



自来水管网的可靠性分析与优化设计

韦波, 张贺

(天津科技大学机械学院, 天津 300222)

摘要: 以某科技园区自来水管网为例, 分析研究了城市供水管网的可靠性和优化设计, 提出了供水管网可靠性优化设计的数学模型. 在确保供水管网系统可靠性的基础上建立优化模型, 寻求最经济管径, 从而建立最经济、最可靠的供水管网系统. 对现有供水管网系统进行了优化, 给出了优化设计方案.

关键词: 供水管网; 可靠性; 经济性; 优化模型

中图分类号: TU991.33

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2009)02-0042-05

Analysis and Optimal Design of Urban Water Supply Pipe Network

WEI Bo, ZHANG He

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300222, China)

Abstract: By means of taking S & T garden as an example, the reliability of urban water supply network system was analyzed, and the optimal design process was researched. Beyond the water supply pipe network system in the reliable foundation, an optimal model was established to seek the most economical caliber. The design optimization of current water supply network was done, and the optimal result was given.

Keywords: water supply pipe network; reliability; efficiency; optimal model

供水管网是城市的基础设施之一, 建立健全一套完整有效的供水管网系统, 是保证城市供水的必要措施和基本条件^[1]. 在管网优化设计中引入可靠性的概念, 可以在投资和收益之间作适当的协调, 保证供水管网系统的效益.

供水管网系统的可靠性是指在一定时间内, 在一定的运行条件下给水系统完成预定功能的性质. 所谓预定功能, 是指在正常工作条件下, 保证用户所需的水量和水压; 在事故情况下, 水量和水压不低于规定的限度, 而在时间上不超过允许减少水量和降低水压的时间. 供水系统的功能是保证用水对象获得所需的水量、水压和水质. 如果用水过程中发生恶化, 使这三个指标中任意一个下降到允许的限度以下, 说明供水系统发生了故障^[2].

本文以某科技园区自来水管网为例, 分析研究了城市供水管网的可靠性和优化设计, 通过建立供水管

网可靠性优化设计数学模型得出了优化方案.

1 自来水管网优化方法

自来水管网的优化包括对现有管网进行可靠性分析、在满足可靠性要求的条件下进行结构优化、在结构优化的基础上求最经济管径以使费用最少. 过程如图 1 所示.

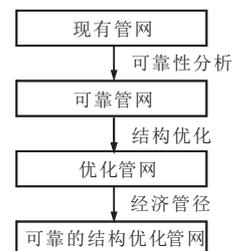


图 1 自来水管网优化流程

Fig.1 Optimization process of water supply

收稿日期: 2008-07-06; 修回日期: 2008-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675208); 天津科技大学自然科学基金资助项目(20050220)

作者简介: 韦波(1975—), 男, 四川人, 讲师.

1.1 可靠性分析

故障强度 λ 也叫失效率^[3],表示单位时间、单位长度管线发生故障的次数,单位 $a^{-1}\cdot km^{-1}$.从事故记录可知,管网发生故障的概率很小,发生故障次数的规律接近于泊松分布,而 λ 即为泊松分布的参数.

t 时间内管线发生故障的概率为

$$P(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

正常工作概率,或称可靠度为

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

自来水管网包括串联结构和并联结构.对于串联系统,系统中单个元件的可靠度为 R_1, R_2, \dots, R_n 时,系统可靠度为

$$R_c = R_1 \cdot R_2 \cdots R_n = \prod_{i=1}^n R_i$$

对于并联系统,可靠度为

$$R_b = 1 - [(1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \cdots (1 - R_n)] = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

目前,供水管网采用的管道主要有灰口铸铁管、球墨铸铁管和水泥管等.表1为常用球墨铸铁管材的故障强度^[4].

表1 球墨铸铁管材的故障强度

Tab.1 Failure intensity of common ductile iron pipes

管径/mm	$\lambda / (a^{-1}\cdot km^{-1})$
200	0.036
250	0.03
300	0.025
350	0.022
400	0.017 5
500	0.012 3
600	0.009
1 000	0.002
1 200	0.001

1.2 结构优化

自来水管网通常是环状与树状混合的结构.树状网网的建造费用最为节省,但从结构上来说缺乏可靠性,它的可靠度完全取决于不发生故障的概率;环状网是管网的主要结构,任一节点都至少要有两条供水路线(当然,两条管线同时损坏的几率很小),理论上几乎可以达到理想的用水保证率,具有高度可靠性.

结构优化就是要进行结构调整,使得管网能够保证任何一点都有两条以上供水线路,并考虑现有条件的限制设计管道走向,比如街道走向、地质条件等.

1.3 管径优化

1.3.1 建立模型

在结构优化基础上,在保证可靠性的前提下,进一步建立管网可靠性优化模型^[5-6],这里采用线性规

划算法,目标为费用函数 $f(D, H, L)$ 最小.

约束条件:

- (1)连续性方程和能量方程约束 $g(H, D) = 0$;
- (2)水压约束 $H_{\min} \leq H \leq H_{\max}$;
- (3)可靠性约束 $R \geq R_{\min}$;
- (4)管径约束 $D \geq 0$.

其中: D 为管径; H 为管线水压; L 为管长; R 为管线可靠性; H_{\min} 和 H_{\max} 为管线水压下限和上限; R_{\min} 为可靠性下限.

为降低管网系统的费用,需减小管径,设第 i 条管线的初始管径 D_{i0} 减小 ΔD_i ,对公式进行一级泰勒级数展开,于是优化问题成为

$$\Delta C_{\max} = \sum_{i=1}^p \frac{\Delta C_i}{\Delta D_i} \Big|_{D_i} \cdot \Delta D_i$$

式中 ΔC_i 为管线 i 的管径变化导致的费用变化量.

约束条件:

$$\sum_{i=1}^p \frac{\partial H_i}{\partial D_i} \Big|_{D_i} \cdot \Delta D_i \leq H_{i0} - H_i \quad i=1, 2, \dots, p$$

$$\sum_{i=1}^p \frac{\partial R_i}{\partial D_i} \Big|_{D_i} \cdot \Delta D_i \leq R_{i0} - R_i \quad i=1, 2, \dots, p$$

$$\Delta D_i \leq \Delta D_i^* \quad i=1, 2, \dots, p$$

1.3.2 模型求解

水头损失是指因沿线的用水造成管道内局部的水压减小,水就会自动由高压向低压部分流动,在水流过管道时,由于要克服管道摩擦做功,而造成水的能量减少,减少的能量即水头损失.管线的水头损失 h 计算公式为

$$h = I \times L$$

目前使用较多的水头损失公式有应用于旧铸铁管和旧钢管的舍维列夫(Ф.А.Щевелев)公式和考虑管壁粗糙系数的巴甫洛夫斯基(Н.Н.Павловский)公式等,本文选用舍维列夫公式^[7].

当 $v \geq 1.2$ m/s 时有

$$I = \frac{0.001 36}{D^{5.3}} Q^2$$

当 $v < 1.2$ m/s 时有

$$I = \frac{0.001 48}{D^{5.3}} \left[1 + \frac{0.688 D^2}{Q} \right]^{0.3} Q^2$$

实地测得第一条管线的的水压,根据水头损失公式依次可以求得各段管线的的水压.在确定了现有管网的可靠度和水压之后,可利用供水管网优化模型进行计算,第 i 条管线的费用目标函数为

$$C_{i\min} = C_{i0} - \frac{dC_i}{dD_i} \Big|_{D_i} \cdot \Delta D_i =$$

$$A \cdot \pi D_{i0} \cdot L - A \cdot \pi (D_{i0} - D_i) \cdot L = A \cdot \pi D_i \cdot L$$

约束条件参考文献[6],定义管道直径和故障强度的关系式为 $\lambda = e^{-(K_1+K_2 \cdot D)}$, 式中系数 $K_1=2.619, K_2=3.5665$. 求解目标函数就得到了最经济的管径,从而得到最优管网.

2 现有管网的可靠性分析与计算

科技园区的自来水管网由自来水厂至科技园的输水管网和科技园内的输水管网两部分组成,应分别计算这两个组分的可靠性. 自来水厂至科技园的输水管网如图2所示,其可靠性框图如图3所示.

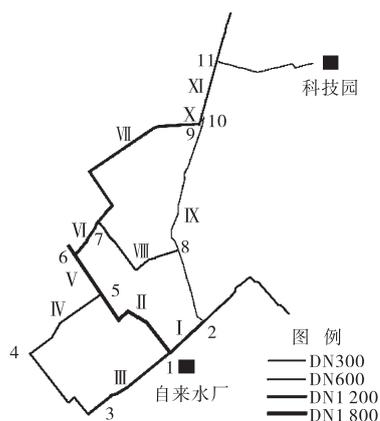


图2 科技园区外输水管网简图

Fig.2 Sketch of water input pipe network outside S&T garden

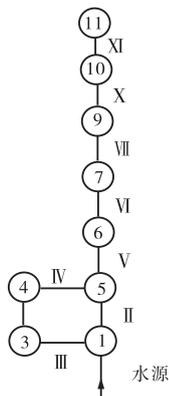


图3 科技园区外输水管网可靠性框图

Fig.3 Reliability block diagram of water input pipe network outside S&T garden

输水管网的可靠度为

$$R = \{1 - [(1 - R_{III}) \cdot R_{IV}] (1 - R_{II})\} \cdot R_V \cdot R_{VI} \cdots R_{XI} = \{1 - [(1 - 0.9586 \times 0.8393)(1 - 0.9960)]\} \times 0.9981 \times \cdots \times 0.8963 = 0.8383$$

图4为科技园区内输水管网的可靠性框图. 园区内输水管网是环状和树状混合的结构. 对环状网的可靠

性计算可采取枚举法. 但是由于并联计算出的可靠度必然比只考虑管线本身因素的可靠度高,而且对供水管网可靠性分析主要是找出可靠度低的组分,因此环状网内管线的可靠度计算可以只考虑管线本身的长度、使用时间,而不考虑其结构特性,且误差不影响分析结果. 对于树型结构的管线,按串联结构进行计算. 以环状结构管线1为例,其可靠度为

$$R_1 = e^{-\lambda t} = e^{-0.0175 \times 0.04 \times 10} = 0.993$$

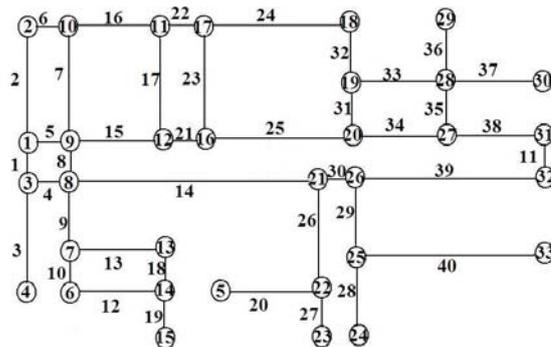


图4 科技园区内输水管网可靠性框图

Fig.4 Reliability block diagram of water input pipe network inside S&T garden

同理可以计算出科技园区内各段输水管线的可靠度. 通过计算可以看出(部分数据如表2所示):园区内的环状输水管网具有较高的可靠度,只是部分树状结构的输水管网,例如管线19、20和40等,其可靠度低于输水管网的可靠度约束值,主要是由于其管网类型造成的,可以通过结构优化加以解决.

表2 部分输水管线的可靠度

Tab.2 Reliability of partial water input net

参数	管线号		
	1	2	3
管径/m	0.40	0.40	0.40
长度/m	40.00	929.38	513.15
故障率/(a ⁻¹ ·km ⁻¹)	0.0175	0.0175	0.0175
可靠度	0.993	0.850	0.914
可靠度约束值	0.90	0.85	0.90

3 管网的优化设计

对于园区外输水管网,可以采用两种方案优化:一是通过增加平行铺设管线来提高输水管网系统的可靠性;另一种方案是按照高速公路模式,在园区双管主干线的西侧增设一套输水管系统,使园区东西两侧实现“双水源”输水管网. 方案一施工难度大;且施工影响周边地区生活、生产供水,经济损失大. 方案二

降低了施工难度,但铺设管线长度较长,成本较高。

运用加权因素法对两个优化方案进行评价,结果方案二较好。本文不对过程详细叙述,重点介绍园区内输水管网的优化。

3.1 结构优化

对于这种水量不允许大幅度变化的工业园区,不宜存在树状网,应将其转化为环状网。对树状网增加一些最小管径的管线,将各末端节点连接起来,就形成环状网。从经济上来说,从树状网转化为环状网时所增加的管线越少越好。

节点上连接的管线数为一的节点称为一度节点,如图4中,节点4、5、15、23、24、29、30和33都是一度

节点。一般来说,树状网转化环状网所需增加的管线数等于一度节点数 k 的一半(若 k 为偶数,需加上 $k/2$ 条管线;若 k 为奇数,则需加上 $(k-1)/2$ 条管线)。该科技园区内管网的一度节点数为 8,即需要增设 4 条管线,使树状网转化为图 5(a)环状网。图中虚线表示所增设的 4 条管线。

为使一度节点连接成环,形成环状网的外围大环,根据以往管网转化的经验,需要增加与一度节点数相同的管线^[8]。而且由于输水管网是铺设在街道下,管网的形状多取决于街道的布置,因此要适当调节管线布局。所以,进一步对园区管网进行优化,优化后的管网如图 5(b)所示。

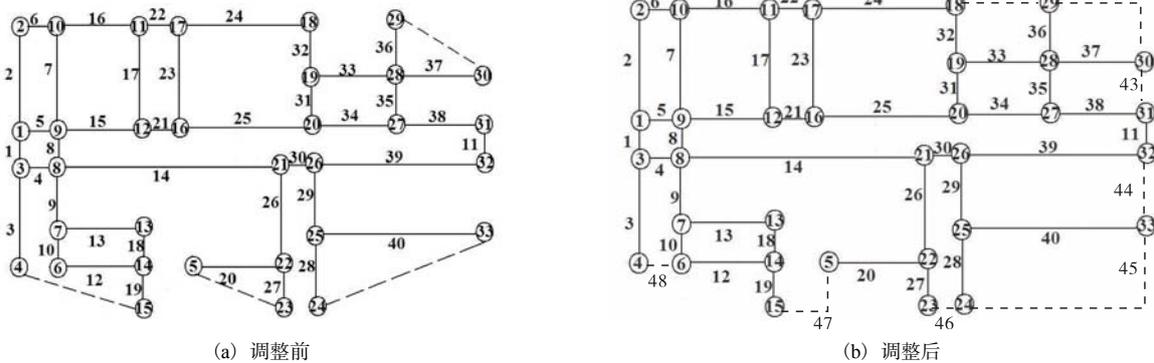


图5 园区内管网优化图
Fig.5 Optimized diagram of water supply pipe network inside S&T garden

3.2 管径优化

为降低管网系统的费用,在保证各段管线可靠性的基础上,还要寻求最经济管径,从而降低成本,提高输水管网的经济性。在图 5(b)基础上根据 1.2 方法对管网进一步优化,求最经济管径。以管线 3 为例,费用目标函数为

$$C_{3min} = C_{30} - \frac{dC_3}{dD_3} \Big|_{D_3} \cdot \Delta D_3 =$$

$$A \cdot \pi D_{30} \cdot L - A \cdot \pi (D_{30} - D_3) \cdot L = A \cdot \pi D_3 \cdot L$$

约束条件: $\lambda = e^{-(2.619+3.566 \cdot D)}$

用 Maple 数学软件求解^[9],得: $D_3 \leq -0.658$ 或者 $D_3 \geq 0.375$, $D_3 \leq 0.400$ 或者 $D_3 \geq 1.653$ 。采用就近圆整,取 $D_3 = 0.40$ m。

同理求得其余管线的经济管径,得到管网优化结果(部分数据如表 3 所示)。

结合管材综合价格指标(如表 4 所示),可以计算出管网优化前后的费用系数。设现有输水管网的费用系数为 1,则优化后的费用系数为 0.751。可见,采用本文的优化方案可以在保证供水安全的条件下大大节省费用,效果明显。

表3 管网优化结果(部分数据)
Tab.3 Optimized reliability (partial)

管线号	初始管径/m	优化管径/m	约束值		初始值		优化值	
			水压/MPa	可靠性	水压/MPa	可靠性	水压/MPa	可靠性
1	0.40	0.25	3.111	0.90	3.444	0.993	3.444	0.988
2	0.40	0.40	3.111	0.85	3.430	0.850	3.430	0.850
3	0.40	0.40	3.111	0.90	3.443	0.914	3.443	0.914

表4 管材综合价格指标
Tab.4 Composite price of pipe

管径/m	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.50
价格/(元·m ⁻¹)	208.57	271.33	343.63	424.97	508.33	701.50

3 结 语

通过对自来水管网水力计算、管网优化设计和可靠性设计的研究,提出了输水管网可靠性优化设计的数学模型,并在对某科技园区内的输水管网改造设计中应用可靠性优化设计模型,提出了输水系统改造的优选方案,在改善供水管网的可靠性的基础上,兼顾了经济效益,降低了成本。

参考文献:

- [1] 张启海. 城市给水工程[M]. 中国水利水电出版社, 2003:1-8.
- [2] H 阿布拉莫夫. 给水系统可靠性[M]. 董辅祥,译. 北京:中国建筑工业出版社,1990:8-15.

- [3] 金碧辉. 系统可靠性工程[M]. 北京:国防工业出版社,2004:15-25.
- [4] 赵新华,陈春芳,郑毅. 给水管网可靠度的计算[J]. 中国给水排水,2007,16(1):57-60.
- [5] 张宏伟. 供水管道漏损预测模型研究[J]. 中国给水排水,2001,17(6):7-9.
- [6] Su Y C. Reliability-based optimization model for water distribution systems[J]. Hydraulic engineering, 1987(12):1539-1556.
- [7] 蒋白懿,李亚峰. 给水排水管道设计计算与安装[M]. 北京:化学工业出版社,2005:230-240.
- [8] Deo N, Pang Can. Shortest path algorithms: taxonomy and annotation [J]. networks, 1984, 14(2):275-323.
- [9] 许仕荣,邱振华. 给水管网的计算理论与电算应用[M]. 长沙:湖南大学出版社,1997:114-128.

(上接第34页)

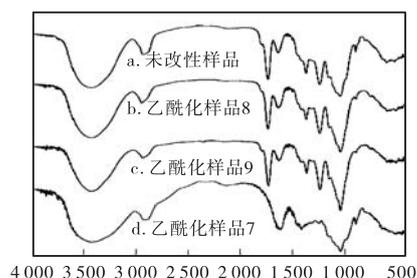


图2 未改性半纤维素和乙酰化产物的红外光谱图

Fig.2 Infrared spectrum of natural hemicellulose and acetylated hemicellulose

3 结 论

(1) 在均相乙酸酐/DMF/LiCl 体系中,以吡啶为催化剂对杜仲半纤维素的羟基进行乙酰化反应,是一种有效的化学改性方法,可以得到含有酯基的聚合物. 通过实验可以得到产物取代度在 0.51 ~ 1.17 之间的乙酰化半纤维素.

(2) 吡啶用量从 0.5%增加到 1.0%,反应温度从 35 °C 提高到 80 °C,反应时间从 2.0 h 提高到 4.0 h,乙酰化半纤维素的取代度 DS 有明显提高.

参考文献:

- [1] 杨淑蕙. 植物纤维化学[M]. 3版. 北京:中国轻工业出

版社,2001:7-9.

- [2] Sun R C, Sun X F, Tomkinson J. Hemicelluloses and their derivatives [C]//Paul G, Maija T. ACS Symposium Series 864. Hemicelluloses: Science and Technology. Washington D C: American Chemical Society, 2004.
- [3] Glaudemans C P J, Timell T E. The Polysaccharides of White Birch (*Betula papyrifera*). IV. The Constitution of the Hemicellulose [J]. Journal of the American Chemical Society, 1958, 80(5):1209-1213.
- [4] Ebringerová A, Heinze T. Xylan and xylan derivatives-biopolymers with valuable properties, 1. Naturally occurring xylans structures, isolation procedures and properties [J]. Macromolecular Rapid Communications, 2000, 21(9):542-556.
- [5] Sun R C, Fang J M, Tomkinson J, et al. Acetylation of wheat straw hemicelluloses in *N,N*-dimethylacetamide/LiCl solvent system [J]. Industrial Crops and Products, 1999, 10(3):209-218.
- [6] Xu F, Sun R C, Sun X F, et al. Analysis and characterization of acetylated sugarcane bagasse hemicelluloses [J]. International Journal of Polymer Analysis and Characterization, 2004, 9(4):1-16.
- [7] 石淑兰,何福望. 制浆造纸分析与检测[M]. 北京:中国轻工业出版社,2003:33-39.