

基于本体几何特征分析的产品制造行为推理

郝泳涛¹, 刘 峥¹, 楼狄明²

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学 汽车学院, 上海 201804)

摘要: 将本体理论应用于产品制造行为建模和推理中. 通过分析零件的加工面邻接图, 逐个提取产品的几何特征, 从而形成制造行为的静态本体模型; 以无向图的布尔运算和本体建模理论为基础, 分析零件的加工进刀方向, 对静态本体模型中的特征归纳优化, 形成可供分析的几何本体的过程序列模型.

关键词: 本体理论; 几何特征; 制造行为; 序列模型

中图分类号: TP 391.7

文献标识码: A

Geometry Feature and Manufacture Behavior Sequence Based on Ontology Theory

HAO Yongtao¹, LIU Zheng¹, LOU Diming²

(1. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Ontology is applied to the study of product's characteristic model. With the ontology theory and the manufacturing face adjacency graph from the components as foundation, the partial characteristic can be recognized in turn — it forms the manufacture behaviors static model. Based on the undirected graph and its Boolean calculation, the integrated manufacture behavior sequence forms by the clamp direction of characteristic, whose sequence can be analyzed in following steps.

Key words: ontology; geometry feature; manufacture behavior; process model

在诸多特征识别方法中, 基于属性邻接图的特征识别方法是最常用的. 早在 21 世纪初, 就有研究者将边之间的关系作为图的构成元素, 实现了以有向图为基础的特征识别方法^[1], 文献[2-3]在其基础上进一步引入了边的凸凹性的判定, 指出合理的数据结构和建模方法能够提高整个系统的性能. 但在基于有向边

形成的属性邻接图中, 相当数量的组合特征并不能被明确识别, 并且仅对于轴类零件有较好的识别效果^[4-5]. 同时, 由于没有一个规范的数据结构作为支撑, 特征识别结果的表达也相对无序.

目前对加工特征识别的研究一般都以特征的静态提取为主, 对提取后的特征重新分析、形成可加工序列的研究较少^[6]. 笔者从定义完整的产品几何本体概念入手, 通过设计规范的特征数据结构, 建立产品的几何本体的静态特征模型和特征序列过程模型, 并最终形成可指导零件加工的加工序列.

1 产品几何本体模型的定义

本体论是一种概念化的说明, 是对客观存在的概念及其关系的一种描述^[7]. 引入本体的目的首先是使术语“标准化”, 实现领域知识的规范化及有效的共享知识; 其次是实现知识的“可重用性”. 在几何建模中, 本体的定义可以按照如下方式表达:

引理 1 本体的概念化描述. 本体是几何特征组合 D 的概念化描述, 包括两个基本的要素: 特征和特征之间的关系, 可形式化定义为结构 $C = \langle D, R \rangle$, 其中 D 是一个领域(domain), R 是建立在 D 上的集合或相应关系.

在几何特征建模中, 有特征、特征的属性以及特征之间的关系这三种结构需要阐述. 引理 1 中的 D 和 R 并不能完整地定义特征的相互关系, 为此, 引入状态集合 W .

引理 2 引入多元组本体. 全函数(n 元)概念关系 $\rho^n: W \rightarrow 2^D$, 从 W 映射到 D 上的所有 n 元关系的集合(在此 $n=3$). 基于以上的引理 1 和引理 2, 可以扩展如下定义:

收稿日期: 2010-06-07

基金项目: 国家自然科学基金(E050604/51075306)

第一作者: 郝泳涛(1973—), 男, 教授, 工学博士, 主要研究方向为智能设计与虚拟现实. E-mail: haoyt@vip.sina.com

通讯作者: 刘 峥(1986—), 男, 硕士生, 主要研究方向为计算机应用. E-mail: charlene009lz@hotmail.com

扩展引理 1 应用于特征建模的本体是一个有序的三元组 $C = \langle D, W, R \rangle$. 其中, R 是几何域空间 $\langle D, W \rangle$ 上的概念关系的集合, D 是几何本体定义的领域, W 是其中所有的属性的状态集合.

在扩展引理 1 的基础上, 经过对产品几何本体的属性分析, 可以将几何本体模型以有序三元组的概念几何加以描述: 领域 $\{D\}$ 为产品的几何特征集合; 属性集 $\{W\}$ 是特征所具有的属性集合; 关系映射 $\{R\}$ 是从特征到属性的映射. 综上, 可以将几何产品的本体理论与概念化定义对比示于表 1.

表 1 本体概念化理论与几何本体模型之间的对应关系
Tab. 1 The contrast between the concept and the descriptal geometry of the ontology

集合	本体的概念性定义	集合	几何本体模型	
C	本体的概念属性	$\{C\}$	几何本体的描述属性	
D	具有类似属性的领域	$\{D\}$	几何特征	相同加工属性的单元
W	领域中各类本体属性集	$\{W\}$	尺寸属性	各特征的属性集合
R	在本体和相应属性间建立的映射关系集合	$\{R\}$	常量符号 谓词符号	特征与属性间的映射

至此, 已经完成了几何本体的框架定义. 这些框架定义需要进一步引入预定义的可能状态集合, 以区分集合 W 中的属性元素.

定义 1 有几何本体 $C = \langle D, W, R \rangle$, 则对任一可能属性空间 $w \in W$, 其关于 C 的“预定客体结构”

(intended world structure)——属性及其间的关系为 $S_w C = \langle D, R_w C \rangle$, 其中 $R_w C = \{\rho(w) \mid \rho \in R\}$ 是 R 中元素(相对于 w)的真子集. 而 $S_C = \{S_w C \mid w \in W\}$ 则表示了所有关于 C 的预定客体结构. 即 $R_w C$ 为单个特征的属性, $S_w C$ 是一个特征的属性集合.

在完成了几何本体的定义之后, 需要考虑用什么样的结构和语言来描述这些本体所包含的特征属性. 为此建立如下属性描述定义的规范:

定义 2 令 L 为一逻辑语言, V 为其词汇集. L 的一个模型(model)定义为结构 $\langle S, I \rangle$, 其中 $S = \langle D, R \rangle$ 为世界结构, $I: V \rightarrow D \cup R$ 为一个解释映射, 在 L 中, I 通过单一映射和多重映射构成完整的解释关系.

以几何本体作为世界空间的内涵重新描述定义为: 令 L 为一特征间逻辑语言, V 为其可能的所有属性(词汇集), 则定义 L 的本体承约(ontological commitment)为 $K = \langle C, J \rangle$. 其中 $C = \langle D, W, R \rangle$ 为域 D 上的所有特征集合, $J: V \rightarrow D \cap R$ 为一个函数, J 通过单一映射和多重映射构成完整的解释关系.

通过定义 1, 2, 完成了几何本体的两种模型的抽象定义. 在制造行为提取的过程中, 需要将抽象的定义与产品的特征及属性相结合. 如图 1 所示, 产品的几何模型及其拥有的特征构成了几何本体的概念集合 $\{C\}$, 通过函数 J 解释, 形成描述本体的静态制造行为集合 $\{V\}$; 进而通过 XML 语言(L)描述, 就可以得到最终的优化制造过程序列.

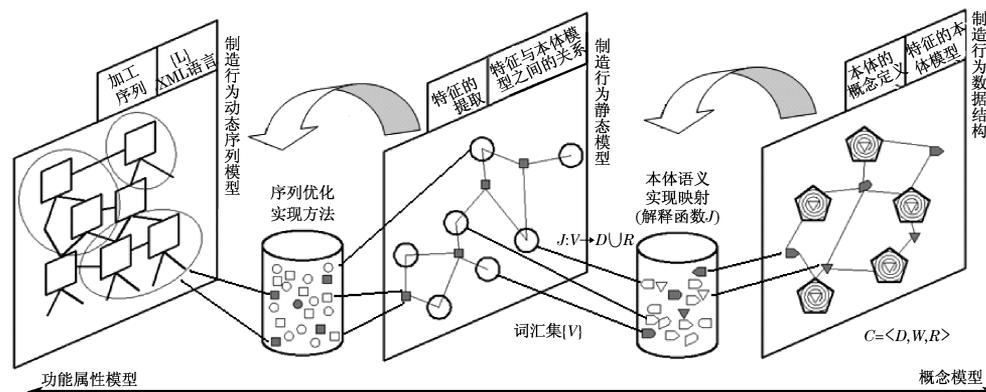


图 1 产品的几何本体概念模型与功能属性模型

Fig. 1 The relationship of product geometrical ontology and the framework in attributes represent definition

2 制造行为定义及其模型推理

2.1 根据本体理论分析制造行为的定义

在定义产品的几何本体基础上, 可以将产品的几何模型本体化. 将其中的特征信息归纳为本体的

领域集合 $\{D\}$; 同时, 将 $\{D\}$ 中的特征元素的属性加以提取, 形成 $\{W_n \mid n \in R\}$ 属性集, 在对应映射集 $\{R\}$ 的作用下, 实现完整的几何本体. 以几何本体的定义为基础, 可以得到如下产品的制造行为的定义.

定义 3 在产品的制造过程中, 将几何本体的特征集合 $\{C\}$ 中各个特征元素及其关系重构归纳, 最

终形成可以实施加工的独立特征的有序组合. 制造行为包含两个层次: 静态制造行为 (manufacture, 记做 M) 和动态制造行为 (operation, 记做 O). 前者表

示每个特征的分立, 而后者则是产品加工的过程序列. 动态制造行为来自于对静态制造行为的推理和演绎, 其间的关系见图 2.

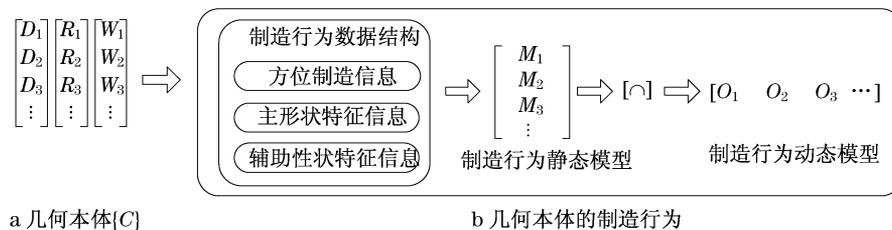


图 2 基于几何本体的产品制造行为的定义与推理

Fig. 2 Defining and reasoning on products manufacturing behavior in ontology

按照制造行为的定义, 在对零件的几何本体结构深入分析以及考虑基于属性邻接图的特征识别方法获取信息能力的基础上, 将几何本体的制造行为分为两大类: 方位制造信息, 形状制造信息. 见图 3.

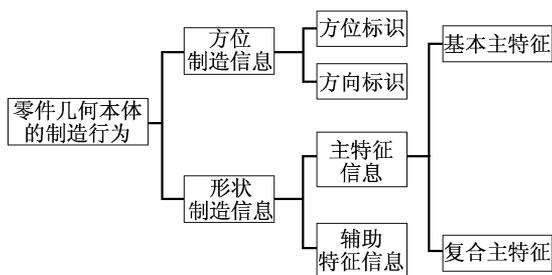


图 3 零件的几何本体制造行为分类层次结构

Fig. 3 The classification structure of product's geometrical ontology

(1) 方位制造信息—— $S_w C$: $S_w C = \{S_w C | w \in W\}$. 在三维空间坐标系中, 任何一个几何本体, 各表面都有其外法线, 外法线的指向和外法线与坐标平面的夹角, 间接反映了构成零件几何本体的几何元素之间的相互位置关系. 方位制造信息即是反映几何本体各表面方位信息的集合, 其元素包括方位标识和方位面外法线与各坐标平面的夹角.

(2) 形状制造信息—— $R_w C$: $R_w C = \{\rho(w) | \rho \in R\}$. 零件上具有一定拓扑关系的一组几何元素 (点、线、面) 所组成的特定形状, 具有特定的功能, 且与一定的加工方式相对应. 不同的形状制造信息, 对于构造零件形状、满足零件的功能要求, 或工艺要求所起的作用是不同的. 因此, 这里将形状制造信息进一步分为主特征信息和辅助特征信息.

相对轴类零件而言, 这里零件的几何本体的制造行为更为复杂多样, 且规律性表现也更为多样, 因此加工特征的识别相对比较困难. 考虑到计算的复杂性和效率, 仅考虑零件几何本体制造行为中的基

本主特征信息的识别. 它的几何本体孤立于制造行为 (即不与其他特征发生交互的制造行为), 识别比较容易; 但当行为之间交互制造行为时, 由于原有的行为模型遭到破坏, 识别工作更为复杂.

2.2 建立基于加工面无向邻接图的制造行为静态模型

为提取加工部件的几何形状, 首先要将加工部分的特征实体单独提取出来, 并根据其具体形状, 产生相应的属性描述表. 为此, 采用加工面无向邻接图 (manufacturing face adjacency graph, MFAG) 结构表示特征属性之间的关系. 但 MFAG 图中仅简单描述相邻面之间的拓扑关系, 若直接采用这种方式匹配, 许多语义上差异很大的特征都会被错误地归为同一特征. 因此, 除了拓扑关系, 还需捕捉相邻面之间的几何关系. 因此, 需要根据已经建立的几何特征的本体模型, 对 MFAG 图扩展概念, 对边和面的属性进一步定义.

定义 4 加工面无向邻接图 $G = \langle N, A, T \rangle$, 其中, $\{N | n \in D\}$ 为图中节点的集合与零件或特征的每个表面本体元素相对应; $\{A | a \in W\}$ 为边的集合, 对应几何本体几何 $\{N\}$ 中的每 2 个相邻面之间的关系; $\{T | t \in R\}$ 为面和边的属性集, 对应于几何本体概念定义中的属性映射 $\{R\}$, 反映面与边之间的关系.

参照属性邻接图的拓展定义方法, 给出一个具体零件的 MFAG 表达 (图 4). 图中所得加工部分的提取由图的布尔减运算得到. 由未加工零件的 MFAG 减去零件的 MFAG, 即可得到需加工部分的特征邻接图.

图 5 是 1 个长方体毛坯上加工一个三棱柱形凹坑的 MFAG 图布尔减的过程. 图的布尔减定义为: 两个图的对应节点 (面) 相减, 而后重新构造节点之间连接弧的过程. 节点相减是将对应的几何面相减, 保持被减节点对应的外法线或外环方向不变, 减数的对应节点的外法线或外环取反方向. 通过图的布尔

减,得到了零件的加工部分特征实体.

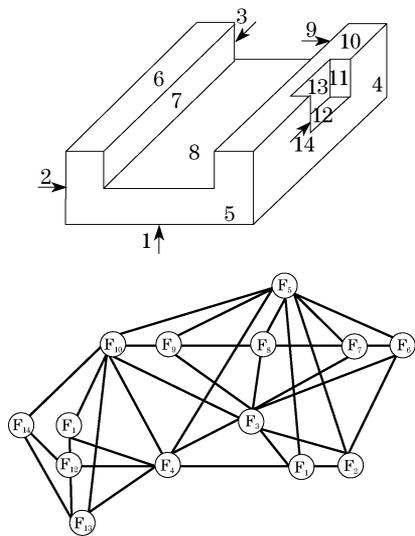


图 4 用于描述几何本体的属性拓展 MFAG 图

Fig.4 MFAG with the extension attribute of the product

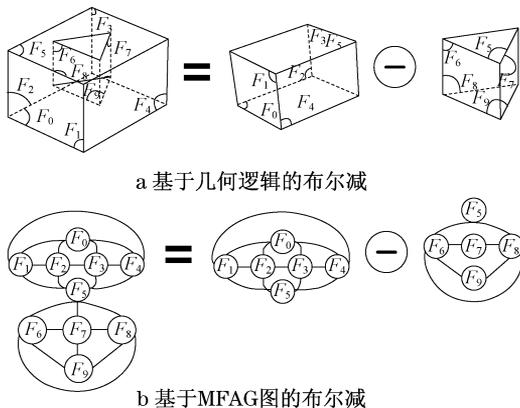


图 5 基于 MFAG 图的布尔减的特征实体的分解

Fig.5 Extraction of feature's datum plane in MFAG

进而,将已得到的被加工部分的 MFAG 与待加工几何本体做交运算 $[\cap]$,所得的几何 $\{F \mid f \in N\}$ 即为所需加工特征的加工基准面.在得到加工部分的特征实体和加工基准面后,零件的静态模型的基本组成元素就齐备了.在图 6 中, F_{10} 为两个特征的几何本体重用的表面同时出现在两个特征的属性邻接图中,所以是特征 1,2 的加工基准面.

在图 4 的实例中,将加工后的几何本体的属性邻接图和加工前的属性邻接图按照上述方做布尔减后,可以得到两个子图.这就说明分别是有两个特征需要分别加工.根据图 6 可以归纳得面集合 $\{F_7, F_8, F_9\}$ 和面集合 $\{F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{14}\}$ 两个特征,这两个特征的基准面分别是 F_6 和 F_{10} .这样就得到了制造序列的静态模型.

2.3 推导基于本体论的制造行为过程序列

研究上节所建立的几何本体的静态模型,通过分析其中抽取的几何特征和特征之间的关系,可以将其间的关系定义为以下几类:

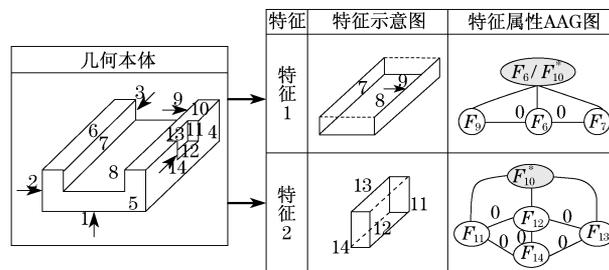


图 6 几何本体的特征提取和制造行为的静态模型

Fig.6 The manufacture behavior static model of geometrical ontology

- R_1 , 并列关系——属于同一个父节点且之间不交互,在特征关系图中属于隐式关系.
- R_2 , 交叠关系——有一个面贴合,且贴合面的外法线方向相反.
- R_3 , 干涉关系——两个特征存在特征实体相交.
- R_4 , 包容关系——负特征所包围的实体在正特征实体内部(负特征包括孔、盲孔、空洞等).

在机械加工中,所有的制造行为都可以在 3 轴机床上沿零件 3 个坐标的 6 个方向(+X, -X, +Y, -Y, +Z, -Z)中选择进刀方向,完全能加工出所需的外形.基于图的沿切削深度方向的制造行为的提取算法的原理,是将待加工部分以进刀方向垂直面为界限,分解为若干独立的特征实体.在这样的处理中,逐层分解出的特征实体部分称为局部制造行为.而这些行为的集合就构成了该零件的制造行为过程模型的基本元素.

对局部制造行为分解得到的子特征,进一步的组合过程如下:

步骤 1——组合,检查进刀方向当前子特征及其相邻子特征之间坐标相同节点的几何属性.

步骤 2——重构,如果上下层子特征所对应节点的几何面重合,通过两个子特征 MFAG 图的布尔和运算,将两个子特征合并,生成新的 MFAG 图.

步骤 3,沿该进刀方向继续搜索,合并所有可以合并的子特征.

步骤 4,由新形成的 MFAG 图对应的边界构造制造过程序列模型.

至此,通过上述算法已经完成了制造行为的优化重构,接下来要按照加工方向形成制造行为关系序列——将静态模型中形成的特征表面编号,并通过沿各进刀方向的搜索,形成制造行为关系序列(feature relation graph, FRG).FRG 根据其本体的约束定义为 $VG = \langle V, E, A \rangle$.其中, V 为节点(特征)

集; E 为连接弧(特征关系)集; A 为特征关系的属性;以0代表干涉,1代表交叠,2代表包容.如图7所示,对零件毛坯中的每个分立特征编号并按照加工方向横向排列,其中涉及到多个特征引用的面用*表示.在序列中,对于包含*的特征,需要将其拆分为邻接于左右节点的子特征序列,同时,其左右邻接节点就是它的加工基准面.

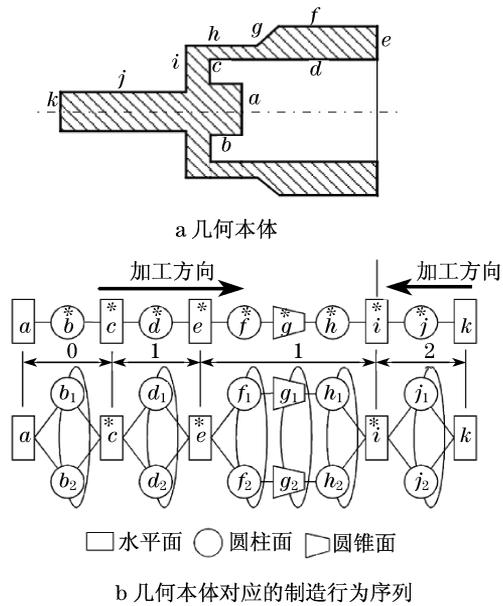


图7 几何本体示意图和它的制造行为过程序列
Fig.7 The geometrical ontology and its sequence of manufacture behavior

3 应用于几何本体的制造行为推理实例

使用文方法对图8a中的零件的几何本体进行特征序列知识的识别,所得的加工特征如图8b所示,并据此以XML语言描述静态的特征;按照进刀方向对所得的特征组成序列并进行优化,最终得到产品的制造行为过程序列模型(图9).这个优化

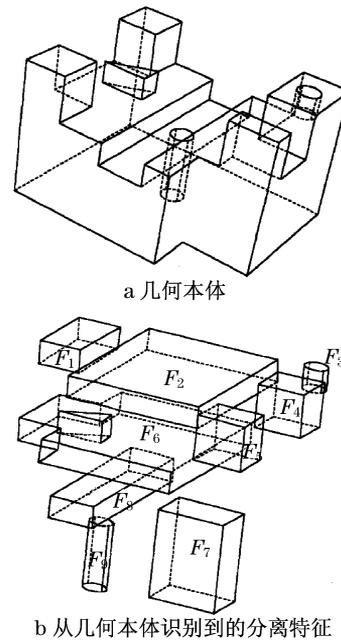


图8 实例零件的几何本体及其包含的加工特征
Fig.8 The geometrical ontology of product and features

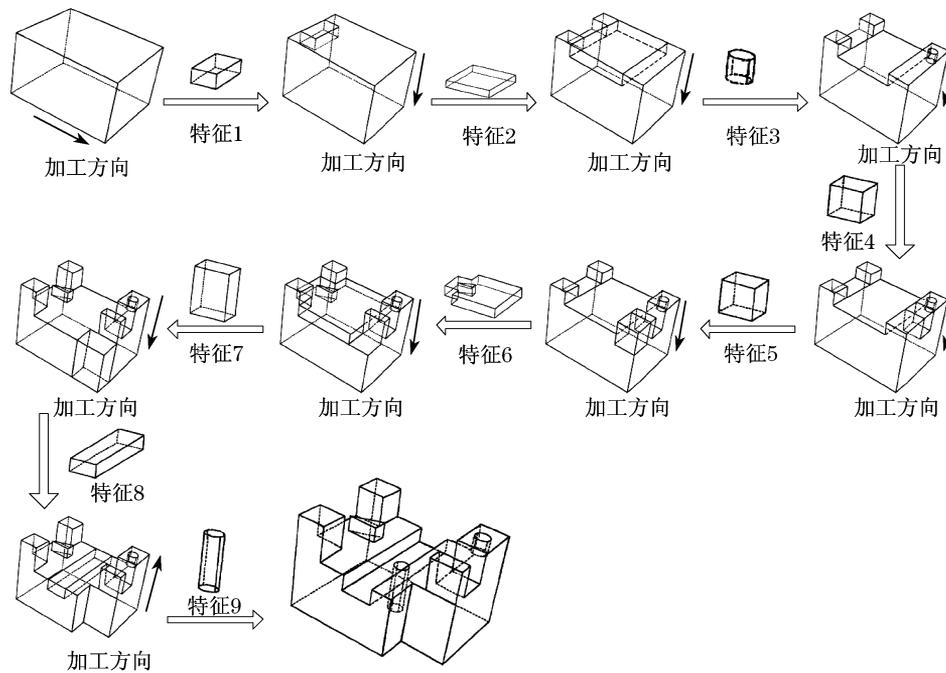


图9 实例零件的几何本体制造行为过程序列
Fig.9 The sequence of manufacture behavior

序列符合加工过程的一般需求,可以有效地应用于产品设计单元与工艺设计、工装设计、数控编程等单元的集成.

在上述算法中,通过先分解单个静态制造行为,再按照几何本体加工时装夹的方向,对静态制造行为为特征优化.整个过程突出了算法的实用、可靠和简洁,以保证方法具有较强的健壮性——即使中间步骤中断,依然可提供后续单元可用的加工特征信息.

4 结语

本文所提出的加工特征制造行为推理方法,以本体为数据结构建模基础,使用图的布尔运算,结合基于图的方法和特征实体分解方法,给出了制造特征的识别、方向性制造行为的组合优化、制造行为过程序列的建立等一系列算法,最终形成了能够应用于零件加工的特征加工序列.该方法具有简洁、可行、有效和实用的特点,可以用于 CAD 系统集成化、智能化的研究与开发.

参考文献:

- [1] Bojan Babic, Nenad Nestic, Zoran Miljkovic. A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition[J]. *Computers in Industry*, 2008, 59: 321.
 - [2] Paolo Di Stefano, Francesco Bianconib, Luca Di Angelo. An approach for feature semantics recognition in geometric models [J]. *Computer-Aided Design*, 2004, 36: 993.
 - [3] Huang Z, Yip Hoi D. High-level feature recognition using feature relationship graphs[J]. *Computer-Aided Design*, 2002, 34: 561.
 - [4] Joshi S, Chang T C. Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model[J]. *Computer-Aided Design*, 1988, 20(2): 58.
 - [5] HAO Yongtao. Research on auto-reasoning process planning using a knowledge based semantic net [J]. *Knowledge-Based Systems*, 2006, 19: 755.
 - [6] 安鲁陵, 葛友华, 周来水, 等. 基于实体模型的加工特征提取与识别[J]. *机械科学与技术*, 2000, 19(4): 665.
AN Luling, GE Youhua, ZHOU Laishui, et al. On extraction and recognition of machining feature based on solid model [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2000, 19(4): 665.
 - [7] 高曙明. 自动特征识别技术综述[J]. *计算机学报*, 1998, 21(3): 281.
GAO Shuming. A survey of automatic feature recognition [J]. *Chinese Journal of Computers*, 1998, 21(3): 281.
-
- (上接第 1306 页)
- [2] Golob T F. Structural equation modeling for travel behavior research[J]. *Transport Research; Part B*, 2003, 37: 1.
 - [3] Mokhtarian P L, Salomon I. Travel for the fun of it[J]. *Access*, 1999, 15: 16.
 - [4] Mokhtarian P L, Salomon I. How derived is the demand for travel? some conceptual and measurement considerations[J]. *Transportation Research; Part A*, 2001, 35: 695.
 - [5] Redmond L S, Mokhtarian P L. The positive utility of the commute: modeling ideal commute time and relative desired commute amount[J]. *Transportation*, 2001, 28: 179.
 - [6] Ory D T, Mokhtarian P L, Redmond L, et al. When is commuting desirable to the individual? [J]. *Growth and Change*, 2004, 35: 334.
 - [7] Zahavi Y, Talvitie A. Regularities in travel time and money expenditures [J]. *Transport Research Record No. 750, Household Activities, Budget Constraints, and Stability of Travel*, 1980(750): 139.
 - [8] Metz D. *The limits to travel: how far will you go?* [M]. London: Earthscan, 2008.
 - [9] Mokhtarian P L, Chen C. TTB or not TTB, that is the question: a review and analysis of the empirical literature on travel time (and money) budgets [J]. *Transportation Research; Part A*, 2004, 38: 643.
 - [10] Stuart K R, Mednick M, Bockman J. Structural equation model of customer satisfaction for the New York City subway system [J]. *Transportation Research Record; Journal of the Transportation Research Board*, 2000(1735): 133.
 - [11] Stradling S G, Anable J, Carreno M. Performance, importance and user disgruntlement: a six-step method for measuring satisfaction with travel modes [J]. *Transportation Research; Part A*, 2007, 41: 98.
 - [12] Friman M, Edvardsson B, Gärling T. Frequency of negative critical incidents and satisfaction with public transport services [J]. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 2001, 8: 95.
 - [13] Department for Transport of UK. *National Travel Survey 2008* [R]. London: Department for Transport of UK, 2009.
 - [14] Ching J Y, Wong A K C, Chan K C C. Class-dependent discretization for inductive learning from continuous and mixed-mode data [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1995, 17(7): 641.
 - [15] Chan K C C, Wong A K C. APACS: a system for automated pattern analysis and classification [J]. *Computational Intelligence*, 1990(6): 119.