

# 基于多源数据融合的制导控制系统评估方法

苏筱婷, 李奇, 唐成师, 王帅豪, 杨扬

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

**摘要:**针对复杂制导控制系统性能评估问题,提出了一种基于多源数据融合的双模复合制导控制性能评估方法,根据某复合制导控制系统的组成特点,构建了指标评价体系与指标权重,基于 Bayes 理论的多源异质数据融合方法完成了单一指标评估,并自底向上逐步完成指标评估与综合,最终得到了双模复合制导控制系统综合性能评估结果。研究成果已成功应用于相关型号制导控制系统性能评估领域,有力支撑了产品研制等工作。

**关键词:**多源数据融合;指标体系;评估方法;制导控制系统

中图分类号: TP182; TJ765

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0035-06

## Evaluation method of guidance and control system based on multi-source data fusion

SU Xiaoting, LI Qi, TANG Chengshi, WANG Shuaihao, YANG Yang

(Shanghai Electro-mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

**Abstract:** A dual-mode composite guidance and control performance evaluation method based on multi-source data fusion is proposed for the performance evaluation of complex guidance and control systems. Based on the composition characteristics of a composite guidance and control system, an indicator evaluation system and indicator weights are constructed. The multi-source heterogeneous data fusion method based on Bayes theory completes a single indicator evaluation and gradually completes indicator evaluation and synthesis from bottom to top. Finally, the comprehensive performance evaluation results of the dual-mode composite guidance and control system are obtained. At present, the research results are successfully applied in the field of performance evaluation of relevant models of guidance and control systems, providing strong support for product development and other work.

**Keywords:** multi-source data fusion; index system; evaluation method; guidance and control system

### 0 引言

试验与评估工作贯穿于装备的全寿命周期,为系统的论证、研制、试验、管理和使用提供重要支撑。随着装备信息化水平和复杂程度的日益提高、装备成本的不断增加、试验难度的显著增大,所以大型装备的各类飞行数据通常都是小子样,传统的大样本试验评估方法已难以适应装备试验与评估的需求。因此,以小样本理论为基础的系统综合试验评估技术应运而生<sup>[1-3]</sup>。

而随着半实物仿真的出现,付出较少的成本便可获得大量的仿真试验数据,目前雷达或红外制导系统的半实物仿真试验<sup>[4]</sup>,已是制导控制系统研制过程中必不可少的试验手段。而如何运用好少量而精确的飞行试验数据,与较为大量的仿真试验数据完成对制导控制系统的性能评估便成为需要解决的问题。目前国内外的研究方法<sup>[5-8]</sup>中较普遍采用 Bayes 融合方法实现对多源数据的处理,但对先验信息及加权处理较为简单,因此得到的可信度偏低,且均为对单一指标的融合评估,没有一套针对制导控制系统完整且置信度高的评估方法。本文提出将 Bayes 多源

数据融合应用于制导控制系统性能评估中,建立了一套完成的评估流程,利用 Bayes 方法融合多源数据完成底层指标计算,再通过变异系数法完成指标权重计算,最终实现对双模复合制导控制性能的综合评估。

### 1 评估流程

制导控制系统性能评估流程可分为指标体系构建、指标权重设计、底层指标多源数据融合及综合评估四步,流程图如图 1 所示。

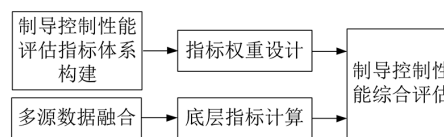


图 1 制导控制性能评估流程

首先,筛选制导控制性能评估指标并构建相应指标体系,再对各级指标开展权重设计;收集多种类型试验原始数据进行分析处理并完成多源数据融合,再通过指标类型分析对评估数据进行归一化处理,计算所有底层指标评估值;最终结合各级指标权重设计结果,自底向上逐级完成指标综合,得到该制导控制系统的综合性能评估结果。

## 2 评估方法

### 2.1 指标体系构建和指标权重设计

#### 2.1.1 制导控制系统性能指标体系构建

基于制导控制系统的组成原理和工作过程,将制导控制性能逐层分解,建立典型的二维树形评估指标体系,如图2所示。

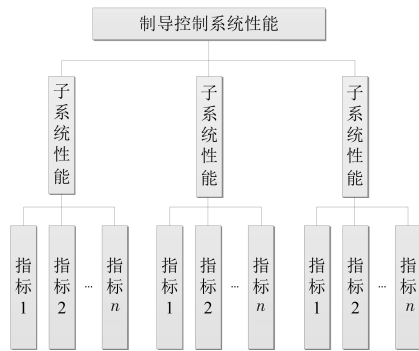


图2 制导控制系统指标体系示意图

#### 2.1.2 指标权重设计

从赋权时数据来源的角度来分,赋权法可划分成主观赋权法和客观赋权法两类。

##### 1) 主观权重设计

主观权重设计主要采用通过直接赋值的专家打分方式,给出对应指标的主观权重意见,并进行相应的归一化处理得到主观权重值,完成指标权重设计。

若一组共  $n$  个指标的直接赋值结果分别为  $m_1, m_2, \dots, m_x, \dots, m_n$ , 则第  $x$  个指标的权值归一化处理结果为

$$w_x = \frac{m_x}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}$$

##### 2) 客观权重设计

客观权重设计中的变异系数法是根据指标数据求指标权重的方法,反映了指标数据变化的客观信息,是一种客观的求权重的方法。变异系数法的思想原理是通过计算各指标实测数据的差异程度来确定指标权重的大小,指标内部数据差异性较大,则该指标对评价对象的区分作用越大,其权重分配值也就越大。变异系数法求指标权重的流程如图3所示。

### 2.2 基于相容性检验的 Bayes 融合评估

#### 2.2.1 贝叶斯数据融合框架

对于制导控制性能评估而言,由于其性能试验类型具有多源性,覆盖面广泛,既包括系统级外场原型试验,也包括数值模拟试验、半实物仿真试验、挂飞试验等替代等效试验。受地域、成本、资源等因素的限制,系统级外场原型试验状态下的试验数据较少,具有小子样的特点,单纯靠少量的原型试验数据难以有效评估。因而进一步扩充信息源,充分利用其他类型的替代等效试验数据作为先验信息,以数值模拟试验、半实物仿真试验等大样本数据为基础开展融合评估,是较为常见的一种解决思路。

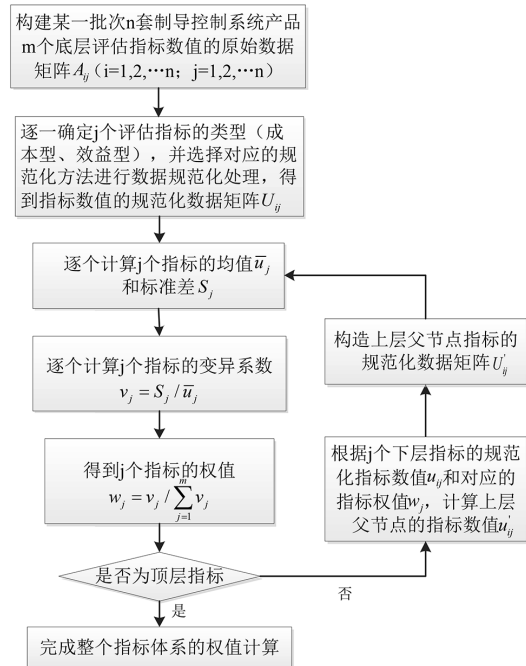


图3 变异系数法求指标权重的计算步骤

贝叶斯估计方法的优点在于能够融合任意容量的数据,且融合具有较大的有效性,因此本文采用基于相容性检验的贝叶斯方法进行多源异质数据融合评估。根据系统性能评估指标数据的特点,建立如图4所示的贝叶斯数据融合框架。

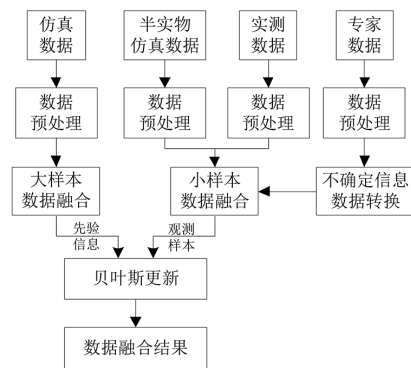


图4 基于贝叶斯理论的多源异质数据融合框架

贝叶斯数据融合流程如图5所示。由于半实物仿真/实测数据和专家数据具有样本量少的特点,采用贝叶斯方法进行数据融合。仿真数据虽然样本容量大,但数据真实性程度较低,故采用经典频率估计方法进行融合;最终,将大样本频率方法数据融合结果和小样本贝叶斯方法结果分别看作先验信息和观测样本数据,采用贝叶斯方法更新先验信息参数,即可得到多源异质数据融合结果。

#### 2.2.2 贝叶斯数据融合方法<sup>[9-10]</sup>

##### 1) 大样本经典频率数据融合

经典频率参数估计方法广泛运用于大样本条件下的多源异质数据融合中。假设在仿真数据中存在  $n$  个相互独立的样本数据集,它们对同一分布参数  $\theta$  的估计值为  $\{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 。

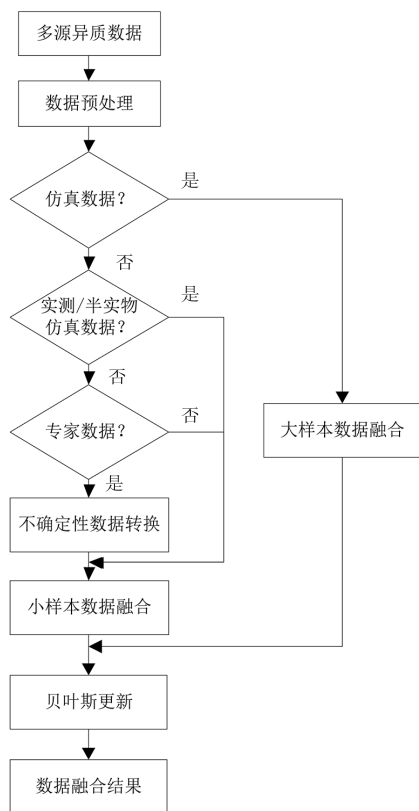


图5 贝叶斯数据融合流程

为方便处理,将  $n$  个观测值细分为  $k$  批,其中,第  $j$  批为

$$\{\theta_{j1}, \theta_{j2}, \dots, \theta_{jn_j}, n_j \geq 2, j = 1, 2, \dots, k\}$$

$$\text{且 } \sum_{j=1}^k n_j = n$$

第  $j$  批的均值为

$$\bar{\theta}_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_{ji}, j = 1, 2, \dots, k$$

记

$$\hat{\sigma}_j^2 = \frac{\bar{s}_j^2}{n_j}, \bar{s}_j^2 = \frac{1}{n_j - 1} \sum_{i=1}^{n_j} (\theta_{ji} - \bar{\theta}_j)^2, j = 1, 2, \dots, k$$

若将  $\{\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \dots, \bar{\theta}_k\}$  视为参数为  $\theta$  的  $k$  个不等精度的观测值,或认为来自  $k$  个不同样本集的观测值,则利用最大似然估计方法可得  $\theta$  的估计值为

$$\hat{\theta} = \bar{\theta} = \left( \sum_{j=1}^k \frac{1}{\hat{\sigma}_j^2} \bar{\theta}_j \right) \left( \sum_{j=1}^k \frac{1}{\hat{\sigma}_j^2} \right)^{-1}$$

方差为

$$\hat{\sigma}^2 = \left( \sum_{j=1}^k \frac{1}{\hat{\sigma}_j^2} \right) \left( \sum_{j=1}^k \frac{1}{\hat{\sigma}_j^2} \right)^{-2} = \left( \sum_{j=1}^k \frac{1}{\hat{\sigma}_j^2} \right)^{-1}$$

## 2) 小样本贝叶斯数据融合

假设小样本数据之前有  $n$  组同一类型的先验信息,与小样本具有相容性。由每一组先验样本可以得到其分布参数  $\theta$  先验密度  $\pi_i(\theta)$ , 且其权重为  $b_i, (i = 1, 2, \dots, n)$ 。则关于参数  $\theta$  的先验分布密度为

$$\pi(\theta) = \sum w_i \pi_i(\theta)$$

其中,  $w_i = b_i / \sum b_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。通过贝叶斯公式可得分布参数  $\theta$  的后验密度为

$$\pi(\theta | X) = \frac{f(X | \theta) \pi(\theta)}{\int_{\Theta} f(X | \theta) \pi(\theta) d\theta}$$

其中,  $\Theta$  是参数空间,  $X$  为现场试验中获得的样本,  $f(X | \theta)$  是  $\theta$  给定时子样  $X$  的分布密度。这样可得  $\theta$  的后验密度为

$$\pi(\theta | X) = \frac{1}{m(X | \pi)} \sum_{i=1}^n w_i \pi_i(\theta) f(X | \theta)$$

其中,  $m(X | \pi) = \int_{\Theta} f(X | \theta) \pi(\theta) d\theta$  为  $X$  的边缘密度。

记为

$$\lambda_i(X) = \frac{w_i m(X | \pi_i(\theta))}{m(X | \pi(\theta))}, i = 1, 2, \dots, n$$

则有计算公式为

$$\pi(\theta | X) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(X) \pi_i(\theta | X)$$

说明在有多种先验信息的情况下,  $\theta$  的后验分布分别由多种后验分布融合而成,这些后验分布的加权平均即为融合后验分布。

## 2.3 评估数据归一化处理及指标综合方法

### 2.3.1 归一化数据预处理方法

在制导控制性能仿真评估的指标经计算后,具有不同的类型和量纲,必须先按照一定的效用函数将各指标进行标准化处理,将其归一化到某一无量纲区间,得到统一的指标分值,解决指标量纲、取值范围、评价趋势等不同的问题,以进行后续综合评估。

制导控制性能评估指标类型有线性递减型、线性递增型、线性倒梯型、线性梯型 4 种。

#### 1) 线性递减型

线性递减型也称逆向型或成本型指标,越小越好。其归一化模型如图 6(a) 所示。

$$Y = \begin{cases} M, & x \leq a \\ (M - L) \frac{b - x}{b - a} + L, & a < x < b \\ L, & x \geq b \end{cases}$$

#### 2) 线性递增型

线性递增型也称正向型或效益型指标,越大越佳。其归一化模型如图 6(b) 所示。

$$Y = \begin{cases} L, & x \leq a \\ (M - L) \frac{x - a}{b - a} + L, & a < x < b \\ M, & x \geq b \end{cases}$$

#### 3) 线性倒梯型

线性倒梯型最佳值处于某两值之外,其归一化模型如图 6(c) 所示。

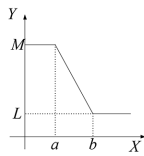
$$Y = \begin{cases} M, & x \leq a \text{ 或 } x \geq b \\ (M-L) \frac{b-x}{b-a} + L, & a < x < c \\ L, & c \leq x \leq d \\ (M-L) \frac{x-c}{d-c} + L, & d < x < b \end{cases}$$

4) 线性梯型

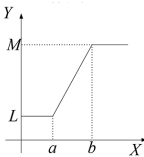
线性梯型最佳值处于某两值之间,其归一化模型如图

6(d)所示。

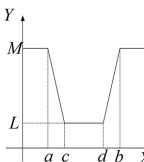
$$Y = \begin{cases} L, & x \leq a \text{ 或 } x \geq b \\ (M-L) \frac{x-b}{b-a} + L, & a < x < c \\ M, & c \leq x \leq d \\ (M-L) \frac{d-x}{d-c} + L, & d < x < b \end{cases}$$



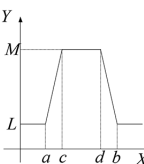
(a) 线性递减型指标归一化模型



(b) 线性递增型指标归一化模型



(c) 线性倒梯型指标归一化模型



(d) 线性梯型指标归一化模型

图 6 指标归一化模型

2.3.2 指标综合

加乘综合评估方法是一种简单直接的指标综合评估方法。加乘混合模型兼有加法和乘法两种方法的性质,在程度上介于两者之间。如对被评价事物的内部关系分析得比较准确,有的部分需要加法合成,有的部分需要乘法合成,这时就可以用加乘综合方法。采用同类指标相乘、异类指标相加的方法对综合评价结果进行合成,计算公式为

$$Z = \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m w_{ij} Y_{ij}$$

其中,  $w_{ij}$ 、 $Y_{ij}$  分别为第  $i$  类第  $j$  个指标的权重和指标评价价值,  $n$  为指标个数,  $m$  为同类指标个数。

3 仿真案例及分析

3.1 仿真案例计算

综合以上评估流程及方法,本文将完成对某双模复合制导控制性能的指标体系构建、指标权重设计、底层指标多源数据融合及综合评估。

首先对双模复合制导控制系统性能建立如图 7 所示的指标体系。

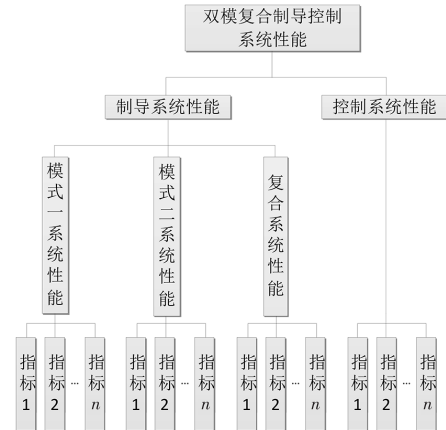


图 7 某双模复合制导控制系统指标体系示意图

结合评估指标的特性,采用主客观权重设计的直接赋值法与客观权重设计的变异系数法相结合的方式,完成对图 7 所示的指标体系的权重设计过程,得到每一项指标权重如表 1 所示。

表 1 某双模复合制导控制系统指标权重设计

指标名称	指标权重	权重设计方法
制导系统性能	0.500 000	专家赋权法
控制系统性能	0.500 000	专家赋权法
模式一系统性能	0.333 333	专家赋权法
模式二系统性能	0.333 333	专家赋权法
复合系统性能	0.333 333	专家赋权法
模式一指标 1	0.234 196	变异系数法
模式一指标 2	0.178 870	变异系数法
模式一指标 3	0.234 196	变异系数法
模式一指标 4	0.118 541	变异系数法
模式一指标 5	0.234 196	变异系数法
模式二指标 1	0.254 875	变异系数法
模式二指标 2	0.208 916	变异系数法
模式二指标 3	0.254 875	变异系数法
模式二指标 4	0.147 152	变异系数法
模式二指标 5	0.134 181	变异系数法
复合指标 1	0.313 910	变异系数法
复合指标 2	0.190 944	变异系数法
复合指标 3	0.181 236	变异系数法
复合指标 4	0.313 910	变异系数法
控制系统指标 1	0.135 124	变异系数法
控制系统指标 2	0.139 113	变异系数法
控制系统指标 3	0.132 689	变异系数法
控制系统指标 4	0.136 691	变异系数法
控制系统指标 5	0.175 532	变异系数法
控制系统指标 6	0.140 425	变异系数法
控制系统指标 7	0.140 425	变异系数法

采用大样本经典频率数据融合与小样本贝叶斯数据融合相结合的方式完成双模复合制导控制系统性能指标体系的多源数据(即半实物仿真数据与实测数据)的数据融合,融合结果如表 2 所示。

表2 某双模复合制导控制系统数据融合结果

底层指标名称	融合结果
模式一指标 1	1.000 000
模式一指标 2	-72.600 000
模式一指标 3	1.000 000
模式一指标 4	0.173 333
模式一指标 5	1.000 000
模式二指标 1	1.000 000
模式二指标 2	5.666 667
模式二指标 3	1.200 000
模式二指标 4	1.600 000
模式二指标 5	31.496 667
复合指标 1	1.000 000
复合指标 2	7.266 667
复合指标 3	3.200 000
复合指标 4	3.200 000
控制系统指标 1	19.800 000
控制系统指标 2	1 397.333 333
控制系统指标 3	11.333 333 3
控制系统指标 4	-0.006 667
控制系统指标 5	2.666 667
控制系统指标 6	0.393 333
控制系统指标 7	13.766 667

采用线性递减型、线性递增型、线性倒梯型、线性梯型四种预处理方法完成对图7所示的指标体系的归一化处理,结果如图8所示。

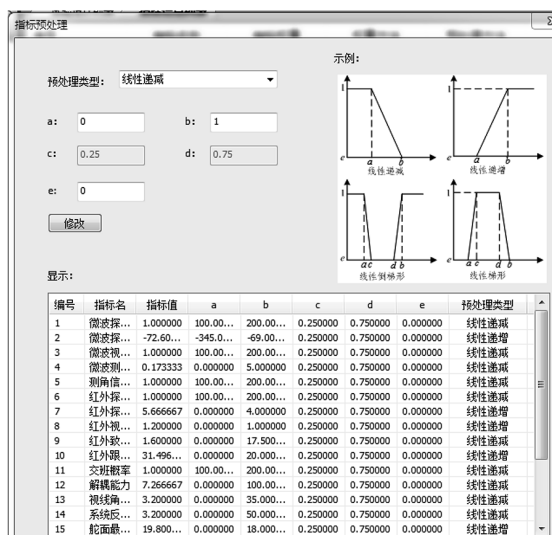


图8 双模复合制导控制系统指标体系预处理界面

最终得到该双模复合制导控制系统指标体系的评估值为0.887,如表3所示。

表3 某双模复合制导控制系统指标综合评估结果

评估指标名称	评估值
模式一系统性能	0.993 557
模式二系统性能	0.986 545
复合系统性能	0.949 464
制导系统性能	0.976 521
控制系统性能	0.798 367
双模复合制导控制系统性能	0.887 444

### 3.2 评估结果分析

在本文的制导控制系统性能评估过程中,对评估结果影响较大的环节是底层指标评估和综合权重设计。底层指标评估过程中的指标数据归一化处理和多元数据融合计算是其中重要的影响因素。

#### 3.2.1 评估数据样本量的影响

对该双模复合制导控制系统性能评估中,涉及多元数据融合的底层评估指标均为系统综合性能指标,多元数据来源于靶试飞行数据和半实物仿真数据,某些数据样本数量过少会对融合结果有一定影响。

#### 3.2.2 指标数据归一化参数的影响

底层指标数据的归一化计算涉及指标归一化类型的确定和对应归一化参数的确定。本文评估中,存在部分底层指标暂时无法确定合理的归一化参数的问题,因此在评估过程中作了如下简化处理。

对于线性递减型指标,均统一按照技术要求值对应归一化结果0.8、0对应归一化结果1进行参数设置,不一定符合所有指标的实际情况,对评估结果会有一定影响。对于线性递增型指标,满足技术要求的情况下,均统一按照归一化结果为1处理,实际所有该类指标的试验数据均满足技术要求,因此评估值均归一化为1,但这种处理方法可能导致最终评估值偏高。

#### 3.2.3 指标权重的影响

从赋权时数据来源的角度来分,赋权法划分成主观赋权法和客观赋权法两类。权重设计应该是多次循环、不断调整修正的过程,既要充分利用已知的客观信息,又能最大限度地考虑评估决策者的交互要求,通过对权重的不断调整和修正最终产生最佳协调权重,从而使评估结果更具合理性。

## 4 结束语

本文针对某双模复合制导控制系统,提出了一种基于多元数据融合的双模复合制导控制系统性能评估方法,通过指标体系的构建及指标权重的设计等手段,使制导控制系统性能可数值化,基于相容性检验的Bayes多元异质数据融合方法,使样本数不同的半实物仿真数据和实测数据的融合结果真实性程度更高,评估结果更可信。该方法已应用于双模复合制导控制系统性能评估中,并可推广至其他制导控制系统,具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 刘灏哲. 面向多元小子样试验数据的系统性能评估方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2024:21.
- [2] 宁小磊,吴颖霞. 基于等效样本和实仿融合的现场小子样试验制导精度评估方法[J]. 中国惯性技术学报,2021,29(2):264-272
- [3] 陈璇,李奇,李博文,等. 基于多元数据可信度的制导精度融合评估[J]. 空天防御,2020,3(4):14-20.
- [4] 庞博,李艳红,田义,等. 雷达/红外复合导引及半实物仿真技术发展及展望[J]. 空天防御,2023,6(4):17-23, 30.
- [5] 许永飞. 弹道导弹制导精度综合评估关键技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2024:21.
- [6] 李鑫,王雨潇,赵显宇. 基于先验信息可信度的制导精度Bayes分析研究[J]. 自动化应用,2021,(7):4-7.
- [7] 孟博. 空空导弹制导精度仿真评估系统设计[J]. 舰船电子工程,2022,42(10):93-95.

(下转第154页)