

文章编号:1674-2869(2012)06-0069-05

门座式起重机臂架折断故障树分析与对策

舒安庆^{1,2}, 张 鹏¹, 丁克勤², 乔 松², 魏化中^{1,2}

(1. 武汉工程大学机电工程学院, 湖北 武汉 430205; 2. 中国特种设备检测研究院, 北京 100013)

摘 要:针对门座式起重机折臂事故时有发生的问题,以门机折臂事故为顶事件建立故障树,并对其进行定性分析和定量分析,得到故障树各底事件的结构重要度、概率重要度,最后计算出各底事件的临界重要度。结果显示门机臂架折断的主要风险源为焊缝开裂、长期交变载荷以及设计制造缺陷等,提出严禁超载、定期检验以及严格按照设计要求制造等预防门座式起重机臂架折断故障的对策。

关键词:门座式起重机;折臂;故障树;风险源

中图分类号:TH213.4

文献标识码:A

doi:10.3969/j.issn.1674-2869.2012.06.018

0 引 言

随着现代化发展的趋势,起重机的作用日益广泛,特别是港口码头、铁路货运场、建筑工地、室内外工矿企业、钢铁化工等地方的大笨重货物的搬运^[1]。然而,起重机械中蕴藏诸多的危险因素,起重机械伤害事故是由多种因素造成的,涉及设计制造、使用维护、安装修理等多个环节。从常见起重机械事故来分,其安全事故归为以下几大类:倾翻事故、重物失落事故、挤伤事故、触电事故及其零件事故等^[2]。门座式起重机这种大型装载机械由于工作环境恶劣,使用频繁、容易过载,折臂事故时有发生。这种事故的发生不仅严重威胁着现场施工人员的生命安全,拖延工作进度,也给企业带来了不可估量的经济损失。

故障树分析法(FAT),直观而明了地对危险性进行分析,逻辑性强,可以做定性分析和定量分析。通过定性分析和定量分析,能够找出一个系统某项故障产生的原因,也可以对最容易导致系统故障的因素进行预测,以提前做好维护保养工作做到防患于未然。体现了它对系统安全问题研究的系统性、准确性和预测性。正是由于故障树分析法的准确性与预测性,它被广泛应用于大型企业的设备健康监测中,结合设备的工作环境等因素,建立故障树,通过分析故障树就能找出设备的危险源。我国从1978年开始,在航空、化工、核工业、冶金、机械等工业企业部门对这一方法进行研究应用。实践表明,事故树分析法是系统安全工程重

要的分析方法之一。为了减少工作量,本文在布尔代数法的基础上用VB开发了故障树定性分析的简易软件,通过运行此程序,工作人员能够对故障树中的各阶割集个数及其所占的比例以及各个底事件的结构重要度一目了然,节省了大量的手工计算时间。

1 门座式起重机折臂事故故障树分析

针对门座式起重机折臂事故建立故障树,并利用软件对其进行定性分析,得出最小割集和结构重要度,然后进行适量的定量分析,从而确定折臂事故中风险等级最高的因素,为防止此类事故的再次发生奠定了基础。

1.1 折臂事故故障树的建立

门座式起重机主臂架结构比较复杂,导致臂架折断的因素也有很多,不仅有使用材料上的问题、设计上的缺陷、工艺缺陷、安全管理方面的问题,也有操作人员失误的因素。通过查阅各方面的资料并结合以往门座式起重机臂架折断事故案例,总结出了导致起重机臂架折断的四个最主要因素:材料问题、臂架锈蚀、焊缝问题和臂架波浪度过大^[3-7]。由此四种主要故障形式逐层深入,进而找到导致臂架折断的11个中间事件和20个基本底事件。根据故障树分析程序^[8],建立起门座式起重机臂架折断事故的故障树,如图1所示,并列出了中间事件和底事件的符号和所代表的含义如表1所示。

收稿日期:2012-05-07

作者简介:舒安庆(1964-),男,浙江宁波人,教授,硕士。硕士研究生导师。研究方向:压力容器压力管道、流体机械和搅拌设备的研究开发、新型高效过程装备及仿真技术。

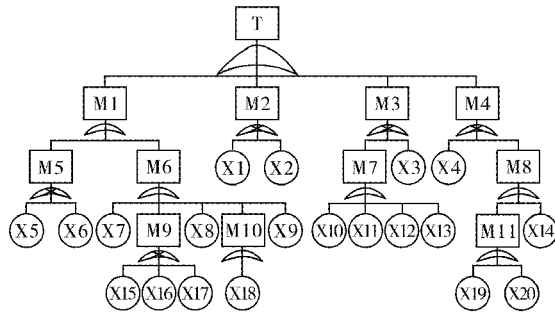


图 1 折臂事故故障树

Fig. 1 Fault tree of arm fold

表 1 门座式起重机折臂事故事件说明

Table 1 Explain event of Gantry crane arm fold

事件代号	事件说明
T	门座式起重机折臂
M1	材料问题
M2	臂架锈蚀
M3	焊缝问题
M4	主臂架波浪度过大
M5	材料初始缺陷
M6	主臂架组成部分问题
M7	焊缝不符合技术要求
M8	应力分布不均匀
M9	纵筋板失效
M10	臂架变幅铰接点附件失效
M11	结构不合理
X1	臂架表面锈蚀
X2	臂架内部加强肋锈蚀
X3	焊缝开裂
X4	长期交变载荷影响
X5	有初始挠度
X6	强度不够
X7	横隔板变形
X8	腹板撕裂
X9	翼板失稳
X10	筋、隔板焊缝长度不符合要求
X11	筋隔板焊缝间应力过大
X12	存在焊接参与应力
X13	有夹渣、气孔、热烈、漏焊及未焊透等
X14	接头设计造型问题
X15	纵筋板弯曲变形
X16	纵筋板刚度不够
X17	筋纵板脱焊
X18	受力复杂导致折断
X19	筋板间距过大
X20	纵横向加强肋板布局不合理

1.2 故障树的定性分析

定性分析在故障树分析中占有相当重要的地位. 它目的是分析某事故的发生规律及特点, 结合分析找出控制该事件的可行性方案, 并分析故障树中各底事件的重要程度, 以便按轻重缓急分别

采取针对性的策略. 定性分析主要就是计算事故树的最小割集及各基本事件的结构重要度.

最小割集就是导致顶事件发生所必须的、最低限度的基本事件的集合. 求解出最小割集是为了掌握事故发生的各种可能性, 了解系统危险性, 为事故预防和调查分析提供理论依据. 由最小割集的定义知, 每个最小割集就是顶事件发生的一种可能. 因此, 故障树中有多少个最小割集, 顶上事件的发生就有多少种可能, 最小割集越多, 顶上事件发生的可能性就越多, 系统就越危险.

结构重要度分析是从故障树入手分析各底事件的重要程度, 它是在不考虑(或者认为各底事件发生概率相同)底事件发生概率的前提下分析底事件的发生对顶事件发生的影响程度.

运用布尔代数法, 对以上故障树进行简化得到该故障树的布尔代数表达式:

$$T = X5X6 + X7 + X15X16X17 + X8 + X18 + X9 + X1X2 + X3X10 + X3X11 + X3X12 + X3X13 + X4X19 + X4X20 + X4X14$$

将上式和底事件以文本文档的形式导入软件中即得到最小割集及各底事件的结构重要度如图 2 所示, 结构重要度如表 2 所示.

表 2 失效树底事件结构重要度

Table 2 Important degree of bottom events

底事件代号	底事件	结构重要度
X3	焊缝开裂	2.000
X4	长期交变载荷影响	1.500
X9	翼板失稳	1.000
X8	腹板撕裂	1.000
X7	横隔板变形	1.000
X18	受力复杂导致折断	1.000
X6	强度不够	0.500
X5	有初始挠度	0.500
X20	纵横向加强肋板布局不合理	0.500
X2	臂架内部加强肋锈蚀	0.500
X19	筋板间距过大	0.500
X14	接头设计造型问题	0.500
X13	有夹渣、气孔、热烈、漏焊及未焊透等	0.500
X12	存在焊接参与应力	0.500
X11	筋隔板焊缝间应力过大	0.500
X10	筋、隔板焊缝长度不符合要求	0.500
X1	臂架表面锈蚀	0.500
X17	筋纵板脱焊	0.333
X16	纵筋板刚度不够	0.333
X15	纵筋板弯曲变形	0.333

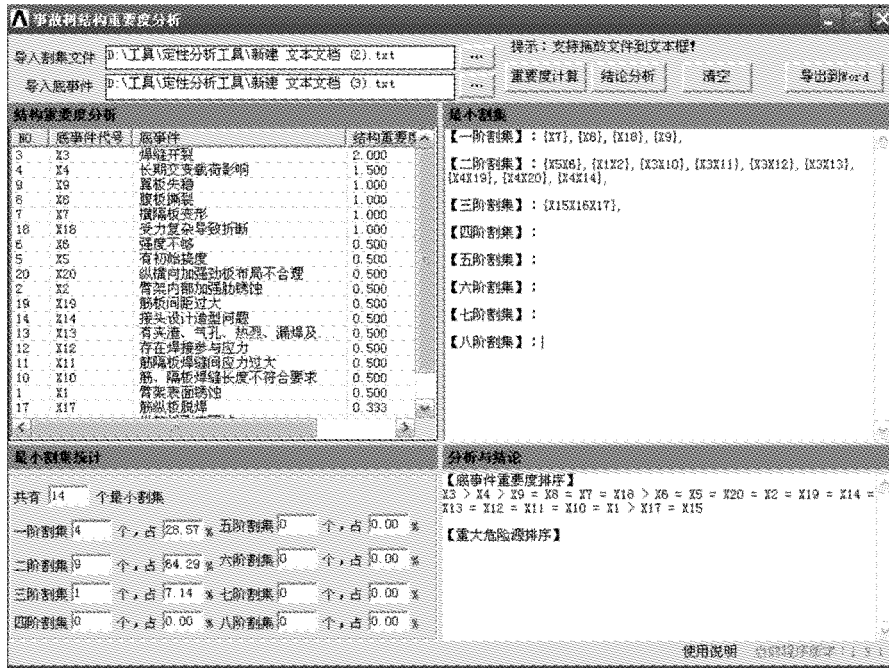


图2 最小割集计算软件

Fig.2 Software to calculate minimum cut set

从上述软件分析计算可知,门座式起重机折臂事故失效树的全部最小割集共有14个,其中,一阶割集(只包含一个底事件的割集)4个,占总数的28.57%,二阶割集(包含两个底事件的割集)9个,占总数的64.29%,三阶割集(包含三个底事件的割集)1个,占总数的7.14%。

【一阶割集】: {X7}, {X8}, {X18}, {X9}。

【二阶割集】: {X5X6}, {X1X2}, {X3X10}, {X3X11}, {X3X12}, {X3X13}, {X4X19}, {X4X20}, {X4X14}。

【三阶割集】: {X15X16X17}。

【底事件重要度排序】:

$X3 > X4 > X9 = X8 = X7 = X18 > X6 = X5 = X20 = X2 = X19 = X14 = X13 = X12 = X11 = X10 = X1 > X17 = X15$

1.3 故障树的定量分析

故障树定量分析的任务是:在已知基本事件发生概率的情况下,计算系统顶上事件发生的概率、各基本事件的概率重要度及临界重要度,并以此为依据,综合考虑各底事件的重要性,为重大危险源的辨识提供定量资料^[9]。

1.3.1 顶事件的发生概率 顶事件的发生概率就是故障树顶事件发生的可能性的,它的大小与各底事件的发生概率有直接的关系,其计算公式如下:

$$g = \sum_{r=1}^k \prod_{x_i \in G_r} q_i - \sum_{1 \leq r \leq s \leq k} \prod_{x_i \in G_r \cup G_s} q_i +$$

$$\sum_{1 \leq r \leq s \leq t \leq k} \prod_{x_i \in G_r \cup G_s \cup G_t} q_i + \dots + (-1)^{k-1} \prod_{x_i \in G_r} q_i$$

式中: r, s, t ——最小割集的序号;

k ——最小割集的个数;

$\sum_{r=1}^k \prod_{x_i \in G_r} q_i$ ——每个最小割集中的基本事件的概率之积的代数;

$\sum_{1 \leq r \leq s \leq k} \prod_{x_i \in G_r \cup G_s} q_i$ ——属于任意两个最小割集并事件中的基本事件之概率积的代数;

$\sum_{1 \leq r \leq s \leq t \leq k} \prod_{x_i \in G_r \cup G_s \cup G_t} q_i$ ——属于任意三个最小割集并集事件中基本事件的概率积的代数;

$\prod_{r=1}^k \prod_{x_i \in G_r} q_i$ —— k 个最小割集里基本事件的概率积;

$x_i \in G_r$ —— i 事件属于 r 最小割集;

$x_i \in G_r \cup G_s$ —— i 事件属于 r 最小割集或 s 最小割集。

查阅并参考各种相关资料数据,给出各底事件发生的概率,如表3所示。

由于计算顶上事件发生概率的精确解的计算量相当大,而且设备的底事件因运行条件、运行环境以及人为的因素等导致底事件发生概率不是很精确,所以运用顶上事件近似计算方法不仅比较方便而且有一定的精确度。按照平均近似法取上面计算顶事件公式的第一项(令其为 F_1)与第二项的一半(令其为 $\frac{1}{2}F_2$)作为顶上事件的近似值,

即有

表 3 底事件发生概率

Table 3 Probability of the bottom events

底事件代号	发生概率
X1	0.004
X2	0.003
X3	0.03
X4	0.03
X5	0.005
X6	0.000 04
X7	0.002
X8	0.002
X9	0.003
X10	0.000 5
X11	0.001
X12	0.001
X13	0.002
X14	0.000 003
X15	0.004
X16	0.000 02
X17	0.02
X18	0.001
X19	0.000 2
X20	0.000 2

$$g = F_1 - \frac{1}{2}F_2$$

经计算得

$$g = 3.5 \times 10^{-2}$$

该计算结果仅供参考。

1.3.2 计算各底事件的临界重要度 一般情况下用来衡量底事件重要度的指标有结构重要度和临界重要度。前面定性分析中已经给出了各底事件的结构重要度。临界重要度是考虑事故频率即严重度,它从敏感度和自身概率大小的双重角度反映了基本事件的重要程度,即从本质上反映了各底事件在故障树中的重要度。临界重要度是各底事件发生的改变量与顶事件发生概率的改变量之比之间的关系,第 i 个基本事件的临界重要度系数计算式为

$$I_c(i) = \frac{\frac{\partial g}{\partial \ln q_i}}{\frac{\partial g}{\partial q_i}} = \frac{q_i}{g} I_g(i)$$

顶上事件发生概率对基本事件 i 发生的变化率为

$$I_g(i) = \frac{\partial g}{\partial q_i}$$

通过计算得出各底事件的临界重要度,将其排序如表 4 所示。

表 4 底事件临界重要度

Table 4 Critical importance of bottom events

底事件代号	临界重要度
X1	$2.205 4 \times 10^{-4}$
X2	$1.102 7 \times 10^{-4}$
X3	$2.688 1 \times 10^{-2}$
X4	$3.332 8 \times 10^{-4}$
X5	$2.205 3 \times 10^{-6}$
X6	$1.654 0 \times 10^{-8}$
X7	0
X8	0
X9	0
X10	$4.135 1 \times 10^{-4}$
X11	$8.270 3 \times 10^{-4}$
X12	$8.270 3 \times 10^{-4}$
X13	$1.654 1 \times 10^{-2}$
X14	$2.481 0 \times 10^{-6}$
X15	$4.410 7 \times 10^{-8}$
X16	$4.410 7 \times 10^{-7}$
X17	$4.410 6 \times 10^{-8}$
X18	0
X19	$1.654 1 \times 10^{-4}$
X20	$1.654 0 \times 10^{-4}$

2 故障树分析结论

从表 4 中可以看出,底事件的临界重要度越大,表示其危险重要度越高,它的发生就越容易导致顶上事件发生。根据数量级的不同,把表中的数据分为四组,第一组 X3(焊缝开裂),X13(有夹渣、气孔、热烈、漏焊及未焊透等)等原因临界重要度最高,是导致门座式起重机折臂事故发生比较重要的风险因素。而焊缝开裂的直接原因又是 X4(长期交变载荷)。第二组 X1、X2、X4、X10、X11、X12、X19 和 X20 均属工艺造型因素,它们的临界重要度低于第一组,这说明它们的危险重要度较第一组低。第三组 X16 临界重要度低于第二组,而第四组 X6、X15、X17 为表中数量级最低的底事件,说明这几个基本事件是该系统中危险度最低的基本事件即最不容易导致顶事件发生的事件。表中这四组底事件的临界重要度依次递减,危险重要度也依次递减。从上面的分析可知,门座式起重机臂架折断事故要从人为因素以及工艺造型因素对其进行控制。下面根据门机折臂事故各底事件的临界重要度表给出预防门座式起重机折臂事故发生的主要措施:

① 严禁超载,一定要在起重机的额定载荷范围内工作;

② 定期检验,及时发现存在安全隐患的地方

并改进;

③ 严格按照门座式起重机臂架的设计要求进行设计制造适当增加臂架上下盖板厚度以降低工作应力;

④ 定期进行安全教育,增强安全意识,严格管理;

⑤ 做好起重机表面防腐蚀工作,对长期暴露在外的钢结构进行必要的防腐蚀处理。

参考文献:

- [1] 李菁,靳慧,丁克勤. 300 t 造船龙门起重机结构动力特性分析[J]. 武汉理工大学学报,2010,32(6):54-58.
- [2] 田复兴. 起重机械安全管理使用指南[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [3] 段天宏,张小永,陆后军. 门座式起重机的脱钩事故故障树分析与对策研究[J]. 现代机械,2006(4):43-45.
- [4] 倪叶明. 防止门机臂架折断事故的3个关键[J]. 港口机械,1999(9):13-14.
- [5] 沈家桢. 具有初挠度的四边简支带纵向加劲板受压实验研究——门座式起重机臂架失稳在线检测原理[J]. 上海海运学院学报,1996(1):24-30.
- [6] 宓为建,马捷,赵成. 门座式起重机主臂架折断的原因分析[J]. 振动、测试与诊断,1999(1):54-57.
- [7] 孙昌之. 港口门座式起重机臂架弯折事故分析[J]. 起重运输机械,1996(1):35-36.
- [8] GB7829-87. 故障树分析程序[S].
- [9] 樊运晓,罗云. 系统安全工程[M]. 北京:化学工业出版社,2009.

Fault tree analysis and countermeasures of gantry crane arm fold accident

SHU An-qing^{1,2}, ZHANG Peng¹, DING Ke-qin², QIAO Song², WEI Hua-zhong^{1,2}

(1. School of Mechanical and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: To prevent the accidents of gantry crane arm folding occurring frequently, gantry crane arm fold was used as the top event to set up a fault tree. By qualitative analysis and quantitative analysis, the structure importance and probability importance of the bottom event were obtained, and the critical importance was calculated. The results show that the risk sources of the trouble are weld failure, long-term cyclic load and design flaw etc. We put forward countermeasures of non-overloading, periodic inspection and strictly according to the design requirements for manufacturing.

Key words: gantry crane; arm fold; fault tree; risk source

本文编辑:陈小平