

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.04.022

应用改进 TOPSIS 法的舰船气流场方案评价

李 想,黄 胜,张修远

(哈尔滨工程大学 船舶工程学院,150001 哈尔滨)

摘 要:为解决大型舰船甲板气流场评估阶段决策方法相对缺乏的问题,针对其各个影响参数之间评价的相似性的特点,初步构建舰船气流场评估指标体系,并将邓氏和斜率灰色关联度法相结合,改进了 TOPSIS 法.在此基础上,数值模拟了相同工况条件下3艘国外大型舰船的甲板空气流场状态,根据起飞、降落跑道速度和甲板面涡系变化等一系列评价气流场的关键参数,提出舰船甲板气流场的评价方法,进而对3艘大型舰船的甲板气流场进行综合评价.实例结果表明,应用改进 TOPSIS 法可以根据不同舰船气流场指标间的差异,对不同舰船甲板气流场方案予以评价,同时该方法可为今后舰船气流场评估提供一套有效、可行的新方法.

关键词:舰船气流场;指标体系;灰色关联度;改进 TOPSIS 方法;评价方法

中图分类号: U662 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2016)04-0133-06

Evaluation of airflow on warship deck based on improved TOPSIS method

LI Xiang, HUANG Sheng, ZHANG Xiuyuan

(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China)

Abstract: In order to deal with the lack of decision method during the evaluation of the airflow field on large ship decks, an initial evaluation index system of the airflow field was built according to the feature of similarity in all parameters. An improved TOPSIS method was proposed by combining the Deng's method and the slope grey relational method. The airflow fields on three foreign ships with same working conditions were simulated. Then, an evaluation method was presented on the basis of the takeoff and landing speeds, the change of vortex and some other related key parameters. With the method, the airflow fields on the three foreign ships were evaluated comprehensively. The results show that the improved TOPSIS method can be applied to assess ship airflow schemes according to the differences between the parameters from the evaluation index system. The present method is effective and feasible to the evaluation of airflow fields on ships.

Keywords: ship airflow; index system; grey relational method; improved TOPSIS method; evaluation method

在大型舰船设计初期,对甲板气流场的关注相对其他普通舰船更为重要,因为甲板气流场是评估舰载机在甲板上安全作业的重要指标,近些年随着大型船舶在国内的建造及应用越来越广泛,人们对舰船气流场的研究也越来越重视.因此,选取一种有效可行的评价方法对舰船甲板气流场进行评估具有重要的意义.

舰船气流场方案评估具有目标多、信息量大等特点,且各指标因素间相互影响,是一个多目标的复

杂系统工程问题,因而找到一种适合其评估特性的评价方法十分重要.目前国内对于决策评价方法做了大量的研究工作,王靖程等^[1]将面积关联度引入 TOPSIS 法贴近度计算公式,保证了灰色关联序与定性分析的一致性,但应用于决策问题时还存在一定的不足.赵萌等^[2]引入了表征广义距离的相对熵概念,弥补了传统 TOPSIS 法无法区分正负理想方案中垂线上的点这一不足.廖全蜜等^[3]将灰色关联度法与 TOPSIS 法相结合,提出了综合考虑通达性与舰体空间资源的通道人机效能评价方法.虽然越来越多的学者^[4-7]从事于评价方法在工程中的应用,但目前对于将各类的评价方法应用于舰船甲板气流场的评估工作却鲜少有人涉及,因此本文首先针对舰船甲板气流场方案建立评价指标体系,采用

收稿日期:2015-10-13.

基金项目:国家自然科学基金(51309061).

作者简介:李 想(1987—),男,博士研究生;

黄 胜(1945—),男,教授,博士生导师.

通信作者:李 想,lixiang2180@163.com

基于粒子群的优化判断矩阵 Hadamard 凸组合^[8]来计算底层评价指标权重,然后通过定性、标准化处理各项效能值,并结合邓氏关联度及斜率关联度,通过分析数据曲线间的距离和斜率对数据序列的相似性进行衡量,改进了 TOPSIS 法,进而对 3 艘大型舰船甲板气流场进行评估,初步形成一套有效的舰船气流场评价方法,为今后气流场舰船方案总体评价提供指导信息和理论依据。

1 气流场评估指标体系的建立

1.1 舰船气流场评估参数选择

对于舰船甲板气流场的评估,有许多重要参数需要考虑,如飞行甲板舰面及尾部涡系分布,起降区的层流湍流度,侧风风速,舰载机起飞离舰、降落时的最低、最高风速,舰载机在飞行甲板尾部着舰的下洗风速、下沉高度等因素。其中,空气与舰载机的相对风速直接影响舰载机的升力和操纵性;侧风风速会使舰载机产生侧滑对舰载机的安全起飞有负面影响;流场压力的变化以及涡量分布对舰载机的飞行稳定性有一定影响,这些因素是需要重点考虑,而有些因素相对来说对舰船气流场总体影响较小,因此在考虑评估参数建立指标体系的时候要根据其参数在总体的权重来选择。总结出舰船甲板气流场方案评估流程如图 1 所示。

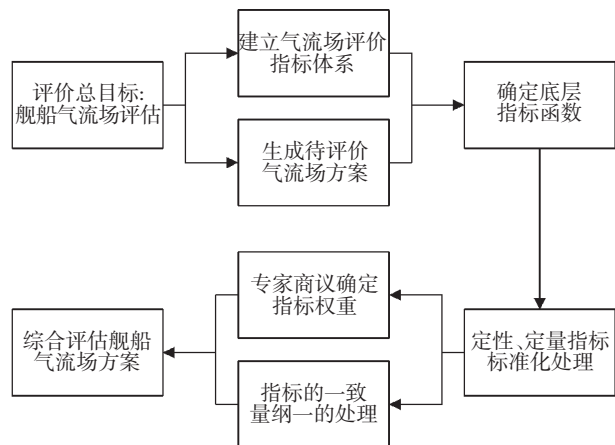


图 1 舰船甲板气流场评估流程

1.2 舰船气流场定性与定量指标确定

1.2.1 定量指标

在众多气流场评估参数中,侧风风速,舰载机起飞离舰、降落时的速度为定量指标,其具体数值结果可由 CFD 数值模拟得出,计算工况为美国对短距起降飞机在大型舰船上所要求的相对风向与风速的极限工况(40 节相对风速右舷 30° 方向)^[9-10],选择该工况的目的是评估 3 艘大型舰船在恶劣的工况条件下甲板气流场的表现和对舰载

机起降的影响。由此根据各个参数距离理想值的远近程度给出其效能值,并结合权重得出与理想方案的贴进度来进行评价。其中,舰载机起飞跑道、降落跑道侧风风速如图 2 所示。

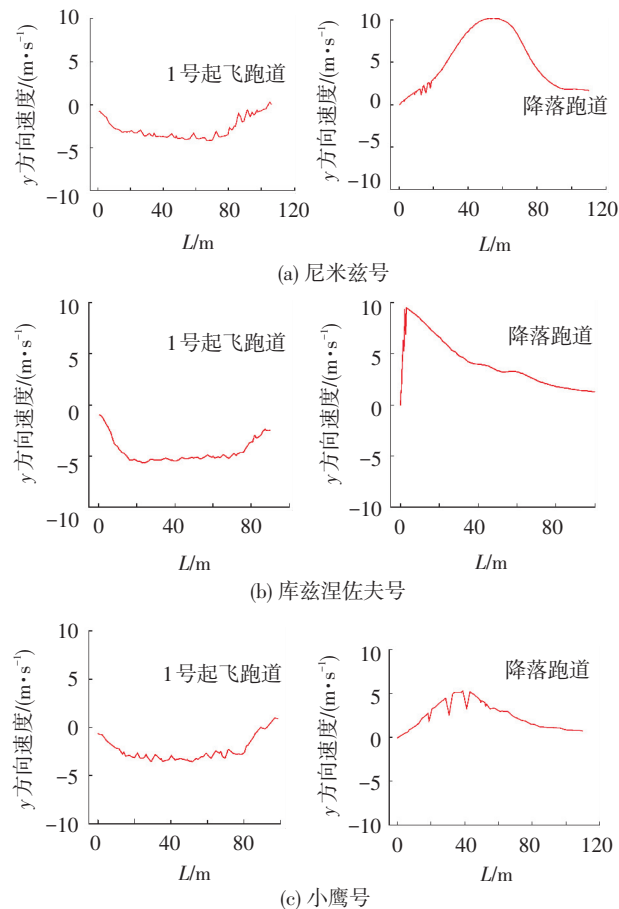


图 2 3 艘舰船起飞和降落跑道侧风风速

根据大型舰船的舰机适配性要求对艏部弹射器侧风风速要求和美军对短距起降飞机作业的相对风向与风速包络图综合得出的侧风风速不超过 10 m/s。通过模拟计算和数据处理可以得到起飞跑道和降落跑道上的速度分布状态,从而判断是否有超过最大允许速度的情况出现。

图 2 中 3 艘大型舰船的起飞、降落跑道的侧风风速变化曲线可以看出(由于篇幅所限仅列出 1 号起飞跑道侧风风速图),对于 1 号起飞跑道,尼米兹号和小鹰号的侧风风速都 < 5 m/s,但尼米兹号的风速变化幅度要优于小鹰号,而库兹涅佐夫号有部分起飞跑道的侧风风速 > 5 m/s 或者在 5 m/s 的范围内波动,因此尼米兹号在起飞跑道的侧风风速方面要优于小鹰号,小鹰号优于库兹涅佐夫号;对于降落跑道,从图 2 中可以看出,库兹涅佐夫号和尼米兹号的侧风风速的最大值都接近于 10 m/s,远远大于小鹰号的 5 m/s,但库兹涅佐夫在接近船体时的速度有一个激变值,极易对舰载机的降落产生影响,而尼米兹号在整个下降过程中的速度变化相对平稳。因

此小鹰号在降落跑道的侧风风速方面要优于尼米兹号, 优于库兹涅佐夫号。

表 1 所示为 3 条起飞、降落跑道上各关键点的相对风速值, 相邻 2 个关键点的距离为跑道总长的 1/14。表 1 中相对风速值没有超过美军标对舰载机起降的安全范围要求, 而根据空气动力学升力公式得出其相对风速越大则升力越大。升力是影响舰载机起降的关键参数, 而舰载机起飞降落时都需逆风而行, 起飞时如果有风迎面吹来, 则舰载机的相对风速变大, 其获得的升力就比无风或顺风时大, 因而

就能较快地离舰起飞。迎风降落时, 就可以借风的阻力来减小一些飞机的速度, 使飞机着舰后的滑行距离缩小一些, 因此, 相对风速在舰载机起降的安全范围之内时, 越大越好。可以看出库兹涅佐夫号的 1、2 号起飞跑道的相对风速值要略高于尼米兹号和小鹰号, 这主要是由于其上翘甲板对后方跑道的气流影响所导致的, 而降落跑道相对风速方面库兹涅佐夫相对其他两舰要略小一些, 说明在右舷 30°来风时, 其尺寸较大的上层建筑对舰载机的降落时的相对风速产生了不利的影响。

表 1 3 艘舰船起飞、降落跑道各关键点的相对风速值 (m · s⁻¹)

关键点	库兹涅佐夫号			尼米兹号			小鹰号		
	1 号起飞 跑道速度	2 号起飞 跑道速度	降落 跑道速度	1 号起飞 跑道速度	2 号起飞 跑道速度	降落 跑道速度	1 号起飞 跑道速度	2 号起飞 跑道速度	降落 跑道速度
1	1.16E+01	1.18E+01	1.03E+01	1.08E+01	1.15E+01	1.05E+01	1.04E+01	1.11E+01	1.03E+01
2	1.16E+01	1.18E+01	1.03E+01	1.09E+01	1.15E+01	1.05E+01	1.05E+01	1.11E+01	1.03E+01
3	1.17E+01	1.18E+01	1.03E+01	1.09E+01	1.15E+01	1.05E+01	1.05E+01	1.12E+01	1.03E+01
4	1.17E+01	1.18E+01	1.03E+01	1.10E+01	1.15E+01	1.05E+01	1.06E+01	1.12E+01	1.03E+01
5	1.18E+01	1.18E+01	1.03E+01	1.11E+01	1.15E+01	1.05E+01	1.06E+01	1.12E+01	1.03E+01
6	1.18E+01	1.18E+01	1.02E+01	1.12E+01	1.16E+01	1.05E+01	1.06E+01	1.12E+01	1.03E+01
7	1.18E+01	1.18E+01	1.02E+01	1.12E+01	1.16E+01	1.05E+01	1.06E+01	1.09E+01	1.02E+01
8	1.18E+01	1.19E+01	1.01E+01	1.12E+01	1.17E+01	1.04E+01	1.06E+01	1.06E+01	1.02E+01
9	1.18E+01	1.19E+01	9.88E+00	1.12E+01	1.17E+01	1.04E+01	1.07E+01	1.06E+01	1.02E+01
10	1.18E+01	1.19E+01	9.78E+00	1.13E+01	1.17E+01	1.04E+01	1.08E+01	1.05E+01	1.02E+01
11	1.18E+01	1.18E+01	9.78E+00	1.14E+01	1.17E+01	1.04E+01	1.08E+01	1.05E+01	1.02E+01
12	1.18E+01	1.18E+01	9.68E+00	1.14E+01	1.17E+01	1.04E+01	1.08E+01	1.05E+01	1.02E+01
13	1.18E+01	1.17E+01	9.47E+00	1.14E+01	1.15E+01	1.04E+01	1.08E+01	1.05E+01	1.02E+01
14	1.18E+01	1.17E+01	9.37E+00	1.14E+01	1.14E+01	1.04E+01	1.07E+01	1.05E+01	1.02E+01
15	1.18E+01	1.17E+01	9.32E+00	1.14E+01	1.14E+01	1.04E+01	1.07E+01	1.04E+01	1.02E+01

1.2.2 定性指标

飞行甲板舰面及尾部涡系分布, 起降区的层流湍流度以及压力分布等因素为定性指标。由于篇幅所限, 仅列出 3 艘大型舰船的舰面流线分布和压力分布云图, 如图 3~5 所示。从图 3~5 中可以看出, 在同一工况下库兹涅佐夫和小鹰号舰面的涡量影响范围大于尼米兹号, 表明该区域有较明显的压力变化或湍流出现, 不利于舰载机的起降。由于库兹涅佐夫号的上层建筑尺寸为 3 艘舰船中尺寸最大的, 从而导致了塔楼附近流线的紊乱和逆压区面积扩大。在流线方面, 3 艘舰船的飞行甲板流场在进入甲板时都较为光顺, 但库兹涅佐夫由于上翘甲板导致其甲板流线速度相对较高, 经过上层建筑附近时开始变得紊乱和发散现象, 这是因为受漩涡区内低压的“抽吸”和风向作用, 气流出现了向塔楼内的侧洗现象。侧洗现象引起下冲气流, 这对舰载机的这一附近操作和停放具有重要影响。

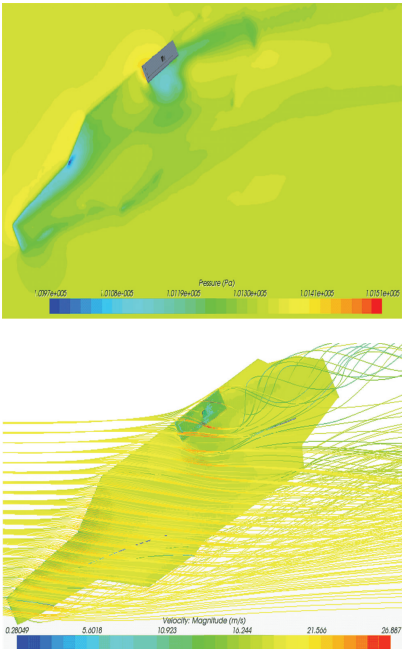


图 3 “尼米兹号”飞行甲板压力分布及流线分布

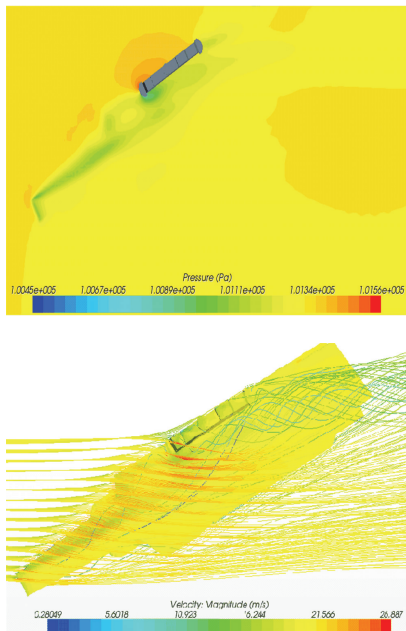


图 4 “库兹涅佐夫号”飞行甲板压力分布及流线分布

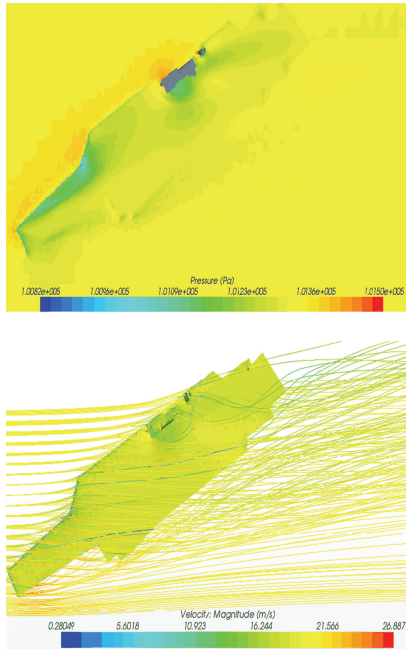


图 5 “小鹰号”飞行甲板压力分布及流线分布

1.3 建立舰船气流场评价指标体系

根据对上述定量指标和定性指标的分析,同时由于舰船气流场评价体系属大信息量,多目标的复杂系统问题,其指标体系较为复杂,因此本文参考文献[11],对影响舰船气流场的主要因素进行分析,并进行了进一步细化,初步建立了如图 6 所示舰船甲板气流场评价指标体系。

2 基于改进的 TOPSIS 法方案排序方法

TOPSIS 法是一种逼近理想解法的排序方法,该方法反映了备选方案和理想方案位置上的一致性,是由 HWANG 等[12]首先提出,目前已经拓展出很多衍生方法,如简单加权法、灰色欧几里得关联分析法

等,但是各种评价方法都存在一定的局限性,如 TOPSIS 法存在逆序问题等,针对传统 TOPSIS 法存在的这一问题,本文提出了结合邓氏关联度[13]的计算方法,该方法是一种基于距离的关联度计算模型,弥补了传统 TOPSIS 法当理想解和负理想解结果相似时无法抉择最优方案的问题,但应用于决策问题时,容易受数据极值的干扰,使两级最大差偏高,针对邓氏关联度这一问题,本文将邓氏关联度和斜率关联度[14]相结合,通过数据曲线的斜率对数据序列的相似性进行衡量,提出了集成距离和斜率的灰色关联度计算方法,综合关联度能充分反映两数据序列间的逼近性,进而提高决策的合理性。

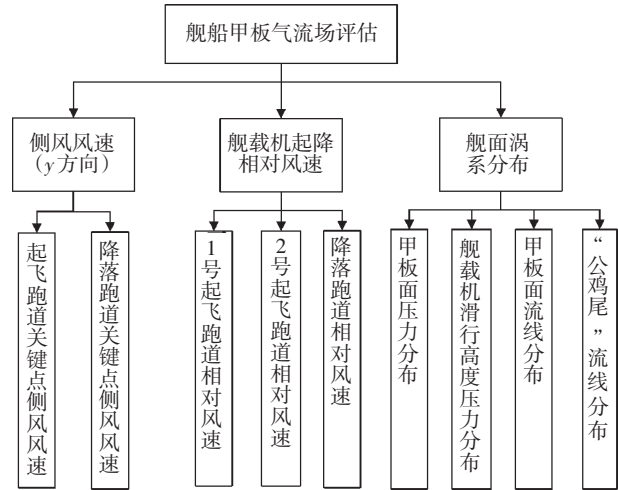


图 6 舰船甲板气流场总体评价指标体系

2.1 权重的确定

上述舰船气流场评价指标体系,需多位专家按照其重要程度商讨后给出,同时需要根据专家在该领域的权威度和熟悉程度评定出该专家的专家权重,以此对专家们的意见予以加权,保证了结果的可靠性。

假设决策专家群体为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, 其中参与专家个数为 k , 评价 n 个指标重要程度的判断矩阵为 $A_1, A_2, A_3, \dots, A_k$. 采用 AHP (analytic hierarchy process) 法[15]根据专家的专业水平确定其权重 $W_p = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_k\}$, $0 < w_l < 1, l = 1, 2, 3, \dots, k, \sum_{l=1}^k w_l = 1$. 在实际应用中,决策专家只需给出判断矩阵的上三角部分,其下三角部分可通过对上三角部分取倒数求得,对角线元素为 1.

2.2 定量与定性指标的标准化处理

1) 对于定量指标,构造决策矩阵并进行归一化处理为

$$y_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2},$$

$(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n).$ (1)

式中: m 为方案数量, n 为指标数量, 满足限制条件 $y_{ij} \in [0, 1]$.

2) 对于定性指标, 则需要用语言值来表示, 按照表 2 可将语言值和效能值进行转换, 将其标准化处理.

表 2 语言值的标准化处理

语言值	效能值	语言值	效能值
绝对高	1.0	中等	0.5
很高	0.9	中低	0.4
高	0.8	较低	0.3
较高	0.7	低	0.2
中高	0.6	很低	0.1

3) 计算加权后的标准化矩阵为

$$z_{ij} = w_j \times y_{ij}, \tag{2}$$

式中, w_j 为 AHP 法求得的指标权重.

2.3 待评方案与理想解的距离和斜率接近度

待评方案指标值与理想解指标值距离关联系数为

$$r_{ij} = g(\Delta_{ij}) = \frac{\min_i \min_j \Delta_{ij} + \zeta \max_i \max_j \Delta_{ij}}{\Delta_{ij} + \zeta \max_i \max_j \Delta_{ij}}, \tag{3}$$

($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$).

待评方案指标值曲线与正、负理想解指标值曲线之间距离为

$$\begin{cases} \Delta_{ij}^+ = |z_{ij} - z_j^+|, \\ \Delta_{ij}^- = |z_{ij} - z_j^-|. \end{cases} \tag{4}$$

待评方案指标值与理想解指标值斜率关联系数为

$$r'_{ij} = g(\Delta'_{ij}) = \frac{\min_i \min_j \Delta'_{ij} + \zeta \max_i \max_j \Delta'_{ij}}{\Delta'_{ij} + \zeta \max_i \max_j \Delta'_{ij}}, \tag{5}$$

($i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$).

待评方案指标值曲线与正、负理想解指标值曲线之间斜率差为

$$\begin{cases} \Delta'_{ij}{}^+ = \Delta'z_{ij} - \Delta'z_j^+, \\ \Delta'_{ij}{}^- = \Delta'z_{ij} - \Delta'z_j^-. \end{cases} \tag{6}$$

其中

$$\Delta'z_{ij} = z_{i,j+1} - z_{ij}, \tag{7}$$

$$\Delta'_{ij}{}^+ = z_{j+1}^+ - z_j^+, \tag{8}$$

$$\Delta'_{ij}{}^- = z_{j+1}^- - z_j^-. \tag{9}$$

式中: ζ 为分辨系数, 一般取 0.5; Δ 为距离即邓氏差异度; Δ' 为形状即斜率差异度.

则待评方案与正、负理想解的距离贴近度, 即邓氏关联度分别是

$$\begin{cases} R_i^+ = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} r_{ij}^+, \\ R_i^- = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} r_{ij}^-. \end{cases} \tag{10}$$

其中

$$\begin{aligned} r_{ij}^+ &= g(\Delta_{ij}^+), \\ r_{ij}^- &= g(\Delta_{ij}^-). \end{aligned}$$

待评方案与正、负理想解的形状贴近度, 即斜率关联度分别是

$$\begin{cases} F_i^+ = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} r'_{ij}^+, \\ F_i^- = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^{n-1} r'_{ij}^-. \end{cases} \tag{11}$$

其中

$$\begin{aligned} r'_{ij}{}^+ &= g(\Delta'_{ij}{}^+), \\ r'_{ij}{}^- &= g(\Delta'_{ij}{}^-), \end{aligned}$$

则集成邓氏和斜率的灰色关联度为

$$\begin{cases} C_i^+ = \beta R_i^+ + (1-\beta) F_i^+ = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} [\beta \cdot r_{ij}^+ + (1-\beta) \cdot r'_{ij}{}^+], \\ C_i^- = \beta R_i^- + (1-\beta) F_i^- = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^{N-1} [\beta \cdot r_{ij}^- + (1-\beta) \cdot r'_{ij}{}^-]. \end{cases} \tag{12}$$

其相对灰色关联度为

$$C_i = \frac{C_i^+}{C_i^- + C_i^+}, \quad (i = 1, 2, \dots, m). \tag{13}$$

式中: β 为偏好系数, 反映了决策专家对评价方案的位置逼近性和趋势逼近性的偏好程度; 关联度 C_i 表征了待评方案与理想方案的相似度, 根据其相对关联度大小对方案进行评估, 相对灰色关联度越大表明该方案与正理想方案越接近, 与负理想方案越远.

3 基于改进 TOPSIS 法的方案排序方法

本文对 3 艘舰船的气流场方案进行评价, 利用计算流体力学仿真软件, 建模仿真得到各指标值并进行标准化, 其中定量指标由式(1)求得, 而定性指标由表 2 得出, 其各项指标值具体见表 3.

经数值计算后, 各项参数指标(表 3), 首先邀请 4 位相关领域的专家对图 6 所示的舰船气流场评价指标给出个体判断矩阵, 从而计算出底层指标权重.

决策专家权重 $\mathbf{W}_p = [0.30, 0.20, 0.25, 0.25]$.

决策专家的个体判断矩阵为:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{11}^1 &= \begin{bmatrix} 1 & 4 & 2 \\ 1/4 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{11}^2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1/2 \\ 1/2 & 2 & 1 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{A}_{11}^3 &= \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{A}_{11}^4 = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 3 \\ 1/4 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

利用 AHP 法综合得出 9 个底层指标的绝对权

重: $w = \{0.202\ 79, 0.193\ 88, 0.126\ 32, 0.102\ 36, 0.092\ 12, 0.078\ 14, 0.065\ 33, 0.060\ 19, 0.078\ 87\}$. 根据式(10)~(13)计算集成距离和斜率的灰色关联度, 偏好系数 β 为 0.5, 关联度计算值为 (0.614 3, 0.543 4, 0.598 1), 可知尼米兹号与理想方案最为接近, 优于小鹰号和库兹涅佐夫号.

表 3 舰船气流场方案评价参数

舰船评价指标	指标类型	尼米兹号		库兹涅佐夫号		小鹰号	
		实际值	标准值	实际值	标准值	实际值	标准值
起飞跑道侧风风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	定量	3.17	0.50	4.40	0.69	3.38	0.53
降落跑道侧风风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	定量	5.94	0.72	4.81	0.58	3.17	0.38
1 号起飞跑道关键点相对风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	定量	11.57	0.58	11.83	0.59	11.06	0.56
2 号起飞跑道关键点相对风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	定量	11.21	0.59	11.26	0.59	10.49	0.55
降落跑道关键点相对风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	定量	10.44	0.58	9.98	0.56	10.24	0.57
甲板面压力分布	定性	高	0.80	中高	0.60	中等	0.50
舰载机滑行高度压力分布	定性	较高	0.70	中高	0.60	中低	0.40
甲板面流线分布	定性	中高	0.60	较低	0.30	中等	0.50
“公鸡尾”流线分布	定性	高	0.80	中等	0.50	中高	0.60

表 4 不同评价方法对比分析

舰船方案	加权算术平均	TOPSIS	基于邓氏和斜率的关联度
尼米兹号	0.531 2	0.443 6	0.614 3
库兹涅佐夫号	0.380 7	0.374 3	0.543 4
小鹰号	0.473 6	0.402 5	0.598 1

4 结 论

1) 以不同舰船甲板气流场情况为研究对象, 分析影响甲板气流场的主要指标, 建立评估指标体系.

2) 将基于距离和斜率的灰色关联度引入气流场评估总体方案决策, 兼顾了备选方案和理想方案的各项指标的逼近性和均衡性, 并改进了 TOPSIS 评估方法, 初步形成了一套甲板气流场研究评估体系.

3) 最后通过与 2 种典型的综合评价方法的计算结果进行对比分析, 验证了此方法用于舰船甲板气流场的可行性.

参考文献

[1] 王靖程, 诸文智, 张彦斌. 基于面积的改进灰色关联度算法[J]. 系统工程与电子技术, 2010, 32(4): 777-779.

[2] 赵萌, 邱菀华, 刘北上. 基于相对熵的多属性决策排序方法[J]. 控制与决策, 2010, 25(7): 1098-1100.

[3] 廖全蜜, 黄胜, 王宇, 等. 基于改进 TOPSIS 法的舰船通道人机效能[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(3): 536-542.

针对上述 3 艘大型舰船的气流场算例, 为验证本文所应用的评估指标体系及方法的有效性, 分别与加权算术平均法和 TOPSIS 法得到的计算结果做对比, 计算结果见表 4. 结果表明, 基于邓氏和斜率的关联度与其他 2 种典型的评价方法排序结果趋势一致, 验证了此方法的可行性和有效性.

[4] 胡晓芳, 胡勇, 程剑. 综合安全评估在舰艇救生通道优化设计中的应用[J]. 舰船科学技术, 2006, 28(6): 121-124.

[5] 黄胜, 郭海鹏, 侯远杭, 等. 基于改进 TOPSIS 法的舰船总体方案群决策方法[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(1): 92-97.

[6] 乔永辉. 一种基于 TOPSIS 的多属性决策方法研究[J]. 企业技术开发, 2006, 25(9): 89-91.

[7] DEERE S J, GALEA E R. A systematic methodology to assess the impact of human factors in ship design[J]. Applied Mathematical Modeling, 2009, 33(2): 867-883.

[8] 金菊良, 魏一鸣. 复杂系统广义智能评价方法与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 5-13.

[9] 孙诗南. 现代航空母舰[M]. 上海: 上海科学普及出版社, 2000: 183-185.

[10] 朱英富. 水面舰船设计新技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2004: 7-9.

[11] 李平. 舰船研制指标体系与评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2003.

[12] HWANG C L, YOON K S. Multiple attribute decision making[M]. New York: Springer Verlag, 1981: 29-56.

[13] DENG Julong. Grey information space[J]. Journal of Grey Systems, 1989, 1(2): 103-1171.

[14] 黄胜, 郭海鹏, 王超. 基于面积和斜率灰色关联度的舰船方案群决策方法[J]. 船舶工程, 2014, 36(1): 100-103.

[15] 张吉军. 模糊层次分析法[J]. 模糊系统与数学, 2002, 14(2): 80-88.

(编辑 张 红)