

文章编号: 2095-4980(2016)02-0253-06

模糊决策评估分析高功率微波威胁等级

林江川^{a,b}, 闫二艳^{a,b}, 钟龙权^{a,b}

(中国工程物理研究院 a.复杂电磁环境实验室; b.应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 传统高功率微波(HPM)效应评估主要是从概率统计的角度, 以作用概率曲线或失效概率曲线来描述电子学目标的 HPM 效应, 但这种方法并不适用于威胁等级评估。本文在分析 HPM 效应评估优点和不足的基础上, 提出了模糊决策的概念, 并优选模糊多目标决策(FMADM)方法, 结合层次分析法(AHP)的递阶层次构造思想提出了一种可行思路, 并通过具体算例证明了方法的可行性, 总结了可能遇到的问题。

关键词: 模糊决策; 高功率微波; 威胁等级评估

中图分类号: TN015

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0253

Application of fuzzy decision in the HPM threat level assessment analysis

LIN Jiangchuan^{a,b}, YAN Eryan^{a,b}, ZHONG Longquan^{a,b}

(a.Complicated Electromagnetic Environment Laboratory; b.Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Traditional High Power Microwave(HPM) effect assessments mainly use the effect probability curve or failure probability curve to describe the effects of electronics system from the point of view of probability and statistics. However this method is not applicable to the threat level assessment. In this paper, fuzzy decision method is proposed on the basis of analyzing the characteristics and defects of traditional method. Then on the basis of Fuzzy Multiple Attribute Decision Making(FMADM), a feasible idea is introduced combined by the hierarchical structure of Analytic Hierarchy Process(AHP). The results obtained from examples prove the feasibility of this method. Finally, the problems possible encountering are summarized.

Key words: fuzzy decision; High Power Microwave; threat level assessment analysis

HPM 的杀伤作用主要表现为依靠微波的前门或后门耦合效应, 进入系统内部, 在金属表面或金属导线上产生感应电流、电压, 或对半导体介质加热导致升温, 造成电路器件状态反常, 或使器件性能下降, 甚至半导体器件、微波器件被损伤、被烧毁等, 从而破坏军用电子系统的正常功能。实际上由于效应目标的种类繁多, 结构、材料、原理等方面各不相同, 不同参数 HPM 与电子系统之间的相互作用机理是十分复杂的。更需要注意的是由于电子系统的实际功能或作战场景差异, 在不同条件下相同的 HPM 参数对相同的电子系统的威胁等级可能并不一定相同, 且之间的状态并不分明。如何客观、有效地对电子学系统在 HPM 环境下进行威胁等级评估国内外均尚未有统一标准, 仍是亟待解决的问题。

1 传统 HPM 效应评估

在国外 HPM 效应评估的研究方面, 美、俄、瑞典等国家开展的工作较多, 相关研究人员主要把目光放到了概率论统计的方法上^[1-5], 即使用生存概率或者失效概率的概念来评估电子系统的 HPM 威胁和加固需求, 这本质上是由于 HPM 效应评估过程中的不确定性所导致的。因此对于 HPM 效应的概率论分析方法被广泛接受, 学者们都认同了用作用概率曲线或失效概率曲线来描述电子学目标的 HPM 效应。因此可以说, 国内外通常的 HPM 效应评估实际上是评估电子系统对 HPM 的敏感性, 即“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”^[6]，它建立在对实验数据的获取和有效的拟合、分析、预测之上，最终成果形式是作用概率曲线或失效概率曲线。这个结果能够明确 HPM 技术的发展需求和发展方向，有的放矢地开展 HPM 武器设计和研制，同时也是开展高功率微波的防护和加固研究工作的基础，但却不能直接指导对某一电子学系统的威胁等级的评估。

随着 HPM 武器实战化的现实及其潜在威胁的日益加深，需要在传统的效应数据概率统计的基础上更进一步，即有针对性地进行威胁等级评估，把抽象的概率数据曲线和数据表格处理为能够直接辅助决策的等级分级。这种威胁等级评估有利于在实际操作中合理地分配战场资源，进行科学的攻防决策，一方面在面对诸多攻击目标的前提下对其进行攻击顺序优选；另一方面可以对我军战场电子装备进行 HPM 威胁等级评估，发现薄弱环节并进行相应的布置和提前防护，既能更好地保护自己，又能有效地打击敌人。

2 模糊决策科学在威胁等级评估中应用的必要性

正如前文介绍，基于其实际功能和作战场景的差异，在不同条件下相同的 HPM 参数对相同电子系统的威胁等级并不一定相同，且之间的状态不分明。对其进行威胁等级评估是一个复杂且不确定的概念。这些问题的解决应与传统从随机性角度(概率统计分析)考虑不确定性的问题解决思路有所差异。因为威胁性评价的核心问题不在于事件的发生与否，而在于事件本身的状态不很分明，在不同的条件下，不同的人观察会有不同的感觉，从而得出不同的结论。如在实际生活中“高与矮”、“美与丑”等没有确切界限的一些对立概念，这些概念都被称为模糊概念。可以说，人们在从事社会实践、科学实践与生产斗争的活动中，大脑形成的概念往往都是模糊概念，其外延是不清晰的，具有亦此亦彼性。其主要特性之一就是不服从数学上的排中律，即它不是非此即彼，可以亦此亦彼，存在许多甚至无穷多的中间状态^[7]。可以说，模糊不确定性是绝对的，而精确(或清晰性)是相对的，是对模糊性的一种抽象与简化^[8]。因此，结合了模糊数学和模糊集理论的模糊决策科学，可能是目前解决电子学系统 HPM 威胁等级评估的一个可行思路。

3 模糊决策科学

3.1 产生和发展

传统的决策论是 1944 年以 J Von Neumann 与 O Morgenstern 的著作“Theory of Games and Economic Behavior”为标志正式诞生的，随着模糊数学和模糊集理论的应用，模糊多准则决策(FMCDM)已经形成了一个较为成熟的理论体系。其中“准则”的概念，是决策事物或现象有效性的某种度量，是事物或现象评价的基础，它在实际问题中有 2 种基本的表现形式，即属性与目标。从而 FMCDM 的研究领域可以划分为模糊多属性决策(FMADM)和模糊多目标决策(FMODM)2 个主要部分。

其中，FMADM 中的属性是伴随着决策事物或现象的某些特点、性质或效能，如汽车的最高时速，HPM 参数指标的数值等，每一种属性应该能提供某种测量其水平高低的方法。FMADM 的特征表现为决策空间是离散的，决策方案是有限的和已知的，且约束条件被隐含于准则之中，不直接起限制作用。这与电子学系统 HPM 威胁等级评估分析的需求一致，即结合效应实验现象、相关效应数据库和效应机理认识，从给定的有限 HPM 参数属性(如载波频率、脉冲重复频率等)组合中，决策出对电子学系统的最大威胁参数组合，并进行威胁等级排序。而 FMODM 中的目标是决策者对决策事物或现象的某种追求，不是威胁等级评估分析的重点，故不做后续讨论。

3.2 FMADM 的基本模型

与经典多属性决策相类似，FMADM 的基本模型可以描述为：给定一个方案集 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ ，与相应于每个方案的属性集 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ (如 C_1 代表脉冲宽度， C_2 代表载波频率等)，以说明每种属性相对重要程度的权集 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 。其中，关于属性指标和权值大小的表示方式可以是数字的，也可以是语言的；涉及的数据结构可以是精确的，也可以是不精确的。而所有语言的或不精确的属性指标、权值大小和数据结构等参数，在 FMADM 中都被相应地表示成决策空间中的模糊子集或模糊数。

最终其决策矩阵 $\tilde{F}$ 可以写为：

$$\mu_{\tilde{u}_1}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.6845 \\ \alpha, & 0.6845 \leq x \leq 0.8573 \\ 1, & 0.8573 \leq x \leq 0.9258 \\ \beta, & 0.9258 \leq x \leq 1.0554 \\ 0, & x \geq 1.0554 \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\tilde{f}_{mn}$ 为不同方案在不同属性下的模糊数,称为模糊指标值,而矩阵的每一行则对应了一个方案的模糊效用值,而后采用广义模糊合成算子对模糊权重矢量 $\tilde{\mathbf{w}}$ 和决策矩阵 $\tilde{\mathbf{F}}$ 实行变换,得到模糊决策矢量 $\tilde{\mathbf{D}}$:

$$\tilde{\mathbf{D}} = \tilde{\mathbf{w}} \odot \tilde{\mathbf{F}} = (\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_m) \quad (2)$$

采用适当的模糊集排序方法(后续会有介绍)对模糊决策矢量的元素 $\tilde{d}_1, \tilde{d}_2, \dots, \tilde{d}_m$ 进行比较,选出 $\tilde{A}_1, \tilde{A}_2, \dots, \tilde{A}_m$ 中的最优方案(记为 $A_{\max}$)并依此排序。

显然, FMADM 程序在实际使用时通常被分解为 3 个部分:

1) 确定表征了各属性对于最终目标影响重要程度的模糊权值 $\tilde{w}_n$, 构建模糊权重矢量 $\tilde{\mathbf{w}}$, 以及不同方案 A_m 对各属性 C_n 的模糊指标值 $\tilde{f}_{mn}$, 形成决策矩阵 $\tilde{\mathbf{F}}$;

2) 选择适当的模糊算子将二者结合成为代表方案价值的模糊效用值, 也就是上述的模糊决策矢量 $\tilde{\mathbf{D}}$;

3) 最终运用模糊集排序方法决策方案优劣。

需要注意的是, FMADM 程序 3 个部分的完成方法并不唯一, 方法之间各有优劣, 应该根据实际情况选使用。

3.3 层次分析法(AHP)

AHP 是匹兹堡大学 Thomas L Satty 教授于 20 世纪 70 年代初提出的一种实用的多准则决策方法, 它把一个复杂的决策问题表示为一个有序的递阶层次结构, 并通过人们的主观判断和科学计算给出备选方案的优劣顺序。虽然它对于很多模糊决策模型来说并非完全适用, 但它的一些思维方式和部分数学方法还是值得借鉴的。故 AHP 越来越多地以一种辅助决策工具的形式出现, 通过与其他方法的有机结合来取得较好的适用效果, 比如可以用于模糊集合中的隶属程度评价、层次化待分析的问题等。AHP 处理问题的基本步骤一般可分为 6 步: 明确问题, 建立层次结构; 按两两比较原则构造判断矩阵; 层次单排序; 层次总排序; 一致性检验; 计算各层元素对系统目标合成重要度, 进行总排序。

在威胁等级评估过程中, AHP 主要用于建立初始的层次结构, 以便确定模糊评价的方案级和属性级。此外, AHP 常用的两两比较原则也可以借鉴参考。

4 评估实例

4.1 评估对象

随机选择 4 组典型电子设备的 HPM 辐照效应实验数据, 作为 4 组实验方案(A_1, A_2, A_3, A_4)。使用结合了 AHP 方法的 FMADM 进行决策分析, 对各方案的威胁等级进行排序, 并与实际效应实验结果进行比对。

4.2 建立结构模型

如图 1 所示, 借鉴 AHP 的递阶层次构造方法, 建立分析问题的层次结构模型。模型中需要解决的问题是“某电子设备 HPM 威胁等级判别”; 评价基准的属性值为“载频威胁”、“脉宽威胁”、“重频威胁”、“峰值功率威胁”和“工作状态威胁”; 而 A_1, A_2, A_3, A_4 则代表了 4 种“方案”。4 种待评估方案的具体参数如表 1 所示, 由于各方案的“工作状态威胁”属性值一致, 均为“设备正常工作”, 没有评估的必要, 故在实际评估过程中不做考虑。

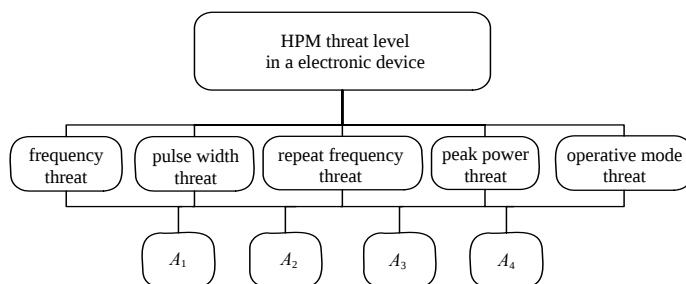


Fig.1 Threat level discrimination model of electronics system in the HPM environment

图 1 电子学系统 HPM 的威胁等级判别模型

表 1 四种“方案”
Table1 Four kinds of solutions

	frequency threat/GHz C_1	pulse width threat/ns C_2	repeat freq threat/Hz C_3	peak power threat/(W·cm ⁻²) C_4	operative mode threat C_5
A_1	2.88	100	20	6	device work properly
A_2	2.88	20	10	5	device work properly
A_3	1.31	100	100	100	device work properly
A_4	5.31	100	100	50	device work properly

表 2 求解 $\tilde{w}$ 的模糊互逆矩阵
Table2 Fuzzy inverse matrices for solving $\tilde{w}$

	frequency threat C_1	pulse width threat C_2	repeat freq threat C_3	peak power threat C_4
C_1	(1,1,1,1)	(9,9,9,9)	(9,9,9,9)	(7,8,8,9)
C_2	(1/9, 1/9, 1/9, 1/9)	(1,1,1,1)	(3,4,4,5)	(1/8, 1/7, 1/7, 1/6)
C_3	(1/9, 1/9, 1/9, 1/9)	(1/5, 1/4, 1/4, 1/3)	(1,1,1,1)	(1/8, 1/7, 1/7, 1/6)

4.3 计算模糊权重矢量

采用 Satty 教授提出的 9 级比例标尺^[9]作为评价尺度, 通过两两比较法构建求解 $\tilde{w}$ 的模糊互逆矩阵, 具体取值依据不在此赘述, 结果如表 2 所示, 具体模糊权重矢量计算矩阵如式(3)所示。

$$\tilde{P} = \begin{bmatrix} (1,1,1,1) & (9,9,9,9) & (9,9,9,9) & (7,8,8,9) \\ (1/9, 1/9, 1/9, 1/9) & (1,1,1,1) & (3,4,4,5) & (1/8, 1/7, 1/7, 1/6) \\ (1/9, 1/9, 1/9, 1/9) & (1/5, 1/4, 1/4, 1/3) & (1,1,1,1) & (1/8, 1/7, 1/7, 1/6) \\ (1/9, 1/8, 1/8, 1/7) & (6,7,7,8) & (6,7,7,8) & (1,1,1,1) \end{bmatrix} \quad (3)$$

定义矩阵 $\tilde{P}$ 中的每一项模糊数 $\tilde{P}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij})$, 其中 $i \neq j$, 有以下公式:

$$a_i = \left[\prod_{j=1}^4 a_{ij} \right]^{1/4}, a = \sum_{i=1}^4 a_i \quad (4)$$

$$b_i = \left[\prod_{j=1}^4 b_{ij} \right]^{1/4}, b = \sum_{i=1}^4 b_i \quad (5)$$

$$c_i = \left[\prod_{j=1}^4 c_{ij} \right]^{1/4}, c = \sum_{i=1}^4 c_i \quad (6)$$

$$d_i = \left[\prod_{j=1}^4 d_{ij} \right]^{1/4}, d = \sum_{i=1}^4 d_i \quad (7)$$

$$\tilde{w}_i = \left(\frac{a_i}{d}, \frac{b_i}{c}, \frac{c_i}{b}, \frac{d_i}{a} \right), i = 1, 2, 3, 4 \quad (8)$$

式中 $\tilde{w}_i$ 为各属性的模糊权重矢量, 表征了各属性之间的相对重要程度, 最终结果如表 3、表 4 所示。

表 3 相关参数求解

Table3 Calculated results of relevant parameters

a_1	a_2	a_3	a_4	a
4.879 7	0.451 8	0.229 6	1.414 2	6.975 3
b_1	b_2	b_3	b_4	b
5.045 3	0.502 0	0.251 0	1.573 2	7.371 5
c_1	c_2	c_3	c_4	c
5.045 4	0.502 0	0.251 0	1.573 2	7.371 5
d_1	d_2	d_3	d_4	d
5.196 2	0.551 6	0.280 3	1.738 9	7.767 0

表 4 各属性模糊权重矢量求解

Table3 The solutions of each attribute fuzzy weighted vector

fuzzy weighted vector of various properties $\tilde{w} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \tilde{w}_3, \tilde{w}_4)$	
fuzzy number of frequency threat	$\tilde{w}_1 = (0.628\ 3, 0.684\ 4, 0.684\ 4, 0.744\ 9)$
fuzzy number of pulse width threat	$\tilde{w}_2 = (0.058\ 2, 0.068\ 1, 0.068\ 1, 0.079\ 1)$
fuzzy number of repeat frequency threat	$\tilde{w}_3 = (0.029\ 6, 0.034\ 0, 0.034\ 0, 0.040\ 2)$
fuzzy number of peak power threat	$\tilde{w}_4 = (0.182\ 1, 0.213\ 4, 0.213\ 4, 0.249\ 3)$

4.4 确定模糊指标值 $\tilde{f}_{mn}$ 构建决策矩阵 $\tilde{F}$

结合 HPM 效应数据库和实验前的系统分析, 可以对常见的 HPM 参数进行属性层参数的模糊化处理, 确定各模糊指标值 $\tilde{f}_{mn}$, 最终构建的决策矩阵如式(9)所示。

$$\tilde{F} = \begin{bmatrix} (0.8, 0.9, 1, 1) & (0.95, 1, 1, 1) & (0.1, 0.2, 0.2, 0.5) & (0.68, 0.78, 0.78, 0.88) \\ (0.8, 0.9, 1, 1) & (0.15, 0.2, 0.2, 0.25) & (0, 0.1, 0.1, 0.2) & (0.68, 0.78, 0.78, 0.88) \\ (0.2, 0.4, 0.6, 0.8) & (0.95, 1, 1, 1) & (0.9, 1, 1, 1) & (0.9, 1, 1, 1) \\ (0, 0, 0, 0.2) & (0.95, 1, 1, 1) & (0.9, 1, 1, 1) & (0.9, 1, 1, 1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

4.5 构建模糊决策矢量 $\tilde{D}$

模糊决策矢量由各方案的模糊效应函数值构成,对于方案1的模糊效用函数值 $\tilde{u}_1$ 有:

$$\tilde{u}_1 = (\tilde{w}_1 \times \tilde{f}_{11}) + (\tilde{w}_2 \times \tilde{f}_{12}) + (\tilde{w}_3 \times \tilde{f}_{13}) + (\tilde{w}_4 \times \tilde{f}_{14}) \quad (10)$$

计算得: $\tilde{u}_1 = (0.6845[0.0097, 0.1629], 0.8573, 0.9258, 1.0554[0.0042, -0.1339])$, 同理有: $\tilde{u}_2 = (0.6350[0.0097, 0.1546], 0.7994, 0.8679, 0.9921[0.0048, -0.1290])$, $\tilde{u}_3 = (0.3175[0.0153, 0.2025], 0.5893, 0.7261, 0.9645[0.0121, -0.2505])$, $\tilde{u}_4 = (0.2458[0.0041, 0.0656], 0.3155, 0.3155, 0.5176[0.0121, -0.2142])$, 则最终的模糊决策矢量 $\tilde{D} = (\tilde{u}_1, \tilde{u}_2, \tilde{u}_3, \tilde{u}_4)$ 。

4.6 排序决策

针对模糊决策矢量中的4个模糊数进行比较排序,即可获得4种给定HPM参数对某一电子系统的威胁等级排序。

如对于模糊数 $\tilde{u}_1$, 其隶属函数为:

$$\mu_{\tilde{u}_1}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0.6845 \\ \alpha, & 0.6845 \leq x \leq 0.8573 \\ 1, & 0.8573 \leq x \leq 0.9258 \\ \beta, & 0.9258 \leq x \leq 1.0554 \\ 0, & x \geq 1.0554 \end{cases} \quad (11)$$

式中

$$x = \begin{cases} 0.0097\alpha^2 + 0.1629\alpha + 0.6845, & 0.6845 \leq x \leq 0.8573 \\ 0.0042\beta^2 - 0.1339\beta + 1.0554, & 0.9258 \leq x \leq 1.0554 \end{cases}。$$

其他模糊数的算法一致,如图2所示,最终可以根据各隶属函数得到对应的隶属函数曲线。

显然,从图2中即可看出,4个方案的威胁等级评价结果为: $A_1 > A_2 > A_3 > A_4$, 这个结论与试验结果是一致的。但需要注意的是,在这里并没有应用完整的模糊集排序方法对模糊决策矢量中的各模糊效用函数值进行排序,这是因为待评价的4个方案通过隶属函数曲线可以从图形上比较清晰地辨别各方案之间的差别。当隶属函数曲线较为接近时,应考虑使用模糊数学中的模糊集排序方法对近似曲线进行进一步判别,这里不再赘述。

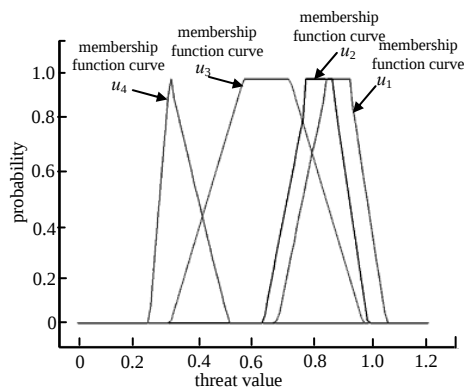


Fig.2 Subjective function curves of fuzzy performance value for four solutions
图2 4个方案的模糊效用值的隶属函数曲线

5 结论

电子学系统HPM威胁等级评估是一个复杂而模糊的概念,以FMADM为基础辅以AHP的相关理论,是进行威胁等级评估一个可行的思路,但这中间不可避免还存在一些问题,例如:

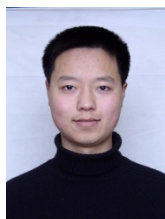
- 1) 为了计算的便捷可行,参数模糊化时使用了特殊的梯形模糊数(三角形模糊数)代替了普通的模糊集;
- 2) 利用AHP方法辅助建立分析问题的层次结构模型的完整性;
- 3) HPM各属性参数(如脉宽、重频等)根据实际情况进行模糊取值时,不可避免地会有条件限制和近似处理,处理方法的合理性还有待探讨。

模糊决策理论本身仍不完善,还在发展改进的过程之中,故本论文提出的FMADM流程思路并不唯一,各步骤的操作方法也不唯一,很多时候都是针对某一种情况或通常情况进行优选,而不是普适。通过文献资料调研,发现对于实际的决策应用,国内研究人员基本以经典决策理论为主,对于模糊综合评判涉猎不深,且一些对于模糊综合评判和FMCDM的文章讨论的内容仍没有脱出经典决策的范畴。如采用专家调查法确定各属性相对重要性时,很多文献仍然假定每一位专家能够明确给出各属性的相对重要程度,或直接平均得到所谓的模糊权集,而实际上这样的方法与经典方法并没有本质区别。当然本文所建议的方法也只是在传统经典方法上针对模糊性做了一些有益的思考,希望能起到抛砖引玉的作用供感兴趣的研究人员借鉴探讨。

参考文献:

- [1] BEVENSEE R M, CABAYAN H S, DEADRICK F J, et al. Probabilistic approach to EMP assessment[Z]. California Univ & Lawrence Livermore National Lab, 1980.
- [2] CABAYAN H S. Workshop on models to estimate military system probability of effect due to incident radio frequency energy[Z]. Volume 1: Findings and Recommendations, 1988.
- [3] MENSING R W, KING R J, CABAYAN H S. A method for estimating the susceptibility of electronic systems to HPM[Z]. Lawrence Livermore National Lab, 1988.
- [4] RICHARD W Mensing. A probabilistic method for estimating system susceptibility to HPM[Z]. Lawrence Livermore National Lab, 1989.
- [5] NANCY J Chesser. Methodology guidelines for High Power Microwave(HPM) susceptibility assessments[Z]. Office of the Secretary of Defense, 1990.
- [6] MENSING R W, KING J, CABAYAN H S. A method for estimating the susceptibility of electronic system to HPM[Z]. Lawrence Livermore National Lab, 1988.
- [7] 李荣钧. 模糊多准则决策理论与运用[M]. 北京:科学出版社, 2002. (LI Rongjun. Fuzzy multiple criteria decision making theory and application[M]. Beijing: Science Press, 2002.)
- [8] 李登峰. 模糊多目标多人决策与对策[M]. 北京:国防工业出版社, 2003. (LI Dengfeng. Fuzzy Multiobjective Many-Person Decision Making and Games[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2003.)
- [9] SAATY. The Hierarchon: A dictionary of Hierarchies[M]. Pittsburg: RWS Publications, 1996.

作者简介:



林江川(1984-), 男, 四川省绵阳市人, 在读博士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为 HPM 效应. email: 18801056@qq.com.

闫二艳(1978-), 女, 河南省焦作市人, 副研究员, 主要研究方向为高功率微波效应机理、低温等离子体.

钟龙权(1985-), 男, 四川省中江县人, 助理研究员, 主要研究方向为效应实验技术、测量技术.

(上接第 252 页)

- [5] 余舜京, 程艳青, 钱炜祺. 跨声速气动参数在线辨识方法研究[J]. 宇航学报, 2011, 32(6): 1211-1216. (YU Shunjing, CHENG Yanqing, QIAN Weiqi. Research on Transonic Aerodynamic Parameter Online Identification[J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(6): 1211-1216.)
- [6] 李正楠, 汪沛. 基于 UKF、EKF 飞行器气动参数辨识方法比较研究[J]. 中国测试, 2013, 39(5): 102-106. (LI Zhengnan, WANG Pei. Comparative study on aerodynamic parameter identification methods based on UKF, EKF[J]. China Measurement & Test, 2013, 39(5): 102-106.)
- [7] LI Meng, LIU Li, Veres S M. Aerodynamic parameter estimation of an Unmanned Aerial Vehicle based on Extended Kalman Filter and its higher order approach[C]// International Conference on Advanced Computer Control. 2010: 526-531.
- [8] KOEHL A, BOUTAYEB M, RAFARALAHY H, et al. Wind-disturbance and aerodynamic parameter estimation of an experimental launched micro air vehicle using an EKF-like observer[C]// IEEE Conference on Decision and Control. 2010: 6383-6388.

作者简介:



彭蜀君(1988-), 女, 四川省绵阳市人, 硕士, 助理研究员, 从事导航与制导控制工作. email: 659481047@qq.com.

祝刚(1977-), 男, 四川省宜宾市人, 硕士, 副研究员, 从事导航与制导控制工作, 在公开刊物和国内外学术会议发表论文多篇.