

doi: 10.7690/bgzdh.2019.05.022

# 故障树分析法在某型扬弹机锁定机构曲柄断裂故障中的分析应用

郭周南

(中国船舶重工集团公司第七一三研究所, 郑州 450015)

**摘要:** 为有效解决装备出现的问题, 采用故障树分析法, 对在调试中出现的扬弹机锁定机构曲柄断裂故障进行分析, 找到造成故障的原因, 绘制故障树, 找出影响故障各原因之间的逻辑关系。通过定性分析和定量计算, 确定故障树的最小割集, 计算顶事件发生的概率和各割集发生的概率等参数, 并分析各原因故障的影响程度。该研究可为高效解决故障提供依据。

**关键词:** 锁定机构曲柄断裂故障; 故障树分析法; 定性分析; 定量计算

**中图分类号:** TJ391 **文献标志码:** A

## Analysis and Application of Fault Tree Analysis in Crank Fracture Fault of Certain Type Locking Mechanism of Projectile Hoist

Guo Zhounan

(No. 713 Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Zhengzhou 450015, China)

**Abstract:** In order to effectively solve the problems of equipment, the fault tree analysis method is used to analyze the crank fracture fault of the locker locking mechanism that appears in the commission. Find the cause of the failure, draw a fault tree, and find out the logical relationship between the causes of the failure. Through qualitative analysis and quantitative calculation, the minimum cut set of the fault tree is determined, the probability of occurrence of the top event and the probability of occurrence of each cut set are calculated, and the influence degree of each cause fault is analyzed. This research can provide a basis for efficient troubleshooting.

**Keywords:** crank fracture fault of a locking mechanism; fault tree analysis (FTA); qualitative analysis; qualitative calculation

### 0 引言

随着我国海军装备的增速发展, 对装备的可靠性要求也随之提高<sup>[1]</sup>。由于舰炮武器包括机械、液压、电气系统, 结构复杂, 任何一个系统出现问题都会降低装备的可靠性; 所以, 对装备出现的故障进行合理分析, 并找到对故障影响较大的因素, 进行有效解决, 便可以很好地提高装备的可靠性。

故障树分析法<sup>[2-4]</sup> (fault tree analysis, FTA) 是一种由出现的结果(顶事件)找到造成其原因(底事件)的分析方法。其中, 顶事件是所研究系统最不希望出现的情况。底事件是产生顶事件的中间事件发生的全部直接因素。该方法通过定性分析和定量计算, 可以很好地分析出各底事件对顶事件的影响, 具有准确、高效、形象等特点, 在故障分析中得到了广泛应用<sup>[5-7]</sup>。

在某型舰炮的调试过程中, 出现了扬弹机锁定机构曲柄断裂的故障。采用故障树分析法对出现的问题进行分析, 就是将扬弹机锁定机构曲柄断裂故

障作为顶事件, 通过分析造成该故障的原因, 建立故障树, 形成造成该故障原因的逻辑关系图, 对各原因进行定性分析和定量计算, 找到对顶事件影响较大的原因, 为锁定机构曲柄断裂故障的解决提供依据。

### 1 故障树分析

#### 1.1 定性分析

定性分析<sup>[8]</sup>的目的在于: 寻找导致顶事件发生的故障模式, 即找到导致顶事件发生的原因和原因组合。通过最小割集, 可以分析系统的故障原因, 判断系统的薄弱环节, 从而提供适宜的维修和改进方案。

所谓割集和最小割集<sup>[9-10]</sup>指: 在故障树中, 若一些底事件同时发生导致顶事件必然发生, 则这些底事件组成的集合, 称为该故障树的一个割集。在一个割集中, 若去掉任意一个底事件就不再是割集, 则这个割集称为该故障树的最小割集。

收稿日期: 2018-12-11; 修回日期: 2018-12-29

作者简介: 郭周南(1991—), 女, 河南人, 硕士, 助理工程师, 从事舰炮装备设计研究。

### 1.2 定量计算

定量计算<sup>[8]</sup>的目的: 计算顶事件发生的概率, 以及通过计算底事件的概率重要度和关键重要度, 分析底事件发生故障对顶事件发生的影响大小。分析出哪些故障解决后, 顶事件发生的概率会大大下降。

#### 1) 顶事件发生的概率。

已知某故障树具有  $n$  个最小割集  $K_1, K_2, \dots, K_n$ , 假设该故障树各底事件相互独立, 且最小割集彼此之间不相交。那么该故障树顶事件发生的概率为

$$P(T) = \sum_{j=1}^n \left( \prod_{i \in K_j} F_i(t) \right) \quad (1)$$

其中:  $F_i(t)$  为  $t$  时刻第  $j$  个最小割集中第  $i$  个部件故障的概率;  $n$  为最小割集数。

#### 2) 概率重要度。

该参数表征了某底事件概率的增加或者减少对顶事件概率的影响程度。某底事件的概率重要度计算公式为:

$$I_i^{Pr} = \frac{\partial g(Q(t))}{\partial Q_i(t)} \quad (2)$$

其中  $Q$  为系统的不可靠度。

#### 3) 关键重要度。

该参数型结构和概率上表征了某底事件改善的难易程度。某底事件关键重要度的计算公式为

$$C_i^{Cr} = \frac{Q_i(t)}{g(t)} I_i^{Pr} \quad (3)$$

## 2 某型扬弹机锁定机构曲柄断裂故障

### 2.1 故障模型

该扬弹机锁定机构模型简化图如图 1 所示。滑块 1 代表缓冲机构, 滑块 2 代表锁定机构。当弹药作用于缓冲机构, 并随之以  $v_1$  的速度运动时, 连杆 1 带着曲柄顺时针运动, 使连杆 2 带动锁定机构以  $v_2$  运动, 实现锁定功能。

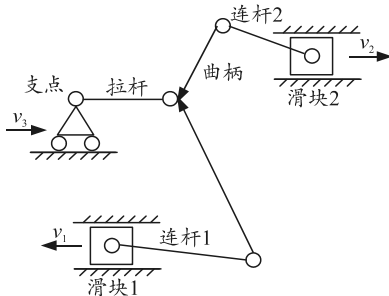


图 1 扬弹机锁定机构模型

通过调整曲柄支点位置, 可以调整锁定时机。

某次试验发现锁定时机过早, 故将支点的位置向上调整(图示右侧方向)。结果导致支点与其连接机构解脱后, 拉杆继续向下运动(图示左侧方向)时受到较大的反作用力。

### 2.2 故障树建立的前提条件

假设扬弹机锁定机构曲柄断裂故障各个模式相互独立, 且事态仅分为发生或者不发生 2 种状态。存在的故障模式 = { $T, M_1, M_2, M_3, M_4, X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7, X_8$ }, 经专家分析讨论, 并对各故障事件发生概率统计计算, 得到各故障模块及其发生概率如表 1 和表 2 所示。

表 1 故障树中事件说明

符号	事件	备注
$T$	扬弹机锁定机构曲柄断裂	顶事件
$M_1$	曲柄受到异常外力	中间事件
$M_2$	锁定机构拉杆传递异常外力	中间事件
$M_3$	多项机构连杆传递异常外力	中间事件
$M_4$	上缓冲机构连接杆传递异常外力	中间事件
$X_1$	曲柄制造缺陷	底事件
$X_2$	摆弹机钩子弹簧力偏大	底事件
$X_3$	摆弹机钩子到极限位	底事件
$X_4$	摆弹机钩子拉杆卡滞	底事件
$X_5$	弹簧顶杆让位槽偏小	底事件
$X_6$	弹簧顶杆顶住拉杆头部	底事件
$X_7$	上口位挡块位置高	底事件
$X_8$	锁定时机过早	底事件

表 2 故障树中事件发生概率

模块号	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7$	$X_8$
发生概率	0.06	0.05	0.04	0.05	0.03	0.04	0.05	0.05

### 2.3 故障树的建立

通过分析各故障模式之间的关系, 按照以下步骤建立某型扬弹机锁定机构曲柄断裂故障的故障树。

#### 1) 确定故障树的顶事件。

在充分了解该机构工作原理的基础上, 确定系统最不希望发生的情况为故障树的顶事件。顶事件具有 2 个特征: ① 该事件是否发生, 直接影响系统是否能够正常工作; ② 该事件可以根据逻辑进一步分析, 找到导致其发生的直接原因或者间接原因。

#### 2) 确定故障树的所有底事件。

按照自顶向下的分析方式, 首先分析造成顶事件发生的原因。若不能再进一步分析造成某个原因发生的下一级原因, 该原因是造成故障的底事件; 反之, 该原因是造成故障的中间事件, 需要进一步分析造成这个中间事件的原因, 直至找到造成故障的底事件为止。

#### 3) 分析故障树的逻辑关系。

在分析造成顶事件或者中间时间的下一级原因中，需要分析这个或者这些原因与顶事件或者中间事件的逻辑关系。逻辑关系包括：逻辑与门和逻辑或门。逻辑与门表示某事件以下的事件同时发生，该事件才会发生；逻辑或门表示某事件以下的事件任意一个发生，该事件就会发生。

故障树中各图形所表示的意义如表 3 所示，所建立的故障树模型如图 2 所示。

表 3 故障树中符号含义

序号	图形	说明
1		顶事件或中间事件
2		或门逻辑符号，表示其下面的任意一件事件发生，其上面的事情就发生
3		与门逻辑符号，表示其下面的事件发生同时发生，其上面的事情才发生
4		底事件或基本事件

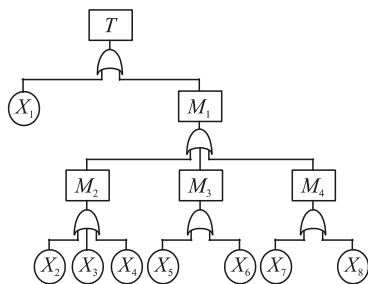


图 2 故障树模型

## 2.4 故障树分析

### 2.4.1 故障树的定性分析

故障树最小割集的求解方法有上行法和下行法，求解结果相同。笔者采用下行法的求解方式求解该故障树的最小割集。下行法是按照故障树的逻辑关系，从故障树的顶端(顶事件)入手，至故障树的底端(底事件)。逻辑与门的输出事件水平排列在表格中，逻辑或门的输出事件竖直排列在表格中，直到全部事件为该故障树的底事件。求解过程如表 4 所示。

表 4 求最小割集下行法表

步骤	过程							
1	$X_1$	$M_1$						
2	$X_1$	$M_2$	$M_3$	$M_4$				
3	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$X_6$	$X_7, X_8$	

经过分析，图 2 故障树的最小割集为： $K_1=\{X_1\}$ ， $K_2=\{X_2\}$ ， $K_3=\{X_3\}$ ， $K_4=\{X_5\}$ ， $K_5=\{X_6\}$ ， $K_7=\{X_7, X_8\}$ 。

### 2.4.2 故障树的定性分析

#### 1) 顶事件发生概率的计算。

根据其逻辑关系以及各底事件发生的概率可以

得到每个最小割集的发生概率为： $P(K_1)=P(X_1)=0.06$ ， $P(K_2)=P(X_2)=0.05$ ， $P(K_3)=P(X_3)=0.04$ ， $P(K_4)=P(X_4)=0.05$ ， $P(K_5)=P(X_5)=0.03$ ， $P(K_6)=P(X_6)=0.04$ ， $P(K_7)=P(X_7) \times P(X_8)=0.05 \times 0.05=0.0025$ 。

那么顶事件发生的概率为： $P(T)=P(K_1)+P(K_2)+P(K_3)+P(K_4)+P(K_5)+P(K_6)+P(K_7)=0.06+0.05+0.04+0.05+0.03+0.04+0.0025=0.2725$ 。

#### 2) 概率重要度的计算。

顶事件发生的概率为： $P(T)=P(K_1+K_2+K_3+K_4+K_5+K_6+K_7)=P(K_1)+P(K_2)+P(K_3)+P(K_4)+P(K_5)+P(K_6)+P(K_7)=P(X_1)+P(X_2)+P(X_3)+P(X_4)+P(X_5)+P(X_6)+P(X_7) \times P(X_8)$ ，对上述函数自变量  $P_i$  求一次偏导数，根据式(2)便可得到各底事件的概率重要度，计算得到的结果如下： $I_{P(X_1)}=I_{P(X_2)}=I_{P(X_3)}=I_{P(X_4)}=I_{P(X_5)}=I_{P(X_6)}=1$ ， $I_{P(X_7)}=0.05$ ， $I_{P(X_8)}=0.05$ 。

#### 3) 关键重要度的计算。

依据式(3)，可以计算得到各底事件的关键重要度结果如下： $C_{X1}=0.2202$ ， $C_{X2}=0.1835$ ， $C_{X3}=0.1468$ ， $C_{X4}=0.1835$ ， $C_{X5}=0.1101$ ， $C_{X6}=0.1468$ ， $C_{X7}=0.0092$ ， $C_{X8}=0.0092$ 。

从计算数据分析可知：

① 事件  $X_1$  和事件  $X_3$  的概率重要度相等 ( $I_{P(X_1)}=I_{P(X_3)}=1$ )，但是事件  $X_1$  的关键重要度比事件  $X_3$  的关键重要度大 ( $C_{X1} > C_{X3}$ )。分析可知：虽然事件  $X_1$  和事件  $X_3$  的地位相同，但是事件  $X_1$  要比事件  $X_3$  优先解决。

② 事件 7 和事件 8 发生的概率均大于事件 5 和事件 6 发生的概率，但是中间事件  $M_4$  发生的概率  $P(M_4)=P(K_7)=P(X_7) \times P(X_8)=0.05 \times 0.05=0.0025$  小于中间事件  $M_3$  发生的概率  $P(M_3)=P(X_5)+P(X_6)=0.03+0.04=0.07$ 。分析可知：与门逻辑组成的中间事件发生的概率小于或门逻辑组成的中间事件发生的概率，或门逻辑组成的事件要比与门逻辑组成的事件优先解决。

## 3 结束语

笔者针对扬弹机锁定机构曲柄断裂故障，建立造成该故障的故障树，并对故障树进行定性分析和定量计算，确定该故障树的最小割集，计算顶事件发生的概率、各割集发生的概率、各底事件的概率重要度和关键重要度。通过故障树的建立，全面地对造成故障的原因进行排查，并分析其和故障的逻辑关系。通过对计算结果的分析可以看出各原因发生的概率、对系统的影响程度等，从而分析出各原

因在系统中的地位，了解解决哪些原因对于提高装备的可靠性有较大提升，对合理高效地解决该故障提供理论参考依据。

参考文献：

[1] 国防科工委军标出版发行部. 国家军用标准可靠性(I)[M]. 北京：国防科工委军标出版发行部，1992：15-21.

[2] 罗航. 故障树分析的若干关键问题研究[D]. 成都：电子科技大学，2010.

[3] XING L, AMARI S V. Fault Tree Analysis[M]. Handbook of Performability Engineering. Springer London, 2008.

[4] 陈宇毅. FTA故障树分析研究[D]. 北京：北京交通大学，2005.

\*\*\*\*\*

(上接第 69 页)

[6] 于银辉, 杨长保, 刘志辉. 基于多 Agent 的分布式专家系统及其应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2005, 35: 266-269.

[7] 吴云华, 曹喜滨, 曾占魁. 编队飞行卫星相对姿态变结构分布式协同控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2007, 37(6): 1465-1470.

[8] 刘波, 覃征, 邵利平, 等. 基于群集智能的协同多目标攻击空战决策[J]. 航空学报, 2009, 30: 1727-1739.

[9] 龙涛. 多UCAV协同任务控制中分布式任务分配与任务协调技术研究[D]. 长沙：国防科学技术大学，2010.

[10] 杨茂, 李成凤, 田彦涛. 动态环境下群体机器人同步的分布式控制[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(2):

\*\*\*\*\*

(上接第 85 页)

[6] 黄家才, 张玳橙, 施昕昕. 基于复合积分滑模的永磁同步电机硬件在环位置控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(12): 108-114.

[7] 刘辉, 吴云洁, 刘旺开, 等. 基于模糊神经网络 PID 的串级温度控制系统研究[J]. 兵工自动化, 2018, 37(8): 37-40.

[5] 倪绍徐, 张裕芳. 基于故障树的智能故障诊断方法[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(8): 1372-1375.

[6] 胡隆基. 基于故障树分析法的某型高炮随动系统故障诊断[J]. 四川兵工学报, 2011, 32(4): 40-43.

[7] 何庆飞, 王汉功, 陈小虎. 故障树分析法在汽车起重机液压系统故障诊断中的应用[J]. 机床与液压, 2014(2): 196-198.

[8] 郑裕国, 张康达. 故障树定性和定量计算的算法[J]. 浙江工业大学学报, 1995(3): 42-47.

[9] 徐敬青, 齐杏林, 李宁. 基于故障树的某型末制导炮弹控制舱故障分析[J]. 四川兵工学报, 2008, 29(3): 25-27.

[10] 安然, 於孝春. 空分主冷凝蒸发器爆炸的故障树分析[J]. 安全与环境学报, 2011, 11(3): 164-165.

\*\*\*\*\*

497-502.

[11] 赵敏. 分布式多类型无人机协同任务分配研究机仿真[D]. 南京：南京理工大学，2009.

[12] WHITTEN A K, CHOI H L, JOHNSON L. Decentralized Task Allocation with Coupled Constraints in Complex Missions[C]//American Control Conference (ACC). Berlin: Springer-Verlag, 2011: 1642-1649.

[13] 李俨, 董玉娜. 基于 SA-DPSO 混合优化算法的协同空战活力分配[J]. 航空学报, 2010, 31: 626-631.

[14] LUC B. Consensus-based Auctions for Decentralized Task Assignment[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 2008.

[15] 顾俊俊, 赵建军, 颜骥. 基于 MODPSO-GSA 的协同空战武器目标分配[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 31: 626-631.

\*\*\*\*\*

[8] 王春明, 李明秋, 姜淑华, 等. 分数阶控制系统设计[M]. 北京：国防工业出版社，2014：5-6.

[9] 寇宝全, 程树康. 交流伺服电机及其控制[M]. 北京：机械工业出版社，2008：55-56.

[10] 王志宇, 王长松, 范普成. 基于滑模变结构的永磁同步电机调速系统设计[J]. 微电机, 2011, 44(6): 52-56.