

12-21-2022

Reliability Parameter Optimization Complex System Simulation Based on R-VIKOR Method

Zhiguang Wang

Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Baiting Liu

Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Xiaolei Wang

Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

Tao Liu

Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

See next page for additional authors

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.

Reliability Parameter Optimization Complex System Simulation Based on R-VIKOR Method

Abstract

Abstract: The operation of complex simulation system is not isolated, and always affected by multiple external factors and its own performance. In simulation reliability calculation, parameters need to be chosen, and different performance indexes need to be taken into account when comparing with the reference model. The research is transformed into the multi-attribute decision. *An system simulation trusted parameter optimization method based on R-VIKOR(resist rank reversal of visekriterijumska optimizacija | kompromisno resenje) is proposed. Multiple sets of aerodynamic parameters of the new model are obtained through model migration theory, and similarity calculation is carried out with the optimal parameters of the basic model, and more reliable aerodynamic parameters for the new aircraft model with similar aerodynamic shape are provided.*

Keywords

R-VIKOR(resist rank reversal of visekriterijumska optimizacija, kompromisno resenje), model of migration, credibility assessment, parameter optimization, pneumatic parameters

Authors

Zhiguang Wang, Baiting Liu, Xiaolei Wang, Tao Liu, and Zhaowei Yang

Recommended Citation

Zhiguang Wang, Baiting Liu, Xiaolei Wang, Tao Liu, Zhaowei Yang. Reliability Parameter Optimization Complex System Simulation Based on R-VIKOR Method[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(12): 2670-2679.

基于R-VIKOR方法的复杂系统装备仿真可信参数优选

王智广, 刘柏廷, 王晓雷, 刘涛, 杨召伟

(北京仿真中心 航天系统仿真重点实验室, 北京 100854)

摘要: 复杂仿真系统的运行往往不是孤立的, 它总是受到多重外部因素和自身性能的影响, 在进行仿真可信度计算时, 不可避免地涉及到参数的选择, 在与参考模型进行比较时, 需要同时考虑不同的性能指标, 这就转化为多属性决策问题的研究范畴。提出一种基于R-VIKOR(resist rank reversal of vise kriterijumska optimizacija | kompromisno resenje)方法的复杂系统仿真可信参数优选方法, 通过模型迁移理论获得新模型的多组气动参数, 与基础模型的最优参数进行相似性计算, 为具有相似气动外形的新复杂系统模型提供更可靠的气动参数。

关键词: R-VIKOR(resist rank reversal of vise kriterijumska optimizacija | kompromisno resenje); 模型迁移; 可信性评估; 参数优选; 气动参数

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2022)12-2670-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-FZ0941

Reliability Parameter Optimization Complex System Simulation Based on R-VIKOR Method

Wang Zhiguang, Liu Baiting, Wang Xiaolei, Liu Tao, Yang Zhaowei

(Science and Technology on Special System Simulation Laboratory, Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China)

Abstract: The operation of complex simulation system is not isolated, and always affected by multiple external factors and its own performance. In simulation reliability calculation, parameters need to be chosen, and different performance indexes need to be taken into account when comparing with the reference model. The research is transformed into the multi-attribute decision. *An system simulation trusted parameter optimization method based on R-VIKOR(resist rank reversal of visekriterijumska optimizacija | kompromisno resenje) is proposed. Multiple sets of aerodynamic parameters of the new model are obtained through model migration theory, and similarity calculation is carried out with the optimal parameters of the basic model, and more reliable aerodynamic parameters for the new aircraft model with similar aerodynamic shape are provided.*

Keywords: R-VIKOR(resist rank reversal of visekriterijumska optimizacija | kompromisno resenje); model of migration; credibility assessment; parameter optimization; pneumatic parameters

引言

当仿真模型确定后, 工程技术人员往往会面对非常多的仿真参数, 选择和调整仿真参数成为仿真成败的关键因素。仿真模型不变, 不同的仿真参数可能会带来截然不同的仿真结果, 甚至是错误的结果。通常而言, 一旦对仿真非常熟悉,

积累了较多的仿真经验, 借助于实验数据和人工经验便成为选择和调整参数的一项基本功。但人工调整, 总是与人的经验密切相关, 一旦对仿真系统知之较少, 就无从谈起人工调参。这里强调的调参, 是指模型自身涉及到的参数选择和调整, 如高超声速飞行器飞行时的气动参数。参数优化,

收稿日期: 2022-08-09 修回日期: 2022-10-26

第一作者: 王智广(1995-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为制导控制半实物仿真、模型可信性。

是在仿真模型确定后, 借助于选择和调整参数的操作, 提高仿真模型可信性的一项举措。通过寻找仿真环境中, 各项仿真性能参数的最佳搭配组合, 与参考模型进行比较, 实现仿真性能与实际运行环境下的最佳逼近模拟。

仿真参数优化已经广泛地应用于科学研究的不同领域, 如文献[1]提出了一种基于模型的金属惰性气体焊接过程参数优化方法。文献[2]利用北京气候中心的亚季节到季节预报模型, 使用拉丁超立方抽样方法对几个关键物理参数进行扰动, 以找到自由运行仿真中关于 Madden-Julian 振荡更好的配置。研究发现, 通过多个参数的组合扰动可以获得最优性能。

实现仿真参数的优化, 目的是服务于仿真系统本身的真实性与可信性, 因此需要结合大量的仿真数据, 对影响仿真系统本身可信性的仿真参数进行有效地遴选筛查。面对仿真数据, 文献[3]指出寻找一个最优的系统设计需要有组织地对参数空间进行大范围的扫描, 提出了一种利用云计算来实现高效仿真优化策略的框架。参数优化的求解, 最终无外乎转化为运筹学的最优化问题, 但最优化的求解往往只是使某一项设计指标达到最优, 而不是全局下的绝大多数指标的均衡考虑。杨明等^[4]针对参数选择问题, 建立了基于模型可信度优化的参数估计方法, 开展拉丁超立方实验, 将每组仿真参数与模型可信度建立对应关系, 进而采用支持向量机算法与遗传算法, 实现了动态仿真可信度优化问题向静态的函数优化问题的转化, 已经显现多属性决策 (multiple attribute decision making, MADM) 方法的影子。克服单一目标或指标决策所带来的考虑不全的弊端, 就需要进行多目标或多属性决策。文献[5]建立了基于仿真优化的多目标确定性粒子群算法用于仿真参数的优选, 算法易于实现, 且计算量合理。文献[6]针对单目标优化方法无法兼顾到飞控系统多个性能指标同时优化的问题, 构建了基于多目标决策的参数优化方法, 使用基于 Pareto 的

遗传算法求解多目标函数的最优解集, 保留了解的多样性。

MADM 方法是多目标优化之外的另一种参数优化新方法, 同样可以进行多种属性指标的权衡折中优化, 有时 MADM 方法又会被称为多准则决策 (multiple criteria decision making, MCDM)。文献[7]将优劣解距离法 (technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS) 用于制导系统设计参数优化研究中, 能够从待选仿真参数方案中筛选出正负理想解, 将每组仿真参数与正负理想解间进行距离比较, 充分考虑了制导系统性能与成本因素, 但却没有考虑到 TOPSIS 方法本身存在的秩序反转缺陷^[8], 造成所优选参数的可信程度降低。文献[9]研究了不同赋权下使用 TOPSIS 方法对制导系统参数进行设计决策的问题, 指出参数决策过程必须与系统仿真结果配合进行, 得出熵值赋权法的可靠性优于层次分析法和经验赋权法, 但该文献同样也没有认识到 TOPSIS 自身潜在的秩序反转问题, 可能会带来决策前后不一致的后果。张一航等^[10]将 Monte-Carlo 方法应用于制导系统不确定性模型的决策过程中, 用于克服参数漂移问题, 近似生成决策准则的概率分布函数, 再使用 TOPSIS 方法获得了具有较强鲁棒性的参数选择决策建议。

事实上, 不仅 TOPSIS 方法存在秩序反转的缺陷, 其他许多 MADM 方法也都存在秩序反转问题, 包括层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP)^[11]、数据包络分析法 (data envelopment analysis, DEA)^[12]等, 这为 MADM 方法的推广和使用蒙上了一层阴影。文献[13]将 VIKOR (vise kriterijumska optimizacija i kompromisno resenje) 方法引入到制导系统仿真参数的优选中, 在群体效用值与个体遗憾值之间进行折中, 所优选出来的仿真参数方案是全面分析决策者不同心态下的妥协解, 指出 VIKOR 方法遵循了成本准则与稳定性准则, 而 TOPSIS 方法则在这里有所不足。文献[14]针对 VIKOR 方法存在秩序反转的问题, 提出

了熵权 VIKOR 方法, 对指标数据进行了规范化处理, 结合熵权法确定指标权值, 并应用于自寻的制导系统的仿真参数优选问题求解, 为仿真参数的可信性和仿真过程的一致性提供了借鉴。目前, 开展同时兼顾仿真系统各项性能均衡的多属性性能指标参数优化关键技术的研究仍然偏少, 且研究内容相对分散。

因此, 聚焦于单个仿真模型固定情况下, 优化其仿真参数, 进而提高其仿真可信度, 从而实现仿真决策秩序保持是具有非常重要的应用价值。为了提高评估的有效性和一致性, 本文从评估的全局出发, 构建了同时兼顾群体效用值和个体遗憾值的改进的 R-VIKOR(resist rank reversal of VIKOR)方法, 理论分析与实例验证均说明 R-VIKOR 方法解决了秩序反转问题, 实现了秩序保持。将 R-VIKOR 方法应用于复杂系统装备再入阶段的气动参数优选评估中, 实现了仿真模型可信度的增强, 丰富了仿真系统参数优选的研究内容。

1 复杂系统装备仿真可信参数优选研究

复杂仿真系统的复杂特性既体现在自身系统构造的复杂上, 还体现在参数众多, 在缺乏实物实验时优化调整参数缺少数据和经验。涉及到复杂仿真系统的可信度是对模型/仿真系统/仿真实验结果是否可信以及科学程度的分析、计算和评价^[15]。仿真系统可信度评估与 VV&A 工作相互交织, 成为评估仿真系统可信与否及可信程度大小的定量与定性相结合的工具。

使用 S 表示所研究的复杂仿真系统, $P=\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$ 、 $Y=\{Y_1, Y_2, \dots, Y_l\}$ 与 $X=\{x_1, x_2, \dots, x_i\}$ 分别表示 S 的参数集合、因变量输出集合与自变量输入变量集合, 那么因变量都可以表示为关于输入变量集合与参数集合的函数, 即 $Y_1=f_1(X, P)$, $Y_2=f_2(X, P)$, \dots , $Y_l=f_l(X, P)$ 。根据复杂仿真系统的运行规律和所处的内外环境, 以

及自身运行的阶段, 在与参考模型比较时, 提取它所涉及到的全部性能指标, 这些性能指标包括所有因变量指标和部分的自变量指标, 由领域知识或专家经验决定从全部指标中选择最具代表性的指标组成决策指标集合 $C=\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 。通过实验或仿真获取参数取值, 进行仿真实验, 获得相应的指标值。假设共计获得了 m 组指标值向量, 对于参数取值 $P_i=\{p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{ik}\}$, 相应的指标值向量 $A_i=\{c_{i1}, c_{i2}, \dots, c_{in}\}$, $i=1, 2, \dots, m$ 。为了获得全局最优参数组合, 理论上, 参数组合方式可以是任意多种, 相应获取的指标值向量亦是任意多种。

不同于传统的运筹学最优化理论, 也不同于群体智能优化算法, 本文将采用多属性决策方法获得多属性决策矩阵的最佳取值方式, 不需要采用穷举法或群体智能优化算法来获得最优参数, 此时基于 MADM 的仿真优选问题可转化为

$$\max_{i=1}^m Q_i = f(A_i) \quad (1)$$

式中: f 为关于仿真方案下所选择某种具体的 MADM 的函数表达式; Q_i 为 A_i 在 f 作用下的得分值。有些 MADM 的评价结果是越小越好, 例如 VIKOR 方法。所评价的对象数据既可以是静态的, 也可以是动态的。

2 抵抗秩序反转的 VIKOR 改进方法

2.1 经典 VIKOR 方法

获取到 m 组指标值向量, 组成原始决策矩阵为

$$F = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1n} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix}_{m \times n} \quad (2)$$

经典 VIKOR 方法的实现步骤:

步骤 1: 确定所有指标 $C_j, j=1, 2, \dots, n$ 的指标最优值 c_j^+ 与指标最差值 c_j^- 。

如果 C_j 是效益型指标, 那么

$$\begin{cases} c_j^+ = \max_i c_{ij} \\ c_j^- = \min_i c_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

如果 C_j 是成本型指标, 那么

$$\begin{cases} c_j^+ = \min_i c_{ij} \\ c_j^- = \max_i c_{ij} \end{cases} \quad (4)$$

步骤2: 分别计算每个评价对象 A_i 的群体效用值 S_i 与个体遗憾值 R_i , $i=1, 2, \dots, m$ 。

$$S_i = \sum_{j=1}^n \left(w_j \frac{c_j^+ - c_{ij}}{c_j^+ - c_j^-} \right) \quad (5)$$

$$R_i = \max_j \left(w_j \frac{c_j^+ - c_{ij}}{c_j^+ - c_j^-} \right) \quad (6)$$

步骤3: 计算每个评价对象 A_i 的得分值 Q_i , $i=1, 2, \dots, m$ 。

$$Q_i = v \frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-} + (1-v) \frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \quad (7)$$

其中,

$$S^+ = \max_i S_i, S^- = \min_i S_i \quad (8)$$

$$R^+ = \max_i R_i, R^- = \min_i R_i \quad (9)$$

另外, 式(7)中的参数 $v \in [0, 1]$, 表示支持群体效用值的权值, 同时 $(1-v) \in [0, 1]$ 表示个体遗憾值的权值, 一般而言, $v=0.5$ 视作二者等权。显然, 当式(7)中的分母为0时, 则公式变为无意义, 这也是VIKOR方法的不足之处。

步骤4: 根据 S_i 、 R_i 与 Q_i 得分结果对评价对象进行升序排列, 从而获得最终的评价结果, 并确定最优评价对象。在VIKOR方法中, 评价结果得分越低, 则排序越靠前。

2.2 改进的VIKOR方法

在经典的VIKOR方法的评价过程中, 如果评价对象的数量增加或减少, 可能会引起评价结果的排序改变。在评价对象改变时, 可能会引起包括指标最优值、指标最差值、群体效用值和个体遗憾值等的改变, 所以极易导致秩序反转现象的发生。秩序反转现象表明评价结果的一致性和可

信度存在矛盾, 也表明评价方法本身存在缺陷。找到客观评价的评价方法固然重要, 也要保证评价结果可信、一致。参考值的变化实质上是评价尺度的变化。因此, 在评价中, 如果能找到最优方案和最差方案作为常数参考值, 则评价对象的评价结果是固定的, 就自然可以避免秩序反转现象。基于这一认识, 本文试图通过改进经典的VIKOR方法来解决秩序反转问题。

导致VIKOR方法中存在秩序反转问题的原因在于人们局限于局部数据, 而非全局数据。假设基于评价问题本身的分析, 已经通过统计学方法、领域知识和专家经验等, 获得了各个指标的历史最大值和历史最小值。由此提出改进的能够抵抗秩序反转的R-VIKOR方法, 该方法的设计思路为:

(1) 从评估问题的全局收集数据, 确定每个指标的历史最值, 保证评估过程中, 评估尺度不变;

(2) 根据指标属性进行合理的规范化处理;

(3) 从根本上确保评估得分值总是有意义。

其实现包括以下6步:

步骤1: 分别确定每个指标的历史最大值 M_j 和历史最小值 m_j , $j=1, 2, \dots, n$ 。无论是原有的评价对象的增加、减少或替换, 对于任意的属性指标值 c_{ij} , 都满足条件 $m_j \leq c_{ij} \leq M_j$ 。

步骤2: 指标数据的规范化。

如果 C_j 是效益型指标, 那么

$$r_{ij} = (c_{ij} - m_j) / (M_j - m_j), \quad i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中: r_{ij} 为规范化后的属性指标值。

如果 C_j 是成本型指标, 那么

$$r_{ij} = (M_j - c_{ij}) / (M_j - m_j), \quad i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

步骤3: 从全局视角, 确定规范化的各个指标数据的最大值和最小值分别为

$$\begin{cases} r_j^+ = 1 \\ r_j^- = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, $r_j^- \leq r_{ij} \leq r_j^+$, $i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, n$ 。

从全局的视野来看, 假设在规范化数据集中存在2个虚拟的正、负理想解分别是 N^+ 与 N^- , 正理想解是最优解, 而负理想解是最差解, 用于改进经典VIKOR方法的不变的参考对象:

$$\begin{cases} N^+ = \{r_1^+, r_2^+, \dots, r_n^+\} = \{1, 1, \dots, 1\} \\ N^- = \{r_1^-, r_2^-, \dots, r_n^-\} = \{0, 0, \dots, 0\} \end{cases} \quad (13)$$

步骤4: 计算评价对象 A_i 的群体效用值 S_i 与个体遗憾值 R_i , $i=1, 2, \dots, m$ 。

$$S_i = \sum_{j=1}^n \left(w_j \frac{r_j^+ - r_{ij}}{r_j^+ - r_j^-} \right) \quad (14)$$

$$R_i = \max_j \left(w_j \frac{r_j^+ - r_{ij}}{r_j^+ - r_j^-} \right) \quad (15)$$

规范化后的评价对象 $N_i = \{r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}\}$, $i=1, 2, \dots, m$ 。

步骤5: 计算评价对象 A_i 的量化评价结果得分 NQ_i , $i=1, 2, \dots, m$:

$$NQ_i = v \frac{S_i - S^-}{S^+ - S^-} + (1-v) \frac{R_i - R^-}{R^+ - R^-} \quad (16)$$

其中,

$$S^+ = 1, S^- = 0 \quad (17)$$

$$R^+ = \max_j w_j, R^- = 0 \quad (18)$$

当规范化后的评价对象 N_i 满足条件 $N_i = N^+$ 时, 可得 $S^- = 0$ 、 $R^- = 0$ 。同时, 当 $N_i = N^-$, 可得 $S^+ = 1$ 、 $R^+ = \max_j w_j$ 。

因此, 式(16)可以改写为

$$NQ_i = vS_i + (1-v) \frac{R_i}{R^+} \quad (19)$$

此外, $v \in [0, 1]$ 拥有和经典VIKOR方法相同的含义, 在此不再赘述。因为 $0 < R^+ \leq 1$, 所以式(19)总是有意义的。

步骤6: 根据 S_i 、 R_i 与 NQ_i 得分结果对评价对象进行升序排列, 从而获得最终的评价结果, 并确定最优评价对象。在R-VIKOR方法中, 评价对象得分越低, 其对应的排序越靠前。

3 飞行仿真实验与参数优选评估

本节将进行拟平衡滑翔制导控制仿真实验, 实现气动参数的优选。为了保证仿真实验更符合实际飞行情况, 本仿真实验选择基础复杂系统装备模型(记为基础模型)为参考模型, 该模型的气动参数已知(由风洞试验和CFD计算获得), 现有一新复杂系统装备模型(记为新模型)作为仿真模型, 与参考模型比较具有较高的仿射相似度, 但新模型没有完整的风洞试验获取的气动参数。为了加快新模型的研发速度, 降低研发成本, 通过模型迁移理论分别获得基础模型与新模型的多组气动参数^[16], 这些气动参数本身已经具有一定的可信性, 但同时存在迁移理论所带来的不确定性和未知性。以新模型作为仿真模型, 对其进行气动参数的优选, 要使所选择出的气动参数能够保证新模型具有较高的可信度。

新模型气动参数的整个优选过程分两步实施: 第一步, 采用R-VIKOR方法, 通过仿真数据, 建立基础模型多属性决策意义下的迁移气动参数的优选方法, 在确保仿真输出一致性情况下, 完成基础模型气动参数在迁移理论下的可信性优化; 第二步, 保证新模型与基础模型的外形相似度满足大于0.8的前提下, 使新模型与基础模型具有较高的相似性, 二者气动参数都满足高超声速相似迁移理论, 将新模型迁移气动参数与基础模型被优选出的迁移气动参数进行相似性比较, 选出相似性最高者即为新模型具有较高可信度的气动参数。

仿真模型气动参数可信性优化的流程见图1, 整个仿真过程具有相同的初始状态、相同的指令信号和相同的仿真条件, 气动参数的模型迁移方法相同, 确保仿真结果具有可比性, 且基础模型与新模型具有较高的外形相似性。在图1中, 参考模型的已知气动参数为实验获取的, 假设其完全可信, 而第1组参数、第2组参数、...、第 m_0 组参数为参考模型通过模型迁移方法获取的迁移

气动参数, 采用 R-VIKOR 方法寻找出参考模型某一组迁移气动参数, 使参考模型的仿真输出与参考模型在已知参数下的仿真输出具有高度的一致性, 进而以此为参考依据, 寻找仿真模型具有较高可信性的迁移气动参数。其中, 仿真模型具有 m_1 组迁移气动参数。

通过模型迁移方法获得了基础模型共计 4 组迁移气动参数。图 2 (a) 给出了飞行高度为 50 km 下的

基础模型已知升力系数与迁移方法获得的升力系数关于攻角和马赫数之间的曲面图, 图 2(b) 给出了相应的阻力系数关于攻角和马赫数之间的曲面图。图 3 给出了飞行高度为 40 km 下的基础模型升力系数、阻力系数关于攻角和马赫数之间的曲面图。基础模型已知气动参数的曲面加上了星号标注, 基础模型的已知气动参数曲面与基础模型迁移方法获得的气动参数曲面之间具有较大的相似性。

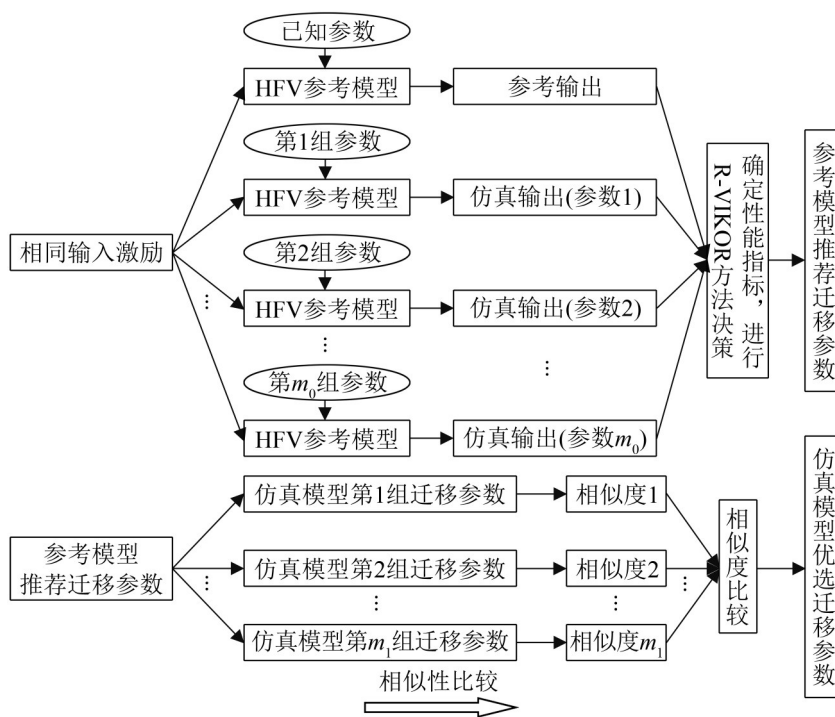


图 1 具有高仿射相似度的气动参数优选流程

Fig. 1 Optimization process of aerodynamic parameters with high affine similarit

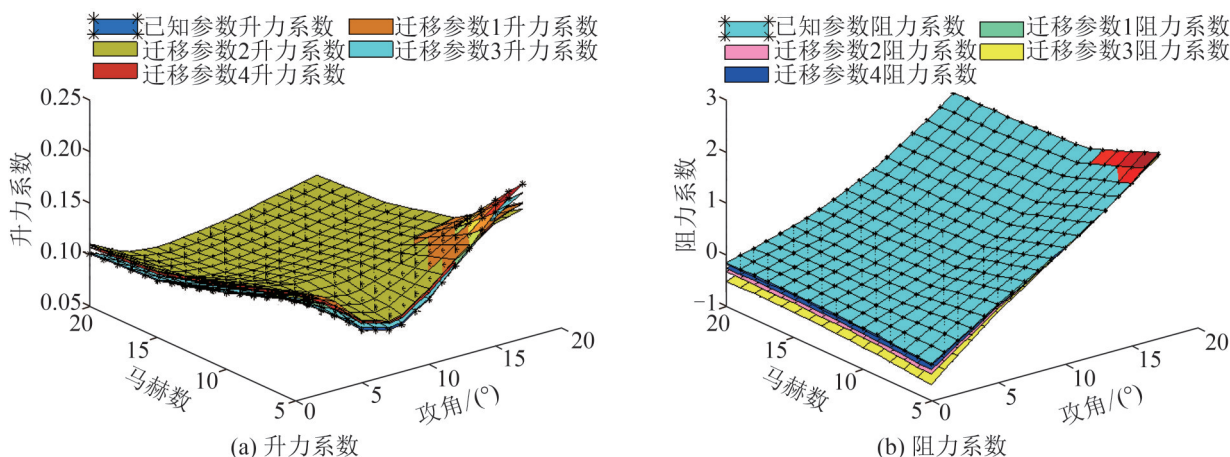


图 2 基础模型 50 km 下气动参数关于攻角与马赫数的拟合曲面

Fig. 2 Fitting surface of aerodynamic parameters of angle of attack and Mach number at 50 km of basic mode

新模型没有完整的气动参数实验数据，通过模型迁移方法获得了 3 组气动参数。图 4~5 展示了

新模型在 50 km 与 40 km 下迁移气动参数关于攻角与马赫数的拟合曲面。

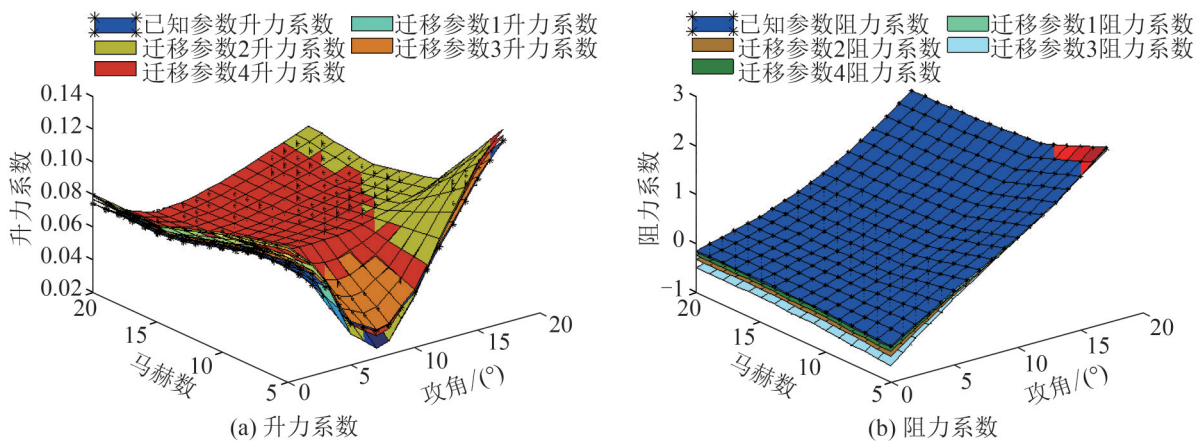


图 3 基础模型 40 km 下气动参数关于攻角与马赫数的拟合曲面

Fig. 3 Fitting surface of aerodynamic parameters of angle of attack and Mach number at 40 km of basic model

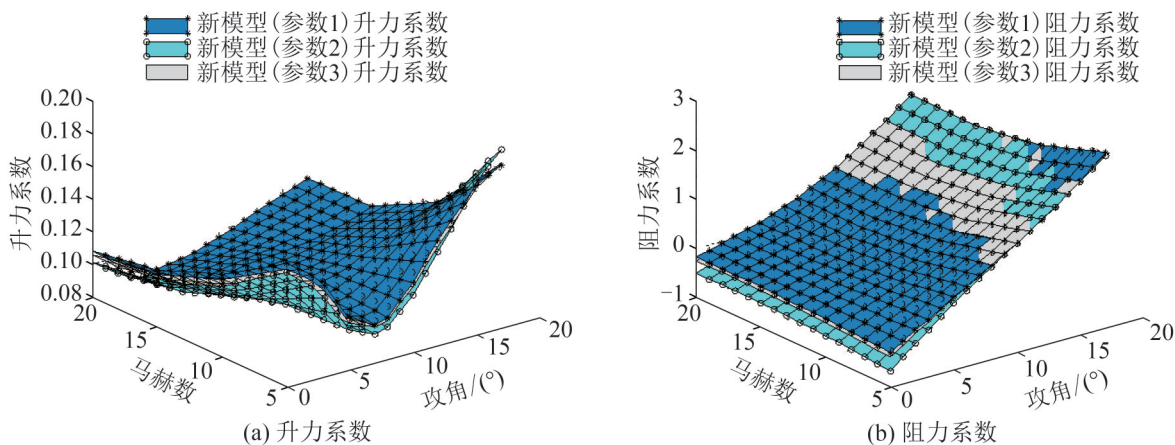


图 4 新模型 50 km 下气动参数关于攻角与马赫数的拟合曲面

Fig. 4 Fitting surface of aerodynamic parameters of angle of attack and Mach number under the new model at 50 km

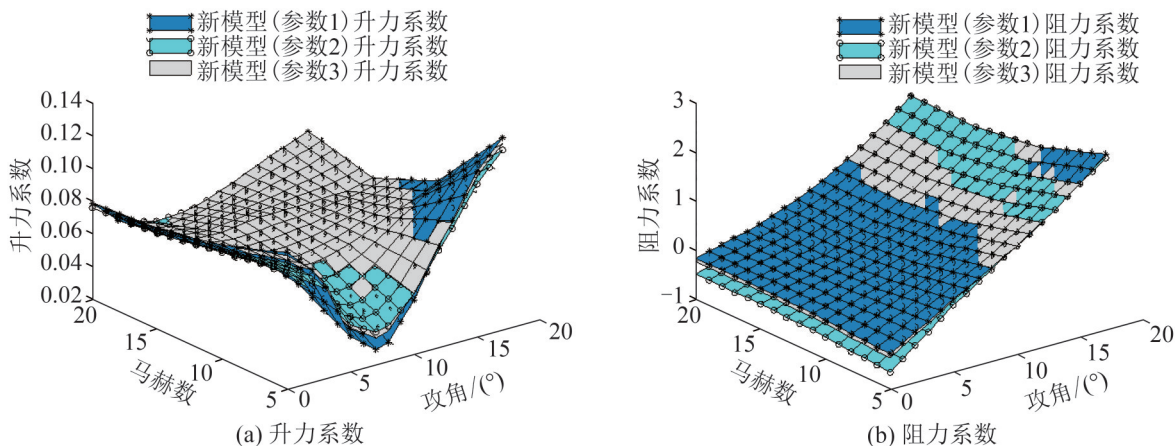


图 5 新模型 40 km 下气动参数关于攻角与马赫数的拟合曲面

Fig. 5 Fitting surface of aerodynamic parameters of angle of attack and Mach number of the new model at 40 km

表1给出了对仿真数据按照误差均值和误差标准差公式予以计算获取的4种性能指标的原始决策数据。

表1 参数优选的原始决策数据

方案	$M_v/(m/s)$	$S_v/(m/s)$	M_h/m	S_h/m
A_1	7.993 5	10.845 8	93.714 0	54.534 6
A_2	9.405 7	12.456 6	109.042 7	63.391 4
A_3	0.962 1	2.163 9	24.059 4	15.137 1
A_4	5.077 9	6.964 9	67.373 7	39.377 0

注: M_v 为速度误差均值; S_v 为速度误差的标准差; M_h 为高度误差均值; S_h 为高度误差的标准差。

使用熵权法依据表1数据计算对应的4种性能指标在保留4位小数下的权值向量为

$$w = [0.251 5, 0.254 5, 0.248, 0.246]$$

从权值的最终计算结果来看, 4种性能指标的权值相差不大, 其中速度误差的标准差 S_v 的权值最大, 说明基础模型在代入4组参数时与基础模型代入已知参数的飞行状态比较接近, 相应的性能指标在权衡方案利弊时发挥的作用相当。

根据每个性能指标的统计规律, 确保每种指标的取值范围包括可能的取值, 确定4种性能指标在再入阶段的统计最小值和最大值如下:

$$m_1 = m_2 = m_3 = m_4 = 0$$

$$M_1 = 10, M_2 = 15, M_3 = 110, M_4 = 100$$

根据R-VIKOR方法的操作步骤计算表1中4种仿真方案的排序结果为

$$A_3 > A_4 > A_1 > A_2$$

使用R-VIKOR方法获得 A_3 排序第一, 即代入第3组迁移气动参数的基础模型会与基础模型(已知参数)具有最高的可信度, 该评价结果是在诸多性能指标中追求了一种效益与成本之间的平衡, 相应的参数选择也是多组迁移参数中最优的, 达到了迁移气动参数的寻优推荐目的。

从基础模型的迁移参数中所优选的推荐气动参数对采用同样迁移方法、且外形具有高度相似性的新模型选择高可信度的气动参数具有启发借鉴意义。采用TIC系数法来比较基础模型优选出

的迁移气动参数与新模型迁移气动参数的相似性。在再入阶段只需要比较升力系数与阻力系数的相似性, 选取攻角、马赫数、高度数据如下:

$$\alpha = [0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5]$$

$$Ma = [5, 10, 15, 20]$$

$$h = [20\ 000, 30\ 000, 40\ 000, 50\ 000, 60\ 000, 70\ 000, 80\ 000]$$

3个关键特征指标交叉形成共计224个特征点数据, 进行两两比较:

$$TIC_i = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (d_0(k) - d_i(k))^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [d_0(k)]^2} + \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [d_i(k)]^2}} \quad (20)$$

式中: $n=224$; $d_0(k)$ 为基础模型获得推荐的迁移参数的第 k 个数据; $d_i(k)$ 为新模型的第 i 组迁移参数的第 k 个数据, $i=1, 2, 3, k=1, 2, \dots, n$ 。

按照式(20)将新模型的3组迁移气动参数与基础模型获得推荐的第3组迁移气动参数进行相似性比较, 可得升力系数相似度、阻力系数相似度, 如表2所示。

表2 新模型迁移气动参数与基础模型推荐气动参数之间的相似度

Table 2 Similarity between aerodynamic parameters transferred from new model and recommended aerodynamic parameters of basic mode

新模型 迁移气动参数	升力系数相似度	阻力系数相似度
第1组	0.119 4	0.927 7
第2组	0.948 6	0.989 7
第3组	0.188 6	0.943 2

不难确定, 新模型的3组迁移气动参数中的阻力系数相似度比较接近, 而升力系数的相似度差异较大。采用式(20)计算得到的结果取值越大相似性就越大, 由此可得, 新模型的第2组迁移气动参数与基础模型被推荐的迁移气动参数相似性最大, 是保证新模型具有较高可信度的迁移气动参数。

为了进一步确定新模型所优选出的迁移气动参数是可信的, 使用式(20)来计算新模型迁移气动

参数与基础模型已知气动参数之间关于升力系数与阻力系数的相似度，具体结果见表3。

表3 新模型迁移气动参数与基础模型已知气动参数之间的相似度

Table 3 Similarity between aerodynamic parameters transferred from new model and known aerodynamic parameters of basic model

新模型 迁移气动参数	升力系数相似度	阻力系数相似度
第1组	0.033 7	0.983 8
第2组	0.409 1	0.918 8
第3组	0.053 8	0.972 6

从表3的数据可知，新模型中的第2组迁移气动参数在与基础模型已知气动参数比较时具有最高的升力系数相似度，而新模型3组迁移气动参数与基础模型已知气动参数的阻力系数相似度都比较接近。

总体而言，无论是将新模型的迁移气动参数与基础模型被推荐的迁移气动参数进行相似性比较，还是将新模型的迁移气动参数与基础模型的已知气动参数进行相似性比较，新模型的第2组迁移气动参数都是相似度最高的，因此是新模型值得信任的迁移气动参数。

4 结论

本文针对仿真系统参数优选往往考虑单一的局面，将多属性决策中的VIKOR方法进行了改进，使其克服了秩序反转问题，在多指标权衡中做到群体效用值与个体遗憾值的统一。在复杂系统装备再入阶段的多种气动参数的优选过程中，实现了各种性能指标的协调优化，提高评估的有效性和一致性。

本文采用的R-VIKOR方法可以为具有相似气动外形的复杂系统装备模型优选气动参数，降低研发成本缩短建模周期，为开展复杂系统装备研发提供便利。但同时也要认识到，优选方法获得的气动参数与通过风洞获取的基础模型的已知气动参数之间还是具有一定差异性的，存在进一步

改善气动参数可信度的需求。

参考文献:

- [1] Chen F F, Xiang J T, Thomas D G, et al. Model-Based Parameter Optimization for Arc Welding Process Simulation [J]. Applied Mathematical Modelling(S0307-904X), 2020, 81: 386-400.
- [2] Liu Xiangwen, Li Weijing, Wu Tongwen, et al. Validity of Parameter Optimization in Improving MJO Simulation and Prediction Using the Sub-Seasonal to Seasonal Forecast Model of Beijing Climate Center[J]. Climate Dynamics(S0930-7575), 2019, 52: 3823-3843.
- [3] Carillo M, Cordasco G, Serrapica F, et al. Distributed Simulation Optimization and Parameter Exploration Framework for the Cloud[J]. Simulation Modelling Practice and Theory(S1569-190X), 2018, 83: 108-123.
- [4] 杨明, 焦松, 李伟, 等. 基于可信度优化的仿真模型参数估计方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 90-94.
Yang Ming, Jiao Song, Li Wei, et al. Estimation Method of Simulation Model Parameters Based on Credibility Optimization[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2014, 42(6): 90-94.
- [5] Pellegrini R, Serani A, Leotardi C, et al. Formulation and Parameter Selection of Multi-Objective Deterministic Particle Swarm for Simulation-Based Optimization[J]. Applied Soft Computing(S1568-4946), 2017, 58: 714-731.
- [6] 徐宁, 董新民, 刘棕成, 等. 基于Pareto集与多目标决策的飞控参数优化[J]. 飞行力学, 2012, 30(3): 245-249.
Xu Ning, Dong Xinming, Liu Zongcheng, et al. Optimization of FCS Parameter Based on Pareto Optimal Set and Multi-Objective Decision[J]. Flight Dynamics, 2012, 30(3): 245-249.
- [7] 张一航, 侯明善. 制导系统设计参数多准则优化决策方法研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(1): 70-75.
Zhang Yihang, Hou Mingshan. Multi-criteria Decision-making for Guidance System Design Parameters[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(1): 70-75.
- [8] Wang Yingming, Luo Ying. On Rank Reversal in Decision Analysis[J]. Mathematical and Computer Modelling(S0895-7177), 2009, 49(5/6): 1221-1229.
- [9] 杜婷, 侯明善. 不同赋权TOPSIS制导系统设计决策比较[J]. 现代电子技术, 2014, 37(9): 15-19.
Du Ting, Hou Mingshan. Comparison Among Different Weighting TOPSIS Methods of Design Parameter Decision Making for Guidance System[J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(9): 15-19.
- [10] 张一航, 侯明善. 基于Monte-Carlo仿真的制导系统多准

- 则决策设计方法[J]. 电子设计工程, 2013, 21(23): 43-46.
- Zhang Yihang, Hou Mingshan. Robust Multi-criteria Decision Making for Guidance System Design Parameters[J]. Electronic Design Engineering, 2013, 21(23): 43-46.
- [11] Saaty T L, Sagir M. An Essay on Rank Preservation and Reversal[J]. Mathematical and Computer Modelling (S0895-7177), 2009, 49(5/6): 1230-1243.
- [12] Meng F Y, Su B, Bai Y. Rank Reversal Issues in DEA Models for China's Regional Energy Efficiency Assessment[J]. Energy Efficiency(S1570-646X), 2019, 12: 993-1006.
- [13] 董典, 侯明善, 殷春武. 导弹拦截目标制导系统的VIKOR方法参数设计[J]. 计算机仿真, 2016, 33(4): 53-57.
- Dong Dian, Hou Mingshan, Yin Chunwu. Parameter Design for Guidance System Based on VIKOR Approach [J]. Computer Simulation, 2016, 33(4): 53-57.
- [14] 杨文光, 吴云洁. 熵权VIKOR方法下的制导系统仿真可信优选研究[J]. 系统仿真学报, 2019, 31(7): 1272-1279.
- Yang Wenguang, Wu Yunjie. Credible Optimum Selection of Guidance System Simulation Based on Entropy Weight VIKOR Method[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(7): 1272-1279.
- [15] 李伟, 林圣琳, 周玉臣, 等. 复杂仿真系统可信度评估研究进展[J]. 中国科学: 信息科学, 2018, 48(7): 767-782.
- Li Wei, Lin Shenglin, Zhou Yuchen, et al. Research Progress on Credibility Assessment of a Complex Simulation System[J]. SCIENTIA SINICA Informationis, 2018, 48(7): 767-782.
- [16] 王浩亮, 李清东, 任章, 等. 基于模型迁移方法的高超声速飞行器建模[J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42(12): 2640-2647.
- Wang Haoliang, Li Qingdong, Ren Zhang, et al. Modeling of Hypersonic Vehicle via Model Migration Method[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2016, 42(12): 2640-2647.