据实测核心温度曲线, 调整其中水化热参数 m 和 n , 通过多次试算, 当取 $m = 1.85, n = 0.79$ 时, 计算得到的温度 (浇筑温度 + 绝热温升) 曲线和实测温度曲线基本一致, 见图 9。

用调参后的公式 (2) 计算流道侧墙绝热温升, 计算的温度曲线与实测核心温度曲线相吻合 (图 10)。由此可见, 反演后的放热曲线在混凝土浇筑初期和实测温度基本吻合。

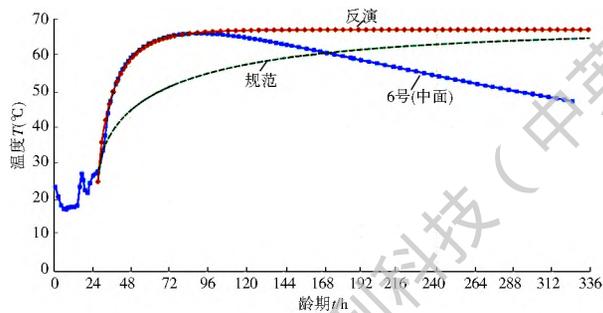


图9 调参后底板温度曲线与实测温度曲线对比(浇筑温度 25°C)

Fig. 9 Comparison between the adjusted and measured floor temperature curves

裂措施。工程取得了理想的防裂效果,未发现温度裂缝。

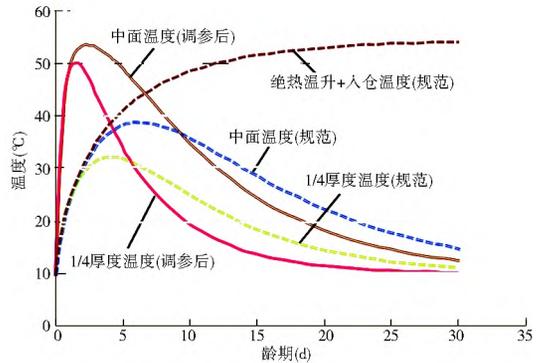


图13 温度时程线

Fig. 13 Temperature history curve

3 结语

目前关于混凝土温控防裂的相关理论已经趋于成熟,温度场温度应力的数值计算的研究也比较充分,但涵闸工程施工期混凝土温度监测尚缺少低投资的自动化设备,本文开发的测温系统为解决这一问题提供了一种技术途径。对一般中小型涵闸工程,在缺少准确热学参数的情况下,借助于测温系统,可以采用以下技术路线进行较为准确的温控防裂数值分析:底板测温→热学参数反演→上部结构温度场温度应力数值计算→确定温控防裂措施。由于土基上的涵闸工程底板很少出现裂缝,裂缝主要在上部墩墙结构,而底板和上部墩墙结构一般采用相同的水泥品种,所以利用底板混凝土取得较为准确的热学参数,对上部结构的数值计算就具有很强的实用意义。

同时,在温控防裂措施的实施过程中,需要随时掌握混凝土温度变化情况以选择恰当的时机采取适当的温控措施来达到预期的防裂效果。比如在混凝土早期温升阶段需采取降温措施来降低最高温度;在后期温降阶段需采取保温措施防止温度下降太快产生过大的温度应力。因此温控监测也必不可少。

总体上,本文开发的测温系统具有体积小、无需布线、无人值守、运行稳定、精度高、远程测量等特点,能够随时随地监控混凝土的温度,满足温控防裂的实际需求,已在多个工程得到成功应用。目前系统的软件和硬件已经基本完成定型,推广使用将大大节省混凝土测温的人力财力。

参考文献(References):

[1] 尹三春. 水工涵闸混凝土结构裂缝成因分析[J]. 硅谷, 2009 (1): 72-73. (YIN Saichun. Cause analysis of concrete struc

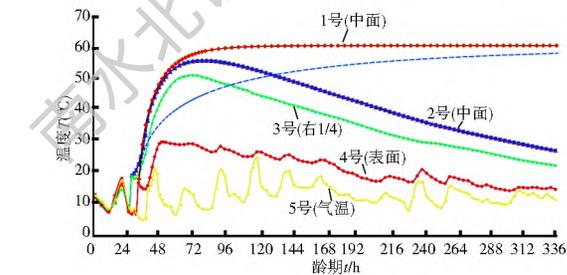


图10 运东船闸流道侧墙理论温度曲线与实测温度曲线对比(浇筑温度 18°C)

Fig. 10 Comparison between the theoretical and measured temperature curves of runner sidewall

2.4 温度场数值模拟

根据上文水化热参数的反演结果,对运东船闸上闸首输水廊道进行了三维温度场数值模拟,得到的计算结果和实测温度过程基本一致(图11-图13)。

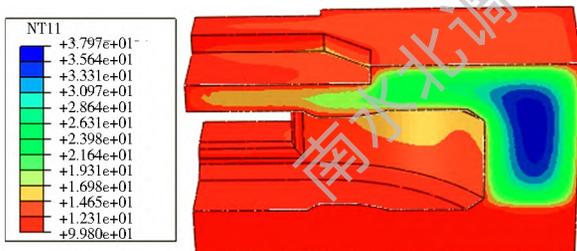


图11 第10天温度场

Fig. 11 Temperature field on the 10th day

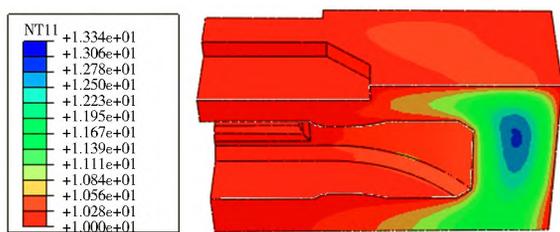


图12 第30天温度场

Fig. 12 Temperature field on the 30th day

本工程在以上工作的基础上,采用反演后的水化热参数对后期浇筑的其他墩墙进行了温度场温度应力数值模拟,根据计算结果采取了相应的温控防

- tures cracks in hydraulic sluices[J]. Silicon Valley, 2009(1): 72-73. (in Chinese)
- [2] 华耀沛, 张仲华. 水工涵闸混凝土裂缝控制技术[J]. 中国新技术新产品, 2009(24): 84-84. (HU A Yaopei, ZHANG Zhonghua. Concrete crack control technology for hydraulic culverts [J]. China New Technologies and Products, 2009(24): 84-84. (in Chinese))
- [3] 方孝伍. 水工涵闸工程混凝土裂缝成因与抗裂技术研究[D]. 南京: 河海大学, 2004. (FANG Xiaowu. Study on cracking mechanism and techniques for prevention from cracking in hydraulic culvert and sluice engineering concrete [D]. Nanjing: Hohai University, 2004. (in Chinese))
- [4] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999. (ZHU Bofang. Thermal stress and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese))
- [5] 张越. 水工涵闸墩墙混凝土结构裂缝及其防裂措施探究[J]. 黑龙江水利科技, 2014, 42(11): 27-29. (ZHANG Yue. Study on structural cracks of pier wall concrete in hydraulic sluices and their prevention[J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 2014, 42(11): 27-29. (in Chinese))
- [6] 申宇, 王滋元, 谢朝晖等. 大体积混凝土无线温度监测系统开发及应用[J]. 工业建筑, 2015, 45(10): 132-137. (SHEN Yu, WANG Ziyuan, XIE Zhaohui, et al. Design and application of wireless temperature monitoring system for mass concrete[J]. Industrial Construction, 2015, 45(10): 132-137. (in Chinese))
- [7] 段绍辉, 张晨, 李小顺. 锦屏一级拱坝施工期混凝土温度监测及自动化监控系统[J]. 水电与新能源, 2015, (12): 16-19. (DUAN Shaohui, ZHANG Chen, LI Xiaoshun. Automatic concrete temperature monitoring system for Jinping I arch dam in construction period[J]. Hydropower and New Energy, 2015, (12): 16-19. (in Chinese))
- [8] 段绍辉, 张晨, 胡书红. 拱坝混凝土施工期温度自动化监控系统研究与应用[J]. 大坝与安全, 2015(5): 8-12. (DUAN Shaohui, ZHANG Chen, HU Shuhong. Research and application of temperature monitoring and control system for concrete construction of arch dam[J]. Dam and Safety, 2015(5): 8-12. (in Chinese))
- [9] 叶志强, 焦生杰, 张亚川等. 混凝土大坝分布式温度监测系统应用研究[J]. 水利水电技术, 2014, 45(2): 129-134. (YE Zhiqiang, JIAO Shengjie, ZHANG Yachuan, et al. Research on application of distributed temperature monitoring system to concrete dam[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2014, 45(2): 129-134. (in Chinese))
- [10] 刘兆峰, 胡志清, 张存磊等. 大体积混凝土计算机无线测温系统的研制与应用[J]. 铁道建筑, 2006(5): 95-97. (LIU Zhaofeng, HU Zhiqing, ZHANG Cunlei, et al. Research and application of computerized wireless temperature measurement system used in huge concrete production[J]. Railway Engineering, 2006(5): 95-97. (in Chinese))
- [11] 俞锐, 方铭, 黄阳等. 大体积混凝土温度监测系统及应用[J]. 工程设计CAD与智能建筑, 2002(5): 60-62. (YU Rui, FANG Ming, HUANG Yang, et al. Mass concrete temperature monitoring system and its application[J]. Engineering Design CAD and Intelligent Building, 2002(5): 60-62. (in Chinese))
- [12] 徐卫军, 李端有, 侯建国. 分布式光纤测温系统在混凝土温度监测的应用[J]. 云南水力发电, 2005, 21(6): 42-46. (XU Weijun, LI Duanyou, HOU Jianguo. Application of distributed optical fiber temperature measurement system to monitoring of concrete temperature[J]. Yunnan Water Power, 2005, 21(6): 42-46. (in Chinese))
- [13] 黄河. 基于 DS18B20 的单总线数字温度计[J]. 湘潭师范学院学报: 自然科学版, 2008, 30(4): 60-63. (HUANG He. Single-bus digital thermometer based on DS18B20 [J]. Journal of Xiangtan Normal University: Natural Science Edition, 2008, 30(4): 60-63. (in Chinese))
- [14] 朱群峰, 王晓芳, 黄磊. 基于 DS18B20 的多路温度采集系统[J]. 船电技术, 2009, 29(2): 7-9. (ZHU Qunfeng, WANG Xiaofang, HUANG Lei. Multichannel temperature collection system based on DS18B20 [J]. Marine Electric & Electronic Engineering, 2009, 29(2): 7-9. (in Chinese))
- [15] 王振, 李长青, 安藏鹏. 基于 DS18B20 的多点温度巡检系统的研究[J]. 成都电子机械高等专科学校学报, 2007, (2): 5-8. (WANG Zhen, LI Changqing, AN Cangepeng. Research on multi-point temperature inspection system based on DS18B20 [J]. Journal of Chengdu Electromechanical College, 2007(2): 5-8. (in Chinese))