

控制与决策

Control and Decision

特征加工链选用规律的挖掘、修正及其在工艺决策中的应用

李春磊, 李亮

引用本文:

李春磊, 李亮. 特征加工链选用规律的挖掘、修正及其在工艺决策中的应用[J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2865–2874.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0367>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

战术级兵棋实体作战行动智能决策方法

Intelligent decision-making method of tactical-level wargames

控制与决策. 2020, 35(12): 2977–2985 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0504>

双层多态加权 k/n 系统可用性模型与冗余设计优化

Availability modeling and redundancy design optimization of dual hierarchical multi-state weighted k/n system

控制与决策. 2020, 35(11): 2752–2760 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1752>

社会网络视角下允许弃权的群决策权力分布

Power analysis of voting games with abstention based on social networks

控制与决策. 2020, 35(11): 2599–2608 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0346>

考虑时间序列的动态大群体应急决策方法

Dynamic large group emergency decision-making method considering time series

控制与决策. 2020, 35(11): 2609–2618 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0088>

基于SRCASAC评价框架挖掘的跨语言查询译后扩展

Cross language query post-translation expansion based on the SRCASAC evaluation framework mining

控制与决策. 2020, 35(11): 2787–2796 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1647>

特征加工链选用规律的挖掘、修正及其在工艺决策中的应用

李春磊[†], 李 亮

(1. 宝鸡文理学院 机械工程学院, 陕西 宝鸡 721016;

2. 陕西省机器人关键零部件先进制造与评估省市共建重点实验室, 陕西 宝鸡 721016)

摘 要: 有别于其他直接以形状相似性或语义相似性作为工艺决策推理基础的研究, 在充分考虑特征加工链选用规律对工艺设计活动影响的基础上, 将对特征加工链选用规律的挖掘及其合理修正结果作为支持工艺决策的证据, 确保工艺设计决策的有效性. 首先, 对特征的工艺实现需求进行分组, 并利用统计方法对符合具体需求的特征加工链的选用规律进行挖掘; 然后, 对符合需求特征加工链的理论使用概率进行分析, 并用获得的理论概率修正所对应加工链的实际选用规律; 最后, 以修正后的规律作为工艺决策的依据, 利用 D-S 证据理论实现特征加工链的选用决策. 实例验证表明, 所提出的方法具有可行性.

关键词: 特征加工链; 选用规律; 规律修正; 工艺决策; D-S 证据理论

中图分类号: TP391

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0367

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 李春磊, 李亮. 特征加工链选用规律的挖掘、修正及其在工艺决策中的应用 [J]. 控制与决策, 2020, 35(12): 2865-2874.

Mining and correction of selection rule of feature operation chain and their application in process design

LI Chun-lei[†], LI Liang

(1. School of Mechanical Engineering, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721016, China; 2. Shaanxi Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Evaluation of Robot Key Components Co-founded by Baoji and the Shaanxi Department of Science and Technology, Baoji 721016, China)

Abstract: Differing in an important aspect from other process reasoning and decision methods based on shape similarity and semantic similarity, the proposed methods considers sufficiently the effect of the selection rule of a feature operation chain on process design activity. Mining the selection rule of the feature operation chain and its correction result are regarded as the supporting evidence of design-making, which ensure the effectiveness of process design. First of all, the process realization requirements are grouped, and the selection rule is mined by conducting statistics of the feature operation chain that matching specific requirements. Then the theoretical selection probability of the matched feature operation chain is analyzed, and the actual selection rule is corrected by using the obtained theoretical selection probability. Finally, the correction selection probability is held as evidence, and then the D-S evidence theory is used for decision-making of the feature operation chain. Experimental results show the effectiveness of proposed method.

Keywords: feature operation chain; selection rules; rule correction; process design; D-S evidence theory

0 引 言

随着制造企业生产过程的延续和发展,企业积累了大量的工艺设计方案,这些方案凝聚了企业的工艺设计成果和经验,已成为企业当前最重要的知识资源之一. 如何在这些资源中找寻到最贴近企业生产实际和加工意图的成熟工艺方案,是制造企业缩短产业

研制周期、提升其应对外部市场环境变化的响应能力的关键问题之一,也是企业提高其工艺成果重用水平和创新能力的重要途径. 特征加工链是对产品局部结构特征形成过程的工艺安排,是规划工艺路线的前提,它在一定程度上能够反映工艺人员的设计意图和企业能够调用的生产资源,是开展工业设计活动的

收稿日期: 2019-03-27; 修回日期: 2019-08-31.

基金项目: 陕西省重点研发计划项目(2019GY-091).

责任编委: 阳春华.

[†]通讯作者. E-mail: 602lcl-602lcl@163.com.

基础. 对企业以往成熟的特征工艺链采用情况进行分析, 捕捉其选用规律, 能够为面向类似的工艺设计活动提供决策支持, 是快速精准定位匹配企业生产实际和设计意图的最优方案、减少已生成工艺修订几率的有效途径之一.

近年来, 国内外很多学者对特征加工链的选用问题进行研究, 取得了丰富的成果. 三维CAD模型的局部结构检索方法^[1-4]认为相似结构具有相似工艺, 通过检索出与特征对象结构相似的其他产品的局部几何结构实现对相似结构工艺的重用. 但这种方法需要将CAD模型进行分割, 并构建易度量的局部几何结构模型, 分割条件复杂且存在一定随意性, 模型的表示精度直接制约度量的准确性, 而且在面对结构复杂的被检索对象时计算效率较低. 加工特征识别方法^[5-8]提出了特征的数学表达方法, 将对象特征的数学表示模型在特征库中进行同构匹配, 取匹配度最高的库中特征作为对象识别结果, 实现对识别结果工艺方案的参考与借鉴. 这种方法需要建立不同加工特征的统一表达模式并提出同构匹配算法, 忽视了不同加工特征表达的差异性, 而且同一特征的形成往往可以通过多种工艺方案实现, 匹配到特征的加工链不一定适用于设计对象的加工实际. 基于神经网络、进化算法等智能优化理论的加工方法选择方法^[9-10]是近年来的研究热点, 这类方法省去了构建精确决策模型的步骤, 通过自身迭代或网络训练输出近似最优解, 但实际应用中会受到进化规则合理性和训练样本容量的限制, 所以也不是一种完备的方法. 考虑到上述方法的局限性, 文献[11-12]提出了工艺人员的设计意图是工艺决策和重用依据的观点, 但加工意图蕴含在工艺人员的大脑中, 很难对其进行精确的数学描述, 而且意图融入工艺决策流程的机理不明晰, 方式有待挖掘, 这些都制约了该类方法的应用.

本文认为针对具体企业, 其以往产生的海量工艺设计成果中隐藏了众多影响工艺决策的信息, 例如企业的制造加工水平, 拥有的加工设备种类和数量, 以及工艺人员面对具体对象的设计倾向性等. 因此, 通过对这种隐性、抽象的工艺设计规律进行挖掘, 能够更好地支持工艺决策. 首先, 对特征的工艺实现需求进行分组, 并利用统计方法对符合具体需求的特征加工链的选用规律进行挖掘; 然后, 对符合需求特征加工链的理论使用概率进行分析, 并用获得的理论概率修正所对应加工链的实际选用规律; 最后, 以修正后的规律作为工艺决策的依据, 利用D-S证据理论实现特征加工链的选用决策.

1 特征加工链选用规律的挖掘

特征加工链的选用规律反映了工艺人员在面对类似设计对象时, 他的工艺设计倾向性及其手头所能调动的制造资源, 对工艺设计的知识、经验和企业的实际生产情况具有强依赖性. 特征加工链的选用规律具有表达的模糊性和个体间的差异性, 难以用精准模型进行表示. 考虑到特征加工链的选用规律隐藏在以往积累的海量工艺成果中, 所以通过对这些成果的统计分析, 可以间接实现对工艺选用规律的捕捉和描述, 即积累工艺设计成果的统计分布特性可以反映工艺选用规律. 例如针对零件上的某孔特征确定加工方案时, 对与该孔的工艺实现需求(孔径、表面粗糙度和加工精度等)相似的其他孔, 因为受工艺人员的设计倾向性和实际制造资源所限, 往往都会采用相同的工艺方案, 即表现出工艺实现需求相似的孔特征加工方案也相同. 因此, 通过研究隐藏在企业以往大量工艺设计成果中的特征工艺链选用规律可以支持快速工艺设计.

1.1 特征的工艺实现需求分组

特征加工链的选用受到工艺实现需求的限制, 面对不同的加工精度、粗糙度以及特征结构的主要几何尺寸, 所采用的加工方案也存在不同. 以孔特征为例, 在对其加工链选用规律进行分析时, 需要考虑孔特征的加工精度、表面粗糙度和孔径等工艺实现需求. 通过分析, 将加工精度等级和表面粗糙度合并为一个因素, 称为TSR (tolerance surface roughness) 因素. 因此, 孔特征工艺实现需求所属的3个主要因素经过合并后所得到的两个因素及其水平分别为:

1) 孔径 d 包括的水平有: 小孔($d \leq 20 \text{ mm}$) = 1, 中孔($20 \text{ mm} < d \leq 60 \text{ mm}$) = 2, 大孔($d > 60 \text{ mm}$) = 3;

2) TSR 因素包括的水平有: IT11~IT13(Ra12.5) = 1, IT9 ~ IT10 (Ra3.2 ~ Ra6.3) = 2, IT6 ~ IT8 (Ra0.4 ~ Ra3.2) = 3, IT3 ~ IT5(Ra0.05 ~ Ra0.2) = 4, IT9 ~ IT10 (Ra0.4 ~ Ra3.2) = 5, IT6 ~ IT8 (Ra0.05 ~ Ra1.6) = 6.

当利用均匀设计表对特征的工艺实现需求进行分组时, 首先要根据因素分组的目的、涉及的因素和相应的水平, 选择适合该因素分组的均匀设计表. 若各因素的水平数不等, 则还需要采用拟水平法将均匀水平的设计表转换为混合水平设计表^[13]. 表1为孔特征工艺实现需求因素的混合均匀设计表 $U_{12}^*(3 \times 6)$, 组合方案1~12为代表性的分组结果.

表1 孔特征工艺实现需求因素的混合均匀设计表

组合方案(f)	孔径因素(v_1)	TSR因素(v_2)
1	1	5
2	1	2
3	1	6
4	1	3
5	2	4
6	2	1
7	2	6
8	2	3
9	3	4
10	3	1
11	3	5
12	3	2

1.2 匹配工艺实现需求的加工链选用规律捕捉

本文通过统计分析某企业的过往工艺设计成果,研究特征工艺链的选用规律,其中,将重点考虑特征工艺实现需求对最终形成的特征加工方案的影响.在给定特征工艺实现需求的条件下,提取过往工艺设计成果中所有满足给定条件的特征工艺链,并对提取工艺链的实际选用规律进行建模.

首先,对过往工艺设计成果进行分类归纳,对所有符合特定工艺实现需求的特征加工链进行提取.以表1中的工艺实现需求组别 f_7 为例,孔径要求在20~60 mm的范围内,要达到的加工精度等级为IT6~IT8,要达到的表面粗糙度值的范围为Ra0.05~Ra1.6.提取该企业以往工艺设计成果中满足条件 f_7 的所有特征工艺链,如表2所示.显而易见,针对工艺实现需求条件 f_7 ,基于企业已有的生产条件和设备,表2中的特征加工链均能满足.

表2 工艺实现需求 f_7 下的所有孔特征加工方法

特征加工链	工序1	工序2	工序3	工序4
m_1	钻	扩	粗铰	精铰
m_2	钻	扩	机铰	手铰
m_3	粗扩	精扩	粗铰	精铰
m_4	粗镗	半精镗	精镗	浮动镗
m_5	粗扩	精扩	铰	浮动镗
m_6	粗镗	半精镗	粗磨	精磨
m_7	扩	半精镗	粗磨	精磨
m_8	钻	粗铰	精铰	研磨
m_9	扩	粗铰	精铰	研磨
m_{10}	粗镗	半精镗	精镗	研磨

针对特定工艺实现需求,工艺选择决策的结果既是必然的,又是偶然的.必然性体现在企业的实际生产条件会对工艺选择决策的多样性发挥产生限制;而偶然性则表现为不同工艺人员对待同一对象可能表现出多种设计倾向,使得在“必然性”限制的一个

小的选择范围内存在多种可能性.统计方法正是处理这种单个决策结果兼具必然性和偶然性的有力工具,它能揭示工艺决策活动的整体性规律.显然,不满足特定工艺需求和企业实际生产条件的工艺方案不会产生,即不会被统计;而满足这些需求的特征工艺方案会视满足度的大小而表现出不同的概率,能够很好适应企业实际生产状况和工艺人员设计倾向的工艺方案会被更多地采用,即被统计到的次数越多,出现概率也越高.因此,采用统计方法对满足特定工艺实现需求的所有特征加工链进行分析,挖掘其背后的隐性规律可以更好地支持工艺设计活动.考虑到加工精度等级和特征表面粗糙度是影响工艺决策的最关键要素,本文将通过统计分析提取到工艺链在企业以往工艺设计活动中达到的加工精度和表面粗糙度水平的分布情况,实现对实际工艺选用规律的挖掘.

对表2提取到工艺链的实际选用规律分布进行分析,可利用下式进行计算:

$$\begin{cases} P_{IT}^i(m_j) = \frac{|IT_i(m_j)|}{\sum |IT_i(m_j)|}, IT_i(m_j) \geq IT_H(m_j); \\ P_{Ra}^k(m_j) = \frac{|Ra_k(m_j)|}{\sum |Ra_k(m_j)|}, Ra_k(m_j) \geq Ra_H(m_j). \end{cases} \quad (1)$$

其中: m_j 表示提取到的加工链, j 为特征加工链编号; $P_{IT}^i(m_j)$ 是从加工精度出发,描述 m_j 的选用规律分布; $P_{Ra}^k(m_j)$ 是从加工后达到的表面粗糙度水平出发,描述 m_j 的选用规律分布; $|IT_i(m_j)|$ 表示由 m_j 所形成的加工精度等级为 i 的所有特征加工方案的数量; $|Ra_k(m_j)|$ 表示由 m_j 所形成的表面粗糙度值为 k 的所有特征加工方案的数量; $IT_H(m_j)$ 和 $Ra_H(m_j)$ 是特征加工方法 m_j 所能达到的精度等级和表面粗糙度值的上限,代表该加工链的最高加工能力.

以表2所列特征加工链为例,对其在企业过往工艺设计成果中的选用情况进行统计,得到如图1所示的统计直方图.可以看出,各直方图均由峰值向两侧以不同速率衰减,仅峰值所处位置及两侧衰减速度有所不同.为了使最终得到的表面粗糙度值的统计直方图能够均匀展现,针对粗糙度等级划分的等比特性,这里将Ra横轴设置成对数坐标轴.

将统计结果代入式(1)中进行计算,可以得到特征加工链的选用规律,这里也可以应用统计直方图进行表示,只是将各直方图的纵坐标从方案选用数量替换成概率计算结果即可.为了使得到的选用规律更易清晰表达,本文使用文献[14]所述方法对统计直方图进行抽象,如图2所示.

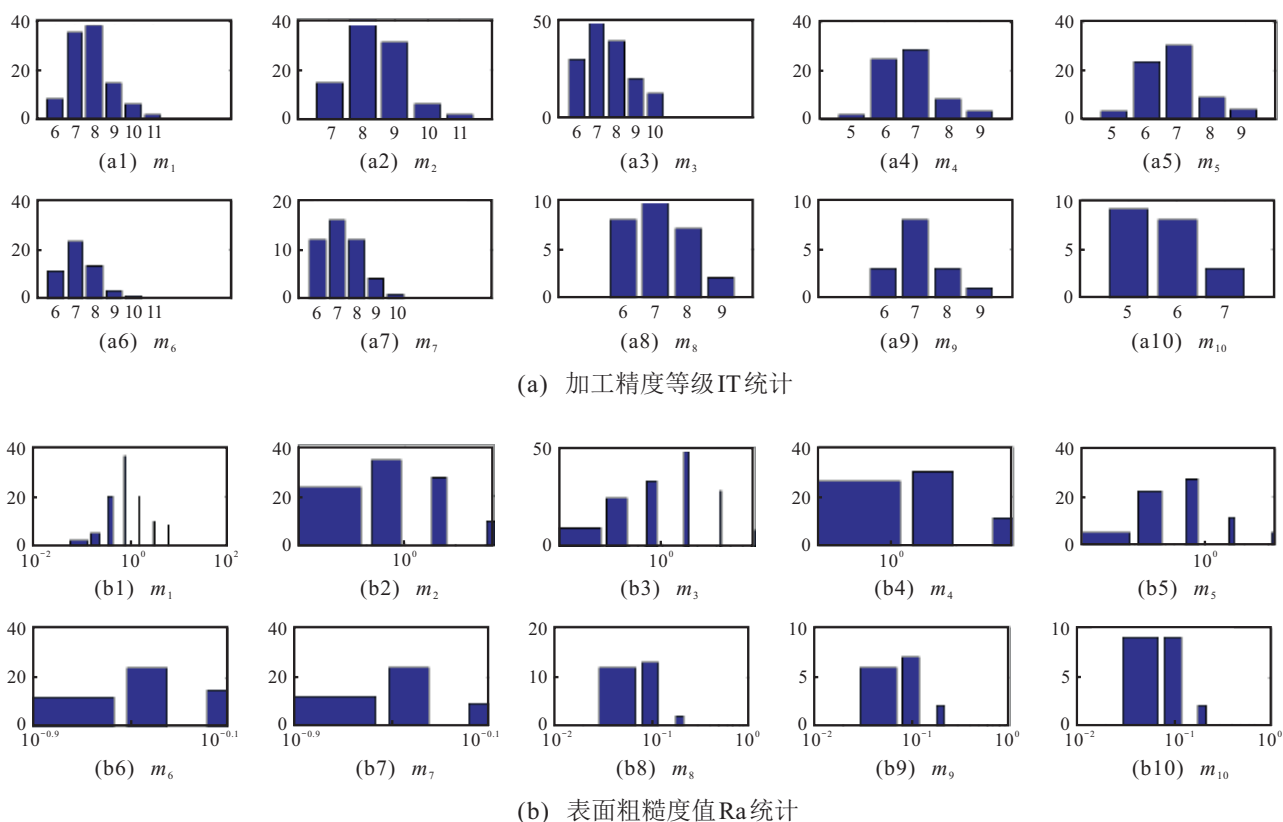


图1 孔特征加工链历史选用情况的统计直方图

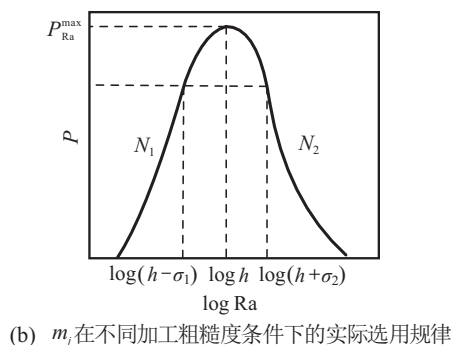
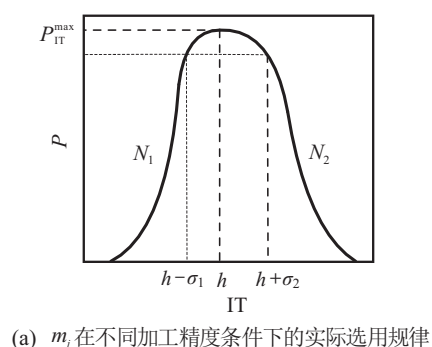


图2 特征工艺链的选用规律模型

以 m_j 的加工精度等级分布规律为例, 使用两段不对称的正态分布曲线 N_1 和 N_2 分别对直方图两侧的衰减情况进行模拟, 峰值对应的最大概率值 $P_{IT}^{\max} = \max(P_{IT}^i(m_j))$, 与 N_1 、 N_2 相对应的标准差 σ_1 和 σ_2 则通过下式进行计算:

$$h = N_1^{-1}(P_{IT}^{\max}) = N_2^{-1}(P_{IT}^{\max}),$$

$$\sigma_1 = \sqrt{2 \sum_{i \leq h} (i - h)^2 / (2n_1)},$$

$$\sigma_2 = \sqrt{2 \sum_{i > h} (i - h)^2 / (2n_2)}. \quad (2)$$

其中: h 为所对应的加工精度等级值; n_1 是位于 h 左侧的直方柱数量, n_2 是位于 h 右侧的直方柱数量。

同理, m_j 的表面粗糙度分布规律模型也可以根据这种方法建立, 这里不再赘述。

2 特征加工链的选用规律修正模型

每种特征加工方法都有它的加工精度等级范围和加工表面粗糙度值范围, 即加工能力范围. 虽然具有较高加工能力的特征加工链可以满足工艺实现需求较低的特征对象, 但这往往会造成生产成本和时间的增长, 不具有经济性. 并且, 某种特征加工链在加工接近它本身精度和表面粗糙度上限的零件特征时, 对加工控制的要求会变高, 加工难度会增大, 甚至还可能造成废品率提升. 因此, 本文认为, 针对某特定特征的理想加工方案应该是在不超出企业当前已有生产能力的条件下, 尽量选择那些工艺实现需求处于加工能力中心区域的特征加工链, 并且随着工艺实现需求偏离中心区域的增大, 选择该加工链的几率会降低, 这种特性与正态分布的特性相一致. 考虑到正态分布在自然界中具有普适性, 并且在处理一些

不确定性问题时具有较好的效果, 本文根据正态分布构造了特征加工链的理论选用规律模型 N , 具体构造方法如下: 根据正态分布的 3σ 准则^[15], 能够有效适用于某特征加工链的工艺实现需求主要落在区间 $[Ex - 3\sigma, Ex + 3\sigma]$ 内, 对于落在此区间外的工艺实现需求, 则基本可以认定该特征工艺链不适用. 因此, 对于加工能力具有范围约束的特征加工链, 可根据下式求得特征加工链的理论选用概率:

$$\begin{cases} \sigma_{IT}(m_j) = \frac{IT_L(m_j) - IT_H(m_j) + 1}{6}, \\ EX_{IT}(m_j) = \frac{IT_L(m_j) + IT_H(m_j)}{2}, \\ \sigma_{Ra}(m_j) = \frac{\log Ra_L(m_j) - \log Ra_H(m_j) + \log 2}{6}, \\ EX_{Ra}(m_j) = \frac{\log Ra_L(m_j) + \log Ra_H(m_j)}{2}, \\ N_{IT}[EX_{IT}(m_j)] = 0.5, \\ N_{Ra}[EX_{Ra}(m_j)] = 0.5. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $IT_H(m_j)$ 和 $IT_L(m_j)$ 是 m_j 所能达到的精度等级上、下限, $Ra_H(m_j)$ 和 $Ra_L(m_j)$ 是 m_j 所能达到的表面粗糙度值的上、下限, 代表 m_j 的加工能力范围; $N_{IT}[EX_{IT}(m_j)]$ 和 $N_{Ra}[EX_{Ra}(m_j)]$ 表示工艺实现需求落入 m_j 加工能力中心位置的理论分布概率. 对于 m_j , 当存在恰好等于其加工能力中心位置 $EX_{IT}(m_j)$ 、 $EX_{Ra}(m_j)$ 的工艺实现需求时, 采用该加工链的经济性和加工精度保障性可以达到最优, 理论选用概率应取最大. 但加工链的加工能力是一个区域, 当从两边稍微偏离 $EX_{IT}(m_j)$ 、 $EX_{Ra}(m_j)$ 时, 选用概率虽然会有所衰减, 但依然会表现出较好的适用性, 即理论选用概率不会大幅降低, 中心位置处最优概率不宜过高. 同时, 通过对企业特征加工链历史选用情况的统计分析可知, 在加工链加工能力中心区域的采用案例数约占全部采用该加工链的案例数的一半. 据此, 本文对理论选用 m_j 的概率分散程度进行调整, 取 $N_{IT}[EX_{IT}(m_j)] = N_{Ra}[EX_{Ra}(m_j)] = 0.5$, 这样既能保证中心区域的理论选用概率最大, 也能保证从中心区域向两侧逐渐偏离的过程中, 理论选用概率的衰减情况不会陡降, 且与特征加工链的现实采用情况相符.

因为特征工艺链的理论选用模型只考虑了特征工艺链的加工能力范围, 忽略了工艺人员的设计倾向对工艺决策的影响, 所以有必要结合实际情况加以修正. 本文对特征加工链的实际选用规律和理论选用规律进行融合优化, 进而得到一个修正后的选用规律

模型. 修正步骤如下(如图3所示).

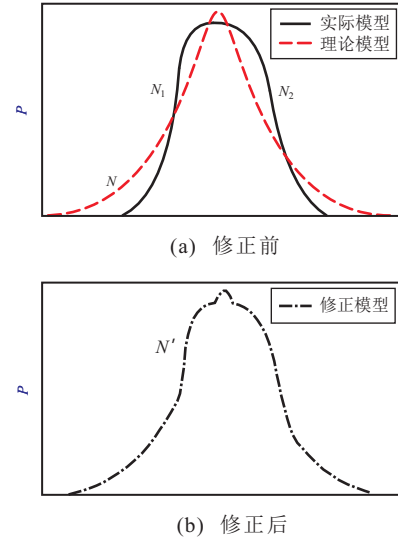


图3 特征加工链选用规律的修正模型

step 1: 输入理论选用规律模型参数 $EX_{IT}(m_j)$ 、 $\sigma_{IT}(m_j)$ 、 $EX_{Ra}(m_j)$ 、 $\sigma_{Ra}(m_j)$, 并利用文献[14]方法构造理论选用规律模型 $N_{IT}(m_j)$ 、 $N_{Ra}(m_j)$.

step 2: 根据式(2)计算实际选用规律的相关参数 $P_{IT}^{max}(m_j)$ 、 $P_{Ra}^{max}(m_j)$ 、 $\sigma_{1IT}(m_j)$ 、 $\sigma_{2IT}(m_j)$ 、 $\sigma_{1Ra}(m_j)$ 、 $\sigma_{2Ra}(m_j)$, 并构造实际选用规律模型 $\langle N_{1IT}(m_j), N_{2IT}(m_j) \rangle$ 、 $\langle N_{1Ra}(m_j), N_{2Ra}(m_j) \rangle$.

step 3: 对于设计对象, 提取工艺实现需求, 得到加工精度等级值 x_{IT} 和表面粗糙度值 x_{Ra} , 代入实际选用规律模型中, 得到实际分布概率 y_{IT} 和 y_{Ra} .

step 4: 将 x_{IT} 和 x_{Ra} 代入理论选用规模模型中, 得到理论分布概率 y'_{IT} 和 y'_{Ra} .

step 5: 如果 $y'_{IT} \geq y_{IT}$, 则保留理论模型 $N_{IT}(m_j)$ 中的 y'_{IT} 值, 否则用 y_{IT} 值代替 y'_{IT} 以修正 $N'_{IT}(m_j)$. 表面粗糙度值的修正方法与之一致.

特征选用规律的修正模型可以解释为, 当企业的以往工艺设计活动对某特征工艺链利用得更充分时, 则保留企业工艺人员现有的设计倾向; 而当企业以往的工艺设计结果对某特征工艺链利用得不够充分时, 则需要利用特征工艺链本身的理论选用概率对设计倾向进行修正. 即在现有生产条件下, 在工艺人员的社交倾向性与科学选用加工方案之间达到平衡效果.

由于修正后的特征加工链选用规律没有考虑企业生产任务的实际安排情况, 在修正概率的基础上, 本文提出一种加工方法选用概率的最终调整确定方法, 即

$$P_{m_j}^{IT}(x_{IT}) = \alpha_1 N_{m_j}^{IT}(x_{IT}) + \alpha_2 \frac{|IT_{x_{IT}}(m_j)|}{\sum_{j=1}^{10} |IT_{x_{IT}}(m_j)|},$$

$$P_{m_j}^{\text{Ra}}(x_{\text{Ra}}) = \alpha_3 N_{m_j}^{\text{Ra}}(x_{\text{Ra}}) + \alpha_4 \frac{|\text{Ra}_{x_{\text{Ra}}}(m_j)|}{\sum_{j=1}^{10} |\text{Ra}_{x_{\text{Ra}}}(m_j)|}. \quad (4)$$

其中: $P_{m_j}^{\text{IT}}(x_{\text{IT}})$ 、 $P_{m_j}^{\text{Ra}}(x_{\text{Ra}})$ 是当设计对象的工艺实现需求为 x_{IT} 和 x_{Ra} 时, 采用 m_j 的最终确定概率; $N_{m_j}^{\text{IT}}(x_{\text{IT}})$ 和 $N_{m_j}^{\text{Ra}}(x_{\text{Ra}})$ 是将 x_{IT} 和 x_{Ra} 代入修正模型后得到的概率; $|\text{IT}_{x_{\text{IT}}}(m_j)| / \sum_{j=1}^{10} |\text{IT}_{x_{\text{IT}}}(m_j)|$ 表示在企业以往的工艺设计成果中, 由 m_j 所形成的加工精度等级为 x_{IT} 的特征加工方案的数量与所有加工精度等级为 x_{IT} 的特征加工方案数量的比值, 它可以在一定程度上反映企业在对待加工精度要求为 x_{IT} 的加工任务时, 安排 m_j 作为加工任务时的倾向程度, 该指标还受企业实际所拥有的制造资源的种类和数量影响; $|\text{Ra}_{x_{\text{Ra}}}(m_j)| / \sum_{j=1}^{10} |\text{Ra}_{x_{\text{Ra}}}(m_j)|$ 的内涵与 $|\text{IT}_{x_{\text{IT}}}(m_j)| / \sum_{j=1}^{10} |\text{IT}_{x_{\text{IT}}}(m_j)|$ 类似, 这里不再赘述; α_1 、 α_2 、 α_3 、 $\alpha_4 \in [0, 1]$, 且满足 $\alpha_1 + \alpha_2 = \alpha_3 + \alpha_4 = 1$, 反映在计算特征加工链最终选用概率时的侧重程度, 可依据对加工链自身科学选用规律和企业生产任务安排接纳情况的偏好程度进行调整; $N_{m_j}^{\text{IT}}(x_{\text{IT}})$ 和 $N_{m_j}^{\text{Ra}}(x_{\text{Ra}})$ 是从特征工艺链自身的选用情况统计出发得到的计算概率, 但针对同一工艺实现需求, 企业可能存在多种加工方案, 且每种加工方案的被采用数量不同. 有些加工方案虽然针对具体工艺实现需求的修正计算概率不是最高, 但采用次数却较大, 说明该加工方案在企业生产实际中易于被安排采纳, 虽然未达到最优的经济性和精度保障性, 但生产条件易实现, 所以有必要在确定最终选用概率时将其影响融入以得到更合理的结果. 确定特征加工链最终选用概率的一个启发式原则是: 从工艺自身的科学选用角度得到的计算概率权重不得低于从企业生产任务安排角度得到的统计概率权重, 即应优先保证工艺选用的最优性与合理性, 本文取 $\alpha_1 = \alpha_3 = 0.6$, $\alpha_2 = \alpha_4 = 0.4$.

3 基于选用规律修正结果的工艺决策

本文将挖掘到且经过修正的加工方法选用概率作为工艺决策的依据. 在工艺推理决策中, 通常以工艺实现需求作为主要参考依据进行评估, 而特征的特征实现需求往往又包含多个因素, 从而工艺决策问题就转化为一个多因素融合决策问题, 所以使用 D-S 证据理论^[16-17]是合适的.

3.1 基于证据理论的特征工艺决策规则

根据 D-S 证据理论, 将满足某一工艺实现需求条件的所有待选特征加工链的集合定义为识别框架, 即 $\Theta = \{m_1, m_2, \dots, m_{10}\}$, Θ 中的所有可能集合用幂集合 2^Θ 来表示. 以工艺实现需求条件 f_7 为例, 因为表 2 所列提取到的特征加工链有 10 个, 即 Θ 中的元素有 10 个, 且各个元素是互不相容的, 所以 Θ 的幂集合 2^Θ 的元素个数为 2^{10} . 定义一个特征加工链的选用决策问题的集函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 满足 $m(\varphi) = 0$ 且 $\sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1$, 则函数 m 为识别框架 Θ 上的基本概率分配函数. 其中: A 为特征加工链的备选决策方案; $m(A)$ 为 A 的基本概率赋值, 表示对 A 的信任度; 满足 $m(A) > 0$ 的 A 称为焦元. 以孔特征为例, 由于在进行加工链的选用决策时只重点考虑加工精度等级和表面粗糙度值这两个因素, 在识别框架 Θ 上存在两个概率分配函数 m_{IT} 和 m_{Ra} , 它们的合成规则如下:

$$m_{\text{IT}} \oplus m_{\text{Ra}}(A) = \frac{1}{K} \sum_{B \cap C = A} m_{\text{IT}}(B) \cdot m_{\text{Ra}}(C), \quad (5)$$

其中 K 为归一化常数, 其计算方法为

$$K = \sum_{B \cap C \neq \varphi} m_{\text{IT}}(B) \cdot m_{\text{Ra}}(C) = 1 - \sum_{B \cap C = \varphi} m_{\text{IT}}(B) \cdot m_{\text{Ra}}(C). \quad (6)$$

根据证据理论的相关概念可知, 在特征加工链选用决策识别框架 Θ 上对 A 的总信任度可用信任函数 $\text{Bel}(A)$ 表示为

$$\text{Bel}(A) = \sum_{A' \subseteq A} m(A'). \quad (7)$$

其中: A' 是 A 的子集, $\text{Bel}(A)$ 表示对 A 的所有子集的可能性度量之和.

在特征加工链选用决策识别框架 Θ 上对 A 的不确定度可用似然函数 $\text{Pl}(A)$ 表示为

$$\text{Pl}(A) = \sum_{A' \cap A \neq \varphi} m(A'). \quad (8)$$

其中: $A' \subset \Theta$, $\text{Pl}(A)$ 表示对 A 的所有子集的不确定性度量之和.

由式 (7)、(8) 可知, $\text{Bel}(A)$ 表示对 A 为真的信任程度, $\text{Pl}(A)$ 表示对 A 为非假的信任程度. 因此, 信任区间 $[\text{Bel}(A), \text{Pl}(A)]$ 可以由信任函数 $\text{Bel}(A)$ 和似然函数 $\text{Pl}(A)$ 这两个值组成, 信任区间用来表示对 A 的支撑程度, 信任区间的关系见图 4.

信任区间综合反映了信任函数和似然函数对各备选特征加工链的支持程度, 采用信任区间评价特征加工链选用方案的优劣更为全面、可靠, 避免了最大

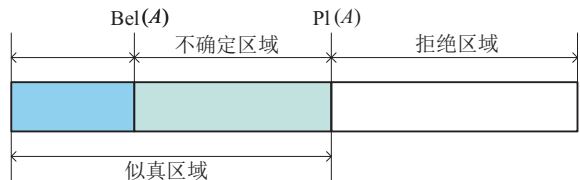


图4 信任区间示意

信任函数决策法和最大似然函数决策法造成的评价结论的片面性. 因此, 本文采用基于信任区间的多属性决策规则^[18]进行特征加工方法重用决策方案的评估, 具体规则如下:

$$F(A > B) = \frac{\max[0, Pl(A) - Bel(B)] - \max[0, Bel(A) - Pl(B)]}{[Pl(A) - Bel(A)] + [Pl(B) - Bel(B)]}, \quad (9)$$

其中 $F(A > B) \in [0, 1]$, 代表方案 A 优于方案 B 的程度. 如果 $F(A > B) > 0.5$, 则说明方案 A 优于方案 B ; 如果 $F(A > B) < 0.5$, 则说明方案 B 优于方案 A ; 如果 $F(A > B) = 0.5$, 则说明两个方案的优劣程度相等. 对于任意多个方案的优劣评估, 可以分别进行两两比较, 如果方案 A 优于方案 B 且方案 B 优于方案 C , 则说明方案 A 优于方案 C .

3.2 证据处理方法

对于给定孔特征的工艺实现需求 x_{IT} 和 x_{Ra} , 通过将其代入式(4)可以得到各备选加工方法的选用概率 $P_{m_j}^{IT}(x_{IT})$ 、 $P_{m_j}^{Ra}(x_{Ra})$, 这可以被认为除 θ 以外各个焦元的效用偏好度. 关于特殊焦元 θ , 本文有以下考虑: θ 表示工艺人员对某决策因素的不确定程度, 如果不考虑其影响, 则决策问题便是一个简单的概率分配问题, 难以体现证据理论在处理多因素决策问题时的优势, 且容易引起“悖论”情况的发生. 同时, 由于工艺人员对各决策因素的信任程度不同, 且决策因素的不确定性是通过 θ 的概率分配体现的, 故不同决策因素对应焦元 θ 的概率分配值也应区别对待. 以特征加工链的选用决策问题为例, 当工艺人员要优先确保特征的加工精度时, 加工精度等级因素显然更为重要, 对其信任程度必定要高于表面粗糙度值因素, 具体体现在焦元 θ 在加工精度等级指标下的基本概率分配值应小于表面粗糙度指标下的基本概率分配值. 基于此, 本文通过引入各决策因素权重的形式, 以权重调整对决策因素的关心程度, 并解决不同决策因素下 θ 的概率分配问题, 进而获得所有焦元的加权基本概率分配值如下:

$$m_{IT}(m_j) = \frac{\omega_{IT} P_{m_j}^{IT}(x_{IT})}{\sum_{j=1}^{10} P_{m_j}^{IT}(x_{IT})},$$

$$m_{Ra}(m_j) = \frac{\omega_{Ra} P_{m_j}^{Ra}(x_{Ra})}{\sum_{j=1}^{10} P_{m_j}^{Ra}(x_{Ra})},$$
$$m_{IT}(\theta) = 1 - \omega_{IT}, \quad m_{Ra}(\theta) = 1 - \omega_{Ra}. \quad (10)$$

4 实例分析

对于图5所示零件的中心孔特征, 材料为非淬火钢, 粗糙度要求为 $Ra0.8$, 孔径为 40 mm , 尺寸公差等级为 $IT7$, 现在需要找出企业以往工艺设计成果中能满足该零件孔特征工艺实现需求的加工方法. 显然, 该孔特征设计要求符合表1中的 f_7 , 提取该企业以往工艺设计成果中满足 f_7 的所有特征加工链(如表2所示).

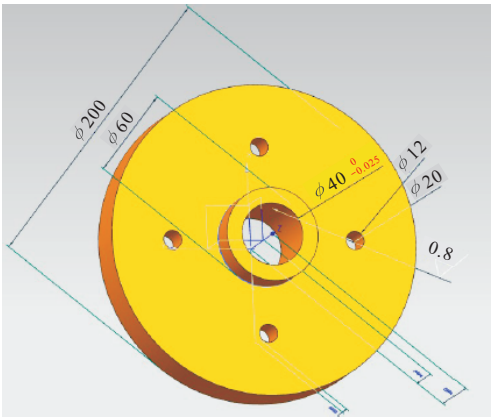


图5 某零件的MBD工艺信息模型

根据图5可知, $x_{IT} = 7$, $x_{Ra} = 0.8$. 将表2所示特征加工链按照本文第1节和第2节所述建立特征加工链的实际选用规律模型、理论选用规律模型和修正模型, 并将 x_{IT} 、 x_{Ra} 代入模型中得到表3所示结果.

表3 特征加工链的选用规律计算结果

$x_{IT} = 7$ $x_{Ra} = 0.8$	实际选用规律		理论选用规律		修正规律	
	$\langle N_{1IT}, N_{2IT} \rangle$	$\langle N_{1Ra}, N_{2Ra} \rangle$	N_{IT}	N_{Ra}	N'_{IT}	N'_{Ra}
m_1	0.299 2	0.356 4	0.377 4	0.500 0	0.377 4	0.500 0
m_2	0.258 1	0.361 7	0.377 4	0.441 2	0.377 4	0.441 2
m_3	0.326 7	0.287 5	0.377 4	0.500 0	0.377 4	0.500 0
m_4	0.432 8	0.271 6	0.162 3	0.162 3	0.432 8	0.271 6
m_5	0.428 6	0.385 7	0.162 3	0.377 4	0.428 6	0.385 7
m_6	0.451 0	0.285 4	0.500 0	0	0.500 0	0.285 4
m_7	0.355 6	0.323 5	0.500 0	0	0.500 0	0.323 5
m_8	0.370 4	0.005 3	0.500 0	0	0.500 0	0.005 3
m_9	0.533 3	0.005 2	0.500 0	0	0.533 3	0.005 2
m_{10}	0.202 2	0.018 3	0	0	0.202 2	0.018 3

得到修正概率后, 代入式(4)得到10种孔特征加工链的最终确定选用概率, 如表4所示.

表 4 孔特征加工链的最终确定选用概率

j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$P_{m_j}^{IT}(7)$	0.247 3	0.192 3	0.285 8	0.253 0	0.254 0	0.263 3	0.244 0	0.227 5	0.235 4	0.089 1
$P_{m_j}^{Ra}(0.8)$	0.320 0	0.289 8	0.310 0	0.195 3	0.244 3	0.164 2	0.159 4	0.002 1	0.002 1	0.007 3

设置特征加工链选用决策因素的权重为 $(\omega_{IT}, \omega_{Ra}) = (0.9, 0.9)$. 将表 4 数据代入式 (10), 得到加工精度等级因素和表面粗糙度值因素下的基本概率分配如下.

加工精度等级因素下的基本概率分配 $m_{IT}(A)$ 为

$$\begin{aligned} m_{IT}(m_1) &= 0.097\,1, m_{IT}(m_2) = 0.075\,5, \\ m_{IT}(m_3) &= 0.112\,3, m_{IT}(m_4) = 0.099\,3, \\ m_{IT}(m_5) &= 0.099\,8, m_{IT}(m_6) = 0.103\,4, \\ m_{IT}(m_7) &= 0.095\,8, m_{IT}(m_8) = 0.089\,4, \\ m_{IT}(m_9) &= 0.092\,4, m_{IT}(m_{10}) = 0.035\,0, \\ m_{IT}(\Theta) &= 0.100\,0. \end{aligned}$$

表面粗糙度值因素下的基本概率分配 $m_{Ra}(A)$ 为

$$\begin{aligned} m_{Ra}(m_1) &= 0.170\,0, m_{Ra}(m_2) = 0.153\,9, \\ m_{Ra}(m_3) &= 0.164\,6, m_{Ra}(m_4) = 0.103\,7, \\ m_{Ra}(m_5) &= 0.129\,7, m_{Ra}(m_6) = 0.087\,2, \\ m_{Ra}(m_7) &= 0.084\,7, m_{Ra}(m_8) = 0.001\,1, \\ m_{Ra}(m_9) &= 0.001\,1, m_{Ra}(m_{10}) = 0.003\,9, \\ m_{Ra}(\Theta) &= 0.100\,0. \end{aligned}$$

以 $m_{IT}(A)$ 和 $m_{Ra}(A)$ 作为证据输入, 利用式 (5) 进行证据融合, 解得备选加工链的综合基本概率分配值 $m(A)$ 如下:

$$\begin{aligned} m(m_1) &= 0.155\,8, m(m_2) = 0.124\,6, \\ m(m_3) &= 0.166\,5, m(m_4) = 0.110\,4, \\ m(m_5) &= 0.129\,4, m(m_6) = 0.101\,2, \\ m(m_7) &= 0.094\,3, m(m_8) = 0.033\,0, \\ m(m_9) &= 0.034\,1, m(m_{10}) = 0.014\,5, \\ m(\Theta) &= 0.036\,1. \end{aligned}$$

根据式 (7)、(8) 分别计算各备选加工链的信任函数值 $Bel(A)$ 和似然函数值 $Pl(A)$, 并构造信任区间 $[Bel(A), Pl(A)]$, 计算结果见表 5.

表 5 各备选特征加工链的信任区间

$[Bel(m_1), Pl(m_1)]$	$[0.155\,8, 0.191\,9]$
$[Bel(m_2), Pl(m_2)]$	$[0.124\,6, 0.160\,7]$
$[Bel(m_3), Pl(m_3)]$	$[0.166\,5, 0.2025]$
$[Bel(m_4), Pl(m_4)]$	$[0.110\,4, 0.146\,4]$
$[Bel(m_5), Pl(m_5)]$	$[0.129\,4, 0.165\,5]$
$[Bel(m_6), Pl(m_6)]$	$[0.101\,2, 0.137\,3]$
$[Bel(m_7), Pl(m_7)]$	$[0.094\,3, 0.130\,4]$
$[Bel(m_8), Pl(m_8)]$	$[0.033\,0, 0.069\,1]$
$[Bel(m_9), Pl(m_9)]$	$[0.034\,1, 0.070\,2]$
$[Bel(m_{10}), Pl(m_{10})]$	$[0.014\,5, 0.050\,6]$

根据式 (9) 给出的信任区间决策规则, 对 10 种孔特征加工链的信任区间分别进行比较决策, 其决策过程如表 6 所示.

表 6 孔特征加工链的信任区间比较决策过程.

$[\text{Bel}(m_1), \text{Pl}(m_1)]$	$F(m_1 > m_2) = 0.932\ 1$	$F(m_1 > m_3) = 0.352\ 3$	$F(m_3 > m_5) = 1.000$	m_3	
$[\text{Bel}(m_2), \text{Pl}(m_2)]$					
$[\text{Bel}(m_3), \text{Pl}(m_3)]$	$F(m_3 > m_4) = 1.000$				
$[\text{Bel}(m_4), \text{Pl}(m_4)]$					
$[\text{Bel}(m_5), \text{Pl}(m_5)]$	$F(m_5 > m_6) = 0.890\ 6$	$F(m_5 > m_7) = 0.986\ 1$			$F(m_5 > m_9) = 1.000$
$[\text{Bel}(m_6), \text{Pl}(m_6)]$					
$[\text{Bel}(m_7), \text{Pl}(m_7)]$	$F(m_7 > m_8) = 1.000$				
$[\text{Bel}(m_8), \text{Pl}(m_8)]$					
$[\text{Bel}(m_9), \text{Pl}(m_9)]$	$F(m_9 > m_{10}) = 0.771\ 5$				
$[\text{Bel}(m_{10}), \text{Pl}(m_{10})]$					

由表6可知,对于企业以往工艺设计成果中满足本例工艺实现需求的所有加工方法,选择 m_3 最为合理,而这也符合现实中工艺人员的设计倾向和企业的实际生产情况。

为了进一步说明本文所提出方法的有效性,这里将其与基于神经网络的特征工艺链决策方法^[10,19]进行对比分析。首先,构建 f_7 下的特征加工链神经网络选择模型如图6所示。其中:孔径、加工尺寸精度等级和表面粗糙度等级是网络的输入层;表2中满足 f_7 的10种孔特征加工链是输出,若某一特征工艺链 m_j 被选上,则输出为1,否则为0。

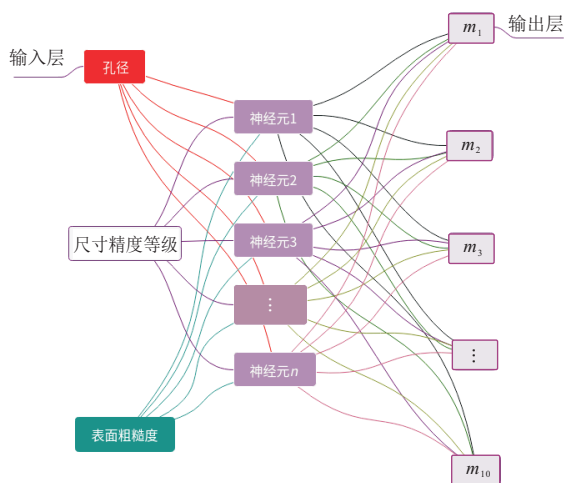


图6 基于神经网络的选择决策模型

在此基础上,将图1所对应的统计案例输入网络中进行训练。例如,当采用 m_1 的某一历史加工案例时,待加工孔径为30 mm,加工孔径的尺寸精度等级为IT8,表面粗糙度要求为Ra0.8,则该案例样本的输入为[30, 8, 0.8],输出为[1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]。

待完成训练后,将图5实例的工艺实现需求输入到网络中进行加工链的选择预测。总共预测4次,对4次输出进行分析,得到 m_3 被优先选择2次, m_1 和 m_2 各被优先选择1次的结果。从多次重复结果来看,与本文所提出方法基本吻合,表明了本文方法的有效性。但基于神经网络的加工方法预算方法在样本规模及其之间差异性较小的情况下,例如本例只取 f_7 下的历史案例作为训练样本,单次预测结果存在一定的不确定性,且该方法对工艺选择决策的规则和机理缺乏深入剖析,其背后的隐性知识和规律也无法进行显性描述。而本文所提出方法深入剖析了特征加工方法选用规律的挖掘与修正,并将其成功地应用到工艺选择决策的过程中,这显然更贴近机加工工艺设计的本质,同时也为工艺选择决策提供了一种新思路和方法。

法上的新尝试,可以为规律、知识驱动的智能制造模式创新提供一定的参考与借鉴。

5 结论

有别于其他直接以形状相似性或语义相似性作为工艺决策推理基础的研究,本文在充分考虑了特征加工链选用规律对工艺设计活动影响的基础上,将对特征加工链选用规律的挖掘及其合理修正结果作为支持工艺决策的证据,确保了工艺设计决策的有效性。具体而言,本文作了以下研究: 1) 研究建立了特征加工方法的实际选用规律模型和理论选用规律模型,并将二者融合得到了选用规律的修正模型; 2) 将修正后的特征加工链的最终确定选用概率作为证据输入,利用D-S证据理论对备选特征加工链进行了选用决策。

后续研究将着重讨论从时间维度上划分加工特征形成过程的认知机理,构建能够反映特征加工方法使用规律的更高维度上的模型。另外,特征加工链选用结果与企业制造资源之间隐藏的对应该规律本文未能详细阐述,这在后续研究中也将在深入讨论。

参考文献(References)

- [1] 徐昌鸿, 张树生, 黄波, 等. 面向数控工艺重用的三维CAD模型局部结构检索[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1652-1661.
(Xu C H, Zhang S S, Huang B, et al. NC process reuse oriented subpart retrieval approach of 3D CAD models[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1652-1661.)
- [2] Huang R, Zhang S S, Bai X L, et al. An effective subpart retrieval approach of 3D CAD models for manufacturing process reuse[J]. Computers in Industry, 2015, 67: 38-53.
- [3] Xu C H, Zhang S S, Huang B, et al. NC process reuse oriented effective subpart retrieval approach of 3D CAD models[J]. Computers in Industry, 2017, 90: 1-16.
- [4] Huang B, Zhang S S, Huang R, et al. An effective retrieval approach of 3D CAD models for macro process reuse[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102(5): 1067-1089.
- [5] 刘雪梅, 周易, 黄剑锋, 等. 基于制造资源的复杂箱体零件加工特征识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2015, 21(12): 3166-3173.
(Liu X M, Zhou Y, Huang J F, et al. Machining feature recognition method for complicated boxy parts based on manufacturing resources[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 21(12): 3166-3173.)
- [6] 魏涛, 张丹, 左敦稳, 等. 面向薄壁多腔类结构件加工

- 特征识别方法[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(12): 2683-2691.
- (Wei T, Zhang D, Zuo D W, et al. Machining feature recognition method for thin-walled and multi-cavity structural parts[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(12): 2683-2691.
- [7] Sunil V B, Agarwal R, Pande S S. An approach to recognize interacting features from B-Rep CAD models of prismatic machined parts using a hybrid (graph and rule based) technique[J]. Computers in Industry, 2010, 61(7): 686-701.
- [8] 刘雪梅, 张树生, 崔卫卫, 等. 逆向工程中基于属性邻接图的加工特征识别[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(6): 1162-1167.
- (Liu X M, Zhang S S, Cui W W, et al. Machined features recognition based on attributed adjacency graph in reverse engineering[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(6): 1162-1167.)
- [9] 花广如, 王会凤, 张震寰, 等. 基于遗传算法的加工方案选择与操作排序综合优化方法[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(2): 195-200.
- (Hua G R, Wang H F, Zhang Z H, et al. A GA-based synthesizing optimization approach for machining scheme selection and operations sequencing[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(2): 195-200.)
- [10] 王玫, 王卓, 王杰. 回转类零件的人工神经网络工序选择方法研究[J]. 电子科技大学学报, 2010, 39(3): 470-474.
- (Wang M, Wang Z, Wang J. Research on ANN-based machining operation selection for rotational Parts[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2010, 39(3): 470-474.)
- [11] 常智勇, 陶礼尊, 李佳佳, 等. 基于加工意图的机加工工艺知识重用方法研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(3): 160-168.
- (Chang Z Y, Tao L Z, Li J J, et al. The measure and search method of process knowledge element based on machining intent[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(3): 160-168.)
- [12] 王英伟, 莫蓉, 万能. 多粒度机械加工设计意图建模方法研究[J]. 工具技术, 2014, 48(6): 31-35.
- (Wang Y W, Mo R, Wan N. Multi-granularity modeling method of machining design intent[J]. Tool Engineering, 2014, 48(6): 31-35.)
- [13] Fang K T. Theory, method and applications of the uniform design[J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2002, 9(4): 305-315.
- [14] 马嵩华, 田凌. 捕捉设计意图的二维草图识别技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(10): 1337-1345.
- (Ma S H, Tian L. Two-dimensional sketch recognition with design intent capture[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(10): 1337-1345.)
- [15] 刘禹, 李德毅, 张光卫, 等. 云模型雾化特性及在进化算法中的应用[J]. 电子学报, 2009, 37(8): 1651-1658.
- (Liu Y, Li D Y, Zhang G W, et al. Atomized feature in cloud based evolutionary algorithm[J]. Acta Electronica Sinica, 2009, 37(8): 1651-1658.)
- [16] 缪燕子, 方健, 马小平, 等. D-S证据理论融合技术及其应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.
- (Miao Y Z, Fang J, Ma X P, et al. D-S evidence theory of fusion technology and application[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2013.)
- [17] Lowrance J D, Garvey T D, Strat T M. Classic works of the Dempster-Shafer theory of belief functions[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008: 419-434.
- [18] Wang Y M, Yang J B, Xu D L. A preference aggregation method through the estimation of utility intervals[J]. Computers & Operations Research, 2005, 32(8): 2027-2049.
- [19] Deb S, Ghosh K, Paul S. A neural network based methodology for machining operations selection in computer-aided process planning for rotationally symmetrical parts[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2006, 17(5): 557-569.

作者简介

李春磊(1987—), 男, 讲师, 博士, 从事智能制造、工艺智能决策、数据挖掘和知识工程的研究, E-mail: 602lcl-602lcl@163.com;

李亮(1979—), 男, 副教授, 博士, 从事工业机器人关键零部件的检测与制造等研究, E-mail: Leeliang@126.com.

(责任编辑: 李君玲)