

无人机复杂气象威胁建模及评估方法

吴忠杰*, 张耀中, 王 强

(西北工业大学 电子信息学院 西安 710129)

(* 通信作者电子邮箱 winksdriver@126.com)

摘 要: 为评价无人机执行任务时气象因素的威胁程度, 在建立气象评价指标体系和量化各种气象等级基础上, 提出一种基于威胁强度的多级模糊综合评判方法。该方法改进了两级权重确定模型和综合评估模型, 并经过计算得到综合威胁指数。通过实例验证, 结果表明该方法能够准确评估气象对无人机的威胁程度, 与传统模糊评判方法和 BP 评估方法相比, 具有速度更快、误差更小和复杂度更低的特点, 提高了评估效率和有效性。

关键词: 气象; 威胁建模; 模糊评价; 无人机; BP 神经网络

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Threat modeling and assessment of unmanned aerial vehicle under complicated meteorological conditions

WU Zhongjie*, ZHANG Yaozhong, WANG Qiang

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an Shaanxi 710129, China)

Abstract: To study the effect of meteorological conditions on Unmanned Aerial Vehicle (UAV), an algorithm of multi-level fuzzy comprehensive evaluation method based on threat value was proposed. This algorithm improved a two-level weight value determination and the comprehensive evaluation model, which can get the comprehensive threat index after being calculated. The simulation results show that this algorithm can assess the degree of weather threat accurately and have faster operation speed, smaller error and lower complexity. The efficiency and validity have also been improved.

Key words: weather; threat modeling; fuzzy comprehensive evaluation; Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Back-Propagation (BP) neural network

0 引言

气象条件对无人机执行侦察、作战和自主决策^[1]等任务至关重要。无人机在科索沃、阿富汗和伊拉克的作战效果表明, 现有无人机很难在包括风切变、雷暴、沙尘和雨雪等气象条件下执行任务。因此, 研究气象威胁对无人机飞行时避免和减少损失以及规划较为安全的航路^[2]有重要意义。

影响无人机飞行安全的气象因素复杂多变且存在相互作用, 其模糊性和不确定性很大, 因此, 很难用函数方程准确描述威胁程度与气象因素之间的关系^[3]。国外对气象威胁程度的评估通常借助于有人机气象评估方法^[4], 通过利用机载气象雷达和机场探测系统提供的信息来评估气象威胁程度。有的也用工程化数学模型^[5]来近似, 但是该模型本身需要很多适用条件而且近似效果不好, 因此有很大的局限性。而国内对气象威胁评估主要采用贝叶斯网络、模糊评判^[6]和 BP (Back-Propagation) 神经网络等。文献[7-8]用贝叶斯网络推理方法对气象威胁度进行建模和评估, 但这种方法需要大量先验概率, 而且方法容易受到主观影响; 文献[3-9]利用 BP 神经网络算法建立气象威胁模型, 并对气象威胁度进行仿真, 但它存在误差较大、收敛速度慢、泛化能力弱、易陷入局部收敛等缺点。

本文在建立气象评价指标体系基础上, 提出了基于威胁强度的多级模糊综合评判方法, 利用隶属度函数将边界不清、不易量化的气象因素定量化, 改进了两级权重数学模型和综合评估模型, 并对多种气象进行威胁指数评估, 最后通过比较传统模糊综合评价^[10-11]、BP 神经网络、极大似然等算法, 分析了改进模型对气象威胁程度评估的有效性和优越性。

1 气象条件特性分析

影响无人机飞行安全的气象条件众多, 为研究方便, 本文将它们划分为损伤性天气因素和能见度性天气因素^[12-13]两类。

1.1 损伤性天气因素

损伤性天气因素是指能够对无人机成功执行任务起破坏作用或使无人机平台上部件无法正常工作的气象, 它主要包括风切变、雷暴、颠簸、风、温度、结冰、云、雨和风沙等。它们不仅能使发动机的推力和空气动力性能改变, 还能影响无人机的空速、流线型、平衡和操纵、跟踪、瞄准与射击等, 严重时甚至能使飞机坠毁。

1.2 能见度性天气因素

能见度性天气因素是指能够影响无人机上探测传感器视程和效果的因素, 包括雨、雪、烟雾和风沙。如果地面能见度

收稿日期: 2012-10-25; 修回日期: 2012-11-24。 基金项目: 航空科学基金资助项目(2011ZC53024)。

作者简介: 吴忠杰(1986-), 男, 四川绵阳人, 硕士研究生, 主要研究方向: 无人飞行器任务规划、复杂系统建模; 张耀中(1974-), 男, 河南舞阳人, 副教授, 博士, 主要研究方向: 先进火力指挥控制原理、复杂系统建模、智能化指挥与控制工程; 王强(1984-), 男, 湖北宜昌人, 博士研究生, 主要研究方向: 无人飞行器任务规划、复杂系统建模。

不佳,降落时还会直接影响安全着陆,处理不好,会危及飞行安全;如果航线或目标区的能见度不高,还会影响地标的航行、空投、照相和视察等活动。

1.3 气象评价指标体系

气象条件的评价原则是要求能够真实地反映无人机所处区域或评测区域的气象情况。目前,不同的学者对气象评价指标体系有各自的看法。这里给出一种比较全面、包含大部分气象因素的指标体系,如图1。

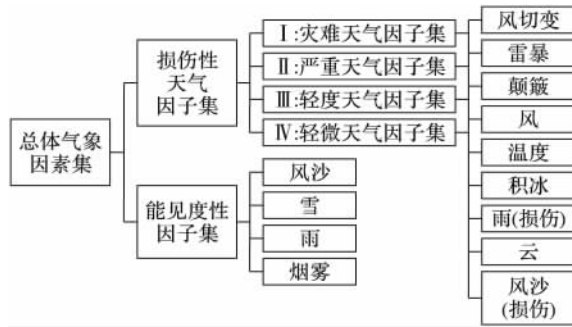


图1 气象评价指标体系

2 气象条件威胁评估模型

2.1 威胁等级综合评判方法

多级模糊综合评判法能够将边界不清、不易量化的气象因素定量化,却只适应于权重分配比较均匀的情况,而对不同强度对应不同权重的气象条件的评价效果较差,因此提出一种先将各种气象实测值按威胁等级划分归类,再进行综合评判的方法。

2.1.1 建立评价空间

V 为评价集。根据文献[14-15]与 GJB900-90 标准,本文按照不同危险程度的各种气象因子对无人机的影响,将气象威胁强度分为 I、II、III、IV 等 4 个等级。其中: I 表示灾难型,是指系统报废; II 表示严重型,是指系统严重损坏; III 表示轻度型,是指系统轻度损坏; IV 表示轻微型,是指轻于 III 级的损伤。表 1 所示为气象因素不同等级对应的限值。

表1 气象因素分级

因子	IV	III	II	I
风切变/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2	4	6	8
雷暴	0.4	0.6	0.8	0.9
颠簸/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	6.1	10.7	15.2	>15.2
风/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	2.5	6.7	9.4	12.3
温度	0.2	0.5	0.7	0.9
结冰/cm	5	15	30	>30
雨损伤/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	2.5	8	16	>16
云	0.1	0.3	0.5	0.8
风沙损伤	0.3	0.5	0.7	0.9
雨/m	2000	500	200	<100
雪/m	1000	500	200	<100
烟雾/m	10000	1000	500	<100
风沙/m	10000	1000	500	<100

注:无单位数据表示已转化到[0,1]的威胁指数;雨、雪、烟雾、风沙数据指的是它们的能见距离。

U 为因素集。设气象因素集为 U , u_1, u_2, \dots, u_n 表示各种天气因素。

2.1.2 隶属度函数

气象威胁程度需要对每个元素 w_i 进行单因素评判。假设 w_i 为第 i 种因子的气象实测值, s_{ij} 为第 i 种因子的第 j 级限值,则:

1) 当 $j = 1$ 时:

$$R_{i1}(w_i) = \begin{cases} 1, & s_{i1} < w_i \\ (w_i - s_{i1}) / (s_{i2} - s_{i1}), & s_{i1} \leq w_i \leq s_{i2} \\ 0, & s_{i2} < w_i \end{cases} \quad (1)$$

2) 当 $1 < j < 4$ 时:

$$R_{ij}(w_i) = \begin{cases} 1, & w_i < s_{ij-1} \\ (w_i - s_{ij-1}) / (s_{ij} - s_{ij-1}), & s_{ij-1} \leq w_i \leq s_{ij} \\ (w_i - s_{ij+1}) / (s_{ij+1} - s_{ij}), & s_{ij} < w_i \leq s_{ij+1} \end{cases} \quad (2)$$

3) 当 $j = 4$ 时:

$$R_{i4}(w_i) = \begin{cases} 0, & w_i < s_{i3} \\ (w_i - s_{i3}) / (s_{i4} - s_{i3}), & s_{i3} \leq w_i \leq s_{i4} \\ 1, & s_{i4} < w_i \end{cases} \quad (3)$$

2.1.3 权重确定

1) 一级单因素权重计算。

设 $U_i = \{u_1^{(i)}, u_2^{(i)}, \dots, u_{n1}^{(i)}\}$ 的权重为 $A_i = (a_1^{(i)}, a_2^{(i)}, \dots, a_{n1}^{(i)})$, 则:

$$\tilde{a}_k^{(i)} = u_i / \bar{s}_i, k \in (1, 2, \dots, n_1) \quad (4)$$

$$a_k^{(i)} = \tilde{a}_k^{(i)} / \sum_{i=1}^{n_1} \tilde{a}_k^{(i)} \quad (5)$$

其中: \bar{s}_i 表示气象因素的均值, $a_k^{(i)}$ 表示归一化权重。由于表 1 存在两种不同的数值表示方法,因此 \bar{s}_i 的计算方式也不同。

对于有确定界限的因素,如风切变、雷暴、风、温度、云和风沙(损伤)等,可用算数平均法进行计算:

$$\bar{s}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n s_{ij} \quad (6)$$

对于没有确定界限的因素,如颠簸、结冰、雨(损伤)、雨、雪、烟雾和风沙等,可用三次曲线拟合方法先分别求出各因素对应函数表达式,再求出均值,设函数为:

$$y = \sum_{i=0}^3 \alpha_{i+1} x^{3-i}, x \in [1, 4] \quad (7)$$

$$\bar{s}_i = \int y dx / 3u_i \quad (8)$$

然后用界积运算模型将各等级因素综合,得到一级评价权值矩阵,即:

$$B'_k = \sum_{i=1}^n (a_k^i \oplus r_k^i) \quad (9)$$

$$\tilde{B}_j = [B'_1, \dots, B'_n]^T \quad (10)$$

2) 二级综合权重计算。

此处不用传统的取大取小运算模型,而是采用公式计数法对权重进行计算:

$$\omega'_i = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\max(\tilde{a}_k^{(i)}) + \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tilde{a}_k^{(i)} \right)^2 \right]} \quad (11)$$

$$\omega_i = \omega'_i / \sum_{i=1}^n \omega'_i \quad (12)$$

2.1.4 综合评价

对一级评价采用加权平均模糊合成方法 $M(\cdot, \oplus)$ [11] 以及评判分值法,对二级评价采用概率分析法。

1) 一级综合评价。

$$b_i = \sum_{j=1}^k (\omega_i \cdot b_{ij}); j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, 3 \quad (13)$$

评判分值:

$$V = \sum_{i=1}^n (i \cdot b_i); i \in (1, 2, 3, 4) \quad (14)$$

此处是将评判集 $V = \{IV、III、II、I\}$ 的4个不同天气的等级威胁强度简单量化,依次赋值为1、2、3和4,得到评判分值。

2) 二级综合评价。

由一级综合评价结论 V_i 组成二级综合评价模型。

$$E = 4 - 0.25 \times \prod_{i=1}^2 (4 - V_i) \quad (15)$$

其中: E 表示无人机受到的总的天气威胁, V_i 表示第 i 种因子集的评判分值。

2.2 传统模糊数学评价模型

传统模糊数学评价方法的一级评价采用取大取小方法^[11],即:

$$b_i = \bigvee_{j=1}^k (\omega_i \wedge r_{ij}); j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, 3 \quad (16)$$

二级评价采用加权平均模型和评判分值法,然后用隶属法获得综合威胁等级。

3 应用实例

无人机在飞行途中受到强度不一的各种气象条件,假设一次气象实测值为:风切变 $5.527 \text{ m/s} \cdot 30 \text{ m}^{-1}$,雷暴 0.612 ,颠簸 12.314 m/s ,风 12.131 m/s ,温度 0.453 ,结冰 8.569 cm ,雨损伤 4.507 mm/h ,云 0.534 ,风沙损伤 0.221 ,雨 700 m ,雪 2500 m ,烟雾 6500 m ,风沙 4400 m 。

3.1 评价空间

根据各因素的观测值和所属危险级别,先将气象因素 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_{13}\}$ 分为2组:

因素集: $U = \{U_1, U_2\}$,其中: U_1 为损伤性天气因子集; U_2 为能见度性天气因子集。

然后划分第二层次:

$U_1 = \{U'_{11}, U'_{12}, U'_{13}, U'_{14}\}$ 。其中: U'_{11} 为轻微天气因子集; U'_{12} 为轻度天气因子集; U'_{13} 为严重天气因子集; U'_{14} 为灾难天气因子集。

$U'_{11} = \{\text{温度、结冰、雨损伤、风沙损伤}\}$

$U'_{12} = \{\text{雷暴、颠簸、风切变}\}$

$U'_{13} = \{\text{风、云}\}$

$U'_{14} = \emptyset$

$U_2 = \{u_{10}, u_{11}, u_{12}, u_{13}\} = \{\text{雨、雪、烟雾、风沙}\}$

评判集: $V = \{I、II、III、IV\}$ 。

3.2 各因子隶属度及一级权重计算结果

根据隶属度函数和权重分配模型,容易得到各因素的隶属度和权重评判值,如表2。

3.3 综合评价

3.3.1 一级综合评价

根据式(13)可得一级评价权值矩阵:

$$B_1 = (0.097 \ 0.329 \ 0.323 \ 0.251)$$

$$B_2 = (0.387 \ 0.613 \ 0 \ 0)$$

根据式(14)可得损伤性天气因素和能见度性天气因素的评判分值:

$$V_1 = 0.097 \times 1 + 0.329 \times 2 + 0.323 \times 3 + 0.251 \times 4 = 2.729$$

$$V_2 = 0.387 \times 1 + 0.613 \times 2 = 1.613$$

3.3.2 二级综合评价

$$E = 3.24$$

属于第 II 等级,为严重天气类型。

表2 各因子隶属度及权重

因子集	因子	隶属度				检测值 c_i	权重 α'_i	归一化权重 α_i
		IV	III	II	I			
轻度天气因子集	温度	0.157	0.843	0	0	0.453	0.788	0.497
	结冰	0.643	0.357	0	0	8.569	0.367	0.229
	雨损伤	0.635	0.365	0	0	4.507	0.361	0.227
	风沙损伤	1	0	0	0	0.221	0.368	0.047
严重天气因子集	风切变	0	0.237	0.763	0	5.527	1.105	0.373
	雷暴	0	0.940	0.060	0	0.612	0.907	0.307
	颠簸	0	0.641	0.359	0	12.314	0.948	0.32
	风	0	0	0.058	0.942	12.131	1.583	0.558
能见度因子集	云	0	0	0.887	0.113	0.534	1.256	0.442
	雨	0.133	0.867	0	0	700	0.75	0.373
	雪	1.000	0	0	0	2500	0.16	0.079
	烟雾	0.611	0.389	0	0	6500	0.446	0.221
因子集	风沙	0.378	0.622	0	0	4400	0.659	0.327

3.4 传统模糊数学评价结果

3.4.1 一级综合评价

根据式(16)可得:

$$B'_1 = (0.06 \ 0.339 \ 0.351 \ 0.25)$$

$$B'_2 = (0.277 \ 0.723 \ 0 \ 0)$$

评判分值:

$$V'_1 = 0.06 \times 1 + 0.339 \times 2 + 0.351 \times 3 + 0.25 \times 4 = 2.791$$

$$V'_2 = 0.227 \times 1 + 0.723 \times 2 = 1.723$$

3.4.2 二级综合评价

$$E' = 3.312$$

属于第 II 等级,为严重天气类型。

3.5 几种评估方法的比较

3.5.1 评估方法及其应用

气象威胁评估方法有很多,除本文的模糊评判方法外,还有极大似然、神经网络和贝叶斯网络等。由于用极大似然法评估需要事先知道各因素的总体概率密度,因此在缺乏相关函数分布时,无法利用这种方法进行评估;而神经网络存在误差较大、收敛速度慢、泛化能力弱、易陷入局部收敛等缺点;贝叶斯网络评估具有需要大量先验概率、通过专家或查阅文献工作量较大等缺点。

以原始模型、改进模型和 BP 神经网络三种模型对气象威胁程度进行评估,并测得另一组气象变化值。假设多种气象条件发生变化后的值为:风切变(序号1) $2.157 \text{ m/s} \cdot 30 \text{ m}^{-1}$,雷暴(序号2) 0.462 ,颠簸(序号3) 7.141 m/s ,风(序号4) 9.334 m/s ,温度(序号5) 0.621 ,结冰(序号6) 25.679 cm ,雨损伤(序号7) 3.417 mm/h ,云(序号8) 0.202 ,风沙损伤(序号9) 0.071 ,雨(序号10) 1000 m ,雪(序号11) 400 m ,烟雾(序号12) 6500 m ,风沙(序号13) 6000 m 。按一级权重对比各因素数值变化前后的情况,如图2所示。

对两组数据进行气象威胁程度评估,其结果为原始模型:3.312和3.126;改进模型:3.24和3.115;BP模型:3.422和

2.948。三种模型评估对比结果如图3所示。

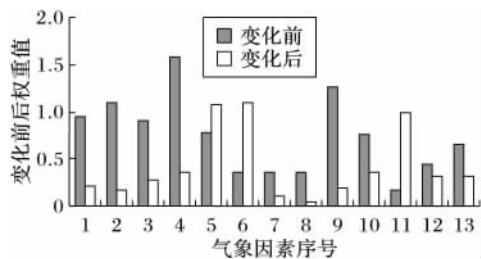


图2 各气象因素变化前后的权重对比值

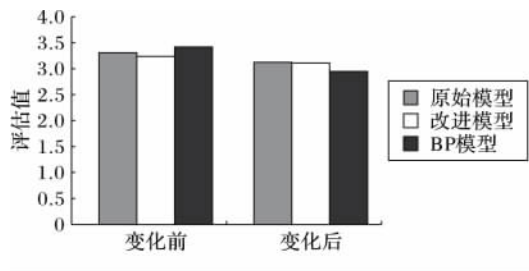


图3 评估结果

3.5.2 结果分析

由图2可知,变化前的气象条件中风切变、雷暴、颠簸、风、云的影响较大,而变化后的气象条件中温度、积冰和雨的影响较大。利用原始模型、改进模型和BP模型对两组数据进行分析,所得评估等级基本一致,为严重天气类型,但评估值却存在一定的差异。其原因在于原始模型采用取大取小算子过分突出了极值的作用,对小权重因素有忽略作用,丢掉了一些次要信息,导致评估结果偏大;而BP模型存在误差较大,两次测评或偏大,或偏小,尤其是对实例2评估时,评估结果仅为轻度天气;改进模型既考虑了小权重因素,又避免了较大误差。因此,改进模型的评价结果更为合理,更能反映气象对无人机飞行的实际威胁程度。

4 结语

从上述研究结果可以看出,基于威胁强度的多级模糊综合评判方法计算简单,复杂度小,不仅能够克服原始评判方法在权重模型上的缺点,而且减小了BP模型存在的误差,可以客观地反映气象威胁程度,这样评判所得的数据有助于无人

机自主决策和航迹重规划,从而使无人机能及时、有效地回避危险,避免遭受损伤或飞行事故。

参考文献:

- [1] 董卓宁,张汝麟,陈宗基. 无人机在恶劣条件下的自主决策技术[J]. 航空学报, 2008, 29(增刊): s107-s113.
- [2] NETO A A, MACHARET D, CAMPOS M. On the generation of trajectories for multiple UAVs in environments with obstacles[J]. Journal of Intelligent and Robotic System, 2010, 57(4): 123-141.
- [3] 王俊,周树道,叶松,等. 融合遗传算法与BP神经网络的气象威胁度建模与评估[J]. 电光与控制, 2012, 19(3): 74-77.
- [4] KROZEL J. Terminal area guidance incorporating heavy weather[C] // AIAA Guidance Navigation and Control Conference. New Orleans: AIAA, 1997: 413-420.
- [5] KROZEL J. Estimating time of arrival in heavy weather conditions[C] // AIAA Guidance Navigation and Control Conference. New Orleans: AIAA, 1999: 1481-1490.
- [6] 王新增,慈林林,李俊山,等. 恶劣气象条件对无人机飞行航迹的威胁评估[J]. 飞行力学, 2010, 28(5): 84-87.
- [7] 罗宇智,陈璟. 贝叶斯网络的气象威胁建模及评估方法研究[J]. 计算机仿真, 2008, 25(11): 52-55.
- [8] 朱国涛,周树道,吕波,等. 基于气象威胁的无人机航迹规划方法研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(6): 26-30.
- [9] 朱国涛,周树道,叶松,等. 基于BP神经网络的气象威胁度建模和评估方法研究[J]. 电光与控制, 2011, 18(3): 69-71.
- [10] 张征. 环境评价学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 155-191.
- [11] 许雪燕. 模糊综合评价模型的研究及应用[D]. 成都: 西南石油大学, 2011.
- [12] HUANG Q, HANESIAK J, SAVELYEV S, et al. Visibility during blowing snow events over Arctic Sea Ice[J]. Weather and Forecasting, 2008, 23: 741-751.
- [13] KIM K W, KIM Y J. Perceived visibility measurement using the HIS color difference method[J]. Journal of the Korean Physical Society, 2005, 46: 1243-1250.
- [14] 徐浩军,刘东亮,孟捷,等. 基于系统仿真的飞行安全评估理论与方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [15] 李春锦,文泾. 无人机系统的运行管理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

(上接第1178页)

- [4] TAN YUN-FU, LEI DU. Study on wavelet transform in the processing for ECG signals[C] // WCSE09: Proceedings of the 2009 WRI World Congress on Software Engineering. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 515-519.
- [5] KILBY J, GHOLAM HOSSEINI H. Wavelet analysis of surface electromyography signals[C] // Proceedings of the 26th Annual International Conference of the IEEE EMBS. Piscataway: IEEE Service Center, 2005, 1: 384-387.
- [6] EBRAHIMZADEH A, AZARBAD M. ECG compression using wavelet transform and three-level quantization[C] // 2010 6th International Conference on Digital Content, Multimedia Technology and its Applications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 2010: 250-254.
- [7] AVCI E, AKPOLAT Z H. Speech recognition using a wavelet packet adaptive network based fuzzy inference system[J]. Expert Systems with Applications, 2006, 31(3): 495-503.
- [8] 王鹏,陈民钊. 基于小波包变换的精神疲劳多参数脑电分析[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(30): 144-147.
- [9] 王桂莲,盖立平. 心电图导联及其电学问题的分析[J]. 医用物理, 2007, 20(3): 390-391.
- [10] YANG XIAO-LI, TANG JING-TIAN. Hilbert-Huang transform and wavelet transform for ECG detection[C] // WiCOM08: 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. Dalian: IEEE, 2008: 1-4.
- [11] 黄艳秋,蒲鹏. 基于能量熵对SVM的电路故障诊断[J]. 计算机仿真, 2011, 28(4): 199-202.
- [12] 贾伟宽,丁世飞. 基于Shannon熵的因子特征提取算法[J]. 模式识别与人工智能, 2011, 24(3): 327-331.
- [13] 赵舒,沙洪. 基于小波能量熵特征的阻抗胃动力信号识别[J]. 中国生物医学工程学报, 2011, 30(3): 321-327.
- [14] WANG DENG, MIAO DUOQIAN, XIE CHEN. Best basis-based wavelet packet entropy feature extraction and hierarchical EEG classification for epileptic detection[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(11): 14314-14320.