

一种前驱三维工序模型与工序图关联方法

黄 瑞, 张树生, 陶 俊, 范海涛

(西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 710072 西安, huangrui053469@163.com)

摘 要: 针对三维工序模型重建需解决前驱三维工序模型与工序图关联问题, 提出一种基于图元组合单元的属性邻接图前驱三维工序模型与工序图关联方法. 提取工序图与前驱三维工序模型投影图的图元组合单元信息, 将工序图与投影图用属性邻接图来表示, 根据图元组合单元顶点与边的属性信息判断两个属性邻接图是否同构, 将前驱三维工序模型与工序图关联问题转化为属性邻接图的映射匹配问题. 以侧板类零件为例进行实例验证, 结果表明, 该方法能够实现前驱三维工序模型与工序图关联.

关键词: 工序图; 工序模型; 三维重建; 子图同构

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2012)03-0102-05

An association method of precursory 3D process model and process drawing

HUANG Rui, ZHANG Shu-sheng, TAO Jun, FAN Hai-tao

(The Key Laboratory of Contemporary Design and Integrated Manufacture Ministry of Education, Northwest Polytechnical University, 710072 Xi'an, China, huangrui053469@163.com)

Abstract: Three-dimensional (3D) model reconstruction needs to resolve the association problem of precursory 3D process model and process drawing. An approach based on the attribute adjacency graph of the primitive combination units is proposed. By extracting the primitive combination units of process drawing and the projection drawings of the precursory 3D process model, the process drawing and the projection drawings was presented in an attribute adjacency graph. According to the attributes of the vertexes and edges, whether the two attribute adjacency graphs were isomorphism were judged, and the association problem of precursory 3D process model and process drawing was translated to the matching problem of attribute adjacency graphs. Taking the side plate part as an example, the experimental result shows that this method realizes the association of precursory 3D process model and process drawing.

Key words: process drawing; process model; three-dimensional model reconstruction; subgraph isomorphism

近年来,国际上 CAPP 技术及应用呈现出在数字化、智能化和网络化技术支持下,向基于三维模型的工艺设计、工艺仿真与优化及可视化装配等发展的趋势^[1]. 随着数字化制造技术应用的不断深化,企业对复杂零件三维工序模型需求日益增加,特别在航空、航天、车辆、船舶等领域大型复

杂产品的制造,其需求更为迫切. 而工程图三维重建技术发展至今,突破性、实用性的进展不大,尚处在徘徊不前的困境,需要寻求新的突破途径^[2]. Wen 等^[3-4]提出了一种新的从剖视图中识别特征并且重建三维模型的方法,但是该方法只能识别拉伸类与回转类特征. Ibrahim^[5]提出了一种“3-Space”特征识别方法,该方法采用从毛坯模型中移除已识别的特征来重建三维零件模型. 王宗彦等^[6]研究了由零件三维 CAD 模型倒推零件制造的工序模型,该方法非常依赖于人的工艺设计经验和知识,需要大量的人机交互以及多次

收稿日期: 2011-01-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51075336); 国家高技术研究发展计划资助项目(863-2007AA04Z137).

作者简介: 黄 瑞(1987—),男,博士研究生;
张树生(1956—),男,教授,博士生导师.

的迭代修正和完善,很难做到实用化.张树生等^[7-9]提出了工艺过程和工艺语义驱动的制造毛坯动态演变的序列三维模型重建技术,它是一种先进的过程和知识驱动的重建方法,国内外尚未见到类似的研究设想和成果报导,为工程图三维模型重建提供新的有效解决途径和手段,可以为新一代 CAPP 系统的研发提供先进的零件三维工序模型生成技术.

工艺过程和工艺语义驱动的制造毛坯动态演变的序列三维模型重建技术的核心是:前驱三维工序模型向工序图映射并获取制造特征的形状、位置等几何信息.位置信息的获取可以通过从前驱三维工序模型中直接获取,即将当前工序图中约束特征(基准)映射到前驱三维工序模型中以获取该约束特征(基准)的位置信息.前驱三维工序模型是与当前工序图相邻的工序图前驱重建结果的一个全信息模型,包含了完备的形状和尺寸信息,并具有向任意方向投影的方便性.利用前驱三维工序模型的全信息特性和方向视图生成的方便性,建立与当前工序图形的形状和位置耦合关联,对实现复杂加工特征的识别具有重要作用.

为了建立前驱三维工序模型与当前工序图形的形状和位置耦合关联,本文提出一种基于图元组合单元的属性邻接图前驱三维工序模型与工序图关联方法.将前驱三维工序模型与工序图之间的关联匹配问题转化为属性邻接图的映射匹配问题.

1 前驱三维工序模型与二维工序图关联总体思路

直接给定前驱三维工序模型与二维工序图,自动判断出两者之间的关联性是困难的,目前还没有很好的解决办法.在工艺过程和工艺语义驱动的制造毛坯动态演变的序列三维模型重建过程中,需要获取加工特征的定形与定位尺寸进行三维重建,如果能够获取工序图中定位基准所对应的前驱三维工序模型中该基准的位置信息,将有利于加工特征定形与定位尺寸的获取.前驱三维工序模型与二维工序图关联总体思路如图 1 所示,以前驱三维工序模型与当前工序图作为输入,主要包括如下结构模块:

- 1) 前驱三维工序模型预处理.负责前驱三维工序模型解析,提取投影方向,获得投影方向上的二维投影图,并且由投影图构建属性图.
- 2) 图形解释器.负责工序图理解,对工序图形进行图形信息提取、图元组合检测、视图关系建立与属性图构建.
- 3) 拓扑图相似性比较.以投影图的属性图与工序图的属性图作为输入,分别进行环检测、拓扑图构建,并由此进行拓扑图相似性计算,获取定形、定位尺寸.
- 4) 三维模型预处理库.提供对三维模型理解的支持.
- 5) 工程图知识库.提供对图形理解的支持.

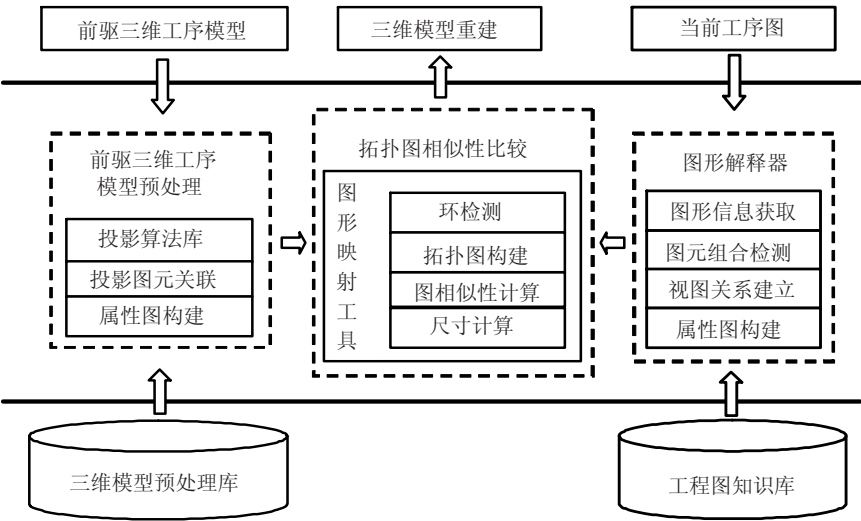


图 1 前驱三维工序模型与二维工序图关联总体思路

2 前驱三维工序模型与二维工序图关联关键技术

2.1 工序图预处理及投影方向的确定
工序图形理解的预处理主要解决工序图形的

数据输入(采用 AutoCAD 绘图交换文件 Drawing Exchange Format, DXF)、数据理解等问题.针对图元、图块、符号和文字进行提取与聚类,对图元打断进行组合单元检测,并构建工序图的属性图.通过视图分离、视图识别和坐标系变换,建立一个以符

号、图元、图元组合单元、图块和视图彼此关联的树形结构,实现对输入数据的理解,为前驱三维工序模型向工序图形的映射提供图形数据基础。在工序图中,待加工面用比工序图中轮廓线粗的线条或以不同颜色进行标识,便于对加工特征进行识别。

前驱三维工序模型可以向无穷多个方向进行投影获得投影图集,然而在这些投影图集中只有一个投影图与当前工序图的视图方向一致。根据工序图主视图与前驱三维工序模型的特点,投影方向优先考虑三视图投影方向与前驱三维工序模型中平面法矢投影方向,沿各投影方向投影同时记录投影图中各图元所对应的面属性(法矢、基点坐标、面类型等),为前驱三维工序模型与工序图的关联提供三维空间位置信息。

2.2 工序图模型的表示

通过对工序图预处理,提取工序图模型中的图元组合单元信息,将工序图用属性邻接图来表示。图元组合单元是具有零件特征意义各工序图信息颗粒中的最小粒度,对尺寸关联、特征映射具有很重要的作用。属性邻接图是一种用于描述工序图几何拓扑信息的图结构,下面给出属性邻接图的定义。

定义1 属性邻接图。给定一个工序图,定义其属性邻接图是一个四元组 $G = (V, E, \alpha, \beta)$, 其中, V 是一个有限非空集合,其元素称为顶点,且 $V \neq \emptyset$; $E \subseteq V \times V$ 是一个以不同顶点的无序对作为元素的有限集合,其元素称为边; $\alpha: V \rightarrow W_v$ 是一个从顶点集合到其属性集合的映射, W_v 是顶点的属性集合; $\beta: E \rightarrow W_e$ 是一个从边集合到其属性集合的映射, W_e 为边的属性集合。

本文首先用邻接矩阵表示属性邻接图中的图元组合单元顶点和边的拓扑关系,然后根据工序图模型的几何和拓扑信息,定义相应的图元组合单元顶点和边的属性。图元组合单元的属性信息包括图元组合单元的边数、外接包围盒、图元的几何参数信息等;边的属性包括图元组合单元间的位置关系。构建属性邻接图的时间复杂度和空间复杂度均为 $O(n^2)$, 其中 n 为属性邻接图节点个数,由工序图模型构建属性邻接图步骤如下:

Step1 对工序图进行预处理,获得其图元组合单元集合 $Primitive = \{p_i\}, 1 \leq i \leq m$, 其中 m 为图元组合单元数;

Step2 遍历图元组合单元集合 $Primitive$ 中的每个元素 p_i , 同时创建一个与该图元组合单元对应的属性邻接图顶点 v_i , 对应的将该图元组合单元属性作为该顶点的属性;

Step3 对图元集合 $Primitive$ 中的每两个图

元组合单元 p_i 与 p_j , 计算两图元组合单元之间的位置关系,作为其对应的属性邻接图边的属性;

对于图元组合单元的属性,图元组合单元的边数定义为组成该图元组合单元边的数量;图元的几何参数属性包括图元的类型、图元的参数、图元的线型等,而图元的类型分为直线段、圆、圆弧、样条曲线等;图元的参数需要根据图元类型来定义,例如直线段包括图元的起点、终点,圆包括圆心和半径;图元的线型分为轮廓线、加工线、中心线等。对于边的属性,将图元组合单元间的位置关系分为相离、相邻、包含,而包含位置关系又分为内贴包含、共心包含、非共心包含3类子关系。如图2所示。

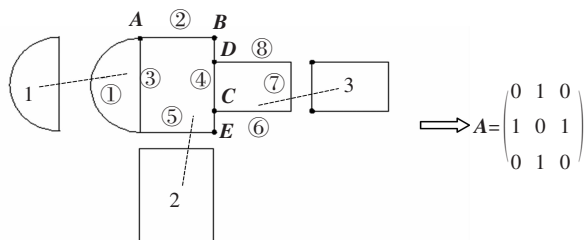


图2 属性邻接图构建及对应的属性邻接矩阵

图2所示为图形实例及对应的属性邻接矩阵,该图形由3个图元组合单元组成,其中第1个图元组合单元由2条边组成,第2、3个图元组合单元由4条边组成,图元组合单元之间的位置关系只有相离与相邻两种情况。

2.3 局部匹配算法

为实现图元关联匹配,在工序图模型与投影图模型分别用属性邻接图表示完成后,采用子图同构算法在属性图中寻找特定的子属性图,下面给出图和子图同构的定义。

定义2 图同构。对于两个图 $G = \langle V, E \rangle$, $G' = \langle V', E' \rangle$, 如果存在一一映射函数 $f: v_i \rightarrow v'_i$, 且 $e = (v_i, v_j)$ 是 G 中的1条边, 当且仅当 $e' = (v'_i, v'_j)$ 是 G' 中的1条边, 则称 G 与 G' 是同构的。

定义3 子图同构。给定两个属性邻接图 G 与 G' , 若 G' 中存在子图 G'' 与图 G 同构, 则称图 G 与图 G' 子图同构, 记为 $G \subseteq G'$ 。

子图同构是指寻找一个图的子图, 该子图与另外一个图同构。本质上是寻找是否存在两个图顶点之间的一个映射 f , 并且在该映射下两个图的边也保持对应。为了提高算法效率, 将充分利用工序图模型中图元组合单元属性和边的属性, 匹配算法步骤如下:

Step1 构建工序图与投影图的属性邻接图 $G = (V_G, E_G, \alpha_G, \beta_G)$, $G' = (V_{G'}, E_{G'}, \alpha_{G'}, \beta_{G'})$, 其对应的属性邻接矩阵分别为 $M_G, M_{G'}$, 假定 $|V_G| < |V_{G'}|$ 。

Step2 取 $u_i \in V_c, i = 1, 2, \dots, m$ (m 为属性邻接图 G 的顶点数量), 遍历属性邻接图 G' 中的每个顶点 $v_j \in V_c, j = 1, 2, \dots, n$ (n 为属性邻接图 G' 的顶点数量), 在 V_c 中查找与顶点 u_i 属性相同的所有顶点, 如果存在则存入集合 $S_i, i = 1, 2, \dots, m$ (m 与属性邻接图 G 的顶点数量相同), 如果在 V_c 中不存在与顶点 u_i 属性相同的顶点, 则该投影图与工序图不存在关联关系, 结束;

Step3 任取 S_i 中一个顶点, 形成一个顶点集合 $V_s (m = |V_s|, V_s$ 中顶点互不相同);

Step4 由顶点集合 V_s 组成属性邻接图 $G_s = (V_s, E_s, \alpha_s, \beta_s)$, 并且构建属性邻接矩阵 M_s , 如果 M_s 与 M_c 相等, 则转 Step5, 否则返回 Step3, 继续下一个组合;

Step5 如果 E_s 与 E_c 中边属性对应相等, 则该投影图与工序图存在关联关系, V_c 与 V_s 中的顶点依顺序一一对应, 否则返回 Step3, 继续下一个组合.

由于工序图中加工线的存在, 会导致在属性邻接图顶点属性比较过程中出错, 因此本文需要依据下列规则进行属性比较:

规则 1. 当两个图元组合单元的所有图元线型均为轮廓线图元时, 按图元组合单元的边数、外接包围盒、图元类型顺序进行属性相似性比较, 如果有一个不同, 则两图元组合单元属性不同.

规则 2. 当工序图图元组合单元中既有轮廓

线图元又有加工线图元时, 只对外接包围盒、图元几何参数属性进行属性比较, 如果工序图图元组合单元中存在部分图元几何参数属性与投影图图元组合单元中图元几何参数属性相同, 则两图元组合单元属性相同, 否则两图元组合单元属性不同.

规则 3. 当工序图图元组合单元所有图元线型均为加工线时, 投影图中不存在与该图元组合单元属性相似的顶点.

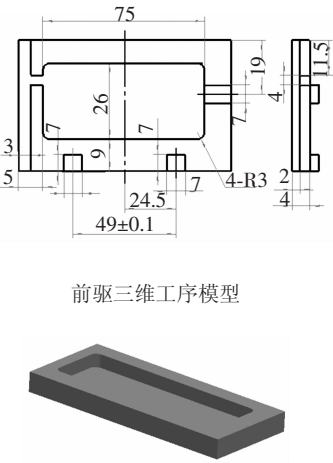
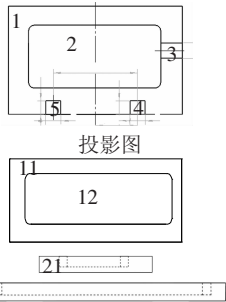
在前驱三维工序模型投影时, 已经将投影图中的图元与前驱三维工序模型中的面进行关联, 即由投影图图元可以获得图元所对应面的空间位置属性(面的类型、面的法矢、面的基点坐标等). 采用前述投影图与工序图属性图子图同构算法实现了图元间的关联映射, 再以投影图为桥梁, 实现前驱三维工序模型与工序图之间的关联.

3 实例验证与讨论

本文以 Microsoft Visual Studio 2008 为集成开发环境, opencascade 为几何模型内核, UG NX 3.0 为造型平台, 对本文方法进行验证.

表 1 是一个典型的侧板类零件前驱三维工序模型与工序图关联实例, 该工序图由 3 个工步组成. 以工步 1 为例, 经工艺语言理解^[10], 确定工步 1 的加工特征为凸台, 以此来指导工序图形理解. 前驱三维工序模型经投影获得 3 个投影图, 如表 1 所示.

表 1 前驱三维工序模型与工序图关联实例

当前工序图	工步号	工步内容	备注
	1	铣凸台	工艺语言指标
	2	铣平台	工序图形理解
	3	铣缺口	
	工序图预处理 仅保留与当前加工特征有关的加工线, 并对图元组合单元进行修复(紫线标识)(以工步 1 为例)		避免其他未加工特征的干扰
	投影图 1	投影图	子图同构 同构
	投影图 2		否
	投影图 3		否

工序图经过预处理获得仅包含工步 1 中加工特征(凸台)的加工线, 它有 5 个图元组合单元; 投影图 1 有 2 个图元组合单元. 根据本文 2.3 中的算法 Step2, 在工序图模型各图元组合单元中查找与投影图中各图元组合单元属性相同的顶点, $S_1 = \{1, 3, 4, 5\}, S_2 = \{2\}$. 在集合 S_1 和 S_2 中任取一个顶点 3 和 2, 则顶点集合 $V_s = \{3, 2\}$, 根据该

顶点集合 V_s 构建属性邻接矩阵 M_s :

$$M_s = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

而投影图 1 的属性邻接矩阵

$$M_c = \begin{pmatrix} 0 & 2 \\ 2 & 0 \end{pmatrix}.$$

M_s 与 M_c 不相等, 所以该组合不可能同构, 进行

下一组合 $V_s = \{1, 2\}$, 该组合的属性邻接矩阵 M_s 与 M_c 相等, 并且由该顶点集合组成的属性邻接图的边属性也相同, 所以投影图 1 与预处理后的工序图同构, 且图元组合单元 11 与图元组合单元 1 相对应、图元组合单元 12 与图元组合单元 2 相对应. 其他投影图采取同样的方法进行子图同构判断, 结果如表 1 所示.

通过采用本文 2.3 中的算法获得与工序图具

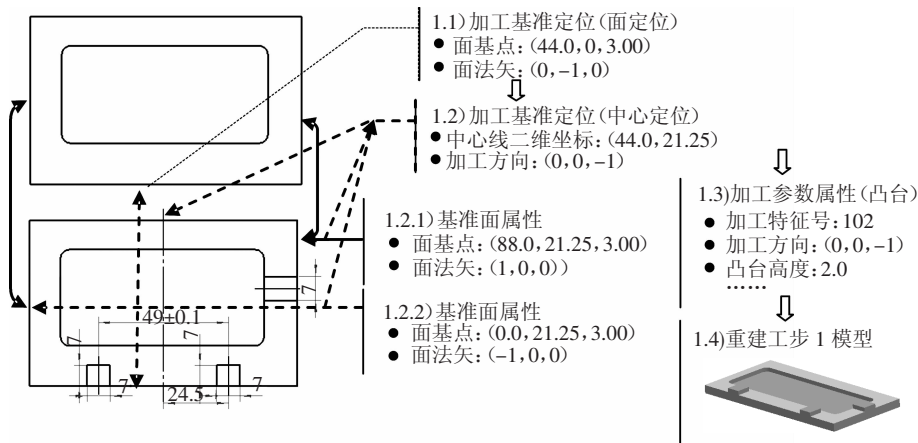


图3 工序1尺寸关联计算实例

4 结 语

本文提出一种基于子图同构的前驱三维工序模型与工序图关联方法, 将前驱三维工序模型与工序图的关联问题转化为属性邻接图的匹配问题. 首先对工序图进行预处理构建基于图元组合单元的属性邻接图, 利用图元组合单元顶点与边属性信息经一系列处理获得与工序图具有相同投影方向的投影图; 然后将前驱三维工序模型的基准面空间位置信息经投影图传递至工序图进行加工特征参数计算; 最后在 UG 系统中重建三维工序模型. 实验结果表明, 本文方法能够实现前驱三维工序模型与工序图之间的关联.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国科学技术部. 国家高技术研究发展计划(863 计划)先进制造技术领域重点项目申请指南[EB/OL]. 北京: 中华人民共和国科学技术部, 2007-07-11[2008-11-13]. http://www.most.gov.cn/tz-tg/200707/t20070711_51022.htm.
- [2] GONG Jiehui, ZHANG Hui, JIANG Bin, *et al.* Identification of sections from engineering drawings based on evidence theory [J]. *Computer-Aided Design*, 2010, 42(2): 139-150.
- [3] WEN Yamei, ZHANG Hui, SUN Jiaguang, *et al.* A new method for identifying and validating features from 2D sectional views [J]. *Computer-Aided Design*, 2011, 43(6): 677-686.

有相同投影方向的投影图, 即投影图 1, 并且将前驱三维工序模型中的基准面空间位置信息经投影图 1 传递至工序图, 如图 3 所示. 工序图中凸台的加工基准既有中心线定位, 又有基准面定位, 其中中心线位置信息需要借助两个基准面来获取, 如图 3 中 1.2 所示. 获取加工基准后计算加工参数属性, 如图 3 中 1.3 所示, 然后在 UG 系统中重建工步 1 模型.

- [4] WEN Yamei, ZHANG Hui, YU Zhongmian, *et al.* Reconstructing 3D objects from 2D sectional views of engineering drawing using volume-based method [C]//Proceedings of the 2010 International Conference on Shape Modeling and Applications. Aix en Provence: IEEE Computer Society, 2010: 13-24.
- [5] IBRAHIM C. A new method for machining feature extracting of objects using 2D technical drawings [J]. *Computer-Aided Design*, 2009, 41(12): 1008-1019.
- [6] 王宗彦, 吴淑芳, 秦慧斌. 零件的设计模型向毛坯模型转换技术研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2004, 10(6): 620-624.
- [7] 石云飞, 张树生, 成彬等. 工艺语义驱动的序列三维模型构建系统[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(11): 2133-2129.
- [8] ZHANG Shusheng, SHI Yunfei, FAN Haitao, *et al.* Serial 3D model reconstruction for machining evolution of rotational parts by merging semantic and graphic process planning information [J]. *Computer-Aided Design*, 2010, 42(9): 781-794.
- [9] 石云飞. 工艺过程和工艺信息驱动的三维模型重建技术[D]. 西安: 西北工业大学, 2010.
- [10] FAN Haitao, ZHANG Shusheng, SHI Yunfei, *et al.* Machining process language understanding in 3D process modeling [C]//Proceedings of the 2009 11th IEEE International Conference on ComputerAided Design and Computer Graphics. Yellow Mountain City: IEEE, 2009: 532-535.