

## 摘 要

本文分别介绍了 CAPP 的概念、发展情况和分类,指出了 CAPP 在应用中的不足,分析了它的发展趋势。通过介绍特征概念和特征的分类,详细分析了回转类零件所具有的外形特征类别和这些特征上所包含的工艺、几何信息,以及 CAPP 系统得到这些信息的方法,并比较了这些方法的特点通过比较确定了本文采用零件形面特征描述法。在此基础上对系统的总体方案进行了规划,阐述了系统的输入模块、知识库模块、决策模块的设计思路,利用 Visual Basic 语言和 SQL Server 编制基于 Solid Edge 的零件信息的输入界面、存储信息的数据库及系统的决策逻辑,实现了由系统生成工艺规程的功能。

关键词: CAPP, 特征, 知识库, 工艺决策

## ABSTRACT

The paper introduces the notion, development and sorts of CAPP, indicates the deficiencies of CAPP in application, and analyses it's developmental trend .Passing introduce the notion and sorts of feature, analyses the feature of Rotational Parts and process information, geometrical information of feature, and introduces measures of that how can CAPP get these information, so decide use the way of describing shape surface by comparing these measures in this paper .Base on these, makes out overall scheme of CAPP system, and introduces the input module, knowledge module, decision module of the system, programs the input interface of part base on Solid Edge, database of saving information and decision logic of the system with Visual Basic and SQL Server, so realizes the function of making process by the system.

Liu Jianwei (Mechanical and electronic engineering)

Directed by associate prof. Yang Xiaohong

**KEY WORDS: CAPP, feature, knowledge base, decision logic**

## 摘 要

本文分别介绍了 CAPP 的概念、发展情况和分类,指出了 CAPP 在应用中的不足,分析了它的发展趋势。通过介绍特征概念和特征的分类,详细分析了回转类零件所具有的外形特征类别和这些特征上所包含的工艺、几何信息,以及 CAPP 系统得到这些信息的方法,并比较了这些方法的特点通过比较确定了本文采用零件形面特征描述法。在此基础上对系统的总体方案进行了规划,阐述了系统的输入模块、知识库模块、决策模块的设计思路,利用 Visual Basic 语言和 SQL Server 编制基于 Solid Edge 的零件信息的输入界面、存储信息的数据库及系统的决策逻辑,实现了由系统生成工艺规程的功能。

关键词: CAPP, 特征, 知识库, 工艺决策

## ABSTRACT

The paper introduces the notion, development and sorts of CAPP, indicates the deficiencies of CAPP in application, and analyses it's developmental trend .Passing introduce the notion and sorts of feature, analyses the feature of Rotational Parts and process information, geometrical information of feature, and introduces measures of that how can CAPP get these information, so decide use the way of describing shape surface by comparing these measures in this paper .Base on these, makes out overall scheme of CAPP system, and introduces the input module, knowledge module, decision module of the system, programs the input interface of part base on Solid Edge, database of saving information and decision logic of the system with Visual Basic and SQL Server, so realizes the function of making process by the system.

Liu Jianwei (Mechanical and electronic engineering)

Directed by associate prof. Yang Xiaohong

**KEY WORDS: CAPP, feature, knowledge base, decision logic**

# 声 明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于 Solid Edge 的回转类零件 CAPP 系统的研究与开发》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：刘建伟 日期：2008.12.25

## 关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名：刘建伟

导师签名：杨新

日期：2008.12.25

日期：2008.12.25

## 第一章 引言

### 1.1 CAPP 系统概述

#### 1.1.1 CAPP 概念介绍

CAPP(Computer Aided Process Planning)——计算机辅助工艺设计是利用计算机技术辅助工艺人员设计零件从毛坯到成品的制造程序,将企业产品设计数据转换为产品制造数据的一种技术<sup>[1]</sup>。随着制造技术及其现代科学技术的发展,特别是计算机技术的迅猛发展,使得计算机集成制造系统CIMS成为了机械制造业的主要发展趋势。在CIMS中,CAPP成为连接CAD/CAM集成的关键和纽带。由于企业生产管理和计划调度等部门也必须依赖CAPP系统的输出信息,所以CAPP成为企业各部门产品信息的交汇点,所以从它诞生以来,其研究开发工作一直在国内外蓬勃发展,而且逐渐引起越来越多的人们的重视和关注。

运用CAPP技术,可以使工艺人员迅速编制出详尽而完备的工艺文件,进而工艺人员可以从繁琐重复的工作中解脱出来,同时使得生产准备周期缩短,进一步提高产品制造质量,缩短了整个产品的开发周期,大大增强了产品的竞争力。随着CAPP的进一步发展,应用CAPP可以提高工艺设计质量,并为制定先进合理的工时定额,改善企业管理提供科学依据。CAPP有助于推动企业开展工艺设计标准化工作,提高工艺设计水平。CAPP有助于对工艺设计人员的宝贵经验进行总结和继承,使这些经验不断丰富和传承<sup>[2]</sup>。同时还可以逐步实现工艺过程设计的自动化及工艺过程的规范化、标准化与最优化,可以推动工艺水平的不断提高。

一般认为,CAPP系统的功能包括毛坯设计、加工方法选择、工序设计、工艺路线制定和工时定额计算等。其中工序设计又可包含装夹设备选择或设计、加工余量分配、切削用量选择以及机床、刀具和夹具的选择、必要的工序图生成等。

#### 1.1.2 CAPP的发展概述

CAPP技术的研究开始于60年代末。第一个CAPP系统是挪威于1969年设计的AUTOPROS系统。它是根据成组技术原理,利用零件的相似性来检索和修改标准工艺来制定相应的零件加工规程。而在CAPP的发展史上具有里程碑意义的是设在美国的计算机辅助制造国际组织CAM-I于1976年推出的CAM-I's Automated Process Planning系统,取其第一个字母,称为CAPP系统。虽然现在对CAPP缩写表示法还有不同的解释,但将计算机辅助工艺设计称为CAPP已经举世公认。一方面是随着科学技术的发展和社会进步,逐渐暴露出手工设计工艺规程的诸多缺点,而计算机由

于本身具有的优越条件,成为克服这些缺点的有效手段。其次,CAPP是随着计算机的出现和应用及科学技术和工程技术发生了革命性的变革的新形势下应运而生的产物,是改善生产状况的有效途径。随着生产状况的改变,人们逐渐认识到CAPP的作用,直到80年代CAPP的研究才得到工业界的重视。在1985、1986年,美国机械工程师协会(ASME)连续召开CAPP技术会议。国际生产工程研究会(CIRP)在1985、1987年连续召开CAPP专题会议。经过这几次在国际上具有较大影响力的会议,使CAPP技术的研究工作在世界范围内推广开来,进而掀起CAPP技术的研究高潮<sup>[3]</sup>。国内的CAPP技术的研究开始于80年代,目前也取得了一定的成绩,不仅发表了大量的论文,也开发了许多CAPP系统,国内最早开发的CAPP系统是同济大学的修订式TOJICAP系统和北京航空航天大学创成式BHCAPP系统<sup>[4]</sup>,现在的如开目CAPP系统、清华天河CAPP系统等,同时还有很多大学院校也进行了大量的研究,取得了很大进步,如<sup>[5]</sup>:

(1) 对于设计对象,所涉及的零件包括了回转类零件、箱体类零件和飞机的结构件等。

(2) 从工艺范围上考虑,从普通加工工艺发展到数控加工工艺;从机械加工工艺到装配工艺、钣金工艺、热处理工艺、表面处理工艺、特种工艺等。

(3) 在系统的设计上,从单一的修订式到生成式,到基于人工智能技术的专家系统,并将检索、修订、生成等多种决策功能结合的综合系统。

(4) 在应用上,从孤立的计算机辅助技术,到满足集成环境需求的集成化系统。

(5) 在开发上,逐渐从单纯的学术性研究和技术驱动的原形系统开发,发展到了以应用和效益驱动的实用化的系统开发。

最初的CAPP系统主要是检索方式,即操作CAPP时通过检索出一组与当前零件相似的标准工艺规程,然后通过修改生成具体的工艺并输出。随着计算机的发展,CAPP技术开发人员将成组技术和逻辑决策技术引入到CAPP中,开发出了以成组技术为基础的派生式系统,以及以决策技术为工艺生成基础的半生成式系统。近来以人工智能、模糊技术为基础的CAPP专家系统和以CAD/CAPP/CAM集成为目的的系统也正在研发。

### 1.1.3 CAPP分类

由于CAPP系统种类繁多,很难准确加以分类,不过从工艺生成的原理上可以分为派生式、创成式、半创成式<sup>[6]</sup>。

(1) 派生式 此类CAPP是利用了基于零件相似性的成组技术原理,把零件按结构和工艺的相似性分类,即相似的零件有相似的工艺,为每一类零件编制出综合工艺规程存入计算机系统。当需要设计某一零件工艺时,将零件按结构进行编码输入

计算机，计算机将会检索出同类零件的标准工艺规程，再结合具体零件的信息和CAPP的决策规则，对标准工艺进行增加、删除、重新排序等编辑工作，从而得到此零件的加工工艺，同时添加零件加工所需的设备如机床、刀具并选择切削参数等。这样即可编制出这个零件的工艺规程。

(2) 创成式 创成式的基本思路是将人们设计工艺过程时所用的推理和决策方法转换成计算机可以处理的决策模型、算法和程序代码，依靠这些决策逻辑，由计算机自动生成工艺规程。这需要先向计算机输入一系列决策逻辑和相应的决策参考信息。将零件的结构信息和工艺信息输入计算机后，计算机就会模仿工艺设计人员的决策方法，自动为该零件编制工艺规程，生成零件的加工过程并自动选择机床、刀具、量具、工艺参数等。这种方法使CAPP系统能够保存、继承工艺设计的知识和经验，能适应技术的不断发展，但由于工艺设计的复杂性和模糊性，很难将所有的工艺决策全部自动化或生成十分合理的工艺。一部分的工艺设计仍需要人工编制和修改。

(3) 半创成式 半创成式系统结合了派生法和创成法来共同生成工艺，由于派生式CAPP功能较弱，创成式系统很难达到理想效果，于是人们提出了这种方法，在多数情况下使用派生法，在没有典型工艺的情况下生成和编辑工序时使用创成法。半创成式CAPP系统有以下几种形式：

- ① 利用存储在计算机中的各种典型零件工艺生成新零件的工艺规程。
- ② 对于一些工艺选取和排序规律性很强的零件，采取决策树(决策表)对工艺知识进行推理以生成工艺文件。
- ③ 对于一些相似性很高的零件，采用参数化工艺设计。
- ④ 对于那些不能归入现有零件族的零件，应用特征技术，对其加工表面进行特征分解，再搜索对应这些特征的加工工艺，则新零件的工艺就是其特征工艺的組合。

#### 1.1.4 CAPP 的发展趋势

随着计算机技术的不断发展和制造企业生产的逐渐进步，对CAPP的应用提出了更高的要求，以及一些新技术的应用，使得CAPP技术不断向前发展，呈现出了以下发展趋势：

##### (1) 知识化、智能化

CAPP系统不会停留在以解决事务性、管理性工作为主的阶段。基于知识的CAPP系统除了作为工艺设计辅助工具，而且还有将工艺专家的经验 and 知识积累起来并加以充分利用的任务。在知识化的基础上，CAPP系统应从实际出发，从工艺设计在工

序、特征形体层面或在全过程提供备选的工艺方案，并根据操作者的工作记录进行各种层次的自学习、自适应。

人工智能技术的发展，使CAPP的智能化成为可能，如何使CAPP系统自学习自适应是现代研究的重点。由于现阶段CAPP还只局限于与单一智能技术结合的研究，而且有的系统开发者过分追求自动化，把CAPP作为一种取代而不是帮助工艺设计人员的工具。针对这种情况有的学者提出了人机智能综合系统的说法，这是将多种智能技术如专家系统，模糊技术，遗传算法，人工神经网络等同时应用于CAPP系统的一种设想，它还有待进一步的研究。智能化研究在较长一段时间将继续保持在特定零件（如回转体、箱体、以及其它特征较明显的零件）、特定工艺（如某产品的焊接工艺、某零件的拉伸工艺、下料工艺等）、特定环境下（如某企业的加工中心、装配线等）的工艺智能生成。

## （2）工具化、工程化

各企业的工艺环境、管理模式千差万别，CAPP既要适应各企业的具体情况，又要控制针对具体企业的实施工作量、提高通用性，就需要加强CAPP系统的工具化和工程化。将CAPP系统的功能分解成一个个相对独立的工具，用户或软件公司的实施服务人员根据企业具体情况输入数据和知识，形成面向特定的制造和管理环境的CAPP系统；用户可以在实施服务人员指导下进行二次开发。在工程化方面，不加考虑地完全服从用户原有的环境和模式，去构建具体的CAPP系统并不完全合理，有必要根据对国家标准、国际标准和先进制造技术的分析，结合各类企业工艺的根本需求，引导企业的工艺活动，促进工艺活动的规范化，从而规范CAPP系统的实施过程。

## （3）集成化、网络化

CAPP是CAD与CAM之间的桥梁，是CAQ、PDM及ERP的重要产品信息来源，同时也需要由CAD提供产品设计模型的特征信息。这些系统的发展可以相对不平衡，但必须在并行工程思想的指导下实现CAPP与CAD、CAM等系统的全面集成，发挥CAPP在整个生产活动中的信息中枢和功能调节作用。这包括：与产品设计实现双向的信息交换与传送；与生产计划调度系统实现有效集成；与质量控制系统建立内在联系。集成化CAPP系统本身的开发方式有两种方向：一种是在原有的CAPP单元系统之上提供足够的接口，使其能与其它单元系统（如CAD、CAM、CAE、PDM、ERP）集成；另一种是在集成框架系统PDM系统之上构建CAPP系统。网络化是现代系统集成应用的必然要求，CAPP对内进行各种角色、工种的并行工艺设计，对外与CAD的双向数据交换，与CAQ、CAM、PDM等的集成应用都需要网络技术支撑<sup>[7]</sup>，才能实现企业级乃至更大范围的信息化。

## （4）交互式、渐进式

CAPP系统是用来帮助而不是取代工艺设计人员，实用、通用的CAPP工具系统不宜追求完全的自动化。操作者要有足够的工艺知识和判断能力，关键决策要由操作者做出。决策、判断对具备足够工艺判断能力的工艺人员来说不是很困难、很繁琐的工作；但对计算机而言可能难以胜任。知识库及其使用法则需要逐步建立、验证、完善，商品化的、基于知识的CAPP工具系统需要有目标、有计划的渐进式发展。

### 1.1.5 CAPP的应用现状与不足

#### 1.1.5.1 CAPP应用现状

在国外，一方面，CAPP单项技术研究仍然保持对“自动化”和“智能化”的追求，使CAPP与CAM更加紧密，进而与CAM融合，成为CAM的一部分。另一方面，CAPP技术的研究已经从面向零件的CAPP研究发展到面向产品、面向企业的工程规划研究。比较典型的例子就是Tecnomatix公司开发的eM. Planner，它是一个集制造过程的工艺建模、规划、分析、仿真为一体的软件系统。

在国内，CAPP技术的研究从20世纪80年代初开始，至今已有20多年的历史。研究人员除进行CAPP的“自动化”和“智能化”研究的同时，已逐步认识到CAPP工程研究的重要性和必要性，已开始了CAPP实用化、商品化的研究和开发。目前，国内商品化的CAPP软件大多是CAPP工具系统，这类系统强调工程化应用，不强调工艺的自动化，而将系统定位在“辅助工具”上，它着重解决工艺的快速输入和快速形成，强调工艺师在CAPP系统中的主导作用，降低工艺生成的自动化程度，这似乎是一种退化，但实际上是一种进步。这种系统便于在企业实际推广使用，它不受零件类型和加工环境的限制，只需通过一定的定制过程就可企业投入使用。

在应用上，经过多年的应用普及，我国制造业企业在CAD技术的应用方面已经取得了良好的效果，大部分企业甩掉了图板，相当比例的企业应用了三维设计软件。但是，在绝大多数企业中，工艺部门的计算机应用严重滞后于设计部门，许多企业还在使用手工进行设计，还有很多企业使用CAD软件或办公软件来“画”工艺卡片，另外一些企业，虽然通过与高校、科研单位合作，开发了专用的CAPP，但由于各种图形处理、与数据库结合以及实用性等原因，时至今日，也未能很好地应用CAPP，在应用过程中还存在着各种各样的问题。总结起来企业的应用可以分为如下几种情况：

(1) 大部分企业的工艺设计仍然采用手工设计的方式，CAPP的应用仍很少。较偏远地区的企业，特别是那些中小企业，CAPP的应用状况也不容乐观。

(2) 部分企业在计算机技术和CAD的应用较为普及以后，工艺设计成为企业的薄弱环节。有些企业自己在Word、Excel或AutoCAD上绘制出工艺卡片的空白表格，在此基础上进行工艺规程的设计。此种设计方式也是利用计算机进行辅助工艺设

计,因此也可称为CAPP,但此类CAPP所生成的工艺规程是以文本文件的形式存在的,企业无法对工艺数据进行有效地管理。

(3) 部分企业已充分认识到工艺设计的重要性,并购买了部分商品化的CAPP系统,但由于企业对CAPP的认识和系统选择上还存在一些误区和盲目性,因此CAPP的应用还不尽人意。

#### 1.1.5.2 CAPP的不足

总的看,CAPP的研究开发方向存在严重的偏差。从应用角度看,已取得的实际效益和投入的力量很不相称;国内外的重点研究方向和当前的实际需求相去甚远。可概括为以下几点<sup>[8]</sup>:

##### (1) CAPP应用范围缺乏应有的广度

目前绝大多数企业,CAPP的应用集中在机械加工工艺的设计。实际上,在制造企业中,产品在整个生命周期内的工艺设计通常涉及到产品装配工艺、机械加工工艺、锻造工艺、钣金冲压工艺、焊接工艺、表面热处理工艺和毛坯制造工艺等各类工艺设计。CAPP在企业中的应用缺乏广度。CAPP应从以零组件为主体对象的局部应用走向以整个产品为对象的全生命周期的应用,实现产品工艺设计与管理的一体化,建立企业级的工艺信息系统。

##### (2) CAPP应用水平还较浅

绝大部分企业CAPP的应用停留在工艺卡片的编辑、工艺信息的统计汇总、工艺流程和权限的管理与控制方面,有效地提高了工艺设计的效率和标准化水平,这是CAPP应用的基础。但CAPP应用的深度还不够,还不能有效地总结行业工艺“设计经验”和“设计知识”,从根本上解决企业有经验的工艺师匮乏的问题。目前通用的CAPP系统还无法实现对工艺知识的总结、积累和应用,如何提高CAPP系统的知识水平,实现CAPP的有限智能,是将来需要考虑的问题。

##### (3) 基于三维CAD的工艺设计与管理

随着三维CAD在国内制造业的广泛应用,三维CAD在不远的将来会成为我国企业产品设计的主流设计工具。设计手段变革,工艺设计也需要变革。现阶段CAPP的应用大多基于二维CAD,工艺如何与三维CAD进行集成,有待研究和突破。

##### (4) CAPP系统与其他应用系统的集成

工艺是设计和制造的桥梁,工艺数据是产品全生命周期中最重要的数据之一,工艺数据同时也是企业编排生产计划、制定采购计划、生产调度的重要基础数据,在企业的整个产品开发及生产中起着重要的作用。CAPP需要与企业的各种应用系统进行集成,包括CAD、PDM、ERP等。特别是与CAD系统的集成,如不能实现,就得在

工艺设计过程中重复输入设计零件信息，零件信息通过手工输入或用成组编码方式输入，会造成系统繁杂。

### (5) CAPP与PDM中的管理功能冲突

近年来，CAPP的功能不断扩展，一些CAPP系统逐渐增加了工艺管理的内容，包括权限管理、流程管理、更改管理，并在工艺部门得到了一些应用。另一方面，PDM的推广应用产生了一些不可忽视的问题：CAPP自身的管理功能和PDM的管理功能发生冲突。商品化的PDM系统本身提供了完善的权限管理、流程管理和任务管理等功能，因此CAPP的工艺管理功能与PDM中的管理功能发生了冲突和矛盾不仅导致企业在集成方面的困惑，也造成企业在信息化过程中的重复投资。

## 1.2 选题背景和课题内容

### 1.2.1 选题的背景和意义

综上所述可以看到，CAPP是CAD和CAM之间连接的纽带，相对于CAD和CAM，CAPP的发展比较落后<sup>[9]</sup>，特别是随着机械制造生产技术和当今市场对多品种、小批量生产的要求<sup>[10]</sup>，更需要工艺设计的快速化和灵活化。而传统的人工编制工艺方法不仅工作量大，而且设计工艺任务比较繁琐复杂，同时重复性劳动比较多易出错，产生的数据不容易被共享，因此CAD与CAM之间的沟通将会容易出现错误。随着计算机的发展，数据的共享和处理更加方便快捷，因此CAPP基于计算机可以满足工艺设计的要求，适应现在的机械制造生产趋势，不过现在的CAPP技术在适应和功能上与CAD、CAM仍有差距。未来CAPP技术将会向着与CAD、CAM集成方向发展，在初期时更多与二维CAD融合，而现在三维CAD的发展与普及将会促进CAPP与三维CAD结合。这一工作还有待进一步研究和突破。

在现在比较流行的CAD软件中，Solid Edge是一款应用较广泛的三维CAD软件。回转类零件和箱体类零件是常见的两类零件，这些零件特征规律性很强，易于总结利用。基于这些情况和上文所述CAPP的发展趋势与不足提出了此课题，旨在对CAPP技术进行探讨和研究。

### 1.2.2 课题的研究内容

本课题以回转类零件为研究对象，对基于Solid Edge二次开发的CAPP进行了研究。主要进行了以下几个方面的研究：

- (1) 研究了CAPP的发展情况及基于三维CAD的二次开发技术，进行了系统结构的分析、规划与设计。
- (2) 分析了回转类零件的涵盖范围及外形特征和零件的几何、工艺信息的表示及输

入方法。

- (3) 研究了 CAPP 系统的知识库模块、工艺决策模块，对相关工艺知识和数据进行了分析和整理，然后对这两个系统模块进行了详细的规划与设计。
- (4) 编制系统程序，以实现零件信息的输入、查询、更改、删除及工艺规则的建立和零件最终工艺的生成、输出。建立数据库，用来存储知识库的数据和零件加工工艺等信息。
- (5) 对系统进行测试和改进。

## 第二章 特征及回转类零件信息描述

### 2.1 特征

#### 2.1.1 特征的概念

在 20 世纪 60 年代由 Opitz、Simon、Spur 和 Stute 等人发展的 EXAPT 系统被看作是特征引入的先驱。EXAPT 系统是对 ROSS 发展的编程系统的扩展，用于计算机辅助 NC 编程。为了实现几何信息的处理，它提供了用于执行工艺性检查的功能。NC 程序编制可以通过定义宏指令实现，这些指令含有对给定的几何形状进行特有的加工，即包含所谓的“加工部位”。这样 EXAPT 的“加工部位”概念被认定为特征概念的起源<sup>[6]</sup>。后来在制造工艺过程设计方面应用了基于特征的概念，同时也引入到特征<sup>[23]</sup>识别技术。

在国际上，1985 年 Pratt 和 Wilson 引入形状特征作为设计元素的几何描述，实现了特征概念在计算机辅助设计中的应用。1991 年 Shah 在有关设计和工艺规划的一篇论文中对特征概念及应用进行了广泛的综述。1993-1994 年 PART 介绍了一个系统，被认为是第一个基于特征的 CAPP 系统，已经在商业上得到应用。1992-1994 年开发的飞机结构件 CAPP 系统是国内第一个基于特征的实用 CAD/CAPP/CAM 集成系统。

在发展过程中已经研制了许多用于各种场合的基于特征的系统，许多学者都对特征进行了定义。C. Hayes 和 P. Write 把特征定义为“被连续加工过程切除材料的形状”；S. S. Luby 和 J. K. Dixon 把特征定义为“一个几何实体，该实体和 CIMS 中的一个或多个功能相关”；Dixon 指出：“特征是具有形状和功能的双重属性的实体”；J. Shah 提出：“特征是一个形状，对于这类形状工程设计人员可附加一些工程特性、属性及可用于几何推理的知识”。

从设计的角度看，特征是用来设计产品的，所以把它们称之为设计特征。针对机械加工工艺过程设计来看，我们可以把零件特征定义为：机械零件上具有特定结构形状和特定工艺属性的几何外形域，它能够被确定的加工方法加工成形。

由于特征方法具有一系列的优点，所以它才被逐渐普及和商业化。首先采用特征方法在构造或改变产品模型上可以缩短时间，而且可以使系统的工作方式适用于用户的思维方式。此外还可以建立特征库存储零件的设计特征信息，以便供用户查询使用，同时这些存储的信息还可以提高研制产品的质量。

因此，作为信息的集成途径和方法，结合上述概念，特征的含义可以定义为：

特征=形状特征 $\cup$ 语义

即特征被定义为形状特征和/或语义。形状特征为不含语义内容的、按结构进行分类的几何元素。语义则包含了下列属性：作为静态信息的数据属性；确定特征行为的规则和方法；用于确定语义特征之间关联关系。

### 2.1.2 特征的分类

对零件的分类而言，由于零件特征表达零件的设计、制造等方面的信息，因而从零件的使用和制造方法等角度看，零件可以用以下几种特征类型来描述<sup>[11]</sup>。

#### (1) 形状特征

它是用来描述一定工程意义的几何形状信息。它是零件信息模型中最重要的特征信息，形状特征在其他非几何特征信息的载体，非几何特征信息作为属性或约束附加在形状特征的组成要素上。

形状特征可以分为主形状特征和辅助形状特征。主形状特征用于构造零件的总体形状结构；辅助形状特征用于对主特征的局部修饰，它依附于主特征上。

#### (2) 精度特征

这是用来描述几何形状和尺寸的许可变动量或误差。如零件的尺寸公差、几何公差、表面粗糙度等。精度特征有可细分为尺寸公差特征、形状公差特征、位置公差特征、表面粗糙度特征等。

#### (3) 材料特征

材料特征用于描述材料的类型与性能及热处理等信息。如材料的机械特性和材料处理方式。

#### (4) 装配特征

用于描述零件在装配过程中的需用的信息。

#### (5) 技术特征

用于描述零件在性能分析时所使用的信息，如有限元网格的划分等。

#### (6) 附加特征

这个特征用于表达一些与上述特征无关的零件的其他信息，如一些管理信息。

### 2.2 回转类零件

通常我们将机械加工零件分为回转类零件和箱体类零件及其他零件，回转类零件是以一个平面图绕一旋转轴旋转一圈即可生成主特征面的零件。回转类零件大体包括了轴类、套类、盘类等零件，这类零件大体是由回转棒料、回转锻件、回转

铸件加工而成。

轴类零件主要用于支撑传动零件如齿轮、带轮等，承受载荷、传递转矩以及保证装在轴上的回转精度<sup>[12]</sup>。轴类零件主要特点是轴的长度  $L$  要远大于直径  $D$ 。按其用途可分为光轴、阶梯轴、偏心轴和空心轴等。套筒类零件也是机械中常见的一种零件。这类零件用途也很广，如作为轴承、导向套、汽缸、液压缸等。它的主要特点是零件的主要表面为同轴度要求较高的内外旋转表面，零件壁的厚度较薄，其长度一般大于直径。盘类零件的特点是直径  $D$  一般大于长度  $L$ 。

通过研究我们可以发现回转类零件的表面特征具有一定的相似性，表面特征可以分为主特征和辅助特征，这里将主特征又分为外部主特征和内部主特征，主特征是指主要的外形表面，辅助特征则指依附于主特征之上的特征。具体的分法可以见下图 2-1。

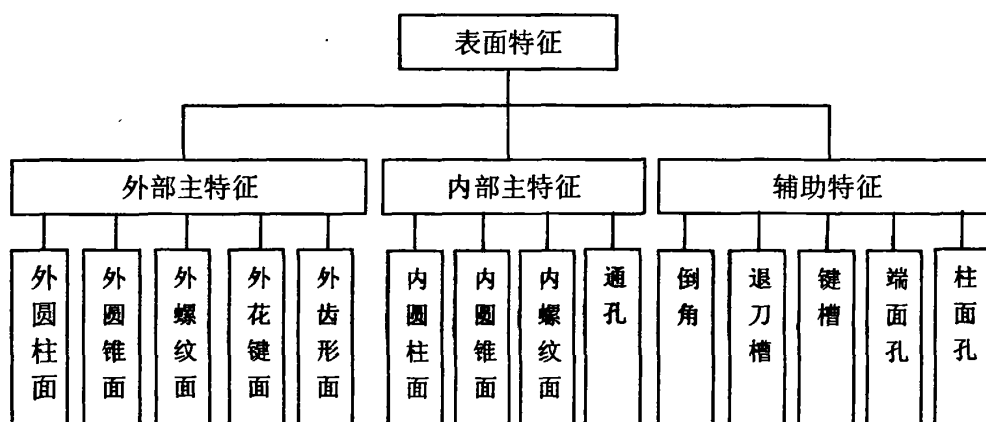


图 2-1 回转类零件外形特征分类

## 2.3 回转类零件特征描述内容

回转类零件可以通过上述外形特征进行描述，而如果进一步描述零件则需要零件的几何信息、工艺信息、材料信息、辅助特征等信息。外形特征不同，零件的几何、工艺等信息所包含的内容差别也很大。下面分别介绍：

(1) 外圆柱面 这类特征涵盖了零件的沿轴线长度、长度的上偏差、长度的下偏差、外圆柱面的初端直径、末端直径、公差等级、粗糙度、端面粗糙度、形位公差及倒角、退刀槽所包含的尺寸信息。

(2) 外圆锥面 这类特征同外圆柱面有一定的相似性，它涵盖了外圆柱面的全部信息，而且它还包括外圆的锥面角度。

(3) 外螺纹面 外螺纹面包括了沿轴线的长度及长度的上、下偏差，螺纹的公称直径、螺距、中径公差等级、顶径公差等级、粗糙度、端面粗糙度、形位公差及倒角、退刀槽的尺寸信息。

(4) 外花键面 这类特征包括花键的长度、花键的大径、小径、花键个数、花键宽度、公差等级、粗糙度、端面粗糙度及其它辅助特征的尺寸信息。

(5) 外齿形面 外齿形面包括了齿轮的长度（宽度）、齿轮模数、齿数、顶径、分度圆直径、公差等级、粗糙度、端面粗糙度及其它辅助特征的尺寸信息。

(6) 内圆柱面 它同外圆柱面的几何、工艺等信息相同，与外圆面的加工方法不同。

(7) 内圆锥面 内圆锥面的特征描述与外圆锥面相同。

(8) 内螺纹面 同外螺纹面的几何、工艺等信息相同，加工方法有所不同。

(9) 通孔 这类特征因其形状不同可能所包含的信息会有不同，不过一般包括通孔长度、公差等级、粗糙度、形位公差的或所含辅助特征的信息。

(10) 倒角 倒角特征一般包括倒角边长、角度或倒角半径（圆弧倒角）。

(11) 退刀槽 退刀槽特征包括退刀槽直径和宽度。

(12) 键槽 键槽的种类较多，如果不是圆键槽则包括键槽宽、槽宽的公差等级、键槽深、槽深的上下偏差、键槽长、槽长公差等级，如是圆键槽还需要圆槽直径等信息。

(13) 柱面孔 这类特征包含孔径、孔公差等级、孔的粗糙度等信息。

(14) 端面孔 这类特征包含孔径、孔公差等级、孔的粗糙度、孔的个数和孔的分布情况等

## 2.4 零件特征信息获取

零件信息包括了几何信息、工艺信息、材料信息等内容，零件工艺设计就是依靠这些信息加以组织来生成零件的加工过程<sup>[13]</sup>。同样利用计算机来辅助编制工艺也必须得到这些信息，零件信息描述是 CAPP 进行工艺决策的基础，因此 CAPP 生成加工工艺十分重要的一步是获取零件的信息。零件设计好以后，计算机并不能直接读取这些信息，也就无法生成工艺规程，如何描述零件并将其输入计算机转化为计算机能够识别的数据成为利用 CAPP 的首要任务和关键技术。因此需要合理的方法来描述零件。随着技术的发展和人们对 CAPP 的不断研究，零件信息描述的方法也在

不断发展。大体上包含两类：图纸信息的描述和 CAD 系统信息直接获取法。下面分别对这些方法进行介绍。

#### 2.4.1 图纸信息的描述<sup>[14][16]</sup>

##### (1) 零件分类编码描述法 (GT 法)

这种方法是用零件编码来描述零件的形状、尺寸、精度等信息。其中 CAM-I 系统和 GEN-PLAN 系统就采用了这种方法。GT 法是开发的最早，也是比较成熟的方法。其基本原理是预先编制一种代码，这些代码是基于零件的相似性，按零件的相似性把它们归类成组，然后用代码对零件图上的信息进行编码，并将 GT 码输入到计算机，这种 GT 码所表达的信息是计算机能够识别的。这种方法简单易行，比较适用于早期的检索式、派生式 CAPP 系统中。这种方法缺点是如果对零件的描述过于粗略，对零件的具体形状、尺寸及精度等无法描述得十分清楚，使得 CAPP 系统得不到足够的信息来详细、合理地进行工艺决策，而如果码位太长时则编码效率很低，容易出错。同时也不便于 CAPP 系统与 CAD 的直接连接，因此它不适合用于集成化的 CAPP 系统。比较成熟的编码系统有 OPITZ 分类编码系统、JCBM 编码系统、MICLASS 系统等。

##### (2) 零件形面特征描述法

零件形面特征描述法是将一个零件视为由若干个基本的形状特征所组成，并将这些特征分为主要形状特征、辅助形状特征。主要形状特征指一般零件上的主要构成和功能表面，如外圆、外锥面、外螺纹面、内孔面、内螺纹面等，辅助形状特征一般指依附于某一主要形状特征、改善零件加工工艺性的结构，如倒角、退刀槽等。零件可以看成是这些形面要素的任意组合，将其进行编码、并确定各要素的描述参数后，将组成零件的各个形状特征的信息按一定的顺序逐个输入到计算机中，输入过程由 CAPP 系统界面引导，并将这些信息按事先确定的数据结构进行组织，在计算机内部形成所谓的零件模型。即可得到比较准确完善的零件信息。零件形面特征描述法的优点在于：①机械零件上的表面元素与其加工方法是相对应的。因此，计算机可以以此为基础，推出零件由哪些表面特征组成，就能很方便地从工艺知识库中搜索出这些表面相对应的加工方法，从而推出整个零件的加工方法；②这些表面为尺寸、公差、粗糙度乃至热处理等的标注或描述提供了方便，从而为工序设计、尺寸链计算、以及工艺路线的合理安排提供了必要的信息。因此，这种方法在很多 CAPP 系统中得到了应用。不过这种输入方法相对比较繁琐，但对于回转体零件的描述比较成熟，对非转体的描述则有一定的难度。

##### (3) 图论描述法

图论描述法是用图论的基本原理来描述零件的结构形状。图是顶点和边的集

合, 即  $G_2\{V, E\}$ 。其中  $V=\{N_1, N_2, \dots\}$  是一组顶点,  $E=\{E_1, E_2, \dots\}$  是一组边, 有边相连的两顶点为邻接点。零件看成由表面或面积元素包围而成的三维物体, 通过用顶点表示零件的几何表面元素, 用边表示两个相邻表面的联结情况, 零件的结构就可以用图加以描述。每一条边上都有一相应的值表示该边相联的相邻表面元素之间的交角, 每个顶点表示的几何表面根据其所属的不同形状要素赋予不同的固定代码。这样, 零件的结构可用图加以描述。这种方法涉及到零件表面元素的分解, 对用户的技术要求高, 同时, 对复杂零件进行描述时, 其间的关联关系不易描述, 不能提供 CAPP 所需的全部工艺信息。因此, 这种方法适于结构比较简单、较规则的零件, 如回转体零件。

#### (4) 语言描述法

语言描述与输入法是开发一种计算机能识别的语言来对零件信息进行描述。用户首先用这种语言规定的词汇、语句和语法对零件信息进行描述, 然后由相应的计算机编译系统对描述结果进行编译, 形成计算机能够识别的零件信息代码。这种方法需要用户学习语言, 而且描述过程繁琐。

#### (5) 知识表示描述法

在人工智能领域, 零件信息实际上就是一种知识或对象, 所以原则上讲, 可用人工智能中的知识描述方法来描述零件信息, 甚至整个产品的信息。一些 CAPP 系统尝试了用框架表示法、产生式规则表示法和谓词逻辑表示法来描述零件信息, 这些方法为整个系统的智能化提供了良好的前提和基础。在实际应用中, 这种方法应与特征技术相结合, 而且知识的产生应是自动的或半自动的, 即应能直接将 CAD 系统输出的基于特征的零件信息自动转化为知识的表达形式, 这种知识表达方法才更有意义。

#### (6) 拓扑描述法

拓扑学是一种定量处理图形的拓扑不变性的几何学, 在拓扑学看来, 三维的零件包括有限数量的元素, 如点、线、面、体, 这些元素称为单元, 一个零件可以用一组单元来表示。这种方法可以详尽地描述零件的结构形状, 但对于 CAPP 系统来说用于工艺决策的零件几何信息不需如此详细, 且描述时也不方便, 同样不能提供 CAPP 所需的高层工艺信息, 故用得较少。

综合以上几种方法, 可以看出零件信息的获得都是经过人工对零件图纸进行识别和分析, 然后再输入, 这就造成对已经设计好的零件图进行二次输入。因为输入过程繁琐、费时, 且易出错, 有时甚至还不如手工编制工艺文件来的快, 所以在生产实际中, 有些工艺人员不大愿意使用这种方法。最理想的 CAD 系统进行零件设计的过程就是 CAPP 的零件信息输入过程, 从而避开了由于零件信息的重新描述和

输入所引出的问题。

## 2.4.2 CAD 系统信息直接获取法

### (1) 特征识别法

由于现有的 CAD 系统主要是基于几何和拓扑信息来定义零件,在用 CAD 绘图系统画好零件图后, CAD 系统会用一定格式的文件记录设计结果。这些文件所包含的一般是点、线、面以及它们之间的拓扑关系等底层的信息, 这些信息能够满足 CAD 系统进行产品或零件图的绘制, 但不能满足 CAPP 系统对零件信息的需求, 其输出的信息无法直接为 CAPP 系统使用。CAPP 所需要的是零件由哪些几何表面或形状特征组成, 以及这些特征的尺寸、公差、粗糙度等工艺信息。特征识别法就是要对 CAD 输出的结果进行分析, 按一定的算法识别、抽取出 CAPP 系统能识别的基于特征的工艺信息。其运算复杂, 并且无法提取 CAD 系统中不存在的工艺信息。

这种方法可以克服上述手工输入零件信息的不足, 实现零件信息向 CAPP、CAM 等系统的自动传输, 是一种非常理想的方法。但实践证明, 这种方法还是有局限性, 不能通用, 而且实现很困难。因此, 这项方法进展较慢, 此项研究只在较简单零件的识别上取得了一些进展, 在对复杂机械零件的自动识别上, 还有一定的困难。

这主要是存在以下几个难点:

- ① 一般的 CAD 系统都是以解析几何作为其绘图基础的, 其绘图的基本单元是点、线、面等要素, 其输出的结果一般是点、线、面以及它们之间的拓扑关系等底层信息。要从这些底层信息中抽取加工表面特征这样一些高层次的工艺信息非常困难。
- ② 在 CAD 的图形文件中, 没有诸如公差、粗糙度、表面热处理等工艺等信息。即使对这些信息进行了标注, 也很难抽取出这些信息, 把它们和它们所依附的加工表面联系在一起更困难。
- ③ 目前 CAD 系统种类繁多, 即使 CAPP 系统能够接受一种 CAD 系统输出的零件信息, 也不一定能接受其它 CAD 系统的输出的零件信息。CAD 系统的输出格式不但和绘图方式有关, 更重要的是与 CAD 系统内部对零件或产品的描述与表达方式, 即所谓的数据结构有关, 要向从根本上解决上述难点, 必须进一步探索, 来实现 CAD 与 CAPP, 乃至 CAD/CAPP/CAM 的全面集成。

### (2) 数据交换法

对于如何实现 CAD/CAM/CAPP 的集成, 最理想的方法是为产品建立一个完整的、语义一致的产品信息模型, 以满足产品生命周期各阶段(产品需求分析、工程设计、产品设计、加工、装配、测试、销售和售后服务)对产品信息的不同需要和保证对

产品信息理解的一致性,使得各应用领域(如 CAD、CAPP、CAM、CNC、MIS 等)可以直接从该模型抽取所需信息。数据交换法就是通过特定的数据接口或标准的数据形式进行不同应用系统间的数据交换,从而实现信息共享。这个模型是用通用的数据结构规范来实现的。显然,只要各 CAD 系统对产品或零件的描述符合这个数据规范,其输出的信息既包含了点、线、面以及它们之间的拓扑关系等底层的信息,又包含了几何形状特征以及加工和管理等方面的信息,那么 CAD 系统的输出结果就能被其下游工程,如 CAPP、CAM 等系统接收。

近年来出现了较多的数据交换标准,流行较广的是美国的 PDES、以及 ISO 的 STEP 产品定义数据交换标准,另外还有法国的 SET、美国的 IGES、德国的 VDAFS 等。图形交换标准 IGES 是针对产品的几何模型而定义,包含的主要是图形信息,没有产品材料、公差等方面的信息,不能满足 CAPP 系统的需要。STEP 则被广泛接受,这种标准代表了最新的产品模型数据交换标准,它的目的是建立一种不依赖于人工解释的、能为产品寿命周期各阶段的计算机辅助系统自动理解的完整的产品模型,在此基础上实现产品数据的自动交换。建立一个完整的产品数据模型,必须考虑和分析产品寿命周期各阶段的数据要求,是一项非常复杂和困难的工程。因此,STEP 本身也处于不断完善的发展过程之中。

### (3) 特征设计法

为了满足集成制造对 CAD 系统提出的新的信息需求,CAD 系统必须描述完整的产品模型,于是人们提出了特征造型技术,目的是通过零件特征设计将产品的几何和工艺信息紧密的联系起来,实现对零件的准确描述,建立基于特征的完整的统一的产品模型。这种方法一般是对二维绘图系统而言的。这种 CAD 系统的绘图基本单元是参数化的几何形状特征(或表面要素),如圆柱面、倒角、键槽等,而不是通常所用的点、线、面等要素。设计者采用这种系统绘图时,不是一条线一条线地进行绘制,而是按特征加以绘制,所以叫特征拼装。设计者在拼装各个特征的同时,即赋予了各个形状特征(或表面要素)的尺寸、公差、粗糙度等工艺信息,其输出的信息也是以这些形状特征为基础来进行组织的,所以 CAPP 系统能够接收这些信息进行处理。这种方法的关键是要建立基于特征的、统一的 CAD/CAPP/CAM 零件信息模型,并对特征进行总结分类,建立便于用户扩充与维护的特征类库。其次就是要解决特征编辑与图形编辑之间的关系、以及消隐等技术问题。目前这种方法已用于许多实用化 CAPP 系统中,被认为是一种比较有前途的方法。基于三维特征造型的零件信息描述与二维的特征设计法的基本原理和思路基本相同,只是在三维空间对零件进行特征造型比二维绘图难度更大,但这也是实现机械制造 CAD/CAPP/CAM 集成的一种趋势。目前这种技术也有所发展。

从以上分析可以看出 CAD 系统信息直接获取法是指直接从 CAD 中获得零件的信

息, 经过数据转换处理形成 CAPP 所需的几何、工艺信息, 这种方法可以节省大量的从图形到信息的转换工作, 真正、彻底地实现 CAD 与 CAPP 系统集成, 是 CAPP 获取零件信息的最理想的方法。不过由于实现这一目标而发展起来的特征识别技术、特征造型技术, 数据转换技术目前还不太成熟, 另一方面 CAPP 系统涉及的技术较多, 直接从 CAD 数据库提取有关的信息还是有一定的难度。因此, 获取 CAPP 系统所需零件信息的方法仍然有待进一步研究。本文考虑的是回转类零件, 相对于其它的零件获取方法零件形面特征描述法对回转类零件的描述较成熟, 能较合理、完善地提供 CAPP 工艺决策所需的零件几何、工艺信息, 所以这里采用了形面特征描述法来完成回转类零件的描述和输入。

### 第三章 系统的总体设计

利用 CAPP 的目的是通过计算机来辅助人们编制出零件的加工工艺。CAPP 系统编制工艺首先需要得到零件的工艺、形状信息，这是生成工艺的基础，而这些信息需要人为加入或从 CAD 系统中转换进去。下一步工作就是依靠这些信息来进行工艺过程的设计，这包含了零件的加工顺序、加工方法、基准选择及采用的机床、刀具、夹具和其它工艺装备。因此 CAPP 系统就需要拥有工艺决策功能来进行工艺推理、编制，同时还要存储大量的工艺知识像加工规则、机床、刀具等内容以方便工艺的设计和查询。对初步生成的工艺进行修改后，这样就完成了工艺的编制，然后通过 CAPP 系统就可输出工艺文件。从这个过程可以看出 CAPP 系统主要包含了零件信息的输入部分和工艺决策功能、知识库，本文以模块的形式来进行设计以实现上述功能。本文是基于 Solid Edge 而设计的，寄以希望达到减少工艺人员工作量，提高设计速度和质量的目的是。

#### 3.1 系统的输入模块

这个系统是基于回转类零件的，由于回转类零件相对简单，整个零件可以看成是若干个形体要素的集合，而且这些形体要素的几何形状较规则，规律性较强，因此输入较简单一些。

输入零件信息是 CAPP 的第一步，零件信息包含了几何、工艺信息，对零件信息描述的准确性、完整性、科学性将会决定所编制的工艺过程的质量、可行性和效率。因此输入信息模块的设计非常重要<sup>[16]</sup>，这要求对零件的信息输入需要满足<sup>[17]</sup>：信息描述完整性是指这些信息能够满足 CAPP 的需要，而不需要将全部的信息输入进去，过多的输入信息不仅浪费时间，而且可能造成 CAPP 系统缺乏灵活性；信息输入的界面友好，使用方便，输入的信息容易被计算机接受、处理；信息的描述要容易被工艺人员接受，便于操作；同时 CAPP 输入模块设计时要考虑到信息管理，以便于不同的工作人员对信息共享。

如何描述回转类零件，正如前文所述对零件的描述采用了零件形面特征描述法。形面特征描述法的具体操作步骤是首先把零件分为若干个最基本的表面特征要素，分别按一定的顺序进行描述。根据基本形面特征要素在构成零件几何形状中所处的地位高低和加工中的不同要求，结合零件，划分出主要特征和辅助形面特征然后通过编制的输入界面将信息逐次输入计算机为工艺决策做准备。这种方法可以对几乎固定不变的形面特征进行各种不同的组合，就可以描述多种不同的零件形状。对回转类零件来说是一种效率较高的方法。

在对零件进行形面特征的划分过程中，应结合具体的零件类型，尽量减少特征的数量，这样可以以较少的形面特征来组成较多的零件种类，即减少系统操作同时又增加了系统的通用性。因此在划分形面特征时不必追求过细过全的方案，否则反而会起不到很好的效果。

结合以上的介绍，在设计输入零件模块时，对于零件的形面特征也划分为主特征和辅助特征，主特征又细分为外部主特征和内部主特征，更详细的划分可见图 2-1。这里对于管理信息的输入单独用一个界面来实现，而零件外部主特征、内部主特征、辅助特征的信息输入分别用另外三个界面来实现。管理信息的输入界面与其它信息输入界面是有联系的，通过管理信息的输入界面可以打开外部主特征输入界面，由于内部主特征和辅助特征依附于外部主特征，所以通过外部主特征输入界面可以打开内部主特征输入界面和辅助特征输入界面。

在所有信息的输入界面，将各个形面特征所包含的具体信息名称显示在界面上（如外圆面的外圆直径），使人一目了然，操作人员可以在界面上这些信息名称后添加或选择数据即可完成信息的输入。管理信息包含的信息较多，这里仅涉及到零件图号、零件名称、材料、热处理等方面，将这些信息名称显示在界面上，同时将最大径向直径和最大轴向直径也添加到管理信息输入界面，便于以后信息的调用。

外部主特征包含了外圆面、外圆锥面、外螺纹面、外齿面、外花键面，这些特征形面所包含的具体信息内容（如尺寸信息、公差信息）可以参考第二章 2.3 节。在设计这个输入界面时，界面上添加“特征段号码”用来表示逐个输入的特征形面的次序。并且将所有的外部特征形面的具体信息名称随外部特征形面的名称列于界面上。这样完成了外部主特征输入界面的初步规划。

内部主特征输入界面和辅助特征输入界面的初步设计同外部主特征界面的思路是大体相同的。内部主特征包含内圆面、内锥面、内螺纹面、非圆通孔，辅助特征包含倒角、退刀槽、键槽、柱面孔、端面孔，由于将倒角和退刀槽的信息名称随外部主特征添加到了外部主特征输入界面，所以在辅助特征输入界面将不设置显示这两个辅助特征。

### 3.2 系统的知识库模块

零件的信息输入后，在工艺决策时需要大量的知识，这有必要建立知识库对其进行管理查询来满足 CAPP 系统需求<sup>[18]</sup>。在设计知识库时应考虑下列要求：尽量保证知识库的相对独立性；便于对知识的管理和维护；便于对知识的搜索。

知识库的具体实现上采用了两种形式：一种是采用了包含在系统程序中的知识模块；另一种则将知识处理后存储于数据库系统之中。知识库内容上大体包含了三

个方面：一是特征加工生成知识库，储存特征及其匹配工艺的规则；二是工艺参数选择知识库，储存机床、刀具和夹具等设备工装，以及切削参数和加工余量的选择规则；最后是工艺排序知识库，储存的是工序序列优化排列的准则。下面对知识库的三个方面的内容进行介绍。

### 3.2.1 与形状特征加工有关的知识

在第二章我们详细介绍了回转类零件的形状特征（可参考图2-1），形状特征不同，在表面的加工方法和工序的安排上有很大的区别。具体的加工方法<sup>[19]</sup>可见下列表所示。

表3-1 外圆面的加工方法

序号	加 工 方 法
1	粗车
2	粗车—半精车
3	粗车—半精车—精车
4	粗车—半精车—精车—滚压
5	粗车—半精车—磨削
6	粗车—半精车—粗磨—精磨
7	粗车—半精车—粗磨—精磨—超精加工
8	精车—半精车—精车—精细车
9	精车—半精车—粗磨—精磨—超精磨
10	粗车—半精车—粗磨—精磨—研磨

表3-2 螺纹的加工方法

序号	加 工 方 法
1	车螺纹
2	铣螺纹
3	铣螺纹—磨螺纹
4	铣螺纹—磨螺纹—研磨螺纹
5	攻螺纹（仅适于直径较小的内螺纹）
6	套螺纹（仅适于直径较小的外螺纹）

表3-3 齿形面的加工方法

序号	加 工 方 法
1	铣齿
2	插齿（滚齿）
3	插齿—磨齿
4	插齿—珩齿
5	插齿—研齿
6	滚齿
7	滚齿—剃齿
8	滚齿—剃齿—珩齿

表3-4 孔（内圆面）的加工方法

序号	加 工 方 法
1	钻
2	钻—铰
3	钻—粗铰—精铰
4	钻—扩
5	钻—扩—铰
6	钻—扩—粗铰—精铰
7	钻—扩—拉
8	粗镗
9	粗镗—精镗
10	粗镗—半粗镗—精镗
11	粗镗—半粗镗—磨孔
12	粗镗—半粗镗—粗磨—精磨
13	粗镗—半粗镗—粗镗—精细镗
14	粗镗—半粗镗—粗镗—精细镗—珩磨
15	钻—拉—珩磨
16	钻—铰—珩磨
17	钻—拉—研磨

另外，对于外花键而言常采用铣削的加工方法，当数量较少时可在卧式通用铣床上加工，当数量较大时可采用花键滚刀在花键铣床上用展成法加工，同时辅以对大径或小径和键侧面的磨削。如果是非圆通孔可以采用拉刀拉削的方法。键槽则采用铣削的加工方法。

### 3.2.2 与工艺设备、工艺参数选择有关的知识

这方面的知识包含了机床、刀具、夹具和工艺参数等知识。由于这些知识已经标准化、规范化，所以本文采用了将这些知识存储于数据库的形式。将这些数据存入数据库的数据表中，既便于输入也便于进行查询和升级或修改。下面通过部分数据表的建立和输入来介绍这方面的知识。

#### (1) 数据表的规划与设计

表3-5 车床数据表的设计

字段名称	数据类型	长度	允许空
名称	nvarchar	50	否
型号	char	10	否
最大加工直径	int	4	是
最大加工长度	numeric	9	是
圆度	numeric	9	是
圆柱度	char	50	是

表3-6 钻床数据表的设计

字段名称	数据类型	长度	允许空
名称	nvarchar	20	否
型号	char	10	否
最大钻孔直径	int	4	否
垂直度 (mm/mm长度)	char	50	是

表3-7 镗床数据表的设计

字段名称	数据类型	长度	允许空
名称	nvarchar	15	否
型号	char	10	否

最大加工直径	int	4	否
圆度	numeric	9	是
圆柱度	char	50	是
垂直度	char	50	是

表3-8 钻头数据表的设计

字段名称	数据类型	长度	允许空
名称	nvarchar	50	否
尺寸d	numeric	9	否
尺寸d1	numeric	9	否
尺寸l	numeric	9	否
尺寸l1	numeric	9	否

表3-9 铰刀数据表的设计

字段名称	数据类型	长度	允许空
名称	nvarchar	30	否
尺寸d	numeric	9	否
尺寸L	numeric	9	否
尺寸L1	numeric	9	否
尺寸a或d1	numeric	9	否
备注	nvarchar	50	是

表3-10 孔加工余量数据表的设计

字段名称	数据类型	长度	允许空
孔径	char	10	否
扩或镗	char	10	是
粗铰	char	10	是
精铰	char	10	是
磨削 孔长 $\leq 50$	numeric	9	是
磨削 孔长 $>50-100$	numeric	9	是
磨削 孔长 $>100-200$	numeric	9	是
磨削 孔长 $>200-300$	numeric	9	是

需要说明的是，对于一些数值型的数据字段，考虑到输入的不是一个数而是一个数字范围，所以建表时采用的数据类型是字符型。

## (2) 数据表的输入内容<sup>[20]</sup>

依据以上设计完成各个数据表的数据输入。可见下列各图。

名称	型号	最大加工直径	最大加工长度	圆度	圆柱度
卧式车床	CM6125	140	350	.01	0.01/100
卧式车床	C616	175	500	.01	0.01/100
卧式车床	C6132D	190	650	.01	0.01/100
卧式车床	CA6140	210	650	.01	0.01/100
卧式车床	CY6140	220	1000	.01	0.01/100
卧式车床	C6150	280	950	.01	0.01/100
卧式车床	CY6150	300	1000	.01	0.01/100
卧式车床	CA6150	300	900	.01	0.01/100
卧式车床	CA6161	370	1870	.01	0.01/100
卧式车床	C61125A	900	20000	.015	0.025/300
卧式车床	C61160	1250	16000	.02	0.04/300
落地车床	C6016A	1600	2000	.03	0.03/300
落地车床	C6020B	2000	2000	.03	0.03/300
落地车床	C6025A	2500	2500	.03	0.03/300
落地车床	C6063	6300	2500	.05	0.05/300
立式车床	C5112A	1250	1000	.015	0.03
立式车床	C5235	3500	2000	.025	0.05
转塔车床	C3110A	<NULL>	<NULL>	.007	0.007/300
转塔车床	C3116	50	50	.01	0.02/300
转塔车床	C336-1	100	400	.02	0.025/300
单轴纵切自动车床	C1012	12	25	<NULL>	<NULL>
单轴纵切自动车床	CM1107	7	50	<NULL>	<NULL>

图3-1 车床数据表内容显示

名称	型号	最大钻孔直径	垂直度(mm/mm)
立式钻床	Z518	18	0.1/100
立式钻床	5132A	32	0.1/100
立式钻床	Z525B	25	0.1/100
立式钻床	Z535	35	0.1/100
立式钻床	Z5140	40	0.1/100
立式钻床	Z5150	50	0.1/100
立式钻床	Z5163A	63	0.1/100
台式钻床	Z515	15	0.1/100
台式钻床	Z4002A	2	<NULL>
台式钻床	Z4006A	6	<NULL>
台式钻床	ZK546	6	<NULL>
摇臂钻床	Z3025	25	0.1/100
摇臂钻床	Z35A	50	0.1/100
摇臂钻床	Z3080*25	80	0.1/100
摇臂钻床	Z32K	25	0.1/100
摇臂钻床	Z33100	100	0.1/100
摇臂钻床	Z3140A	40	0.1/100
摇臂钻床	Z3540	40	0.1/100
平端面中心孔钻床	Z8204	3	0.1/100
平端面中心孔钻床	Z8210	6	0.1/100
平端面中心孔钻床	Z8220B	5	0.1/100

图3-2 钻床数据表内容显示

名称	型号	最大加工直径	圆度	圆柱度	垂直度
卧式镗床	T68	240	.02	0.02/200	0.05/300
卧式镗床	T611	240	.025	0.025/300	0.05/300
卧式镗床	T611H	240	.025	0.025/300	0.05/300
卧式镗床	T612	550	.025	0.025/300	0.05/300
卧式镗床	T6216A	1000	.025	0.025/300	0.05/300
卧式镗床	T6112	360	.025	0.025/300	0.05/300
卧式镗床	TP619	240	.02	0.02/200	0.05/300
深孔钻镗床	T2110	200	<NULL>	<NULL>	<NULL>
深孔钻镗床	T2140	200	<NULL>	<NULL>	<NULL>
坐标镗床	T4120B	32	<NULL>	<NULL>	<NULL>
坐标镗床	T4145	150	<NULL>	<NULL>	<NULL>
坐标镗床	T42100	250	<NULL>	<NULL>	<NULL>

图3-3 镗床数据表内容显示

名称	尺寸d	尺寸d1	尺寸l	尺寸l1
中心钻	1	3.15	31.5	1
中心钻	1.6	4	35.5	2.8
中心钻	2	5	40	3.3
中心钻	2.5	6.3	45	4.1
中心钻	3.15	8	50	4.9
中心钻	4	10	56	6.2
中心钻	6.3	16	71	9.2
中心钻	10	25	100	14.2
直柄小麻花钻	.2	<NULL>	19	2.5
直柄小麻花钻	.22	<NULL>	19	2.5
直柄小麻花钻	.28	<NULL>	19	3
直柄小麻花钻	.45	<NULL>	20	5
直柄小麻花钻	.52	<NULL>	22	6
直柄小麻花钻	.6	<NULL>	24	7
直柄小麻花钻	.65	<NULL>	26	8
直柄小麻花钻	.72	<NULL>	28	9
直柄小麻花钻	.85	<NULL>	30	10
直柄小麻花钻	.95	<NULL>	32	11
直柄小麻花钻	1.2	<NULL>	38	16
直柄短麻花钻	.5	<NULL>	20	3
直柄短麻花钻	1	<NULL>	26	6
直柄短麻花钻	2	<NULL>	38	12
直柄短麻花钻	3	<NULL>	46	18
直柄短麻花钻	4	<NULL>	55	22
直柄麻花钻	2	<NULL>	49	24
直柄麻花钻	3	<NULL>	61	33
直柄麻花钻	4	<NULL>	75	43
直柄麻花钻	5	<NULL>	86	52
直柄麻花钻	6	<NULL>	93	57
直柄麻花钻	7	<NULL>	109	69
直柄麻花钻	12	<NULL>	151	101
直柄麻花钻	20	<NULL>	205	140

图3-4 钻头数据表内容显示

名称	尺寸d	尺寸L	尺寸l1	尺寸a或d1	备注
手用铰刀	1	38	18	1.6	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
手用铰刀	1.2	40	21	1.6	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
手用铰刀	1.6	44	21	1.25	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
手用铰刀	2	50	25	1.6	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
手用铰刀	2.2	54	27	1.8	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
手用铰刀	3	62	31	2.24	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
手用铰刀	4	76	38	3.15	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
手用铰刀	5	87	44	4	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
手用铰刀	6	93	47	4.5	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
手用铰刀	8	115	58	6.3	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
手用铰刀	10	133	66	8	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
手用铰刀	20	201	100	18	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
手用铰刀	32	265	133	25	尺寸a为手用铰刀末端尺寸
直柄机用铰刀	1	30	8	2	<NULL>
直柄机用铰刀	2	49	11	2	<NULL>
直柄机用铰刀	4	75	19	4	<NULL>
直柄机用铰刀	6	93	26	5.6	<NULL>
直柄机用铰刀	10	133	38	10	<NULL>
锥柄机用铰刀	6	138	26	<NULL>	<NULL>
锥柄机用铰刀	8	156	33	<NULL>	<NULL>
锥柄机用铰刀	10	168	38	<NULL>	<NULL>
锥柄机用铰刀	20	228	60	<NULL>	<NULL>
锥柄机用铰刀	28	277	71	<NULL>	<NULL>
锥柄机用铰刀	32	317	77	<NULL>	<NULL>
锥柄机用铰刀	50	344	86	<NULL>	<NULL>
套式机用铰刀	25	45	32	13	<NULL>
套式机用铰刀	32	50	36	16	<NULL>
套式机用铰刀	45	63	45	22	<NULL>
套式机用铰刀	50	63	45	22	<NULL>
套式机用铰刀	63	80	56	32	<NULL>

图3-5 铰刀数据表内容显示

孔径	扩或铰	粗铰	精铰	磨削 孔长≤50	磨削 孔长>50-100	磨削 孔长>100-200	磨削 孔长>200-300
3-6	<NULL>	0.10	0.04	.2	<NULL>	<NULL>	<NULL>
×6-10	0.8-1	0.1-0.15	0.05	.2	<NULL>	<NULL>	<NULL>
>10-18	1-1.5	0.1-0.15	0.05	.2	.3	<NULL>	<NULL>
>18-30	1.5-2	0.15-0.2	0.06	.3	.3	.4	<NULL>
>30-50	1.5-2	0.2-0.3	0.08	.3	.3	.4	.4
>50-80	1.5-2	0.4-0.5	0.1	.4	.4	.4	.4
>80-120	1.5-2	0.5-0.7	0.15	.5	.5	.5	.5
>120-180	1.5-2	0.5-0.7	0.2	.6	.6	.6	.6

图3-6 孔加工余量数据表内容显示

3.2.3 与工序排序有关的知识

零件的机械加工工艺路线中包含切削加工工序、热处理工序、辅助工序，所以在编制工艺路线时要全面的把切削加工、热处理、辅助工序一块考虑，合理的安排

零件上各个表面加工的先后顺序，按次序排列出来。

### (1) 机械加工顺序的安排原则<sup>[21]</sup>

①基面先行原则 对于零件的精基准表面，应安排在起始工序先进行加工，以方便为下面的工序提供精基准。若零件的主要表面精加工之前，还必须安排对精基准进行修整。如果基准不统一，应按基准转换顺序逐步提高精度的原则来安排基准面加工。

②先粗后精原则 零件加工顺序是先安排粗加工，中间安排半精加工，最后安排精加工或光整加工。

③先主后次原则 指先安排主要表面加工，后安排次要表面的加工。主要表面是指装配表面、工作表面等。次要表面包括了键槽、紧固用的光孔或螺孔等。由于次要表面加工量少且又和主要表面有位置精度要求，因此一般放在主要表面半精加工结束后，最后精加工或光整加工之前完成。

④先面后孔原则 对于箱体、支架、连杆等工件应先加工平面后加工孔。因为平面的轮廓比较平整，安放和定位比较稳定可靠。若先加工平面，就能以平面定位加工孔，保证平面和孔的位置精度。此外，由于平面先加工完以后，对于平面的孔的加工也带来方便。

### (2) 零件热处理工序的安排

由于零件的材料和热处理的目的不同，所以热处理工序在工艺路线中的顺序安排也不同。

①预备热处理 这道工序一般安排在机械加工之前，它的主要目的是为了改善毛坯的切削性能，消除毛坯制造时的内应力。例如对于含碳量小于0.3%的碳钢，一般采用正火，来提高材料的硬度，使切削性能改善，不粘刀，表面较光滑；而含碳量大于0.3%的碳钢，一般采用退火，以降低硬度。调质处理能得到组织更细致、均匀的回火组织，能减小淬火时的变形，因此调质也用于预备热处理。对于铸铁、焊接毛坯常在机械加工之前，进行人工时效或退火处理以消除内应力。

②去除内应力处理 安排在粗加工之后，精加工之前。包括人工时效、退火和高温去应力等。一般精度的铸件在粗加工之后安排一次人工时效，消除铸造和粗加工时产生的内应力，减少后续加工的变形。要求精度高的铸件，则需在半精加工之后安排第二次人工时效处理，使加工精度稳定。对精度很高的零件，如丝杆、主轴等安排多次去应力处理。

③最终热处理 最终热处理是为了提高力学性能，如调质、淬火、液体碳氮共渗等都是最终热处理，应安排在精加工前后。变形较大的热处理，如渗碳淬火应该安排在精加工磨削之前，为的是在精加工磨削时纠正热处理变形；调质也安排在精

加工前。变形较小的热处理如渗碳，应安排在精加工之后。表面的装饰性镀层一般安排在零件精加工之后；电镀工序后的表面需进行抛光，以增加耐腐蚀。

### （3）辅助工序的安排

辅助工序的种类较多，包括了检验、去毛刺、倒棱、清洗、防锈等。这些工序也是很重要的工序，如果安排不当，将会给后续的工序或装配带来麻烦，影响产品的质量。比如，未去净的毛刺将影响装卡精度、测量精度；研磨后没清洗的工件会带入残存的砂粒，加剧工件的磨损。

检验工序对保证零件的质量具有极重要的作用，除了每道工序自检外，还要安排检验工序，通常安排在粗加工阶段结束后、粗精加工之间、重要工序加工前后、热处理工序前后、零件全部加工工序结束后、从一个车间到另一个车间前后。去除毛刺的方法机械切削、抛磨、手工去除等形式。手工去除一般紧接在每一切削工序后，机械去除在切削加工结束之后。有些特殊的检验，如探伤等检查工件的内部质量，一般安排在精加工阶段；而密封性检验则安排在工艺过程的最后。

### （4）工序集中和工序分散

工序集中就是将零件的加工集中在少数几道工序内完成。工序分散是指将零件的加工分散在较多的工序内进行。大批量生产，零件的结构较复杂，适于工序集中的原则。对一些结构简单的产品，也可以采用分散的原则。成批生产宜采用工序适当集中的原则，以便选择效率较高的机床，如多刀半自动车床。单件小批量生产适于工序集中的原则。

产品品种较多，又经常变换的情况下适于采用工序分散的原则。零件的加工质量、技术要求较高时一般采用工序分散的原则。如果零件的质量、尺寸较大，不易安装和运输的，应采用这种原则。

结合以上知识，针对工序排序在本文中形成了先加工外部特征而后内部特征，最后辅助特征的大体框架。在外部特征中由于这几个主特征都以外圆为基础加工而成，所以在安排外部特征加工时第一步应为“车削”。对于内部特征而言，内部主特征的几个特征面加工前都需要加工出初孔，因此在加工时需将“钻孔”或“镗孔”放在第一步。

## 3.3 系统的工艺决策模块

工艺决策模块是CAPP系统的核心部分<sup>[22]</sup>。传统的人工方法编制工艺方案，是依靠人的知识和经验，然后反复推敲完成工艺决策，制定出合理的工艺规程。对于CAPP系统而言由于类型不同，工艺决策的原理有很大的差别。在交互式的CAPP系统中，是依靠计算机提示主要由人完成这部分工作；派生式CAPP系统则通过检索相似零件

的工艺规程并加以修改完成这个零件的工艺规程编制工作，其工艺决策是由人和计算机共同完成；而在创成式和半创成式CAPP系统中，将人工所用的工艺决策方法和过程转化为计算机可处理的决策模型，通过CAPP系统进行工艺决策，可以完全或部分自动生成零件的工艺规程。

工艺决策模块的主要任务是在获得零件的几何、工艺信息之后，结合知识库中的内容来完成工艺规程的编制工作。工艺设计过程涵盖了加工方法选择、工序生成、工序排序、机床及其它工艺装备选择等多方面内容。本模块就是基于逻辑推理技术来研究工艺设计过程的。

工艺决策的过程是：

(1) 零件工艺分析 首先确认零件的类型和这个零件的各个表面特征，然后确定零件在具体环境下的可加工性和该零件每种表面特征的主要加工方法。

(2) 选择加工方法 机械零件可以看成有各种表面特征构成，这些特征必须通过加工方法来实现，所以加工方法的选择就是工艺设计的基础。每一种表面特征一般要经过不同的加工序列达到特征要求，所以加工方法的选择实际上是确定是加工序列。一个表面元素的加工序列可以表示为

$$S = \{P_1, f_1, P_2, f_2, \dots, P_n, f_n\}$$

这个式子表示从毛坯开始首先采用加工方法 $P_1$ 加工出中间形态 $f_1$ ，然后再用加工方法 $P_2$ 加工出中间形态 $f_2$ 直到采用最后的方法加工出最终的表面特征。通过加工方法选择所形成的加工序列称为特征加工链。

(3) 工序生成与排序 以所选择的各个表面特征的加工链为基础，综合考虑各特征表面的类型、加工方法等因素，确定哪些特征表面可以放在一起加工，从而可以形成零件的工序。这时的加工工序是无序的，需要考虑多方因素确定各个加工工序的先后顺序。

(4) 工序详细设计 在完成上述内容后还需要确定机床和其它工艺装备、加工余量等方面的内容，这样才完成了工序的全部设计。

本文主要是针对回转类零件的设计，相对于其它类型的零件，回转类零件结构简单，特征明显，所以在进行工艺决策时规律性较强。下面主要针对回转类零件的加工方法的选择进行介绍。

在长期的生产实践中，人们经过总结对一些典型的零件表面特征，如：外圆面、内孔面、螺纹面、平面等，针对这些特征的不同应用要求给出了相应的特征加工链。大多数CAPP系统设计和实际生产中，加工方法选择是根据零件表面要素的最终要

求，直接选择出加工要素表面的工序序列。

回转类零件加工方法选择的思路是通过给出零件表面加工方法的限定条件，利用这些限定条件与规则进行匹配，成功后即可得到表面特征的加工链。确定零件的加工链通常需要综合考虑以下几个方面的因素（限定条件）：工件所用材料的性质；各加工表面特征所要达到的精度、表面粗糙度、硬度等；零件的结构形状和加工特征的尺寸；生产数量（生产类型）。

利用逻辑推理技术实现工艺决策，需要大量以工艺设计原理和工艺经验为基础的决策规则。规则表示的一般形式为：if <前提或条件> then <结论或动作>。这种方法直观便于理解。如外圆特征，一条加工链选择规则可以表示为：

```

if      特征是外圆      and
        材料是钢        and
        6≤精度等级≤7    and
        0.4≤粗糙度≤0.8  and
then

```

选择加工链 精车—半精车—磨削

这些规则主要通过程序来实现的，编制不同特征的规则，利用CAPP系统就可以得出零件的全部加工方法。

## 第四章 系统的详细设计

### 4.1 系统开发环境介绍

本文是针对Solid Edge为平台而进行的开发,在进行系统设计过程中采用了VB作为开发语言,以SQL Server 2000 为系统知识库和临时数据的支撑系统。

#### 4.1.1 Solid Edge 二次开发技术

##### 4.1.1.1 Solid Edge 简介

Solid Edge 是美国UGS公司基于Windows平台开发的中端CAD软件包,它提供了强大的零件设计、钣金设计、装配设计、管道设计及二维工程图设计功能,这款软件易学且应用方便,工作效率很高<sup>[24]</sup>。

它的主要特点:基于Windows 操作系统平台开发的Solid Edge,兼容了所有Windows的优越性能,改善了工程设计的效率、降低了学习难度;Solid Edge建立在Parasolid 的造型内核上以增强工作性能,很容易和其它基于Parasolid 的CAD/CAM/CAE软件集成;Solid Edge支持从2D到3D的移植,同时其创新的帮助系统大大减少了学习难度;Solid Edge具有强大的工业装配设计能力,它支持设计者使用自顶向下或自下而上的装配设计模式;它能够自动生成爆炸图而保持装配结构和零件间的装配关系;它能够应用特殊的钣金制造行业的命令建立和展开完整的3D模型;Solid Edge还支持复杂塑料件和铸造件的工程设计;Solid Edge在装配设计环境里增加了直观的管道设计能力;Solid Edge具有新型流畅的产品工程图功能;Solid Edge的渲染工具可以使用户设计出真实的图片;Solid Edge内置与其它流行CAD系统格式交换的数据转换器,有助于与其它系统设计数据集成;Solid Edge应用程序接口完整,文件详尽,采用标准的Windows OLE 自动化和部件对象模式技术。应用程序接口使最终的用户和软件开发者能够以VB、VC++或其它标准程序将Solid Edge 用户化。

##### 4.1.1.2 ActiveX Automation 技术和 Solid Edge 的对象层次结构

Solid Edge 二次开发的编程工具通过使用ActiveX Automation技术使用户快速地自定义或自动操作Solid Edge。

###### (1) ActiveX Automation技术<sup>[24]</sup>

ActiveX Automation 是微软公司提出的基于COM的技术标准,它的原理是在Windows系统的统一管理下,协调不同的应用程序,允许这些程序之间相互沟通控制。

ActiveX Automation 技术通过在两个程序间安排对话，达到一个程序控制另一个程序的目的，不过这种对话双方不是平等的。其中一个作为客户程序(client)，另一个作为服务程序(Server)，客户程序是开始要求对话的应用程序，服务程序是响应Client 客户程序的应用程序。ActiveX Automation 的代码在Client上运行。

一个程序控制另一个程序的过程是：一个应用程序引发ActiveX Automation操作，这样这个应用程序称为Client，被其调用的程序称为Server<sup>[25][26]</sup>。Server收到对话后，决定暴露哪些对象给Client。在给定时刻由Client决定实际使用哪些对象。此后ActiveX Automation 命令被传给Server，由Server对命令做出反应。这里Solid Edge 被视为服务程序。

## (2) Solid Edge 的对象层次结构

对象之间一般通过被称为对象模型或者对象层次结构的形式互相联系。Solid Edge 的对象层次可以描述为自上而下的树结构<sup>[27]</sup>，其根节点对象通常是一个应用。Solid Edge包含了四种工作环境：零件、钣金、装配、工程图。下图可以表示Solid Edge 的对象层次结构。

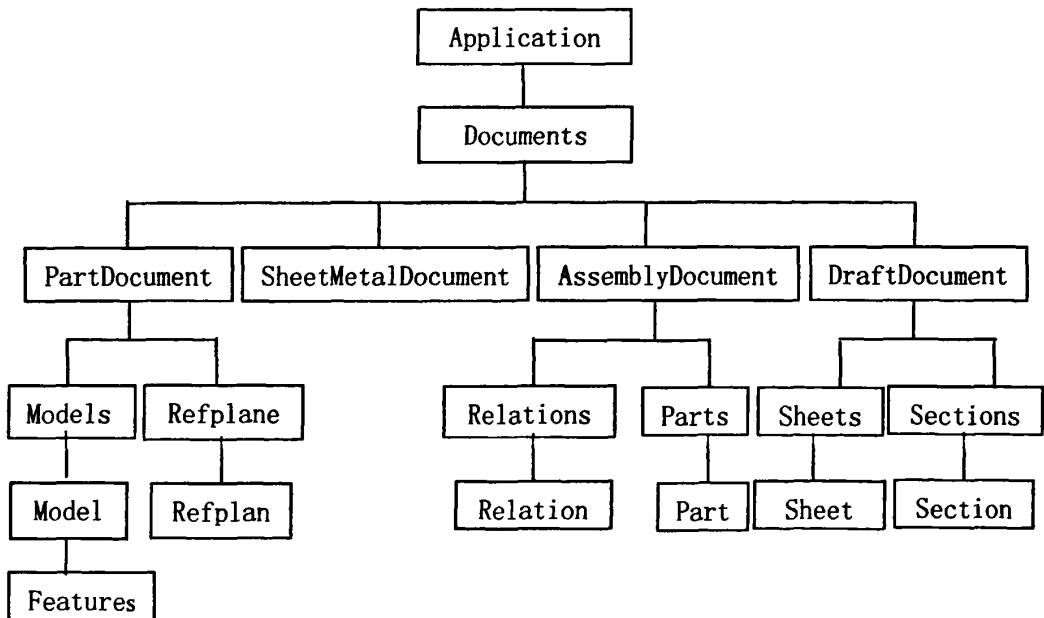


图4-1 Solid Edge 的对象层次结构

其中零件和钣金共用一个对象层次结构。在上图中，Application指的是Solid Edge 应用程序，Documents是一个集合对象，包含了上述所提到的四种工作环境，要访

问某一个环境时，首先必须得到它的文档对象。

#### 4.1.1.3 引用Solid Edge 类型库

当通过开发系统建立Solid Edge 开发程序时，首先在这个开发环境中引用Solid Edge中有关的数据库<sup>[28]</sup>。由于本文是采用VB为开发语言，所以必须在VB的环境中引用Solid Edge中有关的数据库，才能通过ActiveX Automation访问Solid Edge提供的主要对象。引用时打开Visual Basic 的集成环境，在“工程”菜单中选择“引用”命令，然后在弹出的对话框中勾选Solid Edge 类型库，点击“确定”即可。可参考下图。

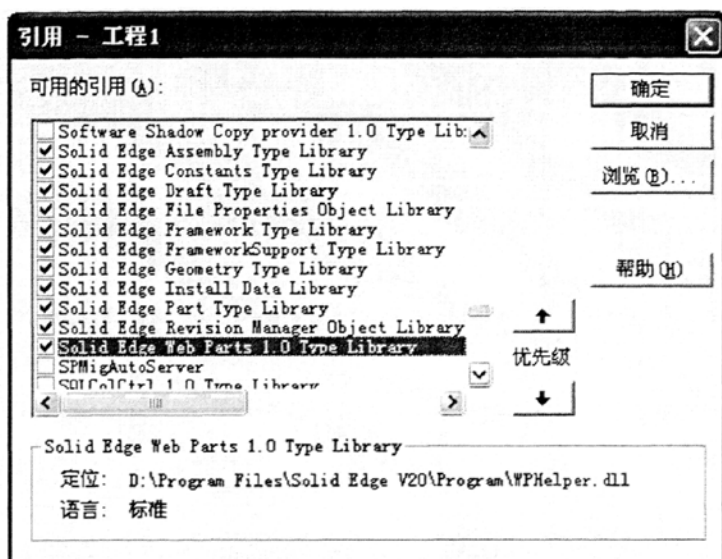


图4-2 引用Solid Edge类型库

以下是Solid Edge类型库介绍：

Solid Edge Assembly Type Library: 装配数据库 (assembly.tlb)

Solid Edge Constants Type Library: 常数类型库 (constant.tlb)

Solid Edge Draft Type Library: 制图类型库 (draft.tlb)

Solid Edge File Properties Object Library: 文件属性对象库 (propauto.dll)

Solid Edge Framework Type Library: 框架结构类型库 (framewrk.tlb)

Solid Edge FrameworkSupport Type Library: 框架结构支架类型库 (fwksupp.tlb)

Solid Edge Geometry Type Library: 几何类型库 (geometry.tlb)

Solid Edge Part Type Library: 零件和钣金类型库 (part.tlb)

Solid Edge Revision Manager Object Library:版本管理对象库 (revmgr.tlb) 选择“视图”菜单中的“对象浏览器”将会显示对象浏览器对话框，从中可以查看对象库、类型库、类、属性、方法，可以很清楚的看到对象之间的层次结构。

#### 4.1.1.4 从Visual Basic调用Solid Edge

利用VB为一个支持ActiveX Automation的应用程序进行编程开发时，需要和该应用程序进行通信。Solid Edge 提供的应用对象 (Application) 为实现这种通信提供了可能，程序通过该应用对象可以访问其下级的所有其它对象。Visual Basic 提供了两个函数调用Solid Edge: CreateObject和GetObject<sup>[29]</sup>。CreateObject方法用以新建Solid Edge应用对象的实例，而GetObject方法则既可以新建一个对象实例还可以连接到一个已存在的实例。在使用上面两个函数来驱动Solid Edge的应用时，必须使用文档集合的Add方法来建立一个文档对象。

#### 4.1.2 Visual Basic

Visual Basic是Microsoft公司开发的一套完全独立的Windows 应用程序开发系统，可用于开发Windows环境下的各类应用程序。Visual Basic是一种可视化、面向对象、采用事件驱动方式的结构化高级程序设计语言，开发效率高，功能十分强大，内容极其丰富，涉及许多方面，它既提供了用户界面的设计工具——控件，又提供了对各种对象实施多种操作——事件过程，而事件过程的发生是通过一段程序代码来完成的。利用 Visual Basic事件驱动的编程机制和可视化设计工具，Windows内部应用程序接口 (API) <sup>[30]</sup>函数，采用动态链接库 (DLL)、动态数据交换 (DDE)、对象链接嵌入 (OLE) 以及开放式数据库访问 (ODBC) 等技术，可以高效、快速地开发出Windows环境下功能强大、图形界面丰富的应用软件<sup>[31]</sup>。

Visual Basic在数据处理方面也表现出强有力的处理能力，它既可以通过文件形式来进行访问，又可以通过数据库形式进行访问，并且还提供了开放式数据库访问的功能 (ODBC) <sup>[32]</sup>，同时还可以使用SQL编程技术。

#### 4.1.3 SQL Server 2000

SQL Server 2000是Microsoft公司开发的采用SQL语言的关系型数据库管理系统，Windows 98、Windows NT与Windows 2000等窗口操作系统的全面支持的优越性得到用户的认可<sup>[33]</sup>。由于它是服务器级的数据库管理系统，因此，它起着后端数据库的角色，是所有数据的汇总与管理中心。

在设计和应用系统时，会用到大量的工艺数据、资源数据、临时数据，使得数据库除了需要存贮工艺数据外，还要大量的资源数据，以及其它一些数据，同时由于这些数据类型多样、结构复杂，而SQL Server 2000比较符合整个数据库设计的

需要，并能对系统的分布式拓展提供有力的支持，所以这里采用了SQL Server 2000作为后台数据管理工具。

## 4.2 系统设计

### 4.2.1 系统登录界面设计

在进行设计系统时，考虑通过登录界面进入主控界面，而后开始工艺设计，此界面可见下图

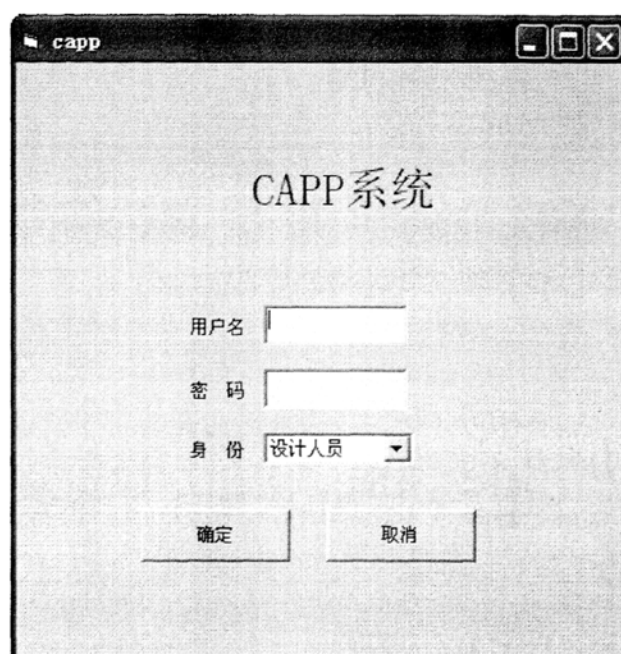


图4-3 CAPP的登录界面

从图中可见需填写的项目，其中身份设置了三个类别分别是：设计人员、校对人员、审核人员，针对这三个类别设置了不同的权限。在设计时，用户名、密码和身份是以捆绑的形式存储于数据库中。

建立的这个数据库名字为“用户”，然后在此数据库中建立数据表，可以将上述三项的具体内容存放在这个数据表里。这样当登录时，输入相关信息后点击“确定”，系统会从这个数据表中搜寻输入的相关信息，如果有即可进入主控界面。表的设计信息如表4-1。

表4-1 用户信息表设计

列名	数据类型	长度	允许空
userid	nvarchar	50	否
userpwd	char	50	否
usertype	int	4	否

系统之所以能够从数据库中搜索信息是因为设计系统时已与数据库可以建立了连接。本文建立与数据库的连接,首先是通过ODBC设置数据源<sup>[34]</sup>,然后通过ADO对象建立与所设置数据源的连接,部分代码如下:

```
Set gconn = New ADODB.Connection
Dim strconn As String
strconn= "Provider=MSDASQL.1;Persist Security Info=False;Extended _
Properties=DSN=用户;APP=Visual Basic;WSID=WEI;DATABASE=用户"
gconn.Open strconn
```

通过上述设置,即可实现与数据库的连接。详细的连接步骤将在下面内容中介绍。

#### 4.2.2 系统的主控界面

登陆界面上所填项目输入正确后,进入图4-4所示的主控界面。

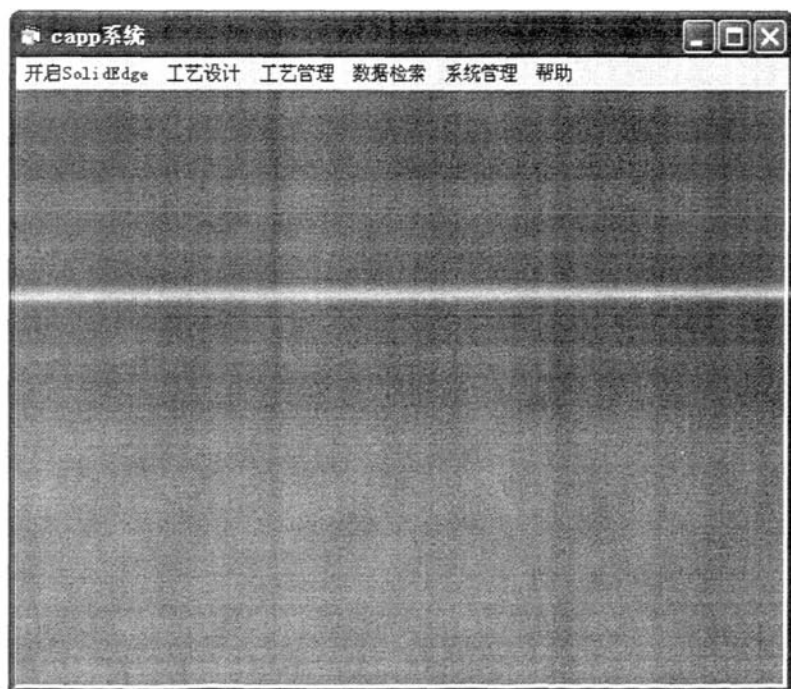


图4-4 系统的主控界面

从图中可以看到主控界面包括了开启SolidEdge、工艺设计、工艺管理、数据检索、系统管理和帮助菜单。

### (1) 开启SolidEdge

点击这个菜单就可进入Solid Edge系统。如何实现此功能，首先需要添加类型库，添加过程如图4-2。添加后，还需如下代码：

```
Dim objapp As SolidEdgeFramework.Application
Dim objdoc As SolidEdgePart.PartDocument
On Error Resume Next
'连接到已存在的实例
Set objapp = GetObject(, "SolidEdge.Application")
If Err Then '如果没有实例
Err.Clear
Set objapp = CreateObject("SolidEdge.Application") '创建新实例
Set objdoc = objapp.Documents.add("SolidEdge.PartDocument") '添加文档
objapp.Visible = True
Else
Set objdoc = objapp.ActiveDocument '激活当前文档
End If
Call objapp.Activate '激活应用
Set objapp = Nothing
Set objdoc = Nothing
```

系统进入Solid Edge系统后，可以进行零件的设计和信息的输入，其中信息的输入通过点击工具栏上的工具条“信息输入”来完成，如图4-5：



图4-5 信息输入工具条

信息输入工具条的实现是采用了直接在Solid Edge中运行VB 生成的命令的方法。生成信息输入工具条，第一步点击Solid Edge中“工具”菜单中“定制”，弹出图4-6定制对话框，选择工具条下类别框中的“宏”，然后点击“浏览”弹出选择宏目录窗体，从这个窗体中选择已生成的 .exe文件，点击“确定”。此时将定制对话框中的.exe文件拖至Solid Edge中适当位置，并从“定制按钮”中选择按钮图片，即可生成图4-5所示的工具条。

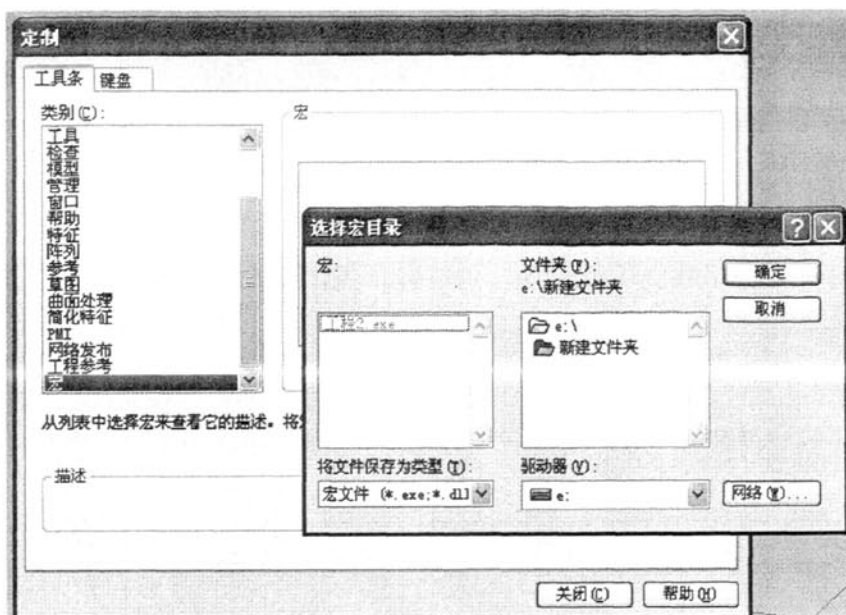


图4-6 定制对话框

信息输入工具条包含了多个零件信息的输入界面，这实际上就是第三章介绍的系统输入模块。输入模块的第一个输入界面（既管理信息输入界面）可见图4-7，通过这个界面可以打开其它的信息输入界面。

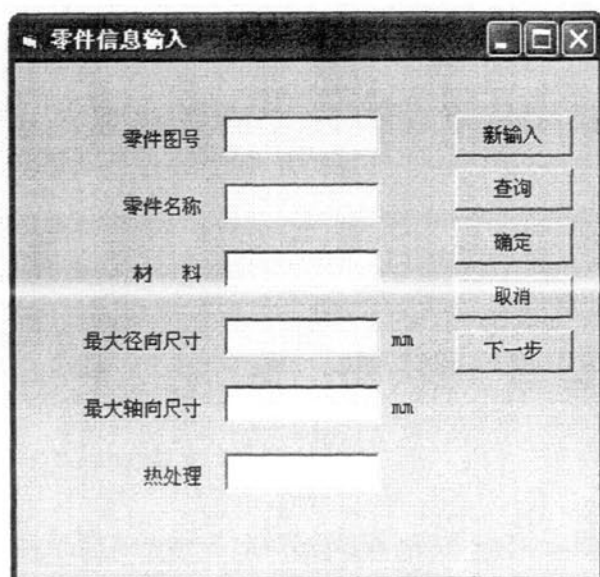


图4-7 信息输入界面

如上图所示, 这个界面中包含了多个按钮, 其中“新输入”命令按钮它的作用是完成清除数据库中已存储的信息的工作, “查询”按钮的作用是查询已存储的数据并将这些数据显示于此界面, “确定”按钮是把输入的信息存储于数据库中, 点击“下一步”按钮后就会弹出外部特征输入界面。

外部特征输入界面又包含了四个子输入界面, 这几个界面的详细情况可见图4-8~图4-11。

图4-8 外圆面

图4-9 外螺纹

从这些图中可以看到各个外部特征所需填写的项目, 对于倒角和退刀槽, 考虑它们信息不是很重要且过多的输入反而使系统复杂, 所以对这两项的信息只通过勾选表示有或没有。对于各子特征界面是通过选择外部特征输入界面上组合框中外特征的名称来显示的, 如从这个组合框中选“外圆面”, 外部特征输入界面显示情况如图4-8。而特征段号码会随着各个特征信息的保存而逐渐增加。

图4-10 外花键

图4-11 外齿形

如图，外部特征输入界面中“保存”按钮在开始时均不可用，是为了防止当数据库有数据，而再次启动系统后，可能造成特征段雷同的输入，导致无法生成工艺。当点击“新输入”按钮后，将会删除数据库中数据，此时“保存”按钮开启。点击“查询”按钮后，如果数据库中有数据将会显示在相应子界面上，连续点击数据会按照特征段号码从一逐次显示，点击至最后“保存”按钮也会开启，此时可继续输入。点击“辅助特征”和“内部特征”按钮，则这两个界面就会显示。这里将辅助特征依附于外部特征，

对于内部特征输入界面，可以见图4-12～图4-14，此界面上的组合框和命令与外部特征输入节面的使用方法类似。辅助特征输入界面见图4-15～图4-17，辅助特

内部特征输入

特征段号码: 1

内圆面

长度  mm

上偏差  mm

下偏差  mm

始端直径  mm

末端直径  mm

角度  度

表面公差等级

粗糙度   $\mu m$

倒角 ☐

形位公差:

圆度   $\mu m$

保存 取消

新输入 查询 外部特征

图4-12 内圆面

内部特征输入

特征段号码: 1

内螺纹面

长度  mm

公称直径  mm

螺距  mm

中径公差等级

顶径公差等级

粗糙度   $\mu m$

保存 取消

新输入 查询 外部特征

图4-13 内螺纹

内部特征输入

特征段号码: 1

非圆通孔

长度  mm

公差等级

粗糙度   $\mu m$

保存 取消

新输入 查询 外部特征

图4-14 非圆通面

征依附于外部特征，这样辅助特征输入界面中的特征段号码是与外部特征的特征段号码是一致的。当其特征段号码是零时“新输入”和“查询”按钮不可用，只有在外部特征输入后或经查询有数据时，这两个按钮方可用。

通过这些界面输入的信息全部储存在基于SQL Server 2000建立的数据库中，在这个数据库中又分别建立了十个数据表，数据表和上述各输入界面涉及到的特征相对应，使得数据相互独立，又通过统一的数据库实现联系，为最终的工艺设计做好了准备。

通过系统的这些界面进行信息输入和查询，必须和数据库建立连接，是通过ADO对象与ODBC数据源实现的。ODBC是微软公司开放服务结构中关于数据库的一个组成部分，可以理解为是一个数据接口，程序通过这个数据接口来操作数据库。首先打开“控制面板”中“管理工具”，点开“数据源”，从中选择合适的选项即可建立数据源。ADO对象是一种提供访问各种数据类型的连接机制<sup>[35]</sup>，ADO的引用必须通过“工程”菜单打开“引用”窗口，从这个窗体中选择“Microsoft ActiveX Data Objects

2.6 Library”项，单击的“确定”完成。最后通过ADO的Connection对象，在程序中编制连接字符串，可实现与数据库的连接。

辅助特征输入

特征段号码: 0

键槽

键槽宽  mm

槽宽公差等级

键槽深  mm

槽深上偏差  mm

槽深下偏差  mm

键槽长  mm

槽长公差等级

圆槽直径  mm

保存 取消

新输入 查询 外部特征

图4-15 键槽

辅助特征输入

特征段号码: 0

端面孔

个数

直径  mm

公差等级

粗糙度  μm

保存 取消

新输入 查询 外部特征

图4-16 柱面孔

辅助特征输入

特征段号码: 0

柱面孔

直径  mm

公差等级

粗糙度  μm

保存 取消

新输入 查询 外部特征

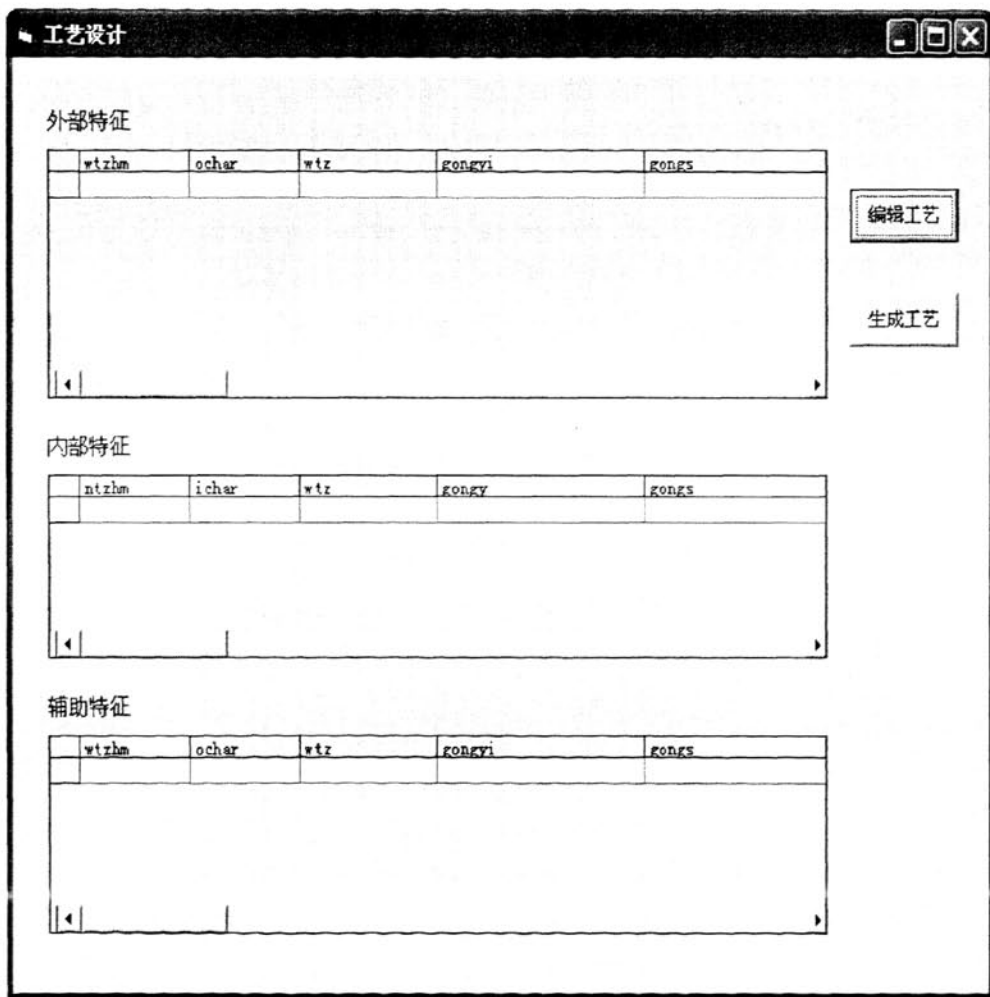
图4-17 端面孔

## (2) 工艺设计

“工艺设计”菜单里包含了“新工艺设计”、“工艺检索”、“退出”三个子菜单，其中“新工艺设计”的界面见图4-18。

此界面上“编辑工艺”按钮，是用来生成各个特征段的加工方法。点击来了这个按钮后，系统就开始从存储零件信息的数据表中查找信息，由系统初步生成各特征段的加工方法，然后按外部特征、内部特征、辅助特征将这些生成的加工方法存于三个已经设计好的数据表中，并可从界面上显示这些结果。

对于存放外部特征、辅助特征加工方法的表，它们的列“wtzhm”表示特征段



系统将已编制好的工艺规程存于计算机，当再次遇到相同或相近的零件时可通过工艺检索子菜单调出这些工艺规程，加以修改即可，省去了信息的输入，减少了工作量。

### (3) 数据检索

为了便于查找工艺设备和工艺数据，将这些数据存入数据库中，当需要时可通过数据检索菜单命令查找，点击左侧数据的名称即可在右侧表中显示出，具体情况如下图所示：



图4-19 数据检索界面

#### (4) 系统管理

系统管理菜单包括了“添加用户”和“更改密码”两个子菜单，点击这两个菜单命令，将会分别显出如图4-20和图4-21所示的界面。

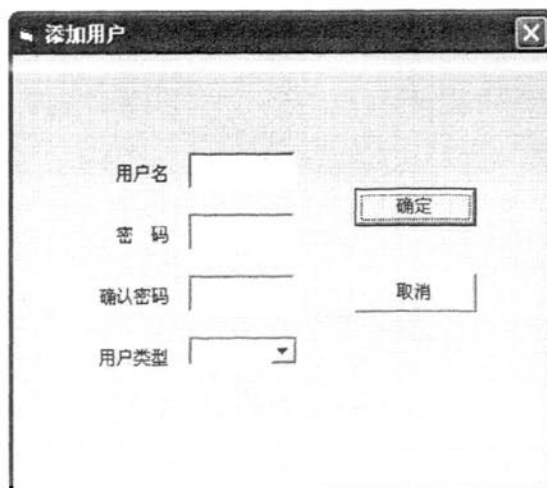


图4-20 添加用户界面

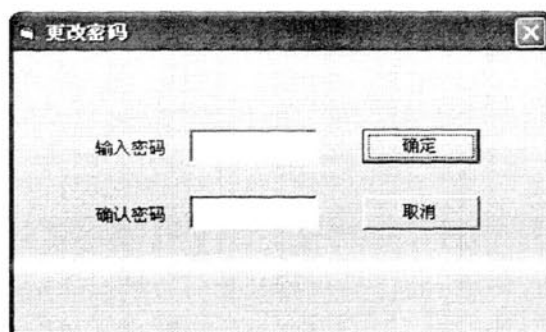


图4-21 更改密码界面

#### (5) 工艺管理

工艺管理菜单主要针对校对人员和审核人员使用，当工艺规程设计好以后，校对人员和审核人员可以调出这些编好的工艺规程，并对其进行校对或提出修改意见。

## 第五章 系统运行实例

本章将通过一个零件来介绍系统的实际应用情况。这个轴的材料为45钢，热处理采用正火，其它信息可见下图。

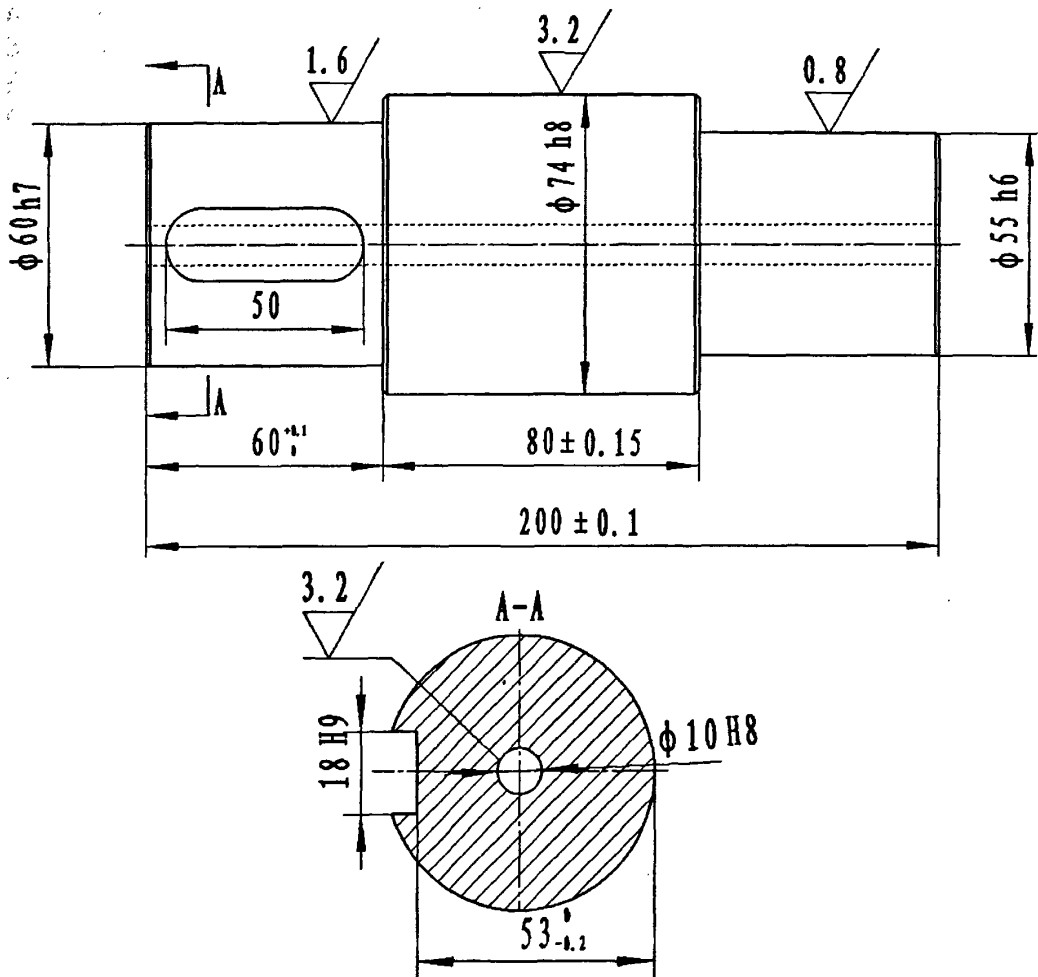


图5-1 轴结构简图

### 5.1 零件信息输入

从上图可以看到，这个轴有三个外部主特征、一个内部主特征和一个辅助特征。三个外部特征全部是外圆面，辅助特征键槽依附在第一个外圆面上，内圆面是一个通孔。在输入零件信息时，按照上图从左到右的顺序输入。首先由系统的登录界面

进入主控界面，然后点击“开启Solid Edge”，进入 Solid Edge 的实体环境，设计了该轴的三维视图5-2。

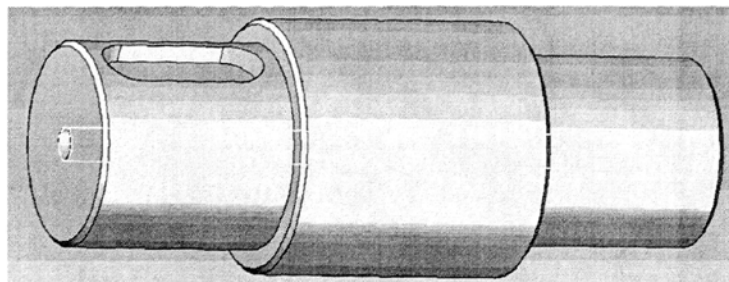


图5-2 轴的三维视图

然后点击图4-5上面的工具按钮“信息输入”，弹出图4-7，依次输入信息并保存。完成以上工作，点击下一步，进入图4-8依次输入此轴的外部信息，需说明的是在输入第一个外部信息后点击图4-8上“辅助特征”按钮弹出图4-15，此时图4-15上的特征段号码与图4-8上的特征段号码是一致的，都为“1”，并将键槽的信息输入保存。最后点击图4-8上的“内部特征”按钮，弹出图4-12，完成孔特征信息的输入。这样轴的信息输入完毕。

外部特征				
wtzhm	ochar	wtz	gongyi	gongs
▶ 1	0	外圆面	a1a3a2	粗车半精车精车外圆
2	0	外圆面	a1a3	粗车精车外圆
3	0	外圆面	a1a3a2	粗车半精车精车外圆
<div> <div>◀</div> <div></div> <div>▶</div> </div>				

内部特征				
ntzhm	ichar	wtz	gongyi	gongs
▶ 1	0	内圆面	e1e3	钻 铰孔
<div> <div>◀</div> <div></div> <div>▶</div> </div>				

辅助特征				
wtzhm	ochar	wtz	gongyi	gongs
▶ 1	0	键槽	j1	铣键槽

图5-3 轴的加工方法

5.2 零件工艺生成

轴的信息输入完后，也就具备了工艺生成的条件。点击主控界面上“工艺设计”菜单下的“新工艺设计”，弹出图4-18，点击“编辑工艺”，生成如图5-3所示的内容。点击“工艺生成”，弹出图5-4，其中设备是人为添加。

Microsoft Excel - 工艺模板													
文件(F) 编辑(E) 视图(V) 插入(I) 格式(O) 工具(T) 数据(D) 窗口(W) 帮助(H)													
S35													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	机械加工工艺过程卡							产品名称		零件名称	轴		
2								产品型号		零件图号	zhou01	材料	45
3	工序号	工序名称	工序内容							设备		刀量具	
4										名称	型号	名称	规格
5													
6	5	热处理	正火										
7													
8	10	粗车	粗车外圆Φ60 粗车外圆Φ74 粗车外圆Φ55 留余量							车床	CA6140		
9													
10	15	半精车	半精车外圆Φ60 半精车外圆Φ55 留余量							车床	CA6140		
11													
12	20	精车	精车外圆Φ60 精车外圆Φ74 精车外圆Φ55							车床	CA6140		
13													
14	25	钻孔	钻孔Φ10 留余量							车床	CA6140		
15													
16	30	铰孔	铰孔Φ10										
17													
18	35	铣槽	铣制键槽							铣床	X52		
19													
20	40	检验	零件检验										
21													
22													
23													
24													

图5-4 轴的加工工序

## 第六章 结论

随着现代化制造业的发展，CIMS成为一种发展趋势，而相对于CAD/CAM，CAPP的发展比较落后，这就使得研究发展CAPP成为必然要求，具有现实意义。特别是三维CAD逐渐被人们应用，与三维CAD的结合将会是未来发展方向之一，基于这种情况并通过学习参考国内外CAPP发展成果的基础上，对这一课题进行了研究，通过研究得到如下结论：

(1) 通过对相关文献的学习，建立了系统的总体结构，提出了以VB为开发语言和以SQL Server 2000 作为后台数据管理工具的总体设计方案。

(2) 零件的特征描述对工艺的设计起到关键作用，所以对特征的描述进行了详细的介绍，采用了形面特征描述法来描述特征，设计了基于Solid Edge的特征输入界面，便于特征信息的输入。

(3) 针对工艺数据的特点，设计了工艺数据的知识库，方便了数据的查询。由于这些知识库是建立在SQL Server 2000的基础之上，它与系统的程序是分离的，便于知识库的修改和更新。同时对于动态的信息，建立了存储信息的数据表并实现了系统工作界面与数据表的连接。

(4) 在总结零件加工技术的基础上，制定了相应的知识工艺规则，以实现特征加工方法的生成及零件工序的排序，使以往的加工经验得以继承。

CAPP系统涉及到的知识较多且由于时间紧和本人水平有限，所以系统在某些方面还有不足之处，需加以改进。这些方面包括：

(1) 本文的特征信息输入采用了手工输入的方法，虽然这种方法针对回转类零件较合理，但是仍造成信息的二次输入，使应用人员工作量加大。因此最合理的方法是直接从CAD系统中直接读取特征信息，在这方面还需进一步研究。

(2) 系统所建立的工艺数据知识库需要逐步完善，这里只设计了本系统常用到的数据知识库，要增加知识库量并且考虑以后添加某些数据的示意图，方便查询和理解。

(3) 在加工方法选择和工序的排序方面，要进一步完善使系统更具灵活性和柔性化，生成的工艺更合理。

(4) 本文的工艺设备选择上是人工添加，考虑以后可以由系统添加而且系统可以进行结果的评判。进一步完善系统在教育上的某些细节方面。

## 参 考 文 献

- [1]曾芬芳,严晓光.CAPP的现状与发展趋势.机械制造与自动化,2004,33(3):12~14
- [2]赵汝嘉,孙波.计算机辅助工艺设计.北京:机械工业出版社,2003.4~5
- [3]赵良才.计算机辅助工艺设计.北京:机械工业出版社,1994.6~7
- [4]陈永府,王峰,朱林,等.CAPP发展趋势及面临的问题.计算机工程与设计,2004,25(5):776~781
- [5]张振明,许建新,贾晓亮,等.现代CAPP技术与应用.西安:西北工业大学出版社,2003.4~5
- [6]褚学宁,王治森,马登,等.CAPP技术的智能化发展思路.中国机械工程,2003,14(23):2062~2065
- [7]许建新,邹明政,孔宪光,贾晓亮.现代CAPP技术及其发展研究.制造业自动化,2004,26(9):48-51
- [8]彭义兵,马辉民,陈万领.CAPP深化应用存在的问题及发展趋势.CAD/CAM与制造业信息化,2006,(2):20-21
- [9] Hong-Seok Park, Van-Sy Le, Gyu-Bong Lee. An Integrated CAD-CAPP-CAM System for Machining Mold Die With Optimal Cutting Parameters. School of Mechanical and Automotive Engineering, 2006:344-347
- [10] JIA Xiao-liang, ZHANG Zhen-ming, XU Jian-xin, HUANG Nai-kang. The Research and Application on Hybrid Intelligent CAPP System Based on Object-oriented Model Driving. Institute of CAPP & Manufacturing Engineering Software, 2003:907-911
- [11]夏翔.基于特征的轴类零件CAPP系统的研究与探索:[硕士学位论文].长沙:中南林学院,2005
- [12]李硕,栗新.机械制造基础.北京:国防工业出版社,2006.144~145
- [13]J. Huang ,T. I. van Niekerk, D. Hattingh ,E. F. du Preez. Computer-Aided Process Planning - An Object Oriented Structure. Manufacturing Technology Research Centre, 1999:531-536
- [14]戴同.CAD/CAPP/CAM基本教程.北京:机械工业出版社,1996.85~89
- [15]罗学科.计算机辅助制造.北京:化学工业出版社,2001.56~60
- [16]李浩平,方子帆,李峰.回转类零件HZCAPP专家系统.机械设计与制造,2005,(11):71~72
- [17]周善征.基于标准化回转类零件CAPP系统设计:[硕士学位论文].济南:山东大学,2006
- [18]王志红.面向CAPP的智能工艺决策方法研究:[硕士学位论文].成都:电子科技大学,2005

- [19]王宏宇. 机械制造工艺基础. 北京: 化学工业出版社, 2007. 135~137
- [20]李洪. 机械加工工艺手册. 北京: 北京出版社, 1990. 861~1129
- [21]张斌. 基于特征的回转体零件CAD/CAPP应用研究: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2006
- [22]王大康. 计算机辅助设计及制造技术. 北京: 机械工业出版社, 2005. 112~113
- [23]Hyun Chan Lee, Won Chul Jhee, Hee-Sok Park. Generative CAPP through projective feature recognition. Computers & Industrial Engineering, September 2007, 53 (2) : 241-246
- [24]彭颖红. Solid Edge Visual Basic 开发入门. 北京: 科学出版社, 2001. 36~37
- [25]尹辉俊, 徐武彬. 对Solid Edge进行二次开发的探索. 机械制造, 2003, 4(462): 20-22
- [26]张铁, 王小强. 基于Solid Edge二次开发的三维参数化注射模常用零件库. 模具工业, 2004, (8):13-15.
- [27]赵长宽, 姬彦巧. Solid Edge 中属性块定义技术. 计算机工程与设计, 2006, 27(23): 4540-4546
- [28]邱爱红, 聂松辉. Solid Edge中标准件的二次开发方法. 机械设计与制造, 2003, (6):26-28
- [29]沈晓玲. 基于VB的Solid Edge参数化设计二次开发. 现代制造工程, 2005, (5): 55~56
- [30]邱彦杰, 王晶晶, 解国宏, 高崇晖, 周雄辉. 基于Solid Edge的集成化CAD/CAPP系统开发. 模具技术, 2005, (6):47-51
- [31]肖翎. Visual Basic 6.0 及其应用. 上海: 复旦大学出版社, 2002. 13
- [32]姚巍. Visual Basic 数据库开发从入门到精通. 北京: 人民邮电出版社, 2006. 239~240
- [33]王宏, 李冬. SQL Server 2000数据库管理. 北京: 人民邮电出版社, 2004. 9
- [34]求是科技. Visual Basic 6.0 数据库开发技术与工程实践. 北京: 人民邮电出版社, 2004. 46
- [35]刘韬. Visual Basic 6.0 数据库系统开发实例导航. 北京: 人民邮电出版社, 2002. 11~12

## 致 谢

本论文是在导师杨晓红副教授的悉心指导下完成的。从论文的选题、论文的设计和论文的编排，无不倾注了导师大量的心血和汗水。导师渊博的知识、严谨的治学态度、一丝不苟的工作作风、高度的责任心给我留下了深刻的印象，是我学习的楷模。在攻读硕士期间，无论是学习上还是生活上老师都给予了热忱的关怀和帮助，特别是论文期间导师为我提供了良好的科研条件和宽松自由的学习环境。在此论文完成之际，谨向老师表示诚挚的敬意和衷心的感谢！

## 在学期间发表的学术论文和参加科研情况

- [1]杨晓红, 刘建伟. 模糊综合评判技术在 CAPP 中的应用. 机床与液压, 2009, 已录用