天津科技大学

系统建模与仿真

课程设计报告

题 目：混流生产线设计与仿真

完 成 人：李嘉彤21083104

杨宸铭21083114

刘小杨21083115

迪力木拉提·艾买提21083116

指导教师：宗宪亮

完成时间： 2023年1月2日

目 录

[1. 引言](#_Toc18676)

[1.1 课程设计总览 1](#_Toc26871)

[2. 课程设计任务与系统背景](#_Toc25862)

[2.1 系统背景与现状 2](#_Toc20125)

[2.2 详细任务要求与目标 3](#_Toc17094)

[2.3任务分配 4](#_Toc6961)

[3、 混流生产线系统分析与方案设计](#_Toc23598)

[3.1 产量决策分析 5](#_Toc16297)

[3.2 工位方案设计 (生产线平衡分析, 工位工序分配) 7](#_Toc21076)

[3.3 投料顺序策略 (优化投料顺序) 10](#_Toc4526)

[4、 初始模型的构建与分析](#_Toc11444)

[4.1. 模型布局 15](#_Toc11935)

[4.2. 模型参数 15](#_Toc971)

[4.3 初始模型模拟结果 18](#_Toc8021)

[5、 改善措施与优化策略](#_Toc17582)

[5.1. U型生产线优化 24](#_Toc19714)

[5.2. 单元布局生产线优化 26](#_Toc25821)

[6、 仿真结果对比](#_Toc31991)

[6.1 初始仿真结果 30](#_Toc32535)

[6.2 U型布局仿真结果 31](#_Toc7454)

[6.3 单元布局仿真结果 32](#_Toc2753)

[6.4 方案对比 33](#_Toc1733)

[7. 总结](#_Toc17906)

[参考文献](#_Toc14574)

# 1. 引言

## 1.1 课程设计总览

本次课程设计聚焦于混流生产线的设计与仿真，目标是构建一个能够准确模拟混流生产线运作的仿真模型，并通过模型分析来优化生产线的设计。课程设计将围绕以下几个核心内容展开：

1. 系统背景与分析

分析混流生产线的系统背景，包括市场需求、现有的生产线状态等。

1. 模型构建

根据系统分析的结果，构建混流生产线的仿真模型，涉及模型布局、流程逻辑、参数设置等。

1. 仿真实验

运行仿真模型，收集数据进行分析，识别系统的瓶颈和问题点。

1. 改善策略

基于仿真结果，提出改善生产线的策略，主要包括U型生产线优化和单元布局生产线优化。

# 2. 课程设计任务与系统背景

## 2.1 系统背景与现状

当前的混流生产线系统普遍存在一些效率和资源利用上的问题。例如，某些工序成为生产瓶颈，导致整个生产线的效率下降；或者某些设备和人力资源没有得到充分利用，造成资源浪费。具体到本课设中涉及的A、B、C三种产品的生产线，虽然需求已知，但由于生产能力限制和工序时间的差异，无法满足所有产品的需求。此外，生产过程中的投料顺序、投料批量、产线布局等因素也对系统的性能有重要影响。通过仿真分析，可以更加深入地了解系统运作的现状，识别问题所在，为后续的优化提供依据。

A、B、C 三种产品，根据以往订单分析，每天的平均需求量分别约为 80、80、40。三种 产品的单件利润分别为 15、12、20。虽然需求已知，但目前生产能力有限，有无法 满足三种产品的全部需求。三种产品生产工艺流程相同（工序关系如图 1 所示），但各工序 作业时间不一样，三种产品各个工序的加工时间均为正态分布，正态分布均值 μ 如表 1 所 示，标准差 σ ：若 μ≤5 ，σ=1；若 5<μ≤10 ，σ=2；若 10<μ≤20 ，σ=3；若 μ≥20 ，σ=4 。生产企 业目前为三班轮换 24 小时工作。

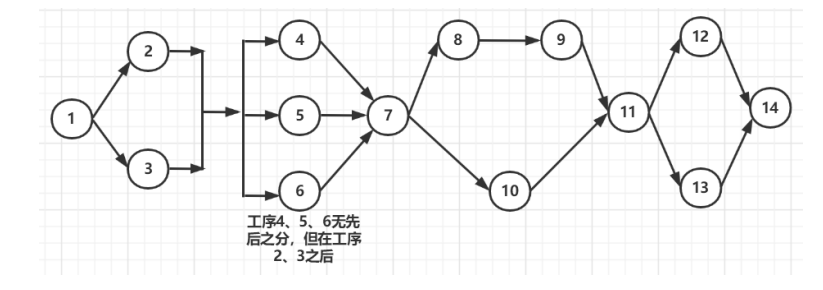


图2-1 A、B、C产品工序关系

表2-1为 A、B、C 各工序加工时间（未标明台数的工序为 1 台设备；单位：分钟）

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 工序  产品 | 工序1  （两台） | 工序2  （两台） | 工序3 | 工序4  （两台） | 工序5 | 工序6 | 工序7  （三台） |
| A | 8 | 16 | 10 | 12 | 9.8 | 8 | 22 |
| B | 5 | 10 | 7 | 4 | 7 | 4 | 16 |
| C | 6 | 5 | 8 | 9 | 12 | 4 | 24 |
| 工序  产品 | 工序8 | 工序9 | 工序10 | 工序11  （两台） | 工序12 | 工序13 | 工序14 |
| A | 1 | 5 | 7 | 15 | 2 | 3 | 5 |
| B | 1 | 3 | 4 | 6 | 4 | 5 | 5 |
| C | 3 | 2 | 3 | 17 | 2 | 2 | 5 |

为便于模拟，对订单到达和处理做如下假设：三种产品的订单各自独立到达（每个订单 只订一种产品），订单每隔 24 小时（1440 分钟）到达一次。A 类订单量为 floor(normal（80， 8）)+1，B 类订单量为 floor(normal（80，8）)+1，C 类订单量为 floor(normal（40，4）)+1。 所有订单，若 24 小时未能满足，则订单取消。

通过对市场需求的分析和系统运作现状的审视，可以明确课程设计的方向和重点，即通过系统建模与仿真技术，探索提高混流生产线效率和灵活性的方法，满足市场的需求，优化系统的运作。

## 2.2 详细任务要求与目标

在本课程设计中，面临的主要任务是对混流生产线进行系统建模与仿真，以识别并解决影响生产效率和资源利用的关键问题。在深入分析和优化混流生产线的过程中，将按照以下详细的任务要求展开工作。

1. 分析现有系统

对当前的生产线进行全面分析，以确定各类产品的产量要求。这将包括对订单处理流程、工序加工时间、资源利用情况和在制品水平的评估，确保对生产能力和市场需求有一个准确的了解。

1. 建立仿真模型

基于对现有系统的分析，建立一个详尽的混流生产线仿真模型。该模型将用于生产线平衡分析，并完成生产线工位作业分配。模型应能准确反映生产过程中的各种动态变化和复杂交互，为进一步的优化提供支持。

1. 识别问题和瓶颈

运行仿真模型，利用利特尔法则验证、产线布局对系统性能的影响分析、投料顺序和批量对系统性能的影响分析，以及产线平衡和资源利用率分析，以识别生产效率低下和资源浪费的主要问题和瓶颈。这一步骤将帮助确定改进的焦点区域。

1. 提出改善方案

根据识别出的问题，提出具体的改善方案。这将包括U型生产线优化和单元布局生产线优化策略，以及针对特定问题的其他改进措施。每一项策略都将针对提升生产线平衡、人员及设备利用率、在制品水平和成品库存等方面的性能。

1. 验证改善效果

将改善方案应用于仿真模型，并通过仿真评估来验证其效果。将分析改进措施对生产线平衡、资源利用率和整体性能的实际影响，并根据分析结果调整和优化改进方案。这一步骤将确保的优化措施能够有效地解决识别出的问题，并显著提升生产效率和产品质量。

通过这一系列细化的任务要求，将能够全面优化混流生产线的性能，确保生产过程的高效和灵活，满足市场需求，同时提高资源利用效率和产品质量。

## 2.3任务分配

项目流程策划：迪力木拉提·艾买提

模型建立：李嘉彤

模拟改善：杨宸铭

数据分析：刘小杨

# 混流生产线系统分析与方案设计

## 3.1 产量决策分析

在混流生产线的设计中，准确的产量决策分析是保证生产效率和市场需求满足的关键。它涉及对未来订单量的预测，合理规划生产能力，以及有效管理资源。

1. 产量与需求

为了对未来的产量需求做出准确预测，采用了统计方法对历史数据进行分析。考虑到产品需求的波动性，选择了正态分布模型来进行订单量的预测。

A 类订单量为 floor(normal（80， 8）)+1，

B 类订单量为 floor(normal（80，8）)+1，

C 类订单量为 floor(normal（40，4）)+1，

首先收集历史订单数据，包括每种产品的日均需求量及其波动情况。

选择正态分布模型来描述需求量的波动。

根据历史数据，设定正态分布的均值（μ）和标准差（σ）。例如，A类产品的均值设为80，标准差设为8。

1. 决策依据与方法

在进行产量决策时，除了需求预测之外，还需要考虑多个因素，如生产能力、资源限制、交货时间、成本控制等。

决策依据：需求预测结果：预测的订单量为提供了未来市场需求的基本信息。

生产能力：评估当前的生产线能够处理的最大订单量。

资源状况：包括人力、原材料、机器等的可用情况。

成本与利润分析：分析不同产量水平下的成本与利润，找到最优点。

有效产出利润：

分析A、B、C产品在瓶颈工序上的单位时间有效产出：由题目的条件可得，A、B、C三种产品得利润分别为15、12、20，所以可以求得三种产品在瓶颈工序上的单位有效产出，如表3-1所示。

表3-1 产品A、B、C在瓶颈工序3上得单位时间有效产出

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | 产品A | 产品B | 产品C |
| 需求量 | 80 | 80 | 40 |
| 利润 | 15 | 12 | 20 |
| 占用瓶颈工序5得时间 | 9.8 | 7 | 12 |
| 瓶颈工序得单位时间有效产出 | 1.53 | 1.71 | 1.67 |

很明显，B在瓶颈上的单位时间有效产出大于A、C。所以，尽量利用工序5，并优先生产B，B产量为需求量80件，剩余时长为：1440-80×7=880分钟，C生产40件所需时长为40×12=480分钟，则C生产40件。那么A的产量=(880-480)/7分钟=40件。

A产品的有效产出利润为40×15=600,B产品的有效产出利润为80×12=960，C产品的有效产出利润为40×20=800，所以总利润为600+960+800=2360。

## 3.2 工位方案设计 (生产线平衡分析, 工位工序分配)

1. 工位布局(U型生产线优化, 单元布局生产线优化)

识别瓶颈工序：

有A、B、C三种产品，据以往订单分析，每天的需求量分别约为80、80、40。三种产品的单件利润分别为15、12、20。已知产品A、B、C的加工需每天工作24小时，每小时60分钟，即每天1440分钟。

产量决策分析：所有工序若按市场需求生产三种产品A、B、C的生产时长如表3-2所示，很明显无法满足A、B、C的全部市场需求。

表3-2 各工序产品加工时长

|  |  |
| --- | --- |
| 工序 | 各工序总计加工时间/分钟 |
| 1 | （80×8+80×5+40×6）/2=640分钟 |
| 2 | （80×16+80×10+40×5）/2=1140分钟 |
| 3 | （80×10+80×7+40×8）=1680分钟 |
| 4 | （80×12+80×4+40×8）/2=820分钟 |
| 5 | （80×9.8+80×7+40×12）=1824分钟 |
| 6 | （80×8+80×4+40×4）=1120分钟 |
| 7 | （80×22+80×16+40×24）/3=1333分钟 |
| 8 | （80×1+80×1+40×3）=280分钟 |
| 9 | （80×5+80×3+40×2）=720分钟 |
| 10 | （80×7+80×4+40×3）=1000分钟 |
| 11 | （80×15+80×6+40×17）/2=1220分钟 |
| 12 | （80×2+80×4+40×2）=560分钟 |
| 13 | （80×3+80×4+40×2）=720分钟 |
| 14 | （80×5+80×5+80×5）=1000分钟 |

很显然无法满足A、B、C的全部市场需求，因为若全部满足，则工序3的加工时间需要（80×10+80×7+40×8）=1680分钟，工序5加工所需要的时间为（80×9.8+80×7+40×12）=1824分钟，均超出了每天的1440分钟的可利用时间，明显工序3和工序5为瓶颈，但工序5超出的时间比工序3超出的时间多。所以优先考虑工序5。

1. 全部工序时间

混合流水生产线的方案设计主要包括两个部分，即多品种流水线平衡问题和多品种流水线投产排序问题。多品种流水线平衡问题主要解决资源合理利用和分配问题，将车间资源（机床等）合理分配到各个工位，或者说是将各作业工序合理分配到各工位，解决生产线的平衡问题。此问题常用综合优先图（作业顺序图）方法将多品种流水线平衡问题转换为单一流水线平衡问题求解。多品种流水线投产排序问题，则从缩短加工工期等角度，获取最优的产品投产顺序，常采用最小循环方法。本课程设计中，对多品种流水线投产排序问题不做优化，只模拟对比指定的多个投产顺序方案。

确定各类产品产量和有效工作时间，确定综合优先图（作业顺序图）

图2-1所示为三种产品生产作业顺序图。三种产品的各工序时间如图2-2所示，各工序的综合作业时间如表3-3所示。有效工作时间为24×60=1440分钟，三种产品的总产量为（160×1440=230400）件，三种产品的产量比例1：2：1。

表3-3 各工序综合作业时间

|  |  |
| --- | --- |
| 工序 | 各工序综合作业时间/分钟 |
| 1 | 3 |
| 2 | 5.125 |
| 3 | 8 |
| 4 | 3.625 |
| 5 | 8.95 |
| 6 | 5 |
| 7 | 6.5 |
| 8 | 1.5 |
| 9 | 3.25 |
| 10 | 4.5 |
| 11 | 5.5 |
| 12 | 3 |
| 13 | 3.75 |
| 14 | 5 |

由上可知，全部工序总时间为66.7分钟。

1. 节拍于最小工位数

经过合成以后，可将该混合产品问题转化为单一产品问题。按公式（3-1）可求得该复杂生产线的节拍时间：

（3-1）

其中C表示节拍，表示可用生产时间，表示需要生产的产品数量。

C=1440/160=9分钟。

按公式（3-2）则工位的数是：

（3-2）

K=66.7/9≈8。

1. 工位工序分配

表3-3 工位工序分配（单位：分钟）

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 工位 | 可分配工序 | 选定工序 | 作业时间 | 剩余时间 | 工位工时 |
| 工位1 | 1、2、3 | 1  2 | 3  5.125 | 6  0.875 | 8.125 |
| 工位2 | 3、4 | 3 | 8 | 1 | 8 |
| 工位3 | 4、5、6 | 4  6 | 3.625  5 | 8.375  3.375 | 8.625 |
| 工位4 | 5、7 | 5 | 8.95 | 0.05 | 8.95 |
| 工位5 | 7、8、9、10 | 7  8 | 6.5  1.5 | 2.5  1 | 8 |
| 工位6 | 9、10、11、12 | 9  10 | 3.25  4.5 | 5.75  1.25 | 7.75 |
| 工位7 | 11、12、13、14 | 11  12 | 5.5  3 | 4.5  1.5 | 8.5 |
| 工位8 | 13、14 | 13  14 | 3.75  5 | 5.25  0.25 | 8.75 |

## 

## 3.3 投料顺序策略 (优化投料顺序)

在混流生产线中，正确的投料顺序对于提高整体生产效率和资源利用率至关重要。这一部分将详细探讨投料顺序的基本原则和优化策略，旨在确保生产线运作的高效性和适应性。

1. 投料顺序原则

投料顺序原则是确保生产线顺畅运作的基础，主要包括以下几点：

1. 瓶颈优先：优先安排瓶颈工序所需的物料投料，以确保整个生产线不会因为瓶颈工序的等待而停滞。
2. 平衡生产：确保所有工位的工作负载尽均衡，避免某些工位过载而其他工位空闲。
3. 减少等待：合理安排投料顺序，减少半成品在生产线上的等待时间，提高生产流畅性。
4. 适应性强：投料顺序需要有一定的灵活性，能够快速适应订单变化、机器故障等突发情况。
5. 顺序优化策略 (最小时间偏离指数, 最小时间综合)

最小循环法投产排序

为减小算法计算量，投产排序问题的研究使用最小循环法。最小循环法将大规模投产产品按种类缩减到最小后，寻找最小集合内的最佳排序方案。具体操作步骤如下∶

投产排序问题的研究是为了找到最优的生产顺序，以最小化等待时间、最大化生产效率或满足其他优化目标。

最小循环法是一种减少大规模问题计算量的方法。它首先将大规模投产产品按种类缩减到最小后，然后在这个最小集合内寻找最佳排序方案。

①确定所有种类产品的最大公约数g

通过确定g来简化问题规模，因为它允许你将大规模问题缩小到由 g决定的最小周期内。

三种产品的产量分别为 40、80、40，所以，g=40

②确定品种为m产品的最小循环投产数量。

计算式为∶

（m=1,2,...,M） （3-3）

表示：第m种产品在最小循环中的投产数量，

表示：第m种产品的总需求数量。

通过将总需求数量除以最大公约数，反映了在缩减后的最小循环中，每种产品的投产次数。

三种产品的产量分别为 40、80、40，所以，, *,* 。

③确定最小循环集合

确定最小循环集合，即为所有品种产品最小投产数量加和，计算式为∶

（3-4）

𝑑表示所有品种产品在最小循环中的总投产数量。

通过加和每种产品的最小循环投产数量，得到整个生产线在一个最小循环中的总投产数量。这是评估整个生产线效率和优化投产顺序的关键步骤。

在本题中，𝑑=𝑑1+𝑑2+𝑑3=1+2+1=4。

进行投产排序优化时，只需考虑1个产品A，2个产品B和1个产品C的投产顺序即可。这大大简化了原本需要考虑数百个产品的复杂问题。通过这种方式，最小循环法有效地将问题规模减小，使得计算变得可管理且更高效。

1. 投料顺序判断

①根据综合销售额判断投料顺序

通过实验器来判断各个方案与三种产品投料顺序的销售额，其中模拟时间为59天，每个场景模拟5次，每次投料均包含一个产品，投料顺序如下图所示。

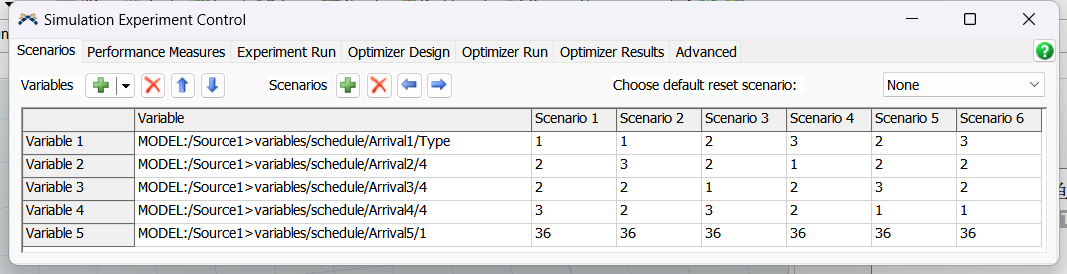
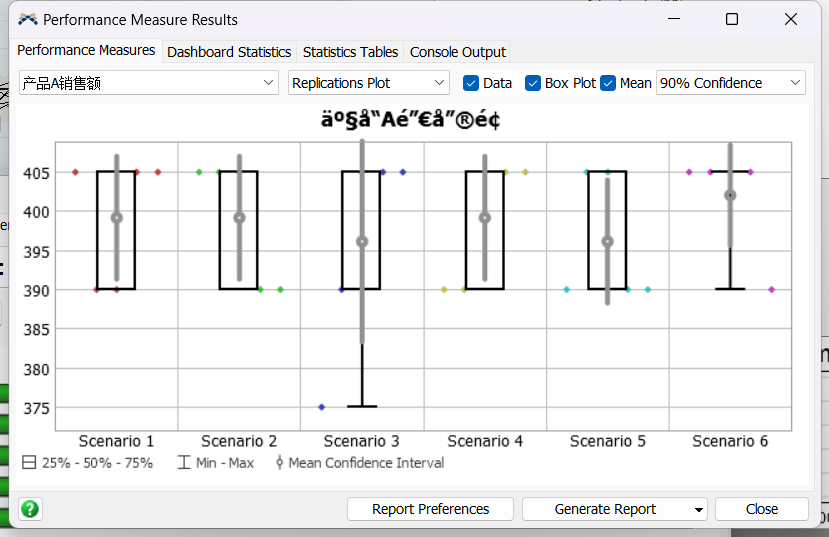


图3-1 投料顺序图

方案1的投料顺序为ABBC，方案2的投料顺序为ACBB，方案3的投料顺序为BBAC，方案4的投料顺序为CABB，方案5的投料顺序为BBCA，方案的投料顺序为CBBA。

通过实验器的模拟可以得出各个方案产品A的销售额、产品B的销售额和产品C的销售额，各个方案不同产品的销售额模拟如下箱型图3-2，图3-3，图3-4所示, 箱型图包括以下几个部分：

1. 中位数：箱子中间的线，代表数据的中位数。
2. 四分位数范围：箱子的长度，代表数据的中间50%，从第一四分位数到第三四分位数。
3. 异常值：图中的单独点，被认为是比上四分位数高1.5倍的四分位差或比下四分位数低1.5倍的四分位差的点。
4. 上下界：箱子外的线（胡须），展示了除了异常值外的最大值和最小值。
5. 平均值：有些箱线图会包括表示平均值的标记，是一个加号或者一个小圆圈。

图3-2 各个方案产品A销售额

其中，Scenario 1中位数为395，Scenario 2中位数为385，Scenario 3中位数为395，Scenario 4中位数为395，Scenario 5中位数为400，Scenario 6中位数为389。

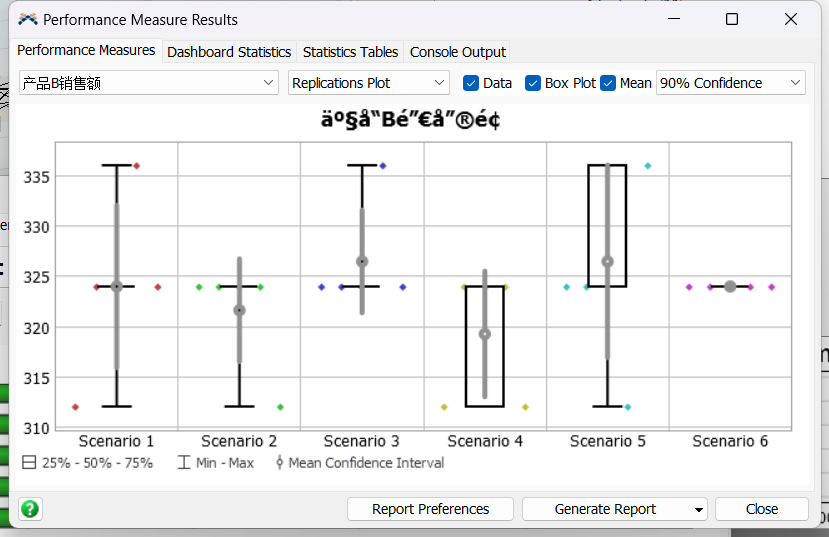


图3-3 各个方案产品B销售额

其中，Scenario 1中位数位为325，Scenario 2 中位数为320，Scenario 3中位数为330，Scenario 4中位数为325，Scenario 5中位数为330，Scenario 6中位数为330。

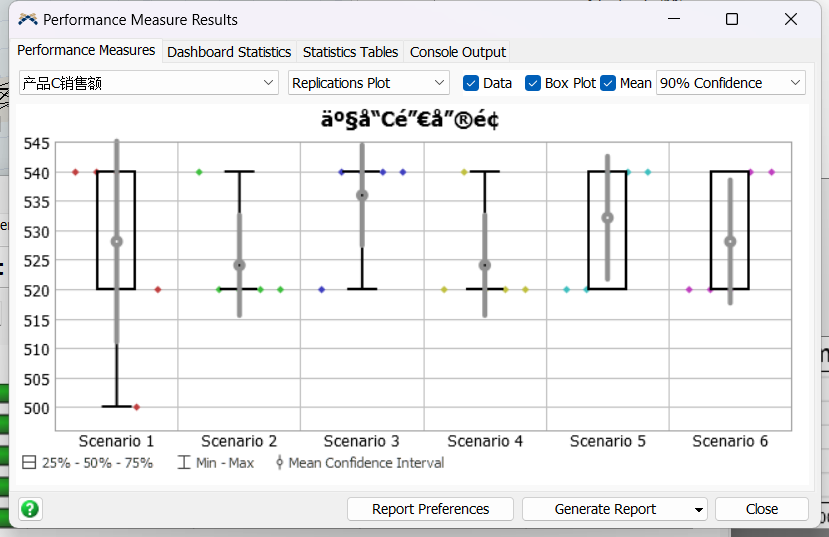


图3-4 各个方案产品C销售额

其中，Scenario 1中位数为530，Scenario 2中位数为525，Scenario 3中位数为540，Scenario 4 中位数为535，Scenario 5中位数为535，Scenario 6中位数为530单位。

根据表3-4的数据，可以得出方案3获得了最多的销售额，因此方案3是最合适的选择，其投料顺序为BBAC。

表3-4 各方案综合销售额

|  |  |
| --- | --- |
| 方案 | 综合销售额 |
| 方案1 | 395+325+530=1250 |
| 方案2 | 385+320+525=1230 |
| 方案3 | 395+330+540=1265 |
| 方案4 | 395+325+535=1255 |
| 方案5 | 400+330+535=1260 |

# 4、 初始模型的构建与分析

## 4.1. 模型布局

初始模型布局图是整个系统设计的蓝图，它清晰地展示了各个模块之间的相互关系和功能。图4-1作为整体布局图，呈现了整个系统的宏观结构，包括各个模块的分布和连接方式。通过整体布局图，可以对整个系统有一个全面的了解，并能够快速识别出各个模块的定位和作用。



图4-1 整体布局

## 4.2. 模型参数

## （1）订单到达设置

为便于模拟，对订单到达和处理做如下假设：

三种产品的订单各自独立到达，即每个订单只包含一种产品。

订单每隔24小时（1440分钟）到达一次。

类别A订单的数量遵循正态分布，均值为40，标准差为4，并且对结果向下取整后加1。

类别B订单的数量遵循正态分布，均值为80，标准差为8，并且对结果向下取整后加1。

类别C订单的数量遵循正态分布，均值为40，标准差为4，并且对结果向下取整后加1。三种订单设置如下面三图所示：

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| f7791c97616e810d62631cb71a0a55f | efe0ac61158da53654fdd1b3b5d4abd | b6df4cad4b75759afc218cdd2910644 |
| 图4-4 A类订单 | 图4-5 B类订单 | 图4-6 C类订单 |

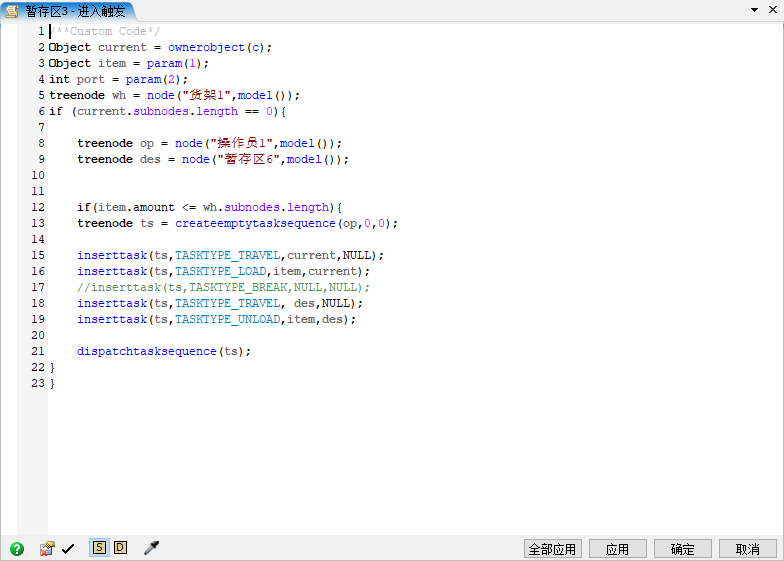
（2）原料到达设置

原料发生装置设置如图4-7所示，到达方式为到达时间表如图4-8所示。

|  |  |
| --- | --- |
| 6d8ed9af57e204f256bb487d1cd0d8a | 34b4817e85291954d06f0f865944dc5 |
| 图4-7 原料发生装置 | 图4-8 到达时间表 |

（3）暂存区、货架设置

暂存区设置代码（见图4-9至图4-12）用于有效管理生产流程中的暂存环节。以暂存区3为例，该代码实现了订单到达时的实时判断：首先，检查货架1所生产的货物是否足以满足暂存区3的需求。如果足够，系统将自动触发运送程序，将相应货物传送至合成器进行打包。后续的暂存区与暂存区3相同。

图4-9 暂存区3设置

以图4-10为例来介绍货架的摆放，可以清晰地看到货架1的代码设置。这些代码的作用并非简单的摆放与存储，而是具有更加复杂的功能。其主要目标是管理生产线上产出的大量成品，特别是处理那些等待时长超过24小时的成品。

对于等待时长超过24小时的成品，这些代码会执行销毁操作，而对于等待时长在24小时以内的成品，情况则有所不同。如果在一个24小时内，成品的数量达到了订单到达的需求量，那么这些成品将正常进行运送和打包操作。

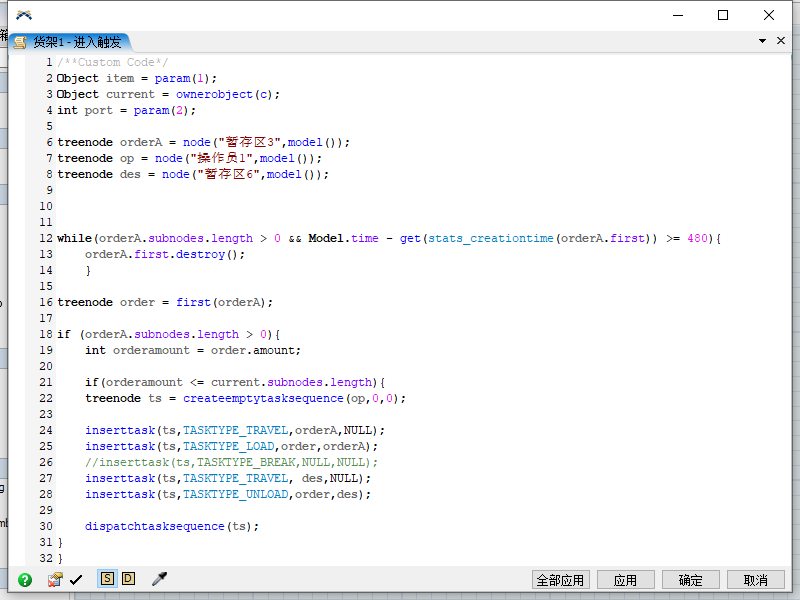


图4-10 货架1设置

## 4.3 初始模型模拟结果

在仿真建模的初始阶段，通过对模型的模拟运行，可以收集和汇总数据来评估生产-库存系统的性能。这些结果是评价模型是否符合设计要求和现实操作的基础，并指导后续的优化和调整。在评估了59天的仿真模拟结果后，获得了关于生产-库存系统的深入洞察。以下是基于以上结果的改进描述和分析，包括对相应图表的引用：

1. 订单完成量：

现状：在59天内，共输出了59个订单，其中订单1（A）完成了39份，订单2(B)完成了59份，而订单3(C)完成了41份（见图4-15）。



图4-15 各个订单完成量

1. 输入与输出：

现状：系统每天输入约400个产品，但只能输出约200个产品（见图4-16）。



图4-16 三类产品的输入与输出

1. 在制品数量：

现状：图4-17显示了产品A、B、C（用1、2、3代表）的在制品数量从一月初到三月初的变化趋势。在这个时间段内，三种产品的在制品数量稳定增长，趋势线几乎重合，表明所有产品的生产速度和积累量非常相似。

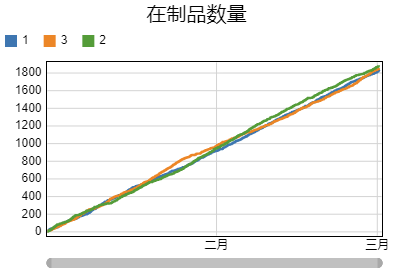


图4-17 在制品数量

1. 产品综合停留时间：

现状：产品平均停留时间为18757分钟，波动范围从84.4分钟到31930.5分钟之间（见图4-18）。

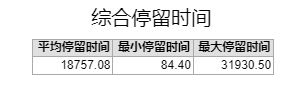


图4-18 产品综合停留时间

1. 货架容量随时间变化：

现状：图4-19展示了三个货架（用1、2、3代表）存货的时间变化，从一月初到三月初。每个货架的存货量都显示出显著的周期性波动，这表明存货的定期补充和消耗。

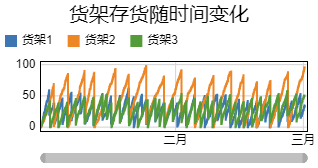


图4-19 货架存货

1. 各工序状态

现状：部分工序存在等待操作人员的情况（见图4-20）。

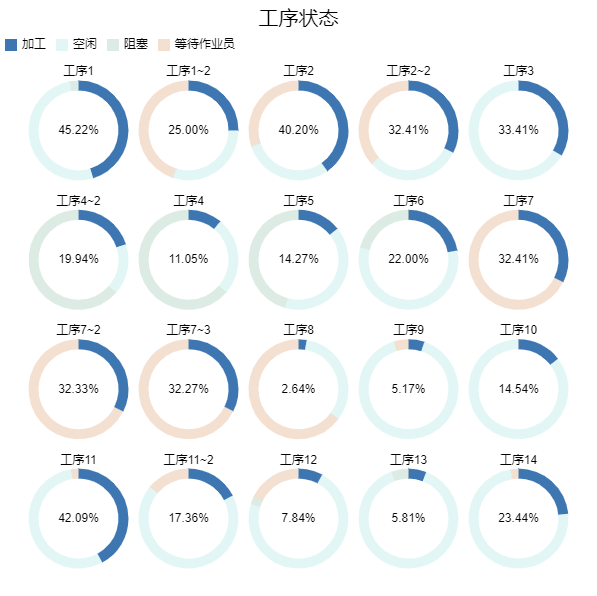


图4-20 各工序状态

1. 各工位状态

现状：一些工位过于忙碌，而有些则相对空闲（见图4-21）。

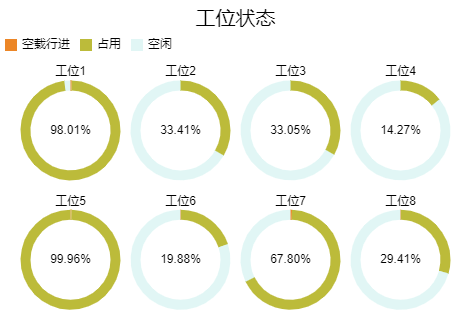


图4-21 各工位状态

为改善生产系统中发现的问题，可以采取一系列措施。首先，针对产品C产量过多的情况，建议进行精细化生产计划，根据订单需求调整产量，避免库存过剩。其次，对于等待操作人员的工序，可以优化人力资源分配，确保操作人员能够及时到位，减少生产过程中的等待时间，提高加工效率。最后，对于工位过于忙碌和相对空闲的问题，建议重新评估工序安排和资源分配，以平衡工位利用率，避免资源浪费和瓶颈的发生。

4.4 理想状态下利特尔法则的验证

理想状态即去除操作员的影响，且各个工序加工时间均设 为中间值，以工序 5为例，如图 4-22 所示。

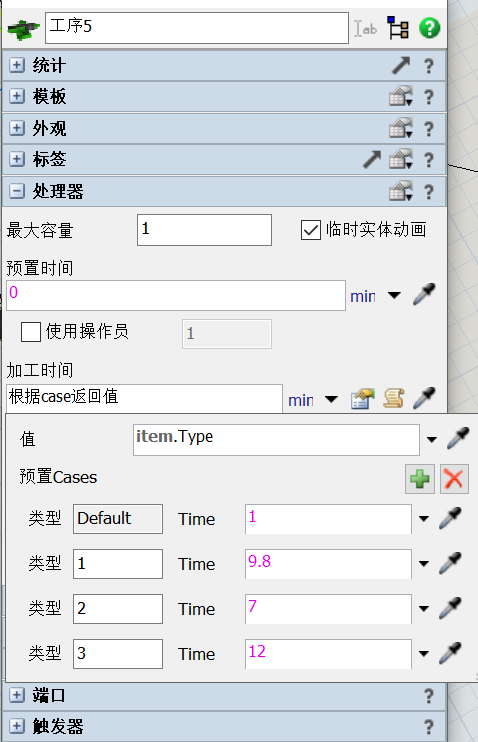


图4-22 理想状态工序设置更改处

（4-1）

如图4-23，图4-24，图4-25所示。

,,，10到16的中值为13。

TH×T=12.85≈13，满足利特尔法则。

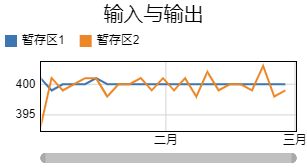


图4-23 原材料输入与输出

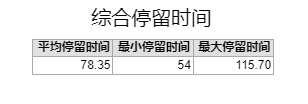


图4-24 停留时间

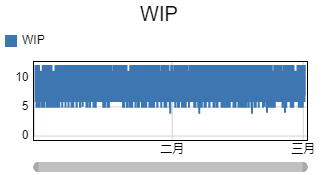


图4-25初始WIP

# 5、 改善措施与优化策略

在混流生产线设计与仿真课程设计中，改善措施是针对生产系统中发现的问题提出的解决方案。这些措施旨在优化生产效率、减少在制品、平衡产线和提高资源利用率。一个重要的改善方法是U型生产线优化。

## 5.1. U型生产线优化

U型生产线是一种以U形布局组织生产流程的方式。这种布局能够有效地减少工人和物料的移动距离，优化生产过程，提高工作效率。其主要设计原则如下。

最小化移动距离：将工序紧密排列，确保物料和工人的移动距离最小。

平衡工作负荷：尽量平衡每个工位的工作负荷，避免有些工位过忙而有些工位闲置。

减少在制品存量：通过紧密的物料流和平衡的工作负荷，减少在制品(WIP)的存量。

（1）布局

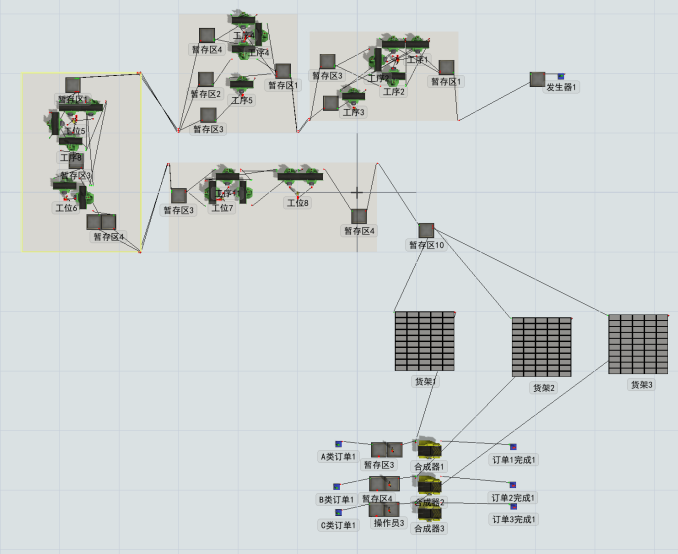
改善后布局如下图5-1所示，布局每个小部分呈现U型，一个操作员操作多个工位，每个操作员操作的工位以U的形状包围操作员。三个工序1和一个工序2围成一个U型，由工位1操控。工序3，由工位2操控。两个工序4和一个工序6，由工位3操控。一个工序5又工位4操控。三个工序7和一个工序8由工位5操控。一个工序9，一个工序10，有工位6操作。两个工序11，一个工序12由工位7操作。剩余的一个工序13和一个工序14由工位8操作

图5-1 U型布局

（2）库存随时间变化

如图5-2展示的是U型布局优化后三个新货架（1、2、3）的库存随时间的变化。从图中可以看出，三个货架的库存量都存在显著的周期性波动。这种波动是由于库存补充和消耗的周期性活动所引起的。尽管波动的频率和幅度在三个货架上略有不同，这反映了不同货架上产品的需求周期或补货策略的差异。货架1的库存波动幅度最大，货架2和货架3的库存波动则相对较小且较为接近。

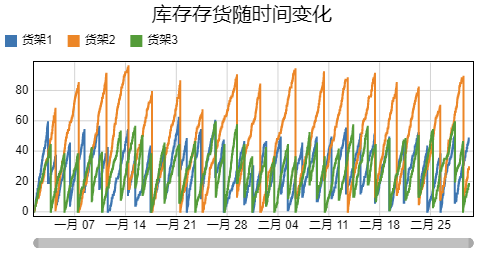


图5-2 存货随时间变化

（3）在制产品

图5-3显示了在制品A、B、C（用蓝色、橙色和绿色表示）的数量随时间的变化。在这一时期内，三种产品的在制品数量呈现出稳定的线性增长，表明有大部分材料浪费。

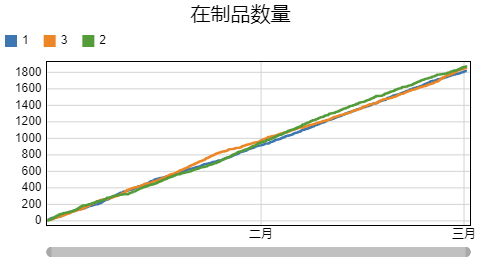


图5-4 在制品数量

（4）订单完成率

如下面两图5-5，图5-6所示，通过下面两图，可以计算订单完成率，A订单完成率为54.2%，B订单完成率为57.6%，C订单完成率为28.8%。



图5-5 订单到达量



图5-6 订单完成量

## 5.2. 单元布局生产线优化

单元布局生产线是一种工作站围绕中央物料处理区布局的方式，它类似于花朵的结构，因此得名。此布局设计用于提高生产效率和灵活性，特别适用于多品种、小批量生产。以下是单元布局布局的设计原则：

1. 中心化物料处理：所有物料都通过位于中心的物料处理区域进行分发和收集，减少物料的搬运距离和时间。
2. 模块化工作站：每个工作站负责一系列特定的任务，可以根据生产需要快速重新配置或调整。
3. 灵活的工作流：工作流是灵活的，可以根据不同产品的生产需求进行调整，以最大化工作站和设备的利用率。
4. 最小化在制品(WIP)：通过合理的布局和调度，尽减少在制品的数量和停留时间，从而降低成本并加快响应时间。
5. 优化人员流动：确保工人能够轻松地在工作站之间移动，减少不必要的步行时间，提高生产效率。

（1）布局

布局如下图5-7所示，呈现单元布局，其中工位一与工位二为一个生产模块，工位三与工位四为一个生产模块，工位五与工位六为一个生产模块，工位七与工位八为一个生产模块，把工位合并可以有效的解决人员过于空闲或繁忙的问题。

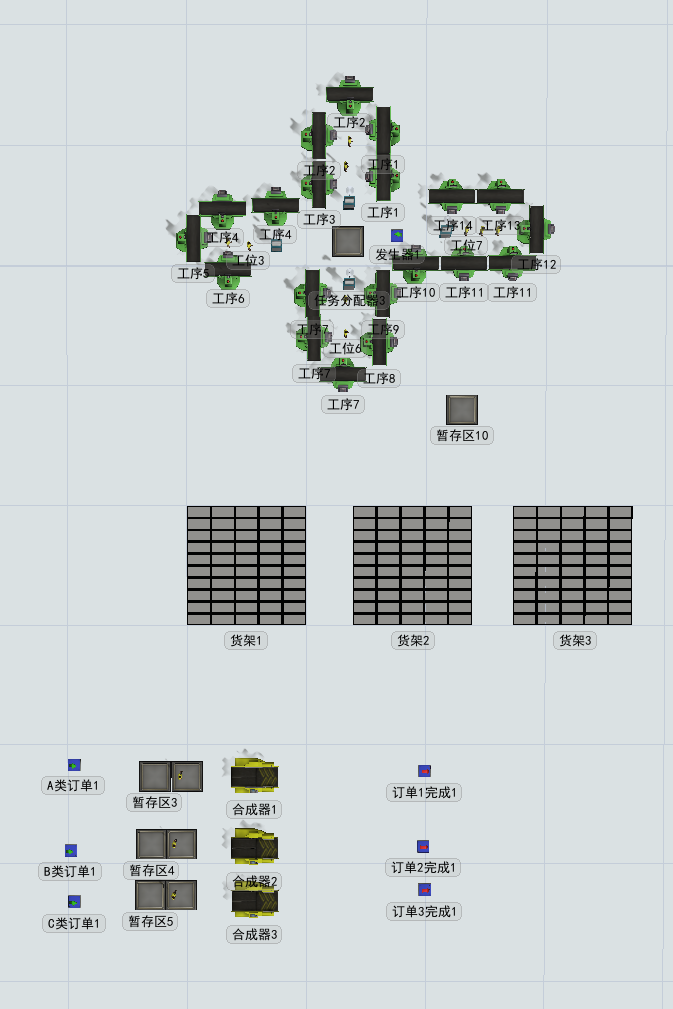


图5-7 单元布局

（2）库存随时间变化

图5-8展示了单元布局优化后三个新货架的库存随时间的变化。这里可以看到货架1（蓝色）、货架2（橙色）、货架3（绿色）的库存量呈现出显著的周期性波动，这些波动反映了库存的定期补充和消耗。相比于之前的图表，这张图表中的波动幅度更大，峰值更高，这表明库存补充的频率更高或者消费速度更快。

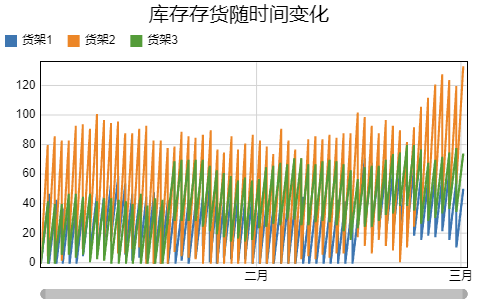


图5-8 库存随时间变化

（3）在制产品

图5-9是一个堆叠条形图，它显示了在制品产品B（蓝色）、产品C（绿色）在一段时间内的累计数量。产品A不在图表中显示，因为其在制品数量为零，这表明产品A的生产完全满足了订单需求，没有剩余的在制品。

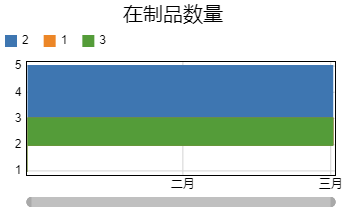


图5-9 在制品类型

（4）订单完成率

如下面两图5-10，图5-11所示，通过下面两图，可以计算订单完成率，A订单完成率为98.3%，B订单完成率为100%，C订单完成率为98.3%，能够满足大部分的订单需求。



图5-10 订单到达数

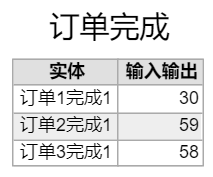


图5-11 订单完成数

# 6、 仿真结果对比

## 6.1 初始仿真结果

（1）订单完成量

数据描述: 在模拟的59天中，订单1完成了39份，订单2完成了59份，而订单3则完成了41份。

使用订单完成率 (OCR) 公式计算每个订单的完成率:

（6-1）

订单A完成率: ；

订单B完成率: ；

订单C完成率: ；

（2）输入与输出

数据描述: 每天约有400个产品输入到生产系统中，而每天只有大约200个产品输出到货架上。

计算每日产出率 (Daily Throughput Rate, DTR)：

（6-2）

DTR=200/400=50% , 每日产出率为50%，表明对于每个输入到系统中的产品，只有50%产品最终被输出到货架上。

（3） 产品综合停留时间

最大停留时间是，最小停留时间是84.4min

（6-3）

；

（4）货存周转率

数据描述: 产品A和产品B的产量能满足部分需求，而产品C的产量超需求。

计算每种产品的库存周转率 (Inventory Turnover Rate)：

（6-4）

产品A的库存周转率：；

产品B的库存周转率：；

产品C的库存周转率：；

（5）工位平衡率

数据描述: 工位平衡率是一种衡量生产线各工序之间工作分配是否合理的指标，它反映了生产线的利用效率和浪费程度。通过仿真模拟得到了14个工序的工序时间和瓶颈工序时间（即最长的工序时间）。

使用平衡率 (Balance Ratio) 计算工作负荷分配的均衡性：

（6-5）

是工序数，是第i个工序的工序时间，CT是瓶颈工序的时间。由于模拟的时间相同所以采用百分比的方式表示工序的时间。

；

## 6.2 U型布局仿真结果

（1）订单完成量

数据描述: 在模拟的59天中，订单1完成了17份，订单2完成了17份，而订单3则完成了34份。

使用订单完成率 (OCR) 公式计算每个订单的完成率:

订单A完成率: ；

订单B完成率:；

订单C完成率: ；

（2）每日产出率

数据描述: 产品A的每小时输入量为131.21个，输出量为55.5个，产出率为42.30%。产品B的输入量为134.42个，输出量为56.42个，产出率为41.97%。产品C的输入量为134.33个，输出量为57个，产出率为42.43%。这些产出率表明U型布局中的生产效率存在一定的提升空间，特别是在提高产品输出比例方面。

计算每日产出率 (Daily Throughput Rate, DTR)：

；

；

；

（3） 产品综合停留时间

数据描述：平均停留时间是18754.2min最大停留时间是，最小停留时间是84.4min

（4）货存周转率

数据描述: 产品A和产品B的产量能满足部分需求，而产品C的产量超需求。

计算每种产品的库存周转率 (Inventory Turnover Rate)：

产品A的库存周转率：；

产品B的库存周转率：；

产品C的库存周转率：；

（5）工位平衡率

数据描述: 存在一些工位过于忙碌，同时也有一些工位相对空闲。

使用平衡率 (Balance Ratio) 计算工作负荷分配的均衡性：

## 6.3 单元布局仿真结果

## （1）订单完成量

数据描述: 在模拟的59天中，订单1完成了30份，订单2完成了59份，而订单3则完成了58份。

使用订单完成率 (OCR) 公式计算每个订单的完成率:

订单A完成率: ；

订单B完成率:；

订单C完成率: ；

（2）每日产出率

数据描述: 产品A每小时约有100个产品输入到生产系统中，而小时只有大约99.92个产品输出到货架上。产品B每小时约有199.96个产品输入到生产系统中，而小时只有大约199.92个产品输出到货架上。产品C每小时约有99.92个产品输入到生产系统中，而小时只有大约100个产品输出到货架上

计算每日产出率 (Daily Throughput Rate, DTR)：

,

,

（3） 产品综合停留时间

数据描述：平均停留时间是81.15min，最大停留时间是，最小停留时间是54.28min

（4）货存周转率

计算每种产品的库存周转率 (Inventory Turnover Rate)：

产品A的库存周转率：

产品B的库存周转率：2

产品C的库存周转率：

（5）工位平衡率

使用平衡率 (Balance Ratio) 计算工作负荷分配的均衡性：

；

## 6.4 方案对比

1. 订单完成率 (OCR)

U型布局：订单A和C的完成率较高（约28%），而订单C的完成率最高（约58%）。但订单C的完成率相对较低（约29%）。

单元布局：所有订单的完成率非常高，订单B和C约为99%，而订单A达到了50.85%。

分析：在订单完成率方面，单元布局明显优于U型布局，表明其在订单处理方面更为高效和可靠。

1. 每日产出率 (DTR)

U型布局：所有产品的DTR大约在42%左右，表明只有大约42%的产品从输入转化为输出。

单元布局：所有产品的DTR几乎达到了100%，表明几乎所有输入的产品都被成功处理并输出。

分析：单元布局的每日产出率显著高于U型布局，表明生产效率和生产线的优化程度远超U型布局。

1. 产品综合停留时间

U型布局：平均停留时间较长，近似标准差大，表明停留时间波动较大。

单元布局：平均停留时间短，近似标准差小，表明停留时间更稳定。

分析：单元布局在产品停留时间上表现更佳，产品流转更快，生产过程更加稳定。

1. 库存周转率

U型布局：库存周转率较低，特别是对于产品B。

单元布局：库存周转率普遍较高。

分析：单元布局的库存流转更为高效，表明其库存管理更优，能更快地将库存转化为销售。

1. 工位平衡率

U型布局：平衡率约为42.87%，表明存在一定程度的工作负荷不均衡。

单元布局：平衡率约为47.36%，表明工作负荷分配更为均衡。

分析：从结果可以看出，单元布局的平衡率略高于 U型布局。这说明单元布局的各工序之间的时间差异最小，生产线最平衡，浪费最少，效率最高。U型布局的平衡率虽然比初始布局高，但是瓶颈工序的时间也比U型布局高，这意味着U型布局的作业周期和产能都比初始布局低。

单元布局在工作站的负荷平衡方面表现更好，有助于提高整体生产效率和减少瓶颈。

1. 综合对比分析

综合以上各项指标，单元布局在订单完成率、每日产出率、产品停留时间、库存周转率和工位平衡率等关键生产指标上均优于U型布局。单元布局提供了更高的订单完成效率、更快的生产速度、更稳定的生产过程、更高效的库存管理以及更均衡的工作负荷分配。因此，根据这些分析数据，单元布局是两者中更优的选择，特别是在追求高效率和高产出的生产环境中。

# 7. 总结

本次课程设计的主要目标是聚焦于混流生产线的设计与仿真，旨在构建能够准确模拟混流生产线运作的仿真模型，并通过模型分析来优化生产线设计。整个过程围绕系统背景与分析、模型构建、仿真实验、改善策略、以及结果验证与讨论展开。

在仿真建模的初始阶段，收集并汇总了数据以评估生产-库存系统的性能，这包括了订单完成量、输入与输出、在制品数量、产品综合停留时间、货架容量随时间变化、各工序状态和各工位状态。通过59天的仿真模拟结果，获得了关于生产-库存系统的深入洞察。例如，发现了订单完成量低、生产效率不高、产品停留时间长、存货周期性波动等多个问题。

针对这些问题，采取了一系列改善措施。例如，针对产品C产量过多的情况，进行了精细化生产计划；对于等待操作人员的工序，优化了人力资源分配；对于工位过于忙碌和相对空闲的问题，重新评估了工序安排和资源分配。这些措施旨在优化生产流程、提高资源利用效率，从而实现更有效的生产，满足订单需求，并提高整体经济效益。

通过模型仿真和优化策略的应用，显著提升了生产线的效率和经济效益，同时增强了其适应快速变化市场需求的能力。

# 参考文献

1. 周泓，邓修权、高德华.生产系统建模与仿真[M].北京：机械工业出版社,2012.8.
2. 朱海平.生产系统建模与仿真[M]. 北京：清华大学出版 社,2022.10