

燃气火灾爆炸事故危险源辨识及危险性模拟分析^{*}

张 甫 仁

(天津大学机械学院)

张甫仁.燃气火灾爆炸事故危险源辨识及危险性模拟分析.天然气工业,2005;25(1):151~154

摘 要 城市燃气输配系统主要分布在人口和建筑物集中的区域,一旦发生火灾爆炸事故,将会造成严重的人员伤亡和财产损失。为此,从燃气泄漏危险源和火源危险源入手,对城市燃气火灾爆炸事故危险源进行了系统地辨识分析,得出事故危险源,并建立了以城市燃气火灾爆炸事故为顶上事件的故障树图。在实际应用过程中,分析了故障树的智能绘制,并阐述了运用蒙特卡罗法的计算机事故危险性模拟方法,将危险性指数模拟程序运行结果与理论值进行了对比,所得结果误差较小,从而证实了该方法的可靠性及其合理性。同时,利用模拟结果,分析了各指标危险性重要度指数。该项研究量化了每个危险源在事故致灾中的贡献,也得到了整个系统的危险性,为制定相应的预防和控制措施提供了参考。

主题词 燃气 火灾 爆炸 危险源 辨识 危险性 故障树 蒙特卡洛法

一、燃气火灾爆炸事故危险源辨识

燃气系统是一个复杂的系统,其运行受到许多因素的影响。了解和研究事故致因(即危险源),是提高系统安全性和降低燃气事故发生的有效工具^[1,2]。其危险源辨识必须采取系统性原则来进行。燃气事故危险源辨识可依据故障树分析法以及综合性实统双析法^[3]来进行。综合性实统双析法是将大量事故统计资料与具体对象相结合,以因素归类为手段,来进行危险源辨识归类的方法。故障树分析法是一种从结果到原因,运用逻辑布尔模型反向分析的有向逻辑树图法。它能够把系统的故障与组成系统部件的故障有机地联系在一起,从而可以清晰地以图例说明系统是怎样失效的。因此,上述两个方法的结合对于危险源辨识是适用的,可使危险源的辨识过程和分析思路更为直观、清晰和全面。

燃气火灾爆炸事故的发生必须具备两个条件即燃气泄漏危险源的存在和火源危险源的存在。这是构成燃气火灾爆炸事故故障树的两个必要分层中间事件。笔者结合已有研究成果,即文献[1,4~8],对某城市近 10 年来燃气火灾爆炸已发事故统计进行资料分析,并以上述两大危险源为分支进行分析。

具体的危险源不在此详细说明和列举,其所有危险源因素将在燃气火灾爆炸事故故障树图的建立过程中给予说明。

二、燃气火灾爆炸事故故障树的构造

由故障树可以清晰地看出设备故障、操作失误以及外部因素等危险因素是如何导致系统失效的^[9]。故障树是以危险源的分类描述为中间事件,以危险源为基本事件,以逻辑门符号相连接的过程。笔者依据辨识分析,得出如图 1、表 1 所示的燃气火灾爆炸事故故障树图。该故障树共包括 44 个危险源因素。

三、燃气火灾爆炸事故危险性模拟

以某城市燃气近 10 年来运行事故统计资料为基础,加以分析补充,可以得出如表 2 所示的燃气火灾爆炸事故危险源危险性系数值。

1. 燃气火灾爆炸事故故障树图的智能绘制

在复杂系统的可靠性设计与分析、系统安全性分析中,故障树分析法在世界各国相继得以重视且广泛应用。但是,故障树的建造通常仍采用手工方法进行,效率低、费用高,发生遗漏和错误不可避免。

^{*} 本成果系国家自然科学基金资助项目(50376048),教育部博士点基金项目(20030056027),天津市科技发展项目(043112411)以及 211 二期学科建设项目。

作者简介: 张甫仁,1975 年生,博士研究生。地址:(300072)天津大学自动化学院 2002 春博 476 号。电话:(022) 27401656,13072063237。E-mail:zh_feixoe@163.com

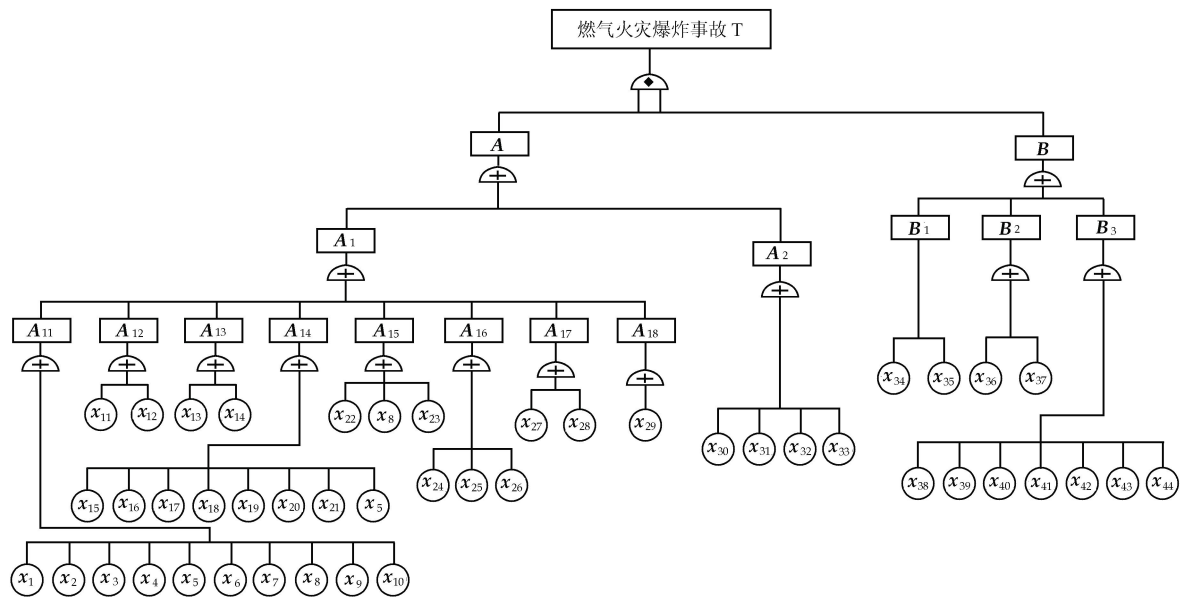


图 1 燃气火灾爆炸事故故障树图

表 1 燃气火灾爆炸事故危险源符合及意义详表

项目	代表意义	项目	代表意义	项目	代表意义	项目	代表意义	项目	代表意义
A	燃气泄漏	A ₁	管网泄漏	A ₂	用户端泄漏	A ₁₁	腐蚀	A ₁₂	人为破坏
A ₁₃	自然因素破坏	A ₁₄	设计施工缺陷	A ₁₅	材料缺陷	A ₁₆	管理因素	A ₁₇	操作失误
A ₁₈	不明因素	B	火源	B ₁	电器火花	B ₂	雷电火花	B ₃	一般因素火源
x ₁	材料抗腐蚀性差	x ₂	存在应力集中	x ₃	内部抗腐蚀层脱落	x ₄	内部抗腐蚀层老化	x ₅	防腐措施不当
x ₆	外部防腐层质量差	x ₇	燃气含水	x ₈	内应力腐蚀	x ₉	阴极保护失效	x ₁₀	土壤腐蚀性强
x ₁₁	偷气	x ₁₂	第三方施工破坏	x ₁₃	雨水过大	x ₁₄	其他自然因素	x ₁₅	管道及部件安装缺陷
x ₁₆	施工时防腐层破坏	x ₁₇	管路路线设计缺陷	x ₁₈	施工未按要求	x ₁₉	管道及部件机械损伤	x ₂₀	材料选型不当
x ₂₁	焊接缺陷	x ₂₂	材料含杂质	x ₂₃	材料机械性能差	x ₂₄	管线管理不善	x ₂₅	管道及部件失修
x ₂₆	易坏部件超期使用	x ₂₇	操作失误	x ₂₈	故障处理不当	x ₂₉	不明原因	x ₃₀	燃气用具漏气
x ₃₁	球阀阀心松动	x ₃₂	用户违章操作	x ₃₃	室内管线损伤	x ₃₄	非吸烟人为火源	x ₃₅	防爆器损坏
x ₃₆	无避雷器	x ₃₇	避雷器失效	x ₃₈	危险区违章动火	x ₃₉	电器设施不防爆	x ₄₀	接地不良
x ₄₁	电缆短路	x ₄₂	吸烟	x ₄₃	静电火花	x ₄₄	不明火源		

表 2 燃气爆炸事故危险源危险系数值表

指标	危险值	指标	危险值	指标	危险值	指标	危险值	指标	危险值	指标	危险值
x ₁	0.0054	x ₂	0.003333	x ₃	0.001111	x ₄	0.00278	x ₅	0.001667	x ₆	0.001667
x ₇	0.002222	x ₈	0.001111	x ₉	0.000555	x ₁₀	0.001111	x ₁₁	0.002222	x ₁₂	0.002222
x ₁₃	0.001667	x ₁₄	0.001111	x ₁₅	0.000555	x ₁₆	0.006611	x ₁₇	0.00911	x ₁₈	0.013733
x ₁₉	0.004089	x ₂₀	0.007722	x ₂₁	0.0054	x ₂₂	0.001667	x ₂₃	0.0054	x ₂₄	0.0044
x ₂₅	0.002222	x ₂₆	0.005555	x ₂₇	0.01	x ₂₈	0.003888	x ₂₉	0.002778	x ₃₀	0.001667
x ₃₁	0.001111	x ₃₂	0.002778	x ₃₃	0.002222	x ₃₄	0.011667	x ₃₅	0.006667	x ₃₆	0.003333
x ₃₇	0.006667	x ₃₈	0.01632	x ₃₉	0.0054	x ₄₀	0.003333	x ₄₁	0.003333		
x ₄₂	0.0054	x ₄₃	0.009066	x ₄₄	0.01						

因此,故障树的自动建造已成为人们的研究重点之一^[10]。而故障树的计算机智能绘制和数据的输入是实现计算机模拟中一件困难而又关键的工作。因此笔者提出了一种新的智能绘制方法——基于枝叶链接法来进行故障树的智能绘制及数据输入。

基于枝叶链接法具体实现方法及步骤为:首先进行故障树基的绘制,即顶事件(在此称为基事件)点输出,这是一个简单的过程,在此不作赘述;其次进行故障树干的绘制,即主要干线的绘制,即故障树树干的分叉,在故障树中就是导致顶事件发生的基础危险源(在此称为干事件),如燃气火灾爆炸事故故障树来说,就是燃气泄漏和火源两个必要因素。给予每个干事件一个指向基事件的指针,由此形成基和干的链接。

由于故障树中子事件及基本事件存在的同步性和相异性,即在分层上该事件可能是基本事件,而该事件出现的顺序来说又是在其他子事件同步的位置,因此,子事件与基本事件必须同步绘制,故此第 3 步进行枝及叶的绘制,具体方法如下。

首先将每个干进行三向化,即给每个子事件结点三个指针,一个指针指向兄弟事件,一个指针指向第一个子事件,一个指向父事件,以此可以方便地实现对故障树所有事件及基本事件的搜索、列举和显示等操作。其次给每个基本事件结点一个指向故障树中对应的基本事件的指针,建立基本事件链^[11]。

最后,进行子事件与父事件的指向调整,即完成反向过程,由于在建树过程中,指针的方向是由子事件指向父事件的,故此,需要进行反向调整,以完成与故障树一致指向的逻辑方向图。建库流程图见图 2。

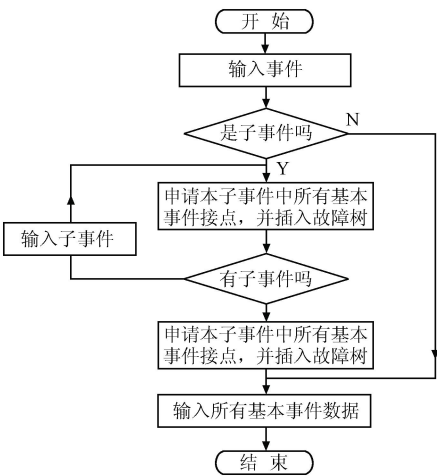


图 2 建树流程简图

2.燃气火灾爆炸事故的危险性模拟及基本事件危险性重要度模拟及结果分析

在故障树分析法实际运用中,除建树以外,在求割集、求最小割集、不交化,直到计算顶上事件发生的概率等基本步骤中,计算量是巨大的,即产生了所谓的组合爆炸问题^[11]。同时,基本事件概率重要度时的计算过程十分复杂和繁琐,为了解决这个问题,采用了计算机模拟的方法。

燃气火灾爆炸事故危险性模拟,就是模拟分析事故发生的可能性大小。引进蒙特卡罗法,以可靠度的随机变量进行大量的随机抽样,将其带入燃气火灾爆炸事故系统功能函数式,确定燃气系统是否失效,从而求得燃气事故失效概率,即危险性大小。

燃气火灾爆炸事故有 44 个互不相同的基本事件组成,即 $x_1, x_2, \dots, x_{44}$ 。由各基本事件的状态,根据事件间逻辑关系,即功能函数 $F(T) = g(x_1, x_2, \dots, x_{44})$ 来判断顶上事件的发生状态。利用伪随机数对各基本事件 x_i 进行概率随机抽样,当状态值 $g(x_i) = 1$,即事件发生,否则 $g(x_i) = 0$,事件不发生。将各基本事件状态值代入功能函数,从而得出 $F(T)$ 值,如果 $F(T) = 1$,则 $N_s = N_s + 1$ 。同样重复 N 次后,得出 N_s 值,则燃气系统危险性系数为: $P(T) = N_s / N$ 。

设基本事件 x_1 总的失效次数为 $N_{s,i}$,则基本事件危险性重要度,即危险性重要度为: $PE_i = \frac{N_{s,i}}{N_s}$ 。

据上述方法,可以得出燃气爆炸危险性模拟程序算法框图(在此从略)。

根据上述建树和模拟方法,利用 VB 进行其模拟程序的编制。以表 2 所示数据为模拟程序输入,当取运行次数为 1000000 次时,其模拟运行结果如表 3 所示。故障树危险性计算的理论方法是以故障树割集求解法来进行计算,其具体计算过程可以参考系统可靠性相关文献,在此不给予详细论述。

表 3 燃气爆炸事故危险性指数表

模拟次数	理论值	模拟值	相对误差(%)
1	0.008786	0.008775	-0.1266
2	0.008786	0.008763	-0.2670
3	0.008786	0.008766	-0.2327
4	0.008786	0.008807	0.2370
5	0.008786	0.008792	0.0627
6	0.008786	0.008774	-0.1373
7	0.008786	0.008764	-0.2566
8	0.008786	0.008816	0.3431

模拟结果与理论计算结果误差绝对值最大不超过 0.4%,而 8 次平均相对误差为-0.04635%。这对于燃气火灾爆炸危险性的初步定量化分析,是可以满足工程要求的。同时,根据危险源分级表可知,该燃气火灾爆炸事故危险性属于 F 级,属于非常安全的级别。

以平均基本事件重要度平均值为重要度模拟计算结果,并将其结果进行归一化处理,其结果如表 4 所示。鉴于重要度指标的理论计算的相对复杂性,笔者在此将不给予具体比较和分析。

表 4 危险源危险性重要度值表

指标	危险值	指标	危险值	指标	危险值
x1	0.027094	x2	0.016672	x3	0.005579
x4	0.01403	x5	0.008316	x6	0.008301
x7	0.010993	x8	0.005644	x9	0.002822
x10	0.005469	x11	0.010983	x12	0.011113
x13	0.008351	x14	0.005474	x15	0.002837
x16	0.0333054	x17	0.045789	x18	0.068794
x19	0.02041	x20	0.036186	x21	0.026924
x22	0.008331	x23	0.026969	x24	0.021991
x25	0.011153	x26	0.02784	x27	0.050016
x28	0.019624	x29	0.01384	x30	0.008351
x31	0.005584	x32	0.01396	x33	0.011153
x34	0.058552	x35	0.033254	x36	0.016757
x37	0.033319	x38	0.081874	x39	0.026859
x40	0.016827	x41	0.016632	x42	0.026859
x43	0.045312	x44	0.050111		

3.系统危险性分级及危险源危险性排序分析

根据文献[3]的危险源分级建议可以得出,该燃气火灾爆炸事故危险性属于 C 级,属于比较安全的级别。

据表 4 可以得出分类危险源危险性排序,其中燃气泄漏危险源排序为:

$$x_{18} > x_{27} > x_{17} > x_{20} > x_{16} > x_{26} > x_1 > x_{23} > x_{21} > x_{24} > x_{19} > x_{28} > x_2 > x_4 > x_{32} > x_{29} > x_{25} > x_{33} > x_{12} > x_7 > x_{11} > x_{13} > x_{30} > x_{22} > x_5 > x_6 > x_8 > x_{31} > x_3 > x_{14} > x_{10} > x_{15} > x_9$$

源危险源排序为:

$$x_{38} > x_{34} > x_{44} > x_{43} > x_{37} > x_{35} > x_{39} > x_{42} > x_{40} > x_{36} > x_{41}$$

由上述危险源排序,可以得到引起燃气火灾爆炸事故主要危险源。

燃气泄漏方面:施工未按要求、管路路线设计缺陷、操作失误、材料选型不当、施工时防腐层破坏、材

料机械性能差、焊接缺陷、材料抗腐蚀性能差、防腐措施不当管线管理不善、偷气、第三方施工破坏以及等危险源是造成的燃气泄漏的主要原因。针对这种情况,应积极采取内外防腐以及严格选材,加强管材质量的检查等措施,以延缓或防止腐蚀的发生;加强管线管理,避免第三方破坏;强调安全管理规程,对城市管线进行定期检修。

火源危险源方面:对于危险区违章动火、非吸烟人为火源、静电火花、防爆器失效以及避雷器失效等危险源是造成火源存在的主要危险源。对于此应加大职工的教育力度,提高其安全意思,从而尽可能地避免人为因素而造成事故的发生;注意设备产生静电以及避雷措施的采取;对于未知火源还应该加大力度予以监控,将其划分归类,以采取相应的控制措施,从而降低系统危险性。

参 考 文 献

1 Helena Montiel, Juan A Vilchez *et al* . Mathematical modeling of accidental gas release . Journal of Hazardous Materials ,1998 ;(59) :211—233

2 Helena Montiel, Juan A *et al* . Historical analysis of accidents in the transportation of natural gas . Journal of Hazardous Materials ,1996 ;(51) :77—92

3 张甫仁 .瓦斯爆炸事故危险源辨识及评价研究 .焦作工学院硕士学位论文,2002

4 沈斐敏,伍良 .管道燃气火灾爆炸事故树分析 .工业安全与环保,2003 ;29(1) :42~45

5 蒋宏业,姚安林,郑兴华 .天然气球罐失效故障树分析 .天然气工业,2003 ;23(6) :143~145

6 Juan A ,Vilchez Sergi Sevilla ,Helena Montiel *et al* . Historical analysis of accidents in chemical plants and in the transportation of hazardous materials . Journal of Loss Prev Process Industries ,1995 ;8(2) :87—96

7 闰凤霞,高惠临 .风险评估及其在油气管道方面的应用 .石油工业技术监督,2003 ;9(2) :1~6

8 闰凤霞,董玉华,高惠临 .故障树分析方法在油气管线方面的应用 .西安石油学院学报,2003 ;18(1) :47~50

9 Yanjun Wang ,William J *et al* . Algorithmic fault tree synthesis for control loops . Journal of Loss Prevention in the Process Industries ,2003 ;(16) :427—441

10 A Carpignano ,A Poucet . Computer assisted fault tree constrction ;A review of methods and concerns , Reliability engineering and system safety ,1994 ;44(3) :265—278

11 贾玉双,史宪铭 .基于故障树模型的系统可靠性分析与仿真 .湘潭大学自然科学学报,2001 ;23(4) :101~105