

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.06.026

面向智慧城市的合肥智慧供水规划与建设

朱 波^{1,2}, 郑飞飞³, 刘业政¹, 姜元春¹, 穆 利²

(1. 合肥工业大学管理学院 过程优化与智能决策教育部重点实验室, 安徽 合肥 230009;
2. 合肥供水集团, 安徽 合肥 230011; 3. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

摘 要: 智慧供水是供水信息化建设的高级阶段,是智慧城市的重要组成部分,能够有效提升供水企业的管理和业务水平。基于智慧供水的基本概念和前沿技术,对合肥智慧供水建设规划、建设内容、信息安全、支撑体系进行了介绍。合肥供水的智慧生产、智慧管网、智慧服务、智慧管理、调度指挥、移动应用、水量预测,以及网络信息安全和支撑保障体系建设的经验可为同行提供参考。

关键词: 智慧城市; 智慧供水; 信息化; 物联网; 深度学习

中图分类号: TU991 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)06-0143-06

Planning and Construction of Smart Water Supply for Smart City in Hefei

ZHU Bo^{1,2}, ZHENG Fei-fei³, LIU Ye-zheng¹, JIANG Yuan-chun¹, MU Li²

(1. Key Laboratory of Process Optimization and Intelligent Decision-making of Ministry of Education, School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Hefei Water Supply Group, Hefei 230011, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Smart water supply is the advanced stage of water supply informatization construction and an important part of smart city, which can effectively improve the management and operation level of water supply enterprises. Based on the basic concept and cutting-edge technology of smart water supply, the construction planning, construction content, information security and support system of smart water supply in Hefei are elaborated. The experiences of Hefei water supply in smart production, smart pipe network, smart service, smart management, dispatch and command, mobile application and water volume prediction, as well as the information security and support system can provide reference for other cities.

Key words: smart city; smart water supply; informatization; IOT; deep learning

1 建设背景

合肥供水集团始建于 1954 年,承担着合肥市区全域供水任务。拥有 7 座制水厂、3 座水源厂、7 个供水所和巢湖水业有限公司、肥西自来水公司等子公司。截至 2019 年底,集团资产总额 94.99 亿元,用户 235 万户,直径 75 mm 以上供水管网 8 211.64

km,供水能力为 $231 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,供水服务面积为 652.9 km^2 ,为大型一类国有企业。

合肥供水信息化建设始于 20 世纪 80 年代,伴随着我国信息化的进程而发展,经历了从无到有、从必要到必需的过程,2010 年前后合肥供水生产、营运、服务板块均建立了信息系统,但是与国内大多数

大型供水企业一样存在数据不完善、信息孤岛、敏捷性不够、智慧化不足等突出问题^[1],亟需利用新兴的信息技术开展智慧供水建设。

2 合肥智慧供水建设

2.1 智慧供水建设目标

合肥智慧供水建设遵循“统一规划、统一标准、分步建设、信息共享、面向服务”的原则,按照“标准化、松耦合、可扩展、组件化、平台化、资产化、云上化”原则,利用大数据、云计算、物联网、信息物理网络、人工智能等新一代信息技术,构建智慧水务平台,使得供水系统达到智慧的状态,从而促进粗放管理向精细管理转变、结果管控向过程管控转变、被动服务向主动服务转变、应急处置向预警处置转变、优化调度向科学调度转变,实现管理精细、服务标准、生产智能、决策科学的目标。

2.2 智慧供水建设内容

构建了包括供水物联网(感知层)、基础设施(物理层)、业务系统(逻辑层)、数据中心(数据层)、智慧应用(应用层)、决策中心(智慧大脑)的智慧供水体系架构,建设了供水业务信息管理应用群,在供水数据中心建设基础上实现了智慧生产、智慧管网、智慧管理、智慧服务、科学调度五大核心智慧应用,实现了供水业务生产运作自动化、业务管理高效化、客户管理优质化、智慧决策科学化。

2.2.1 智慧供水信息物理系统建设

以安全生产、可靠运行、节能降耗为目标,紧密围绕制水生产关键环节,构建了全面感知、实时监控、及时响应的智慧水务信息物理系统。

① 供水物联网

制定了供水物联网数据通信规约合肥标准,建设了供水物联网平台,基于窄带物联网技术构建了压力、流量、水质、温度等在线设备的供水物网络,实现了物网络数据统一集中管理。

② 水厂生产管理系统

建设了水厂生产管理系统,采用国内主流的自控架构对原水、沉淀池、滤池、清水池、出水泵房的制水全过程进行实时监控,实现了全生产过程的自动化控制;研制了基于神经网络的自动加药系统精准控制加药,在生产过程质量大幅提升的同时节约了大量人力物力;建设了生产能耗分析系统、生产决策支持系统,对生产进行指导;这些系统的建立有效降低了电耗、药耗,目前合肥供水集团供水量已经达到

$5.95 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,各水厂的单位制水能耗已降至 $260.4 \text{ kW} \cdot \text{h}/10^3 \text{ m}^3$,处于国内领先水平。

③ 二次供水监控系统

建设二次供水远程监控信息管理系统,实现二次供水流量、压力、水位、机泵等工况的实时监控,1000余座泵房运行状态一目了然,同时可以远程控制,保障二次供水泵房运行安全,创新性地实现泵房视频、门禁与报警系统联动控制,实现了闯入报警、远程对话、行为追踪、远程停泵等功能,全天候保障二次供水泵房安全运行。

2.2.2 智慧供水应用平台建设

① 智慧管网建设

合肥供水利用 ArcGIS 平台建设了供水管网地理信息管理系统,实现了近6900 km供水管网及附属设施的全面数字化。通过建立管网水力静态模型,将管材、管径、阀门、管网节点及建设年代信息综合形成系统图,经过拓扑、参数、工况的模拟仿真实现管网设计规划口径和走向优选、水厂最佳选址。

建设了漏控管理信息系统,按照“三级分区六级计量”的逻辑,接入了原水、出厂水、供水所、供水所子区域、小区进 waters 表、用户水表的六级流量计数数据,全面管控约200万户水量信息,通过综合展示、分区管理、大用户管理、水平衡分析、夜间最小流量分析等功能,及时排查、维修、止漏。与清华合肥公共安全院联合完成合肥市城市生命线供水安全工程建设,运用超声波、智能球技术实现了管网漏点快速定位和爆管风险管理,保障供水运行安全。

建设管网外业管理系统,为供水管理所配备了手机终端设备,并定制化开发了巡检APP,按照编制好的巡检任务前往各巡检点即可完成管网养护任务。如果巡检过程中发现了管网隐患,也可以直接通过APP形成维修工单,传递给抢修人员前往修复,实现了管网巡检养护的闭环管理;建立了“网页端巡检计划编制,手持端巡检任务执行,GPS轨迹回放”的管网巡检新模式,分区域精细化管理,实现了管网设施巡检的全覆盖,极大提高了巡检养护工作效率,成为管网设施巡检管理的重要抓手。

② 智慧客服建设

合肥供水基于CRM(客户关系管理)思想建立了智慧客服管理系统,基于 workflow 技术构建了网络业务办理平台,具备手机端、网络端、智慧营业厅多个用户入口,实现供水业务网页办、微信办、APP办。

在用户业务上将查询、缴费、过户等25个线下业务搬到线上,通过融合支付技术实现网上银行、移动支付平台和供水营收数据的完全打通,实现供水业务“线上办”“零跑办”。

在业扩报装以及工程建设上,以项目为中心,实现对业务受理、现勘与立项、设计审图、预算、合同编制与收费开票、施工下单、移交和结算等关键节点“红黄绿灯”信息管控,极大地减少中间环节,简化办事程序,压缩办理时限,实现了供水业务办理的高效、精准和快捷,实现用户“最多跑一次”,有力地提升了合肥市营商环境。

在用户诉求处理上,建立了基于云呼叫的供水热线与工单处理系统,将话务、工单、报表等功能模块集成到一起,为用户提供来电、咨询、报修、回访全套便捷服务。当用户来电时,系统自动根据手机号生成以用户基本信息、用水量信息、水费信息、报建信息、过往来电等信息为维度的用户画像,有效处置用户诉求并及时下发工单处置。

③ 智慧管理建设

合肥供水基于EAS(电子商务防盗窃)系统平台,构建了符合供水业务实际的ERP(企业资源计划)平台,将企业经营中业务流程、财务流程、管理流程三大流程有机融合,将“事件驱动”概念引入流程设计,建立基于业务事件驱动的财务一体化信息处理流程,使财务数据和业务融为一体,形成以财务数据为龙头、以业务数据为依托、以项目数据为核心的信息化管理平台,实现对财、业、物的统一管控。

④ 数据中心建设

制定了适用于合肥供水的统一的数据标准体系,基于数据仓库技术和统计分析模型,将分布在各信息孤岛上的数据进行统一的存储、管理、分析、传递,实现数据资源有效整合,建立生产运营、管网运维、客户服务、综合管理四大主题数据仓库,利用大数据和数据挖掘技术对主题仓库中的数据开展定量分析、模拟建模、预测建模,实现报表生成、即席查询、多维分析、预警分析、统计分析、预测分析、模拟分析功能,采用商业智能工具结合决策支持技术,为供水生产运营中的各类管理问题提供决策支持,指导员工如何做、中层如何管、决策层如何定,全面支撑供水各项业务管理科学化、智慧化。

⑤ 移动应用建设

信息系统的移动应用有着不受时间、空间限制

的突出优势,合肥供水在关键业务上全面实现了移动化:基于办公APP,可以随时查看新闻、通知公告,办理工作流程,随时随地掌上办公;基于工单APP,所有工单均可在手机上处置,可以最便捷的方式掌握用户诉求服务用户,有力支撑了集团公司“半小时服务圈”建设;基于巡检APP,管网巡检任务实现了定时、定点、全覆盖,轨迹回放功能可对巡检质量进行管控;基于管网信息APP,设计、工程管理人员可以摆脱传统纸质图纸的束缚,随时随地查看管网信息,进行现场查勘。可以说,移动应用已经成为合肥供水工作必不可少的工具之一。

2.2.3 智慧供水调度指挥平台建设

建设了合肥供水调度指挥平台,集成了3座水源厂、7座制水厂、9座加压站、110个管网压力监测点、48个管网水质监测点、300余台车辆、200余人员、5000余块工商户表等共计8000余项实时监测数据和营收、话务、工单、视频等海量非实时数据,利用BI(商业智能)技术实现了“一张图”展示供水业务全貌,平台可以通过地理信息系统展示空间数据,也可以通过柱状图、折线图、报表等多种形式查看从水厂到管网到用户的全业务链条数据信息,实现了管网状态实时预警和科学辅助调度,有效降低爆管、滴漏、低压等供水运行风险。

在综合调度管理上,实现各类调度信息所见即所得、所见即所需、所见即所用。利用决策支持技术实现调度方案的在线自动生成,通过数字化指令直接下达到各水厂和二级单位,指令产生、下达、接收、确认、执行、回复、评价全过程数字化,历史调度方案存入专家知识库,利用知识发现技术不断对自动调度方案进行优化修正。

在应急调度管理上,如发生爆管等重大管网事件时,平台利用Dijkstra最短路径算法调度故障点附近人员、车辆、物资等资源快速到达抢修现场,现场可以通过移动网络布控球回传抢修现场画面,抢修人员一举一动都尽收眼底。基于供水管网水力模型的爆管分析功能,快速生成关阀方案并预测可能影响的用户,快速制定科学的应急调度方案,同时应急调度方案生成后直接下达到具体抢修人员手机上,迅速止水、及时维修,将突发事件影响降到最低,极大提高了应急保障能力。

2.2.4 基于深度学习的供水量预测

合肥智慧供水项目的实施基本实现了“明察眼

前”,但是“预见未来”指导供水决策还有很长的路要走,特别是准确的供水量预测,对于供水系统调度决策、漏损控制、节能降耗、安全运行等具有很高的价值。

国内外在供水预测方面主要成果有:差分自回归移动平均模型(ARIMA)普遍用于供水量预测分析,如在爱尔兰都柏林的15 min用水量预测上,产生的平均绝对百分比误差(MAPE)约为4.2%^[2]。美国佛罗里达州的小时城市用水量预测和中国城市的24 h用水量上的预测精度分别达到了4.7%^[3]和6.2%^[4]。一种多尺度相关性向量回归(MSRVR)已被开发用于预测城市日用水量,该模型将历史数据序列分解为不同的精度^[5];在随机森林模型(RF)方面,有关研究将小波变换和随机森林回归相结合,预测中国西南地区的城市日用水量^[6]。这些先进的数据驱动模型表现突出,但相关模型的精度仍有待提高,例如,RF模型^[6]和ANN模型^[4]在用于预测每日用水量时产生的MAPE值分别为6.98%和8.11%。从这些结果来看,预测结果并不理想,因此仍然有必要进一步提高用水量预测模型的预测精度,从而使它们更广泛地应用于实际中。

鉴于供水量预测对于智慧供水建设的重要性,合肥供水联合浙江大学、合肥工业大学开展了合肥城市供水量24 h总体用水量预测(误差要求 $\pm 3\%$)研究并在调度指挥系统进行了程序实现。该研究选取了ARIMA、支持向量机(SVM)、循环神经网络(LSTM)、RF等深度学习算法,对全市供水量进行预测研究,选取的训练数据周期为3年,验证数据周期为90 d,经试验发现LSTM的预测精度最好(见表1),选取2019年10月8日—11月28日间共计52 d进行实际预测(见表2),其中88.7%的预测误差在5%以内,71.7%的预测误差在3%以内,MAPE值为2.20%,达到项目制定的目标。该成果标志着合肥供水的智慧供水开始向着高级阶段发展。

表1 各模型时用水量预测效果

Tab.1 Prediction effect of water consumption in each model

模型	MAPE/%	纳什效率系数(NSE)	均方根误差/ m^3	R^2
ARIMA	4.26	0.937	3 366.74	0.937
LSTM	2.56	0.978	1 975.98	0.981
SVM	3.40	0.963	2 587.10	0.966
RF	3.70	0.945	3 153.39	0.945

表2 供水预测结果

Tab.2 Water supply forecast results

日期	预测水量/ m^3	实际水量/ m^3	相对误差(绝对值)/%
2019-10-08	1 784 395	1 746 340	2.18
2019-10-09	1 820 954	1 820 714	0.01
2019-10-10	1 856 952	1 798 262	3.26
2019-10-11	1 848 429	1 759 486	5.06
2019-10-12	1 732 953	1 737 254	0.25
2019-10-13	1 702 614	1 775 004	4.08
2019-10-14	1 767 767	1 762 264	0.31
2019-10-15	1 787 391	1 797 996	0.59
2019-10-16	1 797 374	1 792 568	0.27
2019-10-17	1 818 010	1 813 908	0.23
2019-10-18	1 815 172	1 834 786	1.07
2019-10-19	1 856 010	1 839 060	0.92
2019-10-20	1 855 787	1 841 236	0.79
2019-10-21	1 844 985	1 863 836	1.01
2019-10-22	1 871 118	1 846 614	1.33
2019-10-23	1 859 258	1 888 646	1.56
2019-10-24	1 886 237	1 921 802	1.85
2019-10-25	1 886 237	1 843 598	2.31
2019-10-26	1 848 914	1 838 714	0.55
2019-10-27	1 778 840	1 885 558	5.66
2019-10-28	1 893 606	1 939 352	2.36
2019-10-29	1 893 606	1 864 938	1.54
2019-10-30	1 886 680	1 811 954	4.12
2019-10-31	1 742 897	1 813 556	3.90
2019-11-01	1 774 218	1 820 548	2.54
2019-11-02	1 774 218	1 792 746	1.03
2019-11-03	1 791 039	1 801 880	0.60
2019-11-04	1 783 312	1 800 934	0.98
2019-11-05	1 807 548	1 772 054	2.00
2019-11-06	1 764 124	1 761 082	0.17
2019-11-07	1 736 679	1 770 442	1.91
2019-11-08	1 764 124	1 772 324	0.46
2019-11-09	1 779 814	1 761 052	1.07
2019-11-10	1 759 645	1 742 818	0.97
2019-11-11	1 729 805	1 760 608	1.75
2019-11-12	1 751 380	1 695 882	3.27
2019-11-13	1 693 043	1 677 192	0.95
2019-11-14	1 623 975	1 716 788	5.41
2019-11-15	1 712 669	1 723 514	0.63
2019-11-16	1 754 892	1 721 610	1.93
2019-11-17	1 726 178	1 628 378	6.01
2019-11-18	1 603 642	1 641 570	2.31
2019-11-19	1 574 944	1 686 740	6.63
2019-11-20	1 707 926	1 685 724	1.32
2019-11-21	1 719 347	1 657 998	3.70
2019-11-22	1 650 304	1 698 448	2.83
2019-11-23	1 687 766	1 698 394	0.63

续表2 (Continued)

日期	预测水量/ m ³	实际水量/ m ³	相对误差 (绝对值)/%
2019-11-24	1 728 718	1 638 976	5.48
2019-11-25	1 624 081	1 566 926	3.65
2019-11-26	1 504 350	1 579 830	4.78
2019-11-27	1 529 018	1 556 200	1.75
2019-11-28	1 559 970	1 633 332	4.49

3 智慧供水信息安全建设

随着城市供水系统的信息化程度不断提升,智慧供水已经成为城市供水系统的重要基础设施。2019年12月1日随着网络安全等级保护2.0的正式实行,对于云计算、物联网、移动互联网、工业控制、大数据新技术提出了新的安全扩展要求,智慧供水完全覆盖了这些新技术,信息安全的重要性不言而喻。

3.1 供水信息安全威胁

合肥供水目前每天受到的网络攻击7 000余次,235余万用户的关键数据需要保护,经分析威胁主要来自4个方面:①随着智慧服务系统的运行,在方便用户的同时,也存在着外部黑客攻击、用户关键数据泄露的危险;②伴随着智慧水务建设,信息化应用大量运用,存在病毒传播、商业信息泄露的风险;③由于权限管理不善、数据备份不及时会造成数据误删和丢失的威胁;④随着供水生产运行自动化程度的不断提高,工业控制系统面临系统漏洞和外部攻击威胁。这些安全威胁如果不能有效防范,将会造成供水企业重大经济损失和恶劣的社会影响。

3.2 信息安全建设内容

针对4个方面的威胁,合肥供水从信息安全管理、信息安全技术、数据安全3个方面建设了信息安全体系。

3.2.1 信息安全管理

对于信息网络设置了4个安全区:A级别安全区为供水实时控制系统,包括供水物理信息网络系统、水厂控制系统、二次供水控制系统等生产核心系统。B级安全区为包含供水营销系统、业扩报装系统、供水热线系统、管网管理系统等的供水运行核心系统。C级安全区为支持企业经营、管理、运营的管理信息系统。D级安全区为和用户进行服务交互的各类网络服务系统。

其中A级安全区关系安全生产,是安全防范的重中之重,B级安全区关系到供水核心业务,也是重

点防范对象,这两个区域使用网闸和C级安全区进行数据单项流动,C级安全区与D级安全区使用防火墙隔开,采用中间件技术进行数据通信,D级安全区采用云防护技术,对攻击、病毒按照3级等保要求防护。同时参照等保2.0、ISO 27001信息安全管理体制制定了信息安全管理规定,规范信息安全管理。

3.2.2 信息安全技术

供水各机房均按照B级标准建设,设置准入管理系统和机房监控系统,对人员门禁准入和机房设施进行管理和监控,做实物理安全管理;在病毒防治上,部署虚拟主机防护、计算机系统防护、终端设备防护系统,做到从服务器到终端的全面病毒防治;在漏洞管理上,设置补丁分发服务器,及时分发补丁,采购漏洞扫描服务,定期开展代码漏洞扫描,及时修补漏洞;在行为管理上,部署上网行为系统、IDS、IPS系统进行用户行为管理,规范用户行为;部署CA认证系统、身份管理系统,对信息系统权限按照业务要求进行分配和管理,配合日志和审计系统对用户操作进行管理;部署堡垒机、采购云防护服务,对提供外部服务的平台和网络进行防护。

3.2.3 数据安全

合肥供水打造了“两地三中心”的IT架构,对关键数据进行异地备份,开展信息数据ABCD分级管理,针对不同等级设置不同备份频度;对于关键数据进行严格的权限管理,对于用户信息服务的数据进行脱密处理后发布;对于涉密数据,单独设立涉密计算机,对关键数据加密处理。

合肥供水通过制度建设、科学管理和技术防范三管齐下,实现了“不授权进不来,没权限看不到,看到了拷不走,所有操作可追溯,丢失了能恢复”的信息数据安全监管效果^[7]。

4 智慧供水支撑体系建设

4.1 标准制度规范

基于合肥智慧供水的建设实际,选用基于服务的架构(SOA),从而实现智慧水务各组成模块间的信息共享和业务系统,而水务对系统功能快速迭代的要求则必须采用敏捷统一开发过程,建立微服务框架。IT服务管理使用目前较为成熟的ITIL、COBIT和ISO 17799标准来规范IT控制、运维支撑、IT治理和IT安全管理,采用PMBOK标准来规范信息化建设中的项目管理,采用ISO 9000标准来规范信息化建设中的产品质量,采用ISO 27001标准来

规范智慧水务安全管理。通过这些成熟的信息化治理工具,建立起完备的管理制度体系和技术标准体系将是智慧供水成功的制度保证。

4.2 人才队伍保障建设

智慧供水建设信息化人才是关键,信息化建设的成功与否,最终取决于全员的信息素养和技能。信息化建设需要既懂信息技术,又懂企业管理的复合型人才,他们能将信息技术充分融合到企业管理,带领企业实现智慧化转型。而员工的信息运用能力是供水信息化落地的关键性因素,利用培训提升员工信息管理意识,提高其信息化能力至关重要。企业员工的信息运用能力是企业信息化的水平高低的根本性因素,所以智慧水务成败的关键在人,只有在打造信息化业务专才的同时提高全员的信息运用水平和技能,才能在根本上促进合肥供水水务信息化的发展。

合肥供水在智慧供水的建设过程中非常重视人才队伍建设,不仅拥有一支23人的专业信息化建设管理团队,还在生产、营运、服务、综合各类智慧供水系统建设过程中培养了一批懂业务通信息的复合型人才,利用上线培训、定期培训和日常宣贯对全员的信息运用能力进行提升,使得合肥智慧供水不仅建得好,而且用得好。

5 结语

结合合肥供水智慧供水建设实际,介绍了智慧供水总体框架和建设目标,并就智慧生产、智慧服务、智慧管网、智慧管理、科学调度等方面的建设进行了详述;介绍了物联网、大数据、信息物理网络、移动互联网、深度学习等技术在智慧供水中的运用和成效;介绍了智慧供水信息安全管理 and 支撑保障体系建设情况,具有一定的前瞻性和创新性,对于国内智慧水务和智慧城市的建设具有示范意义。

参考文献:

[1] 谢丽芳,邵煜,马琦,等. 国内外智慧水务信息化建设

与发展[J]. 给水排水,2018,44(11):135-139.

XIE Lifang, SHAO Yu, MA Qi, *et al.* Construction and development of smart water informatization at home and abroad[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(11):135-139(in Chinese).

[2] ARANDIA E, ECK B, MCKENNA S. The effect of temporal resolution on the accuracy of forecasting models for total system demand[J]. Procedia Engineering, 2014, 89: 916-925.

[3] CHEN J D, BOCCELLI D L. Forecasting hourly water demands with seasonal autoregressive models for real-time application[J]. Water Resources Research, 2018, 54(3):879-894.

[4] GUO G, LIU S, WU Y, *et al.* Short-term water demand forecast based on deep learning method[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2018, 144(12):04018076.1-04018076.11.

[5] BAI Y, WANG P, LI C, *et al.* Dynamic forecast of daily urban water consumption using variable-structure support vector regression model[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2014, 140:19435452.

[6] CHEN G, LONG T, XIONG J, *et al.* Multiple random forests modelling for urban water consumption forecasting[J]. Water Resource Management, 2017, 31:4715-4729.

[7] 春增军,时光. 大型企业集团网络与信息安全保密总体方案及策略[J]. 计算机安全, 2009(11):75-78, 82.

CHUN Zengjun, SHI Guang. The total solution and policy of network and information security and secret for large enterprise group[J]. Computer Security, 2009(11):75-78, 82(in Chinese).

作者简介:朱波(1982-),男,安徽合肥人,硕士,高级工程师,主要从事给排水技术、供水信息化、自动化技术研究。

E-mail:68754788@qq.com

收稿日期:2019-08-23

修回日期:2020-02-14

(编辑:衣春敏)