

基于中面的注塑产品特征识别

李伟平 谷正气 何忆斌

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙,410082

摘要:摒弃传统的基于实体模型的特征识别方法,提出基于中面模型的方法。首先提出了适合于中面模型的表达方法:面一边属性图和面一边属性矩阵;然后针对注塑产品的特点,对特征进行了分类,将其分为面特征、连接特征和加强特征;最后对中面模型的中面、边环和边的几何拓扑特征进行了分析,分别研究了基于中面的特征识别算法,给出了算法实现方法和实例。

关键词:特征识别;中面;面一边属性图;面一边属性矩阵

中图分类号:TP391. 72 **文章编号:**1004—132X(2009)19—2387—06

Feature Recognition of Molded Part Product Based on Middle Face

Li Weiping Gu Zhengqi He Yibin

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha, 410082

Abstract: The conventional feature recognition method was abandoned here and a method based on middle face model was proposed. Firstly, the appropriate method was proposed to represent middle face model, i. e. face—edge attribute graph and face—edge attribute matrix. Secondly, according to characteristics of molded product, features were classified into face feature, link feature and strengthen feature. Thirdly, based on analyzing topology and geometry characteristics of the faces, edge loops and edges in middle face models, feature recognition methodology based on middle face model was researched respectively. Lastly, algorithm implementation method and a case study were presented.

Key words: feature recognition; middle face; face—edge attribute graph; face—edge attribute matrix

0 引言

产品的设计决定了后续工艺的可行性,在注塑产品设计前,需要对产品进行可成形性分析,以便及早发现产品设计对后续模具设计和成形工艺有何不良影响。由于注塑产品结构的复杂性,设计者很难逐个检查结构的合理性,而自动化的成形性分析系统无疑是比较有效的检测手段。编写这种自动化成形性分析系统的关键是此系统能够自动从产品几何模型中提取设计特征。

自动特征识别是 CAD 向 CAPP、CAM 传递信息的重要手段,包括基于面表示和基于体积表示的自动特征识别方法,这些方法大多面向机械加工特征,面向注塑产品或包含自由曲面的自动特征识别方法并不多见^[1]。

1 注塑产品特征识别现状

与机械加工零件不同,注塑产品一般由壁厚均匀的几何实体构成,几何拓扑关系复杂,用识别加工特征的算法识别注塑产品特征十分困难^[2]。

文献[3]提出了一种基于图的注塑产品侧凹

特征识别方法,建立并应用扩展面属性邻接图对凹特征、凸特征及通孔三种类型的侧凹特征进行描述,采用子图匹配的方式将侧凹特征的特征子图从产品面属性邻接图中识别出来。

文献[4]提出了一种基于面的自由曲面加工特征识别方法,该方法能够从一系列复杂的曲面中确定加工区域,但由于应用领域的差异,这种方法很难应用于注塑产品的特征识别。

文献[5]提出了一种基于体的特征识别方法,用于识别注塑产品中的侧凹特征。其创新点在于利用凸分解方法对相交特征进行解释。该方法仍然沿用了加工特征识别的思路,且仅用于识别侧凹特征。

此外,文献[6]提出了一种基于 CAD 模型的 STL 表示的特征识别方法。该方法根据三角形面片之间的法向量信息,确定特征区域,识别相应的特征,用于计算 STL 模型与原始 CAD 模型之间的误差。

2 基于图的中面模型表示

中面模型的概念广泛应用于有限元前处理中。从数学描述上看,实体模型是流形结构,即在

拓扑结构中, N 维拓扑形体只能由有限个 $(N-1)$ 维形体组成; 而中面模型是非流形结构, 即 N 维形体不但可以由有限个 $(N-1)$ 维形体组成, 而且还可以包含 $(N-2)$ 、 $(N-3)$ 、 \cdots 、 0 维形体的信息^[7]。从几何上看, 中面模型是利用假想的位于三维实体中心位置的二维平面来表示零件的几何模型, 模型中的面不具有封闭性, 不能构成一个体, 并且存在悬面、悬边; 而实体模型中的面的集合具有封闭性, 能构成一个体, 不存在悬面、悬边。

基于图的特征识别方法的搜索策略是, 解析 CAD 模型的面属性邻接图的结构, 并与特征的面属性邻接图进行子图匹配, 以识别特征。以图 1 所示的 L 形零件为例, 它包含 8 个面、18 条边, 传统的方法是利用边的凹凸性、边的分裂情况与特征子图进行匹配的。图 2 是 L 形零件的面属性邻接图。

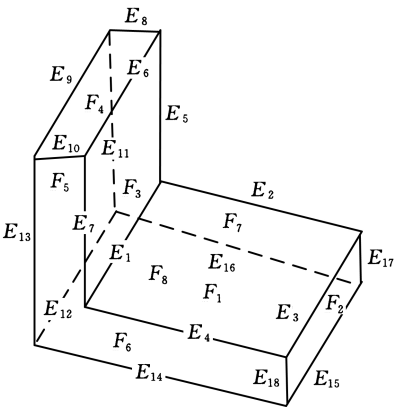


图 1 L 形零件的面和边

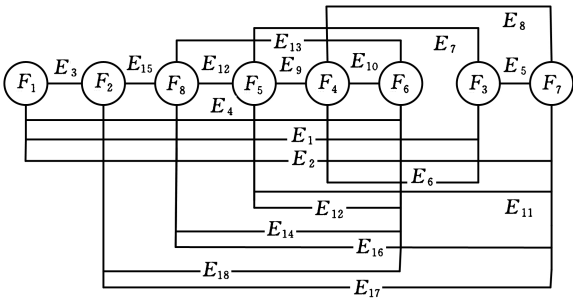


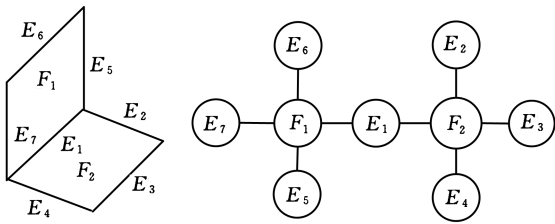
图 2 L 形零件的面属性邻接图

对于注塑产品的特征识别来说, 实体模型的面属性邻接图是基于 B-rep 表达的, 冗余的几何拓扑信息过多。而中面模型实际上是对实体模型进行了降维简化处理: 注塑产品在几何外形上一般是壁厚均匀的, 因此可在壁厚方向上, 将三维的实体用二维的面表达, 二维的面用一维的边表达, 这样仅表达其几何外形的“骨架”, 保留必要的信息用于解析图结构或进行子图匹配。

中面模型是非二维流形结构, 边的连接面数量可以为任意值, 且存在悬面和悬边, 因此面与边

的关系不满足二维流形拓扑结构, 无法采用面属性邻接图方法表达。本文对其改进后, 提出一种表示非二维流形拓扑结构的方法: 面一边属性图。在这种图的结构中, 面和边都作为节点, 面与面之间通过边连接, 边要么作为共享边与多个面连接, 要么仅与一个面连接, 构成图的叶子节点。

以图 1 所示的 L 形零件为例, 其中面模型和面一边属性图表达如图 3 所示。由图 3 可以看出, 中面模型的拓扑结构比实体模型简洁得多: 由 10 个面构成的实体模型, 在忽略其壁厚信息的中面模型中, 仅 2 个面就可表达; 边的数量也由 18 条减少为 7 条。



(a) 拓扑结构 (b) 面一边属性图
图 3 L 形零件的拓扑结构和面一边属性图

3 相关定义

定义 1 设中面模型由 n 条边和 m 个面构成, 则以面为行、以边为列构成 $m \times n$ 阶面一边属性矩阵, 矩阵元素的值表示相应的面和边的包含关系, 即某个面如果包含某条边, 则相应元素置为 1。

以图 3 所示的 L 形零件为例, 面一边属性矩阵如下:

$$\begin{matrix} & E_1 & E_2 & E_3 & E_4 & E_5 & E_6 & E_7 \\ F_1 & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ F_2 & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

矩阵的行信息表明某个面的所有构成边, 包括内边界和外边界, 矩阵的列信息表明包含某条边的所有面。

定义 2 为了有效地实现特征识别, 定义边的属性集 $A_E (A_E = \{A_1, A_2, A_3, A_4\})$:

(1) A_1 表示边所属的边环号, 说明边是哪一个边环的组成边。边环分为外部边环和内部边环两类。

(2) A_2 表示边的阶次。说明在中面模型中, 该边被面使用的次数。如果为 1, 则表明该边为悬边 (如图 3 中的 E_6)。

当一条边仅有一个端点与面的边环连接时 (如图 4 中的 E_1), 为保证边环的封闭性, 采用图 4 中的连接方式: 在边环的边链表中, 同一条边被使用两次, 但两次使用时边的起点和终点相反。

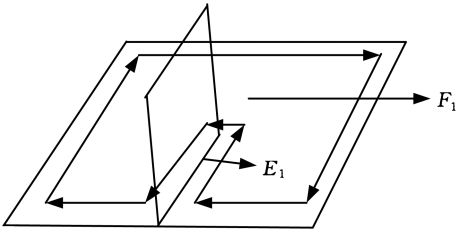


图 4 仅有一个端点与面的边环连接的情况

(3) A_3 表示边的凹凸性^[8]。

(4) A_4 表示边的封闭性,0 为不封闭,1 为封闭。如果边封闭,表明该边单独构成了一个边环,如封闭圆环构成的边环。

4 特征分类和识别

对于注塑产品,特征的几何形状与功能有密切的关系。本文定义了最为常见的三类特征:面特征、连接特征、加强特征。

4.1 面特征

面特征存在的必要条件是:一个面存在内环或内部边。根据内环或内部边的特征,又可细分为孔特征、凹陷特征、凸起特征和翼面特征。

4.1.1 孔特征

这里指在注塑件侧壁或底面薄壁上的通孔,其轮廓可以是完整的圆、线段或曲线段围成的封闭曲线构成的异形孔。

孔特征存在的判据是:某个面中包含一个内环(如图 5a 中的 E_5),同时该内环的每条边都没有被其他面所共享。如图 5b 所示,属于 F_1 面的边有 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 、 E_5 ,通过查询边的属性可知 E_5 为内部边,单独构成内部边界环,且仅属于面 F_1 ,因此面 F_1 内存在一个孔特征,其边界为 E_5 。内环可以由多条边组成,构成各种形状的孔,通过这些边的几何特征可以判断孔的类型,如三角形孔、四边形孔等。

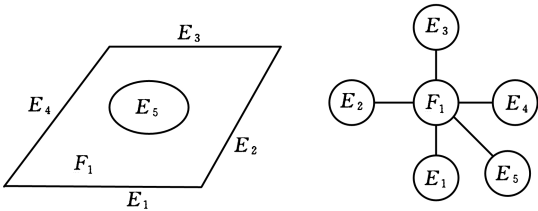


图 5 孔特征

4.1.2 凹陷特征

凹陷特征存在的判据是:某个面存在内环,且环的每条边均为凸边;同时对于共享这些凸边的面的外边环,除共享的凸边外,其余每条边均为凹边。从内部边环开始,查找所有与其邻接的面,并

查找这些邻接面所包含的外部边界边,对它们构成的边界环进行判断:是否构成面的外边界环。如果存在边界环没有构成面的外边界环,则说明凹陷特征存在孔洞,定义为 I 型凹陷特征;如果都构成了面的外边界环,则说明该凹陷特征是封闭的,定义为 II 型凹陷特征。图 6a 中 E_5 、 E_6 、 E_7 、 E_8 是邻接面的边,但它们构成的边环不是任何面的外边界,因此这些邻接面构成了 I 型凹陷特征;用同样的方法可以判断,图 6b 中的邻接面构成了 II 型凹陷特征。

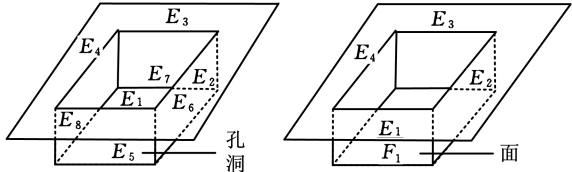


图 6 凹陷特征

4.1.3 凸起特征

与凹陷特征相反,凸起特征存在的判据是:某个面存在内环,且环的每条边均为凹边;同时对于共享凹边的面的外边环,除共享的凹边外,其余每条边均为凸边。与凹陷特征类似,根据边界环是否都构成面的外边界判断是 I 型还是 II 型凸起特征,如图 7 所示。

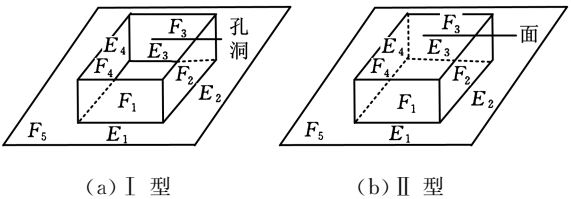


图 7 凸起特征

4.1.4 翼面特征

翼面特征存在的判据是:两个面的共享边是其中一个面的内部边(如图 8 中的 E_1 和 E_2),且该边本身不封闭。值得注意的是:一条拓扑边在几何上可能是由多条直线段或曲线段构成的非封闭边,因此翼面特征可能由多个面构成。根据注塑产品成形的原理,这些面仅应构成一个翼面特征。在图 8a 中, E_1 和 E_2 应合并为一条边, F_1 和 F_2 应合并为一个面。

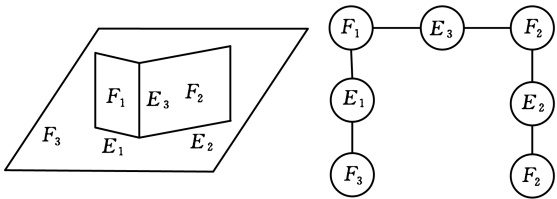


图 8 翼面特征

面特征识别算法如下:

(1) 查询面一边属性矩阵, 判断面是否包含内部边或内部边环, 或边在同一个面中使用次数是否为 2。

(2) 如果存在内部边环, 则查找该面的相邻面: ① 如果没有相邻面, 则该边环构成了孔特征, 通过检查边环的几何特征, 可以判断孔特征的类型, 如圆孔、方孔、多边形孔等; ② 如果有相邻面, 则判断内部边环的凹凸性, 若为凹边, 则存在凸起特征, 若为凸边, 则存在凹陷特征; ③ 对相邻面继续步骤①和②, 直到从某个面出发找到所有的面特征为止; ④ 对于凸起特征, 查找所有相邻面包含所有边的构成的外部边环, 如果存在外部边环没有构成某个面的边界, 则为 I 型凸起特征; 反之则为 II 型凸起特征; ⑤ 对凹陷特征执行④的算法, 确定凹陷特征的具体类型。

(3) 如果存在内部边, 则查找与该边相连的边, 将它们合成一条边, 包含这些边的面合并成一个面, 共同构成翼面特征。

由于对面特征进行了递归的识别算法, 因此算法完成后, 可以将面特征所包含的面和边从面一边属性矩阵中删除, 并重构矩阵, 简化后续特征识别算法。

4.2 连接特征

连接特征包括 T 形和 X 形连接特征。连接特征存在的判据是: 一条边连接面的数量大于 3, 即在面一边属性矩阵中, 某条边对应的列非零元素之和大于 3, 且每条边在每个面的使用次数均为 1, 则存在连接特征。如果和为 3, 且 3 个面的夹角为 90° , 则为 T 形连接特征, 如图 9 所示; 如果和为 4, 且 4 个面的夹角为 90° , 则为 X 形连接特征, 如图 10 所示。

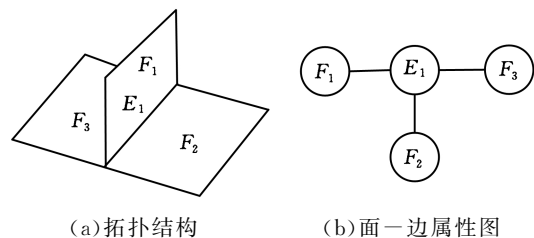


图 9 T 形连接特征

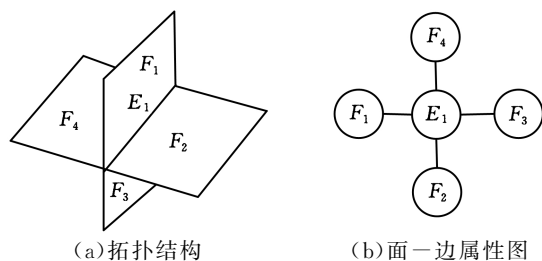


图 10 X 形连接特征

面夹角的计算方法是: 计算面的边界边环任意两个相邻边的叉积, 得到面的法向量; 将其中一个面的法向量向另一个面的法向量投影, 得到的角度即为这两个面的夹角。

4.3 加强特征

在注塑产品中, 加强特征的作用是对产品的壁面或面特征进行加固, 包括肋板特征和支撑板特征。支撑板特征的特点是: 在一个面中, 有 2 条边的阶次为 3 且相连, 至少有一条边是悬边, 如图 11 所示; 而肋板特征的特点是: 至少有 3 条边的阶次为 3 且相连, 至少有一条边是悬边, 如图 12 所示。

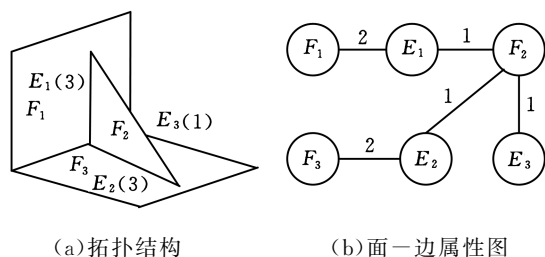


图 11 支撑板特征

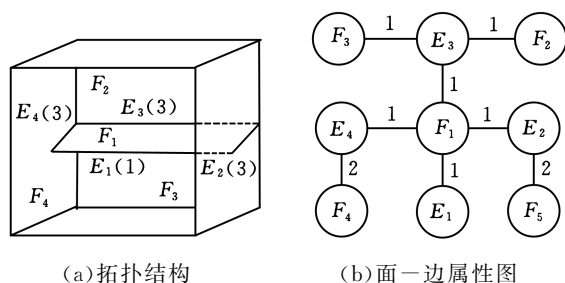


图 12 肋板特征

在图 11a 和图 12a 所示的中面模型中, 括号内的数字表示对应的边的阶次, 计算方法是: 在面一边属性图中, 将边与所有面连接的次数相加。如图 11b 所示的 E_1 , 它与 F_1 的连接次数为 2, 与 F_2 连接次数为 1, 因此 E_1 的阶次为 3。

加强特征识别的算法是: 对于模型中的每个面, 得到其边界边环以及每个边的阶次; 如果边界边环在某个面上有两条以上边, 则将这些边合并成一条边; 如果边环的阶次构成模式是 $3 \rightarrow 3 \rightarrow 1$, 说明有两个面与加强特征面连接, 存在支撑板特征; 如果边环的阶次构成的模式是 $3 \rightarrow 3 \rightarrow 3 \dots \rightarrow 1$, 说明有超过三个面与加强特征面连接, 存在肋板特征。

5 算法实现及实例

本文提出的算法基于 UGNX4.0 平台, 注塑产品的设计是利用其三维建模模块实现的。利用软件的中面提取功能, 生成产品的中面模型, 并将

其输出为 AP203 格式的中性文件;由于中面是非二维流形拓扑结构,利用 STEPAP203 扩展边界表示法中的类库对中性文件进行几何拓扑构造^[9],生成面一边属性图和面一边属性矩阵;最后利用本文的算法进行特征识别,输出特征的几何表示。算法实现流程如图 13 所示。

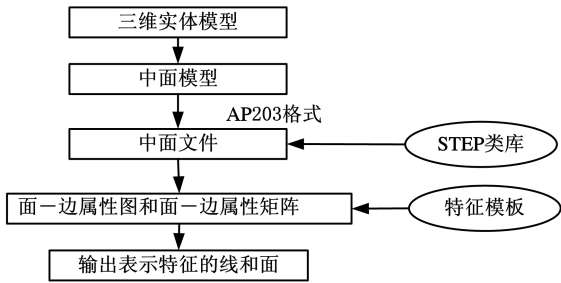


图 13 算法实现流程

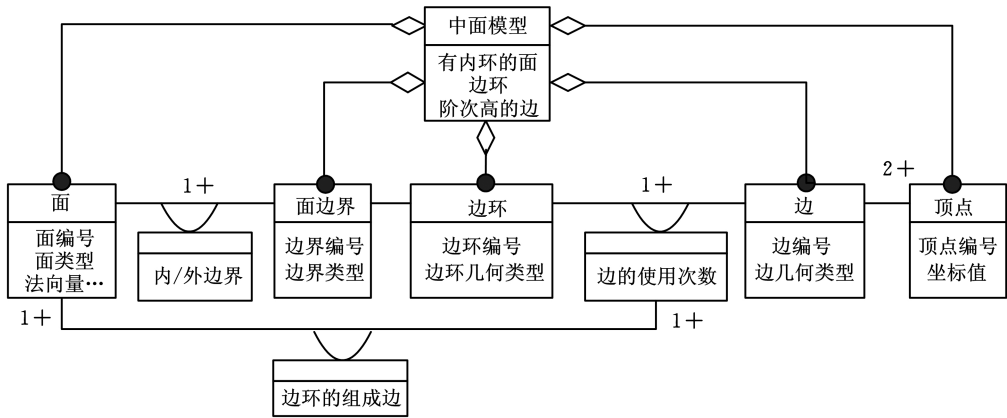


图 14 中面模型的数据结构

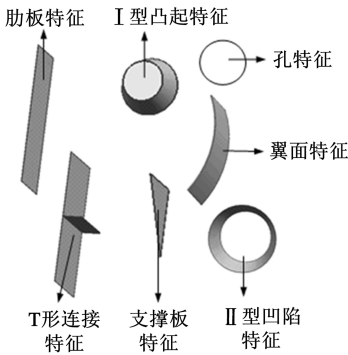
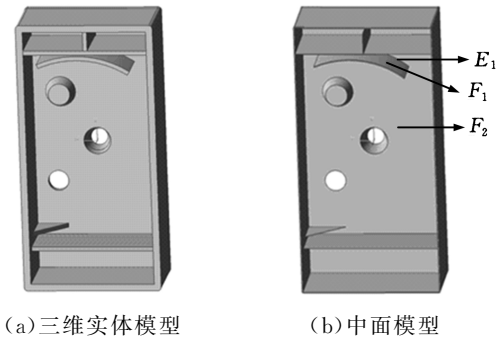


图 15 特征识别实例

STEP 模型信息复杂而且全面,在获取中面几何拓扑信息时,只选择与特征识别有关的信息,为此,建立了面向对象的中面模型数据结构,用于数据存储。其结构如图 14 所示。

图 15 所示为测试零件特征识别的实例,图 15a 为零件的实体模型,包括 35 个面和 67 条边;图 15b 为零件的中面模型,包括 17 个面和 34 条边。通过本文提出的算法共识别 7 个特征,如图 15c 所示,包括:连接侧壁的肋板特征,由 1 个平行四边形平面构成;支撑板特征,由 1 个三角形平面构成;T 形连接特征,由 2 个互相垂直的平行四边形平面构成;零件底面上的 I 型凸起特征,由 1 个圆台面和 1 个边界为封闭圆弧的平面构成;II 型凹陷特征,由 1 个圆台面构成;翼面特征,由 1 个圆弧面构成;孔特征,由 1 个封闭圆弧构成。

以翼面特征的识别过程为例,通过检索中面模型(即 AP203 格式的文件)底面 F_2 的几何信息可知:有 3 个圆环和一条不封闭的圆弧(E_1)位于 F_2 的内部。根据每个圆环的凹凸性和阶次可以进一步判断是否为凹陷特征、凸起特征或孔特征;对于 E_1 ,通过检索所有共享它的面可知其阶次为 2,即除 F_2 外还有 F_1 共享 E_1 ,且构成 F_1 外边环的一部分,即 F_1 为翼面特征。通过检索 F_1 的几何信息可知它是圆弧面。

特征的几何信息对于下游系统(如 CAM、CAPP 系统)具有重要的价值,有必要将其从中性文件中提取并输出。以翼面特征为例,输出格式如下:

Face ID=43 is a FIN with non-planar face;

其中,ID 指的是该翼面特征的拓扑实体在中性文件中的标识号。通过解析中性文件,查找该拓扑实体,并查找其对应的几何实体,将相关信息输出。

6 结束语

本文针对注塑产品几何形状复杂和壁厚均匀的特点,提出了基于中面的特征识别方法。该方法对基于图的方法解析 B-rep 表达的三维实体模型进行了改进,用中面模型简化注塑产品的几何形状,提出了面一边属性图和面一边属性矩阵表达中面模型的拓扑结构,在此基础上对特征进行了分类并研究了各自的特征识别算法。文中给出的实例表明本文提出的注塑产品特征识别算法的可行性。

进一步的研究工作包括:拓展和细分注塑产品的特征,并给出相应的特征识别算法,使其适应更加复杂的几何形状;研究基于中面模型的注塑产品侧凹特征识别方法;研究中面模型中相交特征的识别方法;实现本文提出的特征识别算法与 CAD 系统环境的集成。

参考文献:

- [1] 花广如,周雄辉.特征识别的现状与存在的问题及解决方案[J].机床与液压,2008,36(4):19-22.
- [2] Chen Y M, Wen C C, Ho C T. Extraction of Geometric Characteristics for Manufacturability Assessment[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2003,19(4):371-385.
- [3] 邵健,吕震,柯映林.基于图的注塑产品侧凹特征识别技术的研究[J].中国机械工程,2006,17(1):52-55.
- [4] Zhang X, Wang J, Yamazaki K, et al. A Surface Based Approach to Recognition of Geometric Features for Quality Freeform Surface Machining[J]. Computer-aided Design,2004,36(8):735-744.
- [5] Yin Zhouping, Ding Han, Li Hanxiong. Geometric Mould Ability Analysis by Geometric Reasoning and Fuzzy Decision Making[J]. Computer-aided Design,2004,36(1):37-50.
- [6] Belludi N, Yip-Hoi D. High Level Feature Recognition Using Approximate and Partial Exact CAD Models[C]//Proceedings of DETC'02. ASME 2002 Design Engineering Technical Conferences. Montreal,2002:113-127.
- [7] Rezayat M. Midsurface Abstraction from 3D Solid Models: General Theory and Applications[J]. Computer-aided Design,1996,26(11):905-915.
- [8] 李伟平,谷正气,邓彪.面向 CAD/CAPP/CAM 的特征识别技术[J].中国机械工程,2006,17(10):249-253.
- [9] Stefan Richte. NIST STEP Class Library[EB/OL]. (2005-01-09)[2006-03-01]. <http://www.statik.tu>

—cottbus.de/fileadmin/project_dth/scl/.

(编辑 王艳丽)

作者简介:李伟平,男,1971 年生。湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室副教授、博士。研究方向为数字化设计与制造。
谷正气,男,1963 年生。湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室教授、博士研究生导师。
何忆斌,男,1966 年生。湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室副研究员、博士。

(上接第 2361 页)

- [2] Kong L, Parker R G. Equilibrium and Belt-pulley Vibration Coupling in Serpentine Belt Drives[J]. Journal of Applied Mechanics, 2003, 70(5): 739-750.
- [3] Kong L, Parker R G. Coupled Belt-pulley Vibration in Serpentine Drives with Belt Bending Stiffness[J]. Journal of Applied Mechanics, 2003, 71(1): 109-120.
- [4] Zhang L, Zu J W. Non-linear Vibrations of Viscoelastic Moving Belts, Part I: Free Vibration Analysis[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998, 216(1): 75-91.
- [5] Rubin M B. An Exact Solution for Steady Motion of an Extensible Belt in Multipulley Belt Drive Systems[J]. Journal of Mechanical Design, 2000, 122(3): 311-316.
- [6] 郑大字,孟庆鑫,陈申,等.带传动惯性力影响的研究[J].中国机械工程,2008,19(17):2028-2032.
- [7] Hwang S, Perkins N. High Speed Stability of Coupled Band/Wheel Systems: Theory and Experiment[J]. Journal of Sound and Vibration, 1994, 169(4): 459-483.
- [8] Kong L, Parker R G. Steady Mechanics of Belt-pulley Systems[J]. Journal of Applied Mechanics, 2005, 72(1): 25-34.
- [9] Shampine L F, Kierzenka J, Reichelt M W. Solving Boundary Value Problems for Ordinary Differential Equations in Matlab with bvp4c[R/OL]. Natick; the MathWorks, 2000 [2008-08-15]. <ftp://ftp.mathworks.com/pub/doc/papers/bvp/>.
- [10] Yang R J. Steady Motion of a Thread Over a Rotating Roller[J]. Journal of Applied Mechanics, 1994, 61(1):16-22.

(编辑 王艳丽)

作者简介:熊峰,男,1968 年生。华中科技大学机械科学与工程学院副教授、博士。研究方向为数字制造、机电一体化。发表论文 20 余篇。
韩奉林,男,1983 年生。华中科技大学机械科学与工程学院博士研究生。
易朋兴,男,1974 年生。华中科技大学机械科学与工程学院博士后研究人员。
史铁林,男,1964 年生。华中科技大学机械科学与工程学院副院长、教授、博士研究生导师。