

doi: 10.7690/bgzd.2021.06.002

基于故障树的火炮协调器机电液系统故障分析

千金杰, 陈龙淼

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为分析某型火炮协调器在控制程序无误的情况下仍出现控制未到位的问题, 以协调器的机电液系统为分析对象, 提出一种基于故障树分析(fault tree analysis, FTA)系统故障点的方法。以协调器控制未到位为顶事件进行系统故障分析并建立故障树; 对协调器故障树进行定性分析, 找出其最小割集; 定量分析故障树顶事件发生概率和底事件故障概率以及重要度, 结合底事件分析中间事件发生概率; 并对协调器部件故障发生概率进行排序和分析。结果表明: 该方法能避免盲目操作, 提高维修效率。

关键词: 故障树; 火炮协调器; 机电液系统; 概率重要度

中图分类号: TJ301 **文献标志码:** A

Fault Analysis of Artillery Coordinator Electro-hydraulic System Based on Fault Tree

Gan Jinjie, Chen Longmiao

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to analyze the certain type artillery coordinator that still has the control problem even when the control program is correct, the electro-hydraulic system of the coordinator is taken as the analysis object, and based on fault tree analysis (FTA), a method which analyzing system failure points is proposed. Analyze system faults and establish a fault tree with the top event of the coordinator control not in place. Qualitatively analyze the fault tree of the coordinator to find its minimum cut set. Quantitatively analyze the occurrence probability of the top event, the bottom event failure probability and importance degree. And analyze the probability of intermediate events in combination with the bottom event. Sort and analyze the probability of failure of the coordinator components. The results show that this method can avoid blind operation and improve maintenance efficiency.

Keywords: fault tree; artillery coordinator; electro-hydraulic system; probability importance

0 引言

协调器是火炮整体系统的关键部位之一, 对火炮的发射精度和发射安全起到关键性作用^[1]。本文中分析的协调器是一个复杂的机电液系统, 并且控制要求精度误差为±2密位。该系统不单需要一个合适的控制算法, 更需要对系统整体的稳定性提供保障。一旦出现协调器控制未到位的情况, 需要调试人员立刻进行故障排除。由于系统比较复杂繁琐且很多部件都是封闭的, 不能通过肉眼发现故障所在位置, 一般只能采取测量压力和流量等进行故障检测, 但是协调器液压系统部件多, 很难准确快速地找到故障点, 加大了系统故障定位的难度。

利用故障树分析(FTA)可以把总体的原因按树枝状逐级细化到各底事件, 能够形象地表现出小故障和整体故障之间的联系^[2], 调试人员可以在发生故障时根据故障树逐级对系统整体进行排查, 有利

于改善原先定位故障点时的盲目性, 实现对系统故障进行准确快速定位。

1 故障树分析法原理

故障树分析法是把研究对象最不希望发生的故障作为分析故障的目标, 然后找寻能直接影响这一故障的全部因素, 再找出下一级事件出现故障的因素, 直到找出不能再深究的因素为止。一般会把最不希望发生的故障称为顶事件, 不能再深究的事件称为底事件, 介于底事件和顶事件之间的所有事件称为中间事件, 再通过相应的逻辑门把底事件、中间事件和顶事件联结成树形图, 称之为故障树, 可以直观形象地表现出引起协调器故障的原因^[3]。

2 协调器故障树的建立

2.1 协调器机电液系统的组成

协调器系统由齿轮泵、液压马达、油箱、溢流

收稿日期: 2021-01-29; 修回日期: 2021-03-15

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20140773)

作者简介: 千金杰(1995—), 男, 浙江人, 硕士, 从事液压伺服控制与故障仿真研究。E-mail: 569862472@qq.com。

阀、减压阀、伺服阀、控制器、平衡阀、电子球阀、节流阀和油缸组成。齿轮泵、液压马达、油箱和溢流阀组成协调器系统的液压站，为协调器系统提供压力源；油液再通过减压阀达到一个适当的压力，打开电子球阀使系统油路导通，通过控制器发出指令变换伺服阀的位置，从而控制协调油缸的运动，其原理如图 1 所示。

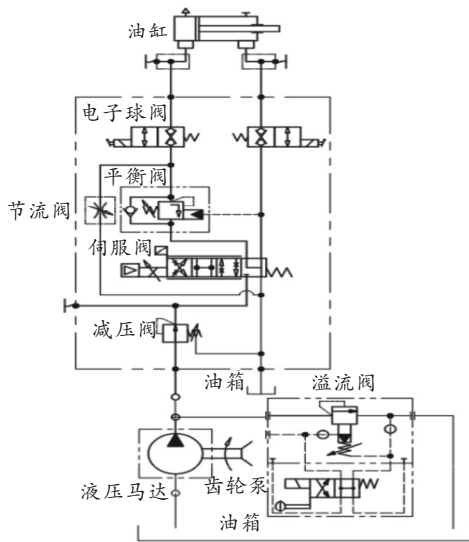


图 1 协调器液压原理

整个协调器机电液系统具有结构复杂、工作环境恶劣和精度要求高等特点，出现故障时很难准确高效地对故障点进行定位排查，故采用故障树分析法对其进行故障分析。

2.2 协调器故障树建立

首先对系统进行分析，了解系统的组成及各项操作内容，熟悉其正常运行时的作业图^[4]；其次对系统的故障进行定义，对预计可能发生的故障、过去发生过的故障事例及故障统计作广泛的调查；再

仔细分析各故障之间的逻辑关系，收集各因素发生的概率；最后做出故障逻辑图^[5]。

协调器控制未到位主要分为电器故障、液压故障和机械故障 3 大类。电器故障主要发生在控制器、控制面板和协调编码器等处；机械故障主要发生在结构装配位置；液压故障会出现在各个液压部件中。由于系统的复杂性，引起协调控制不到位的故障因素很多，并且很多都存在于系统内部，难以排查，因此通过故障树分析来建立各个故障点之间的逻辑关系。

设协调器控制未到位为顶事件，标记为 T 。 S_i 为中间事件， S_1 为电器故障， S_2 为液压故障， S_3 为机械故障， S_4 为控制器无法接收指令， S_5 为控制器接收指令异常， S_6 为液压系统有压力但不动作， S_7 为液压系统压力过大， S_8 为液压系统压力不足， S_9 为溢流阀故障， S_{10} 为伺服阀故障， S_{11} 为减压阀故障， S_{12} 为供油不足。 X_i 为底事件， X_1 为机构变形， X_2 为耳轴卡死， X_3 为控制箱故障， X_4 为操作面板故障， X_5 为编码器故障， X_6 为伺服放大器故障， X_7 为平衡阀堵塞， X_8 为伺服阀阀芯卡滞， X_9 为球阀堵塞， X_{10} 为减压阀设定压力不满足要求， X_{11} 为减压阀阀芯短阻尼孔堵塞， X_{12} 为球阀泄漏， X_{13} 为油缸泄漏， X_{14} 为节流阀泄漏， X_{15} 为溢流阀设定压力过大， X_{16} 为溢流阀堵塞， X_{17} 为溢流阀磨损， X_{18} 为伺服阀阀体没安装到位， X_{19} 为伺服阀阀芯堵塞， X_{20} 为伺服阀阀芯泄漏， X_{21} 为减压阀设定压力过低， X_{22} 为减压阀阀芯长阻尼孔堵塞， X_{23} 为齿轮泵泄漏， X_{24} 为液压马达转速过低， X_{25} 为油箱液面过低。因为协调器系统的特性，每级故障之间都由逻辑或门连接，即只要有一个下级故障发生，就会使相应的上级事件产生故障，协调器系统故障树如图 2 所示。

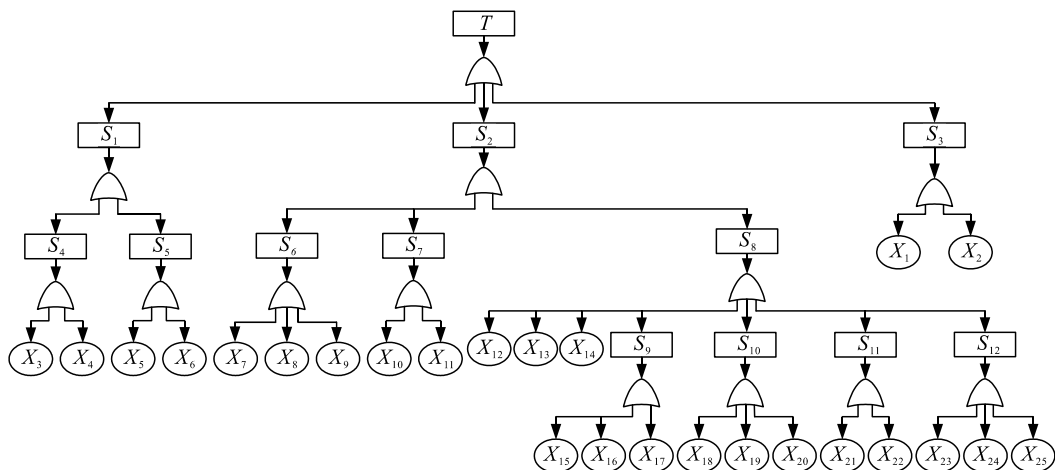


图 2 协调器系统故障树

3 协调器故障树的定性分析

如果故障树的某几个底事件的集合同时发生，将引起系统故障即顶事件的发生，则这个集合称为割集，一个割集代表系统发生故障的一种可能性，而去掉一个底事件后不再成为割集，则这个割集为最小割集。对故障树的定性分析目的之一是为了找出故障树的最小割集，因为最小割集的发生都会直接导致系统出现故障^[6]。找出最小割集即可找出系统中最易出现故障的薄弱环节，可为系统故障的修复和后期的维护提供重点对象。

求最小割集的方法一般有上行法、下行法和布尔割集法等。笔者采用上行法来求最小割集，上行法是对要研究的故障树的最下一级事件开始，通过逻辑门运算把所有的底事件和中间事件联系起来，直到顶事件为止^[7]。从协调器故障树图中可以看出： $T=S_1+S_2+S_3$ ， $S_1=S_4+S_5$ ， $S_2=S_6+S_7+S_8$ ， $S_3=X_1+X_2$ ， $S_4=X_3+X_4$ ， $S_5=X_5+X_6$ ， $S_6=X_7+X_8+X_9$ ， $S_7=X_{10}+X_{11}$ ， $S_8=X_{12}+X_{13}+X_{14}+S_9+S_{10}+S_{11}+S_{12}$ ， $S_9=X_{15}+X_{16}+X_{17}$ ， $S_{10}=X_{18}+X_{19}+X_{20}$ ， $S_{11}=X_{21}+X_{22}$ ， $S_{12}=X_{23}+X_{24}+X_{25}$ 。因为协调器故障树都是用异或门联系，并且所有的底事件也相互独立，所以协调器故障树的每一个底事件就是一个最小割集，即故障树的最小割集为 $\{X_i\}$ ， $i=1,2,\dots,25$ 。

4 协调器故障树的定量分析

对协调器故障树进行定量分析是为了能计算出协调器控制未到位这一顶事件的发生概率^[8]，以及各个底事件对顶事件发生的相关概率重要度。通过定量分析排列出不同系统部件发生故障概率的大小顺序，调试人员可根据此顺序更快地发现故障位置，提高系统故障诊断效率。

4.1 顶事件发生概率

顶事件的发生概率意味着整个系统发生故障概率的大小，是分析整体系统可靠性的重要指标，一旦发生协调器控制未到位这一顶事件，就会导致整个火炮无法射击，带来难以估量的损失。在协调器系统的故障树中，各底事件都是最小割集，故顶事件概率可按式(1)进行计算：

$$G(t)=1-\prod_{i=1}^s [1-q_i(t)]。 \quad (1)$$

式中： s 为底事件的个数； $q_i(t)$ 为每个底事件在 t 时

间内发生故障的概率； t 为底事件的工作时间，以工作 300 h/a 为基础。

通过平时对项目故障数据的统计和工作人员的经验，以及对将要发生故障的预估，可推断出每个底事件的失效率 b_i 。协调器系统又以液压部件为主，各底事件的寿命服从指数分布，因此每个底事件在 t 时间段内的发生概率为：

$$g_i(t)=1-e^{-b_i t}。 \quad (2)$$

经过计算，得出顶事件协调器控制未到位发生的概率为 8.9%。

4.2 底事件概率重要度

研究底事件概率的重要度可分析底事件发生概率对顶事件发生的影响程度，并且在后续生产调试中对底事件概率重要度高的进行重点检查，可降低顶事件故障的发生概率。底事件概率重要度计算方法为

$$g_i^p(t)=\frac{\partial G(t)}{\partial g_i(t)}。 \quad (3)$$

因为协调器故障树之间都是通过异或门来联结各个事件，所以将式(1)和式(2)代入式(3)可得

$$g_i^p(t)=\exp\left(\sum_{i=1}^{25} -b_i t\right)\exp(b_i t)。 \quad (4)$$

4.3 底事件关键重要度

研究故障树底事件关键重要度，可分析出底事件发生概率占顶事件发生概率的占比，直观地将各底事件的关键性体现出来。底事件关键重要度的计算方法为

$$g_i^{CR}(t)=\frac{g_i(t)}{G(t)}g_i^p(t)。 \quad (5)$$

通过式(1)一(5)，可计算出各个底事件的失效率、发生概率、概率重要度和关键重要度，结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出：失效率、底事件发生率、概率重要度和关键重要度都是成正比的，基本上失效率越高的底事件对顶事件故障发生的影响也越大。由于协调器系统零部件多，结构复杂，为了能更好地在工程中减少故障，在统计各事件概率和重要度的基础上，对协调器系统各部件的重要度进行统计，可在出现故障时更高效的找出故障部件；然后再对部件内部的底事件进行排查，增加排查效率。协调器系统各部件的关键重要度如图 3 所示。

表 1 各底事件失效率、概率和重要度

底事件	失效率 $\times 10^{-6}$	发生率 $\times 10^{-3}$	概率 重要度	关键 重要度
1	1.50	0.750	0.911 6	0.008
2	1.80	0.899	0.911 8	0.009
3	14.80	7.373	0.917 8	0.076
4	2.12	1.059	0.912 0	0.011
5	6.83	3.409	0.914 1	0.035
6	14.47	7.209	0.917 6	0.074
7	11.34	5.654	0.916 1	0.058
8	4.69	2.342	0.913 1	0.024
9	16.69	8.310	0.918 6	0.086
10	0.80	0.399	0.911 4	0.004
11	3.43	1.714	0.912 6	0.018
12	4.58	2.287	0.913 0	0.023
13	23.29	11.577	0.921 7	0.120
14	5.60	2.796	0.913 6	0.029
15	0.75	0.375	0.911 3	0.004
16	7.76	3.872	0.914 5	0.040
17	5.69	2.841	0.913 6	0.029
18	14.36	7.154	0.917 6	0.074
19	1.34	0.670	0.911 6	0.007
20	3.33	1.664	0.912 5	0.017
21	0.78	0.389	0.911 4	0.004
22	3.58	1.789	0.912 6	0.018
23	11.37	5.669	0.916 2	0.058
24	22.73	11.301	0.921 4	0.117
25	2.66	1.329	0.911 2	0.014

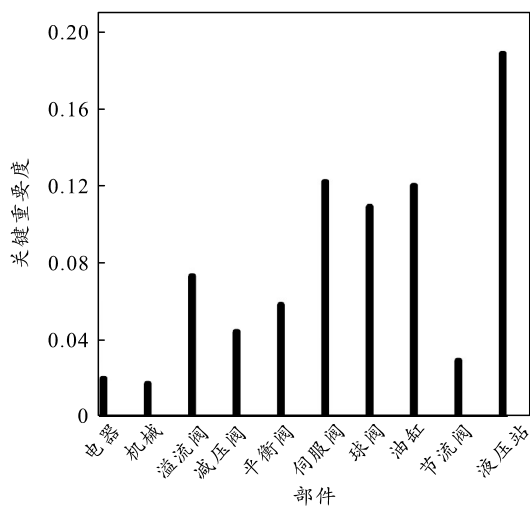


图 3 协调器部件关键重要度

从上图可以看出，整个系统在液压站发生故障的概率最高，因此在后期工程中发现故障时需重点维护和检查液压站，时刻注意液压油箱液面高度、齿轮本转速、油液温度和油液清洁度等。其次检查伺服阀有无故障，特别关注伺服阀阀芯有无异物。同时也要关注油缸的各种密封件是否老化和磨损，

检查油缸有无泄漏。球阀控制着整个系统油路的工作，且阀芯孔径小，容易堵塞。重点检查完这几个部件后若还未发现故障点，再检查余下的部件。在所有部件中，电器和机械出现故障的概率最低，也进一步说明液压系统比较复杂，更易发生故障。

5 结束语

通过故障树分析法对协调器系统进行故障分析，并且以协调器控制未到位为顶事件，通过上行法求出所有底事件的最小割集。根据平时对故障的统计，以系统工作 300 h 为基础计算出故障底事件的发生概率和顶事件的发生概率，通过公式计算出底事件的概率重要度和关键重要度。结合各个底事件的概率重要度总结出协调器系统各部件的概率重要度，并通过柱状图分析得出结果。结果表明，该方法能为调试人员排查故障进行指导，通过概率重要度大小进行有序排查，避免盲目操作，提高维修效率，为协调器系统的后期维护提供了理论依据。

参考文献：

- [1] 侯保林, 刘琮敏, 樵军谋. 火炮自动装填[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2010: 15-38.
- [2] 史定华, 王松瑞. 故障树分析技术方法和理论[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1993: 9-36.
- [3] 方坤, 陶军. 液压 ABS 系统的故障树分析[J]. 液压与气动, 2020, 44(2): 155-161.
- [4] 何庆飞, 陈小虎, 姚春江, 等. 基于故障树搜索的起重机电液系统故障定位方法研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(19): 176-180.
- [5] 余愚, 孙海山, 蒋永华. 液压系统齿轮泵故障树分析[J]. 机床与液压, 2007, 35(9): 249-250.
- [6] 陈淑英. 基于故障树的掘进机截割部液压系统故障分析[J]. 煤矿机械, 2020, 41(5): 171-173.
- [7] 赵征凡, 付江, 刘永涛. 火炮液压系统故障预测与健康管理体系设计与实现[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(12): 8-12.
- [8] 周瑞, 陶军. 蓄能器式电动液压助力转向系统的故障树分析[J]. 液压与气动, 2018, 42(11): 82-88.