

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230835

一种基于 FFT 变换的供水管网节点压力频域分析方法

朱兆晶^{1a,1b}, 何立新^{1a,1b}, 张 峰^{1a,1b}, 刘子航², 范一飞^{1a}, 李志会^{1a}

(1. 河北工程大学 a. 水利水电学院; b. 河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038;
2. 承德建龙特殊钢有限公司生产设备处, 河北 承德 067300)

摘要: 供水管网出现漏损点时, 由于其隐蔽性不易被察觉, 长时间的漏损积累不仅造成水资源浪费, 也会出现供水产销差的问题。将频域分析法引入到供水行业, 提出一种基于 FFT 变换的供水管网节点压力频域分析方法, 首先通过编写程序调用 EPANET 对供水管网进行运行优化模拟, 然后将求解的最优泵阀调度方案反代入模拟漏损点工况内, 借助傅里叶变换将随时间变化的节点压力转换为振幅信号, 从频域的角度分析管道节点压力, 从而判断漏损点距离管道起始节点的长度范围。通过验证, 与以往基于压力分析漏损点相比, 该方法可从频域信号视角来判断管道是否正常运行及漏损点位置范围, 有利于供水行业智能化。

关键词: 频域分析; 漏损模拟; 傅里叶变换; 振幅

中图分类号: TV674

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)10-0111-04

1 引言

在水资源利用中, 作为城市生命线的供水管网并不是一直处于正常工作状态, 由于漏损点总是不易让供水机构和相关人员察觉, 所以往往造成长时间的水资源浪费。因此, 对供水管网漏损点的确定就成为供水管网运行过程中不可忽视的工作。在 EPANET 管段模拟中关闭管段后对应的节点压力发生变化, 比正常运行时的管道压力会有明显的差异。若管道中出现漏损点, 对应管道下节点的压力会与正常工况有所区别, 除此之外, 管段的漏损量位置与漏损量大小均对管道始末节点处节点压力均有不同程度影响。刘书明等^[1]采用杜鹃优化算法, 以最小化管网压力和流量的模拟值与真实值相差最小为目标进行泄漏量和位置的优化, 但该优化方法是以个体逐步迭代寻优的, 寻优速度较慢; 考虑到正常的需求变化会引起管网压力的变化, SANZ G 等^[2]提出了一种结合模型校核的泄漏检测与定位方法, 以需水值作为警示值, 从而确定需水量的变化是否由泄漏引起。但对较大型的供水管网, 会增加优化时间和解的变化性。随着机器学习的迅速发展, 以机

器学习为基础的供水管网研究取得不少成功, SOLDEVILA A 等^[3]通过贝叶斯推理得到了每一个可能的关于泄漏节点概率密度函数, 以最大值的节点作为泄漏节点, 但该方法未考虑漏损点位置的范[4]。频域分析法是研究控制系统的一种工程方法, 频域分析方法目前已成功应用于燃气泄漏、电子信号降噪、声波监测等领域中。傅里叶变换作为主要的频域分析方法, 对电能质量中的谐波检测分析有着很好的效果。将时域信号转换到频域, 能清楚反映谐波的幅值与相位, 方便硬件实现, 目前广泛应用于数字信号处理方面。为此, 本文将频域分析法引入到供水行业, 利用傅里叶变换的频域分析方法分析漏损管段的节点压力, 顺应了智慧供水数字化转型趋势。

2 傅里叶变换的频域分析方法

傅里叶变换的频域分析方法是一种有效的数字信号处理技术, 它可将时域信号转换为频域信号, 以便更容易分析和理解信号的特性。此外, 傅里叶变换的频域分析方法还可以更容易地检测和消除噪声, 因为它可将噪声从信号中分离出来, 从而更容易消除噪声。

收稿日期: 2023-04-23, **修回日期:** 2023-05-31

基金项目: 国家自然科学基金联合基金重点项目(U20A20316); 河北省创新研究群体项目(E2020402074)

作者简介: 朱兆晶(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为智慧水利、供水管网, E-mail: 619589350@qq.com

通讯作者: 何立新(1970-), 男, 博士、教授、博导, 研究方向为智慧水利, E-mail: helixin@hebeu.edu.cn

傅里叶变换公式^[5-6]为:

$$F(\omega) = F[f(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-i\omega t} dt \quad (1)$$

式中, ω 为频率; t 为时间; $e^{-i\omega t}$ 为复变函数。

根据欧拉公式:

$$e^{ix} = \cos x + i\sin x \quad (2)$$

$$e^{2\pi ikt} = \cos 2\pi kt + i\sin 2\pi kt \quad (3)$$

$$\cos 2\pi kt = \frac{e^{2\pi ikt} + e^{-2\pi ikt}}{2}; \sin 2\pi kt = \frac{e^{2\pi ikt} - e^{-2\pi ikt}}{2} \quad (4)$$

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n (a_k \cos 2\pi kt + b_k \sin 2\pi kt) = \sum_{k=-n}^n c_k e^{2\pi ikt} \quad (5)$$

式中, k 为频域上的 x 坐标, 每个 k 值为一种赫兹; t 为时域上的时间; $\frac{a_0}{2}$ 为直流分量; i 为虚数单位; c_k 为一个复数, 一般称为傅里叶系数, 对频域的变换, 一般改变 c_k 。

傅里叶变换实质是一种时域与频域的转换关系, 即:

$$f(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \int_0^1 e^{-2\pi ikt} f(t) dt e^{2\pi ikt} \quad (6)$$

图 1 为频域时域关系图。

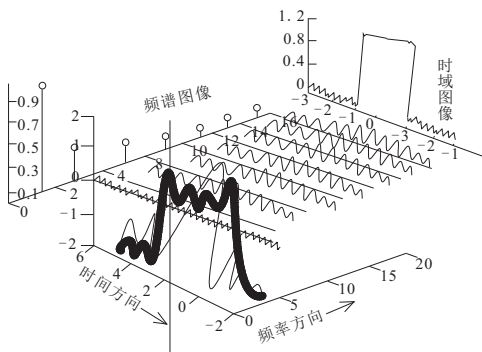


图 1 频域时域关系图

Fig. 1 Diagram of frequency domain and time domain

考虑到频域分析的优势, 先编写代码调用 EPANET 对正常工况与事故工况进行模拟, 并利用遗传算法对整个供水管网运行进行优化, 得出泵阀调度方案, 将泵阀控制策略反代入管道中进行管道正常、事故工况模拟, 提取到节点压力; 然后进行频域分析, 根据频域图进行对比, 从而确定漏损点的位置区间。频域分析流程见图 2。

供水管道节点管道漏损点的位置范围判断具体的步骤为: 在供水管网正常工况前, 将每一个管道在不同距离处出现漏损时进行模拟, 模拟漏损点的位置可根据实际需要以 50 m 或 100 m 作为距离步长进行模拟, 将模拟的节点压力通过傅里叶变换成为频域信号并储存在管网监管平台系统

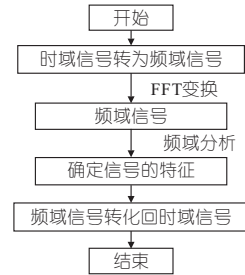


图 2 频域分析流程图

Fig. 2 Flow char of frequency domain analysis

中, 即建立一种节点漏损资料数据库, 以后出现漏损点时, 经过单通道直方图算法进行相似度比较, 若相似度为 45% 便可作为相似的判断的最低准则, 相似度越高越好。

3 实际管网案例验证

以北方某实际管网(图 3)为例对本文所提方法进行验证, 作为管网泵阀调控方案反代入供水管网, 提取节点压力, 求解出的一组解结果绘制见图 4。通过编写程序代码调用 EPANET 进行水力模拟优化后得出泵阀调度方案, 水泵转速比范围为 0.7~1.2, 由图 4 可看出, 在 6:00~9:00, 三个水泵转速较大; 减压阀的阀后压力范围为 60~100 m, 在此泵阀调度方案下, 整个事故工况的供水管网可实现供水在低能耗且加权平均水龄相对最小的目标下运行。

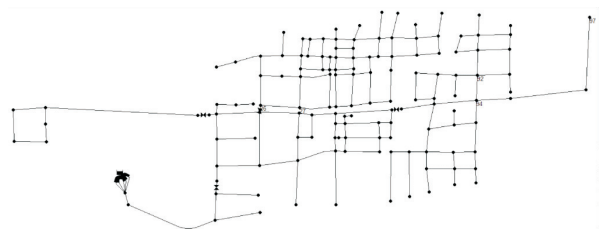


图 3 管网拓扑结构图

Fig. 3 The actual network topology

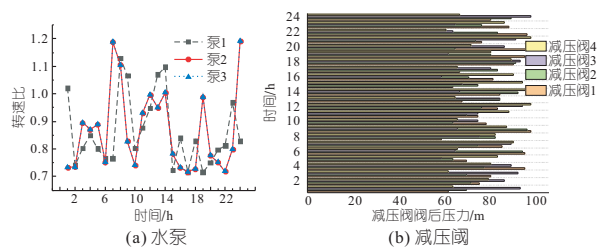


图 4 一组设置水泵与减压阀设置方案

Fig. 4 A set of water pump and pressure reducing valve setting scheme

首先排除管网中的一些边缘管段, 以分区三为例, 选择不同管径的代表性管段分别进行模拟, 判别标准为选择模拟控制点水压相对小的管段作为研究管段, 结果见表 1^[7]。

表 1 不同管径的代表性管段模拟结果

Tab. 1 Simulation results of representative pipe sections with different pipe diameters

管段 ID	管径 /mm	控制点 水压/m	管段 ID	管径 /mm	控制点 水压/m
26	100	28.90	71	400	13.13
70	150	22.94	176	400	9.63
12	200	22.75	11	500	4.23
74	300	17.86			

在模拟过程中,发现管道 11 的节点控制水压相对较低,于是选择管道 11 作为研究管段。图 5、6 为管道 11 节点 26、27 未发生事故模拟与发生事故模拟的压力对比图及频域分析对比图。

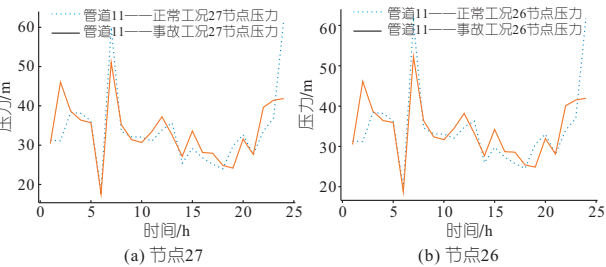


图 5 节点 27、26 未发生事故模拟与发生事故模拟的压力对比图

Fig. 5 Comparison diagram without accident simulation and with accident simulation pressure node 27 and 26

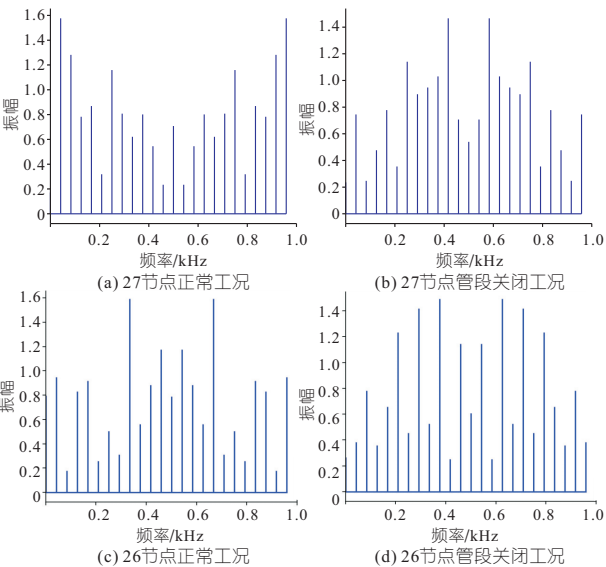


图 6 节点 27、26 未发生事故模拟与发生事故模拟的频域分析对比图

Fig. 6 Comparison diagram of frequency domain analysis between without accident simulation and with accident simulation of node 27 and 26

利用傅里叶变换进行管道漏损分析,首先对管道进行漏损模拟,在漏损量变化时,管道节点的压力也会有相应变化,根据频域分析结果,采用控变量方法,控制漏损量不变,根据图像中的频域图像分析得出漏损点的范围。

图 7 为管道不同位置出现漏损的频域对比图。由图 7 可看出,管道未出现漏损时,在距离节点 50 m 出现漏损时,0.1~0.2 kHz 处的振幅减

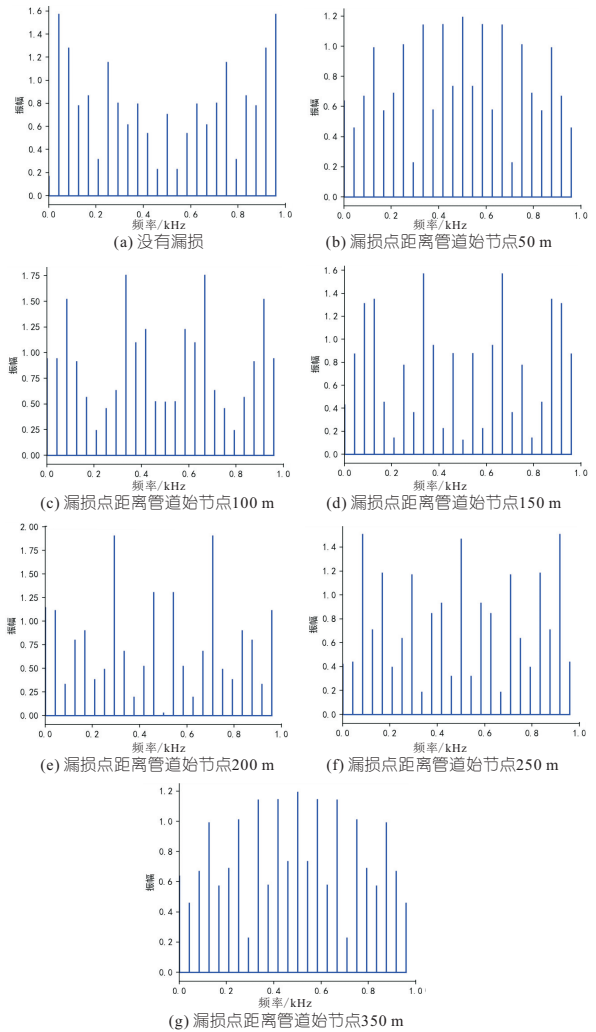


图 7 管道不同位置出现漏损的频域对比图
Fig. 7 Frequency domain comparison chart of leakage at different locations of the pipeline

小,0.4~0.6 kHz 处振幅增大,0.8~1 kHz 处振幅基本不变;在距离节点 100 m 出现漏损时,0.35、0.70 kHz 处的振幅急剧增大,出现峰值,0.8~1.0 kHz 处振幅减小;在距离节点 150 m 出现漏损时,0.35、0.70 kHz 处的振幅急剧增大,出现峰值,0.8~1.0 kHz 处振幅减小;在距离节点 200 m 出现漏损时,0.5 kHz 处出现振幅最低,0.8~1.0 kHz 处振幅减小;0.3、0.7 kHz 处为振幅急剧增大,0.8~1.0 kHz 处振幅局部减小;在距离节点 250 m 出现漏损时,0~0.2 kHz 处振幅变化不大,0.4~0.8 kHz 处振幅增大,0.5 kHz 处出现振幅峰值;在距离节点 300 m 出现漏损时,0.2~0.4 kHz 处振幅相差不多,出现“一”字形振幅,0.45、0.55 kHz 处振幅增加;在距离节点 350 m 出现漏损时,0.35~0.60 kHz 处振幅整体增加,0.8~1.0 kHz 处振幅整体增加。

对不同管网,可先将管道节点标准漏损点的信息数据建立,然后仅需提供管道下节点的压力频域图,对比漏损点不同的距离图像便得出漏

损点的距离范围。为验证此方法的可用性,拟在管道 165 m 处出现漏损点,这个作为验证已知条件,通过漏损点范围模拟代码调用 EPANET 进行水力计算,得到漏损点出现管段下节点的节点压力,见表 2。

表 2 0:00~24:00 节点 27 压力

Tab.2 Node 27 pressure from 0:00 to 24:00 m

时间	压力	时间	压力	时间	压力	时间	压力
0:00	26.2 040	7:00	50.3 934	14:00	58.1 151	21:00	55.468 41
1:00	63.8 293	8:00	46.9 333	15:00	48.4 514	22:00	56.489 18
2:00	65.6 865	9:00	59.0 486	16:00	57.1 115	23:00	70.742 52
3:00	64.0 291	10:00	43.4 755	17:00	68.8 173	24:00	83.821 11
4:00	56.5 328	11:00	48.4 772	18:00	52.2 696		
5:00	55.8 639	12:00	56.5 961	19:00	64.6 833		
6:00	70.6 101	13:00	56.0 219	20:00	53.71 803		

利用单通道直方图算法进行图像对比,得出测试漏损点位置范围,结果汇总见表 3。由表 3 可知,该漏损点的位置范围在 150~200 m 处,在 150 m 处与对比图相似度为 49.17%,相对其他位置处图像较高,由此验证了本文提出的基于 FFT 变换的供水管网节点压力频域分析方法的实用性。由验证结果分析可知,在未存在漏损时管道的压力经过傅里叶变换后为一张频率—振幅关系图,随着漏损点位置的不同,管道末节点的压力傅里叶变换后频域图像也会有不同程度的变化,当频率—振幅对比已确定的漏损点标准图,利用单通道直方图算法可以计算出相似率,相似率高的范围为内漏损点距离管道起始节点的距离范围。

表 3 相似度对比结果

Tab.3 Similarity comparison results

距离点 位置/m	相似度 /%	距离点 位置/m	相似度 /%	距离点 位置/m	相似度 /%	距离点 位置/m	相似度 /%
50	46.97	250	48.85	450	48.00	650	47.55
100	48.80	300	48.97	500	47.29	700	46.98
150	49.17	350	48.56	550	49.17	750	44.02
200	48.07	400	44.61	600	47.89	800	47.32

A Frequency Domain Analysis Method for Node Pressure in Water Supply Pipe Network Based on FFT

ZHU Zhao-jing^{1a,1b}, HE Li-xin^{1a,1b}, ZHANG Zheng^{1a,1b}, LIU Zi-hang², FAN Yi-fei^{1a}, LI Zhi-hui^{1a}

(1a. College of Water Resources and Hydropower; 1b. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Production Equipment Department of Chengde Jianlong Special Steel Co. Ltd., Chengde 067300, China)

Abstract: When there is a leakage point in the water supply pipe network, it is not easy to be detected due to its concealment, and the long-term leakage accumulation will not only cause waste of water resources, but also lead to the problem of poor production and marketing of water supply. The frequency domain analysis was introduced into the water supply industry, and a node pressure of water supply pipe network based on FFT was proposed. Firstly, the specific method is called EPANET by writing a program to optimize the operation simulation of water supply pipe network, and then solve the optimal pump and valve scheduling scheme back into the simulated leakage point working condition. With the help of Fourier transform to convert the time-varying node pressure into an amplitude signal, the pipeline node pressure was analyzed from the perspective of the frequency domain. Therefore, the length range between the leakage point and the starting node of the pipeline was judged. Through verification and compared with the previous pressure based analysis of the leakage point, the proposed method can judge whether the pipeline is normal operation and the location range of the leakage point from the perspective of frequency domain.

Key words: frequency domain analysis; leakage simulation; Fourier transform; amplitude

4 结论

本文提出了一种基于 FFT 变换的供水管网节点压力频域分析方法,该方法在供水管道未出现漏点时便对整个供水管网以一定距离步长进行划分,通过模拟结果建立一个完备的频域图像比对数据集,将这种频域图像信号数据集与实时监测联系起来,便可及时确定漏损点距离范围。

参考文献:

- [1] 刘书明,王欢欢,徐锦华,等. 基于智能优化算法的供水管网漏水点定位 [J]. 同济大学学报:自然科学版, 2014, 42(5):740-744.
- [2] SANZ G, PÉREZ R, KAPELAN Z, et al. Leak detection and localization through demand components calibration [J]. Journal of water resources planning and management, 2015, 142(2):04015057.
- [3] SOLDEVILA A, FERNANDEZ-CANTI R M, BLESJA J, et al. Leak localization in water distribution networks using Bayesian classifiers [J]. Journal of process control, 2017, 55:1-9.
- [4] KANG J, PARK Y J, LEE J, et al. Novel leakage detection by ensemble cnn-svm and graph-based localization in water distribution systems [J]. IEEE transactions on industrial electronics, 2018, 65(5): 4279-4289.
- [5] 唐思豪,姚文轩,邱伟,等. 基于脉冲星信号的自适应同步采样方法 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(10): 121-128.
- [6] 李振华,贾思琦,童悦,等. 隔离开关闭合过程特快速暂态电磁干扰变化特征及变化规律分析 [J/OL]. 高压电器: 1-11. [2023-03-02].
- [7] 张伟倩. 基于泵阀联合调控的城市供水管网压力管理研究 [D]. 邯郸:河北工程大学, 2021.