

不确定环境下再制造系统能耗瓶颈漂移分析

薛 政, 李 涛*, 彭世通

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 针对再制造系统在不确定性环境下产生瓶颈漂移, 导致能耗瓶颈工序难以识别的问题, 在阐述废旧产品回收的不确定性的基础上, 考虑各工序加工时间以及加工功率的动态变化, 提出了增值能耗这一能耗瓶颈指数; 通过 Arena 软件模拟仿真再制造车间的加工工艺路线, 对系统能耗瓶颈指数进行实时监测, 分析系统能耗瓶颈指数及其波动性, 实现能耗瓶颈漂移的可视化, 揭示能耗瓶颈漂移规律. 采用正交试验方法研究不确定性因素改变对系统能耗瓶颈的敏感性分析. 以发动机连杆再制造系统为例, 进行能耗瓶颈漂移的案例研究. 结果表明: 能耗瓶颈指数和能耗瓶颈漂移分析方法能够为再制造系统能耗瓶颈判定和能耗瓶颈漂移特性的分析提供准确和有效的理论基础.

关键词: 再制造; 不确定性; 能耗瓶颈; 瓶颈漂移; 增值能耗

中图分类号: TH186

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb202003005

0 引言

再制造被认为是循环经济的重要组成部分之一^[1]. 传统的单向“资源—产品—废弃物”的线性经济使得经济呈现粗放的发展模式, 造成资源短缺、环境恶化和自然灾害频繁发生等严重后果. 循环经济遵循“资源—产品—废弃物—再生资源”的闭合流程, 主张最大限度地使用资源, 并将对环境的破坏程度降到最低, 有利于社会经济的可持续发展. 因此, 近年来许多研究者都将制造系统的不确定性对时间(即能耗)的影响考虑到生产计划模型中. Tonke 等^[2]从机器人加工作业车间中由于原材料的差异、工具磨损程度不同以及在自适应控制过程的不准确导致机器人加工时间的不确定性入手, 通过对固定机器人工位进行调度来解决不确定环境下双抓取机器人的加工效率问题; Cai 等^[3]在生产任务不确定的情况下, 建立不确定性生产任务的能量基准, 对加强能量管理、促进节能生产发挥了重要作用. 再制造企业通过对磨损的零件和寿命终止的产品进行加工, 使其能够达到重新利用的目标. 与传统制造不同的是, 再制造是

以报废产品为毛坯, 这使得再制造系统具有更高的内在不确定性, 包括报废零件的回收率、损坏程度、工艺路线和再利用需求等都存在很大的差异性, 对企业实现节能减排市场化目标带来了巨大的挑战.

在生产计划与调度问题中, 瓶颈辨识一直是重要的难题. 瓶颈工序是制约制造系统高效生产的关键因素, 决定了系统生产力^[4]. 由于受到各种内部或者外部不确定性因素的影响, 零件再制造过程中的瓶颈工序不断发生变化; 此外, 对目前系统所存在的瓶颈进行优化改善也有可能导致瓶颈工序的改变, 上述现象就叫做瓶颈漂移或者是动态瓶颈. 近些年来, 动态瓶颈的识别和改善受到了广泛的关注. Fang 等^[5]基于物联网收集的大量制造系统数据, 通过开发一种具有主输入和辅助输入的并行门控循环单元网络实现时间瓶颈漂移的预测. Jia 等^[6]利用马尔可夫方法推导制造系统实时数据的数学模型, 讨论封闭式伯努利生产线在有限生产运行条件下完成时间瓶颈漂移问题. Qi 等^[7]通过检验系统生产性能对每台机器能力的敏

收稿日期: 2019-12-20; 修回日期: 2020-04-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775086).

作者简介: 薛 政(1996-), 男, 硕士生, E-mail: dagongxz123@mail.dlut.edu.cn; 李 涛*(1977-), 女, 副教授, 硕士生导师, E-mail: litao@dlut.edu.cn.

感性,得到瓶颈指标矩阵;然后利用相似度排序技术计算出各机器的物料流瓶颈指数,根据计算结果,通过层次聚类分析得到了不同层次下的瓶颈机器集群.凌琳等^[8]采用瓶颈度指标和瓶颈指数来描述动态物料流瓶颈的特性.翟颖妮等^[9]提出了一种基于正交试验法的物料流瓶颈识别方法.Huang等^[10]针对车间意外异常(如订单变化、机器故障等)导致的物料流瓶颈转移,而传统生产车间由于缺乏实时生产数据,难以跟踪瓶颈转移这一问题,提出了一种基于未来瓶颈预测的智能工厂主动任务调度方法,应用物联网技术,打造智能工厂,跟踪制造资源,获取实时关键产品数据,支持精准瓶颈预测.Thürer等^[11]通过控制仿真实验,研究了物料流瓶颈漂移方向对订单释放性能的影响,建立了面向物料流瓶颈转移的订单释放仿真评估模型.

目前,针对瓶颈漂移的研究主要是在制造系统不确定性情况下对物流和时间瓶颈漂移进行分析,很少有文献涉及能耗瓶颈漂移分析.在实际生产过程中,对能耗瓶颈的识别及其瓶颈漂移的提前预知,能够引领节能减排的可持续发展模式,有利于解决企业高能耗、高污染、低产出的

生产问题.然而,由于再制造过程存在很大的工艺不确定性,其中包括加工顺序不确定、可供选择不同的加工工艺路线以及加工机器数目的不确定等多重可变因素,准确预测制造系统中的能耗瓶颈漂移十分困难.

针对此类问题,本文选择再制造零件连杆为研究对象,进行瓶颈漂移分析研究.从增值能耗的角度定义瓶颈,对瓶颈工序进行识别,通过 Arena 仿真实现瓶颈漂移的可视化,为系统的运行、设计和改善提供理论性依据.

1 再制造废旧产品不确定性分析

再制造系统大多被分为拆解、再制造和重组装 3 个子系统,如图 1 所示.回收件通过拆解形成零部件;根据废旧产品的表面质量特征和失效程度,分别进入到以下 4 个处理程序:直接重用、可再制造、材料回收和直接废弃.其中再制造件根据损伤程度分别进入到不同的加工工艺路线,工序上的零部件在经过加工之后会分成两部分:一部分直接报废退出系统;另一部分继续加工直至重新装配,最后经过再制造加工过后的零件与新的零件组装成新的产品^[12-13].

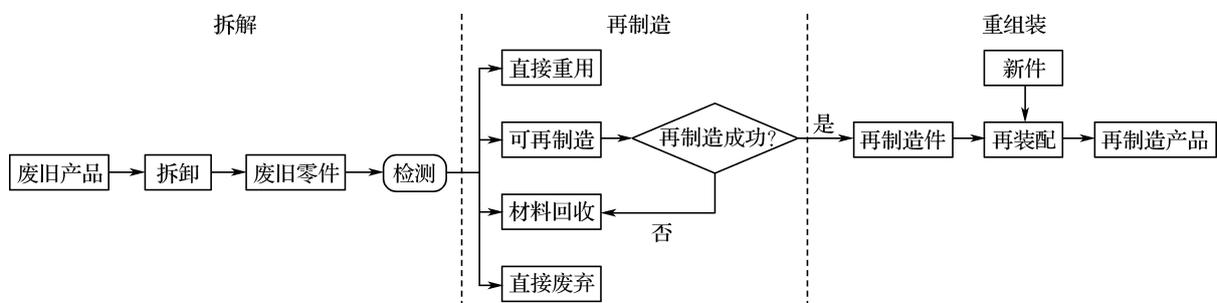


图 1 废旧产品再制造工艺流程图

Fig. 1 Process flow diagram of remanufacturing waste products

再制造生产流程长,具有复杂的协作关系.本文将影响零件能耗不确定性因素分为两个方面^[14]:一是零件本身,对于相同类型的零件,报废零件损伤类型和损伤程度的不确定性是再制造过程中能耗不确定性的主要因素.损伤类型的不确定性是指废旧零件在同一时间内可能存在一种或多种损伤类型;损坏程度的不确定性是指即使相同的损伤类型,不同零件的破损程度和损伤部位都体现出不同;修复过程和工艺参数的差异是由

损伤类型和损伤程度决定的.二是零件再制造的工艺路线,零部件的配合尺寸、连接方式的不同,导致工艺路线以及返修工艺路线都将发生变化,从而导致再制造过程中能耗也发生变化.

2 瓶颈定义及瓶颈指数

生产制造过程中,对系统性能起限制和约束作用的工序称之为瓶颈工序^[15].能耗可以用来评价制造系统的性能,减少工艺过程中无法带来创

造价值的能耗,能够提高企业的生产效益.结合再制造不确定性,从增值能耗的角度定义能耗瓶颈.

在进行再制造工艺过程中,部分工序完成加工后,零件的性能无法达到送至下一工序继续加工的要求而退出系统,称这些工序所进行的作业为非增值作业(non-value added operation),这些工序加工过程中所消耗的能量称之为非增值能耗(non-value added energy consumption).由于非增值作业的存在,某些工序一直处于繁忙的状态,从而使得工序的生产能力大大降低.

在上游工序完成加工之后,某些工序进入到下一步时有多种可能.比如,在珩磨工序完成磨削加工之后,部分零件可能进入压衬套工序,另一部分零件可能直接退出系统.因此,在后续表达此工艺路线不确定性时,采用转移概率的方法描述加工路径.

假设有 K 批再制造零件进入加工系统,每批零件能够生产出符合要求的零件数为 $B_k (k=1, 2, 3, \dots, K)$. 在工序 i 加工的零件数为 P_i . 假设在加工过程中,完成后进入下一工序的零件数为 f_i ,退出系统进行返工或报废的零件数为 s_i ,则零件数

$$P_i = f_i + s_i \geq \sum_{k=1}^K B_k \quad (1)$$

生产系统加工所有批次零件所产生的总能耗等于所有工序加工相应零件所消耗的能量之和,即

$$\sum_{k=1}^K E_k = \sum_{i=1}^N E_i = \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j=1}^{f_i} E_{i,j} + \sum_{j=1}^{s_i} E_{i,j} \right) \quad (2)$$

式中: E_k 为加工第 k 批零件的总能耗, E_i 为在工序 i 上加工零件所产生的总能耗, N 为工序总数, $E_{i,j}$ 为在工序 i 上进行第 j 个作业所产生的能耗, $\sum_{j=1}^{f_i} E_{i,j}$ 表示工序 i 上加工所产生的增值作业能耗(value added operation energy consumption,

VAOEC), $\sum_{j=1}^{s_i} E_{i,j}$ 表示工序 i 上加工所产生的无效作业能耗.

增值作业能耗比例 ν_v 用于表示不同工序增值能耗对其工序总能耗的贡献度:

$$\nu_{v,i} = \frac{\sum_{j=1}^{f_i} E_{i,j}}{E_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $\nu_{v,i}$ 为工序 i 的增值能耗比例.

消耗能量比例 ν_E 反映了每个工序加工所消耗的能量对系统总消耗能量的贡献度:

$$\nu_{E,i} = \frac{E_i}{\sum_{i=1}^N E_{i,j}} \times 100\% \quad (4)$$

式中: $\nu_{E,i}$ 为工序 i 的消耗能量比例.

再制造系统中,能耗瓶颈所具备的特征是系统能耗大而增值能耗小.因此,本文采用工序 i 有效增值能耗比例(effective value added energy consumption, EVAEC)为能耗瓶颈指数,数学表达式为

$$I_{bn,i} = \frac{\nu_{E,i}}{\nu_{v,i}} \quad (5)$$

式中: $I_{bn,i}$ 为工序 i 的能耗瓶颈指数.

能耗瓶颈指数直接反映了综合瓶颈度的大小,且其数值一直随着时间的变化而变化,因此,能耗瓶颈指数属于一个动态指标,本文以动态指标来反映某加工工序成为瓶颈工序可能性的变化情况;但是,在某一给定时刻上,瓶颈有可能是相对静止的,因此,可以将能耗瓶颈指数这一动态指标作为预测瓶颈相对位置的判定指标.结合能耗瓶颈定义,建立瓶颈判定机制,从而实现对瓶颈相对位置的精确分析和预测.

$$\begin{aligned} S_{bn}^t &= \{i | I_{bn,i} \geq b_{std}, i \in S\} \\ S_{nbn}^t &= \{i | 0 < I_{bn,i} < b_{std}, i \in S\} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: S_{bn}^t 表示 t 时刻该系统的瓶颈工序集合; S_{nbn}^t 表示 t 时刻该系统的非瓶颈工序集合; S 表示系统中加工工序的集合; b_{std} 表示能耗瓶颈工序判定标准,属于动态指标,取值范围为 $\lambda \leq b_{std} \leq 0.3$, λ 根据连杆再制造系统的稳定性取值,该值取值不能太小,否则将会可能产生误判,将非瓶颈工序误认为是瓶颈工序,也不能取值太大,否则将会导致瓶颈工序的遗漏,在实际生产过程中, λ 由专家根据作业车间不同时段的不同情况确定.

3 瓶颈漂移分析步骤

以回收件能耗不确定性为基础的瓶颈漂移分析步骤如图2所示.

步骤1 考虑回收件回收环节、拆卸方法、再加工过程以及再制造率的不确定性所导致的能耗不确定性.

步骤2 由式(2)~(5)计算再制造系统中的能耗瓶颈指数.

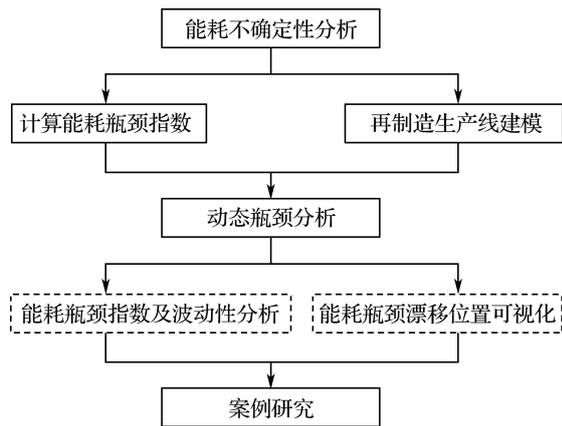


图 2 瓶颈漂移分析步骤

Fig. 2 Analysis steps of bottleneck drifting

步骤 3 通过 Arena 软件建立模型. 构建仿真模型时, 首先定义再制造生产线的结构, 编写获取所需能耗瓶颈指数的方法. 作为仿真模型的输入, 需要每个回收零件的到达时间、再制造率、零件研伤率、报废率、工艺路线、工序上设备的待机功率和加工功率以及加工时间等数据. 运行仿真模型, 收集观测期间各站点的能耗瓶颈指标值.

步骤 4 对结果进行数据分析: 一是通过比较同一工序在不同时段内能耗瓶颈指数的变化, 完成对特定工序能耗瓶颈指数波动性分析; 二是

通过比较同一时段不同工序能耗瓶颈指数的值, 实现能耗瓶颈站点的可视化.

步骤 5 通过再制造连杆的案例, 进行能耗瓶颈识别, 并对能耗瓶颈漂移进行分析. 将以上方法应用到实际生产过程中.

4 案例研究

4.1 连杆再制造工艺路线的仿真建模

图 3 为某发动机再制造公司生产连杆的再制造生产工艺路线. 回收件经过人工初步检测 (W_0), 部分零件无法达到加工要求, 直接报废处理; 部分回收件达到再次重复使用的要求; 另外两种类型的回收件经过加工处理达到使用要求. 其中, 轻微研伤类型连杆需经过珩磨 (W_1)、压衬套 (W_2)、装衬套 (W_3)、铣削 (W_4)、镗小头孔 (W_5)、校直 (W_6) 和清洗 (W_7) 7 道工序; 另一种损伤类零件大头孔研伤类连杆的加工工艺路线比轻微研伤类零件多两道工序, 它们分别是电净 (W_8) 和刷镀 (W_9). 轻微研伤类连杆和大头孔研伤类连杆经过再制造加工得到合格的再制造件 (P_3) 或者经过再制造加工, 还是无法达到使用要求, 则直接报废处理. 因此, 回收得到的废旧产品经过检测有 3 种去向: 退出系统 (P_1)、直接重用件 (P_2) 和符合要求的再制造件 (P_3).

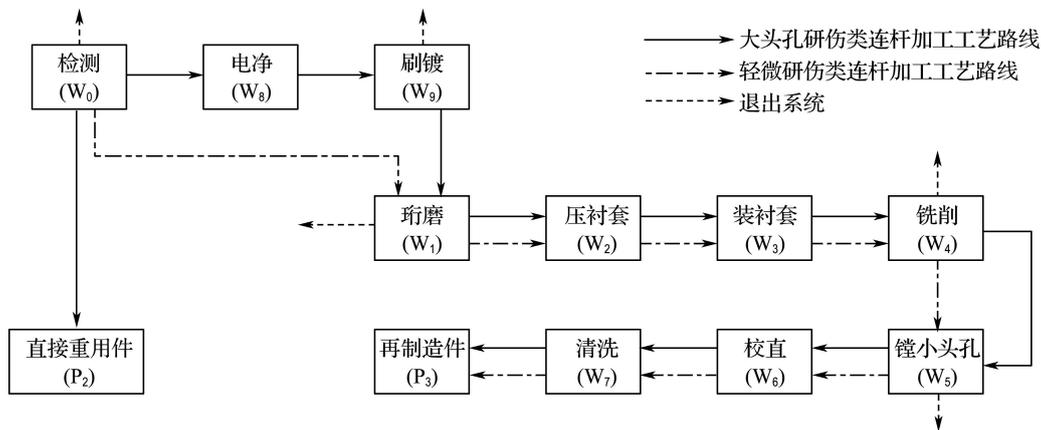


图 3 连杆再制造工艺路线

Fig. 3 Remanufacturing process route of the connecting rod

本节连杆再制造生产工艺路线仿真模型是使用 Arena 软件建立的. 为了对系统的瓶颈漂移做出准确分析, 在研究中做出如下假设: (1) 每分钟到达系统的零件数为 1 个. (2) 各工序之间的人工搬运时间取 0.5 min. (3) 各工序的故障处理时间忽略不计. (4) 各工序之间都有缓冲区域, 且容量

无限大. (5) 使用转移概率的方式来表达零件的工艺路线, 其中部分工序由于加工复杂且加工量巨大导致零件退出率较难统计, 还有一些工序加工效率高, 设备精密, 人员充足, 因此这些工序的退出率都假设为 0. (6) 各个工序设备的待机功率取值范围为加工功率的 25% ~ 70%. 零件加工时

间,各工序设备的加工功率、待机功率及转移概率见表1.

4.2 瓶颈漂移分析

通过 Arena 软件进行仿真模型的运行,10 h 为一个仿真步长,240 h 为仿真周期,计算这段周期内各工序瓶颈指数的变化情况,由式(2)~(5)计算得到工艺路线中各工序的瓶颈指数,结果如表 2~4 所示.

对结果进行数据分析:(1)通过比较同一工序在不同时段内瓶颈指数的变化,完成了对特定工序瓶颈指数波动性分析;(2)通过比较同一时段不同工序瓶颈指数的值,实现了瓶颈站点的可视化.

4.2.1 瓶颈指数波动特性分析 计算得到各工序瓶颈指数如图 4 所示.其中清洗(W₇)工序瓶颈指数的值域是[0.213,0.229],平均值为 0.225 9,在各工序中处于较高水平;其次,铣削(W₄)工序瓶颈指数的值域是[0.216,0.228],平均值为 0.224 8;最后,刷镀(W₉)工序瓶颈指数的值域是[0.209,0.236],平均值为 0.213 5.由此可知,清洗(W₇)、铣削(W₄)和刷镀(W₉)工序最有可能成为瓶颈工序.此外,镗小头孔(W₅)工序和铣削(W₄)工序的瓶颈指数波动性变化程度较大,标准偏差分别为 0.001 3 和 0.002 4,该数据证明这两个工序在增值能耗上的稳定性较差.

工序的瓶颈指数和其波动性反映了工序的漂移特性.瓶颈指数越大,表明该工序成为瓶颈的可能性越大.瓶颈指数的波动性大说明该工序对系统中的不确定性因素敏感,需要采取一定的措施进行计划和控制.

4.2.2 瓶颈漂移的可视化 通过仿真模型的运

行,得到连杆再制造系统在 10 d 内各工序的能耗瓶颈指数变化和瓶颈漂移的规律.如图 5 所示,瀑布图能够反映瓶颈工序在刷镀(W₉)、铣削(W₄)

表 1 工艺路线、加工时间分布、设备加工功率及待机功率

Tab.1 Process route, processing time distribution, processing power of equipment, standby power of equipment

加工路径	转移概率	加工功率/kW	待机功率/kW	加工时间分布/min
W ₀ →W ₁	0.4			
W ₀ →P ₁	0.1			
W ₀ →W ₈	0.4	0	0	expo(1)
W ₀ →P ₂	0.1			
W ₁ →W ₂	0.99			
W ₁ →P ₁	0.01	6	2.45	norm(0.5,0.1)
W ₂ →W ₃	1	2.2	0.66	tria(0.97,1,1.03)
W ₃ →W ₄	1	8	0.66	tria(0.5,1,1.5)
W ₄ →W ₅	0.9			
W ₄ →P ₁	0.1	17	4.3	norm(1,0.1)
W ₅ →W ₆	0.9			
W ₅ →P ₁	0.1	1.9	0.5	expo(2)
W ₆ →W ₇	1	2.2	0.66	norm(0.1,0.01)
W ₇ →P ₃	1	22.65	6	norm(1,0.1)
W ₈ →W ₉	1	7	2.828	norm(0.5,0.1)
W ₉ →W ₁	0.9			
W ₉ →P ₁	0.1	16	6	uniform(1.98,2.05)

注: norm 为正态分布, expo 为指数分布, tria 为三角分布, uniform 为均匀分布.

表 2 10~80 h 各工序瓶颈指数

Tab.2 Bottleneck index of each operation during 10-80 h

工序	瓶颈指数							
	10 h	20 h	30 h	40 h	50 h	60 h	70 h	80 h
W ₁	0.148 55	0.149 30	0.150 86	0.151 55	0.151 60	0.152 07	0.151 84	0.151 10
W ₂	0.027 15	0.027 37	0.027 56	0.027 68	0.027 75	0.027 81	0.027 74	0.027 58
W ₃	0.104 86	0.103 72	0.105 03	0.104 92	0.104 94	0.105 50	0.105 47	0.104 75
W ₄	0.216 77	0.222 92	0.221 89	0.223 86	0.223 30	0.223 83	0.224 08	0.222 42
W ₅	0.039 36	0.041 49	0.040 99	0.041 58	0.040 74	0.041 47	0.041 84	0.041 61
W ₆	0.002 11	0.002 16	0.002 21	0.002 20	0.002 17	0.002 17	0.002 18	0.002 18
W ₇	0.213 46	0.223 72	0.228 25	0.227 92	0.224 39	0.224 10	0.224 06	0.224 37
W ₈	0.026 01	0.024 59	0.023 89	0.023 53	0.024 25	0.023 83	0.023 87	0.024 12
W ₉	0.235 16	0.218 31	0.211 55	0.209 35	0.212 94	0.210 96	0.211 02	0.213 97

表3 90~160 h各工序瓶颈指数
Tab.3 Bottleneck index of each operation during 90-160 h

工序	瓶颈指数							
	90 h	100 h	110 h	120 h	130 h	140 h	150 h	160 h
W ₁	0.150 48	0.149 92	0.150 24	0.150 05	0.149 93	0.149 69	0.149 59	0.149 53
W ₂	0.027 46	0.027 37	0.027 41	0.027 42	0.027 41	0.027 35	0.027 32	0.027 32
W ₃	0.104 08	0.103 77	0.103 78	0.103 87	0.103 75	0.103 47	0.103 33	0.103 31
W ₄	0.224 85	0.225 64	0.225 73	0.225 67	0.224 82	0.224 29	0.224 59	0.226 09
W ₅	0.043 10	0.043 23	0.042 94	0.043 17	0.042 70	0.042 77	0.043 06	0.043 51
W ₆	0.002 19	0.002 17	0.002 19	0.002 19	0.002 19	0.002 20	0.002 21	0.002 20
W ₇	0.225 06	0.224 08	0.225 50	0.225 95	0.226 67	0.227 63	0.228 13	0.227 46
W ₈	0.024 14	0.024 28	0.024 09	0.024 00	0.023 95	0.023 98	0.023 87	0.023 90
W ₉	0.212 92	0.214 72	0.213 43	0.212 84	0.213 26	0.213 18	0.212 64	0.212 54

表4 170~240 h各工序瓶颈指数
Tab.4 Bottleneck index of each operation during 170-240 h

工序	瓶颈指数							
	170 h	180 h	190 h	200 h	210 h	220 h	230 h	240 h
W ₁	0.149 38	0.149 29	0.149 55	0.149 44	0.149 56	0.149 40	0.149 63	0.149 74
W ₂	0.027 29	0.027 26	0.027 31	0.027 30	0.027 32	0.027 28	0.027 32	0.027 34
W ₃	0.103 11	0.102 94	0.103 10	0.103 11	0.103 15	0.102 92	0.103 09	0.103 08
W ₄	0.225 81	0.225 51	0.225 70	0.227 23	0.227 46	0.227 96	0.227 65	0.227 12
W ₅	0.043 44	0.043 77	0.043 83	0.044 35	0.044 43	0.044 49	0.044 27	0.044 05
W ₆	0.002 20	0.002 20	0.002 20	0.002 20	0.002 20	0.002 20	0.002 20	0.002 21
W ₇	0.227 69	0.227 95	0.227 62	0.227 34	0.227 22	0.227 31	0.227 65	0.228 00
W ₈	0.023 88	0.023 96	0.023 90	0.023 84	0.023 82	0.023 87	0.023 81	0.023 83
W ₉	0.212 80	0.212 78	0.212 29	0.211 46	0.211 25	0.211 43	0.210 84	0.210 76

和清洗(W₇)3个工序之间的漂移情况以及各工序在成为瓶颈时所持续的时间.散点图则表明当某一工序在某一时刻成为瓶颈时,该工序瓶颈指数的大小.在连杆再制造生产工艺路线中,刷镀(W₉)首先成为瓶颈,维持相应时间后,在清洗(W₇)工序和铣削(W₄)工序之间漂移.其中,在清洗(W₇)工序成为瓶颈所维持的时间最长,达到170 h.实际生产过程中,刷镀、铣削和清洗工序的机器相对于其他工序的机器加工功率大,且加工时间长,能量消耗大,因此这3个工序有很大可能成为系统的瓶颈工序.清洗工序属于最后一个工序,在加工一段时间之后,清洗工序之前的缓存区存放了大量的待加工件,从而出现了清洗设备超负荷运转的情况,使清洗工序成为瓶颈工序的时间最长.工厂在处理此类状况时,通常放缓其他工序的加工速度,并在清洗工序增加机器.仿真结果与实际生产完全吻合,也证明了该方法的有效性.

当作业车间存在着不确定影响因素时,再制

造系统的能耗瓶颈工序会产生动态变化,它可能会在不同工序之间连续转移,即在连杆再制造系统运行时,存在多个瓶颈,给瓶颈识别带来了许多困难.然而,提高连杆再制造系统的性能是企业最关注的问题.本文首先提出能耗瓶颈指数这一概念,通过实时计算得到各工序的能耗瓶颈指数值,并进行比较,最大值即为系统的能耗瓶颈,并在此基础上,确定了一种新的动态瓶颈检测方法,为企业进行瓶颈改善提供了理论基础.

4.3 瓶颈漂移因素的改变对系统瓶颈的敏感性分析

以某发动机再制造公司对连杆进行再制造加工为例,运用正交试验的方法研究连杆再制造系统不确定性因素对系统能耗瓶颈敏感度.连杆再制造系统由9个工序组成,试验变量包含9道工序的平均服务率 μ 、3道工序的零件退出率 ω 以及整个连杆系统的再制造率 r .采用全因子试验的方法需要进行 3^{13} 次试验,试验量较大.因此本节

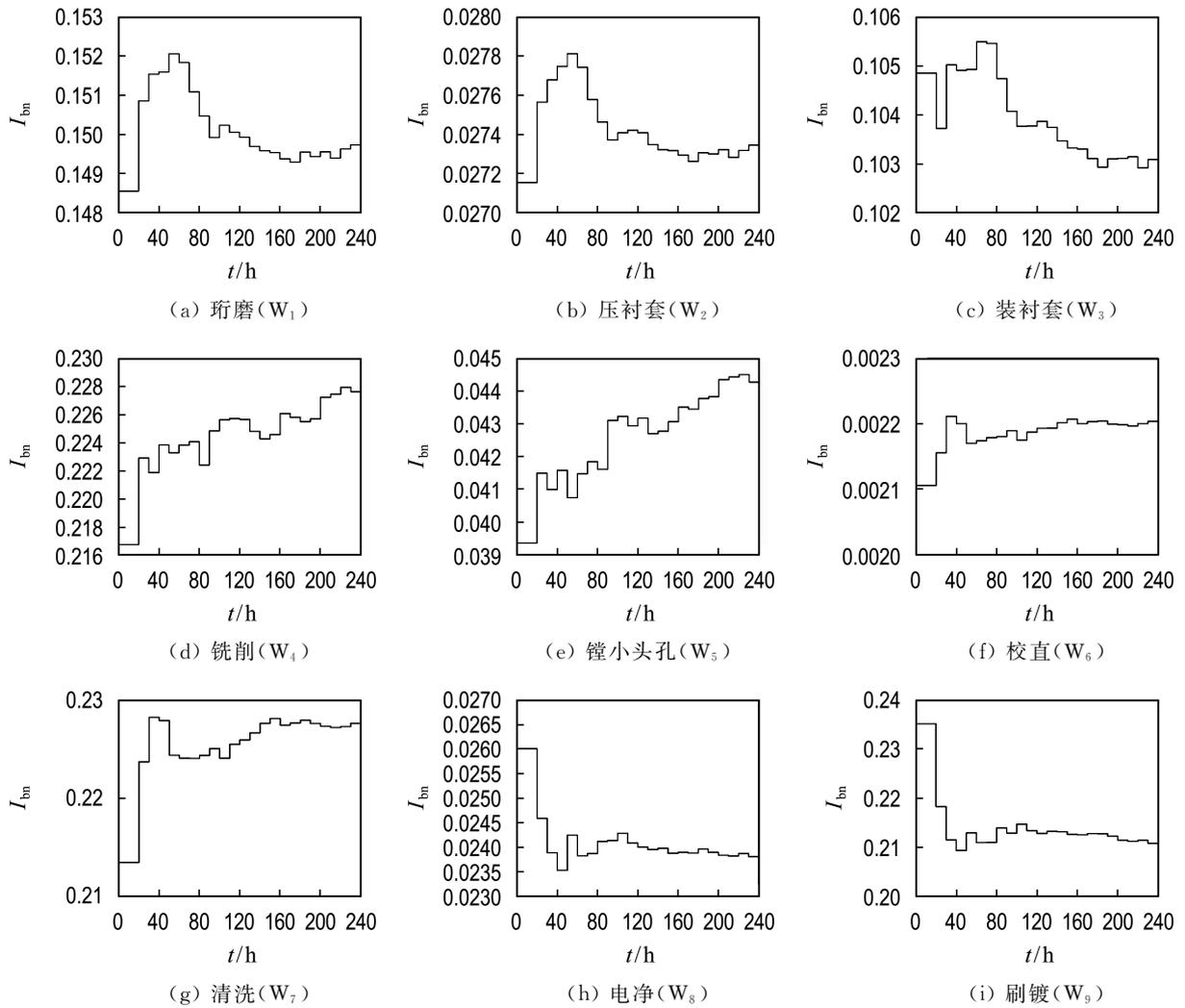


图4 各工序瓶颈指数及其波动性分析

Fig. 4 Analysis of bottleneck index and its fluctuation of each operation

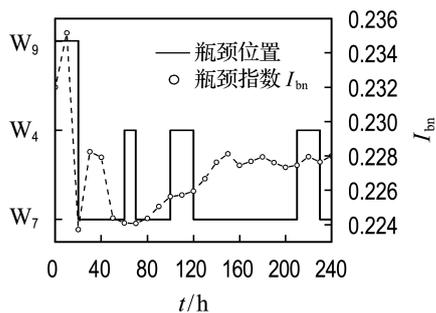


图5 瓶颈工序变化及其瓶颈指数

Fig. 5 The change of bottleneck operation and its bottleneck index

采用正交试验设计 $L_{27}(3^{13})$ 代替全因子试验设计方法,分析连杆再制造系统不确定性因素对系统能耗瓶颈的敏感度. 不确定性因素及其水平如表5所示,假设所有工序加工时间全部服从指数分布.

表5 不确定性因素及其水平

Tab. 5 Uncertain factors and their level

水平 L	r	μ_i	ω_i
1	0.7	1/8	0.05
2	0.8	1/4	0.10
3	0.9	1/2	0.15

如表6所示,通过改变系统主要的不确定性因素,即平均服务率、回收件再制造率及部分工序的零件退出率,观察系统能耗瓶颈持续时间和性能的变化.

由表6可知连杆再制造系统所存在的不确定性因素显著影响各工序成为能耗瓶颈的概率和某工序成为能耗瓶颈后所持续的时间,同时也对系统在10 d内的产出有显著的影响. 试验结果显示能耗瓶颈工序主要出现在装衬套(W_3)、清洗

表6 不同试验因素组合下各工序成为瓶颈持续时间及系统产出

Tab.6 The duration and system output of each operation becoming bottleneck under the combination of different test factors

No.	r	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4	μ_5	μ_6	μ_7	μ_8	μ_9	ω_1	ω_4	ω_9	t/h									产出
														1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	0.7	1/2	1/8	1/2	1/2	1/2	1/2	1/8	1/2	1/8	0.10	0.10	0.15	0	0	0	0	50	0	180	0	10	2 897
2	0.7	1/4	1/8	1/4	1/4	1/4	1/4	1/8	1/4	1/8	0.15	0.15	0.10	0	0	0	0	0	0	240	0	0	1 702
3	0.7	1/8	1/2	1/2	1/4	1/2	1/4	1/2	1/4	1/2	0.10	0.05	0.05	0	0	0	0	0	230	0	10	0	3 416
4	0.7	1/2	1/4	1/8	1/4	1/8	1/4	1/4	1/4	1/4	0.05	0.10	0.15	0	0	240	0	0	0	0	0	0	1 628
5	0.7	1/2	1/2	1/4	1/8	1/4	1/8	1/2	1/8	1/2	0.15	0.10	0.15	0	0	0	0	0	0	0	240	0	1 661
6	0.7	1/4	1/4	1/2	1/8	1/2	1/8	1/4	1/8	1/4	0.10	0.15	0.10	0	0	0	0	0	0	0	240	0	1 478
7	0.7	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	1/8	0.05	0.05	0.05	0	0	0	0	0	0	0	240	0	1 651
8	0.7	1/4	1/2	1/8	1/2	1/8	1/2	1/2	1/2	1/2	0.05	0.15	0.10	0	0	240	0	0	0	0	0	0	1 470
9	0.7	1/8	1/4	1/4	1/2	1/4	1/2	1/4	1/2	1/4	0.15	0.05	0.05	0	0	0	0	0	0	240	0	0	3 469
10	0.8	1/2	1/2	1/8	1/8	1/4	1/4	1/4	1/2	1/8	0.10	0.15	0.05	0	0	240	0	0	0	0	0	0	1 510
11	0.8	1/8	1/8	1/2	1/8	1/8	1/4	1/2	1/2	1/4	0.15	0.10	0.10	0	240	0	0	0	0	0	0	0	1 552
12	0.8	1/4	1/8	1/8	1/4	1/4	1/2	1/2	1/8	1/4	0.10	0.05	0.15	0	0	0	0	0	0	0	240	0	1 725
13	0.8	1/8	1/2	1/4	1/4	1/2	1/2	1/4	1/8	1/8	0.05	0.10	0.10	0	0	0	0	0	0	0	240	0	3 102
14	0.8	1/8	1/4	1/8	1/2	1/4	1/8	1/8	1/4	1/2	0.10	0.10	0.10	0	0	240	0	0	0	0	0	0	1 571
15	0.8	1/2	1/8	1/4	1/2	1/2	1/8	1/2	1/4	1/4	0.05	0.15	0.05	0	0	0	0	0	0	210	30	0	1 818
16	0.8	1/2	1/4	1/2	1/4	1/8	1/2	1/8	1/8	1/2	0.15	0.15	0.05	0	0	0	0	0	0	190	50	0	1 745
17	0.8	1/4	1/4	1/4	1/8	1/2	1/4	1/8	1/2	1/2	0.05	0.05	0.15	0	0	230	0	0	0	10	0	0	1 711
18	0.8	1/4	1/2	1/2	1/2	1/8	1/8	1/4	1/4	1/8	0.15	0.05	0.15	0	0	0	240	0	0	0	0	0	1 798
19	0.9	1/2	1/2	1/2	1/8	1/4	1/2	1/8	1/4	1/4	0.05	0.05	0.10	0	0	0	0	0	0	240	0	0	1 694
20	0.9	1/4	1/2	1/4	1/2	1/8	1/4	1/8	1/8	1/4	0.10	0.10	0.05	0	0	0	0	0	0	230	10	0	1 798
21	0.9	1/8	1/4	1/2	1/2	1/4	1/4	1/2	1/8	1/8	0.05	0.15	0.15	0	0	0	0	0	0	0	240	0	3 436
22	0.9	1/8	1/8	1/4	1/8	1/8	1/2	1/4	1/4	1/2	0.10	0.15	0.15	0	240	0	0	0	0	0	0	0	1 522
23	0.9	1/4	1/4	1/8	1/8	1/2	1/2	1/2	1/4	1/8	0.15	0.10	0.05	0	0	240	0	0	0	0	0	0	1 551
24	0.9	1/2	1/8	1/8	1/2	1/2	1/4	1/4	1/8	1/2	0.15	0.05	0.10	0	0	0	0	0	0	0	240	0	1 710
25	0.9	1/4	1/8	1/2	1/4	1/4	1/8	1/4	1/2	1/2	0.05	0.10	0.05	0	240	0	0	0	0	0	0	0	1 842
26	0.9	1/2	1/4	1/4	1/4	1/8	1/8	1/2	1/2	1/8	0.10	0.05	0.10	0	0	0	0	0	240	0	0	0	1 815
27	0.9	1/8	1/2	1/8	1/4	1/2	1/8	1/8	1/2	1/4	0.15	0.15	0.15	0	0	230	0	0	0	10	0	0	1 462

(W_7)和电净(W_8)工序。

如图6~8所示,通过计算装衬套(W_3)、清洗(W_7)和电净(W_8)工序的每个因素在不同水平下所得到的瓶颈响应(持续时间)均值极差 R_i ,然后将计算的值通过比较大小之后进行排名(图6(a)~8(a)),选择排名靠前的两个瓶颈漂移因素作为主导因素,绘出其主效应图(如图6(b)~8(b)).均值极差的大小体现了瓶颈漂移因素对瓶颈响应的影 响程度。

(1)平均服务率:由图6~8可知:在一般情况下,某工序平均服务率 μ 越低,该工序成为瓶颈后所持续的时间越长,即平均服务率对能耗瓶颈持续时间有显著的负影响(如图7(b)).如图6(b)所

示, μ_2 对装衬套(W_3)成为瓶颈工序所持续的时间先具有正作用,达到一定水平之后,反而起到负影响.具有正作用的原因与该工序存在回流加工相关,起到负影响的原因可能是因为在装衬套(W_3)工序,由于上游工序加工量减少导致进入下一工序的待加工零件变少,使得该工序的加工负荷减小.如图8(b)所示, μ_7 对电净(W_8)成为瓶颈工序所持续的时间具有正影响,可能的原因是在实际生产过程中,考虑到可能在电净(W_8)工序上存在回流加工,使得清洗(W_7)成为该工序的下游工序,这也有可能是该工序成为能耗瓶颈工序的原因。

(2)再制造率:再制造率 r 对某工序成为瓶颈

工序的可能性及成为瓶颈工序后所持续的时间没有显著的影响。

(3) 零件退出率：各个工序的零件退出率 ω

对工序成为瓶颈工序的可能性及成为瓶颈工序后所持续的时间具有不同程度的正影响，但是相较于平均服务率，其影响程度较小。

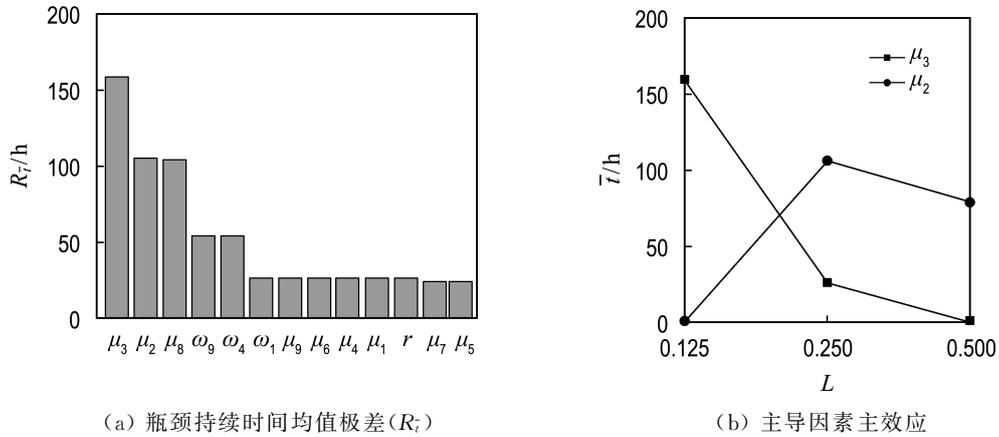


图6 装衬套(W_3)主导因素及其效应

Fig. 6 Dominant factors and effects of bushing (W_3)

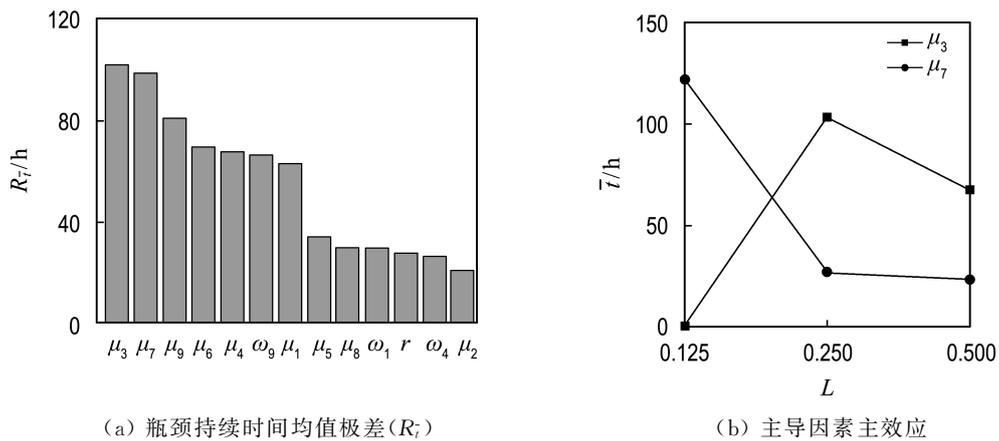


图7 清洗(W_7)主导因素及其效应

Fig. 7 Dominant factors and effects of cleaning (W_7)

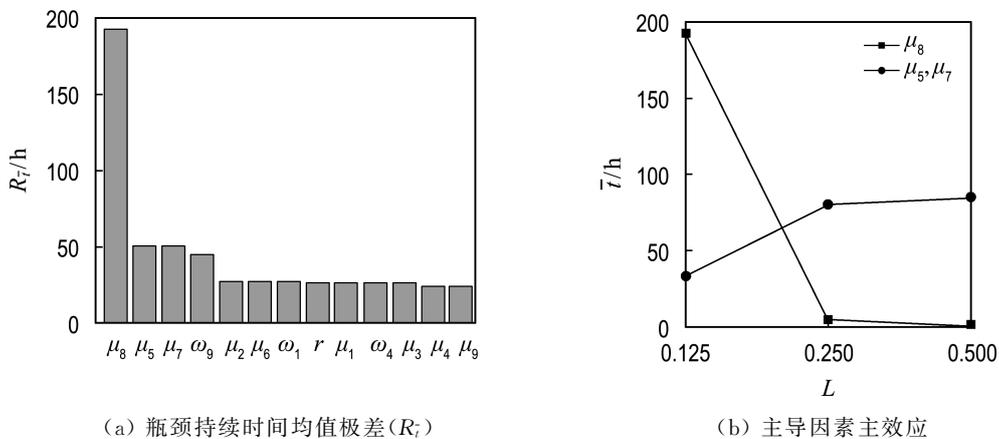
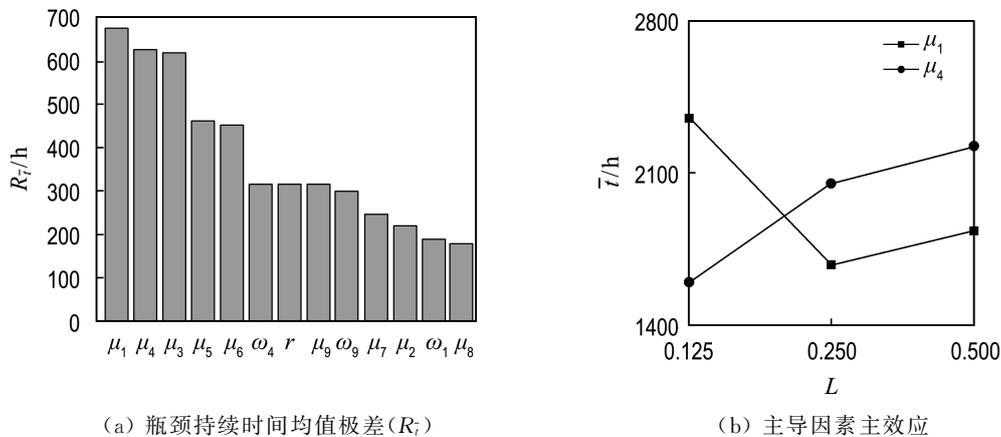


图8 电净(W_8)主导因素及其效应

Fig. 8 Dominant factors and effects of electric cleaning (W_8)

如图9所示,第1道工序珩磨(W_1)、第4道工序铣削(W_4)的平均服务率较大幅度影响系统产出,但并未得到平均服务率越高,系统产出就越

高的结论,原因可能是回收件连杆的各种不确定因素累积使得连杆再制造系统难以稳定输出。



(a) 瓶颈持续时间均值极差(R_i)

(b) 主导因素主效应

图9 影响产出主导因素及其效应

Fig.9 Dominant factors influencing output and their effects

5 结 语

本文考虑再制造加工回收件过程中能耗的不确定性,提出 EVAEC 这一指标用来描述瓶颈漂移特性;通过离散型制造系统仿真技术建立模型,模拟再制造车间的加工过程,对系统能耗瓶颈进行动态监测;对系统瓶颈指数及其波动性进行分析,以便决策者采取措施来改善瓶颈,优化系统性能。

为更好地研究不确定性环境下系统能耗瓶颈漂移因素影响,本文做出了一些假设,如各工序之间的人工搬运时间取 0.5 min. 在以后的研究中,可以加上各种不确定性因素的影响,分析能耗瓶颈漂移特性. 此外,提前预测瓶颈漂移的趋势与描述瓶颈指数对各种瓶颈漂移因素的影响,可对再制造系统的改善和优化提供理论基础. 因此,下一步的研究重点将在瓶颈漂移趋势的预测。

参 考 文 献:

- [1] JIANG Zhigang, JIANG Ya, YAN Wang, *et al.* A hybrid approach of rough set and case-based reasoning to remanufacturing process planning [J]. **Journal of Intelligent Manufacturing**, 2019, **30**(1): 19-32.
- [2] TONKE D, GRUNOW M, AKKERMAN R. Robotic-cell scheduling with pick-up constraints and uncertain processing times [J]. **IIE Transactions**, 2019, **51**(11): 1217-1235.

- [3] CAI Wei, LI Li, JIA Shun, *et al.* Task-oriented energy benchmark of machining systems for energy-efficient production [J]. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology**, 2020, **7**(1): 205-218.
- [4] 苏 春,曹白雪. 考虑质量不确定性的再制造系统动态瓶颈分析 [J]. **计算机集成制造系统**, 2014, **20**(5): 1062-1069.
SU Chun, CAO Baixue. Dynamic bottleneck analysis for remanufacturing system considering quality uncertainty [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2014, **20**(5): 1062-1069. (in Chinese)
- [5] FANG Weiguang, GUO Yu, LIAO Wenhe, *et al.* A parallel gated recurrent units (P-GRUs) network for the shifting lateness bottleneck prediction in make-to-order production system [J]. **Computers and Industrial Engineering**, 2020, **140**: 106246.
- [6] 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**, 2019: 20194707713827.
- [7] 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**, 2017, **231**(6):

- 1091-1101.
- [8] 凌 琳, 刘明周, 唐 娟, 等. 制造车间生产物流瓶颈指数研究 [J]. 农业机械学报, 2012, **43**(5): 197-202.
LING Lin, LIU Mingzhou, TANG Juan, *et al.* Bottleneck index of production logistic in manufacturing shop [J]. **Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery**, 2012, **43**(5): 197-202. (in Chinese)
- [9] 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 Yingni, SUN Shudong, WANG Junqiang, *et al.* Bottleneck detection method based on orthogonal experiment for job shop [J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2010, **16**(9): 1945-1952. (in Chinese)
- [10] HUANG Bin, WANG Wenbo, SHAN Ren, *et al.* A proactive task dispatching method based on future bottleneck prediction for the smart factory [J]. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, 2019, **32**(3): 278-293.
- [11] THÜRER M, STEVENSON M. Bottleneck-oriented order release with shifting bottlenecks: An assessment by simulation [J]. **International Journal of Production Economics**, 2018, **197**: 275-282.
- [12] KHAN M A, MITTAL S, WEST S, *et al.* Review on upgradability - A product lifetime extension strategy in the context of product service systems [J]. **Journal of Cleaner Production**, 2018, **204**: 1154-1168.
- [13] FERGUSON M, GUIDE V D, KOCA E, *et al.* The value of quality grading in remanufacturing [J]. **Production and Operations Management**, 2009, **18**(3): 300-314.
- [14] 郭燕春, 李 涛, 彭世通, 等. 零件再制造过程的不确定能耗建模与评估方法 [J]. 大连理工大学学报, 2019, **59**(1): 45-52.
GUO Yanchun, LI Tao, PENG Shitong, *et al.* Uncertain energy consumption modeling and evaluation method for parts remanufacturing [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 2019, **59**(1): 45-52. (in Chinese)
- [15] AZIZ M H, BOHEZ E, KANDA Y, *et al.* Bottleneck oriented card-based production control for push repetitive manufacturing systems [J]. **Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing**, 2013, **7**(3): 377-397.

Analysis of energy bottleneck shifting in remanufacturing system under uncertainty

XUE Zheng, LI Tao*, PENG Shitong

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Given bottleneck shifting in a remanufacturing system under uncertainties would result in increasing difficulty of energy bottleneck operation identification. Considering a dynamic variation of processing time and power at each operation based on the description of the uncertainty of returns, an energy bottleneck index named value added energy consumption is proposed. Processing routes of remanufacturing job shop are simulated by the Arena software to realize real-time monitoring of the energy bottleneck index of the system. The analysis of the energy bottleneck index and its fluctuation can realize the visualization of energy bottleneck shifting and reveal the law of bottleneck shifting. The sensitivity analysis of the uncertainty factors to the system energy bottleneck is studied by the orthogonal test. The connecting rod remanufacturing is taken as an illustrative example to conduct the investigation of bottleneck shifting. The results indicate that the energy bottleneck index and energy bottleneck shifting method can provide an accurate and effective theoretical basis for energy bottleneck identification and shifting properties analysis.

Key words: remanufacturing; uncertainty; energy bottleneck; bottleneck shifting; value added energy consumption