

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.03.021

# 泵闸混凝土施工期智能温控关键信息识别

程 井,左世杰,邹科辉

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**为实现施工期大体积混凝土温控要素的智能快速识别,提高智能温控系统的反馈及预测模型精度,提出了一套智能算法对物联网技术采集到的各类温控要素原始测值进行识别及转化。针对浇筑温度、浇筑时间、最高温度、内外温差、冷却通水起止时间与表面保温覆盖等施工期关键温控参数,结合工程经验分别给出相应识别任务的判定逻辑并编写对应程序,然后应用多个实际工程数据进行验证,并分析各识别功能的准确率。验证结果表明,本文算法识别效果良好,能够实现温控要素采集的自动化、智能化、快速化、精准化,具有较强的工程实用价值。

**关键词:**泵闸结构;智能温控;物联网;云数据库;信息识别;通水冷却

中图分类号:TV315

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2023)03-0162-07

## Identification of key parameters of intelligent temperature control of pump and sluice concrete during the construction period

CHENG Jing, ZUO Shijie, ZOU Kehui

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

**Abstract:** For realizing the intelligent and rapid identification of the parameters of temperature control of mass concrete during the construction, and improving the feedback and prediction accuracy of the model of intelligent temperature control system, a set of intelligent algorithms are developed to identify and transform the original data of various temperature control parameters collected based on the internet of things technology. As for key parameters for the concrete temperature control during the construction period, such as the concrete placement temperature, the start time, the maximum temperature, the temperature difference between the interior and exterior concrete, the start and end time of water cooling and the surface insulation, the judgment logic of the corresponding recognition task is given and the corresponding program is written combined with engineering experience. Then according to the data of several practical projects, the method and codes are validated, and the accuracy is analyzed. Results show that the proposed algorithms have a good performance for the identification, and can be used for practical projects, so as to benefit the automation, intelligentization, rapidity and accuracy of the collection of temperature control parameters.

**Key words:** pump and sluice; intelligent temperature control; internet of things; cloud database; information identification; pipe cooling

泵闸结构是城镇防洪排涝系统及地区水网系统的核心建筑物<sup>[1]</sup>,随着国家“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的新时期水利工作的推进,多地已建或拟建一大批泵闸工程。这些工程在创造巨大的经济效益和社会效益的同时,也面临着诸多问题,如混凝土温度裂缝等<sup>[2-4]</sup>。混凝土温控防裂措施的合理性直接影响工程的施工质量及运行期耐久性。

目前国内多数大体积混凝土工程可做到自动读取温度数据,但需要通过人工分析调整温控方案<sup>[5]</sup>。随着物联网、计算机和自动化控制技术的迅速发展,许多专家学者将信息化技术与传统水利工程相结合<sup>[6-8]</sup>,探索更加高效的智能化施工及运行管理模式<sup>[9-13]</sup>。对于一些大型重点水利工程如小湾、锦屏一级和一些水闸工程<sup>[14-15]</sup>等,已应用大体积混凝土智能温控系统自动采集温度数据并结合温控指标进行分析判断,然后通过人工进行温度场和应力场仿真计算,实现混凝土开裂预警及自动报警<sup>[16]</sup>。在混凝土施工期,采用智能温

**基金项目:**国家重点研发计划(2022YFC3005501);上海市水务局科研项目(沪水科 2021-09);贵州省水利科技经费项目(KT202217, KT202218)

**作者简介:**程井(1982—),男,副教授,博士,主要从事水工结构计算力学研究。E-mail: cj042@126.com

**引用本文:**程井,左世杰,邹科辉.泵闸混凝土施工期智能温控关键信息识别[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):162-168.

CHENG Jing, ZUO Shijie, ZOU Kehui. Identification of key parameters of intelligent temperature control of pump and sluice concrete during the construction period[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(3): 162-168.

控技术,高效采集混凝土温度数据,智能识别温控模型信息参数,自动开展实时温度场反馈及预测分析,并利用预测结果自动调整冷却水的流量及温度,或发出相关温控建议指令协助现场施工人员及时调整温控措施,可以提升数据采集的效率及现场温控措施调整的时效性,避免以往单纯依靠人工进行混凝土温控工作的弊端。

模型辨识和参数估计是智能控制系统的核心理论问题<sup>[17]</sup>。对于大体积混凝土智能温控系统,其预测反馈模块的有效性取决于各类施工期温控参数识别的准确性和传输的时效性。温控参数主要基于布设在结构及环境中的各类温度及流量传感器采集到原始数据得到。原始测值易受现场监测方式、施工条件、设备状况以及其他因素的干扰<sup>[9]</sup>,需要进行预处理;另一方面,高采集频率带来的海量数据,需要进行筛分才能得到准确值和有效值,进而转化成温控反馈分析模型的性态特征及各参数的合理值<sup>[4,8]</sup>。而目前尚未见关于智能温控反馈模型自动识别方面的相关成果报道。

本文针对浇筑温度、浇筑时间、最高温度、内外温差、通水起止时间与表面保温覆盖等施工期温控参数,结合工程经验及相关温控理论,分别研究相应的判定逻辑,并编制对应程序,利用温控数据库中若干实际工程的温控数据,对各识别程序模块的准确性进行验证和完善。

### 1 识别逻辑与程序

本文选取的张泾河、四激港和南新泾3座泵闸工程均位于上海市,为平原地区泵闸工程,工程主体主要由底板、墩墙、进出水流道和上部结构组成。识别程序使用python 3.6.0和mysql 8.0语言编写,监测设备按照预设的时间间隔自动读取数据,通过无线通信系统(由无线中继配器和DTU组成)进行数据传输并储存至云端数据库。SQL语句从云端数据库提取相应工程部位的温度数据,最后依照相应的识别逻辑和任务进行关键信息识别,并给出施工期混凝土温控关键信息和参数。图1为张泾河工程进水流道第二节的温控系统工作原理示意图。

#### 1.1 浇筑温度及浇筑时间识别

一般泵闸工程混凝土多为泵送混凝土,在其浇筑后的1~2d内会达到最高温度<sup>[4]</sup>。浇筑前的各温度传感器测值均为空气温度,混凝土在运输过程中因为太阳辐射、搅拌摩擦等因素其温度会高于当前气温。开始浇筑时,混凝土会覆盖温度传感器并采集到混凝土温度,该温度即为浇筑温度。温度传感器测值由气温转向浇筑温度,温度过程线会产生明显的梯度,因此可通过相邻时刻间斜率的大小识别浇筑温度。针对温度过程线温升斜率不明显的测点,可引入平均温度机制提高识别率。另外,通过引入测点高程限制信息确保识别准确率,避免出现识别出的上部混凝土浇筑时间早于下部的逻辑错误。程序识别流程如图2所示,其中 $T$ 、 $T_p$ 、 $t_p$ 、 $N_{max}$ 、 $N_i$ 、 $a$ 分别为开始浇筑2d内所有温度数据序列、温度变化率最大处的温度值、温度变化率最大处的时刻值、相邻时刻温度变化率最大值、 $i$ 时刻的温度变化率、温度变化率最大值与其他温度变化率差值(0.1℃/min)。

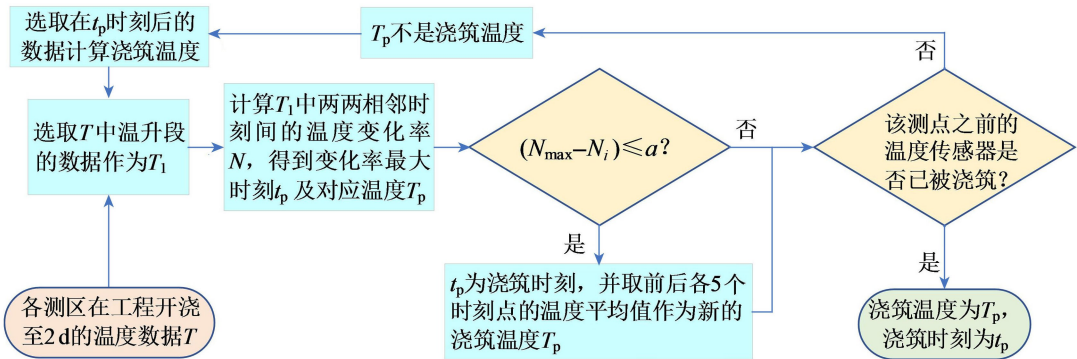


图2 浇筑温度及浇筑时刻识别流程

Fig.2 Flow chart for the identification of concrete placement temperature and start time

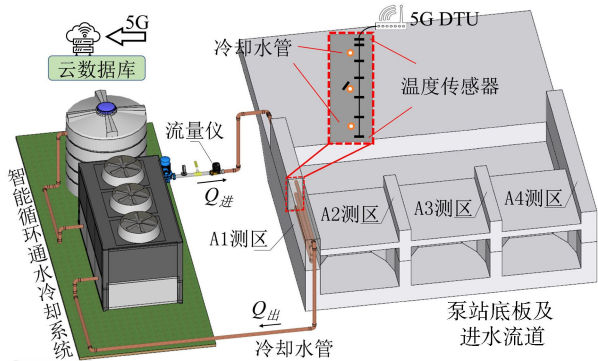


图1 进水流道第二节测区测点示意图

Fig.1 Schematic diagram of measure points in the 2rd data acquisition area of inlet channel

1.2 最高温度识别

最高温度识别的逻辑是找寻温度数据系列最大值,然后通过对混凝土温度实测值的一阶差分序列值的大小进行判断。由于数据采集的频率为 30 s/次,所以会出现多个相邻数据点的温度值相同。如果混凝土温度的一阶差分序列  $\Delta T$  中有 10 个差分值连续为 0 或者 5 个小于 0,则可以认为达到最高温度。一般工程中对最高温度值的误差接受值要求在 1~2℃,本节设置为 2℃,程序识别流程如图 3 所示。

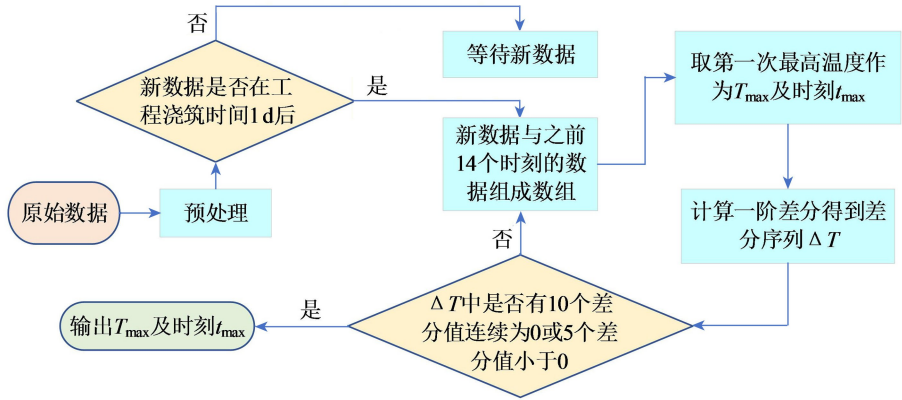


图 3 最高温度识别流程

Fig.3 Flow chart for the identification of maximum temperature

1.3 内外温差识别

在混凝土表面 50 mm 处布置 1 个温度传感器监测表面温度,在混凝土内部中间位置布置温度传感器监测内部温度,2 个温度传感器测值之差即为内外温差。根据 NB/T 35092—2017《混凝土坝温度控制设计规范》、GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》,施工期混凝土内外温差不得超过 20℃,混凝土表面温度与大气温度之差不得超过 20℃。以此为标准,进行内外温差识别。因此,仅需对同时刻的内外温度数据相减得到温差序列,并找出大于 20℃ 的数据即可。

1.4 通水起止时间识别

通水起止时间识别的关键在于识别流量为 0 的时刻,并根据前后相邻时刻的流量值是否为 0 来判断是开始通水还是停止通水。零流量时刻之前的流量值为 0,是通水起始时刻;零流量时刻之前的流量值不为 0,是停止通水时刻,具体流程如图 4 所示。

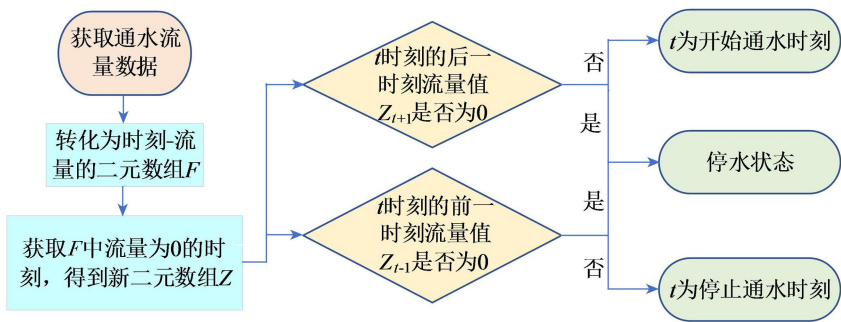


图 4 通水起止时间识别流程

Fig.4 Flow chart for the identification of start and end time of water cooling

1.5 混凝土保温识别

本节仅针对混凝土顶部是否覆盖保温材料的情况进行识别。识别逻辑是通过对混凝土顶面的温度传感器采集的原始值进行一阶差分处理,并和实时气温数据进行比对,综合判定混凝土表面保温状态。一阶差分可以消除数据之间的趋势性,降低数据之间的不规则波动,使曲线更加平稳,也能更容易发现数据之中的较大波动和反映顶面温度测值的变化。顶面温度传感器在混凝土终凝成型和覆盖保温材料之前监测的是空气温度,进入保温状态后其温度会有突升。当保温材料由于意外情况无法继续工作时,顶面温度传感器的测值会有明显变化,与气温温差逐渐减小并与气温变化趋于一致,从而获知当前混凝土表面是否处于保温状态。程序识别流程如图 5 所示。

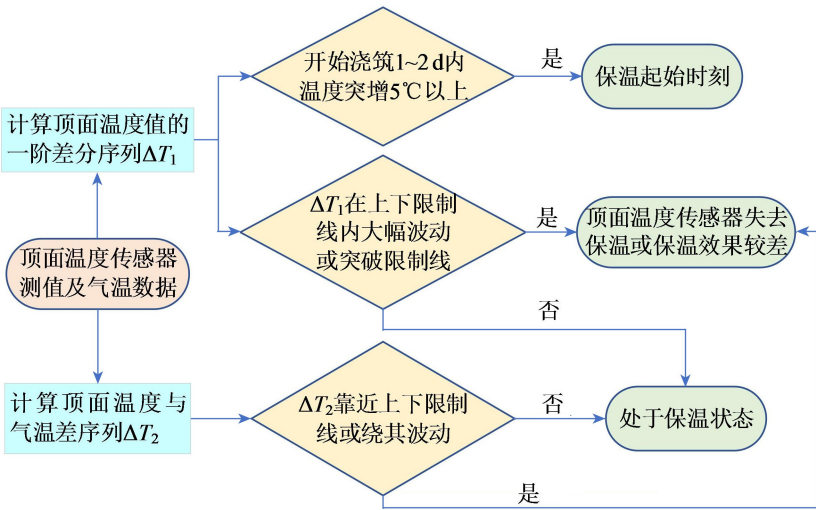


图 5 混凝土表面保温识别流程

Fig. 5 Flow chart for the identification of concrete surface insulation

2 实例验证

根据第一节中提出的识别逻辑和程序,对张泾河、南新泾和四漊港 3 座工程的浇筑温度及时间、最高温度、内外温差、通水起止时间和混凝土保温进行识别,并对比实际情况分析各识别程序的准确率和实用性。

2.1 浇筑温度和浇筑时间

张泾河工程混凝土浇筑量大,主体工程的不同部位于不同季节浇筑,因此温度数据丰富且浇筑温度明确,可用于浇筑温度和时间识别。依据第 1.1 节识别原理,使用 SQL 语句从温控数据库中提取各泵闸工程中各浇筑部位的混凝土温度数据,截取工程开始浇筑时间至整体结束浇筑这一时间段的温度数据,寻找其中两相邻时刻斜率最大且是温升段的温度数据。以 2℃作为程序识别浇筑温度值与实际浇筑温度值的误差接受值,15 min 作为浇筑时间识别误差接受值。选取整个张泾河泵闸主体工程各浇筑部位的温度数据进行识别,识别情况如图 6、表 1 所示。

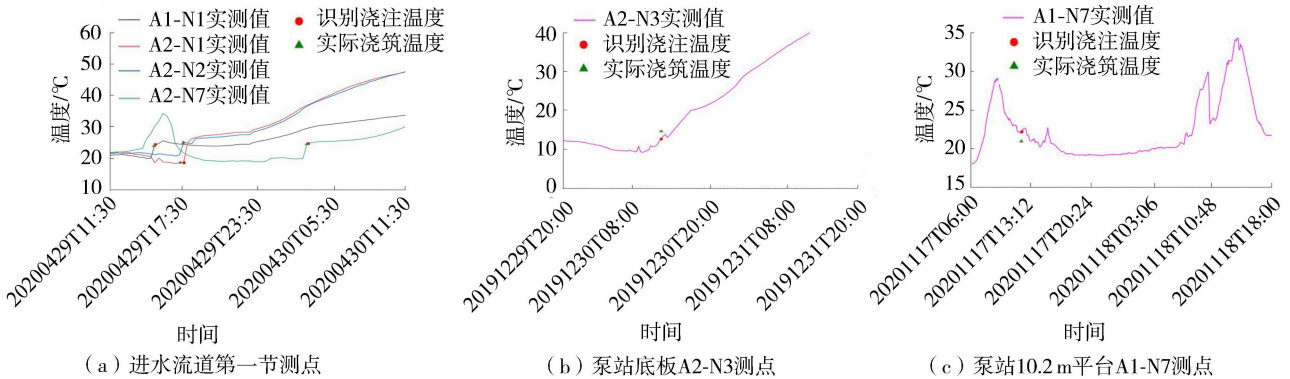


图 6 浇筑温度及浇筑时间识别

Fig. 6 Identification of concrete placement temperature and start time

张泾河主体工程各个部位中泵站底板识别率为 87.5%,出水流动第一节和泵站 5.2 m 平台识别率为 91.67%,水闸底板、进出水流动第二节达到了 95.83% 的识别率,在泵站 6.7 m 平台和 10.2 m 平台上的识别率达到了 100%。该程序在张泾河主体工程中识别表现很好。

张泾河主体工程浇筑时间分布于不同季

表 1 浇筑时间识别

| Table 1 The identification of concrete placement time |                   |                   |
|-------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
| 识别部位                                                  | 识别浇筑时间            | 实际浇筑时间            |
| 进水流动第一节 A1-N1 测点                                      | 20200429T14:58:25 | 20200429T15:08:25 |
| 进水流动第一节 A2-N1 测点                                      | 20200429T14:58:25 | 20200429T15:08:25 |
| 进水流动第一节 A2-N2 测点                                      | 20200429T17:18:29 | 20200429T17:28:29 |
| 进水流动第一节 A2-N7 测点                                      | 20200430T03:21:12 | 20200430T03:31:12 |
| 泵站底板 A2-N3 测点                                         | 20191230T11:45:53 | 20191230T11:55:53 |
| 泵站 10.2 m 平台 A1-N7 测点                                 | 20201117T11:46:00 | 20201117T11:56:00 |

节,浇筑部位和浇筑时间不同,带来的浇筑方式和环境影响就不同,温升模式也有所差异。从图 6、表 1 的识别效果看,程序能针对不同浇筑部位和温升斜率、浇筑时间在允许误差内进行有效识别,适应性较强。

2.2 最高温度

选取张泾河工程进水流道第二节 4 个测区的温度数据进行识别,识别情况如图 7 所示。进一步扩大所选数据范围,选取整个张泾河泵闸主体工程各浇筑部位的温度过程线数据进行识别。

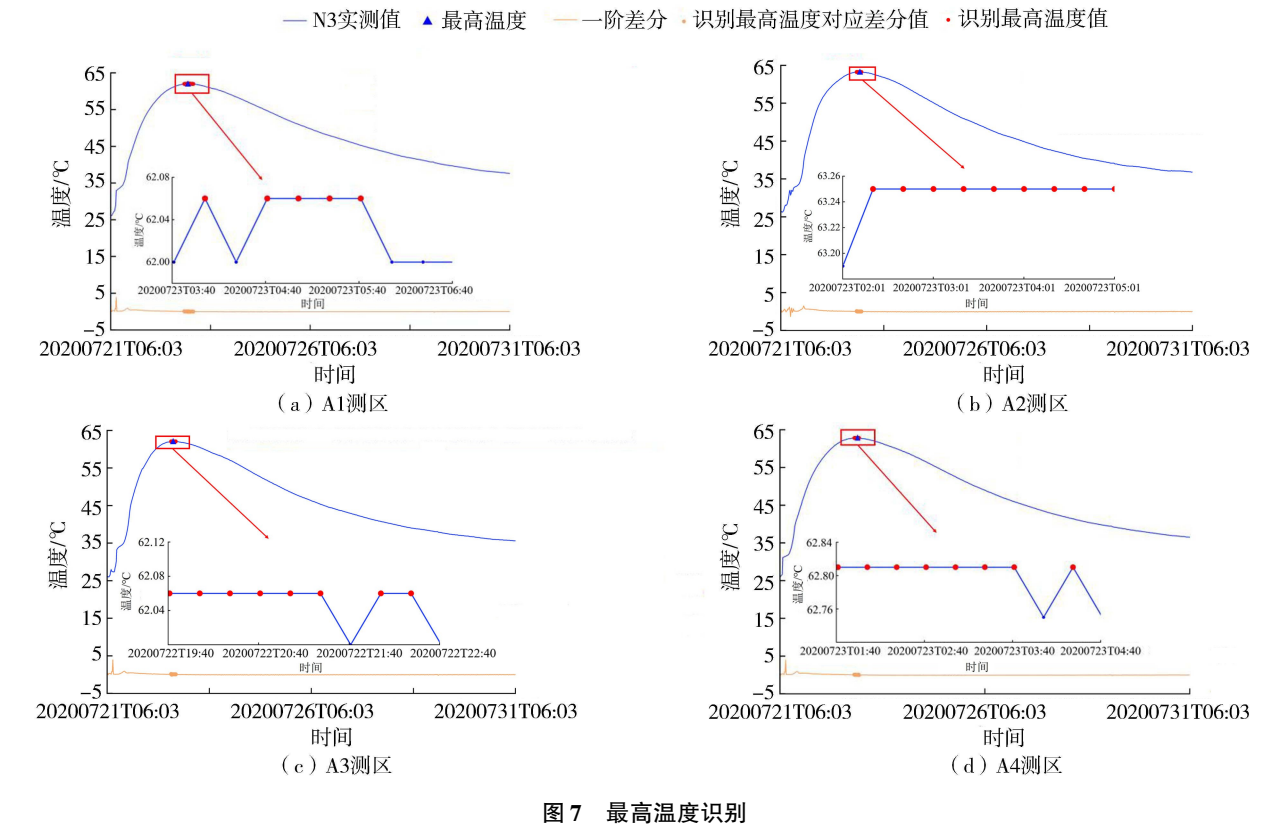


图 7 最高温度识别

Fig. 7 Identification of maximum temperature

从图 7 可以看出,程序首先寻找出符合最高温度判定条件的首个差分序列区间(图中橙色散点标注),然后寻找该序列区间对应的实测温度过程线区间(红色散点标注),此区间的最高温度就是该测区混凝土的最高温度。该程序能够精确识别最高温度区间,与真实最高温度值误差很小,可满足工程精度需要。该程序在张泾河泵闸主体工程各部位最高温度识别任务中均取得 100% 的识别率,识别功能模块效果良好,具有较强的适用性,可用于实际泵闸工程混凝土最高温度识别任务。

2.3 内外温差

根据 1.3 节内外温差识别原理,对南新泾水闸底板进行内外温差预警识别,结果如图 8 所示。可以看出,该预警程序对内外温差预警良好,能够有效识别超出规范限制的温差值并进行标注。

2.4 通水起止时间

采用张泾河进水流道第二节 A1 测区的通水流量数据进行通水识别,用以模拟实际场景。程序的执行结果如图 9 所示。可以看出,程序能对温控通水流量数据库中通水起止点进行高效识别,可以取得很高的识别率。

2.5 混凝土保温

四溍港工程的浇筑时间位于冬季,且保温覆盖操作规范记录完整,采集到的混凝土温度数据适合用于混凝土保温识别。使用该识别程序对四溍港水闸底板进行表面保温情况识别的结果如图 10 所示。

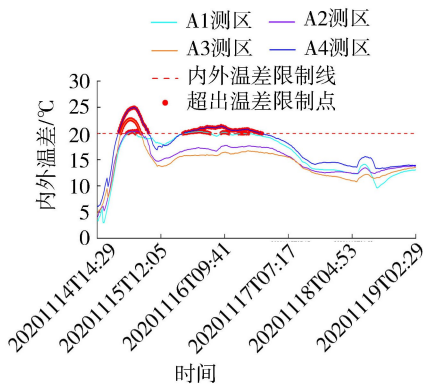


图 8 南新泾水闸底板内外温差预警情况

Fig. 8 Early warning of temperature difference inside and outside the bottom plate of Nanxinjing Sluice

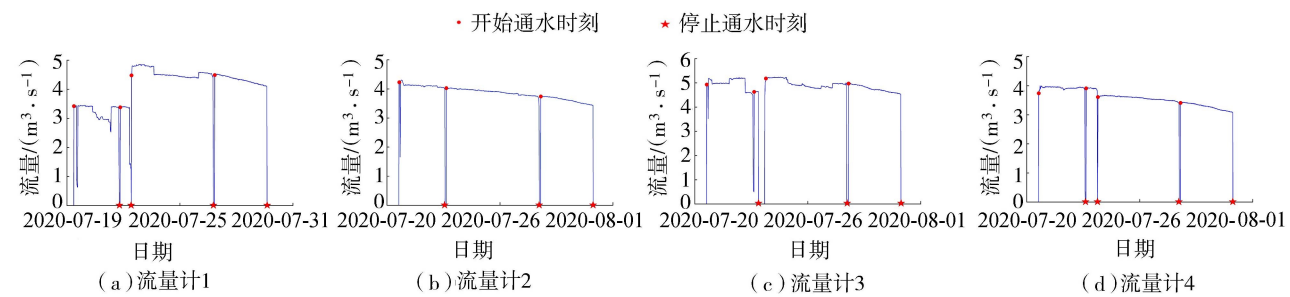


图 9 通水起止识别  
Fig.9 Identification of start and end time of water cooling

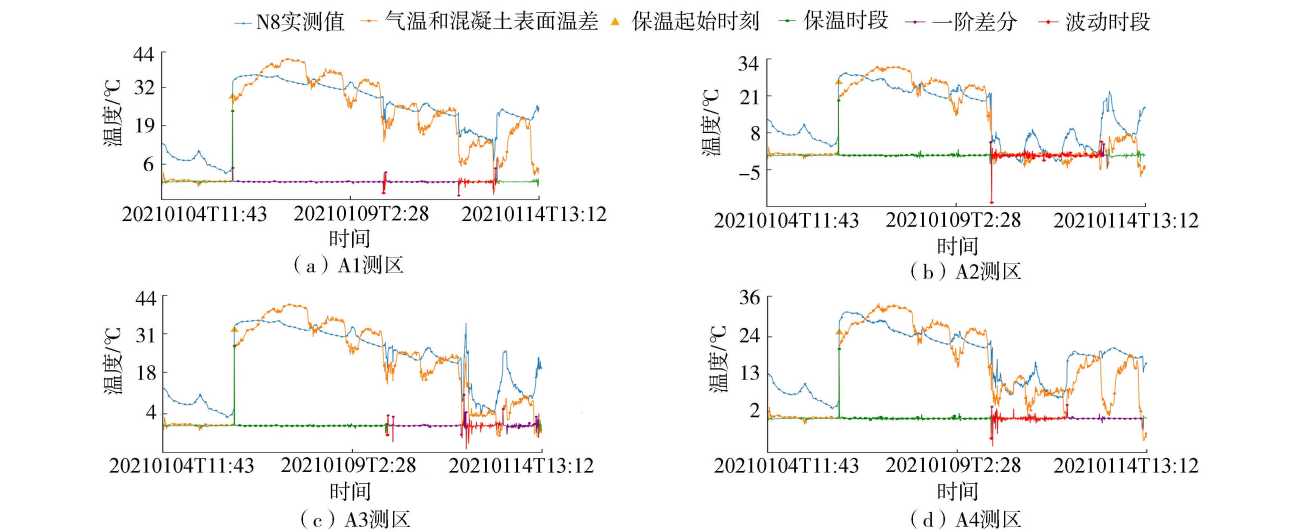


图 10 表面保温情况识别  
Fig.10 Identification of surface insulation

从图 10 可以看出:①保温开始时刻与一阶差分曲线的极大突升时刻相对应,温度传感器从监测空气温度转为监测保温材料覆盖下的顶面混凝土温度,开始进入保温状态;②一阶差分能够显著反映顶面温度传感器相邻时刻间的温度变化,过大的温度变化及在上下限制线间波动变大表明其当前表面保温状态遭到破坏,与实测温度过程线的变化趋势一致;③处于保温状态下的一阶差分波动很小,一般在 1℃ 以内。以一阶差分突破下限制线为标志进入波动状态,波动状态下差分曲线可能多次突破下限制线,或围绕  $y=0$  波动,波动幅度明显大于保温状态。

本文方法综合考虑顶面温度与现场气温对混凝土表面保温状态的影响,能够快速有效识别混凝土表面所处状态及状态间的转换。但该方法目前仅能针对布设表面温度传感器的混凝土测区进行保温覆盖识别,后续可结合现场视频监控及机器视觉技术,提供更丰富而可靠的表面保温情况识别。

### 3 结 论

a. 通过识别各部位浇筑时间段内温升段的斜率最大值,并引入高程限制信息及平均温度机制对浇筑温度及其时间进行识别。将该识别程序应用于张泾河泵闸主体工程浇筑温度识别中,各部位的识别率为 87.5% ~ 100%,可以适应多种浇筑环境。

b. 通水起止识别及内外温差预警的识别标准单一,可以取得很高的识别率。该程序在张泾河泵闸主体工程各浇筑部位的测区最高温度识别任务中均能完全识别最高温度所在区域,无需根据不同部位修改识别逻辑,具有较高的识别率和较强的适用性。

c. 采用混凝土顶面温度的一阶差分及顶面温度与气温之差两项指标,对四渎港水闸底板混凝土进行表面保温识别。该程序能够有效识别保温开始时刻、保温状态、波动状态及状态间的转换,识别效果良好。

参考文献:

[ 1 ] 闫毓,袁赛瑜,唐洪武,等. 上海蕴南水利控制片河网水动力再造[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4):329-334. (YAN Yu, YUAN Saiyu, TANG Hongwu, et al. Hydrodynamic reconstruction of Wennan River network in Shanghai City[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2021,49(4):329-334. (in Chinese))

[ 2 ] 张国新,李松辉,刘毅,等. 大体积混凝土防裂智能监控系统[J]. 水利水电科技进展,2015,35(5):83-88. (ZHNAG Guoxin, LI Songhui, LIU Yi, et al. Intelligent monitoring and control system for crack prevention of mass concrete[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2015,35(5):83-88. (in Chinese))

[ 3 ] 潘希强,刘有志,胡平,等. 藏木水电站大坝混凝土施工工期温控防裂标准与措施动态优化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(4):300-306. (PAN Xiqiang, LIU Youzhi, HU Ping, et al. Dynamic optimal analysis of concrete temperature control and crack prevention standards and measures during dam construction for Zangmu Hydropower Station[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2015,43(4):300-306. (in Chinese))

[ 4 ] 程井,张宇,李明志,等. 平原地区泵闸工程温控防裂优化与反馈研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版),2021,43(2):1-7. (CHENG Jing, ZHANG Yu, LI Mingzhi, et al. Study on optimization and feedback of temperature control and crack prevention of pump and sluice project in plain area[J]. Journal of China Three Gorges University(Natural Sciences),2021,43(2):1-7. (in Chinese))

[ 5 ] 王新刚,杨润来,陈智军. 大体积混凝土智能温控系统的研发及应用[J]. 水运工程,2020(1):118-121. (WANG Xin' gang, YANG Runlai, CHEN Zhijun. Development and application of intelligent temperature monitoring system for mass concrete [J]. Port & Waterway Engineering,2020(1):118-121. (in Chinese))

[ 6 ] 刘辉,方国材. 水利行业信息化现状与发展概述[J]. 水利建设与管理,2021,41(8):81-84. (LIU Hui, FANG Guocai. Overview of water conservancy industry information status and development [J]. Water Conservancy Construction and Management,2021,41(8):81-84. (in Chinese))

[ 7 ] 杨素悦. 数据库技术在水利信息化中的应用:以北江水利信息数据库建设为例[J]. 安徽农业科学,2011,39(18):11139-11141. (YANG Suyue. Application of database technique in water conservancy information[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences,2011,39(18):11139-11141. (in Chinese))

[ 8 ] 高原. 基于传感器集群的水利信息采集与反馈系统的设计与实现[J]. 电子设计工程,2020,28(19):130-137. (GAO Yuan. Design and implementation of water conservancy information collection and feedback system based on sensor cluster[J]. Electronic Design Engineering,2020,28(19):130-137. (in Chinese))

[ 9 ] 林鹏,李庆斌,周绍武,等. 大体积混凝土通水冷却智能温度控制方法与系统[J]. 水利学报,2013,44(8):950-957. (LIN Peng, LI Qingbin, ZHOU Shaowu, et al. Intelligent cooling control method and system for mass concrete [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2013,44(8):950-957. (in Chinese))

[ 10 ] 李庆斌,林鹏. 论智能大坝[J]. 水力发电学报,2014,33(1):139-146. (LI Qingbin, LIN Peng. Demonstration on intelligent dam [J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2014,33(1):139-146. (in Chinese))

[ 11 ] 张国新,刘毅,刘有志,等. 高混凝土坝温控防裂研究进展[J]. 水利学报,2018,49(9):1068-1078. (ZHANG Guoxin, LIU Yi, LIU Youzhi, et al. Reviews on temperature control and crack prevention of high concrete dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2018,49(9):1068-1078. (in Chinese))

[ 12 ] 谭文鹏,王荣兴,赵伟,等. 基于温差控制的大体积混凝土智能温控系统及方法[J]. 公路,2020,65(10):211-215. (TAN Wenpeng, WANG Rongxing, ZHAO Wei, et al. Intelligent temperature control system and method for mass concrete based on temperature difference control [J]. Highway,2020,65(10):211-215. (in Chinese))

[ 13 ] 王振红,朱岳明,于书萍. 薄壁混凝土结构施工工期温控防裂研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2007(6):773-778. (WANG Zhenhong, ZHU Yueming, YU Shuping. Study on temperature control and crack prevention of thin-walled concrete structures during the construction period [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition),2007(6):773-778. (in Chinese))

[ 14 ] 马跃峰,朱岳明,刘有志,等. 姜唐湖退水闸泵送混凝土温控防裂反馈研究[J]. 水力发电,2006(1):33-35. (MA Yuefeng, ZHU Yueming, LIU Youzhi, et al. Feedback study of temperature control and crack prevention of Jiangtanghu pump concrete sluice during construction [J]. Water Power,2006(1):33-35. (in Chinese))

[ 15 ] 陈伟,张红叶. 水闸底板施工工期温控防裂仿真分析[J]. 人民长江,2014,45(增刊1):101-103. (CHEN Wei, ZHANG Hongye. Simulation analysis of temperature control and crack prevention for sluice board during construction [J]. Yangtze River, 2014,45(Sup1):101-103. (in Chinese))

[ 16 ] 杜小凯,孙保平,张国新,等. 大体积混凝土防裂动态智能温控系统应用与监测分析[J]. 水力发电,2015,41(1):46-49. (DU Xiaokai, SUN Baoping, ZHANG Guoxin, et al. Functions and application of dynamic intelligent temperature control system of mass concrete anti-cracking [J]. Water Power,2015,41(1):46-49. (in Chinese))

[ 17 ] 钱学森,宋健. 工程控制论(上册)第3版[M]. 北京:科学出版社,2011.