

重整加热炉模糊故障树分析研究

王玉乔¹, 程光旭¹, 赵振辉²

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 中国石油化工股份有限公司洛阳分公司, 471012, 河南洛阳)

摘要: 应用模糊故障树分析方法研究了连续催化重整装置中三合一组合式加热炉的可靠性. 以重整加热炉工艺失常为顶事件, 建立故障树, 采用上行法定性分析找出该故障树的 31 个最小割集. 引入模糊集理论中的模糊数概念, 采用尖型 L-R 模糊数描述故障树中各底事件的发生概率. 按照模糊逻辑门的运算法则定量计算故障树各中间事件及顶事件的发生概率区间. 在各中间事件中, 炉管故障的发生概率最高, 且辐射室炉管故障明显高于对流室, 从而确定出辐射室炉管为加热炉的薄弱环节. 研究表明: 对于很难或无法获得底事件发生概率准确值的石油化工设备而言, 模糊故障树是一种有效实用的可靠性分析方法, 与传统的故障树方法相比, 计算得出的结果更加科学合理, 更接近工程实际.

关键词: 重整加热炉; 可靠性; 模糊故障树

中图分类号: TE963 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)03-0086-04

Fuzzy Fault Tree Analysis of Reforming Furnace

WANG Yuqiao¹, CHENG Guangxu¹, ZHAO Zhenhui²

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. SINOPEC Luoyang Branch Company, Luoyang, Henan 471012, China)

Abstract: Reliability of the furnace in an existing industrial continuous catalytic reforming unit was investigated with the fuzzy fault tree analysis method. A fault tree was developed considering failure of the reforming furnace to be a top event. Thirty-one minimum cut sets were achieved by qualitative analysis with the ascending method. The concept of fuzzy number of the fuzzy sets theory was applied to describe the probability of basic event occurrence in the fault tree, and the fuzzy failure probabilities of the middle events and the top event were calculated with fuzzy AND and OR operators. Among all middle events the probability of tube failure is highest, and the tube failure probability in the radiant chamber is clearly higher than that in convection chamber, showing that the radiant chamber tube is a weak part in the furnace. The results show that the fuzzy fault tree proposed is an effective method of reliability analysis for petrochemical equipments and its calculation results are more reasonable than those of the conventional fault tree.

Keywords: reforming furnace; reliability; fuzzy fault tree

石油化工生产技术密集、工艺复杂、自动化程度高,且操作条件为高温高压,存在腐蚀介质,在开工、停工、运行、检修过程中潜在着许多影响安全可靠生产的因素. 一旦发生事故,将严重威胁职工的人身安

全和设备安全,同时造成不可估量的经济损失. 因此,分析石油化工装置中的不可靠因素,减少或消除潜在危险,延长装置安全运行周期,提高经济效益是化学工程领域重要的研究课题.

可靠性研究是保证生产装置安全、稳定、长周期运行,提高企业经济效益的重要手段.故障树分析(FTA)是常用的复杂系统可靠性分析方法之一^[1],传统的故障树以概率论为基础,要求首先给出底事件发生概率的精确值^[2],才能进行定量计算.石油化工装置中存在某些特有设备,这些设备数量很少且一般具有较高的可靠度,无法提供大量的基础数据,而且提供的数据往往带有误差.此外,由于设备受到外界环境的影响,故障概率常常发生变化,因此很难或根本无法得到这些设备的故障概率精确值.

本文将模糊集理论与传统的故障树方法结合起来,采用模糊数描述事件的发生概率,克服了传统故障树方法的不足,使分析结果更趋科学合理.应用该方法分析连续催化重整装置中组合式加热炉的可靠性,计算加热炉的失效概率区间,找出薄弱环节,可为制定经济合理的维修计划提供依据.

1 加热炉结构

催化重整是生产芳烃、高辛烷值汽油并副产氢气和少量液化石油气的重要石油二次加工过程^[3].某炼油厂一套 70×10^4 t/a 连续催化重整装置采用法国 IFP 公司第一代专利技术,4 台反应器串联运行,反应所需的热能由两台加热炉提供,其中一台为常规圆筒炉,工号为 H201B,另一台为三合一箱型组合式加热炉,工号分别为 H201A、H201C 和 H201D.该组合式加热炉设计负荷为 $1.209 6 \times 10^8$ kJ/h,燃料为炼油厂瓦斯气.三台加热炉布置在同一炉膛内,加热炉的中下部由隔火墙隔离出三间辐射室,每间辐射室内安装 18 个火嘴.辐射炉管为 IFP 公司典型的倒“U”形排列,进出口集合管位于炉底,辐射炉管为双面辐射,辐射室结构如图 1 所示.为满足重整反应对温度的高要求,介质只在辐射室内加热.对流室采用废热锅炉产生 35 kg/cm^2 的中压蒸汽以回收烟气余热.

2 建立故障树

FTA 是一种图形演绎的逻辑方法,把系统最不希望发生的失效状态作为逻辑分析的目标,找出导致这一故障状态所有可能发生的直接因素,再跟踪循迹找出导致这些中间故障事件所有可能发生的直接原因,一直追寻到引起部件发生故障的全部原因后,用相应的逻辑门把顶事件、中间事件、底事件联接成树形图,即为故障树.对此故障树模型进行定性分析,能找到导致顶事件发生的所有故障模式.通过

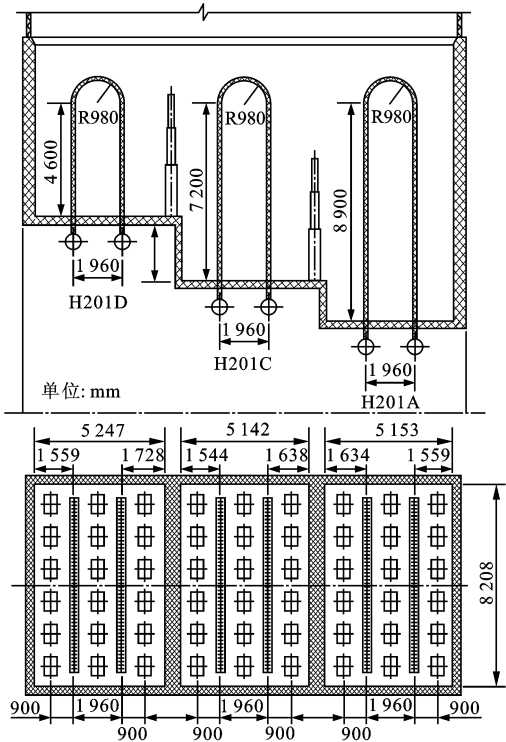


图 1 重整加热炉辐射室结构图

定量分析,即可求出顶事件发生概率和各底事件重要度,从而提出避免事故发生的各种方案并选择最佳的安全对策^[4].

首先定义加热炉工艺失常为故障树的顶事件 T,工艺失常是指加热炉在运行过程中偏离了操作规程规定的正常工作范围,从而造成失稳甚至非计划停车.根据故障树原理以及工艺操作规程和历史数据分析,加热炉工艺失常的中间事件为:①炉膛结构故障;②炉管故障;③燃料系统故障;④燃烧状态失常.所建故障树如图 2 所示,图中字母含义见表 1.

3 模糊故障树分析

3.1 定性分析

故障树定性分析的目的是寻找导致顶事件发生的原因及原因组合,也就是寻找最小割集.最小割集就是部件失效的最小组合,如果该组合中的事件都发生,则会导致顶事件发生.任何故障树都包含有限个最小割集,它们对顶事件来说都是唯一的.

采用“上行法”求取加热炉工艺失常故障树的最小割集.对每个结果事件,若下面是或门,则将此结果表示为该或门下各输入事件的布尔和;若下面是与门,则将此结果表示为该与门下的输入事件的布尔积.由此求得该故障树包含 31 个最小割集,且都为单事件割集: $\{X_1\}, \{X_2\}, \{X_3\}, \dots, \{X_{31}\}$.

表 1 故障树事件及发生概率

代号	事件名称	m	$\alpha、\beta$	代号	事件名称	m	$\alpha、\beta$
T	加热炉工艺失常	0.953 559	0.009 880	X8	对流室炉管腐蚀	0.292 411	0.016 258
A	炉膛故障	0.452 138	0.026 484	X9	焊缝缺陷	0.000 044	0.000 002
B	炉管故障	0.800 533	0.022 287	X10	预热段泄露	0.177 463	0.009 867
C	燃烧状态失常	0.352 645	0.017 296	X11	辐射室炉管腐蚀	0.018 202	0.001 012
D	燃料系统故障	0.343 521	0.017 034	X12	材质劣化	0.097 759	0.005 435
B1	对流室炉管失效	0.418 008	0.020 552	X13	炉管外壁氧化	0.036 074	0.002 006
B2	辐射室炉管失效	0.657 268	0.026 192	X14	压力过高	0.004 125	0.000 229
B3	炉管局部过热	0.634 030	0.026 616	X15	温度过高	0.004 125	0.000 229
B4	炉管蠕变变形	0.063 456	0.003 459	X16	炉管异物堵塞	0.002 179	0.000 121
B5	炉管堵塞	0.288 289	0.014 787	X17	催化剂粉尘过多	0.023 823	0.001 325
B6	炉内偏烧	0.485 789	0.026 713	X18	炉管内结焦	0.209 541	0.011 650
B7	辐射室偏压	0.483 660	0.026 705	X19	介质偏流	0.077 650	0.004 317
C1	热效率低	0.227 642	0.012 611	X20	烟道挡板操作不当	0.004 124	0.000 229
C2	火焰异常	0.017 701	0.000 980	X21	风门操作不当	0.003 324	0.000 185
C3	熄火	0.146 743	0.008 014	X22	对流室积灰	0.480 031	0.026 690
C4	火嘴故障	0.010 344	0.000 576	X23	过剩空气系数超标	0.003 667	0.000 204
C5	火嘴燃烧异常	0.011 644	0.000 645	X24	火嘴堵塞	0.000 007	0.000 000
X1	衬里脱落	0.325 031	0.023 910	X25	火嘴安装不当	0.010 280	0.000 572
X2	隔火墙倒塌	0.188 315	0.010 470	X26	火嘴气孔缺陷	0.000 029	0.000 002
X3	燃料管线泄露	0.224 799	0.012 499	X27	火嘴腐蚀	0.000 022	0.000 001
X4	燃料管线堵塞	0.130 218	0.007 240	X28	火嘴高温变形	0.000 007	0.000 000
X5	燃料软管质量缺陷	0.022 436	0.001 247	X29	瓦斯压力波动	0.004 011	0.000 223
X6	燃料软管安装不当	0.000 009	0.000 001	X30	火嘴操作不当	0.003 667	0.000 204
X7	瓦斯气含油	0.004 011	0.000 223	X31	瓦斯气参数超标	0004 011	0.000 223

注: m 为发生概率均值; $\alpha、\beta$ 为左、右限.

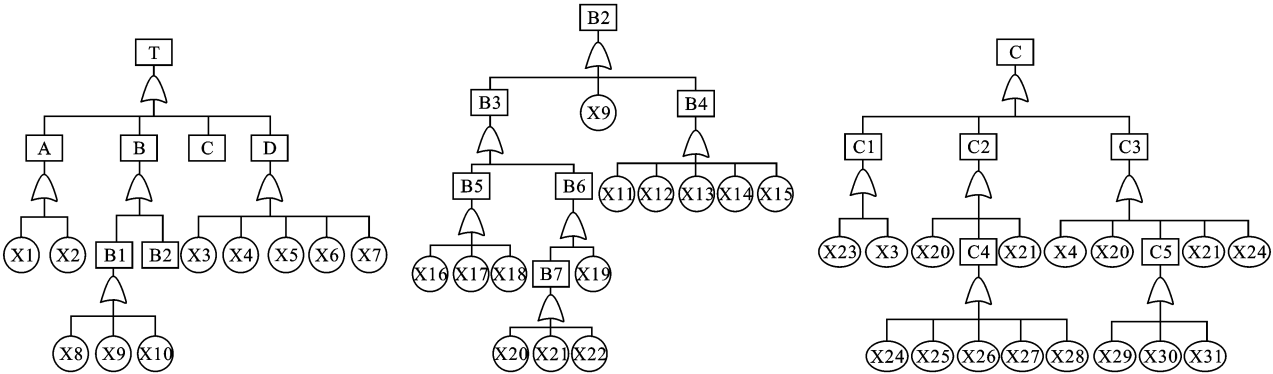


图 2 加热炉工艺失常故障树

3.2 定量分析

故障树定量分析的主要目的是求得顶事件的发生概率. 本文结合模糊集理论,采用 L-R 型模糊数表示底事件的发生概率. 通常,模糊数隶属度为 1 的数只取一点,因此可记为 $\tilde{A}=(m,\alpha,\beta)$, m 为 $\tilde{A}$ 的均值,对应隶属度为 1 的点, α,β 为 $\tilde{A}$ 的左右分布,当 α,β 为 0 时, $\tilde{A}$ 不是模糊数, α,β 越大, $\tilde{A}$ 越模糊. 工程中常用的隶属函数有线性型、正态型和尖型,一般来说,当可以确定事件的发生概率在某个范围之内时,才选择线性函数,否则选取正态型或尖型. 在此选择尖型隶属函数

$$\left. \begin{aligned} f_L(x) &= \frac{1}{1+(m-x)/\alpha}, \quad x \leq m; \alpha > 0 \\ f_R(x) &= \frac{1}{1+(x-m)/\beta}, \quad x > m; \beta > 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

当底事件的发生概率为模糊数时,可以根据模糊逻辑门算子计算顶事件的发生概率,对于含有两个底事件的模糊与门和或门,计算公式如下

$$\tilde{P}_T^{AND} = AND(\tilde{p}_1, \tilde{p}_2) = (m_T, \alpha_T, \beta_T) = (m_1m_2, m_1\alpha_2 + m_2\alpha_1, m_1\beta_2 + m_2\beta_1) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \tilde{P}_T^{OR} &= OR(\tilde{p}_1, \tilde{p}_2) = (m_T, \alpha_T, \beta_T) = \\ &[1 - (1 - m_1)(1 - m_2), (1 - m_1)\alpha_2 + \\ &(1 - m_2)\alpha_1, (1 - m_1)\beta_2 + (1 - m_2)\beta_1] \quad (3) \end{aligned}$$

根据该连续催化重整装置自 2001 年开工至今的运行报告,统计分析得到各底事件的发生概率均值 m_i . 假设隶属函数是关于均值对称的,并且与均值相差 $\pm 50\%$ 的点的隶属度为 0.1^[5],则有

$$\alpha_i = \beta_i, \frac{1}{1+(m_i-x)/\alpha_i} = \frac{\alpha_i}{\alpha_i+0.5m_i} = 0.1$$

由此得到 $\alpha_i = \beta_i = 0.055\ 6m_i$. 根据式(2)、式(3)计算加热炉工艺失常故障树各中间事件及顶事件的发生概率,列于表 1 中.

由表 1 可以看出,加热炉工艺失常顶事件的发生概率在 0.943 679~0.963 439 之间,发生在概率

为 0.953 559 时的可能性最大. 在各中间事件中,炉管故障的概率最高,而辐射室炉管故障明显高于对流室. 这主要是因为炉管堵塞或炉内偏烧发生的概率较高,从而造成炉管局部过热. 因此,在加热炉日常巡检和定期检修时,应着重注意炉管的局部过热监测.

4 结 论

采用模糊故障树分析方法,建立了组合式重整加热炉工艺失常故障树,通过定性分析求得 31 个最小割集. 针对传统故障树分析方法的局限性,引入模糊集合理论,采用模糊数表示事件的发生概率. 根据模糊逻辑门的运算法则,定量计算故障树各中间事件及顶事件的发生概率区间,判断薄弱环节,为日常巡检及检修方案的优化提供科学依据. 模糊故障树分析方法减小了获取底事件发生概率精确值的难度,允许统计数据存在一定程度的误差,使得分析结果更接近工程实际,具有更强的灵活性和适应性.

参考文献:

[1] KHAN F I, ABBASI S A. Techniques and methodologies for risk analysis in chemical process industries [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1998, 11(4): 261-277.

[2] 梅启智, 廖炯生. 系统可靠性工程基础[M]. 北京: 科学出版社, 1987:166-195.

[3] 李成栋. 催化重整装置技术问答[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004:113-121.

[4] WOOD A P. Multistate block diagrams and fault trees [J]. IEEE Transactions on Reliability, 1985, 34(3): 236-240.

[5] SINGER D. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1990, 34(2): 145-155.

(编辑 王焕雪)