

零件工艺分工规划及评价方法*

Method of Part Process Assignment Planning and Its Evaluation

西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室 王 佩 田锡天 耿俊浩 侯忠滨

[摘要] 为了使企业合理、高效地进行零件工艺分工规划,提出了基于车间能力的工艺分工规划方法。该方法依据设备能力、工装能力建立车间能力模型,并根据车间能力和状态为零件的制造阶段选择承制车间,并组合形成分工路线;在此基础上对工艺分工路线的评价方法进行了研究,采用模糊综合评价方法对多个备选路线进行评价、排序,以确定最优的工艺分工路线。最后,通过一个实例验证了所述方法的有效性。

关键词: 零件工艺分工规划 车间能力模型 车间选择 路线评价

[ABSTRACT] Aiming for solving part process assignment planning, a method named process assignment planning based on shop capability is proposed and the method of process assignment route is researched. In this method, shop capability model is built by the capability of machine tools and process unit and manufacturing shop is selected by shop capability and status and the route is formed. On the basis, multi-candidate routes are evaluated by multi-fuzzy comprehensive appraisal to select optimal process assignment route. Finally, the method is verified by an example.

Keywords: Part process assignment planning Shop capability model Shop selecting Route evaluation

零件的工艺分工规划对制造过程进行宏观安排,是实施详细工艺设计的前提条件,对企业合理利用制造资源、平衡车间生产能力,保证企业高质、高效完成产品订单具有重要意义。目前,工艺分工规划存在的问题主要体现在:工艺分工路线中承制车间的选择由工艺人员依靠经验参照一些数据进行,所选车间的合理性依靠工艺人员的工艺经验和对工艺知识的掌握程度,造成编制的工艺分工路线质量得不到保障;没有对工艺分工路线进行评优,使得设计的分工路线不是最优的。

国内外针对工艺分工规划技术的研究比较少。文献[1]从工艺计划与生产计划关系角度建立了工艺规划

模型,隐含了对工艺分工规划过程的解决方案;文献[2]提出了基于网络的虚拟制造环境下动态任务规划研究,并简单介绍了在车间级动态工艺规划的应用;文献[3]对基于知识的逻辑加工路线设计及可执行加工路线生成方法进行了详细讨论;文献[4]针对工艺分工规划过程建模问题提出了一种基于映射分解的工艺分工过程建模方法。这些研究注重工艺分工规划模型的建立,而没有考虑车间的能力,容易造成制造任务等待和分配不平衡;且没有对分工路线进行评价排序,可能造成设计的路线不经济等后果。本课题对零件工艺分工规划方法进行了研究,对工艺分工的总体思路进行了分析,对车间实时能力的描述、车间的选择、路线的评价和排序进行了研究,为工艺分工规划的车间选择和路线选择提供参考,最终使得零件工艺分工规划更合理。

1 基于车间能力的工艺分工规划

基于车间能力约束的零件工艺分工规划根据车间能力解决零件主要制造特征的制造顺序和承制车间的选择等问题。本课题假设零件的制造阶段已经安排好,着重研究零件工艺分工规划过程中基于车间能力的承制车间的选择与分工路线的优化问题。车间能力的动态变化性及制造资源的有限性使得工艺分工规划时应考虑车间能力,工艺分工规划承制车间选择的不唯一性导致产生多条工艺分工路线,需要进行工艺分工路线的评价、排序,以选择最优的路线。零件工艺分工规划过程的描述如图1所示。首先对零件信息进行工艺分析,零件基本形状、材料、热处理、批量、主要制造特征及精度等因素影响工艺路线的设计;其次借助典型路线与路线规范库进行工艺路线设计,确定毛坯种类、加工方法、加工阶段等,即确定零件的主要制造阶段,并通过车间选择对其进行修正;然后将车间制造能力和状态与零件各制造阶段的工艺信息进行匹配选择承制车间,若产生多个候选车间,经组合后就可以形成多条零件任务经历的车间路线,采用加工质量、加工时间、加工成本3个指标进行综合评价得到路线优先顺序,确定最佳路线。

2 车间能力模型的建立

车间能否满足相应的工艺要求,是工艺分工规划所

* 基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2007AA040503)。

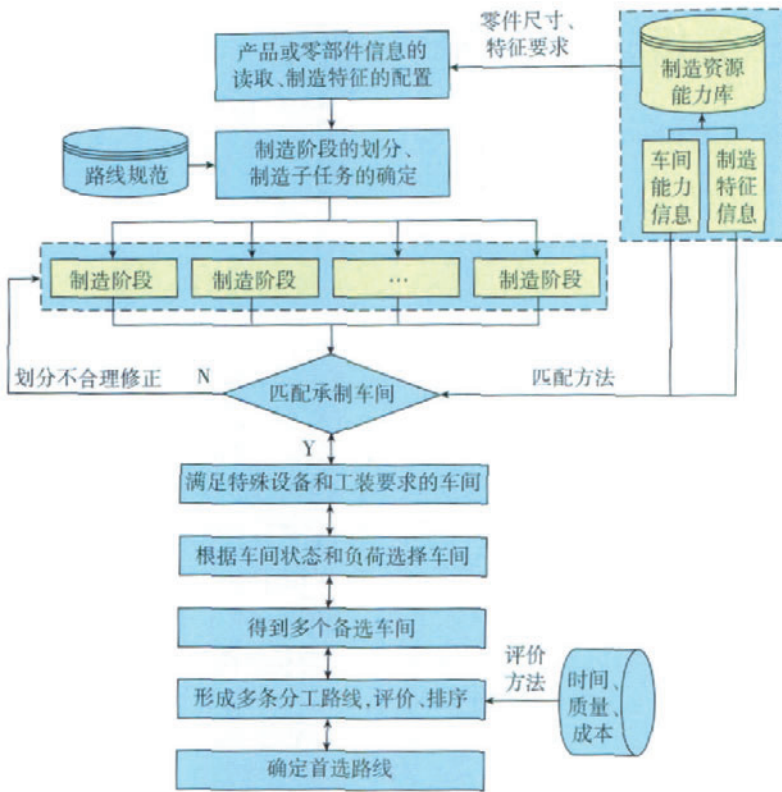


图1 零件工艺分工规划过程

Fig.1 Process of part process assignment planning

要解决的首要问题, 鉴于此, 建立车间能力模型, 描述车间可提供的操作、可加工的零件类型、零件尺寸范围、材料类型、批量、制造特征类型、制造特征尺寸范围和精度范围以及车间资源的状态和负荷等能力信息。

本课题提出一种针对车间能力的层次分类建模方法, 构建由车间、设备、刀具、夹具、加工方法和设备加工能力、人员组成的具有层次和隶属关系的车间能力模型。为了简化模型, 只列出了与车间选择有关的信息, 如图2所示。车间由多个设备、刀具、夹具、量具和人员聚合而成, 其信息包括管理信息, 负荷信息和能力信息, 车间能力是拥有的设备能力和工装能力的并集。设备信息包括管理信息、制造能力信息、

任务信息和状态信息。管理信息描述了设备名称等基本信息。制造能力信息包括设备可加工的零件类型、工件最大尺寸信息、材料类型、批量、拥有的加工方法和特征加工能力等。设备拥有多种加工方法和多种特征加工能力。特征加工能力信息

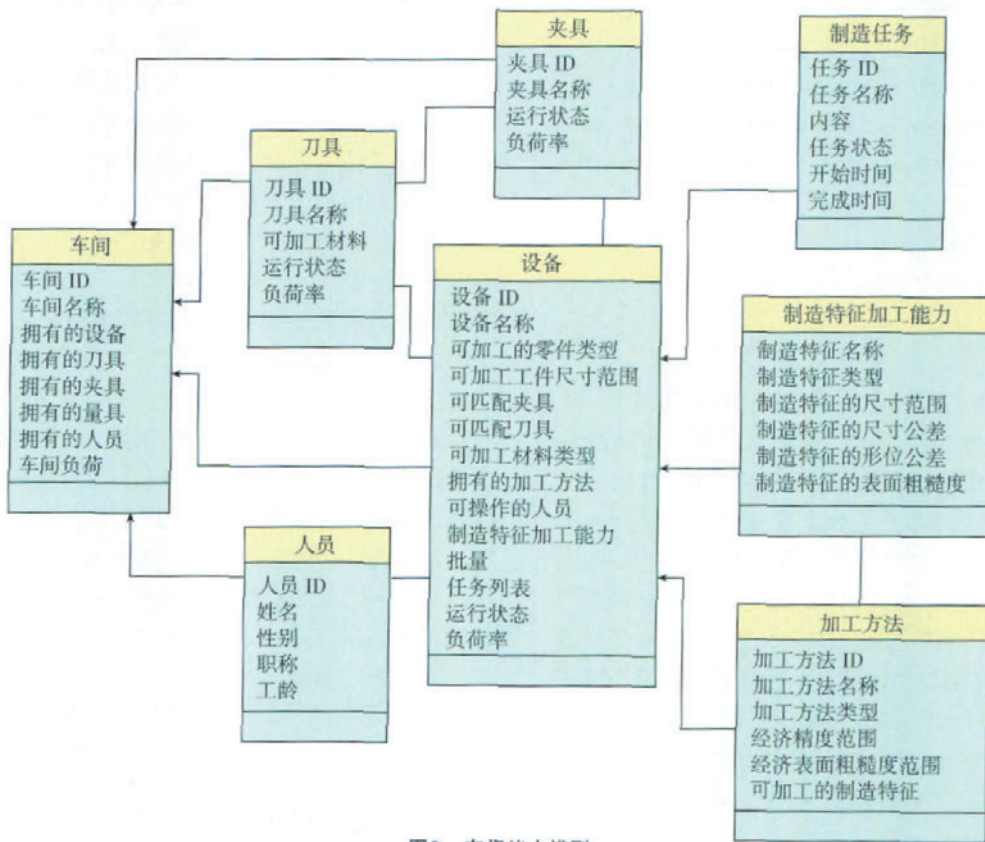


图2 车间能力模型

Fig.2 Model of shop capability

包括可加工的制造特征的名称、类型、尺寸范围、尺寸公差、形位公差和表面粗糙度等,与加工方法是一对多的关系。设备的制造任务信息包括任务的管理信息、状态信息、开始时间和完成时间等信息。设备状态信息由运行状态和负荷率组成。运行状态包括正常、维修、报废3种情况。负荷率指某段时间内设备已有工序的工时与设备满负荷运转时间之比。设备的运行状态和负荷率反映了车间能力在特定时间内是否可用,描述了车间的可用能力。设备与工装之间和组成工装的各元素之间不是相互独立的,工装与设备配合起来可以完成一定的制造任务,设备能力间接的反映了工装能力,是车间能力的主要组成部分,所以本课题依据能力选择车间时主要考虑设备能力。

3 基于设备能力的车间选择及分工路线的评价

传统工艺分工规划中承制车间的选择只是简单的依据经验和对企业能力大概的了解,可能造成制造任务等待或无法完成或不经济等问题,本课题通过对车间拥有的设备能力进行定性与定量描述,通过参数匹配可以得到较为合适的备选车间。

3.1 承制车间的选择

本课题假定工艺分工中零件的制造阶段已经确定,只是为其选择承制车间。承制车间的选择是根据零件类型信息、尺寸信息、材料信息、主要制造特征信息为零件的主要工序选取合适的、可用的车间,即选取能力满足要求的车间。进行车间选择时,首先判断设备制造能力,即判断工件的尺寸是否在设备可加工工件的最大尺寸范围内、工件的制造特征类型是否与设备可加工的制造特征匹配、工件的制造特征尺寸是否在设备可加工的该特征的极限尺寸范围内、工件的制造特征的精度要求是否在设备加工该制造特征所能达到的精度范围;其次判断设备状态,判断运行状态和负荷率在计划时间内是否满足要求;最后根据所选设备与车间的所属关系确定承制车间。

3.2 分工路线评价方法研究

零件工艺分工规划中,同一个零件的同一制造阶段承制车间的选择可能有多个,将各个制造阶段的车间依次组合后,形成的工艺分工路线就可能有多条。综合考虑影响分工路线选

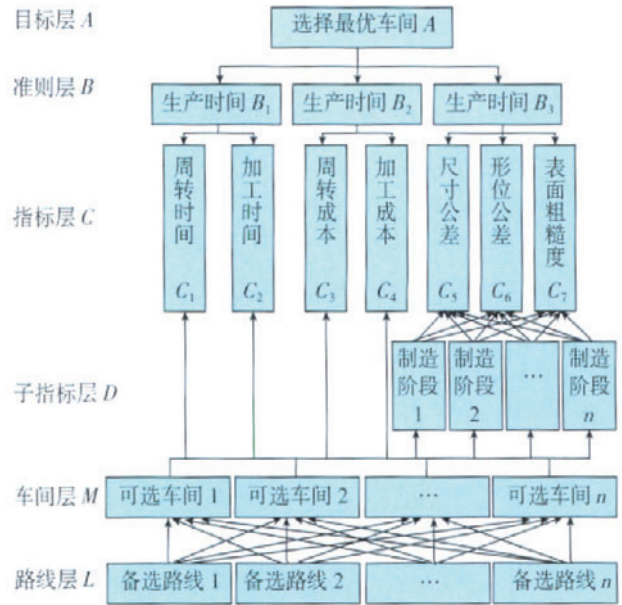


图3 方案优选层次结构图

Fig.3 Structure diagram of optimal selection

择的多个主要因素,建立的评价模型,如图3所示,将影响分工路线优化选择的因素划分为3层,第一层D由一系列制造阶段组成,第二层由7个因素构成: $C^{(1)} = \{C_1, C_2, \dots, C_7\}$,第二层将上述7个因素归纳为3个因素的子集:

表1 隶属度公式及含义说明

公式名称	公式内容	说明	编号
周转时间 隶属度 $R_{ZT_{ij}}$	$\begin{cases} 0 & T_{Zj} \geq T_{\max} \\ 1/(T_{Zj} \times \sum_{k=1}^n T_{Zk}^{-1}) & T_{Zj} < T_{\max} \end{cases}$	T_{\max} 表示零件的交货期, T_{Zj} 表示工艺路线 j 中每个制造阶段之间周转的总的运输时间。	(1)
加工时间 隶属度 $R_{JT_{ij}}$	$\begin{cases} 0 & T_{Jj} \geq T_{\max} \\ 1/(T_{Jj} \times \sum_{k=1}^n T_{Jk}^{-1}) & T_{Jj} < T_{\max} \end{cases}$	T_{\max} 零件的交货期, T_{Jj} 表示工艺路线 j 中每个制造阶段的任务量之和	(2)
周转成本 隶属度 $R_{ZC_{ij}}$	$\begin{cases} 0 & C_{Zj} \geq C_{\max} \\ 1/(C_{Zj} \times \sum_{k=1}^n C_{Zk}^{-1}) & C_{Zj} < C_{\max} \end{cases}$	C_{\max} 表示零件任务的最高成本, C_{Zj} 表示工艺路 j 每个制造阶段运输成本之和	(3)
加工成本 隶属度 $R_{JC_{ij}}$	$\begin{cases} 0 & C_{Jj} \geq C_{\max} \\ 1/(C_{Jj} \times \sum_{k=1}^n C_{Jk}^{-1}) & C_{Jj} < C_{\max} \end{cases}$	C_{\max} 表示零件任务的最高成本, C_{Jj} 表示工艺路线 j 每个制造阶段加工成本之和	(4)
尺寸公差 隶属度 $R_{PC_{ij}}$	$\begin{cases} 0 & P_{c_{ij}} \geq P_{c_{\max ij}} \\ 1/(P_{c_{ij}} \times \sum_{k=1}^n P_{c_{ik}}^{-1}) & P_{c_{ij}} < P_{c_{\max ij}} \end{cases}$	$P_{c_{\max ij}}$ 表示最大允许的尺寸公差, $P_{c_{ij}}$ 表示制造阶段 i 的第 j 个承制车间承诺的尺寸公差值	(5)
形位公差 隶属度 $R_{PS_{ij}}$	$\begin{cases} 0 & P_{s_{ij}} \geq P_{s_{\max ij}} \\ 1/(P_{s_{ij}} \times \sum_{k=1}^n P_{s_{ik}}^{-1}) & P_{s_{ij}} < P_{s_{\max ij}} \end{cases}$	$P_{s_{\max ij}}$ 表示最大允许的形位公差, $P_{s_{ij}}$ 表示制造阶段 i 的第 j 个承制车间承诺的形位公差值	(6)
表面粗糙度 隶属度 $R_{R_{ij}}$	$\begin{cases} 0 & R_{ij} \geq R_{\max ij} \\ 1/(R_{ij} \times \sum_{k=1}^n R_{ik}^{-1}) & R_{ij} < R_{\max ij} \end{cases}$	$R_{\max ij}$ 分别表示最大允许的表面粗糙度, R_{ij} 表示制造阶段 i 的第 j 个承制车间承诺的表面粗糙度值	(7)

$C(2) = \{(生产时间)B_1, (生产成本)B_2, (加工质量)B_3\}$ 。计算过程如下。

(1) 生产时间、生产成本、加工质量隶属度 R 的计算。文献 [5] 将定量指标分为效益型和成本型 2 类, 效益型定量指标值越大越好, 成本型定量指标越小越好, 并分别给出了计算公式。周转时间、加工时间、周转成本、加工成本、尺寸公差、形位公差与表面粗糙度值均越小越好, 因此采用成本型隶属度计算公式, 如表 1 所示。周转时间、加工时间、周转成本、加工成本表示一条路线中各个制造阶段总的周转时间、加工时间、周转成本、加工成本, 尺寸公差、形位公差、表面粗糙度表示一条路线中单个制造阶段对应车间的尺寸公差、形位公差、表面粗糙度。

(2) 各影响因素权重 W 的分配。依据 1~9 阶标度 [6], 对同层次因素按相对重要程度进行两两比较, 得到判断矩阵 $A = (a_{ij})_{n \times n}$ 其中, a_{ij} 表示指标因素 i 对指标因素 j 的相对重要性, 且 $a_{ij} > 0, a_{ii} = 1, a_{ij} = 1/a_{ji} (i, j = 1, 2, \dots, n)$ 。采用和法求权重向量 W , 将 A 的每一列归一化得到判断矩阵 A_0 , 将 A_0 按行相加并归一化处理得 $W = (W_1, W_2, \dots, W_n)$, 使用一致性检验验证权重分配的合理性。

(3) 计算综合评判向量 B , 确定排序。根据公式

$$B = W \cdot R \text{ (“} \cdot \text{”取 } M(\wedge, \vee) \text{)}, \quad (8)$$

计算各级的综合评判向量, 根据各级综合评判向量中元素值的大小进行优先顺序的排列。

4 应用实例

下面以一种叶片零件(材料 DD6) 在某航空发动机制造厂生产过程为例验证所提的承制车间选择方法。

假定该零件的制造阶段已经划分好, 基于制造特征的制造任务划分、每个制造任务需求的主要加工方法, 制造任务的精度等级和表面粗糙度如表 2 所示, 由于文章篇幅所限, 仅列出前 4 个制造阶段表示完整的制造过程。该厂叶片的制造阶段可在表 3 所示的多个车间完成, 并已知车间的特征加工能力、状态以及 负荷率。

将叶片零件的工艺信息及加工方法信息与表 3 的车间能力与状态信息进行匹配, 得到满足要求 4 条流经具体车间的路线, 路线 1: 1-9-18-9; 路线 2: 1-9-20-9; 路线 3: 5-9-18-9; 路线 4: 5-9-20-9。对这 4 条路线按综合评价方法进行评价排序, 具体如下。

表2 某叶片零件的制造阶段与精度要求

制造阶段	基于制造特征的制造任务划分	主要加工方法	精度等级	表面粗糙度
1	粗加工榫根进、排气边, 盆侧榫根、背侧榫根、榫根底平面、叶尖工艺台外型	铣削	IT10	3.2
2	粗加工叶背定位面	铣削	IT10	3.2
3	加工榫根及工艺台	线切割	IT10	3.2
4	加工工艺台定位孔、粗铣盆侧榫根三角区、背侧榫根三角区、叶背型面、叶盆型面	钻镗、铣削	IT9	3.2

表3 可匹配的承制车间的能力和状态

制造阶段	车间编号	可提供加工方法	可加工材料	工件最大直径 × 最大长度	特征尺寸	精度 IT	表面粗糙度 $R_a / \mu m$	所用设备状态	所用设备负荷率 /%
1	1	铣削	单晶高温合金 (DD6)	满足	满足	11~6	6.4~3.2	正常	30
	10~6					6.4~1.6	正常	20	
2	9	铣削				10~6	6.4~3.2	正常	10
	3	18				线切割	11~8	6.4~3.2	正常
20							10~8	6.4~1.6	正常
4	9	钻镗、铣削				10~6	6.4~3.2	正常	10

步骤一: 设置以下模糊判断矩阵并计算权重:

$$A: \begin{pmatrix} T_A & \text{生产时间} & \text{生产质量} & \text{加工成本} \\ \text{生产时间} & 1 & 1/2 & 2 \\ \text{生产质量} & 2 & 1 & 3 \\ \text{加工成本} & 1/2 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_1: \begin{pmatrix} T_{B_1} & \text{周转时间} & \text{加工时间} \\ \text{周转时间} & 1 & 1/2 \\ \text{加工时间} & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_2: \begin{pmatrix} T_{B_2} & \text{周转成本} & \text{加工成本} \\ \text{周转成本} & 1 & 1/2 \\ \text{加工成本} & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$B_3: \begin{pmatrix} T_{B_3} & \text{尺寸公差} & \text{形位公差} & \text{表面粗糙度} \\ \text{尺寸公差} & 1 & 5 & 7 \\ \text{形位公差} & 1/5 & 1 & 3 \\ \text{表面粗糙度} & 1/7 & 1/3 & 1 \end{pmatrix}$$

$$D: \begin{pmatrix} T_D & \text{制造阶段 1} & \text{制造阶段 2} & \text{制造阶段 3} & \text{制造阶段 4} \\ \text{制造阶段 1} & 1 & 1/2 & 1/3 & 1/4 \\ \text{制造阶段 2} & 2 & 1 & 1/2 & 1/3 \\ \text{制造阶段 3} & 3 & 2 & 1 & 1/2 \\ \text{制造阶段 4} & 4 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

计算得到权重向量 $W_A = (0.30, 0.54, 0.16)^T, \lambda_{Amax} = 3.00,$

表4 各因素评价指标

评价因素		可选路线 1				可选路线 2				可选路线 3				可选路线 4			
		1	9	18	9	1	9	20	9	5	9	18	9	5	9	20	9
生产时间	总周转时间/d	1				1.5				2				1.5			
	总加工时间/d	10				9				10				8			
生产成本	总周转成本/元	100				130				130				110			
	总加工成本/元	1200				1000				1100				800			
加工质量	各制造阶段尺寸公差	0.019	0.020	0.021	0.020	0.020	0.021	0.019	0.020	0.020	0.021	0.018	0.022	0.020	0.022	0.018	0.020
	各制造阶段形位公差	0.018	0.020	0.022	0.020	0.018	0.020	0.021	0.022	0.020	0.020	0.019	0.021	0.020	0.020	0.021	0.019
	各制造阶段表面粗糙度	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2

$C_{AR}=0 < 0.1$, $\mathbf{W}_{B_1}=(0.33, 0.66)^T$, $\mathbf{W}_{B_2}=(0.33, 0.67)^T$, 二阶矩阵必然满足一致性要求, $\mathbf{W}_{B_3}=(0.723, 0.193, 0.084)^T$, $\lambda_{B_3\max}=4.00$, $C_{B_3R}=0 < 0.1$, $\mathbf{W}_D=(0.0960, 0.1811, 0.2771, 0.4658)^T$, $\lambda_D=4.0421$, $C_{DR}=0 < 0.1$ 均满足一致性检验。

步骤二: 计算生产时间、生产成本、各个阶段的加工质量隶属度。

假设工艺分工路线各因素定量值如表4所示。据表1公式(1)~(7)计算4条路线的生产时间、生产成本和加工质量隶属度依次为:

$$\mathbf{R}_{B_1} = \begin{pmatrix} 0.3529 & 0.2353 & 0.1765 & 0.2353 \\ 0.2293 & 0.2548 & 0.2293 & 0.2866 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{R}_{B_2} = \begin{pmatrix} 0.2901 & 0.2231 & 0.2231 & 0.2637 \\ 0.2087 & 0.2505 & 0.2277 & 0.3131 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{R}_{PC} = \begin{pmatrix} 0.2628 & 0.2497 & 0.2378 & 0.2497 \\ 0.2497 & 0.2378 & 0.2628 & 0.2497 \\ 0.2517 & 0.2397 & 0.2797 & 0.2289 \\ 0.2487 & 0.2262 & 0.2764 & 0.2487 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{R}_{PS} = \begin{pmatrix} 0.2764 & 0.2487 & 0.2262 & 0.2487 \\ 0.2797 & 0.2517 & 0.2397 & 0.2289 \\ 0.2497 & 0.2497 & 0.2628 & 0.2378 \\ 0.2497 & 0.2497 & 0.2378 & 0.2628 \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{R}_R = \begin{pmatrix} 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \\ 0.25 & 0.25 & 0.25 & 0.25 \end{pmatrix}.$$

步骤三: 计算决策集 \mathbf{B} , 确定车间顺序。

计算第一层决策集, 由公式(8)计算决策集:

$$\mathbf{B}_{(1)1} = (0.33, 0.2548, 0.2293, 0.2866),$$

$$\mathbf{B}_{(1)2} = (0.2901, 0.2505, 0.2277, 0.3131),$$

$$\mathbf{B}_{(1)3} = (0.2517, 0.2397, 0.2771, 0.2487).$$

由 $\mathbf{B}_{(1)1}$, $\mathbf{B}_{(1)2}$, $\mathbf{B}_{(1)3}$ 构成第二层评判矩阵 \mathbf{R} 为:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} 0.33 & 0.2548 & 0.2293 & 0.2866 \\ 0.2901 & 0.2505 & 0.2277 & 0.3131 \\ 0.2517 & 0.2397 & 0.2771 & 0.2487 \end{pmatrix},$$

由 $\mathbf{B} = \mathbf{W}_A \mathbf{R}$ 计算并归一得第二层决策集 $\mathbf{B}_{(2)} = (0.2734, 0.2322, 0.2090, 0.2854)$, 根据值大小确定路线排序得路线 4 > 路线 1 > 路线 2 > 路线 3。

5 结束语

为了解决零件工艺分工规划中的承制车间选择与路线优化问题, 提高工艺分工规划的可执行性, 本课题对基于车间能力的零件的工艺分工规划方法进行了研究。采用层次分类建模方法对车间能力进行建模, 将车间能力在设备、工装层进行分解, 用以描述车间的能力信息和状态信息。将车间的能力信息及状态信息与零件的工艺信息匹配, 进行工艺分工规划中承制车间的选择, 由于产生多个备选车间而形成多条路线, 因而采用模糊综合评判法进行评价得到路线排序, 最终确定最优分工路线。最后通过实例零件的测试, 验证所述方法产生的零件工艺分工规划信息比较符合实际生产的需要。

参考文献

- [1] Kempenaers J, Pinte J, Detand J, et al. A collaborative process planning and scheduling system. *Advances in Engineering Software*, 1996, 25(1):3-8.
- [2] Chung Chulho, Peng Qingjin. Enabled dynamic tasks planning in web-based virtual manufacturing environments. *Computers in Industry*, 2007, 6(4):3-6.
- [3] 张维方, 田锡天, 张振明, 等. 基于动态制造资源的产品工艺分工规划研究. *计算机工程与应用*. 2004(23):192-211.
- [4] 邱福生, 刘文剑. 型号研制过程的工艺分工规划建模技术研究. *计算机集成制造系统*. 2007(13):1 519-1 527.
- [5] 肖伟跃, 郭惠昕, 杨继荣. CAPP 多工艺方案的模糊综合评判策略. *现代制造工程*, 2003(9):34-37.
- [6] 叶叶成, 柯丽华, 黄德育. 系统综合评价技术及其应用. 北京: 冶金工业出版社, 2006. (责编 小颖)