

# 汽车高压继电器粘连失效故障树分析

张长涛<sup>1,2</sup> 房元<sup>1,2</sup> 李威<sup>1,2</sup> 曲振宁<sup>1,2</sup> 慈伟程<sup>1,2</sup>

(1.中国第一汽车股份有限公司研发总院,长春 130013;2.高端汽车集成与控制全国重点实验室,长春 130013)

【欢迎引用】张长涛,房元,李威,等.汽车高压继电器粘连失效故障树分析[J].汽车文摘,2024(9):32-37.

【Cite this paper】ZHANG C T, FANG Y, LI W, et al. Automotive High-Voltage Relay Adhesion Failure Fault Tree Analysis[J]. Automotive Digest (Chinese), 2024(9): 32-37.

【摘要】针对电动汽车高压继电器粘连失效故障现象,采用故障树分析法(FTA)进行相关可靠性分析。通过分析高压继电器所在电气系统,建立继电器粘连失效故障树模型,对其进行定性及定量分析。最后求解故障树最小割集及顶事件故障概率,并依据重要度分析找出引起粘连失效的薄弱环节。

关键词:高压继电器;粘连失效;故障树分析法

中图分类号:U469.72+2 文献标志码:A DOI: 10.19822/j.cnki.1671-6329.20230241

## Automotive High-Voltage Relay Adhesion Failure Fault Tree Analysis

Zhang Changtao<sup>1,2</sup>, Fang Yuan<sup>1,2</sup>, Li Wei<sup>1,2</sup>, Qu Zhenning<sup>1,2</sup>, Ci Weicheng<sup>1,2</sup>

(1.Global R&D Center, China FAW Corporation Limited, Changchun 130013; 2.National Key Laboratory of Advanced Vehicle Integration and Control, Changchun 130013)

【Abstract】In view of the electric vehicle high-voltage relay adhesion failure phenomenon, Fault Tree Analysis (FTA) is used to perform the relevant reliability analysis. By analyzing the electrical system in which the high-voltage relay is located, a relay Adhesion failure fault tree model is built to analyze it qualitatively and quantitatively. Finally, the minimum cut set of the fault tree and the top event failure probability are solved, and the weak links causing the adhesion failure are identified based on the importance analysis.

Key words: High voltage relays, Adhesion failure, Fault Tree Analysis (FTA)

## 0 引言

在绿色发展背景下,各国都将发展新能源汽车作为交通减碳的主要方式。新能源汽车一般采用高压电池组作为动力源,在动力电池系统或相关高压总成中配置高压继电器。高压继电器是维持电气系统稳定性的重要元器件,可以保证电气系统正常通断<sup>[1-3]</sup>。对引起高压继电器失效的关键要素进行分析、识别,是减少其失效频次、提升整车可靠性的重要方法。目前用于识别系统失效关键诱因、预测系统失效概率的方法主要有可靠性框图法、故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)、佩特里网(Petri Nets)等。故障树分析法是一种将系统故障形成的原因由总体至部分按树枝状逐级细化的分析方法。因其可通过梳理系统部件间和子系统间逻辑功能关系,寻找系统故障事件的根本原因,而被广泛用于事前与

事后故障分析<sup>[4-6]</sup>。1961年FTA首次被美国贝尔研究所成功应用于导弹随机失效问题预测研究中<sup>[7]</sup>,之后该方法及其演变、扩展方法广泛应用在故障诊断、系统薄弱环节识别等研究中。如单机故障排查方面,杨帆<sup>[8]</sup>将故障树分析用于压气机的振动故障分析;霍丽宁<sup>[9]</sup>使用故障树分析法估计引信弹道爆炸概率。除机械电子等设备外,故障树分析也可以应用于大系统或体系的故障排查,如郭韧<sup>[10]</sup>在研究跨境电商物流的脆弱性时使用了故障树分析;Asuelimen<sup>[11]</sup>使用故障树和风险矩阵进行海洋地震测量船运营的规范化安全评估。为解决复杂系统可靠性分析问题,多种故障树的衍生或相关分析方法不断出现,如陈东宁<sup>[12]</sup>提出了连续时间多维T-S动态故障树分析方法,并验证其可行性;陈舞<sup>[13]</sup>将T-S模糊故障树和贝叶斯网络结合评价隧道坍塌的易发性。故障树分析法的丰富应用案例和研究证明了其在系统可靠性评

估及薄弱环节识别方面的可行性。



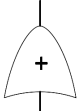
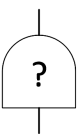

目前,电动乘用车高压电气系统的相关研究起步较晚,汽车用高压继电器故障模式及可靠性评估的研究内容有限。因此,本文结合故障树分析法,对高压继电器所在电气系统进行可靠性评估,以继电器粘连失效为顶事件计算其发生概率,并通过定量及定性分析确定系统的薄弱环节。

## 1 故障树分析原理

### 1.1 故障树基本符号及含义

应用故障树分析方法时,目标系统的所有故障状态以及不正常状况,其他完好状态及正常状况,皆定义为事件。系统的结果事件定义为顶事件,作为故障树分析的目标,位置在故障树的顶端。引起其他事件发生且无法继续拆分的事件成为底事件。处于顶事件和底事件中间的其他结果事件定义为中间事件。代表以上事件的符号和表现事件逻辑关系的门符号构成系统的故障树。本文建立故障树的基本符号表示见表1。

表1 故障树符号表示及其含义

符号图像	符号名称	符号含义
	基本事件 (底事件)	故障分析中,发生原因已明确的底事件
	中间事件	处于顶事件与底事件中间,是顶事件发生的原因,又是底事件造成的结果
	与门	至少有一个输入事件发生时,输出事件发生
	或门	所有输入事件发生,输出事件才发生
	顶事件	结果事件,位于故障树的顶端

### 1.2 故障树分析目标及步骤

故障树分析的目标:明确地表现各事件的联系和相关逻辑;从故障树的顶端向下分析,找出系统故障与哪些部件、零件的状态有关,全面弄清引起系统故障的原因和部位;由故障树的下端向上分析,查清零件、部件故障对系统故障的影响和传播途径;全方位考虑系统环境、人、软硬件等因素,确定目标系统故障率及存在的薄弱环节,以便提出可靠性设计措施。

故障树分析的实施步骤如下:首先,建立故障树模型;然后,建立故障树数学模型;其次是系统模型定性分析;最后,对系统模型进行定量分析并综合结果得出结论。

其中系统定性分析目的是为了确定引起目标事件发生的全部可能故障模式,也就是明确该系统出现故障有多少可能性组合。当故障树几个顶事件同时发生时,将引起顶事件的发生,则称这些底事件组成的集合称之为割集,且当去掉该割集中任意一个事件后,就不再是割集,则这个割集被称之为最小割集<sup>[4]</sup>。对于已经发生故障的系统,最小割集所包括的事件是必须要处理的基本故障。故障树定性分析的首要目标就是最小割集确定。

故障树定量分析主要包括顶事件概率求解和底事件重要度计算。对于给定的故障树,可以明确计算出系统顶事件的故障概率数值来评估该系统的整体可靠性;不同底事件对顶事件发生的贡献程度不同,称作底事件重要度,重要度对识别薄弱环节、确定系统故障诊断方案中发挥着重要作用<sup>[15]</sup>。

## 2 汽车高压继电器粘连失效机理分析

### 2.1 高压继电器所处电气系统简述

电动汽车高压电气系统主要由动力电池、电驱、空调、正温度系数热敏电阻(Positive Temperature Coefficient, PTC)等负载及高压继电器所在的配电模块等组成。其中配电模块包含了预充电路以及若干控制不同电路的继电器,其中正/负极继电器是高压大电流电路的控制开关,在整车电路中起到自动调节、安全保护、切换电路等作用。高压继电器系统示意图1。

高压继电器由触点系统、电磁系统和机械系统3部分共同组成,当高压继电器受到控制器驱动时,其动作线圈通过电流,同时产生磁场,与铁芯相连的动触点动作,动静触点闭合,高压继电器高压电路接通;当控制器停止驱动高压继电器后,其动作线圈断电导致磁场消失,铁芯被弹簧推到原位,动静触点断开,高压继电器高压电路断开;通过控制继电器动作线圈的电信号,进而控制动静触点的闭合与分离,实现对高压系统的逻辑控制,是整车的关键部件。

由图1可以看出,高压继电器在电动汽车内部电路中数量和种类相对其他元器件较多,而且在充电、预充、外放电以及驱动电机、外用电器相关负载等不同工况下,都会由继电器参与工作。因此相较于电路其他部分,继电器具有较高的重要度,其发生失效的

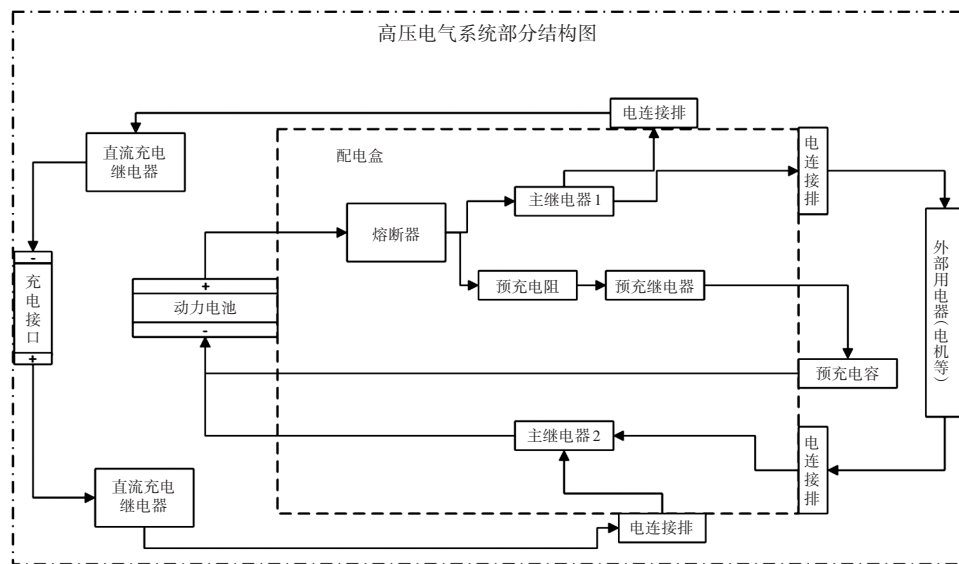


图1 高压继电器电气系统逻辑简图

概率也相应增加,需要明确其关键故障模式,提升高压继电器的可靠性及寿命。

## 2.2 高压继电器失效机理

汽车用高压继电器实际应用中的主要失效模式为动、静触点粘连和分断失效,一旦高压继电器出现粘连故障,整车高压回路一直存在高压电风险,威胁乘员安全。除自身原因外,汽车内部高压电气系统中其他控制器件故障或异常也会引发继电器触点粘连。

引起高压继电器出现粘连失效的原因有很多,按失效机理不同可分为容性接通粘连失效、分断粘连失效等。容性接通粘连失效是因为高压回路中含有电机控制器、空调压缩机等容性负载,当回路接通时,如果预充准备不充分或控制器逻辑不合理会导致产生较大的浪涌电流,在高压继电器动静触点闭合时的回跳会在接触表面反复产生拉弧,使触点接触面局部升

温-软化-熔化,快速冷却后动静触点发生粘连;分断粘连失效一部分原因是因为负载大电流切断时触点表面产生非常大的电弧使触点表面熔化,导致动静触点粘连在一起;另一部分原因是由于长期带载闭合导致触点表面不断有烧蚀积累引起的分断能力下降。此外如果回路发生短路,动静触点间会出现非常大的电流产生电动斥力而分离,从而产生电弧,触点表面熔化粘接。

通过收集电动汽车高压继电器的历史故障数据,总结引起中间事件的主要原因有4类:线圈驱动异常、带载分断故障、触点温升、短路大电流引起的触点粘连。

通过以上的失效机理分析并结合继电器触点粘连失效的历史统计事件进行鱼骨图分析,对引起粘连失效的因素进一步细化分解,找出关键影响因素,鱼骨图分析结果见图2。

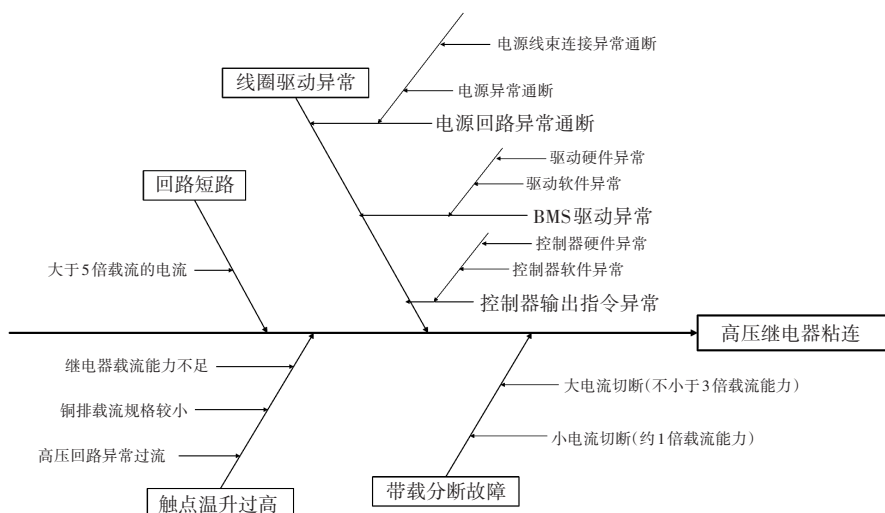

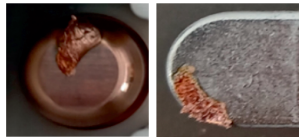
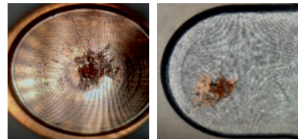


图2 高压继电器粘连失效鱼骨图分析

通过对试验失效高压继电器的拆解分析,不同原因引起继电器粘连失效的动静触点接触面状态见表2。

表2 高压继电器失效时触点表面状态

失效类型及状态描述	动静触点接触面状态
容性接通(表面材料转移)	
大电流分断(表面材料转移、熔化)	
短路(表面材料转移)	

### 3 汽车高压继电器粘连失效故障树分析

#### 3.1 高压继电器粘连失效故障树建立

为分析高压继电器触点粘连失效概率,量化各底事件对高压继电器触点粘连失效事件的影响,本文以纯电动汽车配电箱中高压继电器触点粘连失效为顶事件进行故障树构建。

根据失效机理分析结果及历史经验数据分析,将所有能够引发继电器粘连失效的原因进行整理编码见表3。

表3 高压继电器粘连失效相关事件编码

编码	含义	编码	含义
$D_1$	高压继电器粘连	$X_3$	高压回路异常过流
$Y_1$	回路短路	$X_4$	5倍以上载流的电流
$Y_2$	带载分断	$X_5$	电源线束连接异常通断
$Y_3$	触点温升过高	$X_6$	电源异常通断
$Y_4$	线圈驱动异常	$X_7$	驱动硬件异常
$Y_5$	电源回路通断异常	$X_8$	驱动软件异常
$Y_6$	BMS驱动异常	$X_9$	控制器硬件异常
$Y_7$	控制器输出指令异常	$X_{10}$	控制器软件异常
$Y_8$	载流异常	$X_{11}$	多次小电流带载断开
$X_1$	继电器载流能力不足	$X_{12}$	单次大电流带载断开
$X_2$	外接铜排载流规格小		

同时收集相关的故障信息见表4,结合相关领域专家分析给出相应底事件的故障概率见表5。

依据故障传播的逻辑建立高压继电器粘连失效故障树见图3。

表4 高压继电器故障信息

故障类型	数量/个	车型	整车数量
$X_1$	6	A	121 274
$X_2$	0		
$X_3$	0		
$X_4$	2		
$X_5$	3		
$X_6$	2		
$X_7$	8		
$X_8$	3		
$X_{95}$	1		
$X_{10}$	1		
$X_{11}$	1		
$X_{12}$	0		

注:数据为2018年至2023年共5年间某款车的的历史数据

表5 高压继电器粘连失效底事件故障概率

编码	概率	编码	概率
$X_1$	0.000 006	$X_7$	0.000 000 8
$X_2$	0	$X_8$	0.000 001 6
$X_3$	0	$X_9$	0
$X_4$	0.000 002 5	$X_{10}$	0.000 000 8
$X_5$	0.000 004 9	$X_{11}$	0.000 000 8
$X_6$	0.000 001 6	$X_{12}$	0

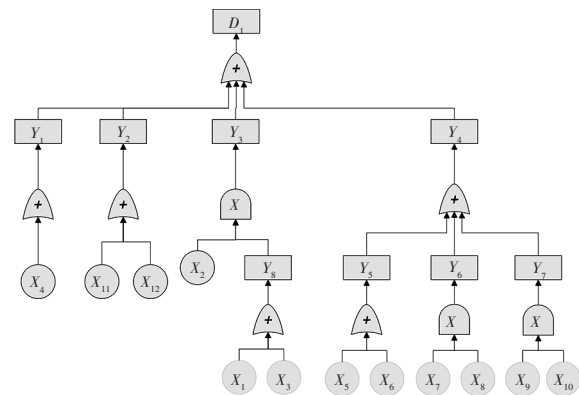


图3 高压继电器粘连失效故障树

#### 3.2 高压继电器粘连失效故障树分析

##### 3.2.1 最小割集

求解故障树最小割集的方法有布尔割集法、上行法和下行法等。文中采用上行法求解最小割集,由图3可以得出顶事件( $D$ )与中间事件( $Y$ )及底事件( $X$ )的逻辑关系为:

$$D = Y_1 \cup Y_2 \cup Y_3 \cup Y_4 \quad (1)$$

为方便展开底事件计算把逻辑乘 $A \cap B$ 记为 $AB$ 。可以得到顶事件( $D$ )与底事件( $X$ )的关系式,如式(2)。

$$\begin{aligned}
 D &= Y_1 \cup Y_2 \cup Y_3 \cup Y_4 \\
 &= (X_5 \cup X_6 \cup X_7 X_8 \cup X_9 X_{10}) \cup X_{11} \\
 &\quad \cup X_{12} \cup X_4 \cup ((X_2)(X_1 \cup X_3)) \quad (2) \\
 &= X_4 \cup X_5 \cup X_6 \cup X_{11} \cup X_{12} \cup \\
 &\quad X_1 X_2 \cup X_2 X_3 \cup X_7 X_8 \cup X_9 X_{10}
 \end{aligned}$$

高压继电器失效故障树的最小割集为： $\{X_4\}$ ,  $\{X_5\}$ ,  $\{X_6\}$ ,  $\{X_{11}\}$ ,  $\{X_{12}\}$ ,  $\{X_1, X_2\}$ ,  $\{X_2, X_3\}$ ,  $\{X_7, X_8\}$ ,  $\{X_9, X_{10}\}$ 。

### 3.2.2 顶事件故障概率计算

顶事件(目标事件)的发生概率是评价系统整体可靠性的重要指标,基于底事件的顶事件失效概率 $p_D$ 的计算公式为:

$$\begin{aligned}
 p_D &= \{1 - (1 - p_{Y_1})(1 - p_{Y_2}) \\
 &\quad (1 - p_{Y_3})(1 - p_{Y_4})\} \\
 &= \{1 - (1 - p_{X_4})(1 - p_{X_{11}})(1 - p_{X_{12}}) \\
 &\quad \times (1 - p_{X_2}(p_{X_1} + p_{X_3} - p_{X_1} p_{X_3})) \\
 &\quad \times [1 - (p_{X_5} + p_{X_6} - p_{X_5} p_{X_6}) \\
 &\quad \times (1 - p_{X_7} p_{X_8})(1 - p_{X_9} p_{X_{10}})]\} \quad (3)
 \end{aligned}$$

式中: $p_{Y_i}$ 为中间事件 $i$ 的故障发生概率, $p_{X_i}$ 为底事件 $i$ 的故障发生概率。

依据表5底事件失效概率及公式(3),可计算出故障树顶事件失效概率 $p_D = 0.000\ 009\ 8$ 。

### 3.2.3 底事件重要度计算

故障树分析中,底事件重要度反映了其对顶事件的影响程度。底事件重要度越大,则说明该事件所处的环节越薄弱。重要度是系统可靠性薄弱环节识别、可靠性改进及优化的基础。常用的重要度有两个,其中一个是关键性重要度,其表示由某一底事件触发顶事件的可能性大小;另一个是概率重要度,表示底事件发生概率对目标顶事件是否发生的影响程度。这是评价引起系统故障事件重要性的关键指标。

底事件 $i$ 发生概率变化时对顶事件概率变化的影响程度称为事件 $i$ 的概率重要度 $Ig(i)$ ,其求解公式为:

$$Ig(i) = \frac{\partial p_D}{\partial p_{X_i}} \quad (4)$$

概率重要度 $Ig(i)$ 数值越大,说明底事件相比其他事件对顶事件的影响程度越大。将表4数值及 $p_D$ 带入公式可以得到各底事件的概率重要度见表6,并绘制概率重要度的条形图,如图4所示。

底事件 $i$ 的关键性重要度 $I_c(i)$ 的含义是其故障概率的变化率与其引起顶事件发生概率变化率之比,其计算公式为:

$$I_c(i) = \frac{p_{X_i}}{p_D} Ig(i) \quad (5)$$

$I_c(i)$ 的数值表示底事件 $i$ 引起顶事件发生的可能性大小。将表4数值及 $p_D$ 带入公式可以得到各底事件的关键性重要度如表7,并绘制关键性重要度的条形图,见图5。

表6 底事件概率重要度

编码	概率重要度	编码	概率重要度
$X_1$	0	$X_7$	0.000 000 000 010 4
$X_2$	0.000 005 999 941 2	$X_8$	0.000 000 000 005 2
$X_3$	0	$X_9$	0.000 000 000 005 2
$X_4$	0.999 992 700 013	$X_{10}$	0
$X_5$	0.999 995 100 006	$X_{11}$	0.999 991 000 024 1
$X_6$	0.999 991 800 016 9	$X_{12}$	0.999 990 200 031 3

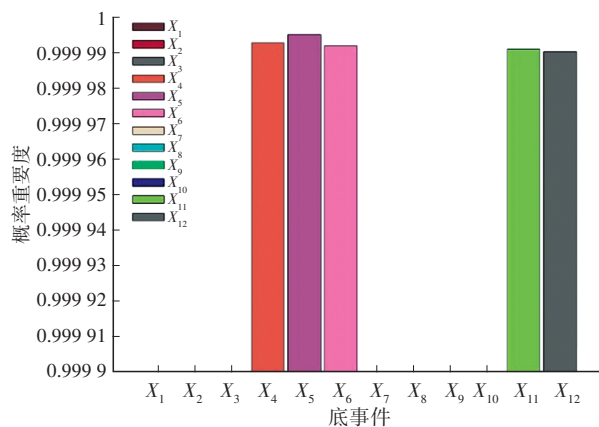


图4 底事件概率重要度

表7 底事件关键性重要度

编码	关键性重要度	编码	关键性重要度
$X_1$	0	$X_7$	0.000 000 000 000 8
$X_2$	0	$X_8$	0.000 000 000 000 8
$X_3$	0	$X_9$	0
$X_4$	0.255 100 993 074	$X_{10}$	0
$X_5$	0.499 999 146 424	$X_{11}$	0.081 632 179 009
$X_6$	0.163 264 488 628	$X_{12}$	0

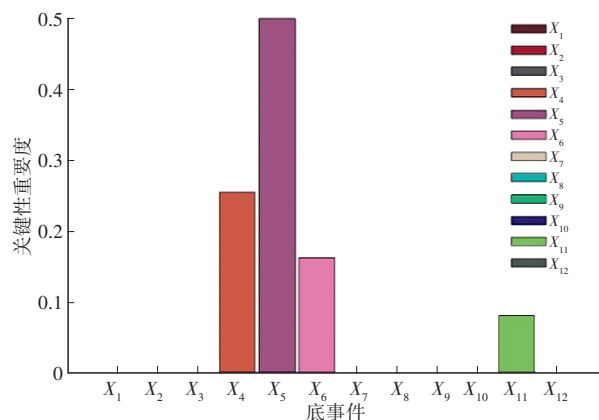


图5 底事件关键性重要度

由表5可以得出高压继电器粘连失效故障树底事件的概率重要度大小排序为: $X_5 > X_4 > X_6 > X_{11} > X_{12} > X_2 > X_7 > X_9 = X_8 > X_1 = X_3 = X_{10}$ 。

由表7可以得出高压继电器粘连失效故障树底事件的关键性重要度大小排序为: $X_5 > X_4 > X_6 > X_{11} > X_7 = X_8 > X_1 = X_2 = X_3 = X_9 = X_{10} = X_{12}$ 。

综合底事件概率重要度及关键性重要度可知,对系统故障影响较大的底事件是电源线束连接异常通断、5倍以上载流的电流、电源异常通断。

#### 4 结束语

本文通过建立高压继电器粘连失效故障树模型,并将模型结合历史数据进行定量、定性分析,得到以下结论:

(1)通过对高压继电器粘连失效机理及该故障传播途径的分析,确立了电动汽车高压继电器故障树模型,找到了引发粘连失效相关事件的最小割集,计算出高压继电器的故障概率及相关底事件的概率重要度和关键性重要度。

(2)结合故障树概率重要度和关键性重要度可分析得出,回路短路、线圈驱动异常是引起继电器粘连失效的主要原因和薄弱环节;需要从以上两个薄弱环节开展相应的失效机理分析从而达到提高高压继电器可靠性,降低其发生粘连失效故障的概率,间接提高整车的可靠性。

#### 参 考 文 献

- [1] 朱楚梅. 车用动力电池的高压继电器控制技术[J]. 汽车电器, 2022(2): 19-21.
- [2] 符兴锋, 翟艳霞, 肖莎, 等. 增程式纯电动汽车动力电池高压电安全管理[J]. 汽车技术, 2014(10): 44-49.
- [3] 刘金配, 邓海文, 黄祖朋. 电动汽车高压继电器应用选型研究[J]. 汽车实用技术, 2019(10): 22-24.
- [4] 薛广库, 乔永忠, 夏远猛, 等. 基于故障树分析法的刀具库堆垛机货叉故障快速诊断与维修[J]. 机床与液压, 2019, 47(10): 184-187.
- [5] CHANG Y, ZHANG D. Causation Analysis of Fire Explosion in the Port's Hazardous Chemicals Storage Area Based on FTA-AHP[J]. Process Safety Progress, 2023, 42(1): 96-104.
- [6] PURBA J H, SONY T, JAHYANI D T, et al. Fuzzy Probability and  $\alpha$ -cut Based-Fault Tree Analysis Approach to Evaluate the Reliability and Safety of Complex Engineering Systems[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2022, 38(5): 2356-2371.
- [7] 罗承昆, 陈云翔, 何桢, 等. 基于故障树分析的航空装备体系结构贡献率评估方法[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(1): 155-162.
- [8] 杨帆, 张倩, 赵鑫. 基于故障树分析法的压气机振动故障分析[J]. 航空发动机, 2018, 44(2): 35-39.
- [9] 霍丽宁, 王雨时. 用故障树分析法估计引信弹道炸概率[J]. 探测与控制学报, 2020, 42(6): 13-20.
- [10] 郭韧, 温情. 跨境电商物流系统脆弱性研究: 基于故障树分析法的视角[J]. 华侨大学学报: 哲学社会科学版, 2018(5): 73-80.
- [11] ASUELIMEN G, BLANCO-DAVIS E, WANG J, et al. Formal Safety Assessment of a Marine Seismic Survey Vessel Operation, Incorporating Risk Matrix and Fault Tree Analysis[J]. Journal of Marine Science and Application, 2020, 19(2): 155-172.
- [12] 陈东宁, 许敬宇, 姚成玉, 等. 连续时间多维T-S动态故障树分析方法[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 231-244.
- [13] 陈舞, 王浩, 张国华, 等. 基于T-S模糊故障树和贝叶斯网络的隧道坍塌易发性评价[J]. 上海交通大学学报, 2020, 54(8): 820-830.
- [14] 潘波, 黄领才, 姜同敏, 等. 服役飞机结构件腐蚀失效故障树分析及改进[J]. 北京航空航天大学学报, 2010(3): 299-302.
- [15] 周长聪, 常琦, 周春苹, 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.

(责任编辑 明慧)