

# 实测方法评估压力管理对漏失水量降低程度的适用性

郑成志<sup>1,2,3</sup>, 赵焱<sup>1,3</sup>, 孙国胜<sup>1,3</sup>, 李冬平<sup>1,3</sup>, 徐叶琴<sup>1,3</sup>,  
高金良<sup>2</sup>, 崔福义<sup>2</sup>

(1. 广东粤海水务股份有限公司, 广东 深圳 518021; 2. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 3. 广东粤港供水有限公司, 广东 深圳 518021)

**摘要:** 压力管理作为一种漏失水量控制措施正逐步受到重视,合理评估压力管理对漏失水量的降低程度,对比较压力管理的投资和收益十分重要。针对实测方法中的降压测试法和水平衡分析对比法分别进行了分析。通过分析供水总流量的测量误差、供水水压对用水流量的影响、用水流量和用水量的不稳定性,证明了降压测试法依托的等效漏点指数模型在实际操作性方面并不可行,上述4个方面均会对漏失水量降低程度的评估造成很大影响;通过推理及试验数据分析证明,等效漏点指数模型存在理论上的缺陷,会对漏失水量降低程度的评估造成进一步的偏差。通过阐述水平衡分析对比法自身特点及误差,证明该方法难以单独区分压力管理的作用,会对评估结果造成不可估量的误差。可见,采用实测方法评估压力管理对漏失水量降低程度是不适用的。

**关键词:** 供水管网; 漏失水量; 压力管理; 漏损控制; 实测方法

**中图分类号:** TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2019)19-0050-07

## Applicability of Measurement Method in Assessing Extent of Real Losses Reduction through Pressure Management

ZHENG Cheng-zhi<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Yan<sup>1,3</sup>, SUN Guo-sheng<sup>1,3</sup>, LI Dong-ping<sup>1,3</sup>,  
XU Ye-qin<sup>1,3</sup>, GAO Jin-liang<sup>2</sup>, CUI Fu-yi<sup>2</sup>

(1. Guangdong GDH Water Co. Ltd., Shenzhen 518021, China; 2. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 3. Guangdong Yuegang Water Supply Co. Ltd., Shenzhen 518021, China)

**Abstract:** The pressure management is an increasingly accepted method in the real losses control strategy. Reasonable assessment of the extent of real losses reduction is critical to evaluate the investments and returns of the pressure management. The two measurement methods, pressure reduction experimental method and water balance analysis comparison method, were analyzed separately. The analyses of the uncertainties in the total water supply flow measurements, the impact of water pressure on the water consumption, and the fluctuation in the flows and volumes of the water consumption revealed that the equivalent leak exponent model (ELEM), which the pressure reduction experimental method relied on, was inappropriate from the practical operation perspective. Additionally, the aforementioned four aspects had great impacts on the assessment of the real losses reduction. The formula derivation and

the analysis of experimental data proved a theoretical defect in the ELEM, which further deviated the assessment of the real losses reduction. The features and uncertainties in the water balance analysis comparison method were analyzed. The method could not distinguish the impact of pressure management, which could introduce unknown errors to the evaluation. The measurement method was inappropriate for assessing the extent of real losses reduction attributed to pressure management.

**Key words:** water distribution network; real losses; pressure management; leakage control; measurement method

供水管网漏损控制越来越引起供水企业的重视<sup>[1-2]</sup>,漏损可分为物理漏损(有明漏、暗漏、背景漏损等形式,背景漏损是物理漏损的主要组成部分)和表观漏损<sup>[3]</sup>,物理漏损是管网漏损的主要部分<sup>[4]</sup>,通常占到70%以上<sup>[5]</sup>。在我国,物理漏损被称为漏失水量。相比漏点探测修复、管道更新改造等方法,压力管理是一种经济有效的漏失水量控制措施,而且几乎是背景漏损的唯一经济有效的控制方法<sup>[6-7]</sup>。而合理评估压力管理对漏失水量的降低程度,对分析项目投资回收期十分重要,过高地估计将会对供水企业造成经济损失,过低地评估会使得供水企业对压力管理的使用信心不足。实测方法有时候被用来计算压力管理的效益,笔者则主要分析了实测方法(降压测试法和水平衡分析对比法)是否能够有效评估压力管理对漏失水量的降低程度。

## 1 压力管理简介

供水管网漏失水量是由大量漏点的漏损形成的,单个漏点的漏失水流量可以用如下指数模型<sup>[8]</sup>表达:

$$q_L = \alpha H^\beta \quad (1)$$

式中: $q_L$ 为单个漏点的漏失水流量; $\alpha$ 为漏损系数; $H$ 为漏点处水压(特指自由水头); $\beta$ 为漏损指数。

由于不同漏点之间 $\alpha$ 、 $\beta$ 差异很大,并且这些参数取值难以确定,在衡量供水管网全局的漏失水流量时,所有漏点简化为一个等效漏点,把式(1)应用于全局得到等效漏点指数模型如下<sup>[9]</sup>:

$$Q_L = K_{\text{net}} H_{\text{AZP}}^n \quad (2)$$

式中: $Q_L$ 为供水管网全局的漏失水流量; $K_{\text{net}}$ 为等效漏损系数; $H_{\text{AZP}}$ 为供水管网的平均水压; $n$ 为等效漏损指数。

由式(1)或式(2)可知,只要减小水压,就可以实现漏失水流量的降低,这就是压力管理的原理,从这个角度讲,压力管理的实质就是降低水压。

降低水压也可有效减少管道爆管次数,从而降

低漏失水量,例如有分析认为供水压力降低1/3,管道爆管次数可降低1/2。由于爆管可以得到及时修复,所以爆管产生的漏失水量并不大,因此本研究的评估不考虑供水压力引起的爆管次数差异对漏失水量的影响。

压力管理通常在供水管网分区(DMA)的基础上进行,通过在DMA入口安装减压站并按照一定策略对减压站内的减压阀进行控制,实现漏损控制。

## 2 压力管理对漏失水量降低程度的评估方法

压力管理降低漏失水量程度的评估方法有3类:模型模拟法、实测方法、模型模拟与实测结合法(实测是为确定模型中的参数提供数据支持)。本研究将后两类方法统称为实测方法,主要有:降压测试法、水平衡分析对比法。

从实施时间看,模型模拟法、降压测试法、水平衡分析对比法的评估分别是压力管理实施前评估、试探性压力管理评估和压力管理实施后评估。压力管理实施前评估尚没有开展压力管理措施,根据预定的供水压力方案计算得到预期的漏失水量降低程度;试探性压力管理评估是通过降压测试获得数据,从而确定漏损模型中的参数取值,进而通过模型按照压力管理前后的供水压力计算得到漏失水量降低程度;压力管理实施后评估是压力管理实施时间已超过水平衡分析最小周期,根据实测数据进行压力管理实施前后的水平衡分析与对比,评估出漏失水量降低程度。

## 3 城市供水总流量划分

以国际水协(IWA)在1996年提出的供水总量划分方法为基础,将供水总流量进行划分以侧重于漏失水量的分析。IWA水量划分是基于水体积平衡的方法,供水总量被分为4类:售水量、免费供水量、账面漏水量和物理漏水量,后3类水量之和称为产销差水量;由于体积是流量对时间的积分,所以供水管网中任意一个稳态工况下上述水量划分关系对

流量同样适用,由此本研究将供水总流量划分为两类:漏失水流量和用水流量,其中漏失水流量对应 IWA 方法的物理漏水量,用水流量对应 IWA 方法的其余 3 类水量,并得到如下关系:

$$Q_Z = Q_Y + Q_L \quad (3)$$

式中: $Q_Z$  为供水总流量; $Q_Y$  为用水流量(即供水管网中所有用水流量之和)。

#### 4 采用实测方法评估的适用性

##### 4.1 降压测试法的理论基础

降压测试法测试各工况  $Q_Z$  和  $H_{AZP}$ ,通常结合等效漏点指数模型进行分析,降压幅度需达到两次以上,见式(4)。

$$\begin{cases} Q_{Y0} + K_{net} H_{AZP0}^n = Q_{Z0} \\ Q_{Y1} + K_{net} H_{AZP1}^n = Q_{Z1} \\ Q_{Yi} + K_{net} H_{AZPi}^n = Q_{Zi} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i$  为工况编号, $i=0$  表示降压前, $i \geq 1$  表示降压后。

当  $i=2$  时,通过式(4)可求解得到  $H_{net}$  和  $n$  这两个参数, $Q_L$  的降低程度可通过式(5)评估。

$$\eta = \frac{Q_L^{aft}}{Q_L^{bef}} = \left( \frac{H_{AZP}^{aft}}{H_{AZP}^{bef}} \right)^n \quad (5)$$

式中: $\eta$  为降压后与降压前漏失水流量的比值; $Q_L^{bef}$ 、 $Q_L^{aft}$  分别为降压前后供水管网漏失水流量; $H_{AZP}^{bef}$ 、 $H_{AZP}^{aft}$  分别为降压前后供水管网的平均水压。

结合等效漏点指数模型,以下从实际可操作性、理论可靠程度两个方面分析降压测试法的适用性。

##### 4.2 等效漏点指数模型的实际可操作性

首先,假设等效漏点指数模型在理论上是正确的。理论上,经过降压测试可通过方程求解得到等效漏点指数模型的参数值,降压测试时可以保持  $Q_Y$  存在,也可以采取措施使得  $Q_Y$  为零;保持  $Q_Y$  存在的测试又可以分为两类,即  $Q_Y$  被全部计量、 $Q_Y$  不被全部计量。

$Q_Y$  被全部计量以及保持  $Q_Y$  为零的降压测试均能较为简单地实现方程组(4)的求解,但这两种方法依然存在误差风险: $Q_Y$  被全部计量时,部分  $Q_Y$  计量不准确;保持  $Q_Y$  为零的方法,存在个别进水管上阀门关闭不严的情况,导致部分  $Q_Y$  被误判为  $Q_L$ 。

实际供水管网中的  $Q_Y$  是普遍没有实现全部计量的(仅计量了体积而不是流量);保持  $Q_Y$  为零的方法需要停掉各类用户的进水,实施繁琐且难以让

用户接受。因此,降压测试时通常保持  $Q_Y$  存在且不被全部计量,这导致  $Q_Y$  数据不健全,从而造成方程组(4)的求解困难,解决这个问题就要采取一定方法规避  $Q_Y$  的变化。

如果保持不同工况下  $Q_Y$  相等的状态进行降压测试, $i=2$  时式(4)可变为式(6)。

$$\begin{cases} K_{net} H_{AZP0}^n - K_{net} H_{AZP1}^n = Q_{Z0} - Q_{Z1} \\ K_{net} H_{AZP0}^n - K_{net} H_{AZP2}^n = Q_{Z0} - Q_{Z2} \end{cases} \quad (6)$$

##### 4.2.1 基于供水总流量的测量误差分析

如式(6)所示,每个工况均要测试  $Q_Z$ ,仪表可采用流量计或者水表 logger。目前我国生产运营中使用的仪表一般为工业用仪表,其精确度等级基本在 1.0 级以下,一级仪表的精确度较高,一般为 0.5 级。1.0 级、0.5 级仪表的测量基本误差分别为总量程的 1%、0.5%。假定  $Q_Z$  的测量误差能控制在一级仪表水平, $Q_Z$  占仪表量程的 70%,则两次测量造成的最大误差可达 1.0%,式(6)等号右侧的计算值误差占  $Q_Z$  的 1.4% 左右。假定不同的供水管网漏失率和不同的漏失降低幅度,基于供水总流量的测量误差影响分析如表 1 所示。

表 1 最大测量误差对漏失水流量降低程度的影响

Tab.1 Impact of maximum measurement error on real losses flow reduction %

①:漏失率	②: $Q_L$ 降低幅度	③: $Q_L$ 降低程度 (③ = ① × ②)	④:最大测量误差	⑤: $Q_L$ 降低程度的评估误差 (⑤ = ④/③)
8	10	0.8	1.4	175
	20	1.6	1.4	88
	30	2.4	1.4	58
16	10	1.6	1.4	88
	20	3.2	1.4	44
	30	4.8	1.4	29
24	10	2.4	1.4	58
	20	4.8	1.4	29
	30	7.2	1.4	19

由表 1 可知,当某供水管网漏失率( $Q_L$  占  $Q_Z$  的百分数)和漏失水量降低幅度均较小时, $Q_Z$  测量误差导致的评估误差可达到 175%,反之两者均较大时,如漏失率为 24%、 $Q_L$  降低幅度为 30%,此时评估误差也有 19%,仍然较大。由此,流量测量误差即使较小也足以造成较大的漏失水量降低程度评估误差。从数据量级上分析,式(6)等号左侧的每个量是相对  $Q_Z$  较小的数,为“小数”,而等号右侧的两

个  $Q_Z$  均为“大数”,显然两个带有误差的“大数”求差运算得到的“小数”是不可信的。

此外,使用诸如成分分析法等方法<sup>[10]</sup>评估得到  $Q_Y$ ,或者降压测试时  $Q_Y$  被全部计量,这两种方法得到的  $Q_Y$  同样存在上述“大数”运算误差占“小数”比重过大的问题,造成方程组(6)求得的参数有较大误差。

以上分析是假定较高精确度等级的最大测量误差开展的,如果测量误差均遵循系统误差的同向性(某一固定值多次测量时误差均保持为正数或负数),则实际测量误差对  $Q_L$  降低程度的影响要比表1分析结果小很多。实际测量时,不同位置流量仪表的系统误差难以保持同向性,并且流量传感信号在模拟量与数字量转换中存在误差扩大风险,同时测量仪表通常使用工业级仪表造成测量误差更大,因此  $Q_Z$  的测量误差对于评估  $Q_L$  的降低程度影响可能仍然很大,尤其是漏失率较小、 $Q_L$  的降低幅度又较小时,影响程度更为显著。

综上,供水总流量的测量误差影响对漏失水量降低程度的判断,使得降压测试方法不可靠。

#### 4.2.2 基于供水压力对用水流量的影响分析

按照用水量(体积)受供水压力的影响不同,用水器具可分为3种:时间型、体积型、时间-体积混合型。时间型用水器具要达到一定用水时间,其用水量与供水压力密切相关,一般用水量与供水压力的0.5次方呈线性关系,例如定时开关洒水喷头;体积型用水器具单次要达到一定用水体积,用水量与供水压力无关,例如洗衣机、浴缸;时间-体积混合型用水器具以达到一定用水体积为目的,同时受到供水压力的影响。供水管网中各类用水器具同时存在,供水压力对用水量的影响是有限的,文献[11]认为用水量与供水压力的0.2次方呈线性相关;当供水管网中时间型用水器具较少时,用水量几乎不受供水压力的影响。

用水流量在一定时间内是比较稳定的,此时开展降压测试快速读取降压前后的  $Q_Z$ ,并忽略供水压力对  $Q_Y$  的影响,由于降压前后  $Q_Y$  不变,则  $Q_L$  的降低量等同于  $Q_Z$  的减少量,这即是瞬时降压测试的设计依据。但降压后所有用水器具的供水压力降低导致用水流量变小,瞬时降压测试改变了用水条件造成降压前后  $Q_Y$  不变的假定不成立。供水压力对用水器具一定时间段内的用水量影响可以忽略不

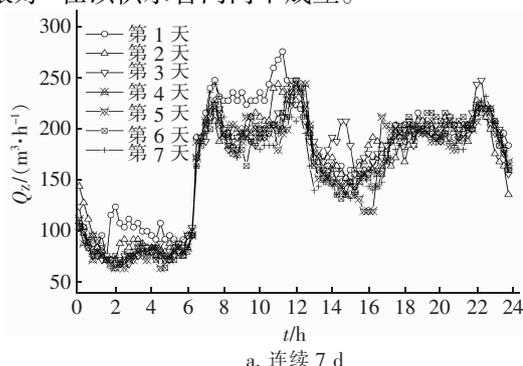
计,但对用水流量的影响是显著的,瞬时降压测试实际测量的是瞬时流量而不是水量,得到的  $Q_Z$  的减少量包含了所有  $Q_Y$  的减少量,其不能等同于  $Q_L$  的降低量。因此,瞬时降压测试反映出的漏失水量降低量远远大于真实值,其无法评估出漏失水量的降低程度。

#### 4.2.3 基于用水流量的不稳定性分析

受到用水习惯影响,城市供水几乎每天经历同样的供水流量曲线,如果不同日期相同时刻的  $Q_Y$  稳定性很好,则可以通过降压测试测量不同日期相同时刻的  $Q_Z$ ,用  $Q_Z$  之差代表  $Q_L$  降低量(此时用户经过较长时间的适应调节供水管网整体的  $Q_Y$  不会因供水压力改变而受到影响),这种测试本研究称为短期降压测试。

保持连续几天相同时刻的供水压力一致,则相同时刻  $Q_L$  的差异会很小,  $Q_Y$  的稳定程度可大致用这段时间内  $Q_Z$  的稳定程度表示。考虑间隔时间越短,温度等因素对  $Q_Y$  的稳定性影响会越小,因此采用连续7d的数据进行分析;为实现生活习惯对  $Q_Y$  稳定性的影响达到最小,采用连续6个周二的数据进行分析。

以CP镇LB计量分区所测  $Q_Z$  为例进行分析(此时该计量分区每天采用相同的供水压力方案),实测  $Q_Z$  随时间( $t$ )的变化见图1。为保守估计  $Q_Y$  的波动性,由于图1(a)中第1天与其他天相比数据差异明显较大,分析时不做考虑。计算每刻  $Q_Z$  的离散系数(CV)在全天的分布,得到连续6d的最小CV值为0.0157,连续6个周二的最小CV值为0.0243。LB计量分区  $Q_Z$  的最小CV值大于上述最大仪表测量误差(1.4%),可以判定该分区  $Q_Y$  的稳定性不足以达到评估漏失水量降低程度的要求。短期降压测试认为的“不同日期相同时刻的  $Q_Y$  稳定性很好”在该供水管网内不成立。



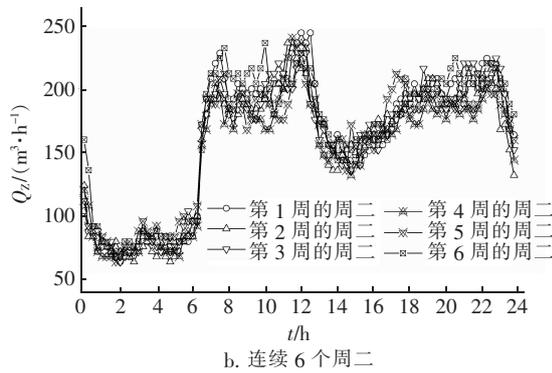


图 1 LB 分区不同日期相同时刻的供水总流量

Fig. 1 Total supply water flow at the same time on different days in LB District

表 2 供水总流量的波动情况

Tab. 2 Fluctuations in the total supplied water flow

项 目	区域供水规模/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	CV 范围	CV 均值	备注
LB 计量区	3 000	[0.015 7, 0.167 4]	0.063 6	连续 7 d, 第 1 天数据剔除
DT 计量区	1 200	[0.030 3, 0.087 9]	0.052 1	连续 7 d, 第 7 天数据剔除
BYY 计量区	1 600	[0.047 8, 0.182 4]	0.096 7	连续 7 d, 第 4 天数据剔除
DE 计量区	3 000	[0.046 7, 0.215 8]	0.100 7	连续 7 d, 第 4 天数据剔除
LB 计量区	3 000	[0.024 3, 0.177 4]	0.062 4	连续 6 个周二
DT 计量区	1 200	[0.050 9, 0.113 8]	0.070 5	连续 7 个周二, 第 2 周数据剔除
BYY 计量区	1 600	[0.034 7, 0.217 5]	0.106 1	连续 7 个周二, 第 7 周数据剔除
DE 计量区	3 000	[0.044 4, 0.173 2]	0.112 8	连续 7 个周二, 第 1 周数据剔除

#### 4.2.4 基于日用水量的不稳定性分析

由于供水总流量几乎每日重复同一条曲线出现,即相邻两日的供水总量(体积)是稳定的,并且为降低随机性带来的供水总量的波动,可采用连续多日的供水总量取均值。由此出现了间隔降压测试,即 1 d(或几日)采用降压方案供水、1 d(或几日)采用原供水压力方案供水,如此循环持续多日,从而通过供水总量的减少量反映降低的漏失水量。这种测试方法理论上不但可有效规避随机性带来的供水总量波动,还很好地避免了季节性变化对供水总量的影响。图 2 为 6 个计量分区连续 30 d 的供水总流量(期间无法定节假日),奇偶天平均日供水总量差异分析见表 3。连续多日奇偶日日均供水总量差异变化区间为[-5.78%, 2.98%];不同计量区之间存在差异,有的奇数日大,有的偶数日偏大;同一计量区,随统计天数的不同,增加程度数值正负可能发生改变;随统计天数的增加,多数计量区奇偶日日均供水总量差异有减小趋势,但并不是所有计量区都有这个规律,即使统计天数为 30 d 时,奇偶日日均供水总量差异区间为[-1.59%, 2.98%],边界

再结合其他 3 个计量分区实测数据,对  $Q_z$  的波动情况进行保守估计,分析结果见表 2。4 个计量分区中最小 CV 值也达到了 0.015 7,超过上述最大仪表测量误差(1.4%),表明  $Q_y$  的稳定性达不到分析要求。实际  $Q_z$  即使只有 1% 的微小波动,也足以对  $Q_L$  降低程度的评估产生不可接受的误差。例如,当  $Q_L$  降低量占  $Q_z$  的 1% 时,  $Q_z$  由于波动产生 1% 的误差就可以完全覆盖掉  $Q_L$  的降低量,而现实中又无法确定该时刻  $Q_y$  具体产生了多大的波动,因此  $Q_y$  的波动性造成  $Q_L$  降低程度难以评估。因此,由于  $Q_y$  存在不稳定性,短期降压测试无法评估出漏失水量的降低程度。

值大于上述最大仪表测量误差,可以判定奇偶日供水总量稳定程度不足以达到评估漏失水量降低程度的要求。

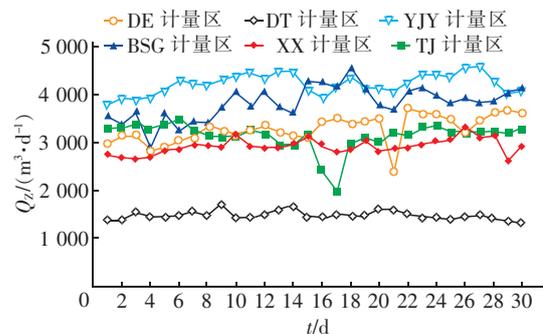


图 2 不同计量区连续 30 d 供水总流量

Fig. 2 Total supply water flow for 30 consecutive days in different districts

另外,间隔降压测试频繁改变供水压力,影响用户对供水压力的常规感受,容易造成高压供水日供水总量增加、低压供水日供水总量减少的现象(例如直接利用市政压力进行园林浇灌,高、低压供水每日工作时间相同,但高压供水日比低压供水日用水量增加;二次供水吸水罐高压供水日比低压供水日

储水量增加,造成高压供水日比低压供水日供水总量增加),从而造成间隔降压测试法评估出的漏失水量降低程度远大于实际值。

表3 奇偶日供水总量差异分析

Tab.3 Difference analysis of total supply water flow between odd and even days

项 目	偶数日比奇数日日均供水总量增加程度/%		
	连续 10 d	连续 20 d	连续 30 d
DE 计量区	0.32	1.08	2.98
DT 计量区	-4.94	-1.41	-1.59
YJY 计量区	2.20	0.73	0.66
BSG 计量区	-5.78	-2.33	-0.74
XX 计量区	1.68	-0.10	1.59
TJ 计量区	-0.58	-0.27	-0.06

综上,由于供水总流量存在测量误差、供水压力对用水流量造成影响、用水流量存在不稳定性、日用水量存在不稳定性,使得降压测试无法反映出真实的漏失水流量降低程度,这使得等效漏点指数模型的实际可操作性很差,评估造成的误差不能满足工程应用需求。

#### 4.3 等效漏点指数模型的理论可靠性

等效漏点指数模型是通过简化指数模型得来的,该模型中只有1个自变量参数,即供水管网平均水压,这种模型基本可以脱离供水管网水力模型独立应用,得到了较为广泛的工程应用。

假定一条高程不变、漏点沿管长均匀分布的管线上有 $2N+1$ 个漏点,水力坡降为 $\Delta H$ 且沿管长均匀产生,平均水压为 $H_{AZP}$ ,则这条管线上的漏损流量计算见式(7)。

$$Q_L(\Delta H) = K_1 \left( H_{AZP} + \frac{N}{2N} \Delta H \right)^{n_1} + K_2 \left( H_{AZP} + \frac{N-1}{2N} \Delta H \right)^{n_2} + \dots + K_j \left( H_{AZP} + \frac{N-j+1}{2N} \Delta H \right)^{n_j} + \dots + K_{N+1} H_{AZP}^{n_{N+1}} + \dots + K_{2N} \left( H_{AZP} - \frac{N-1}{2N} \Delta H \right)^{n_{2N}} + K_{2N+1} \left( H_{AZP} - \frac{N}{2N} \Delta H \right)^{n_{2N+1}} \quad (7)$$

式中: $Q_L(\Delta H)$ 表示水力坡降为 $\Delta H$ 时的漏失水流量; $K_j$ 为第 $j$ 个漏点的漏损系数; $j$ 为漏点编号; $n_j$ 为第 $j$ 个漏点的漏损指数。

假定该管线上式(8)成立:

$$\begin{cases} K_1 = K_2 = \dots = K_j = \dots = K_{2N+1} = K^+ \\ n_1 = n_2 = \dots = n_j = \dots = n_{2N+1} = n^+ \end{cases} \quad (8)$$

此时式(7)转化为式(9),即为一致漏损模型。

$$Q_L(\Delta H) = K^+ \left\{ \left( H_{AZP} + \frac{N}{2N} \Delta H \right)^{n^+} + \left( H_{AZP} + \frac{N-1}{2N} \Delta H \right)^{n^+} + \dots + \left( H_{AZP} + \frac{N-j+1}{2N} \Delta H \right)^{n^+} + \dots + H_{AZP}^{n^+} + \dots + \left( H_{AZP} - \frac{N-1}{2N} \Delta H \right)^{n^+} + \left( H_{AZP} - \frac{N}{2N} \Delta H \right)^{n^+} \right\} \quad (9)$$

若用等效漏点指数模型表达漏失水流量,则为式(10)。

$$Q_L(\Delta H) = K_{net} H_{AZP}^{n^+} \quad (10)$$

当该管线水力坡降为 $2\Delta H$ 且沿管长均匀产生,平均水压仍为 $H_{AZP}$ 时,此时漏失水流量为式(11)。

$$Q_L(2\Delta H) = K^+ \left\{ \left( H_{AZP} + \Delta H \right)^{n^+} + \left( H_{AZP} + \frac{N-1}{N} \Delta H \right)^{n^+} + \dots + \left( H_{AZP} + \frac{N-j+1}{N} \Delta H \right)^{n^+} + \dots + H_{AZP}^{n^+} + \dots + \left( H_{AZP} - \frac{N-1}{N} \Delta H \right)^{n^+} + \left( H_{AZP} - \Delta H \right)^{n^+} \right\} \quad (11)$$

可以证明,当且仅当 $n^+ = 1$ 时, $Q_L(\Delta H) = Q_L(2\Delta H)$ ,而不论 $n^+$ 为何值,只要平均水压仍为 $H_{AZP}$ ,使用等效漏点指数模型得出的漏失水流量在水力坡降不同的情况下仍然相同,因此等效漏点指数模型在理论上并不可靠。

#### 4.4 水平衡分析对比法的适用性

水平衡分析对比法在压力管理实施时间达到水平衡分析最小周期后进行,通过水平衡分析方法对比压力管理实施前后的漏失水量情况,评估出压力管理降低漏失水量的效果。

水平衡分析法得到的漏失水量误差通常较大,乐观估计误差达到供水总量的1%以上,参照上述分析,水平衡分析对比法评估误差较大,并且无法实现预评估。更重要地,实际的城镇供水管网漏损控制是多措施并举的,压力管理期间可能同步采取其他措施,比如检测漏点并修复,造成难以单独区分压力管理的作用;同时,压力管理实施时间较长,期间

新漏点持续不断发生,新增漏点造成的漏失甚至可能大于压力管理降低的漏失,而新增漏点造成的漏失又难以评估,使得水平衡分析对比法难以找到合理的对比基准,从而大大降低了评估结果的可信度。

## 5 结论

对实测方法(包括瞬时降压测试法、短期降压测试法、间隔降压测试法和水平衡分析对比法)评估压力管理降低漏失水量程度的适用性进行了分析。采用降压测试法结合等效漏点指数模型进行评估时,供水总流量的测量误差会对评估结果造成较大影响;带有用水流量的降压测试,由于供水水压对用水量造成影响,以及实际供水管网存在用水流量和用水量的不稳定性,均可对评估结果造成较大误差;等效漏点指数模型存在理论上的缺陷;水平衡分析对比法自身误差乐观估计不低于1%,且难以单独区分压力管理的作用,会对评估结果造成不可估量的误差。综上,实测方法评估压力管理降低漏失水量程度的上限误差很大,不满足工程应用需求。

为实现压力管理对于漏失水量降低程度的准确评估,一方面应提供足够多可供模型校核用的数据,另一方面应开展更为广泛的试验研究以进一步探明漏损指数的取值规律,建立供水管网漏失水流量分析模型,从而提供更可靠的模型模拟方法,有效规避不可控的实际情况对评估的干扰。

## 参考文献:

- [1] Malm A, Moberg F, Rosén L, *et al.* Cost-benefit analysis and uncertainty analysis of water loss reduction measures: case study of the gothenburg drinking water distribution system[J]. *Water Resources Management*, 2015, 29(15): 1-18.
- [2] 姜帅, 吴雪, 刘书明. 我国部分城市供水管网漏损现状分析[J]. *北京水务*, 2012(3): 14-16.  
Jiang Shuai, Wu Xue, Liu Shuming. Leak study on some urban water supply pipe networks[J]. *Beijing Water*, 2012(3): 14-16 (in Chinese).
- [3] Almandoz J, Cabrera E, Arregui F, *et al.* Leakage assessment through water distribution network simulation[J]. *J Water Resour Plan Manage*, 2005, 131(6): 458-466.
- [4] de Miranda S, Molari L, Scalet G, *et al.* Simple beam model to estimate leakage in longitudinally cracked pressurized pipes[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2011, 138(8): 1065-1074.
- [5] Diao K, Guidolin M, Fu G, *et al.* Hierarchical decomposition of water distribution systems for background leakage assessment[J]. *Procedia Engineering*, 2014, 89: 53-58.
- [6] Shafiee M E, Berglund A, Berglund E Z, *et al.* Parallel evolutionary algorithm for designing water distribution networks to minimize background leakage[J]. *J Water Resour Plan Manage*, 2016, 142(5): 7-13.
- [7] Wu Z Y, Wang R H, Walski T, *et al.* Extended global-gradient algorithm for pressure-dependent water distribution analysis[J]. *J Water Resour Plan Manage*, 2009, 135(1): 13-22.
- [8] Ferrante M. Experimental investigation of the effects of pipe material on the leak head-discharge relationship[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 138(8): 736-743.
- [9] Burnell D, Race J. Water distribution systems analysis: patterns in supply-pipe leakage[A]. *Proceedings of ASCE EWRI Conference*[C]. Minneapolis: American Society of Civil Engineers, 2000.
- [10] Wu Z Y, Farley M, Turtle D, *et al.* *Water Loss Reduction*[M]. Boston: Bentley Institute Press, 2011.
- [11] van Zyl J E, Clayton C. The effect of pressure on leakage in water distribution systems[J]. *Water Management*, 2007, 160(2): 109-114.



作者简介:郑成志(1985- ),男,山东日照人,博士,工程师,研究方向为城镇供水管网漏损模拟及控制。

E-mail: buye3000@163.com

收稿日期: 2018-02-11