

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.13.012

# 供水系统水厂临界减产率的分析及应用初探

龙志宏<sup>1</sup>, 许刚<sup>1</sup>, 朱子朋<sup>1</sup>, 张邢<sup>2</sup>, 程伟平<sup>2</sup>

(1. 广州市自来水有限公司, 广东 广州 510600; 2. 浙江大学 建筑工程学院, 浙江 杭州 310058)

**摘要:** 保障管网中不出现“失压断流”是供水系统的安全底线之一,据此提出了水厂“临界减产率”概念作为非正常工况下控制水厂减产量的决策依据之一。从社会心理学角度提出了管网中最小自由水压为0.5 m且节点范围不超过500 m作为是否出现“失压断流”的参考标准。采用压力驱动模型,以逐步减量方式测算“临界减产率”,结果表明,某市大型水厂的临界减产率为40%~50%,当水厂的产水率为10%~30%时,最大减产运行时间为6.25~12.50 h。

**关键词:** 供水系统; 水厂临界减产率; 压力驱动模型

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)13-0076-05

## Analysis of Drinking Water Plant Critical Production Reduction Rate in Water Supply System and Its Application

LONG Zhi-hong<sup>1</sup>, XU Gang<sup>1</sup>, ZHU Zi-peng<sup>1</sup>, ZHANG Xing<sup>2</sup>, CHENG Wei-ping<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Water Supply Co. Ltd., Guangzhou 510600, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** To ensure that there is no “loss of pressure or flow” in the pipe network is one of the safe bottom lines of water supply system. Therefore, the concept of “critical production reduction rate” of drinking water plant was proposed as one of the decision-making bases to control the production reduction of drinking water plant under abnormal working conditions. From the perspective of social psychology, this paper proposed that the minimum free water pressure in the pipe network was 0.5 m and the node range was not more than 500 m as the reference standard for whether there was “loss of pressure or flow”. The pressure driven model was used to calculate the “critical production reduction rate” by stepwise reduction method. The critical production reduction rate of a large drinking water plant in a city was estimated to be between 40% and 50%. When the water production rate of the drinking water plant was between 10% and 30%, the maximum reduction operation time was between 6.25 h and 12.50 h.

**Key words:** water supply system; critical production reduction rate of drinking water plant; pressure driven model

供水管网系统是城市基础设施的重要组成部分,目前其面临两个问题:一是用户需水量接近水厂

基金项目:住房和城乡建设部科学技术计划项目(2022-K-161);浙江省重点研发计划项目(2021C03017);广州市自来水有限公司科研项目(科技19-9)

通信作者:程伟平 E-mail: chengweiping@zju.edu.cn

最大生产能力,产能不足;二是正常情况下,水厂具有充足的产能,但由于输送能力不足而无法满足不同用户需要。一般性供水设施出现故障只会对周围局部区域的正常用水产生影响,而政府和自来水公司则重点关注引起大范围缺水的突发事件。水厂作为供水系统的重要环节之一,非正常运行状态时有可能引发大范围缺水,因此其在水力安全研究中具有重要意义。在复杂的多水源大中型管网中,水厂供水量大幅度下降甚至停产可能会造成管网大范围的“失压断流”<sup>[1]</sup>,其危害主要表现为:①管网因失压或停水,外部污染就可能侵入管道;②断流状态下,如果一楼用户无水可用,则居民需要远距离取水,由此造成的负面心理影响远超过就地取水的影响(如在本幢一楼就近取水),用户无水可用易引发社会舆论事件;③在管网重启时,可能需要进行排气、冲污等复杂程序,造成用户缺水时间加长;④供水单位要保证日常一定量的送水车以应急,这增加了供水单位的管理压力和运营成本。

目前,国家相关规程中尚无详细资料指导自来水公司如何应对水厂的减产停产。相关文献<sup>[2-3]</sup>大多从水厂运行调度等方面展开分析,对于水厂最大减产限度和减产运行时间的研究几乎没有涉及。根据自来水公司的管理经验,对于重大水力事件,优先考虑最大程度上减小“失压断流”的范围,保证居民最基本用水需求。

首先笔者从社会安全和供水保障角度出发,提出了以市政输配水管线不出现“失压断流”时水厂最大减产产量作为“临界减产率”参考标准,反映了水厂在供水系统中的重要程度和水厂减、停产事故对管网供水影响的程度;其次介绍了临界减产率计算流程,以案例说明如何利用管网压力驱动模型分析水厂不同程度的减产对管网造成的影响范围大小以及哪些区域出现“失压断流”;最后研究了如何利用临界减产率指导水厂估计可减产时间,为最大程度上降低减、停产导致的负面影响提供决策依据,这对评估水厂非正常工况下的管理具有指导意义。

## 1 水厂临界减产率分析方法

### 1.1 压力驱动水力模型基本原理

水厂减产乃至停产等事故会对正常供水产生一定负面影响,从安全角度考虑,自来水公司不会对此类极端工况进行实际测试,可借助管网水力模

型进行数值模拟。管网水力模型分为需求驱动模型和压力驱动模型<sup>[4-5]</sup>。传统的需求驱动模型假设需求节点的可用流量始终等于这些节点的所需流量,但是在极端工况时,这种假设与实际情况有较大偏差,无法给出合理的分析结果。压力驱动模型则基于流出压力依赖性的假设<sup>[6]</sup>,研究表明用户实际可利用流量与节点压力存在着密切关系<sup>[7]</sup>。在突发事故发生情况下,同时联立流量连续性方程、能量方程和压力-流量关系方程,得到的结果更符合实际情况。在压力驱动模型中,一定范围内节点的实际可用水量与服务压力呈正相关关系。科研人员开展了大量研究,提出了一些描述压力-流量的经验公式,常用的压力驱动模型包括线性模型和指数模型等<sup>[8]</sup>。本研究采用线性模型,表达式如下:

$$\begin{cases} q_j^{\text{avbl}} = q_j^{\text{req}} & H_j^{\text{req}} \leq H_j^{\text{avbl}} \\ q_j^{\text{avbl}} = (H_j^{\text{avbl}}/H_j^{\text{req}})q_j^{\text{req}} & H_j^{\text{min}} < H_j^{\text{avbl}} < H_j^{\text{req}} \\ q_j^{\text{avbl}} = 0 & H_j^{\text{avbl}} \leq H_j^{\text{min}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $q_j^{\text{avbl}}$ 为节点 $j$ 的实际可用流量; $q_j^{\text{req}}$ 为节点 $j$ 的需求流量; $H_j^{\text{avbl}}$ 为节点 $j$ 的实际水头; $H_j^{\text{min}}$ 为节点 $j$ 的最小服务水头; $H_j^{\text{req}}$ 为最小服务需求水头。

### 1.2 临界减产率分析流程

目前我国绝大部分水厂都有一定设计余量,“以销定产”,即用户用多少就生产多少。不同时期的制水量是不同的,最高日属于比较不利的时间段。本研究定义的临界减产率为:(最高日需水量-非正常状态可生产供应水量)/最高日需水量。基于压力驱动模型建立了分析水厂临界减产率的程序,并结合管网空间位置和水力分析成果自动确定水厂临界减产率。在临界减产率分析中,非常重要的是确定用户在极端工况下的取水行为:①居民取水的最小服务压力;②居民远距离取水步行可接受的距离。对于居民用户,即使水头 $<2\text{ m}$ ,只要取水龙头有水可出,也会尽可能取水。根据日常生活经验,一般情况下居民小区龙头的最低高度在 $0.5\sim 1.0\text{ m}$ 左右(如拖把池龙头),据此将 $0.5\text{ m}$ 作为最小压力限值;同时考虑居民可以短距离步行取水,但当步行超过 $500\text{ m}$ 时,居民会感觉影响较大,较难接受。考虑到以上因素,具体计算方法为:根据不同程度减产率控制水厂出水流量,利用压力驱动模型模拟计算,搜索节点压力和节点间最大直线距离并做出判断,反复迭代演算,若模型计算结果中存在

5~10个节点压力同时低于0.5 m,且节点间供水区域内最大距离超过500 m时,即认为出现较大范围的“失压断流”,此时减产率即为水厂临界减产率。其计算方法虽然简单,但结合了社会心理学背景,对实际供水管理具有指导意义。水厂临界减产率计算流程如图1所示。

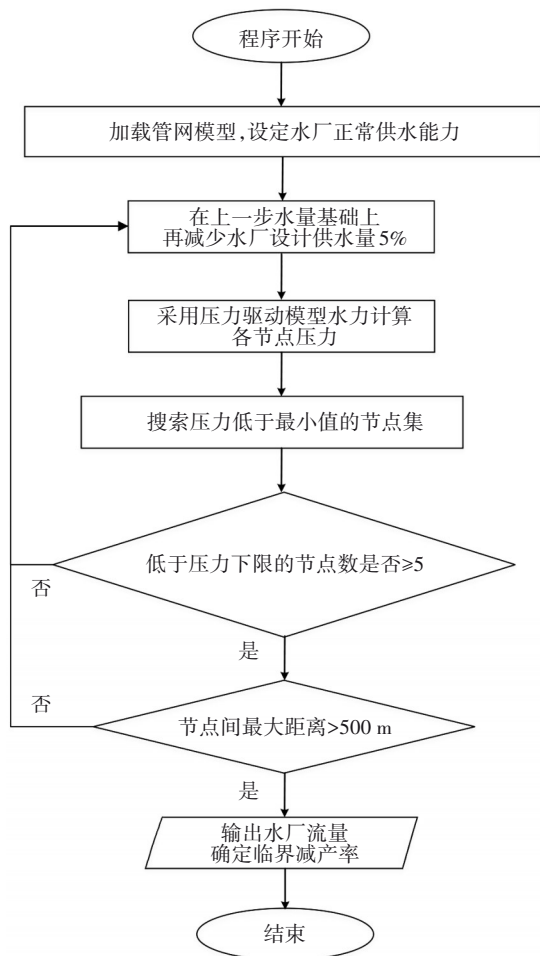


图1 水厂临界减产率计算流程

Fig.1 Flow chart of calculation method of critical production reduction rate of drinking water plant

### 1.3 减产率案例分析

G市从三处水源地取水,原水通过输水管道输送到各个水厂进行净化后,再经管网输送至千家万户。水厂有可能会因为生产设施维护而短期内出现小幅度的减产,这可以通过水厂清水池调蓄解决,不影响正常供水。如果出现水源污染,水厂全面停产,造成大范围供水区域的“失压断流”,则属于最严重的供水事件之一。一定程度的减产会对居民用水造成明显影响,但是多大程度的减产将严重影响居民是水司的关注点之一。根据G市的特点

选用线性压力驱动模型进行计算,基准服务压力设为14 m,压力低于14 m后节点用水量按照比例折减。计算分析结果,对出现事故后管网不同压力范围进行颜色标记,共分为五级,节点压力按不同颜色显示:①绿色:压力 $\geq 14$  m;②蓝色: $8 \text{ m} \leq \text{压力} < 14 \text{ m}$ ;③黄色: $4 \text{ m} \leq \text{压力} < 8 \text{ m}$ ;④橙色: $0.5 \text{ m} \leq \text{压力} < 4 \text{ m}$ ;⑤红色: $0 < \text{压力} < 0.5 \text{ m}$ 。正常工况下的计算结果如图2所示。

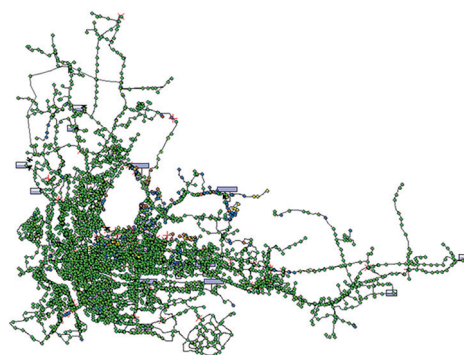
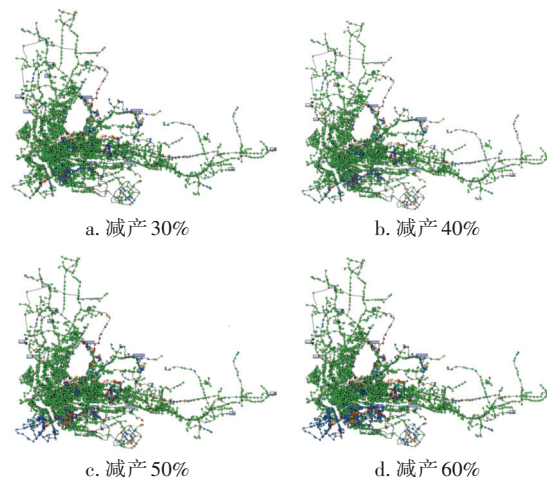


图2 正常工况下管网压力等级分布

Fig.2 Pressure distribution of pipe network under normal condition

#### 1.3.1 南洲水厂临界减产率分析

以南洲水厂减产为例,采用压力驱动模型按图1所示流程进行计算,结果显示其最大限度的安全减产范围在40%左右。图3为南洲水厂不同减产工况下的管网压力分布情况。从图3(a)可知,当减产30%时,管网中有单个节点出现“失压”,但影响不大;从图3(b)可以看出,当水厂减产40%时,南洲水厂附近区域已经出现了较大范围的橙色区域,意味着这块区域中的用水节点面临着“失压断流”风险,需要采取应急措施来保障居民正常用水。





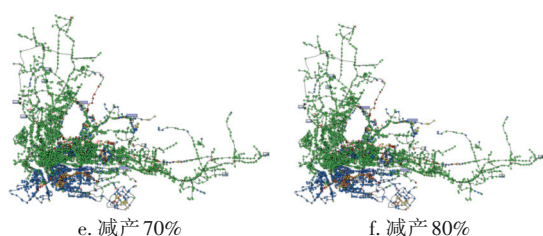


图3 南洲水厂不同减产工况下的管网压力分布情况

**Fig.3 Pressure distribution of pipe network under different production reduction conditions of Nanzhou Drinking Water Plant**

结合图3(c)~(f)来看,随着减产程度加大,橙、红色区域不断扩大,影响范围越来越大。可见,南洲水厂作为G市南部区域的主要供水厂,下游节点用户数量众多,最大限度的安全减产范围约为40%,高于50%后会引发较大范围的节点水压不足,工作人员需重点关注并避免更大范围的减产,甚至停产。

### 1.3.2 北部水厂临界减产率分析

北部水厂是G市新建的大型水厂,对于缓解G市的供水紧张起到了重要作用。图4为北部水厂不同减产工况下的管网压力分布情况。

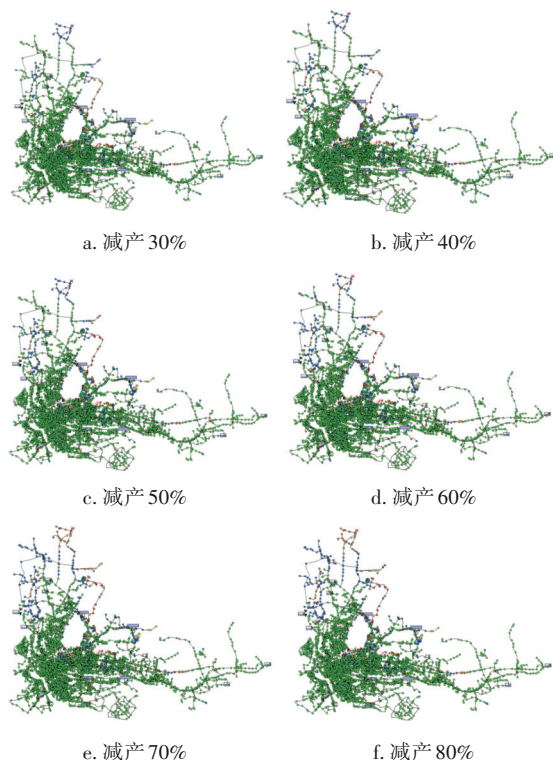


图4 北部水厂不同减产工况下的管网压力分布情况

**Fig.4 Pressure distribution of pipe network under different production reduction conditions of Beibu Drinking Water Plant**

由图4(b)、(c)可以看出,在减产40%和减产50%的工况下,管网中会出现节点水压略微下降的蓝色区域。随着减产程度进一步加大,在减产60%的工况下,管网北部末梢区域开始出现节点压降较大的现象。图4(e)和(f)进一步验证了减产程度的增大会导致管网末梢“失压断流”范围的增大。由此可知,北部水厂的安全减产范围基本在65%~70%之间。计算结果与南洲水厂相比差别较大,这是由于北部水厂是新建水厂,首先是为补充原北部区域供水不足建设的,现阶段还没有完全替代原周边水厂的供水作用,从而使得北部水厂的安全减产程度高于南洲水厂。

## 2 水厂临界减产率的应用

水厂临界减产率对于指导供水系统安全运行具有一定意义,通过确定水厂的安全减产底线,并结合实际运行情况,可以反推水厂在减产工况下保证安全供水的最大运行时间,尽量遵循水厂“不停、少停、短停”的原则,力求在最短时间内恢复正常生产和供水。估算水厂最大减产和停产时间的公式为:允许减产和停产时间=蓄水量/(供水量-制水量)。

以南洲水厂为例,日均供水总量接近 $100 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,其平均供水量约为 $40\,800 \text{ m}^3/\text{h}$ ,水厂清水池容积为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。水厂进行减产维修期间,一方面调用水厂清水池的水来补充,另一方面是减少二泵站的供水。根据上述分析,南洲水厂安全减产范围在40%~50%之间。如果以50%为基准,系统可接受的最小供水量为 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 。南洲水厂清水池蓄水量为 $10 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,当南洲水厂制水量为供水量10%时(制水量为 $0.4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ),则保障不出现失压断流的时间= $10/(2-0.4)$ ,为6.25 h。当制水量为正常供水量的20%、30%时(制水量分别为 $0.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ 和 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ ),则管网不出现失压断流的时间分别为8.30和12.50 h,该方法可为自来水公司制订短期维修计划提供参考。

## 3 结论

提出了以供水系统中不出现“失压断流”作为水厂供水水力安全底线之一,并以管网的自由水压为0.5 m、范围达到500 m作为管网水力计算中是否出现“失压断流”的参数。应用压力驱动模型,采用逐步减量的方法,测算了G市两个典型水厂的临界

减产率,其中南洲水厂的临界减产率为40%~50%,北部水厂为65%~70%。两者之间的差别体现了两个水厂供水范围之间独立性的差异。最后以南洲水厂的临界减产率计算了南洲水厂不同制水率下最大允许减产量和停产时间。该方法可为水厂管理提供理论依据和具体计算手段,在实际生产运行中具有指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 朱子朋,袁永钦,龙志宏,等. 极端工况下综合管廊供水管网的调水作用研究[J]. 给水排水, 2020, 46(10):104-109.  
ZHU Zipeng, YUAN Yongqin, LONG Zhihong, *et al.* Study on water transfer effect of integrated pipe gallery water supply pipe under extreme conditions [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(10): 104-109 (in Chinese).
- [2] 许强,盛宁. 城市给水系统优化调度研究综述[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6(3):115-117.  
XU Qiang, SHENG Ning. Research on optimal operation of urban water distribution system [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6(3):115-117(in Chinese).
- [3] 鲍任兵,邹磊,张怀宇,等. 城市供水系统应急设计研究及案例应用[J]. 给水排水, 2020, 46(5): 105-111.  
BAO Renbing, ZOU Lei, ZHANG Huaiyu, *et al.* Study and application on emergency design of urban water supply system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(5):105-111(in Chinese).
- [4] 王俊良,李娜娜,高金良,等. 基于压力驱动节点流量模型的供水管网漏失控制[J]. 中国给水排水, 2010, 26(13):106-108.  
WANG Junliang, LI Nana, GAO Jinliang, *et al.* Leakage control of water distribution system based on pressure driven node flow model [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(13):106-108 (in Chinese).
- [5] 庞榆文. 城市居民用户用水行为及供水管网水力模型改进研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2019.  
PANG Yuwen. Study on Water Use Behavior of Urban Residents and Hydraulic Model Improvement of Water Supply Network [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019 (in Chinese).
- [6] SHIRZAD A. A model for pressure driven analysis-design of water distribution networks [J]. Journal of Applied Water Engineering and Research, 2020, 8(2): 79-87.
- [7] CHANG D E, LEE H M, YOO D G, *et al.* Quantification of the head-outflow relationship for pressure-driven analysis in water distribution networks [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(8): 3353-3363.
- [8] 张俊,陶涛. 基于压力驱动的管网漏损模型[J]. 供水技术, 2015, 9(5):40-44.  
ZHANG Jun, TAO Tao. Network leakage model based on pressure-driven analysis [J]. Water Technology, 2015, 9(5):40-44(in Chinese).

作者简介:龙志宏(1973- ),男,湖南邵东人,本科,高级工程师,主要研究方向为给水和供水调度、供水调度应急管理、供水技术研发及管理。

E-mail:lzh73@126.com

收稿日期:2023-02-25

修回日期:2023-04-02

(编辑:任莹莹)

加强水土保持, 打造绿水青山