

基于约束理论和综合瓶颈指数的柔性生产线瓶颈设备识别方法

王晓磊, 赵 巍

天津职业技术师范大学机械工程学院, 天津

收稿日期: 2025年7月7日; 录用日期: 2025年7月31日; 发布日期: 2025年8月8日

摘 要

针对不同零件加工顺序的变化导致生产线设备资源与工艺路径配置不合理的问题, 提出了一种基于约束理论(TOC)和综合瓶颈指数的柔性生产线瓶颈设备识别方法。通过分析柔性生产线的设备灵敏度和阻塞程度, 构建瓶颈设备指数矩阵, 并利用多准则决策分析方法(TOPSIS)计算各设备的综合瓶颈指数, 从而精准识别到柔性生产线瓶颈设备, 为工艺规划阶段提供有力支持, 提高生产线整体效率。为验证方法的有效性, 本研究通过仿真构建了多组生产顺序进行对比实验, 结果表明该方法在不同加工顺序组合下均能稳定识别出关键瓶颈设备, 可为工艺规划阶段的设备配置优化提供决策支持, 减少生产线的调试周期。

关键词

瓶颈识别, 约束理论, 柔性生产线, 综合瓶颈指数

Identification of Bottleneck Equipment in Flexible Production Line Based on Constraint Theory and Comprehensive Bottleneck Index

Xiaolei Wang, Wei Zhao

School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin

Received: Jul. 7th, 2025; accepted: Jul. 31st, 2025; published: Aug. 8th, 2025

Abstract

Aiming at the problem of irrational allocation of production line equipment resources and process

文章引用: 王晓磊, 赵巍. 基于约束理论和综合瓶颈指数的柔性生产线瓶颈设备识别方法[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(4): 408-416. DOI: 10.12677/met.2025.144040

paths due to changes in the machining sequences of different parts, a method for identifying bottleneck equipment in flexible production lines based on the theory of constraints (TOC) and the comprehensive bottleneck index is proposed. By analyzing the equipment sensitivity and obstruction degree of the flexible production line, constructing the bottleneck equipment index matrix, and calculating the comprehensive bottleneck index of each equipment by using the multi-criteria decision analysis method (TOPSIS), the bottleneck equipment of the flexible production line can be accurately identified, which can provide powerful support for the process planning stage and improve the overall efficiency of the production line. In order to verify the effectiveness of the method, this study constructs several groups of production sequences for comparison experiments through simulation, and the results show that the method can stably identify the key bottleneck equipment under different combinations of processing sequences, which can provide decision support for the optimization of equipment configuration in the process planning stage and reduce the debugging cycle of the production line.

Keywords

Bottleneck Identification, Theory of Constraints, Flexible Production Line, Composite Bottleneck Index

Copyright © 2025 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

在当前市场环境快速变化的背景下, 制造商面临着产品更新换代速度快和客户需求多样化的挑战, 系统的效率并非由最优秀的部分决定, 而是受限于最薄弱的环节[1]。因此, 为了提升生产效率, 制造业亟需发现和解决生产作业中某一环节的处理能力限制整个系统最大产出的瓶颈问题[2]。

限制生产系统稳定产出的有多种原因, 其中三大主要类别为资源、市场和法律法规[3]。在制造过程中, 资源因素通常是导致瓶颈的关键。例如, 设备陈旧或生产能力不足可能会导致生产中断和节奏失调, 这种情况被称为设备瓶颈[4]。另外, 原材料短缺或供应延迟可能会引起断断续续地物料供应, 这被称为供应瓶颈[5]。还有一种情况是由于操作人员的技能不熟练或专业水平不足, 导致生产速度减慢和产品质量下降, 这被称为员工技能瓶颈。公司的生产环境、员工能力、物料供应和设备状况各不相同, 导致生产瓶颈的资源因素也各不相同。乔非[6]等人提出分层瓶颈概念, 对制造系统中累积负荷最高的加工中心设备进行瓶颈分析, 对制造系统的分层瓶颈进行调度, 平衡各层生产线的生产负荷。刘明周[7]等人考虑到产品的客户订单延迟要付出很高成本, 因此通过设备使用率和订单交货延迟期两个约束指标识别生产系统中的瓶颈。舒云聪[8]等人对仿真构架车间的利用率、在制品数量等关键参数进行特征分析, 识别瓶颈工序, 根据瓶颈工序特性使用模拟退火算法优化人工资源配置。

在生产线瓶颈识别的研究中, 指标识别法[9][10]、数学分析法[11][12]、数据分析法[13]-[15]以及多属性识别法[16]等方法已被广泛应用于生产车间的瓶颈分析, 并取得了显著的效果。

对于产品结构单一、工艺稳定、流程简单的传统生产线, 通过基础工时数据即可完成瓶颈工序的测算。随着制造业向柔性化、智能化方向发展, 柔性制造系统的现代生产线面临着多品种混线生产、动态工艺路线等复杂工况, 使得传统的单一指标分析方法不再适合此类车间。近年来, 部分研究开始尝试综合多个单指标(如设备负载、故障率、等待时间等)进行多维度分析, 更全面地识别生产系统中的瓶颈环节。这种方法不仅能够更准确地定位瓶颈, 还能揭示瓶颈产生的深层次原因, 为优化生产流程提供更可靠的

依据, 克服单一指标识别方法的局限性。

在柔性制造生产线中, 由于零件加工顺序的变化而导致的阻塞现象和生产耗时的变化敏感性, 这两种因素在众多企业中普遍存在, 显著体现了生产瓶颈的成因。本文针对生产线多种工件的加工顺序变化和设备资源竞争等特点, 提出结合仿真软件与综合瓶颈的生产线瓶颈识别方法, 以多属性指标识别由于零件加工顺序的变化导致生产线设备资源与工艺路径配置不合理的问题, 通过仿真案例对该方法进行论述与验证。

2. 柔性制造生产线环境分析

2.1. 柔性制造生产线生产情况

柔性制造生产线环境描述如下: i 个工件 $N = \{N_1, N_2, \dots, N_i\}$ 需要在 m 个机器 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_i\}$ 上加工, 每个工件由 J_k 道工序加工而成, 各工序之间存在着工艺上的先后约束。每台设备能加工的工序类型是确定的。 T_{ikm} 表示工件 i 的第 J_k 道工序在机器 M_m 上的标准加工时间。

已知生产线各设备加工顺序和道工序加工所需的时间, 还满足以下假设条件:

- 1) 生产线设备正常稳定无故障;
- 2) 初始状态下所有的设备均处于空闲状态;
- 3) 任一时刻每台机床只能加工一个工件;
- 4) 任一时刻每个工件只能在一台机床上加工;
- 5) 生产线上可以同时加工多种零部件;
- 6) 一道工序一旦开始加工中途不允许中断;
- 7) 每道工序的加工需要符合工艺要求中的顺序约束以及对应设备上紧前工序加工完成后, 才能开始加工;
- 8) 各个工件之间相互独立, 相互之间没有优先级差别。

2.2. 问题分析

柔性制造生产线上的工件加工顺序的可变性、设备资源竞争性和生产线的运作协调性具体分析:

不同工件的加工路径、工序顺序和设备需求各不相同, 导致设备负载不均衡。以加工不同的四个工件为例, 工件 N_1 、 N_4 需依次经三轴加工中心和镗铣床, 工艺距离跨度大涉及多类设备。而工件 N_2 、 N_3 则可能跳过车床工序, 需要多次往返距离相邻的车床和滚齿机进行加工。某工件可能需要多次经过铣床, 而另一工件则更依赖车床, 使得部分设备负载率会急剧上升。同一生产线工件工艺路线不同可能使得加工设备、缓冲区和运输设备的负载不均衡, 这种工序组合不同、设备使用频次差异直接导致半成品缓冲区需同时处理多种在制品状态, 增加缓冲区阻塞程度, 从而降低生产线整体效率。

3. 基于约束理论和综合瓶颈指数的生产线瓶颈识别

3.1. 综合瓶颈指数

约束理论(Theory of Constraints, TOC)的核心思想是识别制约系统目标实现的关键约束(即瓶颈), 并通过系统性改进这些约束来优化整体性能[17]。对于自动化程度高的生产线来说, 生产瓶颈是指对工艺路线、加工时间最敏感的工位, 从而阻碍了生产进度。因此, 定义了综合瓶颈指数(Composite Bottleneck Index, CBI)来识别柔性车间的实际生产瓶颈, 并将其描述为:

$$CBI_j^t = \omega_1 a_j^t + \omega_2 b_j^t \quad (1)$$

CBI 的值越高, 表明该设备成为生产瓶颈的可能性越大。式中 CBI_j^t 为第 j 站在 t 时刻的 CBI 值; a_j^t 和 b_j^t 分别为 j 站在 t 时间的内部和外部特征; ω_1 和 ω_2 分别为内部特征和外部特征的权重, $\omega_1 + \omega_2 = 1$ 。

内部特征: 用设备工作耗时的灵敏度 a_j^t 描述生产线的内部瓶颈特征。瓶颈设备的微小延迟会显著延长整体生产周期, 而非瓶颈设备即使停机 1 小时也可能对系统影响微弱。设 n 为生产线的设备数, $t_j (i=1, 2, \dots, n)$ 为在既定生产任务下设备的生产或运输时耗, f 为生产系统总完工时间, f 对设备 j 工作耗时改变的灵敏度为:

$$a_j^t = \left| \frac{\Delta f_j}{\Delta t_j} \right|, i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

取 a_j 为设备 j 的瓶颈特征指标值, 称为设备瓶颈指数, 若 $a_j' > a_r', \forall j \neq r$, 则设备 n 为系统中的瓶颈设备。

外部特征: 用生产线的阻塞瓶颈程度 b_j^t 描述生产线的内部瓶颈特征。加工路线和操作时间的不确定性会导致零件在某些工位堆积, 影响制造系统的运行, 缓冲长度可以反映制造系统运行是否顺畅和设备因上下游制约导致的无效等待时间占比, 识别隐性设备资源竞争。因此, 可以用它来描述生产线的阻塞瓶颈程度, 其计算公式如下:

$$b_j^t = 1 - e^{-\frac{L_j^t}{L}}, j=1, 2, \dots, J \quad (3)$$

式中 L 为缓冲区的最大能力, 为常数; L_j 为工位 j 的实际缓冲长度。

3.2. 综合权重分析

利用层次分析法计算内部特征和外部特征的权重, 可避免生产节拍因工艺路线不同导致的误判, 构建权重特征矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & \cdots & a_{2n} \\ a_{12} & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

运用几何平均法计算每行元素的几何平均值:

$$\omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}} \quad (5)$$

对几何平均值归一化, 得到权重向量;

需要通过一致性指标(CI)和一致性比率(CR)来检验矩阵的一致性;

计算一致性指标 CI :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

查找随机一致性指标 RI (根据矩阵阶数查表);

计算一致性比率 CR :

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

如果 $CR < 0.1$, 则认为判断矩阵的一致性是可以接受的; 如果 $CR > 0.1$, 则需要重新调整判断矩阵, 直到满足一致性要求。

3.3. 基于 TOPSIS 的综合瓶颈指数识别

生产瓶颈通常来自于复杂性和不确定性。因此, 它不仅受到先前瓶颈的影响, 还受到生产系统状态的影响。为了预测生产瓶颈, 本研究选择瓶颈指标和典型生产数据作为输入数据, 捕捉系统中生产瓶颈的特征。将不同设备的瓶颈 CBI'_j 在不同的时间点进行计算和记录, 并进行堆叠, 形成一个 $n \times j$ 的矩阵作为特征数据, 如图 1 所示。

$$\begin{array}{l} \text{仿真 } 1 \rightarrow \left(CBI_1 \right) \\ \text{仿真 } 2 \rightarrow \left(CBI_2 \right) \\ \vdots \\ \text{仿真 } n \rightarrow \left(CBI_n \right) \end{array} = CBI = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & \cdots & e_{1i} & \cdots & e_{1j} \\ e_{21} & e_{22} & \cdots & e_{2i} & \cdots & e_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1} & e_{n2} & \cdots & e_{ni} & \cdots & e_{nj} \end{pmatrix} \leftarrow \begin{pmatrix} O_1 \\ O_2 \\ \vdots \\ O_n \end{pmatrix}$$

Figure 1. $n \times j$ order bottleneck index matrix
图 1. $n \times j$ 阶瓶颈指数矩阵

在计算出瓶颈设备指数后, 虽然较高的指数往往指向潜在的瓶颈设备, 但这并不一定准确代表真正的瓶颈。为此, 需要结合多准则决策分析(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS)进行数据处理, 全面地评估瓶颈设备的综合特征值, 各方法要素见表 1。

Table 1. Correspondence between TOPSIS method and equipment bottleneck identification elements
表 1. TOPSIS 方法与设备瓶颈识别要素对应关系

TOPSIS 各要素	瓶颈识别各要素
候选方案	生产系统中的设备
属性	设备在某个生产能力改变量下的瓶颈指数
属性值	设备在某个生产能力改变量下的瓶颈指数值
多属性	设备在多个生产能力改变量下的多个瓶颈指数
决策矩阵	瓶颈指数矩阵 CBI
理想解	在不同生产能力改变量下瓶颈指数都是最高的设备
负理想解	在不同生产能力改变量下瓶颈指数都是最低的设备
候选方案与理想解的贴进度	设备的综合瓶颈矩阵

为消除量纲影响, 对决策矩阵进行标准化处理, 得到标准化矩阵 X :

$$X_{nj} = \frac{O_{ij}}{\sqrt{\sum_{n=1}^n x_{nj}^2}} \quad (8)$$

标准化后的瓶颈指数矩阵为:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1i} & \cdots & x_{1j} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2i} & \cdots & x_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{ni} & \cdots & x_{nj} \end{pmatrix} \quad (9)$$

决定理想值和负理想值:

$$X^+ = (x_1^+, x_2^+, \dots, x_j^+), x_j^+ = \max(x_{nj}) \quad (10)$$

$$X^- = (x_1^-, x_2^-, \dots, x_j^-), x_j^- = \min(x_{nj}) \quad (11)$$

采用欧氏距离方法计算各设备与理想值和负理想值之间的距离:

$$S_n^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{nj} - x_j^+)^2} \quad (12)$$

$$S_n^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{nj} - x_j^-)^2} \quad (13)$$

- x_{nj} 是第 n 个方案在第 j 个指标上的加权标准化值;
- x_j^+ 是理想解在第 j 个指标上的值;
- x_j^- 是负理想解在第 j 个指标上的值;
- m 是指标数量。

计算各设备与理想解的贴近度 C_n , C_n 越大, 该设备越贴近理想解, 瓶颈程度越低:

$$C_n = \frac{S_n^-}{S_n^+ + S_n^-} \quad (14)$$

综合瓶颈指数综合 n 次试验中各个设备的瓶颈特征指数, 消除了单次试验中可能出现的偶然因素, 更加全面地反映设备的瓶颈特征, 用其作为瓶颈识别的最终依据更加准确。

4. 仿真案例验证

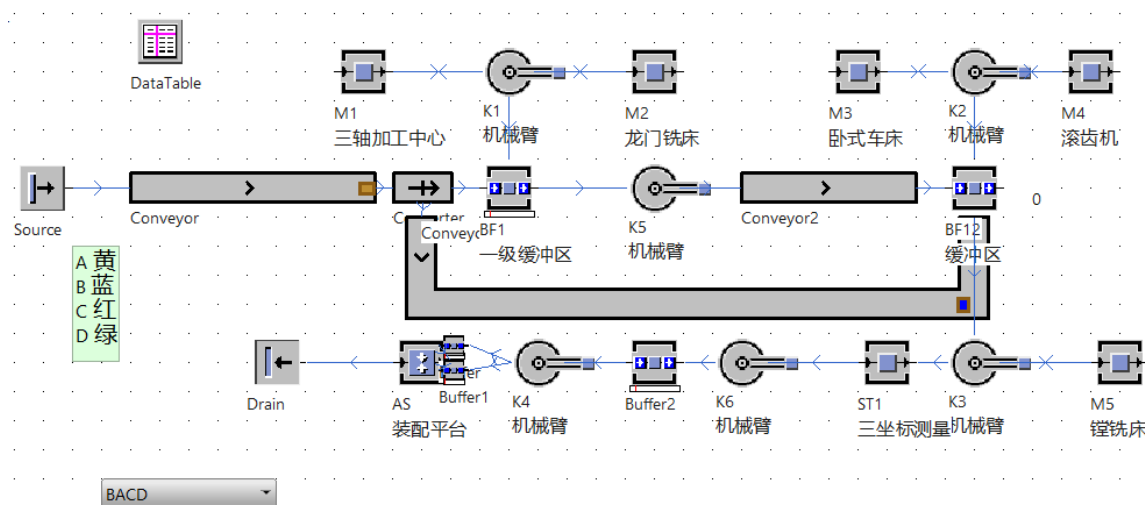


Figure 2. Production line station layout
图 2. 生产线工位布局

该柔性制造生产线用于加工二级减速器的各个组件, 包括上箱体、下箱体、大齿轮轴和小齿轮轴等, 整个生产流程及工位安排如图 2 所示。生产线采用连续作业模式, 毛坯件依次从物料源经过传动带进入生产线, 在关键位置安装了传感器来精确控制工件流转。当工件到达指定位置需要拾取时, 五轴机械臂便会精确抓取并放置工件至加工工位, 各毛坯件在生产线上同步进行加工, 确保生产效率。每完成一个工件的加工工序, 机械臂会将其有序地放置到三坐标测量仪上进行尺寸测量, 确保加工精度。随后, 工

件被送至装配平台, 在这里完成减速器的组装。经过一系列精密的制造流程, 最终输出高质量的减速器成品。利用 Plant Simulation 仿真系统完成柔性制造生产线设计。

加工一级减速器的 4 种工件($N_1 \sim N_4$)经过 5 台加工设备($M_1 \sim M_5$)的生产工艺路线如表 2 所示。

Table 2. Workpiece processing information table
表 2. 工件加工信息表

工件	数量	加工工艺路线
N_1	1	$M_1 \rightarrow M_5$
N_2	1	$M_3 \rightarrow M_4$
N_3	1	$M_3 \rightarrow M_4$
N_4	1	$M_2 \rightarrow M_5$

工件在设备位置、机器加工时间、工艺路线以及工艺参数不变的情况下, 改变零件进入生产线的加工顺序, 各设备的灵敏度和阻塞情况如表 3 所示。

Table 3. Internal characteristic sensitivity bottleneck values of the device
表 3. 设备的内部特征灵敏度瓶颈值

加工顺序	设备										
	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	K_1	K_5	K_2	K_3	K_6	K_4
D→C→A→B	0.1742	0.1893	0.2821	0.2519	0.185	0.0335	0.0288	0.054	0.0605	0.0576	0.0525
A→B→D→C	0.1717	0.1866	0.2781	0.2483	0.1824	0.033	0.0284	0.0532	0.0596	0.0568	0.0517
D→C→B→A	0.1389	0.1509	0.3403	0.3042	0.1475	0.0267	0.023	0.0706	0.0517	0.0459	0.0418
D→B→C→A	0.1405	0.1527	0.3666	0.3019	0.1492	0.027	0.0232	0.0774	0.0523	0.0464	0.0423
B→A→C→D	0.1777	0.1931	0.2879	0.257	0.1887	0.0342	0.0294	0.0551	0.0617	0.0588	0.0535
A→B→C→D	0.1405	0.1527	0.3385	0.3019	0.1492	0.027	0.0232	0.0714	0.0523	0.0464	0.0423

$K_1, K_2, \dots, K_6$ 是负责拾取并运输的机械手, 灵活且耗时低; $M_1, M_2, \dots, M_5$ 是产线的加工机床, 任务重且加工耗时高, 机床的加工用时变化大极易影响生产线的平稳与正常运行, 因此主要比较机床之间的瓶颈值变化。

对象	工作中	设置	等待中	已阻塞	上电/掉电	失败	已停止	已暂停	未计划	部分
M1	20.78%	0.00%	79.22%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
K1	11.03%	0.00%	88.97%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
M2	18.60%	0.00%	81.40%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
K3	11.61%	0.00%	88.39%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
M3	17.22%	0.00%	82.78%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
K2	10.63%	0.00%	89.37%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
M5	30.57%	0.00%	68.93%	0.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
ST1	28.89%	0.00%	71.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
K5	4.28%	0.00%	95.72%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
K6	9.23%	0.00%	90.77%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
M4	40.00%	0.00%	60.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
BF1	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
BF12	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

部分状态

Figure 3. Blocking of external features of production line equipment with A→B→C→D as the processing sequence
图 3. 以 A→B→C→D 为加工顺序的产线设备外部特征阻塞情况

以工件不同加工顺序 A→B→C→D 与 B→A→C→D 为例，设备的外部特征阻塞瓶颈值如图 3、图 4 所示：

对象	工作中	设置	等待中	已阻塞	上电/掉电	失败	已停止	已暂停	未计划	部分
M1	8.80%	0.00%	91.20%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
K1	8.73%	0.00%	91.27%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
M2	28.89%	0.00%	71.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
K3	11.61%	0.00%	88.28%	0.11%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
M3	17.22%	0.00%	82.78%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
K2	10.11%	0.00%	89.89%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
M5	33.33%	0.00%	65.78%	0.88%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
ST1	3.61%	0.00%	96.33%	0.06%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
K5	4.28%	0.00%	95.72%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
M4	37.86%	0.00%	62.14%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
BF1	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	
BF12	0.00%	0.00%	100.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	

Figure 4. Blocking of external features of production line equipment with B→A→C→D as the machining sequence
图 4. 以 B→A→C→D 为加工顺序的产线设备外部特征阻塞情况

设备瓶颈指标综合权重由公式(4)~(7)得内部权重 w_1 为 0.64，外部权重 w_2 为 0.36。
以设备灵敏度和产线阻塞程度的综合瓶颈指数与理想解的贴近度 C_n 如图 5 所示：

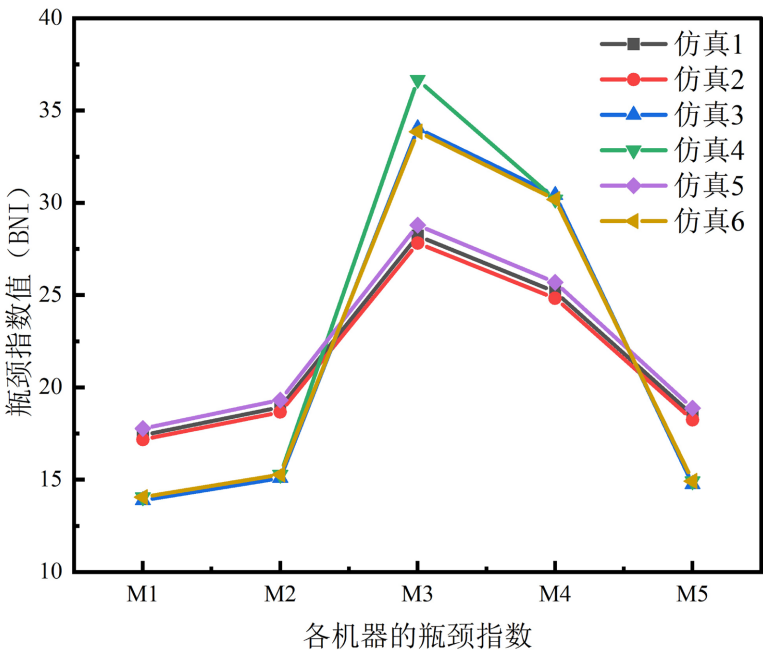


Figure 5. Proximity of the composite bottleneck index
图 5. 综合瓶颈指数的贴近度

综合瓶颈指数与理想解的贴近度 C_n 越低，表明该机器成为生产瓶颈的可能性越高。在不调整各机器加工时间的前提下，通过改变减速机组件的加工顺序进行了六组各一小时的仿真实验。计算结果显示，在六组仿真中， M_3 和 M_4 机器的综合瓶颈指数与理想解的贴近度均为最低，据此可以判定 M_3 和 M_4 为生

产系统中的瓶颈设备, 从而导致设备加工不及时、机械臂拾取混沌以及生产线出现工作站的阻塞现象, 因此在生产过程中应多加关注, 可以考虑调节设备加工参数或优化工作环节来缓解生产瓶颈的压力, 提高生产率。

5. 结论

在生产流程中, 瓶颈设备的存在往往会导致半成品积压, 并引发后续工序的产能浪费和闲置, 这些问题直接降低了生产线的整体效率。对柔性制造生产线进行仿真建模和分析, 为了有效识别这些瓶颈设备, 采用了基于多准则决策分析方法, 提出了设备敏感度和生产线堵塞程度两项瓶颈评价指标, 有效量化柔性生产线各设备的瓶颈优先级。通过工件六组不同加工顺序仿真分析, 综合表明 M_3 和 M_4 为柔性制造生产线中影响生产效率较大的瓶颈设备, 为后期生产调度的合理规划和有效控制提供了依据。

参考文献

- [1] Wieslaw, U. and Patrycja, R. (2020) Methodology for Bottleneck Identification in a Production System When Implementing TOC. *Engineering Management in Production and Services*, **12**, 74-82. <https://doi.org/10.2478/emj-2020-0012>
- [2] 肖序, 李成, 曾辉祥. MFCA 的生命周期视角扩展: 机理、方法与案例[J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(12): 3164-3174.
- [3] 邹方林. 工程变更下的瓶颈分析及对策[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [4] 陈磊, 王相柠, 娄恒权, 等. 针对产能损失的生产线瓶颈辨识与转移预测[J]. 现代制造工程, 2022(4): 21-28.
- [5] 凌琳, 刘明周, 王强. 物料流瓶颈对制造车间不确定环境的敏感性研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(2): 224-232.
- [6] 乔非, 马玉敏, 李莉, 等. 基于分层瓶颈分析的多重入制造系统调度方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(4): 855-860.
- [7] 刘明周, 杜伟山, 葛茂根, 等. 生产系统瓶颈指数及瓶颈漂移问题研究[J]. 现代制造工程, 2009(1): 22-24+28.
- [8] 舒云聪, 朱海平, 沈继统, 等. 基于仿真的构架车间瓶颈识别与人工资源配置优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2024(6): 1-5+11.
- [9] Li, L. (2018) A Systematic-Theoretic Analysis of Data-Driven Throughput Bottleneck Detection of Production Systems. *Journal of Manufacturing Systems*, **47**, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.03.001>
- [10] 薛政, 李涛, 彭世通. 不确定环境下再制造系统能耗瓶颈漂移分析[J]. 大连理工大学学报, 2020, 60(3): 251-261.
- [11] 冯欢欢, 袁逸萍, 李晓娟. 基于网络分析的制造车间瓶颈识别方法研究[J]. 机械设计与制造, 2016(10): 5-7.
- [12] Jacobs, D. and Meerkov, S.M. (1995) A System-Theoretic Property of Serial Production Lines: Improvability. *International Journal of Systems Science*, **26**, 755-785. <https://doi.org/10.1080/00207729508929067>
- [13] Subramaniyan, M., Skoogh, A., Salomonsson, H., Bangalore, P. and Bokrantz, J. (2018) A Data-Driven Algorithm to Predict Throughput Bottlenecks in a Production System Based on Active Periods of the Machines. *Computers & Industrial Engineering*, **125**, 533-544. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.04.024>
- [14] 翟颖妮, 王军强, 褚巍, 等. 基于 TOC 理论的大规模作业车间调度问题研究[J]. 机械科学与技术, 2015, 34(8): 1222-1228.
- [15] Chang, X. and Jia, X. (2023) A Deep AR-Based Hybrid Probabilistic Prediction Model for Production Bottleneck of Flexible Shop-Floor in Industry 4.0. *Computers & Industrial Engineering*, **185**, Article 109644. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109644>
- [16] Muthiah, K.M.N. and Huang, S.H. (2007) Overall Throughput Effectiveness (OTE) Metric for Factory-Level Performance Monitoring and Bottleneck Detection. *International Journal of Production Research*, **45**, 4753-4769. <https://doi.org/10.1080/00207540600786731>
- [17] 何文中, 洪跃. 基于 TOC 理论的生产系统瓶颈识别分析与优化[J]. 机械制造, 2012, 50(7): 83-85.