

# 基于自适应蚁群算法的装配线平衡问题研究

邓福平 张超勇 连坤雷 徐绍铨

华中科技大学数字制造装备与技术国家重点实验室,武汉,430074

**摘要:**提出了一种自适应蚁群算法,用以求解装配线平衡问题。在该算法中,针对装配线平衡问题的具体特点,设计了一种蚂蚁分配方案可行解的构造策略,提出了一种比传统方法区分度更高的评价解质量的目标函数,同时为了克服蚁群算法易陷入局部最优和收敛速度慢等缺陷,通过自适应地调整算法的挥发度等系数,在保证收敛速度的条件下提高了解的全局性。最后,通过实例验证,证明了算法的可行性和有效性。

**关键词:**装配线平衡;蚁群算法;自适应;人工智能

**中图分类号:**TP301

**文章编号:**1004—132X(2011)16—1949—05

## An Adaptive Ant Colony Optimization for Solving Assembly Line Balancing Problem

Deng Fuping Zhang Chaoyong Lian Kunlei Xu Shaotan

State Key Laboratory of Digital Manufacturing Equipment and Technology,

Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074

**Abstract:** An adaptive ant colony optimization was proposed to solve the assembly line balancing problem (ALBP). According to the characteristics of the ALBP, a method of solution constructing strategy was developed, and a better differentiation of objective function was proposed to appraisal solution quality. However, general ant algorithm often falls into local optimal and consume excessive time, in order to overcome these shortcoming, an improved ACO was presented by adaptive adjustment of the parameters in the algorithm, which has a good ability of searching better solution at higher convergence speed. Finally, the proposed algorithm was tested and compared against best known algorithms reported in the literatures, and the experimental results indicate the feasibility and effectiveness of the proposed algorithm.

**Key words:** assembly line balancing; ant colony optimization (ACO); adaptive; artificial intelligence

### 0 引言

装配线在制造企业中广泛存在,在装配线的设计和运行过程中包含了各种问题,装配线平衡问题(assembly line balancing problem, ALBP)是其中最重要的问题之一,其微小的改进都可以在提高效率和降低成本上取得显著效果<sup>[1]</sup>。ALBP是一个典型的 NP-hard 组合优化问题,问题的复杂度随任务数的增加呈几何级数增长,不存在精确求得最优解的多项式时间算法<sup>[2]</sup>。目前,求解装配线平衡的方法可以分为三大类:最优化方法、启发式方法、人工智能方法。最优化方法能找到最优解,理论意义十分重大,但由于其在计算时间和计算规模上的局限性,难以应用到生产实际中<sup>[3-4]</sup>;启发式方法简便、易懂,受到了许多研

究者的关注,但是一般来说,其收敛到最优解的速度较慢,判断解的最优性也很困难<sup>[5]</sup>;近年来人工智能算法(如遗传算法、模拟退火、禁忌搜索等)取得了快速发展,并成功应用于求解 ALBP<sup>[6-7]</sup>。

蚁群算法(ant colony optimization, ACO)是由 dorigo 等<sup>[8]</sup>于 1991 年提出的一种智能优化算法,之后该方法被用于解决了一系列组合优化问题。Bautista 等<sup>[9]</sup>于 2002 年最早提出运用蚁群算法解决最简单模型的装配线平衡问题,他们采用的是最基本的蚂蚁系统(ant system, AS),优化效果不太理想。2003 年,McMullen 等<sup>[10]</sup>运用蚁群算法,研究了混合品种、任务处理时间具有随机性、并允许并行工作站存在这样一类更为复杂的装配线平衡问题,测试实例表明该算法具有较高的性能。2007 年, Bautista 等<sup>[11]</sup>研究了运用蚁群算法解决带有时间和空间约束的更具有实际意义的装配线平衡问题。

上述求解装配线平衡问题的蚁群算法有些是

收稿日期:2010—10—15

基金项目:国家自然科学基金资助重点项目(51035001);国家自然科学基金资助项目(50875101);国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2007AA04Z107)

信息素的累积方式过于简单,以至优化效果不佳,有些是解的评价函数过于单一,以至于对解的区分度不够。针对已有研究的不足,本文提出一种自适应蚁群算法,用以解决装配线平衡问题,在利用蚂蚁构建路径的过程中不仅仅需要考虑外部信息,而且需要充分利用蚂蚁自身的历史经验信息,对全局信息素挥发系数进行自适应调整,避免算法陷入局部最优。同时,经综合考虑,将装配线的平衡率和平滑系数作为目标函数,以克服仅考虑工作站数对解的区分度不够的缺陷,并通过对标准测试问题集的测试,验证本文提出算法的有效性。

## 1 装配线平衡问题及其数学模型

ALBP 是指在工艺等约束条件下,将有限的任务集合分配到一定数量的工作站中,以使每个工作站的作业时间满足一定的节拍要求,缩短工作站的闲置和过载时间,最小化平衡指标。装配线的平衡涉及生产线各工序之间的协调配合,并需要解决各工序在时间上不一致的问题。装配线的平衡程度直接反映了装配线的生产效率,并会影响到产品质量。

本文将所要解决的 ALBP 的数学模型描述如下:

目标函数为

$$\max f(m) = \lambda L - I \quad (1)$$

其中

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{mC}$$

$$I = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (\max(T(S_k)) - T(S_k))^2}{m}}$$

约束条件为

$$S_i \cap S_j = \emptyset \quad (2)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n \text{ 且 } i \neq j$$

$$\bigcup_k S_k = E \quad (3)$$

$$\forall i \in S_x, j \in S_y, 1 \leq x, y \leq n \quad (4)$$

若  $P_{ij} = 1$ , 则  $x \leq y$

$$T(S_k) \leq C \quad (5)$$

式中,  $L$  为装配线平衡率;  $I$  为装配线平滑系数;  $\lambda$  为用户定义参数 ( $\lambda > 1$ );  $E$  为装配线上任务的集合;  $S_k$  为分配到第  $k$  个工作站任务的集合;  $C$  为装配线的节拍;  $t_i$  为第  $i$  个任务的作业时间;  $T(S_k)$  为第  $k$  个工作站的总作业时间;  $\mathbf{P}$  为 ALBP 的优先关系矩阵,  $\mathbf{P} = [P_{ij}]_{n \times n}$ , 当任务  $i$  是任务  $j$  的直接紧前工序时,  $P_{ij} = 1$ , 否则  $P_{ij} = 0$ 。

## 2 求解装配线平衡问题的自适应蚁群算法

### 2.1 可行解的构造策略

采用蚁群算法求解装配线平衡问题时,可将装配线上的各工序任务看成是蚂蚁游历所需经过的节点,将各工序任务和工作站位置之间的连接看成是蚂蚁游历所需经过的边。将工序任务分配到各工作站的过程,可以看成是一群蚂蚁在信息素强度和启发式信息的指引下沿着边的移动过程。

可行解的构造是求解装配线平衡问题的关键,本文通过逐步添加可供分配的任务至相应的工作站中而生成完整的可行解。为描述这一过程,定义相关概念如下:

(1) 未分配任务 (no-assigned task): 尚未分配至任一工作站中的任务;

(2) 可选任务 (available task): 为未分配任务,且满足优先顺序约束关系,即只要该任务的直接先行任务已分配,则该任务为可选任务;

(3) 可供分配的任务 (assignable task): 为可选任务,且是满足节拍约束的任务。

可行解的构造步骤可描述如下:

(1) 开启一个工作站;

(2) 根据未分配任务集和优先顺序约束关系构建可选任务集,若未分配任务集为空,转步骤(7);

(3) 根据可选任务集和节拍约束构建可供分配的任务集;

(4) 如果可供分配的任务集为空,转步骤(6);

(5) 按设定的规则从可供分配的任务集中选出一项任务,分配至当前工作站,转步骤(2);

(6) 开启一个新的工作站,转步骤(2);

(7) 结束。

采用上述步骤构造可行分配方案,可行方案集中总是存在着相对最优分配方案。

蚁群算法一个很重要的特征就是利用了信息正反馈和启发式信息相结合的原理,信息素的累积方式和启发式规则的选取,对提高蚁群算法的性能具有重要作用。本文算法中,将蚂蚁所游历的边上信息素强度  $\tau_{ij}$  定义为将工序任务  $i$  分配到工作站  $j$  的期望,启发式信息通过静态优先规则给出。经综合考虑,将最大作业时间和最大后续任务数作为算法的启发式信息,工序任务  $i$  的能见度  $\eta_i$  可按下式计算得到:

$$\eta_i = \frac{t_i}{C} + \frac{U_i}{\max_{i=1,2,\dots,N} U_i} \quad (6)$$

式中,  $U_i$  为工序任务  $i$  的后续任务数。

为解决蚁群算法易出现停滞现象的问题, 保证其有较强探索能力, 构造如下混合搜索机制, 蚂蚁按下式来选择任务  $i$ , 并将其分配到工作站  $j$  中:

$$i = \begin{cases} I_1 & \arg \max_{i \in N_j} (\tau_{ij}(t))^\alpha (\eta_i)^\beta, 0 \leq r \leq r_1 \\ I_2 & p_{ij} = \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha (\eta_i)^\beta}{\sum_{z \in N_j} (\tau_{zj}(t))^\alpha (\eta_z)^\beta}, r_1 < r \leq r_1 + r_2 \\ I_3 & \text{随机选择}, i \in N_j, r_1 + r_2 < r \leq r_1 + r_2 + r_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $r$  为  $(0,1)$  之间的随机数;  $r_1, r_2, r_3$  为自定义的参数, 满足  $0 \leq r_1, r_2, r_3 \leq 1$ , 且  $r_1 + r_2 + r_3 = 1$ ;  $N_j$  为蚂蚁在当前工作站  $j$  的可供分配任务集;  $z$  为可供分配的任务;  $\alpha, \beta$  为决定信息素强度和启发式信息相对重要性的参数。

该混合搜索机制按概率选择使用三种策略中的一种来选择一项任务: ① 利用。以概率  $r_1$  从可供分配任务集  $N_j$  中选择  $(\tau_{ij}(t))^\alpha (\eta_i)^\beta$  最大的作为分配至工作站  $j$  的任务; ② 探索。以概率  $r_2$  根据等式中的  $I_2$  给出的概率  $p_{ij}$  选择一项任务; ③ 随机选择。以概率  $r_3$  从可供分配任务集中随机选择一项任务。

按上述规则, 将蚂蚁  $k$  当前已分配的任务记录在表  $tabu_k$  中, 当所有  $n$  项任务都加入到  $tabu_k$  中时, 蚂蚁  $k$  便完成了一次周游, 此时蚂蚁  $k$  所选择的任务序列就是问题的一个可行解。

### 2.2 评价解质量的目标函数

完成可行解的构造后, 需要对解的质量进行评价。第一类装配线平衡问题 ALBP-1 的目标是在给定节拍的条件下, 使工作站数最小, 然而以工作站数  $m$  作为目标函数, 装配线平衡问题的许多分配方案具有相同的解, 区分度不佳。为了利于蚂蚁搜索过程中信息素更有效地累积, 本文采用下式作为目标函数来评价解的质量:

$$\max f(m) = \lambda L - I = \lambda \frac{\sum_{i=1}^n t_i}{mC} - \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m (\max(T(S_k)) - T(S_k))^2}{m}} \quad (8)$$

该目标函数综合考虑了装配线平衡率  $L$  和装配线平滑系数  $I$  来对装配线平衡的效果进行评价, 即平衡率越高、平滑系数越小, 装配线的平衡效果越好。就装配线平衡率  $L$  和装配线平滑系数  $I$  相对重要性而言, 我们赋予装配线平衡率  $L$  以更高的权重, 取  $\lambda > 1$ 。

采用该目标函数, 可增强具有相同工作站数分配方案的区分度, 此外还可使算法搜索的目的

性更强, 增强信息素的学习和更新, 有助于提高算法的收敛速度。

### 2.3 信息素更新策略

本文算法的信息素更新策略将采用蚁群系统 (ant colony system, ACS) 中局部信息素更新和全局信息素更新相结合的方式来进行。

(1) 局部信息素更新 (local pheromone trail update)。在解的构造过程中, 当蚂蚁将任务  $i$  分配到工作站  $j$  后, 边  $ij$  上的信息素按下式进行更新:

$$\tau_{ij}(n) = (1 - \rho_1) \tau_{ij}(n-1) + \rho_1 \tau_0 \quad (9)$$

式中,  $\rho_1$  为局部信息素挥发系数,  $0 \leq \rho_1 \leq 1$ ;  $\tau_0$  为初始化信息素量。

局部信息素更新的作用是使已选的分配方案对后来的蚂蚁影响力较小, 从而使蚂蚁对没被选择过的边有更强的探索能力, 这样可使得算法的搜索空间尽可能地大, 以寻找那些可能存在最优解的解空间。

(2) 全局信息素更新 (global pheromone trail update)。当所有蚂蚁都完成一次周游后, 只有构成全局最优解的任务分配方案才会增加信息素, 这样使搜索的目的性就大大增强了。当前迭代中全局最优蚂蚁按下式进行全局信息素的更新:

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \rho_2) \tau_{ij}(t-1) + \rho_2 \Delta \tau_{ij}^{gb}(t) \quad (10)$$

$$\Delta \tau_{ij}^{gb}(t) = \begin{cases} f(m) & (i, j) \text{ 属于当前最优分配方案} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

式中,  $\rho_2$  为全局信息素挥发系数,  $0 \leq \rho_2 \leq 1$ ;  $f(m)$  为当前最优分配方案的目标函数。

使用上述全局信息素的更新策略, 经过有限几次的搜索, 属于当前最优解的任务分配方案的信息素量就会明显高于其他分配方案, 这样一方面可增强搜索的目的性, 但同时也会带来算法易陷入局部最优的缺陷。为了提高蚁群算法的全局搜索能力, 本文使用一种自适应蚁群算法来自适应地改变  $\rho_2$  的值, 用来避免某些边上的信息素过小或过大。

我们取  $\rho_2$  的初始值  $\rho_2(t_0) = 1$ , 当算法求得的最优值在  $N$  次循环内没明显改进时,  $\rho_2$  减小为

$$\rho_2(t) = \begin{cases} 0.95 \rho_2(t-1) & 0.95 \rho_2(t-1) \geq \rho_{2\min} \\ \rho_{2\min} & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

其中,  $\rho_{2\min}$  为  $\rho_2$  的最小值, 用来防止  $\rho_2$  过小而降低算法的收敛速度。

### 2.4 算法步骤

- (1) 初始化算法的参数;
- (2) 开启一个工作站, 生成初始可选任务集、可供分配任务集;

(3) For 每只蚂蚁 do;

Repeat

①初始化每条路径上的信息素;②按式(7)从可供分配任务集中选择任务分配到当前工作站;③将已选择任务置于 *tabu* 表中;④按式(9)进行局部信息素更新;⑤移动到下一任务,若工作站已满,则开启一个新的工作站;⑥生成新的可选任务集、可供分配任务集;⑦ Until 所有任务分配完毕;

End for

(4)按式(8)计算每只蚂蚁解的目标函数,找出迭代最优解,若是全局最优解,则替代之;

(5)按式(11)对全局信息素挥发系数进行自适应更新;

(6)按式(10)进行全局信息素更新;

(7)置  $N_c \leftarrow N_c + 1$ ;

If  $N_c > N_{cmax}$  then

①输出最优解;②退出算法;

Else

①清除所有蚂蚁禁忌表中的数据;②转步骤

(2)。

End if

### 3 算例分析

根据上述算法,本文对 ABLP 的基准问题(benchmark 问题)进行了求解验证。笔者在 Windows XP 下用 C++ 开发了一个实验程序,在 Pentium IV 2.20GHz,2G 内存的 PC 机上进行了多次实验计算。蚁群算法的参数设置对算法的求解效率有很大的影响,通过多次组合实验我们将算法参数设置如下:蚂蚁数( $N\_ANT\_COUNT$ )=任务数( $N\_TASK\_COUNT$ ),最大迭代次数  $N_{cmax} = 50, \tau_0 = 1, \alpha = 1.0, \beta = 2.0, \rho_1 = 0.1, \rho_2(t_0) = 1, \rho_{2min} = 0.5, r_1 = 0.6, r_2 = 0.3, r_3 = 0.1$ 。

本文首先以求解 benchmark 问题 Kilbridge ( $C=57$ )得到的具体结果来分析算法的性能,进而给出测试问题集<sup>[12]</sup>中共 24 个测试问题的解与已有的研究进行比较。Kilbridge 问题作业优先顺序图及 Kilbridge 问题计算结果分别见图 1 和表 1。

测试问题:Kilbridge( $n=45, C=57$ )

从测试结果来看,采用本文算法求解 Kilbridge 问题能求得理论最小工作站数,装配线平衡率达到了 96.8%,从装配线工位负荷图(图 2)可以看出,各工位的负荷非常均匀,即装配线的平

衡效果较好。上述计算结果都是在不到 1s 时间内得到的,说明了算法的高效性。

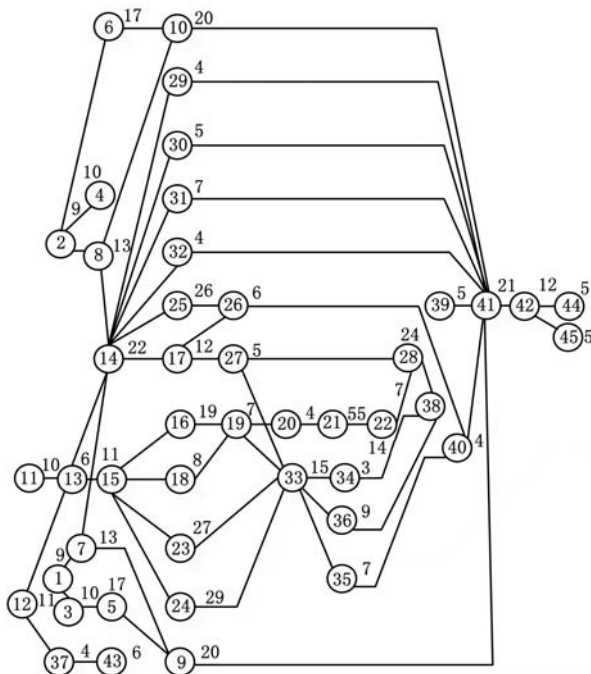


图 1 Kilbridge 问题作业优先顺序图

表 1 Kilbridge 问题计算结果

工作站序号	站中作业元素	工作站时间(s)	空闲时间(s)
1	1, 11, 12, 13, 15, 18, 39	55	2
2	2, 7, 8, 16	54	3
3	14, 17, 19, 20, 27, 31	57	0
4	21	55	2
5	23, 24	56	1
6	3, 4, 22, 30, 33, 34	57	0
7	5, 25, 29, 36	56	1
8	6, 26, 28, 35	54	3
9	9, 10, 32, 38, 40	55	2
10	37, 41, 42, 43, 44, 45	53	4

本文算法与位置权重法、遗传算法(GA)求解测试问题集计算结果的比较如表 2 所示。

从表 2 可以看出,自适应蚁群算法与遗传算法<sup>[13]</sup>对于 24 个测试问题都能求得理论最小工作站数,且其效果明显优于位置权重法。位置权重法作为一种静态的优先规则,其选择标准是唯一确定的,而本文提出的自适应蚁群算法,本质上是一种随机搜索算法,在搜索的过程中能充分利用个体之间和对自身的历史信息的学习,能有效脱离局部最优,找到全局最优解。

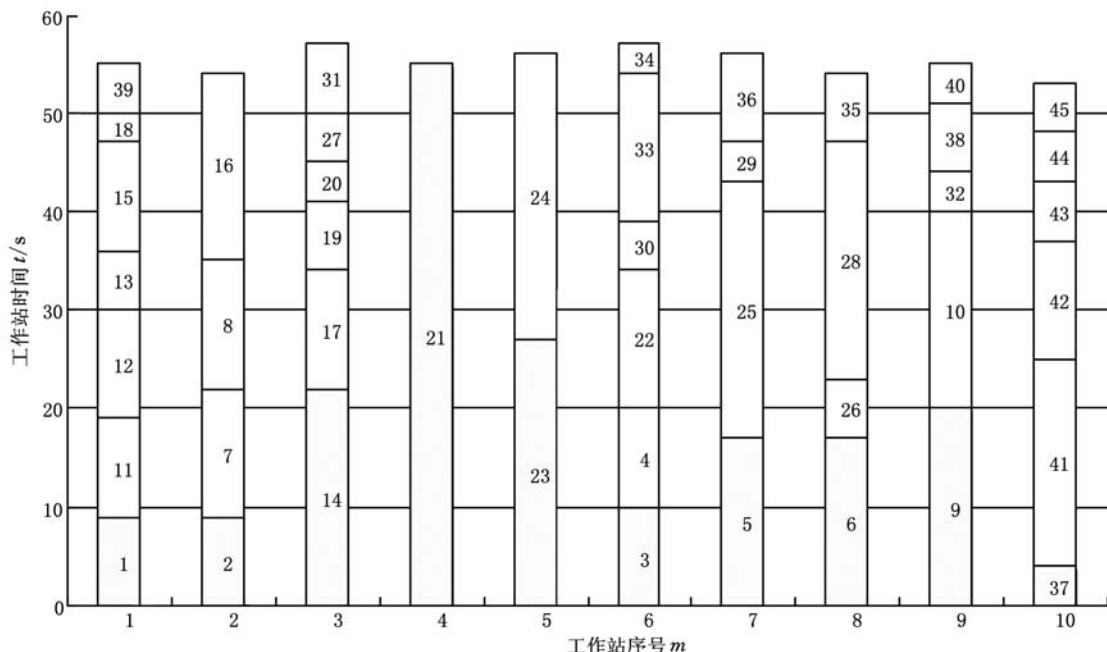


图 2 Kilbridge 平衡后装配线工位负荷图

表 2 测试问题的计算结果对比分析

问题 <sup>[13]</sup>	任务数 $n$	节拍 $C$	任务总时间 $t_{sum}$	理论最小工作站数 $m_{min}$	自适应蚁群算法			位置权重法	GA <sup>[13]</sup>
					$m$	$L$	$I$		
Jackson	11	10	46	5	5	92.0%	1.095	6	5
		13		4	4	88.5%	0.707	4	4
Heskiaoff	28	205	1024	5	5	99.9%	0.447	6	5
		256		4	4	100.0%	0	5	4
Buxey	29	30	324	12	12	90.0%	2.309	12	12
		41		8	8	98.8%	0.707	9	8
		54		7	7	85.7%	4.629	7	7
Sawyer	30	41	324	8	8	98.8%	0.707	9	8
		47		7	7	98.5%	2.390	8	7
Lutzi	32	1414	14140	11	11	90.9%	134.400	12	11
		1572		10	10	89.9%	134.270	11	10
		2020		8	8	87.5%	110.640	8	8
		2828		6	6	83.3%	449.620	6	6
Kilbridge	45	57	552	10	10	96.8%	2.240	11	10
		79		7	7	99.8%	0.377	8	7
		92		6	6	100.0%	0	7	6
		110		6	6	83.6%	18.876	6	6
		138		4	4	100.0%	0	5	4
		184		3	3	100.0%	0	4	3
Tonge	70	176	3510	21	21	95.0%	8.423	22	21
		364		10	10	96.4%	4.795	11	10
		410		9	9	95.1%	6.896	10	9
		468		8	8	93.8%	15.050	8	8
		527		7	7	95.1%	14.540	7	7

#### 4 结语

本文提出了一种自适应蚁群算法用以解决装配线平衡问题。该算法具有如下特点:综合考虑利用、探索和随机搜索三种规则来构造解的可行分配方案;为了增强所求问题解的区分度,综合考虑了装配线平衡率和装配线平滑系数,对装配线平衡的效果进行了评价;为了避免算法陷入局部

最优,提高算法的全局搜索能力,在解的构造过程中对全局信息素挥发系数进行了自适应调整。测试实例表明,该算法具有较好的性能。

此外,本文仅考虑了单一确定型装配线平衡问题,今后可将该算法扩展到更为复杂的装配线平衡问题中,如动态问题、随机问题、多目标问题以及多品种混流装配线平衡问题等。

(下转第 1959 页)

- [1] 金建交,杨世春,何根旺,等. 砌块成型机的振动对砌块密实度的影响[J]. 机械工程与自动化,2006(2):49-50.
- [2] 刘红月. 基于 MATLAB 的砌块成型机振动仿真分析[J]. 科技咨询导报,2007(3):14-15.
- [3] Howard I M. Higher-order Spectral Techniques for Machine Vibration Condition Monitoring[J]. Journal of Aerospace Engineering,1997,211:212-217.
- [4] McCormick A C,Nandi A K. Bispectral and Trispectral Features for Machine Condition Diagnosis[J]. Vision,Image and Signal Processing,1999,146(5):229-234.
- [5] Gani A,Salami M J E. A Labview Based Data Acquisition System for Vibration Monitoring and Analysis[C]//2002 Student Conference on Research and Development Proceedings. Shah Alam, Malaysia,2002:62-65.
- [6] Hinich M J. Higher-order Cumulants and Cumulants Spectra[J]. Circuits Systems and Signal Processing,1994,13(4):391-420.
- [7] Balan C,Dlana B,Gheorghiu E. Rheological Characterization of Complex Fluids in Electro-magnetic Fields[J]. Non-newtonian Fluid Mech.,2008,154:22-30.
- [8] Hui Li. Gear Fault Monitoring Based on Order Tracking and Bi-spectrum Under Running-up Condition[C]//Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Haikou, China,2007:379-383.
- [9] 王书明,王家映. 利用高阶谱重构功率谱抑制高斯有色噪声[J]. 科学技术与工程,2004,4(2):69-73.
- [10] Lutes L D,Chen D C K. Trispectrum for the Response of a Nonlinear Oscillator[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics,1991,26(6):893-909. (编辑 王艳丽)
- [3] Scholl A,Becker C. State-of-the-art Exact and Heuristic Solution Procedures for Simple Assembly Line Balancing[J]. European Journal of Operations Research,2006,168(3):666-693.
- [4] Marc P,Zeger D. An Linear Programming Based Lower Bound for the Simple Assembly Line Balancing Problem[J]. European Journal of Operational Research,2006,168(3):716-731.
- [5] Ponnambalam S G,Aravindan P,Naidu G M. Comparative Evaluation of Assembly Line Balancing Heuristics[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,1999,15(8):577-586.
- [6] Ugur O,Talip K,Bilal T. A Genetic Algorithm for the Stochastic Mixed-mode U-line Balancing and Sequencing Problem [J]. International Journal of Production Research,2011,49(6):1-22.
- [7] Ugur O, Bilal T. A Tabu Search Algorithm for Two-side Assembly Line Balancing [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2009,43(7/8):822-829.
- [8] Clolrni A,Dorigo M,Maniezzo V. Distributed Optimization by Ant Colonies[C]//Proceedings of the First European Conference of Artificial Life. Paris, France,1991:134-142.
- [9] Bautista J,Pereira J. Ant Algorithms for Assembly Line Balancing[C]//Proceedings of the 3rd International Workshop, ANTS2002. Berlin, Germany, 2002:65-75.
- [10] McMullen P R,Tarasewich P. Using Ant Techniques to Solve the Assembly Line Balancing Problem[J]. IIE Transactions, 2003, 35(7):605-607.
- [11] Bautista J, Pereira J. Ant Algorithms for a Time and Space Constrained Assembly Line Balancing Problem[J]. European Journal of Operational Research,2007,177(3):2016-2032.
- [12] Armin S. Data of Assembly Line Balancing Problems [J]. Schriften Zur Quantitativen Betriebswirtschaftslehre,1993,16:93.
- [13] Hwang R K,Katayama H,Gen M. U-shaped Assembly Line Balancing Problem with Genetic Algorithm[J]. International Journal of Production Research,2008,46(16):4637-4649.

(编辑 王艳丽)

作者简介:吴福森,男,1987年生。华侨大学机电及自动化学院硕士研究生。主要研究方向为信号处理、机械振动分析。  
黄宜坚,男,1945年生。华侨大学机电及自动化学院教授、博士研究生导师。

(上接第 1953 页)

参考文献:

- [1] Salveson M E. The Assembly Line Balancing Problem[J]. Journal of Industrial Engineering,1955,6(3):1-25.
- [2] Kilinc O. A Petri Net-based Heuristic for Simple Assembly Line Balancing Problem of Type2[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2010,46(1/4):329-338.

作者简介:邓福平,男,1983年生。华中科技大学机械科学与工程学院硕士研究生。主要研究方向为智能优化算法、装配线平衡。  
张超勇,男,1972年生。华中科技大学机械科学与工程学院讲师、博士。  
连坤雷,男,1987年生。华中科技大学机械科学与工程学院硕士研究生。  
徐绍敏,男,1984年生。华中科技大学机械科学与工程学院硕士研究生。