

4-12-2023

Bottleneck Drift Fluctuation Analysis of Discrete Remanufacturing System under Disturbance

Yongzhang Zhou

Engineering Research Center of Internet of Things Technology Applications Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Yan Wang

Engineering Research Center of Internet of Things Technology Applications Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;, wangyan88@jiangnan.edu.cn

Zhicheng Ji

Engineering Research Center of Internet of Things Technology Applications Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Bottleneck Drift Fluctuation Analysis of Discrete Remanufacturing System under Disturbance

Abstract

Abstract: Considering comprehensively the influence of each production process on the bottleneck degree of discrete remanufacturing system, the interval bottleneck index matrix is established by collecting data repeatedly in the observation stage to obtain the comprehensive bottleneck index of equipment, which is used as the identification basis. Aiming at the volatility of bottleneck drift in the uncertain environment of discrete remanufacturing system, *based on the interval bottleneck index matrix and comprehensive bottleneck index, a theoretical method of visual dynamic analysis including system sensitivity coefficient, machine sensitivity coefficient and bottleneck drift judgment model is established.* The discrete event simulation case is used to obtain the real-time data of each machine and realize the visualization of the bottleneck drift. The orthogonal experiment method is used to study the influence and degree of the disturbance factors on the volatility of the bottleneck drift in the disturbed environment.

Keywords

interval bottleneck, sensitive coefficient, visualization, orthogonal experiment, drift volatility analysis

Recommended Citation

Yongzhang Zhou, Yan Wang, Zhicheng Ji. Bottleneck Drift Fluctuation Analysis of Discrete Remanufacturing System under Disturbance[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(4): 809-821.

扰动下离散再制造系统瓶颈漂移波动性分析

周勇樟, 王艳*, 纪志成

(江南大学 物联网技术应用教育部工程研究中心, 无锡 214122)

摘要: 综合考虑离散再制造系统各生产过程对瓶颈度的影响, 在观测阶段连续多次采集数据建立区间瓶颈指数矩阵, 得到设备综合瓶颈指数, 以此为识别依据。针对离散再制造系统不确定环境下的瓶颈漂移波动性问题, 以区间瓶颈指数矩阵、综合瓶颈指数为基础, 构建包括系统敏感系数、机器敏感系数和瓶颈漂移判断模型的可视化动态分析的理论方法。采用离散事件仿真案例, 获得各机器加工生产的实时数据, 实现瓶颈漂移的可视化, 并采用正交实验方法研究扰动环境下扰动因素对瓶颈漂移波动性产生的影响。

关键词: 区间瓶颈指数矩阵; 敏感系数; 可视化; 正交实验; 漂移波动性分析

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X(2023)04-0809-13

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-1335

引用格式: 周勇樟, 王艳, 纪志成. 扰动下离散再制造系统瓶颈漂移波动性分析[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(4): 809-821.

Reference format: Zhou Yongzhang, Wang Yan, Ji Zhicheng. Bottleneck Drift Fluctuation Analysis of Discrete Remanufacturing System under Disturbance[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(4): 809-821.

Bottleneck Drift Fluctuation Analysis of Discrete Remanufacturing System under Disturbance

Zhou Yongzhang, Wang Yan*, Ji Zhicheng

(Engineering Research Center of Internet of Things Technology Applications Ministry of Education, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Considering comprehensively the influence of each production process on the bottleneck degree of discrete remanufacturing system, the interval bottleneck index matrix is established by collecting data repeatedly in the observation stage to obtain the comprehensive bottleneck index of equipment, which is used as the identification basis. Aiming at the volatility of bottleneck drift in the uncertain environment of discrete remanufacturing system, based on the interval bottleneck index matrix and comprehensive bottleneck index, a theoretical method of visual dynamic analysis including system sensitivity coefficient, machine sensitivity coefficient and bottleneck drift judgment model is established. The discrete event simulation case is used to obtain the real-time data of each machine and realize the visualization of the bottleneck drift. The orthogonal experiment method is used to study the influence and degree of the disturbance factors on the volatility of the bottleneck drift in the disturbed environment.

Keywords: interval bottleneck; sensitive coefficient; visualization; orthogonal experiment; drift volatility analysis

收稿日期: 2021-12-23 修回日期: 2022-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB1701903)

第一作者: 周勇樟(1997-), 男, 硕士, 研究方向为离散车间瓶颈识别与应用。E-mail: 893769250.com

通讯作者: 王艳(1978-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 研究方向为制造系统能效优化。E-mail: wangyan88@jiangnan.edu.cn

0 引言

制造业是工业的重要组成部分，但由于生产资源的有限，容易在某些地方出现“瓶颈”^[1]现象。作为系统的控制点和关键因素，瓶颈影响与限制着整个系统的生产效率和性能^[2]。

传统的关于瓶颈的研究是针对单一瓶颈机器、瓶颈阶段等识别^[3]，采集制造单位在加工过程中的状态作为判断依据。例如，Qi等^[4]利用机器敏感性这一指标进行识别建模，通过层次聚类将机器状态接近的机器划分为不同层次的机器簇。Chen等^[5]将系统生产过程中某阶段有效生产时间与加工制造单位的数量比值作为识别瓶颈阶段的判断依据。Amin等^[6]将系统生产过程中某阶段制造单位的生产速率与产出能力的乘积与制造单位所耗负载的比值作为分析瓶颈阶段的判定依据。

这些瓶颈分析方法多是不考虑扰动因素，只针对静态情况，缺乏对不确定干扰对系统的影响而导致的动态瓶颈漂移问题以及对瓶颈漂移影响程度的分析。受生产环境中不确定因素的影响，系统中的瓶颈单位可能会不固定，发生移动，这种现象被称之为动态瓶颈(瓶颈漂移)。

动态瓶颈研究备受关注，Jia等^[7]使用马尔可夫链相关理论，分析瓶颈漂移在系统加工中的变化，进行建模分析，建立与实时性能相匹配的模型。Thure等^[8]通过一些仿真实验，根据数据建立了订单释放仿真评估模型，分析瓶颈漂移的波动情况。Liu等^[9]以瓶颈指数为数学模型，通过仿真建立瓶颈识别实时监控系統，动态研究瓶颈。这些方法可以有效分析瓶颈漂移现象，但不能很好地分析出不确定因素对瓶颈漂移影响的程度。

本文在文献[10]的基础上，建立区间瓶颈指数矩阵，然后运用区间数可能度排序值^[10]得到设备的综合瓶颈指数数学模型，以此为识别依据。以离散制造系统为对象，运行Plant Simulation仿真软件，获得各机器的实时数据，以区间瓶颈指数矩阵和综合瓶颈指数为基础，构建系统敏感系数、

机器敏感系数和瓶颈漂移判断模型的可视化监测和动态分析流程，实现瓶颈漂移的可视化。并采用正交实验方法，研究在机器利用率、机器恢复时间和暂存区由于人工操作导致的存储工件数量变化的扰动环境下瓶颈漂移波动性问题。

1 离散再制造系统不确定性分析

在生产制造过程中，瓶颈度代表生产过程中制造单元成为系统加工过程中瓶颈机器的一种可能性^[11]，而瓶颈指数是衡量瓶颈度大小的一种参数。

关于生产系统瓶颈方面的研究大多是在静态的环境中^[12]，且系统中的机器参数与生产环境都是固定不变不会波动的，是不含扰动的静态分析。但是实际的生产环境中，不确定因素普遍存在^[13]，比如，机器的可利用率和机器故障后的恢复时间，对这种现象进行瓶颈研究是动态分析。在生产制造过程中，出现不确定性因素是不可避免^[14]，其中，设备利用率最为常见，这表明机器存在一定故障概率，有可能会改变其瓶颈度的大小；机器恢复成可使用状态所花费的时间多少也会影响生产产出和效率，因此也会对瓶颈度产生影响；暂存区由于员工摆放或者其他原因导致容量变化也会直接导致生产物流堵塞，限制工件的进一步加工速度而导致各生产单元的生产效率变化，影响瓶颈度。

如图1所示，本文研究对象是加工生产环境中常见的一种离散再制造系统。离散再制造系统的常见结构是检测工件质量、拆解再制造和工件重装配3个部分。对工件上一道工序结束后进行检测，判断工件加工后的状态是否达标，如果达标就直接进入工件的下一工序加工，如果不达标再判断是否满足再制造条件，如果满足就返回上一步重新加工，如果不能满足再制造条件，就直接进行材料回收或者废弃。在离散再制造生产环境中，影响加工质量和产出的因素有多方面，本文研究以下3种不确定因素。

(1) 设备利用率 R ：生产环境中，机器是存在一定故障概率的，而且每台机器的故障概率可能

都不一样, 是不可避免的不确定性因素。

(2) 机器恢复时间 W : 当机器发生故障时, 故障程度和工作人员的排障能力, 使恢复时间具有随机性和不确定性。

(3) 暂存区大小 V : 在生产线上, 由于每块暂存区摆放工件的大小或者其他原因导致暂存区存放待加工工件的数量不一致, 导致生产物流堵塞, 也会影响加工效率, 这也存在不确定性。

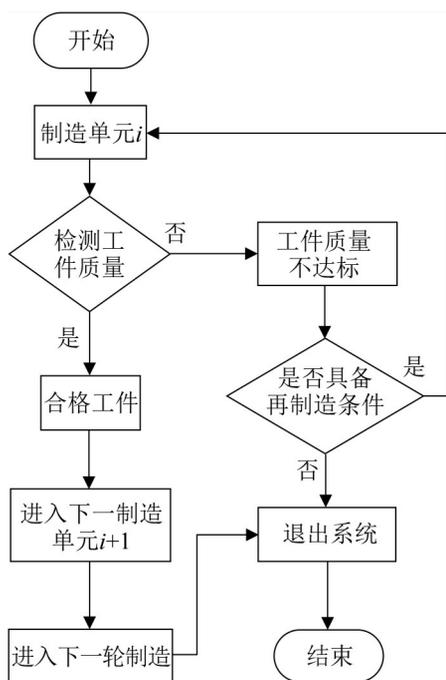


图 1 离散再制造系统生产流程

Fig. 1 Production flow chart of discrete remanufacturing system

上述不确定性因素的存在, 会让生产系统中各单元的瓶颈度发生波动, 导致瓶颈漂移, 增加了离散再制造系统瓶颈分析的难度, 因此, 在瓶颈识别模型的基础上, 设计了瓶颈漂移模型, 实现瓶颈漂移的可视化, 并且分析不确定因素对瓶颈漂移的影响程度。

2 瓶颈识别模型

2.1 瓶颈指数

在离散再制造系统中, 每台机器加工时长相当于这台机器上所有加工达标工件、不合格工件

和加工失败工件的加工时长总和, 而生产系统总加工时间等于各机器加工时间之和, 因此有

$$\sum_{i=1}^n T_i = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{w_i} T_{i,j} + \sum_{j=1}^{c_i} T_{i,j} + \sum_{j=1}^{s_i} T_{i,j} \right) \quad (1)$$

式中: i 为机器的标号, 其中 $i \in \{1, 2, \dots, n\}$; T_i 为第 i 台机器的总加工时间; $T_{i,j}$ 为机器 i 中第 j 个工件的加工时间; q_i 为被机器 i 加工的所有的零件数; w_i 为机器 i 有效加工产出的工件数量; c_i 为机器 i 加工失败直接退出系统的零件数; s_i 为加工完成但没达到质量要求的零件数, 有 $q_i = w_i + s_i + c_i$ 。将没有达到质量要求的工件和机器上加工失败的工件称为非贡献作业, 相应的加工时间就称为非贡献作业时间; 在机器上加工完成并达到质量检测标准的工件就是有效贡献作业, 相应加工时间就称为有效贡献作业时间。本文定义机器 i 的瓶颈指数为 θ_i , 根据制造单元有效贡献作业时间和非贡献作业时间进行计算。

机器 i 有效加工产出对机器 i 总加工时间的贡献度为

$$\beta_{\text{attri}, i} = \frac{\sum_j T_{i,j}}{T_i} \times 100\% \quad (2)$$

机器 i 总加工时间对系统总加工时间的贡献度为

$$\delta_{\text{attri}, j} = \frac{T_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \times 100\% \quad (3)$$

综上, 可定义机器 i 瓶颈指数为

$$\theta_i = \frac{\delta_{\text{attri}, i}}{\beta_{\text{attri}, i}} \times 100\% \quad (4)$$

θ_i 直接体现了再制造系统中各加工机器瓶颈度的大小, 且其数值一直随着时间的变化而变化, 本文以瓶颈指数 θ_i 来衡量某制造单元成为瓶颈机器可能性的变化情况。

2.2 区间瓶颈指数矩阵模型

2.2.1 区间数与可能度

在实际车间生产环境中, 在有不确定因素干扰的情况下, 机器加工会存在波动性^[15], 那么单

一取值会导致选取的数值与实际情况可能有所偏离, 因此, 本文结合区间数的方式来描述瓶颈度。

区间数定义: 设 a_{sec} 为区间数, 有 $a_{\text{sec}} = [a^L, a^U] = \{x | a^L \leq x \leq a^U, a^L, a^U \in R\}$, 其中, x 为关于 a_{sec} 的变量, a^L 为 a_{sec} 的下限, a^U 为 a_{sec} 的上限。若 $a^L = a^U$, 则 a_{sec} 为实数。

区间数运算法则: 设区间数 $a_{\text{sec}} = [a^L, a^U]$, 区间数 $b_{\text{sec}} = [b^L, b^U]$, b^L 为 b_{sec} 的下限, b^U 为 b_{sec} 的上限, 各运算法则具体如下:

- (1) $a_{\text{sec}} = b_{\text{sec}}$, 当且仅当 $a^L = b^L, a^U = b^U$;
- (2) $a_{\text{sec}} + b_{\text{sec}} = [a^L + b^L, a^U + b^U]$;
- (3) $ka_{\text{sec}} = [ka^L, ka^U]$, 其中 k 为非负数。

区间数的可能度定义为

$$p(a_{\text{sec}} \geq b_{\text{sec}}) = \frac{\min\{a^U - a^L + b^U - b^L, \max(a^U - b^L, 0)\}}{a^U - a^L + b^U - b^L} \quad (5)$$

式中: $p(a_{\text{sec}} \geq b_{\text{sec}})$ 为 $a_{\text{sec}} \geq b_{\text{sec}}$ 的可能度, 表示区间数 a_{sec} 比区间数 b_{sec} 大的可能性。

假设某车间在不确定干扰下多次检测机器 M_1 的设备利用率, 其中最小值为 75.42%, 最大值为 78.45%, 根据区间数定义, a^L 为最小值 75.42%, a^U 为最大值 78.45%, 因此区间数可描述为 [75.42%, 78.45%]。利用式(5)中可能度的定义, 计算在设备利用率上机器 M_1 比机器 M_2 大的可能度, $a^L=75.42\%$, $a^U=78.45\%$, $b^L=74.13\%$, $b^U=76.87\%$, 代入式(5), 求出可能度为 0.748 7。

2.2.2 区间瓶颈指数矩阵与排序向量

为了消除单次采集可能带来的偶然因素, 在某一时间段附近进行 k 次数据采集, 得到设备在当前时间下的区间瓶颈指数矩阵。

建立瓶颈指数矩阵 H , M_i 为第 i 台机器, 将 n 组候选机器表示为 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_n\}$, $x_{\text{sec } ij} = [x_{ij}^L, x_{ij}^U] = \{x | x_{ij}^L \leq x \leq x_{ij}^U, x_{ij}^L, x_{ij}^U \in R\}$ 表示为第 i 台机器的瓶颈指数区间值。 x_{ij}^L 是 $x_{\text{sec } ij}$ 区间数里面最小的一个值, x_{ij}^U 是 $x_{\text{sec } ij}$ 区间数里面最大的一个值, 得 $H = (x_{\text{sec } ij})_{m \times 1} = \{[x_{ij}^L, x_{ij}^U]\}_{m \times 1}$ 。

$$H = \begin{matrix} M_1 & [x_{11}^L, x_{12}^U] \\ \vdots & \vdots \\ M_i & [x_{i1}^L, x_{i2}^U] \\ \vdots & \vdots \\ M_n & [x_{n1}^L, x_{n2}^U] \end{matrix} \quad (6)$$

针对区间瓶颈指数矩阵 H , 由式(5)区间可能度 $p(a_{\text{sec}} \geq b_{\text{sec}})$ 的计算方法让区间瓶颈指数矩阵 H 进行两两比较, 得到可能度矩阵 P , 可证明可能度矩阵 P 满足:

$$p(a_{\text{sec}} \geq b_{\text{sec}}) + p(b_{\text{sec}} \geq a_{\text{sec}}) = 1 \quad (7)$$

因此, 根据文献[10], 可得 P 为模糊互补判断矩阵, 利用文献[10]反映不确定信息的区间数排序向量公式作为模糊互补判断矩阵的排序方法:

$$Vh_a = \frac{1}{t(t-1)} \left(\sum_{b=1}^t s_{ab} + \frac{t}{2} - 1 \right), a, b = 1, 2, \dots, t \quad (8)$$

2.2.3 综合瓶颈指数

通过式(5)对 H 进行比较, 即可求出相应可能度 $p(\theta_i \geq \theta_u)$, 记为 p_{iu} , 并建立可能度矩阵 $P = (p_{iu})_{t \times t}$ 。根据式(8), 利用反映不确定信息的区间数, 求出可能度矩阵的排序向量, 作为综合瓶颈指数:

$$IBN_i = \frac{1}{u(u-1)} \left(\sum_{u=1}^n p_{iu} + \frac{u}{2} - 1 \right), i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

其中, IBN_i 值最大的机器即为系统的瓶颈机器 IBN , 是制造单元中的一种特有的动态属性, 综合瓶颈指数 IBN_i 是衡量瓶颈度大小的一种尺标。

3 瓶颈漂移模型

在某一给定的时刻, 瓶颈识别模型中的综合瓶颈指数 IBN_i 直接反映了系统中各加工单位的瓶颈度大小, 但是这种分析是相对静止的, 不能很好地描述和分析不确定因素对于瓶颈波动的影响, 因此, 使用瓶颈漂移模型解决这个问题, 建立可视化的瓶颈分析环境, 实现对瓶颈机器相对位置的判断预测和对不确定因素对瓶颈波动的影响分析。

3.1 敏感系数

在离散再制造系统中, 由于是在几种不确定

性因素的影响下进行生产加工, 使得瓶颈机器 IBN 并不总是位于同一机器, 因此, 应在瓶颈识别模型的基础上, 对影响瓶颈漂移的各种因素进行有针对性地组合研究, 有效分析当前系统是否容易发生瓶颈漂移和确定各扰动因素对瓶颈漂移的影响程度, 量化生产系统的瓶颈漂移情况, 降低由于不确定性因素导致的瓶颈波动引发的生产过程管理难度, 并提高系统稳定性。

以制造系统综合瓶颈指数 IBN_i 为参数, 构建其与系统的瓶颈机器 IBN 的综合瓶颈指数离差多元线性回归模型, 求出系统敏感系数 V_{IBP} 和机器敏感系数 $V_{IBP,i}$, 系统敏感系数为

$$V_{IBP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [\max(IBN_i) - IBN_i]^2}{[\max(IBN_i) - \min(IBN_i)]^2}} \quad (10)$$

式中: IBN_i 为加工机器 i 的综合瓶颈指数; $\max(IBN_i)$ 为当前时刻系统中瓶颈机器的综合瓶颈指数最大值; $\min(IBN_i)$ 为当前时刻系统中综合瓶颈指数最小值; n 为加工机器的数量。

V_{IBP} 在一定程度上可以反映当前系统是否容易发生瓶颈漂移, 同时也可作为指标用来衡量各扰动因素对瓶颈漂移的影响程度。 V_{IBP} 越大, 表示当前系统中瓶颈机器的综合瓶颈指数与其他机器的综合瓶颈指数差值越大, 那么受不确定因素干扰而发生瓶颈漂移的概率越小; V_{IBP} 越小, 则表示当前系统中瓶颈机器的综合瓶颈指数与其他机器的综合瓶颈指数越接近, 那么反而更容易受不确定因素的干扰而导致瓶颈漂移。

$V_{IBP,i}$ 反映系统当前时刻中每个机器与系统中瓶颈机器的综合瓶颈指数的差值大小, 可以反映出当前系统中各个机器是否容易发生瓶颈漂移。 $V_{IBP,i}$ 和 V_{IBP} 可以结合使用作为指标来衡量各扰动因素对瓶颈漂移的影响程度。

$$V_{IBP,i} = \sqrt{\frac{[\max(IBN_i) - IBN_i]^2}{[\max(IBN_i) - \min(IBN_i)]^2}} \quad (11)$$

式(11)中的 $V_{IBP,i}$ 越大, 表示当前时刻中机器 i

的综合瓶颈指数与瓶颈机器的综合瓶颈指数差值越大, 下一时刻成为瓶颈机器的概率越小; $V_{IBP,i}$ 越小, 则表示当前系统中机器 i 的综合瓶颈指数与瓶颈机器的综合瓶颈指数差值越接近, 那么反而更容易受不确定因素的干扰而导致成为瓶颈机器的概率越大, 使得系统发生瓶颈漂移。

3.2 瓶颈漂移判断模型与步骤

为了有效判断离散再制造系统的瓶颈是否发生漂移情况, 需要首先确定瓶颈漂移的相关定义和判断公式, 为了量化离散再制造系统中各机器的瓶颈漂移情况, 引入了当前时段生产系统的瓶颈漂移系数 IN 与加工机器 i 的瓶颈漂移系数 IN_i , 具体的瓶颈漂移判定公式为

$$\begin{cases} IN_i = \frac{IBN_i}{IBN_0} \\ IN = \max(IN_i) \end{cases} \quad (12)$$

式中: IBN_0 为初始瓶颈制造单元的综合瓶颈指数。

根据式(12)的瓶颈漂移预测模型可以判断系统是否有瓶颈漂移现象, 即根据 IN 的值来判断瓶颈是否发生漂移, 当 $IN > 1$ 时可以判定发生漂移, 当 $IN \leq 1$ 时可以判定未发生漂移。

如图2所示, 针对机器可利用率、机器恢复使用时间和暂存区容量这些不确定扰动因素, 设计正交实验方法。根据瓶颈识别模型和瓶颈漂移模型, 不仅要能对瓶颈相对位置进行精确判断, 还要对不确定因素对瓶颈波动的影响进行定量和有效分析, 量化生产系统的瓶颈漂移情况, 降低由于不确定性因素导致的瓶颈波动引发的生产过程管理难度。根据图中描述, 分析流程分为4步, 具体步骤如下:

(1) 结合具体研究对象, 分析扰动对系统加工流程、性能的影响, 利用 Plant Simulation 建立仿真模型, 运行仿真模型, 收集各指标值。

(2) 在某一时间段进行 k 次数据采集组成的区间瓶颈指数矩阵, 由式(9)确定系统中的综合瓶颈指数 IBN_i 的计算公式。

- (3) 瓶颈漂移的分析从 2 个角度进行：①比较同一机器、不同时段 IBN_i 的变化；②比较不同机器、同一时段内 V_{IBP} 和 $V_{IBP,i}$ 值的大小。
- (4) 使用实验设计方法，根据瓶颈漂移模型判

断是否发生漂移，并根据 V_{IBP} 和 $V_{IBP,i}$ 分析当前系统是否容易发生瓶颈漂移和当前系统中各个机器是否容易发生瓶颈漂移。

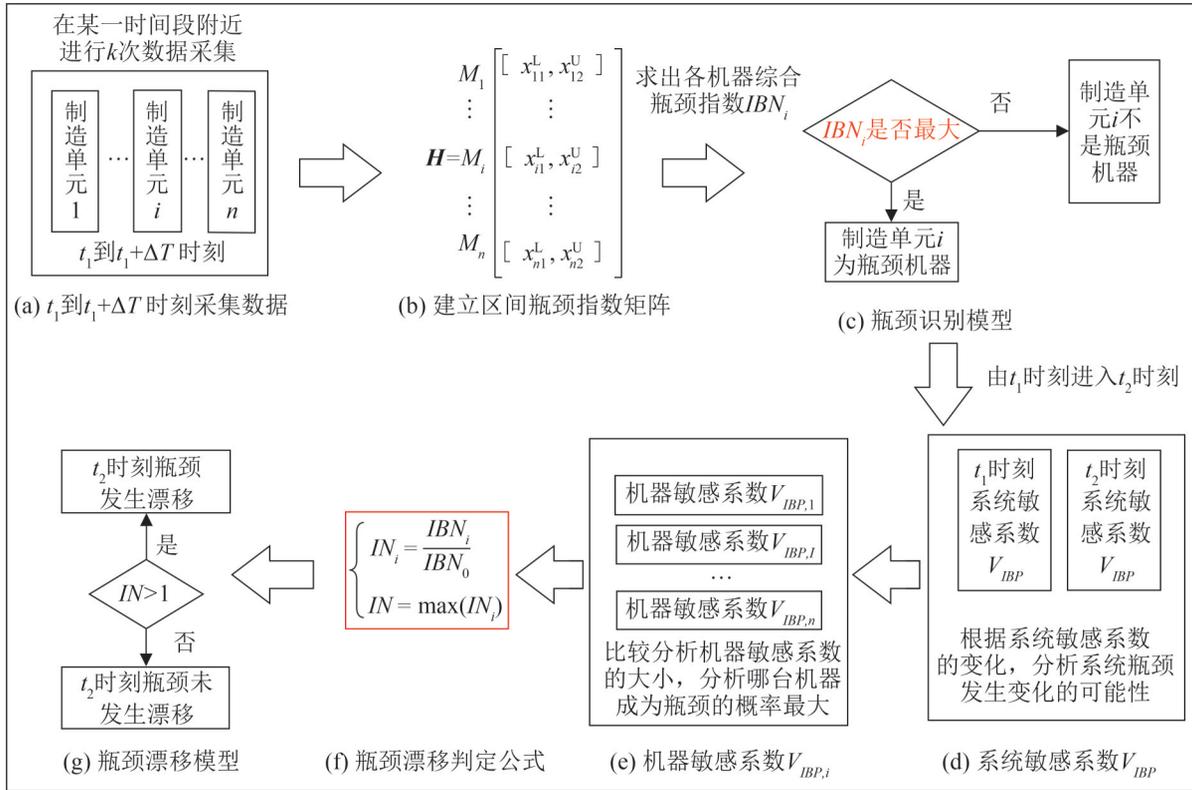


图2 瓶颈漂移敏感分析
Fig. 2 Bottleneck drift sensitivity analysis

4 基于不确定扰动案例研究

4.1 再制造生产线仿真建模

算例仿真在 Plant-Simulation8 平台上进行，使用 Matlab2014a 软件对数据进行处理。生产线有检测 M_0 机器、镀刷 M_1 机器、涂敷 M_2 机器、焊补 M_3 机器、车削 M_4 机器、粗磨 M_5 机器和精磨 M_6 机器总共 6 台机器，还有退出系统 P_1 、直接重加工 P_2 和合格制造件 P_3 ，图 3 工艺路线和表 1 数据来源于文献[16]。

表 1 记录了 Plant-Simulation8 算例仿真的相关数据，N 表示加工为正态分布，Exp 为指数分布。转移概率表示选择这条加工路径的几率，例如，

表格数据第一列中， $W_0 \rightarrow W_1$ 的概率是 0.6，加工时间符合 Exp(10) 指数分布。

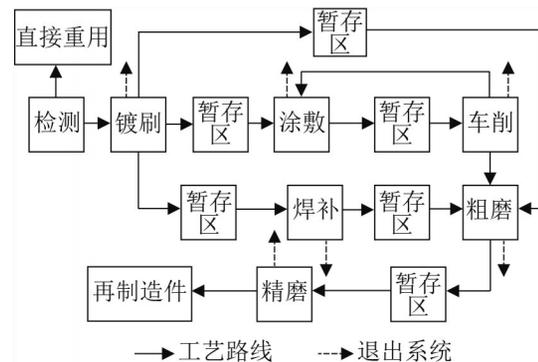


图3 生产线加工
Fig. 3 Production line processing diagram

4.2 瓶颈漂移与可视化分析

4.2.1 各机器瓶颈指数及其波动特性分析

运行仿真模型, 采用表2中第9行数据进行仿真, 以10 h为单位, 记录仿真周期300 h内系统各机器数据的变化情况, 实现瓶颈可视化分析。

由式(10)计算出各机器的 IBN_i , 如图4所示。从图4可以看出机器1综合瓶颈指数的值域很高为[0.232 9, 0.262 6], 表示机器1成为瓶颈机器的概率比较大; 机器2的综合瓶颈指数值域为[0.233, 0.244 6], 与机器1很接近, 表示这2个机器最有

可能成为系统的瓶颈机器, 图5也证明了这一点。

由式(11)计算出各机器敏感系数 $V_{IBP,i}$, 如图4所示。其中机器1敏感系数值域处在[0, 0.045 4]这一范围, 处于比较低的水平, 表明机器1成为瓶颈机器的可能性很高机器2机器敏感系数值域为[0, 0.086 3], 十分接近机器1, 成为瓶颈的概率也很高; 其他机器的 $V_{IBP,i}$ 值相对于机器1、2差值很大, 因此, 成为瓶颈机器的概率较低, 这些数据表示机器1、2成为瓶颈机器的可能性最大, 图5证明机器敏感系数 $V_{IBP,i}$ 有一定的预见性。

表1 再制造系统相关参数
Table 1 Remanufacturing system related parameters

加工路径	转移概率	加工时间分布 T_i/min	加工路径	转移概率	加工时间分布 T_i/min
$W_0 \rightarrow W_1$	0.60	Exp(10)	$W_3 \rightarrow W_5$	0.95	N(5, 2)
$W_0 \rightarrow P_1$	0.10		$W_3 \rightarrow P_1$	0.05	
$W_0 \rightarrow P_2$	0.30		$W_4 \rightarrow W_2$	0.70	N(6, 2)
$W_1 \rightarrow W_2$	0.60	$W_4 \rightarrow W_5$	0.20		
$W_1 \rightarrow W_3$	0.20	Exp(15)	$W_4 \rightarrow P_1$	0.10	
$W_1 \rightarrow W_5$	0.15		$W_5 \rightarrow W_6$	0.95	N(8, 2.5)
$W_1 \rightarrow P_1$	0.05	$W_5 \rightarrow P_1$	0.05		
$W_2 \rightarrow W_4$	0.95	Exp(8)	$W_6 \rightarrow P_1$	0.10	N(10, 3)
$W_2 \rightarrow P_1$	0.05		$W_6 \rightarrow P_3$	0.90	

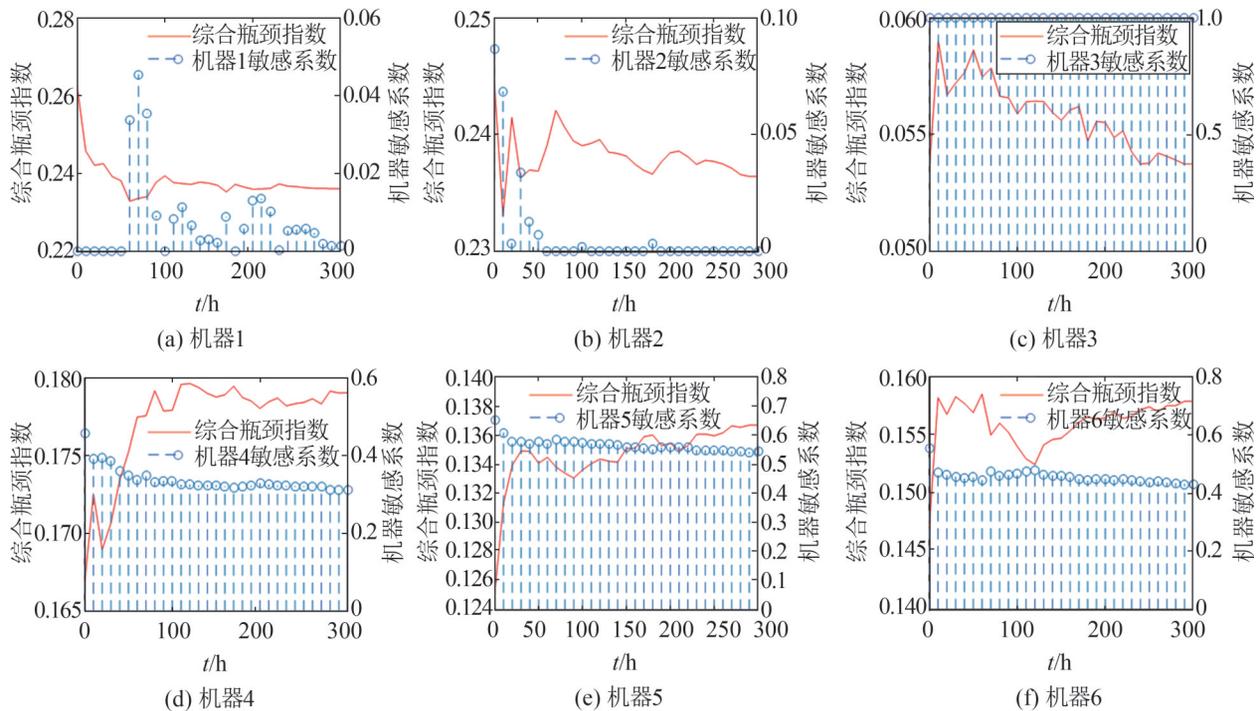


图4 综合瓶颈指数和机器敏感系数

Fig. 4 Integrated bottleneck index and machine sensitivity coefficient

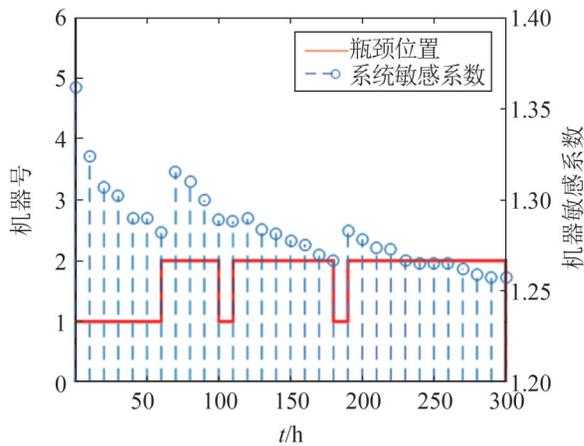


图5 瓶颈机器与系统敏感系数可视化图
Fig. 5 Bottleneck machine and system sensitivity visualization

图5中，阶梯图反映生产过程中机器的瓶颈漂移情况，以及成为瓶颈机器之后的维持时间和变化趋势；火柴图反映了当某机器成为瓶颈时，该时段 V_{IBP} 的大小。由图5可看出，瓶颈机器基本上都是机器1和机器2。当 V_{IBP} 持续降低的时候就容易发生瓶颈转移，如60~70 h和170~180 h；当

V_{IBP} 上升或者稳定在一个水平的时候瓶颈不容易变化，如70~100 h和200~300 h。本文提出综合评价指数 IBN_i 、机器敏感系数 $V_{IBP,i}$ 、系统敏感系数 V_{IBP} 概念，通过实时计算得到各机器的 IBN_i 、 $V_{IBP,i}$ 值和 V_{IBP} 值，不仅可以得出系统机器瓶颈，而且还可以动态分析当前系统是否容易发生瓶颈漂移和当前系统中各个机器是否容易发生瓶颈漂移，利用瓶颈可视化操作降低由于不确定性因素导致的瓶颈波动引发的生产过程管理难度，有一定的预见性。

4.2.2 对比结果分析

为了更直观地比较本文所提识别模型与现有识别方法之间的优劣，将本文的综合瓶颈指数模型与文献[4]的基于TOPSIS的综合瓶颈度法进行对比。运行Simulation仿真模型，同样采用表2中第9行数据进行仿真，以10 h为单位，记录仿真周期300 h内系统各机器数据的变化情况，如图6所示。

表2 各实验扰动组合与机器瓶颈时间
Table 2 Each experiment disturbance combination and machine bottleneck time

NO.	V	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	1	2	3	4	5	6	V_{IBP}
1	4	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	50	50	50	50	50	50	20	280	0	0	0	0	1.454
2	4	0.85	0.85	0.85	0.90	0.90	0.90	55	55	55	55	55	55	290	10	0	0	0	0	1.717
3	4	0.85	0.85	0.85	0.95	0.95	0.95	60	60	60	60	60	60	290	10	0	0	0	0	1.659
4	4	0.90	0.90	0.90	0.85	0.85	0.85	55	55	55	60	60	60	170	100	0	30	0	0	1.195
5	4	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	0.90	60	60	60	50	50	50	240	60	0	0	0	0	1.376
6	4	0.90	0.90	0.90	0.95	0.95	0.95	50	50	50	55	55	55	10	290	0	0	0	0	1.626
7	4	0.95	0.95	0.95	0.85	0.85	0.85	60	60	60	55	55	55	180	40	0	70	10	0	1.131
8	4	0.95	0.95	0.95	0.90	0.90	0.90	50	50	50	60	60	60	170	120	0	10	0	0	1.177
9	4	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	55	55	55	50	50	50	120	180	0	0	0	0	1.291
10	5	0.85	0.90	0.95	0.85	0.90	0.95	50	55	60	50	55	60	250	30	0	20	0	0	1.334
11	5	0.85	0.90	0.95	0.90	0.95	0.85	55	60	50	55	60	50	270	20	0	10	0	0	1.370
12	5	0.85	0.90	0.95	0.95	0.85	0.90	60	50	55	60	50	55	260	40	0	0	0	0	1.347
13	5	0.90	0.95	0.85	0.85	0.90	0.95	55	60	50	60	50	55	270	10	0	20	0	0	1.415
14	5	0.90	0.95	0.85	0.90	0.95	0.85	60	50	55	50	55	60	290	10	0	0	0	0	1.477
15	5	0.90	0.95	0.85	0.95	0.85	0.90	50	55	60	55	60	50	300	0	0	0	0	0	1.775
16	5	0.95	0.85	0.90	0.85	0.90	0.95	60	50	55	55	60	50	0	290	0	10	0	0	1.411
17	5	0.95	0.85	0.90	0.90	0.95	0.85	50	55	60	60	50	55	0	300	0	0	0	0	1.501
18	5	0.95	0.85	0.90	0.95	0.85	0.90	55	60	50	50	55	60	0	300	0	0	0	0	1.539

续表

NO.	V	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	W_1	W_2	W_3	W_4	W_5	W_6	1	2	3	4	5	6	V_{IBP}
19	6	0.85	0.95	0.90	0.85	0.95	0.90	50	60	55	50	60	55	290	0	0	0	10	0	1.463
20	6	0.85	0.95	0.90	0.90	0.85	0.95	55	50	60	55	50	60	300	0	0	0	0	0	1.476
21	6	0.85	0.95	0.90	0.95	0.90	0.85	60	55	50	60	55	50	300	0	0	0	0	0	1.534
22	6	0.90	0.85	0.95	0.85	0.95	0.90	55	50	60	60	55	50	30	250	0	20	0	0	1.296
23	6	0.90	0.85	0.95	0.90	0.85	0.95	60	55	50	50	60	55	30	270	0	0	0	0	1.278
24	6	0.90	0.85	0.95	0.95	0.90	0.85	50	60	55	55	50	60	10	290	0	0	0	0	1.428
25	6	0.95	0.90	0.85	0.85	0.95	0.90	60	55	50	55	50	60	0	290	0	10	0	0	1.455
26	6	0.95	0.90	0.85	0.90	0.85	0.95	50	60	55	60	55	50	60	240	0	0	0	0	1.423
27	6	0.95	0.90	0.85	0.95	0.90	0.85	55	50	60	50	60	55	0	300	0	0	0	0	1.781

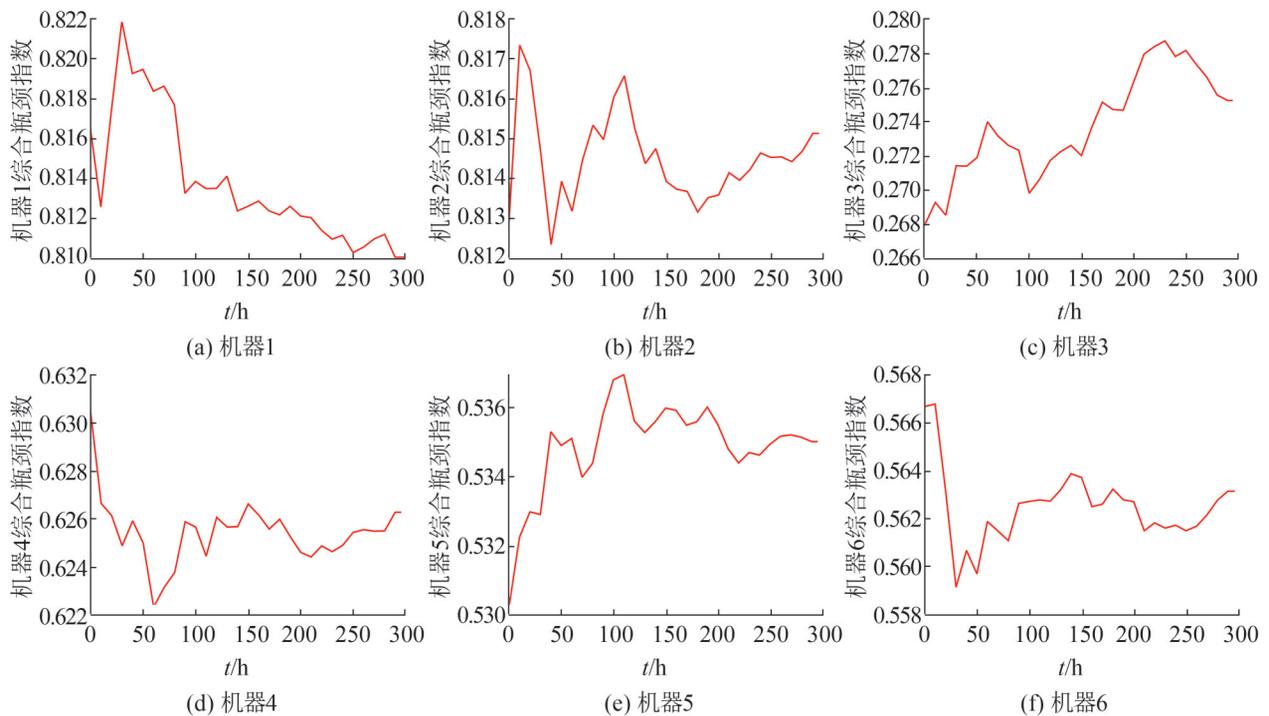


图6 基于TOPSIS的综合瓶颈度
Fig. 6 Comprehensive bottleneck degree based on TOPSIS

图6中, 各个阶梯图反映生产过程中机器的综合瓶颈度, 可以看出机器1与机器2是最有可能成为系统的瓶颈机器, 与本文综合瓶颈指数识别方法得出的结果大致相同。从图6中可以看出各机器的综合瓶颈度的大小排序与本文识别方法的结果也大致相同, 证明了本文综合瓶颈指数定义的有效性, 也证明了本文机器敏感系数 $V_{IBP,i}$ 的有效性。

如果只是某个时间段的瞬时分析, 文献[4]的

方法可以很清楚地对比各机器的瓶颈情况, 但如果是进行长时间的可视化分析和波动分析, 单一的综合瓶颈度并不能清晰有效地反映机器的瓶颈漂移现象和波动程度, 也不能用来有效分析扰动对瓶颈漂移的影响程度。本文不仅在综合瓶颈指数上进行分析, 还基于本文的综合瓶颈指数定义, 衍生出了机器敏感系数 $V_{IBP,i}$ 、系统敏感系数 V_{IBP} 和瓶颈漂移判断模型。 $V_{IBP,i}$ 用来观测机器发生漂移的可能性, V_{IBP} 用来观测系统发生漂移的可能

性, 瓶颈漂移判断模型用来分析当前系统是否发生漂移, 这些方法与瓶颈指数结合起来, 不仅有效得出各机器的瓶颈程度, 还能动态观测在扰动环境下, 系统漂移的波动情况, 用来动态分析当前系统是否容易发生瓶颈漂移, 为下文动态分析瓶颈漂移波动现象打下了基础。

4.3 瓶颈漂移与可视化分析

本节使用实验设计方法, 确定扰动因素对系统机器瓶颈漂移的敏感度和重要性, 本文采用正交设计实验 $L_{27}(3^{13})$, 如表3所示, R_i 是机器 i 的可利用率, 0.85 表示机器可利用概率是 85%, 表示可能有 15% 的概率机器在加工时发生故障; W_i 是机器 i 的修复时间, 50 表示机器修复时间是 50 s; V_j 是暂存区大小, 4 表示此暂存区 j 可容纳 4 个待加工工件。

表3 扰动因素及其水平
Table 3 Disturbance factors and levels

因子	水平		
	1	2	3
R_i	0.85	0.90	0.95
W_i/s	50	55	60
V_j	4	5	6

如表2和表4所示, 通过改变系统扰动因素, 观察系统瓶颈机器持续时间和性能的变化, 由表2可知: 扰动因素直接影响各机器成为瓶颈的可能性和成为瓶颈的持续时间, 同时系统敏感系数 $V_{IBP,i}$ 也随之变化。从实验结果可以看出, 瓶颈机器主要集中在机器1和机器2, 少部分在机器4, 这也表明当有不确定扰动因子时, 瓶颈是容易发生漂移的, 当系统敏感系数 V_{IBP} 均值大于或接近 1.5 时, 系统瓶颈漂移很少发生或者不发生; 当系统敏感系数 V_{IBP} 均值小于 1.5 大于 1.3 时, 瓶颈发生少许漂移; 小于 1.3 时表示系统不稳定, 瓶颈漂移现象发生频繁; 说明系统敏感系数 V_{IBP} 在一定程度上可以用来观测整个系统的稳定状态、判断系统是否会发生漂移。

表4 机器敏感系数

Table 4 Machine sensitivity coefficient

NO.	$V_{IBP,1}$	$V_{IBP,2}$	$V_{IBP,3}$	$V_{IBP,4}$	$V_{IBP,5}$	$V_{IBP,6}$
1	0.073	0.002	0.985	0.404	0.765	0.810
2	0.001	0.073	0.863	0.679	0.952	0.999
3	0.001	0.153	0.776	0.755	1.000	0.921
4	0.021	0.043	0.993	0.142	0.434	0.565
5	0.008	0.044	0.973	0.364	0.618	0.611
6	0.056	0.001	0.998	0.582	0.831	0.718
7	0.007	0.034	1.000	0.015	0.216	0.266
8	0.011	0.041	1.000	0.171	0.433	0.393
9	0.007	0.029	1.000	0.346	0.565	0.471
10	0.011	0.128	1.000	0.218	0.543	0.631
11	0.004	0.163	1.000	0.343	0.677	0.484
12	0.013	0.161	1.000	0.505	0.383	0.529
13	0.002	0.242	0.774	0.191	0.822	1.000
14	0.001	0.211	0.767	0.394	1.000	0.599
15	0	0.352	0.931	0.861	0.658	0.989
16	0.241	0.001	1.000	0.276	0.655	0.755
17	0.305	0	1.000	0.445	0.816	0.540
18	0.295	0	1.000	0.598	0.451	0.628
19	0.002	0.298	1.000	0.243	0.141	0.683
20	0	0.361	1.000	0.475	0.484	0.766
21	0	0.321	1.000	0.625	0.521	0.705
22	0.113	0.004	1.000	0.177	0.637	0.519
23	0.111	0.003	1.000	0.357	0.387	0.587
24	0.114	0.002	1.000	0.507	0.533	0.455
25	0.272	0.002	0.774	0.143	1.000	0.785
26	0.050	0.016	0.897	0.475	0.558	1.000
27	0.262	0	0.989	0.826	0.982	0.685

图7(a)与图8(a)反映了扰动因子在不同的扰动水平下所得结果(瓶颈持续时间)的均值极差排名; 图7(b)和图8(b)分析了对瓶颈持续时间影响非常大的主导因子, 极差图反映扰动因子对瓶颈的影响程度。

图9(a)与图10(a)反映了扰动因子在不同扰动水平下机器敏感系数(每次实验的平均值)均值极差的排名; 如图9(b)到图10(b)分析了对瓶颈漂移波动水平影响非常大的主导因子。

图11为扰动因素对系统敏感系数 V_{IBP} 均值影响程度和主导因子的效应图。

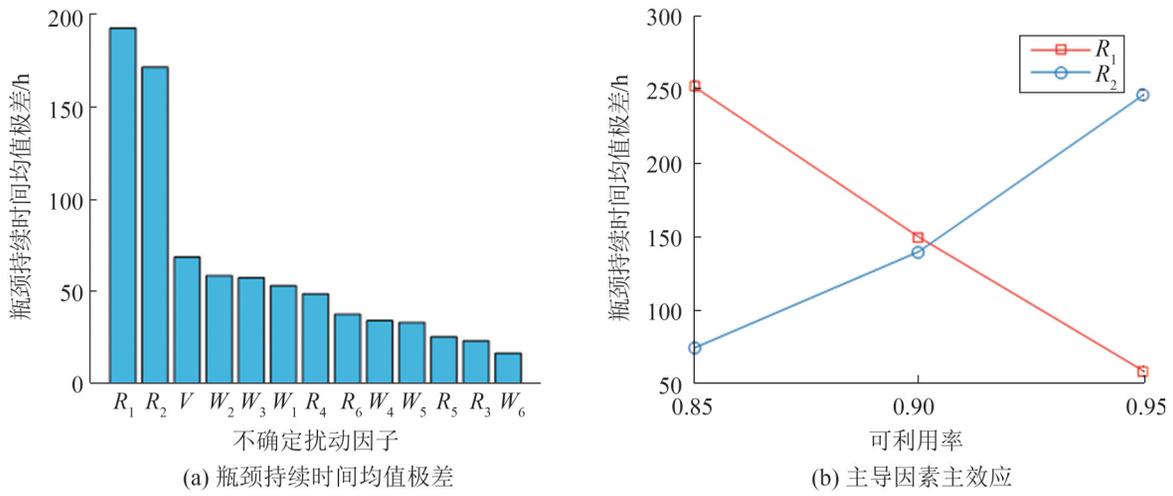


图7 机器1瓶颈持续时间极差及其主导因素主效应
Fig. 7 Machine 1 bottleneck duration extreme and its leading factors main effect

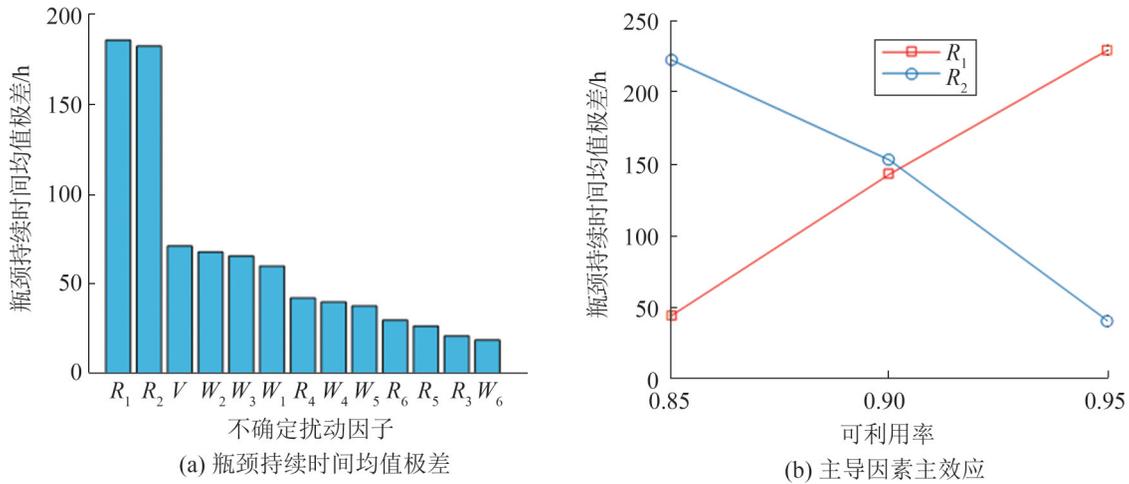


图8 机器2瓶颈持续时间极差及其主导因素主效应
Fig. 8 Machine 2 bottleneck duration extreme and its leading factors main effect

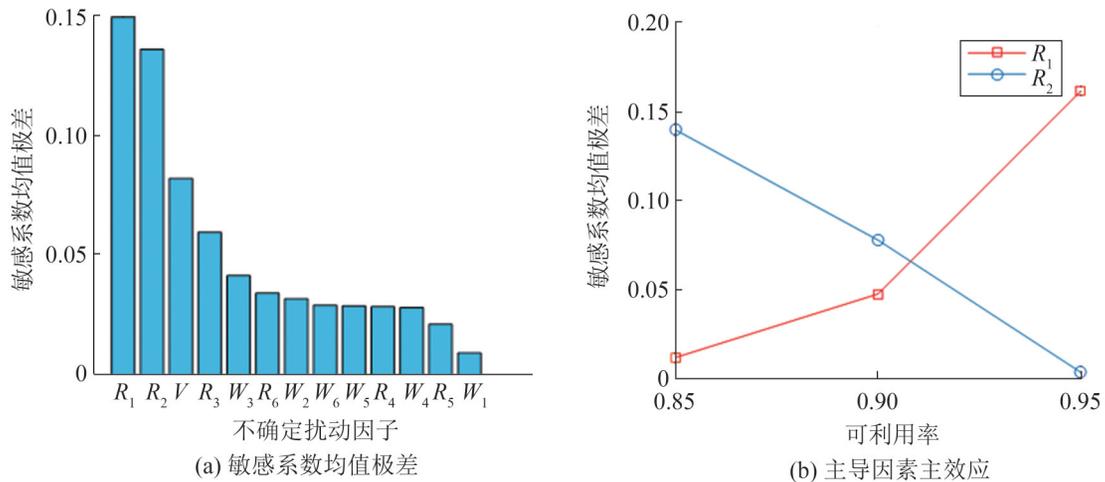


图9 机器1敏感系数均值极差及其主导因素主效应
Fig. 9 Average range of machine 1 sensitivity coefficient and its leading factors main effect

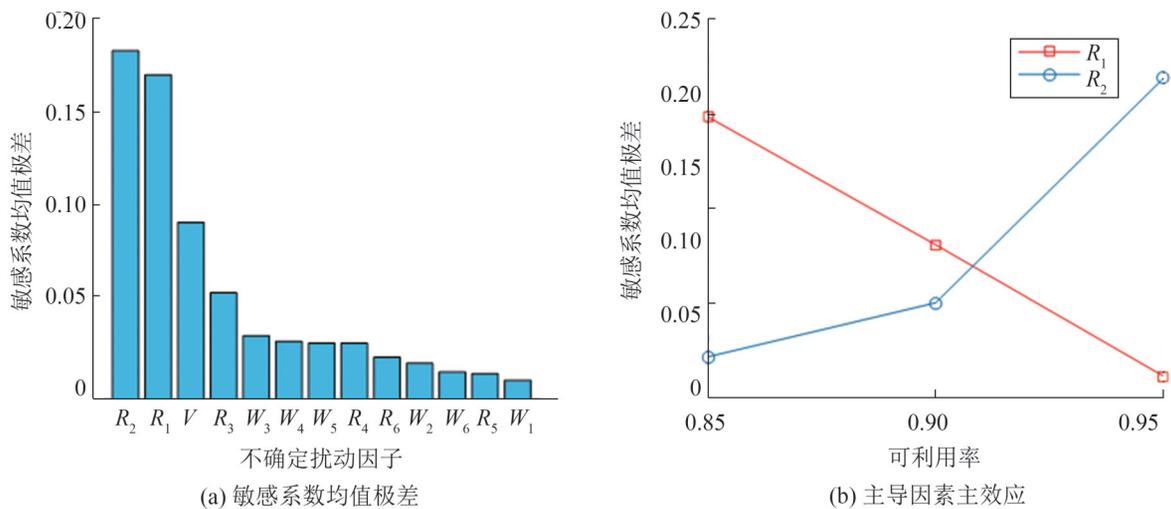


图10 机器2敏感系数均值极差及其主导因素主效应

Fig. 10 Average range of machine 2 sensitivity coefficient and its leading factors main effect

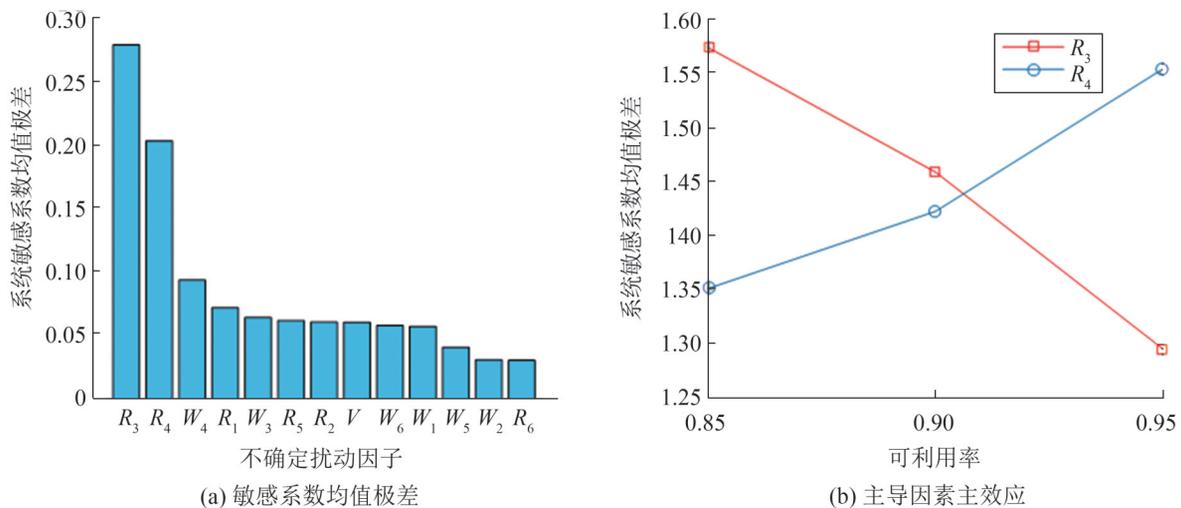


图11 系统敏感系数均值极差及其主导因素主效应

Fig. 11 Mean range of system sensitivity coefficient and its leading factors main effect

观察图7~11可知:

(1) 机器可利用概率 R_i : 对机器瓶颈持续时间有显著影响, 如 R_1 对机器1的瓶颈持续时间具有较大的负影响, 如图8(b)所示, 而 R_2 对机器1的瓶颈持续时间具有较大的正影响, 如图8(b)所示, 即瓶颈1的下游机器2利用概率越高, 机器1成为瓶颈的时间越长。 R_1 和 R_2 对瓶颈机器的机器敏感系数 $V_{IBP,i}$ 均值极差有显著影响, 如图9(b)所示, R_1 利用概率越高, 机器1成为瓶颈机器的可能性越低, R_2 利用概率越高, 机器1成为瓶颈机器的可能性越高。 R_3 和 R_4 对系统敏感系数 V_{IBP} 均值影响很大,

表明 R_3 和 R_4 的变化使得系统波动性剧烈, 对所有机器瓶颈度的变化有着深刻影响, 如图11所示。

(2) 暂存区容量 V : 对瓶颈持续时间影响不大, 但对机器敏感系数影响较大。

(3) 机器修复时间 W_i : 对机器成为瓶颈的可能性及波动性没有显著影响, 对系统敏感系数 V_{IBP} 也影响不大。

5 结论

本文考虑系统加工时的复杂情况, 以区间瓶颈指数矩阵和综合瓶颈指数为基础, 构建系统敏

感系数、机器敏感系数和瓶颈漂移判断模型的动态可视化理论分析流程, 同时采用正交实验分析扰动对系统的影响程度和重要扰动因子, 实现对瓶颈漂移的有效分析和控制, 其中, V_{IBP} 在一定程度上可以用来观测整个系统的稳定状态、判断系统是否会发生漂移; $V_{IBP,i}$ 可以用来观测哪个机器成为瓶颈的概率最大, 同时它们可以作为重要指标来衡量不确定因素对整个系统的影响程度。因此, 下一步的研究重点是更加贴近实际生产情况, 解决生产的“瓶颈”现象, 提高加工效率。

参考文献:

- [1] 王军强, 孙树栋, 李翌辉. 考虑外包能力拓展的TOC产品组合优化研究(I)[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3287-3293.
Wang Junqiang, Sun Shudong, Li Yihui. Research on TOC Product Portfolio Optimization Considering Outsourcing Capability Expansion(I)[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11): 3287-3293.
- [2] 潘春荣, 黎良. 印刷包装生产线的建模与仿真分析[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(12): 2996-3002.
Pan Chunrong, Li Liang. Modeling and Simulation Analysis of Printing and Packaging Production Line[J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(12): 2996-3002.
- [3] Yan Z, Gu H, Xi Y. Modified Bottleneck-Based Heuristic for Large-Scale Job-Shop Scheduling Problems with a Single Bottleneck[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics(S1004-4132), 2007, 18(3): 556-565.
- [4] Qi Lei, Tong Li. Identification Approach for Bottleneck Clusters in a Job Shop Based on Theory of Constraints and Sensitivity Analysis[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture(S0954-4054), 2017, 231(6): 1091-1101.
- [5] Chen Chunlung, Chen Chuenlung. A Bottleneck-Based Heuristic for Minimizing Makespan in a Flexible Flow Line with Unrelated Parallel Machines[J]. Computers & Operations Research(S0305-0548), 2009, 36(11): 3073-3081.
- [6] Amin-Naseri M R, Beheshti-Nia M A. Hybrid Flow Shop Scheduling with Parallel Batching[J]. International Journal of Production Economics(S0925-5273), 2009, 117(1): 185-196.
- [7] Jia Zhiyang, Dai Yaping, Chen Jingchuan. Closed Bernoulli Lines with Finite Buffers: Real-time Performance Analysis, Completion Time Bottleneck and Carrier Control[J]. International Journal of Control (S0020-7179), 2019, 94(7): 1-14.
- [8] Thurer Matthias, Stevenson Mark. Bottleneck-oriented Order Release with Shifting Bottlenecks: An Assessment by Simulation[J]. International Journal of Production Economics(S0925-5273), 2018, 197(1): 275-282.
- [9] Liu Mingzhou, Tang Juan, Ge Maogen. Dynamic Prediction Method of Production Logistics Bottleneck Based on Bottleneck Index[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering(S1000-9345), 2009, 22(5): 710-716.
- [10] 徐泽水. 不确定多属性决策方法及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
Xu Zeshui. Uncertain Multi-attribute Decision Making Method and Its Application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004.
- [11] Cai Jingcao, Lei Deming. A Cooperated Shuffled Frog-Leaping Algorithm for Distributed Energy-Efficient Hybrid Flow Shop Scheduling with Fuzzy Processing Time[J]. Complex & Intelligent Systems(S2199-4536), 2021, 7(5): 1-19.
- [12] 王彩璐, 陶跃钢, 杨鹏, 等. 云控制系统并行任务分配优化算法与并联控制[J]. 自动化学报, 2017, 43(11): 1973-1983.
Wang Cailu, Tao Yuegang, Yang Peng, et al. Parallel Task Allocation Optimization Algorithm and Parallel Control for Cloud Control System[J]. Automatica, 2017, 43(11): 1973-1983.
- [13] 朱海峰, 刘畅, 温熙华, 等. 均衡流量和饱和度的交通瓶颈控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(5): 816-824.
Zhu Haifeng, Liu Chang, Wen Xihua, et al. Traffic Bottleneck Control for Equalizing Flow and Saturation [J]. Control Theory and Applications, 2019, 36(5): 816-824.
- [14] Zuo Yan, Gu Hanyu, Xi Yugeng. Modified Bottleneck-Based Heuristic for Large-Scale Job-Shop Scheduling Problems with a Single Bottleneck[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics(S1004-4132), 2007, 7(3): 556-565.
- [15] 延渊渊, 范文慧, 冯袁. 汽车连杆生产线的建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(9): 3360-3365, 3376.
Yan Yuanyuan, Fan Wenhui, Feng Yuan. Modeling and Simulation of Automobile Connecting Rod Production Line[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(9): 3360-3365, 3376.
- [16] 李成川, 李聪波, 曹华军, 等. 基于GERT图的废旧零部件不确定性再制造工艺路线模型[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(2): 298-305.
Li Chengchuan, Li Congbo, Cao Huajun, et al. An Uncertain Remanufacturing Process Model of Used Parts Based on GERT Diagram[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(2): 298-305.