

基于模糊理论的频率综合器故障树分析

李华府

中国空空导弹研究院第十六研究所, 河南 洛阳

收稿日期: 2022年2月25日; 录用日期: 2022年5月4日; 发布日期: 2022年5月11日

摘要

基于相似产品历史数据和模糊理论, 将频率综合器故障树各项定性参数进行量化描述。通过对频率综合器开展模糊故障树分析, 求出了其常见故障模式本振输出信号异常的最小割集, 全面梳理了以此为顶事件的各种可能底事件, 对顶事件出现的可能性进行了预估, 为设计优化、故障预判及防范提供参考。

关键词

频率综合器, 故障树分析, 模糊理论

Fault Tree Analysis of Frequency Synthesizer Based on Fuzzy Theory

Huafu Li

The 16th Institution of China Airborne Missile Academy, Luoyang Henan

Received: Feb. 25th, 2022; accepted: May 4th, 2022; published: May 11th, 2022

Abstract

Based on the historical data of similar products and fuzzy theory, the qualitative parameters of the fault tree of the frequency synthesizer are quantitatively described. Through the fuzzy fault tree analysis of the frequency synthesizer, the minimum cut set of the abnormal local oscillator output signal of its common fault mode is obtained, various possible bottom events taking this as the top event are comprehensively combed, and the occurrence probability of the top event is calculated. The result provides a reference for product design improvement, fault accident investigation, analysis, prediction and prevention.

Keywords

Frequency Synthesizer, Fault Tree Analysis, Fuzzy Theory



1. 引言

频率综合器主要由锁相频率源组成,为整机输出发射、本振、自检及设备基准信号;根据信号处理分机控制,在某一频率范围内可进行射频、本振频率跳变[1]。一般情况下,在产品研制过程中,频率综合器需要结合产品任务实际进行定制,多属于新研成件,需要按照新品研制程序进行研发和管理,尤其是在转批生产之前在解决性能满足需求之外,重点是提升可靠性,以保证批生产的质量一致性问题。频率综合器相关可靠性工作依据 GJB450A 装备可靠性工作通用要求实施,通过可靠性分析、试验等来尽早暴露其可靠性薄弱环节[2],通过不断地设计改进,促进产品的成熟、健壮。故障树分析(fault tree analysis, FTA)是开展频率综合器可靠性分析的一种常用手段,可确定导致频率综合器故障相关因素或因素组合及其发生概率,为在早期开展频率综合器可靠性改进优化提供支撑[3]。

在频率综合器研制过程中,开展 FTA 的适应时机主要包括在进行产品设计的同时协同实施。GJBZ768A-1998 故障树分析指南提供了较为系统的技术支撑手段。由于新研成件一般在开发过程中具有研制周期短、数量小的特点,就单一品类而言能积累的基础数据有限,在对故障进行分析判断时定性的居多,量化困难。好在频率综合器历代产品在硬件组成方面差异性不大,具有一定的可参考历史数据,能够增强 FTA 事件发生概率评估的可信性。如何充分利用好相似型号的历史数据量,进一步具象化频率综合器 FTA 结果对产品设计师来说具有一定的现实意义。

针对该问题,基于相似产品历史数据和模糊理论[4]将频率综合器 FTA 各项定性参数进行量化描述,建立频率综合器模糊 FTA 模型,通过分析给出相对量化的频率综合器 FTA 分析结果,为产品可靠性设计改进提供参考。

2. 系统定义

频率综合器主要由电压转化控制单元(A1)、晶振信号产生单元(A2)、中频信号产生单元(A3)、基频模块(A4)、本振产生单元(A5)、发射信号产生单元(A6)、设备及自检产生单元(A7)、控制单元(A8)。其中,电压转化控制单元由缓存器、门电路等组成;晶振信号产生单元由晶振、功分器等组成;中频信号产生单元主要包括混频、滤波器等组成;基频模块由锁相环、倍频器等组成;本振单元由放大器、滤波器组成;发射信号产生单元由混频器、射频开关等组成;设备及自检单元包括滤波器、射频开关组成;控制单元由门电路组成。未开展 FTA,基本假设如下:

- 1) 假设产品故障之间是相互独立的,系统各部件故障不致引起其它部件故障;
- 2) 各级产品状态却认为故障或正常两类;
- 3) 假设产品的故障分布均使用指数分布;
- 4) 分析不包括进行地面测试而加装的元器件,如压力传感器;也不考虑系统中的简单结构件,如标准螺钉,忽略部件间连线故障;
- 5) 本次分析主要是基于产品组成单元的固有能力进行,对于因人因导致的可靠性问题暂不考虑,假定频率综合器相关操作人员是稳定、可靠的。

若不能完成预定能力,则认为频率综合器故障。频率综合器的各组成部分不能在规定的时刻按技术指标要求完成功能,即为故障。

频率综合器的故障判别准则为：寿命期内非人为(含软、硬件)因素导致的故障均判定为关联故障；在任务预期设定中，不能实现预定任务目标的判定为关联故障。

影响整机任务完成的频率综合器故障主要包括：本振输出信号异常、发射输出信号异常、基频输出异常、设备及基准输出异常，控制异常。据此确定本次分析的顶事件为本振输出信号异常，指频综正常开启后，本振输出信号达不到产品规定的性能参数，从而导致整机不能正常工作，导致任务失败。

3. 建立故障树

频率综合器在多型产品中经过了应用，积累了较多的历史数据，经统计分析，其各组成单元故障发生概率定性评估情况，如表 1 所示。

Table 1. Qualitative evaluation of failure probability of each component unit of frequency synthesizer

表 1. 频率综合器各组成单元故障发生概率定性评估

单元名称	故障发生概率
倍频器	一般
混频器	高
滤波器	较少
放大器	极少
开关	极少
电源	极少
控制信号	极少
晶振	高
跳频	一般
点频	较少

建立频率综合器各组成单元故障发生概率与模糊数评价映射关系，如表 2 所示。

Table 2. Mapping between fault probability level and fuzzy number

表 2. 故障概率等级与模糊数的映射

故障发生概率	模糊数
高	0.0045, 0.0055
一般	0.0002, 0.0044
较少	0.00005, 0.00019
极少	0, 0.00004

建立频率综合器 FTA 的基本假设：

- 1) 设定基本边界范围，确定故障树与频率综合器产品系统的边界相符，确保不缺项、不漏项，以边界范围为基准确定故障树分析截止点；
- 2) 排除掉可能导致频率综合器产品故障的门 - 门相连相关情况；
- 3) 在建立频率综合器故障树并开展分析的过程中，有导向性的确保故障树分析发展态势，尽可能用

具体的直接事件不断取代间接事件；

4) 在分析过程中出现的共因事件，按照标准要求统一符合。若出现互斥事件，按照相关要求采用异或门处理。

以频率综合器“本振输出信号异常”为顶事件，按照 GJBZ768A 规定的方法绘出的故障树如图 1 所示。

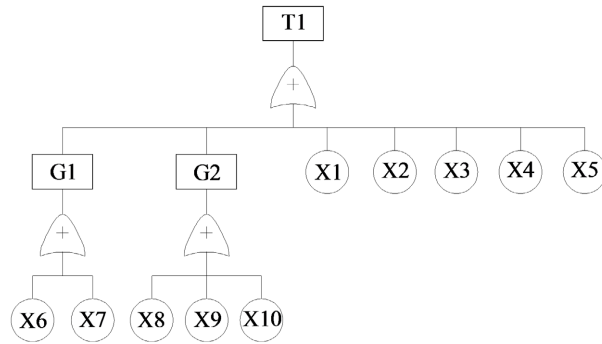


Figure 1. Local oscillator output signal abnormal fault tree
图 1. 本振输出信号异常故障树

顶事件：T1 本振输出信号异常。

中间事件：G1 电压转化控制单元故障、G2 基频模块故障。

底事件：X1 倍频器失效、X2 混频器失效、X3 滤波器失效、X4 放大器失效、X5 开关失效、X6 电源故障、X7 控制信号错误、X8 晶振信号故障、X9 跳频源故障、X10 点频源故障。

4. 模糊故障树分析

按照标准规定的下行法开展 FTA，顶事件 T1 的最小割集如表 3 所示。

Table 3. Set top event T1 downward method analysis
表 3. 设定顶事件 T1 下行法分析

步骤	1	2	3
过程	G1	X6	X6
	G2	X7	X7
	X1	G2	X8
	X2	X1	X9
	X3	X2	X10
	X4	X3	X1
	X5	X4	X2
		X5	X3
			X4
			X5

顶事件 1：本振输出信号异常 最小割集为{X1}，{X2}，{X3}，{X4}，{X5}，{X6}，{X7}，{X8}，{X9}，{X10}。

所有最小割集的阶数均为 1，系统各组成部分故障都会导致顶事件发生。

4.1. 顶事件发生概率计算

在工程应用过程中，同一底事件存在同时出现于多个最小割集中的情况，因此利用精确计算方法预估设定顶事件发生的可能性的必要性不大。在满足预期分析需求的前提下，采用概算方法计算设定顶事件发生可能性较为常用，效率更高。

$$P(T) \approx \sum_{i=1}^{N_K} P([K_L, K_R]_i)$$

式中： $P(T)$ —— 顶事件发生概率；

$P([K_L, K_R]_i)$ —— 第 i 个最小割集发生的概率；

N_K —— 最小割集数。

T1 本振输出信号异常发生概率为[0.0095, 0.02034]。

4.2. 结构重要度分析

底事件的价值在于对设定顶事件的发生所产生的贡献度，通常称为该事件的重要度。在 FTA 过程中低组装等级的产品存在故障模式多样的情况，且每一种故障模式会映射相应的基本事件。在结构重要度中，相应底事件 i 在高组装等级产品中的重要度用数学表达为：

$$I_i^{St}(t) = \frac{1}{2^{n-1}} n_i^\phi(t)$$

式中： $I_i^{St}(t)$ —— 相应底事件 i 关联的结构重要度；

n —— 系统所含底事件的数量；

$$n_i^\phi = \sum_{2^{n-1}} [\Phi(1_i, X) - \Phi(0_i, X)]$$

高组装等级产品的底事件 i 由功能正常(0)转变为功能故障(1)，在组成单元中其他低组装等级产品状态不变时，高组装等级产品存在以下可能：

1) 由低组装等级产品相关底事件 i 功能正常、高组装等级产品顶事件功能正常转变为低组装等级产品相关底事件 i 功能故障、高组装等级产品顶事件也功能故障，即高组装等级产品顶事件功能状态发生了变化，值为 1；

2) 由低组装等级产品相关底事件 i 功能正常、高组装等级产品顶事件功能正常转变为低组装等级产品相关底事件 i 功能故障、高组装等级产品顶事件仍功能正常，即高组装等级产品顶事件状态未变化，值为 0；

3) 由低组装等级产品相关底事件 i 功能正常、高组装等级产品顶事件功能故障转变为低组装等级产品相关底事件 i 功能故障、高组装等级产品顶事件功能正常，即高组装等级产品顶事件状态发生了变化，值为-1。因本次研究所涉及的单调关联系统，所以该情况基本不相关，可以不予考虑。

由于顶事件 T1 的各底事件的发生都会导致顶事件故障，可以判定最小割集各组成事件均为关键因素。

5. 结论

通过对频率综合器开展模糊 FTA，求出了常见故障模式本振输出信号异常最小割集，系统分析了以频率综合器为高组装等级产品的顶事件出现的相关故障情况，为产品设计优化过程中功能故障分析、定位及状态监控提供依据，也可以为相似产品故障分析提供借鉴。对以频率综合器为高组装等级产品顶事

件总体发生可能性和各低组装等级产品底事件的结构重要度开展了相对量化的评估，为产品设计师设计改进决策提供参考。在应用 FTA 支撑新研产品可靠性提升过程中，应当主动考虑贯彻落实“谁设计，谁分析”相关原则，通过 FTA 所形成的产品优化措施或建议，应当及时同相关产品设计团队沟通、协调，落实到相关文件中，以促进 FTA 结果落地。

参考文献

- [1] 金广华, 苏梦蜀, 谢翔宇. 一种小型化频率合成器的设计[J]. 电子信息对抗技术, 2021, 36(5): 94-97.
- [2] 宋太亮, 朱美娴, 祝耀昌, 等. GJB450A-2004, 装备可靠性工作通用要求[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2004.
- [3] 廖炯生, 曹晋华, 梅启智. GJB/Z768A-1998, 故障树分析指南[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 1998.
- [4] 杨玉东, 杨铃玉, 张杨. 应用模糊数学的舰船射频电磁场曲线拟合计算方法[J]. 舰船科学技术, 2021, 43(20): 133-135.