

# 船用折叠式舱口盖液压系统故障树分析

郭靖, 王昊\*, 徐扬

上海电力大学, 能源与机械工程学院, 上海

Email: 2285465961@qq.com, \*whouco@163.com, katherinexy@sina.com

收稿日期: 2020年12月25日; 录用日期: 2021年1月7日; 发布日期: 2021年2月8日

## 摘要

折叠式舱口盖是散货船的重要组成部分, 而用于驱动舱口盖的液压系统非常容易出现故障, 所以为了保证船用折叠式舱口盖平稳运行, 在安装调试阶段运用故障树分析法对舱口盖的液压系统进行故障分析。首先运用故障树分析法对影响液压系统的因素进行定量分析, 然后计算出各个故障的最小割集的故障模式概率, 为船用折叠式舱口盖液压系统的故障排除、乃至设计和调试提供一定参考。

## 关键词

折叠式舱口盖, 液压系统, 故障树分析法

# Fault Tree Analysis of Hydraulic System of Marine Folding Hatch Cover

Jing Guo, Hao Wang\*, Yang Xu

School of Energy and Mechanical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai

Email: 2285465961@qq.com, \*whouco@163.com, katherinexy@sina.com

Received: Dec. 25<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jan. 7<sup>th</sup>, 2021; published: Feb. 8<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Folding hatch cover is one of the important components of bulk carrier, and the hydraulic system used to drive the hatch cover is very prone to failure, in order to ensure the smooth operation of marine folding hatch cover, using fault tree analysis to analyze the fault of the hydraulic system of the hatch cover during the installation and debugging phase. Firstly, the factors affecting hydraulic system are analyzed quantitatively by fault tree analysis method, and then calculate the fault

\*通讯作者。

mode probability of the minimum cut set of each fault, which provides a reference for the fault elimination, design and commission of marine folding hatch cover hydraulic system.

## Keywords

Folding Hatch Cover, Hydraulic System, Fault Tree Method

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

船用舱口盖主要起到保护货船货物的作用，因为液压系统紧凑且功率密度大，所以目前市场上船用舱口盖动力系统以液压系统居多。

将故障树分析法运用于工程机械液压故障分析并不少见，例如，方坤[1]利用故障树分析法对汽车液压 ABS 系统失效进行故障分析；李钦奉[2]利用故障树分析法对机床润滑泵进行了故障分析；周瑞[3]利用故障树分析法对蓄能器式电动液压助力转向系统进行可靠性分析。

前人对于船用舱口盖液压系统的研究比较少，对此采用故障树分析方法研究的几乎没有见到，因此运用故障树分析法对船用舱口盖进行液压故障分析具有创新性的价值，本文着手于此方面，期望针对船用折叠式舱口盖，一方面可以在安装调试阶段使设备调试人员全面熟悉折叠式舱口盖液压系统的调试要点，另一方面可以反映出折叠式舱口盖在液压设计方面的缺陷及使用中存在的问题。并且本文的分析思路对其它液压系统的故障分析具有一定的借鉴意义。

## 2. 折叠式舱口盖液压系统故障分析

折叠式舱口盖液压系统由液压泵站、液压管路、液压阀组和液压油缸组成，折叠式舱口盖在安装调试阶段液压故障分析主要从这四个组成部分考虑。

液压泵站主要由油箱、电动机、泵头、出口阀组以及油液组成，油箱油液清洁度未达标、电动机反转、泵头吸油管口焊接沙眼以及泵站出口阀组中的安全阀故障均会导致泵站无法建立起压力；液压管路主要由高低压管路以及高压球阀组成，高低压管路接反、高压球阀质量不符合要求均会导致液压管路爆破喷油；液压阀组主要由密封件和阀件组成，密封件质量不符合要求会导致阀组漏油，阀件故障也会使阀组无法正常工作；液压油缸主要由缸筒、活塞杆、密封圈和防尘圈组成，这些元件损坏均会导致油缸内泄无法正常工作。

## 3. 折叠式舱口盖液压系统故障树的构建

### 3.1. 折叠式舱口盖液压故障主树构建

建立故障树，首先需要进行故障树边界条件的设定[4]，根据对折叠式舱口盖液压系统的了解和对其所做的分析，对其边界条件作以下定义。

在开启船用折叠式舱口盖的过程中由于液压系统故障无法正常动作，不仅会对船厂正常安装生产造成停滞，更会因为未知的因素造成重大的伤亡事件。在折叠式舱口盖液压系统的调试中，这种现象都以折叠式舱口盖无法正常动作的形式表现出来，导致这种现象因素有液压泵站原因、液压管路原因、操作

阀组原因以及液压油缸原因。因此，把折叠式舱口盖无法正常动作 T 定义为顶事件作为故障树的入口，折叠式舱口盖液压系统故障主树见图 1 和表 1。

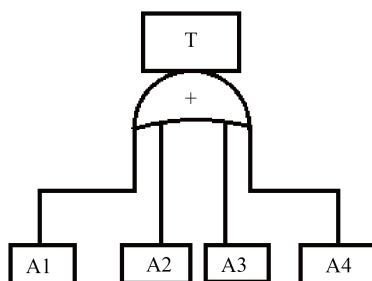


Figure 1. Main tree of hydraulic failure for folding hatchcover

图 1. 折叠式舱口盖液压故障主树

Table 1. Fault main tree event factors

表 1. 故障主树事件因子

事件代码	故障名称
T	折叠式舱口盖液压故障停机
A1	液压泵站故障
A2	液压管路故障
A3	液压阀组故障
A4	液压油缸故障

### 3.2. 折叠式舱口盖液压故障树模型构建

A1 折叠式舱口盖液压泵站故障主要原因有：(1) 泵站电动机相续错误。泵站电动机接线未按图施工容易导致泵站电动机相续错误，从而使泵反转无法建立起压力，影响折叠式舱口盖正常动作。(2) 泵站安全阀故障。一般连接液压管路前会对液压管路进行酸洗去除内部的铁锈以及杂质，由于液压管路酸洗不到位可能导致杂质进入泵站安全阀，使泵站安全阀无法正常工作，从而使泵站无法达到要求压力，影响折叠式舱口盖正常动作。(3) 泵站 P 口故障。泵站 P 口管路未连接可靠，导致泵站在建立起压力的过程中爆管喷油，影响折叠式舱口盖正常动作。(4) 泵站吸油口故障。由于泵站吸油口在加工时质量不过关，导致泵站吸油口焊接存在沙眼无法正常吸油建立起压力，影响折叠式舱口盖正常工作。

A2 折叠式舱口盖液压管路故障主要因素有：(1) 高压管路与低压管路接反。由于折叠式舱口盖高压管路与低压管路接反，导致低压管路承受高压管路的压力从而爆管，影响折叠式舱口盖正常工作。(2) 液压管路球阀故障。由于液压管路上高压球阀质量不过关，导致高压球阀爆破喷油，影响折叠式舱口盖正常工作。

A3 折叠式舱口盖操作阀组故障主要因素有：(1) 阀组漏油故障。阀组漏油主要有底座漏油和阀组上阀件漏油两种类型，主要是因为密封圈漏油导致，影响折叠式舱口盖正常工作。(2) 阀组阀件故障。阀组阀件故障主要有：油液未达到清洁度标准导致有杂质进入阀件使阀件堵塞无法正常工作、阀组通孔未按图纸施工等导致阀件无法正常工作，影响折叠式舱口盖正常工作。

A4 折叠式舱口盖液压油缸故障主要因素有：(1) 油缸表面防尘圈损坏故障。由于船厂在焊接施工过程中对油缸保护不到位，导致高温焊渣掉落到油缸表面使油缸表面防尘圈损坏，液压油缸漏油影响折叠

式舱口盖正常工作。(2) 油缸内泄故障。由于船厂施工过程中对液压油缸保护不到位, 导致油缸表面刮伤致使油缸内泄影响折叠式舱口盖正常工作。

通过自己的调试经验, 总结得出上述中间事件的其他中间事件, 中间事件找出后, 进一步使用逻辑分析来识别中间事件的所有可能的直接原因。

对故障树模型进行简化完善, 获得折叠式舱口盖液压故障树模型图见图 2, 其中各事件因子见表 2。

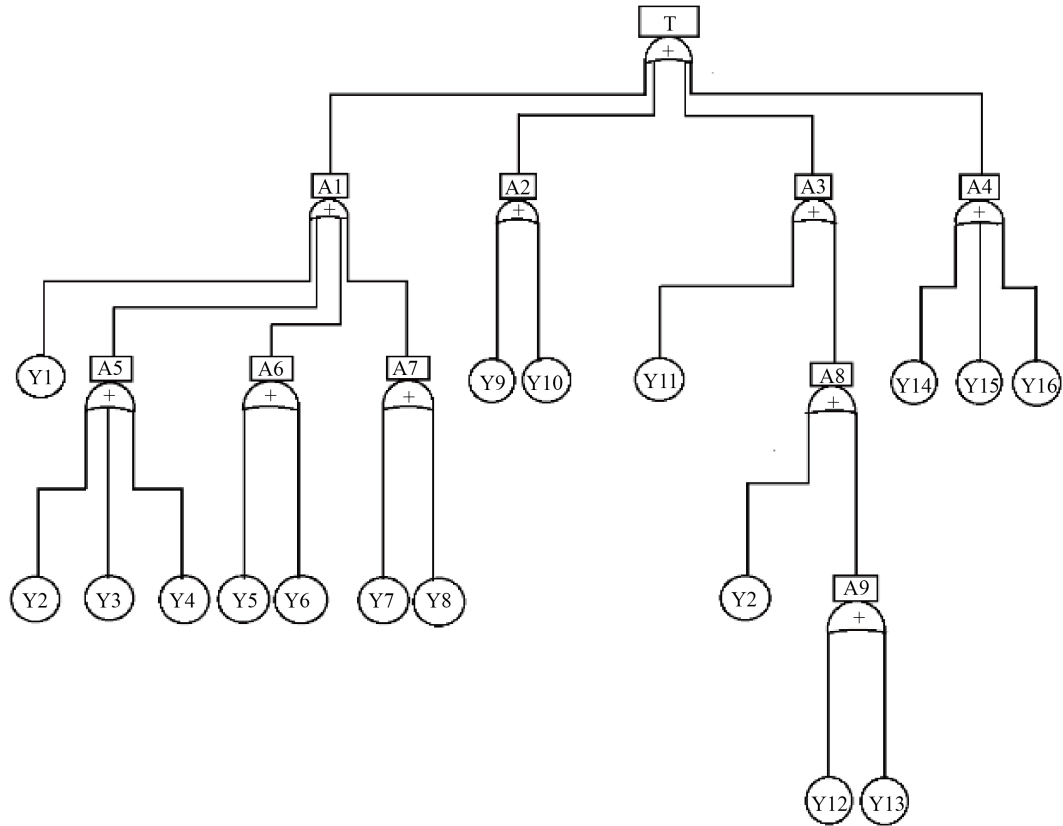


Figure 2. Hydraulic fault tree for folding hatchcover  
图 2. 折叠式舱口盖液压故障树

Table 2. Event factors  
表 2. 各事件因子

事件代码	故障名称	事件代码	故障名称
T	折叠式舱口盖液压故障停机	Y4	溢流阀故障
A1	液压泵站故障	Y5	P 口密封圈故障
A2	液压管路故障	Y6	P 口法兰螺栓未上紧
A3	液压阀组故障	Y7	吸油口焊接质量不过关
A4	液压油缸故障	Y8	吸油口内有气体未排出
A5	泵站安全阀故障	Y9	高低压管路接反
A6	泵站 P 口故障	Y10	液压球阀质量不过关
A7	泵站吸油口故障	Y11	阀组密封圈故障
A8	阀元件故障	Y12	换向阀中位弹簧故障

Continued

A9	阀元件加工故障	Y13	安全阀先导油口未加工
Y1	相续错误	Y14	油缸表面电镀层损坏
Y2	油液清洁度不符合标准	Y15	油缸表面防尘圈损坏
Y3	管路清洁不到位	Y16	油缸密封圈损坏

#### 4. 折叠式舱口盖液压故障树的分析

##### 最小割集故障模式概率分析

在构建故障树后，所有级别的事件之间的逻辑关系从底部事件逐步写入，用布尔和将顶事件转化为底事件积之和[5]。

$$A9 = Y12 \cup Y13$$

$$A8 = Y2 \cup A9 = Y2 \cup Y12 \cup Y13$$

$$A7 = Y7 \cup Y8$$

$$A6 = Y5 \cup Y6$$

$$A5 = Y2 \cup Y3 \cup Y4$$

$$A4 = Y14 \cup Y15 \cup Y16$$

$$A3 = Y11 \cup A8$$

$$A2 = Y9 \cup Y10$$

$$A1 = Y1 \cup A5 \cup A6 \cup A7$$

$$T = A1 \cup A2 \cup A3 \cup A4$$

根据布尔代数运算规则有：

$$T = Y1 \times (Y2)^2 \times Y3 \times Y4 \times Y5 \times Y6 \times Y7 \times Y8 \times Y9 \times Y10 \times Y11 \times Y12 \times Y13 \times Y14 \times Y15 \times Y16$$

为了计算折叠式舱口盖液压故障树顶部事件的概率，首先要知道故障树中基础事件的概率。根据自己的调试经验一船套折叠式舱口盖液压系统需要调试 2~3 天，调试 5 船套折叠式舱口盖液压系统基本可以熟悉折叠式舱口盖的液压系统并且做相应的记录可以大致得到各基础事件出现的概率，总体来说预计使用两周时间可以得到相关数据然后做相应的计算分析。

本文通过自己近几年对折叠式舱口盖液压故障造成的停机事件影响汇总，在每次出现液压故障后进行分析讨论，确定发生故障的基础事件，统计每个基础事件出现的概率，可获得每个基础事件的发生概率，见表 3。

**Table 3.** Fault probability of base event occurrence

**表 3.** 基础事件发生的故障概率

事件	概率	事件	概率
Y1	0.01	Y9	0.01
Y2	0.15	Y10	0.01
Y3	0.05	Y11	0.04
Y4	0.02	Y12	0.08
Y5	0.01	Y13	0.01

Continued

Y6	0.05	Y14	0.02
Y7	0.01	Y15	0.02
Y8	0.05	Y16	0.01

则 T 发生的概率为  $P = 1 - (1 - 0.01) \times (1 - 0.15) \times (1 - 0.05) \times (1 - 0.02) \times (1 - 0.01) \times (1 - 0.05) \times (1 - 0.01) \times (1 - 0.05) \times (1 - 0.01) \times (1 - 0.01) \times (1 - 0.04) \times (1 - 0.08) \times (1 - 0.01) \times (1 - 0.02) \times (1 - 0.02) \times (1 - 0.01) = 0.435$

通过计算最小割集[6]的发生概率与顶事件的发生率之比可以得出每个最小割集的故障模式概率[7], 详见表 4。

**Table 4.** Minimum cut set fault mode probability of the base event

**表 4.** 基础事件最小割集故障模式概率

事件	故障模式概率	事件	故障模式概率
Y1	0.023	Y9	0.023
Y2	0.345	Y10	0.023
Y3	0.115	Y11	0.092
Y4	0.046	Y12	0.184
Y5	0.023	Y13	0.023
Y6	0.115	Y14	0.046
Y7	0.023	Y15	0.046
Y8	0.115	Y16	0.023

如表 4 所示, 底事件 Y2 故障模式概率最大, 即底事件 Y2 对折叠式舱口盖液压系统的影响最大。所以, 在调试过程前要求船厂按照标准严格使用外部循环泵用与本液压系统相同的液压油对液压管路进行循环冲洗直至达到施工标准并提供油液清洁度报告; 在调试过程中, 动作折叠式舱口盖之前将阀组 P 口与 T 口间隔离阀打开, 用泵站循环系统液压油半小时后检查液压泵站滤器, 只有当滤器中无肉眼可见的杂质才能动作折叠式舱口盖。在调试过程中其他底事件均有可能导致折叠式舱口盖液压系统故障, 判断问题时可以首先分析出故障是来源于四大部分(液压泵站、液压管路、液压阀组和液压油缸)中的哪一部分, 再结合表 4 中计算出的最小割集故障模式概率进行故障排查。

## 5. 结论

本文运用故障树分析法对折叠式舱口盖液压系统分析计算出基础事件故障模式概率, 不仅可以在安装调试阶段给相关调试人员提供一定思路, 也可以给相关设计人员提供一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] 方坤, 陶军. 液压 ABS 系统的故障树分析[J]. 液压与气动, 2020(2): 155-161.
- [2] 李钦奉, 庞浩, 刘汉阳. 灰关联分析法在机床润滑泵故障树中的应用[J]. 机床与液压, 2020, 48(5): 184-188.
- [3] 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(11): 82-88.
- [4] 闫川川, 王高飞. 基于故障树法对钢包加盖设备常见故障分析[J]. 中国冶金, 2019, 29(11): 72-75.

- 
- [5] 水剑虹. 基于故障树分析法在工程机械维修中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2016(23): 82-83.
  - [6] 梁光辉, 李兆军. 液压挖掘机回转系统故障树分析[J]. 液压与气动, 2012(4): 107-110.
  - [7] 姚成玉, 侯安农, 陈东宁, 等. 基于 T-S 故障树的液压轮边制动系统可靠性分析[J]. 液压与气动, 2019(6): 11-16.