

广州区域管制扇区运行效能指标体系的构建与实证研究

黑妍茹, 张振东, 尚 锋

民航中南空管局空中交通管制中心, 广东 广州

收稿日期: 2025年12月28日; 录用日期: 2026年1月19日; 发布日期: 2026年1月29日

摘要

为定量研究区域管制任意扇区的运行效能, 以广州区域管制中心42个扇区为研究对象, 构建了涵盖安全、空域、流量及效率4个维度的区域管制扇区运行效能评价指标体系, 梳理并提取了15项关键性能指标。后依托层次分析法(AHP)确定各指标权重, 并结合线性加权法建立了综合评估模型。选取典型扇区, 采集涵盖平常日与高峰日的多组运行日共2160个样本进行实例验证, 评价结果与实际情况相符, 证明了指标体系及评价模型的合理性、可行性和实用性。在此基础上, 利用大数据平台, 开发了一套区域管制运行效能评估系统, 为空管运行态势感知与科学决策提供了有效工具。

关键词

区域扇区, 运行效能, 量化分析, 层次分析法

Construction and Empirical Research on the Operating Efficiency Index System of the Guangzhou Air Traffic Control Sector

Yanru Hei, Zhendong Zhang, Feng Shang

Air Traffic Control Center, Middle South Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation of China, Guangzhou Guangdong

Received: December 28, 2025; accepted: January 19, 2026; published: January 29, 2026

Abstract

To quantitatively study the operational efficiency of any sector within area control, this research focuses on the Guangzhou Area Control Center. An evaluation index system for the operational efficiency of area control sectors is constructed, and 15 key performance indicators are identified and extracted. Subsequently, using the Analytic Hierarchy Process (AHP), the contribution of these 15 indicators to

文章引用: 黑妍茹, 张振东, 尚锋. 广州区域管制扇区运行效能指标体系的构建与实证研究[J]. 统计学与应用, 2026, 15(1): 301-310. DOI: [10.12677/sa.2026.151028](https://doi.org/10.12677/sa.2026.151028)

the system is determined, and an initial evaluation system is established. Two typical sectors within the Guangzhou Regional Control Center are selected, and 1080 samples from all time periods of three key days are collected for data validation. The evaluation results are consistent with the actual situation, demonstrating the rationality and feasibility of the indicator system and evaluation system. Based on this, a control operation situation system based on the Guangzhou area control operational efficiency indicator system is developed using a big data platform to further enhance the management level and decision-making efficiency of control operations.

Keywords

Aera Control Sector, Effectiveness Evaluation, Quantitative Analysis, Analytic Hierarchy Process (AHP)

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国民航空管系统向“安全与效率并重”的深度转型，以及大数据、人工智能等新一代信息技术与空管业务的加速融合，实现空管运行的精细化、智能化管理已成为行业发展的必然趋势。区域管制扇区作为空管运行体系中的核心组成部分，空域范围广、运行持续时间长，其效能状态直接决定着整个系统运行的流畅性与稳健性。然而，当前针对区域管制扇区的运行管理仍主要依赖于宏观流量统计与管理者的经验判断，在精确辨识扇区真实负荷特征、量化评估协同运行效益，以及为动态管理决策提供明确量化依据等方面，存在显著的实践瓶颈。

在管制运行效能评估领域，国内外研究已形成较为清晰的脉络。国际层面，国际民航组织(ICAO)、美国联邦航空管理局(FAA)及欧洲空管组织(EUROCONTROL)等机构构建了宏观性能指标体系，如 ICAO Doc 9854 提出的关键绩效领域(KPA) [1]-[3]，为全球空管系统提供了顶层设计框架与评估逻辑。我国研究在借鉴国际经验的基础上，结合空管现代化战略，同样从宏观层面确立了效能评估的发展方向与目标 [4]，为行业提供了高阶理论指导。与此同时，学术研究更多聚焦于特定维度的深化，例如终端区运行品质评价[5]、管制员工作负荷研究[6]以及空域网络复杂性分析[7]等；国内学者还在多模型融合与动态分析等关键技术层面取得了诸多突破[8] [9]。

尽管上述成果奠定了重要基础，其在区域管制扇区这一特定场景中的适用性仍显不足。区域管制扇区的效能内涵具有独特性，它既不同于航空公司对航班准点率、燃油效率等商业效益的追求，也区别于终端区与机场强耦合的微观动态调控(如跑道利用率、进离场排序)。其“高空大范围、长航时、强协同”的运行特点，要求评估体系能够综合反映空域结构利用、军民协同效能与大范围流量管理等核心维度。目前，尚缺乏一套专门针对该层级的、能够实现多维度融合的综合评估工具。

基于此，本研究构建一套适用于区域管制扇区的运行效能指标体系，并开展实证评价。该体系兼具轻量化、通用化与指标化的特点，旨在从系统层面实现对管制运行的科学评价与量化分析，并为空管一线单位提升运行安全与效率、推动管理从经验驱动向数据驱动转型，提供了可参考的实证依据。

2. 指标体系的构建

本研究以广州区域管制中心下辖的 42 个扇区为研究对象，涵盖单一进离场、单一巡航及混合运行等

多种典型扇区形态。以扇区为最小分析单元，旨在构建一套适用于所有区域管制扇区的通用化运行效能评价指标与模型。

2.1. 构建思路与筛选

为克服传统指标体系中存在的定义模糊、主观性强及可比性不足等问题，实现对区域管制扇区整体运行态势的精准评估，本研究系统构建了广州区域管制运行效能指标体系。构建过程紧密围绕区域管制的运行特点与风险特征，并遵循代表性、相关性、可衡量性与可实现性四项核心原则。

在理论框架上，本研究以国际民航组织(ICAO)的效能框架、欧洲空管组织(EUROCONTROL)的空域分类标准、中国民航局的《高质量发展指标框架体系》等为理论基础，同时深度结合中南地区独特的空域结构、飞行流量分布及资源利用现状。通过对区域管制实际效能需求的系统分析，确立了从安全、空域、流量及效率四个核心维度展开评估的架构。

通过组织专家会议，对区域管制系统整体运行效能的关键要素进行深入分析与研讨。在构建过程中，对初选指标进行了多次重新分类与筛选，确保每一项指标均归类清晰、数据源明确，并能动态反映现场运行的真实情况。最终，形成一套兼具全面性与可操作性的指标体系，共包含4个一级指标与15个二级指标，其结构如图1所示。

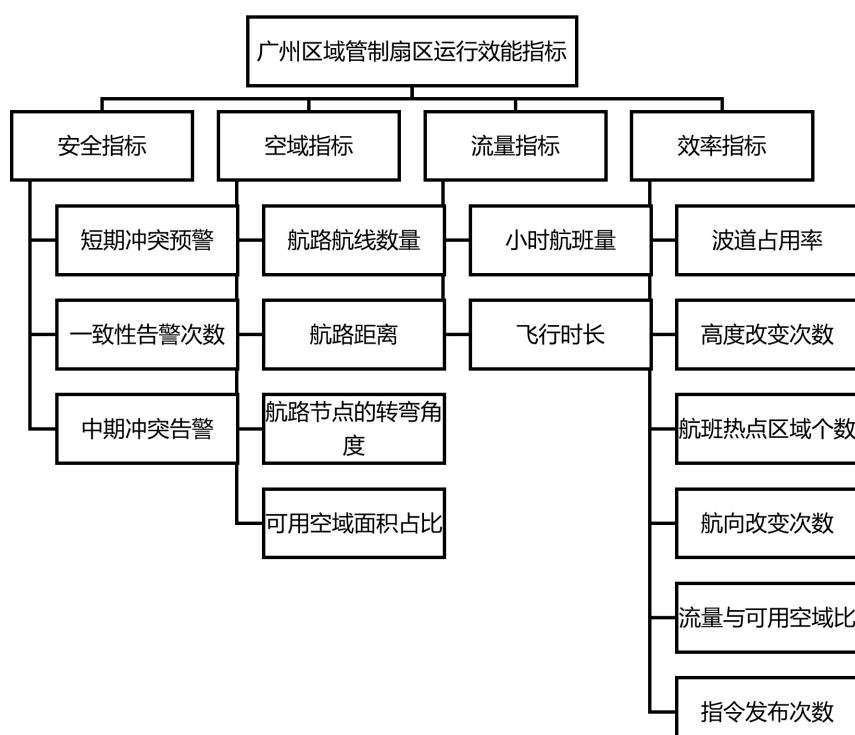


Figure 1. Regional control operation efficiency evaluation index
图 1. 区域管制运行效能评价指标

2.2. 指标定义与数据标准化

在确立指标体系框架后，本研究为全部15项二级指标明确了其具体定义、算法与计算公式(表1)。针对各项指标量纲与函数关系各异的问题，采用了数据标准化(无量纲化)处理，将原始数据统一映射至[0,1]区间，为构建综合评估模型奠定了一致的数据基础。

Table 1. Evaluation metrics and formulas for regional control system performance**表 1. 区域管制运行效能评价指标算法及公式**

序号	一级指标	二级指标	数学表达及公式
1		短期冲突预警	num_{st}
2	安全指标	一致性告警次数	num_{con}
3		中期冲突告警	num_{mt}
4		航路航线数量	$L_i = \sum_{i=1}^{L_i} r_i$
5		航路距离	$D_i = \sum_{i=1}^{L_i} d_i$
6	空域指标	航路节点的转弯角度	$\Delta_i = \theta_i - \theta_{i-1}, i \geq 2$ $\theta_{deg\ i} = \begin{cases} \Delta_i, 0^\circ \leq \Delta_i < 180^\circ \\ 360^\circ - \Delta_i, \Delta_i > 180^\circ \\ 360^\circ + \Delta_i, \Delta_i < 0^\circ \end{cases}$ $R_{deg} = \sum_{n=1}^N \sum_{i=2}^L \theta_{deg\ i}$
7		可用空域面积占比	$P_{weather}^{mil} = 1 - \frac{S_{weather}^{mil}}{S}$
8	流量指标	小时航班量	$num_{\Delta t}$ 为时间片段 Δt 内的航班总架次
9		飞行时长	T_{leg_i} 为统计时长内航段 i 的通行时间
10		波道占用率	$T_{tran} = \sum_{i=1}^n t$ $P_{tran} = \frac{T_{tran}}{\Delta T}$
11		高度改变次数	num_{cfl} 为时间片段 Δt 内的航班高度改变次数
12	效率指标	航班流热点区域个数	$q_{flow}^{i \in I} = \begin{cases} 1, num_{flow}^{i \in I} > x \\ 0, other \end{cases}$ $NUM_{flow} = \sum_{i \in I} q_{flow}^{i \in I}$
13		航向改变次数	航向改变次数 $num_{heading}$
14		流量与可用空域比	$P_{f \& s} = \frac{f_i}{S - S_{weather}^{mil}}$
15		指令发布次数	指令发布次数 num_{clear}

3. 综合效能评估模型构建(AHP-线性加权)

由 15 项运行效能指标获得的量化数据, 虽为评估提供了基础, 但难以直观反映管制运行的整体态势与演变趋势。为此, 需构建综合评估模型, 对多维数据进行深度整合与解析, 目标生成一个范围在 0 至 100 之间的综合评价价值, 从而为管理决策提供直观、量化的依据。

3.1. 数学模型构建

参考民航局《航班正常性统计办法》等行业规范性文件, 线性加权综合法因其权重透明、计算高效、结果可解释的核心优势, 已成为运行效能评估领域的基准方法。鉴于本项目构建的 15 项指标需直接服务

于高时效性决策场景(例如高峰时段扇区开合及人力动态部署), 其需求本质与航班正常性评估存在显著共性, 沿袭此验证方法论。

线性加权综合法(Linear Weighted Sum, LWS)又称简单加权平均法(Simple Additive Weighting, SAW), 是多准则决策分析(MCDA)中最基础且应用最广泛的方法。其核心公式为:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x'_i \quad (1)$$

其中 S 为综合效能评价值(0~100), w_i 为第 i 项指标权重($\sum w_i = 1$), x'_i 为标准化后的指标值(经无量纲化处理至[0, 1]区间)。

该模型可将安全、空域、流量、效率四个维度的异构指标统一至标准化标度空间, 实现效能态势的科学量化。

3.2. 基于 AHP 的权重确定

指标体系的建立提供了丰富的量化数据, 但仍需在这些指标中识别出关键影响因素。为科学确定各项指标的相对重要性, 本研究引入了层次分析法。

层次分析法(AHP)作为一种将定性与定量分析相结合的系统化决策方法, 在解决多准则权重分配问题上具有独特优势[10]。本研究旨在探索 AHP 在管制效能评估这一复杂场景下的应用, 并将其与透明的线性加权综合模型相结合, 构建一套权重合理、计算高效、结果可解释的扇区运行效能评估模型。

对于 15 项既定的二级指标, 采用层次分析法确定各项指标权重, 首先邀请 20 名资深专家进行独立打分, 完成意见汇总后, 将结果反馈给所有专家进行第二轮讨论与调整, 以此确保权重分配的客观性与共识度。

最终确定的指标权重系数如表 2 所示。其中, 流量指标(如小时航班量)与效率指标(如波道占用率、

Table 2. Weight coefficients calculated from the AHP expert rating matrix

表 2. 基于 AHP 专家打分表所计算出的权重系数

目标层	因素层(一级指标)	指标层(二级指标)	最终权重系数
区域管制运行效能评价指标体系	安全指标	短期冲突预警	0.059589534
		一致性告警次数	0.026103421
		中期冲突告警	0.018722851
	空域指标	航路航线数量	0.028973958
		航路距离	0.030692708
		航路节点的转弯角度	0.014917528
		可用空域面积占比	0.054705292
	流量指标	小时航班量	0.270287894
		飞行时长	0.115313549
		波道占用率	0.097222859
	效率指标	高度改变次数	0.099689245
		航班流热点区域个数	0.042725708
		航向改变次数	0.058986716
		流量与可用空域比	0.030993772
		指令发布次数	0.051074965

高度改变次数)被赋予较高权重,精准反映了区域管制运行中动态流量管理与指令操作效率的核心地位,是评估体系更贴合实际运行场景的效能驱动因素。

4. 实例分析及验证

4.1. 验证方案设计

为系统检验指标体系的区分度与适应性,本研究选取 AC4(复杂进港扇区)与 AC24(简单出港扇区)作为核心验证对象,如图 2 所示,以代表区域管制的两种典型运行模式。为量化高扇 AC30 对 AC4 的分流效益,AC4+30 视为两者的融合单元。

为全面检验指标体系在不同运行负荷下的表现,选取了六组典型运行日,包括平常日(2024年1月1日、2025年1月1日)与高峰日(2024年2月7日、2月11日; 2025年1月25日、2月1日)。所有样本日均满足“无复杂天气、无军航活动”条件,以控制外部变量,确保所观测的效能变化主要源于交通流量的内在波动。分析时段聚焦于每日08:00至20:00的关键运行时段。

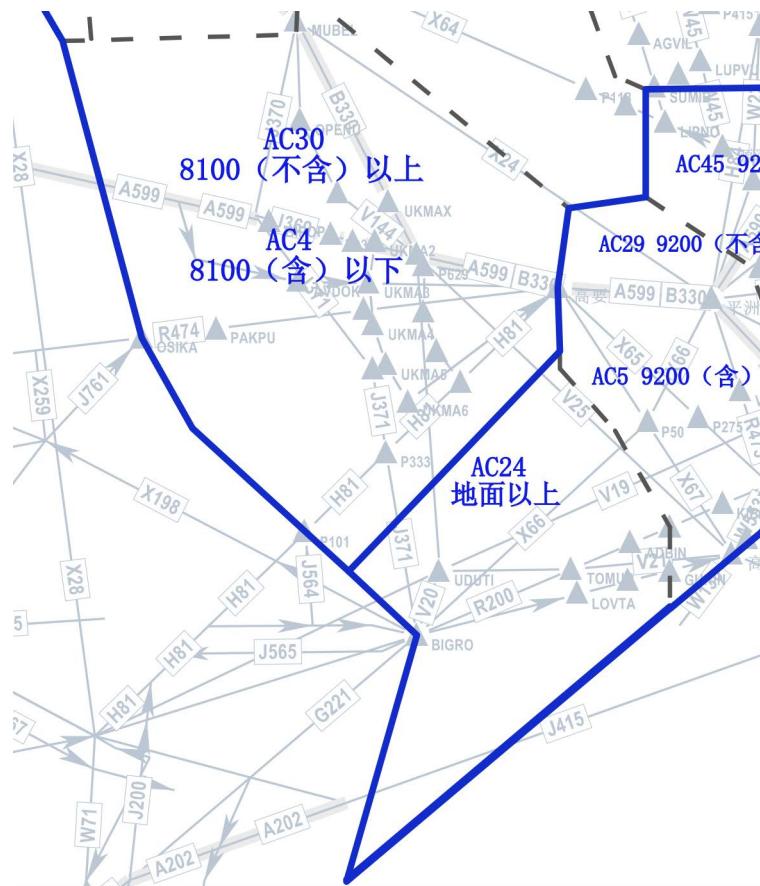


Figure 2. Schematic of airspace sectors AC4, AC30, and AC24 under Guangzhou area control

图 2. 广州区域管制 AC4, AC30 以及 AC24 扇区空域示意图

4.2. 综合评价结果

通过对六组运行日、共 2160 个样本数据的计算与分析, 如图 3 和图 4 所示, 通过对多组样本日的综合效能值进行计算, 本指标体系展现出卓越的适用性, 主要结论归纳如下:

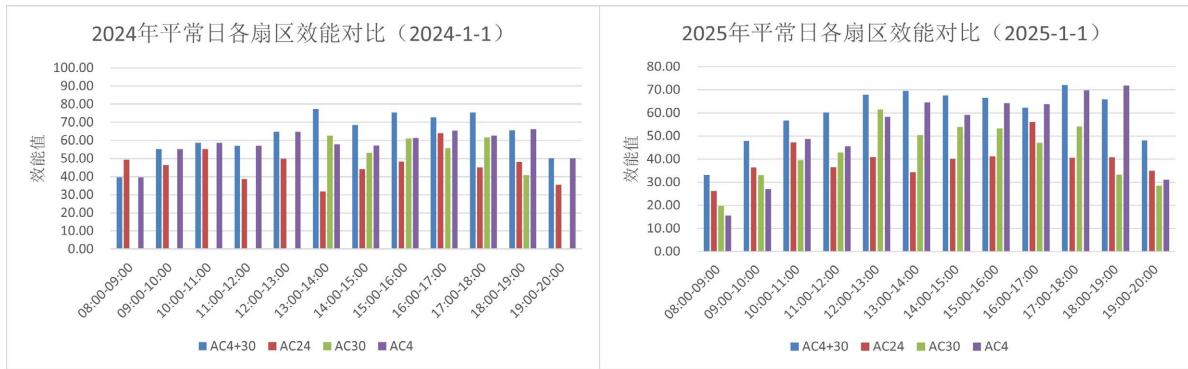


Figure 3. Annual performance comparison of sectors on regular days
图3. 年度平常日各扇区效能对比

1. 精准刻画扇区核心运行特性: 体系清晰区分了 AC4(复杂压力核心)、AC24(高弹性简单扇区)与 AC30(标准化协同模块)三类扇区的本质差异。AC4 扇区呈现“高基准、低增幅”的饱和特性(高峰日增幅约 19%); AC24 扇区则展现“高效能弹性”(增幅约 49%), 并在流量提升 19.6% 时实现“增量降指”(次均指令数下降); AC30 通过承接高复杂度流量(次均指令数上升 33.2%), 其角色已从“战术备用”深化为“常态支柱”。

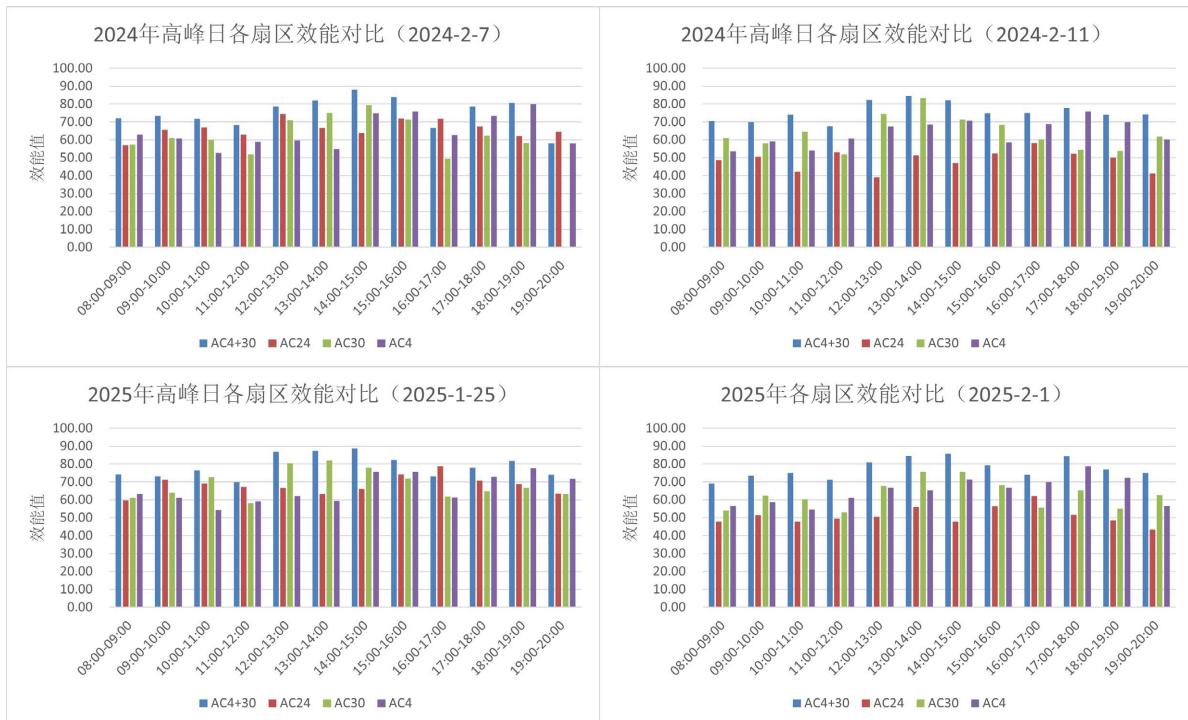


Figure 4. Comparison of sector performance on peak days
图4. 年度高峰日各扇区效能对比

2. 有效捕捉系统年度效能演进: 2025 年高峰日数据显示, 系统整体效能显著跃升。AC4 扇区在承受极限流量时, 效能峰值稳定在更高水平(78.8 分)且波动性收窄, 运行稳健性增强。同时, AC4+30 融合扇区模拟效能与 AC4 实际效能的压力差进一步扩大, 量化验证了高低扇协同价值的提升。各扇区从平常日至高峰日的效能响应模式在两年间高度一致, 证明了体系评估结果的稳定性。

3. 为空管精细化管理提供量化依据: 分析结果表明, 综合效能值可作为扇区动态开合(如 AC30)的精

准触发依据。体系界定了各扇区的角色与优化优先级(如 AC24 为挖潜对象), 并为基于统一数据客观判定扇区类型、预判负荷增长、实现资源精准匹配提供了前瞻性工具。

4.3. 验证结论与有效性总结

通过多维对比分析验证了所构建指标体系的综合性能。该体系能精准区分不同类型扇区的运行特征, 有效捕捉系统从独立承压向协同增效的演进趋势, 并通过量化 AC4+30 融合扇区的压力差证实了高低扇协同价值。

基于 AHP 的赋权模型展现出良好的稳定性, 在不同年份和负荷场景下均能产生合理、一致的评价结果, 证明了权重体系的鲁棒性。本体系还具有显著的实用价值, 不仅为扇区动态开合提供了数据驱动的决策依据, 界定了各扇区的弹性特征和优化优先级, 更建立了基于统一数据的扇区角色客观判定标准。

验证结果表明, 本指标体系是一个兼具区分度、敏感性、稳定性与实用性的有效工具, 为空域系统状态诊断、效能评估与精细化管理提供了可靠的量化支撑。

4.4. 归因分析与管理启示

为进一步揭示各二级指标对综合效能值的贡献程度, 本研究选取 2025 年 2 月 1 日(高峰日)AC4 扇区在 17:00~18:00 时段的运行数据, 进行归因分析。该时段综合效能值为 78.8 分, 处于高位运行状态。

通过绘制雷达图(图 5), 清晰展示了各二级指标在标准化后的表现及其对总分的贡献比例。分析发现:



Figure 5. AC4 comprehensive effectiveness value distribution: a peak hour analysis
图 5. 高峰日某时段 AC4 综合效能值分布

高度改变次数、波道占用率、小时航班量三项指标的贡献度合计超过 45%, 是影响该时段效能的核心因素; 航向改变次数与指令发布次数也表现出较高贡献, 反映出该时段管制指令密集、航向调整频繁; 空域结构参数与安全指标整体贡献较低, 说明该时段空域结构相对稳定, 冲突风险可控。

基于此, 管理者可针对高度层使用效率与波道资源分配进行优化, 例如通过动态高度层分配、优化管制用语节奏等方式, 进一步提升运行效能。

4.5. 系统应用展示

基于上述指标体系与模型, 本研究利用大数据平台开发了一套区域管制运行效能评估系统(图 6)。该

系统集成了来自欧洲猫自动化系统、ADS-B、中南云数据平台、全国流量管理系统等多源数据，通过自主开发的数据解析与可视化控件，实现了对扇区运行效能的实时监控、历史回溯与多维度对比分析，成功将理论研究转化为提升一线管理决策效率的有效工具。



Figure 6. Interface of the regional control operation efficiency evaluation system

图 6. 区域管制运行效能评估系统展示界面

5. 结语

本研究基于广州区域管制扇区，构建了一套实用的运行效能指标体系，为实时监控与评价分析提供了理论依据，并据此开发了集成安全态势评价与预警功能的运行效能系统。实证表明，该体系在扇区运行画像刻画、负荷感知与决策支持方面具有良好效果。

然而，本研究仍存在一定局限性。首先，实证验证是在“无复杂天气、无军航活动”的理想条件下开展的，该设定虽有利于控制变量、验证模型内核有效性，但也导致模型在面对实际运行中频繁出现的天气扰动、空域占用等复杂外部因素时，其适用性与鲁棒性尚需进一步检验。此外，指标体系在微观层面的精细化程度仍有提升空间，系统的预测预警功能及多源数据融合能力也待加强。

展望未来，研究工作可从以下三方面深化：其一，增强模型鲁棒性，通过引入气象、军航计划等外部数据，构建动态扰动因子，使模型具备复杂运行环境下的自适应评估能力；其二，提升系统智能水平，推动系统功能从现状评估向“评估-预测-预警”一体化演进，实现从被动响应到主动调控的跨越；其三，拓展体系应用边界，在不同空域结构和管理模式下进行广泛验证，以期形成一套普适、稳健的区域管制运行效能评估标准与工具。

参考文献

- [1] 国际民用航空组织. 全球空中航行系统性能手册[M]. DOC 9883, 蒙特利尔: 国际民用航空组织, 2019.
- [2] 欧洲空管局绩效评审委员会. 2018 年绩效评审报告[R]. 布鲁塞尔: 欧洲空管局, 2018.
- [3] 美国联邦航空局. 空中交通管理相关运行性能对比报告[R]. 华盛顿: 美国联邦航空局, 2020.
- [4] 民航局空管局. 中国民航空管现代化战略(CAAMS)实施路线图[M]. 北京: 民航出版社, 2018.
- [5] 张建平, 胡明华, 刘卫东. 终端区空中交通管制运行品质综合评价[J]. 西南交通大学学报, 2012, 47(2): 341-347.
- [6] 张明, 韩松臣. 基于可拓学的管制员工作负荷综合评价[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(6): 840-844.
- [7] 董襄宁, 胡明华, 李孝荣. 区域管制扇区复杂性指标构建及分析[J]. 数据采集与处理, 2019, 34(5): 908-914.
- [8] 王润东, 潘卫军, 陈晓光. 基于博弈论赋权的区域管制服务质量可拓集对评价模型[J]. 航空计算技术, 2024, 54(3): 70-74.
- [9] 朱承元, 张澈, 管建华. 基于改进支持向量机的空域交通态势识别方法[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(15): 6301-6308.
- [10] 董君. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 科技资讯, 2015, 13(29): 218, 220.