

doi: 10.7690/bgzdh.2020.12.018

基于故障树理论的特种车辆三防系统故障诊断

胡际万, 朱磊, 王永杰, 范振钦, 毛磊

(中国人民解放军 32382 部队, 武汉 430311)

摘要: 为解决三防系统发生故障或状态异常时, 特种车辆的防护性能大幅降低, 严重影响车内人员人身安全的问题, 建立三防系统的故障树模型。通过深入分析三防系统的工作原理及常见故障, 对故障树模型进行定量和定性分析, 并完成结构重要度分析。结果表明: 该方法能快速定位三防系统故障, 有效缩短故障排除时间, 提高维修效率。

关键词: 故障树理论; 三防系统; 定量分析; 定性分析; 故障排除

中图分类号: TP306.3 **文献标志码:** A

Fault Diagnosis of Special Vehicle Three-defense System Based on Fault Tree Theory

Hu Jiwan, Zhu Lei, Wang Yongjie, Fan Zhenqin, Mao Lei

(No. 32382 Unit of PLA, Wuhan 430311, China)

Abstract: In order to solve the problem that the protection performance of special vehicles is greatly reduced when the three-proof system fails or the state is abnormal, which seriously affects the personal safety of the personnel in the vehicle, a fault tree model of the three-proof system is established. Through in-depth analysis of the working principle and common faults of the three-proof system, quantitative and qualitative analysis of the fault tree model is performed, and the analysis of structural importance is completed. The results show that this method can quickly locate the faults of the three-proof system, effectively shorten the troubleshooting time and improve the maintenance efficiency.

Keywords: fault tree theory; three-proof system; quantitative analysis; qualitative analysis; troubleshooting

0 引言

三防系统是某型特种车辆的重要组成部分, 其性能的好坏直接决定特种车辆能否发挥正常功能。三防系统通过探测装置检测报警信号, 根据报警信号类型控制三防系统执行装置进行相应的防护动作, 保证特种车辆受到核、生、化武器的袭击或通过沾染放射性沾毒剂及细菌的区域时, 车内人员和部件不受伤害, 最大限度保障车内人员人身安全。当三防系统出现故障或状态异常时, 会出现探测失效或执行装置动作故障, 导致特种车辆防护性能失效, 车内人员安全遭受重大威胁^[1-2]。

故障树分析法通过树形图的形式, 分析系统可能发生的某种故障和导致该故障发生各种原因的逻辑关系, 确定系统可能发生故障原因的组方式及发生概率, 从而快速定位故障原因, 达到预测和预防故障的目的。

1 工作原理

当车辆受到核、生、化武器的袭击或通过放射

性沾毒剂及细菌沾染地区时, 三防系统将检测到的 γ 射线转换为电信号向车内进行闪光报警(红灯亮为毒剂报警, 黄灯亮为核辐射报警), 同时将电信号传输给信号检测控制盒。信号检测控制盒根据指令的电信号和预定程序, 输出多路控制信号使执行装置完成三防状态的转换, 即车辆进、排气口关闭、发动机油门断油熄火、排气扇停转、排气通风关闭机构关闭; 同时将过滤通风装置转换为三防状态, 激活门转换装置使车内通风口关闭, 使过滤吸收器的关口打开。此时手动闭合增压风扇开关, 使增压风机运转。车内染毒气体经增压风机吸入, 通过过滤吸收器后, 将清洁空气排入车内产生车内超压, 形成车内集体防护。图 1 为三防系统工作原理。

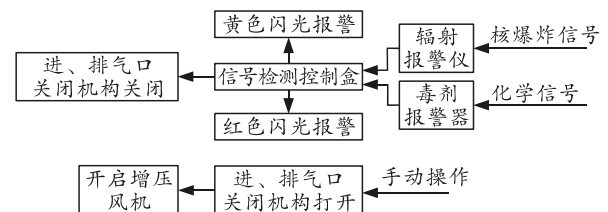


图 1 三防系统工作原理

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-09-08

作者简介: 胡际万(1989—), 男, 湖北人, 硕士, 工程师, 从事机电工程研究。E-mail: Hujiwan110@163.com。

由图可知：三防系统对细菌无检测报警功能，系统也不能自动向控制装置发出指令信号。只能根据实际情况手动进行控制，即向信号检测控制盒输入控制指令，使三防系统的进排气口关闭机构打开，开启增压风机，完成对细菌武器的防护。

2 常见故障分析

三防系统常见故障主要为毒剂报警器故障、辐射报警故障、信号检测控制盒故障和执行装置故障等。在深入研究三防系统工作原理的基础上，梳理统计历史故障事件，分析故障机理，对提高故障处理效率具有一定的促进作用。

2.1 毒剂报警器

故障现象 1：用信号检查器对准车体外毒剂进气口，毒剂报警器不报警。

故障原因分析：

1) 信号检查器罩在进气口上时，未把信号检查器与进气口的缝隙堵严；

2) 进气口至毒剂报警器面板的进气管气路不通畅或漏气。

故障现象 2：毒剂报警器电源灯不亮，无马达运转声。

故障原因分析：

1) 毒剂报警器供电线路断路或插头未拧紧；

2) 毒剂报警器保险管损坏或松动；

3) 毒剂报警器接地片接地不良。

2.2 辐射报警仪

故障现象：用辐射信号模拟器对准辐射报警仪，辐射报警仪不报警。

故障原因分析：保险丝烧断、连接电缆脱落、继电器和三极管损坏等。

2.3 信号检测控制盒

故障现象：开启除尘增压风机进排气口关闭机构后，信号检测控制盒的“开启”指示灯不亮。

故障原因分析：

1) 控制盒电磁控制总成上的微动开关未接通；

2) 控制盒连接电缆有断路或插头松动。

2.4 执行装置

故障现象：按下“启动”按钮时，风机不运转。

故障原因分析：

1) 风机工作线路发生断路或接头松动；

2) 未开启风机进排气口关闭机构。

三防系统故障情况如表 1 所示。

表 1 三防系统故障情况统计

序号	故障现象	原因	排除方法
1	毒剂报警器不报警	信号检查器与进气口的缝隙未堵严 进气口至毒剂报警器面板的进气管气路不通畅或漏气 毒剂报警器供电线路断路或插头未拧紧	堵严缝隙 检查并排除 修理导线或拧紧插头
2	毒剂报警器电源灯不亮	毒剂报警器保险管损坏或松动 毒剂报警器接地片接地不良 辐射报警仪保险丝烧断	拧紧或更换保险管 清理接地片与附座间的油污锈蚀，拧紧接地片 更换保险管
3	辐射报警仪不报警	连接电缆脱落 继电器和三极管损坏	检查排除 更换
4	信号检测控制盒的“开启”指示灯不亮	信号检测控制盒电磁控制总成上的微动开关未接通 信号检测控制盒连接电缆有断路或插头松动	检查排除 检查排除
5	风机不运转	风机工作线路发生断路或接头松动 未开启风机进排气口关闭机构	修理导线或拧紧接头 开启进排气口关闭机构

3 故障树模型建立

图 2 为故障树分析法的基本处理流程，首先确定故障树的顶事件、中间事件和底事件，从而建立故障树模型，通过对故障树进行定性和定量分析，找出导致系统出现故障的主要原因，从而提出针对性的改进措施或排除方案^[3-6]。

通过分析故障树的逻辑关系，确定故障树的顶事件为三防系统故障，根据三防系统在车辆行驶中出现的故障进行分析总结可知，导致三防系统故障的原因主要有毒剂报警器故障、辐射报警故障、

信号检测控制盒故障和执行装置故障。按照故障原因与故障模式的因果关系建立电力电缆故障树模型。

图 3 为三防系统故障树模型。该故障树以三防系统故障为顶事件，以毒剂报警器故障、辐射报警故障、信号检测控制盒故障和执行装置故障为中间事件，以信号检查器与进气口的缝隙未堵严、进气管不通畅或漏气、线路断路或插头未拧紧、保险管损坏或松动、接地片接地不良、微动开关未接通和未开启风机进排气口关闭机构等为底事件。

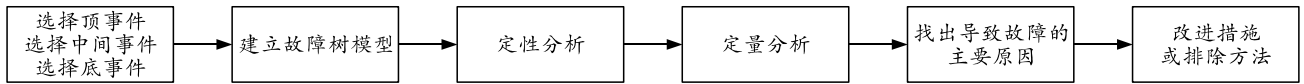


图 2 故障树分析法的一般处理流程

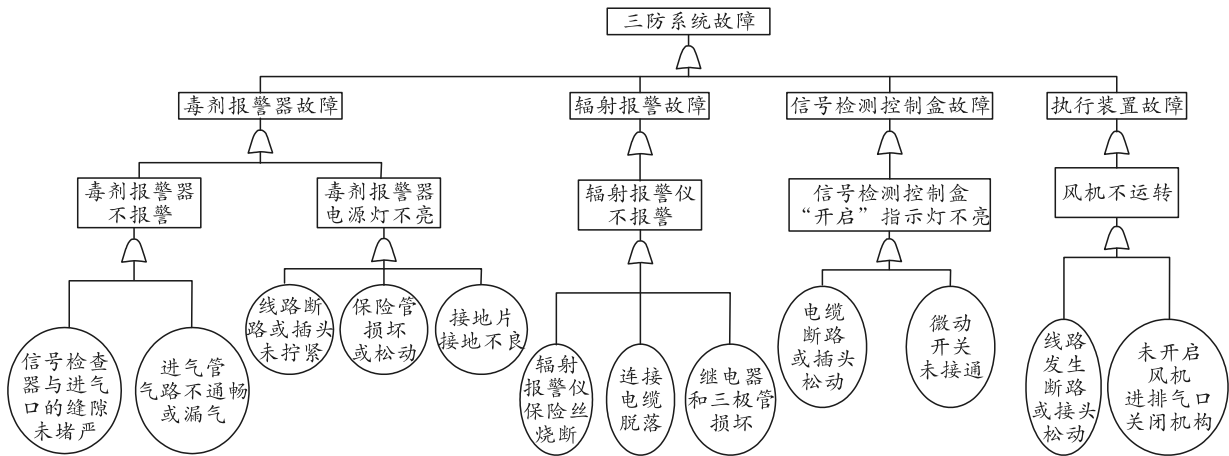


图 3 电力电缆故障树模型

根据故障树原理，对故障树的顶事件、中间事件以及底事件进行编号，用 T 表示故障树的顶事件，用 A、B、C、D 表示故障树的中间事件，用 $X_i(i=1,2,\dots,12)$ 表示故障树的底事件，则故障树模型对应的事件代码如表 2 所示。

表 2 故障树模型对应的事件代码

事件代码	事件名称
T	三防系统故障
A	毒剂报警器故障
B	辐射报警故障
C	信号检测控制盒故障
D	执行装置故障
A1	毒剂报警器不报警
A2	毒剂报警器电源灯不亮
B1	辐射报警仪不报警
C1	信号检测控制盒“开启”指示灯不亮
D1	风机不运转
X1	信号检查器与进气口的缝隙未堵严
X2	进气管路不顺畅或漏气
X3	毒剂报警器线路断路或插头未拧紧
X4	毒剂报警器保险管损坏或松动
X5	毒剂报警器接地片接地不良
X6	辐射报警仪保险丝烧断
X7	辐射报警仪连接电缆脱落
X8	辐射报警仪继电器和三极管损坏
X9	信号检测控制盒电缆断路或插头松动
X10	微动开关未接通
X11	风机连接电缆断路或插头松动
X12	未开启风机进排气口关闭机构

4 故障树定性分析

建立故障树模型后，对整个系统进行定性和定量分析。故障树的定性分析是通过下行法计算故障树的最小割集 (minimal cut set, MCS)，确定引发故障现象所有底事件的组合，从而计算顶事件 (即故障

现象) 的发生概率^[7-8]。

下行法的关键在于确定故障树中各因素的逻辑关系是与门关系还是或门关系。逻辑关系为与门则增加当前计算的割集内故障原因的数量；或门则增加总割集的故障原因数量^[9-11]。

根据下行法分析计算方法，确定下行法求解故障原因最小割集的步骤如表 3 所示。

表 3 下行法求最小割集步骤

步骤	1	2	3	4	5	6
1	X_1	X_1	X_1	X_1	X_1	X_1
2	T_1	T_1	T_4, T_5	X_1, X_3	X_1, X_6	X_4, X_6
3	X_2	T_3	T_3	X_3, T_6	X_1, X_{11}	X_4, X_8
4		X_2	X_5	X_3	X_3, T_6	X_7, X_9
5				T_6	X_3	X_5, X_7
6				X_2	T_6	X_3
7					X_2	X_{10}
8						X_{12}
9						X_2

通过分析计算最终得到故障树的最小割集为：

$$\{X_1\}, \{X_4, X_7\}, \{X_5, X_7\}, \{X_3\}, \{X_6\}, \{X_8\}, \{X_2\}。$$

第 1 个因素 T 的发生概率为：

$$P(T) = \sum_{i=1}^n P(K_i) - \sum_{i<j=2}^n P(K_i K_j) + \dots + (-1)^{n+1} P(K_1 K_2 \dots K_n)。$$

5 故障树定量分析

故障树定量分析是指根据底事件发生的概率计算分析顶事件发生的概率，从而确定三防系统出现故障时最可能的故障原因^[12]。

假设故障树的全部最小割集为

$$K_1, K_2, \dots, K_{N_k}。$$

其中 $N_k=12$ 为最小割集的数量，且最小割集之间是

不相交的，则

$$P(T) = P\left(\bigcup_{j=1}^{N_k} K_j(t)\right) = \sum_{j=1}^{N_k} \left[\prod_{i \in K_j} F_i(t)\right].$$

由 t 时刻第 j 个最小割集中第 i 个部件故障的概率与底事件 X_i 的发生概率 $P(X_i)$ 之间的关系则为三防系统发生故障的概率，即不可靠度^[13-14]为：

$$P(T) = F_s(t) = \sum_{i=1}^5 P(X_i) + \sum_{i=7}^{12} P(X_i) + P(X_9) \cdot P(X_{12}).$$

可靠度为：

$$R_s(t) = 1 - F_s(t) = 1 - \sum_{i=1}^5 P(X_i) - \sum_{i=7}^{12} P(X_i) - P(X_9) \cdot P(X_{12}).$$

6 结束语

针对三防系统发生故障时故障原因定位难、故障排除效率低等问题，笔者在研究三防系统工作原理的基础上，分析总结三防系统常见故障，并建立三防系统故障树模型。根据故障树模型对顶事件、中间事件和底事件进行研究，最后针对故障树进行了定性和定量分析，从而确定引发三防系统故障最可能的原因。基于故障树的特种车辆三防系统故障诊断方法在三防系统故障诊断和排除方面具有较强的指导性，能够帮助操作人员快速定位故障点，可靠性高，缩短了三防系统的故障排除时间，对其他系统的故障诊断也具有参考价值和实践指导意义。

参考文献：

- [1] 李佩昌, 周海军, 周国敬. 基于专家综合评估的模糊动态故障树分析[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(10): 192-197.
- [2] RAJAKARUNAKARAN S, KUMAR A M, PRABHU V A. Applications of fuzzy faulty tree analysis and expert elicitation for evaluation of risks in LPG refueling station

[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 33: 109-123.

- [3] 张义民, 肖洁, 李常有. 数控车床进给系统基于模糊理论的故障树分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 38-40.
- [4] 全睿, 全书海, 黄亮, 等. 基于模糊故障树的燃料电池发动机氢安全[J]. 上海交通大学学报, 2010, 44(7): 951-956.
- [5] 赵奕磊, 毛宗强, 奚树人, 等. 基于故障树模型的燃料电池安全性评价[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(3): 425-428.
- [6] 刘国印, 林少芬, 江小霞, 等. 基于故障树的船舶起货机液压系统可靠性仿真分析[J]. 船海工程, 2008, 37(2): 70-73.
- [7] BOUDALI H, CROUZEN P, STOELINGA M. Dynamic fault tree analysis using input/output interactive marked chains[C]. IPA Lentedagen, Rhenen: IEEE Computer Society, 2007: 708-717.
- [8] JIANG G, YUAN H J, LI P C, et al. A new approach to fuzzy dynamic fault tree analysis using the weakest n-dimensional t-norm arithmetic[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2018, 31(7): 1506-1514.
- [9] 李锡江, 刘荣, 张厚祥. 基于模糊故障树法的清洗机器人安全性研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 5(4): 344-349.
- [10] 龙志强, 吕治国, 常文森. 基于模糊故障树的磁浮列车悬浮系统故障诊断[J]. 控制与决策, 2004, 19(2): 139-142.
- [11] 靳哲峰, 陈文华, 潘晓东. 船用齿轮箱的模糊可靠性故障树分析[J]. 农业机械学报, 2003, 34(1): 145-147.
- [12] 谢永成, 黄捷音, 李光升, 等. 故障树分析法在装甲车辆电源系统故障诊断中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2014, 24(11): 3627-3629.
- [13] 邹学新. 故障树分析法在工程装备维修管理中的应用[J]. 科技研究, 2014, 1(30): 74-76.
- [14] 梁茂林, 崔国峰, 王剑波. 故障树分析法在某型导弹故障诊断中的应用[J]. 地面防空武器, 2013, 44(3): 41-43.

(上接第 65 页)

参考文献：

- [1] 毛炳祥, 白桦, 程文鑫, 等. 系统战备完好性分析、计算与检测[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 17-18.
- [2] 崔旭涛, 王鲁彬, 刘军山, 等. 导弹装备战备完好性评估模型[J]. 指挥控制与仿真, 2014, 6(3): 61-65.
- [3] 刘顺华, 俞亮, 毕坤鹏, 等. 防化装备完好性评定方法: GJB 6884-2009[S]. 2010-04-01.

- [4] 姚伟召, 诸雪征. 防化装备效能评估[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2014: 26-27
- [5] 刘益新, 刘增良, 余达泰, 等. 一种新型装备完好率计算模型的研究[J]. 航天控制, 2005, 23(4): 73-78.
- [6] 王孟莲. 船舶电力推进系统状态评估研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [7] 李伟, 刘波峰, 林挺宇, 等. 基于 D-S 证据理论的超速离心机健康状态评估方法[J]. 仪表技术与传感器, 2011(4): 97-99.