

低压供水管网水力分析研究进展

刘年东¹, 杜坤¹, 李贤胜¹, 杜雨², 涂家鹏³, 董伟新⁴

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南昆明 650500; 2. 中建二局第三建筑工程有限公司, 北京 100070; 3. 昆明市政工程设计科学研究院有限公司, 云南昆明 650228; 4. 云南世纪阳光建筑设计有限公司, 云南昆明 650031)

摘要: 从水力方程求解及节点流量-压力关系率定两个方面梳理了低压供水管网水力分析研究进展。研究发现, 当前成果尚不足以解决实际工程问题, 并针对节点流量-压力关系指出有如下3点需要解决: ①不同建筑及管网节点流量-压力曲线中额定压力及最低压力的率定; ②不同建筑及管网中VDD与PDD卫生器具比例的确定; ③包含不同比例VDD及PDD类型卫生器具的节点流量-压力曲线的率定, 以及简化率定方法研究。针对上述问题, 提出应用蒙特卡洛模拟对低压供水时建筑用水进行数值仿真。

关键词: 低压供水; 水力分析; 压力驱动水力分析法; 节点流量-压力曲线

中图分类号: TU991 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2017)07-0063-05

Research Progress of Hydraulic Analysis of Water Distribution System under Pressure Deficient Condition

LIU Nian-dong¹, DU Kun¹, LI Xian-sheng¹, DU Yu², TU Jia-peng³, DONG Wei-xin⁴

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. The Third Construction Engineering Company Ltd. of China Construction Second Engineering Bureau, Beijing 100070, China; 3. KM Municipal Engineering Design Institute of Science and Technology Co. Ltd., Kunming 650228, China; 4. Yunnan Shijiyangguang Construction Designing, Kunming 650031, China)

Abstract: The paper summarized the research progress of hydraulic analysis of water distribution system (WDS) under pressure deficient condition in aspects of the solution of hydraulic equations and the calibration of relation between node flux and node pressure. It was concluded that current research was still incapable to solve practical engineering problems. Three problems concerning the relation between node flux and pressure needed to be solved: ① the calibration of rated pressure and minimum pressure in the curve of node flux and pressure in different buildings and WDSs; ② the proportion estimation of VDD and PDD sanitary equipments in different buildings and WDSs; and ③ the calibration of the curve of node flux and pressure with different proportions of VDD and PDD sanitary equipments, as well as the study of simplified method for calibration. In view of above problems, it was proposed to simulate the water usage of buildings in pressure deficient condition using Monte Carlo simulation for the calibration in

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51608242); 云南省人才培养计划(14118943); 昆明理工大学学术科技创新基金资助项目(2015YB025)

通信作者: 杜坤 E-mail: dukun_cq@foxmail.com

different situations.

Key words: low pressure water supply; hydraulic analysis; pressure driven hydraulic analysis method; node flux and pressure curve

供水管网水力分析不仅是管网设计、扩建及改造的基础,还能为供水调度、运营管理提供依据。传统管网水力分析假定管网节点流量是与供水压力无关的变量,称为节点流量驱动法(DDA 算法)。但当供水压力下降、管网处于低压运行状态时,管网配水量将无法满足不同需求,节点流量随供水压力动态变化,导致传统 DDA 算法的计算结果与实际不符。大量研究表明,主管检修、爆管、消防等事故会使管网处于低压运行状态,在应用传统 DDA 算法进行管网优化设计、供水调度及可靠性分析时,结果往往不理想^[1]。例如,主管检修时设计方案的不可靠、消防校核时设计方案的不经经济^[2]。为此,国内外学者提出了基于压力驱动的管网水力分析法(PDA 算法),并成为了当前的研究热点。

与 DDA 算法不同,PDA 算法通过考虑节点流量随水压的动态变化,使低压供水时管网水力计算结果与实际相符,其中包括低压管网水力方程求解及节点流量-压力关系研究两个基本问题^[3]。通过调研发现,虽然国内外学者对这两个问题开展了广泛研究,但现有研究成果还不足以指导工程实践。

因此,笔者从上述两个方面介绍了低压供水管网水力分析的研究进展,重点剖析了节点流量-压力关系理论存在的不足,并提出拟解决方案,旨在为今后相关研究的开展提供参考。

1 低压管网水力方程求解

低压管网水力方程求解,即供水压力不足时考虑节点流量随水压动态变化时的管网水力方程求解,目前所提出的求解方法大致可分为3种:将流量-水压关系式嵌入管网水力方程进行求解,如周建华等^[4]、Wu 等^[5]、Tabesh 等^[6];利用 EPANET 软件中的喷嘴或水塔功能模拟流量随压力的动态变化,如 Pathirana^[7]、杜坤等^[8];通过反复运行 EPANET 并修改节点流量使其满足设定的流量-压力关系,如吴一攀^[2]、Liu 等^[1]及 He 等^[9]。上述3种方法都有应用于实际的案例,尤其是 EPANET-MNO 算法及改进收敛策略后,包含不同节点流量-压力曲线的水力方程都能直接调用 EPAENT 工具箱求解,无需修改源代码,编程量小。由于针对该问题的分析

相对成熟,目前研究主要集中在算法的完善方面,如收敛性的改善、计算量的减小以及运算的简化等。

2 节点流量-压力关系率定

实际中不同管网的节点-压力流量曲线不同,甚至相同管网中不同节点的流量-压力曲线也不同。其影响因素除了供水压力外,还包括卫生器具类型及人的用水习惯等。而在求解低压管网水力方程时,大多研究假定节点流量-压力关系式能准确反映实际情况,鲜有探讨节点流量-压力关系的适用性问题,这使得现有成果不足以解决实际问题。

针对节点流量-压力关系研究,Bhave^[10]最早指出当供水压力下降到一定程度时,需水量只能被部分满足或不能被满足。为量化节点流量与压力关系,国内外学者构造了十余个节点流量-压力关系式,其思路可概括为3种:

① 认为实际用水与孔口出流类似,如 Wagner 等^[11]建议采用式(1)。

$$Q_i^{Avl} = \begin{cases} 0 & P_i \leq P_i^{\min} \\ Q_i^{\text{Req}} \left(\frac{P_i - P_i^{\min}}{P_i^{\text{Req}} - P_i^{\min}} \right)^{0.5} & P_i^{\min} < P_i \leq P_i^{\text{Req}} \\ Q_i^{\text{Req}} & P_i > P_i^{\text{Req}} \end{cases} \quad (1)$$

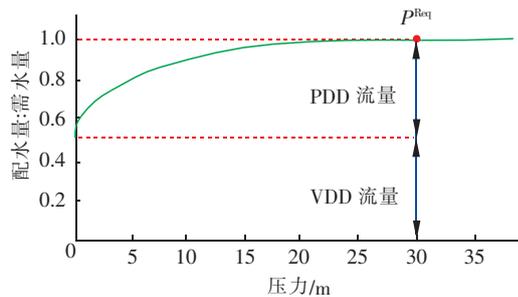
式中, Q_i^{Avl} 、 Q_i^{Req} 分别为节点*i*的实际配水量及需水量; P_i 、 P_i^{\min} 、 P_i^{Req} 分别为节点*i*的实际水压、最小水压及额定水压。Wu 等^[5]也采用类似关系式,其认为 $P_i^{\min} = 0$,并引入参数 P_i^{Ref} (压力限值)使压力达到限值时节点流量不再增加。

Giustolisi 等^[12]的研究表明,不同用水特征的卫生器具其流量随压力变化不同,并将实际用水分为人的行为用水、容积驱动用水、不受控制孔洞用水和漏损。Liu 等^[1]进一步将上述4种性质用水归纳为容积驱动用水(VDD)、压力驱动用水(PDD)及漏损3类,其中VDD代表日常中由浮球阀或水位仪控制的容积类卫生器具用水,如洗衣机、生活水池及水箱等用水。PDD指由人或延时自闭阀控制的淋浴、洗脸盆等卫生器具用水^[1]。根据 Giustolisi 等^[12]及 Liu 等^[1]的研究,对于VDD类卫生器具用水,虽然

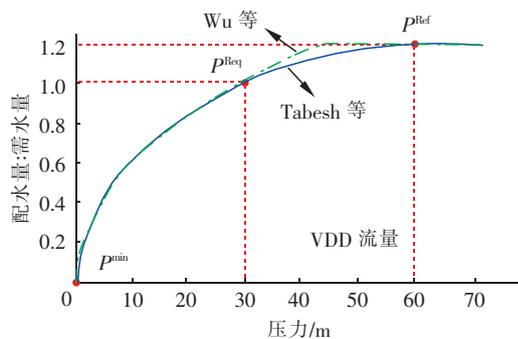
压力变化会影响其瞬时出流量, 但只要卫生器具出水口压力大于零, 容器随时间延长总会被充满, 故 VDD 用水可视为与压力无关的变量, PDD 用水则与压力呈正相关。基于 Wagner 等^[11]、Wu 等^[5] 及 Giustolisi 等^[12] 的研究, Tabesh 等^[6] 提出的节点流量 - 压力关系见式(1)。

$$Q_i^{Avl} = \begin{cases} 0 & P_i^{Avl} \leq P_i^{\min} \\ Q_i^{\text{Req}} \left(\frac{P_i^{Avl} - P_i^{\min}}{P_i^{\text{Req}} - P_i^{\min}} \right)^\alpha & P_i^{\min} < P_i^{Avl} \leq P_i^{\text{Req}} \\ Q_i^{\text{VDD}} + Q_i^{\text{PDD}} \left(\frac{P_i^{Avl} - P_i^{\min}}{P_i^{\text{Req}} - P_i^{\min}} \right)^\alpha & P_i^{\text{Req}} < P_i^{Avl} \leq P_i^{\text{max}} \\ Q_i^{\text{VDD}} + Q_i^{\text{PDD}} \left(\frac{P_i^{\text{max}} - P_i^{\min}}{P_i^{\text{Req}} - P_i^{\min}} \right)^\alpha & P_i^{Avl} > P_i^{\text{max}} \end{cases} \quad (2)$$

式中, 建议 $P_i^{\text{max}} = 2P_i^{\text{Req}}$ 。与 Liu 等^[1] 观点不同, Tabesh 等^[6] 认为当压力 \leq 额定压力时, PDD 和 VDD 流量都与压力相关, 而当压力 $>$ 额定压力后, VDD 流量将不随压力增加, PDD 流量则随压力增大到额定值的 1.2 倍后保持不变。Liu 等^[1]、Wu 等^[5] 及 Tabesh 等^[6] 提出的节点流量 - 压力曲线见图 1。



a. Liu 等提出的曲线



b. Wu、Tabesh 等提出的曲线

图 1 Liu、Wu、Tabesh 等提出的节点流量 - 压力曲线

Fig. 1 Node flow head relationship (NFHR) by Liu, Wu, Tabesh, et al.

图 1 中额定压力 $P_i^{\text{Req}} = 30 \text{ m}$ (1 m 水柱产生的压力约为 9.8 kPa, 下同)、最小压力 $P_i^{\min} = 0 \text{ m}$, 并假定节点流量中 VDD 与 PDD 流量各占 50%。

② 通过实测法对节点流量 - 压力关系进行率定, 例如周建华等^[4] 对 5 栋居民楼的进户总表和入口压力进行监测, 通过调整入口压力考察用水量变化, 得到的流量 - 压力关系见式(3)。

$$Q_i^{Avl} = \begin{cases} 0 & P_i \leq 0 \\ 0.005711 Q_i^{\text{Req}} P_i^2 & 0 < P_i \leq 6 \text{ m} \\ Q_i^{\text{Req}} \sin^2(\pi P_i / 40) & 6 \text{ m} < P_i \leq 20 \text{ m} \\ Q_i^{\text{Req}} & P_i > 20 \text{ m} \end{cases} \quad (3)$$

文献中 $\sin(\pi P_i / 40)$ 应为 $\sin^2(\pi P_i / 40)$, 否则关系式与所给图形不符, 在此予以修正。周建华等^[4] 指出, 随楼层高度和水龙头开启度的不同, 不同节点的流量 - 压力曲线不同(见图 2), 但为简化且忽略随机性影响, 可将该式用于管网中所有节点。

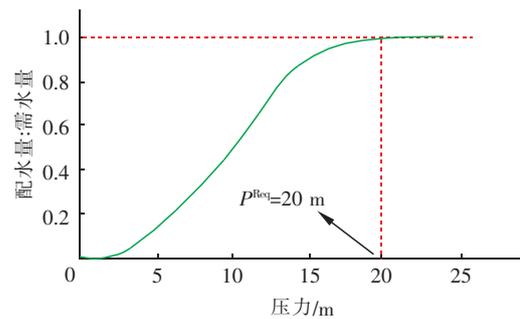


图 2 周建华等提出的节点流量 - 压力曲线

Fig. 2 NFHR proposed by Zhou Jian-hua, et al.

然而, 实际中独栋建筑与管网节点并不对应, 管网节点流量通常代表服务区域内多栋建筑用水, 因此式(3)在实际工程中的适用性有待考证。此外, Shirzad 等^[13] 对单个水龙头进行了放水试验, 并利用实测数据得到了节点流量 - 压力曲线, 如图 3 所示。

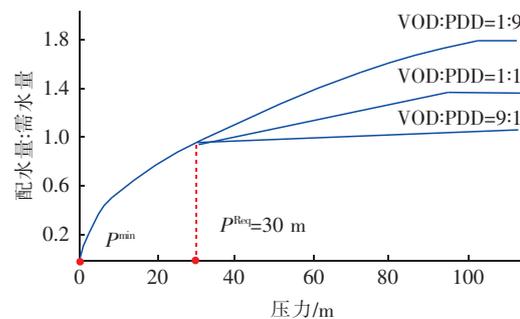


图 3 Shirzad 等提出的节点流量 - 压力曲线

Fig. 3 NFHR proposed by Shirzad, et al.

式(3)与Wagner等^[11]建议的平方根计算式非常接近,但由于试验条件的约束,只能相对准确反映单个卫生器具的流量-压力关系,是否适用于整栋建筑及管网节点仍值得商榷。

③ 通过构造导函数连续的节点流量-压力关系式以改善管网水力方程计算收敛性,例如Tanyimboh等^[14]构造了式(4)。

$$Q_i^{Avl} = Q_i^{Req} \frac{\exp[\alpha + \beta(P + H)]}{1 + \exp[\alpha + \beta(P + H)]} \quad (4)$$

式中, P 为压力水头; H 为地面标高。式(4)为logistic函数 $y = e^x / (1 + e^x)$ 的变形,常用于将变量关系映射到 $[0, 1]$ 区间。对于参数 α, β ,在缺乏实测数据时,建议 $Q_i^{Avl}(H_i^{Req}) = 0.999Q_i^{Req}$, $Q_i^{Avl}(H_i^{min}) = 0.01Q_i^{Req}$,可反解出式(5)。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{-4.595(P_i^{Req} + H) - 6.907(P_i^{min} + H)}{P_i^{Req} - P_i^{min}} \\ \beta = \frac{11.502}{P_i^{Req} - P_i^{min}} \end{cases} \quad (5)$$

Tanyimboh等^[14]提出的节点流量-压力曲线如图4所示。通过设置 $\alpha, \beta, P_{min}, P^{Req}$ 能得到不同曲线,以满足实际节点流量-压力关系。与式(3)相比,采用logistic函数不仅能达到分段函数的目的,还能保证函数连续,进而改善计算收敛性。Tanyimboh等^[14]指出,由于不同管网的节点流量-压力曲线不同,应采集实测数据进行参数率定。

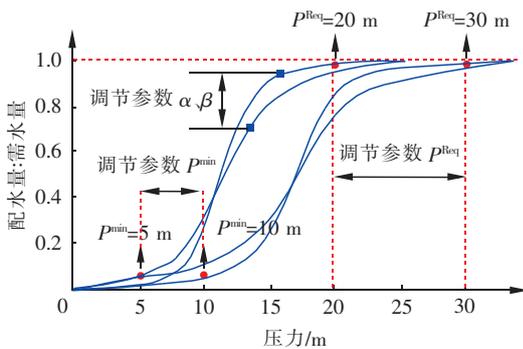


图4 Tanyimboh等提出的节点流量-压力曲线

Fig. 4 NFHR proposed by Tanyimboh, et al.

3 当前研究存在的问题

综上所述,虽然国内外学者对低压管网水力分析开展了广泛研究,但对节点流量-压力关系尚未达成统一意见,现有研究成果还不足以解决实际工程问题,且至少有如下问题值得进一步探讨:①不同

建筑及管网节点流量-压力曲线额定压力(P^{Req})及最低压力(P^{min})的率定;②不同类型建筑及管网中VDD与PDD卫生器具比例的确定;③包含不同比例VDD及PDD类型卫生器具的节点流量-压力曲线的率定,以及关键参数识别及简化率定方法的提出。

针对问题1:管网节点流量主要代表周围建筑用水,故 P^{Req} 及 P^{min} 的取值与建筑高度及供水方式相关,如市政水压直供、水泵加压供水等。而现有研究大多令 $P^{Req} = 30 \text{ m}$, $P^{min} = 0 \text{ m}$,尚未有研究从实际供水情况出发探讨 P^{Req}, P^{min} 的取值问题。

针对问题2:已有研究表明,当建筑或管网中VDD与PDD卫生器具比例不同时,节点流量-压力曲线存在差异,而目前鲜有研究探讨不同类型建筑及管网中VDD与PDD卫生器具的比例。

针对问题3:实际中不同管网的节点流量-压力曲线不同,其影响因素除了供水水压、建筑高度、供水方式外,VDD与PDD类卫生器具比例也是重要的影响因素,因此有必要识别关键参数并进一步提出简化率定算法,以便在实际工程中推广应用。

4 拟解决方案

要获得准确性较高的节点流量-压力曲线,理论上应采集实测数据进行参数率定,但这需要人为降低管网供水压力,并对低压供水时的流量及压力进行监测,不仅耗费大量人力财力,且可操作性差。事实上,Blokker等^[15,16]关于随机终端用水模型的研究表明,根据卫生器具使用频率等统计信息,应用Monte Carlo模拟能对不同类型建筑用水进行数值仿真,包括住宅、商业、旅馆等不同类型的建筑。再者,Shirzad等^[13]、Giustolisi等^[12]及Liu等^[1]的研究成果为低压供水时卫生器具用水模拟提供了基本参数及理论支持。因此,通过构建建筑配水管网水力模型,应用Monte Carlo模拟对低压供水时建筑用水进行数值仿真,可望解决监测值难以获得的难题,为不同供水情况下的节点流量-压力曲线率定提供基础数据。此外,我国建筑设计规范、建筑给排水规范对不同类型建筑的卫生器具设置数量、类型做出了相关规定,《建筑中水设计规范》3.1.4条还给出了各类建筑物分项给水百分率,这为不同类型建筑中VDD与PDD卫生器具比例估算提供了参考。

5 结论

低压供水管网水力分析是开展事故时供水可靠

性分析、供水优化调度,以及消防用水时管网优化设计等研究的基础。而目前针对低压供水时节点流量-压力曲线的研究存在不足,相关成果还不足以解决实际工程问题。从水力方程求解及节点流量-压力关系率定两个方面介绍了基于PDA算法的低压管网水力分析研究进展,总结了当前研究存在的问题并提出拟解决方案,对今后相关研究的开展有一定的借鉴及指导意义。

参考文献:

- [1] Liu J, Yu G P. Iterative methodology of pressure-dependent demand based on EPANET for pressure deficient water distribution analysis[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2013, 139(1): 34-44.
- [2] 吴一繁. 节点流量调整法用于供水管网事故校核[J]. 中国给水排水, 2004, 20(7): 62-64.
- [3] 何萍, 信昆仑. 低压条件下城市供水管网水力模拟方法探究[J]. 供水技术, 2015, 9(5): 1-7.
- [4] 周建华, 赵洪宾. 低水压供水时的管网平差计算方法[J]. 中国给水排水, 2003, 19(3): 43-45.
- [5] Wu Z Y, Wang P H, Walski T M, *et al.* Extended global-gradient algorithm for pressure dependent water distribution analysis[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2009, 135(1): 13-22.
- [6] Tabesh M, Shirzad A, Arefkhani V, *et al.* A comparative study between the modified and available demand driven based models for head driven analysis of water distribution networks[J]. Urban Water Journal, 2014, 11(3): 221-230.
- [7] Pathirana A. EPANET2 desktop application for pressure driven demand modeling[J]. Water Distribution Systems Analysis, 2010, 11(1): 65-74.
- [8] 杜坤, 龙天渝, 郭劲松, 等. 地震导致渗漏的供水管网水力模拟[J]. 土木建筑与环境工程, 2013, 35(3): 126-130.
- [9] He P, Tao T, Xin K, *et al.* Modelling water distribution systems with deficient pressure: An improved iterative methodology[J]. Water Resources Management, 2016, 30(2): 593-606.
- [10] Bhavne P R. Node flow analysis distribution systems[J].

Transportation Engineering Journal, 1981, 107: 457-467.

- [11] Wagner J M, Shamir U, Marks D H. Water distribution reliability: simulation methods[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1988, 114(3): 276-294.
- [12] Giustolisi O, Walski T M. Demand components in water distribution network analysis[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2012, 138(4): 356-367.
- [13] Shirzad A, Tabesh M, Farmani R, *et al.* Pressure-discharge relations with application to head-driven simulation of water distribution networks[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2013, 139(6): 660-670.
- [14] Tanyimboh T T, Templeman A B. Seamless pressure-deficient water distribution system model[J]. Water Management, 2010, 163(8): 389-396.
- [15] Blokker E J M, Pieterse-Quirijns E J, Vreeburg J H G. Simulating nonresidential water demand with a stochastic end-use mode[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2011, 137(6): 511-520.
- [16] Blokker E J M, Vreeburg J H G, Dijk J C V. Simulating residential water demand with a stochastic end-use model[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2011, 136(1): 19-26.



作者简介:刘年东(1990-),男,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向为市政工程。

E-mail: 850070507@qq.com

收稿日期:2016-11-18