

文章编号: 2095-4980(2016)06-0920-05

电磁加固设计余量可靠度与置信度评估算法分析

郭春莹, 李虹轶, 许 伟, 林源根

(北京市清河大楼子六, 北京 100094)

摘 要: 介绍了系统抗电磁脉冲性能评估的主要任务以及系统抗电磁脉冲加固性能的统计性描述方法, 根据评估水平(或目标)的不同, 将电磁脉冲试验分为 4 种类型, 在此基础上分析了电磁加固设计余量评估中的随机误差来源, 分析了总误差标准偏差的评定方法, 介绍了一种设计余量下限估计及其对应可靠度与置信度的评定方法, 分析了该方法应用的前提条件, 并以某屏蔽舱内电子设备的加固设计余量评估计算为例, 说明了算法的使用过程及注意事项。

关键词: 加固设计余量; 可靠度; 置信度; 评估算法; 应用条件

中图分类号: TN306; O213.2

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201606.0920

An evaluation algorithm for the reliability and confidence of EMP hardening design margin

GUO Chunying, LI Hongyi, XU Wei, LIN Yuangen

(Beijing Qinghe Building Zi Six, Beijing 100094, China)

Abstract: The primary tasks of EMP (Electromagnetic Pulse) hardening assessment of complex systems are introduced, and the statistical descriptive method of EMP resistant performance of the systems is described in detail. According to the different levels (or purposes) of the assessment, four types of EMP testing are defined as well. Besides, the various sources of random errors in EMP hardening margin evaluation, and the method to estimate the standard deviation of the total error are also analyzed. To estimate the lower-bound of the margin and its Reliability-Confidence, an algorithm is developed and the preconditions for its application are also analyzed. As an application guide for the algorithm, the evaluation on EMP hardening margin of the electronic equipments in a shielded cabin is provided.

Keywords: hardening design margin; reliability; confidence; evaluation algorithm; preconditions

评估复杂系统的抗电磁脉冲性能, 核心任务是测量其敏感子系统的失效阈值(在此基础上确定系统的失效阈值), 并与系统面临的威胁电磁环境进行对比, 如果失效阈值远大于(或远小于)威胁环境, 即系统足够“硬”(或足够“软”), 可用确定性的语言描述系统的抗电磁脉冲性能, 即能够在威胁环境下生存(或失效)。但对一个经合理加固设计的系统而言, 完全确定性的“生存”或“失效”描述并不科学, 原因在于: 一是系统不可能超级“硬”(或超级“软”); 二是失效阈值(或抗力)仅是多次试验测量值的一个平均值, 存在测量不确定度; 三是系统面临的威胁环境通常比较复杂, 在电磁场峰值确定的条件下, 入射波的辐照方向、极化方向对电磁耦合的影响非常大, 从这个角度讲, 系统内部的电磁环境也存在不确定性^[1]。在失效阈值及威胁环境存在不确定度的情况下, 对系统加固性能的表述一般采用统计性语言, 如在 XX 置信度下, 系统的生存概率是 XX^[2]。

本文在电磁脉冲模拟试验目的分析基础上, 分析了加固设计余量评估中的误差来源, 在总误差不确定度估计方法分析基础上, 分析了文献中余量评估的可靠度-置信度算法及其应用条件, 并以某屏蔽舱内电子设备的加固设计余量测量为例, 说明了算法的使用过程及注意事项。

1 电磁脉冲(EMP)试验的目的

评估复杂系统的抗电磁脉冲性能, 应针对不同的评估目标(或评估水平)要求, 开展相应不同类型的 EMP 试

收稿日期: 2015-07-15; 修回日期: 2015-09-23

验, 根据得到的试验数据进行分析与评定。文献[3]将 EMP 试验要达到的目的分为如下 4 种类型:

1) 正常与否的定性测试: 系统还能继续保持工作吗?

2) 余量确定: 辐射场的水平必须增加到多少(或失效阈值减小到多少), 从而恰好刚刚引起系统失效?(最坏情况下场的入射方向、极化方向, 等等。)

3) 如果余量的最优估计为 $\hat{M}$, 这种情况下系统成功的最小概率是多少? 或这种估计的可靠度是多少?

4) 如果 $\hat{M}$ 是推荐的余量, 并且 $\hat{R}$ 是该余量对应的可靠度, 与 $\hat{R}$ 相联系的置信度是多少?

第 1 种类型试验的目的比较简单, 也是容易做到的。很明显, 第 2 种试验的目标得到提升, 因为它提供了为防止系统失效, 如何对系统进行加固(加固哪一部分? 怎样加固?)以及加固“程度”的信息, 或者说不需要加固的“数量”、“程度”究竟是多少的信息。既然最终的目标是对系统进行“充分的”加固以确保其正常工作, 那么针对系统评估, 我们还能要求什么? 或者说还能提出哪些定量化的需求? 这就是第 3、第 4 种评估目标(评估试验)要回答的问题。

2 加固余量测定的误差来源及其标准偏差估计

2.1 电磁加固余量的定义

针对电磁脉冲加固, 当加固设计约束相关的应力用电压、电流、电场或磁场来确定时, 加固设计余量 M (用 dB 表示), 其定义为如下公式^[4]:

$$M = 20 \log \left(\frac{X}{Y} \right) \quad (1)$$

式中: X 是与电磁脉冲加固设计约束相关的应力量级, 在该等级将发生硬件失效, 失效解释为执行某一规定任务的关键功能的能力丧失(下文以电场峰值表征, 单位: V/m); Y 是相应规定的或分配的应力量级(同样以电场峰值表征)。

2.2 余量测量的误差来源

根据加固余量 M 的定义, 它由损伤阈值 X 、威胁环境 Y 计算, 因此余量误差的可能来源就在于 X 与 Y 的测定过程。

1) 被测对象性能随机变化引起的阈值测量误差

在损伤阈值 X 的测量中, 一般要利用 N 个同样的对象进行测量, 在测量条件、测量方法等不变的前提下, 因各个对象的性能总存在差异, 各次的测量结果是随机变化的, 假设为 $E_{t1}, E_{t2}, E_{t3}, \dots, E_{tm}$, 以上数列一般服从正态分布。在工程实践中, 一般采用以上测量值的均值作为特定对象的损伤阈值(因为真实的损伤阈值永远不知道), 即有:

$$\bar{E}_t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m E_{ti} \quad (2)$$

将 $\bar{E}_t$ 作为损伤阈值, 则各次阈值测量值的绝对误差为: $\Delta E_i = E_{ti} - \bar{E}_t$, 该误差是由被测对象性能随机变化引起的, 如用相对误差 δ_i 表示, 则:

$$\delta_i = \frac{\Delta E_i}{\bar{E}_t} \quad (3)$$

显然 δ_i 服从正态分布 $N(0, \sigma_{\delta}^2)$, 该相对误差用分贝表示^[5], 则有分贝误差:

$$\delta_A = 20 \log(1 + \delta_i) \quad (4)$$

则 δ_A 服从对数正态分布, 均值为 0。显然, 如果用 e_1 表示阈值 X 测量过程因对象性能变化引起的误差, 假设其为一随机变量, 则 $e_1 = \delta_A$ 。

2) 辐射模拟器性能变化、辐射场强刻度等引起的误差

在阈值测量过程中, 因电磁脉冲模拟器性能存在不稳定性, 致使在模拟器激发参数相同的条件下, 重复 m 次激发电磁脉冲, 获得的电场峰值也不可能完全相同。此外, 在对模拟器进行标定(刻度)的时候, 因电场探头响应存在不稳定性等影响因素, 也会造成辐射场的实际强度与测量强度存在误差。以上 2 种因素是确定研究对象所处电磁环境 Y 的误差源(当然还可能存在其他未知的误差源)。

类似对阈值误差的分析, 如果用 e_2 表示该误差, 则其服从均值为 0 的对数正态分布。

3) 误差区间估计方法^[6]

针对某个误差分量, 假设经过 N 次测量, 得到第 j 次的相对误差(以分贝为单位)为 x_j , 其均值为 $\bar{x}$, 样本方差为 σ_0^2 , 则有:

$$\chi^2 = \frac{1}{\sigma_0^2} \sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2 = \chi^2(N-1) \quad (5)$$

根据式(5)可对误差总体标准差 s 进行估计, 当概率 $p=1-C_i$ 的 χ^2 分布的分位数 $\chi_{1-C_i}^2(N-1)$ 对应 s 的置信上限为:

$$s = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^N (x_j - \bar{x})^2}}{\chi_{1-C_i}^2(N-1)} \quad (6)$$

即在置信度为 C_i 下, 某相对误差(譬如: 模拟器产生电场峰值)的区间估计为 $[\bar{x}-s, \bar{x}+s]$, 因有 $\bar{x} \approx 0$, 故该项相对误差的区间估计为 $[-s, s]$ 。

2.3 余量总误差及其标准偏差评定

除了随机性效应之外, 如果在加固设计余量的测定过程中还存在其他影响因素, 譬如系统的加电与不加电状态、电磁波不同的入射方向、极化方向等, 因此不确定度的评定还需要考虑这些因素的影响。如果将这些因素称为余量误差的来源, 并且各个误差分量已经事先测定, 其均值为 0, 服从对数正态分布, 则余量总误差的不确定度评定可按下列步骤进行^[7]:

- 1) 列出所有的独立误差来源 e_i (假设共有 n 个), 设总误差为 e_m , $e_m = \sum_{i=1}^n e_i$;
- 2) 利用公式(6)计算每一个误差的标准不确定度 s_i ;
- 3) 利用“方和根法”计算余量总误差的合成标准不确定度, $s_r = \sqrt{\sum_{i=1}^n s_i^2}$;
- 4) 总误差的标准偏差 σ_e 可用 s_r 估计(是一个保守的上限估计)。

3 加固余量的下限估计及其置信度确定方法

3.1 余量下限估计方法^[8]

上面已给出余量总误差的标准差计算方法, 当误差源个数 n 足够大时, 按中心极限定理, e_m 近似服从正态分布。根据正态分布可靠寿命计算方法, 如对应可靠度 R 的余量可靠寿命估计为 M_R , 余量的下限估计为:

$$M_R = m_{0.5} - z_R s_r \quad (7)$$

式中: $m_{0.5}$ 为某一次测量获得的余量; z_R 为标准正态分布的分位数, 即 $\Phi(z_R) = R$ 。

3.2 余量下限 M_R 估计的置信度^[9]

令余量下限估计 M_R 的置信水平为 C , 则有 $C \equiv \min\{C_i\}$, C_i 是第 i 个误差分量标准差估计 s 的置信水平。以上对总误差置信水平的判断基于如下定理:

条件: 如果 $x_i \sim N(0, \sigma_i^2)$, 其中 $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, 并且在置信水平 $\tilde{C}$ 下, 针对 x_i 的可靠度为 R 区间估计为 $[-e_i, e_i]$ 。

结论: 在以上条件下, 对 N 个区间进行“方和根法”计算(方差相加), 则 $X = \sum_{i=1}^N x_i$ 的可靠度为 R 的区间估计的置信水平 $C \geq \tilde{C}$ 。

4 加固余量可靠度与置信度算法应用条件分析

以上给出余量估计及其可靠度、置信度估计算法, 这些算法的应用具有前提条件, 初步分析如下:

a) 首先应当找出余量测定过程中所有的误差来源(误差分量), 或者说不要遗漏重要的误差分量; 同时, 以上误差主要是指通过测量方法、数据处理方法等扣除系统误差以后的随机误差。如果在测定余量的过程中, 存在较大的系统误差, 则该算法不成立。

b) 2.3 的 1)要求各误差源是独立的, 且是线性相加的, 即 $e_M = \sum_{i=1}^n e_i$, 否则不能用第 3 步的“方和根法”计算合成不确定度, 如果误差分量之间存在相关性, 此时需要考虑误差源相关性引入的不确定度。判断误差的独立性, 可通过误差类型、来源的分析, 进行物理判断, 如果不能确定误差的独立性, 则需要对误差的相关性检验。

c) 在 2.3 的 2)中, 运用式(5)、式(6)计算误差分量的标准不确定度及区间估计, 这就要求各误差分量服从对数正态分布。因此算法要求对测得的误差分量数据进行拟合优度检验, 如没有通过检验, 则必须寻求其他解决办法。

d) 根据余量的定义, 它仅与损伤阈值和指定(或规定)环境的时域峰值有关, 因此误差源也应仅考虑引起 X, Y 峰值强度变化的误差类型。如果损伤阈值不但与环境的电场峰值有关, 还与环境的电磁频谱相关(工程实践中经常遇到的情况), 则必须寻求其他的余量评估算法。

e) 如果敏感电子设备与电磁场的耦合关系是非线性的, 譬如以设备耦合的电压、电流、能量等参数表征损伤阈值, 且这些耦合参数与电磁辐射环境的函数关系是非线性, 则加固设计余量的估计不能表示为损伤阈值(单位: dB)误差与其他引起辐射场强误差项的线性和, 从而以上算法不成立。

5 某设备舱电子设备电磁加固余量的可靠度与置信度评定

以某屏蔽舱内电子设备加固设计余量(以电场峰值表征、电磁耦合关系是线性的)实验分析为例, 初步分析了余量测定的误差来源, 计算分析了加固设计余量的可靠度与对应的置信度。

5.1 余量测定的误差来源及误差分析结果

在对某屏蔽舱内电子设备加固设计余量开展实验测量时, 误差的来源及其结果分析见表 1。

表 1 误差来源及分析结果
Table1 Error source and analysis results

serial number	error type	error results(90%~90%)	comments
1	threshold	[-7.3 dB, 7.3 dB]	The EUTs are different, while the measuring conditions are not changed.
2	measure error	[-5.4 dB, 5.4 dB]	Includes simulator variability and calibration.
3	simulation error	[-6.7 dB, 6.7 dB]	Includes variability of wave orientation, and its polarization.
4	power on-off	[-8.2 dB, 8.2 dB]	Power supply for EUT is on or not.
5	environment of the shielded cabin	[-2.6 dB, 2.6 dB]	Usually only part of equipments are installed in the cabin during testing, and this is not the real situation.

5.2 误差结果的含义

上表中 90%-90%的含义: 第 1 个 90%表示某误差的区间估计至少有 90%的概率包含该误差分量, 譬如, 表中第 1 行损伤阈值的误差区间[-7.3 dB,7.3 dB], 其含义是阈值误差落在此区间的概率为 90%(在这里阈值误差是一随机变量, 其概率分布为对数正态分布, 该概率分布是基于 Bayes 方法或 Fiducial 方法获得的^[10])。第 2 个 90%表示基于抽样样本做出上述判断的置信水平(或置信概率、置信度)为 90%, 它就是式(6)中的 C_i 。

5.3 余量可靠度与置信度的计算

下面利用式(7)计算不同可靠度情况下的余量, 根据表 1 数据, 如果某次测得的余量 $m_{0.5} = 20.0$ dB, 则在 90%置信水平下, 可靠度为 0.8 的余量下限为 $M_{0.8} = 8.08$ dB, 可靠度为 0.9 的余量下限为 $M_{0.9} = 1.84$ dB, 可靠度为 0.92 的余量下限为 $M_{0.92} = 0$ dB, 可靠度为 0.95 的余量下限为 $M_{0.95} = -3.27$ dB。当然, 如果误差估计时的置信度是不同于 90%的其他值, 则余量的置信度也要随之相应变化。

6 结论

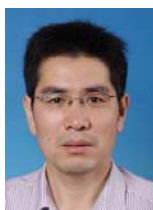
本文分析了电磁加固设计余量评估的可靠度-置信度算法及其应用条件, 可以看出该算法的要求还是非常高的, 如果能够做到文中分析的 5 个条件, 则评估结果的可信度就比较高。

同时需要指出的是, 以上算法事实上仅考虑了随机误差的合成, 或者说将某些系统误差当作随机误差来处理, 因此算法并不完美, 严格上应该将误差细分, 区分为随机误差与系统误差, 并考虑它们的合成方法。还有一点是, 以上算法对抽样的样本数要求很高, 但在工程实践中, 往往需要处理小子样问题, 因此应当选用一些现代的数据处理方法, 使之更符合工程的实际需要, 这就对从事系统评估的人员提出了新的研究课题, 发展更科学、更实用的可靠度与置信度计算方法。

参考文献:

- [1] Headquarters, Department of the Army. TM5-858-6(Hardness Verification)[R]. Washington D.C.:Headquarters, Department of the Army, 1984.
- [2] 郭春营,吴成迈,段占元,等. 电子器件生存概率及置信度的 Bayes 计算方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(21):754-758. (GUO Chunying,WU Chenmai,DUAN Zhanyuan,et al. Bayesian method to determine the survival probability and confidence of electrical devices under certain radiation environments[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(21):754-758.)
- [3] ASHLEY C. Reliability-confidence algorithms for assessing complex systems[R]. Air Force Weapons Laboratory, 1978.
- [4] Air Force Regulation (AFR). Nuclear hardness and survivability program requirements for ICBM weapon systems:MIL-STD-1766B(USAF)[S]. Department of Defense(DoD), 1994.
- [5] 李金海. 误差理论与测量不确定度评定[M]. 北京:中国计量出版社, 2003. (LI Jinhai. Error Theory and the Assess of Measurement Uncertainty[M]. Beijing:Chinese Measurement Press, 2003.)
- [6] 《数学手册》编写组. 数学手册[M]. 北京:高等教育出版社, 1979. (Mathematics Handbook editorial group. Mathematics Handbook[M]. Beijing: Higher Education Press, 1979.)
- [7] ASHLEY C,LOCASSO J V. A brief presentation and discussion of the algorithm to determine EC-135 EMP margin reliability-confidence[R]. Air Force Weapons Laboratory and Rockwell International Autonetics Group, 1977.
- [8] 潘吉安. 可靠性维修性可用性评估手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1995. (PAN Ji'an. Assess Handbook of Reliability, Maintainability and Usability[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1995.)
- [9] LOCASSO J V. The confidence in combinations of imperfectly known variances[R]. Rockwell International Autonetics Group, 1977.
- [10] 周源泉,翁朝曦. 可靠性评定[M]. 北京:科学出版社, 1990. (ZHOU Yuanquan,WENG Chaoxi. Assess of Reliability[M]. Beijing:Science Press, 1990.)

作者简介:



郭春营(1969-), 男, 山东省沂水县人, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为抗辐射加固技术.email: sdgcymail@126.com.

李虹轶(1981-), 男, 天津市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为核电磁脉冲加固技术.

许伟(1981-), 男, 石家庄市人, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为核技术应用.

林源根(1971-), 男, 福建省漳州市人, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为核探测技术.