doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.041

基于粗糙集和模糊聚类的复杂曲面零件可制造性评价*

樊成张雷袁俊赵继

(吉林大学机械科学与工程学院,长春 130025)

摘要:针对复杂曲面零件的可制造性,建立了复杂曲面零件可制造性评价指标和模型,在设计初期能够对曲面的可加工性进行预测,提高曲面加工质量和效率。将影响复杂曲面零件可制造性的因素分为几何构型复杂度和加工技术复杂度。首先针对曲面几何构型复杂度,基于模糊聚类算法,按照复杂曲面曲率分布特征和斜率分布特征对曲面进行聚类分析,建立曲面簇群体模式;然后综合考虑加工技术复杂度中的各属性,运用粗糙集理论的数据离散和指标约减算法计算各属性权重,形成曲面评价知识库;最后利用模糊模式识别和曲面相似度的计算方法预测设计曲面零件的可制造性。实例分析表明,该方法能够较准确地对曲面可制造性进行评价。 关键词:复杂曲面 可制造性 评价 粗糙集 模糊聚类

中图分类号: TH166 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)10-0253-07

Manufacturability Evaluation of Complex Surface Parts Based on Rough Set Theory and Fuzzy Clustering

Fan Cheng Zhang Lei Yuan Jun Zhao Ji

(Institute of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: In order to improve the ability to predict the manufacturability of complex surfaces in the design stage, the manufacturability evaluation indexes and models of complex part surfaces were studied. The factors affecting the manufacturability of the complex part surfaces were divided into two groups, the geometrical complexity (GC) and the technological complexity (TC). Considering the features in GC, the complex part surfaces were classified into several clusters according to distribution features of complex surfaces and slopes, which established the group patterns of the parts. Then the discrete and the reduction algorithms of rough set were used to calculate the weights of the feature attributes including a few attributes in TC. After that, the method of fuzzy pattern recognition and the calculation of surface similarity were used to evaluate the manufacturability of parts. A case study showed that the method could evaluate the manufacturability of the complex part surfaces accurately.

Key words: Complex surface Manufacturability Evaluation Rough set Fuzzy clustering

引言

曲面加工在模具、飞机、动力设备等众多制造部 门中具有重要地位,一直是数控加工技术的主要研 究与应用对象^[1]。复杂曲面零件的数控加工工艺 复杂,其可加工性很难预测,若曲面零件设计不合理 会导致曲面在加工过程中发生干涉或过切,影响曲 面加工质量和效率,所以需要在曲面零件设计的同 时考虑其可制造性。

产品的可制造性评价是并行设计的重要组成部 分,即在设计初期综合考虑生产能力和产品自身结 构约束,对产品的可加工性、可装配性等进行评价,

收稿日期: 2012-08-09 修回日期: 2012-10-05

^{*}国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB706702)和吉林大学研究生创新基金资助项目(20121078) 作者简介:樊成,博士生,主要从事自由曲面数字化制造和光学曲面精密制造研究,E-mail: fancheng2011@gmail.com 通讯作者:张雷,教授,博士生导师,主要从事智能精密制造研究,E-mail: zhanglei@jlu.edu.cn

获得产品的改进意见^[2]。现有的可制造性评价研 究工作主要集中在对常规制造特征进行识别^[2-4], 而对复杂曲面零件的可制造性评价较少涉及。文献 [5]研究复杂曲面可加工性的多属性评价算法,将 影响可加工性的因素映射为曲面的几何特征属性, 并根据经验赋予每个属性一定的权值,对曲面可加 工性进行评价;文献[6]从影响曲面可制造性的几 何复杂度和技术复杂度出发,提取若干个曲面参数, 通过模糊数学和神经网络训练对复杂曲面进行可制 造性评价;文献[7]开发了基于零件信息和加工资 源能力匹配算法的航空叶片可制造性评价系统。

但是,以上所述的曲面可制造性评价方法只能 得到复杂曲面是否可以制造,对实际加工并没有指 导价值。本文参照文献[5~6],综合考虑影响复杂 曲面零件可制造性的各种因素,建立曲面可制造性 评价的树形指标体系。利用模糊聚类和粗糙集理论 建立曲面评价知识库,以期通过模糊模式识别和相 似度计算的方法对曲面进行可制造性评价,并给曲 面加工以指导性意见。

1 指标体系和评价流程

1.1 指标体系的建立

与常规的规则零件不同,复杂曲面制造特征模 糊,无法基于特征对其进行可制造性评价,但是曲面 的一些特征参数能够在一定程度上反映曲面的复杂 度和加工难易程度。文献[5]主要针对复杂曲面零 件的几何特征,建立了曲面曲率、单值性、水平度和 闭角评价的多属性评价指标。文献[6]建立的指标 体系分为曲面几何复杂度和技术复杂度两项,指标 内容具体包含高斯曲率、斜率、材料硬度、尺寸公差、 位置公差、形状公差、表面粗糙度和加工制造能力等 特征参数。根据前人研究成果,本文建立了复杂曲 面评价树形指标体系(图1),将复杂曲面的可制造 性分为几何构型复杂度和加工技术复杂度。

(1)几何构型复杂度

曲面自身的几何复杂程度对其可制造性的影响 至关重要^[5]。本文选取的反映曲面复杂度的参数 包含曲率分布特征参数^[7-8]和斜率分布特征参数, 具体包含的特征参数见图1。

(2)加工技术复杂度

将加工技术复杂度分为材料的可加工性和零件 的加工精度特性。材料的可加工性主要指材料的切 削特性,本文选取了材料硬度作为其度量指标。高 精度曲面零件需要高精度的机床加工,且加工工序 增多,增加了技术难度和工艺成本。本文选择表面 粗糙度、尺寸精度、位置精度和形状精度反映其加工



Fig. 1 Evaluation index system for complex surface manufacturability

精度特征。

1.2 评价流程

针对建立的评价指标,综合运用模糊聚类分析 和粗糙集理论对复杂曲面零件的可制造性进行评价,算法流程如图2所示。



图 2 曲面可制造性评价算法流程

Fig. 2 Flow chart of manufacturability evaluation algorithm

(1)对样本曲面进行建模,提取其曲率和斜率 分布特征参数;根据提取的特征参数进行聚类分析, 形成曲面群体模式;设计的曲面通过计算贴合度进 行曲面簇的模糊识别,获得曲面几何复杂程度的模 糊评价。

(2)将连续属性分割成粗糙集能够处理的离散 属性,利用特征属性约减算法去除指标体系中的冗 余指标,并计算属性的重要性权值,形成知识库。

(3)通过计算设计的曲面和知识库中样本曲面的相似度,对设计曲面进行可制造性评价,同时可获得设计曲面加工时的一些建议。

2 曲面几何构型复杂度聚类分析

综合考虑曲面的曲率分布参数和斜率分布参数,运用模糊聚类的方法对其曲面进行分类,从而发现各曲面间的相似性和亲疏程度^[9]。

2.1 曲面样本特征参数正规化处理

由于选定的反映曲面复杂度的 10 个特征参数 的量纲和数量级不同,需建立统一的尺度,对其进行 规一化处理,即

$$x'_{ik} = \frac{x_{ik} - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m} x_{ik}}{\sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^{m} \left(x_{ik} - \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{m} x_{ik}\right)^{2}}}$$
(1)

式中 x_{ik}——第*i*个曲面样本的第*k*个特征,*i*=1, 2,…,*n*

2.2 建立模糊等价矩阵 R*

自由曲面各样本间的相似程度由相似矩阵 **R** 来描述,采用夹角余弦法得到其相似系数,第*i*个曲 面样本和第*j*个曲面样本的第*k*个特征的相似度为

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^{m} x_{ik} x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{m} x_{ik}^2} \sqrt{\sum_{k=1}^{m} x_{jk}^2}}$$
(2)

模糊关系的性质必须满足自反性、对称性和传 递性。由上文建立的曲面样本相似矩阵 R 往往只 满足对称性和自反性,而不满足传递性。需要对矩 阵 R 进行相应的传递闭包计算,将其改造成模糊等 价矩阵 R*。

用平方法求传递闭包: $R \cdot R = R^2, R^2 \cdot R^2 = R^4$, …直至 $R^k \cdot R^k = R^{2k}$,此时 $k = 2^m$,则 $R^* = R^k$ 。

由模糊等价矩阵 **R**^{*} 出发可以对样本进行聚类 分析,通过置信水平 λ 建立 **R**^{*} 的截矩阵。通过 λ 从 0 到 1 之间的取值变化可以将样本分类不断细 化,建立动态聚类图。

2.3 建立群体模式

取定 λ 值后可将样本分为 c 类,即形成了 c 个 样本簇,每个样本簇中都有 p 个样本,即

$$X_i = \{X_{i1}, X_{i2}, \cdots, X_{ip}\} \ (i = 1, 2, \cdots, c)$$

每个簇内的曲面样本具有相近的曲面特征参数,从而具有相近几何构型复杂度。对簇内的各曲 面样本的特征参数取均值即可得到新的曲面样本, 该样本能在一定程度上反映整个簇的综合特性,称 为群体样本,这些群体样本构成了群体模式。

3 基于粗糙集的属性约减和权重计算

通过模糊聚类的方法得到了反映曲面几何复杂 度的设计样本曲面的分类,然后结合加工技术复杂 度中的材料硬度、表面粗糙度、尺寸精度、位置精度 和形状精度5个参数,构成可用于粗糙集分析的决 策表。

3.1 数据离散

一个信息系统可以表示为四元组 $DT = (U, C \cup D, V, f)$ 的决策表,其中 U 为对象非空有限集合,即论域; $C \cup D$ 为属性的非空有限集合,其中 C 为条件属性,D 为决策属性;V 为信息函数f 的值域;f 表示决策表的信息函数^[10-11]。

粗糙集不能直接处理连续属性,所以需要对指标参数中的连续属性值进行离散。粗糙集的离散化即通过设定断点划分指标空间,将 n 维空间离散成有限个区域,缩小信息系统,增加指标值的粒度,提高数据分析的质量和效率。

比较典型的属性离散算法分为两大类,一是在 不改变决策表相容性的基础上选择最少断点,算法 往往较为复杂;二是不考虑决策表相容性,仅考虑数 据本身规律,但是离散效果往往不理想。本文选取 Kurgan^[12]提出的 CAIM 属性离散算法对材料硬度、 表面粗糙度等连续属性进行离散化。

3.2 基于决策表的属性约减

 $P \setminus Q$ 为定义在论域 U上的两个等价关系族,且 $P \subseteq Q$,如 IND(P) = IND(Q),则 $P \neq Q$ 的一个绝对 约减。Q可能有很多个约减,所有不可约去的关系 称为核,即 CORE(Q)。

一个决策表表述了条件属性知识范畴与决策属 性知识范畴之间存在的关系^[12]。本文建立的决策 表条件属性包括曲面几何构型复杂度、材料硬度、表 面粗糙度、尺寸精度、位置精度和形状精度6项,决 策属性即为曲面的可制造性。而对于这6个条件属 性,很难定量描述它与可制造性的关系,并且可能有 冗余属性。属性约减就是在保持决策表分类能力不 变的条件下,对条件属性进行优化和筛选,去除不必 要的属性。

采用基于 Pawlak 属性重要度的决策表属性约减算法,即通过从决策表中删除某属性考察决策表

3.3 属性权重计算

属性权重反映了该条件属性对决策属性的重要 性。任意一个条件属性 $c_i \in C(i \in [1,k], k)$ 为条件 属性的个数,定义条件属性 c_i 对条件属性集 C 相对 于决策属性 D 的重要性为

$$Sig(c_i, C; D) = \frac{|pos_c(D)| - |pos_{c-|c_i|}(D)|}{|U|} \quad (3)$$

式中 1·1表示集合的基数,pos_c(D)表示决策属性 D 相对于条件属性 C 的正域。Sig(c_i,C;D)的值越大 说明删除 c_i对 C 相对于 D 的分类能力影响越大及 c_i 对 C 相对于决策属性 D 越重要。

条件属性 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_k\}$, 对重要度进行规范化处理

$$w(c_i) = \frac{\operatorname{Sig}(c_i, C; D)}{\sum_{i=1}^{k} \operatorname{Sig}(c_i, C; D)}$$
(4)

 $w(c_i)$ 即为各条件特征属性权重,且 $\sum_{i=1}^{n} w(c_i) = 1_{\circ}$

4 曲面相似度计算及可制造性评价

4.1 设计曲面几何构型模糊模式识别

对旧曲面样本进行模糊聚类,形成群体模式后, 即可对新曲面样本进行模糊识别,确定所属的曲面 簇,位于同一曲面样本簇内的曲面样本加工时可以 选取相近的工艺参数,即可以对曲面复杂度进行评 价。

将新曲面样本看成 n 个特征参数表示的模糊 集,记为 A;而将第 j 个曲面簇的群体样本看成 n 个 特征参数表示的模糊集,记为 B_j,两个模糊集之间 的接近程度可由两个模糊集之间的贴近度来衡量。 定义 A 和 B_i的贴近度为

$$\sigma(A, B_j) = 1 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n |A(x_i) - B_j(x_i)|^2 \right)^2$$
(5)

根据最大贴近度原则,新曲面应与其贴近度最 大的曲面簇构型复杂程度最为相似,故将新曲面划 归在与它贴近度最高的曲面簇内。

4.2 设计曲面实例匹配相似度计算

设计曲面通过特征属性相似度计算得到与它最 相似的曲面样本。本文选取各特征属性的数据类型 分为枚举型和数值型,其中几何构型、尺寸精度、位 置精度和形状精度属于枚举型,而材料硬度和表面 粗糙度属于数值型。

(1)局部相似度计算

枚举型属性局部相似度计算公式为

$$S_{i}(p_{ix}, p_{iy}) = 1 - \frac{|p_{ix} - p_{iy}|}{M}$$
(6)

式中 *p_{ix}、p_{iy}*——样本曲面和设计曲面特征属性 *M*——该特征属性的最大值

数值型属性局部相似度为

$$S_{i}(p_{ix}, p_{iy}) = 1 - \frac{|p_{ix} - p_{iy}|}{\max(p_{i}) - \min(p_{i})}$$
(7)

式中 $\max(p_i)$ — 第i 个特征属性的最大值

 $\min(p_i)$ ——第i个特征属性的最小值

(2)整体相似度计算

综合考虑各特征属性的局部相似度和属性权 重,计算设计曲面与样本曲面间的整体相似度为

$$S(n_{j}) = \sum_{i=1}^{k} (w(c_{i})S_{i}(p_{ij},p_{i}'))$$
 (8)

S(n_j)表示第 j 号曲面样本与设计曲面的相似度,通 过比较各曲面样本与设计曲面相似度大小,可以选 出和设计曲面相似度最大的样本曲面。因为样本曲 面的可制造性已知,从而可以推理得出设计曲面的 可制造性。

5 实例分析

5.1 建立样本知识库

为验证上述可制造性评价方法的可行性和实用 性,用 Matlab 实现上述算法。建立了由 22 个 NURBS 曲面组成的样本知识库,每个曲面样本即可 看成一条知识。对样本曲面进行了建模,并计算其 曲率平均值 K_1 ,曲率最大值 K_2 ,曲率最小值 K_3 ,曲 率方差 K_4 , u 向斜率平均值 Q_{u1} , u 向斜率最大值 Q_{u2} , u 向斜率方差 Q_{u3} , v 向斜率平均值 Q_{v1} , v 向斜率 最大值 Q_{v2} , v 向斜率方差 Q_{u3} 等 10 个参数, 计算结 果如表 1 所示。

首先对表 1 里的数据进行正规化处理, 使每个 数据都位于 0 到 1 之间。对样本进行模糊聚类分 析, 可以得到动态聚类图, 如图 3 所示。由于后续粗 糙集分析的需要, 分类个数应与决策属性个数相近。 故当 λ = 0. 796 2 时将曲面样本分成以下 6 类: A 类 为 { 2,3,4,5,9,10,11,15,16,20,22 }, B 类为 { 13, 14 }, C 类为 { 17,18,19 }, D 类为 { 1,12 }, E 类为 { 6,7,21 }, F 类为 { 8 }。由于篇幅所限,本文只列出 了部分曲面参数及数据。

对每一类中的样本特征参数取均值,形成了6个 新样本,即为群体模式样本,如表2所示。

在对样本进行几何构型分类的基础上,提取样本技术复杂度属性,形成表3所示的决策表,条件属性为几何构型、材料硬度、表面粗糙度、尺寸精度、位置精度和形状精度,决策属性主要考虑能够反映样

	表1 曲面模糊聚类样本	
Tab. 1	Free-form surface samples for fuzzy clustering	ıg

伯日	曲率平均值	曲率最大值	曲率最小值	曲率方差	u 向斜率	u 向斜率	u 向斜率	v 向斜率	v向斜率	v 向斜率
编号	K_1 / mm ⁻¹	K_2 / mm ⁻¹	K_3 / mm^{-1}	K_4 / mm ⁻¹	平均值 Q_{u1}	最大值 Q _{u2}	方差 Q _{u3}	平均值 Q_{v1}	最大值 Q_{v2}	方差 Q ₁₃
1	3.6000	315.3617	- 0. 905 3	25.2288	0.2006	0.4922	0.1081	0.2463	0.7908	0.1575
2	0.1975	7.7318	- 0. 869 6	0.8544	0.1834	0.3484	0.0746	0.2269	0.6151	0.1266
3	0.3889	13.9519	- 0. 883 5	1.5328	0.1840	0.4242	0. 095 9	0.2289	0.7108	0.1457
4	-0.0024	4.9810	- 7. 515 1	0.9266	0.1760	0. 259 0	0.0577	0.2201	0.5752	0.1059
5	0.0004	0.9974	- 1. 432 9	0.2505	0.1743	0. 287 0	0.0544	0.2171	0.4936	0.1071
6	1.4741	408.9024	- 9. 971 7	17.8886	0.3497	2.9528	0.3958	0.3520	1.6392	0.2713
÷	:	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷
20	0.1005	17.3027	- 5. 230 6	1.3630	0.1992	0.6769	0. 099 8	0.244 0	0.8655	0.1552
21	2.5633	486. 427 9	- 18. 425 6	25.0126	0.2362	1.7588	0.2230	0.2627	1.5484	0.2530
22	0. 199 6	31. 540 9	- 4. 152 8	1.8165	0.1869	0.6518	0.0856	0. 229 4	1.1831	0.1802



图 3 曲面样本动态聚类图

 $Fig. \ 3 \quad Clustering \ trend \ for \ free-form \ surface \ samples$

本零件可制造性的加工时间和加工成本,决策属性 为{优秀、良好、中等、差}。

对表 3 中的各连续属性进行离散,结果如表 4 所示。通过离散后的属性特征值,根据式(3)计算 属性权重。

 $U/IND(C) = \{ \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \dots, \{22\} \} \}$ $U/IND(D) = \{ \{1,3,7,12,13,17\}, \{2,4,10,11,14, 15,16,20,22\}, \{5,9\}, \{6,8,18,19,21\} \}$ $U/IND(C - \{c_1\}) = \{ \{5,12\}, \{7,10\}, \{8,9,18\}, \{19,22\}, \{1\}, \{2\}, \{3\}, \{4\}, \{6\}, \{11\}, \{13\}, \{14\}, \{15\}, \{16\}, \{17\}, \{20\}, \{21\} \}$

	表 2	自由曲面群体模式样本
Tab. 2	Group p	oattern of free-form surface samples

							-			
伯日	曲率平均值	曲率最大值	曲率最小值	曲率方差	u 向斜率	u 向斜率	u 向斜率	v向斜率	v向斜率	v 向斜率
姍丂	K_1 / mm ⁻¹	K_2 / mm^{-1}	K_3 / mm^{-1}	K_4 / mm ⁻¹	平均值 Q_{u1}	最大值 Q_{u2}	方差 Q _{u3}	平均值 Q_{v1}	最大值 Q_{v2}	方差 Q _{v3}
A 类	0.1289	10.3563	- 2. 292 0	0.9350	0.1843	0. 559 6	0.0884	0.2273	0. 779 8	0. 141 9
B 类	0.6590	58.7619	- 2. 092 8	4.1495	0.2047	0.4700	0.0971	0.245 5	1.1342	0.2015
C 类	0.3970	74.5626	- 86. 102 4	5.6206	0.2208	1.2882	0.1470	0.2500	1.4273	0. 191 6
D 类	2.9152	259. 854 9	- 1. 773 1	20. 266 6	0. 199 4	0.4545	0.0980	0.2517	0.8948	0. 169 7
E 类	0. 196 3	385.4713	- 11. 783 6	19.2813	0. 281 1	2.0921	0. 276 8	0.3045	1.5761	0. 242 6
F 类	1.1638	156.8669	- 3. 045 2	11.0169	0.2001	0.7196	0.1084	0.2813	1.5569	0.2138

表 3 曲面可制造性特征属性描述决策

Tab. 3	Decision	table	of	attribute	description
--------	----------	-------	----	-----------	-------------

	ubic	Decisio	ii tubit	01 40011	bute ut	seriptio	
伯日	几何	材料	表面粗	尺寸	位置	形状	决策
細亏	构型 c ₁	硬度 c ₂	糙度 c3	精度 c4	精度 c5	精度 c ₆	属性 D
1	D	60	$R_{a}3.2$	IT8	IT8	IT7	中等
2	А	43	$R_{a}0.2$	IT5	IT5	IT6	良好
3	А	58	$R_{a}0.2$	IT6	IT6	IT6	中等
4	А	58	$R_{a}1.6$	IT6	IT6	IT6	良好
5	А	60	$R_{a}1.6$	IT6	IT6	IT6	优秀
6	Е	57	$R_{a}3.2$	IT7	IT7	IT7	差
÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷	÷
20	А	52	$R_{a}0.8$	IT6	IT5	IT6	良好
21	Е	58	$R_{a}3.2$	IT7	IT7	IT8	差
22	А	52	$R_{a}0.8$	IT5	IT5	IT6	良好

表 4 离散化的特征属性描述决策

Tah 4	Discrete	decision	table	of	attribute	description
1 av. 4	Discrete	uecision	table	UI.	attribute	uescription

							- F
伯日	几何	材料	表面粗	尺寸	位置	形状	决策
细亏	构型 c_1	硬度 c ₂	糙度 c3	精度 c4	精度 c5	精度 c ₆	属性 D
1	3	2	1	3	2	2	1
2	0	0	0	0	0	1	2
3	0	1	0	1	0	0	1
4	0	1	1	1	1	1	2
5	0	2	1	1	1	1	3
6	4	1	1	2	2	2	0
÷	÷	:	÷	÷	:	:	÷
20	0	1	1	1	1	1	2
21	4	1	1	2	2	3	0
22	0	1	1	0	0	1	2

可得 $|pos_c(D)| = 22 |pos_{c_{-}|c_1|}(D)| = 13$ 故 Sig(c₁, C; D) = $\frac{|pos_c(D)| - |pos_{c_{-}|c_1|}(D)|}{|U|} =$

0.409

同理可以算出:Sig $(c_2, C; D) = 0.091$,Sig $(c_3, C; D) = 0.273$,Sig $(c_4, C; D) = 0$,Sig $(c_5, C; D) = 0.091$,Sig $(c_6, C; D) = 0.182$

根据式(4)对其进行规范化处理,可得: $w(c_1) =$ 0.391, $w(c_2) = 0.087$, $w(c_3) = 0.261$, $w(c_4) = 0$, $w(c_5) = 0.087$, $w(c_6) = 0.174$ 。根据得到的权值大小可知,复杂曲面零件几何复杂程度对可制造性的影响最大,其次是表面粗糙度和曲面的形状精度,材料硬度和位置精度的影响较小,而尺寸精度的权值为零,说明它是不必要属性,可以将该属性删除。所

得的权值反映了在该样本知识库中各属性对决策属 性的重要性,也与实际情况较为吻合。

5.2 设计曲面可制造性评价实例

设计了 2 个 NURBS 自由曲面并对其进行可制 造性评价。1 号设计曲面的控制顶点矩阵见表 5,权 矩阵见表 6;2 号设计曲面控制顶点矩阵见表 7,权 矩阵见表 8。两个曲面的节点矢量均为:u = (0, 0, 0, 0, 0.4, 0.6, 1, 1, 1), v = (0, 0, 0, 0.2, 0.5, 0.8, 1, 1, 1)。从两个曲面的控制顶点矩阵可知两个曲面大小相等, 而 2 号设计曲面的控制顶点矩阵可知两个曲面大小相等, 而 2 号设计曲面的控制顶点浮动更大, <math>z 方向最高顶点为(20,20,22), 最低顶点为 (30,30, -10)。从权矩阵上看, 2 号曲面的权矩阵 因子更大,从以上分析可以推断 2 号曲面就曲面构 型而言比 1 号曲面复杂。

表 5 1 号设计曲面控制顶点矩阵 Tab. 5 Matrix of control vertices of No.1 designed surface

	v [白]			(ゴ	
(0,0,0)	(0,10,0)	(0,20,0)	(0,30,0)	(0,40,0)	(0,50,0)
(10,0,0)	(10,10,-2)	(10,20,-10)	(10,30, -10)	(10,40,-10)	(10,50,0)
(20,0,0)	(20,10,-4)	(20,20,-10)	(20,30, -10)	(20,40,-10)	(20,50,0)
(30,0,0)	(30,10,-5)	(30,20,-2)	(30,30,-2)	(30,40,-2)	(30,50,0)
(40,0,0)	(40,10,0)	(40,20,0)	(40,30,0)	(40,40,10)	(40,50,0)

表 6 1号设计曲面权矩阵

Tab.	6 Weigh	nt matrix	of No.1 d	esigned su	irface
	v 向			u 向	
1	1	1	1	1	1
1	1	2	1	1	1
1	2	4	1	2	1
1	4	6	2	2	1
1	1	1	1	1	1

两个设计曲面的曲面模型如图 4a 和图 4c 所示。通过计算,1 号和 2 号设计曲面的几何特征参数如表 9 所示。分别计算设计曲面特征参数与曲面 群体模式样本(表 2)的贴合度。通过计算可得 1 号 设计曲面与 A 类曲面贴合度最大,故将 1 号设计曲 面划分到 A 类;而 2 号设计曲面与 D 类的的贴合度 最大,故将 2 号设计曲面划分到 D 类。

表 7 2 号设计曲面控制顶点矩阵

Tab. 7 Matrix of control vertices of No. 2 designed su	rface
--	-------

	ℓ [□]			<i>u</i> [句]	
(0,0,0)	(0,10,0)	(0,20,0)	(0,30,0)	(0,40,0)	(0,50,0)
(10,0,0)	(10,10,10)	(10,20,10)	(10,30,10)	(10,40,-2)	(10,50,0)
(20,0,0)	(20,10,10)	(20,20,22)	(20,30,10)	(20,40,-5)	(20,50,0)
(30,0,0)	(30,10,10)	(30,20,10)	(30,30, -10)	(30,40,-2)	(30,50,0)
(40,0,0)	(40,10,0)	(40,20,0)	(40,30,0)	(40,40,10)	(40,50,0)

表 8	2 号设计	h曲面权矩阵
-----	-------	--------

Tab.8	Weight	matrix	of	No. 2	designed	surfaces
-------	--------	--------	----	-------	----------	----------

	v 向		u 向				
1	1	1	1	1	1		
1	3	5	1	1	1		
1	2	14	1	2	1		
1	3	3	2	2	1		
1	1	1	1	1	1		

设计曲面的加工技术复杂度的属性如表1所

示。两个曲面的材料硬度相同,尺寸精度、位置精度 和形状精度要求均相同,而对表面粗糙度的要求 1号设计曲面更高(*R*_a1.6)。根据设计曲面可制造 性的特征属性描述,分别计算设计曲面与样本知识 库中各样本曲面的相似度。通过计算可得,1号设 计曲面与4号样本曲面(图4b)最为相似,即

$$S(n_4) = 0.391 \times 1 + 0.087 \times 1 + 0.261 \times 1 + 0.261 \times 1 + 0.087 \times 1 + 0.261 \times 1 + 0.087 \times 1 + 0.000 \times 1 + 0.0000 \times 1 + 0.00000 \times 1 + 0.0000 \times 1 + 0.0000 \times 1 + 0.00000 \times$$

 $0.087 \times 0.67 + 0.174 \times 1 = 0.971$





Fig. 4 Surfaces model

(a) 1 号设计曲面 (b) 4 号样本曲面 (c) 2 号设计曲面 (d) 1 号样本曲面

表9 设计曲面几何构型特征参数

编号	曲率平均值	曲率最大值	曲率最小值	曲率方差	u 向斜率	u 向斜率	u 向斜率	v 向斜率	v向斜率	v 向斜率
	K_1 / mm^{-1}	K_2/mm^{-1}	K_3 / mm^{-1}	K_4 / mm ⁻¹	平均值 Q_{u1}	最大值 Qu2	方差 Q _{u3}	平均值 Q_{v1}	最大值 Q_{v2}	方差 Q _{v3}
1	0.0736	3.4264	2.1863	0.4265	0.1836	0. 581 4	0.0875	0.2256	0.7466	0. 143 8
2	1.8778	227. 992 8	- 6. 291 8	15.0522	0.2125	0. 786 4	0. 129 3	0.2676	1.0304	0. 195 4

表 10 设计曲面可制造性特征属性描述 Tab. 10 Attribute description of designed surfaces

사람 다	几何	材料	表面粗	尺寸	位置	形状
编号	构型 c_1	硬度 c ₂	糙度 c3	精度 c4	精度 c5	精度 c ₆
1	А	58	$R_{a}1.6$	IT7	IT7	IT6
2	D	58	$R_{a}3.2$	IT7	IT7	IT6

设计曲面与 4 号样本曲面相似度为 0.971, 而 4 号样本曲面的可制造性为良好, 故可推断 2 号设 计曲面零件的可制造性良好。而 2 号设计曲面与 1 号样本曲面的相似度最大, 即

 $S(n_4) = 0.391 \times 1 + 0.087 \times 0.943 + 0.261 \times 1 +$

 $0.087 \times 0.67 + 0.174 \times 0.67 = 0.909$

由1号样本曲面的可制造性可知2号设计曲面 的可制造性为中等。如图4所示,1号样本曲面与设计 曲面都有曲率非常大的凸峰,加工时容易产生干涉。 1号样本曲面所选用的机床、刀具及相关加工工艺参数 均可作为对2号设计曲面进行加工时的参考。

6 结论

(1)针对复杂曲面零件的特点,提出了曲面零件可制造性评价的树形指标体系,从曲面几何构型复杂度和加工技术复杂度两个方面讨论其可制造性。建立了用于曲面可制造性评价的样本知识库。 在模糊聚类对相似几何构型的样本曲面进行聚类的基础上,综合考虑加工技术复杂度的各指标,运用粗糙集理论进行特征属性的约减和权重计算。

(2)提出了用样本曲面零件的可制造性来推断 设计曲面可制造性,给出了设计曲面与知识库中样 本曲面贴合度计算方法。运用 Matlab 实现了上述 算法,通过实例分析对算法进行验证。

参考文献

- 1 周济,周艳红. 数控加工技术[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- 2 胡伟,钟毅芳,周济.并行设计中机械产品可制造性评价方法研究[J].农业机械学报,2001,32(3):83~89.
 Hu Wei, Zhong Yifang, Zhou Ji. Manufacturability evaluation of mechanical products in concurrent design [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(3):83~89. (in Chinese)
- 3 Molcho G, Zipori Y, Schneor R, et al. Computer aided manufacturability analysis: closing the knowledge gap between the designer and the manufacturer[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 153 ~ 158.
- 4 Kumar S, Singh R, Sekhon G S. A component check knowledge-based system for assessing manufacturability of sheet metal parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 37(2): 64 ~ 69.
- 5 李桂东,周来水,安鲁陵,等. 复杂曲面零件可加工性分析的多属性评价算法研究[J]. 中国机械工程, 2009,10(3): 315~319. Li Guidong, Zhou Laishui, An Luling, et al. An approach to multi-attribute evaluation in machinability analysis for complicated surface parts [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 10(3): 315~319. (in Chinese)
- 6 Korosec M, Balic J, Kopac J. Neural network based manufacturability evaluation of free form machining [J]. International Journal of Machine Tools & Manufactures, 2005, 45(1): 13 ~ 20.
- 7 刘红军,莫蓉,范庆明,等. 面向航空发动机叶片的可制造性评价方法[J]. 计算机集成制造系统, 2009,15(7):1 328~ 1 335.

Liu Hongjun, Mo Rong, Fan Qingming, et al. Manufacturability evaluation method for aeroengine blades [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2009, 15(7): 1 328 ~ 1 335. (in Chinese)

Li Shuping, Xie Shaorong, Cheng Jun, et al. Parameter optimization for spherical parallel mechanism bionic eye based on differential evolution [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 189 ~ 194. (in Chinese)

- 10 曾宪菁,黄田,曾子平. 基于三自由度球面并联机构数控回转台的机械设计[J]. 机器人技术与应用,2000(4):23~26. Zeng Xianjing, Huan Tian, Zeng Ziping. Design of NC rotary working table based on spherical parallel mechanism with 3-DOF [J]. Robot Technology and Application, 2000(4): 23~26. (in Chinese)
- 11 张艳伟,韦斌,王南,等. 空间转动 3 SPS S 并联机构运动学性能分析[J]. 农业机械学报,2012,43(4):212~215. Zhang Yanwei, Wei Bin, Wang Nan, et al. Kinematic performance analysis of 3 - SPS - S spatial rotation parallel mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 212~215. (in Chinese)
- 12 崔国华,王国强,赵春江,等. 空间转动 3 自由度并联微调机构设计与运动学分析[J]. 农业机械学报,2008,39(9):144~148.

Cui Guohua, Wang Guoqiang, Zhao Chunjiang, et al. Mechanism design and kinematic analysis on a three degree-of-freedom spatial manipulator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(9): 144 ~ 148. (in Chinese)

- 13 Dai J S, Zhao T S. Sprained ankle physiotherapy based mechanism synthesis and stiffness analysis of robotic rehabilitation device [J]. Autonomous Robots, 2004, 16(2):207 ~ 218.
- 14 Jin Guoguang, Chang Boyan. Configuration change and mobility analysis of a new metamorphic parallel mechanism used for bionic joint[M]//Jian S Dai, Matteo Zoppi, Xiangwen Kong. Advances in Reconfigurable Mechanisms and Robots. Berlin: Springer, 2012: 333 ~ 342.
- 15 刘辛军.并联机器人机构尺寸与性能关系分析及其设计理论[D].秦皇岛:燕山大学,1999.
 Liu Xinjun. The relationships between the performan cecriteria and link lengths of the parallel manipulators and their design theory
 [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 1999. (in Chinese)
- 16 Merlet J P. Jacobian, manipulability, condition number, and accuracy of parallel robots [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2006, 128(1): 199 ~ 206.
- 17 Gosselin C M, Angeles J. Singularity analysis of closed-loop kinematic chains [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1991, 6(3): 281 ~ 290.
- 18 Joshi S A, Tsai L W. Jacobian analysis of limited-DOF parallel manipulators [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2002, 124(2): 254 ~ 258.
- 19 谭兴强,谢志江,谢永春. 6_PUS 并联机构奇异判据推导与奇异性分析[J]. 农业机械学报,2012,43(12):234~239.
 Tan Xingqiang, Xie Zhijiang, Xie Yongchun. Singularity judge deriving and singularity analysis for 6_PUS parallel mechanism
 [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 234~239. (in Chinese)
- 20 王德伦,戴建生. 变胞机构及其综合的理论基础[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 32~42.
 Wang Delun, Dai Jiansheng. Theoretical foundation of metamorphic mechanism and its synthesis [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 32~42. (in Chinese)
- 21 Huang Z, Liu J F, Li Q C. A unified methodology for mobility analysis based on screw theory. Smart device and machines for advanced manufacturing [M]. Berlin: Springer-Verlag, 2008: 49 ~ 78.
- 22 Dai J S, Rees J J. A linear algebraic procedure in obtaining reciprocal screw systems [J]. Journal of Robotic Systems, 2003, 20(7): 401 ~ 412.

(上接第 259 页)

- 8 谢晋,邹明山,崔晓玲. 复杂自由曲面曲率分布特征对数控铣削性能的影响[J]. 机械工程学报, 2009,45(11):158~162. Xie Jin, Zou Mingshan, Cui Xiaoling. Effect of curvature distribution feature of complex free-form surface on CNC milling performance[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009,45(11):158~162. (in Chinese)
- 9 Fan Cheng, Zhao Ji, Zhang Lei, et al. Method of evaluating the complexity of geometries for free-form surfaces [J]. Advanced Materials Research, 2012, 490 ~ 495: 1 150 ~ 1 155.
- 10 李增芳,何勇.基于粗糙集与 BP 神经网络的发动机故障诊断模型[J].农业机械学报,2005,36(8):118~121. Li Zengfang, He Yong. Study on fault diagnosis model of misfire in engines based on rough set theory and neural network technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(8):118~121. (in Chinese)
- 11 钱建平,吴晓明,杨信廷,等. 基于粗糙集和 WebGIS 的农产品质量安全应急管理系统[J]. 农业机械学报,2012, 43(12):123~129.

Qian Jianping, Wu Xiaoming, Yang Xinting, et al. Farm products quality safety emergency management system based on rough set and WebGIS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(12): 123 ~ 129. (in Chinese)

12 Kurgan L A, Cios K J. CAIM discretization algorithm [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2004, 16(2): 145 ~ 153.