

# 基于多维关联函数的调整工艺选择

赵燕伟, 史文浩, 桂元坤, 任设东, 洪欢欢

浙江工业大学特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 杭州 310014

**摘要** 为解决快速扩散制造中工艺调整方案的选择问题, 分析工艺调整对扩散制造产生的多种影响, 通过关系矩阵和基于实例搜索的方法定量计算影响值; 在主制企业对影响值提出的约束基础上, 采用多维关联函数的方法, 通过点位置判断和降维计算等过程计算得到符合影响约束范围内调整工艺; 以某型叶片的调整工艺方案选择分析为例, 计算得到主制企业期望的工艺方案, 验证了本方法的适用性和可行性。

**关键词** 快速扩散制造; 工艺扩散; 调整工艺; 多维关联函数; 影响矩阵

**中图分类号** TP391

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.36.003

## Selection and Analysis of Adjustment Technology Based on Multidimensional Correlation Function

ZHAO Yanwei, SHI Wenhao, GUI Yuankun, REN Shedong, HONG Huanhuan

Key Laboratory of Special Equipment and Advanced Processing Technology Ministry of Education, Zhejiang University of Technolong, Hangzhou 310014, China

**Abstract** Aimed at selection and analysis of technology adjustment scheme in rapid proliferating manufacturing, the influence of adjustment technology on proliferation manufacturing is analyzed, and the relationship matrix and case-based reasoning are introduced to quantize the influence. Then, based on the constraint value of influence, judging point location, and reducing dimension, adjustment technology which meets the demand of main enterprises is generated by using multidimensional correlation function. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by the selection and analysis of technology adjustment scheme for a certain type of blade.

**Keywords** rapid proliferating manufacturing; manufacturing technology proliferating; adjustment technology; multidimensional correlation function; relationship matrix

快速扩散制造是军工企业“多研制、少生产、少装备”的武器装备方针下, 战时实现武器装备制造链的快速复制、成网、形成综合制造能力的一种制造模式。“加工工艺扩散”是快速扩散制造模式下, 主研制企业将事先制定好的加工工艺快速复制到扩散制造链, 扩散企业对复制的加工工艺不用修改或者和主研制企业进行局部协同修改后, 就可以进行快速生产, 从而节省工艺研制时间, 快速形成生产能力<sup>[1]</sup>。在工艺扩散过程中, 根据扩散企业的制造能力对加工工艺进行协同修改是其中的关键过程之一。工艺协同修改的结果是形成一系列的工艺调整方案, 选择工艺调整方案, 纳入扩散制造

链中, 是主研制企业必须解决的问题。基于调整工艺产生的影响对调整方案进行选择是一种主要方法。

文献[2]中分析了扩散工艺调整影响分析模型, 研究了扩散工艺对零件加工精度、任务进度的影响机理。文献[3]、[4]通过判定表对调整影响分析进行推理决策分析, 利用产生式规则构造的扩散工艺调整影响规则, 分析的影响范围包括进度变化、质量检测要求、对下道工序的影响、对工艺过程的影响等。上述调整影响分析主要通过人工或知识决策, 缺乏定量的计算过程以及根据影响对多种调整工艺选择决策。

工艺调整方法和调整影响之间存在一定的关联, 可通过

收稿日期: 2014-10-23; 修回日期: 2014-12-01

基金项目: 浙江省自然科学基金项目(Y1110994)

作者简介: 赵燕伟, 教授, 研究方向为数字化产品现代设计、物流配送与优化调度, 电子信箱: zyw@zjut.edu.cn

引用格式: 赵燕伟, 史文浩, 桂元坤, 等. 基于多维关联函数的调整工艺选择[J]. 科技导报, 2014, 32(36): 26-31.

影响关系矩阵<sup>[5]</sup>、基于实例库<sup>[6]</sup>的搜索等方法定量计算工艺调整影响值。传统的影响分析决策如层次分析法、模糊综合评判法等具有较大的模糊性,多维关联函数<sup>[7]</sup>的技术核心是充分考虑多维约束条件,以每个维度计算结果集成为基础的多维距计算方法中的主观因素,实现多维距计算的客观化求解。本文通过关系矩阵和基于实例搜索的技术定量计算影响值,并在主制企业对影响值提出的约束基础上,采用多维关联函数的方法计算得到符合影响约束范围内调整工艺。

## 1 调整工艺的多影响可拓描述及影响值计算

### 1.1 调整工艺的多影响可拓描述

利用3因素的影响来衡量调整工艺:1)调整工艺对任务进度的影响,对原始工艺中工艺要素的调整,将影响到制造任务的加工时间、换装时间、准备时间等。任务进度的影响还可以转化为任务完工时间,以任务完工时间衡量调整工艺;2)调整工艺对工艺路线影响,在工艺扩散的过程中,若调整幅度过大,对主制企业的工艺设计者和制造任务的管理者产生巨大的工作任务,给扩散制造单元链上的扩散企业造成一定的信息混乱;3)调整工艺稳定运行时间,考虑生产的各种不确定因素,主制企业在解集中选择调整方案时必然选择稳定运行时间长的调整工艺方案。

定量计算3因素的影响值后,输入到三维物元中,得到多影响的可拓描述,表示为

$$O = \begin{bmatrix} O_m & c_{m1} & [v_{m1}^1, v_{m1}^2] \\ & c_{m2} & [v_{m2}^1, v_{m2}^2] \\ & c_{m3} & [v_{m3}^1, v_{m3}^2] \end{bmatrix}$$

式中,  $O_m$  为制造工艺产品对象,  $c_{m1}$ 、 $c_{m2}$ 、 $c_{m3}$  分别为调整工艺稳定运行时间、调整工艺对工艺路线影响、调整工艺对任务进度影响的3个特征,  $[v_{m1}^1, v_{m1}^2]$ 、 $[v_{m2}^1, v_{m2}^2]$ 、 $[v_{m3}^1, v_{m3}^2]$  分别为  $O_m$  关于  $c_{m1}$ 、 $c_{m2}$ 、 $c_{m3}$  的量值区间。

影响值计算完成后还需在计算结果基础上对多调整工艺方案进行选择分析,本文采用多维关联函数解决调整工艺的选择决策(图1)。

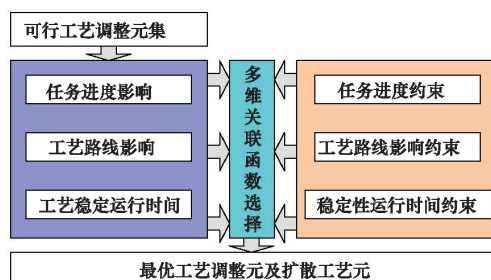


图1 基于多维关联函数的调整工艺选择分析

Fig. 1 Analysis of adjustment technology selection based on multidimensional dependent function

### 1.2 调整工艺的影响值计算

#### 1.2.1 基于影响关系矩阵的任务进度

工艺调整对任务进度影响体现在加工时间改变,工装转

换时间改变,工装再设计、设备调整时间等。考虑工艺快速扩散制造中工艺调整变更的影响范围和特征,工艺调整对任务进度的影响关系。

1) 进度直接影响关系。该影响存在工艺路线上前后两工序之间。由于两工序加工时间紧邻,只有在前道工序完成后下道工序才可启动。

2) 加工特征直接影响关系。该影响存在工艺路线上加工特征相关的前后两道工序之间,当前道工序完成工艺调整时,与该工序加工特征相关的工序也需进行工艺调整。

3) 间接影响关系。该影响为进度直接影响和加工特征直接影响共同作用下,调整工艺节点产生的影响传递到相关联的工艺节点的影响,间接影响体现了调整工艺对任务进度影响的变更传播。

4) 无关影响关系。该影响为调整工艺节点产生的影响对不关联的工艺节点不产生影响。

定义制造工艺链上序号为  $i$  的工艺节点的任务完成需要的时间向量为  $J_i = (j_i^1, j_i^2, j_i^3)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 其中  $j_i^1$ ,  $j_i^2$ ,  $j_i^3$  分别表示该工艺节点加工时间、工装再设计以及设备调试时间、该工艺节点工装转换时间、工艺调整对任务进度的影响用向量表示为  $\Delta J_i = (\Delta j_i^1, \Delta j_i^2, \Delta j_i^3)$ , 其中  $\Delta j_i^1$  表示调整工艺对第  $i$  个工艺节点的加工时间的影响值,  $\Delta j_i^1 = 0$  表示工艺调整对加工时间没有影响,其他依次类推。

工艺调整对任务进度的影响关系是用影响关系矩阵  $R(J_m, J_n)_{3 \times 3}$  来描述的。矩阵元素的值反应了一个任务完成时间实体属性发生变更对另一个实体属性的影响程度,  $R_{ij}$  反映了  $J_m$  实体第  $i$  个属性发生变更时对  $J_n$  实体的第  $j$  个属性的影响程度。进度直接影响关系矩阵中,  $R(J_m, J_n)$  为单位矩阵, 即  $R(J_m, J_n) = E$ 。加工特征直接影响关系矩阵,  $R_{ij}$  的确定依赖于叶片制造领域专家的知识。 $J_n$  的变更对  $J_m$  产生的影响可由  $J_m = J_n R(J_m, J_n)$  计算。迭代计算调整工艺对工艺路线的任务进度影响值步骤为:

步骤1 确定直接影响关系矩阵;

步骤2 确定调整节点及该节点的进度影响值  $\Delta J_i = (\Delta j_i^1, \Delta j_i^2, \Delta j_i^3)$ ;

步骤3 计算调整节点下一个工艺节点进度影响值, 计算式为

$$\Delta J_{i \rightarrow i+1} = \Delta J_i E + J_{i+1} R(J_{i+1}, J_i) \quad (1)$$

步骤4 计算调整节点下下个工艺节点进度影响值, 计算式为

$$\Delta J_{i+1 \rightarrow i+2} = \Delta J_{i \rightarrow i+1} E + J_{i+2} R(J_{i+2}, J_{i+1}) + J_{i+2} R(J_{i+2}, J_i) \quad (2)$$

步骤  $n$  计算调整节点对第  $n$  个工艺节点进度影响值, 计算式为

$$\Delta J_{n-1 \rightarrow n} = \Delta J_{n-2 \rightarrow n-1} E + J_n R(J_n, J_{n-1}) + J_n R(J_n, J_{n-2}) + \dots + J_n R(J_n, J_i) \quad (3)$$

式中,  $R(J_n, J_i)$  代表不同加工节点之间的加工特征直接影响关系矩阵。当两个节点之间不存在加工特征传递时, 其对应的影响关系矩阵为0矩阵。以此可以计算出由于工艺调整而

对工艺链中每个工艺节点的进度影响值。在工艺链中,所有的调整工艺对任务进度的影响值最终都可汇总到工艺末节点,即工艺末节点的任务进度影响值为  $\Delta J = \sum_{n=1}^3 \Delta j^n (i=1,2,3)$ 。

上述过程为一个调整节点的任务进度影响值,对于多个调整节点,则逐个计算后累和即可得到总的任务进度影响值。在生产过程中,整个工艺完成时间为工艺链末节点的原始完成时间与任务进度影响值之和。

### 1.2.2 基于影响关系矩阵的工艺路线

将制造工艺划分为工艺层,工序层,工步层,每个层次的制造工艺信息知识不同。工艺层包括了工艺路线、工艺方法、模具设计、毛坯类型等知识;工序层包括了加工设备、工件装夹方式、工步设计等知识;工步层包括加工余量、切削用量等知识,工艺调整对工艺路线的影响体现在这3个层次上。

调整工艺对工艺路线的影响也可分为直接影响、间接影响、无关影响。工艺调整对工艺路线的影响值矩阵  $J_{te}^i = (j_{te}^{i-1}, j_{te}^{i-2}, j_{te}^{i-3}, j_{te}^{i-4})$  表示对第  $i$  个工艺的影响矩阵,矩阵中每一列分别代表对该工艺层中工艺方法、工艺路线、毛坯类型、模具设计的影响值。 $J_{pro}^i = (j_{pro}^{i-1}, j_{pro}^{i-2}, j_{pro}^{i-3})$  表示对第  $i$  个工序的影响矩阵,矩阵中每一列分别代表对该工序层中加工设备、工步路线、工装夹方式的影响值。 $J_{st}^i = (j_{st}^{i-1}, j_{st}^{i-2}, j_{st}^{i-3}, j_{st}^{i-4})$  表示对第  $i$  个工步的影响矩阵,矩阵中每一列分别代表对工步层中背吃刀量、进给量、切削速度、刀具选择的影响值。

计算调整工艺对工艺路线的影响值步骤为:

步骤1 置工艺链上全部影响值矩阵元素为零。

步骤2 输入工艺链调整节点的调整影响值矩阵  $J_k^i = (j_k^{i-1}, j_k^{i-2}, j_k^{i-3}, j_k^{i-4}) (k=te, pro, st)$ , 矩阵中元素的取值规律见表1。

表1 工艺链影响值矩阵元素取值规律

Table 1 Rules for valuing elements of matrix of technical chain influence

元素取值	工艺改变情况	工序改变情况	工步改变情况
1.0	工艺方法完全改变 工艺路线完全打乱 毛坯完全改变 模具重新设计	加工设备完全替换 工步路线完全打乱 重新设计装夹具	刀具完全改变
0.5	工艺路线部分调整 毛坯尺寸等部分调整 模具部分调整	工步路线部分调整 装夹具部分调整	背吃刀量、进给量、 切削速度调整
0	不变	不变	不变

步骤3 通过影响关系矩阵  $R(J_k^i, J_l^i) (k, l=te, pro, st)$  计算工艺链节点上的工艺调整对工艺链上其它节点的影响值,影响值应包括直接影响和间接影响。

以包含  $J_1, J_2, J_3$  三道工艺的工艺链为例,  $J_1$  对  $J_3$  的直接影响值为  $J_{te \rightarrow te}^{1 \rightarrow 3} = J_{te}^1 \times R(J_{te}^1, J_{te}^3)$ , 间接影响值为  $J_{te \rightarrow te}^{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3} = J_{te}^1 R(J_{te}^1, J_{te}^2) R(J_{te}^2, J_{te}^3)$ ,  $J_3$  的总影响值为

$$J_{te}^3 = J_{te \rightarrow te}^{1 \rightarrow 3} + J_{te \rightarrow te}^{1 \rightarrow 2 \rightarrow 3} = J_{te}^1 R(J_{te}^1, J_{te}^3) + J_{te}^1 R(J_{te}^1, J_{te}^2) R(J_{te}^2, J_{te}^3) \quad (4)$$

关系矩阵中矩阵元素反映工艺要素的变化对其他工艺要素的影响程度,关系矩阵中  $R_{ij}$  的确定依赖于叶片制造领域专家的知识确定。为方便领域专家确定,设定关系矩阵元素的取值为0.9、0.3、0.3个等级,分别代表有“强烈影响”、“没什么影响”和“很难确定是否有影响”3个层次。

步骤4 汇总工艺链中所有工艺层、工序层、工步层的影响值矩阵,其中对每一个单独的影响值矩阵的元素进行累和计算得到该工艺节点的影响值,计算式为

$$SJ_{te}^i = \sum_{p=1}^4 j_{te}^{i-p}, SJ_{pro}^j = \sum_{p=1}^3 j_{pro}^{j-p}, SJ_{st}^l = \sum_{p=1}^4 j_{st}^{l-p} \quad (5)$$

最后计算整条工艺链工艺路线影响值,计算公式为

$$SJ = u_{te} \sum_{i=1}^n SJ_{te}^i + u_{pro} \sum_{i=1}^m SJ_{pro}^i + u_{st} \sum_{i=1}^q SJ_{st}^i = u_{te} \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^4 j_{te}^{i-p} + u_{pro} \sum_{j=1}^m \sum_{p=1}^3 j_{pro}^{j-p} + u_{st} \sum_{l=1}^q \sum_{p=1}^4 j_{st}^{l-p} \quad (6)$$

式中,  $u_{te}$ 、 $u_{pro}$ 、 $u_{st}$  为工艺、工序、工步3个层次影响值的权重,  $u_{te}, u_{pro}, u_{st} \in [0, 1]$ , 且  $u_{te} + u_{pro} + u_{st} = 1$ , 权重值可根据叶片制造专家评审打分获得。

### 1.2.3 工艺稳定运行时间

工艺稳定运行时间是根据具体加工工艺质量统计所得到的工艺稳定生产满足质量要求的任务时间。调整工艺属于原有工艺基础上重新演化变换之后得到的新工艺,无法形成可靠的完整统计质量,必须仰仗历史数据进行决策。基于实例的推理技术 CBR (case-based reasoning)<sup>[9]</sup> 的核心思想是充分利用已有的成功经验作为同类问题的参考解决无法准确预知的问题。

利用 CBR 技术来解决工艺调整对工艺稳定性的影响问题,实例采用层次结构存储,表示为  $C_{case} = (C_1, C_2, \dots, C_n)$ ,  $n$  为总实例个数,每个单独实例可采用物元表示为

$$C_i = \begin{bmatrix} \text{实例 } C_i & \text{调整对象} & O_i \\ & \text{工艺调整层次} & P_i \\ & \text{调整内容} & G_i \\ & \text{调整方法} & M_i \\ & \text{调整结果} & R_i \\ & \text{稳定运行时间} & t_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

结合上面分析实例表示方法和检索方法等,构建了图2所示的叶片扩散工艺调整工艺稳定运行时间计算模型。首先根据调整工艺信息检索调整规则实例库,在对实例进行搜索时,按照调整对象→调整工艺层次→调整内容→调整方法→调整结果顺序进行搜索,先搜索属于同一层次的工艺调整实例,再搜索调整内容一致的实例,继而搜索调整方法一致的实例。对检索到的参考实例进行分析修改,得到当前的工艺稳定性影响结果,修改后的实例作为新的可重用的参考实例添加到影响规则实例库供以后的影响分析使用。

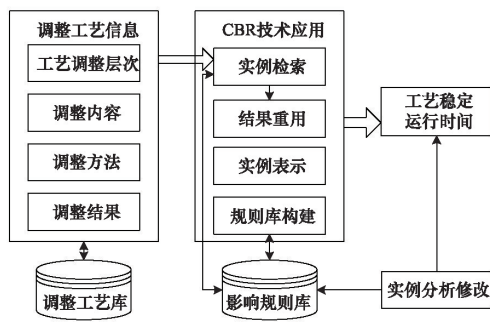


图2 工艺调整对工艺稳定运行时间分析模型

Fig. 2 Analysis model for process stable running time with respect to technology adjustment

## 2 基于多维关联函数调整工艺选择

当工艺调整方案集合以及集合中调整工艺的影响值形成后,为选择工艺调整方案集合中的最优方案纳入扩散制造链,需根据主机企业需求检索方案集合,通过对影响约束值的输入,给出符合要求的工艺调整方案,以此作为最终工艺方案输出的参照设计基础。而影响约束值呈现多维性,构建基于多维关联函数的检索方法,多维关联函数的计算过程为:

步骤1 多维可拓关联函数建模。

设点  $P(x_1, x_2, \dots, x_n)$  为  $S_0$  维空间上任意点,设  $S_0$ 、 $S$  分别为  $S_0 \subseteq S$  维空间上的两个空间(二维为面框,三维为长方体),且  $S_0 \subseteq S$ , 则  $n$  维可拓关联函数为

$$k_{n-D}(P) = \frac{\rho_{n-D}(P, S)}{D_{n-D}(P, S_0, S)} \quad (8)$$

式中,  $\rho_{n-D}(P, S)$  为  $n$  维可拓距,  $D_{n-D}(P, S_0, S)$  为点  $P$  关于两个  $n$  维体  $S_0$  和  $S$  的区间套位值。

步骤2 确定点  $P$  的所属的空间区域。

以3维空间为例,假设某点为  $P=(x_{11}, x_{12}, x_{13})$ , 最优点  $x_0=(x_{01}, x_{02}, x_{03})$ , 则过这两点的直线为

$$l_{x_0P}: \frac{x_1 - x_{01}}{x_{11} - x_{01}} = \frac{x_2 - x_{02}}{x_{12} - x_{02}} = \frac{x_n - x_{03}}{x_{1n} - x_{03}}$$

在3维空间中,判断点  $P$  所属的空间区域,需计算直线与平面的交点情况下就已经知道其中一个维度的边界值,即

$$Fr(2-D): a_1x_1 + a_2x_2 + a_3 = 0 \Big|_{x_i = \Delta x_i^i}$$

其中,  $a_i$  可由平面方程求解而得的常数。

在求解点  $P_1=(l_{x_0P} \cap Fr(2-D))$  时可转换为以下方程式求解问题

$$\begin{cases} \frac{x_1 - x_{01}}{x_{11} - x_{01}} = \frac{x_2 - x_{02}}{x_{12} - x_{02}} = \frac{x_n - x_{03}}{x_{1n} - x_{03}} \\ a_1x_1 + a_2x_2 + a_3 = 0 \\ x_i = \Delta x_i^i \end{cases} \quad \text{s.t.} \begin{cases} 0 \leq x_1 \leq \Delta x_1^1 \\ 0 \leq x_2 \leq \Delta x_2^2 \\ 0 \leq x_3 \leq \Delta x_3^3 \end{cases}$$

通过点  $P_1$  的值可直接断定点  $P$  所属区域(即所在维度)。此外,对于三维关联函数,还可通过几何图形中  $P$  点坐标以及最优点的坐标,判断点  $P$  的大概位置区间。

步骤3 多维关联函数降维计算,当明确点  $P$  落在多维空

间的区域时,可直接降维到该区域所在轴向的一维空间方法计算其多维关联函数值。

步骤4 根据多维关联函数值判断调整工艺影响值是否符合约束值,判断规则:1) 当  $k_{n-D}(P) \geq 1$  时,判定点  $P \in S_0$ , 且其数值愈大,表明点  $P$  符合  $S_0$  程度愈高,即  $P$  属于  $S_0$  中事物的条件愈具备;2) 当  $0 \leq k_{n-D}(P) < 1$  时,判定点  $P \in S$  但点  $P \notin S_0$ , 且其绝对值愈小,表明点  $P$  可拓为  $S_0$  中事物的条件愈具备;3) 当  $k_{n-D}(P) < 0$  时,判定点  $P \notin S_0$  并且  $P \notin S$  其绝对值愈大,表明点  $P$  符合  $S_0$  的条件愈差。

## 3 实例计算

### 3.1 影响因素值计算

以某型叶片的加工工艺扩散过程为实例,对其原始工艺进行调整,得到3个工艺调整方案  $T_1 \sim T_3$ , 以方案  $T_1$  为例计算该方案的工艺调整影响值。

#### 3.1.1 任务进度影响值

该叶片的原始制造工艺路线为模锻毛坯→叶身型面加工→进排气边加工→叶根加工→榫头铣削→工艺凸台切除→喷丸→振动光饰。经工艺调整后,形成的扩散工艺路线为精锻毛坯→叶身型面加工→进排气边加工→叶根加工→榫头铣削→榫头磨削→工艺凸台切除→喷丸→振动光饰。

采用精锻毛坯后,叶身型面不需要加工,关系矩阵为0矩阵,此外叶片其它机加工余量变小,加工时间变短,但是需重新调整叶片精锻设备工装等,计算过程为:

第1步 原始工艺模锻毛坯的时间向量为  $J_1=(0.3, 0.3, 0.4)$ , 调整为精锻工艺之后,  $\Delta J_1=(-0.1, 0.1, 0.1)$ 。

第2步 工艺叶身型面加工进度影响值为  $\Delta J_{1 \rightarrow 2} = \Delta J_1 E^2 + J_2 R(J_2, J_1) - J_2$ 。

$$\Delta J_{1 \rightarrow 2} = (-0.1, 0.1, 0.1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + (0.8, 0.2, 0.2) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (-0.1, 0.1, 0.1)$$

第3步 计算进气边加工进度影响值,由于精锻毛坯与之有加工特征传递,故计算式为  $\Delta J_{2 \rightarrow 3} = \Delta J_{1 \rightarrow 2} E + J_3 R(J_3, J_1)$ 。

$$\Delta J_{2 \rightarrow 3} = (-0.1, 0.1, 0.1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + (0.3, 0.2, 0.1) \begin{bmatrix} -0.4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (-0.22, 0.1, 0.1)$$

第4步 计算叶根加工进度影响值,由于精锻毛坯与之有加工特征传递,计算式为  $\Delta J_{3 \rightarrow 4} = \Delta J_{2 \rightarrow 3} E + J_4 R(J_4, J_1)$ 。

$$\Delta J_{3 \rightarrow 4} = (-0.22, 0.1, 0.1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + (0.4, 0.05, 0.05) \begin{bmatrix} -0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (-0.26, 0.1, 0.1)$$

第5步 计算榫头铣削加工进度影响值,由于精锻毛坯与之有加工特征传递,计算式为  $\Delta J_{4 \rightarrow 5} = \Delta J_{3 \rightarrow 4} E + J_5 R(J_5, J_1)$ 。

$$\Delta J_{4 \rightarrow 5} = (-0.26, 0.1, 0.1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + (0.2, 0.1, 0.1) \begin{bmatrix} -0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (-0.36, 0.1, 0.1)$$

第6步 计算榫头磨削加工进度影响值,由于精锻毛坯、榫头铣削与之有加工特征传递,计算式为  $\Delta J_{5 \rightarrow 6} = \Delta J_{4 \rightarrow 5} E + J_6 R(J_6, J_1) + J_6 R(J_6, J_5)$ 。

$$\Delta J_{5 \rightarrow 6} = (-0.36, 0.1, 0.1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + (0.05, 0.025, 0.025) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + (0.05, 0.025, 0.025) \begin{bmatrix} 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (-0.285, 0.125, 0.125)$$

第7步 计算凸台切割加工进度影响值,由于精锻毛坯与之有加工特征传递,计算式为  $\Delta J_{6 \rightarrow 7} = \Delta J_{5 \rightarrow 6} E + J_7 R(J_7, J_1)$ 。

$$\Delta J_{6 \rightarrow 7} = (-0.285, 0.125, 0.125) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + (0.01, 0.005, 0.005) \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (-0.295, 0.125, 0.125)$$

第8、9步 仅存在进度直接影响关系,因此合并计算,计算式为  $\Delta J_{7 \rightarrow 9} = \Delta J_{7 \rightarrow 9} E^2$ 。

$$\Delta J_{7 \rightarrow 9} = (-0.295, 0.125, 0.125) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = (-0.295, 0.125, 0.125)$$

工艺调整方案  $T_1$  对任务进度的影响值为

$$\Delta J = \sum_{n=1}^3 \Delta J^n (i=1, 2, 3) = -0.295 + 0.125 \times 2 = -0.045$$

原始工艺完成时间为4 d,计算调整工艺完成时间为3.955 d。

### 3.1.2 工艺路线影响值

工艺调整方案  $T_1$  从内容上看,包括叶片毛坯置换,机加工方法和路线改变,其产生的影响从工艺层次上分析,计算过程为:

第1步 输入工艺链调整节点的调整影响值矩阵  $J_{ic}^1 = (J_{ic}^{j_1-1}, J_{ic}^{j_1-2}, J_{ic}^{j_1-3}, J_{ic}^{j_1-4}) = (1, 1, 1, 1)$  为第一个工艺(模锻)的调整影响值矩阵。 $J_{ic}^5 = (J_{ic}^{j_5-1}, J_{ic}^{j_5-2}, J_{ic}^{j_5-3}, J_{ic}^{j_5-4}) = (0.5, 0.5, 1, 0)$  为第5个工艺(榫头铣削)的调整影响值矩阵。

第2步 计算工艺链节点上的工艺调整对工艺链上其他节点的影响值。计算毛坯的改变对叶身型面加工工艺的影响,计算式为  $J_{ic \rightarrow ic}^{1 \rightarrow 2} = J_{ic}^1 R(J_{ic}^1, J_{ic}^2)$

$$J_{ic \rightarrow ic}^{1 \rightarrow 2} = (1, 1, 1, 1) \begin{bmatrix} 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.9 \end{bmatrix} = (0.9, 0.9, 0.9, 0.9)$$

毛坯的改变,还影响到进排气边加工、叶根加工、榫头铣削凸台切割工艺中加工余量,计算式为

$$J_{ic \rightarrow st}^{1 \rightarrow i} = J_{ic}^1 R(J_{ic}^1, J_{st}^i) (i=2, 3, 4, 6)$$

$$J_{ic \rightarrow ic}^{1 \rightarrow 2} = (1, 1, 1, 1) \begin{bmatrix} 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = (0.3, 0, 0, 0)$$

第3步 计算整条工艺链上的工艺路线影响值。根据上文公式以及给定的  $(u_{ic}, u_{pvo}, u_{st}) = (0.57, 0.32, 0.11)$  计算工艺调整方案  $T_1$  对工艺路线产生的影响。计算结果为

$$SJ = 0.57 \times (1 \times 5 + 0.5 \times 2 + 0.9 \times 4) + 0.32 \times 0 + 0.11 \times (0.3 \times 4) = 5.604$$

### 3.1.3 工艺稳定运行时间

工艺调整方案  $T_1$  的物元表示为

$$C_1 = \begin{bmatrix} \text{调整方案 } T_1 & \text{调整对象} & \text{压气机转子叶片} \\ & \text{工艺调整层次} & \text{工艺层} \\ & \text{调整内容} & \text{毛坯类型} \oplus \text{工艺方法} \oplus \\ & \text{调整方法} & \text{工艺路线} \\ & \text{调整结果} & \text{置换} \oplus \text{增加} \\ & \text{稳定运行时间} & \text{精锻毛坯} \oplus \text{磨削} \\ & & t_1 \end{bmatrix}$$

检索实例库,得到两个相似实例,

$$\text{实例 } C_i = \begin{bmatrix} \text{调整对象} & \text{压气机转子叶片} \\ \text{工艺调整层次} & \text{工艺层} \\ \text{调整内容} & \text{毛坯类型} \oplus \text{工艺方法} \\ \text{调整方法} & \text{置换} \oplus \text{增加} \\ \text{调整结果} & \text{半精锻毛坯} \oplus \text{磨削} \\ \text{稳定运行时间} & 8.5 \text{ d} \end{bmatrix}$$

$$\text{实例 } C_j = \begin{bmatrix} \text{调整对象} & \text{压气机转子叶片} \\ \text{工艺调整层次} & \text{工艺层} \\ \text{调整内容} & \text{毛坯类型} \oplus \text{工艺方法} \\ \text{调整方法} & \text{置换} \oplus \text{增加} \\ \text{调整结果} & \text{精锻毛坯} \oplus \text{拉削} \\ \text{稳定运行时间} & 7 \text{ d} \end{bmatrix}$$

考虑实例  $C_i$  与物元  $C_1$  更接近,因此在对稳定运行时间进行决策时,将其纳入参考实例,并采用公式  $t_1 = u_i$  对其进行适当修改,计算  $t_1 = 0.7 \times 8.5 = 5.95 \text{ d}$ 。其中,修正系数  $u = \frac{\text{半精锻毛坯切削余量} - \text{精锻毛坯切削余量}}{\text{半精锻毛坯切削余量}} = 0.7$ 。

计算其他两个工艺调整方案,表2为工艺调整方案影响值汇总。

表2 工艺调整方案影响值汇总

Table 2 Summary of influence values of technology adjustment scheme

方案代号	稳定运行时间/d	工艺路线影响值	任务完工时间/d
$T_1$	5.95	5.604	3.955
$T_2$	6.01	1.340	5.530
$T_3$	4.60	1.010	6.310

### 3.2 基于多维关联函数的调整工艺检索

主制企业对调整工艺影响值的需求区间为

$$\left[ \begin{array}{ll} \text{某型号压气机叶片} & \text{稳定运行时间} \\ & \text{对工艺路线的影响} \\ & \text{任务完工时间} \end{array} \right] \begin{array}{l} [5, 9] \text{d} \\ [1, 4] \\ [2, 5] \text{d} \end{array}, \text{同时,主}$$

制企业在任务影响值的需求区间基础上给出了影响值的可行区间即约束拓展空间,为

$$\left[ \begin{array}{ll} \text{某型号压气机叶片} & \text{稳定运行时间} \\ & \text{对工艺路线的影响} \\ & \text{任务完工时间} \end{array} \right] \begin{array}{l} [3, 11] \text{d} \\ [0, 6] \\ [1, 7] \text{d} \end{array}, \text{各影响因}$$

素最优值分别为8, 2和3 d。

当主制企业的影响因素、需求区间、可行区间以及最优

值确定之后,可建立基于任务完工时间、对工艺路线的影响和工艺稳定性三维可拓关联函数,然后将生成的扩散工艺方案的对应指标带入,计算每个方案的可拓关联函数值,进而得出最符合扩散制造任务要求的调整工艺。

建立基于任务完工时间、对工艺路线的影响以及工艺稳定运行时间的三维可拓关联函数分析(图3)。

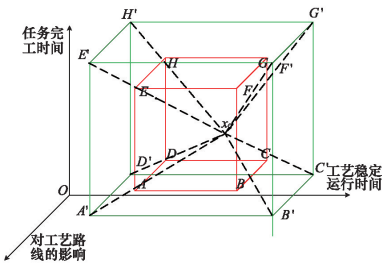


图3 任务完工时间、对工艺路线的影响以及工艺稳定运行时间的三维可拓关联函数分析

Fig. 3 Three dimensional extension dependent function analysis diagram of task completion time, influence of process route and stable operation time

图3中红色空间 $S_1$ 为影响值约束空间,绿色空间 $S_2$ 为影响值约束拓展空间、最优点 $A(5,3,0)$ ,其中, $O$ 为可拓与空间的几何中心。计算工艺稳定运行时间关联函数、工艺路线的影响值关联函数、任务完工时间影响值关联函数得:

$$k(x) = \frac{\rho_r(x, x_0, X)}{D(x, X_0, X)} = \begin{cases} \frac{3-x}{2} & x \leq 5 \\ \frac{3-x}{6} & 5 < x \leq 8 \\ \frac{55-5x}{18} & 8 < x \leq 9 \\ \frac{55-5x}{6} & 9 < x \leq 11 \\ \frac{x-11}{2} & x > 11 \end{cases}$$

$$k(y) = \begin{cases} \frac{-y}{|y-3|-|y-2.5|-1.5} & y \leq 0 \\ \frac{-2y}{|y-3|-|y-2.5|-1.5} & 0 < y \leq 1 \\ \frac{-2y}{|y-3|-|y-2.5|-4.5} & 1 < y \leq 2 \\ \frac{y-4}{|y-3|-|y-2.5|-4.5} & 2 < y \leq 4 \\ \frac{y-6}{|y-3|-|y-2.5|-1.5} & y > 4 \end{cases}$$

$$k(z) = \begin{cases} \frac{1-z}{|z-4|-|z-3.5|-1.5} & z \leq 1 \\ \frac{-2z+2}{|z-4|-|z-3.5|-1.5} & 1 < z \leq 2 \\ \frac{-2z+2}{|z-4|-|z-3.5|-4.5} & 2 < z \leq 3 \\ \frac{z-7}{|z-4|-|z-3.5|-4.5} & 3 < z \leq 5 \\ \frac{z-7}{|z-4|-|z-3.5|-1.5} & z > 5 \end{cases}$$

再结合点 $x_0$ 和需求点的坐标,判断调整方案 $T_1 \sim T_3$ 的影

响值位于 $x_0 - A'B'F'E'$ 、 $x_0 - F'G'H'E'$ 、 $x_0 - F'G'H'E'$ 内部,因此根据三维关联函数以及其实际降噪效果可知, $k(T_1)$ 、 $k(T_2)$ 、 $k(T_3)$ 的求解过程可以分别转化为一维工艺路线影响轴、一维任务完工时间轴、一维任务完工时间轴求解,故调整方案对应的三维关联函数值分别为

$$k(T_1) = k(y_1) = 0.198, k(T_2) = k(z_2) = 0.735, k(T_3) = k(z_3) = 0.345$$

通过判定规则(2)可知在三个调整方案中调整工艺 $T_2$ 的影响值可拓为 $S_1$ 中事物的条件最具备,调整方案 $T_2$ 最接近主制企业对调整工艺的约束要求,在选择调整工艺时应优先考虑该方案。

#### 4 结论

考虑了调整工艺的多影响和多约束问题,将多维关联函数中关联值的客观化求解过程引入到调整工艺的选择分析中,同时结合使用影响矩阵、基于实例检索的方法,提出了影响值的求解和调整工艺选择计算过程。介绍了工艺调整对扩散制造链产生的多种影响,分别从影响关系矩阵和基于实例的检索构建了计算影响值的计算过程;针对从工艺调整方案集中获取主制企业期望的工艺解决方案,在主制企业对影响值提出的约束基础上,采用多维关联函数的方法计算得到符合影响约束范围内调整工艺。由于快速扩散制造及工艺调整是一项处于发展中的研究方向,未来有必要研究更加复杂的影响值和影响约束问题,使其更具有有效性和实用性。

#### 参考文献(References)

- [1] 赵岩, 莫蓉. 面向快速扩散制造的逻辑生产线设计关键技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(7): 1270-1278.  
Zhao Yan, Mo Rong. Key techniques for logic production line design oriented to the rapid extended manufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(7): 1270-1278.
- [2] 刘娇剑. 支持快速扩散制造的工艺扩散关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.  
Liu Jiaojian. The diffusion research key technologies supporting rapid extended manufacturing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [3] 俞烽, 廖文和, 谢亚楠, 等. 扩散工艺调整模型研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(12): 2322-2327.  
Yu Feng, Liao Wenhe, Xie Yanan, et al. Proliferative process adjustment model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(12): 2322-2327.
- [4] 高世文. 武器装备快速扩散制造系统及关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.  
Gao Shiwen. The rapid extended manufacturing system and its key technology research of weapons[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010.
- [5] 王际坤, 魏法杰. 工程变更影响分析与评估研究[J]. 工业工程, 2006, 9(3): 32-35, 79.  
Wang Jikun, Wei Fajie. Analysis and evaluation of the impacts on engineering change [J]. Industrial Engineering Journal, 2006, 9(3): 32-35, 79.
- [6] 徐修文, 邱顺流, 宋豫川, 等. 离散制造车间动态事件影响评估方法[J]. 重庆大学学报, 2012(S1): 1-5.  
Xu Xuiwen, Qiu Shunliu, Song Yuchuan, et al. The assessment methods of discrete manufacturing plant dynamic event impact[J]. Journal of Chongqing University, 2012(S1): 1-5.
- [7] Florentin S. Extensics in higher dimensions [M]. Columbus: The Educational Publisher, 2012.

(责任编辑 赵业玲)