

DOI:10.16356/j.2097-6771.2026.02.010

战斗机总体布置的边界设计与聚类分析

左健巍, 李 军, 祝中强, 姚 远

(中国航空工业集团公司成都飞机设计研究所, 成都 610091)

摘要: 为量化战斗机总体布置设计过程并构造决策模型, 提出了针对总体布置的边界设计与聚类分析方法。首先, 提出了边界波动风险指标, 通过将边界波动风险指标调整为非负, 实现从初始舱位定义到细化舱位定义的更新。同时, 根据边界波动风险由高到低的排序, 可以筛选出 p 截强边界, 定义了使用 p 截强边界构造 p 截强区域的方法。 p 截强区域可作为总体布置聚类过程中的类。然后, 针对聚类分析的实现, 提出了针对总体布置的基于朴素贝叶斯的聚类 (Naive-Bayes-based clustering, NBC) 方法和基于模糊层次分析法的聚类 (Fuzzy analytic hierarchy process-based clustering, FAHPC) 方法。NBC 方法通过对设备进行特征识别, 将各个特征进行编码后应用朴素贝叶斯分类器实现分类。FAHPC 方法首先构造总体布置的指标体系, 使用专家评分法确定各个指标相对于评语集的隶属度, 然后使用模糊层次分析法确定准则层和指标层的权重, 最后以归一化的综合评分结果作为隶属度来确定分类结果。工程算例验证了所提方法的可行性和实用性。

关键词: 总体布置; 边界设计; 聚类分析; 朴素贝叶斯; 模糊层次分析法

中图分类号: V221

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2026)02-0339-11

Boundary Design and Clustering Analysis in General Arrangement for Fighters

ZUO Jianwei, LI Jun, ZHU Zhongqiang, YAO Yuan

(AVIC Chengdu Aircraft Design & Research Institute, Chengdu 610091, China)

Abstract: In order to quantify the design process and construct the decision model of general arrangement for fighters, a boundary design method and two clustering analysis methods for general arrangement are proposed. Firstly, a boundary fluctuation risk indicator is introduced, which can be utilized to update an initial cabin definition to a refined cabin definition by non-negativity adjustment. Simultaneously, based on the ranking of boundary fluctuation risk indicators from high to low, p -cut strong boundaries can be selected and a method for constructing p -cut strong regions using these boundaries is defined. The p -cut strong regions can serve as classes in clustering analysis for general arrangement. Then, two methods are proposed for implementing clustering analysis: Naive Bayes-based clustering (NBC) method and fuzzy analytic hierarchy process-based clustering (FAHPC) method. By feature recognition of equipment, NBC method applies naive Bayes classifier for classification after feature encoding. FAHPC method first constructs an indicator system for general arrangement and uses expert scoring method to determine the membership degree of each indicator relative to the evaluation comment set, and then uses fuzzy analytic hierarchy process to determine weights between the criteria layer and the indicator layer. Finally, normalized comprehensive scores are used as membership degrees to determine classification results. An engineering example validates the feasibility and

收稿日期: 2024-12-12; 修订日期: 2025-08-10

通信作者: 左健巍, 男, 工程师, E-mail: jianweizuo@mail.nwpu.edu.cn.

引用格式: 左健巍, 李军, 祝中强, 等. 战斗机总体布置的边界设计与聚类分析[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2026, 58(2): 339-349. ZUO Jianwei, LI Jun, ZHU Zhongqiang, et al. Boundary design and clustering analysis in general arrangement for fighters[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2026, 58(2): 339-349.

practicality of the proposed methods.

Key words: general arrangement; boundary design; clustering analysis; naive Bayes; fuzzy analytic hierarchy process

飞机的研制过程是分阶段开展的,主要包含概念设计、方案设计、初步设计、详细设计和优化更改这几个阶段。其中,总体布置是飞机初步设计阶段的主要工作,在此之前,飞机已经基本确定了总体方案、结构框架以及系统方案^[1]。总体布置一般包含全部机载系统设备、管路线缆的布置,以及外形和结构的调整设计。这个过程涉及总体设计人员与各个系统专业设计人员的协同设计。总体布置完成的标志包含:飞机的外形、结构确定,机体内部的各个设备、管路、线缆的安装位置和安装形式确定。这些空间属性的确定是飞机进一步详细设计,形成生产图样的主要依据。典型的战斗机总体布置流程如图 1 所示。总体布置涉及全部机载设备的空间关系设计,由于设备间的组合方式千变万化,总体布置最优解的存在性与唯一性通常难以确认。同时,由于初步设计阶段设计需求更改频繁,总体布置可能会经历多个反复迭代过程。由于总体布置工作量大且难以将流程线性化,一架战斗机的研制历程中,初步设计阶段的时间占比通常仅次于方案设计阶段,有时甚至是最高的。

文献[2]给出了飞机总体布置设计的一般性参考,为实现初步可行的总体布置方案提供了一些指导性的意见。在工程实践中,总体布置是一项高度非线性的系统工程,涉及到多个设计因素的综合与决策,总体布置的程序化设计模式尚无成熟标准可供参考。

已有部分研究探索了总体布置设计过程的量化与建模。文献[3-4]研究了基于任务关联 WBS/Petri 网的飞机总体布置设计过程建模方法。文献[5-7]对舰船总体布置设计中的参数化方法进行了研究,其设计思想也可供战斗机总体布置参考。整体来讲,战斗机总体布置相关的量化方法与设计参考较少见诸公开文献,且主要工作集中在图 1 中“细化舱位定义”之后的环节。而如何得到准确的舱位定义,尚无可参考的文献。此外,在工程实践中,从舱位定义的获取到设备相对于舱位定义的初始分类,均依赖经验化的设计方法。这就造成总体布置设计结果的优劣以及设计效率的高低较大程度依赖设计人员的经验水平。随着战斗机的敏捷研发需求日益高涨,总体布置的快速设计,尤其是总体布置边界的快速和量化设计已成为一项亟待解决的工作。

本文从总体布置设计的两个关键阶段,舱位定

义确定和机载设备初始布置出发,提出了总体布置的边界设计方法,并以舱位定义为基准,将总体布置过程视为各个机载设备相对于各个舱位的聚类问题。构造了一套机载设备初始聚类过程的决策模型,并设计了两种针对总体布置的聚类方法。具体实现过程为:首先,定义了边界波动风险指标,将边界波动风险指标调整为非负可实现对初始舱位定义的细化,细化舱位定义中的舱位边界具备了可量化和可设计性。其次,依据边界波动风险指标的高低,在指定水平下,可筛选出具有强约束力的边界。提出了使用边界构造相应水平的聚类区域的方法。最后,通过特征识别并构造指标体系,使用聚类分析方法找到设备与聚类区域的空间对应关系,实现设备的初始总体布置。

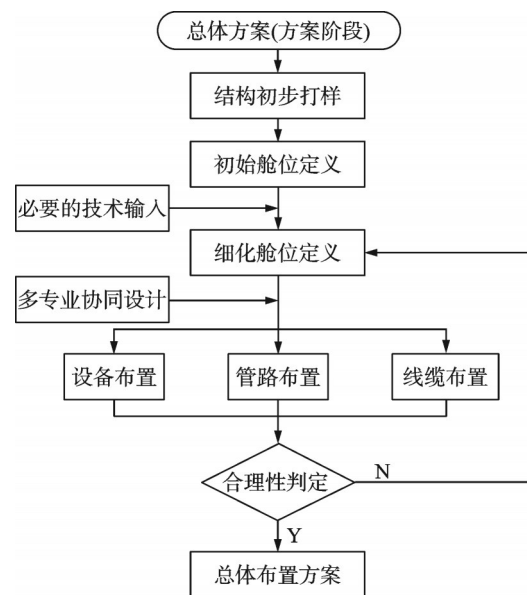


图 1 战斗机总体布置流程图

Fig.1 Flowchart of general arrangement of a fighter

1 总体布置的设计边界

1.1 边界划分与舱位定义

在战斗机初步设计阶段,根据方案设计阶段的飞机外形、各主要部件的初始站位和结构初步打样,可形成一版初始的舱位边界划分。根据初始舱位边界划分可以形成初始舱位定义,即使用初始边界将战斗机的内部空间切割为一系列更小的子空间集合,这些子空间即为舱位。舱位的划分依赖于各个边界的选定,然而在初步设计阶段,除了飞机各个主要部件和机体结构的主要框架外,边界的制定通常缺乏依据,从而具有显著的不确定性。

图2展示了初始舱位定义中的几个关键边界,这些关键边界往往是雷达、座舱、发动机等大部件所在的物理分界面,通常使用一些经验方法来划定,边界的具体空间位置如何确定,各边界是否可变动或是允许变动到什么程度,暂无可参考的量化方法。

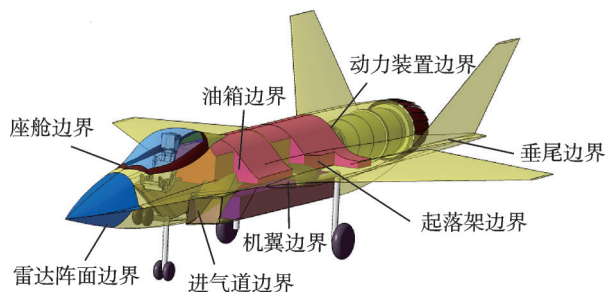


图2 战斗机总体布置边界示意

Fig.2 Illustrative boundaries of general arrangement of a fighter

本文通过构造边界波动风险指标,提出了一种总体布置的边界量化方法。

1.2 边界波动风险与 p 截强边界

1.2.1 总体布置的边界波动风险

假设总体布置中任意一个边界为 B_i ,其初始状态为 b_i^0 ,波动过程中边界 B_i 取值为 b_i ,偏离量 $b_i - b_i^0$ 可定义为 b_i 与 b_i^0 的某种距离度量,如欧氏距离、马氏距离等。偏离量也可定义为 b_i 相对于 b_i^0 的面积变化。当分析边界值 b_i 波动带来的影响时,假设偏离量 $b_i - b_i^0$ 在波动范围内满足一定的分布且具有概率密度 f ,可定义边界波动风险 R_b 为

$$R_b = E(\alpha_b \mathbf{S}_b^T) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{S}_b = [S_1, S_2, \dots, S_\omega]$ 为因素风险向量,向量中的元素表示受边界波动影响,单个战斗机设计因素变化带来的风险, ω 为考虑影响因素的个数; $\alpha_b = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_\omega]$ 为因素权重向量; $E(\cdot)$ 为期望。

下面列举一些战斗机设计的因素风险。

首先从空间布置的角度,考虑边界波动对总体布置方案可行性的影响,即可定义方案可行性风险为

$$S_{li} = S_{si} \triangleq (C_s(b_i) \wedge 1) - (C_s(b_i^0) \wedge 1) \quad (2)$$

式中: $C_s(b_i) \triangleq -\log p_i$ 表征边界 b_i 可实现性产生的代价, p_i 表示边界位于 b_i 时的总体布置方案可行概率,当 $p_i = 1$ 时方案可行性代价为0; \wedge 为取小值算子。

其次,考虑边界波动对战斗机战技指标的影响,定义战技指标风险为

$$S_{2i} = S_{pi} \triangleq \alpha_p \cdot \mathbf{S}_p^T \quad (3)$$

式中: $\mathbf{S}_p = [S_p^{(1)}, S_p^{(2)}, \dots, S_p^{(s)}]$ 表征各个战技指标受边界影响的程度; $\alpha_p = [\alpha_p^{(1)}, \alpha_p^{(2)}, \dots, \alpha_p^{(s)}]$ 表示各个战技指标的权重向量,共计 s 个指标。第 k 个指标的受边界影响程度 $S_p^{(k)}$ 定义为

$$S_p^{(k)} \triangleq \text{sign}(k) \cdot \frac{C_p^{(k)}(b_i) - C_p^{(k)}(b_i^0)}{C_p^{(k)}(b_i^0)} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $C_p^{(k)}(b_i)$ 为边界 $B_i = b_i$ 时,第 k 个战技指标 $C_p^{(k)}(\cdot)$ 的取值。由于波动风险衡量的是波动带来的损失,因此定义符号函数如下

$$\text{sign}(k) = \begin{cases} 1 & \text{指标}k\text{为负向指标} \\ -1 & \text{指标}k\text{为正向指标} \end{cases} \quad (5)$$

负向指标表示指标值越小,战技指标越好,如耗油率、加速时间等,正向指标表示指标值越大,战技指标越好,如航时航程、载弹量等。

此外,可定义时间成本风险和经济成本风险为

$$S_{3i} = S_{ti} \triangleq \frac{C_t(b_i) - C_t(b_i^0)}{C_t(b_i^0)} \times 100\% \quad (6)$$

式中: $C_t(b_i) \triangleq \sum T$ 表示边界为 b_i 时研制流程中的时间成本(T),包括研制周期、各试验周期等。

$$S_{4i} = S_{ei} \triangleq \frac{C_e(b_i) - C_e(b_i^0)}{C_e(b_i^0)} \times 100\% \quad (7)$$

式中: $C_e(b_i) \triangleq \sum E_{co}$ 表示边界为 b_i 时,研制流程中的经济成本(E_{co}),包括研制费用、各试验费用等。

因素向量可根据总体方案研究中考虑的因素进一步扩充并构造相应的衡量指标,以使波动风险的评估包含更为全面的信息,权重向量可根据研制过程和实现目标的侧重进行合理分配,从而使边界波动风险 R_b 能够更合理地反映总体布置设计边界在一定波动水平下变化带来的影响。

若存在某个边界的波动风险 $R_b < 0$,说明初始舱位定义中此边界的划分不合理,需要调整边界使 $R_b \geq 0$ 。完成所有边界风险非负的调整后即由初始舱位定义更新为一轮细化舱位定义。

战斗机的舱位定义一般包含数百个舱位,直接分析待布置的设备与单个舱位的对应关系较为复杂且容易出现矛盾和反复。考虑使用一定规则将各个舱位在一定水平下整合为较少的几个大区域,先确定待布置设备与大区域的对应关系,再在各个大区域内进行进一步的布置。这样可以显著提升总体布置的合理性和效率。

1.2.2 总体布置的 p 截强边界与 p 截强区域

假设总体布置的细化舱位定义包含边界数量为 n_b ,将全部边界根据边界波动风险由高到低排序,得出的序列即为边界波动影响程度由大到小的序列。在序列中排序越靠前,边界波动带来的风险

越大,即对总体布置舱位划分的约束力越强。

p 截强边界有 2 种方法选定:

方法 1(百分比选取) 取序列中前 $p\%$ 的边界,所得边界子集即为总体布置的 p 截强边界。

方法 2(固定值选取) 指定一个固定的 p 值,边界波动风险大于等于此 p 值的边界子集即为总体布置的 p 截强边界。

假设 p 截强边界包含的边界数量为 n_p ($n_p \leq n_b$),使用这些边界完成一次舱位的重新组合,新生成的舱位集合称为 p 截强区域。使用 p 截强边界将细化舱位定义中的 m_c 个舱位整合为 m_p 个,采用如下准则:

(1)充分性。任意一个 p 截强边界,两侧的舱位需在不同的 p 截强区域。

(2)完备性。任意一个 p 截强区域,至少包含一个 p 截强边界。

(3)收敛性。 p 截强区域应包含最少的扩展边界。扩展边界属于细化舱位定义中的边界,但不属于 p 截强边界。

使用 p 截强边界将细化舱位定义整合为 p 截强区域的示意,如图 3 所示。

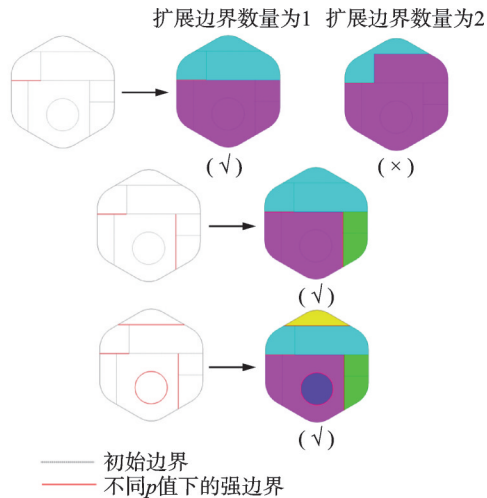


图 3 由 p 截强边界划分 p 截强区域方法示意

Fig.3 Illustration of dividing a region into p -cut strong regions using p -cut strong boundaries

使用上述准则可实现舱位在指定水平下的整合。由于 p 截强边界和 p 截强区域是定量化分析后的准确值,相比经验化的区域划分方法,使用所提方法获得整合后的区域支持参数化设计,同时可作为进一步定量分析的基础。因此,可将 p 截强区域作为总体布置聚类分析中的类(p 水平下)。

2 基于聚类分析的总体布置

在完成区域划分后,需要将待布置的各个设备

划分入合适的区域。以往的做法是根据设计人员的经验进行初步划分归类,随着总体布置的推进与细化不断调整,直至完成全部设备的可行布置。这个过程对初值十分敏感,一个不合适的初始归类往往会造成后续进展困难,甚至不得不倒回初始状态重新划分,在反复迭代中寻求合适的解法。为了减少总体布置中的倒推、反复过程,提高设计效率,有必要将这一过程进行合理的量化。

2.1 总体布置基于朴素贝叶斯的聚类方法

2.1.1 朴素贝叶斯分类法

朴素贝叶斯^[8-9](Naive Bayes, NB)是一种基于贝叶斯定理与特征条件独立假设的分类方法,特征条件独立假设即假设单一属性对指定类的影响独立于其他属性。相较于其他分类算法, NB算法在使用小规模数据进行多分类任务时表现良好,对缺失数据不敏感且形式简单^[10-12]。

贝叶斯定理表达式为

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (8)$$

对于给定的训练集,基于特征条件独立假设,输入输出的联合概率分布可写为

$$P(X=x|Y=c_k) = P(X^{(1)}=x^{(1)}, \dots, X^{(n)}=x^{(n)}|Y=c_k) = \prod_{j=1}^n P(X^{(j)}=x^{(j)}|Y=c_k) \quad (9)$$

利用贝叶斯定理可获得后验概率最大的输出 y ,即

$$P(Y=c_k|X=x) = \frac{P(X=x|Y=c_k)P(Y=c_k)}{\sum_k P(Y=c_k) \prod_j P(X^{(j)}=x^{(j)}|Y=c_k)} \quad (10)$$

则

$$y = f(x) = \arg \max_{c_k} \left\{ P(Y=c_k) \prod_j P(X^{(j)}=x^{(j)}|Y=c_k) \right\} \quad (11)$$

式中: X 为特征属性, x 为属性值, Y 为类, c_k 为类的取值(类标签)。一种典型的分类器为多项式贝叶斯分类器(Multinomial NB)^[12],即

$$P(X^{(j)}=x^{(j)}|Y=c_k) = \frac{N_{y_i} + \alpha}{N_y + \alpha n} \quad (12)$$

式中: n 为类的总数量; N_{y_i} 表示标签 i 在样本集中属于类别 y 的数目; N_y 表示所有标签中属于类别 y 的数目; α 为先验平滑参数,用于防止某些特征不存在于训练样本中从而造成概率为 0, $\alpha = 1$ 称为 Laplace smoothing, $\alpha < 1$ 称为 Lidstone smoothing,

本文使用Laplace smoothing。

2.1.2 特征编码与基于朴素贝叶斯的聚类方法

为了提取可用于聚类的特征,本文识别并构造了8个影响总体布置的设备特征,分别为体积、外形复杂度、所属系统、关联度、外形可变性、技术成熟度、适应能力以及维护需求。

体积:根据设备本身的体积大小,分为大(L)、中(M)、小(S)3类,即“体积”属性的取值为{L, M, S}。

外形复杂度:影响设备安装的外形复杂度可用 V_e/V_o 来表征。其中, V_e 为设备自身体积, V_o 为设备最小外接六面体体积,其中一个面需为设备安装面。外形复杂度根据 V_e/V_o 的大小可分为大、中、小3类(V_e/V_o 越小,外形复杂度越大),即属性“外形复杂度”的取值为{L, M, S}。

所属系统:设备所在的机载系统,此机载系统的分类需具有普适性,以使不同类别战斗机中的样本可以具有通用性。例如可选择:导航/控制/传感/通信系统(a)、机械与电气系统(b)、动力与起降系统(c)、任务与武器系统(d)、其他系统(e),属性“所属系统”的取值为{a, b, c, d, e}。

关联度:设备与其他设备的布置关联程度,如设备A的布置受到另外3个设备的制约,设备B的布置受到另外5个设备的制约,则认为设备B的关联度高于设备A。关联度可分为大、中、小3类,即属性“关联度”的取值为{L, M, S}。

外形可变性:设备在总体布置过程中是否允许为了实现安装而改变外形。属性“外形可变性”的取值为{Y, N},分别代表“是”和“否”。

技术成熟度:设备自身技术原理成熟程度,分为高(H)、中(M)、低(L)3类,属性“技术成熟度”的取值为{H, M, L}。

适应能力:设备对安装舱位的环境适应能力,综合考虑机械环境与自然环境,分为高、中、低3类。属性“适应能力”的取值为{H, M, L}。

维护需求:设备对安装舱位维护性的需求,分为高、中、低3类。属性“维护需求”的取值为{H, M, L}。

这8个特征组成了设备的8位特征码(Feature code),使用特征码可以将设备相对于区域的分类转化为特征码相对于指定类的聚类分析。每个特征的取值可以进一步细化,以使特征描述更为准确。

基于朴素贝叶斯的聚类(Naive Bayes-based clustering, NBC)方法的一般步骤如下:

步骤1 使用第1节所述方法,将总体布置的

空间划分为 m_p 个 p 截强区域,即为总体布置聚类分析中的类。

步骤2 对待布置的设备进行特征识别,并对相应特征进行编码规则指定(本文提取了8个特征,可进一步扩展)。

步骤3 通过特征码和类构造贝叶斯分类器,使用已有样本进行训练。

步骤4 对待分类设备,根据设备的特征码使用式(11)计算出所属的类,即相应的 p 截强区域。

注意:由于训练的样本往往来自已经完成总体布置的成熟飞机,而待布置的设备来自与之不同的新飞机,因此训练样本应在与新飞机具有相同或相似的 p 截强区域中寻求。部分训练样本如表1所示,表中区域1~8代表某飞机的前10%截强区域。

表1 部分样本示例

Table 1 Illustration of partial samples

设备序号	体积	外形复杂度	所属系统	关联度	外形可变性	技术成熟度	适应能力	维护需求	区域
1	S	M	c	S	N	H	H	L	6
2	M	M	e	M	N	H	H	M	1
3	S	L	d	M	Y	H	H	M	5
4	L	S	e	M	N	M	L	H	2
5	M	M	a	L	N	H	H	M	8

2.2 总体布置的基于模糊层次分析法的聚类方法

由于2.1.2节中设备特征码的取值具有显著的模糊性,因此也可使用模糊聚类方法进行总体布置的聚类分析,本文所提模糊聚类方法是基于模糊层次分析法(Fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)^[13-18],通过给不同强区域匹配差异化的权重矩阵来计算设备对各个 p 截强区域的评价分值,并以归一化后的分值作为设备从属于各个区域的隶属度,使用最大隶属度原则确定设备对区域的从属关系计算,从而完成各设备相对于 p 截强区域的聚类(FHAP-based clustering, FAHPC)方法。

2.2.1 指标体系构建

根据2.1.2节识别的总体布置特征属性,构造如图4所示指标体系。

指标体系有3层,分别为目标层(A)、准则层(B)和指标层(C)。本文目标层为总体布置区域评价,即以某个指定区域的视角来衡量某个指定设备是否适合在此区域安装。衡量的准则有空间属性、系统属性、灵敏属性和适配属性。每个属性下包含细化的两个评价指标。

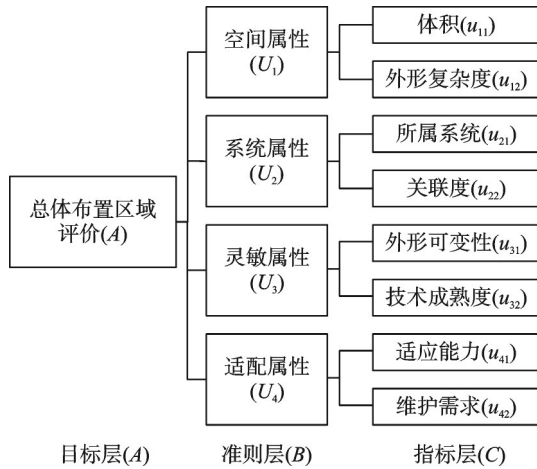


图 4 指标体系构造

Fig.4 Construction of indicator system

2.2.2 FAHPC 方法

假设待布置的设备为 $F_t (t=1, 2, \dots, n_d)$, n_d 为待布置设备的总数。在对上述区域属性进行评价时, F_t 相对于每个 p 截强区域, 使用评语集(分值): $V = \{10, 8, 6, 4, 2\}$ 。

FAHPC 方法的具体实现步骤如下:

步骤 1 使用专家评分法确定各个指标隶属于 V 中的隶属度 r_{ij} (即指标层的每个指标相对于 V 的隶属度)。

F_t 相对于某个 p 截强区域 $D_k (k=1, 2, \dots, m_p)$, 使用指标 u_i 评为 j 等级的隶属度为

$$r_{ij} = \frac{n_{u_i}^j(D_k^{(t)})}{n_e} \quad (13)$$

式中: n_e 为参与评分的专家总人数; $n_{u_i}^j(D_k^{(t)})$ 为评估针对 F_t 隶属于区域 D_k 的程度时, 给 C 中某个因子 u_i 评为 j 等级的人数。

按照准则层(B)构造评价矩阵, 将指标层(C)中的每个指标针对评语集 V 中的隶属度作为矩阵元素, 可以得到 4 个评价矩阵, 即

$$R_1(D_k^{(t)}) = \begin{pmatrix} r_{11}^{(1)}(D_k^{(t)}) & \dots & r_{15}^{(1)}(D_k^{(t)}) \\ r_{21}^{(1)}(D_k^{(t)}) & \dots & r_{25}^{(1)}(D_k^{(t)}) \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$R_2(D_k^{(t)}) = \begin{pmatrix} r_{11}^{(2)}(D_k^{(t)}) & \dots & r_{15}^{(2)}(D_k^{(t)}) \\ r_{21}^{(2)}(D_k^{(t)}) & \dots & r_{25}^{(2)}(D_k^{(t)}) \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$R_3(D_k^{(t)}) = \begin{pmatrix} r_{11}^{(3)}(D_k^{(t)}) & \dots & r_{15}^{(3)}(D_k^{(t)}) \\ r_{21}^{(3)}(D_k^{(t)}) & \dots & r_{25}^{(3)}(D_k^{(t)}) \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$R_4(D_k^{(t)}) = \begin{pmatrix} r_{11}^{(4)}(D_k^{(t)}) & \dots & r_{15}^{(4)}(D_k^{(t)}) \\ r_{21}^{(4)}(D_k^{(t)}) & \dots & r_{25}^{(4)}(D_k^{(t)}) \end{pmatrix} \quad (17)$$

步骤 2 权重矩阵的构造。

对每个区域 D_k , 需要确定两层权重向量。分别为准则层(B)的权重向量, 即

$$W(D_k) = (\omega_1(D_k), \omega_2(D_k), \omega_3(D_k), \omega_4(D_k)) \quad (18)$$

和指标层(C)的权重向量

$$W_1(D_k) = (\omega_{11}(D_k), \omega_{12}(D_k)) \quad (19)$$

$$W_2(D_k) = (\omega_{21}(D_k), \omega_{22}(D_k)) \quad (20)$$

$$W_3(D_k) = (\omega_{31}(D_k), \omega_{32}(D_k)) \quad (21)$$

$$W_4(D_k) = (\omega_{41}(D_k), \omega_{42}(D_k)) \quad (22)$$

步骤 3 对 F_t 属于 D_k 的程度进行综合评价。评价模型为

$$Q(D_k^{(t)}) = W(D_k)OK(D_k^{(t)}) = W(D_k)O \begin{pmatrix} W_1(D_k^{(t)})OK_1(D_k^{(t)}) \\ W_2(D_k^{(t)})OK_2(D_k^{(t)}) \\ W_3(D_k^{(t)})OK_3(D_k^{(t)}) \\ W_4(D_k^{(t)})OK_4(D_k^{(t)}) \end{pmatrix} \quad (23)$$

式中矩阵合成算子 O 采用 $M(\cdot, \oplus)$ 算子: $a \cdot b = a \times b, a \oplus b = (a + b) \wedge 1$ 。

进一步, 对 $Q(D_k^{(t)})$ 进行归一化处理可得

$$\tilde{Q}(D_k^{(t)}) = \left(\frac{q_1(D_k^{(t)})}{\sum_{i=1}^5 q_i(D_k^{(t)})} \dots \frac{q_5(D_k^{(t)})}{\sum_{i=1}^5 q_i(D_k^{(t)})} \right) \quad (24)$$

则 F_t 相对于 D_k^t 的总分为

$$Z(D_k^{(t)}) = \tilde{Q}(D_k^{(t)}) \cdot V^T \quad (25)$$

F_t 相对于 D_k 的隶属度可定义为

$$r(D_k^{(t)}) = \frac{Z(D_k^{(t)})}{\sum_{k=1}^{m_p} Z(D_k^{(t)})} \quad (26)$$

步骤 4 对任意 $F_t (t=1, 2, \dots, n_d)$, 将 F_t 相对于 $D_k (k=1, 2, \dots, m_p)$ 的隶属度进行排序, 隶属度最大的 D_k 即为 F_t 所属的 p 截强区域。

其中, 步骤 2 权重矩阵的构造可采用文献[19]中的方法, 步骤为:

步骤 2.1 对任意一层, 首先采用 0.1~0.9 标度来作元素间的两两对比判断, 从而建立模糊互补判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 。

步骤 2.2 计算权重向量 W , W 中的元素 W_i 为

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} + \frac{n}{2} - 1}{n(n-1)} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

步骤 2.3 计算 A 的特征矩阵 W^* , W^* 中的元素为

$$\omega_{ij}^* = \frac{W_i}{W_i + W_j} \quad (28)$$

表 2 0.1-0.9 标度说明
Table 2 Illustration of scale 0.1-0.9

标度	定义	说明
0.5	同等重要	两元素比较,同等重要
0.6	稍微重要	两元素比较,一元素比另一元素稍微重要
0.7	明显重要	两元素比较,一元素比另一元素明显重要
0.8	重要得多	两元素比较,一元素比另一元素重要得多
0.9	极端重要	两元素比较,一元素比另一元素极端重要
0.1,0.2,0.3,0.4	反比较	若元素 a_i 与元素 a_j 相比较,得到判断 r_{ij} ,则元素 a_j 与元素 a_i 相比较,得到的判断为 $1 - r_{ij}$

步骤 2.4 计算相容性指标 I 。

假设矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 和矩阵 $B = (b_{ij})_{n \times n}$ 均为模糊判断矩阵,则相容性指标 I 为

$$I(A, B) = \frac{1}{n^2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |a_{ij} + b_{ji} - 1| \quad (29)$$

步骤 2.5 一致性检验。

计算模糊判断矩阵 A 和其特征矩阵 W^* 的相容性指标 $I(A, W^*)$,判断 $I(A, W^*) \leq \alpha$ 是否成立,成立则通过一致性检验。本文取 $\alpha = 0.1$ 。

通过一致性检验后,步骤 2 中各层的权重向量可由式(27)确定。

3 示例验证

为了验证所提方法的实用性,以一个中小型无人作战飞机总体布置的实例进行分析。在方案设计阶段,该飞机确定了基本外形和主要大部件(发动机、起落架、雷达和弹舱等)的初步布置,并根据初步的结构打样,划分了 81 个初始边界。

3.1 边界波动风险计算与聚类区域确定

将各个边界 B_i 的几何中心 $C_i^b (i = 1, 2, \dots, n_b)$ 作为参考定位点,边界波动采用如下规则来度量:

假设 B_i 沿其法向量的偏移 $X(C_i^b)$ 满足均值为 0,标准差为 20(单位:mm)的正态分布。 B_i 相对自身面积变化的比率 $A(C_i^b)$ 满足均值为 0,标准差为 0.1 的正态分布。

进一步说明:为了简化问题,上述 $X(C_i^b)$ 和 $A(C_i^b)$ 仅考虑主动变化,而不考虑被动影响。例如,前中机身分界面在 $X(C_i^b)$ 变化时,界面移动过程中面积虽有变化但完全取决于 $X(C_i^b)$ 的变化,而 $A(C_i^b)$ 单独变化并不能改变实际界面。即不确定性仅来自于 $X(C_i^b)$,因此不考虑 $A(C_i^b)$ 的变化。而对进气道进口界面,需同时考虑 $X(C_i^b)$ (偏移量)和 $A(C_i^b)$ (缩放量)的变化。

通过抽样计算 R_b 时通常采用基于 Monte Carlo 法的抽样方法^[20-22],此类方法虽然准确但所需样本量巨大,在本例中,每个样本点处均需考虑涉及

全机方案的计算与评估,模型复杂且无显式表达式,因此并不适用。考虑采用无迹变换法(Unscented transformation, UT)^[23]进行抽样,UT 变换法在计算低阶矩(不超过二阶)时具有显著的高效率,即使用少量样本即可完成准确率较高的计算^[24],本文所提波动风险 R_b 不涉及高阶矩的计算,因此采用 UT 方法较为合适。

UT 变换的基本思想是:确定地选择一组能够表征一个概率分布某些特征(如期望、协方差矩阵等)的样本点(称之为 sigma 点),将这组 sigma 点经过某种非线性变换,用变换得到的点计算期望值和协方差矩阵^[25-26]。

UT 变换法的一般步骤^[24]如下:

步骤 1 由式(30~31)获得 $2n + 1$ 个 sigma 点 s_i 和相应权值 W_i ,即

$$s_0 = W_0 \bar{X} \quad (30)$$

$$s_i = \bar{X} + \left(\sqrt{\frac{n}{1 - W_0} P_{XX}} \right)_i, W_i = \frac{1 - W_0}{2n}$$

$$s_{i+n} = \bar{X} - \left(\sqrt{\frac{n}{1 - W_0} P_{XX}} \right)_{i+n}, W_{i+n} = \frac{1 - W_0}{2n}$$

$$i = 1, 2, \dots, n \quad (31)$$

步骤 2 经非线性变换获得点 $z_i = f(s_i)$ 。

步骤 3 计算变换后点的均值和协方差阵,即

$$\begin{cases} \bar{z} = \sum_{i=1}^p W_i z_i \\ P_{zz} = \sum_{i=1}^p W_i (z_i - \bar{z})(z_i - \bar{z})^T \end{cases} \quad (32)$$

在本例中,根据边界波动风险的定义,进行任意一个边界计算时,其他边界固定,单一边界仅考虑边界的偏移 $X(C_i^b)$ 和缩放 $A(C_i^b)$ 两个变量且不一定同时考虑,因此单个界面抽样次数最多为 $2 \times 2 + 1 = 5$ (次),全机计算最多需要抽样 $5 \times 81 = 405$ (次)。

在 R_b 的计算中,因素权重向量 α_b 分别取 [0.6, 0.2, 0.1, 0.1](优先考虑方案可行性 S_{1i})、[0.3, 0.5, 0.1, 0.1](优先考虑战技指标 S_{2i})和 [0.2, 0.2, 0.3, 0.3](优先考虑时间成本 S_{3i} 和经济成本 S_{4i})时,边界波动风险的计算结果分别如图 5~7 所示。其中

战技指标风险 S_{2i} 考虑 3 个战技指标: 载油量、载弹量和进气道捕获面积(均为正指标)。相应的战技指标权重取 $\alpha_p = [0.3, 0.3, 0.4]$ 。

如图 5 所示, 在方案可行性考虑占优时, 若要截取前 10% 的边界, 可令 $p=0.65$, 此时筛选出的边界为: 弹舱顶部与油箱分界面、弹舱前端边界、左主起落架与弹舱侧面分界面、右主起落架与弹舱侧面分界面、左机翼与机身分界面、右机翼与机身分界面、进气道侧壁边界、发动机前端边界。当 $p=0.5$ 时, 新增筛选出的强边界有: 雷达阵面边界、前起落架上边界、前起落架前边界、左主起落架前边界、右主起落架前边界、左主起落架上边界、右主起落架上边界、左垂尾与机身边界、右垂尾与机身边界。进一步地, 当 $p=0.2$ 时, 约 69% 的边界被筛选为强边界, 此时剩余的边界多为结构打样中不经过主要部件且非主要传力路径的边界, 如主起落架前方区域的某个地板边界。

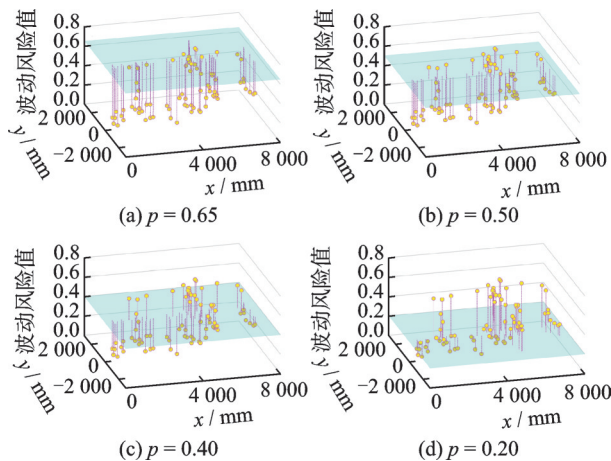


图 5 p 截强边界计算结果 (S_1 占优)

Fig.5 Computed results of p -cut strong boundaries (S_1 dominating)

如图 6 所示, 在战技指标占优时, 前 10% (可令 $p=0.366$) 的边界为: 弹舱顶部与油箱分界面、弹舱前端边界、左主起落架与弹舱侧面分界面、右主起落架与弹舱侧面分界面、左主起落架上边界、右主起落架上边界、进气道侧壁边界、发动机前端边界。与方案可行性占优时略有不同, 未筛选出机翼与机身边界, 而是另筛选出了主起落架舱与机身油箱的边界。原因是机翼机身分界面波动对整机载油量、载弹量和进气道捕获面积影响均较小。另外, 由于影响上述 3 个指标的边界较少, 即使 $p=0.2$, 仍有超过 50% 的边界未被筛选出。

如图 7 所示, 在时间与经济成本占优时, 前 10% (可令 $p=0.33$) 的边界为: 左主起落架与弹舱侧面分界面、右主起落架与弹舱侧面分界面、左主起落架前边界、右主起落架前边界、左机翼与机身

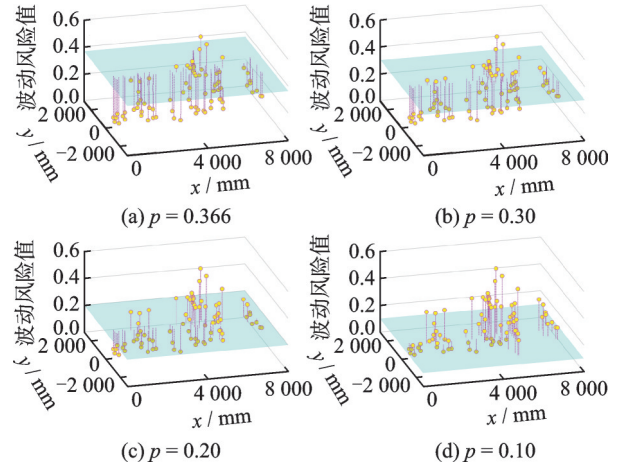


图 6 p 截强边界计算结果 (S_2 占优)

Fig.6 Computed results of p -cut strong boundaries (S_2 dominating)

分界面、右机翼与机身分界面、进气道侧壁边界、发动机前端边界。上述边界主要集中在主起落架和机翼附近, 主要原因这些边界的波动可能导致起落架或机翼站位的变化, 从而带来了较大验证时间成本与新增的试验成本。前起落架和垂尾附近的边界未被识别出的主要原因是前起落架和垂尾附近的边界在给定水平下的边界波动对载油量、载弹量和进气道捕获面积影响为 0。

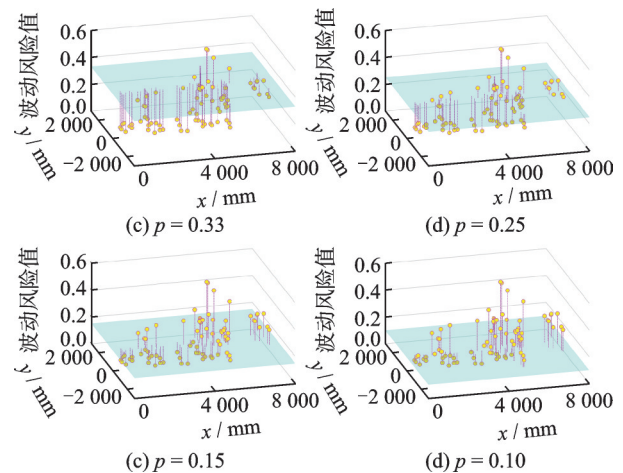


图 7 p 截强边界计算结果 (S_3 占优)

Fig.7 Computed results of p -cut strong boundaries (S_3 dominates)

将方案可行性占优情况下 $p=0.5$ 时的 p 截强边界划定 p 截强区域, 所得结果如图 8 所示 (选择其他参数时同理)。可见此水平下的区域划分基本上是以飞机部分主要大部件站位为主的划分 (机身油箱的整体边界并未识别出, 原因是油箱的布置自由度较高, 方案可行性风险较小), 但比直接使用大部件进行区域划分具有更为准确的边界和参数化的可设计性。在此区域划分的基础上对待布置的设备进行总体布置。由于图 8 中的 9 个

区域部分具有相似性且进气道内通常不布置设备,因此在实施聚类分析之前,可进一步将上述区域整合,形成可用于总体布置聚类分析的 6 个区(类),分别为:机头区(区域 1)、前中机身区(区域 3)、起落架区(区域 2+区域 4)、弹舱区(区域 5)、翼面区(区域 6+区域 9)、后机身区(区域 8),类别编号分别为 1~6。

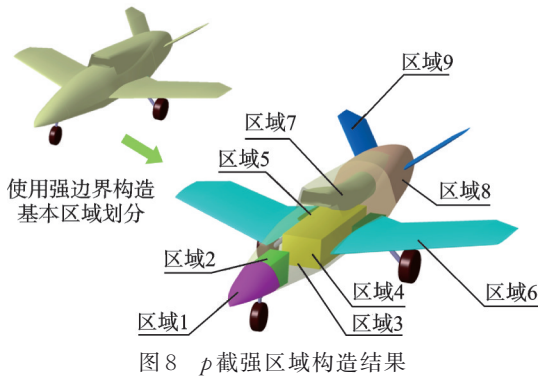


图 8 p 截强区域构造结果
Fig.8 Construction result of p -cut strong regions

3.2 NBC 与 FAHPC 的前置计算

获得准确的类后,使用所提方法进行基于聚类分析的总体布置。

(1) NBC 方法

为了减少计算量和样本需求量,令表示程度的特征属性仅区分大与小、高与低,即将属性编码取值为 {L,M,S} 的属性,相应取值简化为 {L,S},将属性取值为 {H,M,L} 的属性,相应取值简化为 {H,L}。

NBC 使用另 2 架相似飞机的 400 个样本进行训练,并采用其中 10% 的样本进行测试,得到如下混淆矩阵

$$C_{conf} = \begin{pmatrix} 6 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 7 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{pmatrix}$$

可见 NBC 分类方法在上述样本规模下的分类精确率约为 72.5%。精确率可以在样本量显著增大的基础上,通过细化属性编码的取值来提高。此外,选取独立性更强的特征也会进一步提高 NBC 方法的精确率。

(2) FAHPC 方法

针对机头区 D_1 ,对准则层 4 个准则进行两两对比分析,获得如下模糊互补判断矩阵(各行/列对应的元素按顺序依次为:空间属性、系统属性、灵敏属性、适配属性)

$$A_B^{(1)} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.8 & 0.7 & 0.6 \\ 0.2 & 0.5 & 0.6 & 0.4 \\ 0.3 & 0.4 & 0.5 & 0.4 \\ 0.4 & 0.6 & 0.6 & 0.5 \end{pmatrix}$$

使用获得的准则层权重向量为

$$W(D_1) = (0.3000, 0.2250, 0.2167, 0.2583)$$

经计算,相容性指标 $I=0.0779$,满足一致性检验结果。

同理,可得指标层模糊互补判断矩阵和相应权重为

$$A_{C_1} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.7 \\ 0.3 & 0.5 \end{pmatrix}, W_1(D_1) = (0.60, 0.40)$$

依次对应体积和外形复杂度为

$$A_{C_2} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 \end{pmatrix}, W_2(D_1) = (0.55, 0.45)$$

依次对应所属系统和关联度为

$$A_{C_3} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.8 \\ 0.2 & 0.5 \end{pmatrix}, W_3(D_1) = (0.65, 0.35)$$

依次对应外形可变性和技术成熟度为

$$A_{C_4} = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.6 \\ 0.4 & 0.5 \end{pmatrix}, W_4(D_1) = (0.55, 0.45)$$

依次对应适应能力和维护需求。

受限于篇幅, $D_2 \sim D_6$ 的计算结果不再赘述。

3.3 分类结果

分别使用 NBC 方法、FAHPC 方法对待布置的 15 个设备进行分类,同时将 5 名设计人员各自独立判断的结果进行对比,结果如图 9 所示。

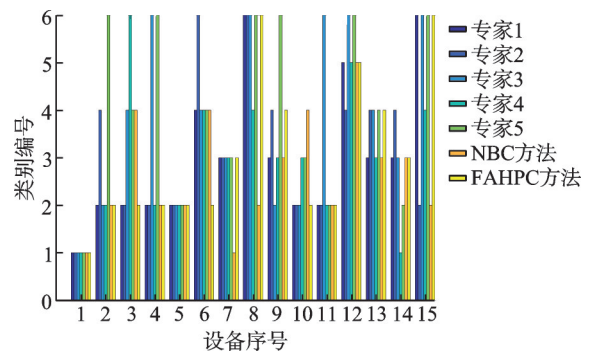


图 9 分类结果对比

Fig.9 Comparison of classification results

序号 1~15 分别为某雷达天线、某液压泵、某任务设备、某指控设备、某飞管设备、某电气设备 1、某起降设备、某动力设备、某电气设备 2、某机构、某环控设备、某燃油设备、某电气设备 3、某电气设备 4 和某液压泵 2。

可见,对专家意见高度一致的设备,FAHPC 往往可以给出相同的分类结果,NBC 方法一致性也较好,但略低于 FAHPC 方法。对专家意见较为分散的设备,NBC 方法与 FAHPC 方法结果不尽

相同。NBC方法的判断信息主要来自参考成熟飞机的样本,FAHPC方法则是对当前飞机定性分析与定量分析的综合。两种算法的综合信息量均大于单个设计人员的主观经验判断,在工程实践中,均可作为总体布置的决策依据。此外,相比专家直接判断,两种方法具备更强的可解释性和参数化可设计性,可支持总体布置方案的敏捷化生成。

4 结 论

(1) 针对总体布置的边界量化问题,提出了边界波动风险指标,该指标能够量化总体布置的设计边界。同时,边界波动风险的排序反映了边界重要程度的高低,可根据此准则筛选出 p 截强边界。使用 p 截强边界确定的 p 截强区域是对总体布置细化舱位定义的整合,具备参数化的可设计性。

(2) 针对总体布置聚类过程,设计了基于朴素贝叶斯分类器的NBC方法,通过对待布置设备进行特征识别与编码并构造合适的朴素贝叶斯分类器,可将待布置设备与指定区域的空间从属关系用后验概率分布来排序。同时,设计了基于FAHP的聚类方法,通过构造指标体系,对待布置设备相对于不同区域进行综合评分,选取归一化的评分值作为隶属度,使用隶属度最大原则确定设备与指定区域的空间对应关系。

(3) 所提的总体布置边界量化方法、指标体系与聚类方法,可用于实现总体布置的定量分析与参数化设计,可支持战斗机总体方案的敏捷化生成,具有较强的工程应用价值与拓展潜力。在此基础上可进一步发展出针对特定问题更为适用的指标和聚类方法,推广价值较高。

参考文献:

- [1] DANIEL P R. Aircraft design: A conceptual approach [M]. Washington DC: AIAA, 1989: 13-17.
- [2] 《飞机设计手册》总编委会. 飞机设计手册 第4册: 军用飞机总体设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2005: 159-188.
The Editorial Committee of the Aircraft Design Manuals. The aircraft design manuals Volume 4: General design of military aircraft[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2005: 159-188.
- [3] 王凯, 刘毅, 李文正. 协同工作模式下飞机总体布置设计过程建模[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(2): 41-46.
WANG Kai, LIU Yi, LI Wenzheng. A design process modeling method for airplane general arrangement in the cooperative development mode[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(2): 41-46.
- [4] 刘佳. 面向维修的飞机总体布置设计技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010: 37-61.
LIU Jia. Research on design for maintenance in airplane general arrangement design[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010: 37-61.
- [5] 姜文英. 船舶主船体高效率布置设计方法研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016: 63-101.
JIANG Wenying. Research on efficient design method of main hull arrangement[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016: 63-101.
- [6] 董宗然. 船舶管路自动布置方法及应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017: 50-172.
DONG Zongran. A research on auto-routing methods and applications of ship piping[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017: 50-172.
- [7] 陈鹏华, 吴珂. 船舶三维总体布置设计技术应用研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(7): 13-17.
CHEN Penghua, WU Ke. Application and research on tridimensional design technique of ship general arrangement[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(7): 13-17.
- [8] YANG F J. An implement of naive Bayes classifier [C]//Proceedings of 2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence. Las Vegas: IEEE, 2018: 301-306.
- [9] JIANG L, ZHANG H, CAI Z. A novel Bayes model: Hidden naive Bayes[J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2009, 21(10): 1361-1371.
- [10] HAND D J, YU K. Idiot's Bayes: Not so stupid after all[J]. International Statistical Review/Revue Internationale de Statistique, 2001, 69(3): 385.
- [11] NARASIMHA M, SUSHEELA D. Pattern recognition: An algorithm approach[M]. [S.l.]: Springer, 2011: 86-102.
- [12] 周志华. 机器学习[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015: 150-154.
ZHOU Zhihua. Machine learning[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 150-154.
- [13] WIND Y, SAATY T. Marketing application of the analytic hierarchy process[J]. Management Science, 1980, 26(7): 641-658.
- [14] WALLENIUS J, DYER J, FISHBURN P. Multiple criteria decision making, multiattribute utility theory: Recent accomplishments and what lies ahead[J]. Management Science, 2008, 54(7): 1336-1349.
- [15] LAARHOVEN V, PEDRYCS P. A fuzzy extension of Saaty's priority theory[J]. Fuzzy Set and Systems, 1983, 11: 229-241.
- [16] BUCKLEY J. Fuzzy hierarchical analysis[J]. Fuzzy

- Sets and Systems, 1985, 17(3): 233-247.
- [17] CHANG D Y. Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 95(3): 649-655.
- [18] AHMED F, KILIC K. Fuzzy analytic hierarchy process: A performance analysis of various algorithm[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 362: 110-128.
- [19] 姬东朝, 宋笔锋, 喻天翔. 模糊层次分析法及其在设计方案优选中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(11): 1692-1695.
- JI Dongchao, SONG Bifeng, YU Tianxiang. FAHP and its application in the selection of design scheme [J]. Systems Engineering and Electronics, 2006, 28 (11): 1692-1695.
- [20] LIU J S. Monte Carlo strategies in scientific computing [M]. New York: Springer-Verlag, 2001.
- [21] MEKCHERS R E. Importance sampling in structural system[J]. Structural Safety, 1989, 6(1): 3-10.
- [22] GROOTMAN F. Adaptive radial-based importance sampling method for structural reliability[J]. Structural Safety, 2008, 30(6): 533-542.
- [23] 张勇刚, 黄玉龙, 武哲民, 等. 一种高阶无迹卡尔曼滤波方法[J]. 自动化学报, 2014, 40(5): 838-848.
- ZHANG Yonggang, HUANG Yulong, WU Zhemin, et al. A high order unscented Kalman filtering method [J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(5): 838-848.
- [24] CLAUDIO M, ROCCO M. Uncertainty propagation and sensitivity analysis in system reliability assessment via unscented transformation[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2014, 132: 176-185.
- [25] JULIER S J, UHLMAN J K, DURRANT H F. A new method for the nonlinear transformation of means and covariances in filters and estimators[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2000, 45(3): 477-482.
- [26] JULIER S J, UHLMAN J K. Unscented filtering and nonlinear estimation[J]. Proceedings of the IEEE, 2004, 92(3): 401-422.

(编辑:夏道家)