

区域管制扇区运行效能评估体系的系统构建： 理论路径、核心难点与应对策略

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11月24日；录用日期：2026年1月7日；发布日期：2026年1月19日

摘 要

区域管制扇区运行效能评估体系的构建是空管系统实现精细化与智能化管理的关键理论问题。文章系统提出了“理论奠基、指标构建、模型实施、验证优化”的闭环构建总体路径，并深入剖析了“国际-本地融合适配”、“数据可靠获取与治理”、“多维度指标科学集成”三大核心理论难点及其应对策略。研究构建的理论框架具有普遍适用性与前瞻性，为空管系统从经验管理向数据驱动决策转型提供了系统方法论支持，对推动未来智慧空管体系建设具有重要指导意义。

关键词

空中交通管制，运行效能，指标体系，构建路径，难点分析

Systematic Construction of an Operational Efficiency Assessment System for Regional Control Sectors: Theoretical Pathways, Core Challenges, and Addressing Strategies

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: November 24, 2025; accepted: January 7, 2026; published: January 19, 2026

Abstract

The construction of an operational efficiency assessment system for regional control sectors is a

文章引用：黑妍茹，张振东，尚锋. 区域管制扇区运行效能评估体系的系统构建：理论路径、核心难点与应对策略[J]. 交通技术, 2026, 15(1): 34-45. DOI: 10.12677/ojtt.2026.151004

key theoretical issue in achieving refined and intelligent management in air traffic control systems. This paper systematically proposes an overall closed-loop construction framework comprising “theoretical foundation, indicator construction, model implementation, and validation optimization.” It also provides an in-depth analysis of three core theoretical challenges—“integration and adaptation of international and local standards,” “reliable data acquisition and governance,” and “scientific integration of multi-dimensional indicators”—along with corresponding strategies. The theoretical framework developed in this study demonstrates universal applicability and forward-looking significance, offering systematic methodological support for the transition of air traffic control systems from experience-based management to data-driven decision-making. It holds important guiding value for advancing the development of future intelligent air traffic management systems.

Keywords

Air Traffic Control, Operational Efficiency, Indicator System, Construction Path, Challenge Analysis

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

我国民航空管系统正处于加速转型升级的关键时期，面对日益复杂的运行环境，如何在保障安全的前提下持续提升运行效率，成为系统发展的核心议题。这一进程高度依赖大数据、人工智能及云计算等新一代信息技术与空管业务的深度融合。然而，空管系统在运行过程中产生的海量、多源、异构数据仍处于碎片化、非体系化的状态，难以直接支撑精准的态势判断与科学地运行决策。因此，构建一套系统化的运行效能评估体系，将底层原始数据转化为具有指导意义的关键绩效指标，已成为释放数据价值、推动空管运行从经验驱动转向数据驱动的关键路径。

现有研究在运行效能评估方面多聚焦于终端区与机场层面[1]，或局限于安全、复杂度等单一维度[2][3]，缺乏对区域管制扇区运行特点的整体把握。作为连接机场终端区与航路网的关键环节，区域管制运行具有“高空大范围、长航时、强协同”的典型特征，其效能评估的维度和方法与其他航空主体存在本质区别。长期以来，针对区域巡航阶段的精细化评估研究相对薄弱，缺乏对区域管制扇区指标体系构建全过程的系统方法论指导。

此外，随着大数据、人工智能与空中交通管理的深度融合，效能评估研究呈现出从静态描述向动态诊断、从孤立分析向系统融合演进的新趋势。学者们开始探索利用机器学习(ML)方法挖掘运行数据中的深层模式，例如基于卷积神经网络(CNN)的空中交通态势特征提取[4]，以及利用长短期记忆网络(LSTM)对管制扇区运行负荷进行短期预测[5]。同时，大数据平台的建设使得融合雷达轨迹、飞行计划、气象情报等多源异构数据进行系统性效能评估成为可能[6][7]。国际机构如 EUROCONTROL 也在其年度绩效评估中，系统性地展示了从海量数据中提炼智能、支撑决策的最新实践范式[8]。这些前沿探索极大地丰富了评估的技术工具箱，但也暴露出研究焦点分散、评估框架与本地化业务逻辑衔接不足、以及全流程方法论指导缺失等问题。

鉴于此，基于中南空管局广州区域管制中心的项目实践，本文提炼出一套具有普适性的区域管制扇区运行效能评估体系构建方法论，强调理论的前瞻性与系统的可迁移性，旨在为空管系统整体效能提升与未来智能化发展提供理论支撑与实践指引。其贡献在于，本文并非提出另一项孤立的技术模型，而是

旨在构建一个能够系统整合并有序引导上述前沿技术与传统方法应用的顶层理论框架。本文系统提出的“理论奠基 - 指标构建 - 模型实施 - 验证优化”闭环路径及其应对核心难点的策略体系，正是为了将碎片化的技术探索与差异化的本地实践，纳入一个具有普遍解释力与可操作性的方法论体系之中，从而为空管运行效能评估从离散创新走向系统化、工程化实施提供理论指引。

2. 区域管制运行效能评估体系的构建路径

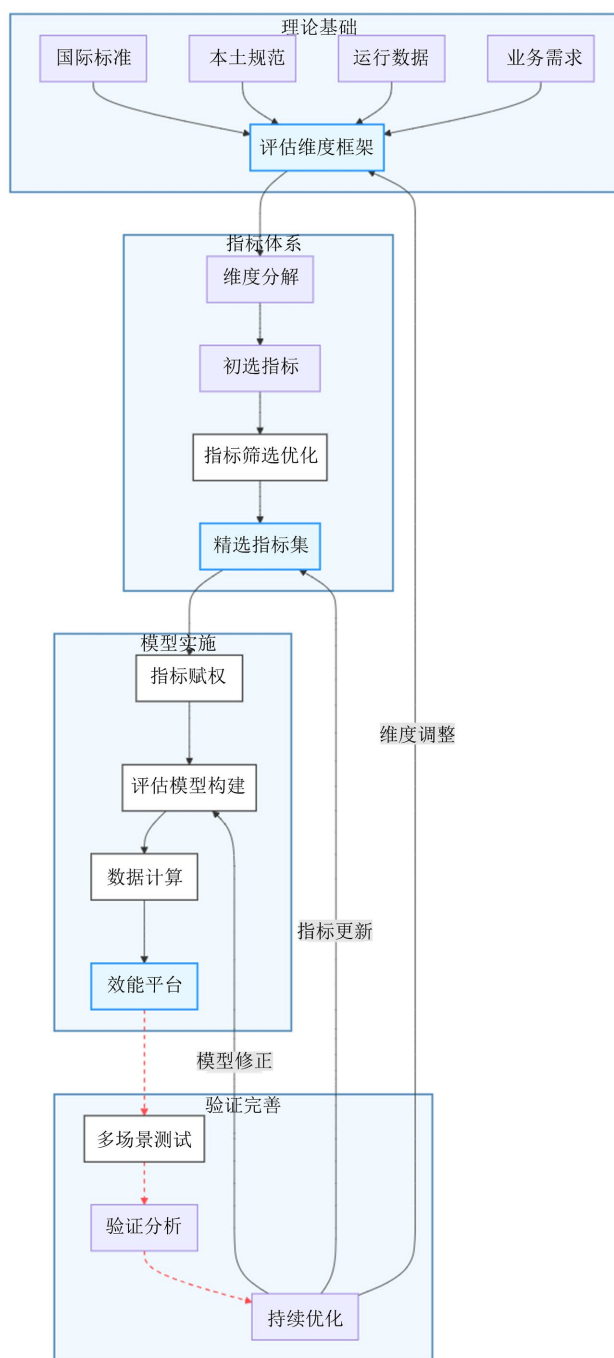


Figure 1. Logical framework and phased progression

图 1. 构建逻辑脉络与阶段递进

区域管制运行效能评估体系的构建是一项系统性工程, 基于中南空管局广州区域管制中心 3 年的项目实践, 研究出其总体遵循“理论奠基-指标构建-模型实施-验证优化”的闭环逻辑。该路径为实际工作提供了清晰的阶段划分与实施框架。为更直观呈现构建过程的逻辑脉络与阶段间递进关系, 图 1 展示了完整的构建路径。

该体系构建主要包括以下四个主要阶段:

(1) 理论奠基: 本阶段旨在整合国际标准、本土规范、运行数据及业务需求, 确立运行效能评估体系的维度框架基础, 为系统构建奠定理论基础, 可视为体系的“灵魂”。

(2) 指标体系构建: 将理论维度分解为初步指标池, 通过专家评议、相关性分析等方法进行筛选与优化, 最终提炼出核心指标集, 构成体系的“血肉”。

(3) 评估模型与实施: 该阶段主要包括四项任务: 指标赋权(采用层次分析法、熵权法等科学方法确定权重)、模型构建(建立如加权求和、TOPSIS 等综合评价模型)、数据集成与计算(明确数据来源并设计效能计算算法)、以及工具化实现(开发自动化评估平台, 实现评估过程的自动化、标准化与工具化), 共同充当体系运行的“心脏”。

(4) 验证完善: 通过选取典型运行场景(如日常、高峰流量、复杂天气等)对体系进行多维度测试, 验证其有效性、灵敏度与实用性, 根据测试结果分析和实际应用反馈, 对指标权重、模型参数乃至指标体系本身进行持续迭代优化, 此机制确保体系持续具备适应性与活力。

3. 核心难点与破解思路

基于上述构建路径, 本章深入分析过程中必然面临的三大核心理论挑战, 并探讨相应的解决思路与方法论选择。

3.1. 国际标准与本土化实践的有效融合

在构建区域管制运行效能评估体系的理论奠基阶段, 首要难点在于如何实现国际标准、国家规范与区域特色之间的有机衔接与融合。国际民航组织(ICAO)通过 Doc9854 与 Doc9883 [9]-[11]等文件, 确立了以安全、容量/效率、环境与成本为核心的四大效能维度, 为全球空管系统提供了统一的评估框架与通用“语言”。然而, 该框架还需结合具体国家与地区的空域管理体制、运行特点与发展阶段进行本土化转换。

我国民航局发布的《高质量发展指标框架体系》[12]正是 ICAO 框架在中国语境下的深度适配成果。其在保留国际通用维度的基础上, 创造性引入“军民协同响应度”“空域释放率”等体现中国空域管理特色的关键指标, 并建立起动态迭代机制, 实现了国际标准与国家战略、行业实践的系统性对接。这一本土化路径, 为区域级运行效能评估体系的构建提供了方法论基础。

将国际标准与国家框架落实到具体空管运行系统时, 需进一步结合其运行生态进行细化与调整。以中南空管局广州区域管制扇区为例, 其地处珠三角密集机场群空域, 面临高度层交叉运行、军民航活动频繁等复杂情境, 效能运行效能评估体系需精准刻画此类区域特有因素。相较于航空公司对商业效益的关注, 或终端区对机场耦合效能的侧重, 区域管制扇区运行效能评估更需聚焦于空域结构与利用效率、军民协同效能与大范围流量管理等专项维度。

为在指标层面实现从国际规范到区域实践的贯通, 研究团队提出“指标加减法”作为核心构建策略:

(1) “加法”强调对区域核心特征的增强表达, 系统增补如空域释放率、军民协同响应度、大范围流量协调效率等特色指标;

(2) “减法”则注重对通用指标的转化与聚焦, 弱化非核心职责类指标(如航司关注的碳排放), 并将

ICAO 通用维度转化为如指令直飞效益、航迹偏离率等反映区域运行实际的操作性指标。

该策略贯穿于理论奠基阶段的全过程，最终构建起一个国际维度、国家指标与区域特征三级贯通的层次化结构，由此确保所构建的运行效能评估体系兼具国际合规性、国家适用性与区域针对性。

3.2. 基于数据可得性的指标科学筛选

将理论维度逐层分解为可操作、可落地的具体指标池时，研究团队常面临严峻的数据基础挑战，导致理想化指标体系难以落地。

在数据收集层面，诸多理想的关键效能指标常因各种现实约束而难以量化获取，例如，涉及军方活动、空域限制的详细数据往往出于安全保密政策而难以获取；刻画管制员工作负荷、协调效能、决策过程等方面的定性指标，则常常依赖非正式渠道或人工采集，易受记录不全、标准不一、格式混乱、主观性强等问题影响，严重损害了数据的连续性、可靠性与可比性。

数据处理与融合环节同样复杂。构建综合效能指标体系需融合量纲与类型各异的指标(例如航班延误、空域面积等定量指标，以及工作负荷评分、协调顺畅度等定性指标)。为确保这些指标具备可比性，必须进行标准化处理，而方法的选择及其影响需充分论证。

此外，确保来自雷达、计划、气象等多源系统、具有不同时间戳和空间参考的数据精确对齐与融合，是保证计算结果准确可靠的基础性工程难题。

这些现实存在的挑战深刻地揭示了理论模型设计与数据可获得性现实之间的巨大差距，常迫使运行效能评估体系的设计者必须在评估范围的全面性、模型结构的复杂性与工程实现的可操作性之间做出权衡与妥协，有时甚至不得不放弃一些理论重要但数据不可得的指标，或者简化模型结构。

为系统应对上述挑战，基于项目实践与研究总结，本研究提炼并确立了以下四项核心构建原则，以指导指标的科学筛选。

代表性原则：指标应能集中表征管制运行的核心矛盾(如军民航协同)，通过典型性指标透视系统关键状态。即使评价体系高度精简，仍能全面覆盖多维效能特征，避免评价结果陷入局部视角失真。

相关性原则：强调指标应与巡航阶段的效能表现有直接、明确的关联(例如，航迹偏离率能直接体现管制指令的执行效果)。通过筛选掉关联性不强的指标，并避免选择含义相近的指标，可以确保运行效能评估体系精准聚焦核心问题，从而提升其诊断能力和对决策的支持作用。

可衡量性原则：要求指标能够利用空管自动化系统(如雷达航迹、空域状态数据等)进行客观测量。此原则旨在确保评估基于客观数据，从而将管制员的主观经验判断转化为可量化、可验证的分析依据，保障评估结果的客观公正。

可实现性原则：注重指标在现有系统中的工程落地性。要求数据采集不依赖人工转录或外包数据处理，基于现有空管自动化系统实时输出能力，杜绝理论完美但实操滞后的设计陷阱。

在上述原则指导下，可进一步从安全、空域、流量、效能四个维度建立评估框架。这四个维度既源于理论奠基阶段对区域管制运行特性的提炼，也为后续指标筛选提供了结构化指引，推动经验管理向科学管理转型。

安全维度：聚焦管制运行中冲突预防与指令一致性等核心安全属性，衡量系统抵御扰动、维持安全边界的底层能力。其评价重心在于实时风险感知精度与安全冗余可靠性。

空域维度：关注航路结构复杂性与空域资源利用效率，评估物理环境对运行效能的支撑水平。其评价核心在于空域拓扑合理性与资源供给适配性。

流量维度：追踪空中交通流的规模、分布及持续性特征，量化交通需求与管控措施的交互效应。其评价侧重流量波动适应性与管理措施响应灵敏度。

效率维度：衡量管制员在空域-流量系统中的作用效能，评估人因操作与资源配置的协同水平。其评价本质在于资源转化效率与人机协同优化度。

综上，通过将四项构建原则具体应用于安全、空域、流量、效率四个维度，形成了一个在数据约束下兼具科学性与可实现性的评估框架，为后续指标的精确定义与筛选奠定了坚实基础。

3.3. 应用佐证：指标筛选策略的输出与示例

上文所述“指标加减法”与四项构建原则，共同构成了一套系统的指标筛选理论工具。为阐明其应用逻辑，本小节以广州区域管制中心的实践为背景，展示该理论工具的具体输出。

(1) 核心指标集的生成：通过“加减法”策略对初步指标池进行系统权衡，最终凝练出包含 4 个维度、15 项指标的核心集合，这里以部分核心指标为示例(如表 1 所示)。此清单并非普适标准，而是理论工具在“高空大范围协同”这一特定区域运行特征下的一次定制化应用示例。它显著体现了“加法”对区域核心矛盾(如动态空域管理)的强化，以及“减法”对非核心或场景错配指标的简化。

Table 1. Example of a set of core indicators for regional control operational effectiveness

表 1. 区域管制运行效能部分核心指标集示例

目标维度	二级指标	理论工具应用要点
安全	短期冲突预警	强化表达：直接映射实时冲突风险，满足“相关性”与“可衡量性”原则。
	一致性告警次数	强化表达：量化指令执行偏差，关联人因系统安全。
空域	可用空域面积占比	加法(特色新增)：响应“军民协同”本土化需求，将动态空域资源供给转化为可计算指标。
效率	航班流热点区域个数	加法(特色新增)：超越静态航路，识别动态交通聚集区，提升态势感知深度。
	流量与可用空域比	转化与集成：将“空域”与“流量”维度耦合，生成动态压力指数，体现“代表性”原则。

(2) 关键指标的计算逻辑示例：在 15 项关键指标中，以“可用空域面积占比”指标为例。

其定义为：扇区内可用空域占总空域面积的比例。

指标说明：空域是调配的基础，当空军活动或者天气影响时，扇区可用空域被压缩，给管制工作造成一定难度。可用空域面积占比越少，管制员调配难度越大，压力指数越高。天气突变(如雷雨覆盖)或军航活动导致的空域压缩，会瞬间提升调配复杂度，甚至引发连锁反应(如航班大面积延误、安全裕度降低)。然而，传统方法依赖人工估算空域损失率，存在主观性强、精度低、时效差三大缺陷。例如，气象雷达回波图与军航活动空域数据的割裂处理，使空域可用性计算难以匹配运行需求。为攻克空域动态量化这一行业共性难题，本研究在计算逻辑层面，创新性地集成了 A 星算法。该算法通过将空域网格化并搜索可通行路径，实现了对不规则受限空域面积的精准、自动化测算。这一算法选型与集成策略，正是“可实现性原则”与“可衡量性原则”在工程实现层面的具体体现。

数据来源：气象雷达图，军航活动模板库

公式：

$$P_{weather}^{mil} = 1 - \frac{S_{weather}^{mil}}{S} \quad (1)$$

其中 $P_{weather}^{mil}$ 为常态化可用空域面积与空域总面积占比， S 为空域面积， $S_{weather}^{mil}$ 为存在军航或天气的空域面积。

取值方法：提取一小时内天气气象图，并对常态军航活动做下线设置，根据实际情况叠加两者图像，

由小程序解析图像计算可用空域面积占比每小时均值。

详细计算过程：

1. 读取每小时天气气象图做初步解析生成阴影区域；
2. 根据实际运行记录调取军航活动图像，生成二次解析阴影区域；
3. 根据两者叠加图像计算可用空域面积占原有空域的比值。

“可用空域面积占比”指标，其定义、数据源与计算逻辑的确定，完整遵循了四项构建原则。

代表性上，它直接关联军民航活动与天气对管制调配的根本性约束；可衡量性上，通过集成气象雷达与军航活动模板数据，并应用 A 星算法进行像素化分析(见图 2)，实现了从模糊经验到精准测算的跨越；可实现性上，其计算依托于现有系统的标准化数据输出。该指标的可视化结果，能为管理者提供直观的空域资源态势，这正是理论框架所追求的“将数据转化为可操作的决策信号”价值的体现。

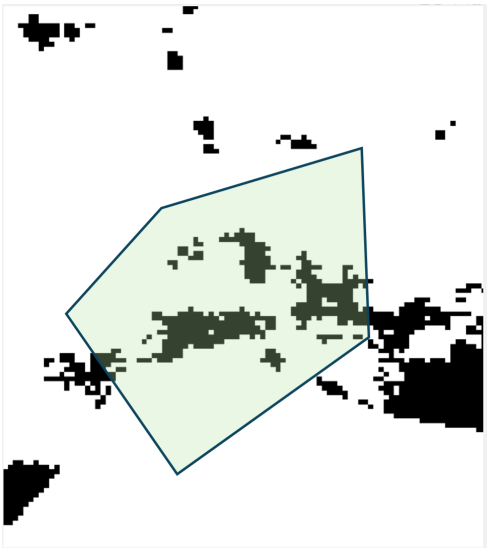


Figure 2. A pixelized weather map and A star algorithm
图 2. 某扇区像素化处理过的天气图与 A 星算法

本节示例表明，本文构建的理论筛选工具能够有效引导出一套紧扣区域运行特征、兼具国际合规性与本地实用性的指标集。这验证了该理论工具的方法论价值，为其在不同特性区域的迁移应用提供了可参照的范式。

3.4. 多维度异构指标的综合评价模型构建

在完成指标体系的构建与数据准备后，区域管制扇区运行效能评估面临的核心挑战在于如何将安全、效率等多个维度下性质迥异、量纲不一的指标进行科学融合，以形成对系统运行状态的综合性判断。这一过程的复杂性不仅源于指标本身的异构性，更在于不同融合方法在理论基础、权重逻辑与结果解释性上存在显著差异，模型构建者需在科学性、复杂性与实用性之间做出审慎权衡。

因此，在完成基础的数据预处理(如标准化与正向化)以消除量纲影响后，选择适宜的指标融合方法便成为构建综合评价模型的关键决策。不同的多属性决策或多目标优化方法，对数据分布、指标关系及权重来源的假设各不相同，其输出结果的形式与含义亦有所区别，需结合具体的评估目标与应用场景进行针对性选择。

主流融合方法论主要包括以下几类：

- (1) 线性加权综合法:通过赋予各指标权重后线性加和得到综合评价值。该方法模型透明、计算高效、结果易于解释,但其假设指标间相互独立且可线性补偿,与实际复杂系统的非线性特征常有不符。
- (2) 主观赋权法:以层次分析法[13]为代表,依据专家经验判断确定指标权重。其优势在于能有效融合专家知识,尤其适用于定性指标或数据稀缺场景;缺点在于主观性强,权重易受专家背景与偏好影响。
- (3) 客观赋权法:如熵权法[14],完全依据数据本身的离散程度确定权重,具有绝对的客观性。其不足之处在于权重可能偏离实际业务重要性,且对数据样本量与质量较为敏感。
- (4) 组合赋权法[15][16]:融合主、客观赋权方法,旨在兼顾专家经验与数据本身的信息量,寻求更均衡的权重分配,是当前研究的热点方向。
- (5) 其他复杂模型:如数据包络分析适用于效率评价,TOPSIS 基于理想解距离进行排序,神经网络等机器学习方法具备强大非线性拟合能力但解释性较弱。各类方法均有其适用前提与场景,应依据评估目标灵活选用。
- 综上,综合评价模型的选择本质上是在科学性、实用性、可解释性与可实现性之间的权衡过程。一个成功的模型应既能准确捕捉系统运行的多维特征,又能在实际工程环境中稳定、高效地运行,为空管决策提供可靠依据。

广州区域管制扇区效能评价——AHP专家打分表[复制]

尊敬的专家:

您好!感谢您在百忙之中抽空填写这份问卷。请您根据自己的经验和看法判断表中两两指标之间的重要程度。此调查问卷,根据层次分析法(AHP)的形式设计,在同一层次,对影响因素重要程度为衡量尺度,划分九个等级。请您按照重要程度对所列指标两两进行比较评分,本项调查的最终结果将作为评定指标权中的重要依据,您的意见对本研究具有重大意义,感谢您的支持和帮助!

以下是此次调查研究的评价指标体系:

目标层	准则层	指标层
广州区域管制运行效能评价体系	安全指标	短期冲突预警
		一致性告警次数
		中期冲突告警
	空域指标	航路航线数量
		航路距离
		航路节点的转弯角度
		可用空域面积占比
	流量指标	小时航班量
		飞行时长
	效能指标	波道占用率
		高度改变次数
		航班流热点区域个数
		航向改变次数
		流量与可用空域比
		指令发布次数

评分要求:

(1) 评分划分为9个等级。

9级其重要、7明显重要、5比较重要、3稍微重要、1同等重要

量化值	含义
1	两个指标具有同等重要性
3	前者指标比后者指标稍微重要
5	前者指标比后者指标较强重要
7	前者指标比后者指标强烈重要
9	前者指标比后者指标极其重要
2, 4, 6, 8	两相邻判断的中间值
倒数	两相邻的反比较(1/3、1/5、1/4....)

Figure 3. Regional control sector performance questionnaire based on AHP design

图 3. 基于 AHP 设计的区域管制扇区效能调查问卷

在完成指标体系的构建后,综合评估模型的选择需回到“国际-本地融合”与“数据-经验平衡”

的核心难点上进行决策。各类方法均有其适用前提与场景，应依据评估目标灵活选用。为具体阐明上述理论权衡如何在实践中落地，以中南空管局广州区域管制中心项目为例，面对指标体系中同时包含高度定量的雷达数据与高度依赖专家经验的协调效能评估这一典型混合情境，层次分析法(AHP)因其在处理定性定量混合信息、构建结构化判断矩阵方面的固有优势被采纳。这一选择印证了理论分析：当运行效能评估体系深度涉及本土化、人性化因素时，能够融合专家知识经验的模型往往比纯数据驱动模型更在项目实践中具适用性。

实践进一步表明，基于专家问卷(如图 3)确定的静态权重在实际应用时，可能因数据质量(如系统虚警)或特定运行场景的敏感性，导致评估结果与实际效能感知存在偏差。这引出了对初始模型的动态校准机制：即依据历史典型场景的综合评估结果与一线管理反馈，对权重进行审慎的迭代优化。这一过程并非否定模型的理论基础，而是将本土化实践数据作为关键输入，使模型从“静态设计”走向“动态适配”，从而在理论严谨性与实践贴合度间达到更高阶的平衡。此案例说明，模型的选择与优化并非一次性工作，而应是一个嵌入在“验证完善”阶段、与本地数据持续交互的闭环过程，这为其他区域在应用本框架时提供了重要的方法论启示。

在通过专家问卷(AHP)确定指标权重并建立动态校准机制后，运行效能评估进入综合计算阶段。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 之间的综合评价值，从而为管理决策提供直观、量化的依据。

在模型选择上，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(Linear Weighted Sum, LWS)因其模型透明、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。鉴于本研究构建的 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，因此沿袭此成熟方法作为综合评估的实现路径。

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：

$$S = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i' \quad (2)$$

其中 S 为综合效能评价(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。

4. 理论框架的应用示例与讨论

为初步验证本理论框架的输出效果，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，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。

将构建的指标体系与 AHP 权重模型应用于 2025 年 1 月 25 日春运高峰日 08:00 至 20:00 的关键运行时段，生成了 AC4、AC24 及 AC4+30 融合扇区全天的综合评价值(S)时序曲线。

结果表明：1) 模型有效区分了不同扇区的负荷特征，AC4 扇区呈现“复杂压力核心”的剧烈波动模式，在特定高峰时段(14:00~15:00, 18:00~19:00)承受极限压力(评分 > 75)，——需注意，此效能值是在高扇 AC30 已协同分流的情况下测得，若独立运行则压力将更为凸显。与之相对，AC24 扇区则表现出“高效能弹性单元”的稳定与突增特性，在大部分时段分布相对均匀，且在 16:00~17:00 展现出单点高峰(78.87)，表明该扇区在极限压力测试下，能够在需求激增时高效转化流量，具备良好的可预测性与储备弹性；

2) AC4 + 30 融合扇区的效能值在绝大多数时段持续显著高于 AC4 独立值, 量化证实了高低扇协同运行对释放系统容量、提升整体效能的实质性贡献。这一示例表明, 本理论框架所构建的运行效能评估体系, 能够成功地将复杂的运行状态转化为具有明确管理含义的量化信号, 为空域资源协同优化等决策提供了直接的数据支撑。

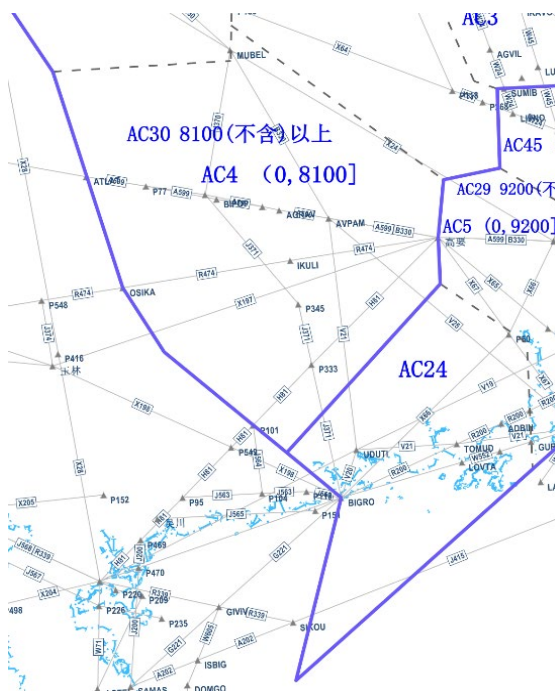


Figure 4. Schematic of airspace sectors AC4, AC30, and AC24 under Guangzhou area control
图 4. 广州区域管制 AC4, AC30 以及 AC24 扇区空域示意图

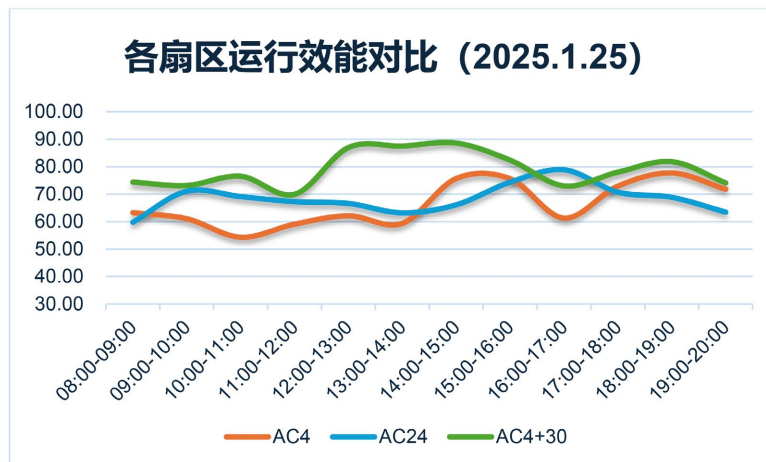


Figure 5. Performance of Guangzhou area control AC4, AC4 + 30 and AC24 sector during spring festival travel rush
图 5. 广州区域管制 AC4, AC4 + 30 以及 AC24 扇区在春运日的运行效能表现

5. 研究局限性与框架适用性讨论

本文提出的理论框架虽力求系统性与普适性, 但其构建与验证毕竟源于特定运行环境(如珠三角空域这一高强度、高复杂度的运行样本)的实践。因此, 在认识其价值的同时, 必须清晰地界定其当前局限与

适用边界,这既是科学严谨性的要求,也为后续研究与推广指明了方向。

(1) 框架的理论前提与实施边界

本框架的有效性建立在“运行效能可通过多维指标结构化表征”这一核心假设之上。然而,空管运行作为一个复杂社会技术系统,仍存在难以完全量化的要素(如管制团队协同文化、应急响应的隐性知识等)。框架在推广至运行特征迥异的其他区域时(例如,空域结构简单、军民航干扰极少的区域),其“指标加减法”策略中的具体“加”、“减”项,以及模型权重,必须进行重新校准。这并非框架的缺陷,而是其作为一种方法论所固有的、需要与具体情境深度适配的特性。成功的迁移应用关键在于把握框架的结构化构建逻辑,而非机械复制某个具体的指标清单或权重系数。

(2) 当前依存的“数据-模型”生态局限

框架的实施高度依赖于底层数据质量与模型成熟度。首先,在数据基础方面,部分关键指标的精准度量仍受限于现行空管系统的数据开放粒度与质量,如管制员情景意识、精细化协调过程等数据的自动化采集尚未完全实现。其次,在模型能力方面,现有框架内的评估模型主要服务于历史与实时态势的量化诊断,而在前瞻性预警与自主优化决策方面的能力尚属初级阶段。这受制于预测模型所需的超高维度、高连续性数据样本,以及空管决策本身强安全性约束下的可解释性要求。最后,系统集成的深度与成本,仍是框架全面工程化面临的现实挑战。

(3) 未来演进方向

基于上述讨论,本理论框架的未来演进可聚焦于三个方向:一是向动态化与自适应演进,探索构建嵌入实时反馈循环的动态赋权模型,使运行效能评估体系能随运行模式演变而自我调优。二是向智能化与前瞻性演进,对接引言所述的研究前沿,在确保安全与可解释性的前提下,审慎引入强化学习、因果推断等先进 AI 方法。三是向标准化与验证推广演进,推动框架核心构件(如指标定义、数据接口、模型算法模块)的标准化,并在更广泛、更多元的区域管制环境中进行对比验证与基准建立,从而在普适性与特异性之间找到更优的平衡点。

承认局限并非否定价值,而是为了更坚实、更理性地推动理论发展。本框架的生命力,恰恰在于其为应对这些局限与挑战,提供了一个可迭代、可扩展的系统化升级基底。

6. 结论

本文系统构建了一套系统化、可迁移的适用于区域管制扇区的运行效能评估体系方法论,明确了从理论奠基、指标构建、模型实施到验证优化的全过程阶段划分与逻辑框架,并重点针对体系构建中面临的三大核心难点——理论适配、指标筛选与模型融合——展开分析,提出了如“指标加减法”策略、四项构建原则及多种模型选择在内的系统化解决方案。该研究为改变当前区域管制效能评估领域研究碎片化、实践缺乏系统指导的现状提供了清晰的理论范式与实践路线图,对推动空管运行管理从经验主导向数据驱动转型具有积极意义。

在理论层面,本研究的核心贡献在于首次将区域管制效能运行效能评估体系的构建过程,系统整合为一个融“路径框架-核心难点-应对策略”于一体的完整理论框架,为空管部门从顶层设计到工程实施提供了兼具前瞻性与操作性的指引。文中构建的指标体系与模型方法源于广州区域的实践,但充分考虑了国内其他区域管制中心的运行共性,具备良好的迁移性与推广价值。

展望未来,本研究框架可向动态化、智能化方向演进,探索动态赋权机制以提升评估的情境相关性,更可进一步融合大数据与智能技术,实现从效能评估、成因诊断到风险预警的闭环管理,推动运行效能评估体系从静态分析迈向具备自学习与自优化能力的智能决策支持系统演进,为空管系统迈向“智慧空管”新范式提供持续理论支撑。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 张亚, 赵征, 吕人力. 基于深度学习的空中交通运行态势复杂度评估[J]. 航空学报, 2022, 43(10): 326-335.
- [5] Wang, Y., Hu, M. and Zhang, Y. (2023) Short-Term Sector Workload Prediction Based on Hybrid Deep Learning Model. *Chinese Journal of Aeronautics*, **36**, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2023.02.001>
- [6] 中国民用航空局. 智慧民航建设数据治理与融合应用白皮书(2023 年) [R]. 北京: 中国民用航空局, 2023.
- [7] 刘继新, 杨磊, 唐治理. 基于多源数据融合的终端区运行效能实时监测方法[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(7): 1940-1948.
- [8] EUROCONTROL (2022) Aviation Intelligence: From Data to Decision (2022 Performance Review Report). EUROCONTROL.
- [9] ICAO (1993) Manual on Global Performance of the Air Navigation System (DOC9883).
- [10] Eurocontrol Performance Review Commission (2013) Performance Review Report-2018.
- [11] FAA (2018) Comparison of Air Traffic Management-Related Operational Performance: U.S./Europe.
- [12] 民航局空管局. 中国民航空管现代化战略(CAAMS)实施路线图(IB-ATMB-2020-001) [Z]
- [13] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
- [14] 薛会琴. 多属性决策中指标权重确定方法的研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 西北师范大学, 2008.
- [15] 李桥兴. 多属性决策中指标权重确定的理论研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2004.
- [16] 张玉, 魏华波. 基于 CRITIC 的多属性决策组合赋权方法[J]. 统计与决策, 2012(16): 75-77.