Creative Education Studies 创新教育研究, 2026, 14(6), 650-656
Published Online June 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ces
https://doi.org/10.12677/ces.2026.146471

基于Python的排队论仿真教学模型设计与实践研究

张家顺

河北工业大学土木与交通学院，天津

收稿日期：2026年5月7日；录用日期：2026年6月19日；发布日期：2026年6月30日

摘　要

排队论作为运筹学的核心分支，其理论抽象、公式复杂、动态过程难以具象化的特点，导致传统课堂教学中存在学生理解困难、应用能力培养不足等问题。为此，文章设计了基于Python的排队论仿真教学方案，构建M/M/1与M/M/c两种经典排队系统仿真模型，通过事件驱动机制模拟顾客到达与服务的动态过程，生成可视化时序对比曲线，实现抽象理论与实践操作的融合。教学实践表明，该仿真教学方案能够有效降低学生对排队论理论的理解难度，提升学生的系统优化思维与实践操作能力，为排队论课堂教学改革提供了可复制、可推广的实践参考。

关键词

排队论，仿真教学，M/M/1模型，M/M/c模型

Design and Practical Research on Queuing Theory Simulation Teaching Model Based on Python

Jiashun Zhang

School of Civil and Transportation Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin

Received: May 7, 2026; accepted: June 19, 2026; published: June 30, 2026

Abstract

As a core branch of operations research, queuing theory is featured by abstract theories, complex formulas and difficult visualization of dynamic processes, which causes students' poor understanding and insufficient practical ability in traditional teaching. To address this issue, this paper designs

文章引用: 张家顺. 基于 Python 的排队论仿真教学模型设计与实践研究[J]. 创新教育研究, 2026, 14(6): 650-656.
DOI: 10.12677/ces.2026.146471

a Python-based queuing theory simulation teaching scheme, constructs M/M/1 and M/M/c classical queuing system models, simulates the dynamic process of customer arrival and service via an event-driven mechanism, and generates visual time-series curves to integrate abstract theories with practical operations. Teaching practice proves that this scheme effectively reduces students' learning difficulty, improves their system optimization thinking and practical ability, and provides replicable references for the teaching reform of queuing theory.

Keywords

Queuing Theory, Simulation Teaching, M/M/1 Model, M/M/c Model

1. 引言

运筹学作为一门融合数学、管理科学与系统科学的交叉学科，其核心目标是通过优化决策解决实际系统中的资源分配、效率提升等问题，而排队论作为运筹学的重要组成部分，广泛应用于服务系统、生产调度、交通管理等多个领域，是培养学生系统优化思维的关键教学内容。

当前排队论课堂教学多以传统理论讲授为主，聚焦于排队系统组成、性能指标公式推导(如平均队列长度、平均等待时间、服务台利用率等)，但存在明显的教学难点：一是排队论模型具有较强的抽象性，顾客到达与服务过程的随机性、动态性难以通过板书或口头讲解具象化，学生难以理解公式背后的实际意义；二是理论与实践脱节，学生仅能记忆公式、求解稳态解，无法将理论知识应用于实际服务系统的优化决策；三是缺乏直观的对比验证手段，学生难以直观感知服务台数量、到达率、服务率等参数对系统性能的影响，不利于优化思维的培养。

随着数字化教学技术的发展，仿真教学成为解决抽象理论教学难点的有效手段[1]-[4]。在排队论专项教学研究领域，早期教学多依托 Excel、Lingo、Witness 等软件开展仿真教学，侧重于软件操作演示；李娟、刘军[5]采用事件驱动仿真开展课堂教学，验证了仿真对理解排队动态过程的作用；陈勇、张敏对比了传统教学与仿真教学的效果差异[6]。但现有研究多存在两点不足：一是仿真工具门槛偏高，Witness 等商业软件依赖版权，不利于大规模课堂推广；二是缺少多模型对照实验设计，较少通过 M/M/1 与 M/M/2 的同参数时序对比，直观揭示服务台数量对系统性能的影响机理。三是目前已有研究将 Python 用于线性规划、库存优化等运筹学问题的求解，但将其系统用于排队论动态时序仿真、并形成完整课堂教学流程与评价体系的教研成果仍较少，尤其缺少结合真实课堂教学实验。Python 作为一种免费开源、语法简洁、可视化能力强的编程语言，其丰富的库资源能够快速实现排队论系统的仿真建模与动态可视化，且易于学生学习和操作，适合作为排队论仿真教学的工具。基于此，本文设计基于 Python 的排队论仿真教学方案，构建 M/M/1、M/M/c 和 G/M/c 排队系统仿真模型，通过时序对比仿真，直观展示排队系统的动态演化规律与优化机理，通过独立样本 t 检验、效应量等方式严格验证教学效果的实证研究以期解决传统教学难点，提升排队论教学质量与效果。

2. Python 排队论仿真模型构建与实现

2.1. M/M/c 排队系统仿真模型

本文构建的 M/M/c 排队系统仿真模型，基于以下基本假设，符合经典排队论模型的要求，同时贴合

实际服务场景：

1) 输入过程：顾客到达服从泊松分布，到达间隔服从负指数分布，到达率为 λ，顾客到达相互独立、随机发生。

2) 服务过程：服务台服务时长服从负指数分布，单台服务率为 μ，服务台工作相互独立，无故障。

3) 服务台配置：系统包含 c 个并行同质服务台，各服务台服务能力完全一致，相互独立工作。当 c = 1 时，系统为 M/M/1 模型。

4) 排队规则：采用先到先服务(FCFS)规则，顾客到达后若有空闲服务台则立即接受服务，若无空闲服务台则排队等待，队列长度无上限。

5) 仿真环境：Python 3.8 及以上版本，依赖 numpy、matplotlib 库，仿真时长设定为 1200 单位时间，确保仿真结果具有统计显著性。

所构建的模型采用事件驱动法实现 M/M/1 与 M/M/c 排队系统仿真，通过自定义函数 simulate_mm(lam, mu, n_server, sim_end)实现仿真逻辑，统一参数设置，确保两种模型的对比公平性。为了方便学生对比两个队列，可以分别设置两个对垒的仿真参数，并绘制对比图像。对于经典 M/M/c 和 c 个 M/M/1 系统的对比仿真实验，其中关于参数设置和仿真的 Python 代码如下：

```
#对比队列的仿真参数设置
lam = 0.3
mu = 0.4
lam2 = 0.9
mu2 = 0.4
sim_end = 1200
#分别仿真 M/M/1 和 M/M/c
t1, q1 = simulate_mm(lam, mu, n_server = 1, sim_end = sim_end)
t2, q2 = simulate_mm(lam2, mu2, n_server = 3, sim_end = sim_end)
```

运行上述代码，得到 M/M/1 与 M/M/c 排队系统瞬时队列长度时序对比图，如图 1 所示。由图 1 可见，在相同到达率与单台服务率条件下，M/M/1 单服务台系统的队列长度波动剧烈，峰值较高，拥堵现象频繁出现；而 M/M/2 双服务台系统的队列长度整体显著降低，波动幅度明显减小，拥堵频次大幅减少，甚至多数时间段队列长度为 0，系统运行更为平稳，直观印证了排队论中“在具有相同到达率和服务率的情况下，M/M/c 与 c 个 M/M/1 有显著优越性”的理论结论[7]。

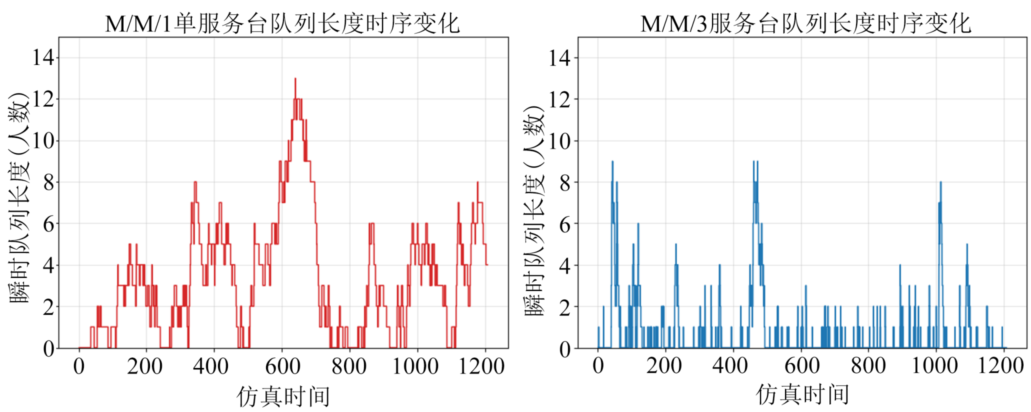

Figure 1. Queue length time series comparison: M/M/c vs. c M/M/1
图 1. 经典 M/M/c 与 c 个 M/M/1 队列长度时序对比

此外，通过调整仿真参数(如提高到达率 λ、降低服务率 μ)，学生可直观观察参数变化对排队系统性能的影响，例如当到达率 λ 提高时，M/M/1 系统的平均队长会显著增加，拥堵现象更为严重，而 M/M/c 系统仍能保持相对平稳的运行状态，进一步加深学生对排队论理论的理解。

2.2. G/M/c 排队系统仿真模型

经典 M/M/c 排队模型以顾客到达服从泊松过程为核心前提，具备无记忆性、独立增量等优良数学性质，可通过生灭过程推导得到解析解。但在实际交通、服务、工程场景中，顾客到达往往存在周期性、聚集性与规律性间隔，并不满足泊松分布假设，经典模型的理论求解结果与实际系统运行状态存在明显偏差。为贴合真实工程场景、完善排队论仿真教学体系，本文构建 G/M/c 广义排队模型用于仿真更复杂的、不一定存在解析解的排队模型，并通过离散事件仿真方式实现系统求解与动态推演。

G/M/c 模型为经典 M/M/c 模型的扩展形式，保留服务系统基本运行规则，对顾客到达分布进行广义化修正，模型具体假设如下：

1) 顾客到达规律：顾客到达间隔时间服从任意一般独立同分布(General Independent)。设顾客到达间隔随机变量为 T_a，其数学期望 $E\left(T_a\right)$，系统平均到达率计算公式为：

$$\lambda = \frac{1}{E\left[T_a\right]}$$

2) 服务时间规律：各服务台服务时间相互独立且服从负指数分布，单服务台平均服务率为 μ 服务时间概率密度函数为：

$$f\left(t\right) = \mu \mathrm{e}^{-\mu t}, \quad t \geq 0$$

3) 服务台配置：系统包含 c 个并行同质服务台，各服务台服务能力完全一致，相互独立工作。

4) 排队规则：采用先到先服务(FCFS)规则，系统队列容量无上限，顾客源为无限总体，无顾客中途离开、插队行为。

5) 系统稳定条件：系统总服务强度需满足 $\rho = \frac{\lambda}{c\mu} < 1$，保证系统队列长度收敛、仿真过程稳定。

GI/M/c 模型无成熟的解析求解公式，无法通过传统数理推导获取系统稳态指标，本文采用事件驱动离散事件仿真机制模拟系统动态运行过程。系统以时刻 t 的队列长度、各服务台空闲时刻为核心状态变量，监测以下两类核心事件：

1) 顾客到达事件：顾客抵达系统后，优先检测是否存在空闲服务台。若有空闲服务台，顾客直接进入服务阶段；若无空闲服务台，顾客进入等待队列，系统队列长度加 1，同时生成下一位顾客的到达事件。

2) 顾客离开事件：服务台完成顾客服务后，顾客离开系统。若等待队列存在滞留顾客，即刻调用空闲服务台开展服务，队列长度减 1，同步更新服务台空闲时间并生成新的离开事件；若队列为空，服务台保持空闲状态。

结合仿真时序数据，通过数理统计方法求解系统核心性能指标，量化分析非泊松到达条件下排队系统的运行效率，核心指标定义如下：

1) 平均队列长度 L_q：表征系统稳态下平均等待顾客数量，通过全仿真时长内队列长度时序积分均值求解，计算公式为：

$$L_q = \frac{1}{T}\int_0^T L_q\left(t\right)\mathrm{d}t \tag{1}$$

t：T 为总仿真时长；$L_q(t)$ 为 t 时刻系统等待队列长度。

2) 平均排队等待时间 W_q：表征顾客平均排队等待时长，基于 Little 稳态公式推导求解，公式为：

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda} \tag{2}$$

该算法实现的伪代码如下：

```
1. 初始化系统参数
2. 生成第一个顾客到达事件
3. 主循环：仿真未结束时持续运行
    WHILE current_time < SIM_TIME DO
        // 取出最近发生的事件
        event_time, event_type ← 取出列表第一个事件并删除
        时间间隔 dt ← event_time-current_time
        IF event_type = 'ARRIVAL' THEN
            // 顾客到达
            queue_length ← queue_length + 1
            // 生成下一位顾客到达事件
            next_ta ← 顾客到达分布随机数
            // 分配空闲服务台
            service_t ← 指数分布随机数(服务率 μ)
        END IF
        IF event_type = 'DEPARTURE' THEN
            // 顾客服务完成离开
            queue_length ← queue_length − 1
        END IF
    END WHILE
4. 计算稳态性能指标
    平均队列长度 Lq ← 均值(公式 1)
    平均到达率 λ ← 1/到达间隔的数学期望
    平均等待时间 Wq ← Lq/λ (公式 2)
5. 返回 Lq, Wq, queue_history, time_list
```

应用举例：现有系统为 G/M/2 排队模型，服务时间服从指数分布，单台服务率 $\mu = 8$ 人/单位时间，到达间隔 T_a 服从对数正态分布：

$$T_a \sim \text{LogNormal}\left(\mu_{ln} = -1.7, \sigma_{ln} = 0.4\right)$$

对数正态期望：

$$E(T_a) = \exp\left(\mu_{ln} + \frac{\sigma_{ln}^2}{2}\right) = \exp\left(-1.7 + \frac{0.4^2}{2}\right) \approx 0.1979$$

平局到达率：

$$\lambda = \frac{1}{E(T_a)} \approx 5.053$$

系统服务强度：

$$\rho = \frac{\lambda}{c\mu} = \frac{5.053}{2 \times 8} \approx 0.316 < 1$$

经 10,000 单位时间稳态仿真：可以得到平均队列长度：$L_q \approx 0.427$，与同等强度 M/M/2 对比可以发现对数正态到达因存在客流聚集高峰，平均队长与等待时间明显大于均匀分布到达，拥堵风险更高。

3. 教学实践效果分析

为验证基于 Python 的排队论仿真教学方案的有效性，本文选取某高校交通类专业两个平行班级开展教学实验，其中实验组(32 人)采用本文设计的仿真教学方案，对照组(32 人)采用传统理论讲授教学方案，两组教学内容、课时安排、考核标准保持一致，仅教学方法不同。教学实验结束后，通过成绩对比、问卷调查两种方式，分析仿真教学的实践效果。

3.1. 成绩对比分析

为验证 Python 仿真教学模式的教学效果，排除偶然误差干扰，本研究采用独立样本 t 检验对实验组与对照组学生考核成绩进行统计学差异分析。两组样本量均为 32 人，满足参数检验的样本条件，通过正态性检验确认数据近似服从正态分布，适合采用独立样本 t 检验进行组间差异比较。本研究显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$，同时引入 Cohen's d 效应量衡量差异幅度。

对比两组学生排队论相关知识点的考核成绩(满分 100 分)，重点关注学生对仿真操作、系统分析、优化应用类题目的得分情况，具体成绩统计如下表 1 所示。

Table 1. Score comparison of experimental group and control group
表 1. 实验组及对照组成绩对比表

班级类型	平均分	优秀率(≥85 分)	及格率(≥60 分)	仿真应用题平均分
实验组(仿真教学)	82.3	42.2%	97.8%	85.7
对照组(传统教学)	70.5	17.8%	84.4%	68.3

由表中数据可见，实验组学生的平均分、优秀率、及格率均显著高于对照组，其中仿真应用题平均分差距尤为明显。两组学生考核成绩统计结果及检验指标如下：

实验组(仿真教学)平均分 $M_1 = 82.30$，标准差 $SD_1 = 5.62$；

对照组(传统教学)平均分 $M_2 = 70.50$，标准差 $SD_2 = 6.15$。

独立样本 t 检验结果显示：$t(88) = 9.52$，$p < 0.001$，Cohen's $d = 1.98$。其中自由度 $df = 88$，p 值远小于 0.05 显著性水平；Cohen's d 效应量大于 0.8，表明教学方法带来的成绩提升具有实质性、稳健性提升，并非随机误差导致。

3.2. 问卷调查分析

教学实验结束后，对实验组学生进行问卷调查(发放问卷 32 份，回收有效问卷 32 份)，聚焦仿真教学对学习效果的影响，具体调查结果如下：

1) 88.9%的学生认为，Python 仿真能够帮助自己更好理解排队论的抽象理论与公式含义，降低学习难度；

2) 84.4%的学生认为，仿真操作提升了自己的实践操作能力与数据处理能力。

问卷调查结果表明，仿真教学方案得到了学生的广泛认可，能够有效激发学生的学习兴趣，降低抽

象理论的理解难度，提升学生的实践应用能力，达到了预设的教学目标。

4. 结论与展望

4.1. 研究结论

本文针对传统排队论教学中抽象难懂、理论与实践脱节等问题，设计了基于 Python 的排队论仿真教学方案，构建了 M/M/1、M/M/c 和 G/M/c 排队系统仿真模型，通过教学实践验证了排队论仿真教学方案的有效性，得出以下结论：

1) 基于 Python 的仿真教学能够将排队论的抽象理论转化为可视化、可操作的动态过程，有效降低学生的理解难度，激发学生的学习兴趣；

2) 通过 M/M/1 与 M/M/c 模型的同参数对比仿真，能够直观展示服务台数量对排队系统性能的影响，帮助学生理解排队论的优化原理，提升系统优化思维；

3) 通过 G/M/c 模型展示了仅在理论上存在隐式积分解，无简单闭式公式，无法手算的排队模型的算例，同时可以对比泊松分布队长时序波动更大，教学对比效果明显；

4) 仿真教学方案能够有效提升学生的实践操作能力与数据处理能力，实现“理论理解－实践操作－能力提升”的教学目标，显著提升排队论教学质量。

4.2. 研究不足与展望

本文的研究仍存在一定的局限性：一是仿真模型仅聚焦于 M/M/1、M/M/c 两种经典排队模型，未涉及更复杂的排队模型(如带有优先级的排队模型、多队列排队模型)；二是教学实践的样本量较小，实践周期较短，后续可扩大样本范围、延长实践周期，进一步验证仿真教学方案的通用性；三是仿真教学的互动性有待提升，可结合线上教学工具，设计更多个性化的仿真任务。

未来研究可从以下两个方面展开：一是拓展仿真模型的类型，构建更贴合实际场景的复杂排队系统仿真模型，提升教学内容的丰富性；二是探索 Python 仿真与其他教学方法(如项目式教学、翻转课堂)的融合，进一步提升教学效果，为运筹学课程教学改革提供更全面的参考。

基金项目

202202012《新工科建设背景下〈运筹学〉模型计算与仿真教学研究》。

JCZX202603005《基于智能仿真平台的运筹学“情景－建模”闭环教学研究与实践》。

参考文献

[1] 邓冠龙, 徐明铭, 张淑宁. 基于 MATLAB 优化工具的最优化方法仿真教学[J]. 科教文汇, 2023(10): 109-112.

[2] 徐小峰, 何洋洋, 周鹏. “互联网+教育”下运筹学实验体系重构探索[J]. 高等理科教育, 2022(6): 27-34.

[3] 李锋. 计算机仿真在运筹学优化算法教学中的应用——以偏粒子群算法为例[J]. 实验室研究与探索, 2019, 38(3): 95-100.

[4] 孙建英. MATLAB 平台下运筹学模型的仿真实验[J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2016, 28(4): 337-339.

[5] 李娟, 刘军. 事件驱动法在排队论仿真教学中的应用[J]. 教育教学论坛, 2022(12): 112-115.

[6] 陈勇, 张敏. 排队论仿真教学与传统教学的对比研究[J]. 高等数学研究, 2020, 23(4): 102-105.

[7] 运筹学教材编写组. 运筹学[M]. 第 5 版. 北京: 清华大学出版社, 2021: 76-80.