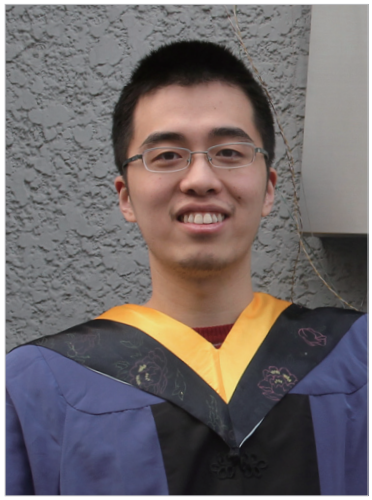
基于三维模型的机加工艺设计模式探讨*

Study on Mode of 3D Model-Based Machining Process Planning

北京理工大学机械与车辆学院数字化制造研究所　　斯铁冬　张　旭　丁　丁



斯铁冬
硕士，从事数字化设计与制造方向的研究。

三维工艺设计的核心是给工艺规划人员提供一个三维的设计、分析与验证环境，可以在工艺规划过程中对加工方法、工艺路线、夹紧定位方案、可制造性、加工质量等进行综合的分析与验证，因此基于三维实体模型进行工艺规划与验证是下一代三维CAPP系统发展方向。

随着三维CAD技术的深化应用，基于模型定义（Model-Based Definition，MBD）的数字化设计与制造技术已经成为制造业信息化的发展趋势。MBD是一个用集成的三维实体模型来完整表达产品定义信息的方法体，它详细规定了三维实体模型中产品尺寸、公差的标注规则和工艺信息的表达方法。MBD改变了传统由三维实体模型来描述几何形状信息，而用二维工程图纸来定义尺寸、公差和工艺信息的分步产品数字化定义方法。同时，MBD使三维实体模型作为生产制造过程中的唯一依据，改变了传统以工程图纸为主，而以三维实体模型为辅的制造方法[1]。

目前，CAD/CAM技术已经在国内航空、航天、车辆、电子、船舶等行业大量应用，CAPP也已经替代了传统的手工工艺卡片的填写。国内使用的CAPP系统主要为卡片式系统，没有三维模型的处理能力，包括三维模型信息的获取、模型显示、模型编辑等功能。一般使用二维图形软件进行单独工序图的绘制。

因此，虽然CAPP从20世纪60年代末诞生至今，已有40多年的发展历史，但是在企业中现有的工艺设计过程中仍然主要采用二维工艺卡片式的工艺设计技术，三维模型在工艺环节中的继承性差、重用性差、集成度低。

基于二维模型的CAD/CAPP/CAM集成系统是很难真正实现信息集成与数据共享的。由于产品数据涉及到设计、工艺、生产等企业的多个部门，当设计部门完成产品的二维

* 国家自然科学基金资助项目（51075036）资助。

模型以后，工艺部门只能将其作为参考，在多数情况下需要重新建模；生产部门也只能以此二维模型为依据单纯地编写 NC 程序。工艺人员在进行数控编程中仍然难以直接应用设计形成的三维模型，还需要大量重复地依照图纸进行三维模型的重建。以上问题严重影响了工艺设计的质量、效率和水平，影响了设计与制造间实现三维模型基础上的集成。因此，基于二维 CAD 的 CAPP 仅仅是一种计算机辅助工艺卡片填表系统[2]。

商用 CAD/CAM 软件提供的功能主要以三维模型的数控编程为主，随着 PTC 提出的直接建模[3]和 UGS 提出的同步建模技术[4]，在各个数字化制造软件中提出了采用 CAD 软件进行模型的手工编辑处理，在数字化制造软件中进行工艺路线的规划和资源管理的设计模式，并且将三维模型与制造工艺相关联。目前国内的三维 CAPP 技术也逐渐在发展过程中。但是由于三维模型处理需要较复杂的软件功能，因此一般是以装配工艺规划为主，在零件的三维工艺设计中，也是采用单独的三维模型处理工具（如 CAD 等）进行模型的处理，再实现与工艺的关联[5]。

三维工艺设计的核心是给工艺规划人员提供一个三维的设计、分析与验证环境，可以在工艺规划过程中对加工方法、工艺路线、夹紧定位方案、可制造性、加工质量等进行综合的分析与验证[6]，因此基于三维实体模型进行工艺规划与验证是下一代三维 CAPP 系统的发展方向。

CAPP 是目前我国在 CAD/CAM 领域唯一具有坚实技术基础和大量自主知识产权软件的领域，国内大型制造企业几乎都采用国产的 CAPP 系统。但是，随着三维技术从设计向制造领域的延伸，基于三维模型的工艺设计（尤其是零件的工艺设计）已经成为趋势。由于在三维建模领域核心技术的缺失，我国自主知识产权软件已经在 CAD、CAM 领域大量萎缩，而如果不针对工艺设计研究三维工艺设计的核心技术，CAPP 也必将成为下一个为国外软件所统治的领域，届时我国将在 CAD/CAM 领域完全失去具有核心技术的自主知识产权的软件。

目前，国内外在三维 CAPP 技术研究主要集中在特征识别、工艺资源管理等方向，还主要是针对围绕三维模型进行工艺信息的表达、组织和展示，而对于建立以三维模型为核心的工艺设计的方法、模式等缺乏相关的研究。

三维工艺可以实现设计与制造在模型上的统一和集成，提供更多的三维的工艺设计手段和工具，实现与数控编程、基于 CAE 的工艺仿真等的集成。随着越来越多的制造企业采用三维 CAD 进行产品设计，基于三维产品模型进行工艺规划已经成为企业的迫切需求。本文重点对机械加工零件的三维工艺设计方法进行了研究，提出了包括模型转换、特征识别、中间模型处理、基于特征的工艺设计与工艺路线规划等在内的完整的工艺设计模式，并通过开发的原型系统进行了验证。

三维机加工艺设计流程

三维工艺设计所依据的最主要信息来源于零件三维模型，从中提取加工特征，进行工艺规划，生成工序模型，完成毛坯到成品的转变。

将基于三维零件模型的工艺设计过程分为 3 个阶段：

（1）工艺信息模型的建立。

从零件和毛坯模型中提取加工特征建立特征信息模型，一般情况下，一个加工特征需要经历不同的加工阶段，通过多道工序下的多个工步来加工完成，因此在特征信息模型基础上给每一个加工特征添加特征工艺链，从而完成工艺信息模型的建立。

（2）工艺路线规划过程。

将所有特征工步按照加工阶段的不同划分成多道工序，并进行排序。

（3）工序模型的生成。

通过工艺信息模型和工艺路线来驱动生成各个中间工序模型。

三维机加工艺设计流程如图 1 所示。由图 1 可知，三维机加工艺设计中的核心是建立零件的工艺信息模型。而工艺信息模型建立的关键是零件特征模型的恰当构建，即加工

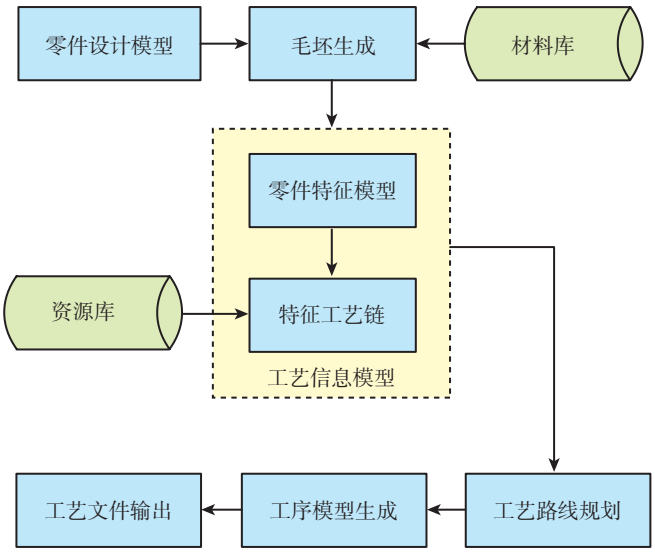


图1　三维机加工艺设计流程

特征的识别和提取。以加工特征作为工艺规划的对象单位，加工特征是零件模型中需要通过刀具连续加工而形成的几何区域，并以此为载体附加工艺信息[7]。添加特征工艺链过程中需要用到机床、工装等资源数据库。特征工艺链是以加工特征为核心的，有关特征加工所需的信息实体，包含了加工形成该特征所需的所有工步的信息。工艺路线规划主要包括工步聚类生成工序、工序 / 工步排序。工序模型生成指根据工艺信息来驱动零件模型按照工艺路线逆序一步步变成毛坯模型，中间的各个模型就是对应工序完成后的零件形状，所谓工序模型。

综上所述，基于三维零件模型三维机加工艺设计主要涉及到 2 个方面的关键技术，一是以零件模型为基础、以加工特征为核心的工艺信息模型建立，二是工序模型的生成。将对以上 2 种关键技术进行研究。

工艺信息模型的建立

基于三维零件模型的工艺信息模型由零件特征模型和特征加工链组成。其中特征信息模型继承了零件的几何信息，包含了特征加工链，是整个工艺信息组织的核心。工艺信息模型最主要的原始信息都来源于零件的三维设计模型。零件模型提供了零件几何信息、管理信息、技术要求、材料信息，依据这些信息来设计或选择毛坯。

1 特征模型的构建

加工特征，就是指在机械加工过程中可以按照特定方法和顺序加工成型的那部分几何拓扑形状。加工特征不仅仅是加工面的集合和面之间的邻接的几何拓扑关系，同时也是制造信息、工艺信息等多种信息为一体的信息载体[8]。所以必须建立完整的特征数据结构，才能实现具有实际加工意义和进行工艺设计应用的加工特征的识别。建立加工特征的数据结构如图 2 所示。

从零件和毛坯三维模型中提取加工特征构建特征模型，提取加工特征通过自动和交互特征识别的方法来实现。

2 特征工艺链的添加

每个特征最终的表面需经一系列加工才能成形，它对应着一组加工工序链，称之为特征工艺链。一个特征工艺链由若干个工步按加工顺序组成，如图 3 所示。

给每个特征添加工艺链的过程其实就是一个工艺设计的过程，不同的是，这是一种基于特征的工艺设计。如图 3 所示，给每一个加工特征分配属于它的特征类型，不同的特征类型又对应不同的加工方法。图中的特征类型 1 对应了加工方法 1.1

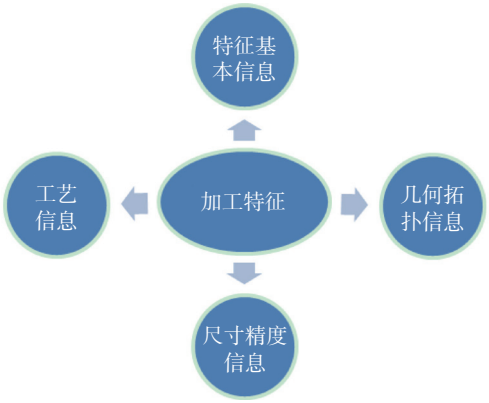


图2 加工特征数据结构

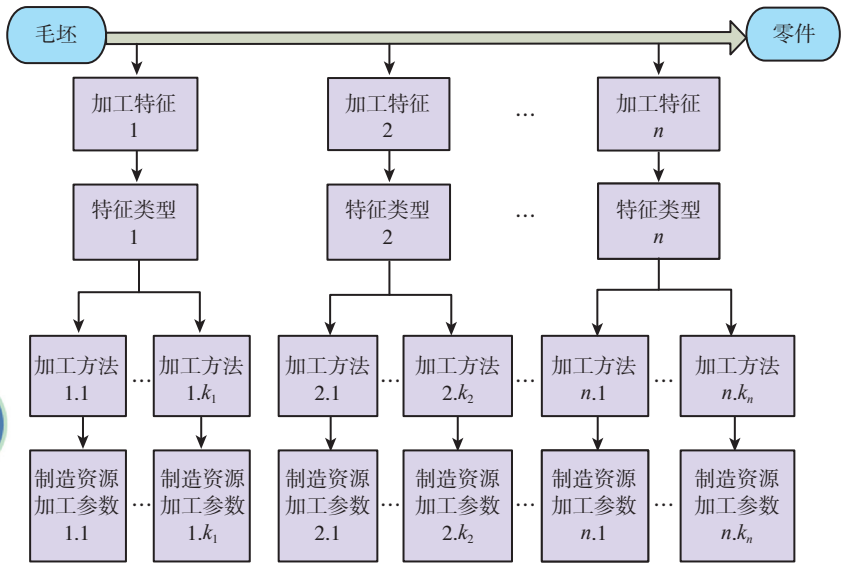


图3 加工特征与加工方法及资源的映射

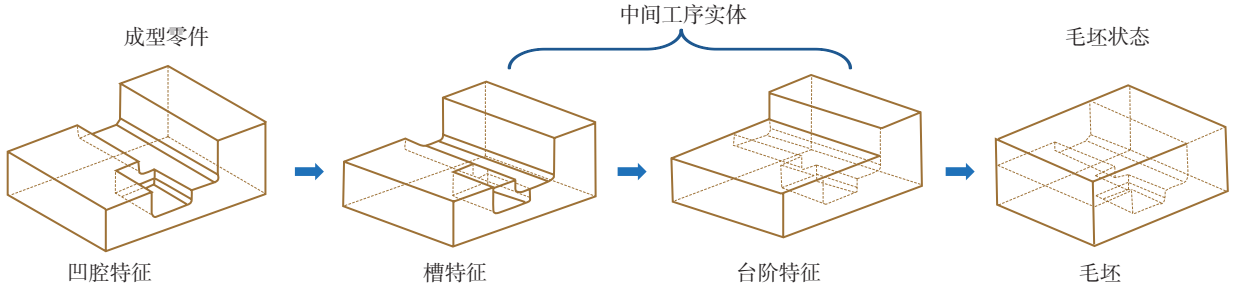


图4 中间工序模型

到加工方法 1.k_1，假如，加工特征 1 是一个孔类型的特征，需要经过钻孔、扩孔和铰孔 3 道工步顺序加工完成，这时，钻孔是加工方法 1.1，扩孔是加工方法 1.2，铰孔是加工方法 1.3，钻孔 – 扩孔 – 铰孔就是这个加工特征 1 的特征工艺链。每一个加工方法又对应机床、夹具、切削用量等工艺信息。每一个加工方法及其工艺信息的集合就是一个工步。

工艺信息模型是三维机加工艺设计的核心，它不仅承载了来自于零件设计模型的信息，而且还有添加的特征信息以及工艺信息。建立合理的工艺信息模型，可以顺利地生成中间工序模型，完成三维工艺设计。

中间工序模型的生成

机加零件的加工是从毛坯开始经历一系列的切削加工及热处理等工序完成的，按照工艺路线在各个工序后都形成一个独立的制造中间实体。按照工艺路线生成工序的中间实体模型对工序图、数控编程、加工变形分析、夹具设计等都具有重要的作用；并且可以直观地反映零件的加工过程，无需再进行二维图纸的分析和三维模型构建。所以在基于三维模型的工艺设计中，零件中间工序模型的生成是至关重要的内容。

中间工序模型，是指零件从毛坯状态开始到加工完成形成最终成型状态的整个过程中，每一步工序后所形成的制造实体。零件的中间工序实体一般有多个，与每步工序一一对应，如图 4 所示。

在三维机加工艺设计中，工序模型是在零件模型的基础上，由工艺信息驱动的，按照工艺路线逆序来一步步生成的，反映特定工序完成后零件实体状态的三维模型。通过对工序模型的虚拟直观浏览，工艺人员可以及时发现现时工艺规划中存在的问题，通过改变特征工艺链甚至重构特征模型来修改工艺规程，如此反复，直到工艺合理为止。

本文采用模型树来组织和表达中间工序模型。工艺树、模型树以及两者之间的关系如图 5 所示，左边为工艺树，右边为模型树，模型树上的一个工序模型关联工艺树上的一道相应的工序。

在生成中间工序模型后，要对中间工序模型进行标注，相当于传统的二维工序简图的绘制。在零件中间工序模型上，进行尺寸、公差、技术要求、表面粗糙度等的标注，示例如图 6 所示。

三维工艺信息的发布与输出

按照相关的规范和标准，生成工艺规程文件，输出的文件包括工艺卡片、工序三维模型及标注（包括了完整的三维模型、工序中间三维模型、工艺路线及工艺参数、设备资源信息）、轻量化模型（按照工艺路线生成的一组轻量化三维工序模型），工艺文件应当可以发布到车间，能够通过车间的终端机实现对工艺卡片信息和三维设计模型、工序中间实体模型等的浏览。

提出了 3 种工艺信息发布的方式：

（1）与传统的工艺卡片类似的发布方式，输出为工艺文件。

与传统工艺卡片不同的是，可以在工艺文件中嵌入三维的工序模型，并提供对模型的浏览和操作能力。

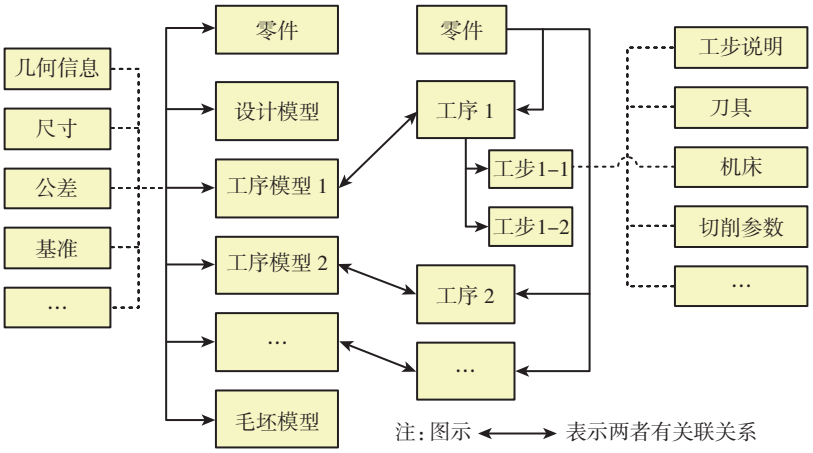


图5　工艺树与模型树的关联

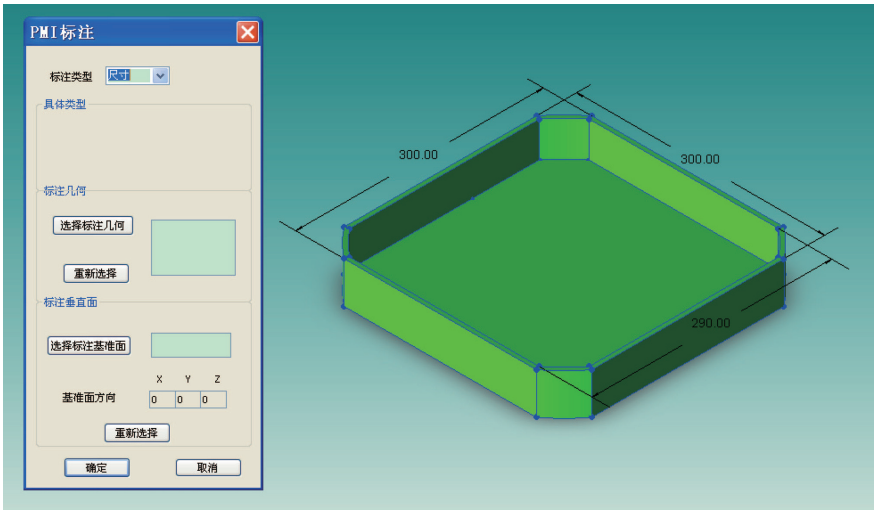


图6　工序模型标注示例

（2）基于 MBD（Model-Based Definition）思想的三维工艺模型的发布。

直接发布三维工艺信息模型，包括了加工特征信息、特征工艺链、工艺路线、工艺详细信息等，直接作为一个完整的模型发布到 PDM 等系统中，并进行传递。

（3）面向工艺现场的发布。

提供综合的工艺信息浏览工具，工人可以直接通过网络在车间的终端机上实现对工艺信息和工序模型的浏览。

应用实例

基于上述方法，作者利用 Visual Studio、ACIS 建模内核以及 HOOPS 渲染引擎开发了一个三维机加工艺设计原型系统，并在某厂新型号的某零件上进行了验证。

通过 ACIS 的 INTEROP 组件，将 PROE 生成的三维模型转换成 SAT 格式，并在系统中打开，如图 7 所示。设置零件基本信息后，通过交互特征提取或者自动特征识别将零件所有加工特征提取出来，并以每一个加工特征为节点构建特征树。然后为每一个加工特征添加特征工艺链，每一个特征工艺链包含不同加工阶段的多个工步，特征工步包含的信息如图 7 右下角对话框所示，特征工艺链添加在对应特征节点下面，如图 7 左侧第一个树控件所示。接着进行工艺路线的规划，即将所有特征工步进行排序并划分成多道工序，如图 7 左侧第二个树控件所示。继而根据工艺路线和工步参数来驱动中间工序模型的生成，并对工序模型进行标注。最后进行工艺规程的输出。

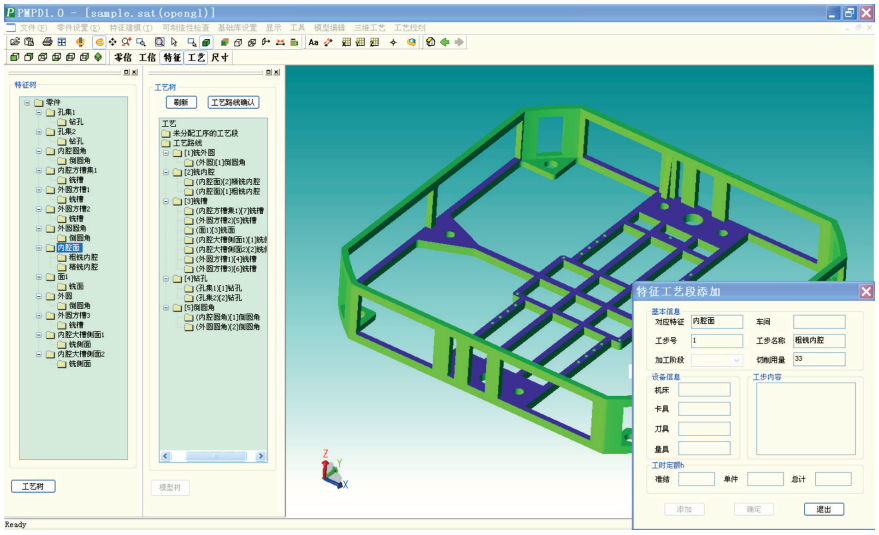


图7　应用实例

结束语

传统的二维工艺卡片设计方法存在二维工序图绘制繁琐且易产生歧义，以及工序模型无法为后期的加工检测与公差分析提供三维数据模型等问题，由此提出利用三维手段提升传统二维工艺设计能力的方法。以三维工序模型替代二维工艺简图表达，使三维工序模型成为工艺信息的载体和工艺检测分析的数据来源。

本文提出了一种基于三维模型的机加工艺设计模式。通过建立零件的特征模型，添加特征工艺链，从而建立工艺信息模型，进行工艺路线的规划，进而生成中间工序模型，输出工艺文件，最终实现基于三维模型的工艺设计，从而达到提升机加工艺设计表达的直观性和准确性的目的。

三维机加工艺设计是基于三维 CAD 技术的 CAPP 研究的重要内容，也是实现 CAD/CAPP/CAM 集成的关键技术之一。本文提出的三维机加工艺设计模式打通了设计模型和工艺模型之间的联系，为三维模型在 CAPP 系统中的充分应用创造了条件，有利于实现 CAPP 和 CAD 系统间的信息交流，并通过一个实例验证了该模式的可行性和有效性。

随着研究的深入，在该领域还存在大量的基础性的研究工作，后续的主要方向包括：CAD 模型转换和 PMI 信息获取技术保证模型几何、拓扑数据的质量和精度，获得完整的 PMI 定义信息；复杂结构加工特征的识别以及中间模型的生成；三维工艺设计环境下的夹紧定位、加工质量分析与验证等。

参 考 文 献

[1] 周秋忠，范玉青．MBD 技术在飞机制造中的应用．航空维修与工程，2008(3):55-57.

[2] 肖伟跃．CAPP 的反思与展望．成组技术与生产现代化，2007, 24(4):1-5.

[3] 丁海骜．融合中的直接建模和参数化建模．CAD/CAM 与制造业信息化，2012 (3):19-20.

[4] Siemens PLM Software. 应用同步建模技术的 NX6. 航空制造技术，2008 (16):104-105.

[5] 万能，赵杰，莫蓉．三维机加工工序模型辅助生成技术．计算机集成制造系统，2011, 17(10):2112-2118.

[6] 万能，常智勇，莫蓉．机加工艺设计的三维新模式研究．计算机集成制造系统，2011, 17(9):1873-1879.

[7] Abouel N, Emad S, Ali K. A new methodology for extracting manufacturing features from CAD system. Computers and Industrial Engineering, 2006，51(3): 389-415.

[8] Perng D, Chen Z, Li R. Automatic 3D machining feature extraction from 3D CSG solid input. Computer aided Design, 1990, 22(5): 285-295.

（责编　深蓝）