

导弹舵面锁制系统的故障模式及其影响分析

杜向辉¹ 栗飞¹ 张昆峰²

(1. 海军驻洛阳地区航空军事代表室 洛阳 471009; 2. 中国空空导弹研究院 洛阳 471009)

摘要:提出一种基于 FMEA 的可靠性仿真分析技术,以降低 FMEA 验证试验的成本。将电子仿真技术和可靠性分析技术相结合,利用 Saber 仿真分析软件的 FMEA/Testify 工具,完成某型导弹舵面锁制系统故障模式及其影响分析。首先构建锁制系统的电路仿真模型,收集系统中所有电子元器件的常见故障模式,并进行故障注入,然后通过电路仿真技术,完成各故障模式对系统的影响评估、危害程度分析,辨识出影响系统可靠性的关键元器件。仿真结果表明,该分析方法具有较高的实用性,可以提高系统的可靠性分析水平。

关键词:锁制系统;故障模式及其影响分析;故障注入

中图分类号: TP302.7 TN602 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.6530

Failure mode and effect analysis of locking system for control surfaces of missile servo control system

Du Xianghui¹ Li Fei¹ Zhang Kunfeng²

(1. Aviation Delegate Office of Navy in Luoyang District, Luoyang 471009, China;

2. China Air-borne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: A reliability simulation analysis technique for FMEA to reduce cost of verification was proposed. Using a combination of reliability analysis and simulation technology, the FMEA/Testify simulation tool of the Saber software was used to analyze the failure mode and the effect of the locking system for the control surfaces of missile servo control system. The circuit simulation model for the locking system was constructed, and the failure modes of all the components were collected. Then all the failure modes were injected into the simulation model. After the execution of the simulation model, the failure model and the effect analysis results of the system were acquired. And the key components influencing the reliability of the system were identified. The results show that the analysis method of failure mode and the effect is practical and can improve the reliability analysis level.

Keywords: locking system; failure mode and effect analysis; failure modes injection

1 引言

故障模式影响分析(FMEA)是分析产品所有可能的故障模式及其可能产生的影响,并按每个故障模式产生影响的严重程度予以分类的一种归纳分析方法,其根本目的是从不同角度发现产品的缺陷与薄弱环节,并采用有效的改进和补偿措施以提高产品的可靠性水平。故障模式及其影响分析是可靠性分析的一个重要工作项目,同时也是开展维修性分析、安全性分析、测试性分析和保障性分析的基础^[1-2]。

目前,在工程分析中进行,传统 FMEA 的技术采用的主要方式是“定性推理”,而在复杂工程系统时,往往难以通过传统的“定性推理”方法完成从“故障模式”到“故障影

响及其影响”的完全推理过程。

FMEA 分析验证技术是一种基于 FMEA 的可靠性仿真分析技术,其主要利用计算机仿真软件的“定量推理”,只要故障模式可以定义和注入,就可以使故障推理定量化;同时在分析过程中,可以准确测量并获得几乎所有参数的变化情况,包括故障元器件及非故障元器件的各项参数。另外,FMEA 分析验证技术以仿真分析技术为基础,可以降低 FMEA 验证试验的成本^[3]。

本文研究应用 Saber 软件平台的 FMEA/Testify 工具,完成某型导弹的舵面锁制系统故障模式及其影响分析。首先构建锁制系统的电路仿真模型,收集系统中电子元器件的常见故障模式,并进行故障注入,然后通过电路

仿真技术,完成各故障模式对系统的影响评估、危害程度分析,并提出提高系统工作可靠性的改进和补偿措施。

2 应用 FMEA/Testify 工具的 FMEA 分析验证技术

采用 FMEA/Testify 工具的 FMEA 分析验证技术,首先需要确定分析对象,从电路设计信息中提取、收集电子元器件的故障模式信息,然后利用 Saber 软件提供的故障模式以及自动注入功能,在仿真测试环境中注入故障模式信息,形成故障电路网表,进行故障电路仿真包括直流工作点分析、瞬态分析或交流小信号分析等,仿真结束后对故障电路的仿真结果、波形进行测量、分析,然后根据仿真数据,分析各个故障模式对系统功能、性能与可靠性的影响^[4-8]。FMEA/Testify 工具的 FMEA 分析流程如图 1 所示。

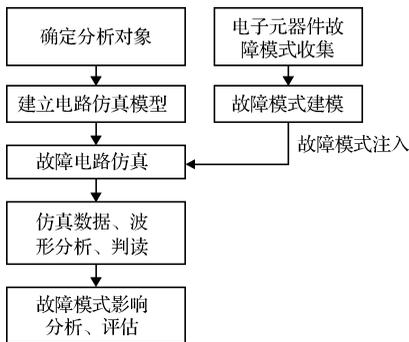


图 1 FMEA 分析验证流程

其中,电子元器件的故障模式信息主要包括元器件的结构互联故障和功能逻辑故障^[9]。

元器件结构互联故障包括电路连线、元器件管脚间物理结构连接异常导致的开路、短路故障。

元器件逻辑功能故障是指由于内部材料或环境条件变化导致的参数漂移、参数退化、逻辑错误和功能异常等故障。

3 解锁控制系统

某型导弹的舵面锁制系统包括电磁锁制器和解锁控制电路。当 DSP 数字信号处理器发出有效的解锁指令 JS,小功率三极管 NPN 2N2222 V1 导通,控制固态继电器 K1 导通,+27 V 电压加在电磁锁制器上,控制电磁锁制器开启,从而舵机完成解锁^[10],舵机锁制系统的工作原理如图 2 所示。锁制控制系统中所采用的电子元器件及其参数规格如表 1 所示。其中,+5 V 供电采用 DC/DC 电源,为混合集成电路;数字信号处理器采用 TI 公司的 TMS320LF2407A。

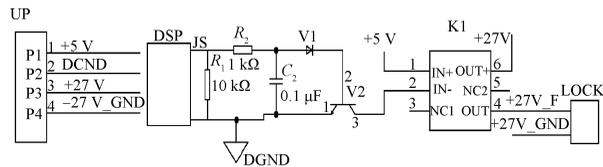


图 2 锁制系统的工作原理

表 1 元器件参数规格

序号	名称	参数规格
1	V2	三极管 2N2222A
2	V1	二极管 1N4148
3	C1	0.1 uF±10%,温度特性为±20%
4	R1	10 kΩ±5% ±200 ppm/°C
5	R2	1 kΩ±5% ±200 ppm/°C
6	+5 V 电源供电	+5 V±2%
7	+27 V 电源供电	+27 V±2%
8	K1 固态继电器	输入接通电压≥3.2 V,接通时间≤50 μs,输入关断电压≤1.2 V,关断时间≤300 μs
9	电磁锁制器	开启电压≥16 V,保持电压≥12 V,线圈电阻 90~100 Ω
10	数字信号处理器	高电平:V _{OH} ≥2.4 V,最大输出电流 4 mA;低电平:V _{OL} ≤0.4 V,最大输出电流-4 mA

4 解锁控制电路的故障模式影响分析

4.1 构建解锁控制电路的仿真模型

利用 Saber 分析软件建立解锁控制电路的仿真分析模型,其中三极管模型采用三极管厂家提供的 Spice 参数模型,固态继电器模型根据厂家提供的内部电路原理图搭建,电磁锁制器模型采用 90~100 Ω 进行等效,其他模型采用 Saber 软件模型库自带的器件模型。构建解锁控制电路的仿真分析模型如图 3 所示。

4.2 无故障状态下解锁控制电路的仿真

实际电子元器件的参数值和标称值之间总是存在着随机的误差,并且参数值会随着工作环境的变化(高低温、湿度等)、工作电应力(电压、电流)的不同发生变化,所有这些变化因素综合在一起,将会使电路实际性能输出与设计标称值之间出现偏差。

蒙特卡罗分析是当电路组成元器件的参数服从某种分布时,由电路组成部分参数抽样值分析电路性能参数偏差的一种统计分析方法。通过蒙特卡罗分析,在组成元器

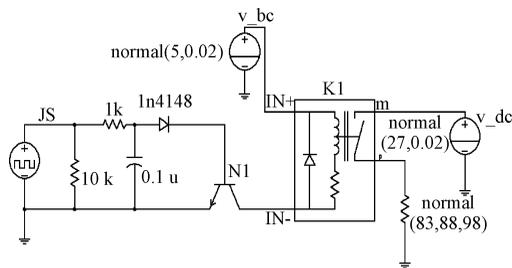


图3 解锁控制电路的仿真分析模型

件的参数偏差范围内,确定电路输出的变化范围,从而得到电路输出电平的正常变化范围,作为后续电路在故障模式下输出数据正确与否的判断依据^[11-13]。

对舵机解锁控制电路来说,主要关注在解锁信号有效时,电磁锁制器的输入端电压。当输入端电压大于锁制器的开启电压时,锁制器开启,舵面解锁;当输入端电压小于锁制器的保持电压时,锁制器关闭,舵面解除锁定。

所以,锁制系统仿真主要分析解锁信号 JS 有效时,锁制器输入端电压 DY 的电平。

完成电路仿真模型中的电子元器件的参数偏差设置,所有的参数偏差均符合正态分布。进行最坏情况下蒙特卡罗分析,设置抽样次数为 500 次,电磁锁制器的输入端电压的仿真分析结果如图 4 所示。

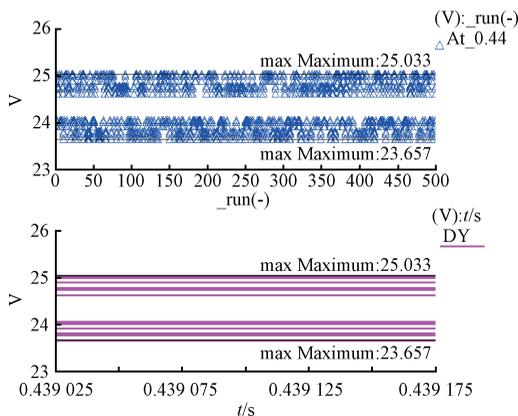


图4 电磁锁制器的输入端电压的蒙特卡罗仿真分析结果

可以看到,电磁继电器的输入端电压 DY 的正常范围为 23.657~25.033 V。即当 JS 信号有效时,只要锁制器的输入端电压分布在该范围内,即可实现锁制器的正常开启。

同时,为了检测电磁锁制器的输入端电压受解锁控制信号 JS 的控制,设置 JS 信号的周期 PD 为 0.2 s。如果电磁锁制器输入端电压的周期也为 0.2 s,说明锁制系统受控。

所以,当锁制系统的电磁锁制器输入端电压范围为 23.657~25.033 V,且信号周期 PD 为 0.2 s 时,锁制系统正常工作。

4.3 电子元器件故障模式收集

收集锁制系统中电子元器件的故障模式信息,故障模式包括结构互联故障和功能逻辑故障。

本文要分析的故障模式统计了产品在使用过程中的最常出现的元器件失效模式,主要包括器件管脚的开路、短路,以及关键元器件的参数漂移,如晶体管的增益衰减退化,电阻值的变化,大负载时电源电压的降低,信号电平的漂移。

同时查阅 GJB/Z299C-2006《电子装备可靠性预计手册》,获得元器件的故障模式频数比。舵面锁制系统中电子元器件最常见的故障模式及其频数比如表 2 所示。

表2 系统中电子元器件故障模式及频数比

序号	名称	故障模式	模式频数比(%)
1	三极管 2N2222A	B 极开路	12
		C 极开路	12
		E 极开路	12
		B、E 短路	22
		C、E 短路	22
2	二极管 1N4148	增益退化	20
		开路	29
		短路	51
3	C1 电容 0.1 uF	参数漂移	20
		开路	13.0
		短路	74.0
4	R1 电阻 10 kΩ	参数漂移(10 kΩ->5)	13
		开路	91.9
5	R2 电阻 1 kΩ	参数漂移(1 kΩ->5)	8.1
		开路	91.9
6	+5 V 电源供电	参数漂移(1 kΩ->5)	8.1
		开路	13.1
		短路	9.3
7	K1 固态 继电器	输出退化(5 V->3 V)	9.3
		其他如封装失效等	68.3
		开启电压参数漂移	38.6
8	Lock 电磁锁制器	(3.2 V->4.0 V)	38.6
		开路	52.6
		短路	8.8
9	数字信号 处理器	线圈短、断路	2
		触点断开	44
		触点粘结	40
		参数漂移	14
		开路	20.8
		对地短路	34.9
		功能失效	10.6
		参数超差	28.4
		偶然失效、引线故障	5.3

4.4 故障模式影响分析结果

除去表2中的封装电磁锁制器中的触点断开、触点粘接、封装失效等结构故障，将表2所列出的解锁控制电路中可能的故障模式注入电路的数字仿真模型，评估电路在各个故障模式下的功能及性能变化，确定故障模式对电路系统输出的影响，如图5所示。

Test Setup	Test Ranges	Fault List	Rest
Faults	test1	test2	
/r.f.r2, p open	0.0	No Measure	
/r.f.r3, p open	27.0	0.2	
/r.f.r4, p open	24.379	0.2	
c.f.c1/c 70n 100n	24.379	0.2	
d1n4148.f.1n4148/area	24.379	0.2	
q_3p.f.n1/model->bf 10 1	0.0	No Measure	
r.f.r2/rnom 5 1000	24.379	0.2	
r.f.r4/rnom 5 10000	0.0	No Measure	
rly_1pno.k1/rcoil 0 100	0.0	No Measure	
rly_1pno.k1/vpull 4 3.2	24.379	0.2	
v_dc.v_dc1/dc_value 0 5	0.0	No Measure	
v_dc.v_dc1/dc_value 0 0	0.0	No Measure	

图5 故障模式及其部分仿真分析结果

注：图中“□”中为蓝色数值，“○”中为红色数值。

在上图中，红色数值代表该故障模式不影响电路的正常工作；蓝色代表该故障模式导致电路功能彻底失去；“No Measure”表示锁制器的输入端电压为固定电平信号，不能测试信号周期。

生成的故障模式及其影响分析报告如图6所示。当故障电路的锁制器输入端电压 $DY < 23.635\text{ V}$ 或 $DY > 25.033\text{ V}$ ，或 $PD! = 0.2\text{ s}$ 时，故障被检测出来，即系统功能丧失，用“D”表示；当故障电路的锁制器输入端电压 $23.635\text{ V} < DY < 25.033\text{ V}$ ，且 $PD = 0.2\text{ s}$ 时，故障不能被检测出来，电路仍可以正常工作，用“N”表示。

Test: test1 DETECTS fault if result < 23.657 OR > 25.033
Test: test2 DETECTS fault if result < 0.2 OR > 0.2

Faults	Test test1	Test test2
/c.f.c1, p open	N	N
/c.f.c1, p short_m	D	D
/din4148.f.in4148, p open	D	D
/din4148.f.in4148, p short_n	N	N
/q_3p.f.n1, b open	D	D
/q_3p.f.n1, b short_e	D	D
/q_3p.f.n1, c open	D	D
/q_3p.f.n1, c short_e	N	D
/q_3p.f.n1, e open	D	D
/r.f.r2, p open	D	D
/r.f.r3, p open	D	N
/r.f.r4, p open	N	N
c.f.c1/c 70n 100n	N	N
d1n4148.f.in4148/area 0.9 1	N	N
q_3p.f.n1/model->bf 10 100	D	D
r.f.r2/rnom 5 1000	N	N
r.f.r4/rnom 5 10000	D	D
rly_1pno.k1/rcoil 0 100	D	D
rly_1pno.k1/vpull 4 3.2	N	N
v_dc.v_dc1/dc_value 0 5	D	D
v_dc.v_dc1/dc_value 0.001 5	D	D
v_dc.v_dc1/dc_value 3 5	D	D
vpulse.vpulse1/amp1 0 2.4	D	D
vpulse.vpulse1/amp1 0.001 2.4	D	D
vpulse.vpulse1/amp1 0.1 2.4	D	D
rly_1pno.k1/rcoil 1000meg 100	N	D
vpulse.vpulse1/amp1 1.9 2.4	N	N

图6 故障模式及其影响分析报告

故障模式影响分析共完成了27个电路元器件故障的注入，其中8个故障对电路输出没有明显影响，另外19个故障导致锁制系统功能彻底丧失。

加上电磁锁制器中的触点断开、触点粘接这两个结构故障，这21个故障模式导致系统出现两种失效模式：

1) 系统不能正常解锁，该种失效模式的故障模式如表3所示；

2) 锁制器始终处于开启状态，不受控，该种失效模式的故障模式如表4所示。

表3 系统不能正常解锁的故障模式

序号	名称	故障模式
1	三极管 2N2222A	B极开路 C极开路 E极开路 B、E短路 增益退化
2	二极管 1N4148	开路
3	C1 电容 0.1 uF	短路
4	R1 电阻 10 kΩ	参数漂移(10k->5)
5	R2 电阻 1 kΩ	开路
6	+5 V 电源供电	短路 输出退化(5 V->3 V)
7	K1 固态继电器	开路 短路
8	Lock 电磁锁制器	触点断开 线圈断、短路 开路
9	数字信号处理器	对地短路 功能失效

表4 锁制器始终开启的故障模式

序号	名称	故障模式
1	三极管 2N2222A	C、E短路
2	Lock 电磁锁制器	触点粘结

4.5 各个故障模式危害度分析

对表3、4中各个电子元器件的故障模式进行综合、分析。查阅GJB/Z299C—2006《电子装备可靠性预计手册》，在环境温度为70℃、导弹发射条件下，计算得到锁制系统中各个元器件的失效率 λ_b ，如表5所示。

结合表2中各个故障模式的频数比，根据下面的公式计算电子元器件故障模式的危害度。

$$\beta = \sum_i^N \lambda_{bi} \cdot \alpha_i$$

表5 锁制系统种电子元器件的失效率

序号	名称	失效概率($10^{-6}/h$)
1	三极管 2N2222A	0.109
2	二极管 1N4148	0.052
3	C1 电容 0.1uF	0.005 4
4	R1 电阻 10 kΩ	0.007
5	R2 电阻 1 kΩ	0.007
6	+5 V 电源供电	41.64
7	K1 固态继电器	0.62
8	Lock 电磁锁制器	2.13
9	数字信号处理器	67.50

其中: N 为电子元器件中导致某一失效模式的所有故障模式的总数, λ_{i_i} 为第 i 个故障模式的失效概率, α_i 为第 i 个故障模式的频数比。

可以得到系统在两种失效模式下, 锁制系统中各个电子元器件对系统的危害度如表 6、7 所示。

表6 不能正常解锁失效模式, 各个器件的危害度

序号	名称	对系统的危害度($10^{-6}/h$)
1	三极管 2N2222A	0.085
2	二极管 1N4148	0.015
3	C1 电容 0.1 uF	0.004 0
4	R1 电阻 10 kΩ	0.000 567
5	R2 电阻 1 kΩ	0.006 4
6	+5 V 电源供电	13.20
7	固态继电器	0.38
8	Lock 电磁锁制器	0.98
9	数字信号处理器	44.75

表7 锁制器始终处于开启失效模式, 各个器件的危害度

序号	名称	对系统的危害度($10^{-6}/h$)
1	三极管 2N2222A	0.024
2	Lock 电磁锁制器	0.852

从表 6、7 可以看到, 影响舵面锁制系统不能正常解锁的主要器件为数字信号处理器、+5 V 电源供电和电磁锁制器; 影响舵面锁制系统锁制器始终开启的主要器件为电磁锁制器。

计算得到系统两种失效模式的危害度总和如表 8 示。

表8 失效模式的危害度总和

序号	失效模式	对系统的危害度($10^{-6}/h$)
1	系统不能正常解锁	59.42
2	锁制器始终处于开启	0.876

从表 8 可以看到, 舵面锁制系统主要的失效模式为不能系统正常解锁。

因此, 要提高锁制系统的可靠性, 主要应从提高数字信号处理器、+5 V 电源供电和电磁锁制器的可靠性入手, 可以从下面两个方面进行:

1) 采用高质量等级的数字信号处理器、+5 V 电源供电和电磁锁制器;

2) 加强电子元器件的环境用力筛选, 实现故障、缺陷电子元器件的早期剔除。

5 结 论

本文利用 Saber 软件平台的 FMEA/Testify 工具, 完成某型导弹的舵面锁制系统故障模式及其影响分析, 通过电路故障自动注入技术和电路仿真技术, 完成各故障模式的仿真分析, 实现各故障模式对系统的影响评估、危害程度分析, 辨识出系统的主要失效模式、影响系统可靠性的关键元器件, 并提出提高系统工作可靠性的改进和补偿措施。同时, 本文 FMEA 分析验证技术以仿真分析技术为基础, 可以降低设计过程的迭代反复, 同时, 在提高系统可靠性的同时, 可以降低 FMEA 验证试验的成本。

参 考 文 献

- [1] 林知明. 电子新品可靠性技术[J]. 电子测量技术, 2000, 23(3): 17-19.
- [2] 黄李, 张亮, 任立明. FMEA 分析验证技术在国内航天的研究状况及前景[J]. 质量与可靠性, 2011(1): 13-16.
- [3] 孙国强, 田芳宁. 雷达可靠性设计与试验验证[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(3): 55-57.
- [4] 林丹龙, 孙宇锋, 赵广燕. 基于仿真的电路故障模式识别研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2009: 220-224.
- [5] 尹国威, 尚朝轩, 马彦恒, 等. 电路仿真的故障自动注入系统设计及实现[J]. 计算机测量与控制, 2013, 21(9): 2356-2360;
- [5] 刘春志, 杜鑫, 曾晨晖. 电路功能可靠性仿真分析技术[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(3): 272-276.
- [6] 雒宝鹏, 魏清新, 杨波. 电路仿真与故障诊断技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2012, 20(10): 2619-2621.
- [7] 陶贵明, 张锡恩, 曾兴志. 电路仿真与故障知识获取研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(12): 1945-1947.
- [8] 徐关澄, 谢利理, 蔡达真. 电气机车整流电路的故障诊断仿真分析[J]. 测控技术, 2011, 30(12): 95-98.
- [9] 胡梅, 樊敏, 赖俊. 空间电子仪器中模拟电路的功能故障诊断分析[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(增刊 2): 131-138.

(下转第 23 页)