

## 基于相似系数的双资源单元构建问题的研究

范佳静, 曹敏, 张玲, 江思定

(浙江科技学院 经济与管理学院, 杭州 310023)

**摘要:** 单元制造能够结合工作车间方式的灵活性和流水线方式的高效率, 同时也能以近似刚性流水线的成本来生产多品种少批量产品, 因此它成为现代企业的宠儿。今在文献回顾的基础上, 总结了目前研究存在的问题, 构建了以相似系数为基础的双资源约束的单元构建模型, 并将应用提出的数学模型与文献中的案例进行对比分析, 发现 5 个对比案例在 Voids 和 EEs 两个指标上都优于以往的文献结果, 从而证明了所提模型的有效性。

**关键词:** 单元制造; 单元构建; 相似系数; 双资源约束

中图分类号: TH165

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2015)03-0189-08

## Study on dual-resource constraint cell formation problem based on similarity coefficient

FAN Jiajing, CAO Min, ZHANG Ling, JIANG Siding

(School of Economics and Management, Zhejiang University of Science and Technology,  
Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** Cellular manufacturing has become the darling of modern enterprise because it can combine flexibility and high efficiency of workshop and produce more varieties products based on cost as low as rigid line. A dual-resource constraint cell formation mathematical model based on similarity coefficient is put forward after literature reviewing and problem summarizing in current research. And then we apply this mathematical model into cases of reference. The results of these five cases are better than reference on the two indicators (Voids and EEs), which proves the effectiveness of this model.

**Key words:** cellular manufacturing; cell formation; similarity coefficient; dual-resource constraint

单元制造 (cellular manufacturing, CM) 思想最初来源于成组技术 (group technology, GT), 单元制造能够结合工作车间方式的灵活性和流水线方式的高效率, 同时也能以近似刚性流水线的成本来生产多

收稿日期: 2015-02-04

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (LQ13G010008)

作者简介: 范佳静 (1977—), 女, 浙江省杭州人, 副教授, 博士, 主要从事工业工程与物流管理研究。

品种少批量产品,可以满足市场在时间、质量、成本、柔性等多方面的挑战,代表着生产方式的新方向。鉴于目前单元制造系统给予企业带来的生机和活力,它已经成为企业的宠儿。

单元制造主要包括三方面的内容:单元构建,单元布局及单元调度。单元构建是单元制造的第一步,也是最为关键的一步。制造单元的合理构建为制造系统的模块化生产、生产系统的流程再造及快速成组技术的广泛应用提供了基础,它是制造系统实现快速重组的核心细胞。目前对单元构建的方法有很多,主要包括相似系数法<sup>[1-3]</sup>、聚类分析<sup>[4-9]</sup>、数学规划法<sup>[10-20]</sup>、图论<sup>[21-23]</sup>等。

相似系数法是根据各种设备之间或者零件之间的相似性确定设备单元和零件族。相似系数值越高,表示单元内零件需要单元外设备的可能性就越小,符合单元构建减少物料搬运次数的基本要求。Li等<sup>[24]</sup>在单元划分时不仅考虑了设备与设备,零件与零件的相似性,还考虑了设备与零件之间的相似性,在计算各自的相似系数后,根据相似系数进行聚类分析,获得最终的设备单元和零件族。相似系数法因其算法的方便简单一直受到学者的青睐,但是,由于不能考虑单元尺寸、设备能力等因素,使其在单元构建问题的应用及发展中受到了一定的限制,而数学规划法正好弥补了这个缺陷。但是目前学者研究的单元制造系统越来越复杂,导致构建模型更加复杂,求解也更加困难。而在企业实际生产中,往往需要将复杂的问题简单化,简单考虑单元尺寸、物料搬运等一般性要求。因此,本研究提出以相似系数值最大为目标,结合考虑单元尺寸等一般性构建要求建立单元构建数学模型,这样既满足单元制造对物料搬运用费的要求,同时又能将复杂问题简单化,帮助企业快速构建单元。

单元制造系统是一个复杂系统,除机器设备外,人力资源对系统柔性、高效的运行也起着至关重要的作用。Süer<sup>[25]</sup>对劳动密集型制造单元提出了混合整数规划模型,以期获得最优的产品和工人的任务分配;Aryanezhad等<sup>[26]</sup>在前人的基础上提出了在多周期环境下的工人的任务分配问题,他们将员工和机器都进行分级考虑,模型中的目标函数主要包括机器成本和工人成本两方面;Mahdavi等<sup>[27]</sup>提出的新模型考虑了多周期生产计划、动态系统重构、机器多台性、设备能力、工人的可用时间及工人工作分配等因素,目标函数希望持有和交货成本、物料搬运成本、机器和重构成本、雇佣和解雇成本及工资成本为最低;Rafiei等<sup>[28]</sup>提出以设备和人员为主的双目标多周期单元构建问题模型,关于设备目标主要考虑设备固定和重构成本、设备变动成本及物料搬运成本,而人员方面主要考虑人员利用率最大这一目标;Bagheri等<sup>[29]</sup>在单元构建时考虑了人员工作的安排。可见,人员工作的安排一直受到学者和企业界的关注。目前对于人员任务的划分主要以培训费用、雇佣费用最低及人员利用率为主要目标,在一定程度上增加了问题的复杂度。而工人与设备的相似系数越高则表示设备对某个工人的依赖性就越强,相对地表示工人对设备操作的技能水平会比较高。随着自动化水平的不断提高,工人可以操作多台设备,而工人操作设备数越多,则所需的工人数就越少,可以在一定程度上降低企业的劳动成本。因此,本研究以工人与设备的相似系数最高及所需人员最少为目标,进行工人工作任务的安排。

## 1 双资源约束的单元构建数学模型

双资源约束的单元构建问题,主要考虑设备和零件的单元划分及工人的工作任务安排。鉴于以上分析,首先根据设备与零件之间的操作关系,以文献<sup>[24]</sup>中提出的方法计算设备与设备、零件与零件及设备与零件之间的相似系数,然后以单元内平均相似系数最大为目标构建设备单元及零件族划分的数学模型,再以设备单元划分为基础,同样依据文献<sup>[24]</sup>的方法获得设备与工人的相似系数,构建人员工作安排模型,以期获得最大的平均工人设备相似系数值及最少的人员数。

为了更好地分析求解双资源约束下的单元构建问题,本研究模型作以下基本假设:

- 1) 零件与设备的关联矩阵是已知的;
- 2) 设备单元尺寸是已知的;
- 3) 单元划分数量是已知的;
- 4) 工人操作设备的情况是已知的。

### 1.1 设备单元及零件族划分模型(模型 1)

#### 1.1.1 模型的参数及变量

1) 模型的符号及参数

$i, i'$  代表零件,  $i, i' = 1, 2, \dots, P, P$  表示零件的种类数;

$j, j'$  代表设备,  $j, j' = 1, 2, \dots, M, M$  表示设备的种类数;

$k$  代表单元,  $k = 1, 2, \dots, C, C$  表示单元数;

$U$  表示单元的可以拥有的最多设备数;

$L$  表示单元的可以拥有的最少设备数;

$G$  表示单元内归属最少零件数;

$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{表示零件 } i \text{ 需要在设备 } j \text{ 上操作} \\ 0 & \text{表示零件 } i \text{ 不需要在设备 } j \text{ 上操作} \end{cases};$

$t_{hj} = \begin{cases} 1 & \text{表示工人 } h \text{ 能操作设备 } j \\ 0 & \text{表示工人 } h \text{ 不能操作设备 } j \end{cases};$

$S_{ij}$  表示零件  $i$  与设备  $j$  之间的相似系数;

$S1_{ii'}$  表示零件  $i$  与零件  $i'$  之间的相似系数;

$S2_{jj'}$  表示设备  $j$  与设备  $j'$  之间的相似系数。

2) 变 量

$x_{ik} = 1$  表示零件  $i$  在单元  $k$  中, 否则为 0;

$y_{jk} = 1$  表示设备  $j$  在单元  $k$  中, 否则为 0。

#### 1.1.2 设备单元及零件族划分模型(模型 1)

1) 目标函数

$$\max Z1 = \sum_{k=1}^C \left[ \frac{\sum_{i=1}^{P-1} \sum_{i'=i+1}^P x_{ik} x_{i'k} S1_{ii'}}{\sum_{i=1}^{P-1} \sum_{i'=i+1}^P x_{ik} x_{i'k}} + \frac{\sum_{j=1}^{M-1} \sum_{j'=j+1}^M y_{jk} y_{j'k} S2_{jj'}}{\sum_{j=1}^{M-1} \sum_{j'=j+1}^M y_{jk} y_{j'k}} + \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^M x_{ik} y_{jk} S_{ij}}{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^M x_{ik} y_{jk}} \right] \quad (1)$$

式(1)中:

$$S_{ij} = \frac{2a_{ij}}{\sum_{q=1}^M a_{iq} + \sum_{q=1}^M a_{qj}} \quad \forall i, j \quad (2)$$

$$S1_{ii'} = \frac{\sum_{q=1}^M \min(a_{iq}, a_{i'q})}{2 \sum_{q=1}^M \max(a_{iq}, a_{i'q}) - \sum_{q=1}^M \min(a_{iq}, a_{i'q})} \quad \forall i, i' \quad (3)$$

$$S2_{jj'} = \frac{\sum_{q=1}^P \min(a_{qj}, a_{qj'})}{2 \sum_{q=1}^P \max(a_{qj}, a_{qj'}) - \sum_{q=1}^P \min(a_{qj}, a_{qj'})} \quad \forall j, j' \quad (4)$$

2) 约束条件

$$\sum_{k=1}^C x_{ik} = 1 \quad \forall i \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^C y_{jk} = 1 \quad \forall j \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^M y_{jk} \geq L \quad \forall k \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^M y_{jk} \leq U \quad \forall k \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^P x_{ik} \geq G \quad \forall k \quad (9)$$

$$x_{ik}, y_{jk} = 0 \text{ 或 } 1 \quad \forall i, j, k \quad (10)$$

上述模型中,式(1)表示设备单元与零件族划分的目标函数,期望获得单元相似系数之和为最大;式(2)表示零件与设备之间的相似系数;式(3)表示零件与零件之间的相似系数;式(4)表示设备与设备间的相似系数。

约束条件中,式(5)表示每种零件只能归属于一个单元;式(6)表示每种设备只能归属于一个单元;式(7)和式(8)表示单元的尺寸限制;式(9)表示每个单元必须包含的零件种类;式(10)表示变量为 0-1 变量。

## 1.2 工人工作任务分配模型(模型 2)

### 1.2.1 模型的参数及变量

#### 1) 模型的符号及参数

$h$  代表人员,  $h=1, 2, \dots, H$ ,  $H$  表示人数;

$$t_{hj} = \begin{cases} 1 & \text{表示工人 } h \text{ 能操作设备 } j \\ 0 & \text{表示工人 } h \text{ 不能操作设备 } j \end{cases};$$

$S_{3_{hj}}$  表示人员  $h$  与设备  $j$  的相似系数;

$B$  表示人员最多能操作的设备数。

#### 2) 变 量

$w_{hk}=1$  表示工人  $h$  在单元  $k$  中, 否则为 0;

$f_{hj}=1$  表示工人  $h$  操作设备  $j$ , 否则为 0。

### 1.2.2 工人工作任务分配模型(模型 2)

#### 1) 目标函数

$$\max Z2 = \sum_{j=1}^M \sum_{h=1}^H f_{hj} S_{3_{hj}} - \sum_{k=1}^C \sum_{h=1}^H w_{hk} \quad (11)$$

其中:

$$S_{3_{hj}} = \frac{2t_{hj}}{\sum_{q=1}^M t_{hq} + \sum_{q=1}^H t_{qj}} \quad \forall h, j \quad (12)$$

#### 2) 约束条件

$$\sum_{h=1}^H f_{hj} = 1 \quad \forall j \quad (13)$$

$$f_{hj} \leq t_{hj} \quad \forall h, j \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^M f_{hj} \leq B \quad \forall h \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^C w_{hk} \leq 1 \quad \forall h \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^C w_{hk} \times y_{jk} = f_{hj} \quad \forall h, j \quad (17)$$

$$w_{hk}, f_{hj} = 0 \text{ 或 } 1 \quad \forall h, j, k \quad (18)$$

上述模型中,目标函数由两部分组成,第一部分为所有单元内的平均相似系数之和,第二部分为所需的工人人数,因为第一部分求极大值而第二部分求最小值,因此将两部分统一地归结于式(11)。

约束条件中,式(13)表示每一种设备必须有一个工人对其进行操作;式(14)表示工人只能操作其能够操作的设备;式(15)表示每个工人操作的设备数量限制;式(16)表示如果某个人员被分配到某个单元,则这个工人必须操作某台设备,否则工人不被聘用;式(17)表示同一工人操作的设备必须位于同一个单元;式(18)表示变量均为 0-1 变量。

### 1.3 模型线性化

很明显,模型 1 是非线性模型,为了方便问题的求解,本研究将其转变为线性模型。设一个 0-1 变量  $Z = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ ,其中  $X_1, X_2, \dots, X_n$  均为 0-1 变量,很明显,当且仅当所有的  $X_i (i=1, 2, \dots, n)$  都为 1 时,变量  $Z=1$ ,否则, $Z=0$ ,同时考虑附加约束条件(19),就可以  $Z$  代替  $X_1, X_2, \dots, X_n$ 。

$$\begin{aligned} Z &\leq X_i \quad \forall i \\ Z &\geq \sum_{i=1}^n X_i - (n-1) \end{aligned} \tag{19}$$

鉴于以上分析,设:

$$x_{i'k} = x_{ik} x_{i'k} \tag{20}$$

$$y_{j'k} = y_{jk} y_{j'k} \tag{21}$$

$$z_{ijk} = x_{ik} y_{jk} \tag{22}$$

同时,增加附加约束式(23)至式(31),将模型 1 中的非线性转为线性条件。

$$x_{i'k} \leq x_{ik} \tag{23}$$

$$x_{i'k} \leq x_{i'k} \tag{24}$$

$$x_{i'k} \geq x_{ik} + x_{i'k} - 1 \tag{25}$$

$$y_{j'k} \leq y_{jk} \tag{26}$$

$$y_{j'k} \leq y_{j'k} \tag{27}$$

$$y_{j'k} \geq y_{jk} + y_{j'k} - 1 \tag{28}$$

$$z_{ijk} \leq x_{ik} \tag{29}$$

$$z_{ijk} \leq y_{jk} \tag{30}$$

$$z_{ijk} \geq x_{ik} + y_{jk} - 1 \tag{31}$$

则最终的模型 1 如式(32)所示:

$$\max Z1 = \sum_{k=1}^C \left[ \frac{\sum_{i=1}^{P-1} \sum_{i'=i+1}^P x_{ik} x_{i'k} S1_{i'}}{\sum_{i=1}^{P-1} \sum_{i'=i+1}^P x_{ik} x_{i'k}} + \frac{\sum_{j=1}^{M-1} \sum_{j'=j+1}^M y_{jk} y_{j'k} S2_{j'}}{\sum_{j=1}^{M-1} \sum_{j'=j+1}^M y_{jk} y_{j'k}} + \frac{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^M x_{ik} y_{jk} S_{ij}}{\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^M x_{ik} y_{jk}} \right] \tag{32}$$

约束条件:

式(5)至式(10),式(23)至式(31)

$$x_{i'k}, y_{j'k}, z_{ijk} = 0 \text{ 或 } 1 \quad \forall i, i', j, j', k, i \neq i', j \neq j'$$

## 2 算例分析

本部分内容主要是将上述的模型 1 和模型 2 应用于文献[30]中的算例,算例规模可见表 1。本研究应用 lingo 软件进行编程求解,其结果可见表 2~6,分别为 5 个算例的最终结果(案例 1~5 的初始数据见文献[30])。表 7 总结了各案例中的单元设备与设备平均相似系数之和 SMM、单元零件与零件平均相似系数之和 SPP、单元设备与零件平均相似系数之和 SMP,以及平均人员相似系数 SH、单元内 0 元素的数量 Voids 和单元外 1 元素的数量 EEs。

从表 7 可以看出,应用本研究的模型可以在 Voids 和 EEs 方面获得比文献[30]更好的结果,特别是当模型规模比较大时,模型结果的优势就更加明显了。此外,除了比较 Voids 和 EEs 两个重要指标外,本研究较文献[30]有另外两大优势:其一是本研究所提出的模型要求工人所操作的设备必须位于同一个单元,这在某种程度上限定了工人的工作范围,而在文献[30]中则允许工人在不同单元之间移动,当单元本身规模比较小时,如案例 1~3,因为本身设备数量就比较少,工人在单元之间移动还是比较方便的,但是当设备数量、零件数量增加时,工人在单元之间的移动只会增加物料在操作过程中的等待时间;其二是本研究提出的模型要求工人人数最少,这样可以减少企业的劳动力成本开支,符合企业实际需求,而在文献

[30]中并没有考虑这一约束。

综上所述,本研究在考虑设备单元和零件族尺寸的要求下,结合工人的工作要求进行工人—设备—零件单元划分获得的结果要优于文献[30]。

表 1 案例的规模

Table 1 Scale of cases

案例	设备数	零件数	人数	单元数
案例 1	4	4	4	2
案例 2	4	5	5	2
案例 3	5	6	5	2
案例 4	7	10	4	2
案例 5	7	10	6	3

表 2 案例 1 工人—设备—零件单元划分结果

Table 2 Worker-machine-part cellular division result of case 1

	P1	P3	P2	P4	人员安排
M2	1	1	0	0	H2
M4	1	1	0	0	
M1	0	1	1	1	H4
M3	1	1	1	1	

注:M—设备;P—零件;H—人员。表 3~6 同。

表 3 案例 2 工人—设备—零件单元划分结果

Table 3 Worker-machine-part cellular division result of case 2

	P1	P2	P4	P5	P3	人员安排
M1	1	1	0	0	0	H1
M2	0	0	1	0	0	H2
M3	1	0	0	1	0	H3
M4	0	0	0	1	1	

表 4 案例 3 工人—设备—零件单元划分结果

Table 4 Worker-machine-part cellular division result of case 3

	P1	P2	P5	P6	P3	P4	人员安排
M1	1	1	0	1	0	0	H4
M3	1	0	1	1	0	0	
M4	1	1	1	0	0	0	H2
M2	0	0	0	0	1	1	H1
M5	0	0	0	0	1	0	

表 5 案例 4 工人—设备—零件单元划分结果

Table 5 Worker-machine-part cellular division result of case 4

	P1	P5	P6	P8	P9	P10	P2	P3	P4	P7	人员安排
M1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	H1
M6	1	0	1	1	0	0	0	1	0	0	
M5	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	H4
M7	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	
M2	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	H3
M4	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0	
M3	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	H2

表6 案例5工人—设备—零件单元划分结果

Table 6 Worker-machine-part cellular division result of case 5

	P3	P4	P9	P2	P6	P7	P8	P1	P5	P10	人员安排
M3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	H3
M4	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	
M1	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	H2
M6	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	
M2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	H6
M5	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
M7	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	H1

表7 结果的汇总及比较分析

Table 7 Summary and comparison for result

	文献[30]结果		本研究所得结果						
	Voids	EEs	SMM	SPP	SMP	SH	人员数	Voids	EEs
案例1	4	3	1.6	1.6	1.4666	0.639	2	0	3
案例2	10	1	0.2	0.51	0.778	0.623	3	4	1
案例3	14	4	0.666	0.383	0.738	0.91	3	4	0
案例4	20	14	0.4278	0.511	0.368	0.7585	4	10	7
案例5	19	6	0.6682	0.8218	1	0.604	4	7	1

### 3 总结与展望

本研究在前人的基础上,提出了基于相似系数的双资源约束单元构建模型。以单元设备与设备的平均相似系数之和、单元零件与零件的平均相似系数之和及单元设备与零件的平均相似系数之和最大为主要目标,构建设备—零件单元划分模型。然后,在此基础上以人员与设备的平均相似系数最大及聘用人数最少为目标,构建人员工作安排模型,并将模型应用于文献算例且获得较好的结果,证明提出的模型是切实可行的。

单元制造系统由单元构建、单元布局及单元调度组成,目前很多研究都是先构建制造单元,然后再以此为基础进行单元布局;但是,单元构建与布局及调度有着极强的联系,特别是在考虑工人工作安排的时候,一种构建及布局方案可能会减少物料的搬运距离和设备操作时间,但在某种程度上却增加了工人的工作强度或者是降低了工人操作设备的等级,影响生产质量;相反,另外一种构建和布局方案可能符合了员工的工作要求,但却增加了物料在单元内和单元间的搬运和设备操作时间。因此,在后续研究中笔者将同时分析设备单元的构建、布局及员工工作任务分配,以获取整个系统的最优效果。

#### 参考文献:

- [1] Gupta T, Seifoddini H. Production data based similarity coefficient for machine-component grouping decisions in the design of a cellular manufacturing system[J]. International Journal of Production Research, 1990, 28(7): 1247-1269.
- [2] Seifoddini H K. Single linkage versus average linkage clustering in machine cells formation applications[J]. Computers and Industrial Engineering, 1989, 16(3): 419-426.
- [3] Mosier C T, Yelle J, Walker G. Survey of similarity coefficient based methods as applied to the group technology configuration problem[J]. Omega, 1997, 25(1): 65-79.
- [4] Rogers D F, Kulkarni S S. Optimal bivariate clustering and a genetic algorithm with an application in cellular manufacturing[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 160(2): 423-444.
- [5] Oliveira S, Ribeiro J F F, Seok S C. A comparative study of similarity measures for manufacturing cell formation[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2008, 27(1): 19-25.
- [6] Alhourani F, Seifoddini H. Machine cell formation for production management in cellular manufacturing systems[J]. International Journal of Production Research, 2007, 45(4): 913-934.
- [7] Yang M S, Hwang P Y, Chen D H. Fuzzy clustering algorithms for mixed feature variables[J]. Fuzzy Sets and

- System, 2004, 141(2): 301-317.
- [8] Naadimuthu G, Gultom P, Lee E S. Fuzzy clustering in cell formation with multiple attributes[J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2010, 59(9): 3137-3147.
- [9] Hung W L, Yang M S, Lee E S. Cell formation using fuzzy relational clustering algorithm[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011, 53(9): 1776-1787.
- [10] Foulds L R, French A P, Wilson J M. The sustainable cell formation problem: Manufacturing cell creation with machine modification costs[J]. *Computers and Operations Research*, 2006, 33(4): 1010-1032.
- [11] Diaby M, Nsakanda A L. Large-scale capacitated part-routing in the presence of process and routing flexibilities and setup costs[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2006, 57(9): 1100-1112.
- [12] Paydar M M, Mahdavi I, Khonakdari S V, et al. Developing a mathematical model for cell formation in cellular manufacturing systems[J]. *International Journal of Operational Research*, 2011, 11(4): 408-424.
- [13] Paydar M M, Saidi-Mehrabad M. A hybrid genetic-variable neighborhood search algorithm for the cell formation problem based on grouping efficacy[J]. *Computer and Operation Research*, 2013, 40(4): 980-990.
- [14] Defersha F M, Chen M. Machine cell formation using a mathematical model and a genetic-algorithm-based heuristic [J]. *International Journal of Production Research*, 2006, 44(12): 2421-2444.
- [15] Defersha F M, Chen M. A linear programming embedded genetic algorithm for an integrated cell formation and lot sizing considering product quality[J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 187(1): 46-69.
- [16] Dalfard V M. New mathematical model for problem of dynamic cell formation based on number and average length of intra and intercellular movements[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2013, 37(4): 1884-1896.
- [17] Kioon S A, Bulgak A A, Bektas T. Integrated cellular manufacturing systems design with production planning and dynamic system reconfiguration[J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 192(2): 414-428.
- [18] Bajestani A M, Rabbani M, Rahimi-Vahed A R, et al. A multi-objective scatter search for a dynamic cell formation problem[J]. *Computers and Operations Research*, 2009, 36(3): 777-794.
- [19] Tavakkoli-Moghaddam R, Safaei N, Sassani F. A new solution for a dynamic cell formation problem with alternative routing and machine costs using simulated annealing[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2008, 59(4): 443-454.
- [20] Herrán A, Defersha F M, Chen M, et al. An integrated multi-period planning of the production and transportation of multiple petroleum products in a single pipeline system [J]. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2011, 2(1): 19-44.
- [21] Aljaber N, Baek W, Chen C L. A tabu search approach to the cell formation problem[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 1997, 32(1): 169-185.
- [22] 吴永明, 马剑, 程猛. 可重组制造系统中加工设备资源的优化配置与重构[J]. *中国机械工程*, 2009, 20(2): 176-181.
- [23] 窦建平, 戴先中, 孟正大, 等. 基于图论的可重构制造系统单零件流水线构形优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(1): 81-91.
- [24] Li S, Mehrabadi H. Generation of block diagonal forms using hierarchical clustering for cell formation problems[C]// *Procedia CIRP*, Windsor: CIRP, 2014, 17: 44-49.
- [25] Sürer G A. Optimal operator assignment and cell loading in labor-intensive manufacturing cells[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 1996, 31(1): 155-158.
- [26] Aryanezhad M B, Deljoo V, Mirzapour Al-e-hashem S M J. Dynamic cell formation and the worker assignment problem: A new model[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 41(3/4): 329-342.
- [27] Mahdavi I, Aalaei A, Paydar M M, et al. Designing a mathematical model for dynamic cellular manufacturing systems considering production planning and worker assignment[J]. *Computers and Mathematics with Applications*, 2010, 60(4): 1014-1025.
- [28] Rafiei H, Ghodsi R. A bi-objective mathematical model toward dynamic cell formation considering labor utilization [J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(4): 2308-2316.
- [29] Bagheri M, Bashiri M. A new mathematical model towards the integration of cell formation with operation assignment and inter-cell layout problems in a dynamic environment[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2014, 38(4): 1237-1254.
- [30] Mahdavi I, Aalaei A, Paydar M M, et al. A new mathematical model for integrating all incidence matrices in multi-dimensional cellular manufacturing system[J]. *Journal of Manufacturing System*, 2012, 31(2): 214-223.