

重大工程装备

含能材料生产系统排产中的瓶颈设备
识别方法研究王冬磊¹, 闫文涛², 张智禹², 尹爱军²

(1. 中国工程物理研究院 化工材料研究所, 四川 绵阳 621900;

2. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044)

摘要: **目的** 识别含能材料生产车间中的瓶颈设备, 对生产系统作出预警, 为排产方案制定以及实际生产工作提供指导, 改善生产系统的加工效率。**方法** 针对传统瓶颈设备识别方法评价指标单一、识别过程复杂的问题, 研究一种基于灵敏度分析和逼近理想解排序法(TOPSIS)融合的瓶颈设备识别方法。该算法首先确定作业指标与设备加工量关系的灵敏度矩阵, 然后运用逼近理想解排序法, 计算设备的综合瓶颈指数, 通过比较各设备的综合瓶颈指数, 识别出瓶颈设备。**结果** 采用含能材料生产车间实际数据进行仿真实验, 可以在生产系统运行之前识别出系统中的瓶颈设备。**结论** 通过与其他方法进行对比分析, 验证了研究的方法的有效性和优越性。

关键词: 含能材料; 瓶颈识别; 灵敏度分析; TOPSIS 法

中图分类号: TJ104

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)08-0072-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.08.013

Research on Bottleneck Equipment Identification Method in Production
Scheduling of Energetic Materials Production SystemWANG Dong-lei¹, YAN Wen-tao², ZHANG Zhi-yu², YIN Ai-jun²

(1. Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

2. School of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: This paper aims to identify the bottleneck equipment in the production workshop of energetic materials, give early warning to the production system, provide guidance for the production scheduling plan and actual production work, and improve the processing efficiency of the production system. Aiming at the problems of single evaluation index and complicated identification process of traditional bottleneck equipment identification method, this paper studies a bottleneck equipment

收稿日期: 2021-05-06; 修订日期: 2021-06-08

Received: 2021-05-06; Revised: 2021-06-08

基金项目: 重庆市人工智能技术创新重大主题专项重点项目(cstc2017rgzn-zdyfx0007)

Fund: Chongqing Municipal Artificial Intelligence Technology Innovation Major Theme Special Project(cstc2017rgzn-zdyfx0007)

作者简介: 王冬磊(1977—), 男, 副研究员, 主要研究方向为数据库与知识工程。

Biography: WANG Dong-lei (1977—), Male, Associate researcher, Research focus: database and knowledge engineering.

通讯作者: 尹爱军(1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为设备故障预测与健康管理、大数据与人工智能。

Corresponding author: YIN Ai-jun (1978—), Male, Ph.D., Professor, Research focus: equipment failure prediction and health management, big data and artificial intelligence.

引文格式: 王冬磊, 闫文涛, 张智禹, 等. 含能材料生产系统排产中的瓶颈设备识别方法研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(8): 072-077.

WANG Dong-lei, YAN Wen-tao, ZHANG Zhi-yu, et al. Research on bottleneck equipment identification method in production scheduling of energetic materials production system[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(8): 072-077.

identification method based on the fusion of sensitivity analysis and TOPSIS. The algorithm first determines the sensitivity matrix of the relationship between the operation index and the processing capacity of the equipment, and then uses the technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) to calculate the comprehensive bottleneck index of the equipment, and identifies the bottleneck equipment by comparing the comprehensive bottleneck index of each equipment. Using the actual data of the energetic material production workshop for simulation experiments, the bottleneck equipment in the system can be identified before the operation of production system. The comparative analysis with other methods verifies that this research method is effective and superior.

KEY WORDS: energetic materials; bottleneck identification; sensitivity analysis; TOPSIS method

约束理论认为, 瓶颈是制约生产系统运行的关键, 瓶颈的损失致使生产系统整体损失。只有从瓶颈出发, 并最大限度地优化瓶颈的生产能力, 才能使整个生产系统的有效产出和整体效益得到提升。由于含能材料生产系统存在生产资源的约束, 必然存在限制系统有效产出的瓶颈。因此, 准确并快速地识别瓶颈是含能材料进行生产管理和过程控制的关键和前提。

传统的瓶颈识别方法以设备负荷、待加工工件队列的长度等特征来定义和识别瓶颈, 将设备负荷最大、待加工工件队列最长的设备作为系统的瓶颈。王刚等^[1]采用遗传算法将调度方案和瓶颈识别相结合, 指出具有最大出现频率的瓶颈即为系统瓶颈。刘志等^[2]利用瓶颈指数建立了综合瓶颈度和独立瓶颈度指标, 通过度量各个制造单元成为瓶颈的能力, 实现多瓶颈的动态识别。乔非等^[3]利用仿真和智能优化算法分析的优势进行瓶颈识别, 可操作性强, 但由于不同生产系统需要不同的仿真模型和算法, 推广受到限制。

大多瓶颈识别方法属于后验的识别方法。ZHANG^[4]提出了在作业排产之前瓶颈识别的方法, 该方法采用随机分派规则组合生成排产方案, 识别的准确性依赖于分派规则组合的多样性和仿真参数, 对于大规模排产问题实施难度大。翟颖妮^[5]提出了一种基于正交实验的瓶颈识别方法, 能够在生产系统运行之前, 通过有限次正交实验, 识别出系统的瓶颈设备, 但对于大规模的瓶颈识别问题, 正交表的构造非常困

难, 降低了该方法的适应性。文中根据瓶颈控制着整个系统产出的原则, 研究了基于灵敏度分析的先验瓶颈识别方法。该方法通过衡量设备容量和系统作业指标之间的关系, 实现瓶颈识别。对于不同的生产系统, 可以通过灵敏度进行统一测量。

1 问题描述与含能材料排产模型

1.1 含能材料生产系统

含能材料生产过程连续, 且工艺过程固定, 生产某种或某类产品时, 整个生产过程按照该种产品的工艺流程依次进行。对于不同的产品需求标准, 同类产品可能由于某种元素含量的不同, 生产加工过程中对原料以及生产环境的要求不同, 应按照不同的工序进行加工。含能材料的一般生产流程如图 1 所示。含能材料生产车间加工 n 种不同种类的产品, 每种产品有多道工序。其中 $J_i, i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 表示第 i 种产品, 第 i 种产品的生产成本可以表示为 Z_i , 第 i 种产品的第 j 道工序记为 O_{ij} 。由于含能材料属于化工产品, 对产品的存储具有特定要求, 将工序 O_{ij} 与 $O_{i(j-1)}$ 之间的单位时间存储费用记为 I_{ij} 。根据产品的加工路线, 安排 n 种产品在 m 台设备 $M_k, k \in \{1, 2, \dots, m\}$ 上加工, 产品 i 的第 j 道工序在设备 k 上的加工时间为 t_{ijk} , 作业排产方案的完工时间表示为 C 。

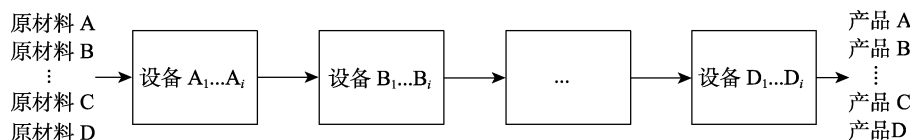


图 1 含能材料生产流程

Fig. 1 Production process of energetic materials

含能材料生产过程连续, 强调整体性, 不同生产设备之间会有部分管道连接, 故而瓶颈设备的制约因素会影响产品的整个加工过程。文中研究的核心问题为: 针对生产过程的 m 台设备, 通过考察设备容量与系统作业指标的关系, 得到 m 台设备的灵敏度矩阵, 然后运用 TOPSIS 综合评价法, 识别出瓶颈设备。

1.2 含能材料生产系统排产模型

在实际生产中, 排产模型常用的作业指标主要包括最大完工时间、设备总负荷、总拖期时间、平均流经时间、生产成本等。对于含能材料生产车间排产问题, 为消除单一排产作业指标对瓶颈设备识别结果准

确性的影响,减小模型的计算复杂程度,选取排产方案的最大完工时间和生产成本的简单加和最小为车间排产性能指标。其中,生产成本主要考虑产品工序间的存储成本。

$$f = \min\{\max\{C_{ij} \mid i=1,2,\dots,n\} + \min\{\sum_{i=1}^n \sum_{j=2}^{O_i} I_{ij}(S_{ij} - C_{i(j-1)})\} \quad (1)$$

式中: C_{ij} 为产品 J_i 第 j 道工序的完工时间; O_i 为产品 i 的工序总数; S_{ij} 为第 i 种产品 J_i 的第 j 道工序的开始时间。约束条件如下:

1) 一种产品唯有前一道工序加工完成后,才能开始下一道工序。

$$S_{ij} + t_{ij} \leq S_{i(j+1)} \quad \forall i \in \{1,2,\dots,n\} \quad \forall j \in \{1,2,\dots,O_i-1\} \quad (2)$$

2) 任一时刻,一台设备只能加工一种产品。

$$S_{pqk} + \lambda(1 - \beta_{ipk}) \geq C_{ijk} \quad \forall i, p \in \{1,2,\dots,n\} \quad \forall k \in \{1,2,\dots,m\} \quad (3)$$

其中: $\beta_{ipk} = \begin{cases} 1 & \text{产品 } i \text{ 先于产品 } p \text{ 在机器 } k \text{ 上加工} \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$

3) 产品工序加工过程中不允许中断。

$$S_{ij} + t_{ij} = E_{ij} \quad \forall i \in \{1,2,\dots,n\} \quad \forall j \in \{1,2,\dots,O_i\} \quad (4)$$

2 瓶颈识别

2.1 瓶颈设备定义

1) 灵敏度。含能材料生产系统设备总数为 m , 车间排产的作业指标为 f 。在给定生产任务下, 设备 M_i 的生产量为 L_i , 则系统作业指标 f 对设备生产量 L_i 改变的灵敏度为:

$$\mu_i = \left| \frac{\Delta f_i}{\Delta L_i} \right|, i=1,2,\dots,m \quad (5)$$

2) 瓶颈设备。当且仅当设备 M_i 的灵敏度为最大值时, 设备 M_i 为瓶颈设备。

$$\mu_{M_i} = \max\{\mu_i \mid i=1,2,\dots,m\} \quad (6)$$

2.2 灵敏度矩阵计算

在确定的车间排产环境下, 各种产品的生产量、工艺路线以及各个工序的加工时间确定, 产品的种类为 n , 设备数量为 m , 令设备的标号为 i , $i \in M = \{1,2,\dots,m\}$ 。设 Ω 为生产系统排产方案的集合, Ω_j 为第 j 次实验中随机产生的排产方案集合, $\Omega_j \in \Omega$, 其元素个数为 N_j , $j \in N = \{1,2,\dots,\omega\}$ 。 Ω_j 中的元素 θ_j^k 表示第 k 个随机产生的排产方案,

$k \in \{1,2,\dots,N_j\}$ 。排产方案 θ_j^k 的作业指标值表示为 f_j^k , 则第 j 次试验 Ω_j 中各排产方案的平均作业指标为:

$$\overline{f_{\Omega_j}^0} = \frac{1}{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} f_j^k \quad (7)$$

设第 j 次试验设备生产量的改变量为 ΔL_j , $\Delta L_j < 0$ 表示设备加工量减少了 $|\Delta L_j|$, $\Delta L_j > 0$ 表示设备加工量增加了 $|\Delta L_j|$ 。对于设备 $A_i \in A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, 改变其加工量, 同时保持其他设备加工量不变, 重新计算排产方案集合 Ω_j 中各方案的作业指标值, 并取平均值, 用 $\overline{f_{\Omega_j}^i}$ 表示, 则生产系统作业指标的改变值为:

$$\Delta f_{ij} = \overline{f_{\Omega_j}^i} - \overline{f_{\Omega_j}^0} \quad (8)$$

根据式 (5), 可以得到设备 A_i 在加工量改变值为 ΔL_j 时的灵敏度。

$$\mu_{ij} = \left| \frac{\Delta f_{ij}}{\Delta L_j} \right| = \left| \frac{\overline{f_{\Omega_j}^i} - \overline{f_{\Omega_j}^0}}{\Delta L_j} \right| \quad (9)$$

保持设备加工量 ΔL_j 不变, 对生产系统中其他设备进行同样操作, 可以得到 m 台设备在第 j 次试验中的灵敏度。为消除单次试验可能造成的偶然性因素, 增加瓶颈设备识别的可靠性, 通过采用不同的设备加工量改变值 ΔL_j 进行 ω 次不同的实验, 得到生产系统中各设备加工量在不同改变值下的 $m \times \omega$ 阶灵敏度矩阵, 如式 (10) 所示。

$$U_{m \times \omega} = \begin{bmatrix} \mu_{11} & \cdots & \mu_{1\omega} \\ \vdots & & \vdots \\ \mu_{m1} & \cdots & \mu_{m\omega} \end{bmatrix} \leftarrow \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

2.3 基于 TOPSIS 的设备综合瓶颈指数

TOPSIS 法亦称理想解法, 是一种多目标决策分析方法。以生产系统中的设备作为 TOPSIS 要素中的决策方案, 将其在不同设备加工量改变值下的灵敏度作为其在不同属性下的属性值, 决策矩阵为灵敏度矩阵, 正理想解与负理想解分别为在不同设备加工量改变值下灵敏度都是最高和最低的设备。通过 TOPSIS 法计算各设备与理想解之间的贴近度, 将其作为设备的综合瓶颈指数。其具体的计算步骤如下:

1) 标准化灵敏度矩阵:

$$\mu'_{ij} = \frac{\text{MAX}_j - \mu_{ij}}{\text{MAX}_j - \text{MIN}_j}, i \in M, j \in N \quad (11)$$

式中: $\text{MAX}_j = \max\{\mu_{ij} \mid i \in M\}$, $j \in N$, $\text{MIN}_j = \min\{\mu_{ij} \mid i \in M\}$, $j \in N$

2) 计算各设备与正理想值和负理想值的距离, 距离取欧式距离。

$$S_i^+ = D_{Eu}(A_i, B^+) = \sqrt{\sum_{j=1}^{\omega} (\mu'_{ij} - B^+)^2}, i \in M$$
$$S_i^- = D_{Eu}(A_i, B^-) = \sqrt{\sum_{j=1}^{\omega} (\mu'_{ij} - B^-)^2}, i \in M$$

(12)

其中： $B^+ = MAX'_j = \max\{\mu'_{ij} | i \in M\}, j \in N, B^- = MIN'_j = \min\{\mu'_{ij} | i \in M\}, j \in N$

3) 计算各设备与理想解之间的贴近度：

$$E_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}, i \in M$$

(13)

将设备与理想解之间的贴近度作为设备的综合瓶颈指数，全面考虑了 ω 次实验中各设备的灵敏度特征，更能反应设备的瓶颈特性，且减小了因单次实验存在的偶然性因素对瓶颈设备识别结果准确性的影响，综合瓶颈指数最大的设备即为识别的瓶颈设备。

3 算例仿真与分析

3.1 算例描述

通过模拟含能材料生产车间的实际数据，获得测试算例。含能材料生产车间中的 5 台设备 ($M_1, M_2, \dots, M_5$) 加工 6 种不同产品 ($J_1, J_2, \dots, J_6$)，对该生产系统进行瓶颈识别。设备的单位时间加工量见表 1，产品的工艺路线、生产量、原料成本以及工序间存储费用见表 2，加工工时信息见表 3。假设所有资源在计划期内均可用。

表 1 设备相关参数
Tab.1 Device-related parameters

设备	单位时间加工量/(kg·h ⁻¹)
M_1	160
M_2	120
M_3	80
M_4	150
M_5	180

表 2 产品工艺信息
Tab.2 Product process information

产品	生产量/kg	工艺路线	工序间存储费用/(元·min ⁻¹)
J_1	820	$M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5$	85
J_2	460	$M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_5$	60
J_3	600	$M_1 \rightarrow M_3 \rightarrow M_2 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5$	55
J_4	290	$M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5$	75
J_5	1080	$M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4 \rightarrow M_5$	65
J_6	930	$M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4$	60

表 3 产品工时信息
Tab.3 Information on product working hours

产品	M_1		M_2		M_3		M_4		M_5		min
	工序准备时间	加工时间	工序准备时间	加工时间	工序准备时间	加工时间	工序准备时间	加工时间	工序准备时间	加工时间	
J_1	28	307	30	410	25	615	28	328	20	270	
J_2	15	172	20	230	18	340	—	—	15	153	
J_3	20	225	18	300	25	450	30	240	18	200	
J_4	15	108	10	145	20	220	25	116	15	98	
J_5	—	—	25	520	30	780	20	420	18	360	
J_6	20	348	25	460	25	690	30	372	—	—	

3.2 结果对比分析

利用文中研究的方法对含能材料生产系统进行瓶颈设备识别，针对具有原材料成本、产品存储成本的测试算例，设置试验次数 $\omega=10$ ， ΔL 从 5 开始，以 5 的增幅逐步增加至 50，识别的结果如图 2 所示。

将该方法与基于正交试验的瓶颈设备识别方

法^[5]、作业车间瓶颈簇识别方法^[8]以及移动瓶颈识别方法^[9]进行比较，结果见表 4。

由表 4 可以看出，文中的瓶颈识别方法得出的瓶颈结果与移动瓶颈识别方法、基于正交试验的瓶颈识别法以及作业车间瓶颈簇识别方法得出的瓶颈结果基本一致。相比之下，移动瓶颈识别方法和车间瓶颈簇识别方法采用的数据是通过优化算法求出的排产

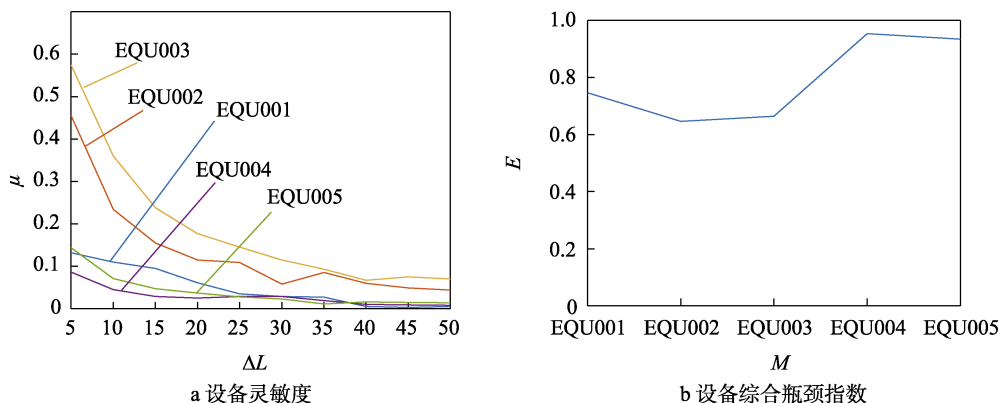


图2 瓶颈设备识别结果

Fig.2 Bottleneck device identification results: a) equipment sensitivity; b) equipment comprehensive bottleneck index

表4 瓶颈识别结果比较

Tab.4 Comparison of bottleneck recognition results

识别方法	移动瓶颈识别法	基于正交试验的瓶颈识别法	作业车间瓶颈簇识别方法		文中方法
			瓶颈簇	阶次	
识别结果	4	4	4,5 4	1 2	4

方案,而文中方法的数据通过随机产生,是在最优排产方案未知的情况下进行的瓶颈设备识别。该方法通过改变设备加工量来考察系统作业指标的变化进行瓶颈识别,与移动瓶颈法和瓶颈簇识别法相比,在不同的数据基础和评价指标下,3种识别方法结果基本一致,证明了该方法的有效性。与基于正交试验的瓶颈识别法相比,两种方法均可在生产系统运行之前先验地识别瓶颈设备,但基于正交试验的瓶颈识别法需构造合适的正交表,计算复杂度较高。该方法作为一种先验的瓶颈识别方法,仅需要可行的排产方案作为识别依据,无需进行优化排产计算,所以瓶颈识别的计算过程相对简单。

4 结语

文中从影响含能材料生产系统作业指标的角度出发,融合灵敏度分析和TOPSIS法,研究了含能材料生产过程瓶颈设备的快速识别方法。首先获得生产设备的灵敏度矩阵,然后利用TOPSIS法计算设备的综合瓶颈指数,并以此为依据进行比较,得出生产系统中的瓶颈设备。针对含能材料生产车间的排产问题,将该识别方法与其他几种方法进行比较,验证了所提方法的有效性。

瓶颈识别时,综合考虑了设备加工量对加工时间、产品存储成本的影响,克服了传统瓶颈识别方法指标单一、识别结果准确性低的不足。瓶颈识别的数据基础容易获得,识别程序简单,因此计算过程简单,可以在生产系统运行之前快速地识别出瓶颈设备,为后续的生产提供良好的指导,从而改善整个系统的性

能。下一步将研究随机扰动事件对瓶颈识别的影响。

参考文献:

- [1] 王刚,王军强,孙树栋,等. 扰动环境下Job Shop瓶颈识别方法研究[J]. 机械科学与技术, 2010, 29(12): 1697-1702.
WANG Gang, WANG Jun-qiang, SUN Shu-dong, et al. Bottleneck identification for job shop in disturbance environment[J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering, 2010, 29(12): 1697-1702.
- [2] 刘志,蒋增强,龚本刚. 基于两种瓶颈度的制造车间多瓶颈动态预测方法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(14): 1910-1915, 1921.
LIU Zhi, JIANG Zeng-qiang, GONG Ben-gang. Dynamic prediction method of multi-bottleneck in manufacturing shop based on two bottleneck degrees[J]. China mechanical engineering, 2014, 25(14): 1910-1915, 1921.
- [3] 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.
QIAO Fei, MA Yu-min, LI Li, et al. Multi-reentrant manufacturing system scheduling based on layered bottleneck analysis[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2010, 16(4): 855-860.
- [4] ZHANG Rui, WU Cheng. Bottleneck machine identification method based on constraint transformation for job shop scheduling with genetic algorithm[J]. Information sciences, 2012, 188: 236-252.
- [5] 翟颖妮,孙树栋,王军强,等. 基于正交试验的作业车间瓶颈识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(9):

- 1945-1952.
ZHAI Ying-ni, SUN Shu-dong, WANG Jun-qiang, et al. Bottleneck detection method based on orthogonal experiment for Job Shop[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2010, 16(9): 1945-1952.
- [6] 刘勇, 谷寒雨, 席裕庚. 基于约束理论的混合复杂流水线规划调度算法[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(1): 97-103.
LIU Yong, GU Han-yu, XI Yu-geng. Planning and scheduling algorithm based on TOC for complex hybrid flow shop problems[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2005, 11(1): 97-103.
- [7] 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): 224-231.
LING Lin, LIU Ming-zhou, WANG Qiang. Sensitivity of material-flow bottleneck to uncertain environment in job shop[J]. Transactions of the Chinese society for agricultural machinery, 2013, 44(2): 224-231.
- [8] 王军强, 康永, 陈剑, 等. 作业车间瓶颈簇识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(3): 540-551.
WANG Jun-qiang, KANG Yong, CHEN Jian, et al. Identification approach for bottleneck cluster in a Job Shop[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2013, 19(3): 540-551.
- [9] ROSER C, NAKANO M, TANAKA M. Shifting bottleneck detection[C]//Proceedings of the Winter Simulation Conference. December 8-11, 2002, San Diego, CA, USA. IEEE, 2002: 1079-1086.
- [10] ZUO Yan, GU Han-yu, XI Yu-geng. Modified bottleneck-based heuristic for large-scale job-shop scheduling problems with a single bottleneck[J]. Journal of systems engineering and electronics, 2007, 18(3): 556-565.
- [11] 李晓娟, 袁逸萍, 孙文磊, 等. 基于网络结构特征的作业车间瓶颈识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2016, 22(4): 1088-1096.
LI Xiao-juan, YUAN Yi-ping, SUN Wen-lei, et al. Bottleneck identification in job-shop based on network structure characteristic[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2016, 22(4): 1088-1096.
- [12] 陈兆璋, 徐克林. 基于约束理论的生产线瓶颈识别及改善[J]. 精密制造与自动化, 2019(3): 43-45, 48.
CHEN Zhao-zhang, XU Ke-lin. Bottleneck identification and improvement of production line based on constraint theory[J]. Precise manufacturing & automation, 2019(3): 43-45, 48.
- [13] 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.
FENG Huan-huan, YUAN Yi-ping, LI Xiao-juan. Research on the bottleneck identification of the manufacturing workshop based on network analysis[J]. Machinery design & manufacture, 2016(10): 5-7.
- [14] 李晓娟, 孙文磊, 袁逸萍, 等. 扰动环境下作业车间网络多瓶颈识别方法研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(12): 64-72, 78.
LI Xiao-juan, SUN Wen-lei, YUAN Yi-ping, et al. Multi-bottleneck identification for job-shop network in disturbance environment[J]. Journal of Xi'an Jiaotong university, 2016, 50(12): 64-72, 78.
- [15] LI Lin, CHANG Qing, NI Jun, et al. Bottleneck detection of manufacturing systems using data driven method[C]//2007 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing. July 22-25, 2007, Ann Arbor, MI, USA. IEEE, 2007: 76-81.
- [16] 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.
HE Wen-zhong, HONG Yue. Analysis and optimization of production system bottleneck recognition based on TOC theory[J]. Machinery, 2012, 50(7): 83-85.
- [17] JOAO J A, SULEMAN M A, MUTLU O, et al. Bottleneck identification and scheduling in multithreaded applications[J]. ACM SIGARCH computer architecture news, 2012, 40(1): 223-234.
- [18] 於骞, 金士良, 何文中. 基于 TOC 和 OTE 的生产瓶颈识别与优化[J]. 机械设计与制造, 2011(9): 182-184.
YU Qian, JIN Shi-liang, HE Wen-zhong. Optimization and detection of bottleneck in production based on TOC and OTE[J]. Machinery design & manufacture, 2011(9): 182-184.
- [19] KRISHNAN S, DEV A S, SURESH R, et al. Bottleneck identification in a tyre manufacturing plant using simulation analysis and productivity improvement[J]. Materials today: proceedings, 2018, 5(11): 24720-24730.
- [20] KIKOLSKI M. Identification of production bottlenecks with the use of Plant Simulation software[J]. Engineering management in production and services, 2016, 8(4): 103-112.
- [21] Roser, Nakano, Tanaka. Comparison of bottleneck detection methods for AGV systems[C]//Proceedings of the 2003 winter simulation conference. New Orleans: IEEE, 2003.
- [22] KANG Yun-yi, JU Feng. Integrated analysis of productivity and machine condition degradation: Performance evaluation and bottleneck identification[J]. IISE transactions, 2019, 51(5): 501-516.
- [23] CAO Zheng-cai, DENG Ji-jie, LIU Min, et al. Method for predicting bottleneck equipment of semiconductor manufacturing system based on improved adaptive fuzzy inference[J]. Chinese journal of chemical engineering, 2012, 20(6): 1081-1088.
- [24] 李少超. 基于层次分析法的生产瓶颈识别[J]. 机械制造, 2018, 56(3): 77-80.
LI Shao-chao. Production bottleneck identified based on AHP[J]. Machinery, 2018, 56(3): 77-80.