

# 城市给水管网可靠性的故障树分析

王 圃<sup>1</sup>, 王 旭<sup>1</sup>, 张 影<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 亚瑞建筑设计有限公司 广东分公司, 广州 510000)

**摘要:**对引起管网失效的各因素进行了分析,建立了给水管网失效的故障树,在此基础上,对故障树进行了定性和定量分析。

**关键词:**给水管网;故障树结构函数;故障树分析法

**中图分类号:**TU991.33

**文献标志码:**A

**文章编号:**1674-4764(2012)S1-0076-03

## Fault Tree Analysis for Reliability of Water Distribution Network System

Wang Pu, Wang Xu, Zhang Ying

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China;

2. Yarui Architecture Design Co. Ltd. Guangdong Branch, Guangzhou 510000, P. R. China)

**Abstract:** This paper discusses the failure of the network, and draws a fault tree of the water distribution network. And on that basis, the fault tree is investigated through the qualitative and quantitative analysis.

**Key words:** water distribution system; fault tree analysis

给水管网是城市给水系统重要的组成部分,其可靠性运行对整个给水系统发挥经济效益和社会效益起着举足轻重的作用<sup>[1]</sup>。然而由于供水管网的复杂性,在运行一段时间后,其往往会发生故障,使管网失效。因此,有必要对供水管网的主要失效形式和薄弱环节进行分析,进而采取相应的措施提高其可靠性和使用寿命。文中根据对城市供水管网的长期观测,对发生故障的统计材料进行整理,建立了供水管网的故障树分析模型,对其可靠性进行了分析和评价。

### 1 故障树分析法(FTA)

故障树分析法(Fault Tree Analysis)<sup>[2]</sup>是一种图形演绎方法,是故障事件在一定条件下的逻辑方法。它把目标函数作为故障树(FT)的顶事件,以方框符号表示;经分析找全顶事件发生的所有直接原因,作为中间事件,以方框符号表示;将逻辑门输出信号与顶事件相联结形成因果关系;再跟踪找出导致每个中间事件发生的所有直接原因作为下一级中间事件,用逻辑门与上一级中间事件联结;以此程序追溯到导致系统所有中间事件状态发生的全部直接原因,作为FT的底事件,以圆形符号表示,用逻辑门与上一级中间事件相联结,最终形成一棵倒置的树状逻辑图。

故障树分析法能反映出系统外部因素对系统故障的影响,同时把系统故障与组成系统各单元的故障有机地联系在一起,找出系统全部可能的失效状态。FTA是与可靠性框图法等价的分析方法,却比可靠性框图更实用、灵活、直观,它可以表示人为因素及环境的影响、多状态系统、非单调关联

系统、相依关系等。正因为如此,近30年来FTA发展迅速,其应用已从宇航、核能等领域渗透到一般的电子、电力、交通、化工、机械等各个领域,同时在社会安全和管理领域也开始得到应用。

### 2 给水管网故障树的建立与分析<sup>[2-3]</sup>

#### 2.1 故障树的建立

对于给水管网,根据故障树建立时顶事件的确定原则,选择“给水管网不能正常工作”也即“失效”作为顶事件,引起管网失效的直接原因是管道失效和附属设备失效,这两种原因中的任意一个出现均会导致管网失效,因此以这2个原因为次顶事件。采用类似方法继续深入分析,直到分解到代表各种故障形式的基本事件为止。图1为给水管网的故障树示意图,图1中各符号代表相应事件见表1。

#### 2.2 定性分析

2.2.1 故障树结构函数 设系统S由n个单元组成,用二值变量 $X_i$ 来表示单元的状态。

$$X_i = \begin{cases} 1 & \text{当第 } i \text{ 个底事件发生时} \\ 0 & \text{当第 } i \text{ 个底事件不发生时} \end{cases}$$

由于系统顶事件的状态是底事件状态的函数,故系统状态可以用行向量函数 $\phi(X) = \phi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示。

$$\phi(X) = \begin{cases} 1 & \text{当顶事件发生时} \\ 0 & \text{当顶事件不发生时} \end{cases} \quad (1)$$

$\phi(X)$ 称为故障树的结构函数。

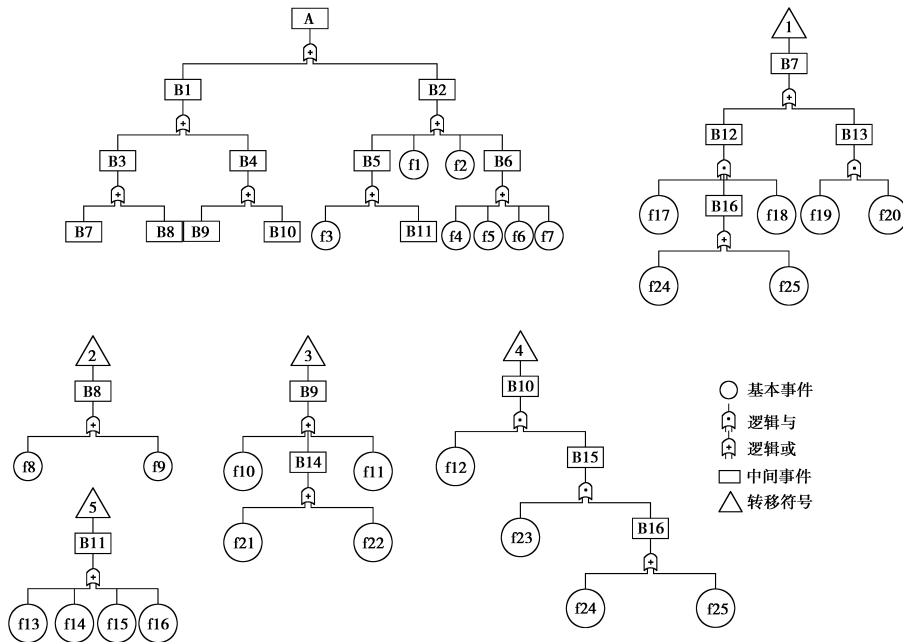


图 1 城市给水管网失效分析故障树

表 1 基本事件

事件	事件	事件
A 给水管网失效	B14 地面移动	f12 材质欠佳
B1 管道失效	B15 应力腐蚀	f13 阀杆断裂
B2 附属设施失效	B16 特定腐蚀介质	f14 轴封漏气
B3 泄露	f1 消防栓失效	f15 加油器断裂
B4 爆管	f2 管接口漏	f16 其他情况
B5 阀门失效	f3 阀门腐蚀	f17 管材抗腐蚀性差
B6 阀门井失效	f4 阀门井内连接管堵塞	f18 内防腐层失效
B7 管道腐蚀	f5 阀门井内连接管漏	f19 土壤腐蚀
B8 存在缺陷	f6 阀门井内连接管断裂	f20 外防腐层失效
B9 第三方破坏	f7 阀门井内连接管腐烂	f21 地震
B10 腐蚀开裂	f8 材质缺陷	f22 气候变化
B11 物理性破坏	f9 施工缺陷	f23 拉应力
B12 内腐蚀严重	f10 野蛮施工	f24 酸性介质
B13 外腐蚀严重	f11 违章占压	f25 碱性介质

记  $n$  个独立的与门或者或门的输入事件为  $x_i$ , 根据与门、或门的定义, 二者的结构函数可分别如下:

与门(可靠性串联系统)的结构函数:

$$\Phi(X) = \prod_{i=1}^n x_i \quad (2)$$

或门(可靠性并联系统)的结构函数:

$$\Phi(X) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - x_i) \quad (3)$$

故障树的结构函数可以用最小割集进行有效描述, 而对给水管网故障树进行定性分析, 就是要找出引起管网失效的最小割集。

2.2.2 下行法求最小割集 割集是网络中由弧构成的一个集合, 如果这些弧全部失效时, 将导致管网由起点到终点的有效途径全部失效, 即系统失效, 则这个集合称为网络的一个割集。最小割集是指在系统没有其他割集发生的条件下, 只有割集基本事件同时发生, 顶事件才发生; 割集中任一个基本事件不发生, 顶事件就不会发生。一般求最小割集的方

法有两种, 一种是下行法, 另一种是上行法。由于下行法求解简单易行, 所以文中采用下行法求解给水管网故障树的最小割集。

下行法的基本思路是, 从顶事件开始逐级向下, 根据不同逻辑关系分行表示。紧接顶事件的如果是或门, 就把每个输入事件分别列入不同的行; 紧接顶事件的如果是与门, 就把所有输入事件排列一行。依次从上到下分解, 一直进行到不能再分解的基本事件为止。对图 1 故障树用下行法进行分析, 分析结果如表 2 所示。

把表 2 所得的最小割集用等效的布尔代数方法表示, 如式(4)所示。该式中各符号的含义如表(1)所示。

$$A = \sum_{i=1}^7 f_1 + \sum_{i=8}^{11} f_1 + \sum_{i=13}^{16} f_1 + f_{21} + f_{22} + f_{12} f_{23} f_{24} + f_{12} f_{23} f_{25} + f_{17} f_{18} f_{24} + f_{17} f_{18} f_{25} \quad (4)$$

由式(4)可知, 给水管网失效故障树由 17 个一阶最小割集, 4 个三阶最小割集组成。一般来说, 割集阶数越少, 其发

生的可能性就越大,因而只有一个事件的最小割集才是导致顶事件发生的主要模式,即 17 个一阶最小割集直接影响系统的可靠性,为系统中的薄弱环节。

表 2 给水管网失效故障树分析步骤

1	2	3	4	5	6
					f17, f18, f24
		B7	B12	f17, f18, B16	f17, f18, f25
	B3		B13	f19, f20	f19, f20
		B8	f8	f8	f8
			f9	f9	f9
B1			f10	f10	f10
		B9	B14	f21	f21
				f22	f22
	B4		f11	f11	f11
		B10	f12, B15	f12, f23, B16	f12, f23, f24
					f12, f23, f25
			f13	f13	f13
		B11	f14	f14	f14
	B5		f15	f15	f15
			f16	f16	f16
		f3	f3	f3	f3
B2	f1	f1	f1	f1	f1
	f2	f2	f2	f2	f2
		f4	f4	f4	f4
	B6	f5	f5	f5	f5
		f6	f6	f6	f6
		f7	f7	f7	f7

### 2.3 定量分析

故障树定量分析的主要任务是根据已知的底事件发生概率,求顶事件发生的概率。给水管网系统可以看作不可修系统,系统的可靠度就是该系统故障树中顶事件发生的概率。

为了方便理解,假设给水管网故障树的每个基本事件  $f_i$  的概率为  $P(f_i)$ 。故障树的 21 个最小割集用  $k_1, k_2, \dots, k_{21}$  表示,则顶事件 A 发生的概率公式为:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(k_1) - \sum_{i < j=1}^n P(k_i k_j) - \dots + (-1)^{n-1} P(k_1 k_2 \dots k_n) \quad (5)$$

若已知每个基本事件的概率就可以由式(5)精确计算出顶事件发生的概率,但是计算量会很大。在实际工程问题中,往往不需要十分精确的计算结果,这时可以采用近似算法。用较少的计算量得到复合误差要求的计算结果。实践证明,当上述 21 个最小割集的故障概率均小于或等于 0.01 时,用式(5)中第一项  $\sum_{i=1}^n P(k_i)$  近似替代  $P(A)$ ,近似的精度比较高。

### 2.4 管网失效的主要因素

对供水管网的故障树以及式(4)中全部最小割集进行分析可知,17 个一阶最小割集( $f_1 \sim f_{11}, f_{13} \sim f_{16}, f_{21}, f_{22}$ )直接影响着系统的可靠性,为失效概率最大的事件。经分析供水管网失效的主要因素可归纳为以下 4 个方面:

1) 腐蚀严重 管道防腐措施不当。管道腐蚀包括内腐蚀、外腐蚀和应力腐蚀 3 个方面。管道内壁防腐不均匀,一

旦腐蚀,直接影响输水能力和水质,造成管道强度降低,易发生爆管现象;外壁防腐不彻底,防腐层太薄且涂层质量差,再加上常年埋在地下与土壤接触会造成外腐蚀;在经过下水道排水沟时,由于施工不当,没有采取偏移、抬高措施,在不能偏移的情况下引起管道拉应力,导致管道应力腐蚀。因此,要确保防腐层和管材质量,提高清管效果,并尽可能避免施工时产生的拉应力。

2) 第三方破坏 包括人为破坏和自然灾害破坏,以人为破坏为主。施工质量不高是人为破坏的主要形式。管道周围的违章开挖,管道上方进行野蛮施工或者荷载较大,管道沟底不平,水流对管沟管道的长期冲刷,使管道失效而泄露。恶劣的天气状况会导致地层运动加剧和出现异常的破坏条件,增加管网的爆管率;地层运动增加了管道的额外压力,造成管道不均匀沉降,使管道漏损严重(失效)。

3) 材质缺陷 管道材质低劣,耐压性差是管道失效的内在因素,选用给水管道的管材应该强度较高,质量符合国家标准,尽量杜绝管材初始缺陷。各种管材都有使用寿命,在达到一定年限后,会出现不同程度的跑、冒、滴、漏现象,使管网因泄露而失效。

4) 附属设施失效 管网的附属设施主要有调节流量用的阀门、供应消防用的消火栓,控制水流方向的单向阀、安装在管线高处的排气阀和安全阀,这些附件是管网能正常工作必不可少的,如果这些附件不能正常工作,势必影响管网的运行。为降低造价,管网附件一般都紧凑布置在阀门井内,阀门和阀门井要定期维护检修,以保障管网运行的安全性。

## 3 结论

1) 对大型复杂的管网作可靠性分析,建立逻辑框图十分困难,由美国贝尔实验室率先使用的故障树分析法因其简明、直观,被用于各个领域。把故障树分析法引入给水管网系统的可靠性分析当中,从系统的不可靠(故障)入手,从定性、定量和图形化等方面进行分析,为给水管网的可靠性分析寻找新的、简便易行的途径。

2) 严格定义顶事件和基本事件,建立的给水管网故障树以“给水管网失效”为顶事件,考虑了 25 个基本事件。按照下行法对故障树进行定性分析,确定 21 个最小割集,并把 17 个一阶最小割集作为影响管网运行的最薄弱环节。

3) 用最小割集法精确计算顶事件发生的概率,并提出近似计算的使用条件。

4) 提出了影响管网失效的主要因素,并针对影响的原因提出了相应的措施。

### 参考文献:

- [1] 王圃,龙腾锐,王力,等.城市给水管网可靠性分析与应用[J].给水排水,2005,31(6):107-110.
- [2] 孙新利,陆长捷.工程可靠性教程[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [3] 何淑静,周伟国,等.燃气输配管网可靠性的故障树分析[J].煤气与热力,2003,23(8):459-461.