

时变排队模型下的高校食堂排队预测研究

刘兴果^{1*}, 李思怡¹, 宋思瑶²

¹沈阳航空航天大学理学院, 辽宁 沈阳

²沈阳航空航天大学安全工程学院, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2026年8月2日; 录用日期: 2026年9月1日; 发布日期: 2026年9月8日

摘要

针对高校食堂高峰拥堵、客流监管难等问题, 本文首先将就餐窗口抽象为多服务台排队系统, 搭建排队预测与推荐框架; 其次采用 $M_t/G/c(t)$ 离散事件仿真描述早、中、晚主要用餐高峰, 并在非高峰时段采用低峰客流函数与 $M/G/c$ 近似模型进行补充预测, 覆盖高峰期并依据实际约束生成模拟数据; 最后系统可输出多项运行指标与可视化图表, 刻画设定仿真场景下的食堂客流特征, 为就餐、窗口调度及备餐工作提供参考。

关键词

高校食堂, 离散事件仿真, $M_t/G/c(t)$, $M/G/c$

Queue Prediction in University Dining Halls Using a Time-Varying Queueing Model

Xingguo Liu^{1*}, Siyi Li¹, Siyao Song²

¹School of Science, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

²School of Safety Engineering, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning

Received: August 2, 2026; accepted: September 1, 2026; published: September 8, 2026

Abstract

To address peak-hour congestion and difficulties in monitoring diner flows in university dining halls, this study models each service window as a multi-server queue and develops an integrated queue prediction and recommendation framework. A time-varying $M_t/G/c(t)$ discrete-event

*通讯作者。

simulation model is used to characterize the major breakfast, lunch, and dinner peaks. For off-peak periods, a low-arrival-rate function combined with an $M/G/c$ approximation is employed, and simulation data are generated under practical operational constraints. The framework produces operational indicators and visualizations to characterize diner-flow patterns under the specified simulation scenarios, providing analytical support for dining choices, service-window scheduling, and meal preparation.

Keywords

University Dining Hall, Discrete-Event Simulation, $M_t/G/c(t)$, $M/G/c$

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

高校食堂客流具有明显的时变性与随机性。课程结束会使学生在短时间内集中到达, 形成持续时间较短但强度较高的用餐峰值; 窗口服务时间则受菜品复杂度、操作流程和服务人员配置等因素影响, 呈现显著差异。因此, 采用平均到达率和平均服务率的稳态模型, 难以准确刻画高峰期的等待时间与队列变化。

已有研究已将 $M/M/s$ 模型用于食堂排队系统分析[1], 并从需求驱动角度探讨高校智慧食堂的数字化转型与运营数据整合[2]。针对时变到达的多服务台系统, Jennings 等研究了非平稳需求下的动态服务配置[3]; 随机效用理论及 Logit 模型则为顾客选择概率建模提供了理论基础[4]。离散事件仿真可按事件序列刻画顾客到达、排队、服务与离开过程, 适用于动态随机服务系统[5][6]。综合现有研究, 针对高校食堂场景, 仍有三方面问题值得进一步研究: 一是固定到达率难以反映短时客流高峰; 二是部分模型采用的指数服务时间假设难以描述不同窗口的服务差异; 三是顾客选择行为通常被简化, 缺少拥堵状态、窗口选择与客流再分配之间的动态反馈。上述不足限制了模型在等待时间预测和窗口调度中的应用。

针对上述问题, 本文构建基于 $M_t/G/c(t)$ 队列与离散事件仿真的高校食堂排队预测模型。模型采用时变到达率描述客流变化过程, 以 Gamma 分布刻画服务时间特征, 并引入动态服务位机制模拟高峰时段增援。同时结合随机效用理论和 Softmax 选择机制, 实现客流在窗口之间的动态分配。最终分别从学生端和运营端输出预测结果, 为就餐推荐、窗口调度和资源优化提供决策支持。

本文的主要创新点包括: (1) 构建 $M_t/G/c(t)$ 时变排队模型, 刻画分钟级客流变化与动态服务能力; (2) 建立考虑拥堵反馈的客流分配机制, 实现窗口选择行为建模; (3) 形成学生端推荐与运营端分析相结合的双端决策支持体系。

2. 核心算法与模型构建

2.1. 时变排队模型

2.1.1. 模型选择依据与优点

本文选择 $M_t/G/c(t)$ 模型, 与传统 $M/G/c$ 相比, 该模型能够保留峰值大小和峰值时刻, 计算任意分位等待而非只给均值, 并能在仿真过程中加入换窗、临时增援等状态依赖规则。代价是参数更多、计算量更大, 因此本文仅在早中晚主要用餐时段使用全量离散事件仿真, 非高峰保留轻量 $M/G/c$ 近似。

2.1.2. 时变客流到达率

结合高校下课客流骤增骤减的规律，构建“基础客流 + 高峰客流”复合到达率模型：

$$\lambda(t) = \lambda_0 + \lambda_p e^{\frac{-(t-t_p)^2}{2\sigma^2}}$$

其中 λ_0 表示基础到达强度， λ_p 表示高峰附加强度， t_p 表示高峰中心， σ 表示高峰持续宽度。该表达能够描述下课逐渐到达、到达峰值后回落的过程。

2.1.3. 多项分布生成分钟到达量

如果直接用泊松分布逐分钟抽样，某一时段总人数可能与预设人数偏差较大。当前程序先计算每分钟的理論到达强度，再归一化为到达概率，最后用多项分布生成分钟级到达量：

$$(A_1, A_2, \dots, A_T) \sim \text{Multinomial}(N, p_1, p_2, \dots, p_T)$$

这样既保留了高峰曲线，又保证早餐、午餐和晚餐总人数与设定规模一致。

2.2. 学生择窗决策与拥堵分流算法

2.2.1. 多维度综合效用函数

根据随机效用理论，学生对窗口的选择可表示为不同属性共同作用下的效用比较[4]。模型根据窗口性价比、位置、出餐速度、预算匹配、饱腹感和健康指数计算综合效用。随后加入楼层惩罚，体现上楼成本。楼层越高，学生选择意愿越低。基础效用函数采用加权线性形式。设第 i 个窗口的综合效用为 U_i ，则学生对该窗口的基础偏好可表示为：

$$U_i = 0.45V_i + 0.18L_i + 0.14S_i + 0.10B_i + 0.08F_i + 0.05H_i$$

其中， V_i 表示第 i 个窗口的性价比。性价比由口味评分、环境评分和价格共同确定，可写为：

$$V_i = \frac{T_i + E_i}{\text{Price}_i / 10}$$

V_i 为性价比，通常是最核心因素，权重设为 0.45； L_i 为位置便利度。权重设为 0.18； S_i 为出餐速度得分，权重设为 0.14； B_i 为预算匹配度，用于衡量窗口价格与学生个人预算之间的接近程度，权重设为 0.10； F_i 为饱腹感，权重设为 0.08； H_i 为健康指数，权重设为 0.05。

2.2.2. 权重设置与敏感性分析

由于当前研究缺乏真实问卷和历史择窗数据，本文未对综合效用函数的权重进行统计估计，而是根据各因素在学生择窗过程中的相对作用设定基准权重。其中，性价比、位置便利度、出餐速度、预算匹配度、饱腹感和健康指数的权重分别为 0.45、0.18、0.14、0.10、0.08 和 0.05。

敏感性分析可以通过改变参数取值，考察模型输出及研究结论的稳定性[7]。本文设置四组对照方案，并对每组权重开展万人次午餐场景仿真，结果见表 1：

Table 1. Comparison of simulation evaluation metrics under different weighting schemes
表 1. 不同权重方案仿真评价指标对比结果

方案	权重向量	平均等待时间	等待时间标准差	最大队列长度近似	客流集中度 HHI	一楼客流占比	风险窗口数
基准权重	(0.45, 0.18, 0.14, 0.10, 0.08, 0.05)	40.4069957 3679181	27.2931967 22485977	153.573124 93607785	0.02292842 511989075	0.66637546 92890862	24

续表

强调位置	(0.35, 0.25, 0.15, 0.10, 0.10, 0.05)	39.3739876 92725755	27.0709044 41754223	130.087201 53947542	0.02139356 874460515	0.63800254 70328649	25
强调速度	(0.35, 0.15, 0.25, 0.10, 0.10, 0.05)	40.1752435 0305397	29.1433215 40538164	135.305081 16355554	0.02191811 5549727737	0.64847816 46335129	25
强调预算	(0.35, 0.15, 0.10, 0.25, 0.10, 0.05)	39.9281181 6845644	27.3864199 40006867	121.544489 27449201	0.02155899 5085279763	0.64550410 70485945	25
近似平均权重	(0.17, 0.17, 0.17, 0.17, 0.17, 0.17)	37.2233083 9096384	26.5735958 60355745	98.8508865 8607245	0.02040513 971888654	0.61985572 33855633	26

表 1 显示, 各方案的平均等待时间、等待时间标准差、客流集中度和风险窗口数量变化有限, 表明模型整体结果对权重调整具有一定稳定性。基准权重方案的一楼客流占比和最大队列长度相对较高, 说明提高性价比与位置便利度的权重会加剧局部客流集中, 使模型呈现出更明显的极端拥堵特征。

考虑到本文重点关注局部拥堵风险, 后续仿真采用基准权重作为基准场景配置。该权重并非统计意义上的最优结果, 也不代表学生真实偏好, 实际应用时仍需结合问卷或历史择窗数据进行校准。

2.2.3. 概率化择窗与动态分流机制

为体现学生选择的随机性, 模型进一步采用 Softmax 函数将综合效用转化为选择概率。设学生选择第 i 个窗口的概率为 P_i , 则:

$$P_i = \frac{e^{U_i}}{\sum_j e^{U_j}}$$

同时设置 8 分钟可接受等待阈值构建拥堵分流机制: 当目标窗口预估排队时长超过阈值时, 学生自动重新筛选低拥堵窗口完成择窗更新, 有效规避模型极端拥堵数据, 复现真实场景下学生主动避开拥堵、动态分流的行为。

2.3. 非高峰时段近似预测模型

非正餐时段客流规模小、波动平缓, 无需执行高算力全量离散事件仿真。本文采用轻量化两步预测策略, 首先, 主程序生成全天总客流曲线。饭点使用仿真结果; 非饭点使用低峰基线, 并叠加小波峰。其次, 将非高峰总客流按窗口吸引力分配到具体窗口。分配时考虑口味、位置、出餐速度、价格和品类低峰偏好。夜间更偏向适合加餐或夜宵的品类。查询模块在非高峰时段使用 $M/G/c$ 近似模型估计窗口状态。

2.4. 运营量化评价模型

为实现食堂供需关系的量化诊断, 本文创新性构建市场未饱和指数, 综合标准化需求强度、排队等待压力、服务台利用率三大核心运营指标, 精准评估各品类、各窗口的供需缺口:

$$O_c = 0.45D_c + 0.35P_c + 0.20\rho_c$$

其中 D_c 表示标准化需求强度, P_c 表示等待压力, ρ_c 表示服务台利用率。若 O_c 较高, 说明该品类不仅受欢迎, 而且现有供给承接压力较大, 适合考虑扩容、提前备餐或增加相近品类。

市场未饱和指数权重敏感性分析

为检验品类排序对指数权重变化的敏感程度, 本文设置四组对照方案, 并采用 Top5 品类重合率和 Spearman 等级相关系数衡量排序变化, 以评价排序结果的稳定性[7]。

Table 2. Comparison of the Top5 categories by market unsaturation index under different weighting schemes
表 2. 不同权重方案下市场未饱和指数 Top5 品类对比

方案	权重(D,P, ρ)	Top5 品类	Top5 重合率	Spearman 相关
基准权重	(0.45, 0.35, 0.20)	麻辣香锅、自选菜、炒饭、黄焖鸡、盖饭	1	1
强调需求	(0.60, 0.25, 0.15)	自选菜、盖饭、炒饭、馄饨、黄焖鸡	0.8	0.8556390977443609
强调等待	(0.25, 0.60, 0.15)	麻辣香锅、煲仔饭、麻辣烫、黄焖鸡、炒饭	0.6	0.47969924812030074
强调利用率	(0.30, 0.25, 0.45)	麻辣香锅、炒饭、黄焖鸡、盖饭、馄饨	0.8	0.9503759398496241
近似平均权重	(0.33, 0.33, 0.33)	麻辣香锅、炒饭、黄焖鸡、盖饭、自选菜	1	0.9593984962406015

表 2 结果显示，近似平均权重方案与基准方案的 Top5 品类完全一致，Spearman 等级相关系数为 0.9593，说明品类排序总体稳定。强调等待方案的 Top5 重合率降至 0.60，Spearman 等级相关系数降低，表明等待压力权重过高会显著改变排序，并可能使需求较低但服务较慢的品类排名上升。因此，本文采用需求强度、等待压力和服务台利用率权重分别为 0.45、0.35 和 0.20 的基准方案，以兼顾品类需求与现有供给压力。该权重并非唯一最优配置，实际应用时仍需根据真实运营数据进行校准。

2.5. 算法流程

主程序的整体流程如图 1，查询子程序算法如图 2。

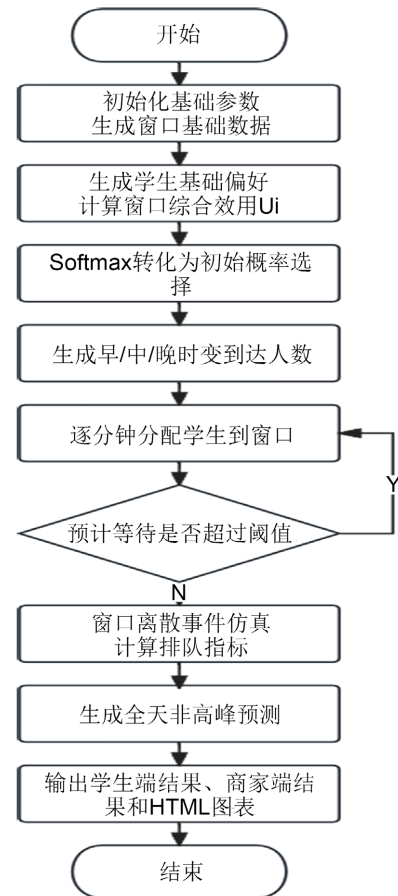


Figure 1. Flowchart of the main program
图 1. 主程序算法流程图

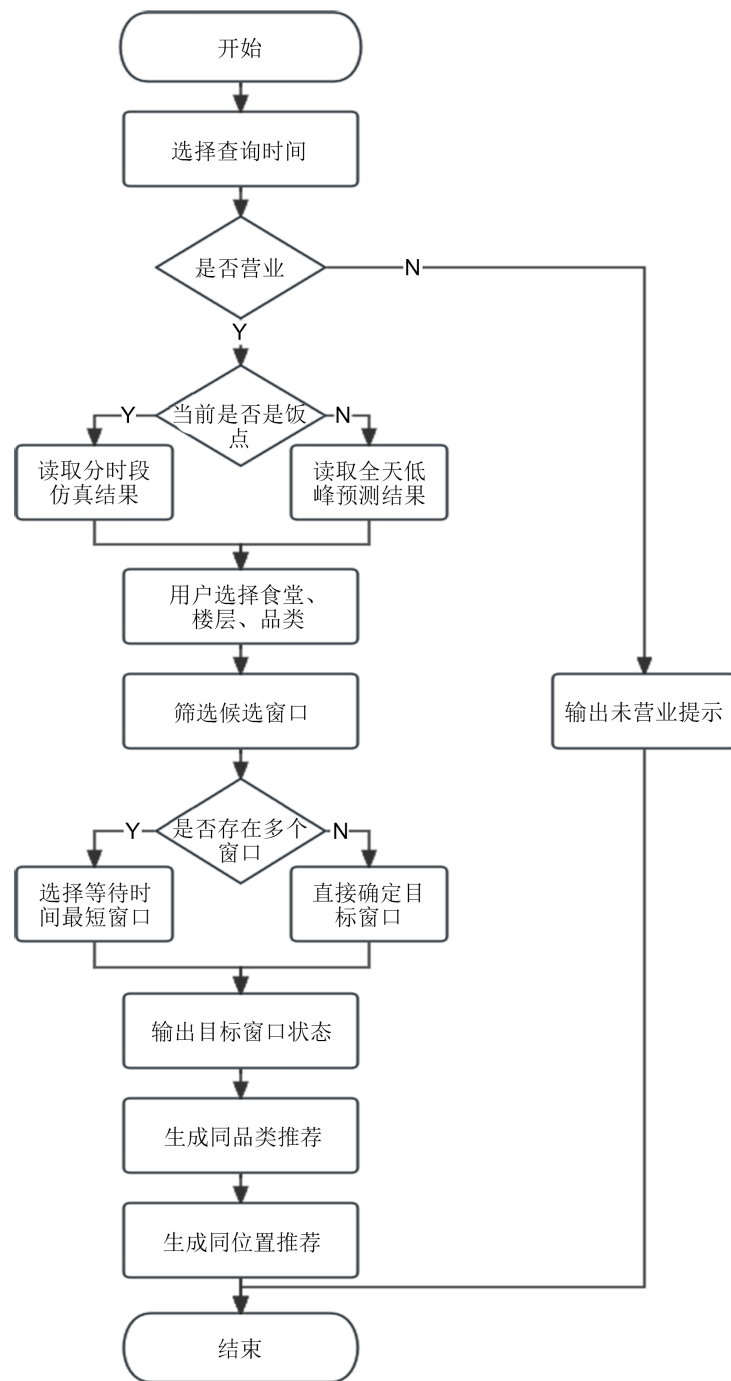


Figure 2. Flowchart of the submodule
图 2. 子模块算法流程图

3. 数值实验设计

3.1. 实验基础参数设置

研究场景设定为一个中等规模校区，在校学生约 12,000 人。样本包括 60 个窗口，两个食堂各 30 个窗口；每个食堂一楼 12 个窗口、二楼 9 个窗口、三楼 9 个窗口。营业时间为 06:00~22:00，非高峰额外

形成零散客流，用于刻画课间加餐、下午错峰和夜间夜宵等需求。

3.2. 价格、评分与预算分布

价格按品类范围均匀抽样，口味评分和环境评分采用正态分布，且价格与评分存在弱相关关系。学生预算采用均值 18 元、标准差 5 元的正态分布。多数学生正餐预算集中在十几元到二十元之间，同时存在少数预算较低或较高的学生。预算进入选择模型时不是硬约束，而是通过预算匹配度影响选择概率。

3.3. 服务台数、服务时间和 Gamma 分布

服务台数不是完全随机。慢品类高峰期通常需要多人协作，因此设置为 3 个服务能力单位；平均出餐时间较长的普通品类也至少配置 2 个服务位。服务时间采用 Gamma 分布，以描述非负、右偏的服务过程。通过变异系数 CV 控制波动程度。其中，标准化程度较高的窗口设置较小 CV，麻辣香锅、煲仔饭等服务差异较大的品类设置较大 CV。

3.4. 数据自检机制

程序运行后会检查窗口布局、等待时间、服务台利用率、分流比例等结果是否明显异常。自检的目的不是修改结果，而是提醒研究者随机数据是否偏离现实。通过服务能力约束、分流机制和低峰强度设置，避免了等待时间几百分钟、非高峰大量排队等不合理现象。

为保证实验可复现，程序采用固定随机种子。仿真结束后，自检机制按照预设阈值检查各窗口的服务时间、等待时间和服务台利用率。异常判定标准如下表 3：

Table 3. Thresholds and criteria for simulation data validation
表 3. 仿真数据自检指标阈值与判定标准

检查指标	阈值范围	判定含义
平均出餐时间	1.2~6 分钟	低于 1.2 分钟说明设置过快，高于 6 分钟说明设置过慢
平均等待时间	1.5~20 分钟	低于 1.5 分钟可能不符合真实体验，高于 20 分钟提示需加强分流
90 分位等待时间	≤30 分钟	超过 30 分钟说明存在极端排队情况
服务台利用率	≤0.98	接近 1 说明窗口长期饱和，需要增加服务位
午餐时段人窗比	80~130	偏离该范围说明窗口规模设置不合理

如果上述任何一项指标超出设定范围，则自检程序会输出对应的警告信息；若全部指标均处于合理区间，则表明仿真结果可信且无极端不合理的排队时长。运行结果如下：

```
===== 数据自检报告 =====
窗口总数：60
平均出餐时间范围：1.27~5.26 分钟
平均等待时间范围：4.94~15.17 分钟
90 分位等待时间最大值：26.08 分钟
服务台利用率最大值：0.918
午餐期每个窗口接待学生数：100.0
自检通过：未发现极端数据。
结果表明本文数据均处于合理区间，可以正常使用。
```

4. 结果分析

4.1. 仿真结果与运营分析

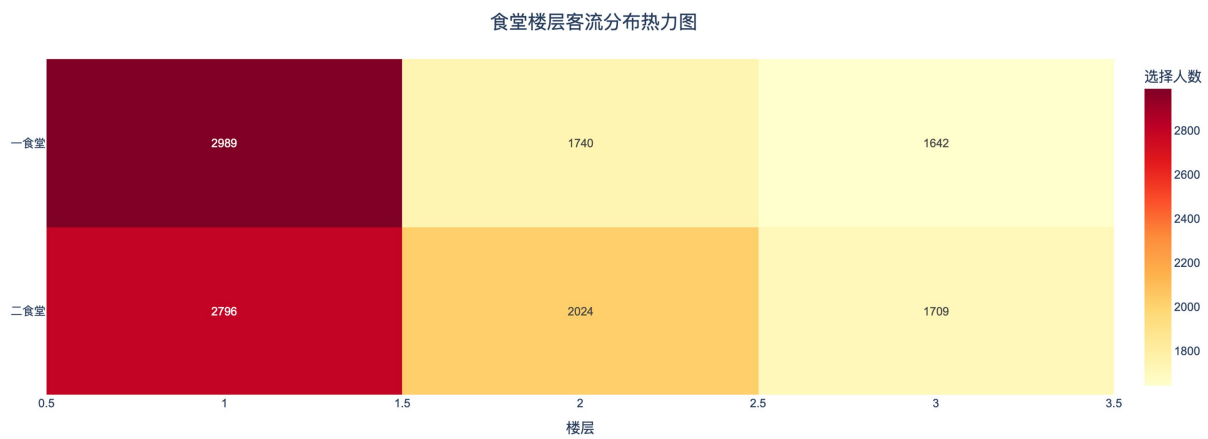


Figure 3. Heatmap of diner flow distribution by dining hall and floor

图 3. 食堂楼层客流分布热力图

图 3 表明，两座食堂总体客流基本均衡，而楼层差异明显。一楼仅占 40%的窗口，却承担 44.8%的客流，说明入口便利性显著影响学生择窗行为。该结果表明，高峰期一楼应作为重点疏导区域，可结合电子引导和推荐系统实现客流分流。

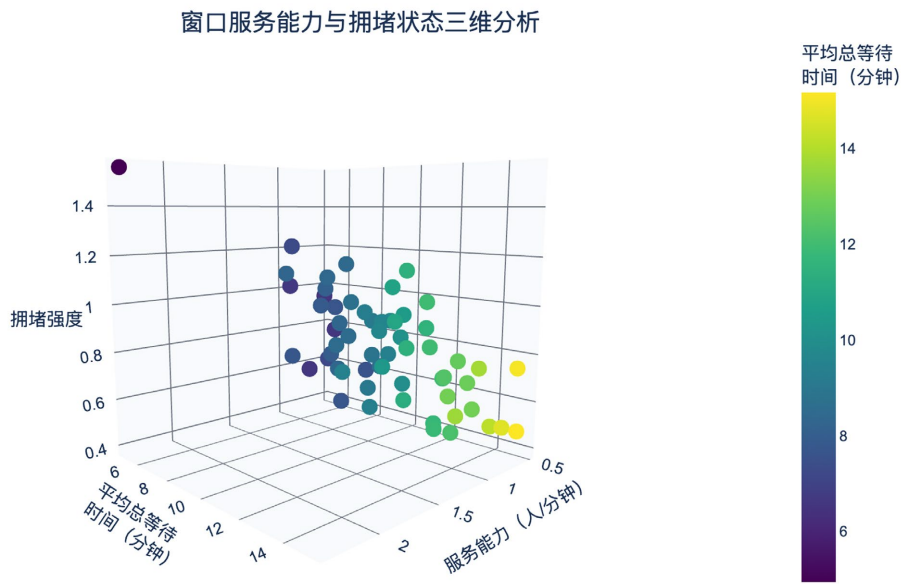


Figure 4. Three-dimensional analysis of service capacity and congestion status at service windows

图 4. 窗口服务能力与拥堵状态三维分析

图 4 表明，窗口服务能力均值为 0.88 人/分钟，平均等待时间为 10.01 分钟。平均出餐时间与等待时间呈正相关(0.623)，服务能力与等待时间呈负相关(-0.605)，表明窗口拥堵不仅取决于客流规模，也受单位时间处理能力影响。因此，高复杂度窗口应优先通过流程拆分和高峰增援提升服务率，而非仅增加窗口数量。

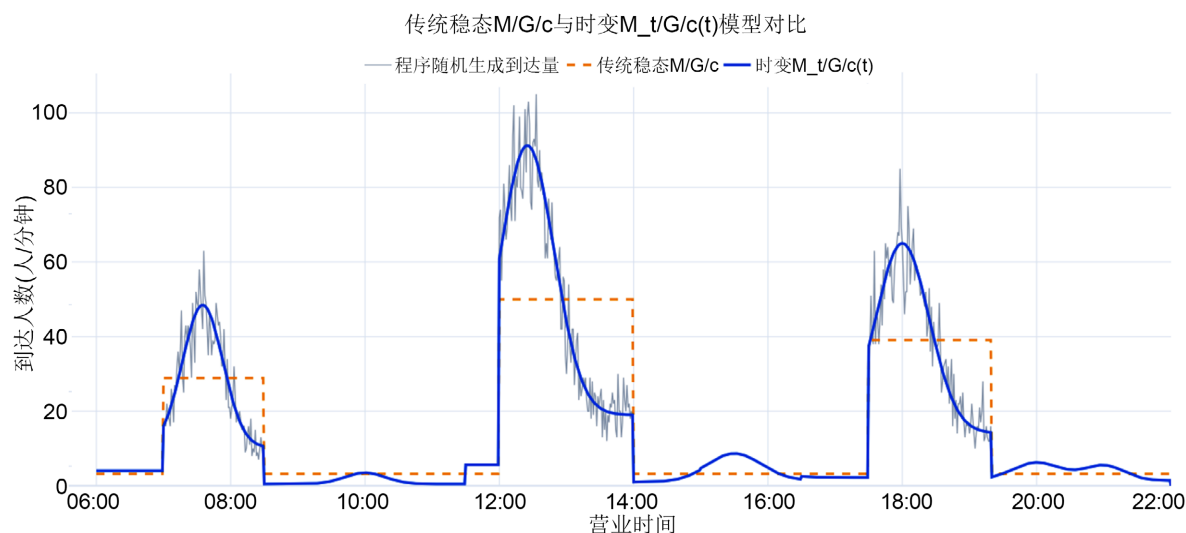


Figure 5. Baseline simulated arrival intensity and model predictions throughout the day

图 5. 全天基准模拟到达强度及模型预测结果

图 5 展示了全天基准模拟到达强度及两类模型的预测结果。在设定的仿真场景中，客流呈现明显的早、中、晚三次高峰，非正餐时段仍存在由课间加餐、错峰就餐和夜间消费形成的小幅波动。

图中灰色曲线表示基准模拟到达强度，橙色虚线表示稳态 $M/G/c$ 模型基于整体平均到达率得到的预测，蓝色实线表示时变 $M_t/G/c(t)$ 模型的预测。对比可见，稳态模型难以反映客流的时段波动，而时变模型能够较好地捕捉基准模拟序列中三次用餐高峰的强度和出现时刻。需要说明的是，该结果属于同一仿真场景下的模型内部比较，并非基于现场客流数据的现实验证。

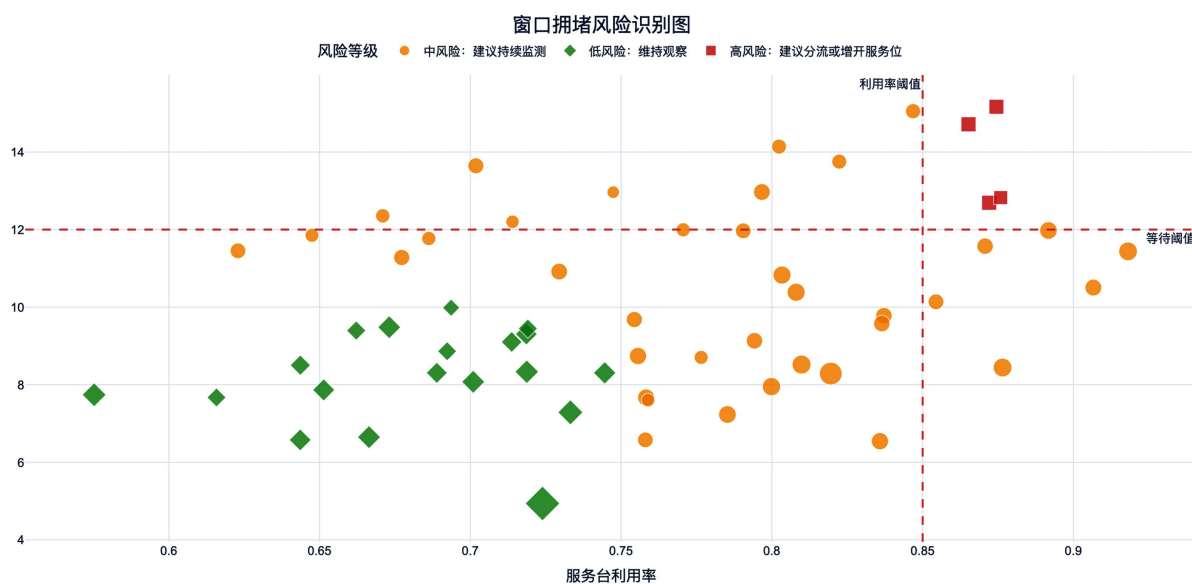


Figure 6. Congestion risk identification for service windows

图 6. 窗口拥堵风险识别图

图 6 根据服务台利用率和等待时间识别风险。当前高风险窗口 4 个，占 6.7%；中风险窗口 37 个，占 61.7%；低风险窗口 19 个，占 31.7%。高风险窗口数量不多，但中风险窗口超过六成。高风险窗口主

要集中在等待时间超过 12 分钟且利用率较高的位置,包括兰州拉面、烤肉饭、麻辣香锅、煲仔饭等。它们不是全部属于最高客流窗口,而是共同具有服务压力偏高的特征。中风险窗口数量较多,一旦午餐高峰进一步增强,部分中风险窗口可能向高风险转化。高风险窗口需要立即分流或增援,中风险窗口需要持续监测,低风险窗口可作为推荐系统的承接对象。

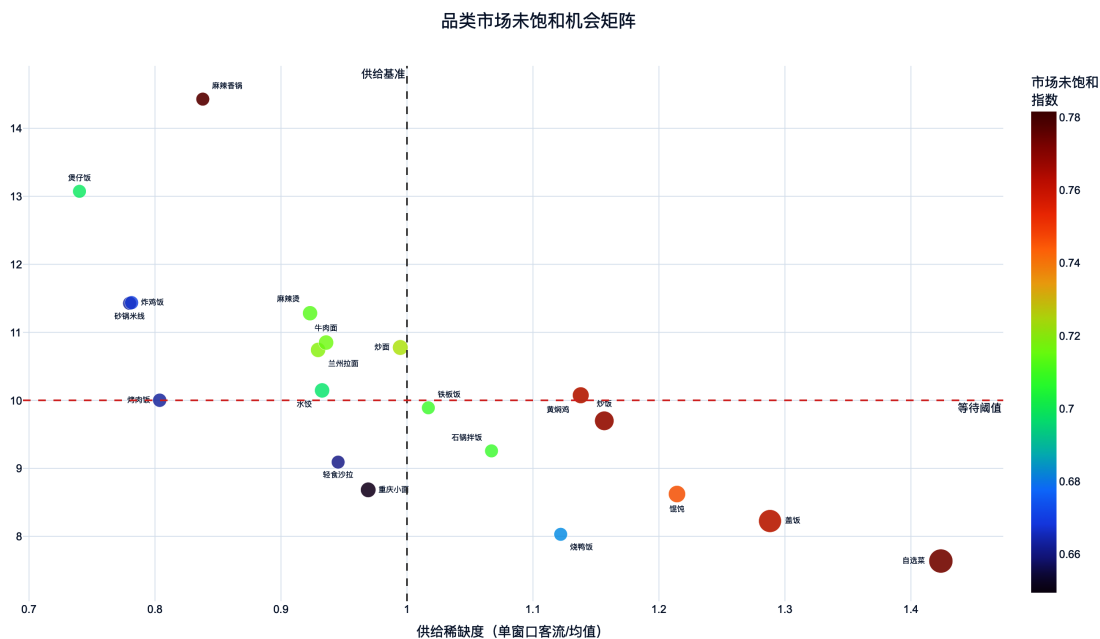


Figure 7. Market opportunity matrix based on the category unsaturation index

图 7. 品类市场未饱和和机会矩阵

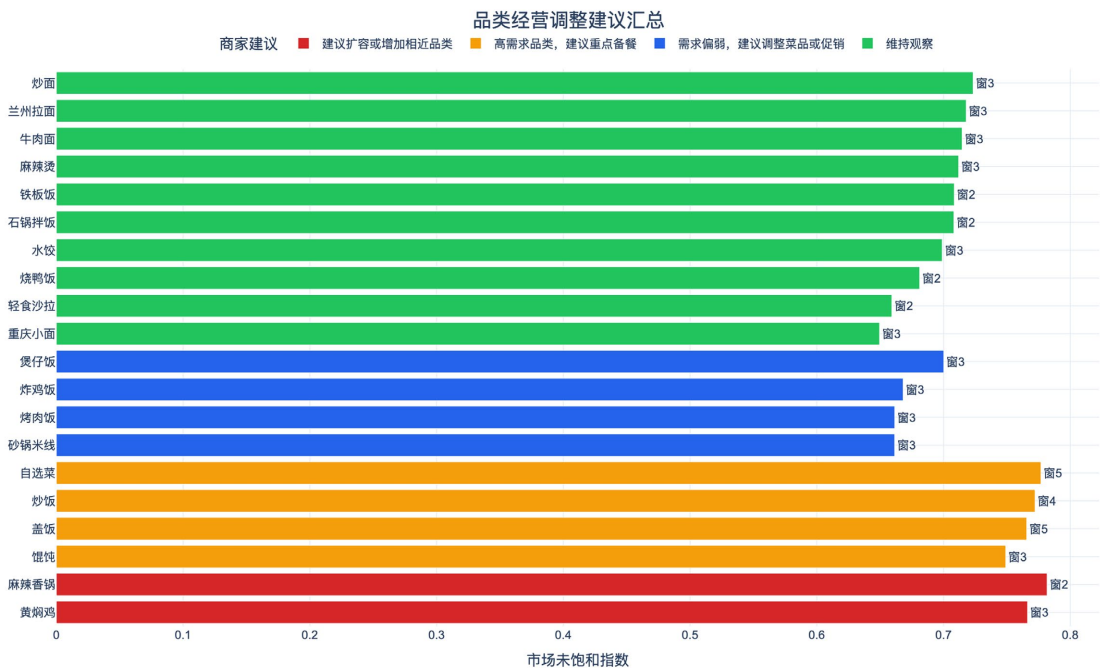


Figure 8. Summary of category-level operational adjustment recommendations

图 8. 品类经营调整建议汇总

图 7 和图 8 综合反映了不同品类的供需状态及相应经营策略。市场未饱和指数较高的品类包括麻辣香锅、自选菜、炒饭、黄焖鸡、盖饭和馄饨，但其优化方向存在差异。麻辣香锅仅设 2 个窗口，平均等待时间达到 14.43 分钟，属于供给偏紧、等待压力较高的品类，应优先扩容或优化出餐流程；黄焖鸡兼具较高的单窗口客流和等待压力，可考虑增加相近品类或提升服务能力；自选菜和盖饭客流较高，但平均等待时间分别为 7.64 分钟和 8.23 分钟，现有承接能力相对稳定，重点应放在备餐和补货。

系统根据市场未饱和指数、单窗口客流、等待时间和服务台利用率转化为经营建议。从现实经营看，如果对需求偏弱品类盲目扩张，可能降低整体效率；如果对高等待、高需求品类不调整，则会持续损害学生体验。食堂资源有限，品类调整必须有优先级。把预测结果转化为可执行方案，使系统不仅能描述拥堵，还能给出窗口扩容、重点备餐、促销调整和流程优化建议。

4.2. 模型内部对比

Table 4. Error comparison between the $M_i/G/c(t)$ and $M/G/c$ models

表 4. $M_i/G/c(t)$ 和 $M/G/c$ 误差对比

模型	平均绝对误差 MAE (人/分钟)	均方根误差 RMSE (人/分钟)	峰值误差 (人/分钟)	峰值时刻误差 (分钟)	决定系数 R^2
传统稳态 $M/G/c$	18.813636363636363	21.767950911114415	55	33	0.13255532485999166
时变 $M_i/G/c(t)$	4.975208772482658	6.47269154497344	13.768094548404818	8	0.9233033298333182

从表 4 中结果可以看出，传统稳态 $M/G/c$ 模型的 MAE 为 18.81，RMSE 为 21.77，峰值误差达 55 人/分钟，峰值时间误差为 33 分钟， R^2 仅为 0.133。稳态模型只利用了长期平均到达率，无法反映用餐时段的显著波动，预测峰值既偏高又滞后。时变 $M_i/G/c(t)$ 模型通过划分时段并对各时段进行独立参数估计，使得 MAE 降至 4.98，RMSE 降至 6.47，峰值误差减小到 13.77，峰值时间误差只有 8 分钟， R^2 提升到 0.923，表明时变模型能够较好地拟合基准模拟序列的变化。

综合各项指标，在设定的仿真场景中，时变模型对基准模拟到达序列的拟合效果优于稳态模型，尤其能够更好地捕捉用餐高峰的强度和出现时刻。该结果属于模型内部比较，不能直接解释为模型已经具备现实客流预测精度。

5. 实际部署条件与实施路径

5.1. 数据接口与参数校准

模型实际部署需要接入客流、交易和窗口运行三类数据。客流数据可由食堂入口计数设备或视频识别系统获取，用于估计不同时段的到达强度及峰值变化；交易数据可由校园支付系统或窗口点餐系统提供，用于统计品类需求、消费价格和窗口选择结果；窗口运行数据主要包括出餐时间、服务位数量、营业状态和临时增援记录，用于校准服务时间分布及动态服务能力。此外，课程安排、食堂空间布局和窗口品类等基础信息也可作为客流波动与择窗行为的辅助解释变量。相关数据在使用前应完成异常值处理和时间同步，以保证数据的准确性。

5.2. 实施步骤

实际应用可分为离线校准、小范围试运行和动态更新三个阶段。首先，利用历史客流、交易和窗口

服务数据估计时变到达率、服务时间分布及学生择窗参数，并通过历史时段回测检验模型适用性。其次，选择部分食堂或窗口开展小范围试运行，将模型输出与现场排队情况进行对照，调整风险阈值和推荐规则。在数据质量和模型表现达到要求后，再逐步接入实时客流和窗口状态，定期更新模型参数。采用分阶段实施方式能够降低一次性部署带来的系统风险，也便于根据实际运行情况调整模型结构。

5.3. 可能面临的挑战

模型落地仍面临数据缺失、设备误差、系统接口不统一和隐私保护等问题。学生偏好、菜品价格和窗口服务能力也会随时间变化，使固定参数逐渐失效。此外，推荐结果本身可能改变学生的窗口选择，进而影响原有客流分布，形成新的反馈关系。因此，实际系统需要建立数据质量检查、参数定期更新和异常状态处理机制。本文尚未完成上述现实部署与验证工作，相关内容主要用于说明模型从仿真分析走向实际应用所需的基本条件。

6. 结论

本文针对高校食堂高峰期排队问题，构建了结合 $M_t/G/c(t)$ 排队模型、随机效用理论和离散事件仿真的预测分析框架，对客流到达、窗口服务和学生择窗行为进行了联合建模，实现了对食堂运行过程的动态模拟与分析。本文的主要贡献在于将时变排队过程与学生择窗行为纳入统一框架，为分析不同客流和运营情景下的食堂拥堵状态提供了一种可解释的仿真方法。

仿真结果表明，高校食堂排队受到用餐时段、空间位置、窗口服务能力和学生择窗行为的共同影响。午餐构成全天最大负荷，一楼窗口承担了高于其窗口占比的客流，服务流程较复杂的品类更容易形成持续等待。部分窗口在客流增加或服务能力下降时存在拥堵加剧风险，因此仅依据当前队列长度难以全面判断窗口状态，还需结合等待时间和服务台利用率进行综合识别。模型内部对比结果显示，时变模型能够更好地捕捉用餐高峰的强度和出现时刻，对基准模拟到达序列的拟合效果优于稳态模型。

从应用角度看，该框架能够输出等待时间、服务台利用率、窗口风险和品类供需状态等指标，并据此形成学生择窗以及管理端备餐、分流、增援和品类调整等情景化建议。高需求且服务较快的品类应重点保证备餐和补货，慢服务品类应优先优化出餐流程与服务能力，需求较弱的品类则可结合价格、菜品和展示位置进行调整。相关结果可为高校食堂运营方案比较和资源配置分析提供参考。

需要说明的是，本文属于基于模拟数据的探索性研究，参数设置和研究结论主要反映设定仿真场景下的运行特征，尚不能直接代表现实食堂的实际运行状态。当前模型更适合作为整合学生择窗行为的动态仿真分析框架，而非可直接部署的实时决策工具。后续可结合真实客流、消费记录和窗口服务数据校准模型参数，并通过重复实验和小范围实际运行进一步检验模型的稳定性与外部有效性。

参考文献

- [1] 王叶韵, 孙菲菲. M/M/s 排队模型在食堂中的应用[J]. 科技资讯, 2012(1): 215.
- [2] 余静. 需求驱动的高校智慧食堂数字化转型系统设计与策略研究[J]. 计算机科学技术与应用, 2024, 1(4): 23-25.
- [3] Jennings, O.B., Mandelbaum, A., Massey, W.A. and Whitt, W. (1996) Server Staffing to Meet Time-Varying Demand. *Management Science*, **42**, 1383-1394. <https://doi.org/10.1287/mnsc.42.10.1383>
- [4] Train, K.E. (2009) *Discrete Choice Methods with Simulation*. 2nd Edition, Cambridge University Press.
- [5] Law, A.M. (2015) *Simulation Modeling and Analysis*. 5th Edition, McGraw-Hill Education.
- [6] Banks, J., Carson, J.S., Nelson, B.L. and Nicol, D.M. (2010) *Discrete-Event System Simulation*. 5th Edition, Pearson Education.
- [7] Pannell, D.J. (1997) Sensitivity Analysis of Normative Economic Models: Theoretical Framework and Practical Strategies. *Agricultural Economics*, **16**, 139-152. <https://doi.org/10.1111/j.1574-0862.1997.tb00449.x>