

[经营·管理]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2014.05.028

基于工艺通用性的企业产能主从优化方法

蔡杰¹, 邓劲莲¹, 王威²

(1. 浙江机电职业技术学院 机械工程学院, 浙江 杭州 310053,
2. 浙江大学 机械工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要:为了解决企业产品组合变动情况下的零件生产和现有产能的匹配问题,提出了一种在产品族生产企业中,基于工艺通用性的企业产能主从优化方法,并给出了相应的数学模型。文中模型可以在有效利用企业现有产能的基础上,降低产品族生产的复杂性,提高生产效率,同时,解决了以往单层优化方法在工艺和生产优化中的利益冲突困境,保证了企业整体利益实现最大化。

关键词:产品族;工艺通用性;多工艺方案规划;主从决策;双层规划

中图分类号:TB115.2 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2014)05-0116-06

Leader-Follower Joint Optimization of Enterprise Capacity Based on Process Commonality

CAI Jie¹, DENG Jinlian¹, WANG Wei²

(1. School of Mechanical Engineering, Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China;
2. Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: This research proposed a leader-follower joint optimization of enterprise capacity based on process commonality, which in order to solve the problem that match the parts production with existing capacity in product family when the product portfolio changed. The model given in the article could reduce the production complexity and increase productivity under the premise of effective utilization of enterprise existing capacity. At the same time, solved the interest conflicts of previous single optimization method in process and production optimization, and thus ensured the maximization of the overall interests of the enterprise.

Key words: product family; process commonality; multi process planning; leader-follower decision; bi-level program

在全球化迅速普及的背景下,企业面临的竞争更加激烈。一方面,来自用户的个性化需求使企业不得不提供更加独特的产品,另一方面,同行业的企业之间为了争取更大的市场份额,需要根据市场需求快速调整产品线,使更有竞争力的产品组合投入市场。产品族策略是有效应对以上问题的企业战略。然而,虽然过去数十年产品族设计被越来越多的企业所接纳,但产品族产品的生产过程却缺乏有效的管理手段。主要问题在于产品族生产中由于零件种类增多,造成生产的复杂性激增,使产品的生产成本失控,这一现象在同时生产多个产品族,每个产品族中包含多个产品实例

的企业尤为突出。另一方面,为了快速响应市场需求,企业往往需要快速调整产品组合,而产品组合变动之后的企业产能管理却缺乏相应的模型和手段。

在企业产品组合变动时,原先的生产秩序必然被打乱,如何以现有的产能匹配新的产品组合是企业必须面对的问题^[1]。从企业的生产角度考虑,由于零件生产工艺的灵活性,同一零件往往可以采用多种不同的工艺方法和工艺路线生产出来,这就为解决上述问题提供了合适的突破口。在企业信息化平台的支撑下,企业可以将现有的生产设备进行统一管理,并在系统中实时观察到当前工艺方案下的企业设备的使用状

收稿日期:2014-03-20;修回日期:2014-07-14

基金项目:浙江机电职业技术学院教改项目(浙机电院教【2013】92号-12)

作者简介:蔡杰(1984),男,甘肃张掖人,助教,硕士,主要从事计算机集成制造系统方面研究。E-mail: noah_0816@163.com

况,当企业产品组合变动时,如果出现现有产能无法满足产品族生产的状况,往往可以通过改变某些零件的工艺方法和工艺路线,使现有的产能可以完成新产品组合的生产。这样,一方面提高了企业设备的利用率,另一方面也使企业的产品线和产能实现了新的匹配。

这一策略的实施涉及到两方面的问题,首先,为了实现产品族和产能新的匹配,需要改变某些零件的工艺方法和工艺路线,但是具体改变哪些零件的工艺方法和工艺路线还需要进一步的研究。其次,当企业产能和产品族实现了新的匹配之后,意味着企业生产的复杂性并没有降低,那么如何降低企业生产中的复杂性,从而控制生产成本也是必须考虑的问题。针对以上两方面问题,本文提出了一种以工艺通用性为主,产品生产中设备有效利用率和零件加工排序灵活性为辅的双层规划模型。文章的第2部分对以往的相关研究进行了综述,第3部分提出了基于工艺通用性的产能决策过程模型,第4部分提出了基于工艺公用性的双层规划数学模型,最后一部分对现有的产能优化数学模型进行了对比。

1 相关研究回顾

多工艺路线可以影响企业产能的利用状态,从而使产品组合变动时使产能与新产品族零件的生产达到新的平衡成为可能,然而,以往对多工艺路线的研究却主要集中在2个方面。第一,研究多工艺路线如何影响零件组和制造单元的划分。例如,Logendran^[2]提出了一种生产中制造单元的划分方法,包括如何确定各生产单元设备的数量,以及如何选择各零件的工艺路线。Rajamani^[3]等人研究了在同时确定零件组和各制造单元设备数量的条件下多工艺路线对企业产能分布的影响。Caux^[4]研究了制造单元划分时,在企业产能约束下,零件多工艺路线对划分结果的影响。Sofianopoulou^[5]在以前研究的基础之上,提出了一种制造单元划分中以零件物流路径最短为优化目标的模型,其模型可以应用在每个零件存在多个工艺路线,每种设备存在多个副本的环境下。R. KIA^[6]提出了一种可以使动态单元式生产系统的总成本最低的优化模型,该模型中考虑了机器配置成本和材料运输成本,并且每个零件存在多个可选的工艺路线。第二,研究多工艺路线如何影响零件的加工排序以及多工艺路线的决策问题。例如,Sormaz^[7]等人提出了一种多工艺路线的自动生成及决策方法,其模型以加工时间最短和成本最小为优化目标对多工艺路线进行决策,而其多工艺路线的自动生成方法是以零件的工艺特征为基础

进行的。Saygin^[8]提出了一种工艺设计和生产计划设计的整合设计方法,这种方法包括4个步骤,首先在多设备中进行决策,其次在多工艺路线中进行决策,第3步基于前2步决策的设备和工艺路线生成生产计划,最后根据实际情况对生产计划进行调整。Shao^[9]等人提出了一种多工艺路线和生产排序的综合优化算法。Solimanpur^[10]等人以零件加工的总成本最低为优化目标,提出了一种零件的多工艺路线决策模型。这两方面的研究,并不能完全解决本文提出的问题,还存在:①无法降低零件生产阶段的复杂性;②仅以零件设计阶段的成本对零件的多工艺路线进行决策,可能陷入局部最优解;③将零件的工艺路线和加工排序放在同一个层次上进行权衡,有可能为了企业的局部利益牺牲整体利益。

在我国,对双层规划应用方面的研究开始于20世纪70年代,为了解决资源在各部门的分配矛盾。由于求解双层规划的严格数学最优解属于NP问题,因此这种方法在工程领域的应用并不普遍,但其思想却有着不可替代的重要作用。目前在数学上对双层规划的求解方法有很多,例如,Edmunds^[11]等人提出了一种分枝定界算法用于求解双层规划问题。Bialas^[12]等人提出了一种基于K次最好法的双层规划求解方法。Aiyoshi^[13-14]等人提出了一种将双层规划问题转化为单层规划问题的方法。这些方法虽然都能求得双层规划问题的数学最优解,但往往对所求解的问题有很严格的限制,例如所求解的问题必须是线性的等,因此应用并不普遍。在实际情况中,由于工程领域的很多问题并不要求严格的数学最优解,而只要求一个满意解即可,因此越来越多的工程优化问题都采用了数值求解算法,例如遗传算法、蚁群算法、神经网络算法等等,因此,一些学者将数值求解算法用于求解双层规划问题的解,例如,Wu^[15]等人将神经网络算法和遗传算法结合起来,求解一类双层规划问题的全局最优解。

2 基于工艺通用性的产能决策过程模型

本文研究的问题决策过程如图1所示,假设共生产3个零件,首先由工艺人员对每个零件进行多工艺方案设计,然后从每个零件的可行工艺规程集中选择一个工艺规程,组成一个包括每个零件的一种工艺路线的集合,称为一个工艺解决方案。在决策时,工艺人员先从所有工艺解决方案中选择一个工艺通用性最大的方案,将其交给生产计划人员,生产计划人员根据该工艺解决方案完成相应的所有可能的设备分配方案和零件加工排序方案,然后从这些设备分配方案和加工

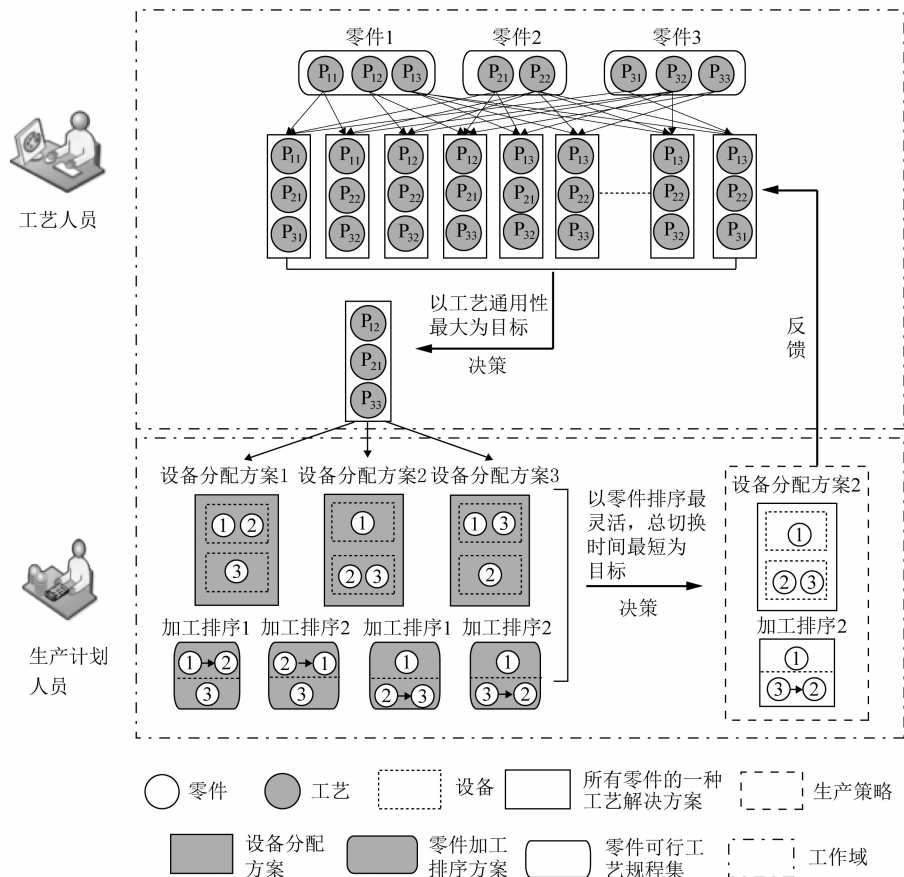


图1 基于工艺通用性的产能决策过程模型

Figure 1 Process model of capacity planning based on process commonality

排序方案中选择一组使零件的排序灵活性和有效设备利用率（指总切换时间最短）的生产策略，将其对自身利益的达成度反馈给工艺人员，由于工艺人员决策结果也会受到生产计划人员的影响，在接到生产计划人员的反馈之后，工艺人员将综合考虑自身利益和生产计划人员的利益，重新选择一组工艺解决方案，将其交给生产计划人员，再由生产计划人员计算新的工艺解决方案下的最优设备分配方案和零件加工排序方案和这种加工策略对自身利益的达成度，反馈给工艺人员。这样，当所有工艺解决方案都完成了一次循环，最后由工艺人员综合考虑自身利益和生产计划人员的利益，选择出一个工艺解决方案，而最优的设备分配方案和零件排序方案也就随之确定下来了。

在这一决策过程中，工艺人员和生产计划人员的利益是不能在同一个层级进行权衡的，而应该以工艺人员的利益为主，以生产计划人员的利益为从。因为工艺人员的决策目标是工艺通用性，这是针对整个企业的产品族生产的整体优化目标，而生产计划人员的决策目标是零件的加工排序灵活性和总切换时间最

短，这是其所在的车间的利益最大化目标，应该服从企业的整体利益。因此，在这一决策过程中，工艺人员处于主导地位，生产计划人员处于从属地位，当两者利益冲突的时候，应该首先满足工艺人员的利益，在此基础上，生产计划人员再寻找使自身利益最大化的生产策略。工艺解决方案和生产策略的最终确定，也就决定了企业的产能利用状态。在决策过程中，将企业的现有产能作为约束，也就可以确定匹配现有产能条件的生产方案。

3 基于工艺通用性的双层规划数学模型

在以上讨论的基础上，可以建立面向工艺通用性的主从双层规划的数学模型如(1)，(2)，(3)式，其中的符号含义为：

x —工艺解决方案矩阵。

X —工艺方案矩阵。

y —设备分配矩阵。

Y —对应于某工艺方案的设备分配矩阵。

z —零件加工排序矢量。

z^* —最优零件加工排序矢量。

λ_{jxp} —取0或1的值。指示零件 j 在工艺方案 x 中是否用到工艺方法 p ,是取1,否取0。

S_{xj}^* —生产以使总切换时间最短的方式组织时,工艺方案 x 下零件 j 的总切换时间。

$$n_{xp} = \sum_{p=1}^{n_p} \eta_p, \eta_p = \begin{cases} 1 & \text{对 } \forall x, x_{jai} - p = 0, j \in \{1, 2, \dots, n_d\}, a \in \Omega_j, i \in \{1, 2, \dots, u\} \\ 0 & \text{对 } \forall x, x_{jai} - p \neq 0, j \in \{1, 2, \dots, n_d\}, a \in \Omega_j, i \in \{1, 2, \dots, u\} \end{cases}^{\circ}$$

Ω_j —零件 j 的可行工艺方案集, a 表示其中第 a 种工艺方案。

C_p —工艺通用性指标。

C_{sf} —排序灵活性指标。

C_{sf}^* —生产以使总切换时间最短的方式组织时,零件加工排序灵活性指标。

E_u —设备有效利用率,即使设备上总切换时间最短的设备利用率。

n_d —互异零件总数量, j 为零件编号。

n_d^* —生产以使总切换时间最短的方式组织时,互异零件总数量, j^* 为生产以使总切换时间最短的方式组织时的零件编号。

n_z —零件加工排序方案总数。

L_{pj} —零件 j 的零件等级系数,量纲一。

L_{mi} —工艺方法 i 的工艺等级系数,量纲一。

L_{pj} 和 L_{mi} 的取值见表1和表2。

表1 零件等级系数

Table 1 Parts of grade coefficient

等级系数	零件等级		
	一般件	重要件	关键件
L_{pj}	3	2	1

表2 工艺等级系数

Table 2 Technical grade coefficient

等级系数	工艺等级		
	III	II	I
L_{mi}	3	2	1

u —最大工序数。

u' —由设备分配方案 y 决定的,分配在设备 e 上加工的工序总数。

e —设备编号。

D_{j^*} —生产以使总切换时间最短的方式组织时,根据市场调查推算出的零件 j 的需求量。

n_{xp} —在工艺方案 x 下所用到的总工艺方法数量。

n_e —设备总数量。

h, k, m, n, q, l —在切换时间矩阵中,为零件的每个工序安排的临时序号。

ω_1, ω_2, K —权重系数。

$T_{s^*}^*(y)$ —当采用设备分配方案 y 时所能达到的最短切换时间。

T_e^a —设备 e 可用的工时总数。

T_e^b —设备 e 被占用的工时总数。

$(\beta_{hk}^{ye})^{z^*}$ —对应于设备分配方案 y 的,由设备 e 上的最优排序 z^* 生成的 B 矩阵中位于 h 行 k 列上的元素。最优排序 z^* 是指可以使设备 e 上的总切换时间最短的排序方案。

其中 B 矩阵的生成是按以下步骤进行的:首先得到设备的切换时间矩阵,按切换时间矩阵中的顺序,给每个工序分配序号,按从左到右的顺序依次记为 $1, 2, 3, \dots, u'$ 。按新序号对所有工序进行排序,用 z 表示第 z 种排序方案, $1 \leq z \leq n_z$, n_z 为排序方案总数, $n_z = u'!$ 。对于某种排序,记排在首位的工序号为 f ,排在末位的工序号为 l 。则在 B 矩阵中,第 h 列的元素和第 k 行的元素均为 $0 (1 \leq h, k \leq u')$,即 $(\beta_{hf}^{ye})^z = 0 (h = 1, 2, \dots, u')$, $(\beta_{lk}^{ye})^z = 0 (k = 1, 2, \dots, u')$,当给定某个排序,如 $2-1-3-4-5$ 时,则其矩阵中的元素按下面的规则产生: $(\beta_{21}^{ye})^z = 1, (\beta_{13}^{ye})^z = 1, (\beta_{34}^{ye})^z = 1, (\beta_{45}^{ye})^z = 1$,最后在剩余的空格中都填入“0”。

S_{FL} —最优排序中,排在首位工序的+排在末位工序的值。

ξ_{hk}^{ye} —在设备分配方案 y 下的,设备 e 上的切换时间矩阵的 h 行 k 列上的元素。

$$\alpha_{hk}^{ye} = \begin{cases} 0 & \xi_{hk}^{ye} = 0 \text{ 或 } \infty \\ 1 & \xi_{hk}^{ye} \neq 0 \wedge \xi_{hk}^{ye} \neq \infty \end{cases}^{\circ}$$

上层:

$$\text{Max} C_p(x, y) = \text{Max} \sum_{p=1}^{n_p} \left[\omega_1 \frac{\sum_{j=1}^{n_d} \lambda_{jxp} \sum_{j^*=1}^{n_d^*} S_{xj^*}^* \sum_{j^*=1}^{n_d^*} D_{j^*}}{n_{xp} \left(\sum_{j^*=1}^{n_d^*} D_{j^*} S_{xj^*}^* \right)} + \omega_2 C_{sf}^* \right] - \sum_{j=1}^{n_d} \sum_{i=1}^u K (L_{pj} - L_{mi})^2, \quad (1)$$

约束条件

$$\mathbf{x} \in [X_1, X_2, \dots, X_w],$$

$$\mathbf{y} \in [Y_{11}, \dots, Y_{1m}, Y_{21}, \dots, Y_{2m}, \dots, Y_{w1}, \dots, Y_{wm}],$$

$$\omega_1 + \omega_2 = 1,$$

$$\lambda_{jxp} = 0 \text{ 或 } 1,$$

$$\sum_{j^*=1}^{n_d^*} S_{xj^*}^* = T_{S^*}^*(y^*),$$

$$C_{sf}^* = \text{Min}C_{sf}(y),$$

$$P = 0 \text{ 时}, L_{p_j} = L_{m_i},$$

$$K = \begin{cases} 0.5 & L_{p_j} > L_{m_i} \\ 1 & L_{p_j} \leq L_{m_i} \end{cases}.$$

下层:

$$\text{Max}E_u(y) = \left(1 - \frac{T_{S^*}^*}{T_e^u}\right) \times 100\% =$$

$$\text{Max} \sum_{e=1}^{n_e} \left\{ 1 - \frac{\left\{ \sum_{h=1}^{u'} \sum_{k=1}^{u'} (\beta_{hk}^{ye})^{z^*} \xi_{hk}^{ye} + S_{FL} \right\}}{T_e^u} \right\}, \quad (2)$$

$$\text{Min}C_{sf}(y) =$$

$$\text{Min} \sum_{e=1}^{n_e} \left[\frac{\sum_{h=1}^{u'} \sum_{k=1}^{u'} \left(\xi_{hk}^{ye} \alpha_{hk}^{ye} - \frac{\sum_{q=1}^{u'} \sum_{l=1}^{u'} \xi_{ql}^{ye} \alpha_{ql}^{ye}}{\sum_{m=1}^{u'} \sum_{n=1}^{u'} \alpha_{mn}^{ye}} \right)^2}{\sum_{m=1}^{u'} \sum_{n=1}^{u'} \alpha_{mn}^{ye}} \right], \quad (3)$$

约束条件

$$\mathbf{y} \in [Y_{11} \cdots Y_{1m}, Y_{21} \cdots Y_{2m}, \dots, Y_{w1} \cdots Y_{wm}],$$

$$\text{对 } \forall (\mathbf{X}, \mathbf{Y}), T_e^p < T_e^u$$

$$\xi_{hk}^{ye} > 0, \xi_{ql}^{ye} > 0, \alpha_{hk}^{ye} = 0 \text{ 或 } 1, \alpha_{ql}^{ye} = 0 \text{ 或 } 1, \alpha_{mn}^{ye} = 0 \text{ 或 } 1。$$

$$T_{S^*}^*(y) = \text{Min} \sum_{e=1}^{n_e} \left\{ \sum_{h=1}^{u'} \sum_{k=1}^{u'} (\beta_{hk}^{ye})^{z^*} \xi_{hk}^{ye} + S_{FL} \right\},$$

$$\sum_{h=1}^{u'} \sum_{k=1}^{u'} (\beta_{hk}^{ye})^{z^*} \xi_{hk}^{ye} \leq \sum_{h=1}^{u'} \sum_{k=1}^{u'} (\beta_{hk}^{ye})^z \xi_{hk}^{ye} (z = 1, 2, \dots, n_z, e = 1, 2, \dots, n_e)。$$

4 现有工艺-生产优化模型与本文模型的对比

现有的工艺-生产优化问题的模型有 4 种, 其中 PC_{ls} (Lot Sizing Component of Process Commonality), PC_{sf} (Sequencing Flexibility Component of Process Commonality), PC_{ef} (Expediting Flexibility Component of Process Commonality) 由 Treleven^[16] 提出。CI^(p) (Commonality Index of Process) 由 Jiao^[17] 提出, PCI (Process Commonality Index) 由 Kota^[18] 提出, CMC (Comprehensive Metric for Commonality) 由 Thevennot^[19] 提出, 如表 3 所示。

与其他的优化模型相比, 本文模型主要用于工艺规划阶段, 因此不涉及设计阶段的指标, 比如共用零部件、零件形状、尺寸方面的差异等。从涉及的决策者角度考察, 现存的优化模型大部分都有多种决策者参与决策过程, 因此, 在此决策过程中, 决策者之间的关系就是至关重要的问题, 本文在这方面考虑到了工艺人员和生产计划人员在决策过程中的主从关系, 更真实地反映了决策过程和决策机制, 因此更符合生产实际情况。

表 3 现有工艺-生产优化模型与本文模型对比

Table 3 Comparison of existed process - production optimization model with which declared in the article

方法	PC _{ls} , PC _{sf} , PC _{ef} (Treleven)	CI ^(p) (Jiao)	PCI (Kota)	CMC (Thevennot)	CI, E (本文)
考虑因素					
经济批量	✓	✓			✓
零件加工排序灵活性	✓	✓			✓
生产计划临时变更灵活性	✓	✓			
零件工艺规程相似性		✓			✓
零件形状差异程度			✓	✓	
零件尺寸差异程度			✓	✓	
零件材料差异程度			✓	✓	
零件工艺规程差异程度			✓	✓	
零件装配工艺差异程度			✓	✓	
共用零部件				✓	
零件批量				✓	
零件成本				✓	✓
设备利用率					✓
工艺方案可行性					✓
决策者					
生产计划人员	✓				
生产计划和工艺人员		✓			
设计和工艺人员			✓	✓	
工艺和生产计划人员					✓
关系					
是否考虑主从关系	否	否	否	否	是

5 总结与展望

本文提出了一种在产品族生产企业中,产品组合变化时有效利用企业现有产能的方法。该方法不仅解决了新产品族零件和现有产能的匹配问题,而且提出了以工艺通用性为主,以排序灵活性和总切换时间为从的双层规划数学模型,有效地解决了工艺和生产优化中的利益冲突,保证了企业整体利益实现最大化,并构建了使局部利益服从整体利益的算法。未来的研究希望在生产计划中考虑了更多因素,例如,加工排序问题中,要考虑零件的交货期,单个零件的加工时间和零件的物流时间等等,使算法的约束更加全面,更加符合企业的具体应用环境。

参考文献:

- [1] JIAO Jianxin, SIMPSON T W, SIDDIQUE Z. Product family design and platform-based product development: a state-of-the-art review [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2007, 18(1): 5-29.
- [2] LOGENDRAN R, RAMAKRISHNAN P, SRISKANDARAJAH C. Tabu search-based heuristics for cellular manufacturing systems in the presence of alternative process plans [J]. *International Journal of Production Research*, 1994, 32(2): 273-297.
- [3] RAJAMANI D, SINGHY N, ANEJA Y P. Integrated design of cellular manufacturing systems in the presence of alternative process plans [J]. *International Journal of Production Research*, 1990, 28(8): 1541-1554.
- [4] CAUX C, BRUNIAUX R, PIERREVAL H. Cell formation with alternative process plans and machine capacity constraints: a new combined approach [J]. *International Journal of Production Economics*, 2000, 64(1/3): 279-284.
- [5] SOFIANOPOULOU S. Manufacturing cells design with alternative process plans and/or replicate machines [J]. *International Journal of Production Research*, 1999, 37(3): 707-720.
- [6] KIA R, BABOLI A, JAVADIAN N, et al. Solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system with alternative process routings, lot splitting and flexible reconfiguration by simulated annealing [J]. *Computers & Operations Research*, 2012, 39(11): 2642-2658.
- [7] SORMAZ D N, KHOSHNEVIS B. Generation of alternative process plans in integrated manufacturing systems [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2003, 14(6): 509-526.
- [8] SAYGIN C, KILIC S E. Integrating flexible process plans with scheduling in flexible manufacturing systems [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1999, 15(4): 268-280.
- [9] SHAO Xinyu, LI Xinyu, GAO Liang, et al. Integration of process planning and scheduling: a modified genetic algorithm-based approach [J]. *Computers & Operations Research*, 2009, 36(6): 2082-2096.
- [10] SOLIMANPUR M, SATTARI H, ABAZARI A M. Optimum process plan selection via branch and bound algorithm in an automated manufacturing environment [J]. *International Journal of Operational Research*, 2012, 13(3): 281-294.
- [11] EDMUNDS T, BARD J. An algorithm for the mixed-integer nonlinear bilevel programming problem [J]. *Annals of Operations Research*, 1992, 34(1): 149-162.
- [12] BIALAS W F, KARWAN M H. Two-level linear programming [J]. *Management Science*, 1984, 30(8): 1004-1020.
- [13] AIYOSHI E, SHIMIZU K. A solution method for the static constrained Stackelberg problem via penalty method [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1984, 29(12): 1111-1114.
- [14] SHIMIZU K, AIYOSHI E. A new computational method for Stackelberg and min-max problems by use of a penalty method [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1981, 26(2): 460-466.
- [15] WU C P. A hybrid technique for global optimization of hierarchical systems [J]. *IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, 1996, 3: 1706-1711.
- [16] TRELEVEN M, WACHER J G. The sources, measurements, and managerial implications of process commonality [J]. *Journal of Operations Management*, 1987, 7(1/2): 11-25.
- [17] JIAO Jianxin, TSENG M M. Understanding product family for mass customization by developing commonality indices [J]. *Journal of Engineering Design*, 2000, 11(3): 225-243.
- [18] KOTA S, SETHURAMAN K, MILLER R. A metric for evaluating design commonality in product families [J]. *Journal of Mechanical Design*, 1998, 122(4): 403-410.
- [19] THEVENOT H J, SIMPSON T W. A comprehensive metric for evaluating component commonality in a product family [J]. *Journal of Engineering Design*, 2007, 18(6): 577-598.
- [3] 冯毅雄,谭建荣,尹国栋,等. 基于符号的装配建模方法研究 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2003, 15(6): 673-679.
- [4] 戴国洪,张友良,汪惠芬,等. 产品数字化预装配系统体系的研究 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2011(7): 39-41.
- [5] 王永金,孙克豪. 虚拟装配技术研究概述 [J]. *机械*, 2011, 31(4): 1-3.
- [6] 黄薇,邓海波,刘肖健. 笔类产品组合创新的数字化设计方法 [J]. *轻工机械*, 2012, 30(1): 82-87.
- [7] 王凯,曹西京. 基于 Pro/E 的机械产品机构运动的仿真设计 [J]. *轻工机械*, 2006, 24(1): 62-64.
- [8] 季忠齐. 产品数字化预装配关键技术研究 and 实现 [D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
- [9] 武殿梁,杨润尧,马登哲,等. 虚拟装配系统及其关键技术 [J]. *上海交通大学学报*, 2010, 38(9): 1539-1543.

(上接第 115 页)