

文章编号: 1674-2869(2013)06-0062-05

事故树分析法在港机故障检测中的应用

舒安庆¹, 张鹏¹, 丁克勤², 乔松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:采用事故树分析法(ATA)对门座式起重机的潜在危险源进行辨识,以门座式起重机事故为顶上事件,从“倒塌”和“货物坠落”两类典型事故入手,层层深入,寻找导致顶上事件发生的原因,建立事故树.按照事故树中各事件的逻辑关系,运用布尔代数法简化事故树得到其代数表达式,然后对事故树进行定性分析,得到事故树的最小割集,计算出最容易导致顶上事件发生的一阶割集的结构重要度,并对其进行排序.结果显示导致门座式起重机事故的主要危险源为超负荷工作、焊缝开裂、设计制造安装缺陷以及操作不当等问题,提出在额定载荷下工作、严格按照国标设计制造安装以及定期检修等预防门座式起重机此类事故发生的对策.

关键词:门座式起重机;事故树;危险源

中图分类号: TH213.4

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1674-2869.2013.06.012

0 引言

随着加入世贸组织的不断深入化,我国逐渐成为进出口贸易大国.据网上资料显示,2012年前8个月,我国进口贸易额达13 091亿美元,出口11 885亿美元^[1].港口机械在日益壮大的对外贸易中所起的作用越来越重要.然而港口机械中,门座式起重机所占的比重在一半以上,因此,港口门座式起重机的安全正常运行是我国对外贸易顺利进行的关键所在.但如今,经常听到有关门座式起重机发生事故的报道,这些事故的发生,给国家带来巨大的损失.港口门座式起重机这种结构复杂,体积庞大的装载机械由于工作环境恶劣,各个部件都有可能存在潜在隐患.因此,对港口门座式起重机进行系统的危险源辨识,在事故发生前采取预防措施,做到防患于未然是十分必要的.

事故树分析(accident tree analysis,简称ATA)法起源于故障树分析法(简称FTA),是一种演绎的安全系统分析方法,是以人们对从结果推断可能原因的思维方法为基础而发展起来的分析方法,只抓住一个特殊的事故进行原因分析,而不论这一事故是否真正发生,通过一整套科学有效的方法找出对事故发生起作用的基本原因(基本事件),即可实现对引发事故的各种基本原因进

行分析.它能够直观的分析出危险性所在,逻辑性很强,可以做定性分析、定量分析^[2].

1 门座式起重机事故树的建立

结合门座式起重机的工作环境以及事故案例^[3-4],以“门座式起重机事故”作为顶上事件,二级中间事件以“倒塌”和“货物坠落”为主,按照事故树建立的方法^[5],经过逐层寻找上层事件的原因,层层深入,直到不能再分(底事件).根据这两种主要事故模式,共找出导致顶上事件发生的原因包括120个中间事件和186个底事件.最后把这些中间事件和底事件用逻辑符号连接起来即建立起了门座式起重机的事故树,如图1所示.并列出了部分中间事件及底事件(由于中间事件和底

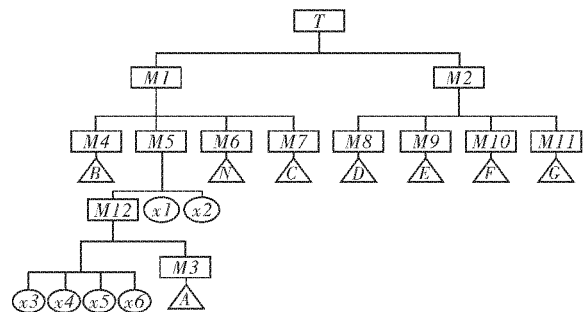


图1 门座式起重机事故树

Fig. 1 Accident tree of gantry crane accident

收稿日期: 2013-04-19

基金项目: 十二五国家支撑计划课题(2011BAK06B01-13)

作者简介: 舒安庆(1964-),男,浙江宁波人,教授,硕士.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.

事件比较多,这里只列出了部分中间事件和一阶割集的所有底事件)的符号以及所代表的含义,如表 1 所示。

表 1 事故树事件代号及事件说明

Table 1 Explain event of gantry crane accident

代号	事件说明	代号	事件说明	代号	事件说明
M1	倒塌	X59	自重不合格	X158	照明电路故障
M2	货物坠落	X65	制动过程振动太大	X159	电磁铁电源线进端口不正确
M3	防风装置失效	X66	冲撞其他物体	X160	切断电源电磁铁断电(应不断电)
M4	操作问题	X67	吊物重心不稳	X161	无备用电源
M5	自然灾害	X70	质量缺陷	X162	控制器不动作
M6	啃道	X71	强度不够	X163	轴变形
M7	金属结构失效	X72	捆绑不牢	X164	轴断裂
M8	吊钩问题	X73	挂钩方法错误	X167	温度过高
M9	钢丝绳问题	X74	无防脱钩装置	X168	硬物进入摩擦面
M10	折臂	X83	吊钩表面裂纹	X170	制动轮与制动片接触问题
X1	洪灾	X84	吊钩螺纹处因应力集中产生的裂纹	X171	制动器推动器故障
X2	地震	X88	扭转变形超过 10%	X172	超速保护装置故障
X25	无超速保护装置	X89	危险面和吊钩颈部产生塑性变形	X173	起升、下降限位器故障
X26	超速保护装置失灵	X90	吊钩锈蚀	X174	行走驱动轮直径有差别
X31	存有侥幸心理	X117	起动、制动过猛	X175	行走轮之间距离不相等
X34	起升高度限位器失效	X126	压板个数不够	X176	车轮的水平偏斜过大
X43	平衡系统不达标	X127	压板上螺钉松动	X177	车轮有垂直偏斜
X44	尾重过重	X128	无防脱绳装置	X178	驱动不同步造成门机跑偏
X45	尾重过轻	X133	横隔板变形	X179	行走轮内圆锥滚子轴承损坏或 轴承间隙过大
X49	长期满载荷工作	X137	腹板撕裂	X180	轮距误差太大
X51	铰接处脱落	X138	翼板失稳	X181	轮道顶部高低偏差太大
X52	焊缝开裂	X139	受力复杂导致折断	X182	坡度太大
X53	结构不合理	X150	系统压力不足	X183	轨道纵向直线度超过允许误差
X54	大拉杆断裂	X153	控制柜故障	X184	轨道接头高低误差过大
X55	象鼻梁断裂	X154	电阻器问题	X185	转盘开裂
X56	主臂梁断裂	X155	照明装置问题	X186	润滑不良
X57	交变应力导致裂纹扩展	X156	馈电装置故障		
X58	铰点安装不合理	X157	电路保护装置故障		

2 事故树的定性分析

定性分析是事故树的核心内容,其目的是分析该类型事故的发生规律及特点,经过专家讨论分析找出控制事故的可行方案.其主要内容包括:求解事故树的最小割集、基本事件的结构重要度以及制定预防事故的措施^[6].

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,事故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^[7].

结构重要度分析是从事故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.

2.1 求最小割集

对事故树进行定性分析首先需要将事故树进行简化,运用布尔代数法化简后得到事故树的代

数表达式:

$$T =$$

$$M4 + M5 + M6 + M7 + M8 + M9 + M10 + M11$$

由于此事故树的底事件比较多,通过人工计算得到最小割集和各底事件的结构重要度的计算

量十分大,因此,运用本实验室自己编写的进行事故树定性分析的简易软件进行分析.运用此软件只需将事故树的代数表达式及底事件以文本文档的形式导入即可完成大量的计算工作.软件界面如图 2 所示.



图 2 最小割集计算软件

Fig. 2 Software to calculate minimum set

由图 2 可知,门座式起重机事故树共有 199 个最小割集,其中,一阶割集(只包含一个底事件的割集)72 个,占总数的 36.18%,二阶割集(包含两个底事件的割集)63 个,占总数的 31.66%,三阶割集(包含三个底事件的割集)55 个,占总数的 27.64%,四阶割集(包含四个底事件的割集)4 个,占总数的 2.01%,五阶割集(包含五个底事件的割集)0 个,占总数的 0.00%,六阶割集(包含六个底事件的割集)2 个,占总数的 1.01%,七阶割集(包含七个底事件的割集)3 个,占总数的 1.51%。因为每一个割集就是顶上事件发生的一种可能性,所以本事故树顶上事件发生的可能性共有 174 种.而且,最小割集的阶数越低,就越容易导致顶

上事件发生.因此,事故树中的 72 个一阶割集为本事故树的薄弱环节,应当引起管理人员的重视.

2.2 一阶割集中底事件的结构重要度

通过求最小割集,找出了事故树的 72 个最容易导致顶上事件发生的重大危险源(即一阶割集),计算它们的结构重要度,并对一阶割集进行结构重要度排序,能够看出这些重大危险源里面对系统可靠性影响的大小,以便维修保养人员更加注意这些环节.结构重要度的计算方法是将每个最小割集赋值 1,然后平均分配给该最小割集里的每个底事件,最后累加起来得到每个底事件的结构重要度.本事故树一阶割集的结构重要度如表 2 所示.

表 2 一阶割集结构重要度
Table 2 Structure importance of the first cut set

代号	结构重要度	代号	结构重要度	代号	结构重要度	代号	结构重要度
X1	1.000	X59	1.000	X133	1.000	X168	1.000
X2	1.000	X65	1.000	X137	1.000	X170	1.000
X25	1.000	X66	1.000	X138	1.000	X171	1.000
X26	1.000	X67	1.000	X139	1.000	X172	1.000
X31	1.500	X70	1.000	X150	1.000	X173	1.000
X34	1.000	X71	1.000	X153	1.000	X174	1.000
X43	1.000	X72	1.000	X154	1.000	X175	1.000
X44	1.000	X73	1.500	X155	1.000	X176	1.000
X45	1.000	X74	1.000	X156	1.000	X177	1.000
X49	6.083	X83	1.000	X157	1.000	X178	1.000
X51	1.000	X84	1.000	X158	1.000	X179	1.000
X52	3.500	X88	1.000	X159	1.000	X180	1.000
X53	2.000	X89	1.000	X160	1.000	X181	1.000
X54	1.000	X90	1.000	X161	1.000	X182	1.000
X55	1.000	X117	1.500	X162	1.000	X183	1.000
X56	1.000	X126	1.000	X163	1.000	X184	1.000
X57	1.500	X127	1.000	X164	1.000	X185	1.000
X58	1.000	X128	1.000	X167	1.000	X186	1.000

按上述方法计算出每个一阶割集的结构重要度的数值如表 2 所示,并对重大危险源排序如下:

$X49 > X52 > X53 > X73 = X57 = X31 = X117 > X90 = X89 = X88 = X84 = X83 = X74 = X72 = X71 = X70 = X67 = X66 = X65 = X59 = X58 = X56 = X55 = X54 = X51 = X45 = X44 = X43 = X34 = X26 = X25 = X26 = X186 = X185 = X184 = X183 = X182 = X181 = X180 = X179 = X178 = X177 = X176 = X175 = X174 = X173 = X172 = X171 = X170 = X168 = X167 = X164 = X163 = X162 = X161 = X160 = X159 = X158 = X157 = X156 = X155 = X154 = X153 = X150 = X139 = X138 = X137 = X133 = X128 = X127 = X126 = X1$

由定义可知,一阶割集是最容易导致顶上事件发生的基本事件,为重大危险源,而在这些重大危险源中,结构重要度值越高的,对顶上事件的影响就越大.所以,在预防类似事故发生时,就应该把这些事件作为重点防范对象.

2.3 事故树定性分析结论与对策

从一阶割集可知,门座式起重机的 72 个危险源涉及到门座式起重机的设计、制造、安装、维护保养及操作等环节.其中,设计、安装及维护保养

方面的原因占了很大的比重.而在以上几个方面中,X49、X52、X53、X73、X57、X31、X117 这 7 个基本事件的结构重要度值较大,为本事故树的主要重大危险源,应该特别引起门机制造使用方的注意.针对以上重大危险源,为使门座式起重机的长期安全正常运行给出以下几个方面的措施:

1)在有设计制造资质的前提下,严格按照门座式起重机的国家设计标准设计制造.保证各种受力部件的结构合理.

2)选材要合格,尽量避免材料的原始缺陷.如避免材料有初始裂纹或者初始挠度等.

3)安装的各个环节一定要符合安装要求,确保在误差范围内精确安装.

4)聘请有操作资历且经验丰富的操作人员操作.合理调运,不超载、不超速,正确吊运.

5)定期检查起重机的各种电气制动装置以及报警系统,对于失效的装置及时给予更换.

6)严格按照起重机的检验时间、检验项目进行检验,不拖检、不漏检,检验不合格的及时处理.并做好运行期间的维护保养工作.对于焊缝处要严格检查,存在裂纹的地方要及时维修或更换,以免交变应力导致裂纹扩展.

3 结 语

通过对门座式起重机可能发生的事故建立事故树,求出该事故树的 199 个最小割集,其中最容易导致顶上事件发生的一阶割集 72 个,计算出其结构重要度并排序,最终确定了导致门座式起重机常见事故“倒塌”和“货物坠落”的重大危险源并提出相应的预防及改进措施,为预防和避免门座式起重机此类事故发生提供了有力依据.从而保证其安全正常运行.

致谢

感谢中国特种设备检测研究院提供的项目支持.

参考文献:

- [1] 中研普华报道. 2012 年 1—8 月我国进出口贸易额累计分析[EB/OL]. <http://www.chinairn.com/news/20120912/948391.html>. 2012-09-12.
Import and export trade in China in August 1—2012 cumulative analysis[EB/OL]. Zhongyan PWC <http://www.chinairn.com/news/20120912/948391.html>, report. 2012-09-12.
- [2] 景国勋,施式亮. 系统安全评价与预测[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2009.
JING Guo-xun, Shi Shi-liang. System safety assessment and prediction[M]. Xuzhou: China University

- of Mining Technology Press,2009. (in Chinese)
- [3] 庞旭东. 门座式起重机的事故分析和安全管理[J]. 中国科技博览,2010(34):521-522.
PANG Xu-dong. The portal crane accident analysis and security management [J]. China Science and Technology Review, 2010 (34): 521-522. (in Chinese)
- [4] 王福锦. 起重机械事故预防与故障分析[M]. 北京:北京理工大学出版社,2008.
WANG Fu-jing. Accident prevention and fault analysis of hoisting machinery[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press,2008. (in Chinese)
- [5] 中国国家标准化管理委员会. GB7829. 故障树分析程序[S]. 北京:中国国家标准出版社,1987.
China national standardization management committee. GB7829. Procedure for fault tree analysis [S]. Beijing: China national standardization management Press,1987. (in Chinese)
- [6] 樊运晓,罗云. 系统安全工程[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
FAN Yun-xiao, Luo Yun. System safety engineering [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [7] 舒安庆,张鹏. 门座式起重机臂架折断故障树分析与对策[J]. 武汉工程大学学报,2012,34(6):69-73.
SHU An-qing, Zhang Peng. Fault Tree Analysis and Countermeasures of Gantry Crane Arm Fold Accident[J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2012, 34(6): 69-73. (in Chinese)

Application of accident tree analysis in portmachinery fault detection

SHU An-qing, ZHANG Peng, DING Ke-qin, QIAO Song

- (1. School of Mechanical and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China
2. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: A method based on accident tree analysis (ATA) was proposed to identify and prevent the potential hazards of the gantry crane. The portal crane accident was seemed as a top event. Starting with two kind of major accidents such as collapse and falling, the reason that cause the top event was found and the accident tree was established by the layers of depth. According to the logical relationship of each event in the accident tree, the Boolean method was used to simplify the accident tree and the Algebraic expressions were got. Though using the qualitative analysis of fault tree, the minimum cut set of it was obtained. Then the structural important degree of cut set, which easily cause the top event of first order, was calculated and carried on the sorting. The results show that the risk resource of accident hazards of portal crane are overload, welding crack, defects of design and manufacture installation and improper operation. The countermeasures of working under rated load, design and manufacture installation in strict accordance with the national standard and periodic inspection are put forward to prevent this kind of accident to happen.

Key words: gantry crane; accident tree; risk source

本文编辑:陈小平