

基于瓶颈指数的生产物流瓶颈监测研究

刘金波^{1,2}, 张 正^{1,2}, 方志梅^{1,2*}

(1.宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2.浙江省零件轧制成型技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为实现计划期内不同时刻生产物流瓶颈的动态监测, 研究了瞬时瓶颈的监测方法. 基于产品制造过程中输入、生产、输出各阶段的相关数据, 综合考虑制造单元的产能负荷、产品质量及等待时间对瓶颈度的影响, 建立瓶颈指数的修正模型; 并提出瞬时瓶颈的概念, 以瓶颈指数为基础, 构建包括瞬时瓶颈识别、转移判断的监测模型和动态监测流程, 为生产物流瓶颈的动态监测及事中控制提供决策依据. 算例应用结果表明, 数据易获, 方法可行.

关键词: 生产物流; 瞬时瓶颈; 瓶颈指数; 动态监测

中图分类号: TH166

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 04-0050-07

在产品生产计划期内, 由于存在许多不确定性因素, 生产物流系统的产能负荷比会动态变化, 使系统的瓶颈具有动态性, 导致产品生产过程的精准控制比较困难. 因此, 迅速、准确地对计划期内的生产物流瓶颈进行动态监测至关重要.

目前, 对于生产物流瓶颈的研究主要集中在瓶颈的识别和预测上. 对于瓶颈识别, 有以瓶颈外部表现特征为指标进行识别. 如 Pollett^[1]将具有最长平均等待时间的设备定义为系统的瓶颈; Roser 等^[2]用设备持续活性时间来识别离散事件系统的主次瓶颈; Zuo 等^[3]以设备负荷率为指标进行识别; 文献[4-5]通过统计设备饥饿或阻塞的概率来识别瓶颈. 有以数学建模方法进行识别, 如 Liu 等^[6]提出瓶颈度的概念, 并构建了用于瓶颈识别的瓶颈指数数学模型; 王军强等^[7]以完工时间和拖期时间之和最小作为作业调度的性能指标, 用以构建作业车间调度模型, 通过获得最优调度实现瓶颈识别; 黄卓平等^[8]以延迟惩罚成本为目标函数, 建立以延迟惩罚成本为识别指标的瓶颈辨识模型. 还有以仿真方法进行识别, 如苏春^[9]等建立仿真模型实现动态瓶颈的可视化和识别; 陈佳琪等^[10]利用 witness 仿真软件确定座椅调角器生产中的瓶颈工位; 潘春荣等^[11]运用 Petri 网和 EM-Plant 仿真软件

对印刷包装生产系统进行建模仿真, 结合 TOC 理论和仿真结果识别并优化系统瓶颈; 蒋益良等^[12]采用 IDEF0 建模方法和 SIMIO 仿真软件对虚拟企业生产物流系统进行建模仿真, 以识别系统瓶颈.

对瓶颈预测的研究更多是在瓶颈漂移研究基础上进行. 如凌琳等^[13]构建了贡献函数, 以预测各种因素对生产能力和生产负荷的贡献度, 并以贡献度和质量保证能力为参数, 在瓶颈指数建模基础上建立生产物流瓶颈的预测模型, 以实现不确定性制造环境下的多瓶颈动态预测; 刘志等^[14-15]在文献[6]基础上, 提出瓶颈多态性概念, 进行定量描述, 并基于瓶颈指数构建瓶颈漂移指数数学模型, 以实现瓶颈的动态连续预测. 李晓娟等^[16-17]根据设备工艺、工艺路线、物流路径和产品配置等生产数据, 建立作业车间网络模型, 通过计算模型中节点瓶颈度, 实现瓶颈预测. 曹政才^[18]利用复合定义描述设备综合瓶颈, 构建了基于增长修剪型神经网络(GPNN)预测模型, 并利用闭环控制思想预测半导体生产线的瓶颈.

不管是瓶颈的识别还是预测, 以往研究主要是对计划期内生产系统固有的一个或几个瓶颈进行识别或预测, 而缺乏对计划期内不同时刻的瓶颈位置变化进行动态分析. 相较于注重事后控制

收稿日期: 2019-01-29.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 浙江省自然科学基金(Y16G010004).

第一作者: 刘金波(1994-), 男, 福建古田人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 制造系统与制造模式. E-mail: 352704257@qq.com

*通信作者: 方志梅(1961-), 女, 浙江宁波人, 教授, 主要研究方向: 制造系统与制造模式. E-mail: fangzhimei@nbu.edu.cn

的瓶颈识别和事前控制的瓶颈预测,动态监测更注重瓶颈的事中控制.利用瓶颈外部表现特征的识别方法虽然在一定程度上能反映瓶颈的动态情况,但由于其参考指标的单一性和外在表征性,仅能作为瓶颈动态判定的必要条件.本文在文献[6]基础上,对瓶颈指数的数学模型进行修正,并据此提出瞬时瓶颈的概念,构建瞬时瓶颈动态监测模型,实现生产物流瓶颈的动态监测.

1 瓶颈指数数学模型的构建

瓶颈度表示生产过程中制造单元在内外部各种不确定性因素的共同影响下成为瓶颈的能力^[7],即制造单元成为瓶颈的可能性,这是制造单元一种固有的动态属性.而瓶颈指数是衡量制造单元瓶颈度大小的一个指标,瓶颈指数越大,表示其成为瓶颈的可能性越大.

文献[6]考虑了制造单元上生产和质量方面的能力、负荷对瓶颈度的影响,以质量能力、质量需求、生产能力和生产负荷为参数,构建瓶颈指数的数学模型,一定程度上能识别计划期内的主次瓶颈位置,但由于忽略了设备故障等一些不确定性因素的影响,使瓶颈度动态状况的度量不够准确.

1.1 瓶颈指数的修正模型

生产过程不可避免会存在各种不确定性因素,其中设备故障最为常见,它会影响制造单元的生产能力,改变其瓶颈度大小,此外,在制品若因各种原因在制造单元前等待较长时间,则会直接导致生产物流堵塞,进而成为瓶颈,因此这两个因素应该在瓶颈指数的建模中予以考虑.于是瓶颈指数数学模型的修正将在文献[6]基础上,综合考虑能力负荷、产品质量、设备故障和等待时间对瓶颈度的影响.

1.1.1 考虑制造单元的能力负荷影响

制造单元的能力负荷比 $f(q)$ 是影响瓶颈度的最直接参数,其量化公式如下:

$$f(q) = \frac{\sum_{j=1}^n q_{ij} t_{ij}}{T_i(1 - \delta_i)}, \quad (1)$$

式中, q_{ij} 表示零件 j 在制造单元 i 上的实时生产数量, i ($i=1, 2, \dots, m$) 表示制造单元, j ($j=1, 2, \dots, n$) 表示加工零件的种类; t_{ij} 为零件 j 在制造单元 i 上的平均单位工时,取自于历史数据统计; T_i 为制造

单元 i 在计划期内的可用生产时间; δ_i 是制造单元 i 的设备故障率.

由于 $f(q)$ 基于实时的零件生产数量,又考虑了设备故障率,因而能够反映制造单元动态的能力负荷比.

1.1.2 考虑生产质量的影响

在生产质量方面,首先是不合格品对瓶颈度的影响,用 $f_Q(p)$ 表示其影响函数.生产过程中的不合格品一般分为报废品、返修品,它们对生产系统的影响各不相同,若是报废品会变相增加生产负荷,而返修品如果是在原生产线返工,则会导致生产单元上可用的有效时间减少,此时其对瓶颈度的影响函数可表示为:

$$f_Q(p) = \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij} t_{ij}}{T_i(1 - \delta_i) - \Delta p_i(t)}, \quad (2)$$

式中, p_{ij} 表示制造单元 i 加工零件 j 的报废品数量; $\Delta p_i(t)$ 表示返修品在制造单元 i 上的返修时间.如果返修品是在专门的返修区返工,则不影响原制造单元的可用时间,此时(2)式中的 $\Delta p_i(t) = 0$,即只考虑报废品对瓶颈度的影响.

其次,生产质量还表现为合格产品质量特征的稳健性,这不仅是保证工序质量稳定的一种能力,也是后续加工过程的质量保证,其对瓶颈度的影响与制造单元的过程能力指数 C_p 相关,可用 $f_Q(C_p)$ 表示. C_p 表示制造单元的工序能力满足技术要求的程度,反映生产过程的质量保证能力,其按数值由高到低分为特级、一级、……、四级, C_p 值越大,表明工序满足质量标准的能力越强,产品质量的稳定性就越高,因而对瓶颈度的影响也就越小;反之,则工序质量不够稳定,不合格率升高,对瓶颈度的影响就加大,极限情况下,生产处于停滞状态.据此,参照文献[6]和[19], $f_Q(C_p)$ 的确定规则见表1,表中 $\alpha_1 = 1.67$, $\alpha_2 = 1.33$, $\alpha_3 = 1.00$, $\alpha_4 = 0.67$ 为过程能力指数的评价标准, C_p^i 表示制造单元 i 的过程能力指数.

1.1.3 考虑零件等待时间的影响

零件在制造单元前大量等待加工,表明生产物流存在堵塞现象,堵塞点就有可能成为瓶颈,这里用零件在制造单元 i 前的实际等待时间和理论等待时间的比值 $g(t)$ 来表示等待时间对瓶颈度的影

表1 $f_Q(C_p)$ 和 β 值的确定规则

C_p 值范围	等级	能力评价	$f_Q(C_p)$	β
$C_p > \alpha_1$	特级	过程能力 过于充足	0	0
$\alpha_2 < C_p \leq \alpha_1$	一级	过程能力 充足		
$\alpha_3 < C_p \leq \alpha_2$	二级	过程能力 尚可	α_3 / C_p^i	$(0, \theta_1]$
$\alpha_4 < C_p \leq \alpha_3$	三级	过程能力 不足		$(\theta_1, 1)$
$C_p \leq \alpha_4$	四级	过程能力 严重不足	∞	1

响函数, 公式如下:

$$g(t) = \frac{\sum_{j=1}^n V_{ij}}{\sum_{j=1}^n q_{ij} z_{ij}}, \quad (3)$$

式中, V_{ij} 表示零件 j 在制造单元 i 前的实际等待时间; z_{ij} 表示零件 j 在制造单元 i 前单位零件平均等待时间, 由历史数据统计得到。

1.1.4 瓶颈指数的修正模型

综上, 将各影响因素合成, 即得瓶颈指数的修正模型为(4)式。式中, E_i 为制造单元 i 的瓶颈指数; α , β , γ 为权重系数, 由于 $f(q)$ 和 $f_Q(p)$ 都是以生产过程中的产品实时加工数量(生产数量 and 不合格品数量)为依据, 故合并共用权重系数 α 。

$$E_i = \alpha[f(q) + f_Q(p)] + \beta f_Q(C_p) + \gamma g(t). \quad (4)$$

将(1)~(3)式代入(4)式则得:

$$E_i = \alpha \left[\frac{\sum_{j=1}^n q_{ij} t_{ij}}{T_i (1 - \delta_i)} + \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij} t_{ij}}{T_i (1 - \delta_i) - \Delta p_i(t)} \right] + \beta f_Q(C_p) + \frac{\gamma \sum_{j=1}^n V_{ij}}{\sum_{j=1}^n q_{ij} z_{ij}}. \quad (5)$$

该模型采用产品生产过程中的输入、加工、输出三个阶段实际可获得的相关数据, 综合反映了生产过程中的制造单元能力负荷、生产质量以及零件等待时间对瓶颈度的影响。由于不同时刻可以获得不同的生产数量和零件等待时间, 故修正模型能更全面地反映制造单元的动态瓶颈度, 可以

支持瓶颈的动态监测。

1.2 修正模型权重系数的确定规则

因为 $\alpha + \beta + \gamma = 1$, 因此只需确定其中 2 个权重系数即可。

1.2.1 β 值确定规则

β 是合格产品质量特征的稳健性对瓶颈度影响的权重。制造单元的产品质量越稳定, 对瓶颈度的影响就越小, 则 β 在瓶颈指数模型中的比重就越小; 反之, 如果制造单元的产品质量波动大, 则其越有可能成为瓶颈, 且在极限情况下将成为决定性因素。

由于 $f_Q(C_p)$ 与制造单元的过程能力指数相关, 参照文献[6]和[19]根据过程能力指数来确定 β , 遵循区间模糊取值, 但需满足 β 随 C_p 值变大而取小, 具体规则见表 1, 表中 $\theta_1 \in (0, 1)$, 采用层次分析法计算正常生产情况下零件加工数量、产品质量以及等待时间在瓶颈指数中的权重, 将其中产品质量的权值作为 β 的临界值, 得到 $\theta_1 = 0.31$ 。

1.2.2 γ 值确定规则

γ 取值取决于 $g(t)$ 的大小, 为此引入表征等待时间对生产线影响程度的评价标准 b , 来表示零件等待时间对瓶颈度影响的敏感界限, 可取瓶颈制造单元处 $g(t)$ 的历史数据均值。

当 $g(t) \leq 1$, 说明在加工过程中零件不存在等待现象, 生产物流畅通, 则 $\gamma = 0$, 即瓶颈指数修正模型中不必考虑等待时间的因素。

当 $1 < g(t) \leq b$, 说明此时生产物流虽存在零件等待加工现象, 但因在生产线上可适应范围内, 生产线能及时调整该等待时间造成的影响, 因此其对瓶颈度影响不大, γ 取值可以较小。当 $g(t) > b$, 说明零件等待现象严重, 生产线无法在短时间内调整正常, 此时对瓶颈度的影响很大, 则 γ 在瓶颈指数修正模型中的权值也较大, 且 $g(t)$ 越大 γ 也越大, 确定规则见表 2。

表2 γ 值确定规则

$g(t)$ 值范围	等待判断时间	γ
$0 \leq g(t) \leq 1$	无需等待	0
$1 < g(t) \leq b$	等待时间稍长	$(0, \theta_2]$
$g(t) > b$	等待时间过长	$(\theta_2, 1)$

表中 $\theta_2 \in (0, 1)$, 采用层次分析法, 计算正常生产情况下产品数量、产品质量以及等待时间在瓶颈

指数中的权重, 将其中等待时间的权值作为 γ 的临界值, 得 $\theta_2 = 0.20$.

2 基于瓶颈指数的瓶颈监测建模

在各种不确定性因素的影响下, 生产物流系统在计划期内的瓶颈位置会在不同时刻发生变化, 为此提出采用瞬时瓶颈表示产品计划期内生产物流某一时刻的瓶颈位置. 于是生产物流的瓶颈监测就是对不同制造单元瞬时瓶颈的识别和不同时刻瞬时瓶颈的转移判断.

2.1 瞬时瓶颈识别

所谓瞬时瓶颈识别即是同一时刻对生产物流的瓶颈识别. 由前文可知, 生产物流系统中制造单元的瓶颈指数越大, 则其越容易成为系统的瓶颈. 据此, 将 T 时刻瓶颈指数最大的制造单元定义为该时刻系统的瞬时瓶颈 B_{BN} , 其表达式为:

$$B_{BN} = \max \{E_{i,T}\}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$$

2.2 瞬时瓶颈转移判断

瞬时瓶颈转移判断是对不同时刻瓶颈单元是否发生转移进行评判. 方法是将当前时刻($T + \Delta T$ 时刻)各制造单元的瞬时瓶颈指数与前一时刻(T 时刻)瓶颈制造单元的瞬时瓶颈指数进行比较, ΔT 可根据实际生产情况进行选取, 如果生产计划期短, 则取小, 生产计划期长, 则取大. 为此, 用瓶颈转移系数 χ_i 进行判断, χ_i 表示当前时刻制造单

元 i 的瞬时瓶颈指数($E_{i,T+\Delta T}$)与上一时刻瓶颈制造单元的瞬时瓶颈指数($E_{0,T}$)的比值, 即:

$$\chi_i = \frac{E_{i,T+\Delta T}}{E_{0,T}}. \quad (7)$$

判断时, 令 $\chi = \max \{\chi_i\}$. 当 $\chi > 1$ 且 $\chi \neq E_{0,T+\Delta T}/E_{0,T}$ 时, 瓶颈发生转移; 否则瓶颈不变, 其中, $E_{0,T+\Delta T}$ 表示 T 时刻的瓶颈制造单元在 $T + \Delta T$ 时刻的瞬时瓶颈指数.

综上, 可以得到生产物流瓶颈监测模型如下:

$$\begin{cases} B_{BN} = \max \{E_{i,T}\}, (i = 1, 2, \dots, m), \\ \chi = \max \{\chi_i\}, \begin{cases} \chi > 1 \text{ 且 } \chi \neq \frac{E_{0,T+\Delta T}}{E_{0,T}}, \text{ 有转移,} \\ \chi \leq 1 \text{ 或 } \chi = \frac{E_{0,T+\Delta T}}{E_{0,T}}, \text{ 无转移.} \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

3 基于瓶颈指数的瓶颈监测方法

根据生产物流瓶颈的动态特征和(8)式的瓶颈监测模型, 确定瞬时瓶颈监测流程如图1所示. 图中, 监测由瞬时瓶颈识别和瞬时瓶颈转移判断两部分组成, 具体步骤及内容如下.

步骤1 T 时刻数据统计分析. 收集各制造单元 T 时刻的实时生产数据, 并进行统计分析, 根据(5)式计算 T 时刻各制造单元的瞬时瓶颈指数 $E_{i,T}$.

步骤2 瞬时瓶颈识别. 根据 $E_{i,T}$, 利用(6)式

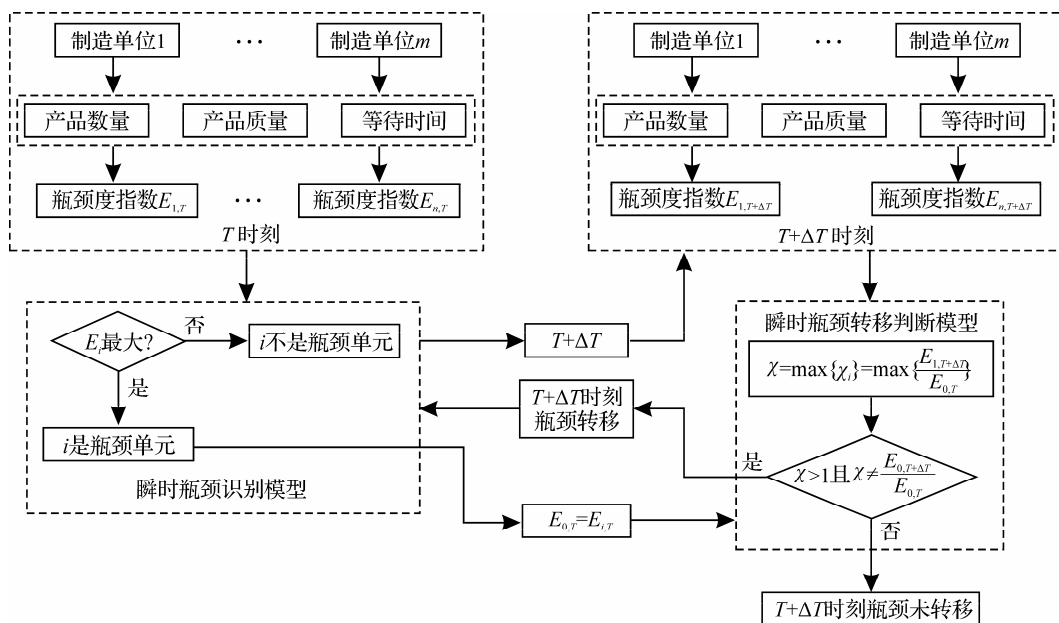


图1 生产物流瓶颈监测流程图

识别 T 时刻生产物流的瞬时瓶颈, 并定义该时刻瓶颈单元的瞬时瓶颈指数为 $E_{0,T}$.

步骤3 $T + \Delta T$ 时刻数据统计分析. 收集各制造单元 $T + \Delta T$ 时刻的实时生产数据, 并进行统计分析, 根据(5)式计算 $T + \Delta T$ 时刻各制造单元的瞬时瓶颈指数 $E_{i,T+\Delta T}$.

步骤4 瞬时瓶颈转移判断. 利用(7)式计算瓶颈转移系数 χ_i , 运用(8)式判断 $T + \Delta T$ 时刻瞬时瓶颈是否发生转移; 如果转移, 则根据 $E_{i,T+\Delta T}$ 值按(6)式判断 $T + \Delta T$ 时刻瓶颈的新位置.

步骤5 循环以上步骤, 即可动态监测零件在整个计划周期内不同时刻生产物流系统的瓶颈变化, 并据此在生产过程中做出适当调整, 以平衡生产物流, 发挥瓶颈的最大效能.

4 算例分析

4.1 算例基本数据

某生产线共有 7 个制造单元 M_i ($i=1,2,\dots,7$), 加工 3 种零件 Q_j ($j=1,2,3$). 3 种零件的工艺路线

分别为: $Q_1:M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_5 \rightarrow M_7$; $Q_2:M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_5 \rightarrow M_6$; $Q_3:M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow M_3 \rightarrow M_4 \rightarrow M_7$. 生产中出现的返修品在专门维修区进行返修. 根据以往生产经验, 等待时间对生产线影响程度的评价标准 $b=1.2$. 制造单元和 3 种零件的相关数据见表 3 和表 4.

表 3 制造单元相关信息

制造单元	可用工时/min	设备故障率/%	C_p
M_1	480	2	1.36
M_2	480	3	1.11
M_3	480	3	1.13
M_4	480	4	1.04
M_5	480	3	1.02
M_6	480	2	1.00
M_7	480	2	0.90

4.2 T_1 时刻生产线运行情况

生产线运行 $\Delta T=4\text{h}$ 后到达 T_1 时刻, 各制造单元实时制造信息见表 5.

根据表 5 信息, 结合(5)式和表 1、表 2 权重确

表 4 零件相关处理时间

零件	min													
	M_1		M_2		M_3		M_4		M_5		M_6		M_7	
	t_{ij}	z_{ij}	t_{ij}	z_{ij}	t_{ij}	z_{ij}	t_{ij}	z_{ij}	t_{ij}	z_{ij}	t_{ij}	z_{ij}	t_{ij}	z_{ij}
Q_1	0.56	0.05	0.68	0.04	0.65	0.03	-	-	1.00	0.05	-	-	0.85	0.04
Q_2	-	-	0.70	0.04	0.76	0.03	-	-	0.90	0.04	1.00	0.05	-	-
Q_3	0.65	0.04	0.65	0.03	0.72	0.05	1.10	0.05	-	-	-	-	1.00	0.05

表 5 T_1 时刻各制造单元实时制造信息

项目	M_1			M_2			M_3			M_4			M_5			M_6			M_7		
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_1	Q_2	Q_3	Q_1	Q_2	Q_3	Q_1	Q_2	Q_3	Q_1	Q_2	Q_3	Q_1	Q_2	Q_3	Q_1	Q_2	Q_3
产量/个	85	-	80	78	75	80	80	70	75	-	-	55	65	70	-	-	65	-	70	-	65
废品/个	2	-	1	3	0	3	2	2	2	-	-	4	2	2	-	-	3	-	1	-	0
V_{ij}/min	4	-	3	3.1	3	2.6	3	2.5	4	-	-	2.8	3.2	3	-	-	3	-	2.8	-	3.2

表 6 T_1 时刻 E_{i,T_1} 值计算过程

制造单元	$f(q)+f_Q(p)$	α	$f_Q(C_p)$	β	$g(t)$	γ	E_{i,T_1}
M_1	0.215 5	1.00	0.000 0	0.00	0.939 6	0.00	0.215 5
M_2	0.346 9	0.73	0.900 9	0.21	1.021 1	0.06	0.503 7
M_3	0.351 1	0.62	0.885 0	0.19	1.151 5	0.19	0.604 6
M_4	0.140 8	0.68	0.961 5	0.27	1.018 2	0.05	0.406 3
M_5	0.286 0	0.63	0.980 4	0.29	1.024 8	0.08	0.546 5
M_6	0.144 6	0.69	1.000 0	0.31	0.923 1	0.00	0.409 7
M_7	0.266 5	0.66	1.111 1	0.34	0.991 7	0.00	0.553 7

表7 T2时刻各制造单元相关制造信息

项目	M_1			M_2			M_3			M_4			M_5			M_6			M_7		
	Q_1	Q_2	Q_2	Q_1	Q_2	Q_2	Q_1	Q_2	Q_2	Q_1	Q_2	Q_2	Q_1	Q_2	Q_2	Q_1	Q_2	Q_2	Q_1	Q_2	Q_2
产量/个	155	-	150	142	145	138	140	150	148	-	-	110	120	125	-	-	120	-	130	-	135
废品/个	3	-	2	6	3	6	5	3	4	-	-	4	3	4	-	-	5	-	4	-	5
V_{ij}/min	6	-	5	6.3	6.2	4.1	4	4.5	7	-	-	5.2	6.2	5	-	-	6	-	6.3	-	7.1

表8 T2时刻 $E_{i,T2}$ 值和 χ_i 值计算过程

制造单元	$f(q) + f_q(p)$	α	$f_q(C_p)$	β	$g(t)$	γ	$E_{i,T1}$	χ_i
M_1	0.398 1	1.00	0.000 0	0.00	0.800 0	0.00	0.398 1	0.69
M_2	0.639 7	0.69	0.900 9	0.21	1.062 7	0.10	0.736 9	1.22
M_3	0.687 2	0.81	0.885 0	0.19	0.962 7	0.00	0.724 8	1.20
M_4	0.272 1	0.73	0.961 5	0.27	0.945 5	0.00	0.458 3	0.76
M_5	0.518 9	0.60	0.980 4	0.29	1.063 6	0.11	0.712 6	1.18
M_6	0.265 7	0.69	1.000 0	0.31	1.000 0	0.00	0.493 4	0.81
M_7	0.539 8	0.51	1.111 1	0.34	1.121 3	0.15	0.821 3	1.36

定规则,利用 Matlab 数值计算软件可以得到 $T1$ 时刻各制造单元瞬时瓶颈指数 $E_{i,T1}$ 的计算结果(表 6)。根据表 6 结果和(6)式可知, M_3 为 $T1$ 时刻的瓶颈,此时,令 $E_{0,T1} = E_{3,T1} = 0.6046$ 。

4.3 T2时刻生产线运行情况

该生产线继续运行 $\Delta T = 4\text{h}$ 后到达 $T2$ 时刻,各制造单元的实时制造信息见表 7。结合(5)式和(7)式以及表 1 和表 2 权重确定规则,利用 matlab 数值计算软件,可以得到 $T2$ 时刻各制造单元瓶颈指数 $E_{i,T2}$ 值和瓶颈转移系数 χ_i 值(表 8)。

根据表 8 的计算结果, $T2$ 时刻 $\chi = \max\{\chi_i\} = 1.36 > 1$, 且 $\chi \neq \chi_3 = 1.20$, $E_{7,T2} = 0.8213$ 最大,所以 $T2$ 时刻生产物流的瓶颈发生转移, M_7 成为转移后新的瓶颈。

如此循环操作,便可以动态监测零件整个生产过程中不同时刻的瞬时瓶颈位置和瞬时瓶颈转移情况,有助于实现瓶颈的事中控制。

5 结语

本文针对产品生产计划期内瓶颈事中控制的问题,研究了不同时刻生产物流瓶颈的动态监测方法。首先在以往瓶颈研究的基础上,充分考虑产品加工过程的输入、生产和输出三个阶段对瓶颈度的影响,建立了瓶颈指数的修正模型;然后为描述生产物流瓶颈的实时动态性,提出了瞬时瓶颈的

概念,并以瞬时瓶颈指数为基础,构建生产物流瓶颈监测模型,实现了产品计划期内瞬时瓶颈的动态监测,为生产物流的合理化改善提供依据。

相比于以往针对瓶颈事前或事后控制的相关研究,本文旨在实现瓶颈的事中控制,完善了瓶颈的优化控制体系。另外,由于该方法主要是通过获取生产物流运行中的产品数量、产品质量以及等待时间的相关生产数据,并利用 Matlab 数值计算软件进行计算,因此具有数据获取容易,计算方便的优点,故而有良好的实施可行性。

参考文献:

- [1] Pollett P K. Modelling congestion in closed queueing networks[J]. International Transactions in Operational Research, 2000, 7(4):319-330.
- [2] Roser C, Nakano M, Tanaka M. Comparison of bottleneck detection methods for AGV systems[C]. Simulation Conference, IEEE, 2003:1192-1198.
- [3] Zuo Y, Gu H Y, Xi Y G. Modified bottleneck-based heuristic for large-scale job-shop scheduling problems with a single bottleneck[J]. Journal of Systems Engineering & Electronics, 2007, 18(3):556-565.
- [4] Ching S N, Meerkov S M, Zhang L. Assembly systems with non-exponential machines: Throughput and bottlenecks[J]. Nonlinear Analysis Theory Methods & Applications, 2008, 69(3):911-917.
- [5] Li L, Chang Q, Ni J. Data driven bottleneck detection of

- manufacturing systems[J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(18):5019-5036.
- [6] Liu M Z, Tang J, Ge M G, et al. Dynamic prediction method of production logistics bottleneck based on bottleneck index[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(5):710-716.
- [7] 王军强, 陈剑, 王烁, 等. 作业车间区间型多属性瓶颈识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(2):429-437.
- [8] 黄卓平, 鲁建厦, 李修琳. 基于延迟惩罚成本的生产物流瓶颈辨识研究[J]. 浙江工业大学学报, 2012, 40(5): 570-573.
- [9] 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.
- [10] 陈佳祺, 郭为忠. 基于生产线仿真分析的关键工位诊断与改进设计[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(1):83-86.
- [11] 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.
- [12] 蒋益良, 方志梅. 虚拟企业生产物流系统建模仿真[J]. 宁波大学学报(理工版), 2015, 28(2):123-127.
- [13] 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.
- [14] 刘志, 唐娟, 费志敏. 基于瓶颈多态性的生产物流瓶颈闭环预测方法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(11): 2554-2561.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 曹政才, 邱明辉, 刘民. 基于增长修剪型神经网络的半导体生产线动态瓶颈分析方法[J]. 电子学报, 2016, 44(7):1636-1642.
- [19] 曾瑶, 李晓春. 质量管理学[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2012.

Bottleneck monitoring of production logistics based on bottleneck index

LIU Jinbo^{1,2}, ZHANG Zheng^{1,2}, FANG Zhimei^{1,2*}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Part Rolling Key Laboratory of Zhejiang Province, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to realize the dynamic monitoring of production logistics bottlenecks at different times during the production planning period, the monitoring method of instantaneous bottlenecks is studied. Based on the relevant data of the input, production and output stages of the product manufacturing process, the influences of the capacity load, product quality and waiting time of the manufacturing unit on the bottleneck degree are considered comprehensively, and a modified model of the bottleneck index is established. On the basis of this bottleneck index, the concept of instantaneous bottleneck is proposed, a monitoring model including identification and transfer judgment of instantaneous bottlenecks is constructed, and the dynamic monitoring process is designed. All above works provide the basis for dynamic monitoring of production logistics bottlenecks and their in-process control. The results of the case study show that the data is easily available and the method is feasible.

Key words: production logistics; instantaneous bottleneck; bottleneck index; dynamic monitoring

(责任编辑 章践立)