

# 基于 DS/AHP 和灰云聚类的制导仿真系统可信度评估方法

潘云龙 何玉珠

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院 北京 100191)

**摘要:** 针对复杂制导仿真系统可信度量化的主观性和不确定性,给出了基于证据理论和灰云聚类的仿真可信度评估模型。首先以群组层次分析法获得多位专家的意见,并对不一致意见进行证据理论融合,得到具有更高可信度的指标权重;然后采用灰云聚类的方法,以灰云模型作为白化权函数,对定性评价进行量化处理,最后通过计算灰色聚类系数完成对仿真系统的可信度评估。应用此模型对制导半实物仿真系统进行评价,结果符合客观实际,表明该模型具备可行性和实用性,为仿真可信度评估和综合评价问题提供了一种新的有效途径。

**关键词:** 证据理论;群组层次分析法;灰云聚类;仿真可信度

**中图分类号:** TP391.1; TN915 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

## Method of credibility evaluation in simulation system based on DS/AHP and grey cloud

Pan Yunlong He Yuzhu

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering,  
Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Given the subjectivity and uncertainty of the credibility quantification of complex guidance simulation system, an evaluation model of simulation credibility based on D-S evidential theory and gray cloud cluster is proposed. Firstly, the experts' opinions are obtained by AHP, and different opinions are combined by D-S to obtain the index weight of higher credibility. Then the gray cloud-clustering model is adopted to quantitatively processing the qualitative results as the whitening weight function in grey clustering. The credibility of the simulation system is evaluated by calculating the gray clustering coefficient. Finally, the evaluation of the HILS simulation system is carried out and the results show that the model is feasible and practical. This model provides a new and effective way for the simulation credibility evaluation and comprehensive evaluation.

**Keywords:** D-S evidential theory; AHP; gray cloud-clustering model; simulation credibility evaluation

## 1 引言

制导武器的半实物仿真技术是代替真实的飞行试验来评估和鉴定飞行器部件性能的重要手段。至于如何科学合理的评价仿真结果可信程度是仿真用户需要考虑的重要方面<sup>[1]</sup>。导弹武器等仿真系统组成设备多、结构复杂,评价其效能的指标繁杂且相互关联,同时许多指标由于数据匮乏、信息模糊等原因带有很大的不确定性<sup>[2]</sup>。目前层次分析法、模糊综合评判法、灰色聚类分析法等都存在一些问题:评价函数难以建立,或者评价方法过于简单,在评价过程中,难以综合不同专家的意见以形成更高可信度的结论。为了克

服上述评价方法的不足,文献[3-4]着眼于提高指标权重提取阶段的可信度,在层次分析法的基础上,引入证据理论,避免了只考虑一位专家意见的片面性和问题。文献[5-7]则侧重于提升指标评价阶段可信度的提高,以灰云模型作为灰色聚类评估的白化权函数,有效描述评价等级边界信息的随机性和模糊性。

本文通过构建仿真可信度评估模型,将作用于评估不同阶段的 D-S 证据理论和灰云聚类归纳到同一体系下,即提高指标权重提取的可信度,又保证了指标评价信息的完整与准确,即表示系统评估信息的不一致性,又能表示主观判断的随机性和模糊性信息,实现随机性和灰性的定性与

定量转化。

## 2 仿真可信度评估模型建立

制导半实物仿真系统主要包括时仿真计算机、转台控制计算机和转台、视景仿真计算机等,节点之间通过环形反射内存网进行数据交互<sup>[8]</sup>。

如图 1 所示,实时仿真计算机存入导弹动力学、运动学等模型,进行弹道的实时解算,转台搭载导引头模拟导弹的三自由度运动,视景仿真计算机驱动视景中目标位置移动,实现弹目相对运动的实时模拟。数学模型的精细程度,仿真机的实时解算能力,目标模拟器的逼真程度,转台的响应速度以及节点间数据传输速度等因素都影响着整个仿真结果,都属于仿真结果可信度评定的重要因素<sup>[9]</sup>。

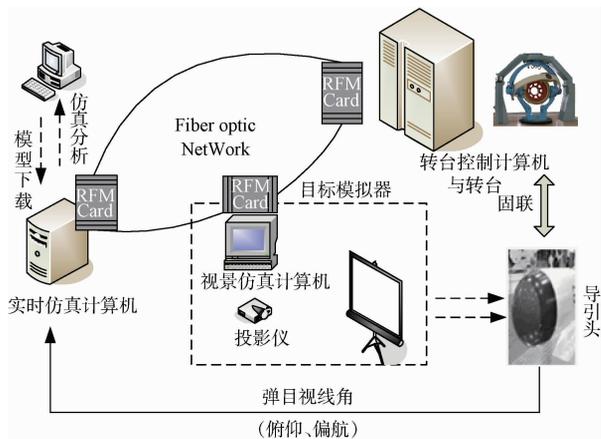


图 1 导引头半实物仿真系统原理

本文将评估模型划分为如图 2 所示的两个阶段,分别进行指标权重的确立和指标效果的评价。首先,通过证据理论对不同专家的多个评价信息进行合成,对多位专家对同一评判对象判断的不一致性进行处理;然后利用灰云模型将专家定性评价量化处理,解决指标权重的过于主观和指标定性评价的难以量化问题;最后将 D-S 融合后的权重作用于灰云聚类系数计算中。通过确定聚类系数所属的灰类确定整个系统的可信度。

### 2.1 基于 D-S 证据理论融合群组 AHP 权重

#### 1) 基本 AHP 权重求取

有关层次分析法具体理参考文献<sup>[10-12]</sup>。

(1) 据指标的相互关联、继承关系建立多层次结构的评价指标体系。

(2) 采用 Saaty 提出的 1-9 标度法,得到一个专家判断矩阵  $A$ , 并进行一致性检验。

(3) 计算矩阵  $A$  最大特征值与特征向量

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (1)$$

式中:  $\lambda_{\max}$  为特征值,  $W$  为特征向量, 经归一化处理, 即得各指标权重。

#### 2) D-S 证据理论对权重融合

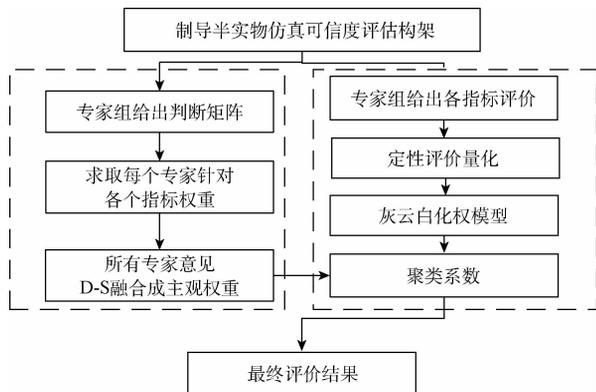


图 2 可信度评估流程

D-S 证据理论由 Dempster 提出 Shafer 完善。它建立在集合论的基础之上, 具有表示“不确定性”、“未知”等概念的优点<sup>[13]</sup>。对于一个判决问题, 用识别框架——集合  $\Theta$ , 表示能够认识的所有可能结果<sup>[14]</sup>。

定义 1 如果集函数:  $2^\Theta \rightarrow [0, 1]$  ( $2^\Theta$  为  $\Theta$  的幂集, 满足:

$$m(\varphi) = 0, \sum m(A) = 1$$

则称  $m(A)$  为  $A$  的基本概率分配函数。若  $m(A) \geq 0$ , 则称所有满足该条件集合  $A$  为  $m$  的焦元。

定义 2  $A$  的所有子集的信度值之和表示对  $A$  的总信任。对于区间信任函数:

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B), \forall A \in \Theta$$

设  $Bel_1$  和  $Bel_2$  是同一识别框架  $\Theta$  上的两个相互独立证据的信度函数,  $m_1$  和  $m_2$  分别是其对应的基本信度分配函数, 设  $m_1$  对应的焦点元素为  $A_1, A_2, \dots, A_p, m_2$  对应的焦点元素为  $B_1, B_2, \dots, B_q$ , 令证据冲突因子为:

$$k = \sum_{\substack{i \leq p, j \leq q \\ A_i \cap B_j = \varphi}} m_1(A_i) m_2(B_j) \quad (2)$$

其中  $0 \leq k \leq 1, k$  越大, 证据间冲突越激烈, 矛盾越明显。一般引入一个常数  $\epsilon$  作为冲突度阈值, 表示允许的证 据分歧程度, 只有当  $k < \epsilon$  才能对证据进行融合。设合成的基本信度分配函数:

$$m(C) = \begin{cases} 0, & C = \varphi \\ \frac{1}{1-k} \sum_{A_i \cap B_j = C} m_1(A_i) m_2(B_j), & C \neq \varphi \end{cases} \quad (3)$$

由于专家的经验 and 偏好不同, 造成了各专家权重的不确定性。将不同专家视为相互独立的证据, 将专家评价过的指标权重向量作为基本概率分配函数  $Bel_1, Bel_2$ , 通过衡量冲突因子进行 D-S 规则合成, 得到专家群体的综合指标属性权重。

若待合成的信度函数多于两个, 则用同样的方法将前两个的合成结果与下一个信度函数继续合成, 直到所有信度函数合成完毕。

### 2.2 基于灰云聚类求取指标评价结果

定义: 灰云模型是建立在云理论基础上的。设  $V$  是一

个论域,则白化权在论域上以正态云的方式分布就称为白化权灰云,简称灰云<sup>[15]</sup>。灰云的数字特征用峰值  $C_x$ 、界值  $(L_x, R_x)$ 、熵  $En$  以及超熵  $He$  等数值来表征。各数字特征存在以下关系:

$$En = \frac{Rx - Lx}{6}, He = \frac{E_n}{\alpha}$$

式中:  $\alpha$  是给定的常数。

基于正态灰云模型的白化权值表达式为:

$$V(xi) = \exp\left[-\frac{(x - Cx)^2}{2(E'_n)^2}\right] \quad (4)$$

式中:  $E'_n$  是以  $En$  为期望,  $H_\epsilon$  为标准差的正态随机数。

值得注意的是,式(4)得的白化权值  $V(x)$  为白化权随机数,由于灰云云滴是服从一定的分布规律,因此求取该点的期望值作为最终的白化权值。这样在确保判断结果准确性的前提下,兼顾了信息的随机性<sup>[4]</sup>。

基于灰云聚类的指标可信度评估步骤如下:

1) 构造白化模型:设置灰类个数  $N$ , 分别对应自定义的优良中差等  $N$  个定性评价,并构造各自的白化权函数。

2) 专家对指标评分:组织  $m$  个专家在  $[0, 1]$  区间内对指标  $U_i$  打分,每位专家的评分记为  $d_i^k (k = 1, 2, \dots, m)$ 。对于指标  $U_i$ ,第  $j$  个灰类的灰色评估系数记为  $x_{ij}$ ,令  $V'_j (j = 1, \dots, N)$  表示第  $j$  个正态灰类白化权函数:

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^p V'_j(d_i^k) \quad (5)$$

总灰色评估系数记为  $x_i$ ,属于第  $j$  个评估,灰类的灰色评估权记为  $s_{ij}$ ,对  $x_{ij}$  作无量纲化处理:

$$x_i = \sum_{j=1}^N x_{ij}, s_{ij} = \frac{x_{ij}}{x_i} \quad (6)$$

通过以上计算最终得到归一化的矩阵:

$$S = (s_{ij})_{n \times N}$$

3) 计算聚类系数:设  $\omega_i$  来自于经过 D-S 融合后的群组专家指标权重,评估对象关于第  $j$  个灰类的综合聚类系数为  $\sigma'_j$ ,则系统仿真可信度最终的评价结果为  $\sigma'_j$ :

$$\sigma_j = \sum_{i=1}^n \omega_i S_i, \sigma'_j = \max_{1 \leq j \leq N} \sigma_j \quad (7)$$

根据  $\sigma'_j$  判断评估对象属于第  $j$  个灰类从而给出系统可信度所属的定性评价。

### 3 制导半实物仿真可信度评估实例验证

对于如图 1 所述的复杂制导仿真大系统,应充分考虑仿真系统的目的相关性,客观的、综合评价仿真系统系统实时性,数学模型可信度,视景逼真度以及仿真模拟器等物理设备可信度等问题。基于此建立如图 3 所示的仿真系统的层次分析构架。

应用本文评估模型对半实物系统进行可信度评估主要步骤如下:

#### 3.1 基于层次分析法的权重分配

对整个仿真系统抽象成如图 2 所示的层次结构,专家

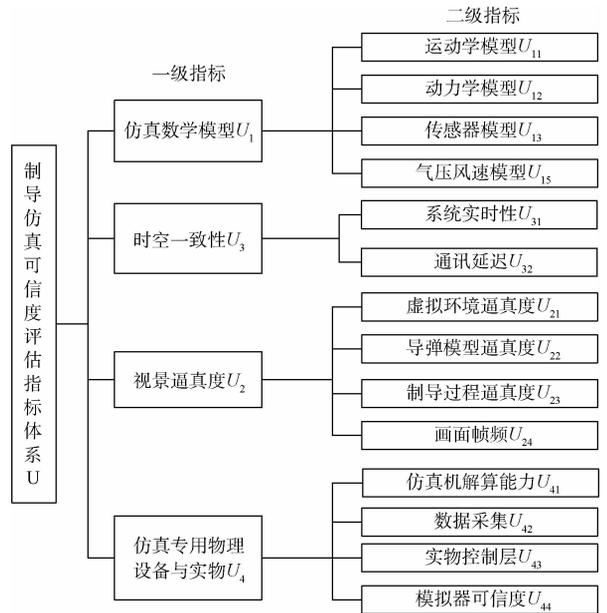


图 3 制导仿真评估体系层次框架

组对一级指标  $U_i (i=1, 2, 3, 4)$  和二级指标  $U_{11}, U_{12}, \dots, U_{34}, U_{44}$  进行权重分配,现以 4 位专家对系统构架中的 4 个一级指标的权重分配作为例子,进行证据理论融合权重的方法说明。

4 位专家依据自身经验对各个指标构建建成对比较矩阵  $D_1, D_2, D_3, D_4$ , 如下所示:

$$D_1 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 1/2 & 7 \\ 1/5 & 1 & 1/3 & 4 \\ 2 & 3 & 1 & 7 \\ 1/7 & 1/4 & 1/7 & 1 \end{bmatrix} \quad D_2 = \begin{bmatrix} 1 & 9 & 7 & 2 \\ 1/9 & 1 & 1/5 & 1/7 \\ 1/7 & 5 & 1 & 1 \\ 1/2 & 7 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1/5 & 3 \\ 1/2 & 1 & 1/4 & 4 \\ 5 & 4 & 1 & 9 \\ 1/3 & 1/4 & 1/9 & 1 \end{bmatrix} \quad D_4 = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 6 & 6 \\ 1/4 & 1 & 3 & 1/3 \\ 1/6 & 1/3 & 1 & 3 \\ 1/6 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}$$

经验证,4 个判断矩阵均满足一致性要求。可以根据公式 1 求得每位专家的 4 个指标的权重分配情况。如表 1 所示。

表 1 一级指标权重

	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$
$D_1 - \omega$	0.0825	0.2368	0.0648	0.6159
$D_2 - \omega$	0.0481	0.6579	0.1798	0.1142
$D_3 - \omega$	0.1873	0.1149	0.1767	0.5210
$D_4 - \omega$	0.6044	0.2153	0.1148	0.0655

#### 3.2 基于 D-S 证据理论的权重融合

设定  $\epsilon = 0.8$  作为冲突度阈值。令证据  $e_1, e_2$  分别为第一、二位专家 ( $D_1, D_2$ ) 给出各一级指标的权重。其中

$m_1(U_i)$  和  $m_2(U_i)$  表示关于  $U_i(1,2,3,4)$  指标的权重, 专家 1,  $m_1(U_1) = 0.0.825, \dots, m_1(U_2) = 0.6159$ ; 专家 2,  $m_2(U_1) = 0.0481, \dots, m_2(U_4) = 0.1142$ ,

由式(2)可得, 专家 1、2 的冲突因子为:

$$k = \sum_{\substack{i \leq 4, j \leq 4 \\ i=1, U_i \cap U_j = \emptyset}} m_1(U_i)m_2(U_j) = 0.658$$

因为  $k < \epsilon$ , 说明两位专家的意见冲突较不满足权重的融合的条件。因此根据式(13)将两个专家权重融合后为  $m(U_1) = 0.0164, m(U_2) = 0.6444, m(U_3) = 0.0482, m(U_4) = 0.2909$ 。

同理依次完成对第 3、4 位专家意见的融合。

最终得到专家组对二级指标的融合权重  $m'(U_1) = 0.0395, m'(U_2) = 0.6969, m'(U_3) = 0.0062, m'(U_4) = 0.2553$ 。

### 3.3 对二级指标作出评价

如表 2 所示, 邀请 4 位专家对评估框架的二级指标 ( $U_{11}, U_{12}, \dots, U_{43}, U_{44}$ ) 进行评分。

表 2 二级指标专家评分

$P$	1	2	3	4
$U_{11}$	0.80	0.80	0.85	0.85
$U_{12}$	0.95	0.85	0.90	0.95
$U_{13}$	0.85	0.90	0.85	0.90
$U_{14}$	0.65	0.75	0.7	0.80
$U_{21}$	0.85	0.80	0.85	0.90
$U_{22}$	0.90	0.85	0.90	0.85
$U_{23}$	0.75	0.80	0.75	0.60
$U_{24}$	0.85	0.90	0.85	0.85
$U_{31}$	0.70	0.75	0.70	0.75
$U_{32}$	0.85	0.95	0.85	0.85
$U_{41}$	0.95	0.75	0.85	0.80
$U_{42}$	0.75	0.80	0.85	0.70
$U_{43}$	0.80	0.95	0.85	0.75
$U_{44}$	0.70	0.80	0.75	0.80

### 3.4 按照白化模型, 将指标聚类处理

将灰类的个数  $N$  设置为 5 个, 依次对应“差、较差、中、良、优”5 个定性指标值, 其白化权函数记为  $V'_j$ 。利用灰云模型对指标量化, 各灰类白化模型的峰值  $C_j$  分别为 0.4、0.6、0.7、0.8、0.9, 计算相应的熵和超熵, 根据五级灰云的数字特征构造, 同时以标准正态云、上升云和下降云建立如图 4 所示的正态灰云白化权模型。

以指标  $U_{11}$  为例, 根据式(5)和式(6), 得到第  $j$  个灰类的评估系数为:

$$x_{ij} = V'_j(0.80) + V'_j(0.80) + V'_j(0.85) + V'_j(0.85)$$

取计算次数  $h = 100$ ,  $Vh(x)$  为第  $h$  次计算得出的白化权值:

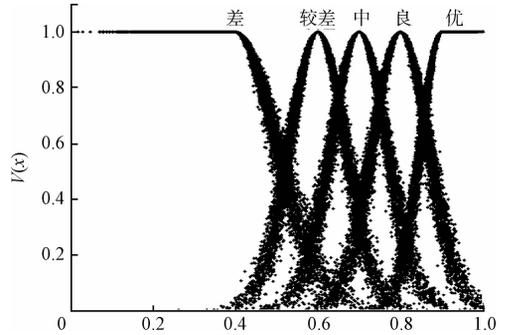


图 4 基于灰云模型的白化权函数

$$V'_j(0.80) = \frac{1}{100}[V_1(0.80) + \dots + V_{100}(0.80)] =$$

$$0.0068V'_1(0.85) = 0.0781$$

从而得  $x_{11} = 0.0016$ 。

同理  $x_{12} = 0.0335, x_{13} = 0.8227, x_{14} = 3.5019, x_{15} = 1.4847$ 。

按照式(6), 对  $x_{1j}(j = 1, \dots, 5)$  无量纲处理, 则  $s_{1j} = (0.0003, 0.0057, 0.1405, 0.5997, 0.2539)$ , 按此步骤将剩余其他指标进行量化, 于是可得 14 个指标的归一化矩阵  $S$  如下:

$$S = \begin{pmatrix} 0.0003 & 0.0058 & 0.1411 & 0.6002 & 0.2526 \\ 0.0000 & 0.0005 & 0.0254 & 0.3036 & 0.6704 \\ 0.0001 & 0.0006 & 0.0357 & 0.3891 & 0.5746 \\ 0.0108 & 0.1871 & 0.4399 & 0.3384 & 0.0238 \\ 0.0002 & 0.0028 & 0.0870 & 0.4987 & 0.4114 \\ 0.0000 & 0.0007 & 0.0372 & 0.3904 & 0.5716 \\ 0.0226 & 0.1914 & 0.3485 & 0.4105 & 0.0270 \\ 0.0001 & 0.0010 & 0.0480 & 0.4584 & 0.4926 \\ 0.0054 & 0.1270 & 0.5339 & 0.3294 & 0.0043 \\ 0.0001 & 0.0010 & 0.0525 & 0.4665 & 0.4798 \\ 0.0008 & 0.0202 & 0.2213 & 0.5013 & 0.2564 \\ 0.0028 & 0.0692 & 0.3498 & 0.4557 & 0.1225 \\ 0.0008 & 0.0206 & 0.2228 & 0.4964 & 0.2593 \\ 0.0029 & 0.0728 & 0.3860 & 0.4922 & 0.0461 \end{pmatrix}$$

将步骤 2) 中求得的基于 D-S 融合后的指标权重代入式(7)得到所有灰类的聚类系数为:

$\sigma_N = \{0.0001, 0.0352, 0.3927, 0.42114, 0.4054\}$ , 经过比较得到最终的聚类系数为:

$$\sigma'_j = \max_{1 \leq j \leq 5} \{\sigma_j\} = 0.42114$$

对应于图 4, 根据最大隶属度原则可知灰类“良”所占的分量最大, 其次是优, 故该制导半实物仿真系统可信度的最终评价结果为“良”, 且与“优”相差不大。

## 4 结 论

在制导半实物仿真系统可信度评估的具体过程中, 充分考虑了指标权重提取阶段和指标评分阶段内在的缺憾,

以证据理论和灰云聚类模型分别改进。

一方面,证据理论有效的融合了多个专家的不确定性评价意见,一定程度上提高了评价结果的可信度。另一方面,灰云模型综合考虑评估中指标的不完全性、模糊性和随机性,提高了白化权值的可信度,有效完成了专家定性评价转化为定量评估。

两者共同作用,从整体上提高了评估的可信度,使我们清楚地认识仿真系统中各个因素的重要程度。不仅评价了当前系统的质量,为后续搭建仿真平台提供了指导。

## 参考文献

- [1] 孙雅峰,王朝阳,黄芝平. 仿真可信度的研究[J]. 电子测量技术,2009,32(11):8-11.
- [2] LI XH, ZHANG J, LI CR, et al. Study on the quality evaluation metrics for compressed spaceborne hyperspectral data[J]. Instrumentation, 2015, 2(1): 33-41.
- [3] LI B, GU G L, XING B W, et al. Ship electric propulsion simulation system reliability evaluation based on improved D-S expert weight calculation method [C]. Mathematical Problem in Engineering, 2015.
- [4] 庞丽萍,曲洪权. 基于证据理论的潜艇舱室综合环境质量评价[J]. 北京航空航天大学学报,2008,34(11): 1243-1246.
- [5] 彭绍雄,王海涛,邹强. 潜空导弹武器系统作战效能评估模型[J]. 系统工程理论与实践,2015,35(1): 267-272.
- [6] WANG H L. Grey cloud model and its application in intelligent decision support system Complex decision[C]. International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management, 2008: 12.
- [7] 蔡红梅,陈剑勇,苏浩益. 基于灰云模型的电力变压器故障诊断[J]. 继电器,2012,40(12):151-155.
- [8] 吕俊,李鑫,凡永华. 基于 RT-LAB 的高空飞艇半实物仿真系统设计[J]. 电子测量技术,2015,38(3):13-16.
- [9] 曹文焕,李体方,亓尧,等. 关于导弹装备系统效能的仿真研究[J]. 计算机仿真,2016,33(4):116-119.
- [10] 钟群芳,郭长欢,黄建. 基于多层模糊评估模型的直升机供电系统综合评估方法[J]. 国外电子测量技术,2015,34(11):27-31.
- [11] 李国正,谭南林,张建斌. 基于改进型 AHP 的地铁列车设备重要度分析[J]. 电子测量与仪器学报,2012, 26(6):503-507.
- [12] 黄云程,蔡金锭. 融合改进层次分析法与灰色关联法评估油纸绝缘状态[J]. 仪器仪表学报,2015,36(9): 2083-2090.
- [13] 卢志刚,马丽叶. 配电网经济运行评价指标体系的建立[J]. 电网技术,2011,35(3):108-112.
- [14] 任明秋,蔡金燕,朱元清,等. 基于证据融合的雷达抗干扰性能多指标综合评估[J]. 仪器仪表学报,2013, 32(10):2336-2441.
- [15] 王斐,梁晓庚,郭超,等. 灰云熵权聚类的制导仿真系统可信度评估[J]. 仿真系统学报,2015,27(8): 1703-1707.
- [15] 左瑜君,滕青芳. 基于变结构模型参考自适应观测器的永磁同步电机无速度传感器矢量控制 [J]. 科学技术与工程,2014,14(9):49-53.
- [16] 朱晓虹,张广明,梅磊,等. 基于滑模速度控制器的 PMSM 无速度传感器控制研究[J]. 电机与控制应用,2016,43(1):1-6.
- [17] 邵友,陈国定. 永磁同步电机的变结构 MRAS 转速辨识[J]. 微电机,2012,45(10):53-56.
- [18] 刘金钊. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 2 版. 北京:清华大学出版社,2012.

## 作者简介

潘云龙,1991 年出生,山东省潍坊市人,硕士研究生,主要研究领域为制导系统仿真与测试。

E-mail: ylpn\_buaa@163.com

何玉珠,1954 年出生,教授,博士研究生导师,主要研究领域为自动化测试与动态仿真。

## 作者简介

刘力郡,1989 年出生,大学本科,助教,研究方向为控制工程。

(上接第 42 页)