

8-3-2020

Guidance Simulation Credibility Evaluation Based on Clustering with Grey Cloud and Entropy Weight

Wang Fei

1. School of Information Engineering, He'nan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;;

Xiaogeng Liang

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

Guo Chao

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China;

Peipei Li

1. School of Information Engineering, He'nan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Guidance Simulation Credibility Evaluation Based on Clustering with Grey Cloud and Entropy Weight

Abstract

Abstract: Considering the problems of randomness and fuzziness in evaluating indexes from guidance simulation system, a novel grey clustering comprehensive evaluation model combined with center normal grey cloud whitening function and combination weighting function was presented. The comprehensive credibility evaluation index system for guidance simulation was built. *The subjective weight vector of indexes was established by weighting cloud model based on analytic hierarchy process, the objective weight vector of indexes was obtained by entropy weighting method based on the entropy and classified distinction of the normal grey cloud whitening function, then the comprehensive weight vector was acquired by fusing the subjective weights and objective weights with addition principle. The grey clustering results of evaluation objects were achieved by grey variable weight clustering theory.* A practical application example validates the effectiveness of the proposed method.

Keywords

credibility evaluation, grey cloud model, grey clustering, entropy weight

Recommended Citation

Wang Fei, Liang Xiaogeng, Guo Chao, Li Peipei. Guidance Simulation Credibility Evaluation Based on Clustering with Grey Cloud and Entropy Weight[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(8): 1703-1707.

灰云熵权聚类的制导仿真系统可信度评估

王斐¹, 梁晓庚², 郭超², 李佩佩¹

(1.河南科技大学 信息工程学院, 河南 洛阳 471003; 2.中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 针对制导仿真系统可信度评估中存在随机性和模糊性的问题, 提出了基于中心点正态灰云白化权函数模型和组合赋权模型的灰云聚类综合评价模型。构建了制导仿真系统可信度评估指标体系。通过基于层次分析法的指标权重云模型确定各指标的主观权重, 采用基于正态灰云白化权函数的信息熵和分类区分度的熵权法确定各指标的客观权重, 结合加法集成原理对二者融合得到综合权重。利用变权灰色聚类理论, 计算评价对象所属灰类的聚类结果。给出实例验证了方法有效性。

关键词: 可信度评估; 灰云模型; 灰色聚类; 熵权

中图分类号: TH 166

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2015) 08-1703-05

Guidance Simulation Credibility Evaluation Based on Clustering with Grey Cloud and Entropy Weight

Wang Fei¹, Liang Xiaogeng², Guo Chao², Li Peipei¹

(1. School of Information Engineering, He'nan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Considering the problems of randomness and fuzziness in evaluating indexes from guidance simulation system, a novel grey clustering comprehensive evaluation model combined with center normal grey cloud whitening function and combination weighting function was presented. The comprehensive credibility evaluation index system for guidance simulation was built. *The subjective weight vector of indexes was established by weighting cloud model based on analytic hierarchy process, the objective weight vector of indexes was obtained by entropy weighting method based on the entropy and classified distinction of the normal grey cloud whitening function, then the comprehensive weight vector was acquired by fusing the subjective weights and objective weights with addition principle. The grey clustering results of evaluation objects were achieved by grey variable weight clustering theory. A practical application example validates the effectiveness of the proposed method.*

Keywords: credibility evaluation; grey cloud model; grey clustering; entropy weight

引言

制导仿真系统通常为动态复杂不确定大系统, 对其进行可信度评估必须基于定性与定量综合分析, 从主观和客观两方面来开展^[1]。通常情况下,

可以采用定量方式的相似度检验方法或者定性与定量结合方式的模糊综合评判法进行评估。

模糊综合评判法相对比较成熟, 但隶属度函数一旦精确数值化表达后, 就失去了模糊性, 并且在确定隶属度函数的过程中, 主观因素影响较强, 随机性较弱, 这在一定程度上影响可信度评估结果的合理性。事实上, 在考虑评估结果等级判定时, 既有模糊性又有随机性。另外, 制导系统仿真中某些



收稿日期: 2015-01-18 修回日期: 2015-07-02;
基金项目: 航空科学基金 (20100196002);
作者简介: 王斐(1976-), 男, 洛阳人, 博士, 副教授, 研究方向为系统建模与仿真; 梁晓庚(1960-), 男, 孟州人, 研究员, 博导, 研究方向为飞行器控制; 郭超(1988-), 男, 驻马店人, 博士, 工程师, 研究方向为飞行器控制。

<http://www.china-simulation.com>

• 1703 •

数据数量非常有限,无法获取大量测试数据,这必然限制相似度检验方法的应用。

针对上述不足,本文采用基于“小样本”、“贫信息”的灰色聚类理论与综合考虑了模糊性和随机性的正态云模型理论,运用正态灰云模型表示评价信息的白化权,对其合理软化,有效解决综合评价中指标隶属度函数过于僵硬的问题。通过指标权重云模型得到各评价指标的主观权重,基于正态灰云白化权函数的信息熵和分类区分度建立指标熵权模型,得到各评价指标的客观权重,结合加法集成原理得到各评价指标的综合权重,避免通常方法采用均权处理导致无法充分利用评价指标信息的问题,构建灰云聚类模型评估制导仿真系统可信度。该模型能够综合考虑制导仿真系统评估过程中的灰性、模糊性、随机性,更符合实际系统,以某仿真系统为例,给出了具体应用。

1 灰云模型理论关键问题研究

为了弥补传统灰数白化函数的不足,使白化权函数能综合反映信息的的不完全性和随机性,本文将李德毅院士首创提出的云模型引入灰数白化过程,构造灰云模型,综合考虑制导武器仿真系统评估信息的不完全性、模糊性和随机性,提高仿真系统评估的可信度。

定义 1 设 U 是一个用精确数值表示的定量论域, C 是 U 上定性概念,对于论域 U 中任意一个定量元素 $x \in U$,且 x 是定性概念 C 的一次随机实现,都存在一个有稳定倾向的随机数 $\mu \in [0,1]$,称 μ 为 x 对 C 的隶属度,即

$$\mu:U \rightarrow [0,1], \forall x \in U \quad x \rightarrow \mu(x) \quad (1)$$

则 x 在论域 U 上的分布称为云,每一个 x 称为一个云滴,云的数字特征用期望值 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 表示^[2]。将云模型理论用到灰数白化过程可得到灰云模型。

定义 2 设 U 是一个论域 $U=\{x\}$, T 是与 U 相联系的语言值, U 中元素 x 对 T 所表达的灰概念的

白化权是一个具有稳定倾向的随机数, $U(x)=GL(x)$ 在 $[0,1]$ 中取值,记做:

$$U(x)=GL(x):U \rightarrow [0,1], \forall x \in U \quad x \rightarrow GL(x) \quad (2)$$

则白化权在论域上的分布称为白化权灰云^[3]。

灰云的数学特征采用峰值 C_x 、左右界值 L_x 与 R_x 、熵 E_n 、超熵 H_e 表示,记为 $GL(C_x, L_x, R_x, E_n, H_e)$ 。点峰值模型的峰值、熵及超熵分别为

$$C_x = \frac{L_x + R_x}{2} \quad (3)$$

$$E_n = \frac{R_x - L_x}{6} \quad (4)$$

$$H_e = \frac{E_n}{\alpha} \quad (5)$$

正态灰云模型的白化权函数如下:

$$NGL(x) = e^{-\frac{(x-C_x)^2}{2(E_n)^2}} \quad (6)$$

2 仿真可信度评估方法

2.1 中心点正态灰云白化权聚类评估模型

基于中心点三角白化权函数^[4]的灰色聚类模型可以消除两个以上灰类的多重交叉,并且满足规范性,易得到各个灰类的三角白化权函数,符合人类的认知评判习惯。本文将正态云模型和中心点三角白化权函数灰色聚类模型相结合,得到中心点正态灰云白化权函数聚类模型。

中心点正态灰云白化权函数聚类计算如下。

第 1 步:划分灰类并延拓

根据评估指标体系及要求确定待评估对象 i 需要划分的灰类数 s ,确定待评估对象各评估指标最属于灰类 $1,2,\dots,s$ 的点 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$ 作为该指标对应灰类的中心点,将各指标取值范围也相应的划分为 s 个灰类,分别以 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_s$ 作为各个灰类的代表。

将灰类向不同方向延拓,增加 0 灰类和 $s+1$ 灰类,并确定其中心点 λ_0, λ_{s+1} ,则灰类 $1,2,\dots,s$ 包含区间左右边界和中心点的参数分别为 $(\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2), (\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3), \dots, (\lambda_{k-1}, \lambda_k, \lambda_{k+1}), \dots, (\lambda_{s-1}, \lambda_s, \lambda_{s+1})$;

第 2 步:计算各灰类正态灰云白化权函数及白化权值

以第 k 个灰类参数 $(\lambda_{k-1}, \lambda_k, \lambda_{k+1})$ 的左边界点和中心点构建以 $(\lambda_k, 1)$ 为峰值点的上升沿单侧正态灰云模型, 以其右边界点和中心点构建以 $(\lambda_k, 1)$ 为峰值点的下降沿单侧正态灰云模型, 得到指标 j 关于灰类 k 的正态灰云白化权函数 $f_j^k(\bullet)$, 其中 $j=1,2,\dots,m; k=1,2,\dots,s$ 。

根据 $f_j^k(\bullet)$ 可以计算出指标 j 各灰类的白化权, 取多次计算得到的白化权的平均值作为最终的白化权值 $f_j^k(x_{ij})$, 易知 $0 \leq f_j^k(x_{ij}) \leq 1$, 其中 $i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m; k=1,2,\dots,s$ 。

由于正态灰云白化权的随机性和主观性, 不一定有 $\sum_{k=1}^s f_j^k(x_{ij})=1$ 成立, 故定义样本观测值 x_{ij} 使对象 i 隶属于灰类 k 的归一化隶属度函数如下:

$$\mu_j^k(x_{ij}) = \frac{f_j^k(x_{ij})}{\sum_{k=1}^s f_j^k(x_{ij})} \quad (7)$$

第 3 步: 计算综合聚类系数

对象 $i (i=1,2,\dots,n)$ 关于灰类 $k (k=1,2,\dots,s)$ 的综合聚类系数 σ_i^k 如下:

$$\sigma_i^k = \sum_{j=1}^m u_j^k(x_{ij}) \cdot w_{ij} \quad (8)$$

其中: w_{ij} 为指标 j 关于对象 i 的分类权重;

第 4 步: 计算仿真对象所属灰类

对象 i 的综合聚类系数向量为

$$\sigma_i = (\sigma_i^1, \sigma_i^2, \dots, \sigma_i^s) = (\sum_{j=1}^m u_j^1(x_{ij}) \cdot w_{ij}, \dots, \sum_{j=1}^m u_j^s(x_{ij}) \cdot w_{ij}) \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^m u_j^2(x_{ij}) \cdot w_{ij}, \dots, \sum_{j=1}^m u_j^s(x_{ij}) \cdot w_{ij})$$

由 $\max_{1 \leq k \leq s} \{\sigma_i^k\} = \sigma_i^{k^*}$, 判断对象 i 属于灰类 k^* , 从而确定其可信度等级。

2.2 权重计算

本文采用基于云模型的权重分析法确定各指标的主观权重, 采用基于正态灰云白化权函数的信息熵和分类区分度的熵权法确定各指标的客观权重, 结合加法集成原理得到综合权重。

定义 $f_j^k(\bullet)$ 关于对象 i 的分类信息熵^[5]为:

$$E_j = -\frac{1}{\ln s} \sum_{k=1}^s [\mu_j^k(x_{ij}) \ln \mu_j^k(x_{ij})] \quad (10)$$

for $j=1 \sim m$

若 $\mu_j^k(x_{ij})=0$, 则 $\mu_j^k(x_{ij}) \ln \mu_j^k(x_{ij})=0$ 。

定义 $f_j^k(\bullet)$ 指标 j 关于对象 i 的分类区分度为:

$$r_j(x_{ij})=1-E_j \quad \text{for } j=1 \sim m \quad (11)$$

则指标 j 关于对象 i 的分类权重为:

$$\eta_{ij} = \frac{r_j(x_{ij})}{\sum_{j=1}^m r_j(x_{ij})} \quad \text{for } j=1 \sim m \quad (12)$$

则各指标客观权重 $W_o=[\eta_{i1}, \eta_{i2}, \dots, \eta_{im}]$ 。

假设利用云模型法确定的主观权重向量为 W_s , 利用熵权法确定的客观权重向量为 W_o , 通过加法集成法得最终综合权重^[6]为:

$$W = aW_s + bW_o \quad (13)$$

$$a = \frac{1}{m-1} [(1P_1 + 2P_2 + \dots + mP_m) - \frac{m+1}{m}] \quad (14)$$

$$b = 1-a \quad (15)$$

其中: P_i 表示对主观权重向量按升序排列后求得的对应该分量, m 为评价指标个数。

3 应用举例

以某制导仿真系统为例, 建立仿真系统顶层可信度评估指标体系如图 1 所示。

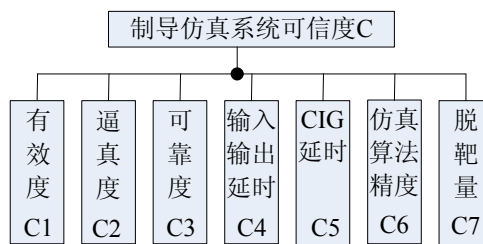


图 1 仿真系统顶层可信度评估指标体系

有效度和逼真度为定性指标, 由仿真专家综合评判给出, 其余为定量指标, 可靠度用平均无故障间隔时间度量, 仿真算法精度用仿真机仿真数据有效位数表示。取某仿真系统试验数据如表 1 所示。

表 1 某仿真系统试验测试数据

指标	C_1	C_2	$C_3/(h)$	$C_4/(\mu s)$	$C_5/(ms)$	$C_6/(\text{位})$	$C_7/(m)$
数值	0.86	0.82	2685	320	15	35	9.25

首先将各评价指标可信度分为五个灰类, 灰类序号为 $k=1, 2, 3, 4, 5$, 分别表示“很不可信”、“不可信”、“较可信”、“可信”、“很可信”, 假定仿真系统可信度评估各评价指标等级标准的各端点值如表 2 所示, 其中 λ_0 和 λ_6 为 j 指标取数域左右延拓的值。

根据表 2 各个评价指标的灰类序列的中心点

值, 建立仿真系统各评价指标的各灰类的单侧灰云白化权模型如表 3 所示。

表 2 仿真系统可信度评估各评价指标等级标准

指标	λ_0	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6
C_1	0	0.3	0.5	0.7	0.8	0.9	1
C_2	0	0.3	0.55	0.75	0.85	0.95	1
$C_3/(h)$	500	1500	2000	2300	2600	2800	3000
$C_4/(\mu s)$	800	500	400	330	270	210	180
$C_5/(ms)$	40	30	25	18	14	10	5
$C_6/(\text{位})$	8	16	20	26	32	40	45
$C_7/(m)$	40	25	18	12	8	5	1

表 3 仿真系统可信度评估各评价指标的灰云白化权模型

指标	可信度等级				
	很不可信	不可信	较可信	可信	很可信
C_1	$C_L(0.3, 0.3/3, 0.01)$	$C_L(0.5, 0.2/3, 0.01)$	$C_L(0.7, 0.2/3, 0.01)$	$C_L(0.8, 0.1/3, 0.01)$	$C_L(0.9, 0.1/3, 0.01)$
	$C_R(0.3, 0.2/3, 0.01)$	$C_R(0.5, 0.2/3, 0.01)$	$C_R(0.7, 0.1/3, 0.01)$	$C_R(0.8, 0.1/3, 0.01)$	$C_R(0.9, 0.1/3, 0.01)$
C_2	$C_L(0.3, 0.3/3, 0.01)$	$C_L(0.55, 0.25/3, 0.01)$	$C_L(0.75, 0.2/3, 0.01)$	$C_L(0.85, 0.1/3, 0.01)$	$C_L(0.95, 0.1/3, 0.01)$
	$C_R(0.3, 0.25/3, 0.01)$	$C_R(0.55, 0.2/3, 0.01)$	$C_R(0.75, 0.1/3, 0.01)$	$C_R(0.85, 0.1/3, 0.01)$	$C_R(0.95, 0.05/3, 0.01)$
$C_3/(h)$	$C_L(1500, 1000/3, 20)$	$C_L(2000, 500/3, 20)$	$C_L(2300, 300/3, 20)$	$C_L(2600, 300/3, 20)$	$C_L(2800, 200/3, 20)$
	$C_R(1500, 500/3, 20)$	$C_R(2000, 300/3, 20)$	$C_R(2300, 300/3, 20)$	$C_R(2600, 200/3, 20)$	$C_R(2800, 200/3, 20)$
$C_4/(\mu s)$	$C_L(500, 100/3, 2)$	$C_L(400, 70/3, 2)$	$C_L(330, 60/3, 2)$	$C_L(270, 60/3, 2)$	$C_L(210, 30/3, 2)$
	$C_R(500, 300/3, 2)$	$C_R(400, 100/3, 2)$	$C_R(330, 70/3, 2)$	$C_R(270, 60/3, 2)$	$C_R(210, 60/3, 2)$
$C_5/(ms)$	$C_L(30, 5/3, 0.1)$	$C_L(25, 7/3, 0.1)$	$C_L(18, 4/3, 0.1)$	$C_L(14, 4/3, 0.1)$	$C_L(10, 5/3, 0.1)$
	$C_R(30, 10/3, 0.1)$	$C_R(25, 5/3, 0.1)$	$C_R(18, 7/3, 0.1)$	$C_R(14, 4/3, 0.1)$	$C_R(10, 4/3, 0.1)$
$C_6/(\text{位})$	$C_L(16, 8/3, 0.1)$	$C_L(20, 4/3, 0.1)$	$C_L(26, 6/3, 0.1)$	$C_L(32, 6/3, 0.1)$	$C_L(40, 8/3, 0.1)$
	$C_R(16, 4/3, 0.1)$	$C_R(20, 6/3, 0.1)$	$C_R(26, 6/3, 0.1)$	$C_R(32, 8/3, 0.1)$	$C_R(40, 5/3, 0.1)$
$C_7/(m)$	$C_L(25, 7/3, 0.1)$	$C_L(18, 6/3, 0.1)$	$C_L(12, 4/3, 0.1)$	$C_L(8, 3/3, 0.1)$	$C_L(5, 4/3, 0.1)$
	$C_R(25, 15/3, 0.1)$	$C_R(18, 7/3, 0.1)$	$C_R(12, 6/3, 0.1)$	$C_R(8, 4/3, 0.1)$	$C_R(5, 3/3, 0.1)$

以可靠度指标为例, 建立其单侧灰云白化权模型示意图如图 2 所示。

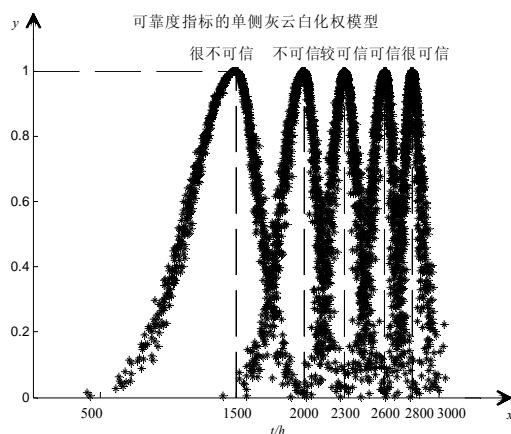


图 2 可靠度指标单侧灰云白化权模型

将表 1 仿真系统各指标的仿真测试数据代入各自的灰云白化模型, 可得仿真系统可信度评估各评价指标所属灰类的灰云白化权值如表 4 所示。

仿真系统可信度各评价指标权重如表 5 所示。

表 4 各评价指标所属灰类的灰云白化权值

指标	很不可信	不可信	较可信	可信	很可信
C_1	0	0	0	0.1984	0.4861
C_2	0	0	0.1109	0.6664	0
$C_3/(h)$	0	0	0	0.4200	0.2362
$C_4/(\mu s)$	0	0	0.8797	0.0485	0
$C_5/(ms)$	0	0	0.0822	0.7514	0
$C_6/(\text{位})$	0	0	0	0.5307	0.1726
$C_7/(m)$	0	0	0.1199	0.6431	0

表 5 仿真系统可信度评估各评价指标的权重

指标	W_S	W_O	W
C_1	0.1064	0.1247	0.1141
C_2	0.1277	0.1485	0.1364
$C_3/(h)$	0.0851	0.1183	0.0991
$C_4/(\mu s)$	0.1702	0.1738	0.1717
$C_5/(ms)$	0.1905	0.1593	0.1779
$C_6/(位)$	0.1064	0.1302	0.1164
$C_7/(m)$	0.2128	0.1453	0.1844

由式(9)计算得知, 系统关于灰类 $k(k=1, 2, 3, 4, 5)$ 的综合聚类系数向量 $\sigma=(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5)=(0, 0, 0.2287, 0.626, 0.1452)$ 。

分析 σ 数据可知该系统本次仿真试验可信度较高, 总体上为可信状态。

4 结论

围绕制导仿真系统可信度评估问题, 构建可信度评估指标体系, 运用云模型理论改进灰色聚类评估中的中心点三角白化权函数, 基于权重云模型和灰云熵权模型计算各指标的主观权重和客观权重, 通过组合赋权得到综合权重。选取某制导仿真系统测试数据, 对各评估指标进行变权灰云聚类, 得到



(上接第 1702 页)

的细微特点, 如地面滑行、单个主轮和导轮触舰或离舰等各种甲板、各种姿态着舰起飞的特性, 该方法具有通用性, 可以方便地引入飞行动力学方程中, 适用于各种飞机、直升机轮式起落架着舰以及降落各种地形地面的动力学仿真。

参考文献:

- [1] 张辽. 直升机模拟器飞行系统建模与仿真[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2006, 11.
- [2] 李新飞. 舰载机起降关键技术仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012, 6.
- [3] 王延刚, 屈香菊. 舰载机进舰着舰过程仿真建模[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(24): 6592-6598.
- [4] 陈宣仪, 刘刚, 洪冠新. 舰载机返航着舰的关键点和关键要素的分解与分析[J]. 飞行力学, 2011, 29(2): 20-24.

可信度评估结果, 验证了方法的有效性。本文建立的灰云熵权聚类评估模型既考虑了信息的不完备性, 又兼顾了信息的随机性和模糊性, 可以为制导仿真系统可信度评估提供重要保障; 同时, 该评估模型还具有较强的适用性, 可以为工业、经济、社会等其它领域复杂系统仿真评估提供参考。

参考文献:

- [1] Sargent R G. Verification and validation of simulation models [J]. Journal of Simulation(S2310-4791), 2013, 7(1): 12-24.
- [2] LI D Y, LIU C Y. A new cognitive model: Cloud model [J]. International Journal of Intelligent Systems (S1098-111X), 2009, 24(3): 357-375.
- [3] 王洪利, 冯玉强. 基于灰色的改进白化模型及其在灰色决策中应用[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2006, 23(6): 740-745.
- [4] 刘思峰, 谢乃明. 基于改进三角白化权函数的灰评估新方法[J]. 系统工程学报, 2011, 26(2): 244-250.
- [5] 王正新, 党耀国, 刘思峰. 基于白化权函数分类区度的变权灰色聚类[J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(6): 23-27.
- [6] 李如琦, 苏浩宜, 凌武能, 等. 基于云模型和灰关联度投影法的烟气脱硫技术优选[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(23): 21-26.
- [5] 王文涛, 张志春. 直升机着舰动力学特性仿真[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(11): 68-70.
- [6] SUI Chengcheng, YANG Yongtian, YOU Junsheng. Modeling and Simulation of Takeoff and Landing for Fixed-wing Aircraft on Carrier[C]// Proceedings of Asia Simulation Conference 2005/the 6th International Conference on System Simulation and Scientific Computing(ICSC). Beijing:International Academic Publishers, 2005: 23-26.
- [7] ZHOU Guojun, ZHOU bo, YU Li. Design for Ship-borne Helicopter Deck-landing Simulator[C]// Proceedings of Asia Simulation Conference 2005/the 6th International Conference on System Simulation and Scientific Computing(ICSC). Beijing:International Academic Publishers, 2005: 693-695.
- [8] 刘智汉, 袁东, 刘超. 舰载机多体动力学仿真建模及起降过程分析[J]. 飞行力学, 2012, 30(6): 485-488.