

1.概述

方法：simpy

- **基准场景:** 每天06:00-24:00运营（18小时）
- **场景1:**
- **场景2:**
- **场景3:**

运行30天，每个场景重复5次，收集KPI

2.Entitys

2.1 卡车

基本属性：

- 类别：FG和R&P两类
- 方向：inbound, outbound
- 装载量：携带的托盘数量（根据业务类型不同而变化）

时间属性：

- 预定到达时间：计划到达DC的时间
- 实际到达时间：真实到达的时间
- 服务开始时间：开始装卸货的时间
- 服务结束时间：完成装卸货的时间
- 发运时限：必须在此时间前完成装车并发出（仅FG出库卡车） **SLA??**

生命周期：

生成 → 到达DC → 等待dock空闲 → 占用dock → 装/卸货 → 释放dock → 离开

2.2 订单

每个订单记录：

- 订单编号和货物数量
- 下单时间和要求发货时间
- 实际完成时间
- 是否按时完成 **SLA??**

3.Resource

3.1 dock设施

类型：

1. **FG Loading**：用于FG装车
 - 容量：营业时段稳定保持1个dock
 - 特点：需求相对稳定，48周实际数据显示几乎不需要增减
2. **FG Reception**：用于FG卸货入库
 - 容量：0-2个dock（时变配置）
 - 特点：随时段调整，晚间减少
3. **R&P Loading**：用于R&P装车
 - 容量：3-6个dock（时变配置）
 - 特点：**需求最大**，高峰时段需要6个dock
 - 虽然R&P业务量仅占30%，但需要86%的出库dock资源
4. **R&P Reception**：用于R&P卸货
 - 容量：营业时段稳定保持1个dock
 - 特点：48周实际数据显示需求非常稳定

时变容量：

- dock数量根据每小时的实际需求动态调整
- 基于48周历史排班数据，取中位数

资源分配策略：

- 先到先服务（FCFS）：卡车按到达顺序排队
- 无法跨类别使用：FGdock不能给原料使用，反之亦然

- 无可用dock时，卡车进入等待队列

3.2 Buffer

缓冲区用于暂存工厂生产但DC尚未处理的货物。

配置：

- **FG缓冲区：** 20辆挂车 × 每车33托盘 = 660托盘容量
- **R&P缓冲区：** 15辆挂车 × 每车33托盘 = 495托盘容量

运作机制：

- **DC关闭时：** 工厂24/7连续生产，产出进入缓冲区暂存
- **DC开放时：** 优先释放缓冲区货物进行入库处理
- **溢出处理：** 缓冲区满时，新产出的货物将溢出丢失（记录为异常事件）

释放策略：

- 先进先出（FIFO）：最早进入的货物优先释放
- 每30分钟检查一次
- FG每次最多释放150托盘，原料/包装每次最多释放100托盘

验证发现：

- FG缓冲区充足，99%时段仅使用26.5%容量
- R&P缓冲区基本充足，但历史上出现过1次极端峰值（622托盘）超出容量

3.3 人力资源

人员配置：

- 总人力：125 FTE
- FG团队：97 FTE（77.6%）
- R&P团队：28 FTE（22.4%）

工作效率：

- **R&P团队效率：** 平均5.81托盘/小时/人，标准差0.416
 - 基于实际KPI数据
 - 每次作业效率有随机波动
- **FG团队效率：** 平均3.5托盘/小时/人，标准差0.5
 - 基于估算值

- 同样考虑随机波动

效率模拟：

- 使用正态分布生成每次作业的实际效率
- 设置下限为平均值的50%（避免异常低效率）
- 装卸时间 = 托盘数量 ÷ 效率

待确认：

- 活动分配比例：假设60%时间用于装卸货，25%用于入库，15%用于其他

4.Processes

4.1 货物生成流程（2个：FG+R&P）

24小时不间断生产，每小时产出固定数量的托盘。FG和原料/包装分别有独立的生产线。

生产速率：

- FG生产：每小时平均46托盘（基于月产33,000托盘计算）
- R&P生产：每小时平均23托盘（基于月产16,500托盘计算）
- 实际产出有随机波动（泊松分布）

流程逻辑：

每小时循环：

1. 生成本小时的产出托盘数
2. 检查DC状态：
 - 如果DC关闭（晚上/早晨）→ 货物进入缓冲区
缓冲区有空间 → 成功存储
缓冲区已满 → 溢出丢失（记录异常）
 - 如果DC开放 → 直接启动入库处理
3. 等待1小时，重复循环

作用：

- 模拟工厂与DC的时间错配（工厂24/7，DC有运营时间限制）

4.2 buffer释放流程

DC开门营业后，优先处理缓冲区中积压的货物，确保库存及时入库。

触发条件：

- DC处于运营时间内
- 缓冲区有待处理货物

流程逻辑：

每30分钟检查：

1. 检查R&P缓冲区：

- 如果有货物 → 释放最多100托盘
- 启动入库处理流程

2. 检查FG缓冲区：

- 如果有货物 → 释放最多150托盘
- 启动入库处理流程

3. 等待30分钟，重复检查

4.3 卡车到达

到达模式（混合模型）：

- **75%预约到达：**提前预定时段，到达时间较确定
- **25%临时到达：**未预约，到达时间随机

到达率（每小时平均卡车数）：

- FG卡车：
 - 高峰时段（10-13点）：3.15-3.21辆/小时
 - 平峰时段（7-9点）：2.47-2.8辆/小时
 - 低峰时段（晚间20-22点）：0.15-0.7辆/小时
- R&P卡车：
 - 高峰时段（19点）：1.42辆/小时
 - 平峰时段（全天）：0.77-1.14辆/小时
 - 低峰时段（早晨6点、晚间22-23点）：0.36-0.77辆/小时

卡车装载量（每车托盘数）：

- FG卡车：
 - 典型值：33托盘（最常见）

- 平均值：30托盘
- 变化范围：1-276托盘
- 分布特征：集中在33托盘附近
- R&P卡车：
 - 典型值：22托盘（最常见）
 - 平均值：22.7托盘
 - 变化范围：1-560托盘
 - 分布特征：高度集中在22托盘

流程逻辑：

每小时循环：

1. 检查DC是否营业
2. 如果营业，分别处理FG和R&P：
 - a) 根据当前小时查询到达率
 - b) 计算到达数量：
 - 预约到达数 = $75\% \times \text{到达率}$
 - 临时到达数 = 泊松随机($25\% \times \text{到达率}$)
 - 总到达数 = 预约 + 临时
 - c) 生成每辆卡车：
 - 随机生成装载量（三角分布）
 - 创建卡车实体
 - 添加到达延迟（避免同时到达造成拥堵）
 - 启动该卡车的出库处理流程
3. 等待1小时，重复

4.4 入库处理流程

流程逻辑：

对每批入库货物：

1. 确定需要的dock类型（FG入库或R&P入库）
2. 检查dock可用性：
 - 查询当前小时的dock配置
 - 如果无可用dock → 等待1小时后重试
 - 如果有可用dock → 继续
3. 请求dock资源：
 - 加入dock等待队列（如果dock繁忙）
 - 按先到先服务顺序等待
 - 获得dock后开始服务
4. 卸货操作：
 - 记录开始时间
 - 获取当前员工效率（随机生成）
 - 计算处理时间 = 托盘数 ÷ 效率
 - 执行卸货（仿真时间推进）
 - 记录结束时间
5. 释放dock，供下一批货物使用
6. 记录操作数据到KPI系统

时间计算示例：

- 100托盘的FG入库
- 员工效率：3.5托盘/小时/人
- 处理时间 = $100 \div 3.5 \approx 28.6$ 小时（理论值）
- 实际时间取决于分配的员工数量

4.5 出库处理流程

流程逻辑：

对每辆到达的卡车：

1. 确定需要的dock类型（FG出库或R&P出库）

2. 检查dock可用性：

- 查询当前小时的dock配置
- 如果无可用dock → 等待1小时后重试
- 如果有可用dock → 继续

3. 请求dock资源：

- 加入dock等待队列
- 按到达顺序排队等待
- 获得dock后开始服务

4. 记录服务开始时间：

- 计算等待时间 = 服务开始 - 实际到达
- 记录到KPI（用于评估服务质量）

5. 装货操作：

- 获取当前员工效率（随机生成）
- 计算装货时间 = 托盘数 ÷ 效率
- 执行装货（仿真时间推进）
- 记录结束时间

6. 服务水平检查（仅FG）：

- 检查完成时间是否超过发运时限
- 超时 → 记录SLA违约
- 按时 → 正常完成

7. 释放dock，记录完成数据

8. 卡车离开

关键性能指标：

- 等待时间：衡量dock资源充足性
- SLA遵守率：衡量服务质量
- 完成数量：衡量吞吐能力

时间计算示例：

- FG卡车装载30托盘
- 到达时间：上午10:00

- 等待时间：15分钟（前面有1辆车在装货）
- 开始装货：10:15
- 装货效率：3.5托盘/小时/人
- 装货时长： $30 \div 3.5 \approx 8.6$ 小时（多人并行会更快）
- 完成时间：约下午6:45
- 发运时限：下午6:00（到达后8小时）
- 结果：超时45分钟，记录SLA违约

4.6 buffer监控流程

监控内容：

- FG缓冲区当前托盘数和占用率
- R&P缓冲区当前托盘数和占用率

流程逻辑：

每小时循环：

1. 获取当前时间
2. 计算R&P缓冲区占用率 = 当前托盘数 \div 495
3. 计算FG缓冲区占用率 = 当前托盘数 \div 660
4. 记录到KPI数据库
5. 等待1小时，重复

预警：

- 占用率 > 80%：高占用预警
- 占用率 > 95%：临近溢出预警
- 溢出发生：记录异常事件

4.7 dock容量更新流程

根据预设的排班计划，每小时更新各类dock的可用数量。每个整点（如8:00, 9:00）自动更新

数据来源：基于48周历史排班数据的中位数配置

流程逻辑：

每小时循环：

1. 获取当前小时（0-23）
2. 查询该小时的dock配置：
 - FG出库dock数
 - FG入库dock数
 - R&P出库dock数
 - R&P入库dock数
3. 更新系统配置变量
4. 等待到下一个整点，重复

5.Events

5.1 到达类

卡车到达事件：

- 触发时机：外部卡车抵达DC
- 频率：每小时数辆，基于到达率
- 后续动作：启动出库处理流程
- 业务影响：增加dock需求，可能产生等待队列

货物到达事件：

- 触发时机：工厂生产完成，货物送达
- 频率：每小时固定发生
- 后续动作：进入缓冲区或直接入库
- 业务影响：增加库存或缓冲区占用

5.2 资源类

dock请求事件：

- 触发时机：卡车或货物需要dock服务
- 频率：每个服务请求触发
- 后续动作：

- dock空闲 → 立即占用
- dock繁忙 → 加入等待队列

dock占用事件：

- 触发时机：获得dock使用权
- 持续时间：装卸货完成前
- 业务影响：dock对其他请求不可用

dock释放事件：

- 触发时机：装卸货完成
- 后续动作：
 - 队列为空 → dock空闲
 - 队列有等待 → 下一个请求占用

5.3 服务类

装货服务事件：

- 触发时机：卡车占用出库dock
- 持续时间：托盘数 ÷ 员工效率
- 服务完成：卡车离开，dock释放
- 记录数据：等待时间、服务时间、SLA状态

卸货服务事件：

- 触发时机：货物占用入库dock
- 持续时间：托盘数 ÷ 员工效率
- 服务完成：货物入库，dock释放
- 记录数据：处理时间、来源（缓冲区/直接）

缓冲区释放事件：

- 触发时机：DC开门后每30分钟
- 释放量：FG最多150托盘，R&P最多100托盘
- 后续动作：启动入库处理流程

5.4 容量类

缓冲区溢出事件：

- 触发时机：货物无法进入已满的缓冲区
- 频率：不定（容量接近满载时可能发生）
- 后续处理：货物丢失，记录异常
- 业务影响：生产损失，需要分析原因

dock容量更新事件：

- 触发时机：每个整点
- 更新内容：4类dock的可用数量
- 业务影响：
 - 增加容量 → 等待队列可能快速消化
 - 减少容量 → 可能产生新的等待

5.5 监控记录

占用率记录事件：

- 触发时机：每小时
- 记录内容：两个缓冲区的占用百分比
- 用途：识别容量瓶颈，评估设施充足性

等待时间记录事件：

- 触发时机：卡车开始服务时
- 记录内容：从到达开始服务的时长
- 用途：评估服务效率，识别拥堵时段

SLA检查事件：

- 触发时机：FG卡车装货完成时
- 检查内容：是否在时限内完成
- 记录结果：按时完成或违约
- 用途：评估客户服务水平

完成记录事件：

- 触发时机：每次装卸货完成
- 记录内容：货物数量、耗时、类别等
- 用途：统计吞吐量，分析效率

6.概率分布

6.1 混合分布（卡车到达）

用途：模拟卡车到达数量

分布形式：

- 75%确定性成分：预约到达，数量相对稳定
 - 计算方式：到达率 $\times 0.75$ ，四舍五入取整
 - 例如：到达率3.2辆/小时 \rightarrow 预约2辆 ($\text{int}(3.2 \times 0.75 + 0.5) = 2$)
- 25%随机性成分：临时到达，数量随机波动
 - 计算方式：泊松分布，参数 = 到达率 $\times 0.25$
 - 例如：到达率3.2辆/小时 \rightarrow 临时平均0.8辆，实际可能0、1或2辆

选择依据：

- 实际数据验证发现到达比纯随机更规律
- 方差仅为均值的30-48%（泊松分布应为100%）
- 说明存在预约系统，大部分卡车提前安排时段

含义：

- 到达有一定可预测性（有利于排班）
- 仍有部分随机性（需要应对临时需求）
- 比完全随机模型更接近实际情况

6.2 三角分布（托盘装载量）

用途：模拟每辆卡车或每批货物的托盘数量

分布参数：

- **FG:**
 - 最小值：1托盘
 - 众数（峰值）：33托盘
 - 最大值：276托盘
 - 典型值：大部分在20-40托盘之间
- **R&P:**
 - 最小值：1托盘
 - 众数（峰值）：22托盘

- 最大值：560托盘
- 典型值：大部分在15-30托盘之间

分布特征：

- 单峰分布，围绕众数集中
- 有明确的上下界（不会出现负值或异常大值）
- 允许偶尔的极端值（如276或560托盘的大批次）

选择依据：

- 基于33,280批次实际数据统计
- 三角分布简单且符合数据特征
- 容易参数化（只需最小、众数、最大三个值）

含义：

- FG批次通常比R&P大（30 vs 22.7托盘）
- 存在标准批次（33和22托盘最常见）
- 偶尔有大量订单需要特殊处理

6.3 正态分布（员工效率）

用途：模拟员工的实际工作效率（托盘/小时/人）

分布参数：

- **R&P团队：**
 - 平均效率：5.81托盘/小时/人
 - 标准差：0.416托盘/小时/人
 - 变异系数：7.2%（相对稳定）
- **FG团队：**
 - 平均效率：3.5托盘/小时/人
 - 标准差：0.5托盘/小时/人
 - 变异系数：14.3%（波动稍大）

分布特征：

- 对称分布，大部分值接近平均值
- 考虑下限截断（最低为平均值的50%）
- 避免出现负值或异常低效率

选择依据：

- 人员效率通常呈正态分布
- R&P数据来自实际KPI统计
- FG数据基于行业经验估算

业务含义：

- 每次作业效率略有不同（员工状态、货物特性等）
- R&P效率更高但操作复杂度大（需要更多dock）
- FG效率较低但流程标准化（dock需求少）

6.4 泊松分布（工厂产出）

用途：模拟工厂每小时的实际产出数量

分布参数：

- FG：平均46托盘/小时
- R&P：平均23托盘/小时

分布特征：

- 离散分布，产出为整数（不会有0.5托盘）
- 围绕平均值随机波动
- 方差等于均值（泊松特性）

选择依据：

- 生产过程的标准建模方法
- 反映生产中的随机波动（设备状态、原料供应等）

含义：

- 虽然计划产量固定，但实际执行有波动
- 某些小时可能多产或少产
- 长期平均符合计划目标

6.5 指数分布（到达间隔）

用途：模拟同一小时内卡车到达的时刻分散

分布参数：

- 平均间隔：0.25小时（15分钟）

分布特征：

- 无记忆性：前一车辆到达不影响后一辆
- 大部分间隔较短，偶尔有较长间隔
- 确保卡车不会在同一时刻同时到达

选择依据：

- 到达过程的经典方法
- 避免仿真中的同时到达造成的不真实拥堵

含义：

- 虽然一小时有多辆车，但到达时刻分散
- 更真实地反映实际到达模式
- 平滑dock需求，避免瞬时峰值

7.KPI

7.1 服务效率指标

卡车平均等待时间：

- 定义：从到达到开始服务的平均时长
- 单位：小时
- 目标：越短越好
- 业务含义：反映dock资源充足性和服务效率

dock利用率：

- 定义：dock被占用的时间百分比
- 单位：百分比（0-100%）
- 目标：60-80%（太低浪费，太高拥堵）
- 业务含义：资源配置是否合理

7.2 服务质量指标

SLA遵守率：

- 定义：按时完成发货的订单百分比

- 单位：百分比（0-100%）
- 目标： $\geq 95\%$
- 业务含义：客户满意度和服务可靠性

SLA违约次数：

- 定义：超时完成的订单数量
- 单位：次数
- 目标：0次
- 业务含义：需要改进的异常事件

平均延迟时长（仅违约订单）：

- 定义：超出时限的平均时间
- 单位：小时
- 业务含义：违约严重程度

7.3 容量管理指标

缓冲区平均占用率：

- 定义：缓冲区使用量的平均百分比
- 单位：百分比
- 目标： $< 80\%$ （预留安全余量）
- 业务含义：缓冲区容量是否充足

缓冲区溢出次数：

- 定义：货物因缓冲区满而丢失的事件数
- 单位：次数
- 目标：0次
- 业务含义：严重异常，需要立即处理

溢出托盘总数：

- 定义：因溢出丢失的托盘数量
- 单位：托盘
- 业务含义：生产损失的量化

7.4 吞吐量指标

完成订单数量：

- 定义：成功处理的出库卡车数
- 单位：辆
- 业务含义：系统吞吐能力

处理托盘总数：

- 定义：入库+出库的托盘总量
- 单位：托盘
- 业务含义：业务总量

每日平均吞吐量：

- 定义：平均每天处理的托盘数
- 单位：托盘/天
- 业务含义：日常运营能力