

# 基于改进 FRAM 的航班地面保障能力评估

邢志伟<sup>1</sup>, 李雅婷<sup>1</sup>, 周芳宇<sup>1</sup>, 张涛<sup>2</sup>, 罗谦<sup>2</sup>

(1. 中国民航大学 电子信息与自动化学院, 天津 300300;

2. 中国民用航空局 第二研究所, 成都 610041)

**摘要:** 针对机场和航空公司运行效率低下, 决策能力不足的问题, 提出了一种基于功能共振分析模型的航班地面保障能力评估方法; 通过对航班保障流程进行分析, 利用区间值犹豫模糊熵和层次分析法将保障环节之间的关系量化, 结合保障环节的大小、可变性以及环节之间的耦合得到航班保障能力评估结果, 从而确定该航班地面保障节点最优构型; 使用某机场航班地面保障数据进行实验仿真, 结果表明: 实际运行与期望之间存在的均方误差为 6.015 min, 平均绝对误差为 2.389 min, 误差与保障时间窗之比约为 0.28, 与该航班的效能评估值近似相加为 1, 反映出实际与期望之间的差距; 此外改变权重方法对比分析, 航班保障关键节点的平均绝对百分误差均低于 13%, 且均比熵权法的值低。

**关键词:** 航班保障; 能力评估; 功能共振模型; 区间值犹豫模糊熵; 层次分析; 环节耦合; 可变性

## Evaluation of Flight Ground Support Capabilities Based on Improved FRAM

XING Zhiwei<sup>1</sup>, LI Yating<sup>1</sup>, ZHOU Fangyu<sup>1</sup>, ZHANG Tao<sup>2</sup>, LUO Qian<sup>2</sup>

(1. College of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China,

Tianjin 300300, China;

2. Second Research Institute, Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Aiming at the low operation efficiency and insufficient decision-making ability of airports and airlines, an evaluation method for flight ground protection capabilities based on a functional resonance analysis model is proposed; By analyzing flight support processes, the interval-valued hesitation fuzzy entropy and analytic hierarchy analysis methods are used to quantify the relationship between support links. By comprehensively considering the size and variability of support links and the coupling between the links, the evaluation of flight support capabilities is obtained, thus optimally configuring the flight ground support nodes; Experimental simulation is carried out by using the flight ground support data from a certain airport, and the result shows that, the mean-square error between actual operation and expectation is 6.015 min, the average absolute error is 2.389 min, and the ratio of the error to the support time window is about 0.28, which approximately sums to 1 with the flight performance evaluation value, reflecting the gap between actual and expected values; In addition, a comparative analysis of the variable weighting method is made, which shows that the average absolute percentage error at key flight support nodes is all below 13% and lower than that of the entropy weighting method.

**Keywords:** flight support; efficiency evaluation; functional resonance model; interval value hesitant fuzzy entropy; analytic hierarchy analysis; link coupling; variability

## 0 引言

随着航班运输量增长, 机场保障服务设备的能力将逼近或达到饱和<sup>[1]</sup>, 这导致机场保障运行的效率和质量下降、航班延误频发等问题。对航班保障能力进行评估

可以为后续的机场运行提供决策依据, 缩短保障服务时间, 减少航班延误, 提高机场整体的运行效率。目前的航班保障能力评估局限于部分环节, 缺乏对整体流程的评估。因此, 如何对航班地面保障总流程的运行能力进行评估是亟待解决的问题。

收稿日期: 2025-02-05; 修回日期: 2025-03-12。

基金项目: 国家自然科学基金(U2333205)。

作者简介: 邢志伟(1970-), 男, 博士, 教授。

通讯作者: 李雅婷(2000-), 女, 硕士。

引用格式: 邢志伟, 李雅婷, 周芳宇, 等. 基于改进 FRAM 的航班地面保障能力评估[J]. 计算机测量与控制, 2026, 34(2): 266

功能共振分析模型 (FRAM, functional resonance accident model) 是一个基于功能共振理论构建的系统模型, 旨在解决复杂的人—社会—技术系统问题, 能够有效反映系统间功能的耦合与交互。在航班保障过程中, 各环节之间的相互作用可能导致意外结果的发生, FRAM 模型可以对此进行有效表示。

目前, 对航班保障能力的评估分为安全评估和运行评估两种, 随着多年来机场运行的需求不断增加, 安全评估在实现长期可持续发展方面具有重要意义。文献 [2] 基于博弈论和云物元分析建立了安全评估方法, 文献 [3] 针对保障流程中的货物子流程建立安全模型, 文献 [4] 建立 SHELL 模型对保障过程中的安全风险进行评估但停留在定性分析阶段。文献 [5] 初步建立了航班保障安全指标体系但指标的完备性存在不足, 文献 [6] 采用模糊综合评价法对机场运行的安全风险进行评价, 但定量计算较少。文献 [7] 通过随机 Perti 网络测量 ATC 系统的安全水平, 但 Perti 网络理论并没有揭示安全管理等级的模糊性。文献 [8] 基于证据综合理论对空管系统运行安全水平进行了评估, 但缺乏理论基础。文献 [9] 引入集对方法分析了空管系统的运行风险, 不能充分体现系统的演化规律。文献 [10] 利用贝叶斯更新提出了一种基于轨迹的着陆风险评估方法, 其模型可以预测着陆事故的发生, 但需要先验概率和更多的数据。机场运行评估方面, 文献 [11] 基于数据包络分析建立了机场运行效率评价方法。文献 [12] 考虑了机场的跑道容量和机位分配, 对机场运行效率进行综合评估。文献 [13] 建立了机场运行效率评价指标体系。文献 [14] 采用建立了可拓次分析法对机场运行效率进行多层次、多指标的评价。文献 [15] 用两阶段方法评估机场运行效率和影响因素, 但其中的 DEA 方法中投入产出项目的选择将对效率评价结果产生决定性影响, 其评价的决策单元必须足够多。

目前对机场安全的评估的研究主要针对保障过程中的部分环节, 忽视了机场运行的复杂性且无法准确描述权重生成方法, 并且现有研究对航班运行能力的评估都是对机场或航空公司的效率及其影响因素进行计算和评价, 没有考虑机场内部保障环节的非线性交互。因此本文针对航班地面保障实际运行状况, 将保障过程定义为一个环节高度耦合、能力高度集成的社会技术复杂系统, 并提出了一种将区间值犹豫模糊熵融入功能共振分析的方法, 将环节间的交互耦合量化, 最终实现对航班地面保障能力的评估。在流程效能评估体系构建中, 鉴于传统方法在处理多维度 (包括大小、变异指数及权重) 评估指标上的局限性, 本研究设计了一种基于雷达图的航班地面保障流程能力评估方法。为更精确地量化流程效能, 引入优化后的面积周长比作为最终评估值的

计算公式。

## 1 保障流程分析

航班地面保障的具体流程根据机场运行的实际情况和相关标准, 大体上分为 4 个并行子流程: 机务检查、加油、客舱服务和货舱服务。其中, 客舱服务流程还包括两项作业, 具体流程如图 1 所示。航班保障流程本质上是一个高度复杂且受严格时间窗与空间条件约束的复杂系统优化问题<sup>[16]</sup>, 其保障能力的评估是指期望机场运行状况与实际运行之间的差距, 这既受到保障流程的影响, 也受到资源运行状况、运行效率等因素的影响<sup>[17]</sup>。本文主要针对单航班保障流程的能力进行评估。

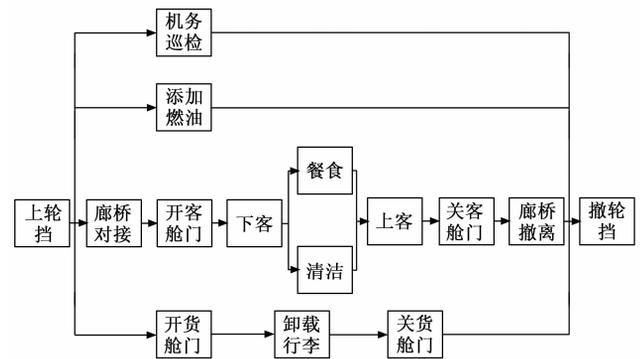


图 1 航班地面保障流程图

## 2 系统 FRAM 模型的建立

FRAM 模型是由功能共振理论发展出的系统模型, 主要研究人—社会—技术系统中的动态交互, 聚焦于探究多个功能单元正常波动性能的无意识交互下, 某一特定功能单元的性能超出预期的突变现象, 能够对系统之间功能的耦合与交互进行分析<sup>[18]</sup>。航班保障过程中, 各个环节之间的交互造成不期望结果的发生, 可以通过 FRAM 模型来进行表示。为了更精确地刻画航班保障流程中的变异性与灵活性, 本节引入了功能可变形描述规则 (RFV, rules of function variability) 作为工具, 以系统地描述 FRAM 框架下的变异可变形性。通过 RFV 的应用, 以结构化和易于理解的方式表达元素之间耦合关系的动态变化, 为后续的能力评估提供清晰的逻辑框架。

### 2.1 模型建立方法

构建 FRAM 模型的过程中, 首先核心聚焦于精准识别并详尽阐述系统内部的功能模块, 随后深入分析这些功能模块之间的相互作用与影响关系。全面准确地对保障环节相关性进行分析是提升运行效率、保障质量的重要前提, 但在航班保障实际运行流程过程中, 将整个复杂系统细致地分解成为多个独立而又相互关联的功能模块, 从而解决忽视了系统内部各环节之间的相互作用与相互影响的问题。因此本文较全面地将每一个功能模块从输入 (I)、输出 (O)、时间 (T)、前提 (P)、资

源 (R) 以及控制 (C) 6 个角度来进行描述, 功能模块的图形化结果如图 2 所示。

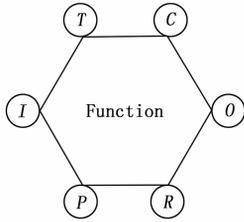


图 2 FRAM 六角功能模块

通过构建功能单元间的相互连接, 使上游功能的输出直接作用于下游功能的输入端, 形成多条并行运作的链路, 这些链路协同工作, 传递信息, 共同保障系统的稳定运行。

### 2.2 模型形式化描述方法

基于对航班保障过程的分析可知, 影响航班保障能力的主要因素为各个保障环节和外部运行状况, 单独对保障流程能力进行评估需要考虑各环节之间的时间约束, 因此 FRAM 保障过程建模方法需对实际保障流程做以下假设:

- 1) 对保障过程做连续化处理, 忽略中断;
- 2) 对保障资源的配置、路径、调度等做理想化处理;
- 3) 忽略保障资源调度对各个环节造成的影响;

FRAM 模型 RFV 的具体表现如下:

1) 功能识别: 确定系统中的关键功能。这些功能是系统正常运行所必需的活动。将航班保障过程中从上轮挡到撤轮挡之间所有的保障环节作为功能模块, 用集合  $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$  表示。

2) 功能描述: 每个功能用 6 个方面来描述: 输入 (I): 用来启动功能模块所需要的触发信息, 并链接上个功能模块。输出 (O): 功能模块运行的结果, 可能是另一个模块的输入。前提条件 (P): 使功能模块正常运行的前提, 如果前提不满足功能可能无法启动或发挥作用。资源 (R): 完成任务需要消耗的人或物。时间 (T): 对功能执行的时间和同步进行约束, 避免时间太早、太晚或不同步。控制 (C): 约束或指导功能如何执行的规则、流程或监督, 在异常情况下对功能模块及时调整。

3) 定义功能间的相互关系: 分析各功能之间的相互依赖关系。如输入与输出的连接: 一个功能的输出可以作为另一个功能的输入。这种连接可以是直接的, 也可以是间接的, 通过其他功能进行传递。时间的影响: 功能执行的时间可能会影响其他功能的执行。例如, 一个功能过早或过晚的执行可能会导致下游功能出现问题。资源的共享: 多个功能可能会共享相同的资源, 资源的可用性和分配可能会影响功能的执行。控制机制:

控制机制可以影响功能的执行方式和结果。例如, 管理层的决策可能会影响操作人员的行为。前提条件: 功能的执行可能需要满足某些前提条件, 这些条件的存在与否则会影响功能的正常执行。

基于保障流程的先后顺序等相互关系将各个功能模块连接起来构成 FRAM 功能网络模型, 上游功能的输出端对下游功能的输入端产生影响进而影响整个网络模块称之为功能间的耦合, 定义  $V(F_i^a F_j^b)$  表示功能  $F_i$  的第  $a$  方面与功能  $F_j$  的第  $b$  方面之间的耦合关系。其中,  $a, b \in \{I, O, P, R, T, C\}$ 。

4) 识别变异: 分析各功能执行过程中输入端元素的变异对功能的影响。这些变异可能来自操作人员、设备、环境条件等。定义每个功能  $F_i$  的变异为  $A_i$ , 其中  $A_i$  描述了功能  $F_i$  的变化情况。

### 2.3 确定功能可变形

功能模块可变性直观地表现为输出端变化偏差, 若功能模块输出与正常输出结果偏差较大, 则认为可变性大, 反之为小。为了对上下游功能元素间的耦合进行量化, 则需要先确定上游功能输出发生何种变化。本文将从时间、精确度两个方面来对上游功能输出的可变性进行定义。时间可能变化为过早、过晚、适时; 精确度可能表现为精确、不精确、可接受。对各类变化情况进行评分, 分值与变化程度呈正相关。功能变化评分见表 1。

表 1 功能变化评分

变化表型	变化程度	得分
时间	适时	1
	过早	2
	过晚	3
精确度	精确	1
	可接受	2
	不精确	3

在正常运行状态下的 FRAM 网络中, 通过优化的区间值犹豫模糊熵<sup>[19]</sup>的计算机准确量化各功能模块变化程度的大小, 评估功能模块变化程度的概率分布, 步骤如下:

1) 区间数定义明确化: 定义区间数  $\tilde{a}$ , 其大小范围为  $[a^-, a^+]$ , 其中  $a^-$  和  $a^+$  分别表示区间的下界和上界, 且两者均属于实数集  $R$ 。即  $\tilde{a} = \{x | a^- < x < a^+\}$ 。为了评估功能模块在时间、精度等方面的变化范围可能性, 专家采用区间数进行评分, 评分范围限定在  $[0.00, 1.00]$  之间, 并设定区间数的波动幅度不超过 0.20。

2) 通过引入时间和精度两个维度的变化范围, 以犹豫模糊元的形式进行量化专家 K 针对功能模块  $F_i$  的时间变化范围和精度变化范围, 分别给出了其变化区间的左侧与右侧边界的评分, 这些评分以犹豫模糊元的形式表达。如式 (1) ~ (2) 所示:

$$\bar{h}_Z^T(i, t) = \{ | \bar{h}_Z^T(i, t) |, | \bar{h}_Z^T(i, t) | \} \quad (1)$$

$$\bar{h}_Z^P(i, p) = \{ | \bar{h}_Z^P(i, p) |, | \bar{h}_Z^P(i, p) | \} \quad (2)$$

式中,  $\bar{h}$  表示犹豫模糊元,  $Z^-$  和  $Z^+$  分别指代变化区间的下限和上限,  $T$  和  $P$  分别代表时间和精度维度,  $i$  为功能模块的索引,  $t$  和  $p$  则分别对应时间和精度的具体评分点。

所有参与评估的专家对功能模块的可变性(即时间和精度的变化范围)的评分共同构成了一个区间值犹豫模糊集。这一集合通过综合了多位专家的意见, 为后续的决策分析提供了更为全面和深入的信息基础。

3) 通过优化后的犹豫模糊熵计算方法, 整合在同一变化程度下多位专家的多个评分值, 并通过去模糊化处理提升评估的精确性。所构建的改进模型的核心在于其单调性, 将犹豫模糊元映射至  $y$  轴时, 能够最大限度地保留专家评分。

设专家总数为  $Y$ , 我们依据公式 (1) 推导出功能模块在时间维度上的变化区间值所对应的改进犹豫模糊熵, 具体表达式如公式 (3) 所示:

$$H_{i,t}^T = \frac{1}{(\sqrt{2}-1)Y} \sum_{k=1}^Y \left[ \sin \frac{1}{4} [\bar{h}_Z^T(i, t) + \bar{h}_Z^T(i, t)_{(Y-k+1)}] \cdot \pi - \cos \frac{1}{4} [\bar{h}_Z^T(i, t) + \bar{h}_Z^T(i, t)_{(Y-k+1)}] \pi + 1 \right] \quad (3)$$

$$H_{i,p}^P = \frac{1}{(\sqrt{2}-1)Y} \sum_{k=1}^Y \left[ \sin \frac{1}{4} [\bar{h}_Z^P(i, p) + \bar{h}_Z^P(i, p)_{(Y-k+1)}] \cdot \pi - \cos \frac{1}{4} [\bar{h}_Z^P(i, p) + \bar{h}_Z^P(i, p)_{(Y-k+1)}] \pi + 1 \right] \quad (4)$$

同样地, 利用公式 (2), 我们进一步计算功能模块在精度维度上的变化区间值所对应的改进犹豫模糊熵  $H_i, p^T$ , 具体见公式 (4)。

基于上述两个维度的改进犹豫模糊熵, 分别采用公式 (5) 和 (6) 来计算功能模块在时间和精度上的变化概率占比, 即  $w_{i,t}^T$  和  $w_{i,p}^P$ 。这一步骤旨在量化不同变化维度下的影响程度:

$$w_{i,t}^T = \frac{H_{i,t}^T}{\sum_i H_{i,t}^T} \quad (5)$$

$$w_{i,p}^P = \frac{H_{i,p}^P}{\sum_p H_{i,p}^P} \quad (6)$$

随后, 根据计算出的变化概率占比, 绘制出每个功能模块在时间和精度上性能变化的概率分布图, 以直观展示其变化特性。最后, 定义功能模块的功能可变性  $A_i$ , 如公式 (7) 所示, 并通过归一化处理, 确保不同功能模块之间的功能可变性能够进行直接比较和评估:

$$A_i = \sum_t S_{i,t}^T w_{i,t}^T + \sum_p S_{i,p}^P w_{i,p}^P \quad (7)$$

## 2.4 确定功能元素间耦合的可变性

本文使用层次分析法<sup>[20]</sup>确定权重的流程。根据层次结构, 对每一层次的每对准则或指标的可变性进行两

两比较, 构建判断矩阵, 从而实现将指标间的相对可变量量化。通过专家对上游功能输出对下游功能的输入耦合程度进行打分, 比较尺度如表 2 所示, 构造的  $F_i$  功能输入端耦合判断矩阵  $A$  如表 3 所示。

表 2 判断矩阵标度及含义

标度 ( $a_{ij}$ )	相对重要性比较
1	$i$ 与 $j$ 同等重要
3	$i$ 比 $j$ 稍微重要
5	$i$ 比 $j$ 明显重要
7	$i$ 比 $j$ 强烈重要
9	$i$ 比 $j$ 绝对重要
2, 4, 6, 8	上述判断的中间值
倒数	若 $i$ 比 $j$ 重要, 则 $j$ 对于 $i$ 的重要性为上述值的倒数

表 3 功能  $F_i$  输入耦合判断矩阵

$F_i$	$V(F_m^O F_n^C)$	$V(F_m^O F_n^T)$	$V(F_m^O F_n^I)$	$V(F_m^O F_n^P)$	$V(F_m^O F_n^R)$
$V(F_m^O F_n^C)$	1	$a_{CT}$	$a_{CI}$	$a_{CP}$	$a_{CR}$
$V(F_m^O F_n^T)$	$a_{TC}$	1	$a_{TI}$	$a_{TP}$	$a_{TR}$
$V(F_m^O F_n^I)$	$a_{IC}$	$a_{IT}$	1	$a_{IP}$	$a_{IR}$
$V(F_m^O F_n^P)$	$a_{PC}$	$a_{PT}$	$a_{PI}$	1	$a_{PR}$
$V(F_m^O F_n^R)$	$a_{RC}$	$a_{RT}$	$a_{RI}$	$a_{RP}$	1

最后确定可变指数, 具体步骤如下:

1) 归一化判断矩阵:

$$\bar{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

将判断矩阵的每个元素除以所在列的总和。

2) 按行求和:

$$w_i = \sum_{j=1}^n \bar{a}_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

计算归一化矩阵的每一行总和。

3) 行和矩阵归一化:

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$\bar{w} = [\bar{w}_1, \bar{w}_2, \dots, \bar{w}_n]^T$  所求特征向量即为指标可变指数。

4) 调整判断矩阵:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, CR = \frac{CI}{RI}, \lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{n w_i} \quad (11)$$

计算一致性指标  $CI$ , 其中  $\lambda_{\max}$  为矩阵最大特征根,  $(Aw)_i$  为向量  $Aw$  的第  $i$  个分量;  $n$  为矩阵阶数, 计算一致性比率  $CR$ ,  $RI$  通过查表可得。

通过调整判断矩阵中的比较值, 重新计算并确保一致性比率  $CR < 0.1$  才能接受计算结果。

## 2.5 流程效能评估方法步骤

在流程效能评估体系构建中, 鉴于传统方法在处理多维度(包括大小、变异指数及权重)评估指标上的局

限性,本研究设计了一种基于雷达图<sup>[21]</sup>的过站航班地面保障流程能力评估方法。为更精确地量化流程效能,引入面积周长比作为最终评估值的计算公式,步骤如下:

首先,确立一个多指标的流程效能评估指标体系,该体系涵盖 15 项关键指标。对于每个指标,进行初步的数据收集与整理。在此步骤中,我们将所有指标的大小维度统一设定为基准值 1,以便于后续的比较分析;同时,将变异指数初始化为 0。随后,计算每个评估指标的权重以反映其在整体流程效能中的重要程度。

其次将单位圆划分为 3 个扇形,确定大小、变异指数、权重 3 个维度的坐标轴,通过式 (12) 将每个指标 3 个维度的大小转化为坐标轴上的点:

$$l = \exp \frac{[u - \bar{u}]^2}{2\sigma^2}, 0 \leq l \leq 1 \quad (12)$$

接着根据已计算出的各评估坐标点(代表不同环节的地面保障流程指标值),采用顺序连接的方式,绘制出每个环节的地面保障流程指标雷达图。为了提供基准对比,同时构建了另一个雷达图,该图基于所有评估指标的大小和变异指数均设为初始值(如大小设为统一基准,变异指数设为 0),并且所有权重保持一致,采用精确的数学方法计算实际雷达图与期望雷达图的周长与面积,记为  $L_A$ 、 $L_E$ 、 $S_A$ 、 $S_E$ 。

最后通过式 (13) 计算每个环节的效能评估值  $e$  和最终的保障流程效能值为  $E$ :

$$e = \frac{\sqrt{L_E} \sqrt{S_A}}{\sqrt{L_A} \sqrt{S_E}}, E = \sum_{i=1}^n w_i e_i \quad (13)$$

### 3 实例验证

#### 3.1 数据来源与预处理

仿真数据来源于国内某枢纽机场协同决策信息系统中历史运行保障数据,如表 4 所示。

表 4 航班地面保障环节时刻数据样例

属性	上/撤 轮档	机务开始 /结束	卸/装 行李	上客开始 /结束	开/关货 舱门	靠/撤 廊桥
开始时刻	19:44	19:54	19:46	20:10	19:46	19:45
结束时刻	20:42	20:21	20:21	20:39	20:21	20:47

为保证地面保障流程效能评估方法计算简洁,对实际数据做如下处理。

- 1) 数据清洗。清理不符合规则的数据、修正错误数据、填补缺失值等,保证数据的质量。
- 2) 数据转换。将原始数据转换为标准化格式(如时间格式、单位转换等),方便后续处理。
- 3) 数据归一化。根据需要对数据进行归一化处理,确保数据在同一量纲下进行分析。将时刻值转化为整数分钟数。

在构建动态数据库时,选取了航班的基本属性作为

初始化字段,这些属性包括机型、航线、航空公司以及航班密度。

依据既定的流程效能评估方法步骤,我们将不同场景下的地面保障环节及其关键数据转化为具体的效能评估指标值,即指标的大小。同时借助历史数据库中的丰富数据资源,采用高斯曲线拟合技术,对各保障环节和节点时刻的数据进行了细致的拟合处理,如图 3 所示。

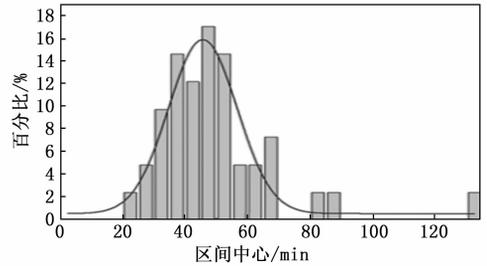


图 3 指标大小

在数据处理阶段,我们通过高斯拟合曲线针对每个效能评估指标,计算并提取了变尺度函数的关键参数。表 5 中详细列出了各效能评估指标变尺度函数的参数。

表 5 评估指标变尺度参数

保障环节/节点	期望	偏差
F <sub>1</sub> 上轮档/F <sub>15</sub> 撤轮档	58.01	19.69
F <sub>2</sub> 廊桥对接/F <sub>9</sub> 撤离	61.00	21.62
F <sub>3</sub> 开/F <sub>8</sub> 关客舱门	58.17	14.31
F <sub>12</sub> 开/F <sub>14</sub> 关货舱门	38.22	18.07
F <sub>4</sub> 下客开始/结束	7.47	1.40
F <sub>11</sub> 添加燃油开始/结束	14.61	5.27
F <sub>6</sub> 清洁开始/结束	10.28	7.22
F <sub>5</sub> 餐食开始/结束	4.34	3.18
F <sub>10</sub> 机务巡检开始/结束	25.90	6.55
F <sub>7</sub> 上客开始/结束	25.55	10.29

#### 3.2 建立功能模型

建立航班保障系统 FRAM 功能网络模型,首先要确定系统的所有功能,航班保障过程包括以下几个环节和节点:上/撤轮档、靠/撤廊桥、开/关客舱门、开/关货舱门、下客、加油、清洁、配餐、上客、机务巡检、卸/装行李。将这 15 个过程确定为功能模块,从输入、输出、资源、控制、时间、前提共 6 个方面来具体分析每一功能模块的内容。其中以下客、撤廊桥两个环节为例,功能模块具体内容见表 6。

表 6 功能模块特征元素

元素	下客	撤廊桥
输入(I)	客舱门打开	客舱门关闭
资源(R)	廊桥、地勤人员	廊桥设备
控制(C)	下客指令	撤离指令
时间(T)	下客全过程	撤廊桥完成时间
前提(P)	廊桥对接正常	客舱门关闭
输出(O)	乘客下机完成	廊桥撤离确认

根据对各个功能的六角功能分析, 结合功能可变性形式化描述, 分析各个功能的相互依赖关系, 确定上游功能和下游功能, 形成图形化的耦合, 绘制出航班保障过程 FRAM 功能网络图, 如图 4 所示。

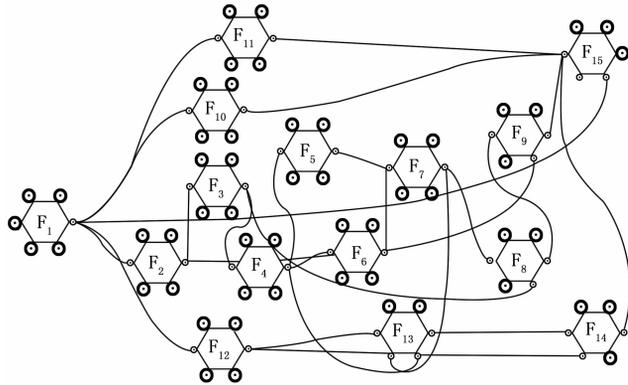


图 4 航班保障过程 FRAM 网络模型

结合航班过站地面保障流程历史运行数据, 对数据进行处理, 确定功能模块输出时间和精度变化评分标准, 时间变化分为适时、过早、过晚, 精度分为精确、可接受、不精确。组织专家对系统正常运行时每个功能模块变化范围进行区间值评分, 通过专家对各模块时间和精度变化区间评分代入式 (3) ~ (4) 进行改进犹豫模糊熵计算, 得到  $H_{i,t}^T$  和  $H_{i,p}^P$ 。根据熵值归一化计算各功能模块变化范围的概率占比  $\omega_{i,t}^T$  和  $\omega_{i,p}^P$ , 结合各功能模块时间和精度变化概率和功能模块时间和精度变化评分数值  $S_{i,t}^T$  和  $S_{i,p}^P$ , 得到的 15 个功能模块分数概率变化曲线如图 5 所示。

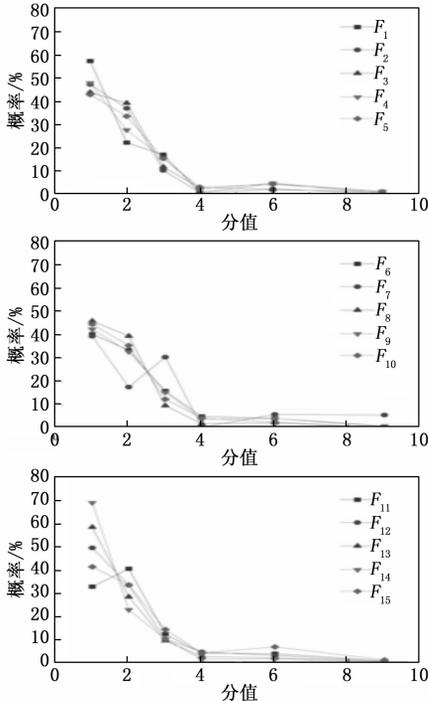


图 5 功能模块变化得分概率

结合图 5 将  $\omega_{i,t}^T$  和  $\omega_{i,p}^P$  代入式 (7) 得到 15 个功能模块可变性  $A_i$ , 见表 7。由表可知, 受人为因素和不确定条件的影响, 该航班的清洁、上客、撤轮挡环节的可变性较大。

表 7 功能模块可变性

功能模块	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	...	F <sub>14</sub>	F <sub>15</sub>
可变性	0.08	0.14	0.13	0.10	0.29

采用层次分析法分别对各功能元素耦合变异指数和功能可变指数进行计算, 确定各功能对系统影响程度作为权重。首先采用对 FRAM 模型中功能间元素的耦合可变性进行两两比较, 利用表 2 提出的判断矩阵标度将可变性量化, 构建输入端耦合判断矩阵。如表 8 所示, 以 F<sub>10</sub> 功能为例构建判断矩阵, 对 F<sub>10</sub> 功能的元素耦合可变性进行计算。由式 (8~10) 通过列归一化、行求和、行和归一化得所求特征向量  $w = [0.6901, 0.0746, 0.1353, 0.1]$ 。经一致性判别, 由式 (11) ~ (13) 得  $CR=0.008 < 0.1$ , 表明通过检验一致性可接受。对所有功能进行上述计算得到各功能元素耦合可变性如表 9 所示。

表 8 F<sub>10</sub> 功能的输入端耦合评判矩阵

F <sub>10</sub>	V(F <sub>1</sub> <sup>0</sup> F <sub>10</sub> <sup>1</sup> )	V(F <sub>9</sub> <sup>0</sup> F <sub>10</sub> <sup>9</sup> )	V(F <sub>11</sub> <sup>0</sup> F <sub>10</sub> <sup>11</sup> )	V(F <sub>14</sub> <sup>0</sup> F <sub>10</sub> <sup>14</sup> )
V(F <sub>1</sub> <sup>0</sup> F <sub>10</sub> <sup>1</sup> )	1	7	5	9
V(F <sub>9</sub> <sup>0</sup> F <sub>10</sub> <sup>9</sup> )	1/7	1	1/2	1/2
V(F <sub>11</sub> <sup>0</sup> F <sub>10</sub> <sup>11</sup> )	1/5	2	1	2
V(F <sub>14</sub> <sup>0</sup> F <sub>10</sub> <sup>14</sup> )	1/9	2	1/2	1

表 9 功能可变指数与元素耦合可变指数

功能	可变指数	元素耦合	可变指数
F <sub>1</sub>	0.08		
F <sub>2</sub>	0.14	V(F <sub>1</sub> <sup>0</sup> F <sub>2</sub> <sup>1</sup> )	0.14
F <sub>3</sub>	0.13	V(F <sub>2</sub> <sup>0</sup> F <sub>3</sub> <sup>2</sup> )	0.10
		V(F <sub>1</sub> <sup>0</sup> F <sub>3</sub> <sup>1</sup> )	0.02
F <sub>4</sub>	0.20	V(F <sub>3</sub> <sup>0</sup> F <sub>4</sub> <sup>3</sup> )	0.10
		V(F <sub>2</sub> <sup>0</sup> F <sub>4</sub> <sup>2</sup> )	0.10
...	...	...	...
F <sub>15</sub>	0.29	V(F <sub>9</sub> <sup>0</sup> F <sub>15</sub> <sup>9</sup> )	0.07
		V(F <sub>10</sub> <sup>0</sup> F <sub>15</sub> <sup>10</sup> )	0.07
		V(F <sub>11</sub> <sup>0</sup> F <sub>15</sub> <sup>11</sup> )	0.07
		V(F <sub>14</sub> <sup>0</sup> F <sub>15</sub> <sup>14</sup> )	0.07
		V(F <sub>1</sub> <sup>0</sup> F <sub>15</sub> <sup>1</sup> )	0.01

使用 ANP 方法构建超级矩阵, 利用超级矩阵计算的稳定性来表示每个功能对系统的影响程度, 以此作为权重。

### 3.3 实验与结果分析

选取该机场某天 19:30 的过站地面保障流程的基本运行数据进行实验仿真及相关验证, 计算航班地面保障流程能力评估指标的 3 个维度大小、权重、变异指数

的大小, 绘制每个环节的效能评估图。

图 6 为上轮挡、下客、关客舱门、上客 4 个保障环节的实际效能评估结果与预期效能评估结果雷达图, 由图可知, 这 4 个航班保障环节中上客所占权重最大, 对整个航班保障能力影响最大。上客环节期望和实际运行偏差最小, 一定程度上反映了上客环节评估表现较好。通过期望和实际雷达图的面积周长比计算得到各个环节的效能评估值。

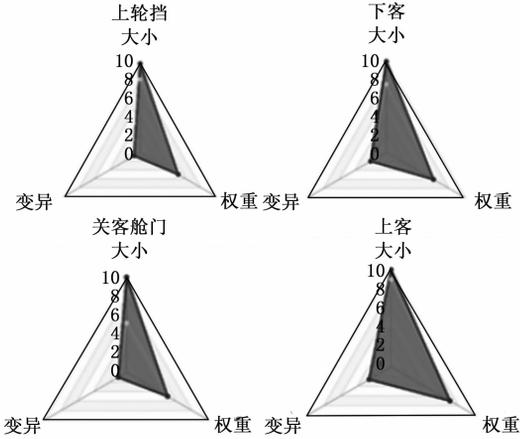


图 6 保障环节能力评估图

综合该航班各个环节效能评估值的最终效能评估结果如图 7 所示, 其中撤轮档环节的评估值为 9.741 0、开货舱门环节的评估值为 9.514 8、关货舱门环节的评估结果为 9.225 1, 这几个环节的效能评估指标较好。通过计算可得该航班最终的效能评估值为 0.732 5。由多个航班历史运行数据经过上述计算, 得到同一时刻多个航班的效能评估结果为: 0.823 3、0.774 5、0.926 8、0.7298、0.855 1。

结合保障流程评估结果和历史数据得到该航班地面保障流程节点的期望数据, 通过式 (14) 和 (15) 计算实际与期望存在的均方误差 (MSE) 为 6.015 min 和平均绝对误差 (MAE) 为 2.389 min, 航班地面保障紧邻

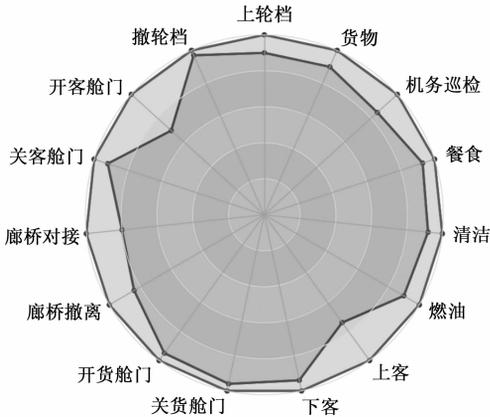


图 7 保障航班效能评估

时间窗一般为 15 min, 误差与时间窗之比约为 0.28, 该航班的效能评估值为 0.732 5, 两者近似相加为 1, 反映实际与期望之间的差距, 某种程度表明流程评估结果反映航班实际运行情况:

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u}_i)^2}{n} \tag{14}$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |u_i - \bar{u}_i| \tag{15}$$

对正常航班和异常航班的数据进行分类并分别输入到航班保障过程能力评估方法中, 如图 8 所示, 可以看出正常航班与异常航班的能力评估值以 0.5 为界, 正常航班的能力评估值都大于 0.5, 某种程度反映了本航班保障能力评估方法的准确性。

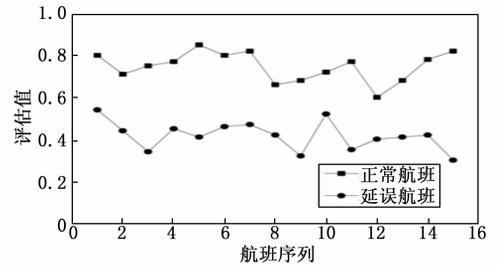


图 8 正常航班与异常航班对比

选取不同机场保障运行数据进行实验验证, 具体数据样例如表 10 所示。通过既定的流程评估方法步骤, 借助各评估指标变尺度函数参数, 将保障环节时刻值转化为具体的评估指标值的大小。

表 10 航班地面保障环节时刻数据样例

属性	上/撤 轮档	开/关客 舱门	下客开 始/结束	开/关 货舱门	清洁开 始/结束	餐食开 始/结束
开始时刻	13:00	13:03	13:05	13:04	13:29	13:30
结束时刻	14:49	14:44	13:20	14:35	13:45	13:51

结合表 7 各评估指标的可变性以及表 9 评估指标的权重大小, 得到该航班保障流程评估雷达图如图 9 所示。将每个环节的大小、权重、变异指数代入式 (12) 和 (13), 得到最终效能评估结果为 0.658 9 > 0.5, 为正常航班。其中上轮挡、廊桥对接、下客 3 个环节的指标与预期差距较大, 使得整个航班的效能评估结果降低。

通过使用不同的权重设计方法, 选择熵权法作为新的权重设计方法与本文的权重方法作对比分析, 结果如图 10 所示。

通过熵权法作为权重方法得到的保障流程评估结果, 计算实际与期望存在的平均绝对百分误差 (MAPE) 来比较两个方法的优劣:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|u_i - \hat{u}_i|}{u_i} \tag{16}$$

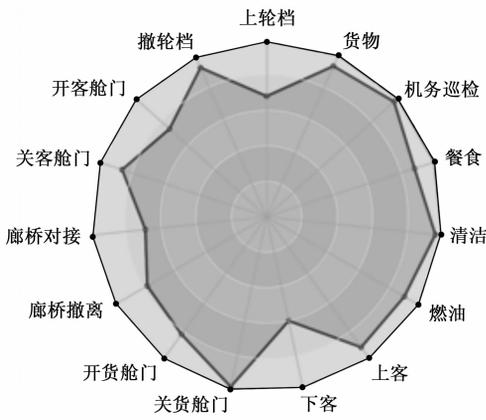


图 9 航班保障流程评估图

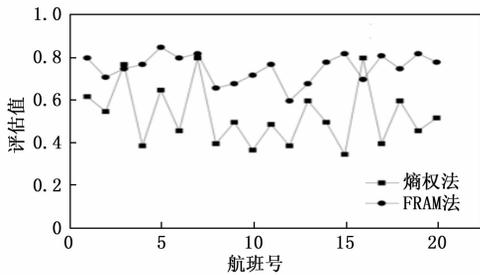


图 10 不同权重方法结果对比图

式中,  $u_i$  为实际运行值,  $\hat{u}_i$  为保障节点的期望值,  $n$  为预测航班数。

计算结果如表 11 所示。已知 MAPE 越小则模型性能越好, 所有关键节点的 FRAM 方法均比熵权法的 MAPE 低, 表明该方法优于熵权法, 且 MAPE 均低于 13%, 表明 FRAM 模型的评估效果较好。因此用熵权法作为权重方法对保障流程能力进行评估得到的结果稳定性及准确程度较差, 无法客观地反映评估指标的重要程度及过站航班地面保障流程能力的真实情况, 不能为后续航班推出决策提供依据。

表 11 MAPE 参数对比

保障节点	FRAM 方法 / %	熵权法 / %
F <sub>1</sub>	7.258	8.027
F <sub>2</sub>	6.817	9.529
...	...	...
F <sub>14</sub>	10.028	13.277
F <sub>15</sub>	12.817	17.778

#### 4 结束语

通过分析航班地面保障流程和机场运行相关标准, 建立了基于保障环节交互的 FRAM 保障过程模型, 从指标的大小、变异指数、权重 3 个角度出发, 设计了单航班保障流程能力评估方法。研究表明, 能力评估指标的大小由历史运行数据决定, 通过改进区间值犹豫模糊

熵和层次分析法进一步得到保障环节的可变指数与各环节交互关系的耦合可变性, 雷达图评估方法综合考虑了保障环节的大小、可变性和环节间的耦合。通过评估结果和实际运行数据进行仿真实验得到保障节点期望结果, 实际与期望存在的 MSE 和 MAE 都符合要求且正常航班的评估值均大于 0.5。在某种程度上, 本方法量化地分析了保障流程过程中的功能和关系, 为后续航班运行决策提供依据。

#### 参考文献:

- [1] 民航局. 2018 年民航行业发展统计公报 [J]. 民航管理, 2019 (5): 77.
- [2] TANG J, WANG D, YE W, et al. Safety risk assessment of air traffic control system based on the game theory and the cloud matter element analysis [J]. Sustainability, 2022, 14 (10): 6258.
- [3] ZHAO H, ZHANG N, GUAN Y. Safety assessment model for dangerous goods transport by air carrier [J]. Sustainability, 2018, 10 (5): 1306.
- [4] HAWKINS F H, ORLADY H W. Human factors in flight [M]. Routledge, 2017.
- [5] NETJASOV F, CRNOGORAC D, PAVLOVIC G. Potential safety occurrences as indicators of air traffic management safety performance: A network based simulation model [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2019, 102: 490 - 508.
- [6] ZHAONING Z, NA M, PENG Z. Based on the fuzzy set-valued statistics and the fuzzy mathematics theory in air traffic control system safety appraisal application [J]. Physics Procedia, 2012, 33: 511 - 520.
- [7] VISMARI L F, JUNIOR J B C. A safety assessment methodology applied to CNS/ATM-based air traffic control system [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2011, 96 (7): 727 - 738.
- [8] YUAN D, LEI Y, YANG N. Approach to the aviation and air traffic and transportation safety evaluation based on the Dempster's combination rule [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18 (3): 1014 - 1019.
- [9] ZHAO Y, WAN J Q. On the operational risk assessment of the air traffic control based on the set pair analysis method [J]. Journal of Safety and Environment, 2018, 18 (3): 871 - 875.
- [10] WANG Y, PANG Y, LIU Y, et al. Aircraft trajectory prediction and risk assessment using bayesian updating [C] // AIAA Aviation 2019 Forum, 2019: 2936.
- [11] GILLEN D, LALL A. Developing measures of airport productivity and performance: an application of data envelopment analysis [J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 1997, 33 (4):

261-273.

[12] ÖRKÜ H H, BALIKÇI C, DOĞAN M I, et al. An evaluation of the operational efficiency of Turkish airports using data envelopment analysis and the Malmquist productivity index: 2009-2014 case [J]. *Transport Policy*, 2016, 48: 92-104.

[13] 王俊丹, 曾小舟, 冯琳. 基于 DEA 方法的我国机场运行效率评价 [J]. *华东交通大学学报*, 2017, 34 (6): 82-89.

[14] 丛玮, 谢道仪, 朱睿, 等. 基于可拓多层次状态分类的机场运行效率评价研究 [J]. *航空计算技术*, 2022, 52 (2): 49-52.

[15] LI Y, TENG M. Airport group operational capacity assessment and analysis of its influencing factors: taking typical Chinese airport group as an example [J]. *Sustainability*, 2023, 15 (2): 1654.

[16] 李彪, 王立文, 邢志伟, 等. 过站航班地面保障流程

(上接第 194 页)

最终生成的方向图性能显著优于单纯依赖弓形约束的方案, 但该过程存在显著的时间消耗问题。长时间的迭代计算不仅大幅延长了算法执行周期, 还对硬件资源造成了沉重负担, 尤其在非均匀阵列场景下, 硬件负载过大可能导致系统稳定性下降。这一矛盾促使研究者聚焦于算法效率优化, 展开深度探索。基于此, 本研究从两个核心维度进行突破性优化: 一方面, 设计了全新的初始权值获取策略; 另一方面, 针对迭代过程中的方向图计算环节, 提出了非均匀采样点计算波束方向图的方法, 有效降低了高频次计算的复杂度。相较于原方法, 本研究在更短时间内实现了拟合效果更好的波束赋形效果。这对于波束赋形算法的实际应用, 尤其是对非均匀阵列实现优化提升系统在复杂环境下的稳定性与效率, 提供了一种提供了兼具理论创新性与工程实用性的高效解决方案。

#### 参考文献:

[1] 吴孟. 阵列方向图综合算法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2020.

[2] 王安义, 黄笑, 徐艳红. 基于伍德沃德-劳森抽样方法的阵列平顶波束综合 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22 (31): 13794-13800.

[3] 肖遥, 蔚保国, 翟江鹏. 全空域球面数字多波束天线波束控制方法研究 [J]. *无线电工程*, 2017, 47 (3): 39-42.

[4] 朱超, 熊沛, 陈红光. 一种半球面相控阵天线的低仰角增益优化设计 [J]. *电子测试*, 2023 (4): 18-21.

[5] 路复宇, 童宁宁, 冯为可, 等. 自适应杂交退火粒子群优化算法 [J]. *系统工程与电子技术*, 2022, 44 (11):

效能评估 [J]. *系统工程与电子技术*, 2020, 42 (7): 1543-1549.

[17] 罗承昆, 陈云翔, 项华春, 等. 装备体系贡献率评估方法研究综述 [J]. *系统工程与电子技术*, 2019, 41 (8): 1789-1794.

[18] 王涵宇, 谭钦文, 刘娟, 等. 基于改进 ISM-FRAM-AHP 的有限空间作业过程风险防控 [J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34 (9): 165-173.

[19] 任浩伟, 王青海. 区间值对偶犹豫模糊  $\beta$  覆盖粗糙集模型 [J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2024, 29 (4): 132-146.

[20] 张怡, 宋晨晨, 宋鹏, 等. 基于层次分析法模型的理工科专业校内评估研究 [J]. *系统科学学报*, 2025, 33 (3): 116-121.

[21] 王俊波, 唐琪, 李国伟. 基于高维随机矩阵和雷达图的真空断路器健康度综合评估 [J]. *武汉大学学报 (工学版)*, 2024, 57 (6): 837-845.

3470-3476.

[6] 张衡. 稀布阵列天线的波束赋形方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2023.

[7] 杨波. 大型阵列天线唯相位方向图综合算法研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.

[8] 王梓任. 大规模天线阵分级波束赋形技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2022.

[9] 李传. 基于双极化共形阵列的波束赋形算法研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2021.

[10] BENJAMIN F, JEAN J F. Optimal narrow beam low sidelobe synthesis for arbitrary arrays [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58 (6): 2130-2135.

[11] 孙洁, 李海林, 曹爱华, 等. 幅值比约束下稀布阵的旁瓣抑制混合算法 [J]. *现代雷达*, 2018, 40 (7): 57-60.

[12] 张峻文. 稀疏阵列天线技术研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.

[13] 包子阳. 基于 Matlab 的遗传算法及其在稀布阵列天线中的应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.

[14] 杨继波, 李会勇, 陈客松, 等. 球面共形天线阵列的稀布优化方法 [J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45 (4): 77-81.

[15] 董宇辉, 丁黎明, 朱天顺, 等. 基于 GA 的凸旋转体曲面共形阵列天线稀布方法 [J]. *空天预警研究学报*, 2023 (3): 164-169.

[16] 冯晨璋. 阵列天线方向图综合新技术研究 [D]. 西安电子科技大学, 2022.

[17] 刘广, 汪爽, 汪井, 等. 基于粒子群算法的阵列天线波束赋形研究 [J]. *微波学报*, 2023, 39 (3): 37-40.