机场航班近机位靠桥率关联影响要素识别探究

毛宏黎[1,2],罗 谦[1,2],刘 宏[3],周 薇[3],陆彦宏[1,2]
(1. 中国民用航空总局第二研究所,成都 610041; 2. 民航成都电子技术有限责任公司科研开发中心,成都 610041;
3. 中国民用航空局运行监控中心,北京 100710)

摘 要: 为识别机场航班近机位靠桥率(简称机场航班靠桥率)的关联影响要素特征,本文从航班规模与结构、航班运行效率、机场运营效率、机位资源配置维度建立机场航班靠桥率关联指标体系,运用 Spearman 相关系数法、灰色关联度分析法对机场航班靠桥率关联指标进行绝对值分布、月均变化率的相关关系和影响重要度分析,得到航班靠桥率影响因素的相关性分布特征与多变量协同影响排序结果。结果表明:高航班靠桥率的机场整体具有更低的过夜航班比例、进港延误和更高的近机位比例;始发、过夜航班靠桥率变化与航班靠桥率变化高度同步,对航班靠桥率提升具有显著贡献;航班正常率提升、地面保障时间缩短、近机位资源增加均对航班靠桥率提升具有显著正向作用;影响机场航班靠桥率的相关指标重要度从大到小排序依次为日均近机位周转频次、实际过站时间、过夜航班比例、离港延误、日均近机位航班负荷比、C/D 类机型日均近机位数量、机场放行正常率、日均近机位数量。

关键词: 航班近机位靠桥率;影响要素;Spearman 相关系数;灰色关联度分析
中图分类号: V351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5590(2025)06-0061-07

Research on the identification of factors influencing flight gate boarding rate at airports

MAO Hongli[1,2], *LUO Qian*[1,2], *LIU Hong*[3], *ZHOU Wei*[3], *LU Yanhong*[1,2]
(1. *The Second Research Institute of CAAC, Chengdu* 610041, *China*; 2. *Research and Development Center, Civil Aviation Electronic Technology Co., Ltd., Chengdu* 610041, *China*; 3. *Operation Monitoring Center of CAAC, Beijing* 100710, *China*)

Abstract: To identify key factors influencing the flight gate boarding rate at airports, an indicator system was established based on flight volume and structure, flight operations efficiency, airport operational efficiency, and contact stand resources. The Spearman correlation coefficient and grey relational analysis (GRA) were used to analyze the correlation and impact significance between flight gate boarding rate and multi-dimensional indicators in terms of their absolute values and monthly average change rates, and the correlation distribution characteristics of the factors influencing the flight gate boarding rate and the ranking of multivariate collaborative influencests are obtained. Results show that airports with higher flight gate boarding rate generally have fewer overnight flights, shorter arrival delays, and a higher proportion of contact stands. Originating and overnight flights' gate boarding rate changes are highly synchronized with the overall rate, significantly boosting the airport's total flight gate boarding rate. Improving flight punctuality rate, shortening ground support time, and increasing contact stand resources all have a positive effect on the improvement of flight gate boarding rate. The ranking of factors influencing flight gate boarding rate from highest to lowest is: average daily turnover of contact stands, actual turnaround time, overnight flight proportion, departure delay, daily contact stand flight load ratio, daily number of contact stands used by C/D-class aircraft, airport departure clearance punctuality rate, and daily contact stand count.

Key words: flight gate boarding rate; influencing factors; Spearman correlation coefficient; grey relational analysis

机场航班近机位靠桥率(简称机场航班靠桥率)是衡量机场运营效率与服务品质的重要指标。机场航班靠桥率包括航班靠桥率(所有实际执行航班的靠桥情况)、始发航班靠桥率(始发实际执行航班的

收稿日期:2025-02-13; **修回日期:**2025-06-05
作者简介:毛宏黎(1993—),男,重庆人,工程师,硕士,研究方向为机场运行控制与管理.

靠桥情况）、过夜航班靠桥率（过夜实际执行航班的靠桥情况）3种类型。自2023年6月起，中国“千万级”机场采取了一系列措施以提升航班靠桥率，然而不同机场面临着不同的资源条件约束，导致机场在提升航班靠桥率的实际执行过程中出现各种问题，表现为航班正常率水平波动、近机位机坪冲突加剧、机务工作负荷激增、机场场面安全风险升高等[1]，使得提升航班靠桥率成为一项复杂的系统工程。影响航班靠桥率的因素众多，航班规模与结构、航班运行效率、机场运营效率、机位资源配置与航班靠桥率之间是否存在关联影响关系、相互影响强弱程度如何，其中机理尚不明确，仍有待深入研究。

目前，国内外针对航班靠桥率的研究较少，国外研究虽有关于“登机桥分配”或“近机位利用率”的研究，但对“航班靠桥率”概念未形成科学的定义[2]，同时，国外机场与航空公司的协同运营模式与中国存在较大差异，难以形成可直接借鉴的航班靠桥率影响要素研究成果。国内已有的研究多集中在机场航班靠桥率提升措施与实践应用分析研究，并结合单一机场的航班、资源运行特点给出具备一定实操性的航班靠桥率提升策略建议，但相关研究多注重定性描述，对影响航班靠桥率的深层次因素挖掘不足[3-5]。

基于现有研究定量分析不足、未清晰揭示航班靠桥率关联影响机制的问题，本文聚焦航班靠桥率关联影响要素分析，全面梳理航班靠桥率的影响因素，建立多层次指标体系；通过指标运行分布与变化趋势分析来挖掘影响要素间的内在关联特征，揭示航班靠桥率与航班规模与结构、航班运行效率、机场运营效率、机位资源配置之间的关联影响关系；对影响航班靠桥率的关键指标进行重要度排序，为最大化利用机场设施资源、综合提升机场航班保障效能，打造品质与效率兼顾的民航服务提供理论依据和实践指导。

1　机场航班靠桥率关联指标体系

1.1　机场航班靠桥率影响因素

机场航班靠桥率是衡量机场航班使用登机廊桥进行旅客上下机比例的指标，航班靠桥率越高，表明机场航班更多地使用近机位登机廊桥。在实际运行中，航班能否靠接廊桥受诸多因素影响，既受机场机位资源配置等硬件基础设施约束，又与航班规模与结构、航班运行效率、机场运营效率等[6]紧密相关。

1）航班规模与结构

当机场运营的航班数量较大时，需要更多的登机廊桥来维持高水平的靠桥班次，从需求侧提升了航班靠桥保障压力；在机场航班进离港高峰时段，航班集中而登机廊桥数量有限时，航班靠桥率就会受到航班时刻安排的影响，始发、过夜航班运行期间机位资源压力尤为突出；国际航班由于边检、安检、海关等流程，航班通常需要停靠登机廊桥来提供更加安全、便捷的出行服务，因此，国内与国际航班比例也将直接影响登机廊桥的使用频率。

2）航班运行效率

航班运行效率主要包括航班正常率与机场场面运行效率。航班正常率主要由机场放行正常率、进离港延误等体现；机场场面运行效率的指标主要包括航空器地面滑行时间、旅客地面等待时间等，若机场过度追求高靠桥率，可能会出现飞机在滑行道上等待机位的情况。航班运行效率直接影响机场航班起降与快速周转保障，并与人员、设施资源利用紧密相关，航班高效运行是保障高靠桥率的关键支撑。

3）机场运营效率

机场运营效率的范畴较广，与航班靠桥率存在直接影响的包括近机位利用效率和航班地面保障效率。近机位利用效率通常由日均近机位周转频次体现，日均近机位周转频次越高，机位闲置时间越短，资源利用越充分。航班地面保障效率是指实际过站时间，即航空器地面服务所有环节的人员到位、设备到位、操作完成水平，若存在操作不熟练、设备故障或遇到恶劣天气等情况，将导致航空器长时间停留在机坪并占用近机位廊桥，使后续航班无法按时靠桥。

4）机位资源配置

机位资源配置是影响机场航班靠桥率的主要客观因素。当航班规模不变时，通常近机位数量越多，近机位比例越高，机场的航班靠桥保障能力越强。当前，中国“千万级”机场的近机位比例普遍不高，分布在40%~70%之间[7]，且不同机场的近机位数量分布差异较大，部分机场的近机位数量在20个以下，部分超大型枢纽机场的近机位数量超过100个；机位类型配置同样直接影响近机位廊桥的使用，国内机场通常使用C/D类机型机位频率更高。

1.2　机场航班靠桥率关联指标体系

不同类型的机场航班靠桥率与航班规模与结构、航班运行效率、机场运营效率、机位资源配置之间存在复杂的直接或间接作用关系。本文综合考虑3种航班靠桥率目标与上述4种机场航班靠桥率影响因素，构建了机场航班靠桥率关联指标体系，如表1所示。

表 1　机场航班靠桥率关联指标体系

Tab.1　Indicator system for correlation analysis of airport flight gate boarding rate

指标类别	指标	指标含义
机场航班靠桥率	航班靠桥率	机场使用近机位廊桥上、下客的航班架次与总客运航班架次之比
	始发航班靠桥率	机场始发客运航班中使用近机位廊桥上客的航班架次与所有始发航班架次之比
	过夜航班靠桥率	机场过夜客运航班中使用近机位廊桥上客的航班架次与所有过夜航班架次之比
航班规模与结构	航段班次	航班每一次起降为一个航段班次
	始发航班比例	机场的始发航班架次与总客运航班架次之比
	过夜航班比例	机场的过夜航班架次与总客运航班架次之比
	国内航班比例	机场的国内航班架次与总客运航班架次之比
航班运行效率	机场放行正常率	机场放行正常航班架次与机场放行航班总架次之比
	离港延误	航班实际出港撤轮挡时间晚于计划出港时间超过 15 min 的情况
	进港延误	航班实际到港挡轮挡时间晚于计划到港时间超过 15 min 的情况
	平均滑出时间	航班离开停机位滑出到跑道起飞的时长
	平均滑入时间	航班从跑道降落到滑入停机位的时长
	旅客地面等待时间	针对离港航班，旅客登机完成后舱门关闭至航班实际起飞的时间
机场运营效率	日均近机位周转频次	统计周期内，机场近机位廊桥每日上、下客航班架次的平均值
	实际过站时间	前序航班到达本站开舱门至本段航班实际关舱门之间的时间
机位资源配置	日均近机位数量	统计周期内，机场可供使用的近机位廊桥数量的日均值
	C/D 类机型日均近机位数量	统计周期内，机场可供使用的 C/D 类机型近机位廊桥数量的日均值
	近机位比例	近机位数量与总机位数量之比
	日均近机位航班负荷比	日均航班量与日均近机位数量之比

2　机场航班靠桥率关联影响要素识别

2.1　研究数据描述

本文采集 2024 年中国 41 个“千万级”机场 1—5 月的航班放行正常率、航班靠桥率及相关航班动态信息数据，按照机场航班靠桥率关联指标体系，对相关数据进行清洗、聚合、计算等处理，对航班靠桥率与其他关联指标的相关关系、影响重要度进行统计建模分析。其中，2 月的平均航班靠桥率最低（82.92%），5 月的平均航班靠桥率最高（85.38%），3—5 月中国“千万级”机场航班靠桥率分布较 1—2 月更加均匀，且航班靠桥率整体水平有所提升，如图 1 所示。

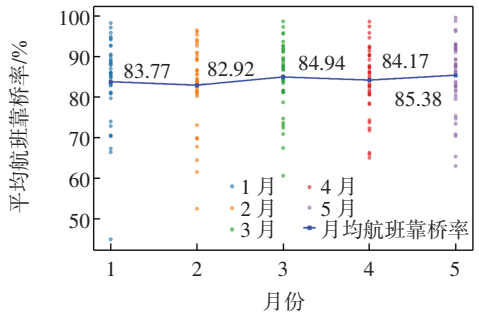


图 1　2024 年中国 41 个“千万级”机场 1—5 月平均航班靠桥率分布

Fig.1　Distribution of average flight gate boarding rates at 41 10–million–class airports in China (January to May 2024)

2.2　指标相关性特征识别方法

Spearman 相关系数（Spearman correlation coefficient）法是一种基于秩的非参数统计方法。与常用的皮尔逊相关系数不同，Spearman 相关系数不依赖于数据的分布特性，主要关注变量的秩次（等级顺序），在处理具有等级或非线性关系的数据时，能够更准确地反映变量之间的关联性[8]，同时不依赖于数据的分布形式，相较于常用的皮尔逊相关系数更为稳健[9]。基于航班靠桥率与航班运行效率、机位资源配置等业务运行关联度极为紧密、相互制约的关系，以及机场航班靠桥率水平分布异质性明显的特点，本文采用 Spearman 相关系数法来识别航班靠桥率与其他关联变量的相关关系，具体步骤如下。

1）数据标准化处理

为消除指标数据如航段班次、日均近机位数量、机场放行正常率等不同特征变量之间的量纲（单位）差异，使各特征变量能够在相同的尺度上进行比较，通过 Min–Max 归一化处理，确保分析过程中各特征变量的贡献是均衡的，即

$$X' = \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{1}$$

式中：X'为归一化处理后的指标特征值；X 为指标特征值；$X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 分别为指标数据的最小值和最大值。

2）计算排名差的平方

对机场航班靠桥率目标变量 $Y_j = (y_1, y_2, \cdots, y_j)$，$j = 1, 2, \cdots, n$ 与关联变量 $X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \cdots, x_{i,j})$，$i = 1, 2, \cdots, m$，分别进行排名，其中，$n = 41$，表示机场数量，$m = 19$，表示关联变量数量，将每个观测值按从小到大排序，计算排名差的平方，即

$$d_{i,j}^2 = (R(x_i) - R(y_j))^2 \tag{2}$$

式中：$d_{i,j}$ 是第 i 个关联变量的排名与第 j 个机场航班靠桥率的排名的差值；$R(x_i)$ 为第 i 个关联变量的排名；$R(y_j)$ 为第 j 个机场航班靠桥率变量的排名。

3）计算 Spearman 相关系数

$$\rho = 1 - \frac{6\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} d_{i,j}^2}{n(n^2-1)} \tag{3}$$

式中，$\rho \in [-1,1]$。

2.3　指标影响重要度判别方法

Spearman 相关性分析仅反映两个变量之间的独立关系，无法判断多个关联指标对某个目标指标造成变化影响的重要度[10]，需根据 Spearman 相关系数显著性情况对指标进行合理调整，进而引入灰色关联度分析（GRA，gray relational analysis）法，综合考虑多因素对目标变量的协同影响，分析指标间相互影响的重要度。

GRA 是一种用于分析多因素之间相对关联程度的多元统计方法，通过分析各指标与目标指标之间的关联度，判断多个指标对某一指标的相对重要性，用于特征选择、权重分配等场景[11]。具体分析步骤如下。

1）构建参考序列和比较序列

设参考序列 $V_0 = \{v_0(1), v_0(2), \cdots, v_0(n)\}$，即系统中某个关键因素或理想的目标值；设比较序列 $V_i = \{v_i(1), v_i(2), \cdots, v_i(n)\}$，表示其他各影响因素序列，其中 $i = 1, 2, \cdots, m$。

2）计算序列间关联系数

关联系数用于表示比较序列与参考序列在某一时刻点上的相似程度，计算公式为

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{\min} + \lambda\Delta_{\max}}{\Delta_i(k) + \lambda\Delta_{\max}} \tag{4}$$

式中：$\Delta_i(k) = |v_i(k) - v_0(k)|$ 表示比较序列和参考序列在第 k 个时刻的绝对差；$\Delta_{\min} = \min\limits_{i,k} \Delta_i(k)$ 表示比较序列和所有参考序列之间在第 k 个时刻的最小差异；$\Delta_{\max} = \max\limits_{i,k} \Delta_i(k)$ 表示所有比较序列和参考序列之间在第 k 个时刻的最大差异；λ 为分辨系数，取值范围在 0~1 之间，通常取 0.5。

3）计算灰色关联度

关联系数反映的是各时刻点的关联情况，灰色关联度则是对整个序列的关联程度进行综合评价，计算公式为

$$\gamma_i = \frac{1}{t}\sum_{k=1}^{t} \xi_i(k) \tag{5}$$

式中，γ_i 为第 i 个关联变量与机场航班靠桥率目标变量在第 k 个时刻的灰色关联度；t 为时刻点数量。

4）排序分析

根据灰色关联度的大小对各比较序列进行排序，关联度越大，说明该序列与参考序列的关联性越强，影响越大。

3　结果讨论

3.1　相关性分析结果

Spearman 相关系数 $\rho \in [-1,1]$，一般地，当 $|\rho| \in [0.7,1]$ 时，表示两个变量之间存在强相关关系；当 $|\rho| \in [0.3,-0.7)$ 时，表示两个变量之间存在中等相关关系；当 $|\rho| \in [0,0.3)$ 时，表示两个变量之间存在较弱相关关系。基于 2024 年 1—5 月中国 41 个“千万级”机场的指标运行数据，运用 Spearman 相关系数法对机场航班靠桥率关联指标体系中的 19 项指标进行分析，分别按照指标绝对值分布、指标月均变化率的相关关系生成相关系数矩阵热图，以中等及以上的相关关系（$|\rho| \geq 0.3$）[12]作为判别条件对结果进行讨论。

1）指标绝对值分布

中国 41 个“千万级”机场的机场航班靠桥率与关联指标绝对值分布的相关系数矩阵热图如图 2 所示。指标绝对值分布的相关系数矩阵反映了 41 个机场数据样本的机场航班靠桥率绝对值高低与其他指标运行表现的相关关系，能够识别不同航班靠桥率水平的机场在航班运行效率、机位资源配置等方面的共性特征。

从图 2 可看出：航班靠桥率与始发、过夜航班靠桥率的相关系数分别达到 0.89、0.92，呈现高度相关特征，表明航班靠桥率处于高水平的机场必然具备高水平的始发、过夜航班靠桥率，三者的变化趋势具备一致性；从航班规模与结构来看，航班靠桥率与航段班次高低没有显著相关关系，相关系数仅为–0.08，航班靠桥率与过夜航班比例的相关系数达到–0.31，刚好达到中等相关门槛，表明过夜航班量比例对航班靠桥率存在显著影响，且影响强于始发航班比例，而国内航班比例高低对航班靠桥率未表现出相关关系；从航班运行效率来看，航班靠桥率处于高水平的机场与机场放行正常率、离港延误高低无直接相关关系，但航班靠桥率与进港延误的相关系数达到–0.43，表明航班靠桥率处于高水平的机场整体表现出更低的进港延误；从机位资源配置与机场运营效率来看，航班靠桥率与日均近机位数量、近机位比例的相关系数分别为 0.20 和 0.66，表明机场航班靠桥率的高低与日均近机位数量没有相关关系，但航班靠桥率处于更高水平

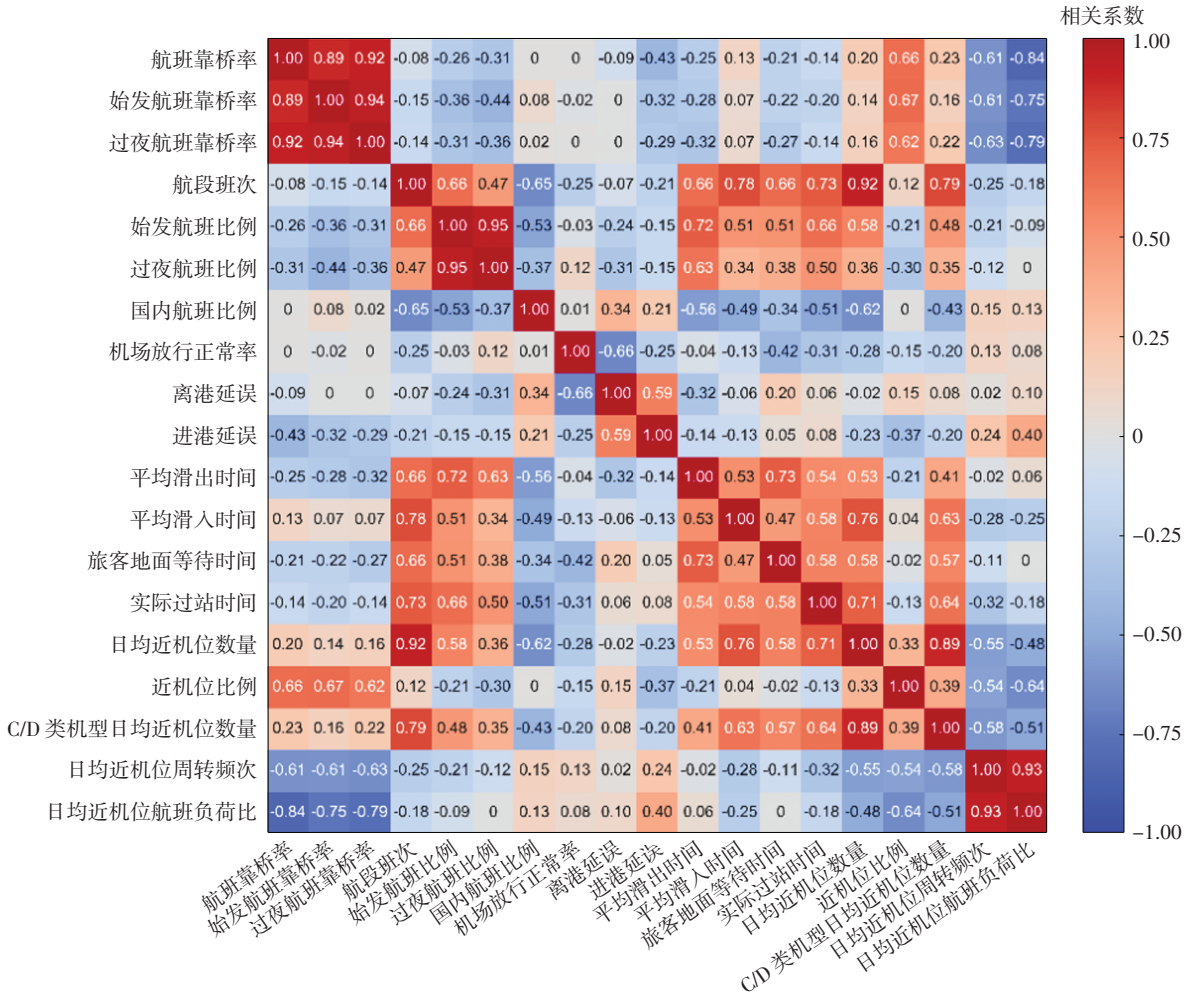


图 2　指标绝对值分布相关系数矩阵热图

Fig.2　Heatmap of the correlation coefficient matrix for the absolute values of indicators

的机场具备更高的近机位比例，航班靠桥率与日均近机位周转频次、日均航班近机位负荷比的相关系数分别达到–0.61、–0.84，表明中国 41 个“千万级”机场中，航班靠桥率处于较高水平的机场整体表现出更低的日均近机位周转效率和航班靠桥保障负荷。

2）指标月均变化率分布

指标月均变化率相关系数矩阵热图如图 3 所示。从图 3 可知：机场航班靠桥率月均变化率与始发、过夜航班靠桥率月均变化率的相关系数达到 0.78、0.79，表明航班靠桥率的变化趋势与始发、过夜航班靠桥率变化高度同步，始发、过夜航班靠桥率的提升对航班靠桥率的提升具有显著贡献；从航班规模与结构来看，航班靠桥率正向提升与航段班次增长之间呈现中等负相关特征，相关系数为–0.42，表明对大部分机场而言，航班量的下降有利于航班靠桥率的提升，由于各机场的航班结构比例特征值趋于稳定，始发、过夜、国内航班比例变化与航班靠桥率变化未呈现相关关系；从航班运行效率来看，机场放行正常率月均变化率的相关系数为 0.45，说明机场放行正常率的提升对航班靠桥率提升具有显著正相关作用，平均滑出时间（–0.36）、离港延误（–0.32）、旅客地面等待时间（–0.32）、实际过站时间（–0.33）的增加对航班靠桥率提升具有显著负相关作用；从机位资源配置与机场运营效率来看，日均近机位数量月均变化率与航班靠桥率月均变化率的相关系数为 0.49，即日均近机位数量增加对航班靠桥率提升具有显著正相关作用，日均近机位航班负荷比月均变化率与航班靠桥率月均变化率的相关系数为–0.60，表明近机位航班靠桥保障压力的增大对航班靠桥率提升具有显著负相关作用。

3.2　重要度分析结果

相关性特征结果仅呈现了两个指标间分布与变化的相关关系，无法反映多个关联指标对航班靠桥率的相对影响强弱程度，为进一步判别关联指标变化的影响重要度，对指标绝对值分布、指标月均变化率均未表现出中等及以上相关程度（$|\rho| < 0.3$），以及可被相近指标替代的指标进行剔除，减少冗余变量影响，

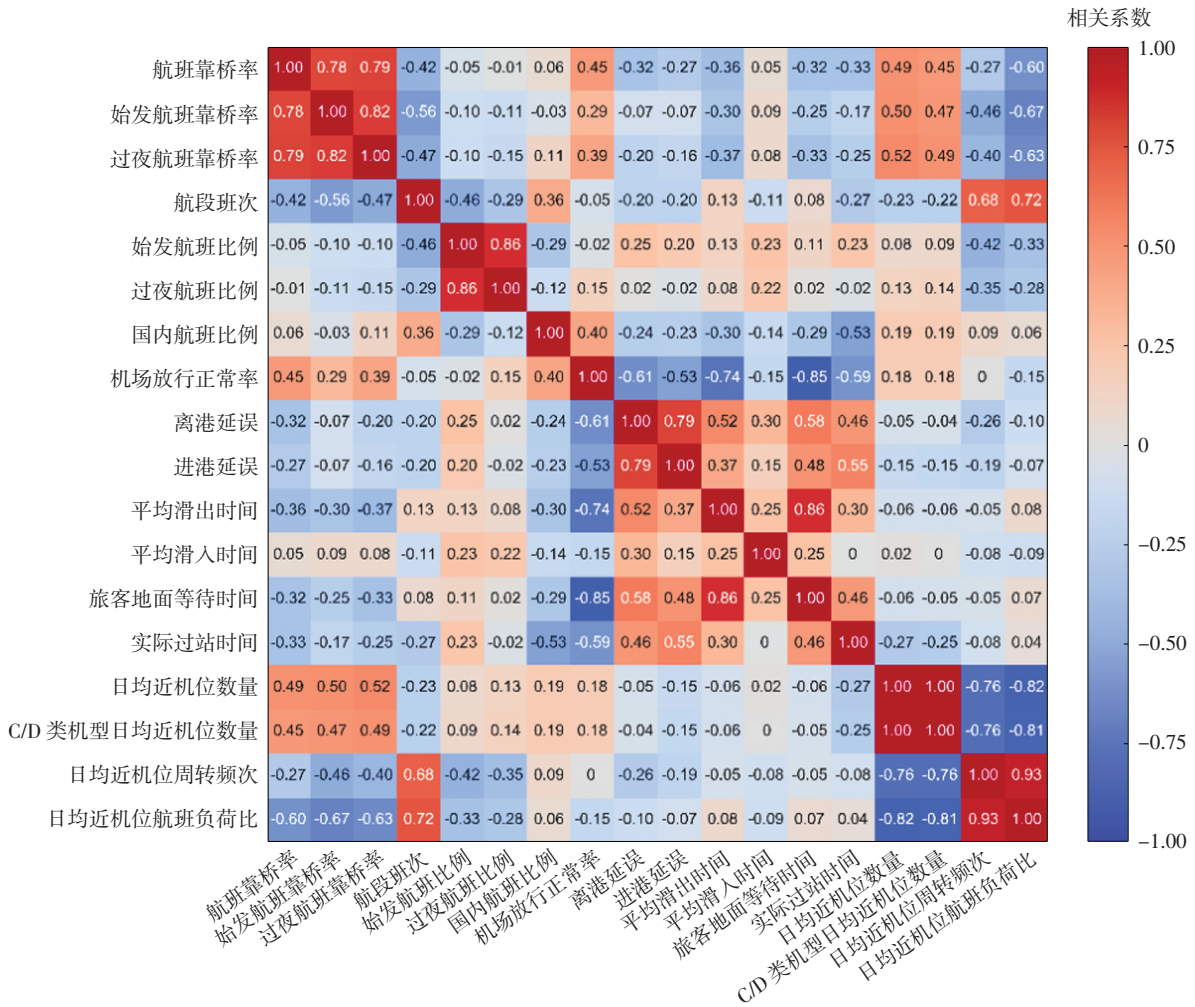


图 3　指标月均变化率相关系数矩阵热图

Fig.3　Heatmap of the correlation coefficient matrix for monthly average change rates of indicators

保留的指标如表2 所示。

表 2　调整后的指标体系

Tab.2　Adjusted indicator system

指标	指标绝对值分布相关性系数	指标月均变化率相关性系数
航班靠桥率	1.00	1.00
航段班次	−0.08	−0.42
过夜航班比例	−0.31	−0.01
机场放行正常率	0	0.45
离港延误	−0.09	−0.32
进港延误	−0.43	−0.27
平均滑出时间	−0.25	−0.36
旅客地面等待时间	−0.35	−0.32
实际过站时间	−0.21	−0.32
日均近机位数量	0.20	0.49
近机位比例	0.66	—
C/D 类机型日均近机位数量	0.61	0.45
日均近机位周转频次	−0.61	−0.27
日均近机位航班负荷比	−0.84	−0.60

基于调整后的指标体系，选择 2024 年 1—5 月中国 41 个“千万级”机场的指标月均值作为输入，通过 GRA 法对影响机场航班靠桥率的相关指标进行重要度排序，结果如图 4 所示。一般地，灰色关联度的取值范围在[0，1]之间，灰色关联度越高，表示因素之间的关联越紧密，影响力越大，通常认为灰色关联度≥0.8 时，因素之间的关联程度非常紧密，灰色关联度在[0.6，0.8）之间时，关联度较强需重点关注，灰色关联度＜0.6 时认为因素之间的关联较为松散，相互影响相对较弱[13]。

从图 4 可知，灰色关联度≥0.6 的指标共有 8 个，影响重要度由大到小分别是日均近机位周转频次、实际过站时间、过夜航班比例、离港延误、日均近机位航班负荷比、C/D 类机型日均近机位数量、机场放行正常率、日均近机位数量。结果表明，日均近机位周转频次（0.655 9）是影响航班靠桥率变化最重要的因素，提高近机位的周转效率是提升航班靠桥率的关键，但日均近机位周转频次作为综合性指标，受航班集中度、

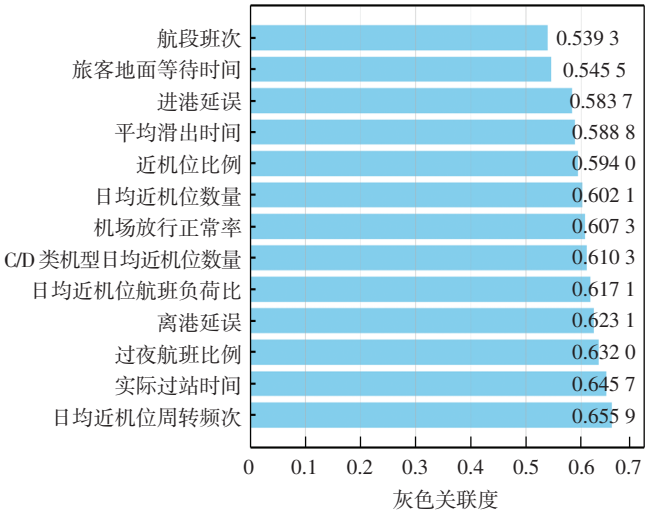


图 4　指标对航班靠桥率影响重要度排序

Fig.4　Importance ranking of indicators influencing flight gate boarding rate

航班正常、廊桥维保、地面保障情况等多种因素影响，可作为航班靠桥率优化提升的目标变量；实际过站时间（0.645 7）是衡量航班地面保障效能的重要指标，缩短航班保障各个环节的操作时间并提高准点率，是提升航班靠桥率的重要保障；过夜航班比例（0.632 0）是机场航班结构的重要特征之一，过夜航班比例越高，机场夜间航班靠桥保障压力越大，同时也对次日始发航班靠桥保障存在潜在影响；离港延误（0.623 1）、机场放行正常率（0.607 3）均是航班运行效率的体现，航班按照计划时间正常放行、撤轮档、起飞，能够避免机位分配频繁更改和廊桥长时间占用情况发生；日均近机位航班负荷比（0.617 1）综合机场航班量与近机位数量，反映了机场近机位资源的供需紧张程度，该比例保持在合适的区间对航班靠桥率水平的影响较为关键，过高会导致近机位服务负荷过大、近机位周转饱和，过低则表示机场的近机位资源存在富余，可以承担更多航班量的保障；C/D 类机型日均近机位数量（0.610 3）相较日均近机位数量（0.602 1）的影响度更高，表明国内机场的航班机型结构偏重于使用中大型飞机，增加 C/D 类机型近机位资源配置对机场航班靠桥率提升具有显著影响。

4　结语

本文聚焦机场航班靠桥率关联影响要素特征，从航班规模与结构、航班运行效率、机场运营效率、机位资源配置 4 个维度全面梳理机场航班靠桥率 3 个目标指标和影响因素之间的关系，建立机场航班靠桥率关联影响要素识别多层次指标体系。基于 2024 年 1—5 月中国 41 个“千万级”机场的运行数据，运用 Spearman 相关系数法形成指标相关性系数矩阵热图，量化呈现机场航班靠桥率与关联指标的绝对值分布、月均变化率的相关关系，通过 GRA 法对影响机场航班靠桥率的相关指标进行重要度排序，明确了不同因素对机场航班靠桥率的相对影响强弱程度，为高效利用机场资源、科学提升航班靠桥率，打造品质与效率兼顾的民航服务提供理论依据和实践指导。

本文以中国 41 个机场整体作为研究对象，未深入考虑机场在构型设计、资源利用水平、资源供需关系等方面的异质性，后续可对中国“千万级”机场进行分群深化研究，引入基于 Agent 智能体的建模或离散事件仿真模型，模拟航班–机位动态匹配过程，精细化挖掘不同类型机场的航班靠桥率关联影响要素差异化特征。

参考文献：

[1] 赵　征，胡　莉，钱媛媛，等. 基于多 Agent 的航空器拖曳规则优化配置方法研究[J]. 系统仿真学报，2022，34(1)：113–125.

[2] PARK B S，LEE H T. Airport surface arrival and departure scheduling using extended first–come，first–served scheduler[J]. Aerospace，2024，11(1)：24.

[3] 任延飞. 提升航班近机位靠桥率的实践路径：以重庆江北国际机场为例[J]. 民航管理，2024(5)：73–76.

[4] 曾　康，张申波，吴新宇，等. 基于航空公司视角对千万级机场航班近机位靠桥率的思考与建议[J]. 民航学报，2024，8(1)：15–19.

[5] 王　烁. 提升机场航班靠桥率措施的分析与优化研究[J]. 民航学报，2024，8(1)：47–51.

[6] 蒋　思，周　巍，马亦飞. 千万级机场航班近机位靠桥率影响因素研究[J]. 民航管理，2024(2)：75–80.

[7] 邓松武，钱　聪. 基于多视角的航班靠桥率问题研究[EB/OL]. (2024–01–02)[2025–01–13]. https://news.carnoc.com/list/614/614539.html.

[8] 何艳频，孙爱峰. Spearman 等级相关系数计算公式及其相互关系的探讨[J]. 中国现代药物应用，2007，1(7)：72–73.

[9] TSCHIMPKE M，SCHREYER M，TRUTSCHNIG W. Revisiting the region determined by Spearman′s ρ and Spearman′s footrule?[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics，2025，457：116259.

[10] LA FÉ–PERDOMO I，RAMOS–GREZ J A，JERIA I，et al. Simultaneous optimization of surface roughness and mechanical properties of 316L produced by LB–PBF using grey relational analysis complemented by residual stress analysis[J]. Arabian Journal for Science and Engineering，2024，49(2)：2285–2298.

[11] 曹明霞. 灰色关联度模型正负性问题的研究及其改进[J]. 系统工程与电子技术，2008，30(6)：1086–1088.

[12] 林嵘嘉，车国卫，徐志华，等. 中文版莱斯特咳嗽问卷的改良及验证[J]. 中国肺癌杂志，2017，20(7)：468–472.

[13] 李嗣同. 我国大气污染的灰色关联分析[J]. 齐鲁工业大学学报(自然科学版)，2014，28(4)：55–58.

（责任编辑：刘雅婷）