

文章编号: 1007-4929(2006)04-0037-04

关于给水管网可靠性分析方法的综述

吴小刚¹, 张士乔²

(1. 浙江大学华家池校区生工食品学院, 浙江 杭州 310029; 2. 浙江大学玉泉校区建工学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 由于给水管网本身比较复杂, 而且受多种因素影响, 给水管网可靠性分析方法发展较缓慢, 目前还没有一种方法得到普遍的认可, 并应用于实际工程设计中。从方法总体分类、考虑管网输水能力及考虑阀门配置等方面对已有的各种方法进行了归纳、总结, 可供可靠性分析及设计、维修等参考。

关键词: 给水管网; 可靠性分析; 阀门

中图分类号: TU991.33 **文献标识码:** A

Review on Reliability Analysis Methods for Water Distribution System

WU Xiao-gang¹, ZHANG Tu-qiao²

(1. College of Biosystem Engineering and Food Science, Zhejiang University, Huajiachi Campus, Hangzhou 310029;

2. Department of Civil Engineering, Zhejiang University, Yuquan Campus, Hangzhou, 310027)

Abstract: Because of the complexity of water distribution system and influence of many factors, the reliability analysis methods for water distribution system developed slowly. At present, there is no one commonly accepted method that has been adopted in the practical design. From the aspects of general classification, considering system capacity and valve configuration, various existing methods were reviewed in this paper, which had some reference value for design and repair of water distribution system.

Key words: water distribution system; reliability analysis; valve

0 引言

给水管网是给水系统的重要组成部分, 作为一复杂系统, 它会出现两类故障: 机械故障和水力故障。机械故障指系统本身的部件故障, 如泵、管段等损坏; 水力故障指实际需求超过设计值而引起的功能下降。由于给水管网远较给水系统中其他部分复杂, 并且受多方面因素影响: ①部件的相互影响, 如蓄水池、泵等; ②单个部件可靠性; ③需求空间, 时间差异等。因此该可靠性分析一直进展缓慢。

已有的给水管网可靠性研究多建立在部件机械故障基础之上, 即认为: 机械可靠度指部件在规定时间内不发生故障的概率, 但是结合给水管网水力功能的考虑却较少, 为此, 应结合其功能, 定义其水力可靠性即功能可靠性为: 系统在一定的条件下能以可接受的水平提供服务的能力。

目前, 在给水管网系统设计中, 可靠性的考虑一般限于

采用定性的原则表示, 对其具体的可靠性定义及如何定量的评价、量测等仍没有统一的概念, 一般可采用概率方法, 通过引入概率来说明某一偶然性事件对系统供水情况的影响, 分析中, 根据选择的评价标准不同, 可以采用不同的指标, 以反映中断供水或供水不足的程度、持续时间、发生频率、用户受影响的程度等, 所采用的方法主要是在 Wagner 和 Shamir 等于 1988 年提出的解析法和模拟法的基础上不断深化发展起来的。

1 解析法

本方法是由 Wagner 和 Shamir 等于 1988 年提出的。根据整个给水系统的组成部分的划分的详细程度将其可靠性分析方法分为 3 类: ①供应、需求都归并到一起; ②需求归并在一起, 分析供应和传输过程; ③供应、需求都详细考虑, 即网络的形式表示给水管网系统。第 1 类把系统视为相连的单

收稿日期: 2005-11-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50278088)。

作者简介: 吴小刚 (1977-), 男, 博士后, 主要从事给排水管网可靠度计算、管道动力工程等方面的研究。

一供水与单一需求区,计算需求超过供水能力的时间比或单位时间内供水不足期望次数。第2类,系统中可以包含更多的部件,利用故障树等分析方法,确定系统中各部件故障对系统可靠性的影响,这两类比较简单,若进行更为详细的研究,需要建立网络模型。在通讯、控制等领域中,网络可靠性研究发展较快,但是这些网络大部分都只涉及到两特定节点间连续路径存在的问题,计算网络所有节点连接的概率,或节点群连接的概率(Bao, 1980年)。对给水管网来说,与水源的连接是保证节点正常作用的必要非充分条件,例如,尽管在水源与节点之间存在一条完全可作用的路径,若系统压力不足,则需求节点也可能得不到所需的流量。

为此,采用3种指标表示给水管网可靠性:①连通度:特定节点的连通度指该节点与至少一个水源相连接;②连接度:给水管网中每一节点与至少一个水源连接。③需求节点处满足正常供应的概率。连接性和连通性可以作为最初的系统审查,以确定是否存在由于冗余不足引起的系统可靠性方面的严重问题,之后再分析连接节点是否满足需求。对较简单的系统,前两种指标可通过简单的串并联运算规律将系统简化为单连接段的系统进行计算;对较复杂的系统,可参照可靠性工程中的计算方法计算。

对第3种概率指标,首先要知道系统所有节点处需求(假设设计荷载已知),然后进行计算。一般假定节点是可靠的,每一连接的正常运行概率是 p_i ,故障概率是 q_i ,单部件故障且相互独立。在一段时间内,连接段可能破坏,也可能正常工作,因此导致在任何给定节点处,流量和压力可能不同,要得到这些量的概率分布是很困难的,情况很复杂,为避免烦琐的计算,仍能反映每一管段的流量限制,计算管段的水力梯度为0.01时的流量,每一连接段的最大流量采用汉森—威廉式计算:

$$v = 0.55 c D^{0.63} s^{0.54}$$

在此基础上结合管段故障,考虑系统中各节点在各种可能情况下的满足需求的概率,计算步骤如下。

(1)找到一组流量,作为每一节点处的需求,且不超过任意连接段运输能力。

(2)连续撤掉某连接段,在简化的网络里,搜索一套流量,该流量满足节点需求,而不超过任意连接段运输能力,所得构造即为可行构造。

(3)累加可行构造的概率。

(4)重复(2)、(3)步骤,直到所有的可能的可行构造都考虑进去为止。

但是这种方法主要考虑系统本身的结构可靠性,而没有考虑系统具体的运行状态,对管段的运输能力的定义也不明确,实际中网络中并不真正具有最大流通能力,因为,只要管段能承受,泵功率的增大将迫使更多的水通过管段,因此该种考虑方法只能用于计算中、小型网络,较费时间,系统的部件故障不能完全在本方法中体现出来,并且严格的假设条件限制了其在实际系统中的应用,比如有限容量的水箱,系统部件故障对系统的影响(系统对部件故障的反映),很难考虑进去,一般需要与模拟法联合使用。

2 模拟法

该方法亦是由Wagner和Shamir等于1988年提出,系统中管线和设备(如水源、泵站、蓄水池、阀门及其他控制设备)以网络模型代表,模型的准确、详细水平应与分析的问题相一致。如:要研究连接性、阀门的配置(从可靠度角度出发),有必要包括小尺寸的管子;另一方面,要研究整个供水区的供水可靠度,模型只能包含一些设备和主要的传输系统即可。水源、管段破裂、泵损坏和电力故障等都可能引起供水不足,本文重点考虑管段、泵的破坏,并且考虑蓄水池的影响。

模拟分析过程由2部分组成:①根据特定的概率分布,生成故障和修理事件。管段或泵的故障、修理时间等的概率分布可以利用一些已有的数据进行模拟,因此,比较灵活,或者若没有可用的数据,可根据其他方面的经验采用比较合理的概率分布;②水力网络解的选择,通过这一步,给出特定需求下,完全或部分故障网络中的流量及每一节点处的水压。

用此方法求解水力网络,所需要的数据包括:①网络信息,包括网络形状,管段长度、直径和粗糙系数等,泵曲线,蓄水池尺寸及蓄水情况,阀门分布及工作情况;②需求与边界条件;③故障及修复概率,每一部件的故障、修理时间的概率分布函数及相应参数;④总模拟分析时间等。

无故障部件的网络的流量、水压可用SDP8程序计算,根据特定的故障时间分布,随机产生管段、泵的故障事件,当管段故障时,将它从系统中移开,再通过解SDP8简化网络,求得节点处的新水头,并假定故障不改变节点处的需求量,以需求点处的新水头来说明系统运行情况,从而计算可靠性指标。

对每一节点水头有两条限制:①要求水头;②服务水头,并指出:①低于服务水头的节点处将断水;②高于要求水头的节点满足需求;③大于服务水头而低于要求水头的则处于容许工作状态。因为流量正比于水头平方根,因此,本文假设供水从正常到中断的供应量与计算水头的平方根有关,此时,节点可用流量可用下式计算:

$$Q = \left(\frac{H - H_s}{H_m - H_s} \right)^{1/2} c$$

式中:Q为节点可用流量;H为计算水头; H_s 为服务水头; H_m 为要求水头; $H_s < H < H_m$;c为节点需求。

因此,每一节点都可能具有3种状态:正常,降低,中断,当管段发生故障和进行修理时,系统假设以相应供水水平运行,直至修理时间为止,模拟程序将记录每一节点降低服务和中断的总持续时间,每一节点处缺水数量等值。

本文假设管段故障为独立事件,并选择指数分布作为管段破坏分布函数,但已有的统计数据表明,该值浮动较大。用模拟法可以计算系统的许多可靠度指标,由于这些指标是建立在有限随机事件的基础上,故计算值只能是约值,这些指标包括:年缺水量、危机模式时间比、故障模式时间比等,在每一单独的时段中,缺水量及每一节点的缺水时间都可计算,可用以下经典统计方法计算可靠度。

设n个时段时间为 (c_1, c_2, \dots, c_n) ,n次缺水指标 (s_1, s_2, \dots, s_n) 可得1年平均缺水量:

$$s = \sum_{i=1}^n s_i / \sum_{i=1}^n c_i \quad (c_i \text{ 以小时计})$$

同解析法相比,模拟法可以计算大量的可靠度指标,只要对程序稍加修改,就可计算如:任意节点处最长故障时间,导致最大缺水量的时间段及故障原因等,所以比较灵活;可以对复杂系统进行复杂的相互作用模拟、分析,该方法可以包括对系统供水功能下降的反映,蓄水池的影响,单个管段的可靠性分析等,这些在解析法中无法体现;可以对系统的水力行为状况进行详细的模拟分析,而大部分解析法要求简化网络形式,因此模拟法可以采用一种可接受的网络简化水平,而不致导致对系统简化的严重偏离。然而,模拟法的困难在于建立模型和每一次分析计算都比较费力,模拟运行也难以优化,而且通用性不好,所以一般应采用解析法和模拟法联合使用,首先用解析法粗略检查网络的可靠性,并找到系统最薄弱的部位或容易出现故障的地方,提出增加部件或者其他补救措施时,用模拟法去详细计算网络运行情况,并指出最佳选择,再用解析法检查。

Bao and Mays 在此基础上建立了一种模拟模型,由 3 个部分组成,随机数产生器、水力网络模拟和可靠性计算。定义可靠度为系统给定节点处满足充分供应、充足压力的概率。即当需求点达不到充足流量或压力时,称系统故障。定义节点可靠度为给定节点达到充足流量、足够压力的概率,从而使给水管网水力可靠性定量化。

- (1) 发展一种建立在蒙特-卡洛模拟基础上的方法,以评价与水力故障有关的节点或系统可靠性。
- (2) 结合需求、压力水头、粗糙等这些不确定因素。
- (3) 考察管粗糙系数这种不确定性对节点/系统可靠性影响。
- (4) 考察水需求、水头、粗糙的不同概率分布情况下,可靠度灵敏性。

考虑水力不确定性时,一般把需求、水头、管粗糙系数视为随机变量,假设需求 Q_d , 粗糙系数 C 的随机性遵循某种概率分布,就可用随机发生器产生每一段的 C 和每一节点的 Q_d , 对于每套值 Q_d 和 C , 水力网络模拟器用来计算需求节点处的水头, 给定节点处要求的水头 H_d 可视为常数, 有上下界, 也可以作为随机变量, 但是, 由于给水管网系统可靠性数据一般很少, 所以在产生 Q_d, H_d 和 C 时很难选择其概率分布, 而且其分布参数也很难估计, 这些可以由工程技术人员指定为已知或由模拟块产生的随机变量, 然后计算相应的节点和系统水力可靠性。

节点可靠性一般定义为: 给定节点满足要求的水头、充足流量的概率, 然而数学上很难得到和计算这种概率, 例如: 某节点处流量和水头并非无关的, 一般即采用假定需求满足, 计算水头满足的条件概率。本文采用的水力计算模型 KYPPIPE 总假定满足需求, 但不一定满足水头, 因此该方法也假设水需求满足: $Q_s = Q_d$, 所以节点可靠度可定义为给定节点处提供的水头 H_s 大于或等于最小要求水头 H_d' 的概率。

$$R_n = P(H_s > H_d'(Q_s = Q_d)) = \int_0^\infty f_s(H_s) \left[\int_0^{H_s} f_{d'}(H_d') \right] dH_s$$

式中: $f_s(H_s)$ 为供应水头的概率密度函数。

若使用最低限度压力水头 H_d' 作为下边界, 则节点可靠度

如下:

$$R_n = P(H_s > H_d') = \int_{H_d'}^\infty f_s(H_s) dH_s \quad (\text{只有下边界})$$

$$\text{若上下边界都存在: } R_n = P(H_d'' \geq H_s \geq H_d') = \int_{H_d'}^{H_d''} f_s(H_s) dH_s$$

节点可靠度提供了一种给水管网可靠性量测方法, 为使用一种单一的可靠性指标如系统可靠性指标, 来代表节点可靠性的综合效果, 作者提出系统可靠性的假设定义:

(1) 节点可靠度最小值 R_{sn} : 系统中节点可靠度的最小值。

$$R_{sn} = \min(R_{ni}), i = 1, 2, \dots, I \quad (\text{需求节点数})$$

(2) 节点可靠度算术平均值:

$$R_{sa} = \frac{\sum_{i=1}^I R_{ni}}{I}$$

(3) 节点可靠度加权平均值:

$$R_{sw} = \frac{\sum_{i=1}^I R_{ni} \bar{Q}_{si}}{\sum_{i=1}^I \bar{Q}_{si}}$$

式中: \bar{Q}_{si} 为节点 i 处平均供水量。

综上所述, 计算可遵循如下步骤: ① 指定 Q_d, H_d', H_d'' 和 (或) c 的概率分布; ② 产生随机数; ③ 计算节点 H_s (假定需求满足); ④ 计算 R_n, R_s 。

本模型属模拟分析方法, 可考虑多种可靠性指标, 并利用该模型可分析可靠性分析中的因素的影响, 考虑其水力功能。但是同样存在数据不足, 概率分布确定的随机性较大等缺点。

3 考虑管网输水能力的可靠性分析

给水管网中取水点与水源点的连接是需求点满足要求的必要而非充分条件, 因为有些路径由于结构上的原因, 其运输能力可能满足需求, 而有些可能部分满足, 因此, 有必要考虑路径输水能力。

Wagner(1988 年)指出: 可以用以下几种指标评价系统的可靠性: ① 流通性; ② 连接性; ③ 节点满足特定需求的概率。可靠性的评价是为了应用于实际工程中, 指导供水公司的维护、运营。为此, Quimpo and Shamir 使用“节点对”可靠度指标, 并定义其为: 特定节点(水源点)与另外一特定节点(需求点)相连的概率, 这同 Wagner 等对连接性的定义类似, 用状态列举法, 或网络简化法, 路集法, 割集法, 故障树等方法计算每一节点的节点对可靠度, 以形成“可靠度指标面”, 由该面上较低的点可确定可靠性较差的区域, 该区域内的系统部件确定为防护和维修等时优先考虑的部分。

为计算水源点 u 与需求点 v 之间的节点对可靠度, 必须考虑 $u-v$ 间的所有路径, 每一路径包含一条弧段链, 假定每一弧段可靠度为 p_i , 对简单网络, 节点对可靠度可通过简化, 用单一等可靠度的弧段代替某区域, m 段串联的弧段, 可以用可靠度为 p_s 的弧段代替:

$$p_s = \prod_{i=1}^m p_i$$

同样, n 个并联的弧段, 可以简化如下:

$$p_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - p_i)$$

非串联、并联网路不易简化, Wood 等探讨了其他的方法, 这些方法的最终目的就是以一弧段的可靠度代替网络的某一部分或区域, 从而将问题转化为简单的弧段可靠度的问题, 从而得到网络的可靠度。也可采用路集法计算: 对一网络或子网络, 存在一些弧段将 u, v 相连, u, v 之间的路集记为 P_w 。Quimpo and Shamsi 指出, 若一个路集不包含也为路集的子路集, 则它是最小路集, 设 $P_1, P_2, P_3, \dots, P_m$ 是 m 个给定节点对之间的最小路集, E_i 代表 P_i 中所有弧段正常工作, 则:

$$R_{u,v}(t) = \sum_{i=1}^m P_r[E_i] - \sum_{i < j} P_r[E_i \cap E_j] + \dots$$

用此式计算所有需求点处节点对可靠度, 并以此形成可靠度表面。但是该方法不足之处在于: 可靠度表面只是建立在节点连接度基础上, 欲使系统正常运行还需要在节点处达到一定的流量水平。即考虑节点对间的路径能否提供足够的流量。

Duan Li, Tomas Dolezal 等意识到在运行时间较长的管网中, 管段的粗糙系数对降低管段的输水能力起较大作用, 提出由于管段的粗糙系数的不确定性, 将其作为一种随机变量来处理, 指出给水管网的管段随时间的增长其运输能力将由于内部粗糙系数的增大而降低, 并且变化很明显。粗糙系数的这种不确定性可以采用概率方法将其作为随机变量处理, 并提出能力可靠度概念, 即运输能力满足需求的概率。定义水管最大连通能力: $Q^n = 0.2795 CD^{2.63} S^{0.54}$, 对给定的 C , 则 Q 为定值, 但是, 实际, C 一般很难确定, 可以使用一种概率分布函数表示 C , 以 $f(c)$ 代表 C 的概率密度函数, 则 Q 也为随机变量, 其概率密度函数为:

$$f_{Q^M}(q) = \frac{f_c\left(\frac{q}{0.2795 CD^{2.63} S^{0.54}}\right)}{0.2795 D^{2.63} S^{0.54}}$$

假设管网中流动分布型式连续, (无不连续的变化), 在此基础上考虑路径运输能力对系统的影响。

Wu S J 等(1993 年)提出能力权重可靠性分析方法, 指出, 为计算各路径对节点对可靠性的影响, 可引入权重指标, 为此, 需要计算: ①网络中每一节点对的可靠度; ②决定每一路径可提供多少需求。对第一种指标可采用前面提到的方法包括故障树、路集法等求得; 对第二种指标必须知道每一连接段的流通能力。对特定管径、粗糙系数、水力梯度的管段最大流动能力可计算如下:

$$Q = 0.28 CD^{2.63} HG^{0.54}$$

式中: Q 为流动能力, 以兆加仑计(1加仑 = 3.785 L); C 为粗糙系数; D 为管径, ft(ft = 30.48 cm); G 为水力梯度。

文中管段流通能力采用管段水力梯度为 0.01 计算。

确定流通能力后, 下一步即考虑(1)中确定的所有最小路径是否能输送到每一节点所需的流量。因为尽管某一路径是流通的, 但是有可能只能输送需求的一部分, 为此, 可采用权重指标, 使用路径的输水能力与需求的比作为权重, 进行计算。

对于简单的系统可以这样计算, 对复杂的网络需找到一种更有效的计算方法以计算每一路集的流通能力, 然后将该流通能力与节点的需求相比较, 若路径 P_i 的流通能力 C_i 低于需求,

则该路径可靠度用权重相乘:

$$\omega_i = \frac{C_i}{C_d} \quad (\text{若 } C_i \geq C_d, \text{ 则 } \omega_i = 1)$$

最后, 得

$$RI = \sum_{i=1}^m \omega_i R_{pi}$$

能力可靠性计算使可靠度指标更接近实际, 允许部分满足需求的考虑使之更合理。但是该方法受算法的制约, 对大型网络, 很难处理。

4 结 语

综上所述, 由于给水管网本身比较复杂, 而且受多种因素影响, 更由于水的可存储性等, 给水管网可靠性分析方法发展较缓慢, 目前还没有一种方法得到普遍的认可, 并应用于实际工程设计中。本文从方法总体分类、考虑管网输水能力及考虑阀门配置等方面对已有的各种方法进行了归纳、总结, 可供可靠性分析及设计、维修等参考。

参考文献:

- [1] Bouchart F, Goulter I. Reliability improvements in design of water distribution networks recognizing valve location[J]. Water Resour. Res., 1991;27(12):3029-3040.
- [2] H H 阿布拉莫夫(苏). 给水系统可靠性[M]. 董辅祥译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [3] 李子富. 多水源管网水力计算的新方法[J]. 给水排水, 1995, (3).
- [4] Mays L W. Reliability analysis of water-distribution systems [J]. ASCE, New York, 1989.
- [5] Walski T M. Water distribution valve topology for reliability analysis[J]. Reliab. Engng. and Syst. Saf., 1993, 42:39-46.
- [6] 严熙世, 赵洪宾. 给水管网理论和计算[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1986.
- [7] Bao Y X, Mays L W. Model for water distribution systems reliability[J]. J. Hydr. Engng., ASCE, 1990, 116(9):1119-1137.
- [8] Duan L, Dolezal T, Haines Y Y. Capacity reliability of water distribution networks[J]. Reliab Engn. & Syst. Saf., 1993, 42:29-38.
- [9] Gupta R, Bhawe P R. Reliability analysis of water distribution systems[J]. J. Envir. Engng., ASCE, 1994, 120(2):447-459.
- [10] Mays L W. Reliability analysis of water-distribution systems [J]. ASCE, New York, 1989.
- [11] Wagner J M, Shamir U. Water distribution reliability: Analytical methods[J]. J. Water Res. Plng. and Mgnt., ASCE, 1988, 114(3):253-275.
- [12] Wagner J M, Shamir U. Water distribution reliability: simulation methods[J]. J. Water Res. Plng. and Mgnt., ASCE, 1988, 114(3):276-294.
- [13] Wu S J, Yoon J H, Quimpo R G. Capacity-weighted water distribution system reliability [J]. Reliab. Engng. and Syst. Saf., 1993, 42:39-46.