

# 物料流瓶颈对制造车间不确定环境的敏感性研究\*

凌琳 刘明周 王强

(合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 提出了物料流瓶颈对瓶颈漂移因素的敏感性度量方法。通过定义物料流瓶颈,从生产速率和生产质量两个方面综合度量制造单元生产能力和需求,并提出物料流瓶颈指数用于表征制造单元阻碍制造车间物料流流动平顺性的程度(即物料流瓶颈程度);分显性和隐性瓶颈漂移因素测度制造单元瓶颈指数对各因素的敏感性,并利用DEMATEL方法分析因素间的相互关联关系,在此基础上提出瓶颈漂移敏感指数度量物料流瓶颈对制造车间不确定环境的敏感程度;最后,通过对某一制造车间内物料流瓶颈和瓶颈程度对不确定环境的敏感性的度量和监测,验证了瓶颈指数和瓶颈漂移敏感指数的有效性和实用性。

**关键词:** 物料流 瓶颈漂移 制造车间 敏感指数

**中图分类号:** TH186 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)02-0224-08

## Sensitivity of Material-flow Bottleneck to Uncertain Environment in Job Shop

Ling Lin Liu Mingzhou Wang Qiang

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The method for measuring the sensitivity of the bottleneck degree to the bottleneck shifting factors was proposed. According to the material-flow bottleneck defining, the production capability and load were described from the perspectives of process speed and quality level, then the bottleneck index was constructed to characterize the degree of manufacturing unit blocking the material-flow (that is bottleneck degree). Based on the measurement of the sensitivity of the bottleneck index to the single bottleneck shifting factor and DEMATEL method for analyzing the relationship of the factors, bottleneck shifting sensitivity index was built to measure the sensitive degree of bottleneck index to the uncertain environment. At the end of this thesis, an example for monitoring the bottleneck and measuring sensitive degree to the uncertain environment in job shop was given to prove the validation and practicability of bottleneck index and bottleneck shifting sensitivity index.

**Key words:** Material-flow Bottleneck shifting Job shop Sensitivity index

### 引言

现代制造模式下,制造车间的生产往往处于不确定环境下,各种不确定因素(如生产任务的增减、工艺路线的更改、制造资源状态的变化等)都会引起制造车间中各个制造单元生产能力和生产负荷

(需求)的相应变化,导致各制造单元的在制品和所需零部件流动相对平顺程度的改变,即物料流瓶颈漂移(包括各制造单元瓶颈程度的变化和随之引起的作业车间瓶颈位置的改变)。不同种类的不确定性因素对制造单元物料流瓶颈程度的影响方式和强弱不尽相同,即制造单元瓶颈程度对不同因素的敏

感性不同。目前,针对瓶颈漂移现象,现有研究多从定性角度分析某几类因素与瓶颈漂移现象的正逆向影响或是寻求抑制漂移因素产生的方法<sup>[1-3]</sup>,未从定量角度研究瓶颈漂移现象对瓶颈漂移因素的敏感程度,对瓶颈漂移的预测则多停留在实时识别和仿真预测<sup>[4-8]</sup>;敏感性分析方面,国内外众多学者将研究重点放在利用数学推理分析影响因素在怎样的变化范围内,而将被影响对象保持不变<sup>[9-12]</sup>,对敏感程度的直接数字化度量缺乏直观简洁的表达。因此,本文从导致物料流瓶颈产生的原因入手,定义导致瓶颈漂移现象产生的显性与隐性因素,研究瓶颈漂移现象对各因素的敏感程度,以及在多因素综合作用下制造单元瓶颈程度对其的敏感性,即瓶颈程度对不确定环境的敏感性。通过研究瓶颈程度对不确定环境的敏感性,分析和度量各类不确定性因素对瓶颈程度的影响,实现对作业车间内瓶颈漂移现象进行更为准确的预测,从而避免根据固定瓶颈制定的作业计划和控制方案的滞后问题。

## 1 物料流瓶颈漂移问题描述

瓶颈概念是瓶颈漂移研究的基础,同一生产条件下,瓶颈定义不同,辨识方法和辨识结果不尽相同<sup>[1]</sup>。因此,根据瓶颈产生的原因,定义物料流瓶颈、主次瓶颈和瓶颈漂移如下:

定义1:设 $f_c(v_i^{(c)}, q_i^{(c)})$ 和 $f_l(v_i^{(l)}, q_i^{(l)})$ 分别表示制造单元 $i$ 生产能力和生产负荷,若 $f_l(v_i^{(l)}, q_i^{(l)}) < o_{sd}f_c(v_i^{(c)}, q_i^{(c)})$ ,则制造单元 $i$ 为生产系统中的物料流瓶颈。其中 $v_i^{(l)}$ 、 $q_i^{(l)}$ 分别表示制造单元在生产可用时间内为保证交货期所需达到的生产速率(即单位时间内产品产出量)和生产质量水平; $v_i^{(c)}$ 、 $q_i^{(c)}$ 分别表示制造单元所能达到的生产速率和其所能保证的质量水平; $o_{sd}$ 为 $(0, 1]$ 之内的常数,是根据生产系统稳定性确定的瓶颈判定标准。

定义2:设 $S_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示系统瓶颈集合,即其生产负荷和生产能力的比值大于 $o_{sd}$ 的制造单元;若制造单元 $i$ 的比值为其中最大的,说明 $i$ 对系统在制品和零部件流动影响最大,则称 $i$ 为主瓶颈,然后依次为系统次瓶颈。

定义3:车间内部由于不确定性因素的影响,导致制造单元 $i$ 的生产负荷 $f_l(v_i^{(l)}, q_i^{(l)})$ 和生产能力 $f_c(v_i^{(c)}, q_i^{(c)})$ 发生变化,若两者之间的比值也相应变化,即制造单元 $i$ 的生产能力满足生产负荷的程度改变,则称 $i$ 的瓶颈程度发生了漂移;若制造单元 $i$ 原为系统中主瓶颈,在因素影响下,其瓶颈程度低于原来的次瓶颈 $j$ ,则称系统中瓶颈的位置发生了漂移。

根据定义1,可知制造单元的物料流瓶颈程度与生产负荷和能力的比值密切相关,且负荷和能力均采用生产速率和质量水平这两个参数进行度量。故建立瓶颈指数度量制造单元的瓶颈程度

$$I_{BN} = \frac{f_l(v_i^{(l)}, q_i^{(l)})}{f_c(v_i^{(c)}, q_i^{(c)})} \quad (1)$$

由以上定义和式(1)可知,系统中每一个制造单元都存在对应一个瓶颈指数,该瓶颈指数是由制造单元所具有的生产能力和所承担的生产负荷共同决定的;而瓶颈漂移现象不仅仅指系统中真正瓶颈位置的变化,也包括每个制造单元瓶颈程度的变化。

## 2 物料流瓶颈漂移因素测度

物料流瓶颈漂移因素是指不确定环境下制造车间内部引起制造单元生产能力和生产负荷相应改变,导致其在制品和零部件流动平顺程度变化的各种因素。这些因素在某种程度上都表现出了一定的随机性,以某一概率在各种状态之间动态转移,即瓶颈漂移因素的变化过程在某种程度上是一个随机过程。各种因素在现在状态已知情况下,其将来的状态只与现在的状态有关,而与过去的状态无关,由此可知,瓶颈漂移因素具有马氏性。其中有些因素是离散发生对生产能力和生产负荷产生影响的,如设备故障、紧急插单等,称这种因素为显性漂移因素,符合时间连续状态离散的马尔科夫链;另一种因素则是通过累积效应对制造单元的生产能力和负荷产生影响,如随寿命时间的设备性能退化、合格品的加工质量瑕疵累积等,称这种因素为隐性漂移因素,符合时间状态均连续的马尔科夫链。

(1)显性漂移因素:不确定环境下离散发生且每次发生都会对制造单元的生产能力和负荷产生明显影响的因素,对生产能力和负荷的影响程度取决于该因素在各个状态的概率和状态强度。对这类因素状态进行有限次划分 $S = \{0, 1, \dots, n\}$ ,根据历史数据计算各个状态间的一步转移概率为

$$p_{ij}(n) = P\{\xi(n+1) = j | \xi(n) = i\}$$

其中

$$P = (p_{ij})_{i,j \in S}$$

式中  $P$ ——状态转移概率矩阵

因素各个状态对生产能力和生产负荷的影响分别用 $(\Delta f_c(\Delta v^{(c)}, \Delta q^{(c)}))_{i,j \in S}$ 和 $(\Delta f_l(\Delta v^{(l)}, \Delta q^{(l)}))_{i,j \in S}$ 表示;则对显性漂移因素的测度结果为

$$(p_{ij})_{i,j \in S} \frac{(\Delta f_c(\Delta v^{(c)}, \Delta q^{(c)}))_{i,j \in S}}{(\Delta f_l(\Delta v^{(l)}, \Delta q^{(l)}))_{i,j \in S}}$$

(2)隐性漂移因素:不确定环境下持续发生但每个时间点上发生的强度都不足以对制造单元的生产能力和负荷产生明显影响的因素,对生产能力和

负荷的影响程度取决于因素各状态的转移概率、强度以及该因素状态的累积时间。该类因素是时间状态均连续的马氏过程,其状态转移概率分布函数<sup>[13]</sup>为

$$F(x, t | x', t') = F_{X(t)}(x | X(t') = x') \quad (t' < t)$$

因素状态随时间的变化函数为  $f(I_1, I_2, \dots, I_n, t)$ , 其中  $I_1, I_2, \dots, I_n$  为状态的各种度量指标; 则该因素在持续时间内的状态变化总量为

$$\int_{t_1}^{t_2} f(I_1, I_2, \dots, I_n, t) dt - f(I_1, I_2, \dots, I_n, t) |_{t_1} (t_2 - t_1)$$

根据该变化总量可分别得到其对生产能力和负荷的影响程度, 结合状态概率分布函数, 实现对隐性因素的测度。

### 3 物料流瓶颈指数

制造单元的物料流瓶颈指数根据式(1), 在制品物料流流动速率和在制品加工质量是度量制造单元物料流瓶颈程度的2个参数, 通过生产能力(物料流动速率能力和质量能力)和生产负荷(物料流动速率负荷和质量负荷)的差异程度反映制造单元在系统中对物料流流动平顺性的阻碍程度, 其中针对不同的质量特性, 质量能力和质量需求以质量保证能力进行表示<sup>[14-15]</sup>, 质量保证能力一般采用无量纲指标表示较为合理。

$$I_{BN} = \omega_v (v^{(l)} / v^{(c)}) + \omega_q (G(C_p, C_{pk}))$$

$$\begin{cases} v^{(l)} = \sum_{h=1}^H \frac{n^{(l,h)}}{t^{(l,h)}} \\ v^{(c)} = \sum_{h=1}^H \frac{t^{(c,h)} + t_w^{(h)}}{n^{(l,h)}} (1 - P(C_{pk}^{(h)})) \end{cases}$$

$$\text{其中 } \omega_v + \omega_q = 1 \quad C_{pk} = \sum_{h=1}^H \omega_h C_{pk}^{(h)} \quad \sum_{h=1}^H \omega_h = 1$$

式中  $\omega_v, \omega_q$ ——流动速率和产品质量在瓶颈指数中的影响权重

$h$ ——制造单元所需加工的某一类产品

$v^{(l)}$ ——制造单元为满足产品  $h$  交货时间所应达到的速度

$v^{(c)}$ ——制造单元实际能够达到的在制品  $h$  的流动速度

$G(C_p, C_{pk})$ ——质量保证能力对瓶颈指数的影响函数

$C_p$ ——工序能力指数的评定标准, 一般  $C_p$  为 1 ~ 1.67

$C_{pk}$ ——制造单元的综合修正工序能力指数

$n^{(l,h)}$ ——产品  $h$  生产任务量

$t^{(l,h)}$ ——产品  $h$  可用的生产时间

$t^{(c,h)}$ ——制造单元完成产品  $h$  加工任务量的总加工时间

$t_w^{(h)}$ ——产品  $h$  在制造单元的排队等待时间

$P(C_{pk}^{(h)})$ ——制造单元在产品  $h$  修正工序能力指数  $C_{pk}^{(h)}$  下的生产不合格品率

$\omega_h$ ——各种产品的重要性程度

当制造单元为加工或装配单元时,  $P(C_{pk}^{(h)})$ 、 $\omega_q$  和  $G(C_p, C_{pk})$  均与工序能力修正指数相关, 三者关系如表1和表2所示<sup>[16]</sup>。

表1 修正工序能力指数  $C_{pk}^{(h)}$  与生产不合格品率  $P(C_{pk}^{(h)})$  的关系

Tab.1 Relationship among  $C_{pk}^{(h)}$  and  $P(C_{pk}^{(h)})$

$C_{pk}^{(h)}$ 值	$P(C_{pk}^{(h)})$	分布中心是否与公差中心一致
$C_{pk}^{(h)} > C_p$	0	一致
$C_{pk}^{(h)} \leq C_p$	$\lambda(1 - \Phi(3C_{pk}^{(h)}))$ $2 - \Phi[3C_{pk}^{(h)}(1+k)] - \Phi[3C_{pk}^{(h)}(1-k)]$	不一致

表2  $G(C_p, C_{pk})$  和  $\omega_q$  的确定

Tab.2 Determination of  $G(C_p, C_{pk})$  and  $\omega_q$

$C_{pk}$ 值	$G(C_p, C_{pk})$	$\omega_q$
$C_{pk} \geq C_p$	0	0
$C_p^{\text{lim}} < C_{pk} < C_p$	$C_p / C_{pk}$	$(0, \tau]$ $(\tau, 1]$
$C_{pk} \leq C_p^{\text{lim}}$	$\infty$	1

在表1中, 针对双侧公差和单侧公差,  $\lambda$  取不同的值,  $\lambda = 1$  表示单侧公差,  $\lambda = 2$  表示双侧公差;  $k$  表示平均值的偏离度, 设  $M$  为公差中心,  $x$  为均值, 则  $k = \varepsilon / (0.5T) = (M - x) / (0.5T)$ ,  $T$  为公差带范围。在表2中,  $C_p^{\text{lim}}$  表示仍可用于正常使用的设备最低综合修正工序能力指数,  $\tau$  根据经验取值, 且  $\tau \in [0, 1]$ 。

当制造单元为运输单元时,  $P(C_{pk}^{(h)})$  用运输过程中产品的损坏率表示。假设产品  $h$  在该单元上运输时的平均损坏率为  $\beta_h$ , 则预定时间内  $P(C_{pk}^{(h)}) = \beta_h$ 。同时, 因运输单元只改变工件位置, 不改变工件形态, 因此,  $G(C_p, C_{pk})$  和  $\omega_q$  均为零。

### 4 物料流瓶颈漂移敏感指数

物料流瓶颈漂移敏感指数用于度量制造单元瓶颈指数对制造车间中各种漂移因素的敏感程度, 据此, 物料流瓶颈漂移敏感指数可表示为

$$I_{BNSS} = \frac{\partial I_{BN}}{\partial \mathbf{F}}$$

其中  $\mathbf{F} = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$  为制造车间瓶颈漂移因素的集合。故瓶颈指数对单因素的敏感度计算和因素

间的相互关联关系是确定物料流瓶颈漂移敏感指数的关键问题。

#### 4.1 单因素敏感性分析

瓶颈漂移单因素的敏感性分析即探寻若某一漂移因素发生,其变动范围或程度与制造单元的物料流瓶颈程度变化的映射关系,包括单因素的敏感程度 $\frac{\partial I_{BN}}{\partial F_i}$ 和物料流瓶颈对该因素敏感程度的变化趋势

$$\frac{\partial^2 I_{BN}}{\partial F_i^2}。$$

##### (1) 显性因素的敏感性分析

设物料流瓶颈漂移显性因素 $F_i$ 按状态强度进行划分的状态序列为

$$\mathbf{F}_i^{(S)} = (F_i^{(0)}, F_i^{(1)}, \dots, F_i^{(n)})$$

其中每个状态强度的表征向量为

$$\mathbf{F}_i^{(n)} = (\Delta v_{F_i^{(n)}}^{(l)}, \Delta v_{F_i^{(n)}}^{(e)}, \Delta G(C_p, C_{pk})_{F_i^{(n)}})$$

则在 $\mathbf{F}_i^{(S)}$ 影响下瓶颈指数序列为

$$\mathbf{I}_{BN}^{F_i^{(S)}} = (I_{BN}^{F_i^{(0)}}, I_{BN}^{F_i^{(1)}}, \dots, I_{BN}^{F_i^{(n)}})$$

单因素敏感指数 $\frac{\partial I_{BN}^{F_i^{(S)}}}{\partial F_i^{(S)}}$ 对应因素 $F_i$ 各种状态下

制造单元瓶颈指数变化量<sup>[17]</sup>, $\frac{\partial^2 I_{BN}^{F_i^{(S)}}}{\partial (F_i^{(S)})^2}$ 对应 $\frac{\partial}{\partial F_i^{(S)}}$ 。

$\left(\frac{\partial I_{BN}^{F_i^{(S)}}}{\partial F_i^{(S)}}\right)$ 为单因素敏感指数的变化趋势,根据 $\frac{\partial I_{BN}^{F_i^{(S)}}}{\partial F_i^{(S)}}$

和 $\frac{\partial^2 I_{BN}^{F_i^{(S)}}}{\partial (F_i^{(S)})^2}$ 可绘制制造单元瓶颈指数对单因素 $F_i$ 的敏感特性曲线。

##### (2) 隐性因素的敏感性分析

设物料流瓶颈漂移隐性因素 $F_j$ 的状态函数为 $f(I_1, I_2, \dots, I_n, t)$ ,初始状态下的状态参数为 $(I_1^{(0)}, I_2^{(0)}, \dots, I_n^{(0)})$ ,则初始状态下的瓶颈指数为 $I_{BN}^{(0)}$ ;根据状态函数绘制瓶颈指数曲线 $f(I_{BN}^{F_j}, t)$ ,由于时间 $t$

的对应关系,故单因素敏感指数 $\frac{\partial I_{BN}^{F_j}}{\partial F_j}$ 即可表示为

$\frac{\partial I_{BN}^{F_j}}{\partial t}$ ,敏感趋势 $\frac{\partial^2 I_{BN}^{F_j}}{\partial (F_j^{(S)})^2}$ 即为 $\frac{\partial^2 I_{BN}^{F_j}}{\partial t^2}$ ,根据 $\frac{\partial I_{BN}^{F_j}}{\partial F_j}$ 、

$\frac{\partial^2 I_{BN}^{F_j}}{\partial (F_j^{(S)})^2}$ 可绘制瓶颈指数对单因素 $F_j$ 的敏感特性曲线。

#### 4.2 因素间关联关系

瓶颈漂移因素间存在影响与被影响的关系,当多因素作为一个集合影响制造单元瓶颈程度时,瓶颈指数对因素集合的敏感程度并不是单因素敏感度的独立相加,其间的相互关联程度是确定多因素敏

感度的关键。DEMATEL方法通过构建因素之间的逻辑关系和直接影响矩阵,计算出每个因素对其他因素的影响度以及被影响度<sup>[18]</sup>,该影响度和被影响度则可用于描述因素间的关联关系。

(1)分析各因素间直接关系,构造有向图,并以0,1,2,3,4表征其关联强度(0代表两因素间无影响,1代表两因素间低度影响,2代表两因素间中度影响,3代表两因素间高度影响,4代表两因素间极高度影响),构建直接影响矩阵 $\mathbf{Y}$ 为

$$\mathbf{Y} = \begin{matrix} & \begin{matrix} F_1 & F_2 & \dots & F_n \end{matrix} \\ \begin{matrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \end{matrix}$$

式中 $Y_{ij}$ ——因素 $F_i$ 对因素 $F_j$ 的影响程度

(2)将直接影响矩阵 $\mathbf{Y}$ 标准化<sup>[18]</sup>,得标准化影响矩阵 $\mathbf{X}$ 。

(3)建立总影响关系矩阵 $\mathbf{T} = \mathbf{X}(\mathbf{I} - \mathbf{X})^{-1}$ 。

(4)计算每个因素的影响度与被影响度。矩阵 $\mathbf{T}$ 中的元素 $T_{ij}$ 表示因素 $F_i$ 对因素 $F_j$ 所带来的直接影响及间接影响程度(即综合影响程度); $\mathbf{T}$ 中每行元素之和为该行对应因素对其他所有因素的综合影响值,称为影响度 $i_{nf}$ ;  $\mathbf{T}$ 中每列元素之和为该行对应因素受其他所有因素的综合影响值,称为被影响度 $i_{nf}^{-ed}$ 。

取每个因素的被影响度作为其独立敏感度的修正参数,则制造单元瓶颈程度对包含多瓶颈漂移因素的集合的敏感度为

$$I_{BNSS} = \sum_{F_i} \frac{i_{nf}^{-ed}(F_i)}{\sum_{F_i} i_{nf}^{-ed}(F_i)} R(F_i)$$

式中 $R(F_i)$ 单因素敏感函数为以状态强度标志的

分段函数,数值由 $\frac{\partial I_{BN}^{F_j}}{\partial F_j}$ 、 $\frac{\partial^2 I_{BN}^{F_j}}{\partial (F_j^{(S)})^2}$ 决定。

## 5 实例分析

以制造车间在4个制造单元 $U_i$ ( $i=1,2,3,4$ )生产A、B、C3种产品为例,假设 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、 $F_4$ 是该制造车间中最为频繁出现的瓶颈漂移因素,分别为:设备故障、订单变更、设备性能退化和人员熟练程度变化。该制造车间工序能力标准采用一般性工业标准,预测时间为5d,有效工作时间为40h。表3中为有效工作时间内的生产任务量、产品工艺路线以及各制造单元单位产品的所需时间和修正工序能力指数。

表3 产品制造相关数据  
Tab.3 Related data of production

产品名称	生产数量	工艺路线时间/工序能力									
		$t/min$	$C_{pk}$	$t/min$	$C_{pk}$	$t/min$	$C_{pk}$	$t/min$	$C_{pk}$	$t/min$	$C_{pk}$
A	40	$U_1$		$U_2$		$U_3$		$U_4$		-	
		6,8,10	0.85	5,8,10	0.91	15,20,25	1.23	8,12,16	1.01		
B	50	$U_1$		$U_2$		$U_4$		$U_2$		$U_3$	
		11,13,15	1.23	4,6,8	0.89	15,18,21	1.21	6,9,12	1.42	27,33,39	1.54
C	60	$U_2$		$U_1$		$U_3$		-		-	
		7,9,11	1.06	7,10,13	1.65	18,23,28	0.98				

制造车间各制造单元布局图如图1所示。其中,制造单元1、2、4中均只有一台设备,制造单元3中有新旧设备各一台,旧设备的生产能力是新设备生产能力的0.8倍。

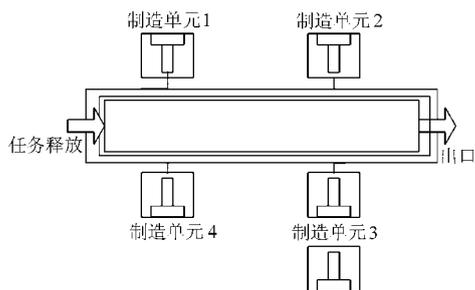


图1 制造车间制造单元布局图

Fig.1 Layout of job shop

加工各产品的修正工序能力指数对设备综合工序能力指数的影响权重矩阵为

$$W = \begin{matrix} & U_1 & U_2 & U_3 & U_4 \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.4 & 0.3 & 0.3 & 0.6 \\ 0.3 & 0.6 & 0.2 & 0.4 \\ 0.3 & 0.1 & 0.5 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

则各制造单元中设备集生产3种产品的总工序能力指数  $C_p$  分别为 1.204、1.072、1.167、1.09。根据工序能力指数评价标准确定各制造单元的  $\omega_q$ , 分别为 0.29、0.52、0.45、0.39。

在不受瓶颈漂移因素影响下,各制造单元的瓶

颈指数如表4所示。

表4 制造单元瓶颈指数  $I_{BN}$  计算结果

Tab.4 Results of production unit  $I_{BN}$

制造单元	$v^{(l)}/v^{(c)}$	$\omega_p$	$G(C_p, C_{pk})$	$\omega_q$	$I_{BN}$
$U_1$	1.23 (0.09/0.073)	0.71	0.72	0.29	1.0821
$U_2$	0.78 (0.1045/0.134)	0.48	0.64	0.52	0.7072
$U_3$	0.55 (0.04/0.074)	0.55	0.70	0.45	0.6175
$U_4$	0.88 (0.055/0.057)	0.61	0.65	0.39	0.7903

假设制造车间的瓶颈判定标准  $\sigma_{std}$  为1,则制造单元1为制造车间的瓶颈。利用 ARENA 11.0 对该制造车间进行仿真,对比各制造单元的产品排队时间和排队数量(图2)可反映瓶颈指数的合理性。

以制造车间瓶颈——制造单元1为例,度量其瓶颈指数对4种瓶颈漂移因素的敏感程度。在单因素下,其瓶颈指数变化情况如表5所示,其中因素各状态—瓶颈指数拟合曲线为通过 SPSS 1.8 中回归分析所得。

表5中的设备性能退化因素  $F_3$ ,可利用线性模型  $\lg y = \alpha + \beta \lg t$  进行拟合<sup>[19~20]</sup>,  $y$  为性能参数指标,  $\alpha, \beta$  为未知参数,其值可以通过退化数据估计获得。

假设该制造车间制造单元1的设备性能退化曲线为

Queue				
Time				
Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Cell 1 Process.Queue	127.18	(insufficient)	0.00	234.10
Cell 2 Process.Queue	59.0523	(insufficient)	0.00	105.85
Cell 3 Process.Queue	35.5136	(insufficient)	0.00	176.59
Cell 4 Process.Queue	67.1405	(insufficient)	0.00	168.83
Other				
Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Cell 1 Process.Queue	7.9487	(insufficient)	0.00	21.0000
Cell 2 Process.Queue	4.1710	(insufficient)	0.00	12.0000
Cell 3 Process.Queue	2.2072	(insufficient)	0.00	16.0000
Cell 4 Process.Queue	2.5178	(insufficient)	0.00	11.0000

图2 ARENA 仿真结果

Fig.2 Simulation result of ARENA

表 5 制造单元 1 的瓶颈指数  $I_{BN}$  变化

Tab. 5 Variation of  $I_{BN}$  of unit 1

显性因素	状态代号及描述	转移概率矩阵	瓶颈指数	状态-瓶颈指数拟合曲线
$F_1$	0:设备正常运行	$\begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.1 & 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.5 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0.3 & 0.2 & 0.4 & 0 & 0.1 \\ 0.2 & 0.1 & 0 & 0.3 & 0.4 \\ 0.1 & 0 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \end{bmatrix}$	1.082 1	
	1:设备故障时间小于 20 min		(1.082 1, 1.110 5)	
	2:设备故障时间在 [20,40) min		[1.110 5, 1.148 5)	
	3:设备故障时间在 [40,60) min		[1.148 5, 1.177 0)	
	4:设备故障时间超过 60 min		[1.177 0, $\infty$ )	
$F_2$	-3:任务量减少频率大于 10	$\begin{bmatrix} 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.3 & 0.1 & 0.25 & 0.15 & 0 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0 & 0.1 & 0 \\ 0.05 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.15 & 0.1 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.2 & 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.3 & 0.4 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.15 & 0.35 & 0.45 & 0.15 \end{bmatrix}$	( $-\infty$ , 1.030 1]	
	-2:任务量减少频率在 [5,10]		(1.030 1, 1.063 6]	
	-1:任务量减少频率在 [0,5]		(1.063 6, 1.082 1)	
	0:任务量不变		1.082 1	
	1:任务量增加频率在 [0,5]		(1.082 1, 1.205 4)	
	2:任务量增加频率在 [5,10]		[1.205 4, 1.569 2)	
	3:任务量增加频率大于 10		[1.569 2, $\infty$ )	

隐性因素	状态转移函数	状态变化曲线	瓶颈指数变化曲线
$F_3$	$\lg y = -0.1427 - 0.0291 \lg t$		
$F_4$	$y = 11x^{-0.132}$		

$$\lg y = -0.1427 - 0.0291 \lg t$$

式中  $y$ ——设备的修正工序能力指数

$t$ ——时间, h

人员熟练程度变化因素  $F_4$  符合加工熟练曲线,

设制造车间的加工熟练曲线为莱特模式<sup>[21]</sup>

$$y = Kx^{-a}$$

根据制造车间统计数据

$$y = 11x^{-0.132}$$

根据表 5 中的瓶颈变化曲线, 可得制造单元 1 对各个因素的平均敏感程度分别为 (0.36, 0.13,  $-1.05 \times 10^{-3}$ ,  $5.71 \times 10^{-5}$ )。

构造瓶颈漂移因素间的直接影响矩阵  $Y$ , 利用 DEMATEL 方法得到总影响关系矩阵  $T$ , 即

$$Y = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 3 & 1 \\ 0 & 4 & 2 & 3 \\ 3 & 1 & 4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1.9571 & 0.3857 & 1.9286 & 0.8229 \\ 0.7714 & 1.0571 & 1.2857 & 1.3886 \\ 1.9286 & 0.6429 & 2.2143 & 0.7714 \\ 0 & 0 & 0 & 0.8000 \end{bmatrix}$$

计算得每个因素的被影响度为(4.6571, 2.0857, 5.4286, 3.7829)。则制造单元1的瓶颈漂移敏感指数为0.122。再次利用 ARENA 11.0 对该制造车间进行仿真,对比制造单元1产品排队时间和排队数量的变化(图3),证明该瓶颈漂移敏感指数的有效性。

Queue				
Time				
Waiting Time	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Cell 1 Process Queue	153.71	(Insufficient)	0.00	236.38
Cell 2 Process Queue	68.5377	(Insufficient)	0.00	127.71
Cell 3 Process Queue	45.2278	(Insufficient)	0.00	175.92
Cell 4 Process Queue	58.9012	(Insufficient)	0.00	189.37
Other				
Number Waiting	Average	Half Width	Minimum Value	Maximum Value
Cell 1 Process Queue	9.8058	(Insufficient)	0.00	21.9000
Cell 2 Process Queue	5.6258	(Insufficient)	0.00	13.9000
Cell 3 Process Queue	2.8025	(Insufficient)	0.00	15.9000
Cell 4 Process Queue	2.2835	(Insufficient)	0.00	10.9000

图3 漂移因素影响下的仿真结果

Fig. 3 Simulation result under shifting factors

## 6 结论

(1)在定义物料流瓶颈的基础上,利用物料流流动速率和在制品质量水平作为度量生产能力和需求参数,通过对比制造单元生产能力满足生产需求的程度,提出瓶颈指数用以确定生产系统中的瓶颈。

(2)将制造车间引起物料流瓶颈漂移的因素分为显性因素与隐性因素,利用马尔科夫链测度因素对制造单元生产能力和需求的影响程度,在此基础上计算制造单元瓶颈指数对影响因素的敏感程度,为对瓶颈漂移趋势的预测提供基础,从而合理规划和有效控制不确定环境下的生产过程。

## 参 考 文 献

- Lu Jiansha, Shen Miaomiao, Lan Xiuju. Study of the shifting production bottleneck: possible causes and solutions [C] // 2006. SOLI '06. IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics, Shanghai, China, 2006: 684 ~ 688.
- 沈妙妙,陈雷雷,鲁建厦. 生产瓶颈转移性影响因素的经济计量研究[J]. 上海电机学院学报, 2008, 11(2): 139 ~ 143. Shen Miaomiao, Chen Leilei, Lu Jiansha. Study of bottleneck shiftiness in production management [J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2008, 11(2): 139 ~ 143. (in Chinese)
- 沈妙妙,陈雷雷. 基于约束理论的生产系统瓶颈转移问题的研究[J]. 上海电机学院学报, 2011, 14(1): 53 ~ 57. Shen Miaomiao, Chen Leilei. Production bottleneck shift based on constraint theory [J]. Journal of Shanghai Dianji University, 2011, 14(1): 53 ~ 57. (in Chinese)
- Roser C, Nakano M, Tanaka M. Shifting bottleneck detection [C] // Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference, San Diego, Chile, 2002: 1 079 ~ 1 086.
- Faget P, Eriksson U, Herrmana F. Applying discrete event simulation and an automated bottleneck analysis as an aid to detect running production constraints [C] // Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference, Orlando, USA, 2005: 1 401 ~ 1 407.
- Chen Chun-Lung, Chen Chuen-Lung. A heuristic method for a flexible flow line with unrelated parallel machines problem [C] // 2006 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, Chicago, USA, 2006: 1 ~ 4.
- Pegels C Carl, Watrous Craig. Application of the theory of constraints to a bottleneck operation in a manufacturing plant [J]. Journal of Manufacturing Technology Management, 2005, 16(3): 302 ~ 311.
- Moss H K, Yu W B. Toward the estimation of bottleneck shiftiness in a manufacturing operation [J]. Production and Inventory Management Journal, 1999, 40(2): 53 ~ 58.
- Cozzens M B, Roberts F S. Greedy algorithms for T-colorings of graphs and the meaningfulness of conclusions about them [J]. Journal of Combinatorics, Information and System Sciences, 1991, 16(4): 286 ~ 299.

- 10 Roberts F S. Meaningfulness of conclusions from combinatorial optimization[J]. *Discrete Applied Mathematics*, 1990,29(2~3): 221~241.
- 11 Sotskov Y N, Werner F. Stability of an optimal schedule in a job shop [J]. *European Journal of Operation Research*, 1991, 55(1):91~102.
- 12 Nicholas G Hall, Marc E Posner. Sensitivity analysis for scheduling problems[J]. *Journal of Scheduling*, 2004,7(1): 49~83.
- 13 汪荣鑫. 随机过程[M]. 西安:西安交通大学出版社,1987.
- 14 Liu Mingzhou, Tang Juan, Ge Maogen, et al. Dynamic prediction method of production logistics bottleneck based on bottleneck index[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22(5): 710~716.
- 15 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. Research on bottleneck index of production logistic in manufacturing shop[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012,43(5): 197~202. (in Chinese)
- 16 张公绪. 新编质量管理学[M]. 北京:高等教育出版社,2003.
- 17 苏文斌,刘兆栋,孙俊成,等. 基于敏感性分析的注塑成型工艺参数优化[J]. *塑性工程学报*,2009, 16(3): 202~206.  
Su Wenbin, Liu Zhaodong, Sun Juncheng, et al. Research on the optimization of injection molding process parameters based on sensitivity analysis[J]. *Journal of Plasticity Engineering*, 2009, 16(3): 202~206. (in Chinese)
- 18 李志刚. 基于DEMATEL的制造业企业动态平衡计分卡的应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2009.  
Li Zhigang. Application research of the dynamic BSC based on DEMATEL about manufacturing enterprise[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
- 19 Lu J C, Jinho Park, Qing Yang. Statistical inference of a time-to-failure distribution derived from linear degradation data [J]. *Technometrics*,1997,39(4):391~400.
- 20 Meeker M Q, Escobar L A. Statistical methods for reliability data[M]. New York: John Wiley&Sons Inc., 1998.
- 21 易树平,郭伏. 基础工业工程[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

(上接第217页)

- 2 Lobell D B, Ortiz-Monasterio J I, Falcon W P. Yield uncertainty at the field scale evaluated with multi-year satellite data[J]. *Agricultural System*, 2007(92):76~90.
- 3 Cochran W G. Sampling techniques[M]. 3rd ed. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1977.
- 4 Tatsuya Inamura, Kei Goto, Michihisa, et al. Geostatistical analysis of yield, soil properties and crop management practices in paddy rice fields[J]. *Plant Production Science*, 2004,7(2):230~239.
- 5 薛亚峰,周明耀,徐英,等. 水稻叶面积指数及产量信息的空间变异性分析[J]. *农业工程学报*,2005, 21(8): 89~92.  
Xue Yafeng,Zhou Mingyao,Xu Ying, et al. Spatial structure of leaf area index and yield of rice[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(8): 89~92. (in Chinese)
- 6 李为萍,史海滨,霍再林,等. 向日葵株高和茎粗的空间结构性初步分析[J]. *农业工程学报*,2004,20(4):30~33.  
Li Weiping,Shi Haibin,Huo Zailin, et al. Spatial structure of the height and diameter of sunflower stem[J]. *Transactions of the CSAE*,2004,20(4):30~33. (in Chinese)
- 7 高祥照,胡克林,郭焱,等. 土壤养分与作物产量的空间变异特征与精确施肥[J]. *中国农业科学*,2002,35(6):660~666.  
Gao Xiangzhao,Hu Kelin,Guo Yan, et al. Spatial variability of soil nutrients and crop yield and site-specific fertilizer management [J]. *Scientia Agricultural Sinica*,2002,35(6):660~666. (in Chinese)
- 8 陈云坪,王秀,马伟,等. 小麦多年产量空间变异与空间关联分析[J]. *农业机械学报*,2010,41(10):180~184.  
Chen Yunping, Wang Xiu, Ma Wei, et al. Analysis of wheat yield over five years[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2010,41(10):180~184. (in Chinese)
- 9 陈树人,肖伟中,朱云开,等. 土壤养分和小麦产量空间变异性与相关性分析[J]. *农业机械学报*,2008,39(10):140~143.  
Chen Shuren, Xiao Weizhong, Zhu Yunkai, et al. Spatial variability and correlation of soil nutrient and wheat yield [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(10):140~143. (in Chinese)
- 10 李琳一. 作物产量空间相关性分析及遥感估产抽样研究[D]. 北京:中国科学院,2001.
- 11 黄绍文,金继运,杨莉萍,等. 粮田土壤养分的空间格局及其与土壤颗粒组成之间的关系[J]. *中国农业科学*,2002, 35(3):297~302.  
Huang Shaowen, Jin Jiyun, Yang Liping, et al. Spatial distribution of soil nutrient and relationship between soil nutrient and soil granule composition for grain crop region[J]. *Scientia Agricultural Sinica*,2002,35(3):297~302. (in Chinese)
- 12 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京:科学出版社,1999:162~192.
- 13 薛亚峰,周明耀,徐英,等. 冬小麦叶面积指数的空间结构性分析[J]. *扬州大学学报:农业与生命科学版*,2006,27(1): 54~57.  
Xue Yafeng, Zhou Mingyao,Xu Ying, et al. Spatial structure of the LAI of winter wheat [J]. *Journal of Yangzhou University: Agricultural and Life Science Edition*, 2006,27(1):54~57. (in Chinese)