

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.14.018

城市内涝监测预警系统研发与应用

杨彪, 钱原铭, 陈良志, 李家华, 黄黎明, 朱峰
(中交第四航务工程勘察设计院有限公司, 广东 广州 510290)

摘要: 为提升对暴雨洪涝的预报预警能力,在系统总结目前主流内涝预警方法的基础上,提出了一种将洪涝数值模拟与物联网技术相结合的内涝预警方法,并基于该方法研发了一套城市内涝监测预警系统,明确了预警等级内涵和预警发布原理。该方法及系统是对我国现有城市内涝预警技术的完善和优化,具有预警准确性高、时效性强、稳定性好等特点,并在实际应用中得到有效验证。

关键词: 城市内涝; 数值模拟; 物联网; 监测预警

中图分类号: TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2024)14-0107-06

Research and Application of Urban Waterlogging Monitoring and Early Warning System

YANG Biao, QIAN Yuan-ming, CHEN Liang-zhi, LI Jia-hua, HUANG Li-ming,
ZHU Feng

(CCCC FHDI Engineering Co. Ltd., Guangzhou 510290, China)

Abstract: In order to improve the forecasting and early warning ability of rainstorm and flood, a waterlogging early warning method based on the combination of flood numerical simulation and Internet of Things(IoT) technology is proposed on the basis of the current mainstream waterlogging early warning methods. Based on this method, a set of system is developed and the connotation of early warning level and its release principle are clarified. The method and system are the improvement and optimization of the existing urban waterlogging early warning technology in China, and have the characteristics of high accuracy, strong timeliness and good stability, which is effectively verified in practical application.

Key words: urban waterlogging; numerical simulation; Internet of Things(IoT); monitoring and early warning

城市内涝问题一直是备受关注的民生问题,近几年国家曾多次发布内涝治理相关文件,强调要完善城市排水与内涝防范相关应急预案,明确预警等级内涵,建立洪涝风险评估机制,提升暴雨洪涝预报预警能力。影响城市内涝的因素有很多,如自然条件、人为因素、排水管网设计等。全球气候变暖致使

城市极端降雨事件频繁发生,是导致城市内涝灾害的主要因素;城市化发展使城区不透水面积和径流总量大幅增加,从而导致洪峰流量增大及汇流时间缩短,加剧了城市内涝的威胁和风险;部分城市排水系统的防洪排涝标准偏低,远远滞后于城市发展,导致暴雨来临时无法快速排出积水,从而出现内涝现

基金项目: 2021年度交通运输行业重点科技项目(2021-MS4-118)

通信作者: 杨彪 E-mail: yangbiao@fhdigz.com

象。城市高标准排水系统的建立不能一蹴而就,特别是对于老城区的排水系统改造更是困难重重,现阶段城市内涝治理的思路应从完全阻止内涝发生转变为减少内涝造成的损失^[1],加快建立城市内涝预报预警机制,并逐步完善现有排水系统,提高城市排水能力,降低内涝风险。

1 内涝预警研究现状

目前,国内内涝预警系统的相关研究与应用大体可以归纳为以下三类:

① 基于雨洪模型的暴雨内涝预警

此类研究^[2-4]基于各种暴雨洪涝模型,在输入地形曲面、降雨过程线、排水管网等条件后,由暴雨洪涝模拟软件经过模拟得出积水区域、积水深度及积水时间的预警情况,目前比较主流的洪涝模拟软件有SWMM、InfoWorks ICM、MIKE Urban、鸿业暴雨排水模拟系统等。基于雨洪模型的暴雨内涝预警实时处理,模型大、计算量大,对服务器的性能要求也较高。同时,预警时效性不足,往往模拟计算时间较长,计算完成后降雨可能已经停止,这就失去了预警的意义。

② 基于神经网络算法和大数据的内涝预警

此类研究^[5-7]是基于人工智能及深度学习,通过神经网络算法和大数据的统计学分析,直接建立雨情与积水之间的关系来进行预警,累积的数据越多则预测结果越准确。但我国城市更新较快,城区的管网、地形、下垫面甚至地貌都会在几年内发生较大变化,这种变化显然会影响地面产汇流,此时,基于大数据的预警方法会使预测结果产生偏差。因此,此类方法比较适用于城市界面长期保持稳定状态的老城区,并需要长期的监测数据积累来进行预测。

③ 基于物联网实时监测的暴雨内涝预警

此类研究^[8-10]采用物联网技术监测河道、排水系统水位或易积水点积水情况,再结合天气预报情况进行预警,具有较好的准确性和时效性。此类方法无需进行数值模拟或大数据分析预测,所以对事件的预警功能较弱,同时需要设置大量的传感器,成本较高。但此类方法易于实施,相关研究较多,且有较多的工程实例。

2 系统组成

通过分析各类内涝预警方法的优缺点,结合物

联网监测技术的实时性和准确性、数值模拟与大数据分析的预测性,总结得出一套将洪涝数值模拟与物联网技术相结合的内涝预警方法,并以此预警方法为基础,利用BIM、GIS、物联网、数字孪生和智能分析等先进技术,设计开发了一套集传感器监测、气象预测和暴雨积水模拟于一体的城市内涝监测预警系统。

该系统基于物联网体系架构搭建,由感知层、网络层、平台层和应用层四个部分组成(见图1)。其中感知层是系统的底层,通过气象站、液位计等传感器设备监测来自物理世界的数据和信息;网络层是系统的通信层,利用移动通信网络和窄带物联网(NB-IoT)将感知层监测到的气象和液位数据传递至对应的数据存储平台;平台层是系统的核心层,提供对监测数据的存储、处理和管理功能,以及设备管理、数据流管理、应用程序开发和部署等功能;应用层是系统的顶层,基于平台层提供的功能进行城市内涝监测预警系统的定制化开发,提升城市内涝预警水平,辅助管理者应急决策。

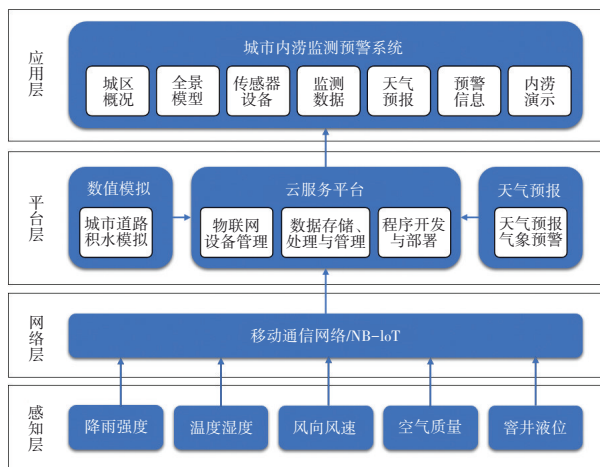


图1 城市内涝监测预警系统的基本架构

Fig.1 Basic framework of urban waterlogging monitoring and early warning system

该系统的前端功能主要包括城区概况、全景模型、传感器设备、监测数据、天气预报、预警信息和内涝演示七个部分,其中全景模型是基于BIM和GIS构建的大场景三维模型,是真实世界在虚拟世界的映射,将传感器设备与全景模型挂接可以对设备进行快速定位,同时全景模型可以为内涝演示提供接近真实情况的城市场景。该系统的数据源除了感知层监测到的气象和液位数据,还包括数值模

拟分析得到的城市道路暴雨积水结果,以及气象部门发布的天气预报信息等,通过制定统一的通信协议和标准,实现设备与系统的互联互通、多源异构数据的深度融合,提升系统的协同效能。此外,预警信息功能模块还具备短信发布和APP发布功能,可以实现各类预警信息的多渠道实时发布,提高预警时效性。

3 系统工作流程

城市内涝监测预警系统的工作流程见图2。

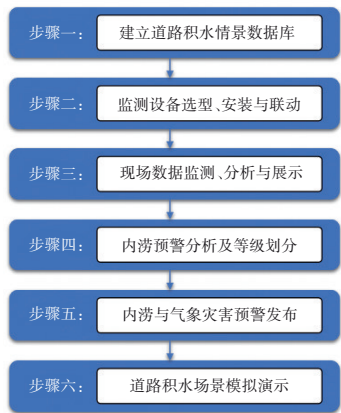


图2 城市内涝监测预警系统的工作流程

Fig.2 Workflow of urban waterlogging monitoring and early warning system

3.1 建立道路积水情景数据库

通过洪涝数值模拟分析建立道路积水情景数据库,过程原理如图3所示。

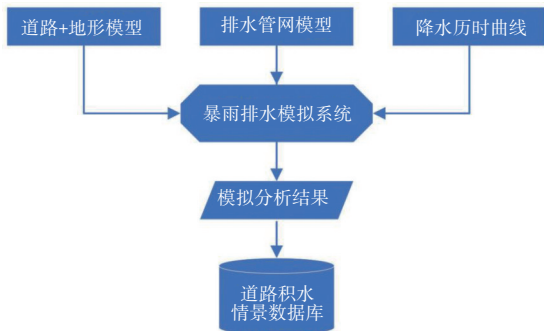


图3 洪涝数值模拟及情景数据库搭建流程

Fig.3 Flow chart of flood numerical simulation and scenario database construction

首先,基于道路和地形模型、排水管网模型、降水历时曲线等,在暴雨排水模拟系统中创建洪涝数值分析模型。道路、地形和排水管网模型均由精细化的BIM设计模型转化生成,构成片区汇水分析和管道排水模拟的基础条件。降水历时曲线示例见

图4。利用当地暴雨强度公式计算得到不同重现期下的降雨强度,并采用芝加哥雨型模拟降雨过程。

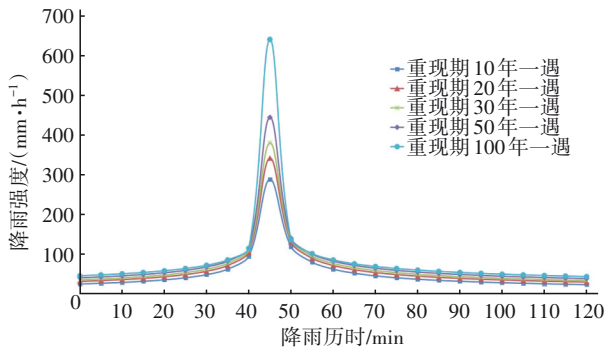


图4 不同降雨重现期下的降水历时曲线示例

Fig.4 Examples of rainfall duration curves under different rainfall recurrence periods

其次,根据片区实际情况进行汇水分区和软件模拟分区,并设置下垫面参数,进而针对不同降雨重现期进行道路积水模拟分析。本研究所采用的暴雨排水模拟系统基于SWMM模型开发,可以实现城市道路积水的一维二维耦合模拟计算。某工况下的数值模拟结果如图5所示。

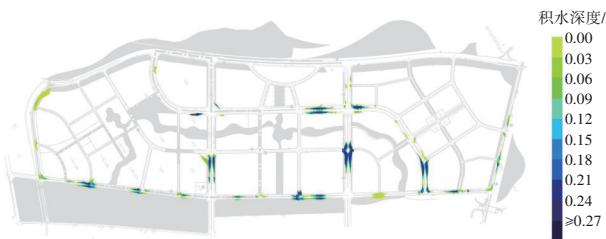


图5 某工况下的道路积水数值模拟结果

Fig.5 Results of numerical simulation of road flooding in a certain condition

最后,基于所有工况下的模拟分析结果创建道路积水情景数据库,包括积水点位置、积水范围和深度、积水历时等,用于城市内涝预警发布与场景动画演示。该情景数据库可在预警系统应用过程中不断迭代优化,根据实际雨情和道路积水情况完善洪涝数值模型,使模拟结果能够更加真实地反映实际情况,提高内涝预测的准确性。

3.2 监测设备选型、安装与联动

该系统配套使用的物联网监测设备主要包括小型气象站和窖井液位计,如图6所示。将小型气象站安装在区域中心位置,使监测结果可以更加准确地反映区域整体气象情况;液位计安装在易积水

道路的雨水井内,用于监测井内的水位变化。将监测设备与城市全景模型相关联,可以在模型中快速定位设备位置,并查看设备信息及相关监测数据。

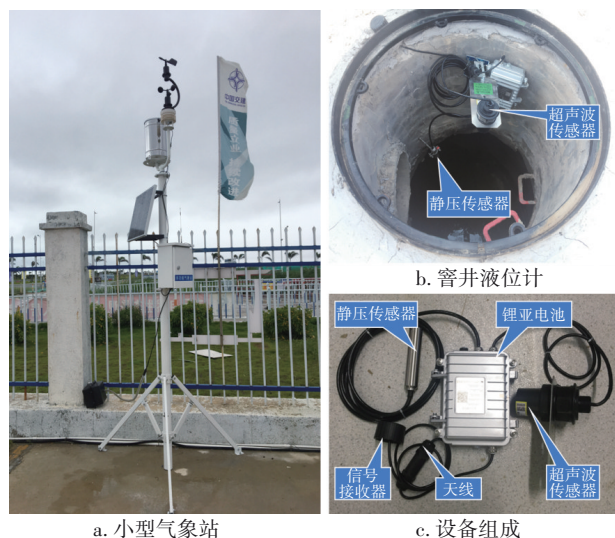


图6 监测设备(小型气象站、窨井液位计)

Fig.6 Monitoring equipment (small weather station, and inspection well level gauge)

常用液位计包括静压式和超声波式,其中静压式液位计适用范围广,但引压孔易堵塞,需定期清理,维护繁琐,超声波式液位计测量精度高,但水位上升至距离换能器较近时存在测量盲区,且水位淹没换能器时无法采集数据。为弥补两类液位计的技术缺陷,形成优势互补,使水位监测范围更广、精度更高、设备耐久性更好,确定选用二者相结合的复合型液位计。

将超声波传感器安装在接近井盖位置,尽可能增大监测范围,将静压传感器安装在超声波传感器测量盲区以下,并尽量远离水面以减少引压孔被水淹没时间,降低维护成本。安装完成后对监测设备进行校准。当井内水位低于超声波传感器的测量盲区时,由超声波传感器采集数据,当水位上升至测量盲区以上时,由静压传感器采集数据。

3.3 现场数据监测、分析与展示

利用气象站和液位计进行现场数据采集,通过移动通信技术和NB-IoT技术将实时数据传输至设备厂商配备的数据存储和管理平台;通过数据接口的开发,调取设备厂商平台上的监测数据,并根据内涝预警系统搭建的需要进行数据处理和统计分析,包括日雨量、瞬时雨量和累计雨量,以及井内水位变化曲线等各类数据信息;将监测平台的原始数

据和处理分析后的数据在内涝预警系统上进行集成展示,效果直观,便于管理者总体把握现场监测情况。

此外,通过数据接口开发,获取气象局或天气数据供应商平台的天气预报和预警数据,包括气温、湿度、风向和风速、气压、空气质量等天气预报信息,以及高温、台风、暴雨等天气预警信息,并在内涝预警平台上进行展示,使数据信息和预警范围更加全面和丰富。

3.4 内涝预警分析和等级划分

城市内涝预警等级和判断依据见图7。

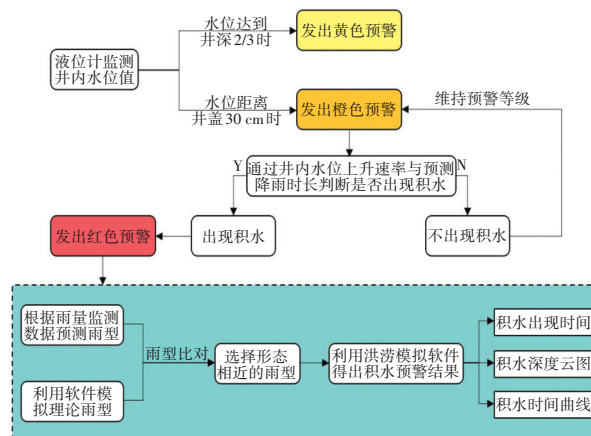


图7 城市内涝预警等级及判断依据

Fig.7 Warning grade and judgment basis of urban waterlogging

该系统将城市内涝预警定义为3个等级,分别是黄色、橙色和红色预警,预警级别依次提升。黄色和橙色预警通过井内水位值进行分析,当液位计监测到井内水位上升到井深2/3时发出黄色预警,此时表明排水管网已超负荷运转,由重力流转为压力流;当水位达到距离井顶以下30 cm时发出橙色预警,此时表明该监测点位可能发生道路积水。红色预警通过井内水位上升速率和天气预报提供的降雨预测情况进行判断分析,当监测井内水位上升导致的冒顶时间小于天气预报预测的降雨时长时,表明该监测点位将会发生道路积水,此时发出红色预警。各级内涝预警解除的判断条件与前述分析相反。

3.5 内涝与气象灾害预警发布

该系统采用C/S架构开发,服务器负责监测、预警等各类数据的管理,客户机负责完成与用户的交互任务,预警信息通过短信息发送至用户手机,并

通过 APP 进行信息推送,辅助管理者及时掌握预警信息,制定应急决策。该系统预警信息包括气象灾害预警信息和城市内涝预警信息两部分,气象灾害预警信息从气象平台获取,内涝预警信息通过内涝预警分析得出。当内涝红色预警发出后则进行本场雨的雨型生成,并与典型降雨情景库中的雨型进行匹配,选择与本场降雨接近的典型雨型,提取该雨型所对应的模拟结果进行内涝情景预报,预报信息包括积水点位置、积水范围和深度、积水持续时长等。

3.6 道路积水场景模拟演示

道路积水场景模拟演示集成了天气场景模拟、降雨强度模拟、实时水位模拟、预警预报详情、内涝区域及积水深度云图等多项功能,以动画形式模拟不同重现期下典型降雨过程引起的城市道路积水、内涝预警、积水消散全过程的动态演变,使用户更加直观地体验和掌握该内涝预警系统的工作原理和预警方法,同时便于向非专业人士解释系统功能。在演示过程中,城市全景模型场景会随着天气变化在晴天、阴天、雨天自动切换,且三维场景支持缩放、移动和旋转查看,道路积水范围和深度、积水持续时长等会随着降雨过程动态变化,可以更加真实地反映实际积水情况。

道路积水场景模拟效果见图 8。

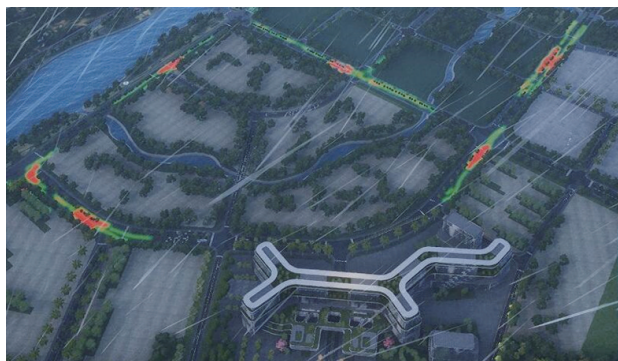


图 8 道路积水场景模拟

Fig.8 Scene simulation of road flooding

4 应用案例

该城市内涝监测预警系统相关成果已在汕头市塔岗围片区进行了试点应用。该片区位于汕头市东南沿海,由填海造地形成,面积为 7.4 km²。结合片区实际情况,定制化开发了“汕头塔岗围数字孪生内涝预警系统”(见图 9),主要包括系统总览、内涝监测、环境监测和内涝演示四个功能模块。



图 9 汕头塔岗围数字孪生内涝预警系统

Fig.9 Digital twin waterlogging early warning system of Tagangwei area in Shantou

该系统自 2022 年 8 月上线应用以来,片区曾多次遭受强降雨影响,当系统发出内涝预警信息时,相关部门管理人员会对预警地点的积水情况进行实地考察和记录,包括是否发生积水、积水范围和大致深度等,对内涝预警的准确性进行了初步验证,表明预警结果基本准确。未来,随着城市建设的不断推进,洪涝数值模型将进行迭代更新,并将根据道路积水的实测结果对模型进行验证和优化,在反复的验证和迭代过程中不断提高系统预警的准确性。

该系统实现了 BIM 模型数据在数字孪生中的复用,探索了一条从工程设计模型到暴雨积水分析模型的路径,结合传感器研究和内涝预警预测算法,在数字底板上搭建了塔岗围片区城市综合体内涝预警预报系统,实现运维阶段数字孪生系统中可视化的内涝预警辅助决策功能,为各级管理部门提供充分的数据信息保证和技术支持手段,初步形成了城市综合体内涝预警与安全体系的构建,为片区带来了一定的经济效益、社会效益和生态效益。

5 结论

在系统总结目前主流内涝预警方法的基础上,结合物联网监测技术的实时性和准确性、数值模拟与大数据分析的预测性,提出了一种将洪涝数值模拟与物联网技术相结合的内涝预警方法,并基于该方法研发了一套城市内涝监测预警系统,明确了预警等级内涵和预警发布原理。该方法及系统是对我国现有城市内涝预警技术的完善和优化,具有预警准确性高、时效性强、稳定性好等特点,在实际应用中得到了有效验证,并将在后续应用中不断迭代升级,使系统更加完善、预警更加准确。该系统的

研发与应用对城市内涝防范和预警有重要意义,具有一定的推广应用价值。

参考文献:

- [1] 陈文杰. 城市洪涝水文水动力模型构建与洪涝管理关键问题研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
CHEN Wenjie. Urban Flood Hydrological and Hydrodynamic Model Construction and Flood Management Key Issues Exploration [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019 (in Chinese).
- [2] 寇殿良, 彭焘, 刘启岚, 等. 基于SWMM的南宁市仙葫大道内涝点分析及改造[J]. 中国给水排水, 2018, 34(5): 136-138.
KOU Dianliang, PENG Tao, LIU Qilan, *et al.* Cause analysis and modification of waterlogging point in Xianhu Road of Nanning City based on SWMM [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(5): 136-138 (in Chinese).
- [3] 徐美, 刘舒, 孙杨, 等. 利用洪涝模型进行城市内涝风险快速识别与预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(8): 1185-1194.
XU Mei, LIU Shu, SUN Yang, *et al.* Rapid identification and early warning of urban waterlogging risk using flooding model [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020, 45(8): 1185-1194 (in Chinese).
- [4] 黄黎明, 肖潜, 陈良志. 基于数值模拟的道路积水分析[J]. 土木建筑工程信息技术, 2022, 14(4): 109-115.
HUANG Liming, XIAO Qian, CHEN Liangzhi. Analysis of road waterlogging based on numerical simulation [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2022, 14(4): 109-115 (in Chinese).
- [5] 刘媛媛, 刘业森, 郑敬伟, 等. BP神经网络和数值模型相结合的城市内涝预测方法研究[J]. 水利学报, 2022, 53(3): 284-295.
LIU Yuanyuan, LIU Yesen, ZHENG Jingwei, *et al.* Intelligent rapid prediction method of urban flooding based on BP neural network and numerical simulation model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 284-295 (in Chinese).
- [6] 白岗岗, 侯精明, 韩浩, 等. 基于深度学习的道路积水智能监测方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 75-80.
BAI Ganggang, HOU Jingming, HAN Hao, *et al.* Intelligent monitoring method for road inundation based on deep learning [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 75-80 (in Chinese).
- [7] 刘雄. 大数据技术在城市洪涝灾害分析预警中的应用研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2015.
LIU Xiong. Research and Application of the Technology of Big Data on Analysis and Early Warning of City Waterlogging Disaster [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2015 (in Chinese).
- [8] 何嘉莉, 陈兵, 姜涛, 等. 城市内涝在线监控与信息服务数字化系统设计[J]. 中国给水排水, 2014, 30(1): 94-98.
HE Jiali, CHEN Bing, JIANG Tao, *et al.* Design of digital system for urban waterlogging online monitoring and information service [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(1): 94-98 (in Chinese).
- [9] 张忠义, 王喆, 方丹辉. 基于物联网与GPRS技术对武汉市内涝监测预警系统的优化设计[J]. 安全与环境工程, 2018, 25(2): 37-43.
ZHANG Zhongyi, WANG Zhe, FANG Danhui. Optimal design of urban waterlogging monitoring and warning system in Wuhan based on Internet of Things and GPRS technology [J]. Safety and Environmental Engineering, 2018, 25(2): 37-43 (in Chinese).
- [10] 徐敏, 李闪, 李进荣, 等. 基于GPRS与组态技术的城市道路积水监测预警系统设计[J]. 轻工科技, 2015, 31(2): 93-94, 96.
XU Min, LI Shan, LI Jinrong, *et al.* Design of urban road water monitoring and warning system based on GPRS and configuration technology [J]. Light Industry Science and Technology, 2015, 31(2): 93-94, 96 (in Chinese).

作者简介:杨彪(1989-),男,辽宁锦州人,硕士,高级工程师,主要研究方向为基础设施工程数字化研究与应用。

E-mail: yangbiao@fhdigz.com

收稿日期:2023-09-04

修回日期:2024-01-17

(编辑:衣春敏)