水工金属结构系统可靠度的失效树分析法

叶 翔

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:鉴于在现行水工金属结构安全检测中,许多评价指标多带有经验性,缺乏严格的分析模型和基础理论支持,致使工程上关心的许多重要问题难以回答和解决,笔者在综合水工金属结构可靠度方面已有研究成果和现行国家有关技术标准的基础上,建立失效树分析模型,对水工金属结构进行总体系统可靠度分析,将被检体系的可靠度评定结论提高到量化水平.

关键词:水工金属结构;安全检测;系统可靠度;失效树;分析模型

中图分类号:TV34 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-1980(2004)06-0665-04

水工建筑物上设置的闸门是用来调节、控制水流的主要设备.现代水利工程中控制水流的闸门绝大部分都采用金属结构,其安全可靠是水利工程发挥效益的重要保证.因此,研究水工金属结构的可靠性问题具有一定的实用价值和经济意义.

水工金属结构失效有多种原因,每种失效又有多种失效模式.如何在整体系统可靠度分析中将这些原因和模式统一考虑,建立起整体系统分析模型是一项关键的基础性工作.根据系统失效原因,建立失效分析模型目前有多种方法,如主次图方法(又称排列图法、巴雷特图法)、因果图方法(又称树枝法、鱼刺图法)、层次分析法和失效树分析法等.本文根据水工金属结构失效的原因以及现行水工金属结构安全检测的规程和标准,尝试建立失效树(Fault Tree Analysis,简称FTA方法)分析模型.

1 失效树法建立的基础

在理论研究领域中,文献[1]介绍了结构体系可靠度计算方法和寻找失效模式的一般方法,关于结构体系可靠度计算的6种重要的基本方法此文作了详尽的叙述.但是,文献[1]中没有考虑主要受力体系以外的因素对系统整体可靠度的影响.除文献[1]之外,关于超静定结构失效模式的识别和寻找,许多学者也提出了一系列的算法,这些方法也可以在水工金属结构可靠度分析中使用.文献[2]提出了网络搜寻法;文献[3]提出了荷载增量法;文献[4]提出了利用有限元在计算机上实现失效模式自动搜寻的分枝约界法和在此基础上发展起来的β约界法;文献[5]提出了截止枚举法;文献[6]提出了线性随机规划法;文献[7,8]提出了优化准则法及其他许多改进法.目前,这些理论上较先进的方法,在水工金属结构安全检测领域由于缺乏系统模型还很少使用,本文为这些方法提供了应用的基础.

在应用研究领域中,现有的研究成果大量地讨论了有关结构失效事件的可靠度计算.文献[9,10]对弧形闸门空间框架体系作了计算分析,提出了空间框架体系可靠度计算的串联模型及计算方法.文献[11]对平面钢闸门主梁3种主要类型的破坏(受弯、受剪、弯剪复合)进行了可靠度校准,同时对极限状态设计法中分项系数的确定进行了探讨.文献[12]对钢闸门可靠度计算的基本理论进行了总结,并分析了组合梁的可靠度.文献[13]对钢闸门主梁破坏形式及主梁体系可靠度进行了分析.文献[14]利用一个工程实例对弧形闸门主框架可靠度及采用新旧钢结构设计规范来设计弧形闸门主框架进行了分析对比.文献[15,16]利用现有资料的数据对钢闸门中常用的基本构件强度可靠指标进行了校准计算和分析.

综观以上研究成果,作为结构参数已知的结构其主要受力体系的可靠度计算方法已基本成熟,今后要做的工作是对计算分析中所用基本数据的搜集与完善.根据文献[17]和笔者积累的资料,由水工金属结构主要

收稿日期:2003-12-09

基金项目:科技部社会公益基金资助项目(2000DIB10085)

作者简介:叶翔(1965—),男,江苏南京人,讲师,硕士,主要从事水电站结构研究.

受力体系失效引起的结构总体失效在所有失效事例中约占59.8%.这个数字说明结构失效是水工金属结构失效的主体,而由其他原因引起的失效也占相当比例,这些因素对系统可靠度的影响目前研究较少.本文应用的失效树分析法可在总体系统中全面细致地考虑各种影响因素.

2 系统分析模型——失效树的建立

在一个系统中,通过分析可能造成系统失效的各种因素,画出逻辑框图,从而确定系统失效原因的各种组合方式或其发生概率,计算系统失效概率,并采取相应措施,提高系统可靠性,这种方法称为失效树分析法(FTA),相应的逻辑框图称为失效树.

水工金属结构系统的特点是形式多样(例如常用的平板门、弧形闸门、人字门等),影响因素众多,任何一种因素都有可能引起系统失效,各种因素对系统都可能有相同的影响.系统可靠度不仅与作为主体的金属结构本身有关,而且与其相关的启闭系统、土建结构等有关.在现行水工金属结构安全评估中,往往根据经验人为地决定各种因素在系统总体可靠度中的权重,而失效树则只考虑已发生事件的影响,排除了人为主观因素的影响.

失效树的分析内容主要应包括定性分析和定量分析两个部分.定性分析的任务是寻找失效树的全部最小割集或全部最小路集,即寻找失效树的失效谱或成功谱.定量分析的任务是利用失效树这一逻辑图形作为模型,计算或估计系统顶事件发生的概率,从而对系统的可靠性、安全性及风险性做出评价.计算顶事件发生的概率方法有几种,如上行法、下行法等,在水工金属结构可靠性分析中可使用最方便的一种方法[5].

或门输出事件是在水工金属结构系统失效树中出现较多的事件,其发生概率为

$$P(x) = \bigcup_{i=1}^{n} P(x_i) = 1 - \prod_{i=1}^{n} [1 - P(x_i)] \qquad (i = 1,2,\cdots,n) \tag{1}$$

式中:x——输出事件;x_i——输入事件.

关于失效树更多的数学理论和具体计算方法见文献[18,19].

3 实例分析

本文以常见的弧形闸门为例,分析其发生故障的主要原因,并自上向下地建立系统失效树分析模型,以说明其使用方法.按照失效树分析法的常规,模型中使用图1和图2中通用的基本符号.具体失效树模型见图3.

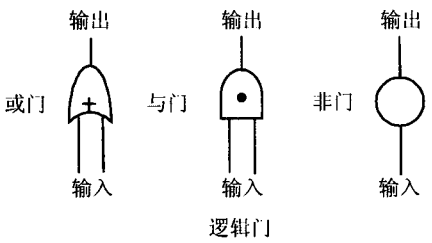

图1 基本逻辑符号(逻辑门)

Fig.1 Basic logical symbols

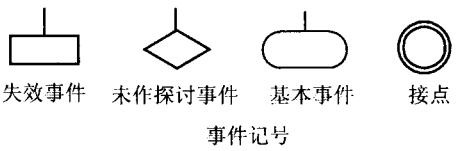

图2 失效树(FTA)基本符号(事件符号)

Fig.2 Basic symbols of FTA

在建立的失效树中,可以很方便地看出一般弧形闸门的失效可能有21种底事件,即有21种失效模式,如果能找出每一种失效模式的发生概率 e_i(i 表示失效原因的数目),进而逐级求得失效树中事件 D_i, C_i, B_i, A_i(i 表示失效事件的数目)等的发生概率,就有可能找出整个弧形闸门系统就某种失效模式的发生概率,从而可定量求出弧形闸门整体系统在该失效模式下的可靠度.

例:通过现场实测,测定某一已运行20年的弧形闸门螺栓不合格率为1%;水位波动范围内平均锈蚀为1 mm,占相关构件有效受力面积的6%;主要受力构件局部锈蚀严重,平均锈蚀为4 mm;此外止水破损有3处,长度占止水总长的0.2%.试求该门的失效概率.

计算采用上行法.由于螺栓不合格,得出失效树中底事件 e_{11} 的发生概率为1%;由于此级中无 e_{10} 事件发生,所以事件 C_1 发生概率为1%.由于水位波动范围内平均锈蚀为1 mm,占相关构件有效受力面积的6%,通

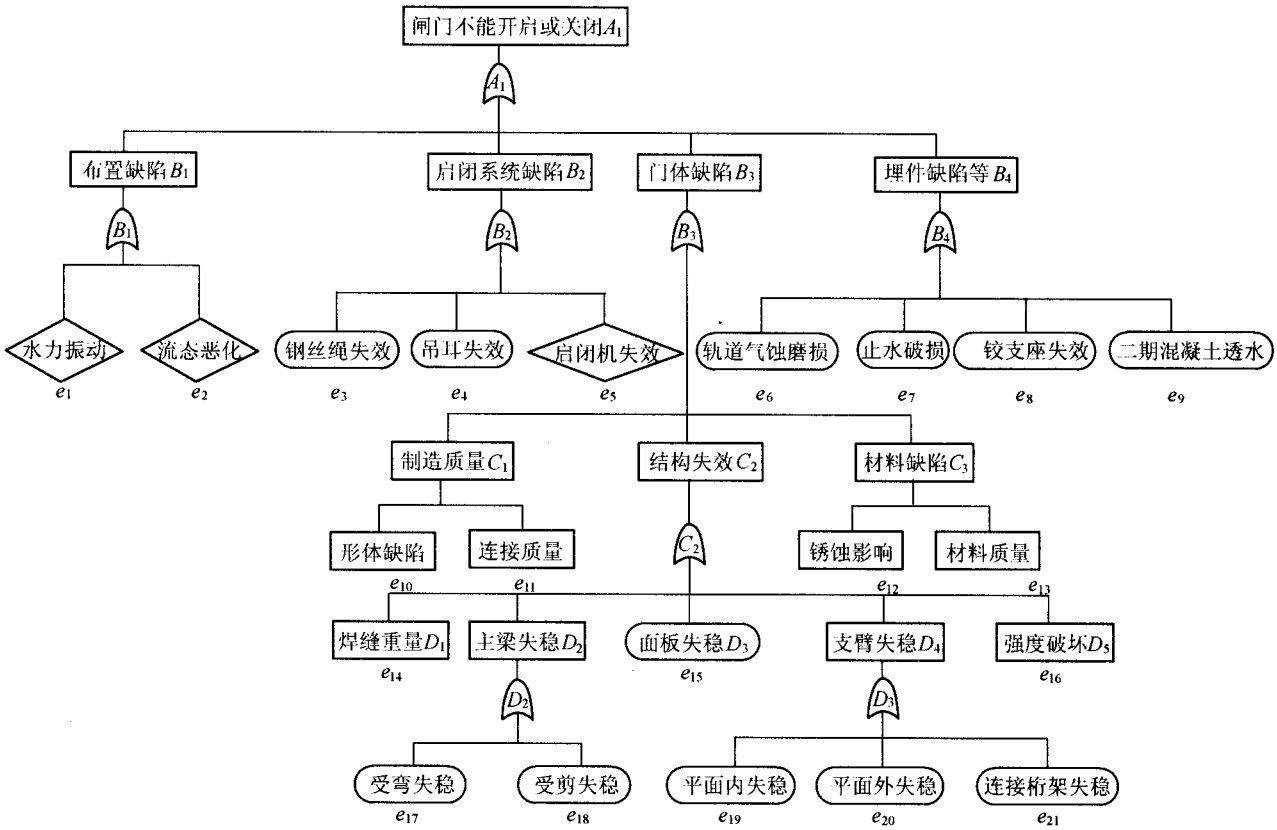

图 3　弧形钢闸门失效树

Fig.3　Fault tree for radial steel gate

过计算得出 e_{12}的发生概率为 1%，所以事件 C_3 发生概率为 1%．由于主要受力构件局部锈蚀严重，平均锈蚀为 4 mm，使用文献[1]或文献[13]的方法，计算得出 C_2 的发生概率为 2%．C_1，C_2，C_3 的上级事件 B_3 发生的概率由或门输出事件发生的概率公式计算：

$$P(B_3) = \bigcup_{i=1}^{3} P(C_i) = 1 - \prod_{i=1}^{3} [1 - P(C_i)] = 1 - (1 - 1\%)(1 - 2\%)(1 - 1\%) = 3.95\%$$

由于止水破损有 3 处，长度占止水总长的 0.2%，得出 B_4 的发生概率为 0.2%．由于事件 B_1，B_2 不发生，概率为 0，所以事件 B_i 的上级事件 A_1 即该弧形闸门不能开启事件的发生概率同样用或门输出事件发生的概率公式进行计算：

$$P(A_1) = \bigcup_{i=1}^{4} P(B_i) = 1 - \prod_{i=1}^{4} [1 - P(B_i)] = 1 - (1 - 0\%)(1 - 0\%)(1 - 3.95\%)(1 - 0.2\%) = 4.14\%$$

由此算出该弧形闸门失效概率为 4.14%，故该门正常工作的概率为 95.86%，进而可以求出工程上所关心的闸门可靠指标．

上例中关于 C_2 的发生概率计算较为复杂，在本文中可作为已解决的问题．本文第一部分提及的研究成果中使用的方法要在计算事件 D_i，C_i，B_i 等的发生概率时加以利用．

4　结　　语

失效树分析法不仅全面细致地考虑了各种因素对系统总体可靠度的影响，还使得求解总体系统可靠度问题转化为寻求其基本部件的可靠度问题，即如果知道了系统中构件的可靠度，从理论上说，就可由失效树定量推算出整个系统在若干失效模式下的可靠度．这改变了以往多凭经验得出结论的做法．因此，失效树分析法可作为水工金属结构系统可靠性分析中重要的基本理论分析方法．它不仅可以有效地解决现行水工金属结构安全评估和具体检测规程中许多难以解决的问题（如闸门各部分可靠度在系统总体可靠度中所占权重的问题、考虑振动对系统总体可靠度的影响问题、在系统中考虑起闭系统的可靠度问题），还可以为研究系统总体可靠度随时间的演化过程、系统可靠度阈值的决定等提供基础平台．

参考文献:

[1] 吴世伟.结构可靠度分析[M].北京:人民交通出版社,1990.196—244.
[2] MA Hak-fong, ANG H S. Reliability analysis of redundant ductile structural systems[M]. Urbana Champain: University of Illinois, 1981.1—5.
[3] MOSES F. System reliability developments in structural engineering[J]. Structural Safety, 1982,1(1):3—13.
[4] THOFT C, MUROSTU Y. Application of structural systems reliability theory[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1986.143—214.
[5] MELCHERS R E. Structural reliability analysis and prediction[M]. Chichester:Ellis Hoorwood, 1987. 1—5.
[6] 刘天云,赵国藩.一种识别结构主要失效模式的有效算法[J].大连理工大学学报,1998,38(1):97—100.
[7] FENG Y S. The theory of structural redundancy and its effect on structural design[J]. Computers & Structures, 1988,28(1):15—24.
[8] 董聪,杨庆雄.冗余桁架结构可靠性分析理论与方法[J].计算结构力学及应用,1992,9(4):393—398.
[9] 王正中.弧形钢闸门空间体系可靠度分析[J].西北农业大学学报,1998,26(4):35—40.
[10] 李宗利,王正中.弧门主框架体系可靠度分析模型与蒙特卡洛模拟[J].西北水电,1995,(3):41—43.
[11] 朱大林,游敏,杜汉斌.平面钢闸门主梁的可靠度分析及概率设计[J].水力发电,1997,(3):33—35.
[12] 范崇仁,徐德新.水工钢闸门的可靠度分析[J].水力发电,1992,(8):34—39.
[13] 李宗利.平面钢闸门主梁可靠度较准分析[J].水力发电,1998,(2):52—57.
[14] 周建方.弧形闸门主框架可靠性分析及设计[J].水力发电,1993,(5):41—44.
[15] 周建方,周美英,李典庆.水工钢闸门的可靠度较准分析[J].金属结构,2001,(3):12—17.
[16] 周建方.《水利水电工程钢闸门设计规范》可靠度初探[J].水利学报,1995,(11):24—30.
[17] 夏念凌.水工闸门事故事例分析[M]. 北京:水利电力出版社,1994.1—100.
[18] 曹晋华,程侃.可靠性数学引论[M]. 北京:科学出版社,1986.129—142.
[19] 史定华,王松瑞.故障树分析方法和理论[M].北京:北京师范大学出版社,1993.1—10.

Fault Tree Analysis method for reliability of hydraulic steel structures

YE Xiang

(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing* 210098, *China*)

Abstract: In current safety inspection of hydraulic steel structures, many indexes for evaluation mainly depend on experiences, lacking supports from precise analytical models and basic theories. Such a case makes it difficult to solve some problems concerned in engineering. Based on a review of current theoretical research results about the reliability of hydraulic steel structures and national technical standards related, a Fault Tree Analysis (FTA) model, which could give a quantitative evaluation, was developed for reliability analysis of the integral system of hydraulic steel structures.

Key words: hydraulic steel structure; safety inspection; reliability of system; fault tree; analysis model