

doi: 10.7690/bgzd.2018.11.003

一种高可靠性水陆转换综合操控技术

贾琴¹, 张聪², 范俊¹, 朱卯成¹, 佘阳¹

(1. 上海电控研究所北斗工程研发中心, 上海 200092; 2. 装甲军代局驻上海地区军代室, 上海 200011)

摘要: 针对两栖装甲车辆水陆转换操控中产生的可靠性问题, 提出一种高可靠性水陆转换操控技术的实现方法。运用可靠性工程理论和方法, 围绕故障和问题, 进行故障机理分析, 得到产品的可靠性关键件清单, 找出影响操控可靠性的问题根源, 完成可靠性技术的研究改进, 形成可靠性增长总体方案, 并对方案进行可靠性建模、分配和预计。结果表明: 该方法能减少对维修人力及保障性要求, 降低使用维修保障费用, 指导产品设计与研制。

关键词: 高可靠性; FTA; FMECA; 水陆转换; 操控

中图分类号: TJ0 **文献标志码:** A

A Highly Reliable Integrated Control Technology for Land and Water Conversion

Jia Qin¹, Zhang Cong², Fan Jun¹, Zhu Maocheng¹, Wu Yang¹

(1. Beidou Engineering Research & Development Center, Shanghai Electronic Control Research Institute, Shanghai 200092, China;

2. Armored Force Military Representative Office in Shanghai, Shanghai 200011, China)

Abstract: In order to solve the reliability problems arising from amphibious armored vehicles in land and water conversion, proposes a method of a high reliability land and water conversion manipulation. Applying the theory and method of reliability engineering, based on fault and problem, analyzes the fault mechanism, acquires the reliability key part list of product, finds out the key factor which influences the manipulate reliability, realizes improvement of reliability technology research and forms the reliability improvement plan. Reliability modeling, allocation and prediction for reliability growth plan are carried out. The results show that the method can decrease requirements of repairing human resource and maintenance, reduce maintenance cost and guide the development and production of the products.

Keywords: high reliability; FTA; FMECA; land and water conversion; manipulate

0 引言

在现代战争中, 信息化、智能化、无人化和体系化成为发展趋势, 为了赢得战争的胜利, 必须发展高新技术武器。这些武器必须具有集中精确打击能力、良好的战备完好性和任务成功性, 以及快速机动性能。可靠性、维修性、保障性、测试性及安全性是提高武器装备战备完好性和打击能力的基础, 也是改善武器装备快速机动性的有力保证。现代战争是一场高科技、高可靠性的战争。发展武器装备不仅要着眼于优越的战斗性能, 还要全面系统地考虑实用性、可用性, 做到能打仗、打胜仗。

近年来, 项目总体多次提出开展提高装备可靠性专项要求, 在产品设计和研制过程中不断加大对产品可靠性的设计和考核。针对两栖装甲装备水陆转换操控装置设计和使用中出现的可靠性问题, 笔者以可靠性的工程理论方法为基础, 运用可靠性工程分析方法, 提出一种高可靠性水陆转换操控技术的实现途径, 以提高两栖装甲装备水陆转换操控装

置的战备完好性和任务成功性, 减少对维修人力及保障性要求, 降低使用维修保障费用, 并为电子类产品的可靠性设计和管理工作提供参考依据。

1 技术途径

笔者以可靠性工程理论方法为基础, 运用可靠性工程分析方法, 得到两栖装甲装备水陆转换操控装置可靠性增长研究总体技术途径, 如图 1 所示。通过对两栖装甲装备水陆转换操控装置(简称操控装置)故障的统计, 分析影响操控装置可靠性的主要因素, 判定故障类型和故障等级, 明确可靠性增长单元。针对可靠性增长单元, 围绕故障和问题, 进行故障机理分析, 开展故障树分析(fault tree analysis, FTA)和故障模式、影响及危害性分析(failure mode, effects and criticality analysis, FMECA)^[1], 得到产品的可靠性关键件清单, 找出影响操控装置可靠性的问题根源, 明确可靠性增长改进方案的技术突破口, 完成可靠性技术的研究改进, 形成操控装置可靠性增长总体方案。对可靠性

收稿日期: 2018-09-14; 修回日期: 2018-09-28

作者简介: 贾琴(1982—), 女, 安徽人, 本科, 高级工程师, 从事车辆综合电子研究。

增长方案进行可靠性建模、分配和预计，验证方案的合理性和有效性，指导操控装置设计与研制^[2]。

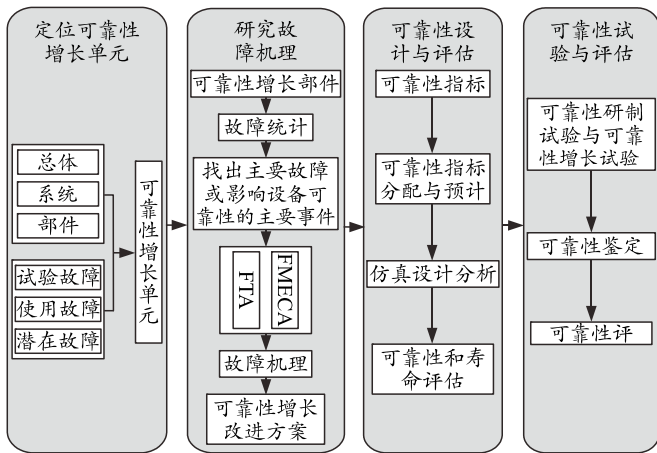


图 1 可靠性增长研究总体技术途径

2 定位可靠性增长部件、故障统计及分析

操控装置组成如图 2 所示。

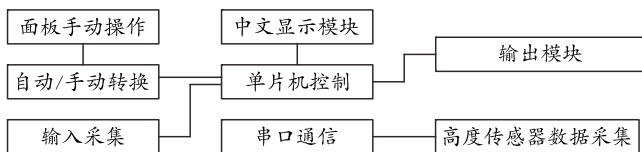


图 2 操控装置功能模块

按照功能，操控装置可以划分成相对独立的模块。其组成部分功能如下：

- 1) CPU 控制：读取采集的输入信号，实现自动程序控制，按照预定控制策略，输出控制信号；
- 2) 串口通信：实现与驾驶员显示终端工况显示信息通信，读取高度传感器当前数据；
- 3) 中文显示模块：接收 CPU 发送的工况信息，并实时显示；
- 4) 输入采集：读取输入信号，并进行调理、隔离处理；
- 5) 输出模块：输出 CPU 控制信号，并驱动执行部件；
- 6) 自动/手动转换：实现操控装置自动和手动工作模式转换；
- 7) 面板手动操作：手动工作模式下，实现产品控制功能，手动输出控制信号。

经过整理、统计，得出操控装置使用过程中出现的故障发生频次如图 3 所示，主要有：

- 1) 面板上的操纵按钮或按钮指示灯失效，故障频次 57 台次，约占故障总数的 25%；
- 2) 水上油路输出线路故障，故障频次 54 台次，约占故障总数的 23%；

3) 自动/手工工况切换继电器易损坏，故障频次 48 台次，约占故障总数的 21%；

4) 串口通信芯片故障，故障频次 24 台次，约占故障总数的 10%；

5) 自动工况下，在使用过程中，出现程序暂停或死机现象，故障频次 19 台次，约占故障总数的 8%；

6) 悬挂高度传感器线路破损、浸水、故障频次 13 台次，约占故障总数的 6%；

7) 其他个别故障现象(如：自动工况下，蓝色指示灯不亮；显示屏无法正常显示)，故障频次 17 台次，占故障总数的 7%。

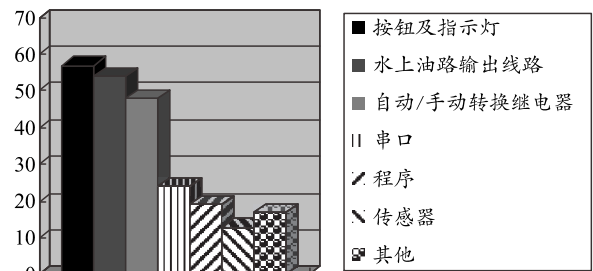


图 3 操控装置故障发生频次

3 研究故障机理

3.1 FTA 分析

FTA 是一种图形演绎的故障分析方法，是故障事件在一定条件下的逻辑推理方法。它对系统故障形成的原因(包括硬件、软件、环境、人为因素等)进行分析，画出逻辑关系图(即故障树)，从而确定系统故障的原因和发生概率。

根据操控装置的结构、原理、维护和使用操作，选取对产品具有严重影响的故障模式作为顶事件，进行故障树分析，找出其故障原因组合。对故障树分别进行定性、提出改进建议及措施。

以操控装置“手动按钮失效”故障模式为例，将其作为输出事件，对其原因进行分析，可能的直接原因包括“整机无供电”和“整机有电，手动控制电路无电流”。将这 2 个事件作为输入事件，并确定之间的逻辑关系为“或”，建立第一级故障树。将“整机无供电”作为输出事件，其原因包括“CH1 插座处无电流”和“电源线缆故障”。将这 2 个事件作为输入事件并确定之间的逻辑关系为“或”，其中“电源线缆故障”作为底事件，不再展开，“CH1 插座处无电流”还可分解为底事件“CH1 插针折断、弯曲”“CH1 插座处短路”和“CH1 插座未插紧”。将“整机有电，手动控制电路无电流”作为输出事件，分析其原因包括“该按钮故障”“JQX-6M 继电

器故障”“手动/自动按钮开路”“F3 保险丝断”“D6 二极管开路”“线路故障”；中间事件“该按钮故障”可分解为底事件“该按钮机械卡死”和“该按钮开

路”，中间事件“JQX-6M 继电器故障”可分解为底事件“JQX-6M 继电器闭合端卡死”和“JQX-6M 继电器开路”。完整的故障树如图 4。

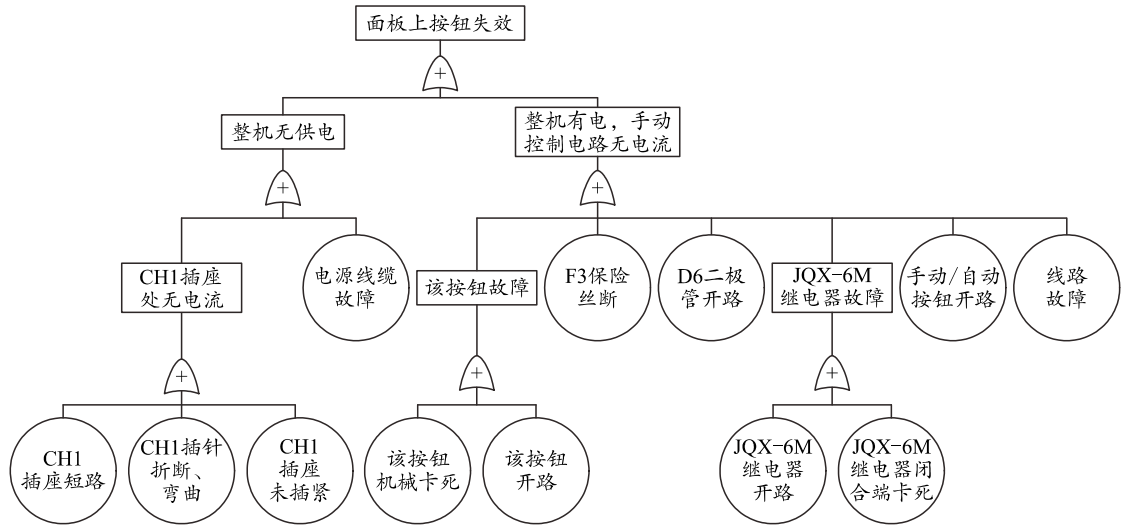


图 4 面板按钮失效故障树分析

故障树分析结果表明，引起按钮失效的主要原因是按钮本身的故障和 J0 继电器的故障。为了提高可靠性，应严格控制按钮及 J0 继电器的选型和质量等级控制，必要时应加强元器件老化和筛选工作。

3.2 FMECA 分析

为了暴露操控装置设计中的薄弱环节，发现影响系统可靠性的关键因素，找出产品在功能及硬件设计中可能的故障模式、原因及影响，本次 FMECA 采用硬件法进行，针对产品设计薄弱环节，提出设计改进和使用补偿措施。

以操控装置为初始约定层次，以操控装置各功能模块为约定层次，以元器件级为最低约定层次，开展操控装置功能及硬件 FMECA。CA 采用危害性矩阵定量分析方法。本次 CA 采用定量的危害性矩阵分析法。该方法计算公式如下：

$$C_{mj} = \alpha_j \cdot \beta_j \cdot \lambda_p \cdot t,$$

$$C_r = \sum_{j=1}^n C_{mj} = \alpha_j \cdot \beta_j \cdot \lambda_p \cdot t. \quad (1)$$

式中： $j=1,2,\dots,n$ ， n 为产品的故障模式总数； α_j 为产品第 j 种故障模式发生次数与产品所有可能的故障模式数的比率； β_j 为产品在第 j 种故障模式发生的条件下，导致产品出现某严酷度等级的条件概率； λ_p 为产品在任务阶段内的故障率； t 为任务阶段的工作时间。

以操控装置“手动操作控制电路”为例，分析

该模块组成及各组成功能，绘制该模块任务可靠性框图，填写 FMEA 表格，绘制危害性矩阵图，如图 5 所示。

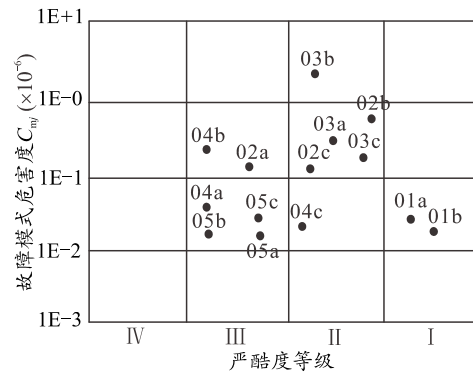


图 5 危害性矩阵

从 FMECA 分析结果可以看出：CH1 连接器严酷度为 I 级，但发生概率较低，危害度不高。在元器件选型时，需选择可靠性好、质量等级高的连接器，在设计中，需充分考虑极端条件电流电压，进行降额设计。

自动/手动转换开关 AN1、自动/手动转换继电器 J0 严酷度均为 II 级。其中编码 03b、02b、03a 在严酷度 II 类情况下，具有较高的故障模式危害度，即手动/自动转换继电器触点粘结、手动/自动转换开关卡紧、手动/自动转换继电器触点断开为严酷度较高的 II 类故障模式。

3.3 可靠性增长改进方案

对操控装置自动工况下，程序暂停或死机、按

钮失效、输出线路失效、悬挂高度传感器读数异常和显示器黑屏、无显示等典型故障模式进行 FTA，从上而下地对故障模式进行直至元器件级的机理分析，找到产品可靠性薄弱点。对手动操作控制电路、输出模块、输入采集电路、中文显示模块、串口通信、高度传感器数据采集和自动/手动转换电路等模块进行 FMECA，由下而上地对操控装置各功能模块展开分析，找出影响产品可靠性的潜在故障模式。对严酷度、危害度等级较高的故障模式采取改进措施。通过上述可靠性分析，得到操控装置可靠性关键件清单，再从设计、工艺、采购、装配各角度和环节对故障模式采取有效的改进措施，综合形成操控装置可靠性增长方案。

在设计中，应进行如下改进：

1) CH1 连接器应选用质量可靠的生产厂家，并要求厂家做好防电磁兼容设计，包括增加穿芯电容，电缆上增加吸收磁环。考虑到实车极端使用情况，对连接器接触件承受的最大电流进行降额设计，建议进行二级降额设计；

2) 自动/手动转换开关 AN1，在选型时需考核开关吸合寿命；

3) 自动/手动转换继电器 J0，选型时要考核继电器吸合寿命，同时触点电流需降额设计；

4) 电气线路改进，将数据总线由双向改为单向，并增加数据总线上拉电阻；

5) 为串口电路增加抗干扰设计，为串口通信电路增加隔离芯片设计，提高通信可靠性；

6) 进一步优化设计，改进水上油路电磁阀控制策略，由多控制终端分立控制改为由操控装置根据优先级统一集中调度。

4 可靠性设计与评估

对可靠性增长方案进行电路容差、热设计、六性分析、电磁兼容设计、元器件降额设计、冗余设计和防腐设计等分析。根据产品的定义和工作原理，绘制系统基本可靠性框图，进行可靠性指标分配，采用元器件应力分析法^[3]进行可靠性预计，从理论角度验证可靠性设计水平。

操控装置属于电子类产品，根据操控装置的功能、工作原理以及各模块的组成，采用串联模型建立操控装置任务可靠性模型^[4]，对各功能单元分别进行可靠性预计，然后计算整个操控装置的可靠性水平。采用元器件应力分析法进行可靠性预计，设环境温度为 60 ℃，国产电子元器件采用 GJB/Z 299C 进行预计，进口电子元器件采用 MIL-HDBK-217 进行预计。操控装置采用 16 位微处理器，其工作失效率预计模型为：

$$\lambda_p = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V + (C_2 + C_3) \pi_E] \pi_L \quad (2)$$

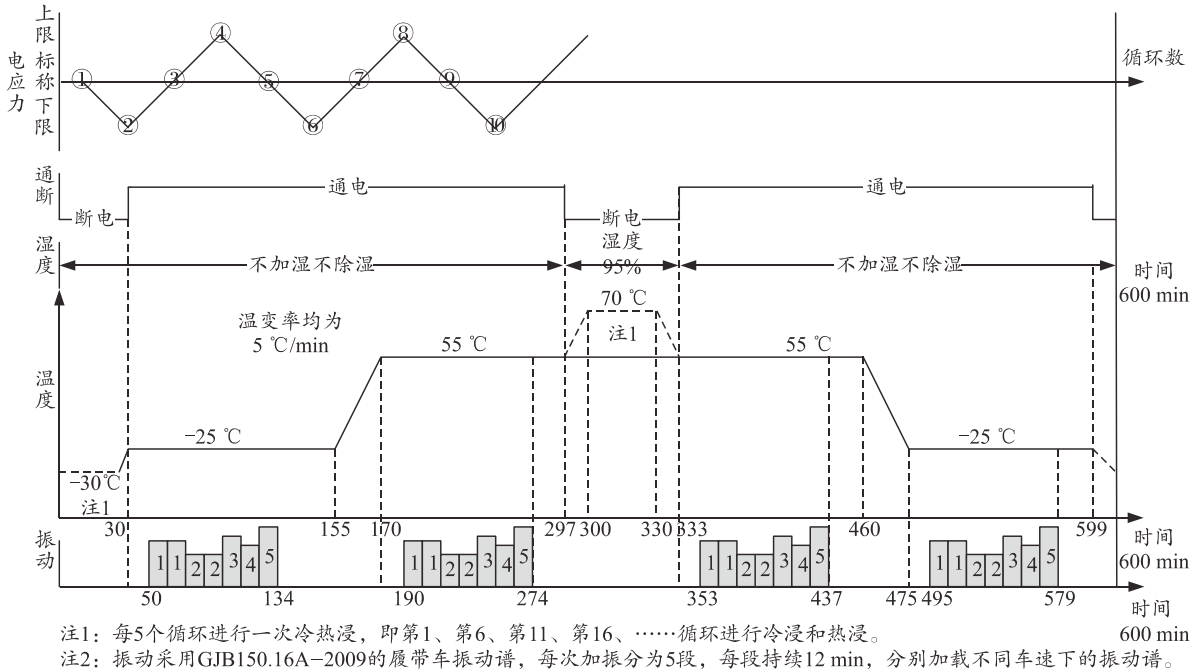
式中： λ_p 为工作失效率； π_E 为环境系数； π_Q 为质量系数； π_L 为成熟系数； π_T 为温度应力系数； C_1 及 C_2 为电路复杂度失效率； C_3 为封装复杂度失效率和 π_V 为电压应力系数通过查表获得。

操控装置各模块包括电子、机械结构和软件等，按照组成部分的性质，采用不同的预计模型计算失效率，最后进行累加得到整个操控装置的失效率，从而预计其可靠性水平，如平均故障间隔时间或平均故障间隔次数等。

5 可靠性试验与评估

对根据可靠性增长方案研制出的样机开展可靠性强化试验^[5]和可靠性摸底试验。其中可靠性强化试验通过随试验样机步进施加低温、高温、快速温变、振动和综合环境等应力，其应力水平超过产品正常使用环境，以快速激发产品潜在缺陷^[6]。可靠性摸底试验对产品施加正常工作综合环境应力，验证产品的可靠性水平^[7]。

根据 GJB 150A—2009《军用装备实验室环境试验方法》要求，结合研制任务书要求，尽可能模拟操控装置实际使用环境。操控装置可靠性摸底试验剖面如图 6 所示，以 600 min 为一个试验循环时间。在每个试验循环中，按照试验剖面对操控装置施加温度、湿度、振动和电应力等综合应力。在每个循环中，每个振动时段结束对操控装置进行一次产品检测，每个温度段进行 3 次产品检测，即一个循环进行 16 次产品检测，203 h 试验时间内即进行 375 次产品检测。



注1: 每5个循环进行一次冷热浸, 即第1、第6、第11、第16、……循环进行冷浸和热浸。
 注2: 振动采用GJB150.16A-2009的履带车振动谱, 每次加振分为5段, 每段持续12 min, 分别加载不同车速下的振动谱。

图 6 可靠性试验剖面

6 结论

产品的可靠性不仅仅依靠对产品的检验和试验来获得, 而且必须从设计、制造和管理等多方面, 实施产品全寿命周期可靠性管理^[8]。笔者阐述了两栖装甲装备水陆转换操控装置可靠性增长技术途径, 从故障分析入手, 对产品典型故障模式开展故障树分析, 采用功能和硬件分析方法对产品约定层次开展故障模式、影响及危害性分析, 找出产品可靠性关键件清单, 对产品可靠性关键件和关键故障模式采取有效改进措施, 形成可靠性增长方案。运用元器件应力分析法, 对设计方案进行可靠性分配和预计。根据产品实际使用环境要求, 确定可靠性试验中产品检测时机和次数, 以验证产品可靠性水平, 暴露产品潜在缺陷。

可靠性工作是一项系统工程, 也是一个不断迭代和改进的过程。笔者阐述的两栖装甲装备水陆转换操控装置是一个典型的电子类控制装置, 其可靠性分析和设计方法对电子类产品可靠性工作开展具

有借鉴作用。

参考文献:

- [1] 汪徐胜, 杨建业, 宋仔标, 等. 车载旋转调制捷联惯导系统最优对准技术[J]. 兵工自动化, 2017, 36(4): 10-17.
- [2] 赛义德, 可靠性工程[M]. 杨舟, 译. 北京: 电子工业出版社, 2013: 38-62.
- [3] 姜同敏. 可靠性与寿命试验[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 5-30.
- [4] 庄奕琪. 电子设计可靠性工程[M]. 西安: 电子科技大学出版社, 2014: 50-58.
- [5] 宋太亮. 可靠性设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 60-72.
- [6] 姜同敏. 可靠性试验技术[M]. 北京: 航空航天大学出版社, 2012: 15-20.
- [7] 王菲菲, 陈延伟. 自动机机构运动可靠性仿真试验系统应用研究[J]. 兵工自动化, 2017, 36(6): 75-79.
- [8] 王华, 张静远, 王鹏, 等. 基于广义对数线性模型的可靠性评估方法[J]. 兵器装备工程学报, 2018(3): 101-104.