

大体积混凝土无线温度监测系统开发与应用*

申 宇¹ 王滋元¹ 谢朝晖² 周 智¹

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁省大连市甘井子区凌工路 2 号 邮编: 116024

2 智性科技南通有限公司, 南通市经济技术开发区景兴路 300 号 邮编 226010)

摘 要: 温度监测是大体积混凝土温控防裂的重要手段之一, 然而大量的工程实践表明现有监测手段仍然存在诸多不足, 突出表现为温度测点可靠性与耐久性差、导线布设工作量繁重; 温控参量需要人工读数并计算, 无法实时捕捉混凝土内部温度信息。这给工程带来了安全隐患, 无法满足现代化施工需要。为了进一步完善大体积混凝土温度监测手段, 本文开发了一套包含无线温度传感器、传感器网络、智能监测软件为一体的大体积混凝土温度监测系统, 并将其应用于某悬索桥承台大体积混凝土施工温控过程中。工程实践表明, 该系统具有布设方便快捷、容纳温度测点数量大、智能化程度高等优点, 实现了对混凝土温度信息的自动采集与存储、实时显示与预警、便捷管理与分析等应用需求, 适合在工程中推广应用。

关键词: 大体积混凝土 温度监测 无线传感器 系统 开发与应用

DESIGN AND APPLICATION OF WIRELESS MASS CONCRETE TEMPERATURE MONITORING SYSTEM

SHEN Yu¹ WANG Ziyuan¹ XIE Zhaohui² ZHOU Zhi¹

(1. Dalian university of Technology, Linggong Road No.2 Ganjingzhi District Liaoning Province Zip: 116024;

2. Zhixing S&T Ltd, Jingxing Road No.300 Nantong Economic-Technological Development District,
Nantong, Jiangsu Province, Zip:226010)

Abstract: Temperature monitoring is an important part in the mass concrete construction process. However, there are still some drawbacks in the existing mass concrete temperature monitoring systems. For example there are large number of wires connecting to the temperature sensors, the monitoring parameters need to be calculated by hand. These drawbacks make the installation of temperature monitoring system very time-consuming and the information is not real-time. In this paper a mass concrete temperature monitoring system is developed, the system includes wireless sensors, wireless sensor networks and a smart monitoring software. The application of the monitoring system in the mass concrete construction of a large suspension bridge proves the convenience and reliability of the system. The features of automatic acquisition and storage of data, display and warning of the temperature of the mass concrete, data management and analysis makes the system fulfills the requirements of the mass concrete temperature monitoring.

Keywords: mass concrete, temperature monitoring, wireless sensors

随着我国经济的高速发展, 大跨桥梁、高层建筑、核电站以及水库大坝等城市基础设施建设方兴未艾。城市基础设施承载着区域经济发展的重要使命, 其施工质量至关重要^[1]。然而, 大型城市基础设施的一些关键部位, 如悬索桥的锚碇和承台、高层建筑的基础、核电站的外壳、水库大坝等, 因其体积巨大, 混凝土凝结硬化初期释放大量热量无法及时散发, 从而使得其内部温度可高达 60~80℃,

产生的温度变形在约束作用下形成了较大的拉应力^[2], 当拉应力超过混凝土相应龄期的抗拉强度时

* 第一作者: 申宇 男 1989 年出生 硕士研究生

Email: shenyufly@163.com

通讯作者: 周智 男 1973 年出生 教授 博导

Email: zhouzhi@dlut.edu.cn

收稿日期: 2014-XX-XX

就会造成结构开裂^[3-5]。如何更有效地获取大体积混凝土内部温度分布与变化规律,并采取相应的控制措施是防止大体积混凝土开裂的重中之重^[6]。

近年已建或在建的大型城市基础设施均针对工程所涉及的大体积混凝土温度进行监测。如南京四桥(悬索桥)北锚碇(58782.6m³)采用JGY-100型智能化数字多回路温度巡检仪(热电偶温度传感器)对混凝土内部温度、环境温度、冷却水管进出水口温度进行了监测^[7];江苏省昆山得利国际大厦(27层)基础筏板(2900m³)采用有线电流型半导体温度传感器进行温度监测^[8];海阳核电 AP1000项目(百万千瓦级第三代核电站)1#核岛底板(6879m³)采用了78个温度测点^[9];广西乐滩水库大坝(坝高130.2m,长172.3m,顶部宽度8m)采用热敏电阻温度计进行温度监测^[10]。

然而长期的工程实践揭示出了现存监测系统的不足:热敏电阻温度传感器阻值与温度的关系非线性严重,元件的一致性差,互换性差;热电偶温度传感器冷端需要温度补偿,对延长导线有特殊要求,探头和导线总体成本高;PN结温度传感器需要特殊的恒压源或恒流源,测温范围小,互换性差。且上述传感器均需要人工进行逐个标定,人工标定过程中难免引入误差,从而降低了传感器的精度。同时,测温元件带来的大量导线致使接线工作异常繁琐^[11-12],从而进一步限制了温度监测系统的大规模应用。在总线技术诞生后,温控人员能够把测温元件的引线统一接入到总线当中^[13-16],这样大大降低了线路布设的数量和难度,在一定程度上实现了传感器联网,提高了测温的便利性。然而,总线所能够承载的传感器数量有限,且多个传感器的信号在总线上易于串扰;大量的引线管理困难,一旦总线损坏,所有传感器立即失效。在温控参量提取方面,如内部温度、表面温度、内表温差、降温速率等温控参量仍依赖于温控人员的现场计算,无法满足实时监测的需要,常常错失了下达温控指令的最佳时机。

本文针对现今大体积混凝土温度监测手段的不足,在其基础上发展了一种一体化的监测系统,包含一种快速布设的无线传感节点;能够容纳上万个温度节点的大规模无线传感网络;能够实现混凝土温度信息的采集与存储、显示与预警、管理与分析的智能化监测软件;从而更好的提升了大体积混凝土温控的信息化水平。

1 需求分析

为使大体积混凝土无线温度监测系统能够有良好的工程适用性,根据《大体积混凝土施工规范》(GB 50496-2009以下简称规范)并结合大体积混凝土施工温控实践,提出如下需求:

(1) 功能需求 温度监测系统应包含的监测参量有:混凝土中心温度、表面温度、冷却水管温度、环境温度等。以及在此基础上自动计算里表温差、降温速率、最高温升等关键温控指标。

(2) 性能需求 根据规范要求,大体积混凝土在浇筑后的最高温度应小于75℃,降温速率应控制在2℃以内。考虑到一定的冗余度,大体积温控监测系统应具有测温范围为0~100℃。同时要求大体积混凝土温控监测系统的分辨率必须优于1℃。

(3) 可靠性需求 大体积混凝土施工现场环境恶劣,如灰尘、水和腐蚀性液体、焊接产生的火花、振捣产生的剧烈震动等,需要大体积混凝土温控系统特别是传感探头和信号传输线具有较高的可靠性,以免在传感器布设之后由于各种原因发生损坏。

(4) 使用需求 考虑到大体积混凝土浇筑层施工周期短,留给传感器布设的时间极为有限,这要求尽可能减小埋设温度传感探头所用的时间。

2 硬件设计与实现

在需求分析的基础上,设计出如图1所示的大体积混凝土温度监测系统。系统共包含五层架构,从底层到顶层分别是:无线温度感知层、无线信号传输层、现场监测与转发层、互联网传输层、远程监测层。他们的功能分别如下:

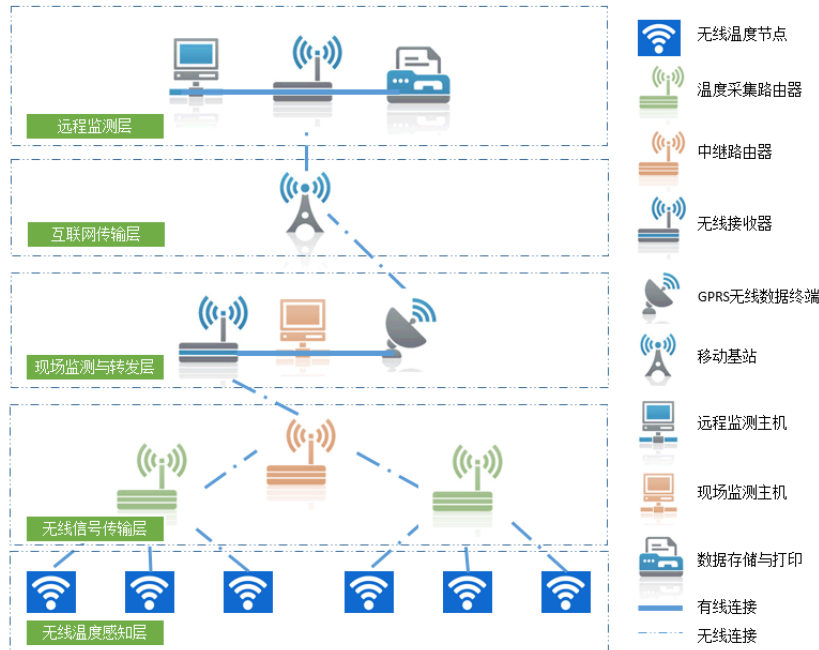


图 1 硬件系统总体框架图

Fig.1 Hardware design of the Monitoring system

(1) 无线温度感知层 无线温度感知层由若干个无线温度传感器节点组成，它们负责收集大体积混凝土各部位的温度信息并通过无线信号发送到无线数据采集层。

(2) 无线数据采集层 无线数据采集层由温度采集路由器和中继路由组成。温度采集路由器负责接收无线温度传感器节点发射的无线信号，中继路由用来转发温度采集路由器的数据。无线信号传输层增加了无线传输距离，拓展了无线信号覆盖范围，加强了无线信号强度，从而能够覆盖整个施工区域。

(3) 现场监测与转发层 现场监测与转发层由无线接收器、现场监测主机和 GPRS 无线数据发送单元组成。无线接收器负责接收由无线信号传输层发送的无线温度信息。现场监测主机运行大体积混凝土温控监测软件。GPRS 无线数据发送单元把温度数据通过互联网发送到远程监测室。

(4) 互联网传输层 互联网传输层借助运营商搭建的网络，把现场的温控数据传输到远程监测主机上。

(5) 远程监测层 远程监测层通过互联网收集各施工现场的温控数据并显示在远程监测主机上，以方便温控专家能够及时把握温控数据和提出温控建议。

根据硬件设计要求，无线温度节点采用了 DS18B20 数字温度传感器和 CC2530 芯片作为解决方案。DS18B20 具有体积小、硬件开销低、精度高等特点，测温范围为 $0^{\circ}\text{C} \sim +125^{\circ}\text{C}$ ，精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，

分辨率为 0.1°C ，满足总体设计的需求。CC2530 是 Zigbee 的一个片上系统解决方案，能够以非常低的总的材料成本建立强大的网络节点。它具有标准的增强型 8051MCU，系统内可编程闪存，8KB RAM 和超低功耗等特性。DS18B20 通过其特有的三线连接方式与 CC2530 芯片连接。最后利用计算机的串口把开发好的 Zigbee 协议栈烧录到 CC2530 中。无线温度节点的实物如图 2 所示。



图 2. 无线温度节点

Fig.2 Wireless temperature sensor



图 3. 路由节点和接收器

Fig.3 Router and receiver

温度采集路由器、中继路由器、接收器同样采用了 CC2530 片上系统解决方案，在无线温度节点上增加了外置天线以增强无线信号。为了方便与服务器连接，在接收器上增加了 USB 接口电路。无线温度节点、无线温度采集路由器和无线中继路由器均采用 18650 可充电锂电池供电。路由节点和接收器实物如图 3 所示，硬件系统的性能指标如表 1 所示。

表 1 硬件系统性能指标

| Table 1 Performances of Hardware | |
|----------------------------------|-------------|
| 项目 | 性能指标 |
| 测温范围 | 0℃~+125℃ |
| 分辨率 | 0.1℃ |
| 测温误差 | ±0.5℃ |
| 采集间隔 | 1 秒~24 小时 |
| 无线传输距离 | 50 ~300 米 |
| 测点数量 | 65535 个 |
| 工作频率 | 2.4GHz |
| 工作电压 | 3.0~5.5V/DC |

3 软件设计与实现

根据对温度监测系统的需求分析，监测软件应实现对大体积混凝土中心温度、表面温度、冷却水管温度、环境温度的实时显示与历史温度查询。以及在此基础上获得里表温差、降温速率、最高温升等关键温控指标。因大体积混凝土施常设多个浇筑层，软件应能够对多个浇筑层监测和控制。同时为了使温度显示更加直观，软件把温度直接显示在大体积混凝土三维模型上。为了满足温控人员后续数据分析的需求，软件能够把温控数据按照指定的时间间隔导出到 Excel 表格中。

软件系统划分六大功能模块与三大基础支持模块（如图 4 所示）。他们的作用分别如下：

（1）传感器与任务设置 传感器设置负责对传感器的通道、温度采集时间间隔进行设置；任务设置负责对项目名称、数据库路径、本次任务（浇筑层）的传感器集合、传感器编号与通道的对应关系以及通信端口号和波特率进行设置。

（2）传感器列表显示 传感器列表显示是针对每个温度测点，显示其传感器编号、温度、通道、电压、最后更新时间以及状态信息（如传感器电量低、传感探头异常等信息）。

（3）三维模型显示 把对应浇筑层的温度测点直观地显示在结构三维模型上。软件支持多个浇筑层温

度测点的分别管理和显示。

（4）历史曲线 显示某个特定温度节点的温度历史曲线。

（5）温控参量 显示某温度测点的最高温升、降温速率。

（6）数据导出 按指定时间间隔从数据库中导出一个或多个测点的温度信息到 Excel 中。

（7）通信模块 该模块是软件底层的模块，它负责直接与操作系统通信端口通信，读取通信端口收到的二进制数据并发送到数据帧校验与翻译模块。

（8）数据帧校验与翻译模块 该模块为基础模块，从通信端口通信模块收到二进制信息，并根据通信协议收到的数据是否正确与完整。忽略错误的数

据，并把正确的数据分别发送到传感器列表显示与传感器列表显示，从而实现温度数据的实时显示。

（9）数据库模块 该模块为基础模块，从它的下一层，即数据帧校验与翻译模块提取数据并把对应的测点温度信息存储到数据库中。数据库模块为他的上层模块（历史曲线、历史曲线、数据导出模块）提供数据查询服务。



图 4 软件系统总体框架图

Fig.4 Software design of the Monitoring system

根据软件系统的总体设计要求，采用了 Visual Studio 2013 集成开发环境和 C#开发语言。数据库采用了 mySql，绘图采用了 GDI+，代码量约 5000 行。软件实现了数据采集与温度测点列表显示、三维模型显示、测点温度历史曲线、自动计算与显示温控参量、数据库管理系统和数据导出到 Excel 等设计功能。监测软件运行效果如图 5 所示。

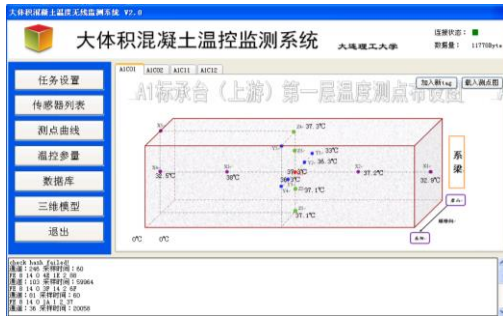


图 5. 监测软件运行界面

Fig.5 User Interface of monitoring system

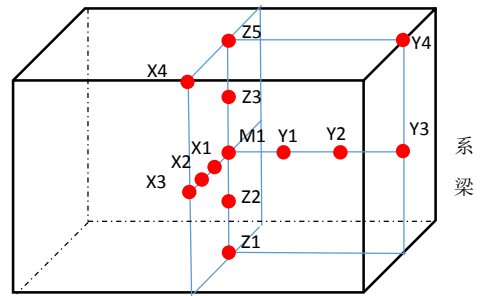


图 6 测点位置与编号

Fig.6 Sensing position and Number

4 工程应用

4.1 工程概况

某悬索桥索塔承台其平面尺寸为 $23.5\text{m} \times 30\text{m} \times 8.0\text{m}$ ，每侧承台上设一独立塔座厚度为 2.0m ，塔座顶面纵横向尺寸为 $15.5\text{m} \times 22.35\text{m}$ ，底面纵横尺寸为 $19.5\text{m} \times 26.35\text{m}$ ；系梁宽 10.0m ，混凝土方量达到 13300m^3 ，是典型的大体积混凝土。

承台先浇筑右幅，再浇筑左幅，最后浇筑系梁，每幅分 3 层浇筑。其右幅第一层最先浇筑，浇筑厚度为 2.2m 。本文选取承台右幅第一层作为监测对象，说明大体积混凝土无线温度监测系统的应用情况。

4.2 测点布设与数据采集

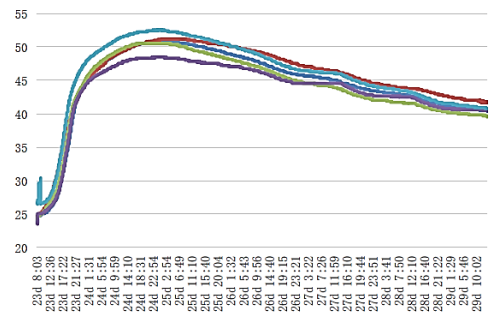
根据规范要求，选取中心温度、表面温度为监测参量，在此基础上，由软件自动计算内外温差、降温速率等温控参量。考虑到结构的对称性，选择在上混凝土中下层、XYZ 轴向布设了 13 个无线温度测点，传感器布设位置及编号如图 6 所示。并在冷却水管进出水口增设温度测点。同时布设温度测点监测环境温度变化。布设时，温度探头固定在待测位置并通过延长线与 Zigbee 无线发射模块连接。无线发射模块的天线外露至混凝土浇筑高度之上，并用塑料袋包裹防水，并在监测任务结束之后回收利用。布设过程见图 7 所示。

2014 年 5 月 20 日承台左幅第一层完成钢筋绑扎及传感器布设工作，于 5 月 22 晚 21:00 开始浇筑工作，至次日下午 17:00 完成浇筑。截至到 5 月 29 日一共 168h 的温度监测数据如图 8 所示。

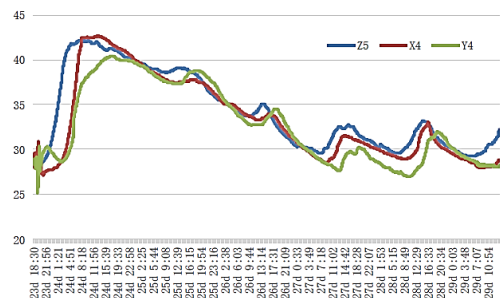


图 7 测点布设

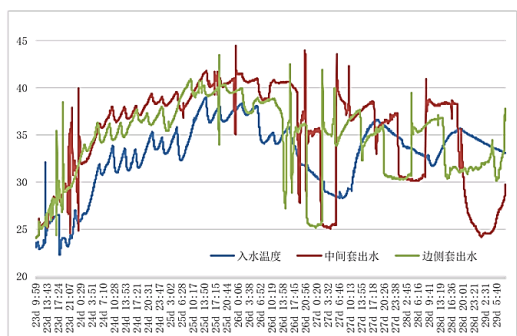
Fig.7 Sensor Deployment



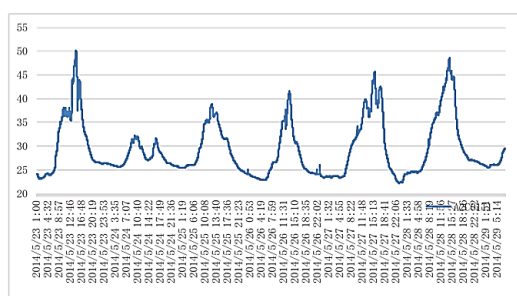
(a) 中心层测点温度发展曲线



(b) 表面层测点温度发展曲线



(c) 冷却水管进出口温度发展曲线



(d) 环境温度发展曲线

图8 温度监测数据

Fig.8 Temperature monitoring data

4.3 温控过程与结果

根据规范要求与温控参量的实测值，采的温控措施与温控结果如下：

(1) 混凝土覆盖水管后（此时混凝土入模温度为25℃），即开始通水，并加入了冰块以降低入水温度，增强降温效果，压制混凝土初始温度，以达到控制混凝土最高温度、延缓温升的效果。

(2) 根据监测系统提供的实时数据，为控制内表温差：将流出温热水用于顶面蓄水对顶面进行保温；在钢模板外喷涂 1.5-2.0 cm 聚氨酯泡沫对侧面进行保温。

(3) 根据监测系统监测并计算出的混凝土内部平均温度、内表温差、内部温升速率、进出水口温差等信息，调整水流速度。

(4) 5月27日下午14点，监测结果显示混凝土顶面与环境温差小于15度，中心与表面温差小于17℃，内部平均温度小于45℃（中心顶面Z5测点30.4℃，内部最高温度X1测点47℃，仓内环境温度T4测点24℃），满足撤除蓄水条件，顶面开始撤除蓄水。撤除蓄水后覆盖土工布开始进行养护工作。

(5) 5月28日早8点，监测结果显示，侧表面X3测点41.6℃，中心最高Z2测点44.3℃，仓内环境温度T4测点28.9℃，满足规范要求的拆模条件，

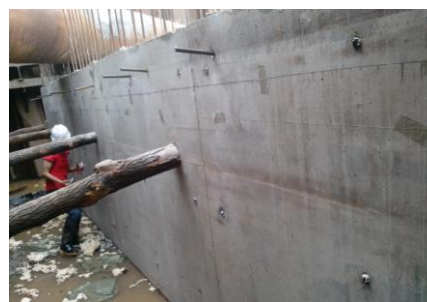


图9 拆除模板后未发现温度裂缝

Fig.9 No crack after removal of template

侧面开始模板拆除工作。模板拆除后，如图9所示，未发现温度裂纹出现并及时覆盖土工布和防风布进行养护工作。

(6) 根据实测内部降温速率，停水前一天开始逐步减小水流速度后，于28日下午17点完全停止通水。

(7) 截至到5月29日，左幅承台第一层在相应温控措施下，温度按预计情况发展，已经历温度上升阶段与温度峰值，进入平稳降温阶段。根据监测结果，顶面撤除蓄水后进行凿毛工作，未发现裂纹产生。侧面模板后也未见裂纹产生，并进行了回填工作。

(8) 在温控监测工作结束后，导出各温度测点数据以形成温控监测报告并提交监理与业主进行备案。

本系统可通过无线温度节点实时扑捉大体积混凝土内温度信息，并通过配套软件采集并显示相关温控参量，大幅缩减了传感器布设时间与温控作业难度。表2列举了几种常用的大体积混凝土温度监测手段，并对比了他们的工作性能。通过对比可以看出，本系统具有优良的工作性能，包括：布设方便快捷、实时性好、精度高、一致性好、测点数量大、智能化程度高等，因此具有良好的工程应用前景。

表2 几种大体积混凝土温度监测手段对比

Table 2 Comparisons of several monitoring methods

| 方法 | 便 利 性 | 实 时 性 | 一 致 性 | 测 点 数 | 智 能 化 |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 酒精温度计法 | 差 | 差 | 优 | 少 | 差 |
| 热敏电阻法 | 中 | 中 | 差 | 少 | 中 |
| 热电偶法 | 中 | 中 | 中 | 少 | 中 |
| 总线测温法 | 良 | 良 | 优 | 中 | 中 |
| 本系统 | 优 | 优 | 优 | 多 | 优 |

5 结论

本文设计并开发了一套大体积混凝土无线温度监测系统,并应用于实际工程中,其主要结论如下:

(1) 研制了硬件系统,实现了无线温度感知、无线数据传输、无线数据采集、现场与远程监测等核心功能;

(2) 开发了软件系统,实现了大体积混凝土中心温度、表面温度、里表温差、冷却水管温度、环境温度的实时显示与历史温度查询等功能。以及在此基础上实现了自动计算降温速率、最高温升等关键温控指标的功能。同时实现了测点温度在三维模型上的直接显示以及监测数据导出到 Excel 的功能;

(3) 工程实践表明,该系统具有布设方便快捷、温度测点数量大、智能化程度高等优点,实现了对混凝土温度信息的自动采集与存储、显示与预警、管理与分析等应用需求,具有良好的工程应用前景。

参考文献

- [1] 欧进萍. 重大工程结构的智能监测与健康诊断[C] 第十一届全国结构工程学术会议论文集第 I 卷, 2002 .
- [2] 邹建文,徐伟. 超大体积承台混凝土温升变形影响因素应用研究[J]. 结构工程师, 2009, (6) 133-137.
- [3] 薛礼兵,王旭峰. 大体积混凝土温度裂缝在实际工程中的控制技术[J]. 结构工程师, 2006, (4) 86-88+93.
- [4] 龚剑,刘颖浩,袁勇. 大体积高强混凝土早期温度、应变测试与分析[J]. 结构工程师, 2012, (1) 111-116.
- [5] 宋正峰,张会东,赵文博. 大体积混凝土工程裂缝控制[J]. 结构工程师, 2011, (S1) 285-287.
- [6] 朱伯芳. 全面温控 长期保温 结束“无坝不裂”历史[C] 第五届碾压混凝土坝国际研讨会论文集(上册), 2007 .
- [7] 王承江,牛亚洲,田欣,等. 南京长江第四大桥北锚碇工程施工关键技术[J]. 中国工程科学, 2013, (8) 31-36.
- [8] 侯景鹏,熊杰,袁勇. 大体积混凝土温度控制与现场监测[J]. 混凝土, 2004, (5): 56-58.
- [9] 王书峰,陈建峰,吴晓静. 温控信息技术在核电站大体积混凝土裂纹控制中的应用[C] Proceedings of International Conference on Engineering and Business Management (EBM2010), : , 2010: .
- [10] 张玉霞. 水库大坝混凝土浇筑温度控制措施及其监测工作探讨[J]. 水利建设与管理, 2012, (9): 27-28+26.
- [11] 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, (4): 60-63.
- [12] 王胜利,冯伟,刘剑科. 单总线分布式测温系统[J]. 工矿自动化, 2005, (5): 49-51.
- [13] 肖志飞,张铁肩,孙秋桐. 基于 DS18B20 的单总线温度巡检系统[J]. 电子工程师, 2005, (12): 57-59.
- [14] 贾洪彩,齐志才,马占敖,等. 基于 DS18B20 多点温度巡检系统的研究[J]. 吉林建筑工程学院学报, 2003, (4): 49-53.
- [15] 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, (2): 7-9.
- [16] 郑宝瑞,陆仲达. 基于 DS18B20 的智能温度巡检仪的研制[J]. 齐齐哈尔大学学报(自然科学版), 2010, (3): 21-23.