

电子工程中实施 FMEA 的作用和技术途径

丁定浩

(华东电子工程研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 可靠性工程界一再提倡的 FMEA, 还未在电子工程中得到切实的落实。原因是多方面的, 除了电子系统的复杂性外, 电路设计师不明确 FMEA 的具体作用、目的和重点, 有关的技术标准也仅局限于名词术语的定义和实施方式的一般介绍, 没有通过示意性示例作深入、具体的分析和指导。因此, 通过具体阐述 FMEA 的目的、作用 and 重点, 并用示意性例子说明对电路进行 FMEA 的方法, 能够使 FMEA 得到进一步的推广和更有效的应用。

关键词: 失效模式与效应分析; 安全性分析; 测试性分析

中图分类号: O 213.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-5468 (2005) 01-0001-05

Role and implementation of FMEA in electronic engineering

DING Ding-hao

(East China Research Institute of Electronic Engineering, Hefei 230031, China)

Abstract: Despite the continuous promotion of the reliability engineering community, FMEA has not been really implemented in electronic engineering for various reasons, including the complexity of electronic systems, circuit designers not exactly understanding the role, purpose and key points of FMEA, and related standards limited to the general introduction of terms and implementation. FMEA will be further extended by describing the purpose, role and key points of FMEA in detail and illustrating the implementation of FMEA in circuit with examples.

Key words: FMEA; safety analysis; testability analysis

1 引言

FMEA在电子工程中得到全面、有效实施的为数不多。原因是多方面的, 在设计方面, 设计师按照有关技术标准, 花费大量的时间作了 FMEA, 但其作用和结果, 对电路的可靠性、维修性和测试性设计究竟有无作用, 有时连设计师本人也不太清楚。因此, 明确目的、作用和重点, 对方法

和技术途径作具体的引导, 是进一步落实 FMEA 的必要步骤。

2 正确列出各种失效模式是 FMEA 的前提

电子工程中进行 FMEA, 首先要通过对具体的电路进行各种失效模式分析, 即电路失效时可能出现的各种现象的表现形式作正确的表达

收稿日期: 2004-04-08

作者简介: 丁定浩 (1929-), 男, 江苏吴江人, 华东电子工程研究所、信息产业部电子第五研究所客座研究员, 上海大学、南京航空航天大学兼职教授, 主要从事系统可靠性、维修性和保障性的理论和工程研究

和深入的分析。这与电路在失效情况下进行的失效分析是不同的。对于已经发生的电路失效，要着重寻找发生失效的原因，分析和鉴定是元器件的随机失效，还是电路、结构、工艺设计中的缺陷和错误，如果是设计缺陷或错误，就可以采取改进措施，达到设计固有可靠性目标的可靠性增长的目的。FMEA首先要对电路可能出现的故障进行预计，在此基础上列出电路所有可能出现的失效模式。

在实际工作中要注意的是，对失效模式的表达有不少是不正确的。失效模式表达不清楚，就达不到 FMEA 的目的。例如：有的把被分析对象的外部输入错误作为一种失效模式，实际上这是输入电路模块的某种失效模式对被分析电路的失效影响，不是被分析对象本身发生的失效模式；有的把被分析对象内部的组成元件、器件、部件的某种失效模式当作被分析对象的一种失效模式，正确的分析应该是当这些元器件、部件发生某种失效时，引发被分析对象产生相应后果的一种具体的表现形式，才是被分析对象的一种失效模式；又有把被分析对象发生故障的原因作为失效模式；还有的表达过于笼统，如“参数退化”，这对于被分析对象是电子元件来说是可以的，但对电路模块是不明确的，究竟是什么参数起作用，参数变化的幅度、相位如何，这些不明确就很难判断此种失效模式对关联电路、设备和系统会引发什么样的效应。

总之，作为一种失效模式概念的表达，必须对被分析对象的输出端呈现一种异常的信号特征作出描述，只有这样，才能判断与它相关联的模块、设备会对系统引发什么样的效应，在测试性分析中才能判别这种信号的异常特征能否被机内检测设备（BITE）检测和响应，才能确定这种失效模式能否被检测和隔离，从而才能确定故障检测率和故障隔离率。所有这些，才是 FMEA 的目的。

如果花费大量的时间，仅仅列出一系列 FMEA 的表格，失效模式描述不清，或仅列出一种失效模式，对于“补救措施”一栏不相应地填上“更换失效件”等。这种只为 FMEA，使之变成了目的而不是用来揭示、判断被分析对象的某种失效模式会造成危害而必须作出设计改进，或者判断哪些主要失效模式机内检测（BIT）不能响应而必须

完善 BIT 设计等。

3 FMEA 的技术途径

FMEA 的途径，通用的有两种：一种是硬件分析法；另一种是功能分析法。

3.1 硬件分析法

硬件分析法的主要特点是：从被分析对象的内部组成单元的失效模式开始，分析每一个组成单元的每一种失效模式会引起被分析对象产生的失效模式，其中，有不同组成单元的失效模式导致被分析对象产生各不相同的失效模式，也有不同组成单元的失效模式导致被分析对象产生同一种失效模式，最终归纳出被分析对象的所有失效模式，才能进一步分析对关联电路、上一个功能层次，乃至系统一级会引发什么样的效应。

对于分析对象的每种失效模式的频数比，硬件分析法由下式确定：

$$f_k = \frac{\beta_k}{\sum_{k=1}^{m_k} \beta_k} = \frac{\sum_{i=1}^{m_{jk_i}} \lambda_i \alpha_{jk_i}}{\sum_{k=1}^{m_k} \sum_{j=1}^{m_{jk_i}} \lambda_i \alpha_{jk_i}} \quad (1)$$

式（1）中： f_k ——分析对象第 k 种失效模式的频数比；

$m_{j,k}$ ——第 i 个组成单元的第 j 种失效模式导致被分析对象产生第 k 种失效模式的单元数；

α_{jk} ——第 i 个组成单元的第 j 种失效模式导致被分析对象产生第 k 种失效模式的频数比；

β_k ——被分析对象发生第 k 种失效模式的频数比；

λ_i ——分析对象中第 i 个组成单元的失效率。

这种方法要从元器件开始，逐层向上直到系统级，因此，硬件分析法又称为自下而上分析法。这种方法置信程度高，但工作量大。

3.2 功能分析法

功能分析法不从下一个层次的单元开始分析，而是直接从被分析对象的可能产生的失效模式开始，其置信程度取决于设计师的分析能力、工程

经验和分析力度，这是此种分析方法的难点。其次是如何确定各种失效模式的频数比。

为此，本文提出一种相对系数分析法。具体方法是在所有已经确定的失效模式中先确定某种失效模式为基准，令其系数等于 1，其它的失效模式的出现频率与之相比，比基准模式高 K 倍的乘以 K ，低 K 倍的除以 K ，则第 K 种失效模式的频数比等于：

$$\beta_k = \frac{m_k}{1 + \sum_{i=2}^k m_i} \quad (2)$$

式 (2) 中： m_i ——第 i 种失效模式的系数。

功能分析方法比硬件分析方法工作量大大降低，这是此法的优点。

FMEA 方法的选择，取决于必要性、可能性和代价的综合权衡。

4 进行 FMEA 的重点

FMEA 作用巨大，但工作量不小，特别是对于电子工程来说，更是如此。一定要根据电子工程的特点，分析要有重点。本人认为：电子工程中 FMEA 的重点主要针对危及人身和设备的安全性、冗余配置连接的正确性、故障检测隔离的有效性进行。

FMEA 首先要针对人身、设备的安全性。在电子工程中，人身的安全性主要是防止电击事故的发生，在以电真空器件为发射管的发射设备中，尤其要注意高电压危险。因此，有关电路的 FMEA，就是要揭示出是否存在对设备、操作人员产生电击的失效模式。作为航空、航天器中起控制或其它关键作用的电子设备中的 FMEA，安全性远非电击事故，而是影响安全飞行的所有可能发生的失效模式，在修改设计中消除此种失效模式或降低其发生概率到可以接受的程度。因此，通常必须采用硬件分析法。

FMEA 的另一个重点，是冗余配置连接的正确性。当冗余单元的电路连接采用并联方式时，必须预先估计或防止发生短路失效模式后的影响；采用串联方式时，必须预先估计或防止发生开路失效模式后的影响。否则，冗余配置的作用将适得其反，不是提高了可靠性，而是降低了可靠性。一个典型的电源模块并联的例子，如果不在每个电源模块输出端添加一只二极管短路隔离器，则

当并联电源模块系统中任一电源模块发生短路失效，就会导致整个电源系统发生失效。

FMEA 还有一个重点，就是正确分析故障检测率和故障隔离的需要。为了检测和隔离故障的需要，不能认为一旦 BITE 在被测单元上设置了检测点，这一单元发生故障后就能被检测和隔离，即它的故障检测率和隔离率均为 100%，然而在通常情况下，这种可能性是不存在的。原因在于 BITE 不可能对被测单元的所有失效模式均有响应。因此，通过 FMEA，列出了可能发生的各种失效模式及其相应的频数比，就能正确确定这一被测单元的故障检测率和故障隔离率。

此外，FMEA 并不是在一切场合下都适用的。在航空产品中用 FMEA 来确定维修级别，在电子工程中是不采用也不适用的。电子模块在什么维修级别上修理，不取决于它的失效模式，这是因为，不论开路失效、短路失效、信号畸变、无信号输出、信号幅度、相位、频率超差、逻辑信号混乱等失效模式，对维修级别都是无关的。电子工程中的模块的维修级别，取决于模块结构的自身和维修级别的设置。例如：对现场更换下来的有故障的现场更换单元 (LRU)，如果由内场更换单元 (SRU) 组成并且设置中继维修站的，LRU 的维修就在中继站进行；如果不是由 SRU 构成，且中继站不具备通过直接更换元器件来修复 LRU 的能力，则此种有故障的 LRU 就直接送制造工厂修理。

5 简单的示意性事例

下面举一个放大器的简单例子用于说明进行 FMEA 的方法。

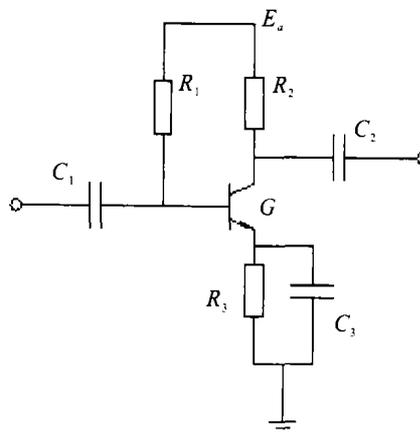


图 1 放大器的简单电路

如图 1 所示, 3 个电阻器和 3 个电容器各取同一失效率, 即电阻器失效率 $\lambda_R=0.06 \times 10^{-6}/h$, 电容器失效率 $\lambda_C=0.05 \times 10^{-6}/h$, 晶体管的失效率 $\lambda_G=0.5 \times 10^{-6}/h$ 。从可靠性预计手册中可以查到电阻、电容和晶体管的失效模式及其相应的频数比 (如表 1 所示), 频数比下标的第 1 个符号表示元器件类别; 第 2 个数字表示失效模式, 1 表示开路失效模式, 2 表示短路失效模式, 3 表示参数漂移超出容许误差范围的失效模式。

表 1 各失效模式及其相应的频数比 %

α_{R_1}	α_{R_2}	α_{C_1}	α_{C_2}	α_{C_3}	α_{G_1}	α_{G_2}	α_{G_3}
83.4	16.6	75	10	15	44	36	20

首先采用硬件分析法对放大电路进行 FMEA, 从每个元器件开始分析。每种元器件的每种失效模式, 都会在放大级输出端产生效应。分析的初步结果如表 2 所示。

表 2 各失效模式及其产生的效应

元件类别	元件的失效模式	放大模块的失效模式	放大器失效模式的 $\lambda_i \alpha_{ij}$
1号电容	开路	无信号输出	$0.75 \times 0.05 \times 10^{-6}$
	短路	信号失真	$0.10 \times 0.05 \times 10^{-6}$
	参数漂移	影响轻微	$0.15 \times 0.05 \times 10^{-6}$
2号电容	开路	开路	$0.75 \times 0.05 \times 10^{-6}$
	短路	输出直流电位	$0.10 \times 0.05 \times 10^{-6}$
	参数漂移	影响轻微	$0.15 \times 0.05 \times 10^{-6}$
3号电容	开路	增益改变	$0.75 \times 0.05 \times 10^{-6}$
	短路	信号失真	$0.10 \times 0.05 \times 10^{-6}$
	参数漂移	影响轻微	$0.15 \times 0.05 \times 10^{-6}$
三极管	开路	无信号输出	$0.44 \times 0.5 \times 10^{-6}$
	短路	无信号输出	$0.36 \times 0.5 \times 10^{-6}$
	参数漂移	增益改变	$0.20 \times 0.5 \times 10^{-6}$
1号电阻	开路	无信号输出	$0.834 \times 0.06 \times 10^{-6}$
	参数漂移	信号失真	$0.166 \times 0.06 \times 10^{-6}$
2号电阻	开路	无信号输出	$0.834 \times 0.06 \times 10^{-6}$
	参数漂移	信号失真	$0.166 \times 0.06 \times 10^{-6}$
3号电阻	开路	无信号输出	$0.834 \times 0.06 \times 10^{-6}$
	参数漂移	增益改变	$0.166 \times 0.06 \times 10^{-6}$

由此可得到如表 3 所示的放大级模块各种失效模式的系数。

表 3 各种失效模式的系数

放大器的各种失效模式	频数比 (%)
开路	3.6
无信号输出	76.5
增益改变	14.3
信号失真	2.9
输出直流电位	0.5
影响轻重	2.2

如果对放大级的失效模式不作详细的分析, 没有列出如表 3 所示的放大级输出端信号异常特征的具体形式, 只以放大级失效后果“丧失放大功能”作为其失效模式, 就难以发现当放大级的输出耦合电容发生短路失效模式时, 因放大级的输出直流电位而发生错误引爆的灾难性后果 (假设放大级模块控制的是一个引爆电路, 当其输出端有直流电位时, 就会发生错误引爆)。对于故障检测隔离而言, “丧失放大功能”也就无法判别 BIT 能否响应。

对于测试性分析设计而言, 可以不通过元器件的失效模式分析, 使用功能分析方法直接就对放大电路进行分析。根据电路原理, 可以分析得到无信号输出、信号失真、开路、增益改变、输出直流电位这 5 种放大级的失效模式。但功能分析法更多的是依赖于设计师的水平、经验和认真态度, 容易遗漏某种发生频率不高的失效模式。这种发生频率很低的失效模式, 对测试性分析设计来说影响不大, 但对安全性分析却不可忽略。正如前面说过如果上述放大级是引爆器的输入电路, 而功能分析法中又把“输出直流电位”失效模式遗漏, 则一旦发生失效就会导致灾难。如果通过 FMEA 发现, 则不难采取对策而避免或大幅度地降低失效模式的出现。最简单的方法是用两个额定电压较高的电容器串联, 虽然会使输出开路失效频率增加, 但也大幅度地降低了灾难故障的发生频率。

功能分析法对失效模式频数比的计算, 以开路失效为基准, 根据分析和工程经验可设无信号

输出的系数为 20，增益改变的系数为 0.4，信号失效失真的系数为 0.7，输出直流电位的系数为 0.15。

于是可得频数比如表 4 所示。

表 4 各频数比

放大器的各种失效模式	频数比 (%)
开路	3.8
无信号输出	77.4
增益改变	15.5
信号失真	2.7
输出直流电位	0.6

以上对这一示意性例子进行 FMEA，说明对于解决或分析这一放大级的安全性或测试性的分析设计来说，作用是明显的。但当包含这一放大级在内的整个电子系统不可能出现机毁人亡的灾难

事件，也不单独考虑它的测试性问题时，则毋须对它进行 FMEA，列出一系列的失效模式，也不必采取设计改进措施，因为它的失效后果都是“功能失效”，已经在通常的可靠性分析、预计、设计中考虑过。显而易见，这种 FMEA 会花费大量的时间，却几乎不起作用。

6 结束语

FMEA 作用的发挥，首先要有明确的针对性，在此基础上，取决于被分析对象失效模式的全面排列和正确表达，这是 FMEA 的前提和关键。由此通过对发生效应的认真分析，就可以达到预期的目的。

参考文献：

[1] GJB 1391-92, 故障模式、影响及危害度分析 [S].
 [2] 丁定浩. 维修性工程 [M]. 北京: 电子工业质量与可靠性培训中心出版, 1999.

信息与动态



《电子产品可靠性与环境试验》

杂志刊期变化情况

1. 1962 年 9 月，《可靠性与环境试验》编辑部出版第 1 期《国外无线电器材可靠性与环境试验》杂志，1962 年共出刊 3 期；
2. 1963 年共出刊 4 期；
3. 1964 年共出刊 6 期（5-6 期为合刊）；
4. 1965 年共出刊 6 期；
5. 1966 年共出刊 6 期；
6. 1967 年共出刊 2 期；
7. 1967 年 5 月至 1975 年 1 2 月休刊；
8. 1976 年复刊，9 月开始出版《国内电子产品可靠性与环境试验》（1976 年只出 1 期）和《国外电子产品可靠性与环境试验》（1976 年共出刊 3 期）两本刊物；
9. 1977 年《国内电子产品可靠性与环境试验》共出刊 4 期，《国外电子产品可靠性与环境试验》共出刊 4 期；
10. 1978 年《国内电子产品可靠性与环境试验》改名为《可靠性与环境试验》共出刊 4 期，《国外电子产品可靠性与环境试验》共出刊 4 期；

11. 1979 年《可靠性与环境试验》共出刊 4 期，《国外电子产品可靠性与环境试验》共出刊 4 期；
12. 1980 年《可靠性与环境试验》共出刊 4 期，《国外电子产品可靠性与环境试验》共出刊 4 期；
13. 1981 年《可靠性与环境试验》共出刊 4 期，《国外电子产品可靠性与环境试验》共出刊 4 期；
14. 1982 年《可靠性与环境试验》共出刊 4 期，《国外电子产品可靠性与环境试验》共出刊 4 期；
15. 1983 年起，上述两种刊物被合并，正式定名为《电子产品可靠性与环境试验》，并改为双月刊，总期数从 1983 年第 1 期开始计算，现总期数为第 133 期；
16. 2005 年 2 月出刊的《电子产品可靠性与环境试验》为 23 卷第 1 期，总期数为 133 期；
17. 1983 年起至今，一直用《电子产品可靠性与环境试验》刊名正常出刊，没有休刊情况。

《电子产品可靠性与环境试验》编辑部

2005 年 2 月