

文章编号: 1001-0920(2015)03-0410-07

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2013.1325

考虑同质设备不同加工能力的模块化制造单元资源配置优化

马书刚^{1,2}, 杨建华¹

(1. 北京科技大学 东凌经济管理学院, 北京 100083; 2. 河北经贸大学 商学院, 石家庄 050061)

摘要: 针对传统制造单元易出现在制品的积压、加工效率低下的问题, 提出一种模块化制造单元资源配置模型及算法. 按照模块化思想进行制造单元划分, 为了保证单元内部均衡, 工作站内可配置若干个同类设备. 考虑到同类设备之间的加工效率不同, 建立以总加工成本最小及制造单元内与单元间的均衡为目标的数学模型, 应用模拟植物生长算法进行求解. 最后通过算例验证了模型与算法的有效性.

关键词: 模块化制造单元; 同质设备; 资源配置; 模拟植物生长算法

中图分类号: F270

文献标志码: A

Resource allocation optimization based on modular manufacturing cells considering different processing ability of homogeneous machines

MA Shu-gang^{1,2}, YANG Jian-hua¹

(1. Dongling School of Economics and Management, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2. School of Business, Hebei University of Economics and Business, Shijiazhuang 050061, China. Correspondent: MA Shu-gang, E-mail: mashugang@126.com)

Abstract: To solve the backlog of work in process and the low machining efficiency in traditional manufacturing cells, a resource allocation model together with its optimization algorithm is proposed. According to the ideology of modular manufacturing cells, various manufacturing cells are established. A mathematical model is established with the minimum total processing cost and equilibriums among various manufacturing cells as its goals. The plant growth simulation algorithm is applied to solve the model. Finally, a numerical example verifies the effectiveness and feasibility of the proposed model and algorithm.

Keywords: modular manufacturing cells; homogeneous machines; resource allocation; plant growth simulation algorithm

0 引言

模块化方法是适应可变环境的一系列组件的集合, 通过分析组件之间的相似性, 尽可能保持模块之间的独立性^[1]. 模块化是达到生产柔性和实现产品多样性的主要方法之一. 产品模块化生产的主要驱动力来自需求的变化, 特别是以较低的成本达到较大的柔性, 产品能够通过简单已有的组件组合完成^[2]. 模块是半自律的子系统, 可通过与其他同样的子系统按照一定的规则相互联系而构成更加复杂的系统. 产品使用模块化体系能够在不增加制造单元复杂性的基础上完成更快的转产, 同时, 模块体系能够使组件更加标准化. 目前, 在制造领域中, 模块化思想已经应用到制造

系统的构建中^[3]. 生产安排一般需先经过工艺订单编制再进行工时测定, 然后进行设备配置和 workstation 平衡等程序, 产品生产的耗时较大. 随着产品小批量、多品种需求的增加, 重复性工作将会影响生产的效率. 通过模块化设计, 能够快速响应客户需求, 缩短生产工期, 从而提高订单交期保障能力, 形成标准化 workstation.

近年来, 制造单元构建已成为一个研究热点. 制造单元的构建方法(如聚类分析、数学规划、启发式方法等)主要考虑零件工艺路线的相似性, 同时对生产批量、加工顺序进行简化处理^[4]. Kesen 等^[5]针对虚拟制造单元作业调度提出了遗传求解算法, 考虑到任务可有多种加工路线, 因此车间中不同位置具有多个

收稿日期: 2013-09-25; 修回日期: 2014-03-30.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(71231001); 河北省高等学校科学研究计划项目(QN20131133); 河北经贸大学校内科研基金项目(2014KYQ03).

作者简介: 马书刚(1977-), 男, 博士生, 从事生产运营管理的研究; 杨建华(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 从事生产运营管理、供应链与物流等研究.

相同类型的机器, 决策目标为分配给机器的任务量. Albadawi 等^[6]提出两阶段数学模型, 第1阶段采用因子分析方法, 第2个阶段通过建立整数规划模型来分配任务. Aldaihani 等^[7]应用因子分析通过启发式方法分析柔性制造单元的绩效. Jannes 等^[8]设计了一个虚拟制造单元系统, 虚拟单元由机器和相关的任务及人员组成. 虚拟单元根据需求量进行变化, 综合考虑了加工能力和单元规模限制. Hossein 等^[9]考虑了单元负载的变化, 应用智能求解算法产生制造单元, 通过实例验证了算法的有效性. Suer 等^[10]在制造单元中考虑了人力资源分配和单元负载, 以最小化总滞后时间为目标, 研究发现较少约束的制造单元比无共享操作有更高的产出率. Arikani 等^[11]针对制造单元设计提出了一个多目标模糊数学模型, 以成本最小化、单元外加工数量最小化、机器利用率最大化为目标, 加工能力与需求具有模糊性. 廉洁等^[12]研究了在设备易复制情形下, 配置多台同质设备实现单元间无物料移动, 同时保证单元间工作量的均衡, 考虑了换装时间、加工顺序、设备生产能力、产品需求量等要素, 建立了平均总流程时间最小的数学模型. 徐宣国等^[13]在设定柔性制造单元中各台机器以不同加工效率进行替代的基础上, 建立了效率矩阵, 同时考虑了任务数量等实际生产要素的柔性度量方法. 贾国柱等^[14]在考虑多品种小批量制造企业的系统设计中, 提出了以流程模块化为基础构建虚拟制造单元的方法, 利用零件聚类 and 工艺聚类两种方法进行模块化分解, 能够有效提高虚拟制造单元的设计速度, 减少生产提前期, 提高系统敏捷性.

现有文献主要研究制造单元的设计和资源配置, 而在模块化方法下构建制造单元的研究则较少, 虽然有的研究考虑了模块在制造单元的应用, 但对内部资源的合理配置却没有进行深入分析. 由于模块与模块之间存在生产中的关联关系, 比一般的制造单元构建更为复杂. 应用模块化制造单元满足多品种小批量生产的需要已成为当前企业提高生产效率的主要方式之一. 模块化制造单元是指在产品多样化和部件标准化的基础上, 为了完成特定的加工任务将制造资源聚集在一起, 主要特征为: 1) 根据相似性原理, 将小批量转化为大批量生产. 2) 有利于实现加工生产均衡, 提高工作效率. 一个模块化制造单元包含若干个工作站, 工作站是指实现对产品部件完成特定操作的工作单元, 工作站之间具有较强的关联性.

本文研究多工期模块化制造单元的设计问题, 需要考虑工期、机器数量、加工成本约束, 建立以加工成本、模块间、模块内工作量均衡为目标的数学模型,

并利用模拟植物生长算法进行求解, 通过实例验证算法的有效性.

本文分析的模块化制造单元以产品的模块化设计特性为依据, 如在服装上衣生产中, 可生成袖子制造模块、前后身制造模块、上衣组装模块. 研究在混合模块化生产过程中不同模块、不同产品、不同工作站的机器配置问题. 为了提高生产效率, 尽可能使得关联模块间、模块内的工作量均衡. 而在实际生产中, 完全的均衡很难达到, 特别是在机器加工效率、人员操作熟练程度不同的情况下. 在本文研究中, 为了尽可能地减少在制品的积压, 同一个工作站上可配置多台同种类型设备, 然而同类设备的加工能力也有所不同, 因此多个产品也可能会出现在同一个工作站.

1 问题描述与模型

1.1 问题描述

本文的目标函数为机器的运营成本最小、模块化制造单元内工作站均衡、模块间工作量均衡. 机器的运营成本为所有类型设备加工所有产品产生的运营总成本, 由设备数量和设备运营单位成本计算得到. 设备运营单位成本由设备单位加工成本和设备单位间接成本组成, 设备单位间接成本包括单位管理费用、电费等. 与以往研究不同的是制造单元的数量是根据加工产品的种类进行确定, 不需要进行决策优化. 模型的决策是在给定加工产品种类、产品数量、交货期、加工设备的前提下, 确定模块化制造单元中产品加工工作站所需的设备数量. 模块化制造单元构建如图1所示.

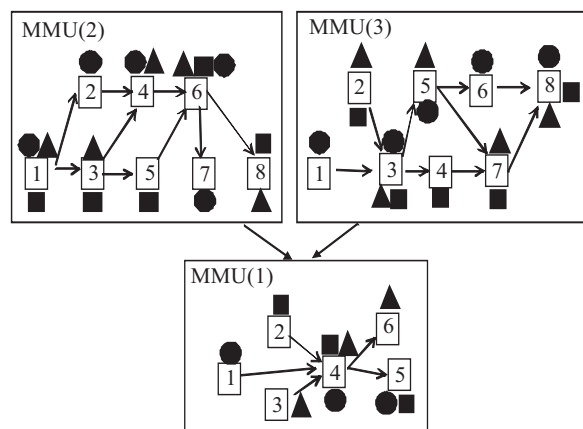


图1 模块化制造单元构建

图1中共包括3个模块化制造单元, MMU(1)为产品组装模块化制造单元, MMU(2)和MMU(3)为产品部件模块化制造单元. 共有3类产品待生产, 圆形代表产品1, 三角形代表产品2, 正方形代表产品3. MMU(1)有6个工作站, MMU(2)和MMU(3)各有8个工作站. MMU(1)中产品1的加工路线为1-4-5, 产品2的加工路线为3-4-6, 产品3的加工路线为2-4-5.

MMU(2)中产品1的加工路线为1-2-4-6-7,产品2的加工路线为1-3-4-6-8,产品3的加工路线为1-3-5-6-8. MMU(3)中产品1的加工路线为1-3-5-6-8,产品2的加工路线为2-3-5-7-8,产品3的加工路线为2-3-4-7-8.

本文研究的问题基于以下假设:

1) 生产任务为多品种、小批量产品,多产品同时开工生产.

2) 产品按模块化设计方法进行部件拆分,各部件由指定的模块化制造单元完成加工.

3) 一种产品只有一条加工工艺路线.

4) 多产品的交货期不同.

5) 产品的每个工作站允许出现多台加工设备.

6) 同类设备由于型号及使用时间不同,加工能力也不同.

7) 在不同工作站不同类型设备上的产品加工时间确定.

8) 产品部件在模块内工作站间、模块间的移动时间忽略不计,设定部件移动的固定时间间隔,每次移动多个产品部件.

1.2 变量定义

1.2.1 输入参数

BE为待生产产品种类数量; M 为模块化制造单元总数量;DT为设备种类数量; D_i 为第*i*类设备的总量; PM_b 为第*b*类待加工产品的需求量; B_b 为第*b*类产品的交货期; D_m^e 为第*m*个模块化制造单元中第*e*个工作站能够容纳的机器数量;TM为产品部件在工作站和模块间的移动时间间隔; MDT_{mi}^{bs} 为第*m*个模块化制造单元第*b*类产品部件在第*s*工作站选择第*i*类设备需要的加工时间; DT_{mi}^{bs} 为第*m*个模块化制造单元第*b*类产品部件在第*s*工作站选择第*i*类设备的数量;MD为机器运营总成本; S_m^b 为第*b*类产品部件在第*m*模块化制造单元的工作站数量; MD_i^b 为第*i*类设备加工第*b*类产品部件的成本; MDU_i 为第*i*类设备运营的单位成本; MDL_i 为第*i*类设备单位加工成本; MDI_i 为第*i*类设备单位间接管理成本; DM_b 为第*b*类产品的完工时间; MC_m^c 为第*b*类产品在第*m*类模块化制造单元的加工时间; MC_{ml}^b 为第*b*类产品在*m*关联的*l*模块化制造单元中的加工时间; m_b 为包含*b*类产品的所有*m*模块化制造单元;MA为模块化制造单元内均衡标准;MMR为模块化制造单元间均衡标准.

1.2.2 辅助二进制变量

$$X_{mi}^{bs} = \begin{cases} 1, & b \in BE, m \in M, s \in S_m^b, i \in DT; \\ 0, & b \in BE, m \in M, s \in S_m^b, k \in DT \wedge k \neq i. \end{cases}$$

$$E_{mb}^{sf} =$$

$$\begin{cases} 1, & b \in BE, m \in M, s \in S_m^b, f \in S_m^b \wedge f = s.next; \\ 0, & b \in BE, m \in M, s \in S_m^b, f \in S_m^b \wedge f \neq s.next. \end{cases}$$

$$A_b^{ml} = \begin{cases} 1, & b \in BE, m \in M, l \in M \wedge l = m.next; \\ 0, & b \in BE, m \in M, l \in M \wedge l \neq m.next. \end{cases}$$

$$AS_m^b = \begin{cases} 1, & b \cap m \neq 0; \\ 0, & otherwise. \end{cases}$$

1.3 数学模型

$$MD = \sum_{b=1}^{BE} \sum_{i=1}^{DT} MD_i^b, \quad (1)$$

$$MD_i^b = DM_b \times \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^{S_m^b} DT_{mi}^{bs} \times MDU_i, \quad (2)$$

$$DM_b = \max_{1 \leq m \leq M} AS_m^b \times MC_m^b + AS_b^m \times MC_{ml}^b, \quad (3)$$

$$MC_m^b = \frac{PM_b}{\sum_{i=1}^{DT} \frac{X_{mi}^{bs} \times TM \times DT_{mi}^{bs}}{MDT_{mi}^{b1}}}, \quad (4)$$

$$MDU_i = MDL_i + MDI_i. \quad (5)$$

式(1)表示所有类型设备加工所有产品的总成本;式(2)表示第*i*类设备加工第*b*类产品的总成本;所用设备加工一类产品的的时间以产品的完工时间计算.产品模块化制造分为产品部件模块化制造和产品组装模块化制造,对于同一类产品,产品部件会存在于多个模块化制造单元中.一类产品的加工完成时间包括产品部件最大完工时间和产品组装完工时间,可用式(3)表示;式(4)表示第*b*类产品部件在第*m*模块化制造单元中的加工时间;式(5)表示的设备单位运营成本包括设备单位加工成本和设备单位间接成本.

1) 最小化目标函数

$$MD = \sum_{b=1}^{BE} \sum_{i=1}^{DT} \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^{S_m^b} DT_{mi}^{bs} \times MDU_i, \quad (6)$$

$$MA = \sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^{BE} \sum_{s=1}^{S_m^b} \sum_{i=1}^{DT} \frac{X_{mi}^{bs} \times TM}{MDT_{mi}^{bs}} (DT_{mi}^{bs} - DT_{mi}^{bl})^2, \quad (7)$$

$$MMR =$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^{BE} \sum_{i=1}^{DT} \frac{X_{mi}^{b1} \times TM}{MDT_{mi}^{b1}} (DT_{mi}^{b1} - A_b^{ml} \times DT_{mi}^{bl})^2. \quad (8)$$

2) 约束条件

$$\sum_{m=1}^M \sum_{b=1}^{BE} \sum_{s=1}^{S_m^b} DT_{mi}^{bs} \leq DT_i, \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^{DT} X_{mi}^{bs} \times DT_{mi}^{bs} \geq 1, \quad (10)$$

$$\sum_{b=1}^{BE} \sum_{i=1}^{DT} DT_{mi}^{bs} \leq D_m^s. \quad (11)$$

模型中的3个目标函数分别为机器运营总成本最小、模块内相同产品部件的关联工作站生产数量的偏差最小、产品部件关联模块的生产数量的偏差最小。优化目标“模块内相同产品部件的管理工作站生产数量的偏差最小”能够缩小关联工作站之间的工作量差距,使得工作站间具有相近的负荷水平,从而实现模块内工作站均衡。优化目标“产品部件关联模块的生产数量的偏差最小”能够缩小关联模块之间的工作量差距,以保证模块间的生产节奏一致。如在图1中,MMU(1)、MMU(2)、MMU(3)为关联模块,各模块输出的产品部件数应较为接近,从而实现模块间均衡。式(9)为所需设备数量小于拥有的设备总量;式(10)为第 m 模块化制造单元中第 b 类产品的第 s 工作站至少需要一种设备类型;式(11)为了保证第 m 模块化制造单元第 s 工作站的机器总量小于工作站能够容纳的机器总量。

在模型中,生产过程要达到完全的均衡较难,而通过模块化制造单元的设定方法,根据最初设定,将不同产品相近工作站的部件加工集中在一起,每个产品在每个模块化制造单元中的加工是相互独立的。但在实际生产中,由于机器运行、人员操作等问题出现了产品加工的滞后,可由同工作站的其他产品加工机器代替,进而使得均衡的偏差最小,保证生产达到较高的效率。

2 模拟植物生长算法

模拟植物生长算法是由李彤等^[15]提出的仿生类随机算法,该算法利用植物的向光性求解整数规划问题。随后李彤将算法扩展到物流网络的优化、两层规划问题、知识创新等领域。国内外许多学者也利用模拟植物生长算法对实际问题进行了求解。杨琴等^[16]运用改进模拟植物生长算法实现瓶颈工作站动态调度;毛崇峰等^[17]构建了技术联盟投资决策模型,应用模拟植物生长算法进行求解;丁雪枫^[18]运用模拟植物生长算法求解虚拟企业选择问题;Rao等^[19]在电容配置中运用该算法求解得到电容的最优位置。

模拟植物生长算法的具体工作原理在多数文献中均已得到充分的分析,本文主要关注针对模块化制造单元的机器配置情况对其进行合理设计。

2.1 算法设计

2.1.1 生长点的表示

模块化制造单元的生长点可表示为

$$(BE_{11}, 1, 1), (1, 3); (BE_{11}, 2, 3), (5, 1);$$

$$(BE_{12}, 1, 2), (2, 2); (BE_{12}, 2, 2), (3, 1);$$

$$(BE_{im}, 1, 2), (7, 2); (BE_{im}, s, j), (r, a). \quad (12)$$

其中: (BE_{im}, s, j) 表示第 m 个模块化制造单元的第 i 个产品的第 s 个工作站对应于制造单元的第 j 个工作站, (r, a) 表示第 r 个类型的设备需占用 a 个。

2.1.2 初始可行解

本文中分析的资源配置问题较为复杂,需要考虑多个产品、多个模块化制造单元、多个工作站等因素。可设计一个启发式方法求初始可行解,以此来提高模型的求解效率。

对多个产品进行资源配置时,需要按产品生产的紧迫程度确定资源配置的优先权。产品的工期越短,需求数量越大,产品可拆分的模块越多,模块中的工作站越多,工作站的加工时间越长,产品生产的紧迫程度越大,可用下式表示:

$$DME_b = \frac{PM_b \times \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^{S_m} PD_m^{bs}}{PE_b}. \quad (13)$$

其中: PM_b 为 b 类产品的需求量, PD_m^{bs} 为第 m 模块化制造单元中第 b 类产品第 s 工作站的单机平均加工时间, DME_b 为第 b 类产品的生产紧迫度。

2.1.3 启发式方法步骤

Step 1: 根据产品生产紧迫度对产品进行从大到小排序。

Step 2: 依次对产品进行资源配置,计算当前紧迫度最大产品拆分所在的模块化制造单元和需要的工作站数。

Step 3: 当前产品所在的每一个模块化制造单元的第1个工作站分配加工能力最高的一台机器,评估产品整体的完工时间。如果完工时间小于交货期,则根据第1个工作站的加工能力确定后序的机器配置;如果完工时间大于交货期,则第1个工作站增加一台机器,直到完工时间小于交货期。

Step 4: 存在待分配资源的产品,转 Step 2。

2.1.4 生长点函数值

3个目标函数的量纲不同,所以在计算各生长点函数值时,需要进行量纲统一。采用极差变换方法对各指标进行标准化处理,处理后的目标函数为

$$\frac{1}{f(x_0)} = w_D \frac{MD(x_0) - MD_{\min}}{MD_{\max} - MD_{\min}} + w_A \frac{MA(x_0) - MA_{\min}}{MA_{\max} - MA_{\min}} + w_R \frac{MMR(x_0) - MMR_{\min}}{MMR_{\max} - MMR_{\min}}. \quad (14)$$

其中: w_D 、 w_A 、 w_R 表示目标 MD、MA、MMR 的权重,权重的取值采用 AHP 方法确定^[20]。 MD_{\min} 、 MD_{\max} 、

MA_{\min} 、 MA_{\max} 、 MMR_{\min} 、 MMR_{\max} 分别表示机器运营总成本、模块内均衡、模块间均衡的最小值和最大值,极值是对3个目标函数分别进行单目标的优化确定。

2.2 模拟植物生长算法求解步骤

Step 1: 根据启发式方法确定初始可行解 x_0 , 生长步长 $s = 1$, 求出 $f(x_0)$ 。

Step 2: 以 x_0 作为初始状态按步长生长出新生长点. 新生长点有两种变化方式: 一是确定设备类型, 对设备数量进行增加和减少; 二是增加和减少设备类型, 相应的设备数量也要增加和减少。

Step 3: 计算各生长点形态素浓度。

Step 4: 建立各生长点在 $0 \sim 1$ 之间的概率空间, 根据随机数选取下一次生长点。

Step 5: 依据步长生成新生长点. 若新生长点目标函数值优于原生长点, 满足模型的约束条件, 则保留最优的生长点。

Step 6: 若新生长点均不优于原生长点, 或达到设定的最大次数, 则得到全局最优解。

3 实例分析

3.1 实例数据及参数

为了验证本文提出的数学模型和模拟植物生长算法的有效性, 现以一大型服装生产加工企业实际生产为实例进行分析. 服装的定制生产以小批量、多品种产品加工为主. 模块化制造单元构建方法能够实现快速反应, 适应市场变化, 同时也提高了人员操作的专业化程度. 不同加工机器数据如表1所示, 待加工产品数据如表2所示, 订单共包括3类产品. 对3类服装产品各组成部件进行拆分, 归纳出标准化的部位,

表1 加工机器数据

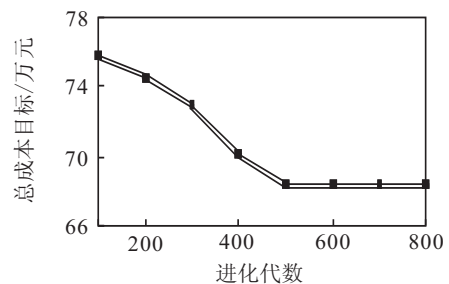
机器类型	机器数量	单位加工成本/(元/h)	单位间接成本/(元/h)
1	10	20	1.2
2	15	50	2.5
3	8	28	1.9
4	30	60	2.7
5	19	39	2.1
6	19	18	1.6
7	21	67	2.7
8	10	70	2.9
9	10	60	3.2
10	15	70	2.9

表2 加工产品数据

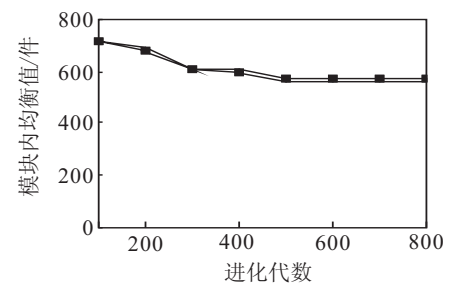
产品类型	需求量/件	生产期/d
1	500	20
2	3000	30
3	5000	30

合并相似件, 根据特定服装款式和工艺要求将服装分成5个模块化制造单元. 图1为其中前后身模块化制造单元 MMU(2)、领子模块化制造单元 MMU(3) 和组合模块化制造单元 MMU(1), 各模块化制造单元包括的工作站任务如表3所示。

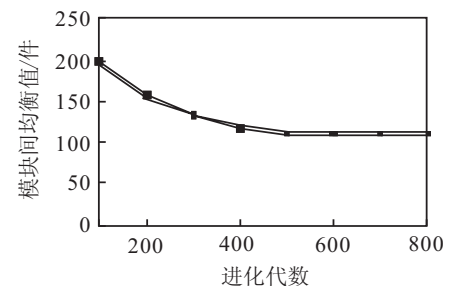
整个实例分析过程是在操作系统 Windows 7、配置为 Pentium 2.2 GHz, 2 Gb 内存的机器上完成. 具体参数设置如下: 步长 $s = 1$, 最大次数为 800, 目标函数的权重 $w_D = 0.6$, $w_A = 0.2$, $w_R = 0.2$. 产品部件在工作站间传送的时间间隔为 $TM = 1200$ s. 针对模型中的3个目标函数总成本最低、模块内均衡、模块



(a) 总成本优化



(b) 模块内优化



(c) 模块间优化

图2 目标优化结果

表3 模块化制造单元工作站任务

模块化制造单元	工作站1	工作站2	工作站3	工作站4	工作站5	工作站6	工作站7	工作站8
MMU(1)	压烫肩缝	缩领袖	合腰袖缝	锁眼	上扣	整烫	-	-
MMU(2)	卷扎	缩胸袋	整烫剪	扣烫	过肩面里	过肩明线	缩商标	合肩缝
MMU(3)	领面组合	剪烫领	领角定型	修领下口	点粘底领	扎底领	底领结合	烫领结合

间均衡同时进行优化的目标,算法迭代次数为800次,模块内均衡衡量标准为模块内关联工作站生产相同产品部件的偏差数量,模块间均衡衡量标准为为关联模块生产产品部件的偏差数量,如图2所示。

从图2中可以看出:算法对于3个目标的优化效果比较明显,基本都在迭代800次后即趋于收敛;优化得到运营总成本为68.33万元,模块内均衡标准为570件偏差量,模块间均衡标准为109件偏差量。

3.2 算法分析结果

本文选取在该领域的研究成果中具有代表性的算法,从求解速度和求解函数值两个方面进行比较。求解速度以具有代表性的同类算法^[15]与本文算法进行比较,迭代次数从100变化到500。在产品、机器、间隔时间不变的情况下比较求解速度的变化,比较结果如图3所示。从图3可以看出,本文算法较文献^[21]中算法求解速度快。在求解最优函数值方面,利用本文算法与改进的蚁群算法^[21]、改进遗传算法^[22]和粒子群算法^[23]进行了比较,各算法的迭代次数设为100~500,见图4。从图4可以看出,本文算法求出生长点函数值要优于其他3类算法。

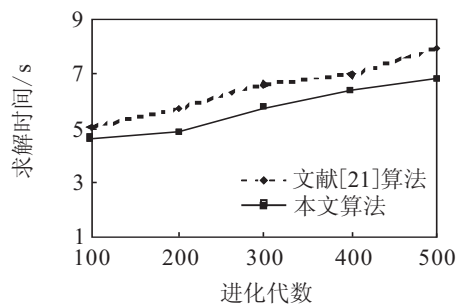


图3 算法求解速度比较

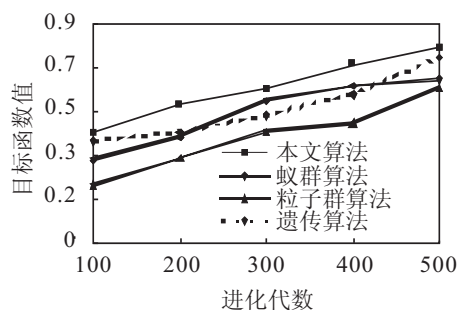


图4 算法求解目标值比较

4 结论

模块化制造单元资源合理优化配置无论在理论和企业实际生产运作中都具有非常重要的研究价值。针对该问题,本文依据柔性结构思路,将制造单元进行模块化设计,在此基础上构建了以设备运营总成本最低、模块内和模块间均衡为目标的数学模型,以模拟植物生长算法进行求解。实例分析表明:本文提出的模型改进的模拟植物生长算法能够有效解决模块

化制造单元资源配置问题;在实际生产中,工作站间完全性均衡较难实现,本文将不同产品相似的加工工作站聚集在一起,当其中一个产品部件加工出现问题时,其他产品部件的加工机器能够提供协助,尽可能保持工作站间的均衡。本文的研究工作能够有效解决模块化生产过程中出现的实际问题,是模块化思想在制造单元领域的实际应用,为模块化加工生产提供了问题的解决思路。

参考文献(References)

- [1] Bi Z M, Zhang W J. Modularity technology in manufacturing[J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 18(5): 381-390.
- [2] Duran O, Perez L, Batocchio A. Optimization of modular structures using particle swarm optimization[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(3): 3507-3515.
- [3] Pandremenos J, Paralizas K, Salonitis K. Modularity concepts for the automotive industry: A critical review[J]. CIRP J of Manufacturing Science and Technology, 2009, 1(3): 148-152.
- [4] 王爱民. 制造单元快速构建技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2006, 26(10): 850-854. (Wang A M. Rapid design technology for manufacturing cells[J]. Trans on Beijing Institute of Technology, 2006, 26(10): 850-854.)
- [5] Kesen S E, Sanchoy K. A genetic algorithm based heuristic for scheduling of virtual manufacturing cells[J]. Computers & Operations Research, 2010, 37(6): 1148-1156.
- [6] Albadawi Z, Hamdi A B, Chen M. A mathematical approach for the formation of manufacturing cells[J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48(1): 3-21.
- [7] Aldaihani M M, Savsar M. A stochastic model for the analysis of a two-machine flexible manufacturing cell[J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 49(4): 600-610.
- [8] Jannes S, Nallan C. Design of virtual manufacturing cells: A mathematical programming approach[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2005, 21(3): 273-288.
- [9] Hossein N, Tang S H. Development of bacteria foraging optimization algorithm for cell formation in cellular manufacturing system considering cell load variations[J]. J of Manufacturing Systems, 2013, 32(1): 20-31.
- [10] Suer A, Kamat K, Mese E. Minimizing total tardiness subject to manpower restriction in laborintensive manufacturing cells[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 57(3): 741-753.

- [11] Arikan F, Gungor Z. Modeling of a manufacturing cell design problem with fuzzy multi-objective parametric programming[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2009, 50(3): 407-420.
- [12] 廉洁, 刘晨光, 李文娟. 基于同质设备多台配置的独立生产单元构建决策[J]. *中国管理科学*, 2012, 20(5): 90-97. (Lian J, Liu C G, Li W J. Decision on independent cell formation with multiple identical machines[J]. *Chinese J of Management Science*, 2012, 20(5): 90-97.)
- [13] 徐宣国, 韩文民. 考虑机器间替代性的制造单元柔性度量[J]. *管理工程学报*, 2013, 27(2): 137-141. (Xu X G, Han W M. Flexibility measurement of manufacturing cell considering machine substitution[J]. *J of Industrial Engineering Management*, 2012, 27(2): 137-141.)
- [14] 贾国柱, 栾世超, 陈亮. 基于流程模块化的虚拟制造单元构建方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(10): 2111-2118. (Jia G Z, Luan S C, Chen L. Cell formation problem for virtual cellular manufacturing based on the process modularization[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2012, 32(10): 2111-2118.)
- [15] 李彤, 王春峰, 王文波. 求解整数规划的一种仿生类全局优化算法——模拟植物生长算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2005, 25(1): 76-85. (Li T, Wang C F, Wang W B. A global optimization bionics Algorithm for sloving integer programming plant growth simulation alogrithm[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2005, 25(1): 76-85.)
- [16] 杨琴, 周国华, 林晶晶. 改进模拟植物生长算法求解汽车维修车间瓶颈工作站的多目标动态调度问题[J]. *系统管理学报*, 2011, 20(5): 595-599. (Yang Q, Zhou G H, Lin J J. An improved PGSA for multi-objective dynamic scheduling of bottleneck machine in an auto maintenance shop[J]. *J of Systems & Managemnet*, 2011, 20(5): 595-599.)
- [17] 毛崇峰, 李彤, 周青. 技术联盟投资决策的模拟植物生长优化分析[J]. *系统工程*, 2012, 30(2): 73-78. (Mao C F, Li T, Zhou Q. Optimal analysis of simulated plant growth of investment decision of technical alliances[J]. *Systems Engineering*, 2012, 30(2): 73-78.)
- [18] 丁雪枫. 基于模拟植物生长算法虚拟企业盟友选择问题研究[J]. *管理学报*, 2011, 8(2): 278-283. (Ding X F. Studies on the partner selection problem of virtual enterprise based on plant growth simulation algorithm[J]. *Chinese J of Management*, 2011, 8(2): 278-283.)
- [19] Rao R S, Narasimhan S, Ramalingaraju M. Optimal capacitor placement in a radial distribution system using plant growth simulation algorithm[J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2011, 33(5): 1133-1139.
- [20] Wang Xiaojun, Chan Hingkai. A two-stage fuzzy-AHP model for risk assessment of implementing green initiatives in the fashion supply chain[J]. *Int J of Production Economics*, 2012, 135(2): 595-606.
- [21] Keskinturk T, Yildirim B. An ant colony optimization algorithm for load balancing in parallel machines with sequence-dependent setup times[J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(6): 1225-1235.
- [22] Konak A. Network design problem with relays: A genetic algorithm with a path-based crossover and a set covering formulation[J]. *European J of Operational Research*, 2012, 218(3): 829-837.
- [23] Bharat T V, Sivapullaiah P V, Allam M M. Robust solver based on modified particle swarm optimization for improved solution of diffusion transport through containment facilities[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(12): 10812-10820.

(责任编辑: 孙艺红)