

文章编号: 1005-0523(2025)01-0073-11



基于公平与效率双目标的航班时刻资源配置优化方法

吕佳璘, 包丹文, 周佳怡

(南京航空航天大学民航学院, 江苏 南京 211106)

摘要: 针对航班时刻资源配置问题, 采用分层调度策略, 引入时刻价值指标, 构建了一个多层次、兼顾公平性与效率性的双目标模型, 以深入探究两者之间的内在联系与优化平衡。通过对某 Level 3 协调机场的历史数据进行验证, 模型的有效性得到了充分证明。进一步分析不同层次、航空公司及日期类型下的时刻调整情况, 揭示了调度过程中的复杂性。同时, 提出过载分配的概念, 并通过容忍度参数重新定义偏移时刻量评估标准, 探讨了最优容忍度水平对调度结果的影响。结果显示, 相较于单目标模型, 双目标模型在总偏移时刻量微增 0.30%、最大偏移时刻量增加 3.28% 的情况下, 公平性提升 26.00%, 且各航空公司调整水平更均衡, 历史时刻请求更易实现公平调度。工作日偏移时刻量低于非工作日, 公平性更优 (0.02%)。周六偏移时刻量最高, 公平性最差 (1.11%)。相对最优容忍度为 2 个时刻, 可降低 47.78% 的过载分配。研究结果为航班时刻优化提供了新思路, 对航空公司申请编制具有重要参考价值。

关键词: 航班时刻资源; 多目标优化; 公平性; 时刻价值; 容忍度

中图分类号: V355; [U8]

文献标志码: A

本文引用格式: 吕佳璘, 包丹文, 周佳怡. 基于公平与效率双目标的航班时刻资源配置优化方法[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(1): 73-83.

A Dual-Objective Fairness-Efficiency Model for Airport Slot Scheduling

Lyu Jialin, Bao Danwen, Zhou Jiayi

(College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Addressing the issue of slot scheduling, this study employs a hierarchical allocating strategy and introduces the value of slot to construct a dual-objective optimization model that balances fairness and efficiency. The validity of model is verified using historical data from a Level 3 airport in China. A comprehensive analysis of slot scheduling across different levels, airlines, and date types reveals the complexity of the process. Furthermore, the concept of overload allocation is introduced, and the offset evaluation criteria are redefined through the tolerance parameter, exploring the impact of optimal tolerance levels on slot scheduling. The results indicate that, compared to a single-objective model, the dual-objective model enhances fairness by only 0.30% and maximum slot displacement by 3.28%, while improving fairness by 26.00%. Moreover, the adjustment among airlines are more balanced, and historical requests are more likely to achieve fair allocation. Displacement on weekdays are observed to be lower than those on non-weekdays, exhibiting superior fairness (0.02%). Saturdays exhibit the highest displacement and the poorest fairness (1.11%). The optimal tolerance level is identified as 2 slots, which reduc-

收稿日期: 2024-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U2033203); 南京航空航天大学研究生科研与实践创新计划 (xcxjh20230719)

es overload allocation by 47.78%. This research provides novel insights into the slot scheduling and hold considerable reference value for airlines in the process of schedule.

Key words: slot scheduling; dual-objective optimization; fairness; value of slot; tolerance

Citation format: LYU J L, BAO D W, ZHOU J Y. A dual-objective fairness-efficiency model for airport slot scheduling[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(1): 73–83.

航空运输需求的快速增长导致部分机场在高峰时段无法满足航班运营需求,进而引发机场服务与机场资源间的供需严重失衡的问题^[1-3]。因此,时刻配置对缓解严峻的供需矛盾具有重要战略意义与应用价值。国际航空运输协会根据机场的供需关系将机场分为三个级别。截至2022年底,全球共有198个时刻协调机场(Level 3协调机场),占全球机场总量的约6%,却承担全球近50%的运输服务任务^[1]。国际航空运输协会(international air transport association, IATA)指出^[2],此类机场的需求远超其容量,且短期内无法通过扩展机场基础设施来缓和供需矛盾,需要通过协调分配来统筹配置航班时刻资源。目前时刻分配方法分为行政化配置和市场化配置,其中行政化配置为全球大多数国家和地区采用的主流模式,即由时刻管理部门根据一定的规则对机场航班时刻进行协调配置^[2]。例如,中国民用航空局(civil aviation administration of China, CAAC)于2018年颁布实施《民航航班时刻管理办法》,强调要促进航班时刻资源的公平配置与高效利用,确保航空承运人公平参与航空市场竞争。

长期以来,学者们致力于研究时刻配置问题的复杂性并提出多种旨在优化时刻分配的模型。战略层面上,时刻配置的主要难点之一在于如何综合考虑多重因素的限制,为整个航季合理有效地分配航班时刻系列^[4]。早期研究大多聚焦于单目标时刻调度优化,其核心目的在于通过最小化总偏移时刻量来优化运行效率,即降低请求时刻与所分配时刻之间的差异总和^[2,5-6]。例如,Koester^[7]提出了一种启发式程序用以评估单个机场时刻表的偏移时刻量,适用于不同级别的申报容量、需求和机位利用率。然而,单纯追求总偏移时刻量的最小化会忽略各个航空公司和航班请求的调度延误水平上的差异,且单目标优化策略难以满足资源分配的多

方均衡需求,因此时刻分配问题逐渐从单目标优化拓展至多目标优化。多位学者将最小化最大调配延误作为优化附加目标,旨在降低请求时刻与分配时刻间绝对差值的最大水平,从而提升时刻分配公平性^[8-10]。此类问题被表述为最大值最小化问题^[11]。例如,Jacquillat等^[8]提出的双目标时刻分配模型中,首先对最小化最大偏移时刻量问题进行求解,随后进一步求解最小化总偏移时刻量问题,以优化战略时刻分配决策。此外,有学者在现有时刻调度模型基础上,进一步纳入运营延迟^[12]、拒绝请求^[13]或鲁棒性水平及运营成本^[14]为指标。例如,Zografos等^[9]构建双目标模型,着重考虑超过可接受偏移阈值范围的时刻分配量的最小化。Ribeiro等^[9]则进一步提出将最小化拒绝的请求总数作为第三优化目标。尽管既往研究在一定程度上保证了时刻资源的有效利用,但它们往往忽视了调配过程中航空公司间的公平性,无法确保最终分配结果的商业或运营可行性。

公平性已被公认为资源分配决策评估的重要标准,因为它是决定分配决策可接受性的重要因素之一^[11]。利益相关方更倾向于接受那些考虑到各方利益的公平建议。如果忽视公平性,优化效率高的解决方案也可能因无法保障商业可行性而无法被利益相关方接受实施^[14]。在空中交通管理决策的背景下,公平性已被明确视为一项重要决策标准^[15]。IATA明确提出要向航空公司提供公平公正待遇,CAAC也强调要保证航空承运人在航空市场竞争中的公平参与。然而目前缺乏明确定义的量化公平性指标^[11]。针对航班时刻分配公平性问题,现有研究主要分为绝对公平性与相对公平性评估。Zografos等^[16]提出一种定义公平性目标的方法,旨在最小化每家航空公司的公平性值与所有航空公司的平均公平性均值之间的最大相对距离。Glover^[17]采用相称性规则,提出时刻应按照航空公

司的请求成比例分配。然而,现有研究所提出的评估方式均忽略了航空公司经营效益这一根本目标,这可能会影响时刻分配结果的商业可行性。

近年来,航空公司调度偏好的战略研究越来越受关注,特别是在探讨时刻调度容忍度方面的研究日渐增多。当前的时刻分配方法可能会导致安排时刻远离航空公司最初的请求时刻,进而降低资源利用率和市场公平性^[14]。有研究提出,对优先级较高时刻请求,微小容差可能会产生更有效的时刻分配结果,该微小容差体现了航空公司对于时刻调度的接受水平^[1]。因此,有学者^[2,16,18]提出容忍度概念用以探究航空公司对每个请求偏移时刻量的接受水平。容忍度表示航空公司对偏移时刻量的可接受水平,其会影响机场和空管单位在满足时刻分配结果公平性和满意度时所需付出的总偏移时刻量成本^[19]。然而,现有模型大多忽略了航空公司对于微小容差的接受水平,导致时刻分配结果的公平性和满意度不高。

为提升时刻分配结果的公平性水平,本文综合考虑分配时刻与航空公司效益间的关系,构建比例性指标,纳入多目标问题探究,以探究兼顾公平性与效率性的时刻分配方法。在此基础上,本文将区分工作日、非工作日,分析时刻请求与分配方案的效用水平,以支持航空公司请求制定。为提高时刻分配的可接受水平,本文将结合多容忍度下的时刻分配公平性评估,探究航空公司容忍度偏好,以提高分配方案的可接受性,对提升时刻资源利用效率和航空公司运营效益具有重要的实践意义。

1 模型构建

1.1 公平性评估指标构建

本研究构建的公平性指标基于相称性原则,旨在最小化航空公司公平性与整体公平水平平均值之间的差值,并充分考虑了经济效益上的公平性。在分配过程中,相称性原则要求根据各方的投入比例来分配产出^[11]。具体而言,根据不同场景特点定义贡献评估标准,并根据用户做出的贡献水平按比例进行资源分配^[2]。先前的研究主要关注请求量而忽略了经济效益。本文在公平性评估指标上做了改进,以时刻价值作为公平性评价对象,即分配结果的时刻价值应当按航空公司请求的比例分布在航空公司之间。强调了分配与请求间的比例关

系^[11,16]。构建公平性指标以表示时刻分配结果的相对时刻价值与航空公司请求的相对时刻价值间的比例关系

$$\rho_a = \frac{\widehat{V}_{a,p}}{\widehat{V}_{a,m}}, \quad \forall a \in A \quad (1)$$

式中: $\widehat{V}_{a,m}$ 为某航空公司 a 的请求 m 的相对时刻价值; $\widehat{V}_{a,p}$ 为某航空公司 a 的分配结果 p 的相对时刻价值; A 为进行时刻协调请求的航空公司 a 的集合; ρ_a 表示分配结果的相对时刻价值 $\widehat{V}_{a,p}$ 应与其请求的相对时刻价值 $\widehat{V}_{a,m}$,即贡献,成正比。理想状态下,航空公司 a 被相对公平对待,则 $\rho_a = 1$;反之,航空公司被优待($\rho_a > 1$)或忽视($\rho_a < 1$)。根据上述指标, ρ_a 越接近1,则证明公平性越优。这种改进,是在请求航班量基础之上,综合考虑航班经营效益,使公平性在航空公司时刻调度上体现得更为合理。 $\widehat{V}_{a,p}$ 与 $\widehat{V}_{a,m}$ 由下式定义

$$\widehat{V}_{a,p} = \frac{V_{a,p}}{\sum_{a \in A} V_{a,p}} = \frac{\sum_{m \in M_a} \sum_{t \in T} v_{m,t} X_{m,t}}{\sum_{a \in A} \sum_{m \in M_a} \sum_{t \in T} v_{m,t} X_{m,t}}, \quad \forall a \in A \quad (2)$$

$$\widehat{V}_{a,m} = \frac{V_{a,m}}{\sum_{a \in A} V_{a,m}} = \frac{\sum_{m \in M_a} \sum_{t \in T} v_{m,t}}{\sum_{a \in A} \sum_{m \in M_a} \sum_{t \in T} v_{m,t}}, \quad \forall a \in A \quad (3)$$

式中: $V_{a,m}$ 为某航空公司 a 的请求 m 的时刻价值; $V_{a,p}$ 为某航空公司 a 的分配结果 p 的时刻价值; $v_{m,t}$ 为时刻 t 航班 m 的时刻价值; $X_{m,t}$ 为时刻 t 航班 m 的决策变量,为二分类变量,若分配在时刻 t 则取1,反之则取0; T 为可供协调的时刻 t 的集合; M_a 为航空公司 a 的航班 m 的集合。

受活动类型、航线类型、航空公司等因素影响,相同时刻的价值存在差异^[1]。航空公司最重视时刻分配所带来的效益^[20]。因此,需要一个能进行全面分析且基本不受会计方法影响的模型来定义时刻价值。现金流折现模型(discounted cash flow model, DCF模型)是评估企业价值最为常用的方法之一,通过将未来现金流折现至当前进行价值评估^[21-22]。DCF模型的核心思想是以利润与成本间的比值来评估价值,这与航空公司对于时刻价值的追求相类似。可用座位公里指标是评估航空公司运营绩效的常用指标,可单独用于评估运营绩效,或与成本/

收入数据相结合衡量效率,支持调度或机队决策。在没有收入数据的情况下,可使用整个航季的可用座位公里数来估算每个请求的价值,而无需输入成本/收入。机票价格和航空公司收入受旅行距离、乘客和飞机载客率等因素的影响。另一个主要影响因素是航线竞争,竞争决定了飞机的大小和有关航线的服务频率。本文参考DCF模型,通过对模型进行变形,忽略了初始时刻的流量水平,以座公里情况表示运营效益,引入时刻竞争比例,对时刻价值提出如下定义

$$V_t = \frac{f_m}{c_f} \times \frac{M_t}{M_{\text{Total}}}, \quad \forall t \in T \quad (4)$$

式中: V_t 为时刻 t 的价值; f_m 为上一航季中,航班 m 的座公里情况; c_f 为其所对应的成本; M_t 为时刻 t 的请求量; $M_{\text{Total}} = M_{\text{Arr}} + M_{\text{Dep}}$ 为进场请求 M_{Arr} 与离场请求 M_{Dep} 的集合。

1.2 基于公平性的双目标时刻配置模型构建

首先,构建考虑效率性的目标函数。计划偏移时刻量被定义为最终分配时刻和请求时刻之间的差值^[2,7],即优化前后的偏移时刻量。当前时刻优化研究中,对于效率性的考虑大多围绕航班偏移时刻量制定优化目标。考虑航空公司的偏好,构建效率性目标函数

$$z_1 = \min W = \min \sum_{a \in A} W_a \quad (5)$$

$$z_2 = \min W_{\max}, \quad \forall a \in A \quad (6)$$

式中:偏移优化目标分别为最小化总偏移时刻量 W ,最小化最大偏移时刻量 W_{\max} (所有时刻请求与分配结果中最坏情况下的偏移时刻量),以保障航空公司的利益,同时降低时刻协调工作难度; W_a 为航空公司 a 所有请求 m 的总偏移时刻量; ω_m 为请求 m 的偏移时刻量。由式(7)~式(9)表示

$$W_a = \sum_{m \in M_a} \omega_m \quad (7)$$

$$\omega_m = \sum_{t \in T} |t - t_m| X_{m,t}, \quad \forall m \in M \quad (8)$$

$$W_{\max} = \max_{t \in T} |t - t_m| X_{m,t}, \quad \forall m \in M \quad (9)$$

式中: t_m 为分配给航班 m 的时刻 t ; M 为航班 m 的集合。

构建考虑公平性的目标函数。由上文可知,对于任意 $\forall a \in A$, $\rho_a = 1$ 时,航空公司 a 被公平对待。然而在实际航班时刻表的编排优化中,由于还需保

证容量限制、最小过站时间等约束以及总偏移时刻量最小的目标,无法实现所有航空公司均被公平对待的理想状态。在公平性度量指标基础上,构建公平性目标函数

$$z_3 = \min \left\{ \max \left| \rho_a - \frac{\sum_{a \in A} \rho_a}{|A|} \right|, \quad \forall a \in A \right\} \quad (10)$$

式中: z_3 为任一航空公司公平性和所有航空公司公平性均值的偏差程度。本文将航空公司的公平性指标与所有航空公司的公平性指标间的最大偏差最小化,确保最不公平的情况与平均公平的差距尽可能小。

基于上述定义内容,提出考虑公平性与效率性的多目标模型

$$Z_q = \{z_1, z_2, z_3\} \quad (11)$$

该模型有以下3个约束条件。

1) 时刻唯一性:本文是属于一类没有航班丢弃的优化问题,每个航班均分配一个时刻。定义决策变量 $X_{m,t}$ 为一个二分类变量

$$X_{m,t} = \begin{cases} 1, & \text{航班请求 } m \text{ 分配到时刻 } t \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (12)$$

$$\sum_{t \in T} X_{m,t} = 1, \quad m \in M \quad (13)$$

2) 机场滚动容量:指机场 k 在单位时间 c 内计划的离港和进港架次容量 $\mu_{k,c}$ 。

$$\sum_{m \in M} \sum_{t \in T_c} X_{m,t,k} \leq \mu_{k,c}, \quad \forall k \in K, \quad c \in C \quad (14)$$

式中: K 为机场 k 的集合; C 为单位时间 c 的集合。

3) 过站时间:飞机在机场 k 从时刻滑行停机到执行下一个航班的时间间隔。

$$\sum_{t \in [0, t_k]} X_{m_{\text{Dep}}, t} + \sum_{t \in [t_k - t_{\text{Arr, Dep}}, T]} X_{m_{\text{Arr}}, t} \leq 1, \quad (15)$$

$$\{m_{\text{Arr}}, m_{\text{Dep}}\} \in M_{\text{Total}}, \quad t_k \in [t_{\text{Arr, Dep}}, T]$$

式中: $\{m_{\text{Arr}}, m_{\text{Dep}}\} \in M_{\text{Total}}$ 为航班对的集合; m_{Dep} 为离港航班; m_{Arr} 为对应的前序进港航班; $t_{\text{Arr, Dep}}$ 为最小过站时间。任意 $t_k \geq t_{\text{Arr, Dep}}$, 如果航班在 $[0, t_k]$ 中任意时刻离港,则前序航班不可能在 $[t_k - t_{\text{Arr, Dep}}, T]$ 时间段内到达。

1.3 考虑航空公司容忍度的偏移时刻量定义

容忍度 τ_m 的实质是基于前人发现的每家航空公司对每个请求 m 的偏移时刻量存在最大接受水平^[13,18,22]。通过比较容忍度阈值与航空公司在接受时刻协调时刻 t 和请求的时间间隔 $t_{a,m}$ 间的差值,以

判断分配的效果。假设分配给指定请求 m 超出阈值范围,即早于最早限额 $t_{a,m} - \tau_m$ 或晚于最晚限额 $t_{a,m} + \tau_m$,则此时刻分配称为“过载分配”。反之,则为“合理分配”(图1)。过载分配的次数构成了航空公司对在时刻表协调的机场分配时刻包容度的总体衡量标准。此评估中内含了忽略请求的估计值。因此,可进一步以减少过载分配的数量为时刻优化的目标,从而减少航空公司拒绝分配结果的次数。

$$f_m = \begin{cases} t - (t_{a,m} + \tau_m), & t > t_{a,m} + \tau_m \\ 0, & t_{a,m} + \tau_m \geq t \geq t_{a,m} - \tau_m \\ t - (t_{a,m} - \tau_m), & t < t_{a,m} - \tau_m \end{cases} \quad (16)$$

$$\omega'_m = \sum_{t \in T} f_m x_{m,t}, \quad \forall m \in M \quad (17)$$

$$W'_a = \sum_{m \in M_a} \omega'_m \quad (18)$$

$$W'_{\max} = \max_{t \in T} f_m x'_{m,t}, \quad \forall m \in M \quad (19)$$

式(16)表示若为过载分配,则偏移时刻量 f_m 为分配时刻与最近阈值间的差值,反之则取0;式(17)~式(19)则为式(7)~式(9)的更新; ω' , W'_a , W'_{\max} 分别为更新后的 ω , W_a , W_{\max} 。

2 模型求解

2.1 约束转换

ε 约束,通过将多目标问题转化为一组单目标问题,找到一组权衡解决方案,是高效的多目标优化算法^[10]。每个单目标问题都涉及将其中一个目标最大化或最小化,同时将其其他目标视为约束条

件^[2],即将本模型中最小化总偏移时刻量为总目标,而最小化最大偏移时刻量与公平性目标转换为参数约束。

首先,将最大值最小目标 z_2 与公平性目标 z_3 转化为以下 ε 约束

$$|t - t_m| x_{m,t} \leq \varepsilon_{z_2}, \quad \forall m \in M \quad (20)$$

$$\left| \rho_a - \frac{\sum_{a \in A} \rho_a}{|A|} \right| \leq \varepsilon_{z_3}, \quad \forall a \in A \quad (21)$$

式(20)左侧表示分配时刻与请求时刻的偏移时刻量;式(21)左侧表示与航空公司 a 相关的公平性与平均公平性的偏差;约束(12)是非线性的,作为包含二进制决策变量,该约束通过乘以总偏移时刻量表达式,当总偏移时刻量不为0时,此操作有效。原多目标模型,仍受约束条件(式(12)~式(15))约束,重新表述为

$$Z_q = \min Z(\mathbf{X}, \varepsilon_{z_2}, \varepsilon_{z_3}), \mathbf{X} = [X_{m,t}] \quad (22)$$

式中: \mathbf{X} 为 $X_{m,t}$ 的矩阵。特别地, ε 的选择应谨慎。如果 ε 的值过高,则公平性约束将不受限制,并且结果将与不考虑公平性的模型的结果相同;如果 ε 的值太小,则问题可能没有可行的解决方案。初始 ε 值通过以下程序确定:首先,求解最小化总偏移时刻量的单目标模型,将单目标模型求解的结果代入式(4)和式(6)中,计算最大偏移时刻量与每家航空公司的公平性指标。随后,将计算出时刻量

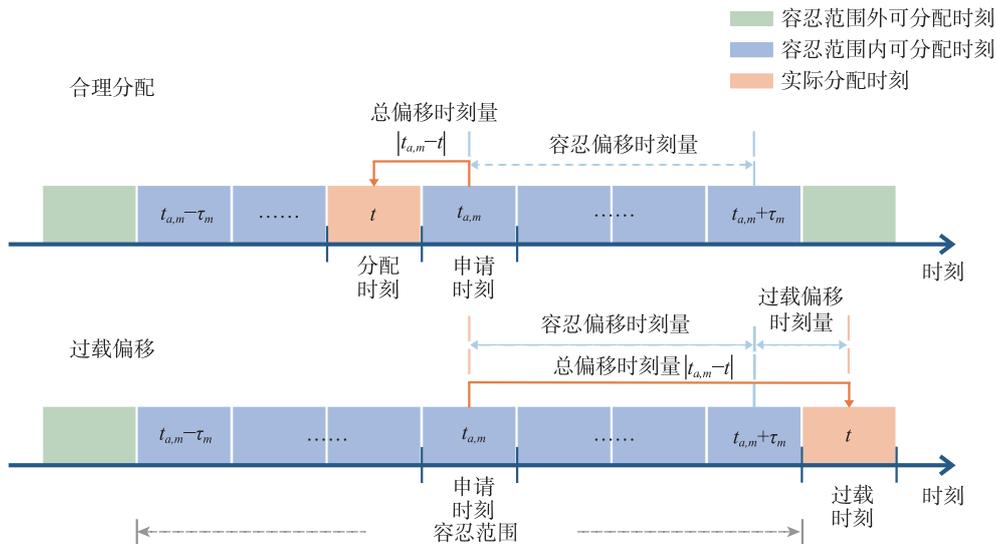


图1 考虑航空公司容忍度的偏移时刻量定义

Fig. 1 Definition of displacement considering airline tolerance

的公平性指标代入式(21)中,以计算公平性目标的值。最大偏移时刻量与公平性目标的计算值设置为初始 ϵ 值。该方法保证了单目标问题的解是多目标问题的可行解,并且 ϵ 的初始值是紧密的。对于 ϵ 的更新,以预定义的步长迭代减少 ϵ 的值并获得 ϵ_i (迭代 I 中采用的 ϵ 值)。对于每个 ϵ_i ,求解 ϵ 约束模型,并存储得到的目标值,以确定有效边界。当无法可行的解决方案时,该算法将终止。

2.2 框架设计

双目标时刻分配模型旨在确定给定时间范围和容量水平内多层时刻分配解决方案。为保证研究结果的实践性,采取双目标分层调度策略,即历史请求(H)优先级高于新进入者请求(N)及其他请求(O),并根据此划分为两个相互关联的层次,依次求解。层次的划分意味着第1层次的求解结果成为第2层次求解可行域的约束。

本文采用 Python 3.11 编码, ϵ 约束模型由 Gurobi 11.0 求解。具体计算过程如下。

1) 使用目标函数(式(5))和约束(式(12)~式(15))构建和求解效率性单一目标时刻分配模型。该模型的最优解均对应于最小总偏移时刻量-较大最大偏移时刻量-最差公平性。

2) 使用目标函数(式(6)~式(10))构建并求解基于公平性与效率性双目标的时刻分配模型,该模型的最优解对应于最小总偏移时刻量-较小最大偏移时刻量-最优公平性。

3) 使用式(17)~式(19)替换式(7)~式(9),重新构建偏移时刻量计算方式和双目标时刻资源分配模型。

3 案例分析

3.1 数据

本文制定的多层次双目标时刻调度模型旨在确定协调机场时刻最优分配结果。所需的输入包括机场公布容量、时刻价值、时刻请求数据和周转时间。本研究选取2023年冬春航季(11月6日至11月12日)珠三角地区某 Level 3 协调机场的数据作为实验案例。机场的申报容量以 15 min 为间隔(表1)。实验中,每个时刻以 15 min 为间隔表示。

表1 选取机场申报容量

Tab.1 Declared capacity of the airport under consideration

活动类型	时刻间隔/min	容量/航班架次
进场	15	7
离场	15	8

时刻请求数据涉及22个航空公司共计7094条请求,其中包含离场请求3553条,进场请求3540条(图2)。由于每日7~25时刻序列为机场夜间停车场阶段,无数据,故未在图中展现。历史请求3698条,新进入者请求和其他请求3396条。每个时刻请求都包括请求该时刻的航空公司的代码、活动类型、请求时刻日期、请求到达和离开的时间、分配到和离开的时间、飞机类型。

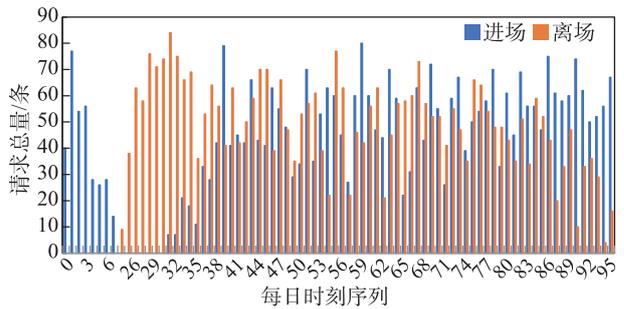


图2 时刻请求情况

Fig.2 Status of slot requests

3.2 基于公平性的时刻配置方案评估

将仅考虑最小化总偏移时刻量的单目标模型与基于公平性与效率性的双目标模型的解决方案进行对比,以评估时刻分配的优化效果。

两种模型的最优解如表2所示。单目标模型的求解结果代表了忽略公平性目标的基准解决方案。通过对比可得,公平性的引入导致总偏移时刻量提升0.30%,但实现公平性相对水平 $|\rho_a - 1|$ 降低26%。根据上文定义,公平性指标 ρ_a 越接近1,表明公平性更佳。因此,公平性的提升是以增加总偏移时刻量为成本,以改善分配结果的公平性水平,从而提升航空公司对时刻分配结果的满意度。同时,本文提出的双目标模型能够在保证偏移时刻量增加不显著的情况下,满足公平性要求。

讨论所提出的基于公平性与效率性双目标模型分层求解结果(图3)。图3中横轴表示效率性结果,即总偏移时刻量水平;纵轴表示公平性结果,即

表2 双目标模型求解结果对比

Tab.2 Comparison of model solution results

模型	总偏移时刻量/个	最大偏移时刻量/个	$ \rho_a - 1 $
单目标(忽略公平性)	14 205	61	0.19
双目标(考虑公平性)	14 247	63	0.14
模型偏差/%	0.30	3.28	-26.32

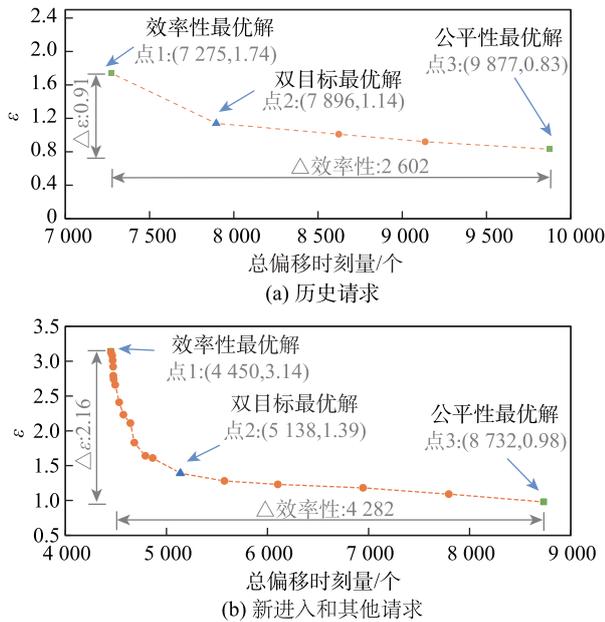


图3 基于公平性的时刻分配双目标模型的有效边界
 Fig. 3 Pareto solution of a bi-objective model of momentary allocation based on fairness

公平性 ε , ε 值越低表示公平性越优。图3中左右两端方形标记点分别对应于效率性最优解与公平性最优解,即总偏移时刻量最小且 ε 值最低,并且效率性最优解与单目标模型求解结果对应。三角

形所标记的点为兼顾公平性与效率性的最优解。每个点标记中,第1个值表示效率性目标,第2个值表示公平性目标。可见,对于各种类型的请求,在兼顾公平性与效率性双目标进行时刻请求分配时,公平性的提升均导致总偏移时刻量的增加。并且在前期牺牲少量的偏移时刻量即可提升较大的公平性,而后期,效率对于优化更加敏感,需要牺牲大量的效率性来提升相同水平的公平性。但是,对于不同时刻请求类型,公平性与效率性的权衡关系并不相同,历史请求的总偏移时刻量与 ε 变化较小,可推断,与其他两类相比,历史请求更易实现公平调度。总体而言,效率性目标与公平性目标呈负相关,即总偏移时刻量的降低是以牺牲公平性为代价的,且不同类型请求实现公平调度的难度不同,历史请求更易实现公平调度。

兼顾公平性与效率性的双目标模型在各航空公司的调整均衡水平优于仅追求总偏移时刻量最小的单目标模型。参与时刻分配的22家航空公司的个体调整情况如图5所示,每一组左列为单目标模型结果,右列为双目标模型结果。图4(a)显示了两种模型中各航空公司平均偏移时刻量相对水平。分析发现,存在某些航空公司偏移时刻量远超

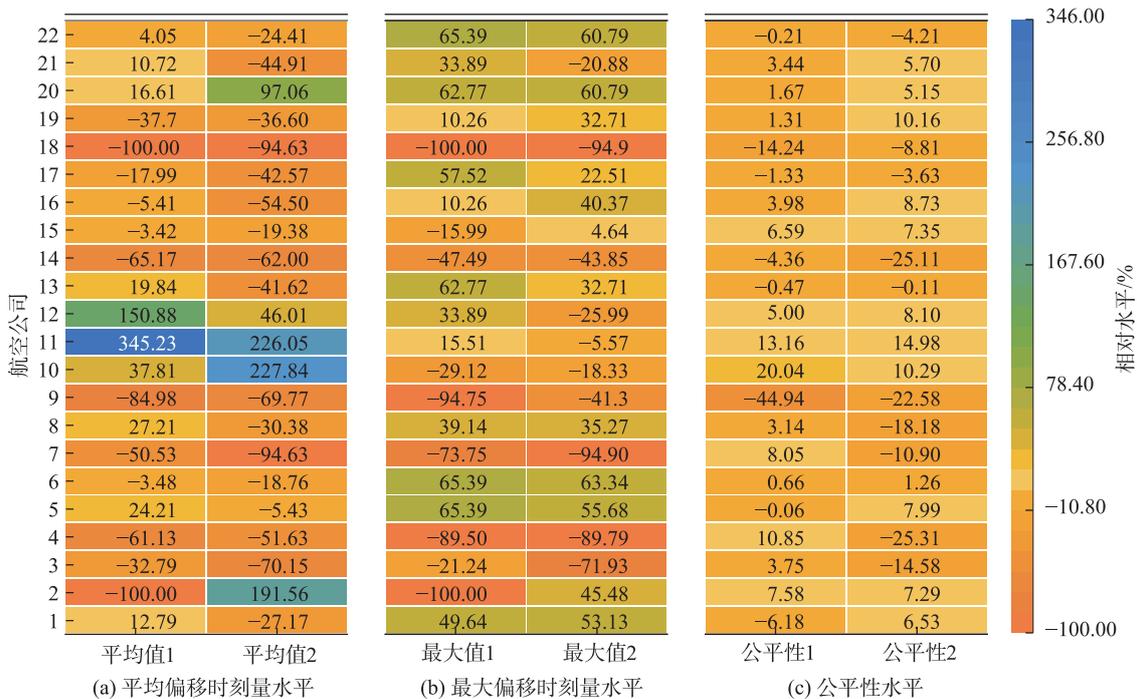


图4 航空公司偏移及公平性相对水平
 Fig. 4 Average relative level of displacement and fairness

平均水平 345.23%, 而某些航空公司平均偏移时刻量低于平均水平 100%。这表明, 在追求最小总偏移时刻量的单目标模型中, 部分航空公司的利益被牺牲, 而双目标模型则能够在保证总偏移时刻量最小的同时使各航空公司调整水平的相对均衡, 最高偏移时刻量相对水平为 227.84%, 最低水平为 -94.63%, 说明双目标模型避免了单目标下牺牲过度集中于某些航空公司的情况。各航空公司最大偏移时刻量相对水平同样证实(图 4(b)), 在单目标模型中仍存在多个航空公司平均偏移时刻量低于平均水平 100% 的情况, 而双目标模型下各航空公司的调整更加均衡(最差为 -94.9%)。在公平性上(图 4(c)), 双目标模型中各航空公司的公平性更为均衡, 而单目标模型中仍存在某一航空公司过度牺牲的情况(如航空公司 9, -44.94%)。因此, 公平性目标的纳入, 除了可满足整体分配上的公平性与效率性需求, 还能确保各航空公司间的公平性, 避免为追求总偏移时刻量最小而过度牺牲或偏爱某一航空公司的情况。

工作日与非工作日的求解结果对比结果如表 3 与图 4 所示。工作日中, 周五的平均偏移时刻量为全周最高, 最大偏移时刻量(58 个时刻)为全周中等水平, ρ_a 为 99.72% ($\rho_a < 1$), $|\rho_a - 1|$ 较优(0.28%), 说明当天虽然请求量为居中水平, 但可能对于时刻价值高的时刻请求相对集中, 而各航空公司调整水平相对均衡, 导致平均偏移时刻量最高, 而最大偏移时刻量不高, 避免了过于牺牲某些航空公司, 满足整体分配的公平性。非工作日中, 周六 ρ_a

表 3 工作日与非工作日求解结果对比
Tab.3 Comparison of solution results on working days and non-working days

类型	日期	请求量	最大偏移时刻量/个	$\rho_a / \%$
工作日	周一	1 013	55	98.72
	周二	1 009	60	101.02
	周三	1 005	61	100.28
	周四	1 016	58	100.15
	周五	1 014	58	99.72
	均值	1 011	—	99.98
非工作日	周六	1 021	60	101.11
	周日	1 005	58	100.09
	均值	1 012	—	100.60

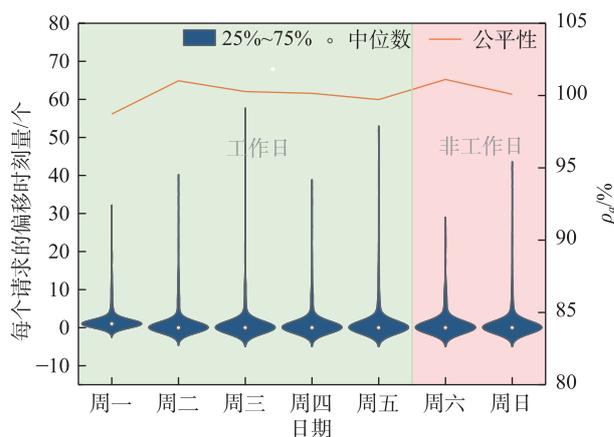


图 5 工作日与非工作日求解结果对比
Fig. 5 Comparison of solution results on working days and non-working days

为 101.11% ($\rho_a < 1$), $|\rho_a - 1|$ 最差(1.11%), 这可能与其请求量最多、请求相对集中于高价值时刻有关; 并且周六的平均偏移时刻量、最大偏移时刻量均位居第二, 说明当天包括高价值时段在内的各个时段请求量均有所提升, 因而导致在平均偏移时刻量低于周五的情况下, 当日的公平性水平仍显著降低。总体来看, 工作日的平均请求量与平均偏移时刻量均低于非工作日, 而 $|\rho_a - 1|$ 更优(0.02%), 但单日的调整则集中于周五周六。

3.3 容忍度水平分析

对 4 种不同容忍度水平下公平性与总偏移时刻量间的关系进行对比, 结果如图 6 所示。在各个层次中, 相同容忍度水平下, 公平性与总偏移时刻量间的关系均呈负相关, 这与上文分析结果相同。并且随着容忍度水平从 1 个时刻逐步放宽至 4 个时刻, 对于相同公平性水平下, 越宽松的容忍度水平, 总偏移时刻量越低。这意味着, 随着航空公司容忍度的提高, 分配的时刻将越接近航空公司的要求, 这对于航空公司在请求计划的制定等实际应用中具有参考价值。

对于 4 种指定的最大容忍度和忽略容忍度指标的结果进行对比, 结果如表 4 所示。总体来看, 容忍度越高, 总偏移时刻量越低。从最严格的容忍情况(即 0.25 h)到最宽松的容忍情况(即 1 h), 总偏移时刻量从 14 247 个降低至 1 982 个, 总降幅约 85.92%。并且, 容忍度每提升 0.25 h, 过载分配总偏移时刻量均有不同程度的降低。因此, 容忍度, 即最大可接受偏移时刻量的设置可显著降低过载分

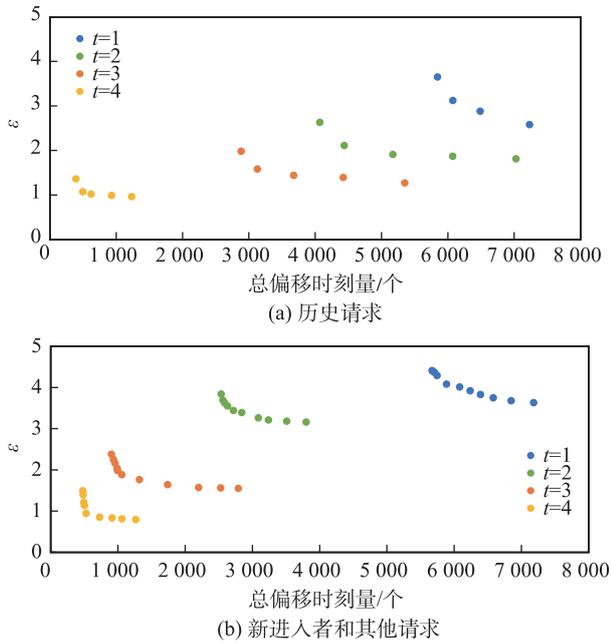


图6 不同容忍度下基于公平性的时刻分配双目标模型的有效边界

Fig. 6 Pareto solution of a bi-objective model of momentary allocation based on fairness under different tolerance levels

表4 不同容忍度下的偏移时刻水平对比

Tab.4 Displacement under different tolerance levels

容忍度水平 (时刻)/个	过载分配	过载分配总偏 移时刻量/个	平均偏移 时刻量/个	降幅/%
0	1 340	14 247	10.63	基准
1	2 062	11 964	5.80	45.47
2	1 500	8 334	5.56	47.78
3	890	5 121	5.75	45.92
4	301	1 982	6.58	38.11

配平均偏移时刻量,容忍度值得纳入时刻分配考量当中。

从不同容忍度方案来看,容忍度水平的增加可以优化分配结果,且存在最优容忍度水平。容忍度从0个提升至2个时刻时,过载分配总偏移时刻量与平均偏移时刻量从10.63个降低至5.56个。容忍度水平从2个时刻提升至4个时刻时,虽然过载分配总偏移时刻量保持降低趋势,但平均偏移时刻量降幅却从47.78%减少至38.11%。这说明,并非容忍度越高,过载分配的平均偏移时刻量越低,而是可能存在最优容忍度水平。从本文求解结果来看,容忍度水平为2个时刻(即30 min)时,过载分配平均偏移时刻量为4种方案的最低(5.56个时刻,相对

降幅47.78%),说明该方案为相对最优容忍度水平。容忍度是航空公司最大可接受偏移时刻量的体现,最优容忍度水平的探究,可以使航空公司合理设置对时刻分配结果的预期阈值,从而在优化时刻分配总偏移时刻量的同时提升公平性,提高的对分配结果的可接受性,从而提升时刻资源利用率^[18],这能够在指导航空公司在制定时刻请求计划时派生效用。

4 结论和建议

4.1 结论

1) 基于公平性与效率性的双目标模型证实了时刻分配时公平性与效率性间的负相关关系,即公平性的提升是以增加总偏移时刻量为成本。分层调度策略证实对于不同的请求类型实现公平调度的难度有所差异,历史请求更易实现公平调度。时刻价值作为公平性评估重要条件体现了先进性,在双目标模型构建中实现在总偏移时刻量提升幅度较小的情况下,满足整体分配上的公平性与效率性需求,同时使各航空公司的调整水平相对均衡,避免将总偏移时刻量最小的满足建立在牺牲部分航空公司的基础之上。

2) 工作日和非工作日在时刻优化情况上存在差异。工作日的平均申请数与平均偏移时刻量均低于非工作日,且 $|\rho_a - 1|$ 更优。但单日的总偏移时刻量调整则更集中于周五周六,且周六的公平性最差。

3) 容忍度概念的引入对偏移时刻量进行了重新定义,可以提升时刻资源分配结果的可接受度,减少过载分配的出现。2个时刻(30 min)为相对最优容忍度水平,可最大程度地优化平均偏移时刻量。航空公司可考虑合理设置对时刻分配结果的预期阈值,从而提高对分配结果的可接受性,提升时刻资源利用率。

4.2 建议

1) 以分层调度策略下双目标模型印证的公平性与效率性间的负相关关系为基础,空管单位可考虑在追求效率性的同时,协调航空公司间的公平性,适当牺牲一定的总偏移时刻量,减少以牺牲部分航空公司为代价来满足总偏移时刻量最小的情况,并调整不同类型的请求满足水平,避免过度牺牲新进入者和其他请求来满足公平性的情况,从而

均衡航空公司的偏移时刻量及所分配时刻的时刻价值,改善航空公司满意度。

2) 根据各航空公司调整情况及工作日、非工作日分配情况的分析,航空公司可结合自身及日期类型适当调整时刻申报计划,来提升自身效益及公平性。对于大型航空公司,航权资源相对丰富,可通过适当调整不同日期高价值时刻的申报量,从中选择更优的航班计划。对于中小型航空公司,航权资源相对较少,高价值时刻竞争力相对较弱,尤其是调整偏移时刻量较高的周五与请求量集中且公平性较低的周六,可适当降低此类时刻请求量,侧重于次高价值时刻,以提升自身效益与公平调度。

3) 本文分析证明过载分配概念下的最优容忍度水平也值得航空公司考虑。本文初步测定相对最优容忍度水平为2个时刻,即30 min。因此航空公司在制定计划时,可初步基于请求时刻放宽2个时刻,调整对于时刻分配结果的评估标准,从而在提高时刻利用率和提升分配可接受度上获得实质性益处,而非大幅度的效率牺牲。

参考文献:

- [1] KATSIGIANNIS F A, ZOGRAFOS K G, FAIRBROTHER J. Modelling and solving the airport slot-scheduling problem with multi-objective, multi-level considerations[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 124: 102914.
- [2] KATSIGIANNIS F A, ZOGRAFOS K G. Multi-objective airport slot scheduling incorporating operational delays and multi-stakeholder preferences[J]. *Transportation Research Part C: Emerging technologies*, 2023, 152: 104156.
- [3] INTERNATIONAL AIR TRANSPORT ASSOCIATION. *Worldwide slot guidelines*[R]. Montreal, Canada: International Air Transport Association, 2017.
- [4] 王艳军, 水笑雨, 王梦尹. 机场航班时刻资源管理研究进展[J]. *北京航空航天大学学报*, 2024, 50(4): 1065-1076. WANG Y J, SHUI X Y, WANG M Y. Research progress on airport slot allocation[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2024, 50(4): 1065-1076.
- [5] FAIRBROTHER J, ZOGRAFOS K G. Optimal scheduling of slots with season segmentation[J]. *European Journal of Operational Research*, 2021, 291(3): 961-982.
- [6] ZOGRAFOS K G, MADAS M A, ANDROUTSOPOULOS K N. Increasing airport capacity utilisation through optimum slot scheduling: review of current developments and identification of future needs[J]. *Journal of Scheduling*, 2017, 20(1): 3-24.
- [7] KOESTER D. White dwarfs: recent developments[J]. *The Astronomy and Astrophysics Review*, 2002, 11: 33-66.
- [8] JACQUILLAT A, ODONI A R. An integrated scheduling and operations approach to airport congestion mitigation[J]. *Operations Research*, 2015, 63(6): 1390-1410.
- [9] RIBEIRO N A, JACQUILLAT A, ANTUNES A P, et al. An optimization approach for airport slot allocation under IATA guidelines[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 112: 132-156.
- [10] ZOGRAFOS K G, ANDROUTSOPOULOS K N, MADAS M A. Minding the gap: optimizing airport schedule displacement and acceptability[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 114: 203-221.
- [11] JIANG Y, ZOGRAFOS K G. A decision making framework for incorporating fairness in allocating slots at capacity-constrained airports[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 126: 103039.
- [12] COROLLI L, LULLI G, NTAIMO L. The time slot allocation problem under uncertain capacity[J]. *Transportation Research Part C: Emerging technologies*, 2014, 46: 16-29.
- [13] PELLEGRINI P, BOLIĆ T, CASTELLI L, et al. SOSTA: an effective model for the simultaneous optimisation of airport slot allocation[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 99: 34-53.
- [14] ANDROUTSOPOULOS K N, MADAS M A. Being fair or efficient? A fairness-driven modeling extension to the strategic airport slot scheduling problem[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 130: 37-60.
- [15] ANDREATTA G L G. Equitable demand management strategies for different classes of customers[J]. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2009, 57(1): 1-22.
- [16] ZOGRAFOS K G, JIANG Y. A bi-objective efficiency-fairness model for scheduling slots at congested airports[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2019, 102: 336-350.
- [17] GLOVER C N B M. Stochastic optimization models for ground delay program planning with equity-efficiency

- trade-offs[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2013, 33: 196-202.
- [18] ZOGRAFOS K G, ANDROUTSOPOULOS K N, MADAS M A. Minding the gap: optimizing airport schedule displacement and acceptability[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2018, 114: 203-221.
- [19] 林雅晴, 周晓东. 机场小时时段离港时刻价值评估分析[J]. *空运商务*, 2023(1): 32-36.
- LIN Y Q, ZHOU X D. Analysis of departure time value evaluation for airport hourly time slots[J]. *Air Transport Business*, 2023(1): 32-36.
- [20] 刘光才, 王莹, 覃娇. 航班时刻价值评估的实证分析: 立足于航空公司的决策视角[J]. *中国交通观察*, 2020, 42(9): 6-10.
- LIU G C, WANG Y, QIN J. Empirical analysis of airport slots value based on PCA and DCF: from the perspective of airline decision-making[J]. *China Transportation Outlook*, 2020, 42(9): 6-10.
- [21] WANG Y, LIU C, WANG H, et al. Slot allocation for a multiple-airport system considering airspace capacity and flying time uncertainty[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2023, 153: 104185.
- [22] KATSIGIANNIS F A, ZOGRAFOS K G, FAIRBROTHER J. Modelling and solving the airport slot-scheduling prob-

lem with multi-objective, multi-level considerations[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2021, 124: 102914.



第一作者: 吕佳璘(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为交通运输规划与管理。E-mail: linjial@nuaa.edu.cn。



通信作者: 包丹文(1982—), 男, 副教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为交通运输规划与管理, 低空空域规划。E-mail: baodanwen@nuaa.edu.cn。

(责任编辑:姜红贵)