

中图分类号：TP391
学科分类号：082503

论文编号：102870515-S224

硕士学位论文

雷达零件三维工序模型快速生成 关键技术研究

研究生姓名	房文林
学科、专业	航空宇航制造工程
研究方向	数字化设计与制造
指导教师	闫崇京

南京航空航天大学

研究生院 机电学院

二 一五年三月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics

The Graduate School

College of Mechanical and Electrical Engineering

Research on Rapid Generation Technology for 3D Process Model of Radar Parts

A Thesis in

Manufacturing Engineering of Aeronautics and Astronautics

by

Fang Wenlin

Advised by

Lec. Yan Chongjing

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

March , 2015

承诺书

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京航空航天大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

本人授权南京航空航天大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本承诺书）

作者签名：_____

日 期：_____

摘要

在雷达零件的设计制造过程中,企业正逐步推进以三维模型为核心的设计制造一体化技术。其中,零件三维工序模型快速生成技术是三维工艺技术实现的重要组成部分。目前三维工序模型生成过程中存在着效率低、实用性差等问题,本文依托于某国防基础科研项目,结合典型雷达零件工艺制造特点,进行了雷达零件三维工序模型快速生成关键技术的研究,具体工作内容如下:

(1)研究了三维工序模型的两种生成方法。采用逆向生成方法,推导出零件工序模型的逆向求解表达式,并给出了零件三维工序模型快速生成的总体流程。

(2)研究了三维工序模型特征识别技术。通过对零件模型几何特征提取算法和零件工艺信息提取方法的研究实现模型特征的识别和提取。给出了特征映射方法和步骤,通过特征分类匹配及制造特征库实现对不同特征的映射处理。

(3)研究了三维工序模型生成过程中涉及到的关键技术,包括几何模型快速生成技术、特征变更响应技术、三维工序模型标注技术和三维工序模型发布技术等。

(4)以上述理论成果为基础,开发了雷达零件三维工序模型快速生成原型系统,并以某典型雷达零件为例,验证了从系统启动、工序信息导入到制造特征识别、特征抑制及制造特征库管理等系统功能的实现过程。

关键词: 三维工序模型, 特征识别, 特征映射, 特征抑制

ABSTRACT

Nowadays, companies are pushing ahead with 3D model as the core of integration of design and manufacturing technology in the process of radar parts design and manufacture. Among them, the rapid generation technology for 3D process model is an important part to achieve 3D technology. The current process of 3D model generation has some problems, such as low efficiency and poor practical. In this paper, on the base of national defense scientific research project, combining with the characteristics of typical radar parts manufacture process, we researched the rapid generation technology for 3D process model of radar parts. The specific work content is as follows:

(1) The method for generating 3D process model is studied. The reverse solving expression of parts process model is deduced and the overall process for 3D process model rapid generation is given.

(2) The feature recognition technology of 3D process model is studied. Feature recognition and extraction of 3D model is implemented by the research of geometric feature extraction algorithm and processing information extraction method. Feature mapping method and steps are given. The mapping process of Different features is achieved by matching feature classification and manufacture feature database.

(3) The key technologies involved in the 3D process model generation are studied, including geometric model rapid generate, feature change response, 3D process model dimension and 3D process model release.

(4) The radar parts 3D process model rapid generation system is developed based on the above theoretical results. And taking the typical radar parts as an example, the system functions, from the system start, process information import to manufacture feature recognition, feature suppression and manufacture feature management, are tested.

Keywords : 3D process model, Feature recognition, Feature mapping, Feature suppression

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 特征识别技术	2
1.2.2 工序模型生成方法	4
1.3 研究的主要内容	6
1.4 论文的组织结构	7
第二章 雷达零件三维工序模型生成方法	9
2.1 引言	9
2.2 三维工序模型定义	9
2.2.1 MBD 模型定义及优势	9
2.2.2 零件三维工序模型定义	11
2.3 雷达零件特点及分类	12
2.4 三维工序模型生成方法	13
2.4.1 工序模型生成方法	13
2.4.2 工序模型快速生成流程	15
2.5 本章小结	17
第三章 三维工序模型特征识别.....	18
3.1 引言	18
3.2 特征提取	18
3.2.1 特征的定义与分类	18
3.2.2 模型信息提取内容	19
3.2.3 模型几何特征提取	20
3.2.4 模型工艺信息提取	26
3.3 特征映射	30
3.3.1 特征映射方法及步骤	30
3.3.2 特征映射分类处理	31
3.3.3 制造特征库及映射规则库	32

3.4 本章小结	35
第四章 三维工序模型快速生成	36
4.1 引言	36
4.2 特征抑制	36
4.2.1 特征抑制方法及步骤	36
4.2.2 参数化建模技术	37
4.2.3 柔性建模技术	38
4.3 工序模型生成	40
4.3.1 工序模型生成	40
4.3.2 工序模型更改	41
4.4 工序模型发布	42
4.4.1 三维工序模型标注	42
4.4.2 三维工序模型发布	43
4.5 本章小结	44
第五章 原型系统开发	45
5.1 引言	45
5.2 系统开发环境	45
5.2.1 系统开发环境	45
5.2.2 Creo2.0 简介	45
5.2.3 Creo 二次开发技术简介	45
5.3 系统总体方案设计	46
5.3.1 系统设计思路	46
5.3.2 系统体系架构	47
5.3.3 系统拓扑结构	48
5.3.4 系统功能模块	48
5.3.5 系统数据库设计	49
5.4 原型系统功能模块实现	50
5.4.1 工序信息导入	51
5.4.2 制造特征识别	51
5.4.3 特征抑制	54
5.4.4 制造特征库管理	55

5.4.5 输出结果	56
5.5 本章小结	57
第六章 总结与展望	58
6.1 全文总结	58
6.2 研究展望	59
参考文献	60
致 谢	63
在学期间的研究成果及发表的学术论文	64

图表清单

图 1.1 二维图纸到三维工艺方法转变.....	2
图 1.2 特征识别方法分类.....	3
图 1.3 属性邻接图识别方法.....	3
图 1.4 论文组织结构图.....	8
图 2.1 波音公司 MBD 飞机零件模型.....	10
图 2.2 三维工序模型定义.....	11
图 2.3 雷达典型结构件.....	12
图 2.4 几种典型雷达零件三维模型图.....	12
图 2.5 两种三维工序模型生成方法.....	13
图 2.6 工序与工序模型对应关系.....	14
图 2.7 雷达零件三维工序模型快速生成流程图.....	16
图 3.1 制造特征分类	19
图 3.2 提取模型信息	19
图 3.3 特征提取过程	20
图 3.4 B-rep 数据结构	21
图 3.5 模型边方向的判断.....	22
图 3.6 各符号意义示意图.....	22
图 3.7 判断边的凹凸性流程图.....	24
图 3.8 判断环的属性的流程图.....	25
图 3.9 三种零件工艺信息提取方式.....	26
图 3.10 利用 XML 实现零件工艺信息传递.....	27
图 3.11 雷达零件工艺信息模型.....	28
图 3.12 特征映射过程.....	30
图 3.13 制造特征添加流程.....	32
图 3.14 制造特征管理.....	33
图 3.15 采用拉伸得到的腔槽与孔特征.....	33
图 3.16 非通台阶特征识别.....	34
图 3.17 带圆角的盲槽特征识别.....	35

图 4.1 特征抑制过程	36
图 4.2 特征参数化流程.....	37
图 4.3 三维工序模型生成流程.....	38
图 4.4 相交槽特征示意图.....	39
图 4.5 柔性建模特征处理示意图.....	39
图 4.6 工序模型生成过程.....	40
图 4.7 零件模型与工序模型及制造特征关系.....	41
图 4.8 两种特征变更类型.....	41
图 4.9 三维标注示例	43
图 4.10 三维标注过程.....	43
图 4.11 三维工序模型发布.....	44
图 5.1 三维工序模型设计模块体系架构.....	47
图 5.2 模块网络拓扑结构.....	48
图 5.3 系统功能结构树.....	48
图 5.4 模块功能流程图.....	49
图 5.5 设计特征到制造特征映射.....	50
图 5.6 某雷达零件实例.....	50
图 5.7 工序生成模块启动过程.....	51
图 5.8 工序信息确认	51
图 5.9 制造特征识别窗口.....	52
图 5.10 设计特征和未识别特征显示.....	52
图 5.11 特征抑制窗口.....	54
图 5.12 “修改更新”功能.....	55
图 5.13 “抑制特征”功能.....	55
图 5.14 制造特征库管理界面.....	56
图 5.15 三维工序模型生成结果.....	56
 表 1.1 MBD 模式与工程图模式对比表.....	 9
表 3.1 特征映射分类处理表.....	31
表 5.1 Creo Parametric 二次开发方法.....	46

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

近年来,随着我国制造业信息化水平不断提高,三维技术逐渐由设计领域向制造领域延伸,企业正在逐步采用以三维模型为核心的设计制造模式^[1]。其中,零件三维工序模型的生成是三维工艺技术实现的重要组成部分,对工艺模式的创新有直接意义。但是由于设计人员在设计过程中对零件模型的理解与工艺人员不同,导致生成的设计模型与采用去除材料加工的切削加工过程没有对应关系,利用设计出的三维零件模型生成工艺人员所需的三维工序模型十分困难。如何快速生成零件三维工序模型成为亟需解决的关键问题。

雷达是一种复杂的机械电子设备,它包含了大量对精度和机械性能具有明确要求的结构件。作为一种典型的复杂机电产品,雷达中的一些关键组件在工艺设计与加工方面存在着困难,严重影响着产品的交货期。例如高精度、薄壁及异形复杂腔体类零件是雷达设备的典型核心组件,具有品种多、批量小的生产特点。这类零件对雷达产品性能指标有重要的影响。但是现阶段,由于工艺方法的落后,零件的研制周期直接制约了雷达产品的研制进度^[2]。而三维工序模型的应用可以有效的提高雷达零件的研制效率。因此,如何将三维工序模型应用在雷达零件的设计制造过程中、如何实现雷达零件三维工序模型的快速生成成为雷达产品工艺设计过程中的重要问题,它对保证雷达产品研制的高质高效有重要意义。

现阶段雷达零件研制是在三维模型设计完成后,需进行二维工程图转换,然后进行二维工艺文件的编制,再进行相关生成。这个过程的缺点主要表现在以下几点:

(1) 工艺设计、制造部门需要花费大量的时间转换和消化二维图纸^[3],使得工艺设计效率低。

(2) 数据重复录入。工艺设计、制造部门需要重新录入数据,使得三维设计模型与二维工程图的数据一致性难以保证。

(3) 难以实现对用户需求的快速响应。当前雷达产品生命周期大大缩短,传统工艺制造方式难以满足多品种、小批量、产品快速更新的特点,难以实现对用户需求的快速响应。

(4) 设计数据和制造数据不关联。存在信息孤岛,设计、工艺和制造数据不关联,设计数据更改时,工艺模型需要手动更改,无法实现快速响应变更。

针对以上问题,三维工艺技术通过三维工序模型来完整表达产品工艺信息,详细规定三维模型中产品定义和工艺信息的表达方法。三维工序模型是指,产品从原材料形态到最终成品的过程中,反映零件模型各工序加工过程所对应的模型状态^[4]。三维工序模型可以形象地表达零件在生产制造过程中各工序的变化。将零件三维工序模型作为生产制造过程中的唯一依据,改

变了传统以二维工程图纸为主的工艺设计方法 ,实现了制造链中的三维数据贯通。如图1.1所示。

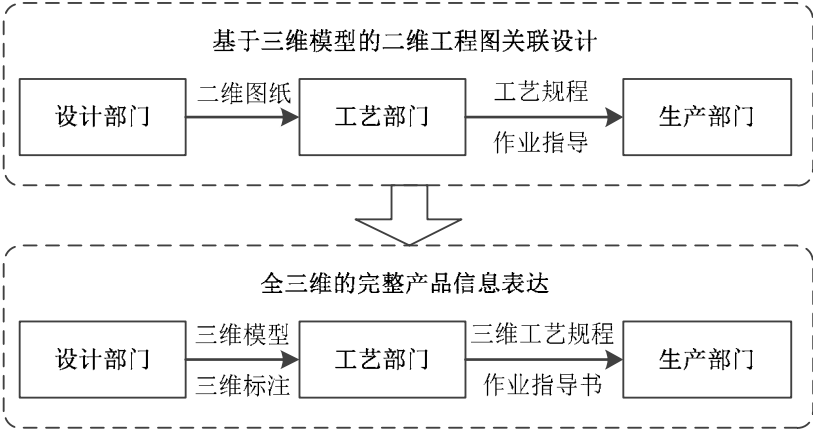


图 1.1 二维图纸到三维工艺方法转变

相对于传统的工艺方式，三维工艺技术以三维工序模型为单一数据源，设计、生产、装配等一系列工作都围绕数字状态的三维模型进行，使产品设计人员、工艺设计人员、生产制造人员及装配人员的工作依据和工作方式发生了深刻变化，对原有的生产模式带来巨大变革，各个部门在同一三维模型上协同工作，可以有效地保证产品质量的可靠性，并提高产品研制效率，缩短研制周期。

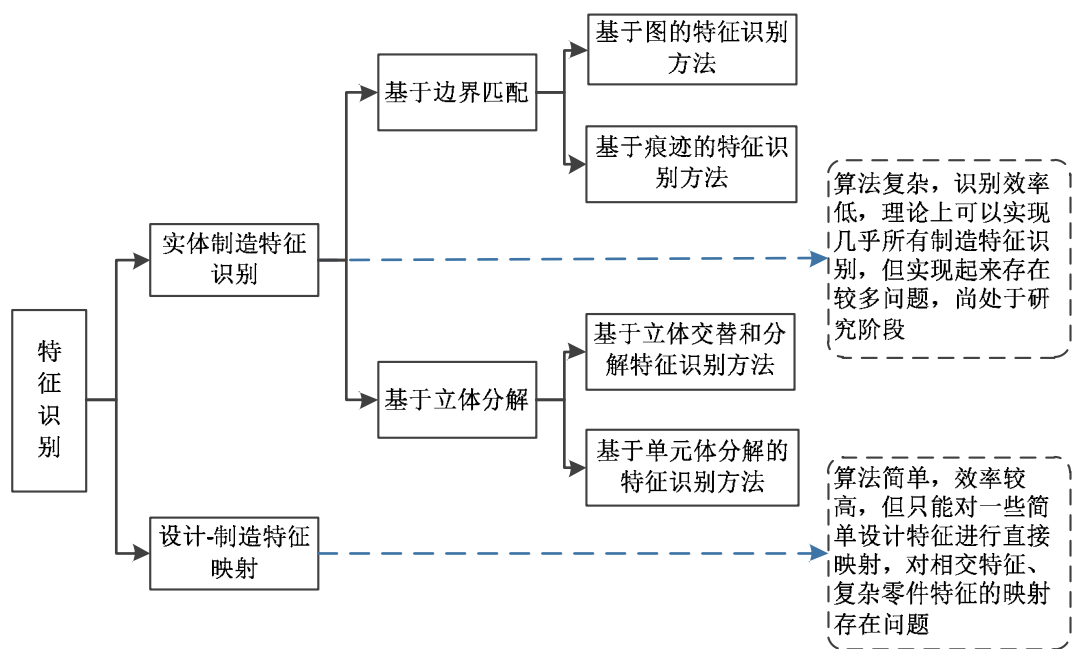
1.2 国内外研究现状

1.2.1 特征识别技术

对零件模型的特征识别与提取是三维工序模型生成首先要解决的问题。由于零件的模型特征表示具有不唯一性，即相同几何形状的零件会有多种不同的模型特征表示方法^[5]，同时特征还包括单一特征和复杂组合特征，因此，如何把零件特征进行识别与提取并进一步转换为加工制造特征，成为三维工序建模的重点与难点。

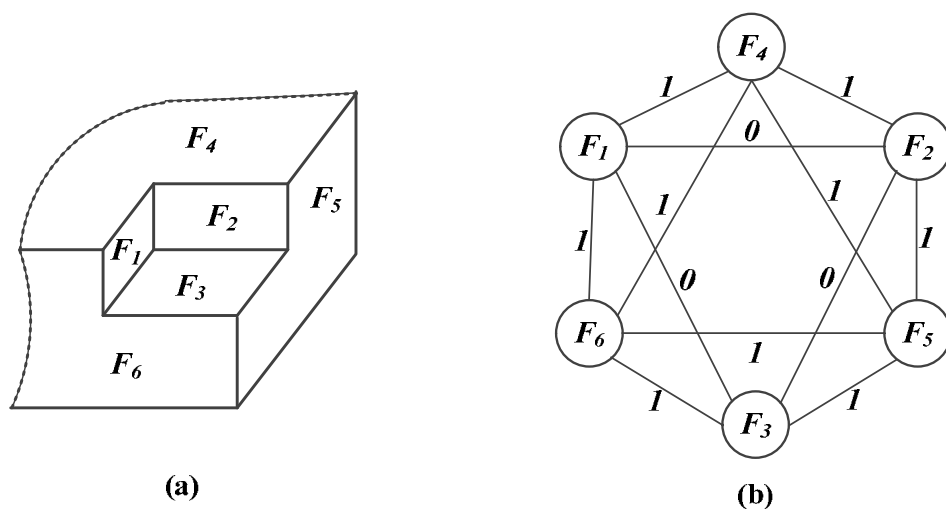
目前特征识别方法总体上可以分为两类，一类是基于设计特征到制造特征的映射，另一类是实体制造特征识别，如图 1.2 所示。设计特征到制造特征映射的方法具有算法简单，效率较高的特点，但是只能对一些简单设计特征进行直接映射，对于相交特征、复杂零件特征的映射还存在问题。而基于实体制造特征识别的方法理论上可以实现几乎所有的制造特征，但是算法复杂，识别效率低，实现起来存在较多问题，许多方面尚处于研究阶段。

实体制造特征识别可以分为两大类：基于边界匹配和基于立体分解。其中基于边界匹配的特征识别方法又可以分为两种：基于图的特征识别方法和基于痕迹的特征识别方法。基于立体分解的特征识别方法也可以分为两种：基于立体交替和分解的特征识别方法和基于单元体分解的特征识别方法^[6]。下面分别对以上几种常用的特征识别方法进行介绍。



(1) 基于图的特征识别方法 (Graph-based approach)

Joshi^[7]在1987年研究了基于图的方法，其目的是建立一个包含拓扑结构和几何信息的零件表达模式。他提出了通过属性邻接图 (Attributed Adjacency Graph, AAG) 的方法来表示零件 B-rep (Boundary representation, 边界表示法) 模型。AAG 是一种图表，它定义邻接关系的弧属性为“0”，凸邻接关系的弧属性为“1”，如图1.3所示为盲台阶特征及其对应的属性邻接图。子图代表形状特征，形状特征的识别过程变为从数据库中对特定子图的寻找匹配过程。属性邻接图法是目前人们研究最多的特征识别方法，许多方法都是在属性邻接图法的基础上改进的^[8]。



（2）基于痕迹的特征识别方法（Hint-based approach）

基于痕迹的特征识别方法的提出是为了解决在识别相交特征时遇到的难以识别的问题。Vandenbrande^[9]和 Requicha^[10]在其面向对象的特征识别系统中首次提出这一方法。该方法将拓扑、几何和启发式信息等作为特征的痕迹，认为不同特征加工过程中会在特征边界留下相应痕迹，通过定义相关规则实现特征的识别。

（3）基于凸包体积分解的特征识别方法（Convex hull volumetric decomposition approach）

凸包分解和单元体分解两种方法都是将输入的模型进行分解，然后将分解体进行操作得到加工特征。因此常将它们统称为体积分解法（volumetric decomposition approaches）。Kyprianou^[11]首先提出了凸包分解法，而 Woo^[12]首先实现该方法。该方法根据零件模型定义一个凸包多面体，以交替和差方式判断形状特征。

（4）基于细胞体分解方法（Cell-based volumetric decomposition approach）

细胞体分解方法主要分为三步：首先，分割出从毛坯到最终零件的单元体的不同集合；然后，以延伸的边界面为分割面细分单元体（细胞体分解）；最后，将可以被同一工步刀具切割的共面单元体合并为得到最大细胞体（细胞体重组）。Sakurai^{[13][14]}等对细胞体分解进行了深入研究，通过对零件切削体进行细胞体分解实现对加工特征的识别。

以上为几种常用的特征识别方法，国内的不少学者也在此基础上进行了广泛的研究，如西北工业大学的田锡天^{[15][16]}、张树生^[17]团队，华中科技大学的严晓光^[18]团队等。尽管有许多学者进行了这方面的研究，但是仍不存在能完全自动化实现特征识别的方法，主要仍存在以下问题：

- （1）算法复杂，特别是对于相交特征的识别算法较复杂，难以得到确定的解；
- （2）目前方法大多集中于解决正交特征，对于非正交特征和任意角度特征无法解决；
- （3）对于识别过程中的制造信息涉及较少，不利于下一步的加工生产。

为了实现工序模型的高效快速生成，本文拟采用设计特征-制造特征映射与基于图的特征识别相结合的方法实现特征识别，并结合工序模型生成特点，加入工序信息对相关方法进行优化改进，辅以人工交互手段，以实现绝大部分特征识别。

1.2.2 工序模型生成方法

在进行相关技术研究的同时，不少学者也研究了工序模型生成方法并进行了三维工序模型生成系统的开发，但大都处于实验阶段。

Jain和Kumar^[19]在其PRIZCAPP系统中完成了部分三维工序模型生成功能的实现。他将AutoCAD的.dxf文件模型提取为线框模型。然后对3D的线框模型进行转换，将每个平行六面体的六个边界平面转换为顶点-边模式2D的图表，通过与知识库的匹配，该系统实现了对孔、台阶、槽、凸台等特征的识别，但是未能实现三维工序模型的自动生成。

Babic^{[20][21]}研究了将零件三维实体模型转换为IGES（the Initial Graphics Exchange

Specification, 初始化图形交换规范)中性数据格式,通过开发的CAPP(Computer Aided Process Planning, 计算机辅助工艺过程设计)系统对IGES数据进行识别。首先提取面并确定底面(底面是至少有一个凹邻接特征面的特征面),然后确定各边界面,通过边界面的数量和类型对形状特征进行匹配。其系统能够识别的特征有腔体、通槽、盲槽、台阶、盲台阶、通孔、盲孔、埋头孔等。相似的从IGES中性文件中提取数据然后进行逻辑规则匹配的还有Bouzakis和Andreadis^[22]的CAPP系统。

近年来,随着三维工艺技术的不断发展,国内学者也对三维工序模型生成系统进行了广泛的研究。

华中科技大学的谢波^[5]给出了一种零件特征模型重构的方法,利用零件的三维设计模型,结合零件制造过程中特征的加工方向和加工方式,将零件进行重构,获得新的零件模型,该模型采用串化的特征表示,然后运用特征转换方法,将零件设计特征转换到加工特征,同时给出了特征顺序排列与优化方法。

西北工业大学的石云飞、李山^[23]等人应用UG/Open提供的多种开发工具,开发了基于UG的叶片CAD造型系统。通过对CAD平台的二次开发,提供了一种三维叶片工序模型的生成方法,并进行应用。该系统由于只针对航空发动机叶片这种零件,因此具有较高的局限性。相似的系统还有哈尔滨工程大学的许国玉、单忠臣^[24]等人以AutoCAD2000为操作平台,在Visual LISP集成开发环境下开发的回转体零件特征信息提取系统。

武汉理工大学的张雪荣^[25]进行了在Pro/ENGINEER平台下运用Pro/TOOLKIT二次开发工具来开发Pro/E环境下的三维CAPP系统的研究。整个三维CAPP系统基于统一的数据库,包括文档管理、三维参数化工艺设计、卡片编辑工具、工艺资源管理、卡片模版定制和用户信息管理等功能,系统完全嵌入Pro/E软件平台。

北京理工大学的丁丁和航天科工集团的刘颖^[1]等人分析了生产制造过程中零件的几何特征和工艺体系,针对去除材料加工的制造过程,提出了合适的特征定义和分类标准,研究了零件工序模型的内容和实现方法。在其研究中基于零件每个加工特征的工艺方法和参数,参照零件合理的加工工艺,实现了相应零件工序模型的生成。实验表明,该方法可有效的应用于常见的以回转体类特征为代表的其他切削加工特征,并能实现三维工序模型的自动生成。

中北大学的陈树晓^[26]研究了以设计模型到毛坯模型,再到制造模型并自动生成相应的工艺规划的内容,利用Visual Basic6.0以及二次开发技术完成了基于特征参数化造型软件SolidWorks的原型系统。该系统能够实现零件三维模型特征的识别与补偿,零件总体信息、加工特征工艺约束信息的获取,工艺方法链的决策,加工元的分解,工序、工步的排序,加工设备、刀具、切削用量参数的匹配、选择,工艺规划的决策与生成等。

以上是关于三维工序建模系统的几种典型实例,其它实例^{[27][28]}大都为实验性的或与上面几

种类似。根据目前已有的经验，以上三维工序模型生成系统方案有三种：一种是如西北工业大学开发的三维叶片工序模型系统的针对特定类型零件的三维工序模型生成系统；一种是如北京理工大学的三维工艺设计软件的利用已有工艺过程，按顺序进行三维工序建模；最后一种也是智能化程度最高、难度最高的一种，能够实现零件三维模型所有特征的识别与补偿，并自动生成三维工序模型，但此方法对零件要求，有一定的局限性。尽管不少学者和机构进行了大量相关研究，目前还未发现成功的三维工序建模的商品化软件。

目前，三维工艺技术正在朝着知识化、集成化、网络化方向发展，而三维工序建模智能化、知识化方面还存在不少难点，特别是在复杂特征识别方面仍未有突破性进展^[29]。具体问题主要有以下几点：

- (1) 缺少对相交特征的通用的处理方法；
- (2) 如何确定足够数量的模板特征库；
- (3) 对于启发式识别系统，如何确定其有效性。

1.3 研究的主要内容

本文主要结合雷达产品制造的特点和需求，围绕雷达设计制造一体化的目标，研究基于三维的雷达零件工序模型相关技术，重点突破三维工序模型快速生成技术，为实现基于三维模型的设计制造一体化平台打下基础。同时，开发三维工序模型快速生成相关应用工具，并在Creo软件界面提供给工序设计人员使用。主要工作内容有以下几个方面：

(1) 雷达零件三维工序模型生成方法研究

对三维工序模型进行定义，分析雷达零件加工制造的特点。研究三维工序模型的生成方法及雷达零件三维工序模型的生成过程，推导出零件工序模型的逆向求解表达式。总结零件三维工序模型快速生成的总体流程。

(2) 三维模型制造特征识别技术研究

对各类特征类型进行分类和总结，对每个特征类型包含的属性信息及映射关系进行定义和管理，并通过建立制造特征库、映射规则库进行存储。以特征提取和特征映射方法为基础，实现对零件模型制造特征信息的识别。

(3) 三维工序模型快速生成技术研究

匹配工序模板，根据所提取制造特征类型，通过参数化建模方法和柔性建模方法结合，实现特征抑制，快速生成每道工序的三维工序模型。

(4) 原型系统开发

以Microsoft Visual Studio 2010为集成开发环境，在PTC Creo2.0平台上用Pro/Toolkit二次开发工具进行三维工序模型辅助生成工具原型系统的开发。

1.4 论文的组织结构

全文共分为六章，每章具体内容如下：

第一章 绪论

本章介绍了论文的研究背景和意义，对特征识别技术和工序模型生成系统的国内外研究现状进行了分析研究，最后介绍了论文研究的主要内容和组织结构。

第二章 雷达零件三维工序模型生成方法

本章首先对三维工序模型进行了定义，并对所要研究的雷达零件的特点进行了分析和总结，对雷达零件进行了分类。在此基础上，研究了工序模型逆向生成方法，并推导出零件工序模型的逆向求解表达式。最后，给出了零件三维工序模型快速生成的总体流程。

第三章 三维工序模型特征识别

本章主要详述三维工序模型特征识别技术，主要包括特征识别与提取、特征映射处理两部分。研究零件模型几何特征的提取和工艺信息的提取，通过特征分类及制造特征库实现对不同特征的映射处理。

第四章 三维工序模型快速生成

本章主要详述三维工序模型快速生成过程中涉及的几何模型快速生成技术、特征的变更响应、三维工序模型标注及三维工序模型的发布。

第五章 原型系统开发

本章介绍以 Microsoft Visual Studio 2010 为集成开发环境，在 PTC Creo2.0 平台上用 Pro/Toolkit 二次开发工具进行三维工序模型辅助生成工具的开发过程。详述原型系统的开发环境及功能模块，并利用典型雷达零件进行实例验证。

第六章 总结与展望

本章对全文的内容进行了总结，并对该技术未来的发展进行了展望。

本文的组织结构如图1.4所示。

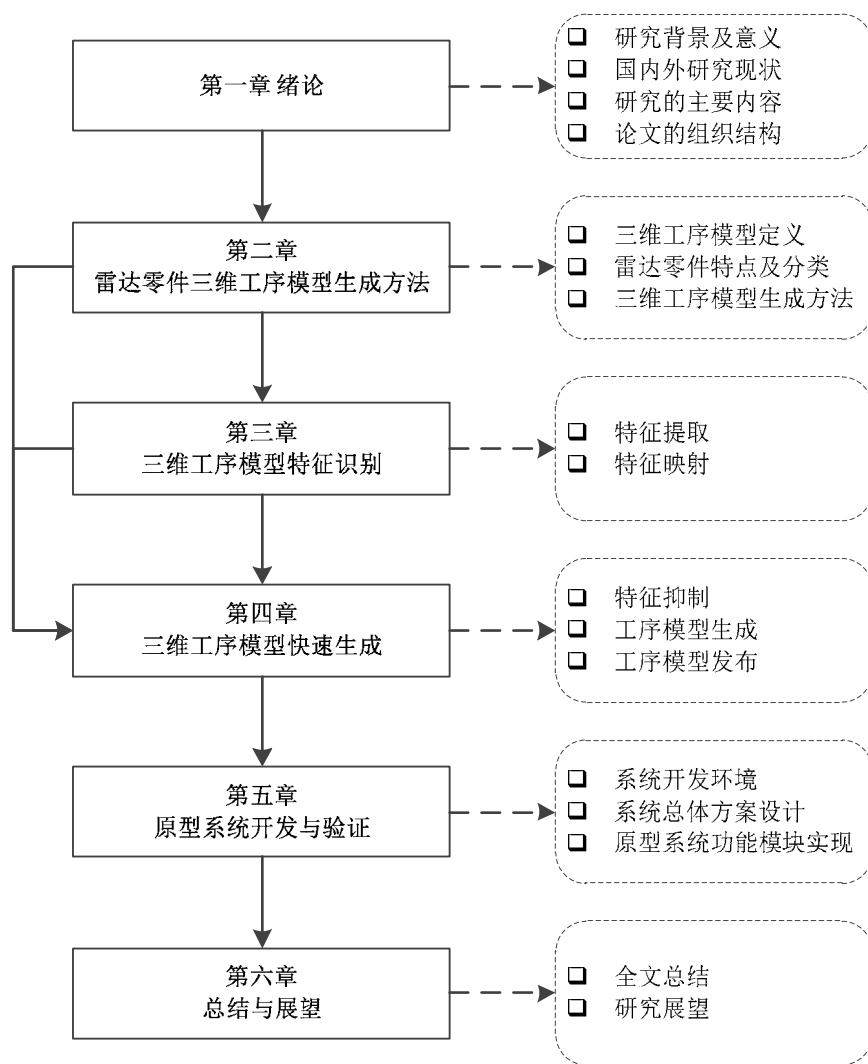


图1.4 论文组织结构图

第二章 雷达零件三维工序模型生成方法

2.1 引言

上一章主要介绍了本文的研究背景和意义以及当前国内外研究现状，针对雷达零件三维工序模型快速生成，首先要明确三维工序模型的定义和雷达零件的特点及分类，并在此基础上研究三维工序模型生成的方法及过程。

2.2 三维工序模型定义

2.2.1 MBD 模型定义及优势

MBD (Model Based Definition，基于模型的定义)是美国波音公司倡导的一种新的产品定义方法，已在众多领域内广泛使用。其核心思想可描述为：全三维基于特征的表述方法，MBD模型关注的是零件的加工特征及特征关系的管理，其目的是实现三维设计模型到三维制造模型的转化，进而实现设计制造一体化；基于文档的过程驱动，MBD的实现是集数字化的设计模型、制造模型以及相关的物料清单等多个关联过程为一体的运行机制，取消了二维工程图，简化了数据的传输过程，有利于保持数据的一致性；融入知识工程，在设计制造过程中存在的众多知识，可通过一定的方法和手段在MBD模型中进行表达、整理和收集。此外，MBD模型还包括了过程模拟和产品标准规范等^[30]思想。其在很大程度上填补了三维模型在设计端和制造端的间隙。MBD模型通过采用高度集成化的三维实体模型，有效的表达了产品从设计模型到制造模型的完整信息，其中涵盖了产品的几何、制造、属性等数据，用以作为制造过程中的唯一依据^[31]。

MBD研发制造模式对比传统二维工程图模式模型在使用上的优势见表1.1:

表 1.1 MBD 模式与工程图模式对比表

MBD模式		工程图模式
产品几何外形	三维几何可视	使用二维形式表现
产品尺寸	三维空间尺寸，关联实际的特征或表面	使用二维文本说明
公差	三维空间公差，关联实际的特征或表面	使用二维文本说明
注释	三维书写，注释直接关联特征和表面	使用二维文本说明
BOM	直接根据模型生成，并关联材料数据	手工构成，需要修改调整

表1.1 (续)

MBD模式		工程图模式
快速样机	直接精确的用三维模型转化得到	二维表现，需要通过三维工具转化
组成、安装、功能和公差分析	三维可视化的计算	二维形式表现展示和计算分析
分析仿真	即时提供三维的几何、公差和材料数据，为有限元分析提供三维的网格文件。	在设计工程师和分析工程师之间不能实现并行工作
检验	评估和测量三维可视化。	使用三维工具测量，二维形式表达。
制造	机械加工人员和质量人员三维可视通过三维模型直接转化	需要将二维的几何描述转换给三维工具
装配和测试	精确装配中三维可视，结果直接反映设计意图	只能通过二维表示
构型管理和文档维护	直接通过模型在构型管理中保证一致性	用纸质形式表现，对模型的升版没有控制力。
部件过程、装配历史的研究开发	特征和装配历史树记录直接在模型中存储，并且与构型管理和版本控制关联。	需要二维绘制
归档	电子数据具有无限备份的能力 纸质或PDF文件可以直接根据模型尺寸、公差、注释和BOM生成。	利用 PDF 或纸质形式
时间成本	减少转化过程；减少因转化而产生的错误；因团队的并行而提升产品的品质	三维形象和二维图纸多次转化物。

波音公司将MBD技术应用在787客机的研制过程中，取得了明显的效果，得到了国际上的广泛认同^[32]。图2.1为波音公司应用了MBD技术的飞机机加零件图。左侧包含零件工序信息，右侧零件图上包含零件工艺信息。可以看到，利用MBD技术，波音公司实现了全三维数字化的模型信息集成^[33]。

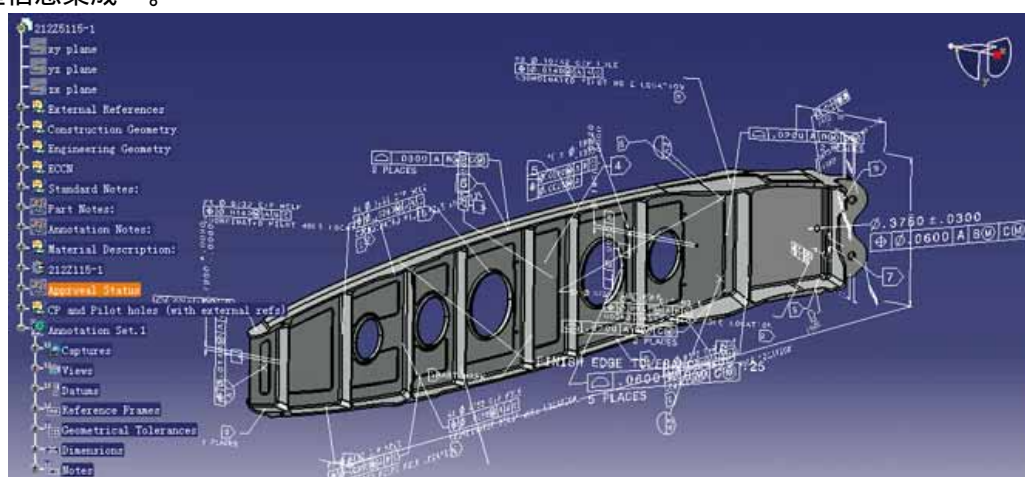


图2.1 波音公司MBD飞机零件模型

2.2.2 零件三维工序模型定义

零件三维工序模型是属于MBD模型的一种。与普通MBD模型相比，零件三维工序模型注重相应工序的工序信息，包括工序内容、加工方法、加工设备等信息。零件三维工序模型采用三维可视化的方法对制造工序过程进行表达和展现，其研究对象为三维实体模型，研究重点为制造工序模型数据，实现了设计数据（几何形状数据）和制造数据（工序数据）的集成，是一个完整的信息模型。零件工序模型主要面向工艺设计人员与制造加工人员，而零件设计模型主要面向零件设计人员。因此与零件设计模型相比，零件工序模型更注重模型外部特征及加工制造特征，对于零件内部特征关联并不注重，其通过对工序信息以及与模型之间的关系进行分析，定义三维工序模型。

考虑零件的加工工艺过程，通过对零件加工过程中的各个中间状态进行分析，参考国际标准ISO16792(技术产品文件——数字产品定义数据规程)，美国机械工程师协会ASME Y14.41(数字产品定义数据的操作规程)，国家标准GB/T24734(技术产品文件数字化产品定义数据通则)，建立三维工序模型，如图2.2所示。三维工序模型由几何实体、标注信息和工序信息三部分组成。

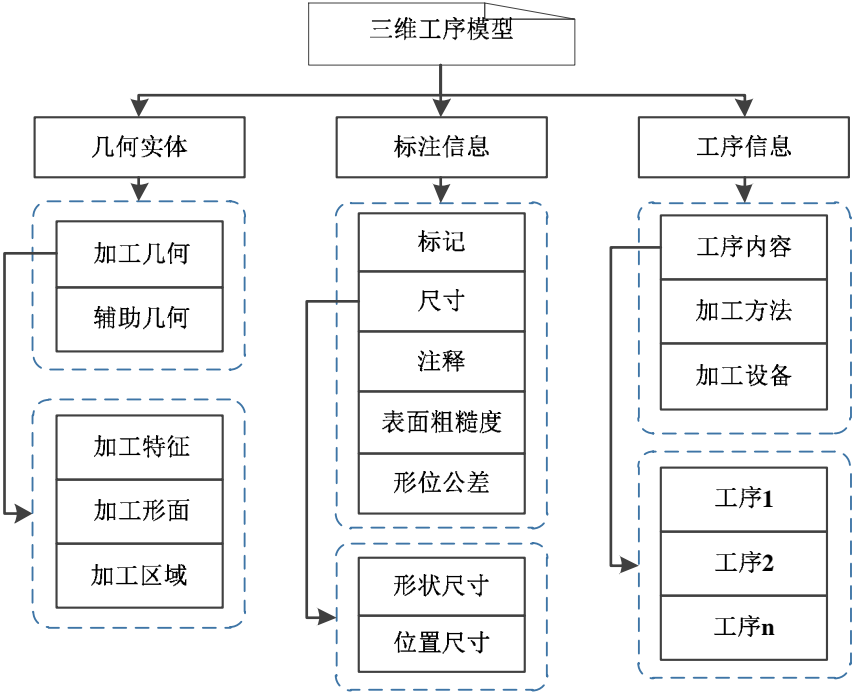


图2.2 三维工序模型定义

在三维工艺环境下，零件工序模型以三维几何模型为载体，工序模型中的标注信息、工序信息等作为辅助信息与三维工序模型息息相关。三维工序模型中的几何模型是在数字化环境中定义零件外形特征和加工特征的三维实体模型。几何模型包括加工几何和辅助几何，加工几何指工序模型中与本道工序加工过程有关的几何部分，包括加工特征、加工型面和加工区域，其中加工特征是几何模型的主体要素；辅助几何指除加工几何外工序模型的其他部分。标注信息

包括标记、尺寸、注释、表面粗糙度和形位公差等。工序信息包括工序内容，加工方法、加工设备等内容。标注信息和工序信息以几何模型为载体，三种共同构成了完整的符合MBD规范的零件三维工序模型。

2.3 雷达零件特点及分类

雷达是一种复杂的机械电子设备。相比于其他机械零件，当代雷达产品具有研制周期短、多品种、小批量、产品更新快且设计制造过程中经常变更的特点。同时，雷达零件的结构复杂，制造精度要求高。雷达典型结构件^[34]如图2.3所示。

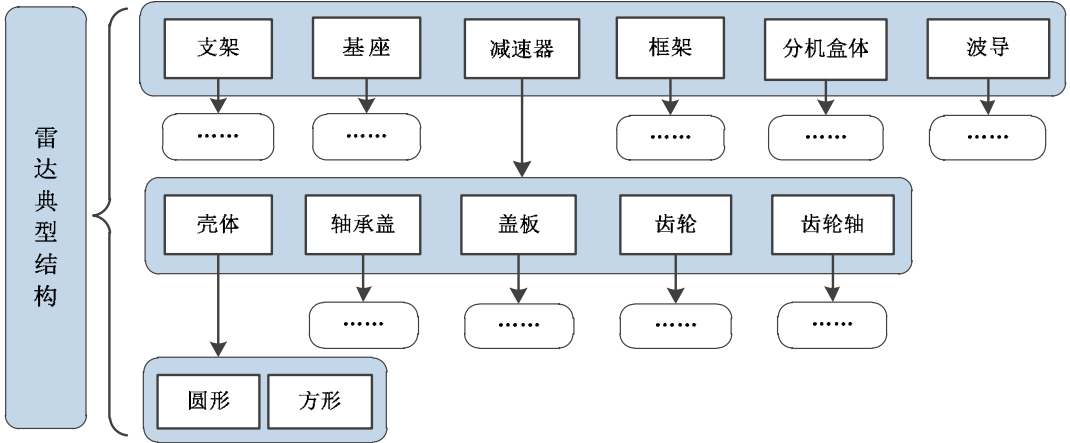


图2.3 雷达典型结构件

在雷达设备的设计制造中，常常会定义一些工艺关键件。这些工艺关键件或者是精度要求高、加工困难的工件；或者是工艺要求高、材料特殊的工件^[35]。雷达系统中常见的典型工艺关键件，如天馈系统中的天线、馈线，天线座和伺服机械传动装置，自动架设和调平机构，电子方舱及大型机箱、机柜，以及一些复杂的微波构件等，都是比较复杂的机械结构。以轻质量、高精度的雷达天线为例，为了满足机动性和低副瓣要求，不仅对天线的表面精度有较高的要求，而且要求天线在多次分块装拆后精度仍保持不变，还要在20m/s风速下保精度工作，对天线质量也有一定的限制^[36]。这些都对设计制造工艺提出更高的要求。几种典型雷达工艺关键件三维模型如图2.4所示。

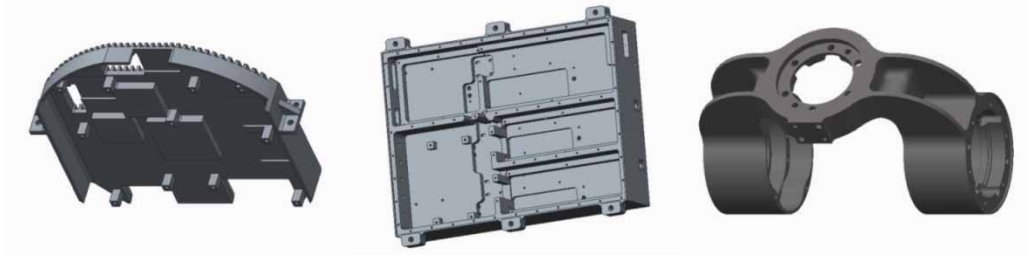


图2.4 几种典型雷达零件三维模型图

传统上,雷达工艺关键件的生产加工具有成本高、周期长的特点,不利于企业的长期发展。为此,需要降低成本、缩短周期,提高关键工艺件的设计生产效率。目前国内工艺研究人员已逐步将三维工序模型技术引入到关键件的制造工艺研究中,它与雷达设计制造的整个过程和相关技术进行集成,以三维模型的形式呈现,能够有效地缩短产品的试制周期,提高产品质量、降低生产成本。

2.4 三维工序模型生成方法

2.4.1 工序模型生成方法

零件工序模型生成可以分为5步:特征提取、特征映射、特征抑制、工序模型生成和工序模型发布。

根据模型的生成顺序不同,三维工序模型生成可以分为正向建模和逆向建模两种方法,如图2.5所示。

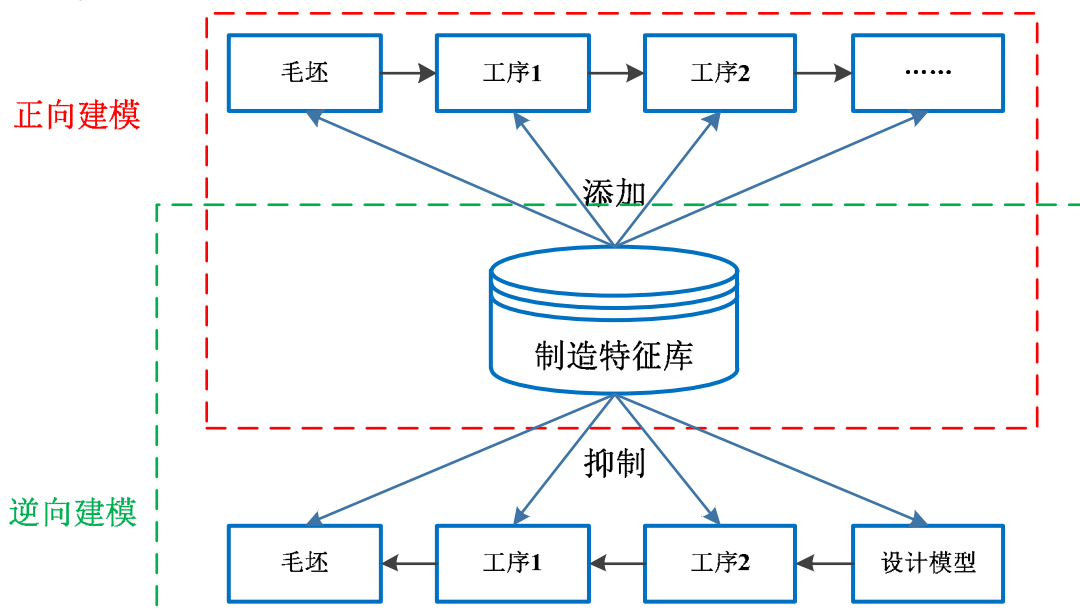


图2.5 两种三维工序模型生成方法

三维工序模型的正向生成过程^[37]是以毛坯为起点逐渐向最终零件演进,从而完成三维工序模型的整个生成流程;在每个工序的三维工序模型生成过程中,首先以前一工序的三维工序模型作为本工序模型的输入状态,根据工序的每个工步关联的产品制造特征及其包含的加工方法、加工余量信息对几何模型进行几何操作,逐步将工序模型加工为紧后工序未加工时的模型状态,最后将得到的三维工序模型作为下一工序的三维工序模型,并进行保存;若当前工序不是工艺规程的最后一个工序,则继续进行,直至工艺过程中包含的所有工序的三维工序模型生成完成。

三维工序模型的逆向生成过程^[38]是一个以最后一个工序为起点逐渐向前一工序演进,从而

完成三维工序模型的整个生成流程；在每个工序的三维工序模型生成过程中，首先以紧后工序的三维工序模型作为本工序模型的输入状态，然后从每个工序的最后一个工步开始，根据工序的每个工步关联的产品制造特征及其包含的加工方法、加工余量信息对几何模型进行几何操作，逐步将工序模型恢复为紧后工序未加工时的模型状态，最后将得到的三维工序模型作为本工序的三维工序模型，并进行保存；若当前工序不是工艺规程的第一个工序，则继续进行迭代，直至工艺过程中包含的所有工序的三维工序模型生成完成。

三维工序模型的正向生成过程与零件建模过程类似，需要预先得到毛坯模型，然后以毛坯模型为基础，通过建模一步步得到相应工序模型。但是此过程需要较多人工参与，难以实现自动化、智能化。相比之下，逆向生成过程可以利用特征识别技术，实现工序模型的自动/半自动生成，生成效率高，满足三维工艺技术自动化、智能化要求。因此本文拟采用逆向建模法。

零件中间工序模型逆向创建的过程中，零件的当前工序的工序模型是由后一道工序的工序模型通过建模操作得到。如图2.6所示，零件包含了 n 道工序，由逆向建模的原理可知工序模型的数量为 $n-1$ 个，每个工序都有一个工序模型与之对应。

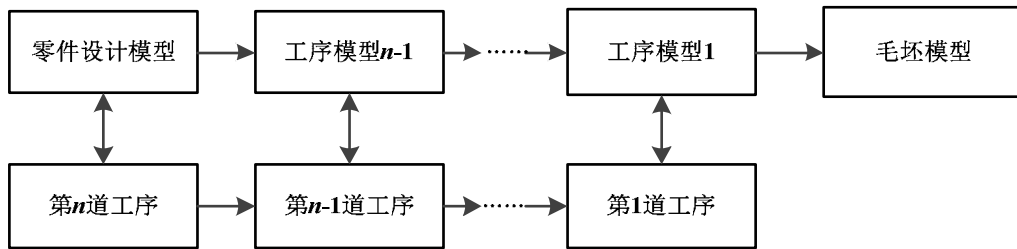


图2.6 工序与工序模型对应关系

从制造角度观察，零件最终模型可看成是通过一组加工活动逐步对毛坯模型进行去除材料操作后形成的^[39]。这里采用 $Part$ 代表成品， $Blank$ 代表原材料毛坯， F_{ij} 代表零件的第 i 道工序切除的第 j 个特征， n 为工序总数， m_i 为第 i 道工序去除的特征数，则零件建模过程可表达为：

$$Part = Blank - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij} \quad (2-1)$$

即

$$Blank = Part + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij} \quad (2-2)$$

从以上两个公式可以看出，正向建模和逆向建模是两个相逆的过程。正向建模时是从毛坯减去材料，而逆向建模时则是从零件模型上增加材料。在已知零件模型的基础上，根据零件的加工工序确定工序模型的生成方法，一般是通过无冗余地自动增加材料（抑制设计特征），以生成所需要的各工序三维工序模型^[40]。

零件工序模型逆向创建是由给定的最终零件设计模型逆向生成，工序模型 M_n 继承零件

的设计模型 $Part$ ，工序模型 M_i 继承毛坯模型 $Blank$ 。

$$M_n = M_1 - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij} \quad (2-3)$$

工序模型 M_k 是从工序模型 M_1 经过 k 个加工工序获得，可表示为

$$M_k = M_1 - \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij} \quad (2-4)$$

由公式(2-3)知

$$M_1 = M_n + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij} \quad (2-5)$$

将式(2-5)代入式(2-4)得到零件的第 k 道工序的工序模型的逆向求解表达式：

$$M_k = M_n + \sum_{i=k+1}^n \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij} \quad (2-6)$$

分析逆向求解的原理和公式(2-6)可知，零件的设计模型是零件成品状态，其通过第 n 道工序实现，成品状态之前的模型是通过第 $n-1$ 道工序实现的。也就是说，第 i 道工序模型加上第 i 道工序模型切除的特征可获得第 $i-1$ 道工序模型。由此，可获得相邻两道工序模型之间关系为：

$$M_{i-1} = M_i + \sum_{j=1}^{m_i} F_{ij} \quad (2-7)$$

以上就是求解某道中间工序模型的逆向生成原理的数学表示。

2.4.2 工序模型快速生成流程

雷达零件三维工序模型快速生成流程如图2.7所示。主要包括信息导入、几何建模、工序模型标注与发布等部分。

(1) 输入零件模型。从设计部门获得零件的设计模型，审查零件模型。包括零件MBD模型和几何模型+电子工艺信息两种形式。

(2) 工序信息导入。提取模型信息，包括零件模型信息及工序信息。全三维零件模型中的信息包括几何形状信息、标注信息、零件属性信息等，工序信息包括工序内容、加工方法、加工设备。

(3) 工序几何建模。从零件模型中识别出需要加工的制造特征及其属性。对于有明显制造意义的模型特征(如倒角、倒圆、孔等)，可以直接通过映射关系识别为制造特征。对于其他特征(如外圆柱、圆锥、键槽、退刀槽、砂轮越程槽、中心孔、阶梯孔、凹槽等)，通过特征识别规则映射为制造特征。对于未识别特征，进行相应操作。系统根据零件的类型及加工工序(工步)自动产生零件各工序的三维工序模型。

(4) 工序模型标注。进行工序模型三维标注,允许用户在工序模型图中指定每道工序的加工基准面、被加工面的粗糙度,并标注工序尺寸。

(5) 工序模型更改。当工艺发生更改时,判断变更范围,相应工序模型响应变更,更新工序模型。

(6) 工序模型发布。生成三维工序模型文件及三维工序模型的可视化发布。

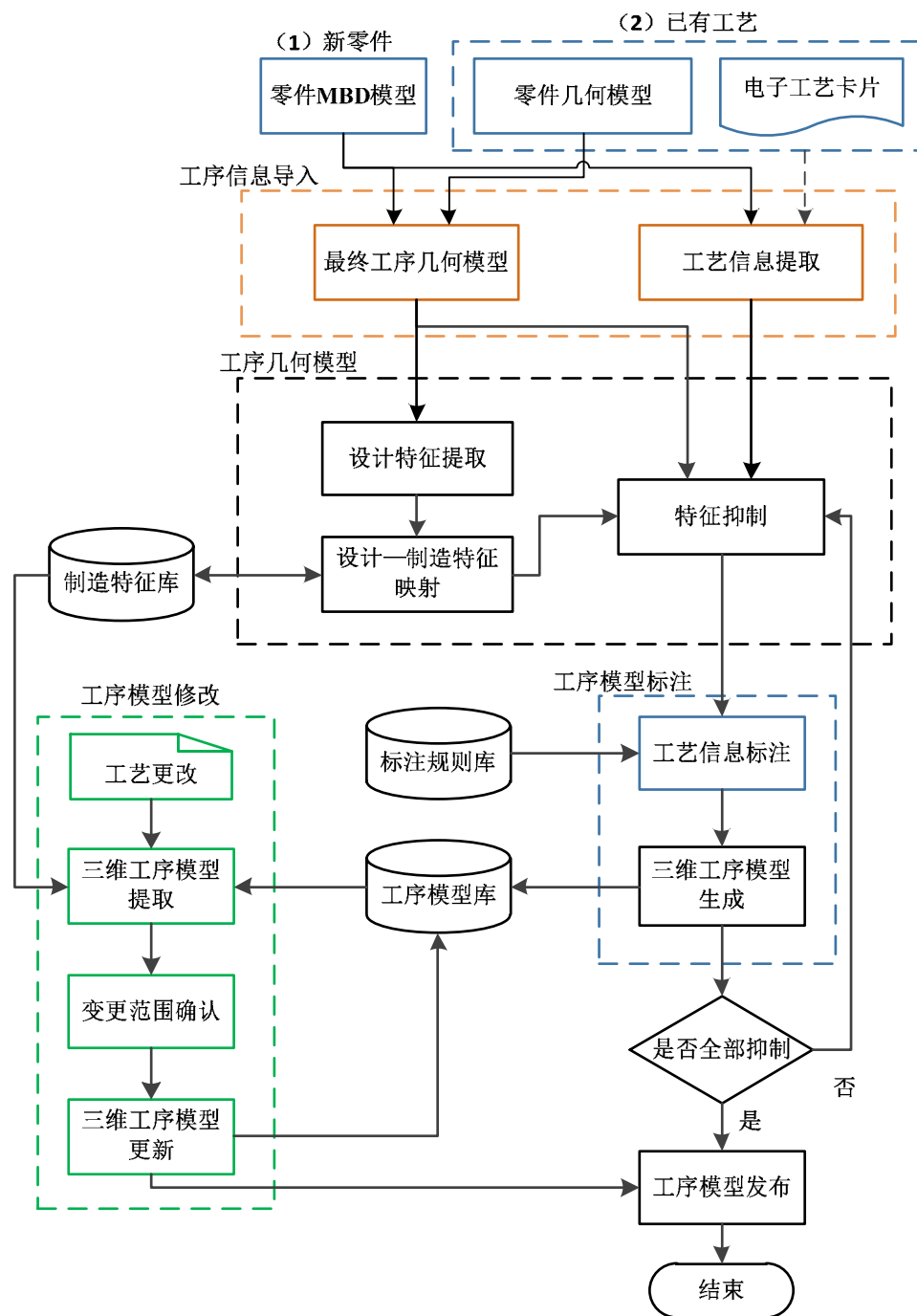


图2.7 雷达零件三维工序模型快速生成流程图

2.5 本章小结

本章首先对三维工序模型进行了定义,并对所要研究的雷达零件的特点进行了分析和总结,对雷达零件进行了分类。在此基础上,研究了工序模型逆向生成方法,并推导出零件工序模型的逆向求解表达式。最后,给出了零件三维工序模型快速生成的总体流程,为下一步工序模型快速生成技术的研究提供了依据、奠定了基础。

第三章 三维工序模型特征识别

3.1 引言

上一章主要介绍了三维工序模型的定义和雷达零件的特点及分类，以及两种三维工序模型生成方法。要实现三维工序模型生成，对零件模型的特征识别与提取是三维工序建模首先要解决的问题。本章将主要详述三维工序模型特征识别技术，分为特征定义与分类、特征提取、特征映射等内容。

3.2 特征提取

3.2.1 特征的定义与分类

特征是具有一定拓扑关系的一组几何特征图素生成的几何实体，并且对应于零件上的一个或多个功能特征信息，通过某种特定的加工方式加工成型。特征应该是一部件的物理组元，具有一定拓扑关系的一组几何元素构成的形状实体，它对应零件上的一个或多个功能，能够被固定的加工方式加工成形^[41]。

根据设计领域和制造领域的不同，特征可以分为设计特征和制造特征。设计特征是指从继承模型的模型树中所提取的特征，模型树中所提取的设计特征分为两类。一类是有明显制造意义的模型特征，由孔、壳、倒角、倒圆、筋命令实现；另一类是通过拉伸、旋转、扫掠等命令生成的仅有几何形状的特征，这些特征按照几何形状复杂程度的不同，可能为平面、圆柱面等简单特征，也可能形成包含不规则曲面或多个几何面的复杂特征。

制造特征能够表示生产工序约束关系，同时具有明确的加工参数^[42]。制造特征也可以分为两大类，如图3.1所示：第一类与设计特征相同，是有明显制造意义的模型特征，由孔、壳、倒角、倒圆、筋命令实现；另一类根据几何形状的复杂程度，可分为简单特征和组合特征。简单特征可以通过单一的几何面进行描述，常见的几何面，如平面，椭圆面等都可以表达简单特征。组合特征往往不能由一个几何面表达，通常需要多个几何面的组合。组合特征由简单特征组合而成，简单特征可看作复杂特征的特例，复杂特征比简单特征更具有代表性^[43]。通过对制造特征的定义与分类，可以为下一步对特征的分类处理打下基础。

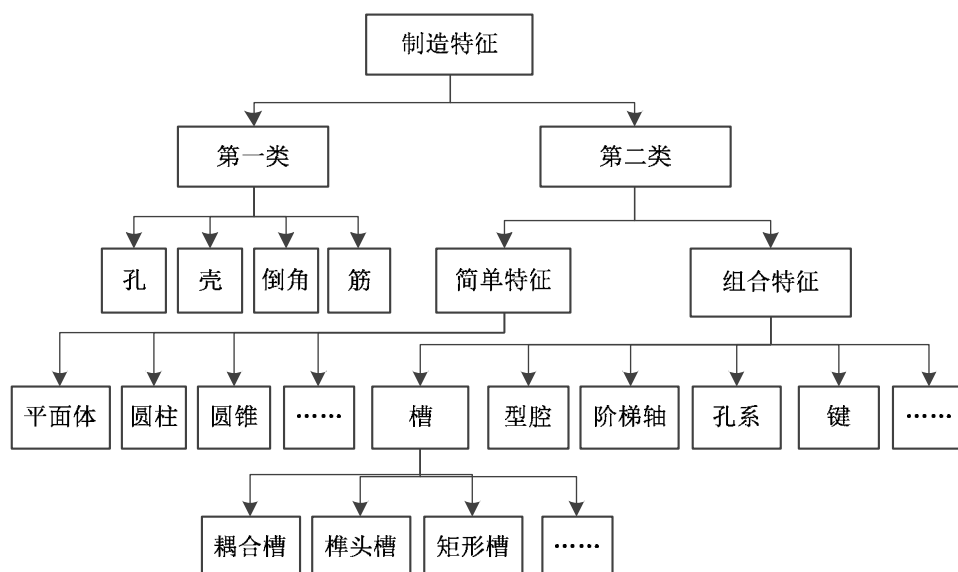


图3.1 制造特征分类

3.2.2 模型信息提取内容

根据第二章中三维工序模型的定义，可以确定模型信息提取的内容。如图3.2所示，主要包括模型信息、基准信息及其所含特征的几何信息、标注信息和属性信息，及设计特征的拓扑关系。

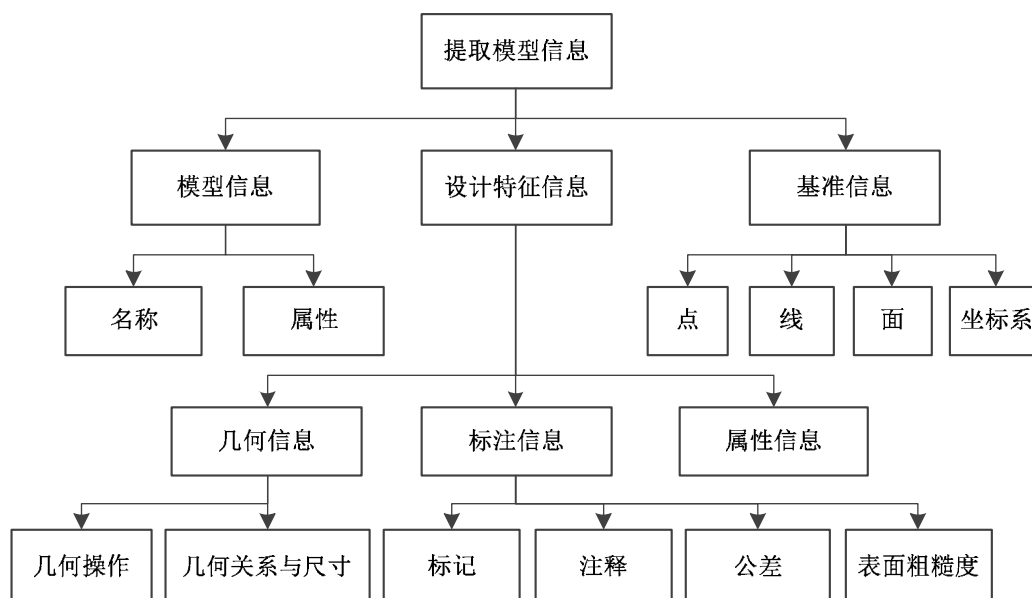


图3.2 提取模型信息

3.2.3 模型几何特征提取

3.2.3.1 从 CAD 文件中提取形状特征

对模型几何特征的提取是模型信息提取的基本内容，也是模型特征识别技术首先要解决的问题。从CAD零件模型中提取模型几何特征的方法可以分为两种：内部提取法和外部提取法。内部提取法是指通过CAD软件的API（Application Programming Interface，应用程序编程接口），利用相关程序获得零件模型拓扑结构和几何信息；外部提取法是指先将零件CAD模型导出为中性数据格式（如STEP，IGES，ACIS等）文件，然后利用外部程序将其转换为可以进行特征识别和提取的零件。

本文综合运用两种方法进行零件模型几何特征的提取。通过对CAD软件的二次开发实现对模型设计特征的提取，如孔、倒角、拉伸、旋转等；同时采用外部提取法，将CAD模型文件导出为STEP(Standard for The Exchange of Product model data，产品模型数据交换标准)格式，利用外部程序，按照B-Rep（Boundary-Representation，边界表示法）结构模式从CAD文件依次读取模型的实体、面、环、边、顶点信息，然后进行特征识别和匹配。提取时，以外部方法为主，内部提取法为辅，内部提取法主要用于一些简单特征。零件模型几何特征提取流程如图3.3所示。

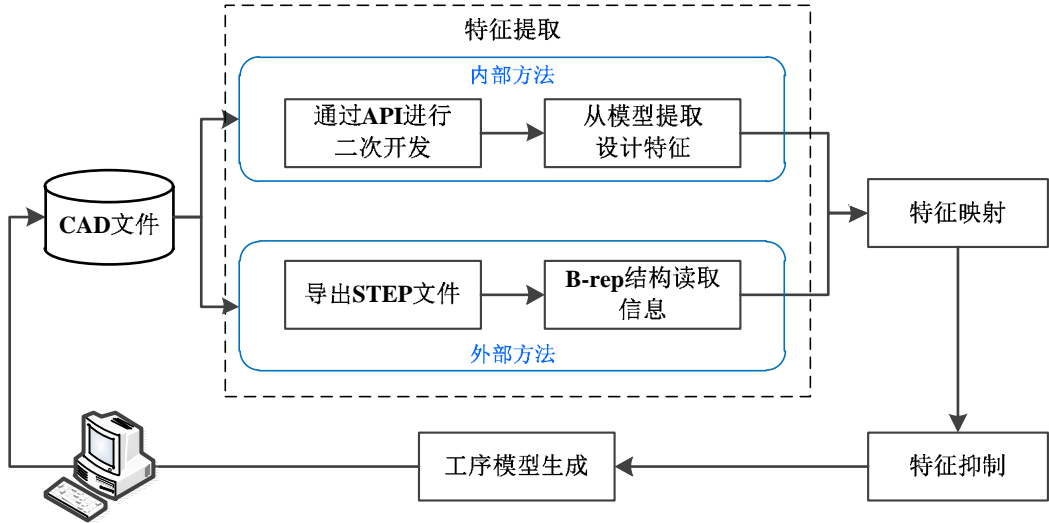


图 3.3 特征提取过程

STEP格式由ISO 10303系列标准规定。它对不同的应用领域定义了特定的应用协议，包括适用范围描述、用于交换或保存的信息、测试方法以及实现该应用的用户指南等。对于制造特征工艺规划方面，ISO 10303-224标准（AP224）定义了零件加工所需的所有信息，包括材料、几何形状、尺寸和公差等。同时，AP224的产品定义不仅包含了几何形状和制造特征的定义，还包含了产品毛坯的信息，这对于零件工序模型生成具有重要意义。由于STEP集合了其它中性数据格式几乎所有优点，各大商业CAD软件（如Pro/E、CATIA、UG、I-DEAS等）均开发了STEP

接口。

B-rep是一种模型表示方法，CAD实体模型表示方法主要有两种：B-rep和CSG（Constructive Solid Geometry，构造实体几何法）。B-rep通过顶点，边，环，面等边界准确的描述对象的几何形状。本文B-rep数据结构如图3.4所示。

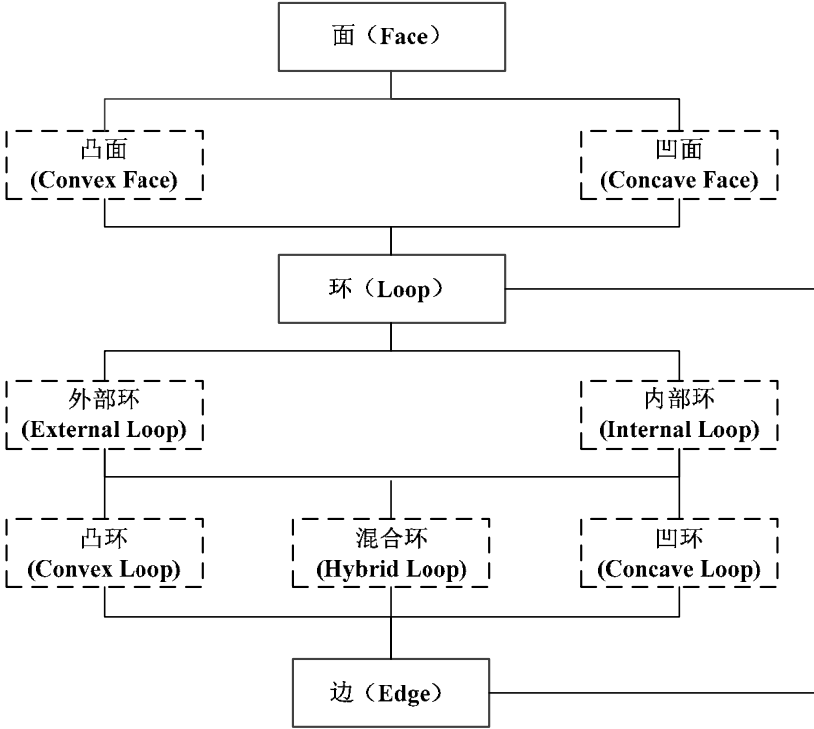


图 3.4 B-rep 数据结构

按照 B-rep 结构对特征进行提取和分类的步骤如下：

- (1) 从 STEP 文件中提取模型的几何形状和拓扑结构：
确定对象的顶点，边，面，环。
- (2) 提取每个基本面的拓扑结构并确定其类型：
确定每个面的环的总数。
根据环的总数确定基本面。
将环分类（凹、凸、混合）
- (3) 根据环验证基本面上的特征是否存在：
如果没有特征则结束，如果有则继续下一步。
- (4) 确定特征类型：
通过查找混合环确定外部形状特征。
通过查找凸环确定内部凸出形状特征。
通过查找凹环确定内部凹陷特征。

(5) 确定特征详细信息并提前相关特征几何参数：

确定特征详细信息，包括表面数量、表面类型等。

确定每个特征的参数，包括长度(L)，宽度(W)，高度(H)，半径(R)等。

根据零件坐标系确定特征的相对位置。

3.2.3.2 识别边的凹凸性的算法

边方向和面方向是从CAD文件提取外形特征的最基本的实体信息。对象模型的边方向可以定义为：当从边绕走一圈时，面一直在左手边。当边在面的外面成环时，边方向相对于面是逆时针方向；当边位于面的内部时，边方向是顺时针的^[44]。可以用右手螺旋定则决定方向。如图3.5所示。

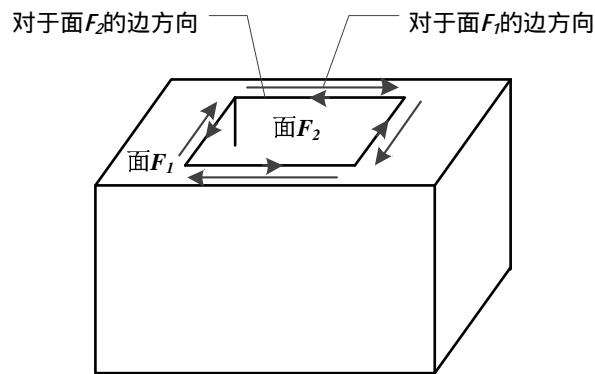


图3.5 模型边方向的判断

边的凹凸性是由有公共边的两个面的法向量的向量积确定的，这是通过对面和边的方向采用矢量几何表示来实现的。图3.6表示了使用的符号，第 i 个面用 F_i 表示，相应的法向量定义为 N_i ，第 k 条边定位为 E_k ，对于每个零件的边 E_k ，它是由两个面 F_i 和 F_j 共有的。

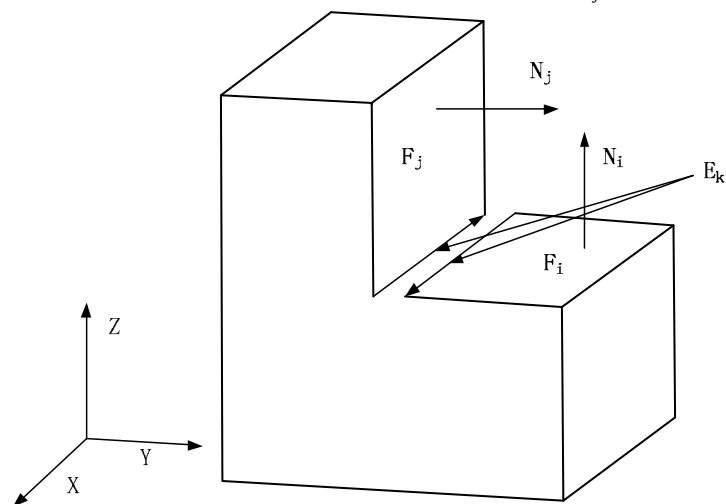


图3.6 各符号意义示意图

零件的任意一条边都是被两个面共用的。以下是凹凸性的判别方法：

- (1) 向量积定义为： $V = N_i \times N_j$ ，即面的法向量的差乘；
- (2) 定义面 F_i 的第 k 条边 E_k 的方向， F_i 的法向量 N_i 必须是第一步中的第一个分量。
- (3) 如果第 2 步定义的边 E_k 的方向与向量积 V 的方向相同，那么边 E_k 是凸边， F_i 和 F_j 是凸面，否则，边 E_k 是凹边， F_i 和 F_j 是凹面，此外，如果向量积为 0，说明边是相切关系

通过这个过程可以定义凸面、凹面或者相切面。此外，凹凸性特征可以假设识别：即凹面包含至少一条凹边和邻近的凹面组成凹面集，每个凹面集定义一个凹面特征，类似的，邻近的凸面组成凸面集。

以下算法用于找到实体中的凹凸性，该算法使用边类找到实体。

- (1) 边的凹凸性未知；
- (2) 如果面1和面2都为平面
 计算面1与面2的方向量的向量积，并将结果记为 *crossDir*；
 如果 *crossDir* == 0，即向量积 == 0；可以得出边的凹凸性为相切；
 如果 *crossDir* 不等于 0，则计算环的方向向量，边的方向向量记为 *egdeDir*：如果 *crossDir* 与 *egdeDir* 的方向相同，可以得出，边的方向为凸性；如果 *crossDir* 与 *egdeDir* 的方向不同，可以得出，边的方向为凹性；
- (3) 如果面1为圆柱面，同时面2为平面；
 找到一个方向 *Dir1*，正交于包含这个边的平面；
 如果 *Dir1* 与面1的法线是正交的，可以得出边的凹凸性为相切；

图3.7为决定边的凹凸性的流程图。算法开始设置边的凹凸性为未知，然后检查面1和面2的表面属性，如果两个面都为平面，定义一个新的变量叫做 *crossDir*，表示两个面的法向量的向量积。如果向量积为零，两个面的公共边的凹凸性为相切。否则，计算公共边相对于面1的方向，记为变量 *egdeDir*，如果 *crossDir* 和 *egdeDir* 相同，则认为边的凹凸性为凸性，否则，边的凹凸性为凹性。如果面1的表面为圆柱表面，面2的表面为平面，定义变量 *Dir1*，正交于平面，同时正交于圆柱面的轴线，如果 *Dir1* 正交于面的法向量，则边的凹凸性为相切，否则，算法结束。

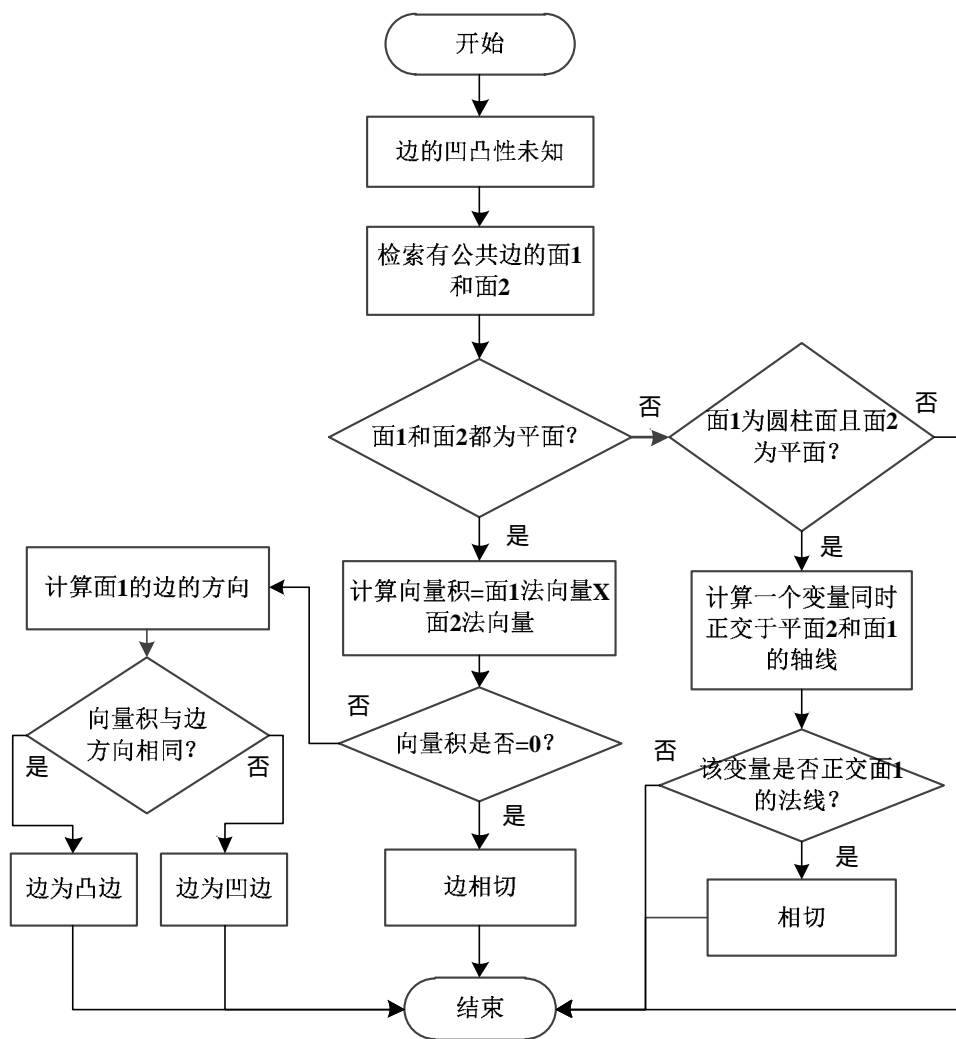


图3.7 判断边的凹凸性流程图

3.2.3.3 识别环的凹凸性的算法

在识别边的凹凸性的基础上进一步进行环的凹凸性的判断，算法如下：

- (1) 设置环的凹凸性=未知；
- (2) 设置变量 *concave_count* 为凹边的数量，且 *concave_count* = 0，
- (3) 设置变量 *convex_count* 为凸边的数量，且 *convex_count* = 0，
- (4) 对于环里面的每一条边：如果边的凹凸性为凹性，变量 *concave_count* 值加1；如果边的凹凸性为凸性，变量 *convex_count* 值加1；
- (5) 如果 *concave_count* = *edge_count*，即凹边的数量=边的数量，则设置环的属性为凹性；
- (6) 如果 *concave_count* > 0，但是不等于边的数量，则设置环的属性为混合；
- (7) 如果变量 *convex_count* = *edge_count*，即凸边的数量=边的数量，则设置环的属性为凸性；

性为凸；

(8) 结束

图3.8为判断环的属性的流程图。算法首先设置环的属性为未知，定义两个变量 *concave_count* 和 *convex_count* 分别表示凹边的数量和凸边的数量，且初值设为0，此外还有一个变量 *edge_count* 表示环内包含的边的数量，如果边的属性为凹，则变量 *concave_count* 加1，同样，如果边的属性为凸，则变量 *convex_count* 值加1。然后，比较 *concave_count* 与 *edge_count* 的值，如果相等，说明环为凹性，类似的，如果 *convex_count* = *edge_count*，则环为凸性，否则，环为混合性。

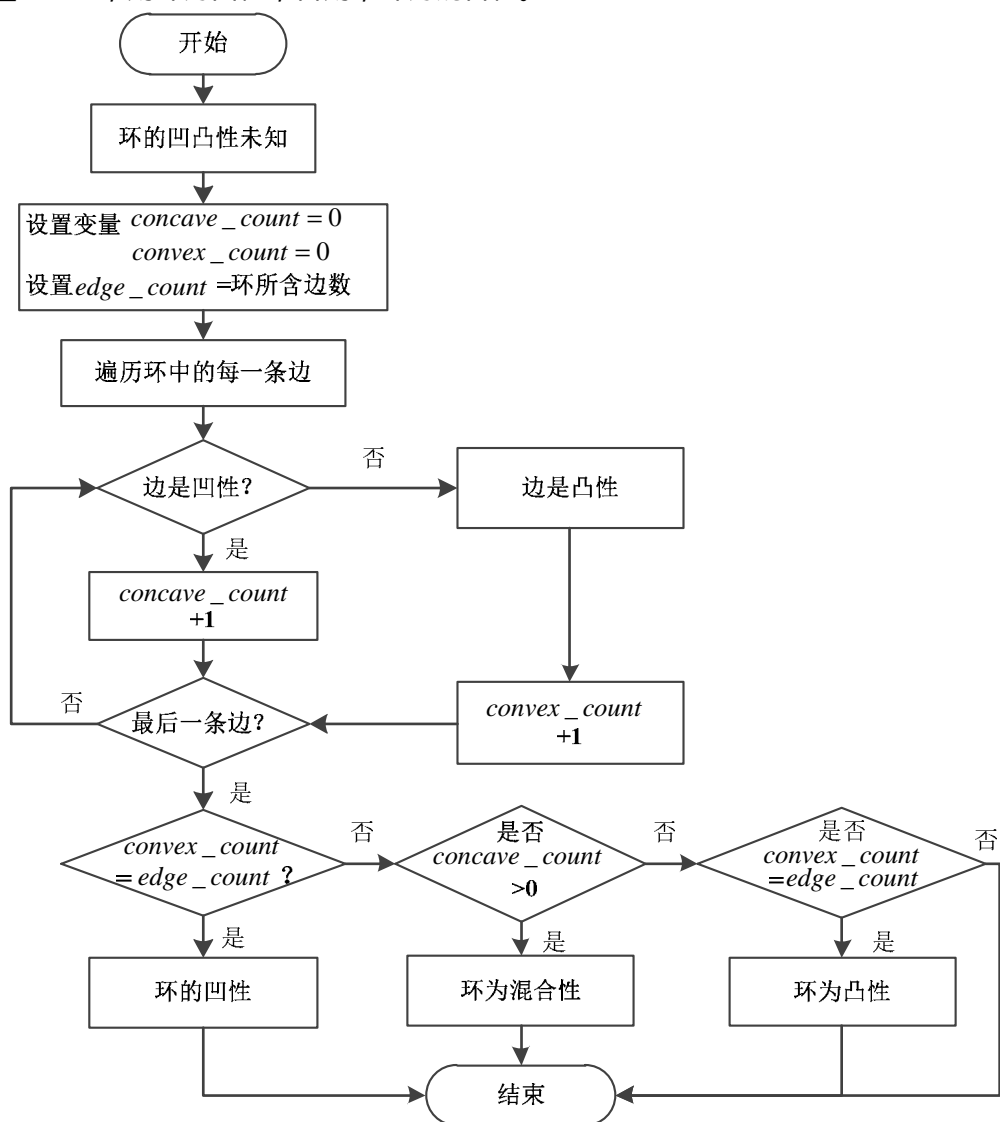


图3.8 判断环的属性的流程图

3.2.4 模型工艺信息提取

3.2.4.1 模型工艺信息提取方法

提取了模型的几何特征后,还要进行模型工艺信息的提取。根据工艺信息存在形式的不同,零件工艺信息的提取主要有三种方式,如图3.9所示。对零件MBD模型的工艺信息,通过二次开发辅助工具从模型数据中提取;对电子工艺信息,根据PDM/CAPP系统存储方式开发相应程序提取;对于难以提取的工艺信息,进行人工交互输入。

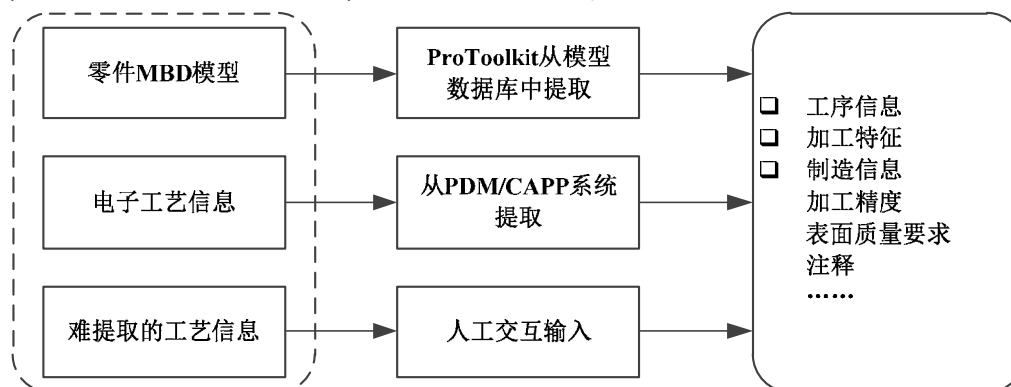


图3.9 三种零件工艺信息提取方式

由于目前雷达零件设计制造过程中MBD技术尚未普及,大多数零件的工艺信息保存在PDM (Product Data Management, 产品数据管理) 系统中或由CAPP系统产生,因此,从PDM/CAPP系统中提取零件工艺信息是目前工艺信息提取的主要途径,也是本课题需要研究解决的问题之一。

为了实现零件工艺信息在PDM/CAPP系统与CAD软件中工序模型生成系统之间的信息交互,应采用一种通用的标准对数据进行规范化处理。

XML (eXtensible Markup Language, 可扩展性标记语言) 可以用来标记数据,定义数据类型。作为一种通用标准,XML在数据交换方面得到了广泛应用^[45]。利用XML标记和定义不同来源的数据,形成较为统一的模型,可以方便的使用面向对象的语言对数据进行处理。本文利用XML定义零件工艺信息模型,实现PDM/CAPP系统与工序模型生成系统之间的数据交换。交换过程如图3.10所示。利用XML技术实现三维工序信息的转换和表达具有以下优点:

- (1) XML规范可以完整的表达数据结构属性,表达数据结构选用的具体语言跟系统开发平台并没有直接关联;
- (2) XML规范对数据的内容和具体的实现进行了分离,简化了数据交换和表示^[46];
- (3) XML综合了SGML (标准通用标记语言) 和HTML (超文本标记语言) 语言的优势并进行了简化,受到众多软件提供商的支持,易于进行数据交流和开发。

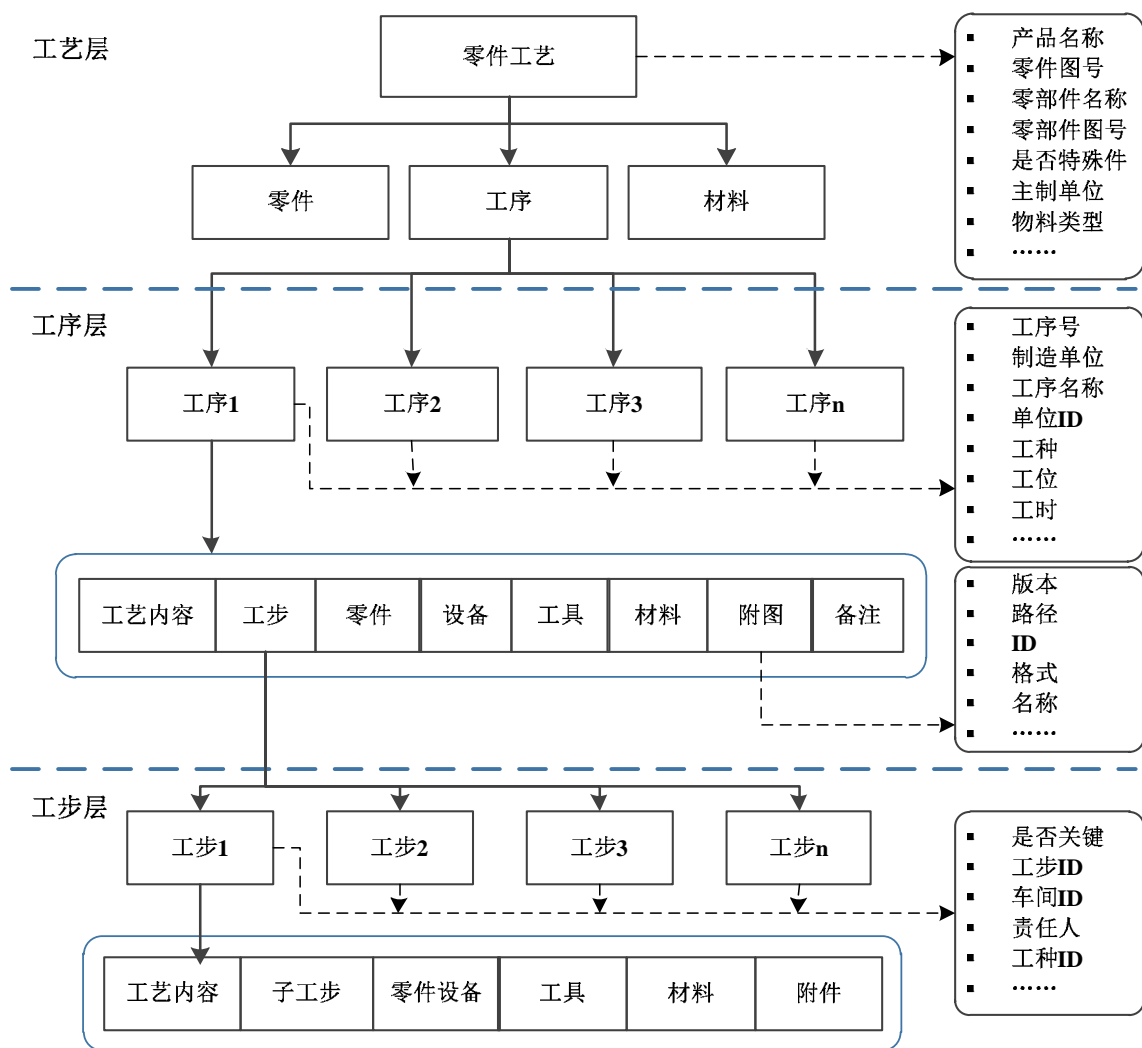


图 3.11 雷达零件工艺信息模型

该模型由工艺层、工序层和工步层三层组成，分别定义了雷达零件制造过程中工艺信息、工序信息、工步信息及相应的属性信息。采用此工艺信息模型的 XML 工艺信息文档实例片段如下：

```
<?xml version="1.0" encoding="GBK"?>
<-technics>
  -<QMFAwTechnicsInfo technicsCategory="normal" isConnectNumber="" unite =
    "Completed" parentPartOid="3725288" modifier="" materialType="自制（可不带料外协）
    " eu_version="" e_version="A.1" partVersion="A.3" partOid="3717980"
    parentPartName="cam_follower_214_0417" systemID="" specialPart="非特殊件"
    isPartKey="false" isKey="false" partType="Part" version="1.3" wrlFile=""
    pbomLifecycle="拟制" lifecycle="拟制" lifeCycleState="" partSize="" partCount=""
    stateSize="" maoWeight="" maxBackupCount="" backupRate="" backupReason=""
```

productName="20130908" productNumber="20130908" workShop="艺" technicsType="零件工艺"

-<steps>

-<QMProcedureInfo isKey="false" workShop="料"

bsoID="2014041806034219960712047589" typicalNumber=""

transferOid="1f3e65" resonserGroup="机械组"

resonser="wt.org.WTUser:756613" nextBsoID="" preBsoID=""

workSpaceID="NOKEY" workShopID="20" workTypeID="0000001383"

workSpace="" procedureType="" cortonaID="" creoView="" stepHour=""

workType="设计师" stepName="抛光" stepNumber="10" isWorktype="">

<procedureContent><html> <head> </head> <body> <img src=

'@#\$\$%^content\1397801350645.png'> </body>

</html></procedureContent>

-<paces>

-<QMProcedureInfo isKey="" workShop=""

bsoID="2014041806034219960715180827" transferOid="4f0d9b"

resonserGroup="" resonser="" nextBsoID="" preBsoID=""

workSpaceID="" workShopID="NOKEY" workTypeID=""

workSpace="" procedureType="" cortonaID="" creoView=""

stepHour="" workType="" stepName="" stepNumber="-1"

isWorktype="">

<procedureContent><html> <head> </head> <body> <p

style='margin-top: 0'> <img src='@#\$\$%^content\

1397801117073.png'> </p> </body> </html>

</procedureContent>

<paces/>

<parts/>

<equips/>

<tools/>

<materials/>

<images/>

3.3 特征映射

CAD模型与工艺系统之间的数据传递过程可分为两类，简单的非几何信息的传递和几何信息的传递。其中非几何信息可以通过程序经工艺信息提取后读取，而几何信息传递的前提是设计特征需要转化为制造特征，之后才能进行下一步操作。由此可见，设计特征到制造特征的转化是特征映射实现的关键。设计特征和制造特征存在许多的区别，其之间的关系并不是简单的一一对应关系，而是存在多种类型的映射关系，例如一对多的映射关系、多对一的映射关系、多对多的映射关系等多种可能性，故需用相应的特征映射技术进行相应的处理。

3.3.1 特征映射方法及步骤

特征映射是指将模型特征从设计域的设计特征映射到制造域的制造特征的过程^[47]。通过特征映射，将原本不利用工艺理解的设计特征转换为面向工艺及制造人员的制造特征，有利于实现和工序信息的匹配，对于工序模型的生成具有重要意义。本文采取的特征映射过程如图3.12所示。

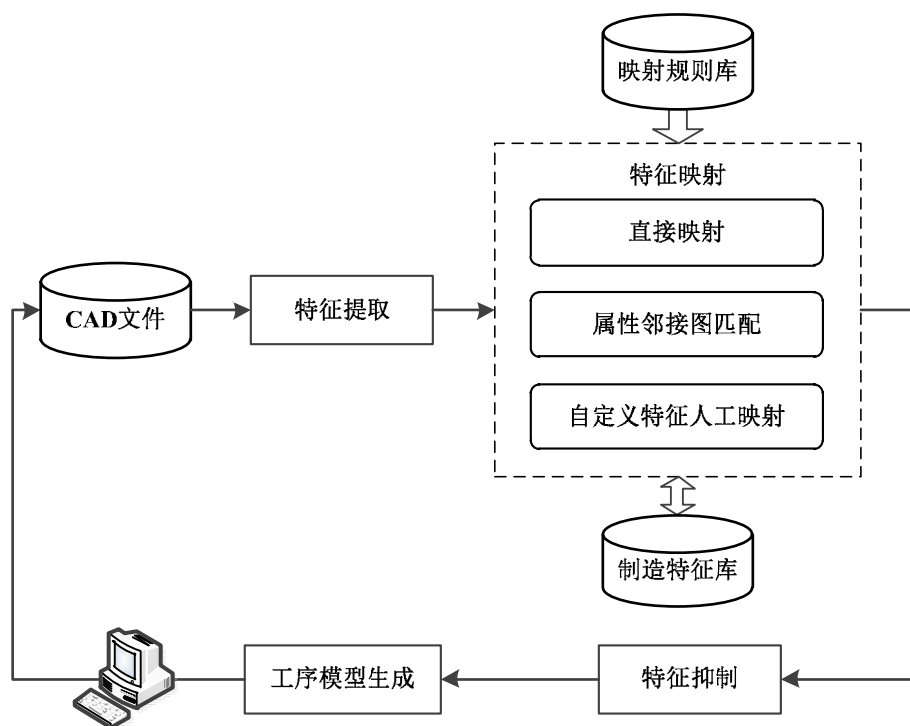


图3.12 特征映射过程

主要包括如下内容：

(1) 对提取到的设计特征采取分类处理的方法。由内部提取法从CAD模型内提取的简单设计特征采用直接映射的方法映射到相应的制造特征；对从STEP文件中按B-rep结构提取的设计信息，采用属性邻接图匹配的方法实现到制造特征的映射；对未能识别的复杂设计特征，

采用人工交互手段，添加入制造特征库，手动建立映射。

(2) 建立制造特征库。实现对特征的几何形状、特征材料和特征加工精度等属性信息的管理。对任意的特征，可以根据特征的尺寸、精度、材料等约束关系与制造特征库中的特征进行匹配。

(3) 建立映射规则库。不管是直接映射还是采用属性邻接图法进行映射，都需要按照相应的规则进行，这些规则保存在映射规则库中，需要时，按照映射规则将设计特征转换为制造特征。

3.3.2 特征映射分类处理

不管是零件设计模型还是工序模型，其几何部分均为三维CAD模型。在上一节进行中，进行了设计特征和制造特征的分类，并且在几何特征提取时，本文采用内部提取和外部提取相结合的方法，其目的便是为本节对特征映射的分类处理做准备。通过对特征进行分类处理，可以有效的提高设计特征到制造特征的匹配成功率，提高特征映射效率，从而实现零件工序模型快速生成。

根据上一节特征的分类，特征映射分为三类进行处理。

(1) 直接映射：将要映射的设计特征根据特征规则库规则，一对一或一对多的直接映射为制造特征。

(2) 属性邻接图匹配：将零件CAD模型中的几何信息，即面、边信息，与预先定义的制造特征库中的制造特征信息进行匹配，匹配成功则认定面或面的组合为相应制造特征。

(3) 人工映射：将无法识别或匹配的特征进行人工自定义特征，添加入制造特征库，人工建立映射关系，然后进行直接映射

三种分类映射方法处理的对象如表 3.1 所示。

表 3.1 特征映射分类处理表

映射方法	设计特征来源	处理对象	典型实例
直接映射	内部提取法	第一类特征	孔、壳、倒角等
		第二类特征中的简单特征	镜像特征、阵列特征、由拉伸得到的孔等
		自定义特征	由用户自定义的特征如典型雷达零件特征
属性邻接图匹配	外部提取法	部分第二类特征	大部分简单组合特征非通台阶、圆角槽等
人工映射	内部提取法	其他特征	复杂相交特征等未识别特征

由表中可以看到，第二类特征可以分为两部分，一部分用直接映射法进行映射，一部分用属性邻接图法进行映射。这是因为，为了提高映射效率及成功率，尽量采取直接映射的方法，因此将第二类特征中既可以由内部提取法得到也可以由外部提取法得到的特征统一用内部提取法通过二次开发程序直接从 CAD 模型中获得，用直接映射法进行映射。

3.3.3 制造特征库及映射规则库

3.3.3.1 制造特征库

进行特征映射的前提是建立相应的制造特征库，制造特征库中记录的制造特征，不仅包含了特征的几何信息，同时包含其属性参数信息，并与相应的制造工艺信息相关联，以利于下一步特征抑制的利用。

本文在Creo软件UDF功能的基础上建立制造特征库。UDF（User Define Feature，用户自定义特征）是Creo/ProE中用户自定义特征的功能。由于本文在Creo平台上进行二次开发，因此以UDF为例，其他CAD软件也有相似功能，开发过程类似。UDF的工作机制是根据用户的需求，将多个系统特征融合为一个特征，该特征根据用户的需求不同其组合形式多种多样，但其总是以整体的形式出现，系统中采用gph文件保存用户自定义特征^{[[48]]}。UDF具有灵活多变的特点，有助于用户根据产品特征快速生成几何模型。根据雷达零件的制造特征信息，预先对典型制造特征建模，如图3.13所示，输入制造特征信息，利用Creo的UDF工具对制造特征进行建模，并存入制造特征库。

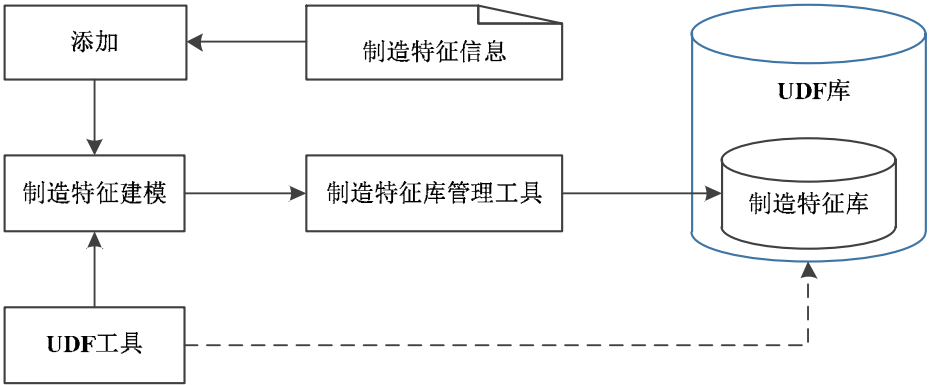


图3.13 制造特征添加流程

如图3.14所示，开发制造特征浏览、修改和删除操作界面，实现对特征库操作。

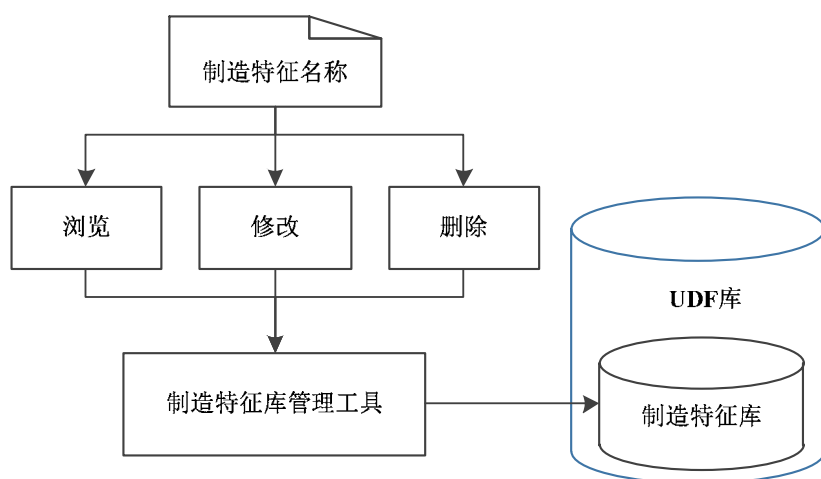


图3.14 制造特征管理

3.3.3.2 映射规则库

进行特征映射时，首先对内部提取法提取的设计特征进行映射。内部提取法提取的特征分类处理：在建模时利用孔、倒角、镜像、阵列等命令实现的设计特征可以直接映射到相应制造特征；利用拉伸命令实现的设计特征根据其是“伸出项”还是“切割项”不同处理不同，“切割项”一般可根据其尺寸参数与特征库中对比，映射到相应的孔或腔槽，“伸出项”由于草图的多样性一般较难进行直接映射，需要用外部提取法属性邻接图进行映射匹配。

下面以拉伸得到的孔和腔槽为例，说明利用直接映射的匹配规则。

对于图3.15中所示特征：

- (1) 特征类型为：拉伸，特征信息为：切割；
- (2) 具有深度尺寸；
- (3) 草图截面为两个尺寸的矩形，则判断为矩形腔槽或矩形孔，添加入特征列表；
- (4) 草图截面尺寸类型为半径R，则判断为原型腔槽或圆孔，添加入特征列表；
- (5) 结束。

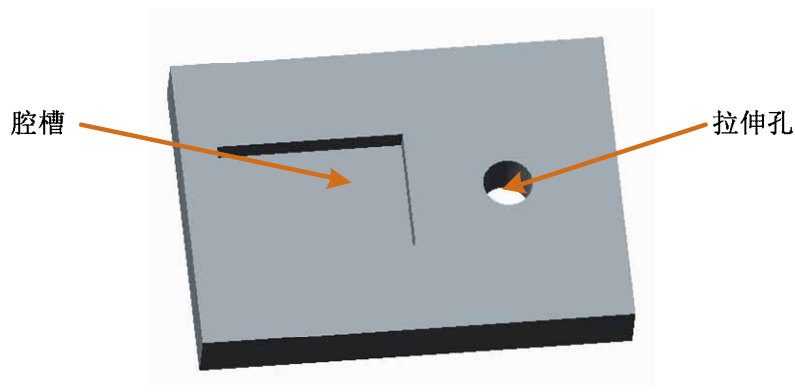


图 3.15 采用拉伸得到的腔槽与孔特征

内部提取法提取的设计特征映射完成后对外部提取法提取的设计特征用属性邻接图方法进行匹配。利用属性邻接图匹配的映射规则有分层级的规则库组成。越往底层，规则越细致，例如在底层规则需要判断面是平面还是曲面，判断两直线之间的关系：平行还是相交。底层的规则可以完成最基本的判定，为上层判定提供基础。上层判定通常是将底层细小规则进行组合，形成一定的识别规则，如盲孔特征识别、台阶特征识别等。

下面以非通台阶和有圆角的槽为例，说明利用属性邻接图匹配的映射规则。

对于图3.16的非通台阶特征：

- (1) 3个边为凹性边；
- (2) 三个边有共同的顶点；
- (3) 三条边中任意两条边都能有都能被同一平面共享，这些面交公共面 $face1, face2, face3$ ；
- (4) 如果所有的公共面彼此都是正交关系；
- (5) 如果每个面里面环内凹边的数量=2，那么可以断定这个特征为非通台阶。否则，创建一个新的台阶对象，并且添加特征列表；
- (6) 结束。

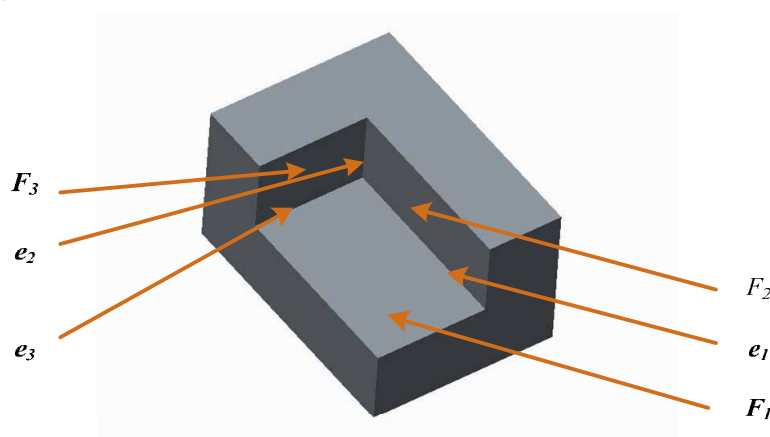


图3.16 非通台阶特征识别

对于图3.17所示带有圆角的盲槽：

- (1) 包含8个面；
- (2) 面3，面4，面6，面7都是圆柱面的1/4；
- (3) 所有的面和边彼此相连；
- (4) 面2和面8都垂直于面5，且面2与面8平行；
- (5) 面1正交与所有其他面，并且面1的凹边数量为3；
- (6) 面3面4彼此相连，且面2面5与他们通过相切边相连；
- (7) 面6面7彼此相连，且面5面8与他们通过相切边相连；
- (8) 面2面5面8凹性边的数量都为1，面3面4面6面7的凹性边的数量为0；

- (9) 找到盲槽，创建带圆角的盲区特征对象，添加到特征列表；
- (10) 结束。

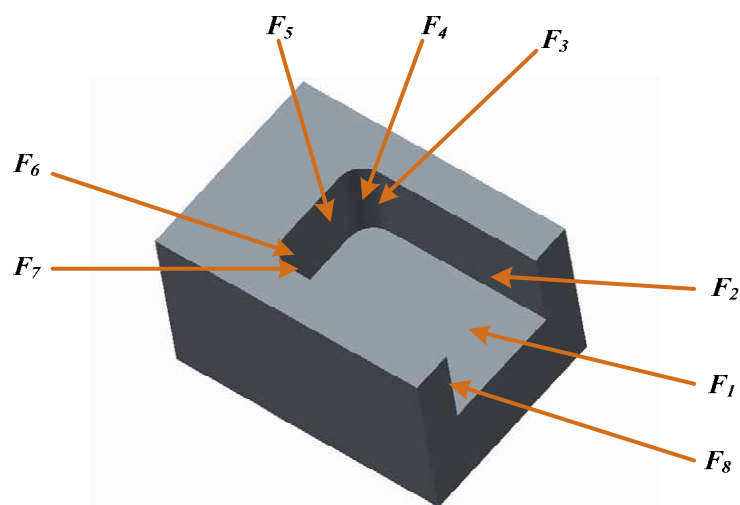


图3.17 带圆角的盲槽特征识别

3.4 本章小结

本章主要详述三维工序模型特征识别技术，主要包括特征识别与提取、特征映射处理两部分。对特征进行了定义与分类，确定了三维工序模型信息提取的内容。对雷达零件模型几何特征的提取和制造工艺信息的提取技术进行了研究。给出了特征映射方法和步骤，通过特征分类及制造特征库实现对不同特征的映射处理。

第四章 三维工序模型快速生成

4.1 引言

上一章主要介绍了三维工序模型的特征识别技术，要快速生成工序模型，还需要在特征识别的基础上进行工序模型快速生成技术的研究，本章主要详述几何模型快速生成技术、特征的变更响应、工序模型标注及工序模型的发布。

4.2 特征抑制

主要研究面向零件三维工序几何模型的特征抑制。首先根据本道工序的工序信息及识别出的制造特征确定本道工序要加工的制造特征，然后根据不同的特征采取不同的方法进行相应的特征抑制。特征抑制手段主要有参数化建模和柔性建模两种方式。参数化建模是利用CAD软件参数化建模功能，通过二次开发，对特征的形状、大小等尺寸参数进行相应的修改，得到工序模型的方法；柔性建模是以几何为基础的一种新的建模方法，本文对此功能进行二次开发用以特征抑制过程，以提高特征抑制的效率。

4.2.1 特征抑制方法及步骤

特征抑制是指零件从最终模型向毛坯模型转换过程中将特征还原为未加工状态的过程。通过特征抑制，将本道工序所有要加工的制造特征还原为未加工状态，即可得到本道工序的工序模型。本文采取的特征抑制过程如图 4.1 所示。

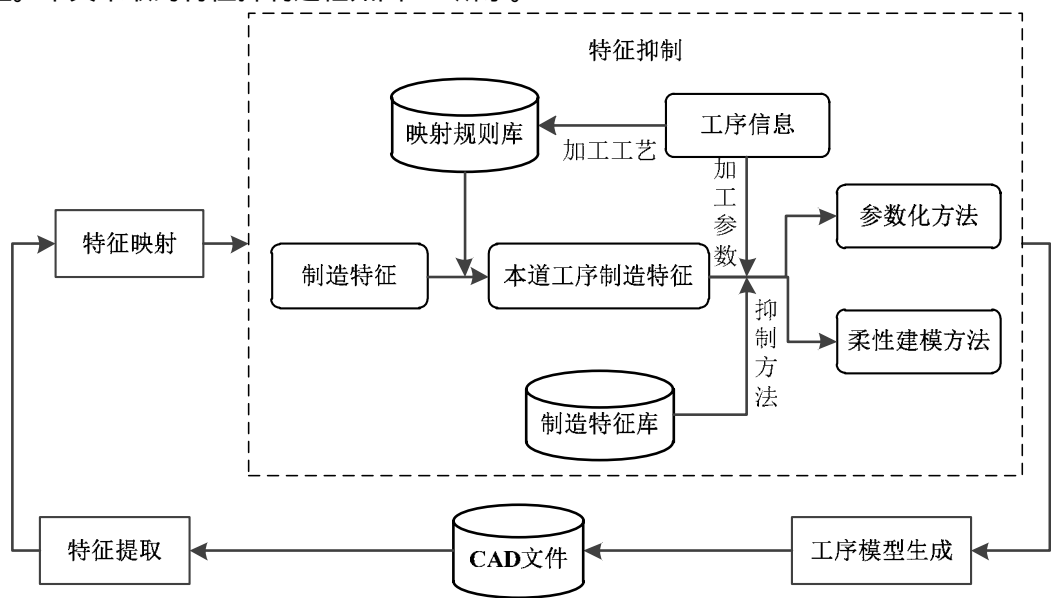


图 4.1 特征抑制过程

特征抑制过程主要包括如下几步：

- (1) 通过映射规则库将工序信息中的加工工艺映射为相应的制造特征；
- (2) 将特征映射得到的制造特征与上一步中的制造特征进行对比，筛选出本道工序要加工的制造特征；
- (3) 从制造特征库中得到要加工制造特征的抑制方法；
- (4) 从工序信息中得到要加工制造特征的加工参数；
- (5) 按照特征不同选择参数化建模或柔性建模方法进行特征抑制；
- (6) 将本道工序要加工的所有特征按照上述方法进行抑制。

4.2.2 参数化建模技术

参数化建模方法是三维工序模型几何模型快速生成时用到的主要方法。它通过建立特征参数化工艺流程，使工艺知识通过表达模型以结构化方式传递给工艺设计人员，这些工艺知识或者直接应用于工艺设计，或者稍微修改后再加以应用。系统采用参数化建模实现特征工艺知识的表达、定义、解释和输出。

特征参数化建模的工艺流程如下图4.2所示。

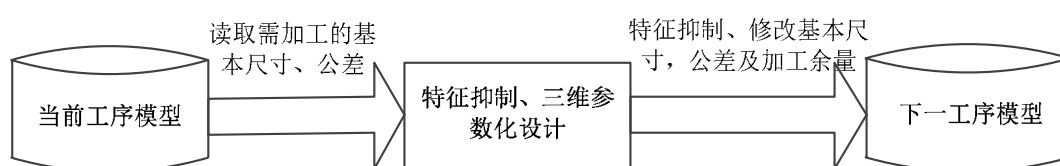


图4.2 特征参数化流程

根据前面获得的工艺路线，在设计模型的基础上，以加工特征为核心、以余量尺寸为驱动，逆向增加已排序的制造特征。如图4.3所示，三维工序模型的逆向生成过程是一个以最后一个工序为起点逐渐向前一工序演进，从而完成三维工序模型的整个生成流程；在每个工序的三维工序模型生成过程中，首先以紧后工序的三维工序模型作为本工序模型的输入状态，然后从每个工序的最后一个工步开始，根据工序的每个工步关联的产品制造特征及其包含的加工方法、加工余量信息对几何模型进行几何操作，逐步将工序模型恢复为紧后工序未加工时的模型状态，最后将得到的三维工序模型作为本工序的三维工序模型，并进行保存；若当前工序不是工艺规程的第一个工序，则继续进行迭代，直至工艺过程中包含的所有工序的三维工序模型生成完成。

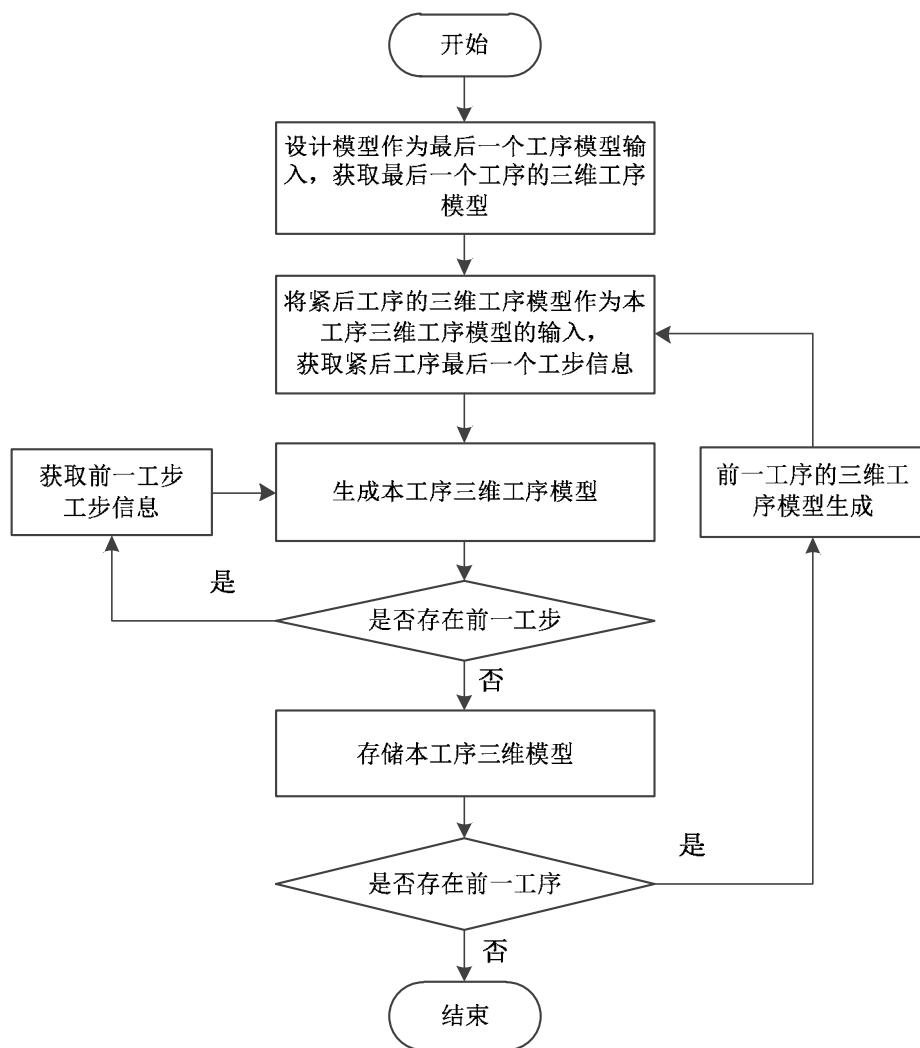


图4.3 三维工序模型生成流程

4.2.3 柔性建模技术

在雷达零件几何模型生成过程中,对于某些复杂特征,特别是复杂组合特征以及未识别的特征,仅利用参数化建模技术进行模型生成时会遇到困难,需要较多的人工参与,建模效率低。本文采用柔性建模技术作为参数化建模的补充,通过二次开发提高特征抑制效率,实现几何模型快速生成。

柔性建模是Creo Parametric的新功能。其中Creo Parametric软件继承了原Pro/ENGINEER的强大的三维参数化建模功能,同时添加了包括柔性建模在内的一些新功能。本文基于Creo Paramereic平台研究雷达零件三维工序模型快速生成技术,因此以Creo的柔性建模技术为例开展几何模型快速生成技术的研究。对于其它三维CAD软件,同样有与柔性建模相似的模块,因此,可以采用类似的方法实现相关功能。

柔性建模与参数化建模不同,它是以几何为基础的一组编辑工具,不支持创建新几何。所

有操作都完全以几何为基础，不会利用现有的、以特征为基础的模型信息。与参数化建模方式相比，使用柔性建模方式可以显著的提高某些特征建模效率。如图4.4所示。对于此相交槽特征，使用参数化建模方式需要分别处理两槽，而使用柔性建模方式，选择“切口和附加切口”可通过Creo自身识别算法识别两槽，同时处理，如图4.5所示。总体来说，使用柔性建模技术辅助生成工序几何模型具有以下优点：

（1）操作简便。在Creo中使用柔性建模流程通常为：先选择模型曲面，然后使用智能选择工具定义所选曲面集，最后应用变换工具、阵列化工具或对称工具来修改所选几何。而在集成到三维工序模型生成系统后，可以实现一键调用柔性建模功能，省去前两步选择过程，直接对几何特征进行柔性建模操作。

（2）智能识别。柔性建模工具中，每个形状选择工具(例如“凸台”(Boss)、“带有附属形状的凸台”(Boss with Secondary)、“切口”(Cut)以及“圆形”(Round))都有其自身的曲面收集算法。可以快速收集所需曲面，并确保这些选择规则内嵌在特征中。这可以大大提高某些复杂组合特征及未识别特征建模效率。

（3）集成度高。柔性建模工具集成于Creo Parametric中，可以与参数化建模同时使用，互不冲突。因此，本文的雷达零件三维工序快速生成系统可以灵活调用两种建模方式，组合使用。



图4.4 相交槽特征示意图

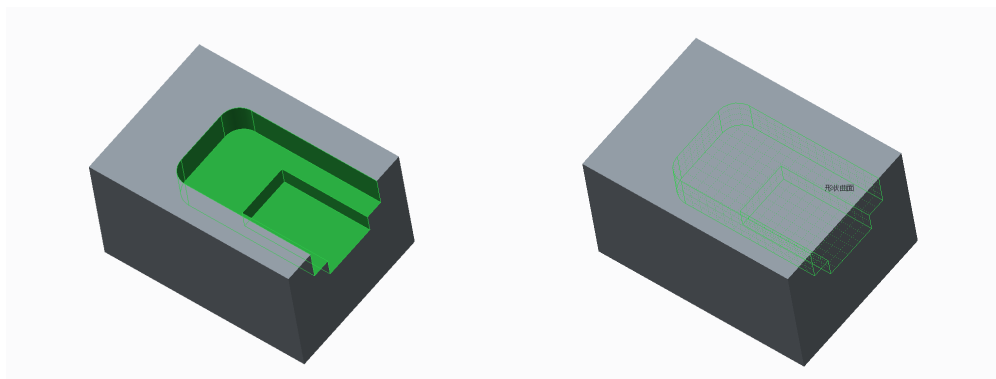


图4.5 柔性建模特征处理示意图

使用柔性建模技术可以提高零件三维工序模型生成效率,但是作为在Creo Parametric中推出的新功能,PTC公司并没有提供用于柔性建模的开发接口。因此对于柔性建模功能的开发利用主要通过宏录制的方式进行。

宏录制是一种简便且常用的开发方法。所谓宏录制就是记录用户的操作过程,并将其转换为程序代码。在Creo Parametric中,可以通过“文件->选项->环境->映射键设置”进行宏录制操作,录制完成后将相应的结果加入到对Creo Parametric的二次开发程序中,实现对柔性建模功能的调用。图4.4的宏录制结果代码如下:

```
mapkey $F2 @MAPKEY_LABELfuzaqiekouyichu;\
mapkey(continued) ~ Command `ProCmdShapeSelGalleryList` 1 `Cut with Secondary`;\
mapkey(continued) ~ Command `ProCmdFtRemoveSrf` ;~ Activate `main_dlg_cur`\
`dashInst0.Done`;\
mapkey(continued) ~ Command `ProCmdSelFilterSet` 320002;
```

4.3 工序模型生成

4.3.1 工序模型生成

根据零件工序信息,对零件特征进行抑制后,即可生成零件三维工序模型。当前工序模型生成后,再以当前模型为输入条件,进行下一工序模型的生成。零件三维工序模型生成过程如图 4.6 所示。开始时 $i=n$, 即零件设计模型;当 $i=0$ 时,为毛坯模型,生成过程结束。

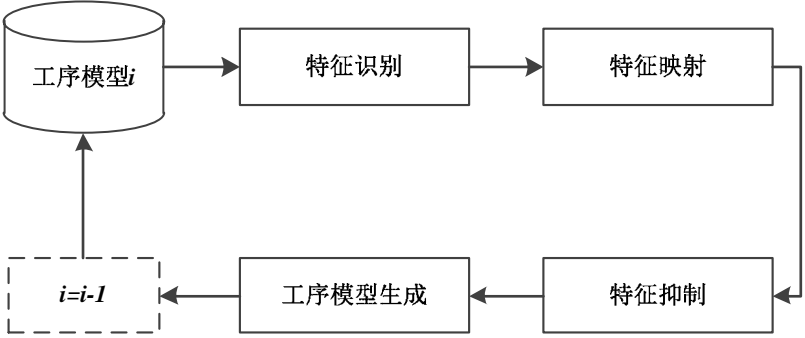


图 4.6 工序模型生成过程

由于要保证工序模型与零件设计模型,以及工序模型与工序模型间的关联关系,因此,下一工序模型(工序模型 $i-1$)与上一工序模型(工序模型 i)为继承关系。零件模型与工序模型之间及制造特征之间关系如图 4.7 所示。其中,DF 代表设计特征,MF 代表制造特征。可以看到,两道工序模型之间通过特征映射、特征抑制实现关联。当零件模型发生变化时,即 DF 变化,则相应的制造特征 MF 发生变化,经过特征抑制过程后,下一工序模型产生相应变化。

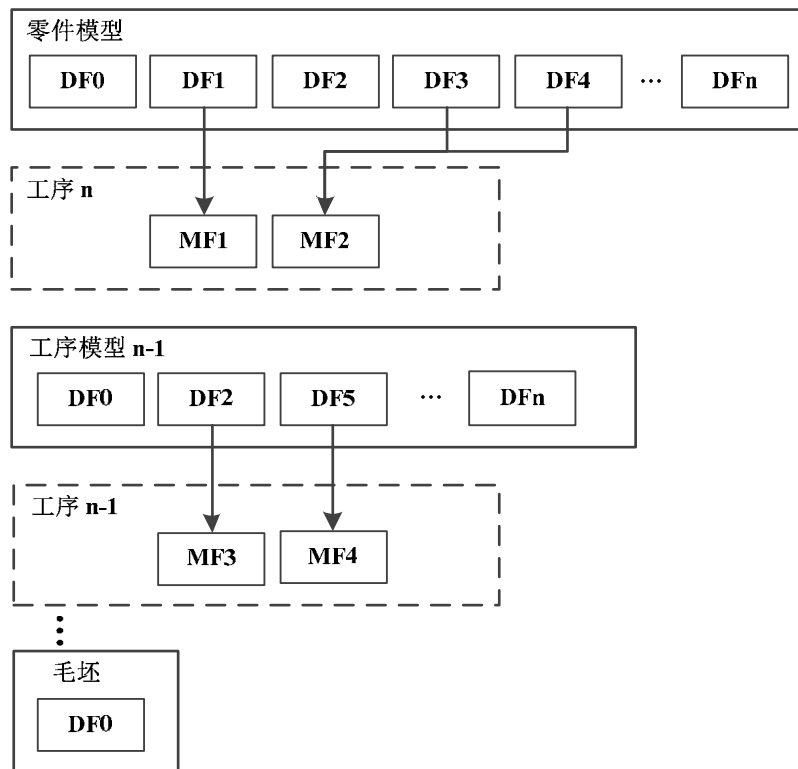


图 4.7 零件模型与工序模型及制造特征关系

工序模型生成后，可以选择是否进行工序模型标注，进行标注则进入工序模型标注模块。否则进行工序模型的保存。生成的工序模型根据企业的信息化管理水平不同而采取不同的保存方式。通常是保存到工序模型库，划分到所属零件集合下，并与相应的工序信息文件相关联。由企业 PDM 系统统一管理。

4.3.2 工序模型更改

由于雷达零件多品种、小批量及设计经常变更的特点，需要考虑三维工序模型更改的问题。响应特征变更首先要进行特征类型和特征变更范围的确定。三维工序模型更改的原因有上游设计更改和下游制造瓶颈两方面。如图 4.8 所示。当上游设计更改时，需将产品设计变更引起的特征变化映射到制造特征，修改相应的工序模型，重新生成三维工序文件；当遇上工艺现场的资源冲突、设备能力局限或故障等因素，也有可能导致三维零件工序模型调整。

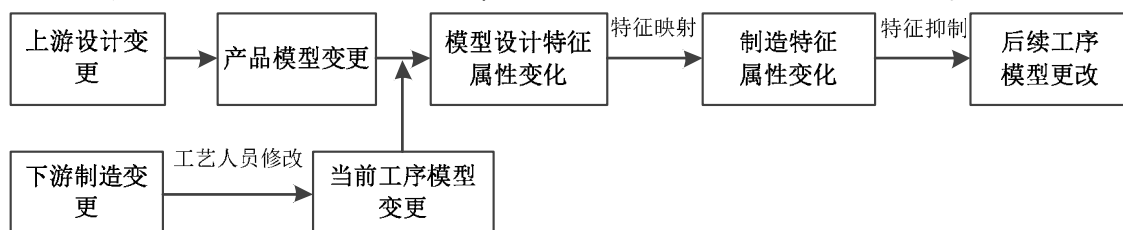


图 4.8 两种特征变更类型

由于三维工序模型在三维零件设计模型基础上派生，各工序模型之间是继承关系，下一工序模型完全继承上一工序模型的信息和数据，零件各工序模型与零件模型相关，因此当产品模型或某一工序模型发生更改时，可按照更改单要求及时更新工序模型参数，反映产品更改，以实现零件模型的更新能自动传递到各加工工序模型。

应当注意到，不同的特征变更程度会导致不同的特征变更范围。如果是简单参数变化或附属特征变化，可以通过特征的变更响应实现工序模型自动更新。但如果是主特征类型发生变化且带有较多附属特征，则不能通过特征变更响应实现，应重新进行三维工序模型的生成。

4.4 工序模型发布

4.4.1 三维工序模型标注

三维工序模型标注是三维工序模型生成的重要内容。主要通过对软件进行二次开发，以定制化方式，在三维工序模型上实现加工特征的快速选取和标注。定义制造特征的标注规范，实现标注界面与制造信息的继承与关联，最终在工序模型上按要求进行显示。

4.4.1.1 三维工序模型标注简介

三维工序模型标注，是在三维工序模型上，表示产品制造信息（Product Manufacture Information, PMI），将产品生命周期内的所有信息（包括设计、工艺、制造和检测等）以三维模型方式传递给工艺、制造等需求部门，用来指导生产。PMI主要包含以下信息：几何信息、尺寸信息、公差信息、基准、注释、剖面、焊接符号等，还包含材料信息、加工精度和工艺信息等。

三维标注涉及的标准繁多，涵盖的内容十分广泛，其中最核心的是 2009 年颁布的 GB/T 24734《技术产品文件 数字化产品定义数据通则》^[49]。该国标采用了 ISO 16792:2006《Technical product documentation-Digital product definition data practices》，应用了诸如 GB/T 17851《形状和位置公差基准和基准体系》、GB/T 4249:2009《产品几何技术规范（GPS）公差原则》等众多标准。该标准分为 11 个部分，从数字化产品定义的术语、数据集要求、设计模型要求、尺寸、注释、基准、几何公差到模型几何细节层级等方面对设计模型的三维标注方法进行了详细的规定。该标准是现行国家标准中唯一对数字化产品设计制造三维标注进行规定的国家标准^[50]。本文以此标准为依据，研究以二次开发的方式在 CAD 系统中实现三维自动标注技术。

4.4.1.2 三维工序模型标注方法

三维标注信息遵循《机械产品文件数字化产品定义数据通则》GB/T24734-2009，标注内容有设计信息标注和工艺信息标注，标注示例如图4.9所示。

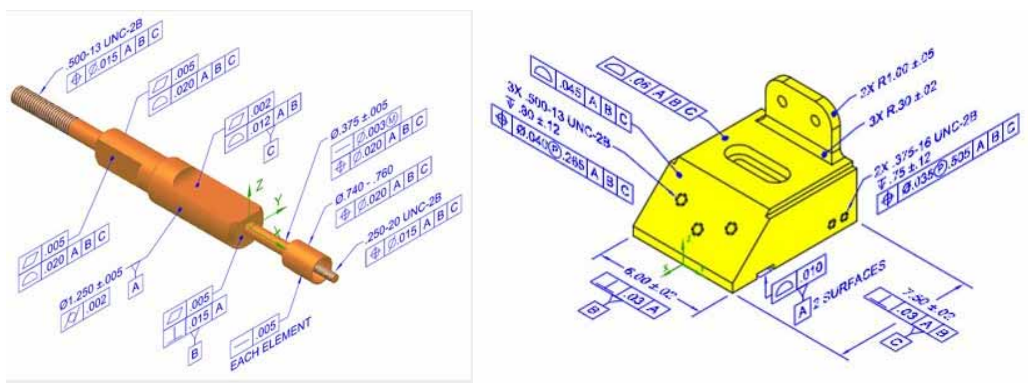


图4.9 三维标注示例

利用CAD软件提供的二次开发接口，通过开发构建符合国家标准的诸如表面粗糙度、焊接符号，几何公差、基准标签等标注模块，对工序模型中的典型符号进行模板化定制。在确定活动标注方向后，工序模型设计过程中的标注信息的表达可以直接调用开发的标注模块。标注过程如图4.10所示。

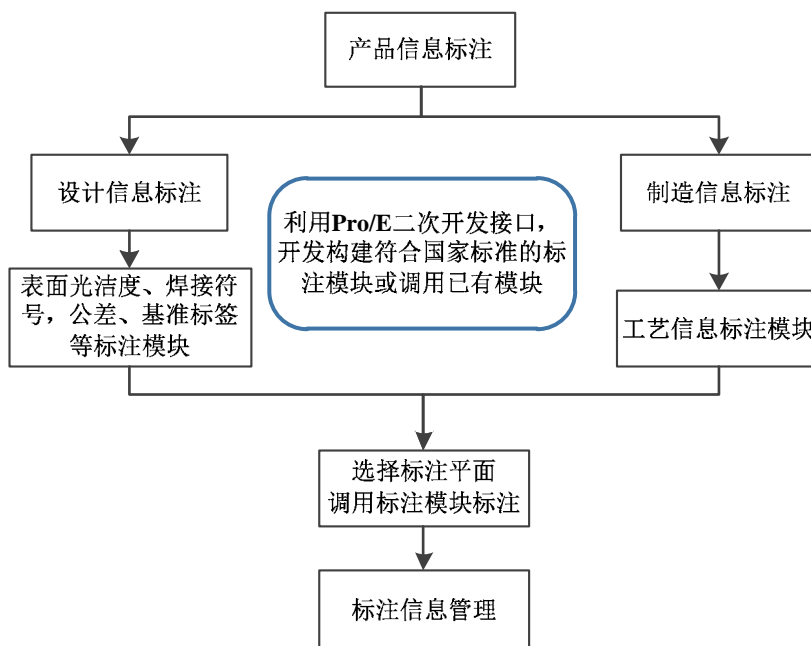


图4.10 三维标注过程

4.4.2 三维工序模型发布

4.4.2.1 三维工序模型发布内容及意义

三维工序模型发布包括两个方面：三维工序模型文件生成和三维工序模型的可视化发布。

三维工序模型文件是在传统二维工艺文件的基础上将二维的文字描述改为集表格、文字、图片和动画于一体的轻量化格式的文件来描述，通过程序开发将工序模型的属性信息提取出来，

生成各种工序文件，再用轻量化工具生成轻量化三维附图，然后集成到工序文件中。

4.4.2.2 三维工序模型发布方法

由于三维工序文件既包括文字信息又含有非文字信息，因此实现过程主要包括两步： 工艺信息自动采集生成的工序文件，此文档作为与其他非文字信息进行集成的数据母本； 三维附图、三维轻量化仿真动画的集成。

工序文件数据模型的目的在于描述工序文件的信息，为其提供一个规范的表达形式。读入CAD中三维工序模型后，提取相关信息，在原来的STEP模型中加入基于特征的CAD/CAPP/CAM集成所需的其它信息，如形状特征、尺寸、材料特性、工艺信息等，生成相应的工序文件。

对于标注好的集成三维工序模型，需经过各种途径进行发布，以供工艺人员、车间制造人员等不同用户浏览和审阅。本文主要运用Creo软件功能进行二次开发输出不同格式，对于其他CAD软件，也有相似功能。如图主要有三种发布方法：利用Creo导出轻量化三维模型（*.PVS文件），可通过ProductView Express查阅器进行浏览；利用Creo投影功能输出二维简图（*.JPG文件）；利用Creo Illustrate技术输出三维插图（*.C3DI文件）。如图4.11所示。

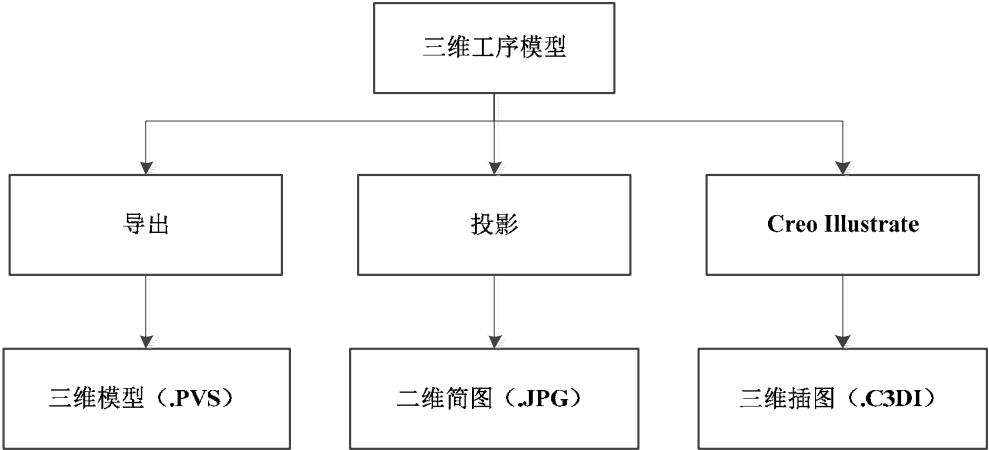


图4.11 三维工序模型发布

4.5 本章小结

本章主要研究了三维工序模型生成过程中涉及到的关键技术： 特征抑制技术，包括特征抑制方法及步骤，参数化建模技术和柔性建模技术； 工序模型生成技术，包括工序模型的生成及工序模型特征变更响应； 三维工序模型发布技术，包括三维标注标准，三维工序模型标注方法和应用，三维工序模型发布的内容和方法。

第五章 原型系统开发

5.1 引言

在攻读硕士学位期间，本人参与了某国防基础科研项目，负责其中三维工序模型生成部分的关键技术研究和系统开发工作。前面几章已经详述了雷达三维工序模型快速生成的体系结构及制造特征识别技术和几何模型快速生成技术，本章将主要详述原型系统的开发环境及功能模块，并利用典型雷达零件实例详述各功能模块的实现。

5.2 系统开发环境

5.2.1 系统开发环境

本文在PTC Creo2.0平台上进行二次开发，将雷达零件三维工序模型快速生成系统嵌入到Creo Parametric中，基于Creo平台具有很多优点：充分利用Creo的参数化建模技术及柔性建模技术，建立便于信息共享的几何特征模型与工序特征模型；充分利用Creo功能强大的API，能够实现底层数据操作，利于开发丰富的用户功能模块；充分利用Creo三维设计平台，实现设计模型的集成和数据交换与传送。

开发环境：Microsoft Visual Studio 2010集成开发环境；

开发工具：Pro/Toolkit二次开发工具、C++编程语言、Microsoft SQL Server 2008数据库管理系统

5.2.2 Creo2.0 简介

美国参数技术公司（PTC）的Pro/E是一款非常流行的三维设计软件，广泛应用于各机械设计领域。但近年来，随着信息技术的不断发展，Pro/E逐渐跟不上时代的发展。因此，PTC推出新一代三维造型解决方案Creo。作为Pro/E的升级换代产品，Creo是一个系列软件包，在继承了Pro/E的参数化技术的基础上，包含了许多新的功能，如柔性建模技术、三维可视化技术等，在易用性、开放性上都有较好的表现。Creo2.0是Creo的正式版本，本文在Creo2.0平台上进行雷达零件三维工序模型快速生成模块的开发。

5.2.3 Creo 二次开发技术简介

作为Pro/E的升级换代产品，Creo二次开发技术与原Pro/E二次开发基本相同。针对不同的用户需求，主要有以下几种二次开发方法：

- （1）基于C++和Pro/TOOLKIT的二次开发过程
- （2）基于Java和J-Link的二次开发过程

(3) 基于VB API的二次开发过程

(4) 基于VB和Automation GATEWAY的二次开发

各个开发方法特点如表5.1所示。

表 5.1 Creo Parametric 二次开发方法

开发工具	Pro/TOOLKIT	J-Link	VB API	Automation GATEWAY
开发语言	C/C++	Java	VB	VB
工具来源	CreoParametric自带	CreoParametric自带	CreoParametric自带	第三方RAND公司
优点	功 能 强 大 ， 与 Parametric无缝集成 能访问底层函数 丰富的函数库	功能强大,表达能力强 语法比C++更简单 可以获取Parametric进 程中内部资源	门槛低容易上手 Parametric提供相当 部分的API函数	简单易用 专门针对Parametric 二次开发
缺点	语言稍复杂	国内缺少相关资料文献	函数库有限,实现的功 能也有限	第三方软件,不能访问 底层资源

综合考虑几种二次开发技术的优缺点及本系统要实现的功能，本文采用基于C++和ProToolkit的二次开发方法，以实现对Creo底层函数的调用，保证系统功能的实现。

5.3 系统总体方案设计

5.3.1 系统设计思路

系统根据雷达零件工艺设计部门业务现状和需求，以及雷达零件分类和特点，建立合适的三维工序表达方式，确定表述规范，建立三维零件工序模型制造特征库，满足工程化应用要求。在设计模型信息基础上，引导工艺设计人员通过三维工序模型设计模快速生成系统快速生成工序几何模型、计算工序参数、快速标注，生成能够指导零件生产的三维工序模型。结合项目需要，以工序快速设计为目标、实用集成为出发点，提出了三维工序模型设计思路：

(1) 工具化—针对雷达零件制造特点，开发三维工序模型快速生成相关应用工具，并在Creo2.0设计软件界面提供给工序设计人员；

(2) 参数化—将工艺师的设计经验存储为映射规则库和制造特征库，通过工序知识的逻辑推理和条件判断等，在可视的工序定义界面上通过工序参数输入实现雷达零件加工工序的快速生成；

(3) 集成化—工艺是设计和制造的中间桥梁，实现工序设计模型与CAD/CAM/PDS/ERP等的集成，确保工艺信息的全程共享、一致性和安全性。

5.3.2 系统体系架构

遵循工具化、参数化和集成化的设计指导思想，雷达零件三维工序模型快速生成系统的体系架构如图5.1所示：

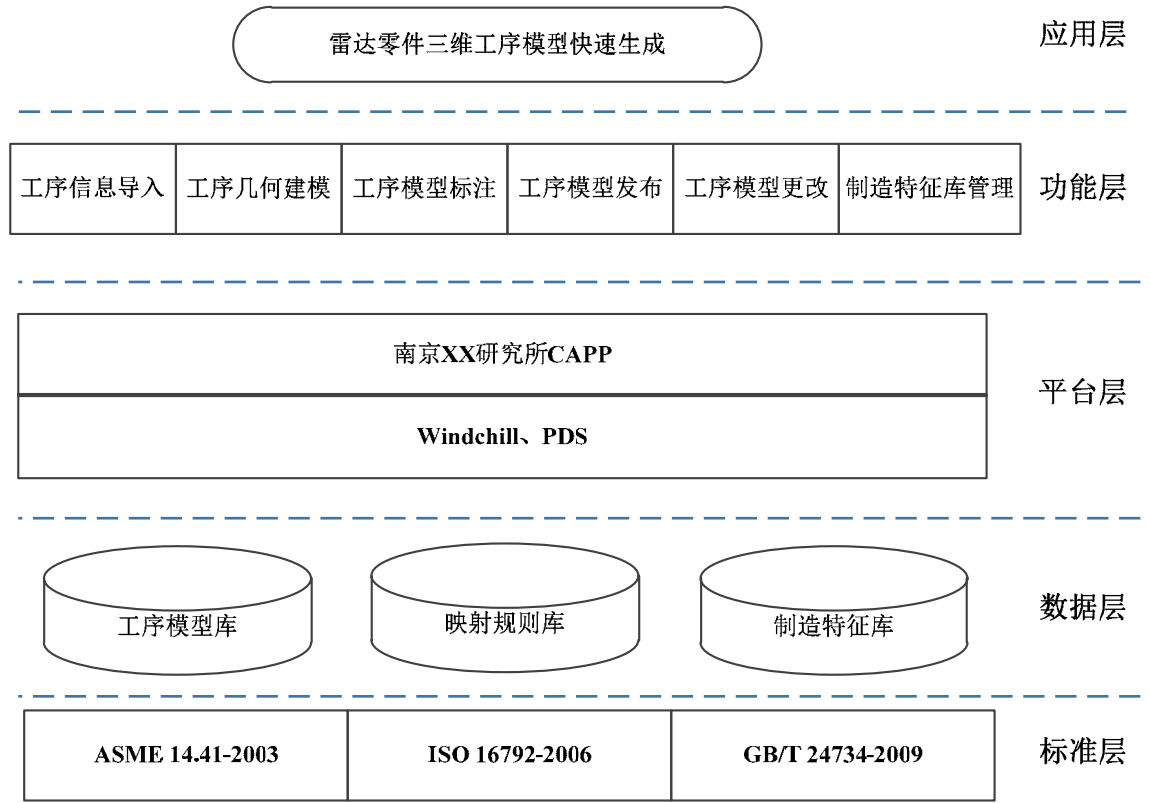


图 5.1 三维工序模型设计模块体系架构

体系架构自底向上分为五层：标准层、数据层、平台服务层、功能组件层和界面应用层。

【标准层】底层为标准层，选用ASME14.41-2003、ISO 16792-2006和GB/T 24734-2009等标准规范作为参考依据。

【数据层】在标准层基础上，构建三维工序模型库、映射规则库、制造特征库等为三维工序模型生成提供数据支撑。模型信息的存储和管理方式有两种：以数据表形式存储于关系数据库中；以三维实体模型方式存放于工序模型库中。

【平台服务层】系统选用Creo 2.0为平台作为三维工序模型生成环境，提供三维技术实现和表达的基本条件与手段。

【功能组件层】包括六大功能组件，分别是工序信息导入、工序几何建模、工序模型标注、工序模型更改、工序模型发布、制造特征库管理。

【界面应用层】应用层面向雷达零件工艺设计人员，提供雷达零件工序模型快速生成工具，通过插件的形式集成到软件平台，为用户提供相应功能服务。

5.3.3 系统拓扑结构

系统网络拓扑结构如图5.2所示。

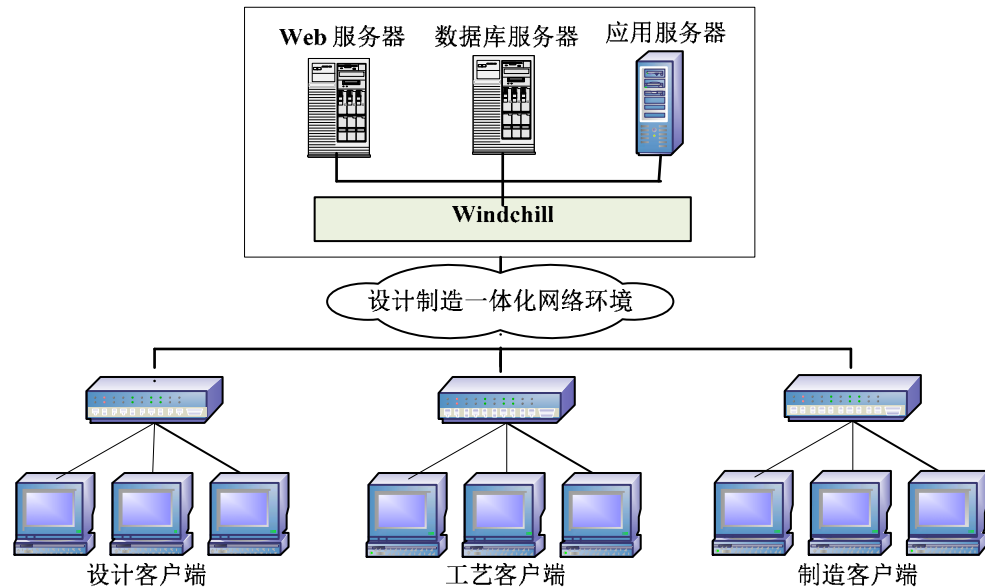


图 5.2 模块网络拓扑结构

雷达零件三维工序模型快速生成系统主要依托现有网络系统，采用星型结构。

客户端包括：设计端、工艺端和制造端。

服务器端包括：数据库服务器、Web服务器和应用服务器。

5.3.4 系统功能模块

雷达零件三维工序模型快速生成系统功能包括六大部分：工序信息导入、工序几何建模、工序模型标注、工序模型更改、制造特征库管理。三维工序模型快速生成系统的功能结构树如图5.3所示。功能结构树确定了功能子模块数量、功能结构总体关系及功能子模块的布局。

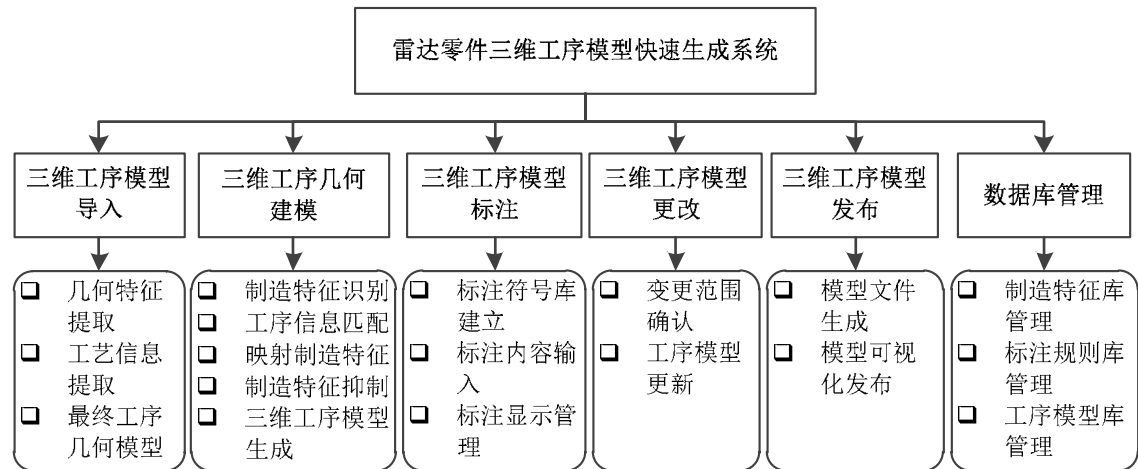


图 5.3 系统功能结构树

工艺设计人员首先启动Creo，在进入Creo零件设计界面后，在主菜单上选中三维工序模型设计系统菜单，在弹出的对话框中新建或是打开已有的三维工艺规程，然后在工艺结构树上进行工序设计，工序设计流程如图5.4所示。

系统模块的总体功能流程如图5.5所示

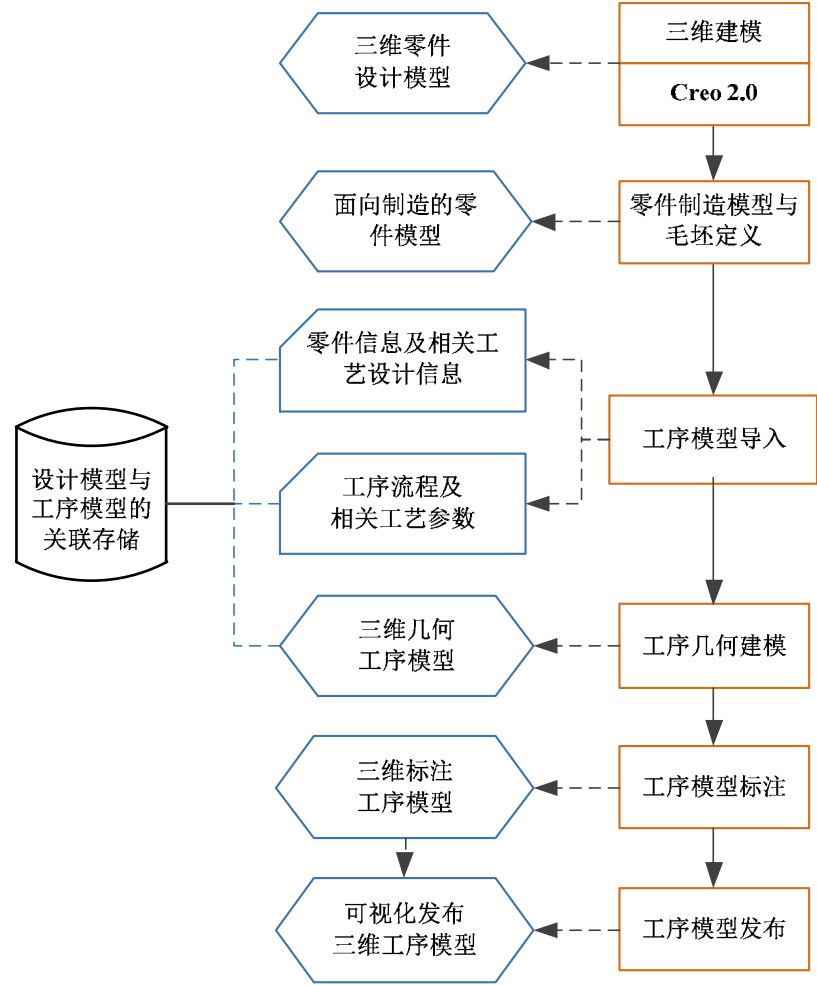


图 5.4 系统模块功能流程图

5.3.5 系统数据库设计

数据库的设计与实现是系统实现各项功能的基本保障。本文通过对雷达零件三维工序模型生成过程中所需要的各种类型数据进行详细分析和研究，建立了相关的Microsoft SQL 数据库。如图5.5所示为设计特征到加工特征映射的数据库基本关系图。

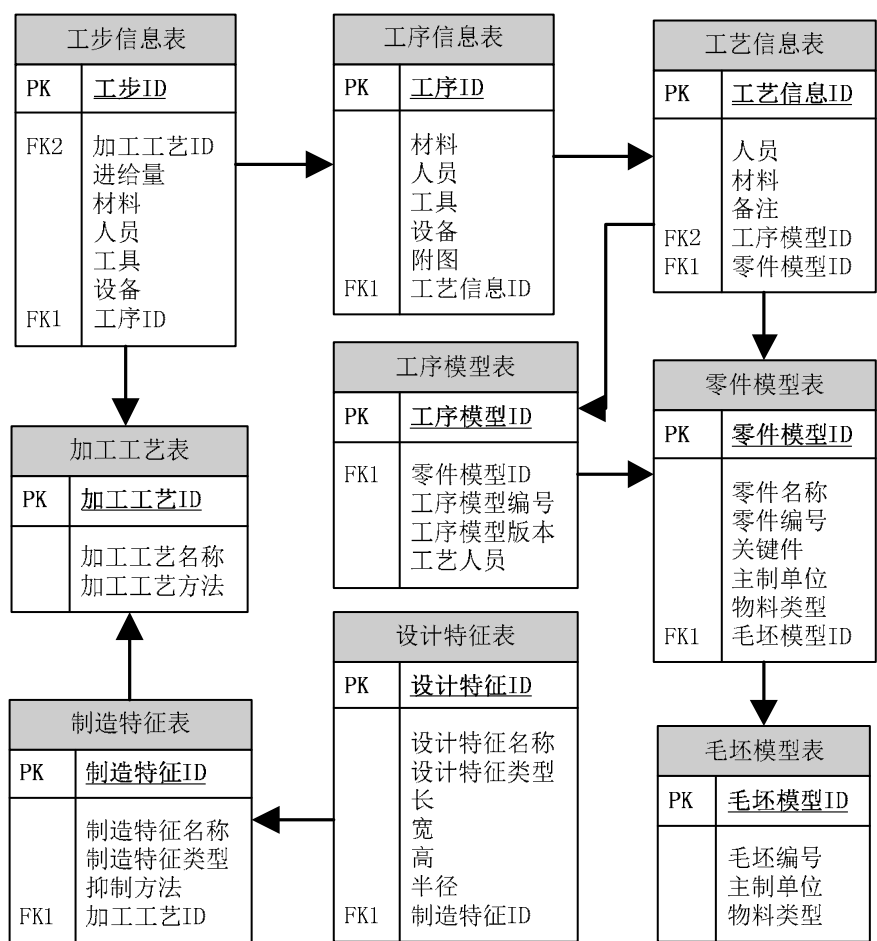


图 5.5 设计特征到制造特征映射

5.4 原型系统功能模块实现

如图5.6为某雷达零件，此类零件在雷达装备的研制中大量存在，具有品种多、批量小、设计更改频繁等特点，现以此零件为例对雷达零件三维工序模型快速生成系统功能模块进行介绍。

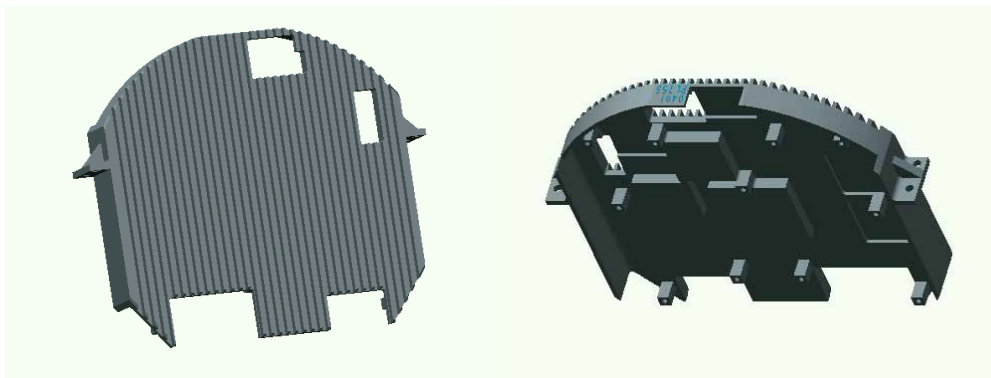


图 5.6 某雷达零件实例

5.4.1 工序信息导入

由于本文主要研究雷达零件三维工序模型快速生成技术，所开发的功能模块集成于Creo Parametric中，并不涉及工艺流程设计。因此，零件工艺流程的编制过程在CAPP系统中完成。系统启动时，在PDM/CAPP系统中选择相应雷达零件，右击选择添加工序模型，自动进入Creo界面，并打开相应三维零件模型。如图5.7所示。同时，PDM/CAPP系统提供零件工艺信息，以XML文件形式被工序模型生成系统读取。进入Creo后，在菜单栏“工具”标签下“TOOLKIT”中选择二次开发的相关命令进行工序模型生成。

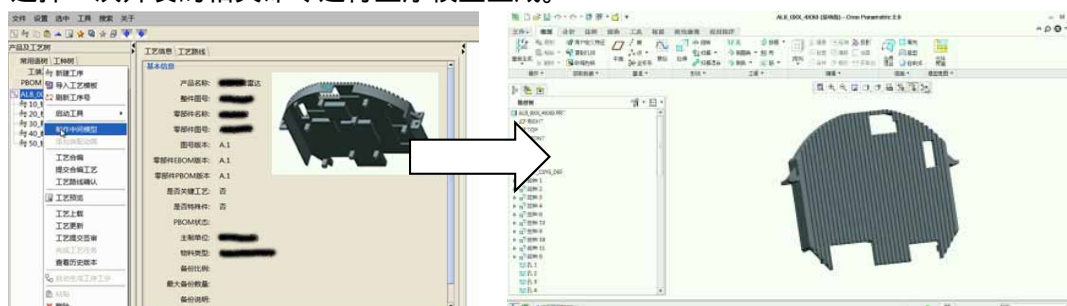


图 5.7 工序生成模块启动过程

在进行三维工序模型生成之前，首先确认零件信息和工艺信息，同时指定工序模型保存路径。零件信息主要包括产品名称、整件图号、零部件名称、零部件图号、图号版本等，工艺信息包括工艺名称、工艺编号、工艺版本、创建者、修改时间等。如图5.8所示。工序信息主要来自于后台读取的PDM/CAPP系统传递的XML信息文档，对于没有XML文档信息或信息不全的情况，可以通过人工输入解决。

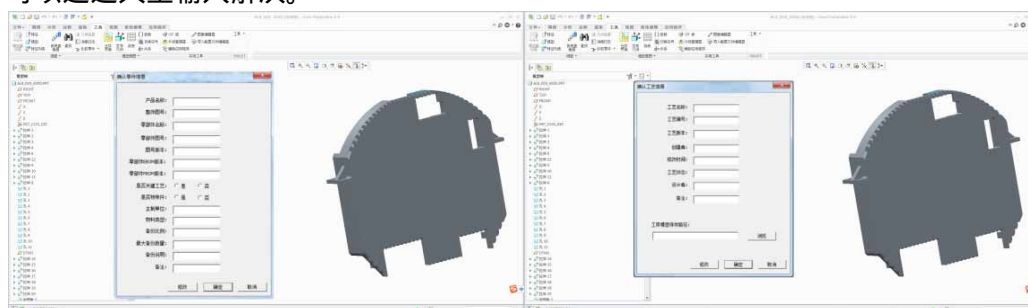


图 5.8 工序信息确认

5.4.2 制造特征识别

点击“制造特征识别”，弹出“制造特征识别”对话框，如图5.9所示。对话框分为三个区域，A部分为识别出的制造特征，点选A中制造特征，相应的设计特征在B中显示，C部分为未识别的设计特征。点选相应特征，Creo工作窗口中零件相应部分会高亮显示，如图5.10所示，分别为识别出的阵列矩形槽和未识别的不规则孔。

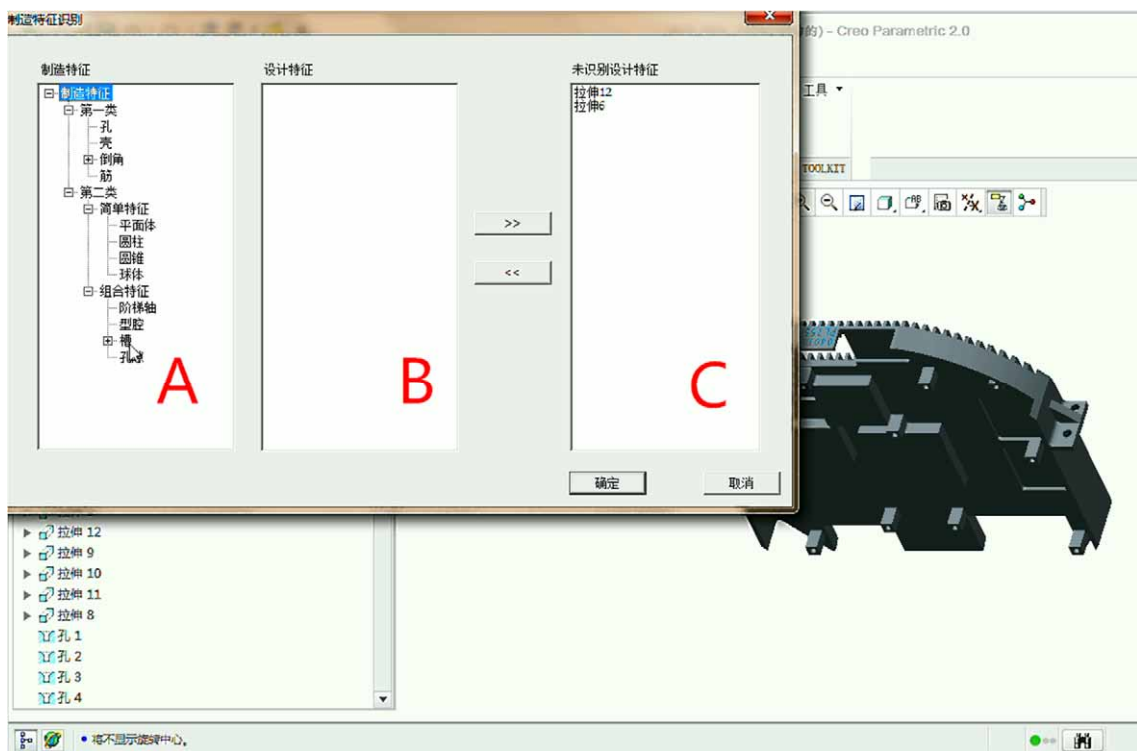


图 5.9 制造特征识别窗口

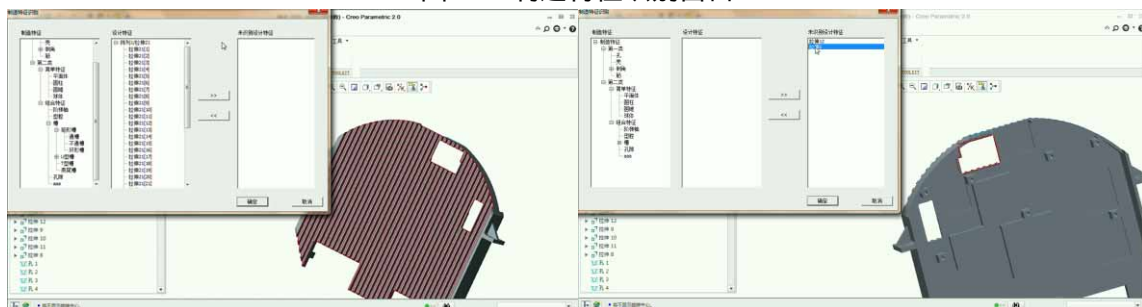


图 5.10 设计特征和未识别特征显示

零件特征提取部分代码如下：

```
int w_id;
ProMdl mdl;
ProMdlCurrentGet(&mdl);
ProMdlWindowGet(mdl,&w_id);
ProWindowActivate(w_id);
ProError status;
ProFeature *p_data;           //特征数组
ProSolid solid;
int FeatCount;
```

```

wchar_t ** labels1;
char *FeatTypeName=NULL;    //特征类型名
CString total;
CString dis_total;
int n_children;
int *children_ids;
status=ProMdlCurrentGet((ProMdl*)&solid);
ProName w_name;
CString itemname;
SolidFeatGet1(solid,&p_data); //遍历特征
status = ProArraySizeGet((ProArray)p_data, &FeatCount);
ProArrayAlloc (FeatCount, sizeof(wchar_t *),1,(ProArray*)&labels1);
for (int i=0;i<FeatCount;i++)
{
    labels1[i] = (wchar_t *)calloc(PRO_NAME_SIZE, sizeof(wchar_t));
    int FeatType;
    ProFeatureTypeGet(p_data+i,&FeatType);
    status = ProModelitemNameGet((p_data+i), w_name);
    if(status==PRO_TK_NO_ERROR)//
    {
        ProWstringToString(FeatTypeName, w_name);
    }
    else
    {
        status = ProModelitemDefaultnameGet ((p_data+i), w_name);
        ProWstringToString(FeatTypeName, w_name);
    }
    CString featype;
    featype.Format(_T("%d"),(p_data+i)->id);
    ProFeatureChildrenGet(p_data+i,&children_ids, &n_children);
    CString number;
    number.Format(_T("%d"),n_children);

```

```

if(n_children>0)           //将提取到的特征填入列表框显示
{
    LV_ITEM lvitem;
    lvitem.mask=LVIF_TEXT;
    lvitem.iItem=0;         // 列表项的索引
    lvitem.iSubItem=0;      // 列表子项的索引
    lvitem.pszText=w_name;  // 指向列表项或列表子项的标签字符串。
    int index=m_clist.InsertItem(&lvitem);
    m_clist.SetItemText(index,1,featype);
    m_clist.SetItemText(index,2,number);
}
}

ProArrayFree((ProArray *)&labels1);
ProArrayFree( (ProArray*)&p_data );

```

5.4.3 特征抑制

特征抑制窗口如图5.11所示。窗口共分为四个功能区域，A中显示本工序及包含的制造特征，选择A中制造特征，则B中显示相应设计特征并在零件上高亮显示，选择B中设计特征，在C中列出对应特征的属性参数，包括标号、尺寸ID、类型及显示的值，选择相应尺寸参数，会在D区域中显示详细尺寸并提供相应操作。

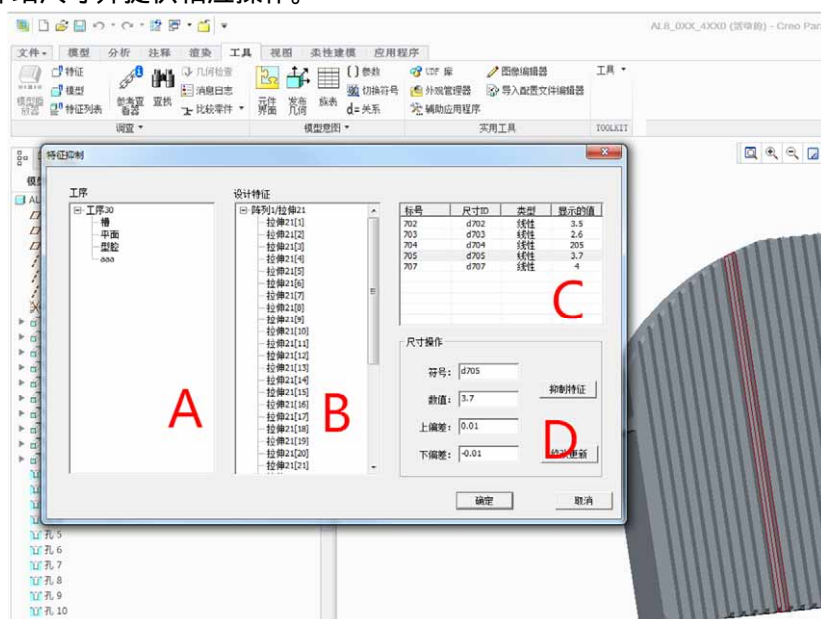


图 5.11 特征抑制窗口

“尺寸操作”中给出了两种处理方法，即“修改更新”和“抑制特征”，分别采用参数化建模和柔性建模的方法。不同特征对应不同的处理方法，对特征尺寸修改可修改相应尺寸后点击“修改更新”，对许多去材料凹陷类特征则选择“抑制特征”。如图5.12所示，利用“修改更新”修改零件阵列矩形槽，将槽宽度改为0，实现相应工步的抑制。图5.13所示为对未识别特征不规则空的处理，点击“抑制特征”利用柔性建模功能实现。

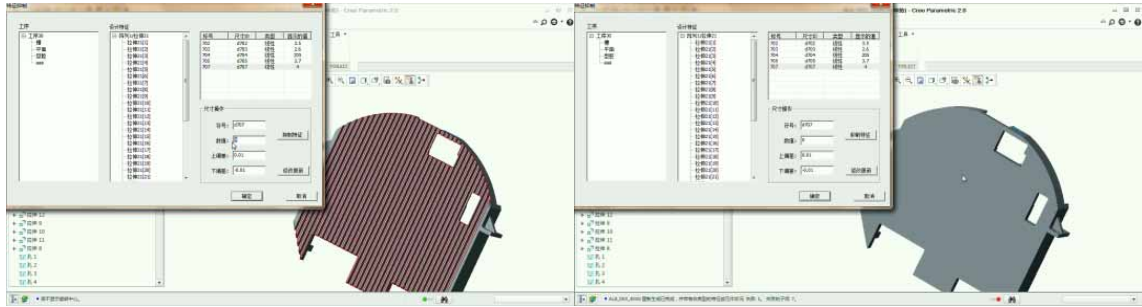


图 5.12 “修改更新”功能

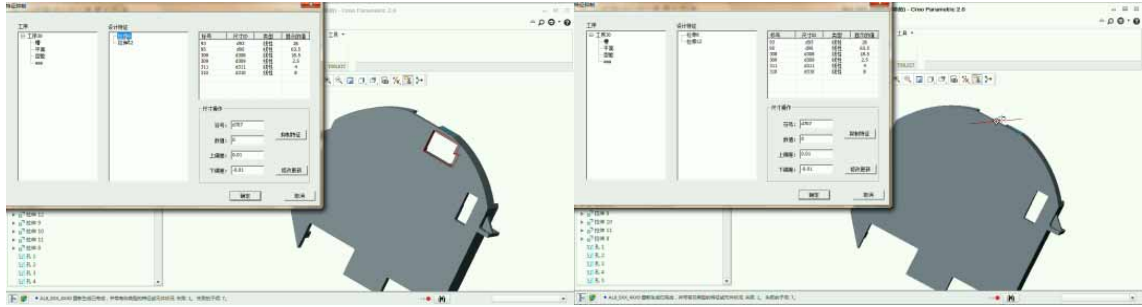


图 5.13 “抑制特征”功能

5.4.4 制造特征库管理

对于未识别出的典型特征需要添加到制造特征库以备后续使用，同时对于某些已有制造特征有时也需要查找、编辑，这些功能在制造特征库管理界面中实现。如图5.14所示，窗口左侧树形控件中显示特征库中已有的制造特征，按照第三章中所述制造特征分类方法分类显示。右侧上部为制造特征示意图，点选相应制造特征，此处显示相应制造特征示意图。右侧下部为相关制造特征库操作，包括新建、编辑、查找、删除等。



图 5.14 制造特征库管理界面

5.4.5 输出结果

图 5.15 为运用本文所述方法，使用所开发的三维工序模型辅助生成工具，对上述零件的处理结果。零件从最终零件模型 A 逆推至毛坯模型 H 共 7 步，生成六个三维工序模型 B~G，且模型与实际加工过程一致。

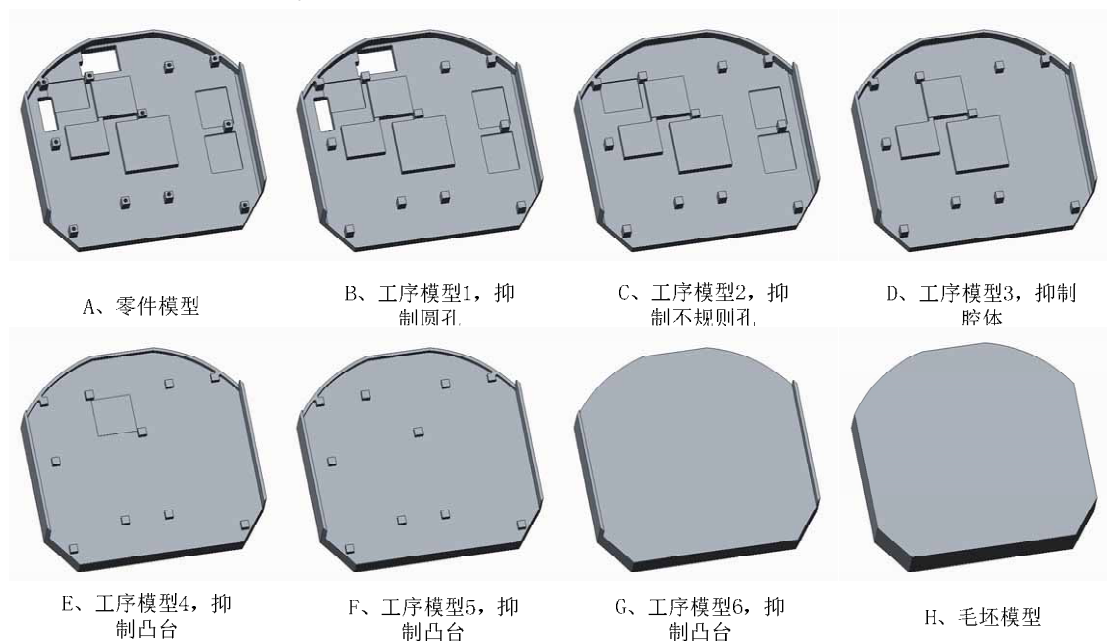


图 5.15 三维工序模型生成结果

5.5 本章小结

本章介绍了系统的开发环境，对 Creo 软件及 Creo 二次开发技术进行了一定介绍。同时，给出了系统总体方案设计，包括系统设计思路、体系架构、拓扑结构、功能模块以及模块的运行流程等。最后，以某典型雷达零件为例，详述了从系统启动、工序信息导入到制造特征识别、特征抑制及制造特征库管理等系统功能的实现过程。

第六章 总结与展望

6.1 全文总结

在雷达零件的设计制造过程中,企业正逐步推进以三维模型为核心的设计制造一体化技术。其中,零件三维工序模型快速生成技术是三维工艺技术实现的重要组成部分。三维工序模型的应用可以有效的提升生产单位对用户需求的快速响应能力,缩短研制周期,同时提高产品的加工精度和质量,保证可靠性,对提高雷达产品工艺制作水平,具有重要意义。

针对目前三维工序模型生成过程中效率低、实用性差等问题,本文结合典型雷达零件工艺制造特点,进行了雷达零件三维工序模型快速生成关键技术的研究,并开发了相应的原型系统。本文的主要工作内容如下:

(1) 雷达零件三维工序模型生成方法研究

首先对传统工程图模式与MBD模式进行了对比,给出了三维工序模型的定义。对所要研究的雷达零件的特点进行了分析和总结,并分类。在此基础上,研究了三维工序模型的生成方法。采用逆向生成方法,推导出零件工序模型的逆向求解表达式。最后,给出了零件三维工序模型快速生成的总体流程。

(2) 三维模型特征识别技术研究

详述了三维工序模型特征识别技术,主要包括特征识别与提取、特征映射处理两部分。对特征进行了定义与分类,确定了模型信息提取的内容。通过对零件模型几何特征提取算法和零件工艺信息提取方法的研究实现模型特征的识别和提取。给出了特征映射方法和步骤,通过特征分类匹配及制造特征库实现对不同特征的映射处理。

(3) 三维工序模型快速生成技术研究

研究三维工序模型生成过程中涉及到的关键技术:特征抑制技术,包括特征抑制方法及步骤,参数化建模技术和柔性建模技术;工序模型生成技术,包括工序模型的生成及工序模型特征变更响应;三维工序模型发布技术,包括三维标注标准,三维工序模型标注方法和应用,三维工序模型发布的内容和方法。

(4) 雷达零件三维工序模型快速生成原型系统开发

主要介绍了雷达零件三维工序模型快速生成系统的开发环境,给出了系统总体方案设计,包括系统设计思路、体系架构、拓扑结构、功能模块以及模块的运行流程等。最后,以某典型雷达零件为例,详述了从系统启动、工序信息导入到制造特征识别、特征抑制及制造特征库管理等系统功能的实现过程。

6.2 研究展望

随着制造业信息化进程的不断推进，设计制造一体化成为设计制造领域必然的发展趋势。三维工艺技术作为其中重要一环也得到越来越多的重视。本文依托于某国防基础科研项目，研究了雷达零件三维工序模型快速生成的关键技术，并开发了相应原型系统。由于工作时间及笔者能力限制，文中尚有许多不足和未完成之处，需要进一步研究完善内容如下：

（1）特征识别算法优化。特征识别是实现工序模型生成的重点和难点，本文从实用角度出发，对不同特征进行分类处理。但仍有部分特征需要人工交互参与识别。下一步应进一步完善特征库并对特征识别算法进行优化以实现自动特征识别。

（2）设计与工艺的贯通。目前三维工序模型系统集成于 CAD 软件，工艺部门制订工艺流程后再进行工序模型的生成。下一步应从知识化、智能化角度出发，三维工序模型由零件设计模型自动生成，工艺流程由三维工序模型自动生成，打通设计与工艺过程。

参考文献

- [1] 丁丁, 张旭, 斯铁冬, 等. 三维工艺设计中基于加工特征的工序模型生成技术[J]. 兵工自动化, 2013(6):31-35.
- [2] 陈兴玉, 张红旗, 陈帝江, 等. 复杂机电产品全三维工艺设计方法[J]. 雷达科学与技术, 2010(5):474-479.
- [3] 徐志良, 张静. 三维模型下厂[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2010(2):37-40.
- [4] 房文林, 闫崇京, 年丽云, 等. 结果导向的三维中间工序模型快速生成[J]. 机械设计与制造工程, 2014(10):32-36.
- [5] 谢波. 设计特征到加工特征的转换方法研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
- [6] 高曙明. 自动特征识别技术综述[J]. 计算机学报, 1998, 21(3):281-288.
- [7] Joshi S, Chang T C. Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model[J]. *Computer-Aided Design*, 1988, 20(02):58-66.
- [8] 刘金山, 廖文和, 刘长毅. 基于图的夹具特征识别方法研究[J]. 机械科学与技术, 2007, 26(6):723-727.
- [9] Vandenbrande J, Requicha A. Spatial reasoning for the automatic recognition of machinable features in solid models[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1993, 15(12):1-17.
- [10] Han J, Requicha A. Integration of feature based design and feature recognition[J]. *Computer-Aided Design*, 1997, 29(5):393-403.
- [11] Han J, Pratt M, Regli W. Manufacturing feature recognition from solid models: a status report[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, 16(6):782-796.
- [12] Tseng Y J, Joshi S. Recognition of interacting rotational and prismatic machining features from 3D mill-turn parts[J]. *International Journal of Production Research*, 1998, 36(11):3147-3165.
- [13] Sakurai H. Volume decomposition and feature recognition[J]. *Computer-Aided Design*, 1995, 27(11):833-843.
- [14] Woo Y, Sakurai H. Recognition of maximal features by volume decomposition[J]. *Computer-Aided Design*, 2002, 34(2002):195-207.
- [15] 田富君, 田锡天, 耿俊浩, 等. 工序模型驱动的工艺设计方法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(6):1128-1134.
- [16] TIAN Fujun, TIAN Xitian, GENG Junhao, et al. A hybrid interactive feature recognition method

- based on lightweight model[C].Proceedings of the 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation(IC-MTMA 2010). Washington, D. C., USA: IEEE, 2010:113-117.
- [17] 黄瑞, 张树生, 白晓亮. 可制造性驱动的三维 CAD 模型相交制造特征识别方法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2013, 25(7):1089-1098.
- [18] 曾芬芬, 邬晶, 严晓光. CAPP 系统中三维制造特征提取关键技术的研究[J]. 机械制造域自动化, 2010, 39(1):124-126.
- [19] Jain P, Kumar S. Automatic feature extraction in PRIZCAPP[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 1998, 11(6):500-512.
- [20] Babic B. Development of an intelligent CAD-CAPP interface[C]. Proceedings of the International Conference on Intelligent Technologies in Human-Related Sciences, 1996: 351–357.
- [21] Babic B, Miljkovic Z. Feature recognition as the basis for integration of CAD and CAPP Systems[C]. Proceedings of the Second World Congress on Intelligent Manufacturing Processes and Systems, 1997:596–601.
- [22] Bouzakis H, Andreadis G. A feature-based algorithm for computer aided process planning for prismatic parts[J]. *International Journal of Production Engineering and Computers*, 2000, 3(3):17-22.
- [23] 石云飞, 李山, 范海涛, 等. 基于 UG/Open 联合开发的叶片工序模型造型系统[J]. 制造业自动化, 2008, 30(7):18-20.
- [24] 许国玉, 单忠臣, 刘志强. 回转体零件特征建模及信息提取[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2002, 23(6):106-109.
- [25] 张雪荣. Pro/ENGINEER 环境下的三维 CAPP 系统研究与开发[D]. 武汉:武汉理工大学, 2008.
- [26] 陈树晓. 基于零件三维特征模型的自动工艺规划研究[D]. 太原:中北大学, 2007.
- [27] 姜存学, 蔡力钢, 胡于进. 复杂产品 3D-CAPP 中工艺方案仿真 关键技术与平台研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(6): 2163-2165.
- [28] 杨毅. 三维 CAPP 系统中基于特征的工艺信息模型研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- [29] Babic B, Nesic N, Miljkovic Z. A review of automated feature recognition with rule-based pattern recognition[J]. *Computers in Industry*, 2008, 59(4):321-337.
- [30] 冯潼能, 王铮阳, 孟静晖. MBD 技术在数字化协同制造中的应用与展望[J]. 南京航空航天大学学报, 2012(1):132-137.

- [31] 刘巍. MBD 技术在制造企业中的应用[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2013(4):73-74.
- [32] 于勇, 陶剑, 范玉青. 大型飞机数字化设计制造技术应用综述[J]. 航空制造技术, 2009(11):56-60.
- [33] 周秋忠, 范玉青. MBD 技术在飞机制造中的应用[J]. 航空维修与工程, 2008(3):55-57.
- [34] 毛雨辉, 蔡良朋. 雷达典型结构件快速设计系统的研究与开发[J]. 工程图学学报, 2007(2):6-11.
- [35] 贲可存, 李博, 臧小俊. 雷达产品关键件制造工艺仿真分析综述[J]. 现代雷达, 2012(2):81-86.
- [36] 张润逵, 戚仁欣, 张树雄. 雷达结构与工艺[M]. 北京:电子工业出版社, 2007:8-9.
- [37] 孟彪, 杜宝瑞, 杨野光, 等. 基于去除特征识别的三维机加工序模型顺序建模方法[P]. 中国专利: CN 103020381 A, 2013-04-03.
- [38] 乔立红, 葛晨, 李少帅, 等. 一种应用于数字化工艺设计的三维工序模型演进生成方法[P]. 中国专利: CN 102622477 A, 2012-08-01.
- [39] 吴淑芳, 秦慧斌, 杨金刚, 等. 毛坯模型的自动形成技术研究[J]. 机械管理开发, 2004(3):16-18.
- [40] 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(6):620-624.
- [41] 杨河清, 陈卓宁, 严晓光. Pro/E 平台下基于特征映射的组合特征提取技术研究[J]. 机床与液压, 2013(13):128-131.
- [42] 陈薇, 沈晓红. 制造特征到夹具特征的映射研究[J]. 机械设计, 2002(7):58-59.
- [43] 王瑞红, 严晓光, 李建勋. 基于制造特征的零件拓扑结构模型及其构建研究[J]. 机械工程师, 2013(12):80-82.
- [44] Nasr E S A, Kamrani A K. A new methodology for extracting manufacturing features from CAD system[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2006, 51(3):389-415.
- [45] 阮文骏. 基于 XML 的互操作协议体系的研究及模型实现[D]. 上海:复旦大学, 2001.
- [46] 陈晚华. XML 安全技术 in 共享数据交换中的应用[D]. 长沙:中南大学, 2008.
- [47] 郑德涛. 集成制造中的特征映射技术[M]. 北京:机械工业出版社, 1999.
- [48] 陆忠东, 郭成, 程羽. 基于 Pro/E 2001 的冲模快速设计系统[J]. 模具工业, 2004(4):10-13.
- [49] 程五四, 陈帝江, 张红旗. MBD 技术标准化及应用研究[J]. CAD/CAM 与制造业信息化, 2013(9):14-16.
- [50] 陈兴玉, 张红旗, 陈帝江, 等. 复杂机电产品全三维工艺设计方法[J]. 雷达科学与技术, 2010(5):474-479.

致 谢

2014 年即将远去，求学生涯也所剩无几，人生将要掀开另一个篇章，回头望去，许多难忘的人和事伴随着时光的脚步款款浮现，指导、伴随、支持着我的成长。

感谢南航，7 年时光里，南航浓厚的学术科研氛围，激励我务实求知、不断前进；感谢南航的老师，言传身教知识、技能与做人做事的道理，让我不断进步成长；感谢南航的同学和好友，一起求学、鼓励、彼此陪伴与支持，让我一路温暖从不孤单。南航的时光见证了我的成长与蜕变，感谢南航所有的人、所有的事和所有的记忆。

感谢我的导师，闫崇京老师。从大一新生到如今研三即将毕业，师徒 7 年，犹记得入学时“采访班主任”活动，闫老师严谨的科研精神、敏锐的思维、踏实的工作态度都给了我深刻的印象，他的谆谆教诲好像还在耳边回响，而如今，当年青涩的我也即将踏入社会参加工作。师父，师父，七年里，是闫老师如父亲般给予我关怀和指导，帮助我克服困难不断前进。在学术科研的道路上，闫老师是我的导师，引领我不断的探索；在生活的道路上，闫老师是我的良师益友，给予我关怀和问候，让我无后顾之忧。在此衷心的感谢闫老师的教诲和辛勤的培育，也祝闫老师工作顺利，生活幸福！

感谢郭宇教授将近 3 年的指导和帮助，郭老师学识渊博，在项目研究中经常给予我启发和建议，科研的顺利进行离不开郭老师的提携和教导；郭老师对学生关怀备至，时常询问学生的生活情况，我也时常受到郭老师在生活上的照顾和关怀，借此机会，我向郭老师表达深深的敬意和最真挚的感谢！

此外，还要感谢数字化中心的沈建新老师、刘长毅老师、田威老师、张霖老师、曾荣老师、梁春老师对我的教导和帮助，他们对工作的敬业、对科研的热情都深深的影响并感染着我，是他们引领我在正确的方向不断的提升自己，再次衷心的感谢各位老师！

感谢在读的谢欣平博士、王发麟博士、张红蕾博士在科研过程中无私的指导和帮助；感谢已经毕业的陈祥师兄的帮助；感谢年丽云、姜佳俊、袁柳阴及 407 教研室其他同学的支持和鼓励；感谢谷秋实师弟、陆鹏师弟及 408 其他师弟对我的帮助；同时感谢蒋苏苏、马志强、刘浩、李超、汤明辉等好友的支持与陪伴。

求学多年，父母一直是我最大的精神支柱。无论任何决定，父母一直给予我最大的支持和鼓励，让我能心无旁骛的求学深造，感谢父母多年的养育和无私的付出！

最后，谨向百忙之中审阅论文和参加答辩的每一位老师表示衷心的感谢！

房文林

2014 年 12 月 31 日星期三

在学期间的研究成果及发表的学术论文

一、在学期间发表学术论文情况

1. 房文林, 闫崇京, 年丽云, 等. 结果导向的三维中间工序模型快速生成[J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(10): 32~36.

二、在学期间参与的科研项目情况

1. “十二五”国防基础科研重点项目“基于虚拟样机的 XX 设计制造一体化技术研究”。

三、成果及专利

1. 闫崇京, 房文林, 谷秋实. 一种 BOM 模糊时间的求解方法. 中国专利, 发明专利, 申请号: CN103593726A.
2. 闫崇京, 陈祥, 房文林. 一种摩擦叠焊的焊接装置. 中国专利, 发明专利, 申请号: CN102589782A.
3. 闫崇京, 陈祥, 房文林. 一种摩擦叠焊的焊接装置. 中国专利, 实用新型, 专利号: CN203245508U.