

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201805005



物联网和云计算下的城市供水管网 漏损控制系统设计

张一凡^{1,2}, 崔建国^{1,2}, 张峰^{1,2}, 李红艳^{1,2}

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 晋中 030600;
2. 太原理工大学 山西省市政工程研究生教育创新中心, 山西 晋中 030600)

摘要: 为了解决城市供水管网不便监管、自控能力弱、漏损严重等问题,设计基于物联网和云计算的城市供水管网漏损控制系统.该系统以物联网为架构体系,OneNet 设备云平台为数据处理平台,分析供水系统感知层的 ZigBee 无线传感网络技术和网络层的传输技术,研究应用层中数据处理平台的设计方法,给出基于遗传算法的压力管理漏损控制技术.实例结果表明:将该系统运用于小型管网中,可有效地优选控制阀门,给出优化的阀门开启度,使管网压力分布趋于合理,从而降低管网漏损率.

关键词: 供水管网; 漏损控制; 物联网; 云计算

中图分类号: TU 991 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2019)01-0034-07

Design of Leakage Control System for Urban Water Supply Network Using Internet of Things and Cloud Computing

ZHANG Yifan^{1,2}, CUI Jianguo^{1,2}, ZHANG Feng^{1,2}, LI Hongyan^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China;
2. Shanxi Municipal Engineering Graduate Student Education Innovation Center,
Taiyuan University of Technology, Jinzhong 030600, China)

Abstract: In order to solve the problems of urban water supply network, such as inconvenient supervision, weak control ability for technology, and serious leakage and so on, the leakage control system of urban water supply network based on internet of things (IOT) and cloud computing was designed. Taking IOT as framework, and OneNet cloud as platform for data processing, the technology of ZigBee wireless sensor network of perception layer and the transmission technology of network layer were analyzed, the design method of data processing platform in application layer was studied, and the technology of leakage control of pressure management based on genetic algorithm was given. The results show: the application of the system in small network can effectively optimize the control valves and valve opening degree, can distribute reasonably the pressure of network, thereby can reduce the leakage rate of pipe network.

Keywords: water supply network; leakage control; internet of things; cloud computing

水资源是人类赖以生存的物质之一.供水管网作为输配水设施的一部分,对维持社会的发展有着至关重要的作用.然而,供水管网的漏损情况一直非常严重^[1-2],大部分城市的管网漏损率都在 15% 以上,超过了我国“水十条”规定的标准.为降低城市供水管网的漏损率,管网维护、提高监测效率、优化管网压

收稿日期: 2017-03-29
通信作者: 崔建国(1965-),男,教授,博士,主要从事城镇给排水系统优化的研究. E-mail: afh2005@163.com.
基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51408397)

力等措施成为当前漏损控制的研究方向^[3]。供水管网数据采集与监视控制系统(SCADA)也成为目前供水管网中的流量和压力等状态信息监控的主要手段^[4-5]。但由于缺乏统一的标准,特别是缺乏海量数据的处理能力,依托 SCADA 系统实际上不能实现全面有效的监控。近年来兴起的物联网技术和云计算技术为新一代的城市供水管网漏损控制系统的研究提供了全新的思路。物联网依托互联网,通过信息传感技术,依据约定的协议,可强化对物体智能化的监控和管理^[6-7],其核心特征是可感知、可互联、智能化^[8]。云计算具有超强的计算能力^[9]、资源信息共享、数据处理强的特点,可以减少对硬件的投资^[10]。针对供水管网,物联网的 ZigBee 无线传感网络技术和网络层的传输技术可以快速地实现供水管网信息的采集和传输,同时,云计算技术凭借其超强的数据处理能力也能够满足供水管网中大量数据处理需求,能够克服 SCADA 系统数据监测与处理能力的不足,为供水管网漏损监控的科学决策管理提供有益的探索。基于此,本文设计基于物联网和云计算的城市供水管网漏损控制系统,以探索供水管网漏损控制的技术方法。

1 供水系统物联网架构体系

供水管网系统是城市基础设施的一部分,智慧城市的建设离不开智慧管网的建设。供水管网要达到智慧的状态,需要实时掌握供水管网系统中设备的运行情况和水力状态信息,然后,立即做出相应的决策方案。物联网技术可将供水管网当成管理对象,通过在供水管网中安装智能传感设备监测管网的运行状态,依靠有线或无线网络将这些信息传输至中心服务器,完成智能控制。

物联网的体系架构是构建和实现物联网应用系统的基础^[11]。目前,国内外学者对物联网的层次数目有不同的观点,文中主要采用比较流行和普遍被认可的感知层、网络层、应用层的 3 层架构体系^[12-14]。如图 1 所示。

感知层类似于身体的感觉器官,用于识别物体和采集信息。感知层主要包括监测仪表、传感器、摄像头等信息采集设备和信息接入网关前的无线传感网络。通过供水管网中流量计、压力计及传感器设备的数据采集,了解供水管网中关键节点的流量压力等状态信息,也可利用摄像头对现场信息进行收集。由于后序数据处理云计算平台功能强大,感知层获得的数据量不再像 SCADA 系统那样受到限制。因此,流量、压力等数据也不局限于主干管,甚至可采集用户端的数据。

网络层类似于传递信息的神经系统,用于收集信息并传输至应用层。网络层主要包括有线网络和 GPRS,3G,4G 等无线网络,也可以根据供水管网中采集点的分布情况选用不同的专用网络。专用网络可根据云计算的接口需求,并充分考虑到网络安全的情况下与互联网对接。

应用层相当于人的大脑,是实现系统智能控制的关键,用于数据处理及方案决策,并将决策命令通过网络层下发至感知层。应用层主要包括强大的数据处理平台、完善的应用软件、Web 服务器等,主要负责供水管网信息的处理、存储、共享,智能的决策及 Web 的展现。

2 物联网漏损控制系统设计

2.1 感知层设计

2.1.1 监测数据类型与层次 根据漏损控制系统的需求,监测的数据应该包括节点的压力、流量、阀门的开启度及水泵的运行参数等,特别是对压力和流量信息的获取,从而了解干管中的压力和流量,分析管道是否出现漏损点,掌握用户的压力和流量,判断是否满足用户的用水需求。

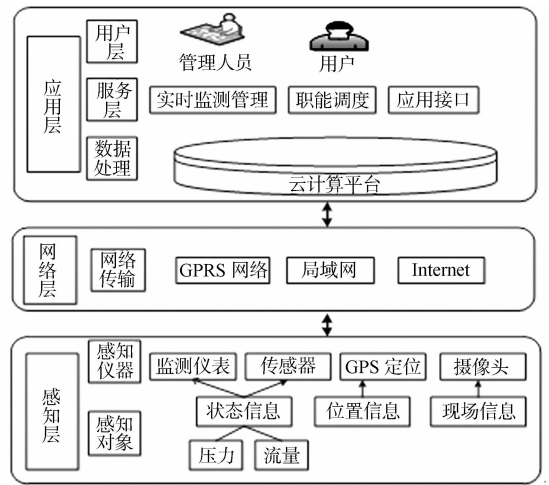


图 1 城市供水管网漏损控制系统结构
Fig. 1 Structure of leakage control system
of urban water supply network

2.1.2 监测点的优化布置 1) 管网的水力特性. 城市供水管网的拓扑结构十分复杂, 实现每个节点压力和流量的监测很不现实, 只能完成对有限个关键节点的信息采集. 但是供水管网的各个节点的压力和流量信息并不是独立的, 都遵循管网连续性方程和能量守恒方程, 依靠有限个关键节点的信息可以推出其他未知节点的信息, 了解管网的运行状态.

2) 监测点布置原则. ZigBee 是一种新型的低功耗、低成本、时延短、网络容量大、可靠性高、安全的无线通信技术^[15]. 它主要有星型、簇状型、网状型 3 种组网方式^[16]. 其中, 网状型(图 2)的拓扑结构网络性能好, 可靠性高, 具有很强的环境适应能力. 系统可以根据网状型的 ZigBee 结构, 将供水管网分成许多监测点, 以监测点为基本单位(图 3), 在每个监测点的 ZigBee 网络中, ZigBee 采集节点由流量传感器和压力传感器组成, 作为采集水力状态信息的终端设备, ZigBee 汇聚节点汇总采集节点采集的压力流量数据, 并将数据通过无线传感网络传输到物联网网关. 因此, 监测点的布置一般选择泵站的出口、管网最不利点、压力过高的点等具有代表性的位置.

2.2 网络层设计

供水管网的压力和流量时刻在变化, 为确保信息的实效性, 可以选用 4G 网络作为 ZigBee 网络连接互联网和终端服务器的数据传输通道. 4G 网关实现 ZigBee 协议与互联网协议的转换, 完成与互联网的连接, 其硬件结构如图 4 所示. 图 4 中: 电源模块和稳压芯片负责提供稳定的电压; CC2520 射频芯片接收传感器节点上传的压力、流量等参数信息; 微处理器 STM32F405RG 有丰富的硬件接口, 能提供 2 个全速 USB 2.0 接口; 4G 模块 MC7710 通过 USB 2.0 接口可与网关中的微处理器进行数据交换, 并通过 4G 网将数据传输到终端服务器.

2.3 应用层设计

2.3.1 云计算数据处理平台设计 OneNet 设备云平台是中国移动推出的一款基于物联网的开放平台. HTTP 协议作为传输协议, 不仅是数据分析平台, 可以存储和共享数据, 还可以实现基于物联网技术的硬件设备的开发. OneNet 设备云平台的资源管理层次结构, 如图 5 所示. 根据 OneNet 平台的框架, 创建一个网络供水管网监测项目. 在项目下, 添加一个管网参数监测设备和监测中心的应用; 在每个设备下, 添加需要监测的位置、压力、流量等参数信息; 在监测中心应用中, 创建各种数据流命令按键等应用模块. 此平台能够对大量传感设备采集的信息进行快速地分析和处理, 在短时间内, 提取有效的数据存入数据库实现信息共享, 确保供水管网数据获取的准确性和时效性.

2.3.2 管网的漏损控制云计算 1) 漏损影响因素. 供水管网的漏损一般分为表观漏损和真实漏损^[17]. 表观漏损是指仪表计量误差和偷水等非法用水量; 真实漏损是指管道破裂、管接头安装质量问题等原因造成的漏损量^[18]. 导致管网漏损的因素很多, 例如, 管材的老化、管道施工质量、管网的运行压力. 其中, 供水管网运行时压力过高是造成漏损严重的最主要因素.

2) 漏损控制方法. 基于我国的漏损状况, 降低管网漏损率需要形成“监测+控制”策略的综合漏损控制技术. 在对管网进行有效监测的基础上, 漏损的控制主要从主动检漏、更换管材、压力管理 3 个方面

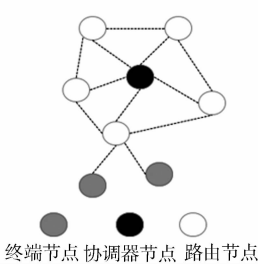


图 2 ZigBee 网状拓扑结构
Fig. 2 ZigBee mesh topology structure

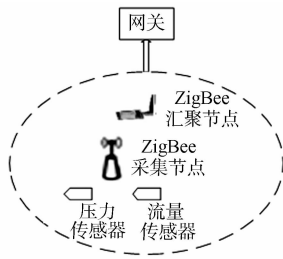


图 3 监测点结构
Fig. 3 Monitoring point structure

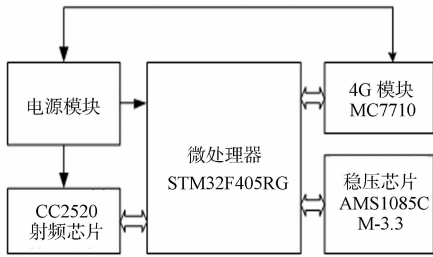


图 4 4G 网关硬件结构
Fig. 4 Structure of 4G gateway hardware

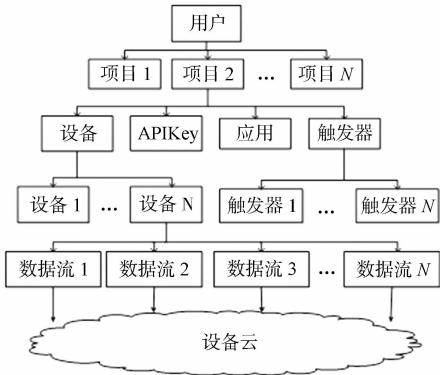


图 5 OneNet 设备云平台的资源管理层次结构
Fig. 5 Resource management hierarchy of OneNet device cloud platform

进行. 其中, 压力管理是控制漏损最经济、最有效的措施, 对管网检漏、预防爆管、管网维护等都有积极的意义. 管网压力的分布主要通过调节泵和阀门的组合完成. 优化泵的组合只能解决最不利点的压力. 管网局部压力过高时, 需要基于遗传算法的压力管理, 优化阀门数量、位置及开启度降低供水管网的压力, 减少管网的漏损.

3) 数据选取. 在云储存的数据库里, 调取水泵的运行参数、管段的属性, 采集节点的压力及流量数据, 阀门的位置、开启度等有效信息.

4) 云计算过程. 在 Epanet 2.0 中建立管网水力模型, 对运行动态进行仿真模拟, 根据遗传算法的压力管理模型, 以供水管网漏损量为目标函数, 满足管网的能量方程和连续性方程, 求解最优的压力调控方案.

3 工程实例

3.1 工程背景

将该系统运用于 F 地区的小型管网中, 管网的拓扑结构, 如图 6 所示. 图 6 中: 管网的拓扑结构共有 36 个节点, 40 个管段, 包括 5 个环, 1 个高位水池和 1 个水厂加压供水组成的双水源系统, 供水服务水头不低于 0.2 MPa.

用水低峰期时, 水厂多余的供水会传输至高位水池; 用水高峰期时, 高位水池与水厂共同对管网供水. 管网在平时运行的过程中, 经常出现压力分布不均匀的情况. 有些管段压力过低, 用户水压不足; 有些管段压力过高, 造成背景漏损严重.

为了方便管网漏损量的计算, 把管段漏损转换成节点漏损, 由节点漏损系数 K_i 表示, 转换公式为

$$K_i = C_i \times \sum_{i=1}^M 0.5L_{i,j}.$$

(1)

式(1)中: K_i 为节点的漏损系数; C_i 为孔隙的漏损系数(与孔的大小和形状有关); $L_{i,j}$ 为节点 i 与 j 之间的管段长度, m; M 为与节点 i 相连的管段个数.

管网节点和管段的基本信息, 如表 1、2 所示.

表 1 管网节点信息

Tab. 1 Information of pipe network node

节点	标高/m	流量/L · s ⁻¹	漏损系数	节点	标高/m	流量/L · s ⁻¹	漏损系数
1	25.0	191.5	—	19	75.0	6.3	0.002 643
2	50.0	5.5	0.012 321	20	85.0	6.2	0.023 145
3	30.0	5.9	0.025 645	21	75.0	6.0	0.054 687
4	30.0	5.5	0.018 423	22	100.0	5.6	0.034 681
5	50.0	5.5	0.024 562	23	115.0	5.5	0.045 618
6	63.0	5.3	0.053 465	24	95.0	5.7	0.023 487
7	80.0	5.3	0.002 356	25	115.0	5.4	0.021 342
8	55.0	5.6	0.064 128	26	117.5	—	—
9	90.0	5.9	0.025 463	27	65.0	5.5	0.084 562
10	55.0	5.3	0.056 324	28	55.0	5.0	0.014 357
11	92.5	7.2	0.042 351	29	55.0	5.4	0.023 456
12	105.0	6.0	0.081 246	30	65.0	5.2	0.024 861
13	105.0	5.1	0.024 863	31	95.0	6.1	0.021 347
14	100.0	5.1	0.045 128	32	55.0	6.1	0.054 613
15	95.0	5.1	0.027 416	33	90.0	5.1	0.024 581
16	75.0	6.3	0.024 851	34	95.0	5.1	0.024 163
17	90.0	6.3	0.023 874	35	55.0	5.0	0.043 515
18	50.0	6.3	0.012 756	36	55.0	5.1	0.024 561

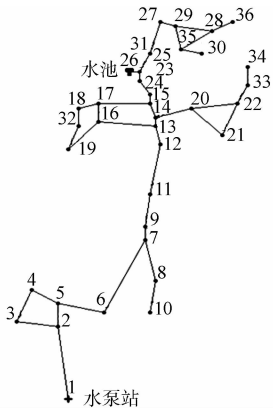


图 6 管网拓扑结构

Fig. 6 Topology of pipe network

表 2 管段信息
Tab.2 Information of pipe

编号	起始节点 编号	终止节点 编号	管长 /m	管径 /mm	粗糙 系数	编号	起始节点 编号	终止节点 编号	管长 /m	管径 /mm	粗糙 系数
1	1	2	732	300	110	21	16	19	427	200	115
2	2	5	244	300	110	22	14	20	335	300	125
3	2	3	396	200	110	23	20	21	396	200	125
4	3	4	366	200	125	24	21	22	396	200	120
5	4	5	305	300	135	25	20	22	396	200	135
6	5	6	366	300	120	26	24	23	183	300	100
7	6	7	823	300	120	27	15	24	76	300	100
8	7	8	366	300	110	28	23	25	91	300	110
9	7	9	122	300	110	29	25	26	61	300	110
10	8	10	305	200	125	30	25	31	183	300	125
11	9	11	213	300	115	31	31	27	122	200	120
12	11	12	579	300	120	32	27	29	122	200	120
13	12	13	183	300	100	33	29	28	213	200	120
14	13	14	122	300	100	34	22	23	305	200	115
15	14	15	91	300	100	35	33	34	122	200	115
16	13	16	457	200	100	36	32	19	152	200	110
17	15	17	457	200	100	37	29	35	152	200	110
18	16	17	183	200	105	38	35	30	305	200	125
19	17	18	213	300	110	39	28	35	213	200	110
20	18	32	107	300	125	40	28	36	91	200	110

3.2 漏损控制方案设计

3.2.1 系统的构建 1) 数据采集. 根据要求,在供水管网中建立独立的 ZigBee 无线传感网络,由于管网的水力条件满足连续性方程和能量守恒方程,所以只需在管网中有代表性的节点布置传感器负责采集流量、压力等参数,选取比较有代表性的管网采集点为泵站的出水节点 1,压力较高的节点为 2,4,8,16,18,27,35,压力较低的节点为 14,23.

2) 数据传输. 由于每个采集节点的信息传递需要其他节点中继它的信息,所经过的节点数量各不相同,采集的信息通过多跳路由的方式传输到 4G 网关,并通过 4G+互联网网络传输到终端服务器.

3) 实时监控. 云计算平台将采集的数据做深度的处理和分析,并进行存储,实现数据的共享,为供水管网漏损的定位和控制提供准确的数据支撑,工作人员可以在 PC 机实时查看监测的信息,完成不同时段智能调度,也可以根据相应的功能完成对应的操作.

3.2.2 压力管理的漏损控制 根据云计算平台存储的节点压力信息,可以得出供水管网中压力分布不合理,漏损的主要因素还是局部压力过高.采用基于遗传算法的压力管理,在 Epanet 2.0 中输入此管网的信息,建立水力模型,模拟现实中的管网运行,借助遗传算法优化管网中阀门的数量、位置及开启度,使管网的压力分布合理,从而降低管网的漏损量.

1) 目标函数为 $\min Q = \min \sum_{i=1}^n q_i$. 其中: Q 为供水管网总漏损值, $L \cdot s^{-1}$; i 为节点的编号; n 为节点的总数; q_i 为节点 i 的漏水量, $L \cdot s^{-1}$. 漏损量 q_i 与供水管网附近的压力有关,可由实验数据拟合获得,即 $q_i = K_i H_i^\gamma$. 其中: H_i 为节点 i 的水压值, Pa; γ 为 1.18.

2) 约束条件有两点. a) 管网的水力计算必须满足以管网连续性方程和能量守恒方程为基础的水力平衡条件,即

$$\begin{cases} \sum_j Q_{i,j} - q_i - l_i = 0, & i = 1, 2, 3, \dots, N, \\ H_i - H_j = h_{i,j}. \end{cases}$$

上式中: $Q_{i,j}$ 为节点 i 至节点 j 之间的管段流量, $L \cdot s^{-1}$; l_i 为节点 i 的用水量, $L \cdot s^{-1}$; H_i 为节点 i 的自

由水头,Pa.

b) 为了保证管网的正常运行,管网中各个节点的自由水头不能小于该节点正常服务的自由水头,即 $H_i > H_r$, 其中: H_r 为最小服务自由水头,Pa.

3.3 漏损控制效果分析

根据上述方案,运行程序得出城市供水管网压力管理的阀门数量、位置、开启度的组合方案和对应的漏损量,如表 3 所示.

根据上述阀门方案组合,其相对应的供水管网压力分布,如图 7 所示.图 7 中:psi 是一种压力计量单位,1 psi=6.895 kPa. 由图 7(a)可知:该地区供水管网最初的压力分布极不合理,虽然可以满足最小服务水头,但高压供水范围太大,漏损比较严重,漏损值高达 36.259 3 $L \cdot s^{-1}$;当采用基于遗传算法的压

力管理模型对管网的压力进行优化时,随着阀门安装数量的增加及其开启度的优化,管网的压力分布情况得到明显的改善. 由图 7(b)可知:在管段 3 安装 1 个阀门后,大面积的高压供水分成了几个小面积的高压供水,漏损值降为 34.561 2 $L \cdot s^{-1}$. 由图 7(c)可知:在管段 3 和管段 32 各安装了 1 个阀门后,有 1 个小面积的高压供水范围消失,漏损值降为 33.182 1 $L \cdot s^{-1}$. 由图 7(d)可知:在管段 3,管段 8,管段 32 各安装 1 个阀门后,高压供水范围得到进一步减少,漏损值降为 32.632 4 $L \cdot s^{-1}$. 由图 7(e)可知:阀门数量达到 4 个时,分别在管段 3,管段 8,管段 17,管段 32 安装 1 个阀门,并确定其相应的开启度后,高压供水范围明显减少,整个管网的压力分布基本达到最优的状态,不仅可以满足最小服务水头,而且管网的漏损量也从 36.259 3 $L \cdot s^{-1}$ 降至 31.265 1 $L \cdot s^{-1}$,大大减少了管网的背景漏损量.

表 3 供水管网压力管理的优化结果

Tab. 3 Optimal result of water supply network pressure management

阀门数量	管段编号	阀门出口压力值/kPa	开启度/%	漏损值/ $L \cdot s^{-1}$
0	—	—	—	36.259 3
1	3	264.1	88	34.561 2
2	3	262.7	86	33.182 1
	32	238.6	75	
3	3	262.7	86	32.632 4
	8	239.3	76	
	32	233.7	70	
4	3	260.6	83	31.265 1
	8	244.8	78	
	17	228.9	65	
	32	233.7	68	

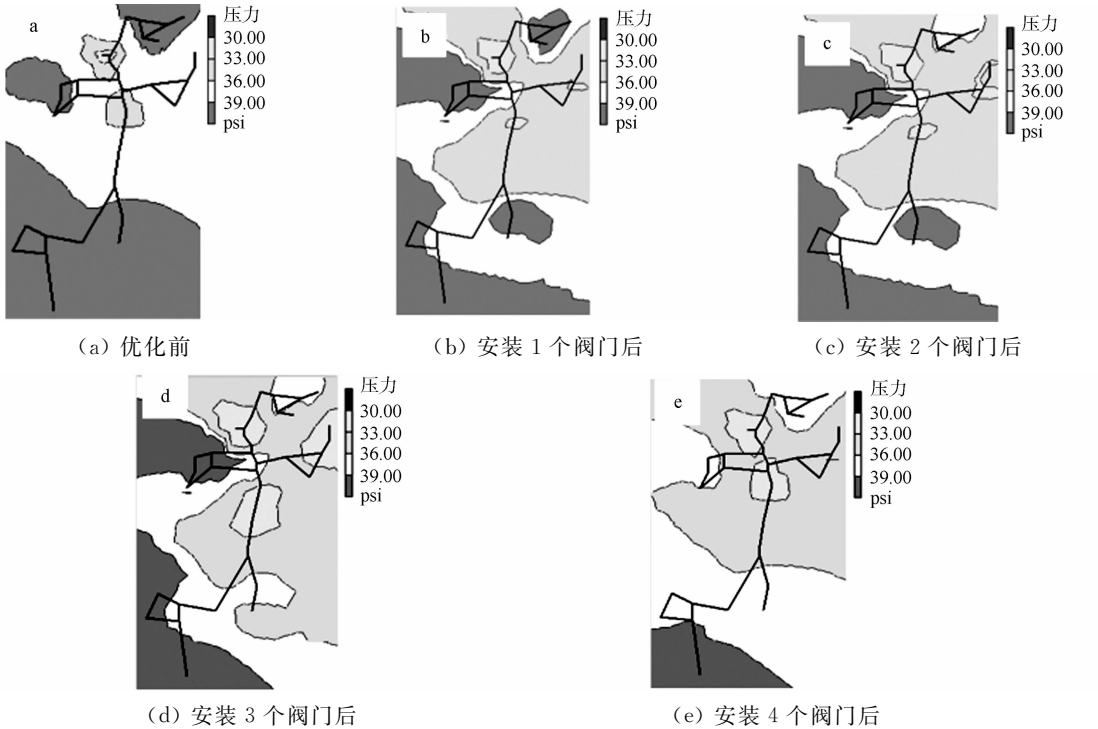


图 7 管网压力分布

Fig. 7 Pressure distribution of pipe network

4 结论

1) 物联网技术结合云计算可获得和管理大量与供水系统漏损控制相关的信息数据,有效地拓展了 SCADA 系统的功能,有利于供水系统漏损控制研究的发展.

2) 该系统运用于城市供水管网中可取得良好的效果,采用基于遗传算法的压力管理,优化阀门的数量、位置及开启度,使管网的压力分布更加合理,漏损量从 $36.259\ 3\ \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$ 降为 $31.265\ 1\ \text{L} \cdot \text{s}^{-1}$.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴 2015[S]. 北京: 中国统计出版社, 2016: 232-233.
- [2] 王瑞彬, 张蕊, 王志军, 等. 供水管网漏损控制管理的应用[J]. 给水排水, 2017, 43(9): 111-114. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-8471. 2017. 09. 028.
- [3] 杨晓芳, 徐强, 王东升. 我国城市供水管网漏损控制技术与展望: 基于水平衡分析与分区管理的管网漏损评价、监测与控制技术[J]. 给水排水, 2017, 43(5): 1-3. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-8471. 2017. 05. 001.
- [4] KARA S, KARADIREK I E, MUHAMMETOGLU A, *et al.* Real time monitoring and control in water distribution systems for improving operational efficiency[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 57(25): 11506-11519.
- [5] 戴婕, 张东. 上海市供水管网信息化平台构建与应用[J]. 给水排水, 2015, 41(12): 104-107. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-8471. 2015. 12. 026.
- [6] LI Shancang, XU Lida, ZHAO Shanshan. The internet of things: A survey[M]. Alphen; Kluwer Academic Publishers, 2015.
- [7] 唐雅璇, 余金山. 采用物联网技术的港口信息化系统[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2012, 33(3): 275-279. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2012. 03. 0275.
- [8] 陈振亚. 应用物联网构建供水计量监测系统模型的实践[J]. 给水排水, 2013, 39(6): 111-115. DOI: 10. 3969/j. issn. 1002-8471. 2013. 06. 027.
- [9] 骆剑锋, 陈俞强. 采用环加星型网络结构负载均衡集群技术的云平台设计[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2016, 37(2): 164-167. DOI: 10. 11830/ISSN. 1000-5013. 2016. 02. 0164.
- [10] LUO Shiliang, REN Bin. The monitoring and managing application of cloud computing based on Internet of Things [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2016, 130: 154-161.
- [11] 陈海明, 崔莉, 谢开斌. 物联网体系结构与实现方法的比较研究[J]. 计算机学报, 2013, 36(1): 168-188.
- [12] HOSSAIN M S, MUHAMMAD G. Cloud-assisted Industrial Internet of Things (IIoT): Enabled framework for health monitoring[J]. Computer Networks, 2016, 101: 192-202.
- [13] XU Jianlong, LIU Guixiong, HONG Xiaobin. Internet of things perception layer scenario abstract method research and application[J]. Advances in Information Sciences and Service Sciences, 2013, 5(7): 605-609.
- [14] 王永涛, 刘浏, 冯诚, 等. 基于物联网技术的农业信息监控系统应用研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(8): 50-54. DOI: 10. 3969/j. issn. 1007-2284. 2015. 08. 014.
- [15] MORIDI M A, KAWAMURA Y, SHARIFZADEH M, *et al.* Performance analysis of ZigBee network topologies for underground space monitoring and communication systems[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 71: 201-209.
- [16] 蒲泓全, 贾军营, 张小娇, 等. ZigBee 网络技术研究综述[J]. 计算机系统应用, 2013, 22(9): 6-11.
- [17] LAMBERT A O. International report: Water losses management and techniques[J]. Water Science and Technology Water Supply, 2002, 2(4): 1-20.
- [18] DAI P D, LI Pu. Optimal localization of pressure reducing valves in water distribution systems by a reformulation approach[J]. Water Resources Management, 2014, 28(10): 3057-3074.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)