

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.05.034

制造车间生产物流瓶颈指数研究*

凌琳¹ 刘明周¹ 唐娟² 赵志彪¹ 葛茂根¹ 蒋增强¹

(1. 合肥工业大学机械与汽车工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽工程大学管理学院, 芜湖 241000)

【摘要】 针对制造车间生产物流瓶颈漂移现象, 将瓶颈漂移因素分为能力因素、需求因素和能力-需求综合因素, 并采用时间能力因子、时间需求因子和质量保证能力因子对各种瓶颈漂移因素进行数字化描述, 为瓶颈漂移因素耦合机理的研究提供数据支持。利用马尔可夫链描述各种瓶颈漂移因素的状态空间和转移概率, 构建贡献函数, 实现瓶颈漂移因素耦合机理的定量分析。以贡献度和质量保证能力为参数, 建立瓶颈指数数学模型, 以度量制造单元成为瓶颈的能力, 为生产过程的控制和优化提供技术支持。通过对某一制造车间内生产物流瓶颈的预测和监控, 验证了瓶颈指数的有效性和实用性。

关键词: 制造车间 生产物流 瓶颈漂移 耦合机理 瓶颈指数

中图分类号: TH186 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)05-0197-06

Bottleneck Index of Production Logistic in Manufacturing Shop

Ling Lin¹ Liu Mingzhou¹ Tang Juan² Zhao Zhibiao¹ Ge Maogen¹ Jiang Zengqiang¹

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

2. School of Management, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China)

Abstract

Aiming at the phenomenon of the production logistics bottleneck shifting because of uncertain manufacturing circumstances in manufacturing shop, the bottleneck shifting factors was firstly categorized into capability factor, requirement factor and capability-requirement factor, a digital description of bottleneck shifting factors was provided through time-capability factor, time-requirement factor and quality assurance capability factor to offer data for the research on the coupling mechanism of bottleneck shifting factors. Markov chain was used to describe the state space and transition probability of different bottleneck shifting factors and to establish contribution function with the aim of realizing the quantitative analysis on coupling mechanism of bottleneck shifting factors. Taking contribution degree and quality assurance capability as parameters, the mathematic model of the Bottleneck index was then built to measure the possibility of the manufacturing cell becoming bottleneck and to provide production process control and make the optimization with technical support in the further way. An example of forecasting and monitoring the production logistics bottleneck in one manufacturing shop was given to prove the validation and practicability of the prediction method.

Key words Manufacturing shop, Production logistics, Bottleneck shifting, Coupling mechanism, Bottleneck index

引言

现代制造模式下, 制造过程中存在着大量的不

确定性因素, 导致物流瓶颈频繁漂移, 使得原先的生产计划和生产调度方案无法按照预定目标正常执行。目前, 针对瓶颈漂移问题, 现有的各种研究成果

收稿日期: 2011-06-13 修回日期: 2011-07-20

* 国家自然科学基金资助项目(71071046)和国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2011CB013406)

作者简介: 凌琳, 博士生, 主要从事生产物流研究, E-mail: linglin8787@126.com

通讯作者: 刘明周, 教授, 博士生导师, 主要从事制造系统运行优化理论与关键技术研究, E-mail: liumingzhou0551@163.com

主要立足于静态的瓶颈判定指标^[1~6]或是利用瓶颈的外部表现特征对其进行预测^[7~11],均未从瓶颈漂移现象产生的根本原因入手,未能反映各种因素与瓶颈漂移现象的内在联系,难以实现制造单元动态瓶颈属性的科学描述。本文定义动态瓶颈属性是不确定环境下制造单元成为瓶颈综合能力的反映,其变化是导致瓶颈漂移的根本原因。继而从瓶颈漂移产生的本质原因出发,分析瓶颈漂移因素,并对其进行数字化描述;研究瓶颈漂移因素间的耦合机理,以此为基础,构建瓶颈指数数学模型,实现制造单元动态瓶颈属性的定量描述,为生产过程的有效控制提供科学依据和决策支持。

1 瓶颈漂移因素分析及其数字化描述

1.1 瓶颈漂移因素分类

瓶颈概念是瓶颈研究的基础,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^[11]。因此,首先从瓶颈产生原因出发,分别给出瓶颈及主次瓶颈定义^[12]:

定义1:设 $f_1(T_{ic}, Q_{ic})$ 、 $f_2(T_{id}, Q_{id})$ 分别表示制造单元 i 的能力和 demand,若 $f_1(T_{ic}, Q_{ic}) < \eta f_2(T_{id}, Q_{id})$,则称 i 为生产物流瓶颈。其中 T_{ic} 、 Q_{ic} 、 T_{id} 、 Q_{id} 分别表示 i 的生产能力、质量能力、生产负荷和质量需求, η 表示系统稳定性相关系数。

定义2:设 $S_j(j=1, 2, \dots, n)$ 表示系统瓶颈集合,若 j 对系统有效产出影响最大,则称 j 为主瓶颈,主瓶颈消除后,最有可能成为主瓶颈的瓶颈称为次瓶颈。

在制造过程中,导致物流瓶颈漂移现象产生的各种不确定性因素称为瓶颈漂移因素。瓶颈漂移因素种类繁多且相互关系复杂,为方便分析各种因素与瓶颈漂移现象的关系,按照因素的影响方式,将瓶颈漂移因素分为能力因素、需求因素和能力-需求综合因素。其中,能力因素是指只引发制造单元生产能力发生变动的各种因素,如设备保养和维修;需求因素是指只改变制造单元生产需求的各种因素,如客户订单的临时变更;能力-需求综合因素则是指同时使制造单元能力和需求发生变化的因素,如产品工艺的调整、物料的质量缺陷。

1.2 瓶颈漂移因素数字化描述方法

瓶颈漂移因素会导致制造单元的生产能力、工序能力以及生产需求发生相对变动,从而引发瓶颈漂移。为定量描述各种因素对瓶颈漂移的影响方式,提出时间能力因子、时间需求因子和质量保证能力因子。其中,时间能力因子和时间需求因子分别是生产能力和生产负荷的时间表示,质量保证能力

因子是制造工序满足产品质量需求的表现。

(1) 时间能力因子 ΔT_c :表示瓶颈漂移因素引发的预定时间内制造单元可用时间(生产能力)的变化量,如设备损坏到维修完毕正常工作的时间间隔为 t_c ,则 $\Delta T_c = -t_c$ 。

(2) 时间需求因子 ΔT_l :表示瓶颈漂移因素引发的预定时间内制造单元生产负荷的变动量,如紧急订单的到达,使得制造单元 j 在预定时间内增加了额外的工作量,以时间 $t_j = \sum (p_{ij}n_i + F_{ij})$ ($i=1, 2, \dots, m$)表示,则 $\Delta T_l = t_j$,其中 n_i 表示第 i 种产品的数量, p_{ij} 表示单位 i 产品的处理时间, F_{ij} 表示制造单元加工产品 i 的准备时间。

(3) 质量保证能力因子 ΔQ_c :表示瓶颈漂移因素引发的制造单元质量保证能力的变动量。质量保证能力包含两层含义,一是保证产品合格的能力,二是保证产品质量功能稳健的能力。因此,质量保证能力可用不合格品率和工序能力指数综合表示,如人员调度和加工质量规范的调整,引发制造单元质量保证能力发生变化,则 $\Delta Q_c = \delta_c(p_2, C_{p2}) - \delta_c(p_1, C_{p1})$,其中 p_1 、 p_2 、 C_{p1} 、 C_{p2} 分别表示瓶颈漂移因素发生前、后制造单元的平均不合格品率和工序能力指数。

2 瓶颈漂移因素耦合机理

不同时间内,各种因素对瓶颈漂移趋势的影响程度不尽相同,且因素不是孤立存在的,而是相互叠加共同影响着瓶颈的变化趋势。由于各种因素对质量保证能力的影响错综复杂,影响机理无法利用统一的模型进行描述,因此,本文只从生产能力和生产负荷的角度讨论各种因素的耦合机理,并以贡献度的形式表现出来;对于质量保证能力则不加以考虑,只以不合格品率等指标反映各因素对制造单元质量保证能力的作用结果。

利用数学统计分析技术,建立反映各种瓶颈漂移因素对瓶颈漂移现象综合贡献度的贡献矩阵。贡献矩阵建立步骤如下:

(1) 瓶颈漂移因素状态空间和转移概率的描述

马尔可夫链可用来描述状态和时间均为连续或离散的动态系统。通过分析可知,瓶颈漂移因素的状态空间具有离散性,时间参数具有连续性,转移概率具有不确定性,因此,可构建有限维次马尔可夫链,以描述各种瓶颈漂移因素的状态空间和转移概率。

以设备状态为例,设随机过程 $\{S(t): t \geq 0\}$ 表示设备发生故障到故障修复完毕的持续过程,按照设备状态划分 $S(t)$ 的状态空间 I_1 , $I_1 = \{0, 1\}$,0表示该设备处于正常状态(包括加工和正常空闲状态),

1 表示设备因故障而不能正常工作状态(包括设备故障待修复状态和正修复状态), Q 为齐次马氏链的密度矩阵,根据实际资料确定,且

$$Q = \begin{bmatrix} -r & r \\ s & -s \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 r, s ——对应状态间的转移概率

则对于任意时间 t 内, $S(t)$ 转移概率矩阵 $P'(t)$ 为

$$P'(t) = QP(t) \quad (2)$$

同理,建立其它瓶颈漂移因素的有限维次马氏链,从而可以求出当前时刻之后 n 个时刻各种瓶颈漂移因素的随机分布概率。

(2) 贡献函数的建立

假设时间 T_i 内, $s_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 因素发生变动,变动次数为 m_i, s_{ij} 表示 s_i 第 j 次变动的状态空间, $s_{ij} \in S_{Ti}$,且 s_{ij} 状态的逗留时间服从参数为 θ_{ij} 的指数分布, S_{Ti} 为 s_i 的状态空间集合; $p(s_{ij})$ 表示 s_i 由当前状态到状态 s_{ij} 的转移概率; $f_i(t)$ 和 $l_i(t)$ 分别表示 s_i 对生产能力和生产负荷的独立贡献函数; $C(t)$ 和 $L(t)$ 分别表示各个瓶颈漂移因素对生产能力和生产负荷的综合贡献函数; α_i 和 β_i 分别表示 s_i 对生产能力和生产负荷的影响因子,具体含意为

$$\begin{cases} \alpha_i = \begin{cases} (0, 1] & (s_i \text{ 影响生产能力}) \\ 0 & (s_i \text{ 不影响生产能力}) \end{cases} \\ \beta_i = \begin{cases} (0, 1] & (s_i \text{ 影响生产负荷}) \\ 0 & (s_i \text{ 不影响生产负荷}) \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

s_i 对瓶颈漂移现象的贡献函数由 s_i 的状态逗留时间的期望值和影响因子联合表示,具体为

$$\begin{cases} f_i(t) = \sum_{j=1}^{m_i} (-1)^p \sum_{s_{ij} \in S_{Ti}} p(s_{ij}) \frac{\alpha_i}{\theta_{ij}} \\ l_i(t) = \sum_{j=1}^{m_i} (-1)^q \sum_{s_{ij} \in S_{Ti}} p(s_{ij}) \frac{\beta_i}{\theta_{ij}} \end{cases} \quad (4)$$

其中: p 和 q 的奇偶性根据 s_i 对生产能力和生产负荷的增减作用进行确定,当其增加生产能力时, p 为偶数,否则,为奇数; q 确定方式与此类似。

当多个瓶颈漂移因素发生变动时,各个因素的发生在时间上具有并行性和交叉性的特点,因此,各种因素的综合贡献度并不等于各个因素独立贡献度的总和。假设瓶颈漂移因素的综合贡献函数为

$$\begin{cases} C(t) = G(f_1(t), \dots, f_i(t), \dots, f_n(t)) \\ L(t) = H(l_1(t), \dots, l_i(t), \dots, l_n(t)) \end{cases} \quad (5)$$

综合贡献函数并不是简单的线性函数,无法建立统一的分析模型来预测综合贡献度。神经网络可以逼近任意的连续函数,可获得很好的逼近效果,通过大容量样本训练出来的网络其评价误差更小,外推能力也更强,因此,可通过神经网络求解综合贡献

函数,实现综合贡献度的预测。

贡献函数求解过程是一个单向流通过程,且同层因素之间不存在关联性,由此特性可知,应选择前馈神经网络。在前馈神经网络中,BP 神经网络能够实现任意的连续映射,具有较强的非线性映射能力和柔性网络结构,预测精度较高^[13],因此,以瓶颈漂移因素的独立贡献度为输入,以综合贡献度为输出,采用 Sigmoid 函数作为激励函数,构建 2 个三层 BP 神经网络,分别求解各因素对生产能力的综合贡献函数和对生产负荷的综合贡献函数,预测各种因素对生产能力和生产负荷的综合贡献度,以实现瓶颈漂移因素耦合机理的定量描述。

3 瓶颈指数

3.1 基于耦合机理的瓶颈指数描述

瓶颈指数用于描述制造单元在不确定性环境下成为瓶颈的能力,是制造单元动态瓶颈属性的数学表达。

制造过程中,加工能力越大、加工任务越小,成为瓶颈的可能性越小;反之,成为瓶颈的可能性越大。依据这一特性,以制造单元加工能力和加工需求为参数,构建瓶颈指数 I_{BN} 数学模型。其中,加工能力包括生产能力(产量)和质量能力,加工需求包括生产负荷(任务数量)和质量需求。考虑不同工序加工时间的差异性,生产能力和生产负荷均以时间为参数进行度量;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表示,质量保证能力采用无量纲指标表示较为合理。假设产品工艺路线和生产调度方案不变,瓶颈指数 I_{BN} 数学模型可表示为

$$I_{BN} = \omega_t (l_j/c_j) + \omega_q G(C_p, C_p^j) \quad (6)$$

其中 $l_j = \sum_{i=1}^{N_j} (q_{ij}(1 + f_{ij}(C_{pi}^j))E_{ij} + F_{ij}) + L_j(t)$

$$c_j = T_j + C_j(t) \quad C_p^j = \omega_{1j} C_{p1}^j + \dots + \omega_{Ni,j} C_{pNi}^j$$

式中 ω_t, ω_q ——产品数量 and 产品质量在瓶颈指数

中的影响权重, $\omega_t + \omega_q = 1$

c_j, l_j ——制造单元 j 生产能力和生产负荷

$G(C_p, C_p^j)$ ——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_p^j —— j 的综合工序能力指数

ω_{ij} ——权重,依据各种产品的重要性进行设定,且 $\omega_{1j} + \dots + \omega_{Ni,j} = 1$

N_j —— j 加工的产品种类数量

q_{ij} —— j 加工产品 i 的数量

E_{ij} —— j 加工单位产品 i 的时间

F_{ij} —— j 加工产品 i 的生产准备时间

C_{pi}^j —— j 加工产品 i 的工序能力指数

$L_j(t)$ ——瓶颈漂移因素对 j 生产负荷的综合贡献度

T_j —— j 计划可用生产时间

$C_j(t)$ ——瓶颈漂移因素对 j 生产能力的综合贡献度

$f_{ij}(C_{pi}^j)$ ——在稳定环境下, j 生产 i 的平均不合格品率

当 j 为加工或装配单元时, $f_{ij}(C_{pi}^j)$ 、 ω_q 和 $G(C_p, C_p^j)$ 均与工序能力指数相关, 三者关系如表 1 和表 2 所示^[14]。

表 1 $f_{ij}(C_{pi}^j)$ 与 C_{pi}^j 的关系

Tab. 1 Relationship among $f_{ij}(C_{pi}^j)$ and C_{pi}^j

C_{pi}^j 范围	$f_{ij}(C_{pi}^j)$	分布中心是否与公差中心一致
(C_p, ∞)	0	
	$\lambda(1 - \Phi(3C_{pi}^j))$	一致
$(-\infty, C_p]$	$2 - \Phi(3(1+k)C_{pi}^j) - \Phi(3(1-k)C_{pi}^j)$	不一致

表 2 $G(C_p, C_p^j)$ 和 ω_q 的确定

Tab. 2 Determination of $G(C_p, C_p^j)$ and ω_q

C_{pj} 范围	$G(C_p, C_p^j)$	ω_q
$[C_p, \infty)$	0	0
(C_{pl}, C_p)	C_p/C_{pj}	$(0, \tau]$ $(\tau, 1]$
$(-\infty, C_{pl}]$	∞	1

在表 1 中, 针对双侧公差和单侧公差, λ 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 $k = \varepsilon/(T/2) = (M - x)/(T/2)$ 。在表 2 中, τ 根据经验取值, 且 $\tau \in [0, 1]$ 。

当 j 为运输单元时, $f_{ij}(C_{pi}^j)$ 用运输过程中产品的损坏率表示。假设第 i 种产品在该单元上运输时的平均损坏率为 β_i , 则预定时间内 $f_{ij}(C_{pi}^j) = \beta_i$ 。同时, 因运输单元只改变工件位置, 不改变工件形态,

因此, $G(C_p, C_p^j)$ 和 ω_q 均为 0。

3.2 基于瓶颈指数的瓶颈动态预测模型

根据瓶颈定义, 以瓶颈指数为基础, 构建生产物流瓶颈预测模型, 在准确预测瓶颈的同时, 验证瓶颈指数的合理性和实用性。具体模型为

$$\begin{cases} S_{BN} = \{i | I_{BNi} \geq \chi, i \in S\} \\ S_{nBN} = \{i | 0 < I_{BNi} < \chi, i \in S\} \end{cases} \quad (7)$$

式中 S_{BN} 、 S_{nBN} —— t 时刻瓶颈集合和非瓶颈集合

S ——制造系统中制造单元集合

χ ——瓶颈判定标准, $v \leq \chi \leq 1$

v 根据制造系统的稳定性进行设定, 一般不宜取太大, 以防止将非瓶颈误判为瓶颈, 也不宜取太大, 以防止瓶颈的漏判。

假设 γ 为 S_{BN} 元素个数, $I_{BNi} = \max\{I_{BNi}, i \in S_{BN}\}$, $I_{BNj} = \max\{I_{BNj}, j \neq i, j \in S_{BN}\}$ 。根据式 (7), 可得出以下结论: 若 $\gamma = 0$, 表示系统在 t 时刻能够满足需求, 无瓶颈; 若 $\gamma = 1$, 表示系统在 t 时刻存在瓶颈 i , i 应重点管理; 若 $\gamma > 1$, 表示系统在 t 时刻存在多个瓶颈, 此时, 依据瓶颈指数大小辨识主次瓶颈。具体判定规则如下: I_{BN} 值最大的瓶颈为主瓶颈, 其次为次瓶颈, 由此可知, i 为主瓶颈, j 为次瓶颈。

4 实例分析

以某车间在 5 台设备 M1、M2、M3、M4、M5 上加工 A、B、C、D、E 5 种产品为例, 通过预测某一生产日内的物流瓶颈, 验证相关理论的正确性和科学性。假定该企业工序能力标准采用一般性工业标准, 该车间运输设备数量充分, 即不存在运输瓶颈, 且预测时间内的有效工作时间为 7 h。表 3 是各个产品在当日的加工数量、单位产品处理时间 t 和制造单元加工各个产品的工序能力指数 C_{pj} 。 S_1 、 S_2 、 S_3 、 S_4 、 S_5 表示车间中最频繁发生的瓶颈漂移因素, 分别表示订单变更、产品工艺、设备故障、人员效率和物料质量。统计分析历史数据, 利用训练好的神经网络结构, 可得出因素对各设备的生产能力综合贡献度和生产负荷综合贡献度 (min), 分别为 $(-24, -53.8, -43.2, -63.4, -28.8)$ 、 $(23, 16, 18, 21, 22)$ 。

表 3 产品制造相关数据

Tab. 3 Manufacturing-related data

产品名称	生产数量	M1		M2		M3		M4		M5	
		t/min	C_{pj}								
A	60	0.56		0.75	0.91	1.4	1.23	1.8	1.01	1.0	1.01
B	40	0.60		0.80	0.89	1.5	1.21	1.7	0.99	0.9	0.99
C	80	0.70		0.70	1.03	1.3	0.75	1.4	0.98	1.0	0.87
D	50	0.60		0.80	1.05	1.5	1.15	1.8	1.21	0.9	0.96
E	45	0.65		0.80	1.21	1.4	1.23	2.0	1.15	1.2	1.01

加工各产品的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

$$W = C \begin{matrix} & M1 & M2 & M3 & M4 & M5 \\ \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0.3 \\ 0.2 & 0.5 & 0 & 0.2 & 0.1 \\ 0.2 & 0.2 & 0.4 & 0 & 0.2 \\ 0 & 0.1 & 0.2 & 0.5 & 0.2 \\ 0.2 & 0 & 0.3 & 0.3 & 0.2 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

则各设备生产 5 种产品的总工序能力指数 C_p 分别为 0、0.888、1.022、1.138、0.970。根据工序能力指数评价标准确定各设备的 ω_q ，分别为 0、0.70、0.36、0.18、0.52。

根据式(6)计算各设备的瓶颈指数，结果如表 4 所示。

表 4 制造单元 I_{BN} 计算结果

Tab.4 Results of production unit I_{BN}

设备	l/c	ω_i	$f_q^2(\sigma, \mu)$	ω_q	I_{BN}
M1	0.443	1.0	0	0	0.443
M2	0.571	0.30	1.066	0.70	0.918
M3	1.030	0.64	0.978	0.36	1.011
M4	1.311	0.82	0.879	0.18	1.233
M5	0.584	0.48	1.031	0.52	0.805

假定车间生产波动较小，瓶颈判定标准 $\chi = 1$ ，根据式(7)可知，在计划生产日中，车间中存在 2 个瓶颈，分别为 M3 和 M4。再根据主次瓶颈判定规则，可知 M4 为主瓶颈，M3 为次瓶颈。

统计各台设备的活性时间，实现瓶颈的实时辨识^[15]，以验证本文相关理论的准确性。根据实际观察，记录实际生产数据，并对数据进行统计和分析，绘制瓶颈漂移图，具体如图 1 所示。

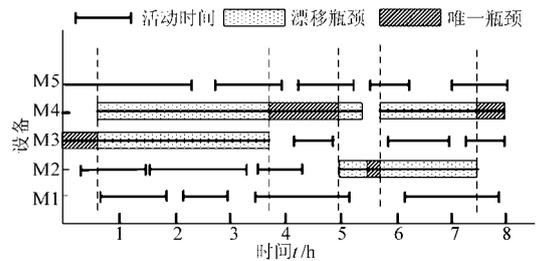


图 1 瓶颈漂移图

Fig.1 Chart of bottleneck shifting

根据图 1，统计各个设备在生产日内作为漂移瓶颈和唯一瓶颈的时间百分比，并以此为依据进行瓶颈的实时辨识，结果如表 5 所示。

表 5 设备状态统计结果

Tab.5 Results of bottleneck real-time detection

设备	唯一瓶颈/%	漂移瓶颈/%	总和/%	是否为瓶颈
M1	0	0	0	
M2	0	31.3	31.3	
M3	8	40.8	48.8	次瓶颈
M4	14.0	73.5	87.5	主瓶颈
M5	0	0	0	

从表 5 可知，利用瓶颈指数可准确预测出制造车间生产物流系统的主瓶颈和次瓶颈。

5 结论

(1) 提出的瓶颈指数是综合考虑了瓶颈漂移因素后，对制造单元成为瓶颈能力的度量，不仅可以识别制造车间中的瓶颈，还有预测制造车间瓶颈的作用。

(2) 基于瓶颈指数的生产物流瓶颈动态预测模型，可以实现不确定性制造环境下多瓶颈的动态预测，为生产过程的合理规划和有效控制提供基础。

参 考 文 献

- 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. Appling 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 Chunlung, Chen Chuenlung. 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.
- 李黎, 成晔, 袁守华. 基于瓶颈分析的优先权调度算法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(2): 247 ~ 250.
Li Li, Cheng Ye, Yuan Shouhua. Research on priority scheduling algorithm based on bottleneck analysis[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(2): 247 ~ 250. (in Chinese)
- Li Lin, Chang Qing, Ni Jun, et al. Bottleneck detection of manufacturing systems using data driven method [C]// Proceedings of the 2007 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, Michigan, USA, 2007: 22 ~ 25.
- 施文武, 严洪森. 知识化制造系统中生产瓶颈的分析方法[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(2): 271 ~ 279.
Shi Wenwu, Yan Hongsen. Method of shifting bottleneck analysis in knowledge-oriented manufacturing system [J]. Computer

- Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(2): 271 ~ 279. (in Chinese)
- 7 Babu T Ramesh, Rao K S P, Maheshwaran C Uma. Application of TOC embedded ILP for increasing throughput of production lines [J]. International Journal of Manufacturing Technology and Management, 2007, 33(7 ~ 8): 812 ~ 818.
 - 8 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.
 - 9 Acero-Dominquez M J, Paternina-arboleda C D. Scheduling jobs on a K-stage flexible flow shop using a TOC-based (bottleneck) procedure [C] // Proceedings of the 2004 Systems and Information Engineering Design Symposium, Charlottesville, VA, Canada, 2004: 295 ~ 298.
 - 10 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.
 - 11 Lu Jiansha, Shen Miaomiao, Lan Xiuju. Study of the shifting production bottleneck: possible causes and solutions [C] // 2006 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI '06), Shanghai, China, 2006: 684 ~ 688.
 - 12 Liu Mingzhou, Tang Juan, Ge Maogen. Dynamic prediction method of production logistics bottleneck based on bottleneck index [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22(5): 710 ~ 716.
 - 13 苏伟, 刘景双, 李方. BP神经网络在水资源承载能力预测中的应用 [J]. 水利水电技术, 2007, 38(11): 1 ~ 4.
Su Wei, Liu Jingshuang, Li Fang. Application of BP neural network to prediction of carrying capacity of water resources [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(11): 1 ~ 4. (in Chinese)
 - 14 张公绪. 新编质量管理学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
 - 15 叶涛锋, 韩文民. 确定瓶颈资源的仿真方法研究 [J]. 华东船舶工业学院学报, 2003, 17(4): 80 ~ 84.
Ye Taofeng, Han Wenmin. Method of simulation on determining bottleneck resource [J]. Journal of East China Shipbuilding Institute, 2003, 17(4): 80 ~ 84. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 172 页)

- 10 丁幼春, 王书茂, 陈红. 农用车辆作业环境障碍物检测方 [J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 23 ~ 27.  
Ding Youchun, Wang Shumao, Chen Hong. Obstacle detection in the working area of agricultural vehicle based on machine vision [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40 (Supp.): 23 ~ 27. (in Chinese)
- 11 Heikkilä J. Geometric camera calibration using circular control points [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(10): 1 066 ~ 1 077.
- 12 于仕琪, 刘瑞祯. 学习 OpenCV [M]. 中文版. 北京: 清华大学出版社, 2009.
- 13 Stefano Mattoccia. Stereo vision: algorithms and applications [M]. Enschede: University of Twente, 2009.
- 14 张广军. 机器视觉 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- 15 斯内尔, 鲍尔美, 刘彦博, 等. Visual Studio 技术大全 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.