

文章编号:1672-3031(2018)01-0009-07

大体积混凝土防裂智能监控技术及工程应用

李松辉, 张国新, 刘毅, 张龔

(中国水利水电科学研究院 水电可持续发展研究中心, 北京 100038)

摘要: 防裂是混凝土坝建设中的一个重要任务。绝大多数混凝土坝裂缝都与温度应力有关, 因此温度控制是防裂的主要手段。本文在总结国内几十座混凝土坝温控防裂实践经验的基础上, 以现有温控防裂理论为技术支撑, 紧密结合大体积混凝土温控防裂工作中的关键技术问题, 采用理论分析、数值计算、软硬件研发、室内试验、现场试验等多种手段, 通过深入研究形成了智能化监控感知—分析—控制的三步曲架构, 开发了一套具有完整自主知识产权的大体积混凝土防裂智能化监控系统。该系统在鲁地拉、藏木、锦屏一级等工程获得成功应用, 以混凝土温控施工监控的智能促进温控施工的精细化, 达到大体积混凝土防裂的根本目的。

关键词: 大体积混凝土; 温度控制; 防裂; 智能监控

中图分类号: TV62

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2018.01.002

1 研究背景

大体积混凝土裂缝是长期困扰工程界的问题之一, 裂缝的出现会影响工程的安全性和耐久性, 增加后期修补费用, 带来经济损失和不利社会影响。温度控制是混凝土防裂的主要手段, 近期建设的高混凝土坝多存在浇筑仓面大, 混凝土标号高, 筑坝条件恶劣等特点, 增加了混凝土的开裂风险, 提高了温控防裂难度, 仅靠传统的防裂方式, 已难以保证大坝不出现危害性裂缝, 近期建设的某高坝的经验教训也充分说明这一点^[1]。

现有温控模式存在“不完整、不及时、不准确”的问题。即: (1) 监测断面有限, 监测仪器和频次偏少, 每天只能获取典型断面的有限数据, 即“不完整”; (2) 监测体系不够自动化、实时化, 每天测得数据量有限且不能及时反馈, 而温度控制是涉及气象、水文、材料、施工、结构等跨专业的复杂问题, 在条件变化或出现问题需要决策时, 一般也难以实时给出及时有效的解决方案, 即“不及时”。(3) 现场资料一般由施工单位提供, 监测数据往往需要经过人工采集和后处理, 即“不准确”^[1-4]。

本文在总结国内几十个混凝土坝温控防裂实践经验的基础上, 以现有温控防裂理论为技术支撑, 结合大体积混凝土温控防裂工作中的关键技术问题, 采用理论分析、数值计算、软硬件研发、室内试验、现场试验等多种手段, 围绕大体积混凝土防裂智能监控的理论方法、数字模型、关键技术及系统进行研究与开发, 形成智能化温控感知—分析—控制的三步曲, 开发出一套具有完整自主知识产权的大体积混凝土防裂智能化监控系统, 并在鲁地拉、藏木、锦屏一级等工程获得成功应用。

2 大体积混凝土防裂智能监控技术构架

大体积混凝土防裂智能监控技术首先要解决的是确定感知量、分析量和控制量的问题, 如图1所示。在感知信息方面, 提出了大体积混凝土智能监控的理念, 形成了大体积混凝土温控全要素监测

收稿日期: 2016-10-16

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0201003); 国家自然科学基金项目(51439005, 51579252); 水利部技术示范项目(SF-201701); 中国水科院科研专项(SS0145B932017)

作者简介: 李松辉(1979-), 男, 河北栾城人, 高级工程师, 主要从事混凝土温度控制研究。E-mail: lish@iwhr.com

的方法；在计算分析方面，形成了大体积混凝土热力学参数反分析、温控施工效果评价、通水流量预测、温度应力、缝开度分析等方法；在反馈控制层面，形成了智能通水理论、裂缝自动监控、预警信息自动发布、表面保温等方法。

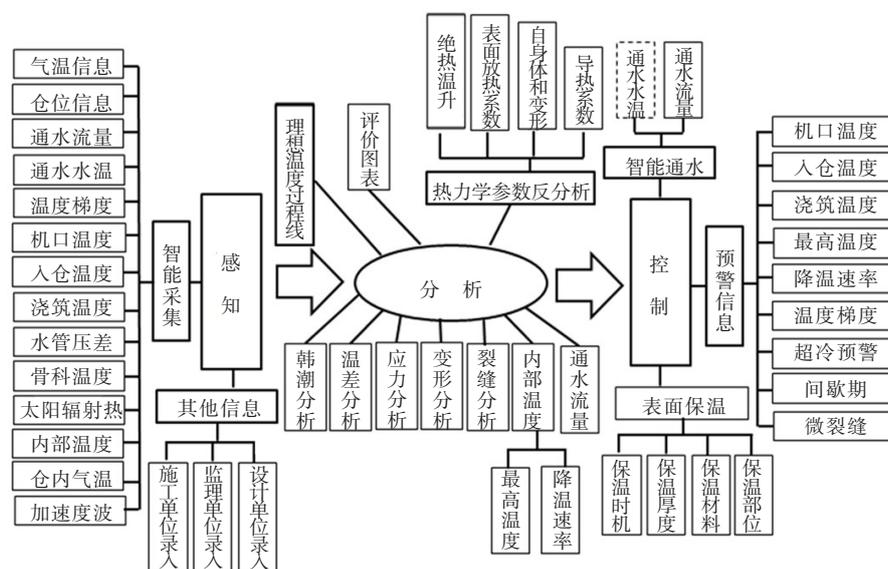


图1 大体积混凝土防裂智能监控技术架构

2.1 混凝土智能温控的理念的提出 2002年，水利部设立了科技创新项目“混凝土高坝施工期温度控制决策支持系统”，中国水利水电科学研究院依托该项目开发了国内第一个“混凝土高坝施工期温度与应力控制决策支持系统”，并用于周公宅拱坝。2007年，朱伯芳^[3]首先提出了数字监控的理念，该理念提出了将仪器监测与数字仿真相结合，解决了长期以来大坝施工期工作性态仪器监控与数字仿真相脱离的问题。但是，数字监控存在管理不闭环、调控不智能问题，为此，张国新等^[4]进一步提出了智能监控的理念，通过信息实时采集与传输、信息高效管理与可视化、温度应力仿真分析与反分析、温控效果评价与预警、温控施工智能控制(含智能通水)，裂缝自动监控与预警、以温控施工监控的智能化促进大体积混凝土温控施工的精细化。

2.2 大体积混凝土温控信息自动采集 根据已有工程的经验教训，传统意义上片面强调对混凝土基础温差和最高温度的控制难以保证最大温度应力小于抗拉强度，需要全过程控制温度变化的时间梯度和空间梯度。为此，本文提出了温控全要素监测的概念，提出智能化监控系统中应该监测的温控要素，这些要素包括出机口温度、浇筑温度、入仓温度、大坝内部温度发展过程、水管通水流量、通水水温、温度梯度、降温速率、气温及太阳辐射热等。同时，还提出了与智能化温控相配套的安全监测设备布设原则，以及温度分布、温度梯度及保温效果监测方法。

2.3 大体积混凝土关键热力学参数反分析 要实现大体积混凝土的智能化温控，温度场和应力场仿真预测结果的准确性至关重要，而仿真计算结果准确与否与所采用的热、力学参数的选择紧密相关，为此，本文作者提出了根据混凝土内部温度监测曲线反演混凝土绝热温升的方法，根据混凝土温度梯度监测数据反演导热系数和放热系数的方法，以及根据无应力计监测数据反演线膨胀系数的方法，大体积混凝土智能通水反馈控制方法，为大体积混凝土反馈仿真预测结果的准确性和可靠性提供了重要保证。

3 大体积混凝土防裂智能化的关键技术

基于大体积混凝土智能监控理论研究出一整套大体积混凝土防裂动态智能化温控的理论模型，主要解决采用何种技术实现感知、分析和控制的问题，关键技术组成结构图见图2。

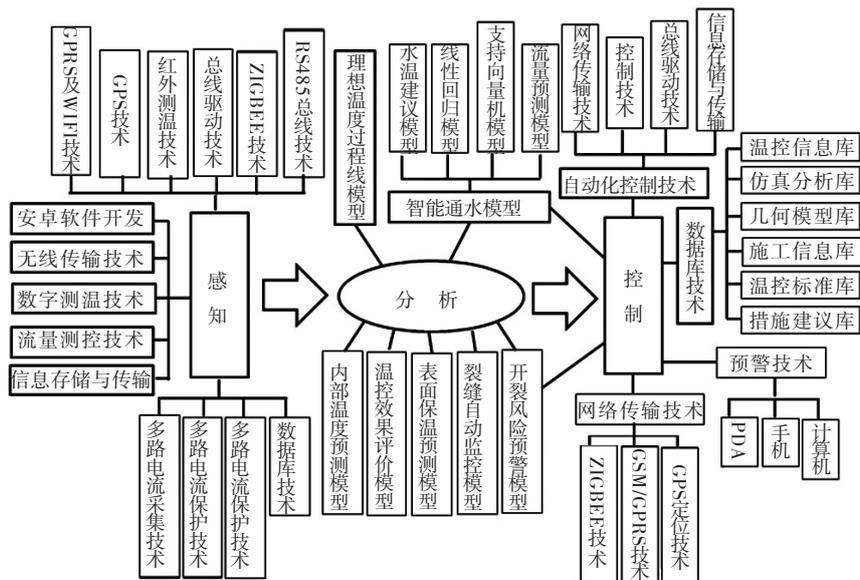


图2 大体积混凝土防裂智能化的关键技术组构

在感知信息方面，关键技术包括数字测温技术、无线传输技术、红外测温技术、数据库技术等。在计算分析方面，提出了理想温度控制曲线模型、温控效果评价模型、温度过程预测模型、表面开裂风险预测预警模型、智能通水反馈控制模型、裂缝监控与预警控制模型等。在反馈控制方面，关键技术包括自动化控制技术、数据库技术及网络传输技术等。计算分析模型关键技术简述如下。

3.1 大坝混凝土理想温度控制曲线模型 所谓理想温度过程线，是指大坝混凝土在冷却过程中所遵循的一条降温曲线，按照这条曲线进行降温，大坝混凝土由于温度变化导致的开裂风险相对最小。通常坝型不同、筑坝材料不同(如碾压混凝土重力坝、常态混凝土重力坝、碾压混凝土拱坝和常态混凝土拱坝)分别有不同的理想温度控制曲线模型，图3、图4为二期冷却及三期冷却理想温度过程线，其中 T_m 、 T_{c1} 、 T_{c2} 、 T_d 等控制指标根据不同工程的特点通过仿真计算得到。

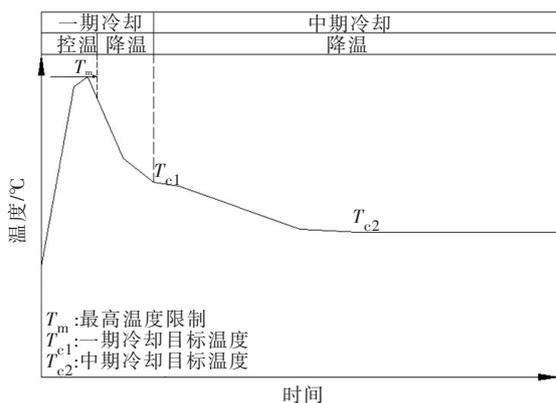


图3 二期冷却理想温度过程线

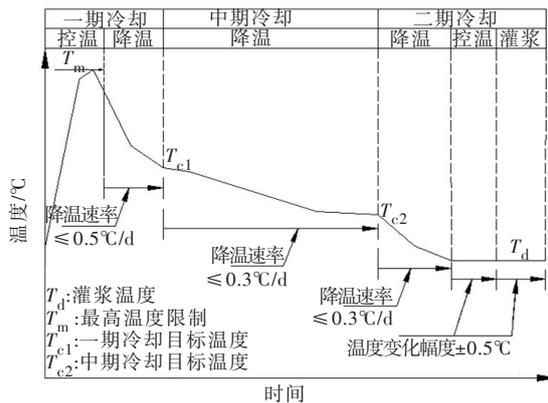


图4 三期冷却理想温度过程线

3.2 基于实时监测数据的混凝土温控效果评价模型 根据实时监测到的气温、骨料温度、出机口温度、入仓温度、浇筑温度、通水冷却流量和水温、水管进出口压差、混凝土内部温度等信息，建立统计模型，用来评价温控施工效果以及偏差程度，以图表形式表示。以温控综合曲线为例，该曲线包括浇筑仓布设的各温度计平均温度过程线、仓面气温过程线以及通水冷却进水口和出水口水温过程线。从该图表可以评估某一浇筑仓的内外温差、降温速率等指标是否满足设计要求，也可以用来分析通水冷却措施的合理性。

3.3 基于实时监测信息的混凝土温度过程预测模型 预测模型的预测流程如下：根据当天的温度监

测资料、外界气温资料、混凝土绝热温升资料等预测混凝土内部第2天温度增量，将预测温度增量与当天实测温度叠加得到第2天的预测温度值；第2天根据实测温度与预测温度的对比对预测模型中绝热温升等参数进行修正，运用修正后的模型继续预测第3天的温度增量，以此类推，最终实现大体积混凝土内部温度过程的精准预测。这一预测模型的精度将随着实测资料的积累而不断提升。

该模型的基本公式如下式所示：

$$T_{i+1} = T_i + \Delta\theta_i + \alpha_1 \bar{T}_a + \alpha_2 \bar{T}_b + \frac{\alpha_3(L, T_w, a)(q_i + q_{i+1})}{2} \quad (1)$$

式中： T_{i+1} 为预测时间*i*+1时刻的温度； T_i 为当前温度； $\Delta\theta_i$ 为绝热温升； α_1 为表面散热系数； \bar{T}_a 为表面温度； α_2 为相邻块散热系数； \bar{T}_b 为相邻块温度； α_3 为通水散热系数； L 为管长； T_w 为水温； a 为管径； q_i 、 q_{i+1} 分别为*i*时刻及*i*+1时刻流量。

运用该模型进行现场预测，结果表明：一期冷却平均误差0.09℃，方差0.01℃；中期冷却平均误差0.06℃，方差0.002℃；二期冷却平均误差0.04℃，方差0.004℃，预测精度满足现场控制要求。

3.4 混凝土表面开裂风险预测预警模型 该模型包括长周期表面温度应力计算子模型、根据天气预报进行昼夜温差应力预测子模型以及考虑表面保温效果的温度应力计算子模型，主要用于表面开裂风险的评估。评估方式如下：首先根据混凝土热、力学参数和多年平均气温情况预先计算长周期表面温度应力，然后根据天气预报计算短周期表面温度应力，两者相叠加并与当时龄期的混凝土强度相对比，可以得到相应的安全系数，如果安全系数低于标准，则还需计算应采取的保温措施。

3.5 混凝土智能通水反馈控制模型 该模型通过综合考虑绝热温升、温度梯度及降温速率等因素，通过大坝混凝土理想温度控制曲线模型计算得到的理想温度过程线确定已知降温目标，并据此预测通水水温 and 流量。

3.6 混凝土裂缝监控与预警控制模型 混凝土在外界力的作用下，其内部将产生局部弹塑性集中现象，当能量积聚到某一临界值之后，就会引起微裂缝的产生和扩展，微裂隙的产生与扩展伴随着弹性波或者应力波的释放并在周围快速传播，这种弹性波称为微震。利用微震监测技术对微震事件进行实时监测，可对微裂缝定位并直观反映混凝土内部裂隙的变化情况，本文将该技术引用到大体积混凝土裂缝监控与预警控制，研发了信号滤波、裂缝监控与预警模型。其主要思想如下：混凝土内部微裂缝产生于宏观裂缝之前，产生过程释放能量并发生微震动，该模型利用微震监测技术实时监测混凝土微震情况，分析裂缝发生的部位、时间、强度，从而判断宏观裂缝发生的可能(部位、时间、强度)，预先提出预警并分析可采取的措施。

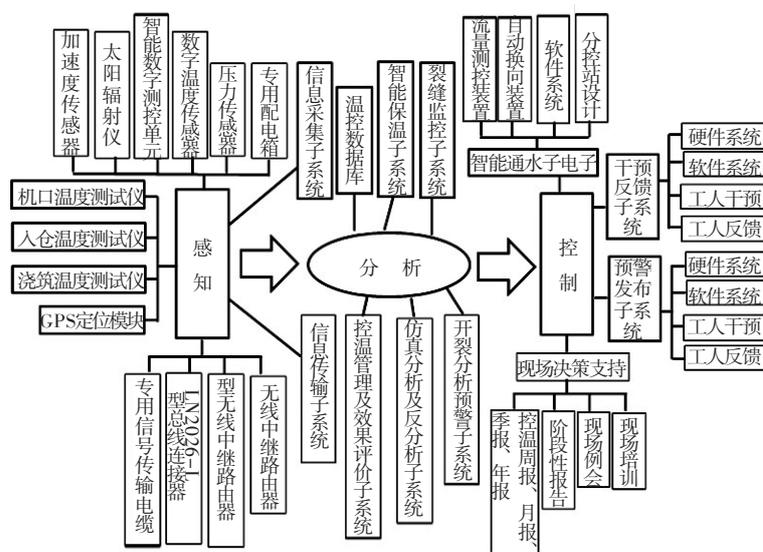


图5 大体积混凝土防裂智能监控系统

4 大体积混凝土防裂智能化的关键技术的实现

大体积混凝土防裂智能化控制须通过硬件设备和软件系统联合实现，基于关键技术和数字模型，本文作者及团队研发出整套大体积混凝土温控防裂智能化硬件设备及拥有自主知识产权的软件系统，其组成如图5所示。在感知信息方面，研发了集高精度的数字测温技术、流量测量与控制技术于一体的测控装置，大容量数据无线实时传输装置等硬件设备，信息采集软件子系统及信息传输软件子系统；在计算分析方面，基于智能化温控理论方法和模型，开发了仿真分析及反分析子系统、温控管理及效果评价子系统、智能保温子系统、开裂风险预警子系统等；在反馈控制方面，研发了智能通水子系统、裂缝监控与预警控制子系统、干预反馈子系统、预警发布子系统，并形成了现场派遣科研直接参与工程建设的机制。

4.1 大体积混凝土温控硬件设备研发 大坝施工现场环境复杂，本文作者及团队研发出了多种适合混凝土施工期复杂环境的温度实时监测设备，实现了混凝土骨料、出机口温度、入仓温度、浇筑温度、内部温度等信息的实时采集和存储。例如：骨料温度监测应用高精度红外探头对骨料温度进行非接触测量，混凝土机口、入仓、浇筑温度监测设备研制了适合插入混凝土结构牢固、热响应速度快的数字温度传感器，并将信息通过 ZigBee 等无线通讯方式传输到中心数据库；大坝混凝土内部温度信息监测设备，根据大坝现场电源供应不稳定、数据传输线布设困难、现场大型机械设备众多等环境特点，开发出一种自带锂电池、可以定时存储测温数据和定时苏醒，通过 ZigBee、GSM/GPRS 等无线通讯手段与中心数据库通讯，实现“无人值守”的温度监测与反馈控制。

4.2 大体积混凝土智能监控软件系统 软件系统设计思路如下：(1)采集大体积混凝土施工有关温控要素信息(包括混凝土浇筑信息、出机口温度信息、浇筑温度信息、通水冷却信息、仓面温控信息、混凝土内部温度信息等)，实现信息实时自动传输；(2)设计相关温控管理图表，形成温控信息可视化管理平台，实现海量温控数据的高效化管理和直观化显示；(3)温度应力的正分析及反分析，按照实际的进度提出温控周报、温控月报、温控季报、温控年报及阶段性科研分析报告，实时把握大体积混凝土的实际热力学参数及温度应力状态；(4)对混凝土温控施工情况进行评价，对分析成果中的超标量进行实时预警，对超标程度及处理情况进行类别划分及级别划分，并将需要处理的意见建议通过统一的平台发送至不同权限的施工与管理人员；(5)运用经过率定和验证的预测分析模型，实现通水冷却、混凝土预冷、保温等施工指令发送，通过自动控制设备或人工方式完成下一个时段的温控施工。

4.3 工程应用 (1)系统在鲁地拉工程中的应用。鲁地拉水电站工程位于云南省大理州宾川县与丽江市永胜县交界的金沙江中游河段上，是金沙江中游河段规划8个梯级电站中的第7级电站。坝高140 m，具有底宽大、无纵缝、地震烈度高、温控要求高、干热河谷、夏季气温高、昼夜温差大等特点，温控难度较大。2010年10月~2012年10月筑坝期间，应用本文的大体积混凝土防裂智能化控制技术，

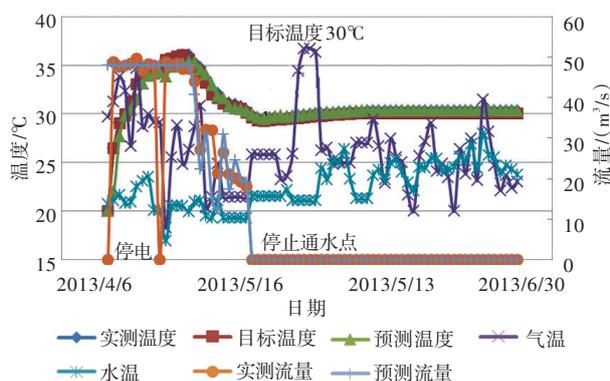


图6 10[#]-3智能通水结果

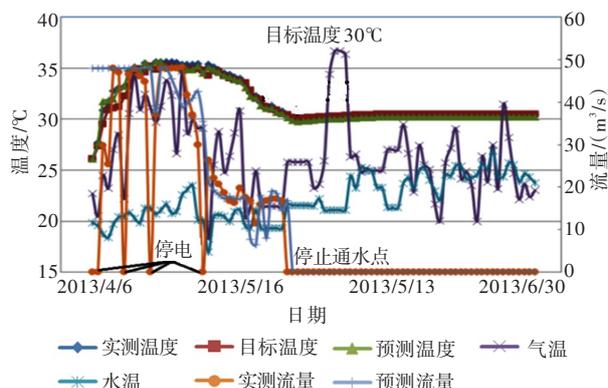


图7 10[#]-5智能通水结果

10[#]、15[#]、19[#] 3 个典型坝段进行数字监控系统应用，10[#]-11[#] 缺口回填坝段进行智能监控系统应用。

图6—图7为系统现场监测结果，通过应用大体积混凝土防裂智能化控制技术，鲁地拉水电站成功实现：(1)实现了温控资料的自动采集与自动分析；(2)实现了大坝全过程温控信息的可视化统计与查询；(3)实现了当前大坝混凝土开裂风险的预警和报警；(4)实现了分析成果及预警信息的自动发布；(5)缺口坝段实现了通水的智能控制，实现了连续上升高度 26.4 m，使得大坝混凝土内部温度过程在“无人干预”的情况下全面满足温控技术要求，缺口坝段未发现裂缝^[5-7]。

(2)系统在藏木工程中的应用。藏木水电站是西藏目前最大的水电开发项目，也是雅鲁藏布江干流上规划建设的第一座水电站，坝高 116 m，为混凝土重力坝，具有氧气稀薄、施工条件差、温差大、蒸发量大等特点。2011年 11月~2013年 12月，大体积混凝土防裂智能化控制技术应用于藏木大坝 10[#]坝段。图 8 为软件界面实时监测结果。

图 9、图 10 为温度过程流量过程。从图中可以看出，通过本技术的实施，藏木水电站成功实现了复杂条件下的全过程水管冷却降温智能控制，实测温度与理想温度过程线基本吻合。同时，本系统还为业主单位增加了第三方监督，确保了工程现场监测数据的实时性、准确性与可靠性^[5]，为现场施工管理提供了有力的数据支持，对保证工程实现三期截流节点目标、蓄水发电及大坝后期运行安全提供了重要保障。

时间	气温	内部温度	水通	实时流量	水管编号	水管流量	水管流量	水管流量	水管流量	水管流量	水管流量
2013-05-09 14:19	19.25	9.87	0	0	10-1-19-03	2	3237	3237	3239	10-1	10-1-19
2013-05-09 14:19		9.87	0	0	10-1-19-00	2	3237	3237	3239	10-1	10-1-19
2013-05-09 14:19		9.87	0	0	10-1-20-03	3	3240.5	3239	3242	10-1	10-1-20
2013-05-09 14:19		9.87	0	0	10-1-20-00	3	3239	3239	3242	10-1	10-1-20
2013-05-09 14:19		7.87	0	0	10-1-12-03	3	3218.5	3217	3220	10-1	10-1-12
2013-05-09 14:19	15.66	7.87	0	0	10-1-12-00	3	3217	3217	3220	10-1	10-1-12
2013-05-09 14:19	19.14	7.87	0	0	10-1-19-03	2	3236.5	3234	3237	10-1	10-1-19
2013-05-09 14:19	19.14	7.87	0	0	10-1-19-00	2	3234	3234	3237	10-1	10-1-19
2013-05-09 14:19	17.84	7.87	0	0	10-1-17-03	2	3232.5	3231	3234	10-1	10-1-17
2013-05-09 14:19	17.84	7.87	0	0	10-1-17-00	2	3231	3231	3234	10-1	10-1-17
2013-05-09 14:19	16.4	7.87	0	0	10-1-13-03	3	3221.5	3220	3223	10-1	10-1-13
2013-05-09 14:19	16.41	7.87	0	0	10-1-13-00	3	3220	3220	3223	10-1	10-1-13
2013-05-09 14:19		9.87	0	0	10-1-21-03	2	3243.5	3242	3245	10-1	10-1-21
2013-05-09 14:19		9.87	0	0	10-1-21-00	2	3242	3242	3245	10-1	10-1-21
2013-05-09 14:19		9.87	0	0	10-1-22-03	3	3246.5	3245	3247.5	10-1	10-1-22
2013-05-09 14:19		9.87	0	0	10-1-22-00	3	3245	3245	3247.5	10-1	10-1-22
2013-05-09 14:19		9.87	0	0	10-1-23-03	3	3249	3247.5	3250	10-1	10-1-23
2013-05-09 14:19		9.87	0	0	10-1-23-00	3	3247.5	3247.5	3250	10-1	10-1-23
2013-05-09 14:19	15.74	7.87	0	0	10-1-14-03	2	3224.5	3223	3226	10-1	10-1-14
2013-05-09 14:19	15.74	7.87	0	0	10-1-14-00	2	3223	3223	3226	10-1	10-1-14

图 8 软件界面实时监测结果

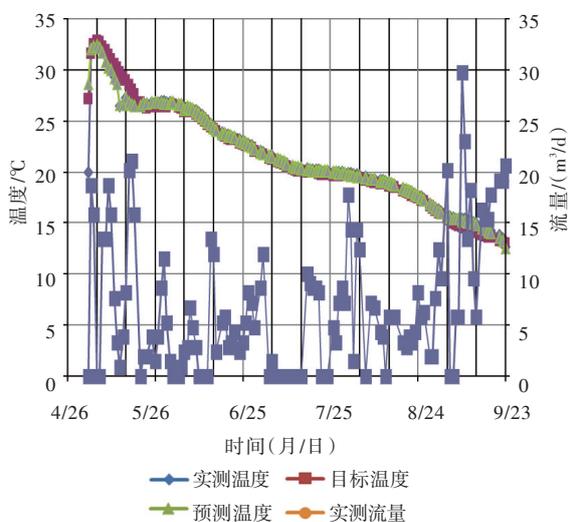


图 9 10[#]-1-23 仓温度和流量过程

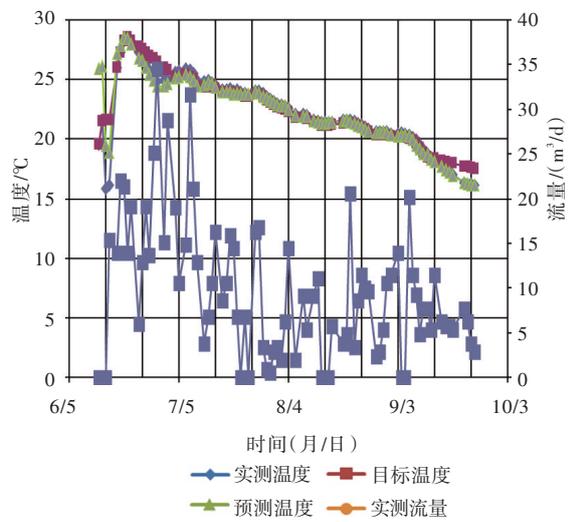


图 10 10[#]-1-27 仓温度和流量过程

5 结论

大体积混凝土防裂智能监控系统由感知、分析、控制所组成,感知是通过信息化的多种技术,实现混凝土自原材料、机口、仓面和通水等各温控要素的实时采集与互联互通,“分析决策”是整个系统的核心,直接或间接获取的感知量,通过学习、记忆、分析、判断、反演、预测等,最终形成决策信息,包括理想温度过程线模型、温度和流量预测预报模型、温控效果评价模型、表面保温预测模型、开裂风险预测预警模型等。“控制”包括人工干预和智能控制两部分,人工控制主要是预警信息的反馈发布,智能控制主要为智能通水、智能仓面等。2010年—2013年本技术在鲁地拉、藏木等工程获得成功应用,效果良好,监控混凝土无危害性裂缝发生。

参 考 文 献

- [1] 张国新,刘毅,李松辉,等. “九三一”温度控制模式的研究与实践[J]. 水力发电学报, 2014, 33(2): 179-184.
- [2] 朱伯芳. 小温差早冷却缓慢冷却是混凝土坝水管冷却的新方向[J]. 水利水电技术, 2009, 40(1): 44-50.
- [3] 朱伯芳. 混凝土坝的数字监控[J]. 水利水电技术, 2008, 39(2): 15-18.
- [4] 张国新,刘有志,刘毅. “数字大坝”朝“智能大坝”的转变-高坝温控防裂研究进展[C]//水库大坝建设与管理中的技术进展. 北京: 中国大坝协会, 2012.
- [5] 郭晨,张国新,魏永新,等. 大体积混凝土冷却通水自动控制系统在鲁地拉水电站的应用研究[C]//2013年大坝安全监测专委会年会暨大坝安全评价技术交流会论文集. 2013.
- [6] 张国新,刘毅,李松辉. 大体积混凝土防裂动态智能温控系统[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2014.
- [7] 张国新,李松辉,刘毅,等. 数字监控系统及其在鲁地拉工程中的应用[C]//2012年度碾压混凝土筑坝技术交流研讨会论文集. 2012.

Mass concrete crack prevention intelligent monitoring technology and engineering application

LI Songhui, ZHANG Guoxin, LIU Yi, ZHANG Yan

(China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Research Center for Sustainable Hydropower, Beijing 100038, China)

Abstract: Crack control is an important issue in construction of concrete dams, the vast majority of concrete cracks is related to temperature stress. And so, Temperature control is the main means of crack control. After summarizing experience of dozens of concrete dam, supported by the existing temperature crack prevention theory, closely integrated the key technical problems of Mass concrete temperature control, the theoretical analysis, numerical computation, software and hardware development, laboratory tests, field tests and other means is executed, and the theory methods, models, key technologies and system are been researched. The intelligent temperature control of perception - analysis control is formed, and Mass concrete crack prevention intelligent monitoring system is developed. The technology is successfully applied in LuDi-La; ZangMu and Jinping projects. Through the concrete construction intelligent promote its fine construction, the pursues of crack prevention is reached.

Keywords: mass concrete; temperature control; crack prevention; intelligent monitoring

(责任编辑: 王冰伟)