

# 电子系统 HPM 效应敏感度评估新方法

徐 勇 丁 武 杜祥琬

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京8009信箱, 100088)

**摘 要** 将模糊信息分析、信息分配和信息扩散原理等模糊信息优化处理理论应用于电子系统 HPM 效应评估, 建立了以效应实验数据为基础的 HPM 效应敏感度概率分布曲线和系统失效阈值与 HPM 参数之间关系预测的模糊数学计算模型, 编制了模拟计算程序, 并对一些实例作了分析计算。

**关键词** 高功率微波效应 模糊数学

在电子系统高功率微波(HPM)效应的实验与理论研究中, 如何建立切实可行的 HPM 效应评估方法是重要的基础工作之一。根据 HPM 与电子系统相互作用物理过程中有大量随机的、系统的和判断上的不确定现象存在, 从八十年代初开始国外研究人员就建立了一些以概率统计方法为基础的电子系统 HPM 效应评估方法<sup>[1~3]</sup>。效应的评估结果则以电子系统敏感度、生存率概率分布曲线的形式给出, 国内近年来也提出了概率统计的评估方法<sup>[4]</sup>。概率统计模型必须建立在大量的效应实验数据的基础上, 而在我国沿用通常的概率统计方法进行电子系统 HPM 效应评估将由于信息量不够充分而遇到困难, 考虑到我国的实际情况和 HPM 与电子系统相互作用中存在大量的不确定性以及效应数据库具有某种群体模糊性等特点, 我们提出以模糊数学方法为基础建立电子系统 HPM 效应评估新方法, 试图利用模糊信息处理的原理, 分析和处理效应实验数据, 以达到充分利用已有实验数据, 就能得出令人满意的效应评估结果的目的。

电子系统的 HPM 效应评估实际上是评估电子系统对 HPM 的敏感性。而所谓系统的敏感性是指: 系统抵抗不利环境的设计能力的界限或弱点随设计参数和环境参数的变化关系<sup>[2,4]</sup>。通过敏感性的评估, 结合系统的环境(HPM 环境), 可以确定系统的生存能力。通常, 系统的敏感性评估以两种形式的曲线给出, 一种是系统失效概率作为 HPM 通量(当源的频率、脉宽、调制等给定时)的函数的概率分布曲线; 另一种是系统失效阈值(即系统失效时的 HPM 最小通量值)与某一 HPM 参数的关系曲线。本文将探讨如何利用模糊数学信息处理方法, 分析电子系统的效应实验数据, 从而估算和预测系统的失效概率分布曲线和失效阈值与辐射参数的关系。

## 1 系统失效阈值与 HPM 参数间关系的预测

在评估一个电子系统的 HPM 效应时, 常常需要给出系统失效阈值与某一参数的关系曲线。一般是从理论或实验上来确定这种关系曲线, 如通过理论分析得出的半导体器件失效功率与脉宽的 Wunsch-Bell<sup>[6]</sup>关系。但由于电子系统的构成各不相同和 HPM 相互作用的机理比较复杂, 所以大量的结果是通过实验获得的, 而 HPM 与电子系统相互作用中存在的不确

\* 国家863激光技术领域青年基金和国家博士后科学基金资助课题

1997年3月25日收到原稿, 1997年10月15日收到修改稿。

徐勇, 男, 1962年10月出生, 博士后, 副研究员

定性现象, 将导致电子系统效应实验数据具有某种群体模糊性的特点。因此, 在本节中我们将借鉴地震灾害研究中的模糊数学分析方法<sup>[7]</sup>, 建立一个基于系统效应实验数据预测系统失效阈值与 HPM 参数关系的模糊数学计算模型。

### 1.1 模糊逻辑推论与模糊言证分析

设  $X_1, X_2, \dots, X_N$  和  $P$  是论域  $U$  中的子集合;  $Y_1, Y_2, \dots, Y_N$  和  $Q$  是论域  $V$  中的子集合, 则论域  $U$  和  $V$  的二维复合命题为:

$$\begin{array}{ll}
 \text{第一前提} & \text{条件命题} \\
 & g_1 = \text{If } X \text{ is } X_1, \text{ then } Y \text{ is } Y_1 \\
 & g_2 = \text{If } X \text{ is } X_2, \text{ then } Y \text{ is } Y_2 \\
 & \vdots \\
 & g_N = \text{If } X \text{ is } X_N, \text{ then } Y \text{ is } Y_N \\
 & \text{信息网块} \quad E = \{g_1, g_2, \dots, g_N\} \\
 \text{第二前提} & \text{If } X \text{ is } P \\
 \text{推 论} & Y \text{ is } Q
 \end{array}$$

其中  $E$  称为信息网块或言证, 它是所有条件命题的总和, 是一个集合。由此可以提出如下问题: 逻辑推论问题(已知  $E$  和  $P$ , 求  $Q$ ); 言证分析问题(已知  $E$  和  $Q$ , 求  $Q$  发生的可能性)。这两个问题都是出自条件命题, 从后面实例计算中可以看到, 条件命题又来源于电子系统 HPM 效应的实验数据。

(1) 逻辑推论方法: 先将条件命题  $g_i$  转换成论域  $U \times V$  的模糊关系  $R_i: R_i = X_i \times Y_i$ , 即  $R_i$  为模糊子集  $X_i$  和  $Y_i$  的笛卡尔积,  $R_i$  的隶属函数  $\mu_{R_i}$  定义为

$$\mu_{R_i}(u, v) = \mu_{X_i \times Y_i}(u, v) = \min[\mu_{X_i}(u), \mu_{Y_i}(v)] \quad \forall u \in U, v \in V \quad (2)$$

据此, 信息网块的模糊关系, 将是单个模糊关系  $R_i$  的并;  $R = \bigcup_i X_i \times Y_i$ 。再将第二前提转换为一元模糊关系或模糊集  $P$ 。最后通过  $P$  与  $R$  的极大-极小( $M - I$ ) 运算“ $\cdot$ ”推论论域  $V$  与  $P$  对应的模糊子集:  $Q = P \cdot R$ 。

(2) 言证分析方法: 在实际应用中, 必须说明模糊推论得到的结果是否可靠。Zadeh 于 1979 年提出了可能发生期望值和肯定发生期望值, 作为衡量推论结果的模糊尺度, 并定义为

$$\text{可能发生期望值} \quad E(Q) = \sum_i p_i \text{SUP}(Q \text{ ' } Y_i) \quad (3)$$

$$\text{肯定发生期望值} \quad EC(Q) = 1 - E(Q \text{ '}) \quad (4)$$

式中,  $p_i$  为命题  $g_i$  出现的概率;  $Q \text{ '}$  为集合  $Q$  的补。

### 1.2 系统失效阈值与 HPM 参数关系的预测

下面通过一个实例, 来说明怎样应用上面介绍的模糊数学计算原理, 预测电子系统失效阈值与 HPM 参数的关系。参照晶体管在不同脉宽的电磁脉冲作用下的失效功率实验数据(取自 1992 年乔登江教授等编著的《电子元器件电磁脉冲效应手册》), 设有如下 53 组脉宽与失效功率测量值:  $(T_i, P_{fi}), i = 1, 2, \dots, 53$ 。具体数值在图 1 中以圆点标出, 我们来求失效功率随脉宽的变化规律。

(1) 实验数据的处理: 设脉宽论域为  $U$ , 失效功率论域为  $V$ 。在  $U$  和  $V$  中各选一组离散数据  $u_i$  和  $v_j$  作为论域元素, 即基础变量, 在本例中,  $u_i$  选为 9 个;  $v_j$  选为 21 个。各个基础变量都代表一定的数值范围, 其中心值是理想的参考值, 以下计算都以它作为标准。然后, 选择  $U$  和  $V$  中的语言变量。 $U$  的语言变量为  $X_1, X_2, X_3$ , 代表脉冲宽度窄、较宽、宽三个等级;  $V$  的语言

变量为  $Y_1, Y_2, \dots, Y_9$ , 表示失效阈值小、次小...、次大、大共九个等级。最后, 确定语言变量值。为了减少人为的主观因素影响, 在这里我们采用了信息分配法<sup>[8]</sup> 来确定语言变量的值。

(2) 信息分析: 信息分析的目的是揭示实验数据的模糊结构形式, 它是用语言变量值构成的信息矩阵  $M$  来表示。 $M$  的构造方法如下: 任取一组实验值  $(T_i, p_i)$ , 在论域  $U$  和  $V$  中对应找到一组基础变量  $(u, v)$ , 再把  $(u, v)$  分别划归可能性最大的语言变量  $(X_j, Y_k)$ ; 然后, 在  $M$  矩阵的元素  $M_{ik}$  上加一个自然数 1。对全部 53 组实验数据作同样的处理, 即可得出信息矩阵:

$$M = \begin{matrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \end{matrix} \begin{bmatrix} Y_1 & Y_2 & Y_3 & Y_4 & Y_5 & Y_6 & Y_7 & Y_8 & Y_9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 4 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 3 & 6 & 3 & 3 & 3 \\ 2 & 9 & 11 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

经过以上处理后, 原始的实验数据就加工成能给整个系统提供许多信息的模糊信息矩阵  $M$ 。在  $M$  矩阵中每一行提出一个非零元素, 就组成一个信息网块  $E = \{g_1, g_2, g_3\}$ 。由  $M$  知, 一共有 108 个信息网块, 每一个网块都携带着系统的信息。

(3) 计算结果: 根据公式 (1) ~ (4), 我们编制了模糊逻辑推论和模糊言证分析的微机计算程序, 对信息矩阵  $M$  给出的全部信息块进行了逻辑推论和言证分析, 求出了  $Q$  的发生可能性达到最高的优化状态信息网块  $E_0 = \{(1, 8), (2, 3), (3, 2)\}$  和相应论域  $V$  及其模糊子集, 由此, 得出的晶体管失效功率与脉冲宽度关系曲线示于图 1 中(图中实线), 同时在图 2 中给出了相应的可能性分布曲线。

以上的分析计算表明, 采用模糊数学方法预测电子系统失效阈值与 HPM 参数间关系, 符合效应实验数据具有群体模糊性现象的本质, 而且对所得结果有验证性分析, 可以给出预测结果可靠程度。

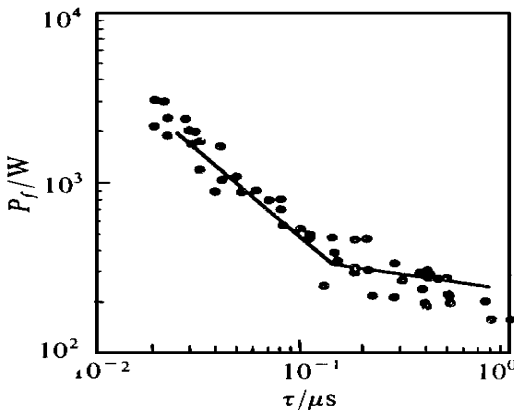


Fig 1 Fuzzy relation between failure power and pulse width (solid line), where circle dots are test data

图1 晶体管电磁脉冲失效功率与脉冲宽度关系的模糊数学预测(实线)和实验数据(点)

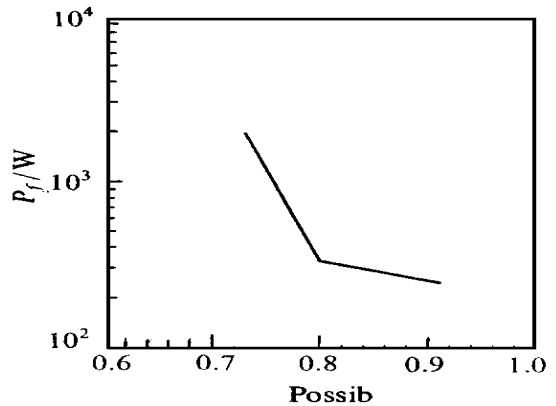


Fig 2 Possibility distribution corresponding to the fuzzy relation shown in Fig 1

图2 图1预测结果的可能性分布曲线

## 2 电子系统失效概率分布曲线的模糊数学估计

电子系统失效概率随 HPM 通量变化的概率分布曲线, 是效应评估中表示系统敏感性的常见形式之一。在概率统计中通常采用经验分布法和直方图法对系统的整体分布进行直观估

计, 但由格里文科定理和强大数定理知, 只有当样本数较大时, 这种估计才接近真实分布<sup>[5]</sup>。在本节中, 我们将介绍一种在小样本情况下估计整体分布的模糊信息扩散估计法<sup>[9]</sup>, 并将其应用于电子系统失效概率分布曲线的估计。

### 2 1 信息扩散原理和整体分布的信息扩散估计

由模糊信息扩散原理<sup>[9]</sup>, 设  $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$  是知识样本,  $V$  是基础论域, 记  $w_j$  的观测值为  $v_j$ , 设  $x = Q(v - v_j)$ , 则  $W$  非完备时, 存在扩散函数  $\mu(x)$ , 使  $v_j$  点获得量值为 1 的信息可按  $\mu(x)$  的量值扩散到  $v$  去, 且扩散所得的原始信息分  $Q(v) = \sum_{j=1}^m \mu(x) = \sum_{j=1}^m \mu Q(v - v_j)$  能更好地反映  $W$  所在总体的规律。

利用信息扩散原理, 令  $Q(v - v_j) = (v - v_j)/\Delta_m$ , 可得总体概率密度分布的一个估计为

$$f_m(v) = \frac{1}{m \Delta_m} \sum_{j=1}^m \mu\left(\frac{v - v_j}{\Delta_m}\right) \tag{6}$$

其中  $\Delta_m > 0$  为常数, 称为窗宽。将模糊信息的扩散过程类比成统计物理中气体分子的扩散过程, 可得出正态分布形式的信息扩散函数  $\mu(x) = (2\pi)^{-1/2} \exp(-x^2/2\sigma^2)$ , 再将其代入(6)式, 即可得出总体密度分布的正态扩散估计<sup>[9]</sup>

$$f_m(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi m} h} \sum_{j=1}^m \exp\left[-\frac{(v - v_j)^2}{2h^2}\right] \tag{7}$$

其中  $h = \sigma\Delta_m$ , 在选用两点择近原则时,  $h = (2(-\ln y))^{-1/2} (b - a) (m - 1)^{-1}$ , 这里  $m$  为样本数,  $b, a$  分别为样本中的最大和最小观测值; 设  $m = 2n + 3$ , 则  $y$  为  $y^4 + y^9 + y^{16} + \dots + y^{(n+1)^2} - 0.5 = 0$  的第一个大于零的实根。根据概率分布的定义, 从式(7)可得总体概率分布的正态扩散估计为

$$F_m(v) = \int_{-\infty}^v f_m(v) dv \tag{8}$$

对上式进行数值积分, 即得总体概率分布曲线。

关于总体分布信息扩散估计的误差, 人们已经证明<sup>[9]</sup>, 扩散估计的均方根误差按样本数  $m$  以  $m^{-4/5}$  的速度收敛于零, 而通常的直方图估计的均方误差至多只能以  $m^{-2/3}$  的速度趋于零。这表明扩散估计好于直方图估计, 即在相同的误差要求下, 扩散估计需要的样本数明显少于直方图估计。

### 2 2 算 例

下面, 将总体分布的正态信息扩散理论应用于电子系统失效概率分布曲线的估计。设在一种晶体管的电磁脉冲效应实验中, 测得一组 10 个该晶体管的损失常数  $K$  的值为 10.9, 13.8, 12.8, 9.2, 11.3, 10.5, 4.8, 11.9, 14.0, 13.2。试估计该晶体管的失效概率分布曲线(在电磁脉冲效应研究中通常用  $K$  值表征失效阈值)。

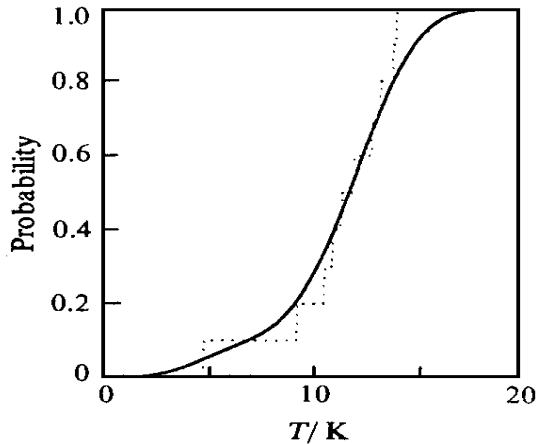


Fig 3 Probabilistic distribution of damage constants of a triode (solid line), where the dot line is empirical distribution in probabilistic approach  
图3 晶体管损伤常数概率分布曲线的信息扩散估计 (实线) 和经验分布法结果 (虚线)

根据公式(6)~(8),我们编制了概率分布曲线信息扩散估计的计算程序。把上面的实验数据输入该程序,便可在微机上算出失效概率分布曲线(图3实线)。作为比较,画出了采用经验分布法的结果(图3虚线),显然,模糊信息扩散估计优于经验分布法。

### 3 结 论

考虑到电子系统与HPM相互作用中存在大量不确定性这一特征,我们将模糊数学信息处理方法应用于系统的HPM效应评估方法中,从而建立了一种电子系统效应敏感度评估的新方法。计算结果表明,采用模糊数学效应评估方法,可以给出效应评估中常见的两种评估曲线,并且,与概率统计方法相比有以下的优点:在概率分布曲线估计中,所需的样本数较少;在系统失效阈值与辐射参数关系曲线预测中,可以给出相应的可靠性分布曲线。

### 参考文献

- 1 Mensing R W. Application of PRA to HEMP Vulnerability Analysis UC D- 20553(1985)
- 2 Mensing R W et al A method for estimating the susceptibility of electronic system to HPM. UC D- 21430(1988)
- 3 Chesser N J. Methodology guidelines for HPM susceptibility assessments UCRL - CR- 104314(1990)
- 4 王建国 高功率微波 1994, (1): 1
- 5 王梓坤 概率论基础及其应用 北京: 科学出版社, 1979 215
- 6 Benford J and Swegle J. High- Power Microwave (中译本). 1994 24
- 7 刘贞荣 地震工程与工程振动, 1992, 2(3): 29
- 8 Liu Z and Huang C. *Fuzzy Sets and Systems*, 1990, 36: 67
- 9 黄崇福, 王家鼎 模糊信息优化处理技术及其应用 北京: 航空航天大学出版社, 1995 第三章

## A NEW METHOD FOR ESTIMATING THE SUSCEPTIBILITY OF ELECTRONIC SYSTEMS TO HIGH POWER MICROWAVE

Xu Yong, Ding Wu, and Du Xiang'an

*Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, P. O. Box 8009, Beijing, 100088, China*

**ABSTRACT** The method of fuzzy mathematics is applied to estimate the susceptibility of electronic systems to high power microwave. The fuzzy mathematics models of high power microwave susceptibility assessment are developed. Our calculation results show that the prospect for using the technique of fuzzy mathematics in high power microwave effect assessment is captivating.

**KEY WORDS** high power microwave effect, fuzzy mathematics