

doi: 10.7690/bgzdh.2024.06.013

基于故障树的排故策略制定

王文鹏, 邹刚, 梁佐堂, 于光辉

(海军航空大学青岛校区一系, 山东 青岛 266041)

摘要: 针对舰载机维护中底事件发生概率不能得到最快排故策略的问题, 提出一种结合故障概率和检查时间的重要度指标, 用来制定排故策略。用包含底事件发生概率和检查时间的公式计算排故重要度和第二排故重要度; 以拦阻钩放不下来的故障为例, 制定排故策略, 并用蒙特卡罗方法进行验证。验证结果表明, 该排故重要度方法排故总时间较短。

关键词: 故障树; 重要度; 排故; 拦阻钩

中图分类号: TB114.3; TH137.7 **文献标志码:** A

Formulation of Troubleshooting Strategy Based on Fault Tree

Wang Wenpeng, Zou Gang, Liang Zuotang, Yu Guanghui

(No. 1 Department, Qingdao Campus, Naval Aviation University, Qingdao 266041, China)

Abstract: Aiming at the problem that the occurrence probability of each basic event in the maintenance of carrier-based aircraft can not obtain the fastest troubleshooting strategy, an importance index combining failure probability and inspection time is proposed to formulate the troubleshooting strategy. The importance of troubleshooting and the importance of the second troubleshooting are calculated by the formula containing the occurrence probability of the bottom event and the inspection time. Taking the failure of the arresting hook as an example, the troubleshooting strategy is formulated and verified by Monte Carlo method. The verification results show that the total troubleshooting time of this method is short.

Keywords: fault tree; importance; troubleshooting; arresting hook

0 引言

舰载机的出动率对航母的战斗有着重要影响, 排故时间又直接影响了舰载机的出动率。排故时间越短, 舰载机的出动率越高, 从而提高了航母的战斗。在使用现场进行维修时, 排故时间往往以分钟为单位, 最小的排故时间经常被放在首位进行考虑; 因此, 针对故障, 制定一种时间较短的策略有着重要意义。故障树分析方法在故障的诊断和排除过程中有着广泛应用^[1-4]。利用故障树分析方法进行排故时间较短的排故策略制定值得探索。

重要度是故障树的一个重要概念, 很多学者从设计角度出发, 计算底事件的重要度, 寻找系统的薄弱环节, 改进对顶事件影响较大的底事件, 从而减少系统发生故障的概率, 提高系统的可靠性^[5-7]。姚成玉等^[8]提出 2 种 T-S 模糊重要度, 对传统二态系统模糊重要度进行了拓展。Márquez 等^[9]结合二元决策图对风力涡轮机关键部件进行了定量分析。Peeters 等^[10]循环使用故障和失效模式与影响分析方法对增材制造系统进行了分析。Ghadhab 等^[11]构

建了动态故障树对车辆引导系统进行分析。张宏熙^[12]将传统故障树重要度延伸到 T-S 故障树、Dugan 动态故障树和 T-S 动态故障树中, 将区间凸集模型与故障树重要度分析方法结合, 提出各故障树的重要度分析方法。Ikwan 等^[13]利用故障树定量分析了储罐系统, Shu 等^[7]分析了电机控制器。陈东宁等^[14]提出了连续时间 T-S 动态故障树的重要度, 对糅杂静态和动态故障行为的复杂系统进行了重要度分析。Bai 等^[15]运用多状态 T-S 故障树对工业机器人系统进行了分析。这些方法从设计和提高系统可靠度角度提出的重要度在排故时适用性并不强。张振兴等^[16]运用故障树分析方法对高压压气机进行了排故分析, 认为排故时要综合考虑各零部件发生故障的概率、维护排故工作的工作量及难易程度, 金帅等^[17]用故障树分析技术在发动机喘振的外场排故过程中也考虑了故障概率和维护工作难易程度, 但并没有进行定量分析。

依据故障树进行排故时, 一般是将概率大的底事件先进行检查, 或者按最小割集发生的概率大小, 检查各个最小割集, 从而进行排故。在实际排故的

收稿日期: 2024-02-23; 修回日期: 2024-03-26

第一作者: 王文鹏(1991—), 男, 河南人, 硕士。

过程中，故障率大的零部件检查起来会比较麻烦，花费时间较长，有一些故障率比较小的零部件，可能检查比较简单，花费时间较短。先检查故障率大，但是检查需要时间较长的原因会导致整个排故工作花费时间较长，仅考虑故障率并不合适。为此，在利用故障树进行排故时，综合考虑故障率和检查时间十分必要。笔者针对排故现场，提出一种考虑故障概率和检查时间的重要度计算方法，以拦阻钩放不下来的故障排故案例进行分析，制定排故策略，并使用蒙特卡洛方法进行验证。

1 排故重要度方法

对故障树进行定性分析可以得到故障树的最小割集，当顶事件发生时，故障原因是第 i 个最小割集的概率可以通过贝叶斯公式求得：

$$P(M_i|Q) = P(Q|M_i) \times P(M_i) / P(Q)。 \quad (1)$$

式中： M_i 为故障树第 i 个最小割集； Q 为故障树的顶事件。

$$P(Q|M_i) = 1。 \quad (2)$$

所以式(1)可转化为：

$$P(M_i|Q) = P(M_i) / P(Q)。 \quad (3)$$

当顶事件发生时，故障原因是分析得到的最小割集中的某一个。在排故时，先找到故障原因，然后再针对故障原因采用修理或更换等措施处理。排故的总时间包括找到故障原因和处理故障零部件的时间。当故障发生后，处理故障零部件的时间不受排故策略的影响，找到原因的时间因为检查顺序不同会不一样；因此，可将检查出故障原因的平均时间作为排故策略优劣的一个重要指标。总平均时间必然和底事件的检查时间有关，在制定排故策略时，考虑底事件检查时间很有必要。

1.1 最小割集独立

在最小割集相互独立的情况下，对最小割集检查时，如果其中一个底事件没有发生，那么故障原因就不是该最小割集；因此，只需检查最小割集中检查时间最短的底事件，就能判断该最小割集是否为故障原因。为描述方便，将最小割集中花费时间最短的底事件称为排故底事件。检查时间影响排故进度，故障原因发生的概率也会影响排故。概率大的最小割集发生的可能性大，一般先检查。检查花费时间长的一般后检查，即花费时间倒数大的先检查，将两者结合起来形成为检查顺序指标，计算如下：

$$I_0 = P(M_i) / P(Q) / t = P(M) / (t \cdot P(Q))。 \quad (4)$$

式中： I_0 为检查顺序指标； M 为排故底事件所对应的最小割集； t 为排故底事件的检查时间； Q 为故障树的顶事件。

注意上式中概率是最小割集发生的概率，时间是排故底事件的检查时间。检查时按照 I_0 递减的顺序检查排故底事件。在比较 I_0 时， $P(Q)$ 均相同，将其略去并不影响排序，还便于计算。为方便描述，将简化后的指标称为排故重要度。

$$I = P(M) / t。 \quad (5)$$

式中： I 为排故重要度； M 为排故底事件所对应的最小割集； t 为排故底事件的检查时间。

按照排故重要度递减的顺序对排故底事件进行检查，直到检查到有底事件发生为止；此时，就能确定故障原因，如果为追求快速排故，先不考虑隐含故障，不用再继续检查。那么第 i 个排故底事件发生，需要检查 i 次，检查所花费的总时间 T_i 可通过以下公式求得：

$$T_i = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_i。 \quad (6)$$

式中 t_i 为检查第 i 个排故底事件所花费的时间。

假设有 n 个最小割集，检查出故障原因所要花费总时间的期望 Et 如下。

$$Et = p_1 \cdot t_1 + p_2 \cdot (t_1 + t_2) + \dots + p_i \cdot (t_1 + t_2 + \dots + t_i) + p_{i+1} \cdot (t_1 + t_2 + \dots + t_i + t_{i+1}) + \dots + p_n \cdot (t_1 + t_2 + \dots + t_n)。 \quad (7)$$

式中： Et 为花费总时间的期望； p_i 为第 i 个最小割集发生的概率。

如果将第 i 个和第 $i+1$ 个排故底事件检查顺序互换，检查出故障原因所要花费的时间期望 Et' 可通过以下公式求得：

$$Et' = p_1 \cdot t_1 + p_2 \cdot (t_1 + t_2) + \dots + p_{i+1} \cdot (t_1 + \dots + t_{i-1} + t_{i+1}) + p_i \cdot (t_1 + \dots + t_{i-1} + t_i + t_{i+1}) + \dots + p_n \cdot (t_1 + t_2 + \dots + t_n)。 \quad (8)$$

减去式(7)可得：

$$Et' - Et = p_i t_{i+1} - p_{i+1} t_i = t_{i+1} (p_i / t_i - p_{i+1} / t_{i+1}) = t_{i+1} (I_i - I_{i+1}) \geq 0。 \quad (9)$$

可知交换顺序后总时间期望不变或增加。任意检查顺序都能经过有限次相邻项交换得到，因此按照排故重要度递减的方式进行检查，可使总时间期望最小，即检查顺序更合理。

1.2 最小割集不独立

当最小割集不独立时，同一个排故底事件可能被包含在不同的最小割集中，排故底事件所对应的排故重要度也会受到影响，很明显，最小割集数量

越多, 排故重要度应该大; 因此, 可将排故重要度计算修正如下:

$$I = \sum P(M_j) / t. \quad (10)$$

式中: t 为排故重要度的检查时间; M_j 为包含排故底事件的最小割集; 分子为对包含该排故底事件最小割集的发生概率求和。

按照排故重要度递减的顺序检查所有排故底事件, 排故底事件如果包含在多个最小割集中, 就还没有确定故障原因。为方便描述, 将检查出问题的排故底事件记为 X_0 , S_M 为包含排故底事件的最小割集的集合, S_X 为已检查过正常的排故底事件的集合, 将 S_M 中包含 S_X 元素的最小割集去掉, 形成集合 $S_{M'}$ 。对集合 $S_{M'}$ 中每个最小割集, 去掉底事件 X_0 形成新的割集称为第二最小割集 M' 。例如 S_M 为 $\{\{1, 2, 3\}, \{1, 4\}, \{1, 5\}, \{1, 6\}\}$, S_X 为 $\{5, 6\}$, 得到 $S_{M'}$ 为 $\{\{1, 2, 3\}, \{1, 4\}\}$, X_0 为 $\{1\}$, 形成的第二最小割集的集合为 $\{\{2, 3\}, \{4\}\}$ 。

与排故底事件类似, 第二最小割集中检查时间最少的底事件形成第二排故底事件, 第二排故底事件的第二排故重要度 I' 可按下式计算:

$$I' = \sum P(M'_j) / t'. \quad (11)$$

式中: t' 为第二排故底事件的检查时间; M'_j 为包含第二排故底事件的第二最小割集; 分子为对包含该第二排故底事件的第二最小割集发生概率求和。

按照第二排故重要度递减的顺序检查所有的排故底事件, 如果检查出问题的第二排故底事件只包含于一个第二最小割集中时, 该底事件所在的最小割集为故障原因。当检查出问题的第二排故底事件出现在不同的第二最小割集中时, 与排故底事件处理类似, 去掉包含已检查过正常的第二排故底事件的第二最小割集, 再去掉剩余的第三最小割集中的第二排故底事件, 形成新的第二最小割集。新的第二最小割集中检查时间最少的底事件形成新的第二排故底事件, 新的第二排故底事件的排故重要度可以按式(11)计算。再按照第二排故重要度递减的顺序检查新的排故底事件, 这样循环进行, 直到检查出问题的第二排故底事件只包含于一个第二最小割集, 这样就找到了故障原因: 所有检查出问题的底事件和最后的第二最小割集组成的最小割集导致的。例如第二最小割集的集合为 $\{\{2, 3\}, \{4\}\}$, 第二排故底事件为 $\{2\}$ 、 $\{4\}$ 。检查 $\{2\}$ 发现问题, 且只包含于 $\{2, 3\}$, 因此故障原因为 $\{1, 2, 3\}$ 。注意故障原

因是最小割集, 不是第二最小割集。

2 拦阻钩放不下排故策略

拦阻钩系统作为舰载机的重要组成部分, 如果出现故障, 将影响舰载机的顺利着舰。当拦阻钩系统出现故障时, 在最短时间内将故障排除十分重要。不考虑连杆断裂等极少出现的故障, 以常见最小维修单元为分析的底事件, 以拦阻钩放不下为顶事件, 将周晓楠^[18]建立的某型拦阻钩系统故障树简化为如图 1 所示。

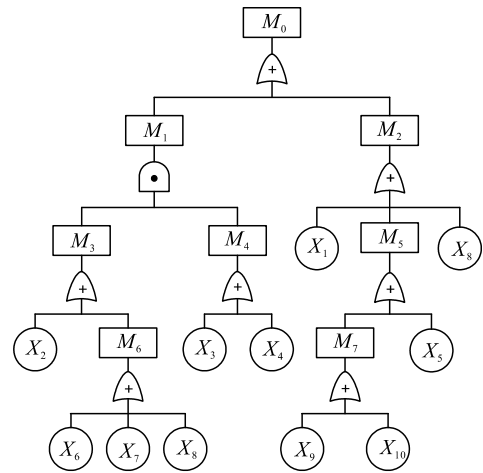


图 1 拦阻钩放不下故障树

上图中, 顶事件和中间事件的名称如表 1 所示, 底事件的名称和故障率如表 2 所示^[18]。假设各底事件符合指数分布, 各部件在某时间的发生概率; 结合经验进行估计, 检查各底事件的时间如表 2 所示。

表 1 顶事件和中间事件名称

编号	事件类型	事件名称
M_0	顶事件	拦阻钩放不下
M_1	中间事件	上位锁无法解锁
M_2	中间事件	作动筒无法放下
M_3	中间事件	液压正常驱动故障
M_4	中间事件	应急驱动故障
M_5	中间事件	系统回油故障
M_6	中间事件	电磁阀不在放下位
M_7	中间事件	限流元件故障

表 2 底事件的相关参数

编号	底事件名称	故障率/ ($10^{-6}/h$)	故障概率	检查所需 的时间/h
X_1	作动筒卡滞	8.16	0.040 0	2.00
X_2	解锁作动筒故障	4.08	0.020 2	0.50
X_3	应急放手柄故障	0.50	0.002 5	0.25
X_4	应急电磁阀故障	2.54	0.012 6	1.00
X_5	旁通阀故障	2.04	0.010 2	0.80
X_6	收放手柄故障	0.10	0.000 5	0.20
X_7	三位四通阀	2.74	0.013 6	1.20
X_8	机电核心机故障	6.01	0.029 6	0.50

使用下行法可以求得最小割集有 10 个，分别为 $\{X_1\}$, $\{X_8\}$, $\{X_2, X_3\}$, $\{X_2, X_4\}$, $\{X_3, X_6\}$, $\{X_3, X_7\}$, $\{X_4, X_6\}$, $\{X_4, X_7\}$, $\{X_5, X_9\}$, $\{X_5, X_{10}\}$ 。根据最小割集中各底事件的检查时间，可以知道排故底事件为 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_8$ 。根据公式求出相应的排故重要度分别为：0.02, 0.000 61, 0.000 34, 0.000 43, 0.000 46, 0.000 04, 0.059 21。按照排故重要度方法确定检查顺序，依据公式计算出的第二排故底事件和重要度如表 3 所示。

表 3 排故重要度方法检查顺序

检查顺序	排故底事件	排故重要度	第二排故底事件	第二排故重要度
1	X_8	0.059 21	/	/
2	X_1	0.020 00	/	/
3	X_2	0.061 00	X_4	0.013
			X_3	0.010
4	X_5	0.000 46	X_{10}	0.027
			X_9	0.018
5	X_4	0.000 43	X_7	0.011
			X_6	0.003
6	X_3	0.000 34	X_7	0.011
			X_6	0.003
7	X_6	0.000 04	/	/

在进行排故时，首先按照排故重要度递减确定的检查顺序进行第一轮检查，按照 $X_8, X_1, X_2, X_5, X_4, X_3, X_6$ 的顺序进行检查。如检查到最小割集发生，从而导致顶事件发生时，应停止检查，此时找到了故障原因。如检查到底事件 X_8 发生时，则 X_8 所在的割集 $\{X_8\}$ 导致顶事件发生， $\{X_8\}$ 是故障原因。 X_1 与 X_8 类似。如果检查到底事件 X_2 发生时，则说明故障原因包含 X_2 ，接着按照 X_2 对应的第二排故重要度递减的顺序进行检查。检查 X_4, X_3 ，故障原因是包含检查出有问题的底事件和 X_2 ，但不包括已检查的底事件 X_8, X_1 的最小割集。 X_5, X_4, X_3 与 X_2 类似。

3 排故策略验证

为验证排故重要度方法的有效性，使用蒙特卡洛方法进行仿真，仿真流程如图 2 所示。在“按概率确定底事件是否发生”步骤时，以每个底事件的发生概率随机确定是否发生，此时生成的组合并不一定符合要求，所以要在“符合要求”步骤进行判断。排故时顶事件是第一次发生，所以不符合要求是指没有导致顶事件发生，或者有 2 个以上的最小割集发生。接着按照确定好的顺序对底事件进行检查，当检查出真正的故障原因时，保存检查所用的总时间。按仿真流程进行计算，对每种方法所记录的检查时间求平均值，将平均值作为检查时间的期

望。当进行 5 000 次仿真时，平均时间的变化率 < 0.01%，因此停止计算。

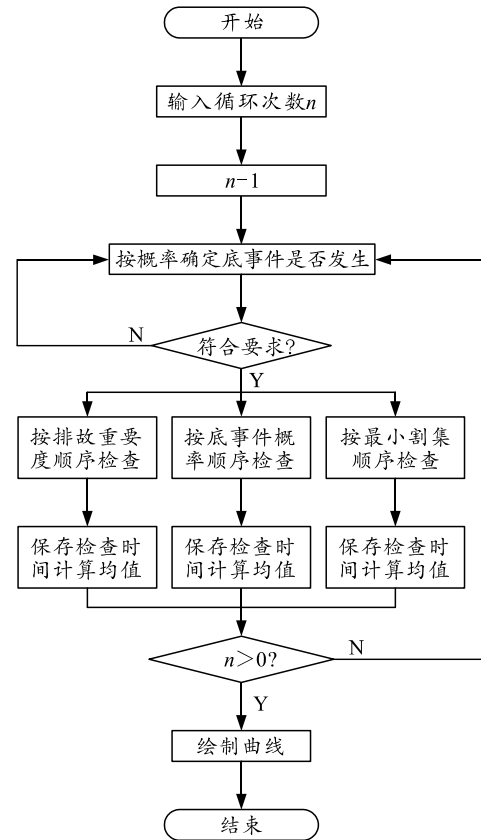


图 2 仿真流程

仿真结果如图 3 所示。按照底事件的发生概率进行检查总时间的期望为 2.27 h，按照最小割集的发生概率进行检查时间的期望为 2.25 h，按照排故重要度的方法进行时间期望为 1.71 h。使用排故重要度的方法进行时间期望是按照底事件发生概率进行检查的 75%，是按照最小割集发生概率的 76%。使用排故重要度方法进行排故所花费的时间较短。

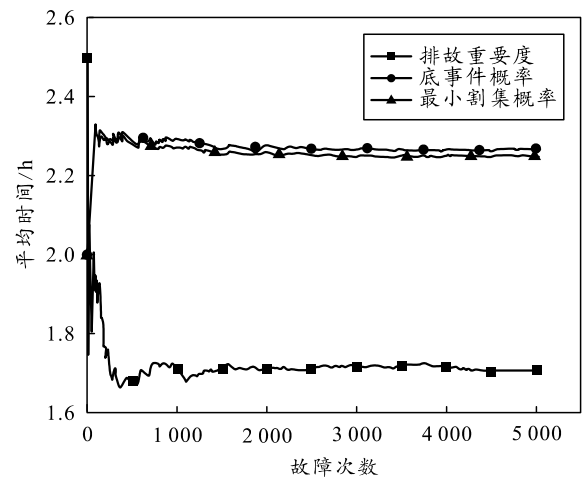


图 3 仿真结果

4 结论

在排故现场应用故障树分析技术时，若要在最短时间内排除故障，需综合考虑各零部件的故障概率和检查时间；为此，提出排故重要度指标来制定排故策略。排故重要度方法用故障概率和检查时间计算排故重要度，先按照排故重要度的顺序进行检查各底事件，然后再按照第二排故重要度的顺序检查底事件，直到确定故障原因进行排故。给出所提方法的工程分析案例，并使用蒙特卡洛方法验证方法的可行性。结果表明，排故重要度方法能够制定合理的排故策略，且排故所用时间较短。

参考文献：

[1] 霍明亮, 王军, 赵宇, 等. 基于故障树的某型火箭外测设备故障诊断分析[J]. 航天控制. 2021, 39(1): 68-73.

[2] 汪天送, 唐玉宝. 18PA6B 型柴油机配套油罐溢油问题分析与解决措施[J]. 核科学与工程, 2021, 41(4): 850-855.

[3] 李小彪, 马庆岩, 张立伟, 等. 航空发动机高压转子转速摆动故障分析与排除[J]. 航空发动机. 2021, 47(5): 62-65.

[4] ZHANG X, SUN L, SUN H, et al. Floating offshore wind turbine reliability analysis based on system grading and dynamic FTA[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2016, 154: 21-33.

[5] 周长聪, 常琦, 周春革, 等. 基于非概率模型的飞机襟翼故障树分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(6): 636-642.

[6] 璩金超, 薛小伟, 张士卫, 等. 2D 换向阀异常打开故障分析与改进[J]. 机床与液压. 2021, 49(13): 190-194.

[7] SHU X, GUO Y, YANG H, et al. Reliability study of motor controller in electric vehicle by the approach of

fault tree analysis[J]. Engineering failure analysis, 2021, 121: 105165.

[8] 姚成玉, 张荧驿, 陈东宁, 等. T-S 模糊重要度分析方法研究[J]. 机械工程学报. 2011, 47(12): 163-169.

[9] MÁRQUEZ F P G, PÉREZ J M P, MARUGÁN A P, et al. Identification of critical components of wind turbines using FTA over the time[J]. Renewable energy, 2016, 87: 869-883.

[10] PEETERS J F W, BASTEN R J I, TINGA T. Improving failure analysis efficiency by combining FTA and FMEA in a recursive manner[J]. Reliability engineering & system safety, 2018, 172: 36-44.

[11] GHADHAB M, JUNGES S, KATOEN J, et al. Safety analysis for vehicle guidance systems with dynamic fault trees[J]. Reliability engineering & system safety, 2019, 186: 37-50.

[12] 张宏熙. 故障树重要度分析方法及应用[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.

[13] IKWAN F, SANDERS D, HASSAN M. Safety evaluation of leak in a storage tank using fault tree analysis and risk matrix analysis[J]. Journal of loss prevention in the process industries, 2021, 73: 104597.

[14] 陈东宁, 魏星, 姚成玉, 等. 连续时间 T-S 动态故障树重要度分析方法[J]. 仪器仪表学报. 2020, 41(9): 232-241.

[15] BAI B, XIE C, LIU X, et al. Application of integrated factor evaluation - analytic hierarchy process - T-S fuzzy fault tree analysis in reliability allocation of industrial robot systems[J]. Applied soft computing, 2022, 115: 108248.

[16] 张振兴, 金帅, 闫海骄. 高压压气机可调静子叶片角度 α_2 摆动故障诊断与分析[J]. 航空发动机. 2021, 47(S1): 57-59.

[17] 金帅, 张振兴, 李家瑞, 等. 航空发动机喘振故障外场诊断与分析[J]. 航空发动机. 2021, 47(z1): 53-56.

[18] 周晓楠. 舰载飞机拦阻钩收放系统及可靠性分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

(上接第 35 页)

[2] STEWART D. A Platform with Six Degrees of Freedom, Proceedings of International Mechanical[J]. Engineering, 1965, 80(15): 370-386.

[3] 张弛. 训练型汽车驾驶模拟器关键技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2014: 3-4.

[4] 方旭光. 飞行模拟器 Stewart 平台的设计及运动控制策略的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019: 14-17.

[5] 李炳川. 多波束天线的座架设计与控制研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019: 30-32.

[6] 谭巧银. 基于 Stewart 并联机构的高频试验台研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012: 52-57.