

研究报告

自控阀在给水管网中布置方法的研究

张宏伟, 郭祎萍, 牛志广, 张丽

(天津大学环境科学与工程学院, 天津 300072)

[摘要] 提出了一个通过管网水力计算在管网中实现自控阀合理布置的方法。将自控阀的局部水头损失引入管网水力计算当中, 计算自控阀在每个管段不同开启度条件下对管网压力变化的影响程度, 提出管网影响度的概念。并以实例管网进行验证, 得出了自控阀在管网中合理布置的一般原则。研究证明, 该方法具有实用、简便、易于操作等特点, 非常有利于在供水企业中的应用。

[关键词] 自控阀; 给水管网; 布置; 管网影响度

[中图分类号] TU991 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)07-0071-05

1 概述

随着经济和社会的发展, 城市给水管网的规模越来越大, 管网的压力分布是否合理是供水安全与否的关键。供水压力过大, 将会加大管网的漏损、事故发生的频率和能源的浪费, 而过小的供水压力又不能满足用户的需要。所以, 要使供水压力分布合理, 就需要在保证各节点最小需要水头的前提下减小管网的过剩服务压力, 即优化富裕水头。但是, 随着配水系统复杂程度的日益提高, 达到理想压力的任务变得越来越困难。

自控阀用于给水管网压力控制是一门新兴的技术, 关于它的理论研究以及成果的应用, 目前还处在探讨和尝试阶段。但是, 随着计算机技术和遥测、遥感、遥控系统在供水行业的普遍使用, 自控阀控制流量, 实现压力均衡, 降低漏损将成为一种更为经济和先进的方法^[1~4]。

众所周知, 自控阀在管网中位置的不同, 其所发挥作用的大小、有效与否也不同; 如果位置不合理, 自控阀将无法真正发挥调节作用, 造成巨大的资金浪费。因此, 合理布置自控阀是非常必要的。L. F. R. Reis等首次对自控阀的优化布置进行了

研究^[5]。他们在自控阀数量确定的情况下, 将无阀控制下管网的最小漏水量与利用 Jowitt - Xu 模型计算出的最小漏水量之差作为目标函数^[6], 找到自控阀在管网中的合理位置。但是, 管网工况变化前后, 利用上述模型计算出的自控阀在管网中的位置也是变化的; 而在实际生产中, 自控阀和其配套的通讯设备又是不宜移动的, 这就使得上述研究的实用性不强。

笔者从水力学角度研究自控阀对管网压力分布的影响, 引入自控阀局部阻力系数, 根据管网水力学计算的结果合理确定自控阀的位置和数量, 为供水部门提供一种简单、实用的自控阀布置方法。

2 原理与方法

由于管网的节点压力与管段流量和节点流量有关, 而管段流量和节点流量也互相制衡, 所以科学地确定对节点压力变化起较大作用的管段是合理确定自控阀的位置和数量的关键。考虑到自控阀开启度与管段流量及节点压力之间的关系, 笔者直接以自控阀作为研究对象, 以管段上自控阀开启度发生改变前后管网压力的变化为依据, 来优化自控阀的布置。但是, 直接以自控阀作为研究对象, 需要在

[收稿日期] 2004-10-20; **修回日期** 2004-12-01

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目 (50278062)

[作者简介] 张宏伟 (1956-), 男, 河南洛阳市人, 天津大学教授, 博士生导师

进行水力计算之前, 确定自控阀的局部阻力系数, 从而确定水流经自控阀时产生的局部水头损失。

2.1 自控阀局部阻力系数的确定

由曼宁公式

$$h_{ij} = 102(H_i - H_j) = 10.2935901 \frac{n_{ij}^2 \cdot q_{ij}^2 \cdot L_{ij}}{D_{ij}^{5.33}} \quad (1)$$

可以得到管段流量与节点压力之间的关系为

$$q_{ij} = \frac{\alpha \cdot D_{ij}^{2.67} \cdot \operatorname{sgn}(H_i - H_j) |H_i - H_j|^{0.5}}{n_{ij} \cdot L_{ij}^{0.5}} \quad (2)$$

式中 h_{ij} —第 i, j 两节点间管段的水头损失, m; H_i, H_j —第 i, j 两节点的节点水压, MPa; n_{ij} —

管段的粗糙度, $n_{ij} = 0.012 - 0.018$; q_{ij} —管段流量, m^3/s ; L_{ij} —管段长度, m; D_{ij} —管段直径, m; α —常数, $\alpha = 3.1479$; $\operatorname{sgn}(H_i - H_j)$ —符号函数。

为方便计算, 取 $R_{ij} = \frac{\alpha \cdot D_{ij}^{2.67}}{n_{ij} \cdot L_{ij}^{0.5}}$ 可得

$$q_{ij} = R_{ij} \cdot \operatorname{sgn}(H_i - H_j) |H_i - H_j|^{0.5} \quad (3)$$

式 (2) 和式 (3) 是在 i, j 两节点间不存在自控阀或其他阻力情况下得出的, 但当 i, j 两节点间有自控阀存在时, 水流经自控阀时会产生局部水头损失。根据 Keystone Valve Hong Kong Ltd. 提供的技术资料 (表 1) 及式 (4) 和式 (5), 可计算出自控阀局部阻力系数。

表 1 自控阀流量系数 k

Table 1 The flow coefficient k of the auto-control valves

类别	阀 /mm	阀的开启度 v /度								
		10	20	30	40	50	60	70	80	90
1	200	5	73	207	389	650	1029	1517	2063	2504
2	300	10	166	440	778	1254	1981	3004	4402	5785
3	400	87	381	866	1658	2424	3896	6407	9351	11255
4	500	130	616	1385	2511	3983	6234	10390	15931	19048

$$k = 3600q_{ij} \sqrt{\frac{10S}{\Delta H}} \quad (4)$$

$$h_{ij}^l = \frac{1.0194 \cdot \Delta H}{S} \quad (5)$$

式中 k —自控阀流量系数; S —水的比重, $S = 1000 \text{ kg}/\text{m}^3$; ΔH —水流经自控阀时产生的压降, MPa; h_{ij}^l —当 i, j 两节点之间有自控阀时产生的局部水头损失, m。

由式 (4) 和式 (5) 可推导出水流经自控阀时产生的局部水头损失:

$$h_{ij}^l = \frac{3600^2 \times 1.0194 \times 10 \times q_{ij}^2}{k^2} \quad (6)$$

令

$$\zeta = \frac{3600^2 \times 10.194}{k^2} \quad (7)$$

则 ζ 为 i, j 两节点间的管段上自控阀的局部阻力系数。由此, 当 i, j 两节点之间有自控阀存在时, 管段水头损失为:

$$h_{ij} = 102(H_i - H_j) = 10.2935901 \cdot \frac{n_{ij}^2 \cdot L_{ij} \cdot q_{ij}^2}{D_{ij}^{5.33}} + \zeta \cdot q_{ij}^2 = \left(\frac{1}{R_{ij}^2} + \zeta \right) \cdot q_{ij}^2 \quad (8)$$

此时管段流量与节点压力的关系可以表示为

$$q_{ij} = R'_{ij} \operatorname{sgn}(H_i - H_j) |H_i - H_j|^{0.5} \quad (9)$$

其中 $R'_{ij} = 1 / \left(\frac{1}{R_{ij}^2} + \zeta \right)^{0.5}$

2.2 计算方法

1) 确定管网的基础数据, 如管段编号, 管段起止节点, 管长, 管径, 节点流量, 地面标高等。

2) 在第一个管段上设置自控阀, 并假设一个初始开启度, 按照 2.1 中确定的水力计算方法在该开启度下进行管网水力计算, 得出管网中各节点的压力初始值, 记为 $H^{(0)} = (H_1^{(0)}, H_2^{(0)}, \dots, H_n^{(0)})$, n 为管网中节点个数; 改变管段开启度, 再一次进行管网水力计算, 得出另一组节点压力值, 并记为 $H^{(1)} = (H_1^{(1)}, H_2^{(1)}, \dots, H_n^{(1)})$; 计算两组开启度下的各节点压力差的平方和 C ($C = \sum_{i=1}^n 102^2 \times (H_i^{(1)} - H_i^{(0)})^2$), 并命名 C 为该管段在该自控阀开启度下的“管网影响度”。

3) 从第二个管段起, 重复 2) 的过程, 计算每一个管段每一个开启度变化范围下的管网影响度

C, 直到最后一个管段, 并将 C 值按从大到小的顺序进行排序。

4) 根据 3) 的排序结果, 结合实际工程要求, 最终确定自控阀的数量和位置。

3 实例计算与结果分析

3.1 管网背景

笔者采用的实例管网为华北滨海某区 2003 年

的规划管网 (见图 1), 其供水面积约为 6.4 km², 服务人口 1.8 万人左右。该管网由两个水源 (水源一供水能力为 10 000 m³/d, 供水节点号 103; 水源二供水能力为 15 000 m³/d, 供水节点号 9, 20, 且两供水节点供水量均分)、117 个节点和 173 条主要管段 (管径 DN100~DN500) 组成; 管网中无蓄水池和水塔, 最小服务水头为 28 m。

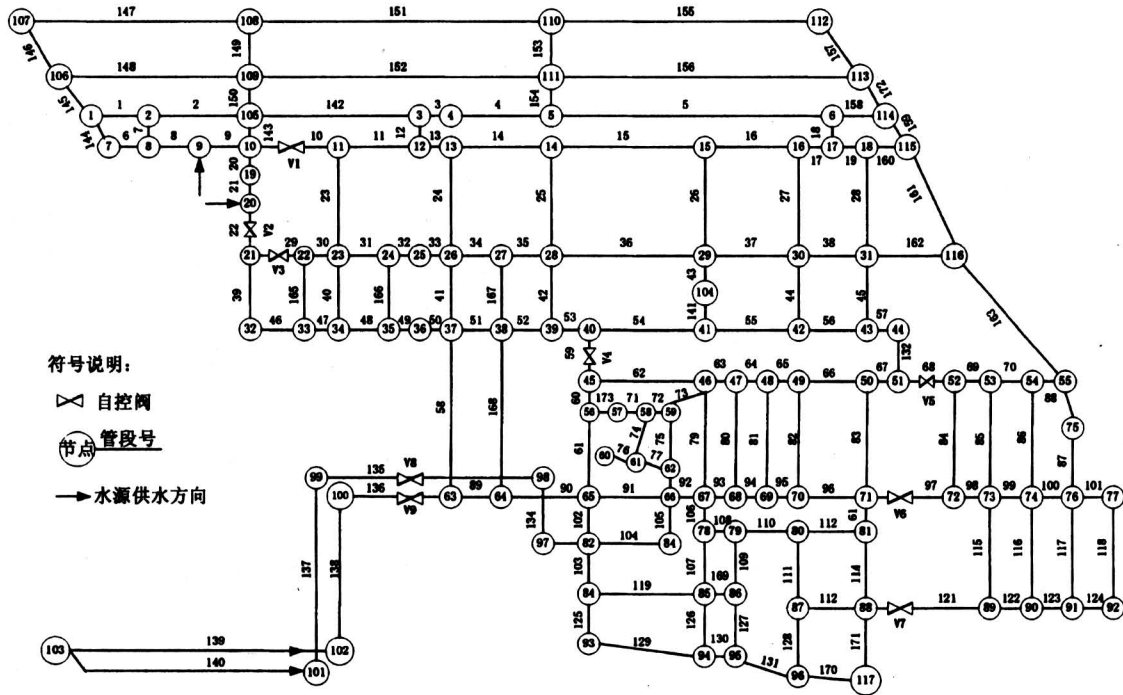


图 1 实例管网结构图

Fig.1 The constructional drawing of the example water supply network

3.2 实例计算

利用笔者提出的计算方法, 对该管网进行了实例考核。表 2 给出 8 组分析结果, 分别显示自控阀开启度在不同初始值和终止值之间变化时, 各管段按照管网影响度 C 的排序结果 (篇幅所限, 仅列出对管网压力影响较大的前 20 个管段)。表 3 显示自控阀开启度在 20°~30° 范围内变化时, 按管网影响度 C 值排序的前 10 位和后 10 位的管段。

3.3 结果分析

通过上述计算结果, 发现在供水管网中各管段及自控阀对管网压力的影响存在以下规律:

1) 主要输水干管对管网压力的影响较大, 如表 2 的每组分析中, 133—140 管段几乎都排在前面, 特别是当自控阀的开启度较小时, 这些管段上的自控阀对整个管网压力的影响就更为明显。但是

当自控阀开启度较大时, 上述管段对管网压力的影响减弱, 其他管段显示出较强的影响作用, 这主要是由于笔者所研究的管网为近期规划管网, 供水水源尚未达到最终设计能力, 部分输水管段处于未充满状态, 所以当自控阀开启度较大时, 这些管段的通水能力基本上等于正常通水能力, 自控阀没有起到调节作用。

2) 处于供水分界线处的管段, 因受不同水源流量分配的影响, 对管网压力影响较大, 如表 2 中的 58, 59 管段, 加之这两个管段的管径都为 DN300, 相对较小, 管段基本上处于充满状态。因此, 对自控阀开启度的任何一个变化, 这些管段的反应都比较灵敏, 对管网压力分布有着较大影响。

3) 管网中流量较小的管段, 当自控阀开启度发生变化时, 对流量变化不敏感, 对管网压力影响

表2 不同开启度下按C值排序的前20个管段
Table 2 The first 20 pipes in sequence of C value with different value opening

排序	开启度调整范围(初始值-终止值)/度								
	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
1	136	136	136	133	136	92	92	1	
2	138	138	138	89	92	136	133	92	
3	139	133	133	136	133	133	53	133	
4	133	134	139	134	89	89	89	53	
5	134	139	134	138	138	138	134	137	
6	135	135	89	92	134	53	1	2	
7	137	137	135	135	139	134	136	134	
8	140	140	137	139	53	139	59	90	
9	89	89	140	53	90	90	106	59	
10	58	90	90	90	135	59	132	140	
11	90	58	92	137	59	132	90	91	
12	11	103	58	140	137	106	139	135	
13	14	132	132	59	103	57	135	106	
14	20	11	103	103	132	103	138	89	
15	21	57	59	132	106	68	68	132	
16	132	59	53	57	140	135	137	139	
17	57	92	57	106	57	12	12	93	
18	10	14	11	58	58	11	140	136	
19	59	93	106	93	12	1	173	58	
20	3	106	93	11	68	3	57	173	

表3 开启度在20°~30°之间调整时部分管段C值计算结果

Table 3 Calculating results of C value of part of pipes with the opening changing from 20° to 30°

排序	管段号	C	排序	管段号	C
1	136	118	164	66	0.178E-04
2	138	79.2	165	117	0.174E-04
3	133	78.6	166	70	0.529E-05
4	134	53.0	167	165	0.268E-05
5	139	49.0	168	80	0.211E-05
6	135	29.0	169	124	0.893E-06
7	137	17.5	170	81	0.430E-06
8	140	14.7	171	75	0.258E-06
9	89	12.6	172	18	0.526E-07
10	90	3.11	173	76	0.183E-07

较小。如表3所示,76,18,75,81,124,80等管段在自控阀开启度为20°~30°时,管网影响度接近于零。这是由于76,124管段处于管网末端,流量较小;而18,75,81,80管段,虽处于管网内部,但附近用水量较小,所以分配到的流量较小。

所以,一方面,在这些管段上设置自控阀,根本起不到调节流量和控制压力的作用;另一方面,

在管网达到最终的设计能力时,如上述状况依然持续,则有必要改善管网结构,使管网能充分发挥其负荷能力。

4) 自控阀开启度越小,对管网压力的影响也越大。表4给出了在不同开启度下,136管段的管网影响度C值。可以看到,最大值约为最小值的 10^8 倍。当自控阀开启度调整值为80°~90°时,对管网压力影响最大的为管段1(见表2),其压力变化平方和也仅为 $0.458E-03$,这一方面证明了自控阀开启度越大,对管网压力影响越小,另一方面也再一次说明管网的负荷能力仍有富余,未达到最终的设计标准。

表4 136管段C值计算结果

Table 4 The calculating result of C value of pipe 136

C	开启度调整范围(初始值-终止值)/度								
	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	
3.430	118	5.90	0.366	0.07	0.861E-2	0.224E-3	0.657E-5		

3.4 布置原则与方案确定

综合以上计算结果和分析,在给水管网中布置自控阀时,可遵循以下原则:

1) 对管网进行水力分析,参考水力分析结果,进行自控阀布置。在有条件的情况下,进行自控阀不同开启度下的水力分析,计算各管段的“管网影响度”,将管段对管网压力影响程度进行排序,以此作为自控阀布置的关键依据。

2) 将自控阀布置在主要的输水干管上,可控制整个管网流量的分配,从而控制整个管网压力的分布。

3) 在多水源管网中,将自控阀布置在供水分界线处的管段上,控制不同水源之间的流量分配,从而影响这些管段的供水能力和供水方向,进而影响管网各部分之间的压力分布。

以上只是布置自控阀时可遵循的一般原则,在生产过程中,还应结合管网的实际情况,最终确定自控阀的布置方案。一方面,尽可能将自控阀布置在压力监测点、测流计的附近,以减少所增加的附属设备;另一方面,要统筹考虑管网的近、远期规划,注意在近、远期规划中某些管段对管网压力影响程度的改变。

根据以上分析及总结出的自控阀布置原则,结合实例管网的现场条件及远期规划,在自控阀数量一定的情况下,在管网上布置了9个自控阀(见图1),其布置方案如下:

1) 135, 136 管段是水源 2 的主要输水干管, 其上分别布置一个自控阀, 134, 135, 137, 139 管段在同一条供水路径上, 且沿途没有配水; 136, 138, 140 管段, 亦如此。考虑到 135, 136 管段在地理位置上相近, 且靠近管网的核心, 并可与附近的两个压力监测点共用通讯设备等附属设施, 因此在两条管段上设置自控阀。

2) 在 10, 22, 29 管段上各设置一个自控阀, 10 和 22 管段是水源 1 的主要输水干管。由于笔者所研究的管网两个主要水源都在管网的一端(管网西侧), 输水方向为东西向, 因此在 29 管段上设置一个自控阀, 与 10 和 22 管段互相配合, 共同调节水源 1 的流量分配。

3) 59 管段处于水源 1 和水源 2 的供水分界处, 故在其上设置一个自控阀。

4) 68, 97, 121 管段处于起步区管网, 该部分管网建于研究区域建设初期, 企业分布密集, 用水量较大, 这三条东西向干管起到主要输水作用, 另外, 也是考虑将自控阀在管网中的位置尽可能与压力监测点靠近。虽然, 在表 2 及表 3 中, 它们并没有显示出对管网压力较大的影响, 但随着远期规划管网用水量的增加, 这种状况将会发生变化。

4 结论

笔者从实用、简便和易操作等考虑, 从水力学角度研究了不同管段在自控阀的各个开启度范围内对管网压力的影响, 提出了“管网影响度”的概念, 并通过实例计算得出了自控阀在管网中合理布置的一般原则, 为自控阀的优化布置提供了科学依

据。该方法与其他方法不同之处在于不需要建立目标函数, 只需将自控阀局部阻力系数引入管网水力计算, 并对计算得到的管网影响度进行排序即可, 计算简单、易于掌握, 计算量小。

自控阀的布置不能完全依赖于表 2、表 3 的计算结果, 还要考虑工程的近、远期结合以及实际工程的现场条件。在有条件的情况下可以对各种数量自控阀的组合情况进行研究, 但是这无疑将增加计算的复杂程度和计算量。

总之, 从实例考核及结果分析可知, 笔者提出的方法和原则可为给水管网中自控阀的合理布置提供一种新的、有效的思路。

参考文献

- [1] Zhang Hong-wei, Yan Xiao-qiang, Zhang Li. Equilibrating Pressure with Auto-control Valve in Water Distribution [J]. Transaction of Tianjin University, 2003, 9 (4): 334~339
- [2] 田林, 张宏伟, 牛志广, 等. 应用自控阀控制给水管网漏损的研究 [J]. 中国给水排水, 2004, 20 (3): 12~15
- [3] Kalanithy Vairavamoorthy, Jeremy Lumbers. Leakage Reduction in water distribution systems: optimal valve control [J]. Hydraulic Engineering, 1998, 124 (11): 1146~1154
- [4] Germanopoulos G, Jowitt P W. Leakage reduction by excessive pressure minimization in a water supply network [J]. Proc Institution Civ Engrs, Part 2, 1989, 87 (6): 195~214
- [5] Reis L F R, Porto R M, Chaudhry F H. Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks by Genetic Algorithm [J]. Water Resource Planning & Management, 1997, 123 (6): 317~326
- [6] Jowitt P W, Chengchao Xu. Optimal valve control in water distribution networks [J]. Water Resource Planning & Management, 1990, 116 (4): 455~472

Study on Distribution Method of Auto-control Valves in Water Supply Network

Zhang Hongwei, Guo Yiping, Niu Zhiguang, Zhang Li

(School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

[Abstract] This paper presented a new approach to realize the optimal distribution of auto-control valves in water supply network by hydraulic calculation. Firstly, the local headloss of the auto-control valve was introduced to the pipe network's hydraulic calculation. Then, the valve was supposed to be set on each pipe with different opening degree, following which the influencing degree on network was calculated under each situation. Last, this approach was tried on an example water supply network, and a general principle for the optimal distribution of auto-control valve was obtained. Through application it could be found that this approach was practical, easy to operate and suitable for application to water corporations.

[Key words] auto-control valve; water supply network; distribution; influencing degree on network