

面向敏捷制造的使能技术研究和应用

摘 要

当前，市场竞争日益加剧。为了在竞争中占据有利的地位，企业必须对动态变化和难以预测的市场需求作出快速响应。本文为了提高企业的产品快速能力，研究面向敏捷制造的使能技术，进行集成反求工程系统的研究开发，其包括数据采集与处理、模型重构、产品制造等子系统。

1. 数据采集与处理。比较了常用的数据获取方法，分析了数据采集设备和策略，阐述了数据对齐、平滑、精简及分割等点云数据预处理的技术流程。
2. 模型的三维实体重构。首先阐述了基于三角 Bezier 曲面、B 样条和 NURBS 曲面的曲面模型重构的理论。其次讨论了基于特征的反求建模技术，给出了基于曲面特征和基于截面特征的反求工程建模策略。然后分析了 RE/CAD 复合实体建模的关键技术，提出了一种基于点云切片的截面特征线提取建模方法，避免了大规模散乱点云的复杂三角化计算，提高了建模效率，减少了重构误差。最后对反求模型的质量评价进行了分析。
3. 基于反求工程的产品制造。对快速原型与快速模具制造技术的原

理及过程、数控加工工艺优化进行了论述。

4. 工程应用实例。利用研究的集成反求工程系统，在Imageware和UGII软件平台环境下，对一个汽车阀体的反求工程实体建模进行具体的工程应用研究，并通过快速原型和快速模具制造装备及其数控机床进行了产品制造，证实了系统的有效性和可行性，达到了要求的精度和效率，可进一步研究加以改进应用。

关键词：敏捷制造，反求工程，模型重构，快速原型，快速模具，
数控加工

THE STUDY AND APPLICATION OF ENABLING TECHNOLOGY FOR AGILE MANUFACTURING

ABSTRACT

Presently, the market competition intensifies day by day. Enterprises must respond rapidly to the changing and uncertain market in order to overcome their competitors. Aimed to improve enterprises' ability in the rapid development of new products, this dissertation studied a kind of integrated system of reverse engineering, including data acquisition and processing sub-system, model reconstruction sub-system and product manufacturing sub-system, for enabling technology of agile manufacturing.

It compared the methods of usual data acquisition, analyzed the equipments and tactics of data acquisition, discussed the technology of point cloud data preprocessing about data registration, smoothness, reduction and segmentation in the chapter of data acquisition and processing.

In the chapter of model reconstruction, surface reconstruction based on triangular Bezier surface, B-spline and NURBS surface was introduced. The reverse modeling technique based on the feature of surface or section was discussed next. Then the key technology of

RE/CAD combined solid modeling was analyzed. A new modeling method about the extracting of section feature line based on point cloud cross section was proposed, which can avoid the complex triangular factor calculation of large-scale confused point cloud, improve the efficiency of modeling and reduce the error of reconstruction. Lastly the quality evaluation of reverse model was analyzed.

The theory and process of rapid prototyping and rapid tooling, the technology optimization of numerical control machining were discussed in the chapter of product manufacturing based on reverse engineering.

In the chapter of engineering application, the reverse engineering solid modeling of an automobile valve based on the Imageware and UGII software was completed, the objects were then manufactured using rapid prototyping, rapid tooling and numerical control machining technique. The experiments prove the validity and feasibility of the system, the precision and efficiency attain to the demand already, and the system can be modified and applied.

KEY WORD: agile manufacturing, reverse engineering, model reconstruction, rapid prototyping, rapid tooling, numerical control machining

东华大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名: 徐建华
日期: 2007年3月15日

东华大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权东华大学可以将本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和汇编本学位论文。

保密 ，在 ____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 。

学位论文作者签名: 徐建华

指导教师签名: 张家梁

日期: 2007年3月15日

日期: 2007年3月15日

第一章 绪论

计算机技术及网络技术的广泛应用与发展，打破了原有的时空界限与观念，使信息的传输量与传输速度大幅度提高，市场也从地方行业的小市场变成全球的跨行业的大市场。一方面市场趋向全球化，竞争加剧；另一方面需求主导市场，并向个性化方向发展。市场需求的多样化，使得商务环境和制造模式发生了根本性的转变，以生产规模(50, 60年代)、生产成本(70年代)和产品质量(80年代)为竞争手段的传统制造战略向着以快速市场响应为竞争手段的新的制造战略转移，在这种情况下，如何敏捷地采用可利用的知识和技术，快速开发新产品，重组资源，组织生产，满足用户“个性化产品”的需要，就成为企业能否赢得竞争、不断发展的关键。

1.1 敏捷制造使能技术

20世纪70年代，由于美国在制造业方面战略和战术上的失误，使得美国的制造业严重地衰退，经济情况空前滑坡。而日本及欧洲各国积极参与国际市场的激烈竞争，导致美国在整个国际市场中占有的份额急剧下降。为了夺回在制造业上的优势，1991年美国国会提出了重振美国制造业雄风的目标，并委托里海(Lehigh)大学联合美国13家大公司的高级行政、技术总裁和著名专家，经过半年多的艰苦工作，前后耗资50万美元，完成了著名的“21世纪制造业发展战略”报告。该报告在对社会发展趋势的深刻剖析后，指出了制造业的方向，提出了敏捷制造(Agile Manufacturing)的概念和哲理，描绘了一个崭新的工业生产模式—全球化敏捷制造模式。该报告在世界范围内引起了强烈反响^[1,2]。

敏捷制造的核心是敏捷性，它是企业在不断变化、不可预测的经营环境中善于应变的能力，是企业在市场中生存和领先能力的综合表现，具体表现在产品的需求、设计和制造上具有敏捷性。其核心竞争力包括

市场响应能力、产品开发能力和资源利用能力^[3]。

敏捷制造的总体技术^[4]包括敏捷制造方法论和敏捷制造综合基础，如图1-1所示。敏捷制造方法论是为正确理解敏捷制造哲理、正确考察、分析和描述敏捷制造系统、正确开发和实施敏捷制造系统而提出的一套完整的、开放的方法体系。敏捷制造综合基础为敏捷制造方法论提供了全方位的支持环境、技术与工具等。

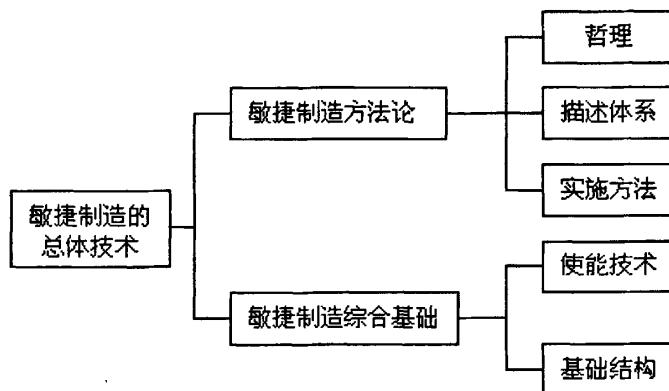


图 1-1 敏捷制造的总体技术

敏捷制造使能技术(Enabling Technology for Agile Manufacturing, ETAM)是指实施敏捷制造的必要技术和工具，可以归纳为敏捷制造信息服务技术、敏捷管理技术、敏捷设计技术、可重组和可重用的制造技术四类，这些技术都是基础技术的综合，是敏捷制造的基础。敏捷制造使能技术通常是共性和单项技术，是面向某一类问题而发展起来的，因此适用面广、影响大。敏捷制造的使能技术为制造企业经营生产与管理提供使能服务，在企业生产业务活动的不同阶段发挥作用，其突破通常能大幅度提升企业的敏捷性和竞争力。敏捷制造的使能技术是开放的，可以不断扩大和完善。

1995年11月美国正式发布了敏捷制造使能技术战略发展计划(Technologies Enabling Agile Manufacturing Strategic plan, TEAM)。TEAM计划的主要内容有：

- (1) 产品并行设计 面向制造能力和供应能力的设计工具；
- (2) 制造计划和控制 集成的产品制造过程，用于制造计划和车间

控制过程的快速迭代的自动化工具；用于过程和资源的最优化的宏观和微观计划器；

(3) 虚拟制造 用于制造过程的集成模拟和建模工具；产品加工前的过程优化；

(4) 智能闭环过程 强化制造过程控制；用于关键过程的开放式结构的控制器和算法。

此外，在其他国家也开展了大量敏捷制造的研究。90年代，日本提出一个名为“智能制造系统(Intelligent Manufacturing System, IMS)”的国际性研究计划，在完成了可行性分析并确定组织结构后，于1995年正式起动。德国、法国和英国也都参加了一项主题为“未来的工厂”的尤里卡项目，为实施敏捷制造进行基础性研究工作。

在我国，国家863CIMS主题从1993年就开始了对敏捷制造的跟踪研究，并结合我国企业状况进行了大量的调查研究。国家自然科学基金委员会(NSFC)每年均资助了敏捷制造方面的研究项目。国内学者对敏捷制造的方法论、关键技术，敏捷制造的总体技术体系和评价体系，敏捷制造的使能技术等进行了研究和应用^[3-5]。

周焕明，邓宏筹等^[6]探索、分析了适合我国国情的敏捷制造使能技术，并提出了8项主要研究内容和应部署的使能技术实质性工作。

我国自从1986年以来，不少企业陆续采用了先进的制造模式、技术与系统，如柔性制造系统(FMS)、计算机集成制造系统(CIMS)和全面质量管理(TQM)等。但是，在实施先进的制造模式和系统的过程中，只有较少的企业能按既定的计划实施并取得预定的经济效益，相当一部分实施企业是高投入、低效益，即具备了很好的装备和技术，但未能形成相应的生产利润和扩大再生产的势头。分析其中的主要因素是：

(1) 在全球经济一体化的进程中，企业缺乏对市场的快速响应能力，产品开发能力弱，尤其是不适应大规模定制生产对企业开发能力的巨大挑战；

(2) 企业和生产调度远不能适应动态变化的制造环境，造成企业的有限资源不能综合优化利用、生产能力不均衡、生产时续时断、库

存不能处于最佳状态、物料供应具有一定的盲目性、生产计划及控制信息的不及时和不准确性等；

(3) 企业制造系统的效率不能充分发挥，处于高投入、低水平运转，不能有效实现制造系统的过程监控和设备的有效利用。

1.2 反求工程

传统的产品开发模式很难用严密、统一的数学语言来描述飞机、汽车和船舶外形、工艺美术品等自由曲面。反求工程就为制造业提供了一个全新的、高效的重构手段，实现从实物模型到 CAD 模型的转换，缩短产品的制造周期，快速的响应市场。作为产品设计制造的一种方法，在 20 世纪 90 年代初，反求工程就引起各国工业界和学术界的高度重视。利用测量技术、CAD/CAM 技术、先进制造技术来实现产品实物的反求工程及其应用，已成为 CAD/CAM 领域的一个研究热点^[7-10]。

反求工程（Reverse Engineering 又称逆向工程）就是根据已经存在的产品模型，反向推出产品设计数据（设计图纸或 CAD 模型），反求设计和正向设计的思想和方法是不同的，反求设计主要是根据扫描获取的点进行拟合进而得到曲线曲面，而正向设计主要是参数化和交互式的设计方式，因此在具体工程设计中把反求设计的自由曲面设计与正向设计的参数化设计和特征建模结合起来，取长补短。提高设计的效率，降低设计的成本和时间。研究正反向复合设计的技术与方法对有复杂型面的结构产品设计有着现实的工程和技术意义^[11,12]。

反求工程技术是 20 世纪 80 年代初分别由美国 3M 公司、日本名古屋工业研究所以及美国 UVP 公司提出并研制开发成功的。在越来越剧烈的市场竞争中，这项技术早已被先进工业国家有远见的企业所采用，为大幅度缩短新产品开发周期发挥了重要作用。

1.2.1 软件系统

近年来，国内外对反求工程技术进行了大量的理论研究并发表了许多研究论文^[13-16]。1997 年，CAD 杂志出版了关于反求工程的专辑 [CAD97]，在该专辑中，Varady 等人对反求工程中的几何反求技术作了

很好的综述。迄今，国外开发了多个具有反求工程功能的系统和模块，主要有：美国 Raindrop 公司出品的 Geomagic、美国 EDS 公司的 ImageWare(原 Surfacer)、英国 DELCAM 公司产品 CopyCAD、韩国 INUS 公司出品的 RapidForm 等等，以及一些大型的软件里面集成的反求模块 CATIA/DSE、PRO/SCANTOOLS 等。

在我国，浙江大学、清华大学、华中科技大学、西安交通大学、北京航空航天大学等开展了反求工程建模技术的研究，并取得了很多可喜的成果。其中浙江大学最早在我国推出了 RE-Soft 反求工程软件系统^[17]。

这些系统主要以交互操作和曲面重建为主，同时一些系统也逐渐采用了特征建模技术，可以进行一些简单的特征的重建（如 Imageware 可以进行一些简单的二次曲面的特征识别和重建），用户可以方便地对测量数据进行简化、光顺及拟合等。通过数据交换标准，可与其它系统进行数据交换。按所构建的曲面种类可分为 NURBS 曲面系统和三角 Bezier 曲面系统。目前主要以 NURBS 曲面系统为主。NURBS 曲面是当前工业界 CAD 数据交换的标准，所以此类系统与目前商品化 CAD/CAM 系统的数据交换非常方便，缺点是所构造的曲面不是实体模型，而是片体状态需要与 CAD 系统结合建立实体模型。生成三角 Bezier 曲面的系统主要为 RE-Soft，其早期功能主要集中在散乱数据的三角化和三角曲面建模方面，首先生成三角形网格，然后提取曲面特征，精化三角形网格，最后构造三角 Bezier 曲面，保证曲面片之间 G^0 光滑连接。优点在于三角形曲面能灵活地表现各种复杂曲面，缺点是与目前的商用 CAD/CAM 兼容性差。后来，在三角曲面构建的基础上实现了 NURBS 曲面的分块重构，其应用也越来越广泛。

无论采用三角曲面还是四边域曲面建模，所得到的曲面模型只能实现对样件的原样拷贝，很难提取和表达隐含在点云数据中的特征信息和原始设计信息，而且重建的模型也很难进行修改，无法实现创新设计和系列化设计。正向设计中的特征造型技术已经比较成熟，由于特征是几何参数、约束信息、拓扑信息等各种信息的综合表达，显然，采用特征表达的反求工程模型，相对于传统的曲面模型具有无可比拟的优势。为

了得到基于特征表达的参数化反求工程 CAD 模型，将正向设计中的特征技术引入到反求工程中，已成为近年来国内外学者研究的重点，反求工程中的各种特征处理技术也相继得到了研究。但是这些特征技术相对独立，没有形成系统的基于特征的反求工程技术。

1.2.2 应用领域

反求工程作为一个迅速发展的学科，它逐渐应用到较多的领域，概括起来有以下一些具体应用^[18-21]：

(1) 在诸如飞机、汽车、摩托车、家用电器等产品开发中，产品的空气动力学性能和美学设计显得特别重要，一般是首先制作木质或粘土全尺寸或比例模型，然后利用反求工程技术重建 CAD 模型。因此，反求工程技术在此类产品的快速开发中显得举足轻重。

(2) 对现有产品的局部修改。由于工艺、美观、使用效果等方面的原因，经常要对已有的产品做局部修改。在原始设计没有三维 CAD 模型的情况下，若能将实物构件通过反求得到与实际相符的 CAD 模型，对 CAD 模型进行修改以后再进行加工，将显著提高生产效率。

(3) 对以已有产品为基础进行的设计。在缺乏二维设计图纸或者原始设计参数情况下，借鉴别人的成功设计并在此基础上进行产品再创新设计是在剧烈竞争的市场中赶超同类行业先进水平的一个重要捷径，也是当今的一条新的设计理念。

(4) 磨损或损坏物体的还原。某些大型设备，如航空发动机、汽轮机组等，常会因为某一零部件的损坏而停止运行，通过反求工程手段，可以快速生产这些零部件的替代件，从而提高设备的利用率和使用寿命。

(5) 一些特殊领域，如：艺术品、建筑、考古文物的复制，医学领域中人体骨骼、关节等的复制、假肢制造，特种服装、头盔的制造需要首先建立人体的几何模型，这些情况下都必须从实物模型出发得到 CAD 模型。

(6) 产品的检测。测量产品的三维点云，与 CAD 模型进行比较，分析产品的制造误差。

1.2.3 关键技术

反求工程的关键技术包括：

(1) 数据采集

数据采集的主要任务是获取模型表面的三维坐标信息，是反求工程的基础，是曲面重建中数据点的来源。同时，测量数据点的分布与数量的大小也影响曲面重建的方法和效果。数据采集分为接触式和非接触式^[22-25]。典型的接触式测量设备是三坐标测量机（Coordination Measuring Machine, CMM）。近年来发展起来的断层扫描测量能够同时测量样件的表面和内部特征^[26]，但设备价格比较昂贵。

(2) 数据预处理

预处理主要包括数据的多视图拼合^[27-29]，数据的平滑、精简和分割等。对具有扫描线特征的测量数据，可以通过高斯滤波^[30]的方法去除噪声点，对于散乱的测量数据可以先对测量数据进行三角化处理然后用基于网格光顺的方法去除噪声点^[31]。Martin 等于 1996 年在欧盟的哥白尼项目中提出了使用均匀网格的数据精简方法，该方法克服了均值和样条曲线简化的阻滞，适合于简单零件表面瑕点的快速去除。缺点是由于使用均匀网格对零件的形状捕捉不灵敏^[32]。韩国的 K.H.Lee^[33-34]等于 2001 年提出了一种用于激光扫描测量的数据精简方法即非均匀网格法，对处理具有变化尺寸的自由形状物体方面更加有效。目前数据分割方法主要有：基于边的方法^[35]、基于面的方法^[36]。

(3) 曲面重构

曲面重构是反求工程中的重要内容，也是研究最多的技术。文献[37-40]从不同的角度对曲面重建的各类方法进行了分类总结。根据所使用的曲面的数学模型，曲面重建可分为函数曲面方法、隐函数曲面方法、三角网格模型方法、三角 Bezier 曲面和 NURBS 曲面方法。就目前的研究成果来分析，比较成熟的技术主要有以 B 样条或 NURBS 曲面为基础的矩形参数域曲面构造和以 Bezier 曲面为基础的三角形参数域曲面构造方法。

对于三角 Bezier 曲面的研究一直非常活跃，在三角网格基础上构造

三角 Bezier 曲面方法有两种：一是整体求解线性方程组^[41]；另一种是借助于三角形的 Clough-Tocher 分割^[42]。浙江大学开发了 RE-Soft 系统，一定程度上解决了三角曲面模型与其它基于四边域参数曲面的 CAD/CAM 系统兼容性问题。

在确定数据的分块区域后，用 NURBS 曲面拟合一个矩形域内曲面的数据点是一个研究非常多的问题^[43,44]。作为 NURBS 曲面的特例，B-Spline 曲面具有较多的优点，如直观性，凸包性及局部性等，在实际应用中较多。NURBS 曲面具有 B 样条曲面的优点，并能精确地表示二次曲面，具有更大的灵活性。曲面拟合方法可分两类：插值和逼近^[45]。

反求工程软件提供了许多真正实用的曲面反求操作手段，但在功能覆盖域、自动化程度、稳定性、与其它 CAD 软件的兼容性方面还不够成熟，特别是智能化程度很低，更多的工作必须由熟练掌握反求构型的操作者来完成。

(4) 基于特征的反求工程

将正向设计中的特征技术引入到反求工程中，通过抽取表达原始设计意图的、蕴涵在测量数据中的特征，重建出基于特征表达的参数化 CAD 模型。目前主要形成了 3 种具有代表性的基于特征的反求工程 CAD 建模方法^[40]：特征模板匹配法、特征元提取法和直接基于点云数据的特征处理方法。

(5) RE/CAD 复合建模^[12]

(6) 模型精度评价^[46]

1.3 产品制造

快速原型^[47]（RP: Rapid Prototyping）制造技术是一种综合 CAD、数控技术、激光技术、材料科学以及机械电子工程为一体的新兴技术，可直接、快速、准确地将产品设计者的思想转变为具有一定功能的原型或零件，从而可以对产品设计进行快速评估、修改以及功能测试，大大缩短产品的研制周期。快速模具（RT: Rapid Tooling）制造技术以快速原型作母模来翻制模具并生产实际材料的产品，进一步发挥了快速成型

制造技术的优越性，可在短期内迅速推出满足用户需求的一定批量的产品，大幅度降低了新产品开发研制的成本和投资风险，缩短了新产品研制和投放市场的周期，在小批量、多品种、改型快的现代制造模式下具有强劲的发展势头。

快速原型与快速模具技术是当今世界上发展最快的制造技术，有数百家大学、研究机构和企业竞相开发的前沿制造技术。美国在这个领域一直处于领先地位，而欧洲国家、日本和中国也取得了丰硕成果。1987年初，美国 3D Systems 公司首次推出商业化的快速原型制造设备 SLA-1，标志着快速原型制造技术工业应用的开始。时至今日，3D Systems 公司仍是全球生产快速原型设备最大的公司，在国际市场上占有约 60% 的份额。国内于 1993 年首次发表了快速原型制造技术的文章，1994 年美国企业在上海国际模具展览会上展出了 Rapid Plant Manufacturing(快速工厂制造)的快速零件制造技术，引起了人们的注意。同年，在北京举行的国际机床博览会上首次展出了我国自己设计制造的快速原型设备。90 年代中期清华大学、西安交通大学、华中理工大学、南京航空航天大学、北京隆源公司等就率先开展了快速原型制造技术的研究和应用工作，并取得了丰硕的成果^[48-50]。

数控技术是机械加工现代化的重要基础与关键技术，应用数控加工可以大大提高生产率，稳定加工质量，增加生产柔性，实现对各种具有复杂特征和曲面类的零件的自动化加工，有利于加快产品的开发和更新换代，提高企业对市场的适应能力，因此，复杂特征和自由曲面的数控加工在国内外工业制造领域越来越受到重视。数控加工的质量与数控加工的工艺有着莫大的关系，尤其是复杂类零件的数控加工。数控加工工艺参数的优化，自动编程技术的采用，可以提高加工质量，减少辅助加工时间，提高企业的效率^[51-55]。

1.4 论文的课题来源与内容安排

开展支持敏捷制造的使能技术及其工程应用研究，使中国企业在较短时间内、花较少的代价尽快适应国际市场的竞争并缩短与世界先进工

业化国家的差距，具有重要的理论价值和现实意义。

本课题是以国家863/机器人主题“面向任意形状工件的通用夹具研制与工业化装备”、“支持产品快速开发的主动寻位自动化通用安装系统”等项目的研究成果为背景而进行的推广应用研究，研究面向敏捷制造的使能技术，进行集成反求工程系统的研究开发，如图1-2所示。

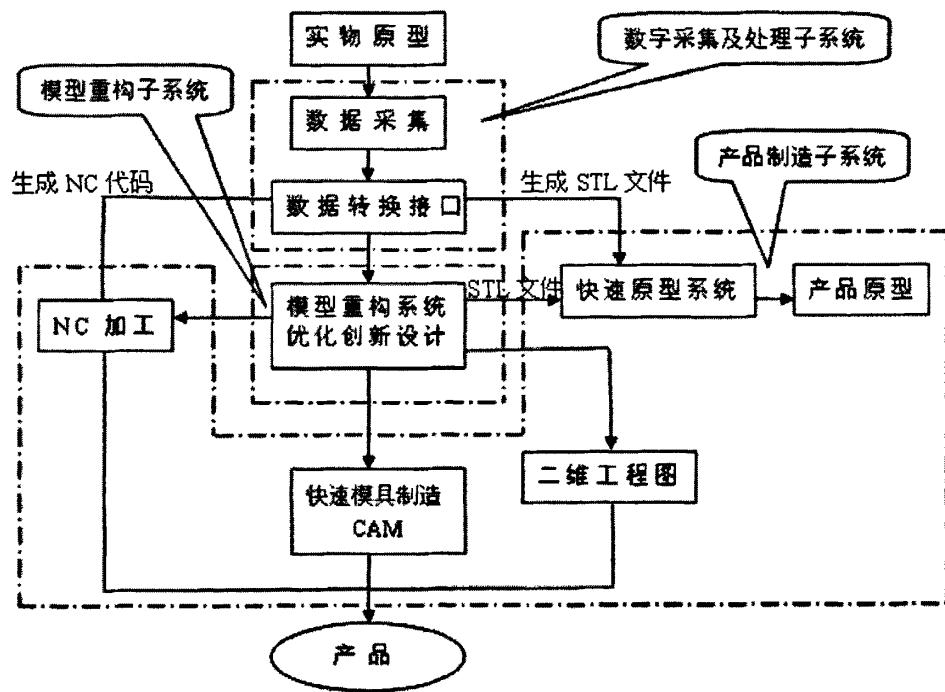


图 1-2 集成反求工程系统框架

其中，数据采集与处理子系统的任务是测量规划、测量和数据处理转换；模型重建子系统主要包括模型重建、模型分析、模型评价等模块，与目前的 CAD 造型软件或 CAD/CAE/CAM 系统不同的是数据结果是面向集成的数据模型结构造型、有专用的反求功能（曲线、曲面拟合等）和重构模型评价功能等；产品制造子系统主要是加工制造设备，包括各种数控机床、快速成型机等，测得的数据经数据处理和转换，输入到加工制造系统，最终得到产品样件、实物和模具。由于本选题尚处于初步研究阶段，一些装备正处于选购和调试阶段，有待于今后的进一步努力。

本文以提高企业的对市场的快速响应能力、提高产品开发能力作为目的，响应敏捷制造的核心理念，对集成反求工程系统进行理论和应用研究，主要研究内容如下。

第二章为数据采集与处理方法介绍。分析比较接触式、非接触式测量方法及复合式测量等数据采集方法，给出数据采集设备和策略，讨论多视图点云数据的拼合、点云的平滑、精简、分割等点云数据的处理技术。

第三章为模型的三维实体重构。阐述曲面模型重构的理论，讨论基于特征的反求建模技术，对RE/CAD复合实体建模的关键技术进行分析和研究，并对反求模型的质量评价进行讨论。

第四章为产品制造。阐述快速原型与快速模具制造技术的基本原理、制造工艺及其适用场合，讨论基于反求工程的快速原型加工过程，对数控加工工艺的优化进行了研究。

第五章进行了工程实际应用研究。对一个汽车阀体的反求工程实体建模进行具体的工程应用研究，通过快速原型和快速模具制造技术及其数控加工进行了实现，取得了较好的精度和效率。

第六章对本文的工作进行了总结和展望。

第二章 数据采集与处理

集成反求工程系统中，数据采集与处理子系统的任务是测量规划、测量和数据处理转换。模型表面的数据采集是反求工程技术的重要组成部分，是整个反求工程的基础。测量的精度与速度，将制约着整个反求工程的质量。因此反求工程的首要任务是提取对象表面的三维坐标信息，只有获得模型表面三维信息才能实现模型的重构与制造。另一方面，由于目前数据采集过程中，非接触式测量方法在工业界得到越来越广泛的应用，通过该测量方法测得的数据非常庞大，并常常带有许多杂点、噪声点，势必影响后续的曲线、曲面重构过程。因此，需要在曲面重构前，对点云数据进行处理，以获得满意的数据，为模型重构做好准备。

2.1 数据采集方法

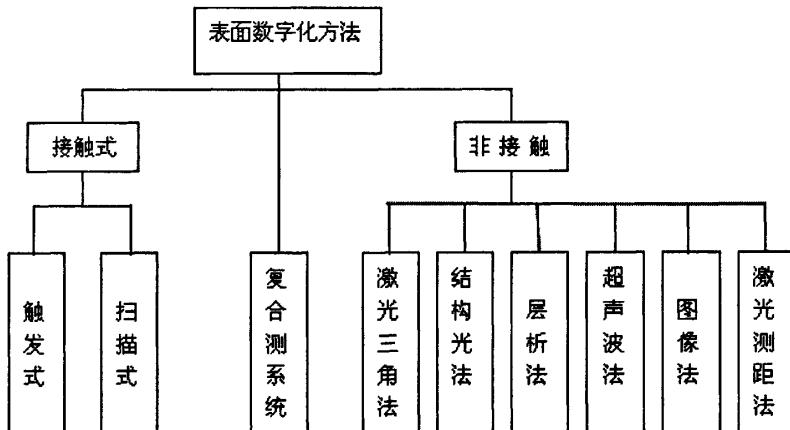


图 2-1 数据采集方法

根据测量探头是否和零件表面接触，零件表面数据采集方法可分为接触式、非接触式数据采集两大类。接触式包括基于力—变形原理的触发式和连续扫描式数据采集；而非接触式主要有激光三角测量法、激光测距法、图像分析法等。数据采集方法如图 2-1 所示，其中复合测量系

统综合接触式和非接触式测量的优点进行集成。

2.1.1 接触式测量

接触式测量是利用测量探头在与被测量物体进行接触时触发一个记录信号，并通过相应的设备记录下当时的标定传感器数值，从而获取三维数据信息。接触式测量方法(tactile methods)采用三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)或机器人手臂进行测量。

三坐标测量机是 20 世纪 60 年代发展起来的一种高效率的新型精密测量仪器。它广泛应用于制造、电子、汽车和航空航天等工业中，是以精密机械为基础，综合应用光学、电子技术、计算机技术等先进技术，主要包括四个部分：机体、数据处理及控制系统、测头、测量及控制软件。由于三坐标测量机具有对连续曲面进行扫描获取数据点的功能，因此一开始就被选为反求工程的主要数字化设备并一直使用至今。

三坐标测量机的测量精度一般都很高，可达到 $0.5\mu\text{m}$ ，并且与测量范围没有直接的联系，可直接测量工件的特定几何特征。但是，其最主要的缺点在于：需逐点测量，测量速度慢，效率低；接触力会造成工件及探头表面磨损，影响光滑度；测量工件内部时，形状尺寸会影响测量值且探头不易深入；对凸凹变化大的复杂曲面的测量非常困难。

利用三坐标测量机对模型表面进行测量时，首先要确定测量路径，通过对模型表面特征截面线进行测量来获得模型表面的数字信息。在模型表面曲率变化小的地方测量点可以少一些，在模型表面曲率变化大的地方要适当增加测量点的数量，以保证运用反求软件反求所获得的曲面与实际的零件模型之间的误差达到所要求的精度范围。

三坐标测量机的测量方法主要有连续扫描测量法和点位测量法。前者指测量探头始终与模型表面接触，并沿模型表面慢慢移动，按模型表面方向、曲率的变化，适时调节运动速度，连续完成空间曲线、曲面的测量。后者是利用触发式探头，按被测曲线逐点采样，取得被测曲线的一系列点的坐标值。三坐标测量机是通过测量模型表面特征截面线，获得测量点，因而测量点的数量比较稀疏，适合于采用各种通用 CAD 软件来进行 CAD 数学模型的曲面反求。随着各种通用 CAD 软件的曲面造

型功能的加强，利用稀疏的数据量也能很好地完成曲面反求，这使得三坐标测量机得到了广泛的应用。

2.1.2 非接触式测量

非接触式三维数据测量设备是利用某种与物体表面发生相互作用的物理现象来获取其表面三维信息，如声、光、磁等。其中应用光学原理发展起来的现代三维形状测量方法应用最为广泛。非接触式测量具有测量精度较差，无法判定特定的几何特征；在陡峭面处不易测量，激光无法照射到的地方无法测量；工件表面与探头表面不是垂直，则测得的误差变大；工件表面的阴暗程度会影响测量的精度等缺点。但是，由于非接触式测量具有测量速度快，曲面数据易获取；可测量柔软、易碎、不可接触、薄件、皮毛、复杂曲面（玩具、雕塑）等工件；无接触力，不损伤工件表面精度等优点，正越来越受到人们的重视。

基于光学三角型原理的激光扫描法是根据光学三角型测量原理，以激光作为光源，其结构模式可以分为光点、单线条、多线条等，将其投到被测物体表面，并采用光电敏感元件在另一位置接收光的反射能量，根据光点或光条在物体上成像的偏移，通过被测物体基平面、像点、像距等之间的关系计算物体的深度信息。

基于相位偏移测量原理的莫尔条纹法是将光栅条纹投射到被测物体表面，光栅条纹受物体表面形状的调制，其条纹间的相位关系会发生变化，利用数字图像处理的方法解析出光栅条纹图像的相位变化量来获取被测物体表面的三维信息。

基于工业 CT 断层扫描图像法是对被测物体进行断层截面扫描，经处理重建断层截面图像，根据不同位置的断层图像可建立物体的三维信息。该方法可以对被测物体内部的结构和形状进行无损测量，但该方法测量精度低，造价高。

立体视觉测量方法是根据同一个三维空间点在不同空间位置的两个或多个摄像机拍摄的图像中的视差，以及摄像机之 R 位置的空间几何关系来获取该点的三维坐标值。立体视觉测量方法可以对处于两个或多个摄像机共同视野内的目标特征点进行测量，而无须扫描装置。这种方

法在机器人视觉和工业检测中常采用，测量速度快，但精度很低。

非接触式激光三角形法由于同时拥有精度和速度的特点，因而在反求工程中应用最为广泛，激光三角形法又根据光源不同可分为点光源和线光源两种不同的方式，不同的方式所得到的数据的组织方法是不一样的。基于点光源扫描测头一次只能测量一个点，测头在给定平面内(扫描平面)沿给定方向运动，形成扫描线，依次移动平面可以扫描整个曲面轮廓，而基于线光源扫描测头一次测量一条线，由于测量视野的限制一般需要分区测量，并且为了能不遗漏测量区域，各区域最好有一定量的重合。

目前基于接触式连续扫描测量方法由于具有高精度、较高速度，同时价格较合适等诸多优点，其应用潜力也相当大。除触发式数据采集外，其他各种方法都能对零件表面实现密集的数据采集，在反求工程中，这种极为密集的测量数据被称为“点云”。密集、散乱的“点云”数据是反求工程的数据采集的主要特点之一。

2.1.3 复合多测头式测量

复合式测量采用复合测头，即接触式测头和非接触式测头结合的方法，充分利用二者的优点对模型进行测量^[56]。该系统由 CMM、结构光传感器 (Structured-light sensor)、触发式测头(Trigger probe)和旋转工作台(Rotary table)集成为一个多测头测量系统，如图 2-2 所示。

结构光传感器（非接触式测头）结合旋转工作台由不同的角度扫描模型的轮廓，接触式测头则测量模型的边界和关键特征。如图 2-3 所示，图中(a)为模型轮廓的扫描数据，(b)为边界及关键特征的测量数据，(c)为两种数据的拼和，(d)为模型的 STL 格式。两种方式产生的数据可以拼合为一个数据体，该系统测量数据的总体精度为 $\pm 0.03\text{mm}$ 。

2.2 数据采集设备和策略

2.2.1 数据采集设备

本文反求模型测量使用的 NEXTEC 激光测量系统的 WIZProbe 激光扫描传感器(图 2-4)。该传感器装载在海克斯康 global status 7107 三坐标

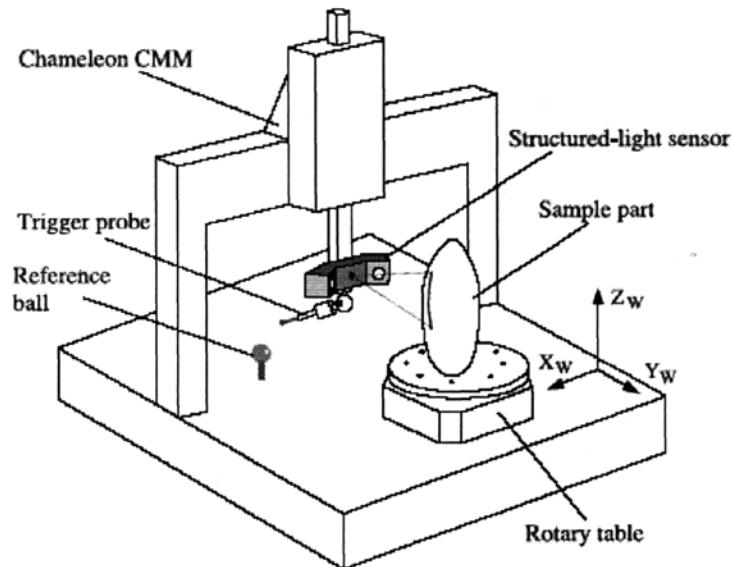


图 2-2 多测头测量系统

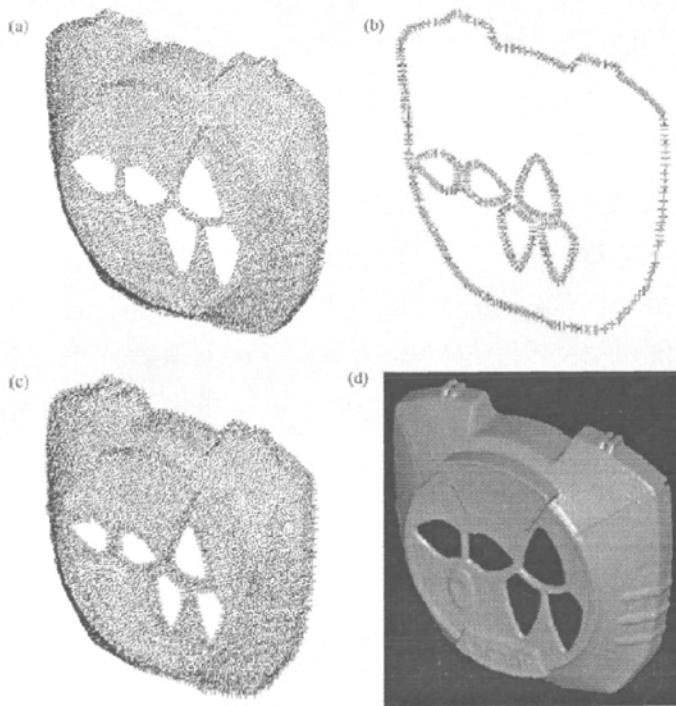


图 2-3 模型复合测量效果

测量机（图 2-5）上，反求数据采集时采用激光扫描；对工件的制造精度分析时采用接触式测头测量。



图 2-4 激光扫描传感器

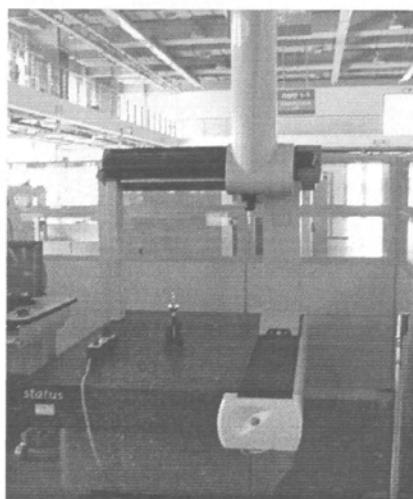


图 2-5 三坐标测量机

海克斯康 global status 7107 测量仪由海克斯康测量技术(青岛)有限公司(Brown & Sharpe 前哨)生产^[57]。global status 7107 的结构特点为高强度的结构、独立运行的坐标轴、金属光栅系统，使得设备的测量系统即使在加速/减速，或是环境存在某种振动的情况下仍能保持极高的测量精度。同时测量系统具有非常小的系统分辨率，保证了测量数据具有稳定的重复精度。WIZProbe 激光扫描头测量原理为独特的三角法测量、分布式光柱和 CCD 形式。其采样频率为 50 点/秒，最优化精度可达 $1\mu\text{m}$ ，测量时几乎没有噪音点的产生。将其装载在测量机测座上，运行稳定，能保持较好的精度重复性。利用测座的 A 角 B 角的旋转，能达到对模型的较大范围的测量。

2.2.2 数据采集策略

在数据采集过程中，工件的材料、形状、尺寸以及工件中不同部位的精度要求不同，决定着需要采取不同的测量设备和测量策略来进行测量。尽量达到数据的完备性。数据采集前期需要对工件即将采取的造型方法进行考虑，据此规划数据的采集方案^[58,59]。

(1) 不同材质

对于刚性材料的工件采用接触式测量或非接触式测量均可，但对当总体精度要求较高、曲面复杂、需要较大的数据密度时，最好采用非接触式测量；而对于总体精度要求不高的工件可用接触式测量；对于软性材料构成的工件不可采用接触式测量，而须采用非接触测量。

(2) 中等尺寸外表面

对此类工件的数据采集最好能够在一次标定后，不移动工件的情况下，完成数据的扫描。外表面的数据，在利用三坐标测量机测座的 A 角 B 角的旋转功能后，可以较充分的完成表面数据的完整采集。扫描时采用分块扫描，注意分块扫描数据边界要有一定的重合，防止出现遗漏。完成后，可以在输出数据时，作为一个整体数据 TXT 或 IGES 格式，也可到反求软件中对点云数据进行拼合，因为一次标定传感器和工件没有移动，所以分块扫描的数据相对工件坐标系是相同的。因而不需要采用另外的技术手段。如果需要移动工件进行测量，则需要粘贴参考点或者扫描时注意分块处的相同特征，参考点是在进行数据采集前由操作者粘贴于工件表面和周围的，系统在进行相邻单幅数据点云之间的共同的参考点来实现的，参考点设置的时候，要能够使相邻几个参考点之间的组合关系是唯一的，避免在点云自动拼合时产生二义行，达不到理想的数据采集效果。扫描后可以在专业反求软件中根据特征进行数据对齐和拼合。

(3) 大尺寸工件

当尺寸足够大时，由于测量空间的限制，工件不能在不移动的情况下，完成工件表面的数据采集，仍用相邻单幅采集数据进行拼接，由于累积误差的存在，精度会大幅度下降，且数据采集效率较低，难以保证数据采集的质量。这时应考虑用数码相机、大基准点和标尺对分布于工件上的参考点进行总体定位，得到参考点云数据。这样在实际数据采集时，就不必利用相邻点云的共同参考点来进行不同点云之间的拼接，而是直接利用当前数据采集区域所采集的参考点与已生成的参考点数据相对接，完成总体数据点云的采集。每幅数据点云之间虽然仍然要有少量重叠，但这种重叠的意义并不是为了点云之间的拼接，而是为了使相

邻之间不遗漏数据。

由于一些大型零件存在刚度问题，其摆放姿态和支点会有所不同，形状会有所变化，故要充分考虑其在产品中的作用和装配位置的摆放姿态，尽可能在整个产品中对其进行数据采集；如果装配中要求其发生变形，则要按其自然状态进行数据采集。

(4) 小尺寸复杂件

由于中等尺寸工件和大尺寸测量在工件表面粘贴的参考点一般在比较平坦的区域，因而形成点云时，由参考点所在的位置留下了“数据空洞”，经适当处理补充后，并不会影响整个点云数据的完整性数据精度，不会出现工件表面的特征丢失现象。但对于小尺寸工件，不管如何粘贴参考点，同样会在参考点所在的位置留下了“数据空洞”，而由于工件本身较小，这些“数据空洞”有的在原型的该位置就有小型的特征存在，而实施“补洞”后，并不能凭空得到这些特征，因而对于小尺寸工件，单纯用工件表面粘贴参考点的方法实施相邻数据点云之间的拼接并不能达到理想的数据采集效果。这种情况下，可根据工件的特点，在工件表面尽可能少地粘贴参考点，而在工件周围使用参考点，参考点并不一定在工件表面，使用这样的参考点可以帮助工件表面的采集方式相一致，但数据采集完成后，要把所得不在工件表面上的点去除。甚至可针对特定产品设计相应的测量夹具，把参考点全部或大部分放在夹具上，最后利用夹具上的点实现多次测量的数据拼合。

(5) 内表面

在光学测量中光线所到的部位如果不能发生有效的反射就无法实施测量。但在实际测量中对内表面的测量是不可避免的，因此在实际采集中要根据不同的情况进行处理。如果工件比较大，测量头能够进入其中并有足够的空间进行测量部件的定位，则可直接进行测量；如果工件比较小，可把测量部位进行拆卸以实施测量；如果内腔的空间小，且数据采集中又不能破坏工件，则可用硅胶注入被测部位，待硅胶凝固后，取出硅胶填充工件内腔形成的实体直接进行测量，这样就把内腔转化为外形来进行测量；当然如果条件允许的话可以把工件破开进行分块测

量，分别完成后再进行拼接，也可以实现内腔点云数据的采集。

(6) 封闭外表面

对于封闭的外表面，在数据采集中，可视具体情况采用两种策略。一种方法是把工件上要进行数据采集的部位直立并定位于某一工作台上，再围绕工件进行数据采集，得到封闭完整的数据点云。另一种方法是把工件平躺于某工作台上，先对正面进行数据采集，再反过来对反面进行数据采集，形成两个数据点云，完成后，将两个数据点云利用共同的参考点（这些参考点在正反面的接合面附近）进行拼合，从而得到一个完整封闭的数据点云。

(7) 对称件及扫描死角

扫描时注意工件的装夹，装夹的最佳状态是工件在不用移动的情况下，完成工件的数据采集。同时注意工件的特征，如果工件为对称件，可以先确定其对称坐标系，然后扫描其一半的数据。注意对称处要多扫描一部分。最后，依据其对称坐标系进行点云数据的对称转换和拼合。或者有些特征比较重要，但是，位置在扫描死角，不能扫描完整的数据，这时可以根据规划的建模方法，扫描其部分数据，通过在 CAD 软件中对其进行造型。如果无法扫描充分的数据，可以间接的通过周围特征的扫描来获取可以对其造型的数据。

2.3 数据的处理

测量数据的处理在反求工程中占有极为重要的地位，是反求工程中关键技术之一。在光学扫描测量中由于存在多视图、测量数据失真和冗余等问题，在 CAD 模型重构之前需要对测量的数据进行预处理，使之能够利用 CAD 软件进行精确快速反求。数据预处理主要包括多视图数据对齐、数据光顺、数据精简、数据分割等。

2.3.1 点云分类

通常将测量所获取的三维空间中散乱的点集称为点云(Point Could)最小的点云只包含一个点，高密度点云可达几百万数据点。由于不同的测量方式得到的点云数据的表现方式各不相同，为了能有效处理各种形

式的点云，根据点云的分布特征(如排列方式、密度等)将点云分为：

(1) 散乱点云

测量点没有明显的几何分布特征，呈散乱无序状态。随机扫描方式下的 CMM，激光点测量等系统的点云呈现散乱状态。

(2) 扫描线点云

点云由一组扫描线组成，扫描线为一个有次序的、单行的点。扫描线上的所有点位于扫描平面内。CMM、激光点光源测量系统沿直线扫描和线光源测量系统扫描所得的测量数据呈现扫描线特征。

(3) 网格化点云

点云中所有点都与参数域中一个均匀网格的顶点对应。将 CMM、激光扫描系统、投影光栅测量系统及立体视差法获得的数据经过网格化插值后得到的点云即为网格化点云。

(4) 多边形点云

测量点分布在一系列平行平面内，用小线段将同一平面内距离最小的若干相邻点依次连接，可形成一组有嵌套的平面多边形。莫尔等高线测量、工业、CT、层切法、磁共振成像等系统的测量点云呈现多边形特征。

由于在工程实际中常用的是扫描线点云和散乱点云，因此，本文中所讨论的主要该两类点云的处理。

2.3.2 多视图数据对齐

实际工程测量中，很难一次测量整个样件，通常是对其重新定位获取不同方位的表面信息，这称为视。需要对各测量数据块进行多视拼合处理，就是多视拼合问题。多视拼合有两种方法，一是对点云进行处理，即直接对点云进行拼合，再重构出原型；二是对各视局部构造几何形体，然后拼合形体。由于各视的集合特征不一致，第二种方法带来的几何形体之间的布尔运算将涉及到许多 CAD 中曲面的拼接、求交、拓延和过渡等目前尚未解决或解决不甚圆满的难题。基于点拼合的最大优点是能对物体所求得的各个面有总体把握，能获得拓扑上一致的数据结构，所以比较常用。

基于点云的多视拼合有3种方法：三点对三点法、参考球法、特征线法和特征平面法，其实这些方法都可以归结为点对点的方法。因为线特征和方向特征是在两点的基础上构建的，平面特征是在三点的基础上构建的，多视点云拼合过程可以归结为根据特征分别构建两片点云的局部坐标系，然后通过旋转和平移变换的方式，基于Turk等人提出的迭代最近点算法，结合具体重构方法将两个局部坐标系归一。

三点几何坐标变换方法为：测量基准点 X_1 、 Y_1 和 Z_1 。第二次测量时，基准点坐标变为 X_2 、 Y_2 和 Z_2 。连接点 X_1 和 Y_1 点形成矢量 Y_1X_1 ，然后连接点 X_1 和点 Z_1 形成矢量 Z_1X_1 ，连接点 X_2 和点 Y_2 形成矢量 Y_2X_2 ，连接点 X_2 和点 Z_2 形成矢量 Z_2X_2 。将点 X_1 变换到 X_2 ，其次变换矢量到 Y_2X_2 ，使 Y_1X_1 和 Y_2X_2 的矢量方向一致，最后将包含 X_1Y_1 和 Z_1 三点的平面变换到包含 X_2Y_2 和 Z_2 三点的平面。

最临近点迭代法(ICP)^[27]的基本原理是寻找目标点云 p_i 与实际获得的测量点数据之间的旋转矩阵 R 和平移矢量 T ，使式(2-1)达到最优，其过程如下：

$$F(R, T) = \min \sum [Rp_i + T - p_i]^2 \quad (2-1)$$

(1) 读入测量数据，调整参数由CAD模型生成引导目标点云 p_i 。令 $k=0$ ，设置旋转矩阵 R 为单位矩阵，平移矩阵为 T ， T 为零矩阵。

(2) 通过最临近点搜索策略寻找出测量点云与引导目标点云的对应点集 p_i^t ，为了加快搜索速度，采用K-D树组织点云数据，使计算复杂程度为 $O(N/2)$ 。

(3) 通过四元数求 R 和 T 。

(4) 计算目标函数 $F(R, T) = \sum [Rp_i^t + T - p_i]^2$ 。

(5) 终止条件判断 $|F_k(R, T) - F_{k-1}(R, T)| < \varepsilon$ (例如 $\varepsilon = 0.0001$)。如果满足条件则终止，否则 $k=k+1$ ，对整个点云数据进行旋转及平移变换，转步骤2。

2.3.3 多视拼合中常用特征及其拼合方式

在数据拼合过程中，可以通过在点云数据中提取特征的方法对多个

视图进行对正拼合，常用的特征有点、线、方向线和平面，如图 2-6 所示。从点云中获得这些拼合特征之后就可以根据这些特征将多视点云拼合起来成为一个整体点云实体。常用的特征拼合方式见表 2-1。

当零件表面没有明显的特征时，可以通过在零件外表面附加特征的方法来解决，常见的做法是在零件外表面前粘贴辅助圆球，圆球的球心就可以作为拼合用的点特征，同时必须注意的是要正确完成多视点云拼合，必须使被选取的特征几何信息足以构建成一个局部三维坐标系。

2.3.4 数据平滑

由于测量设备的外部震动以及被测件表面粗糙或镜面反射因素，使得测量数据中包含噪声。为了降低或消除噪音对后续建模质量的影响，有必要对测量的点云进行平滑滤波。数据平滑通常采用标准高斯、平均或中值滤波算法。

(1) 高斯滤波法，在指定域内的权重为高斯分布，其平均效果较小，故在滤波的同时能较好地保持原数据的形貌。

(2) 平均滤波法是将采样点的值取滤波窗口内各数据点的统计平均值来取代原始点，对于点集 $P_n = \{P_i(x_i, y_i, z_i) | i = 1, 2, \dots, n\}$ 中任一点 $P_i(x_i, y_i, z_i)$ ，经过平均滤波后，变为 $P'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$ ， $x'_i = (x_{i-1} + x_{i+1})/2$ ， $y'_i = (y_{i-1} + y_{i+1})/2$ 。

(3) 中值滤波法为采样点的值取滤波器窗口内各数据点的统计中值，这种滤波方法消除数据毛刺的效果较好。

实际应用时可根据数据质量和建模方法灵活选择滤波算法。三种滤波效果如图 2-7 所示，其中黄色线是原始数据点，蓝色为平滑后的数据。

对于具有扫描线结构的测量数据，一般采用通过对点列拟合曲线的光顺处理，以及高斯滤波的方法去除噪声。对于离散的测量数据，首先进行三角化处理，然后应用网格光顺法去除噪声。噪点过滤通常是反求工程中必不可少的过程，但在很多时候，噪点可能并不需要删除，因为这可能会破坏数据的清晰性，导致在识别特征时引起严重的问题。

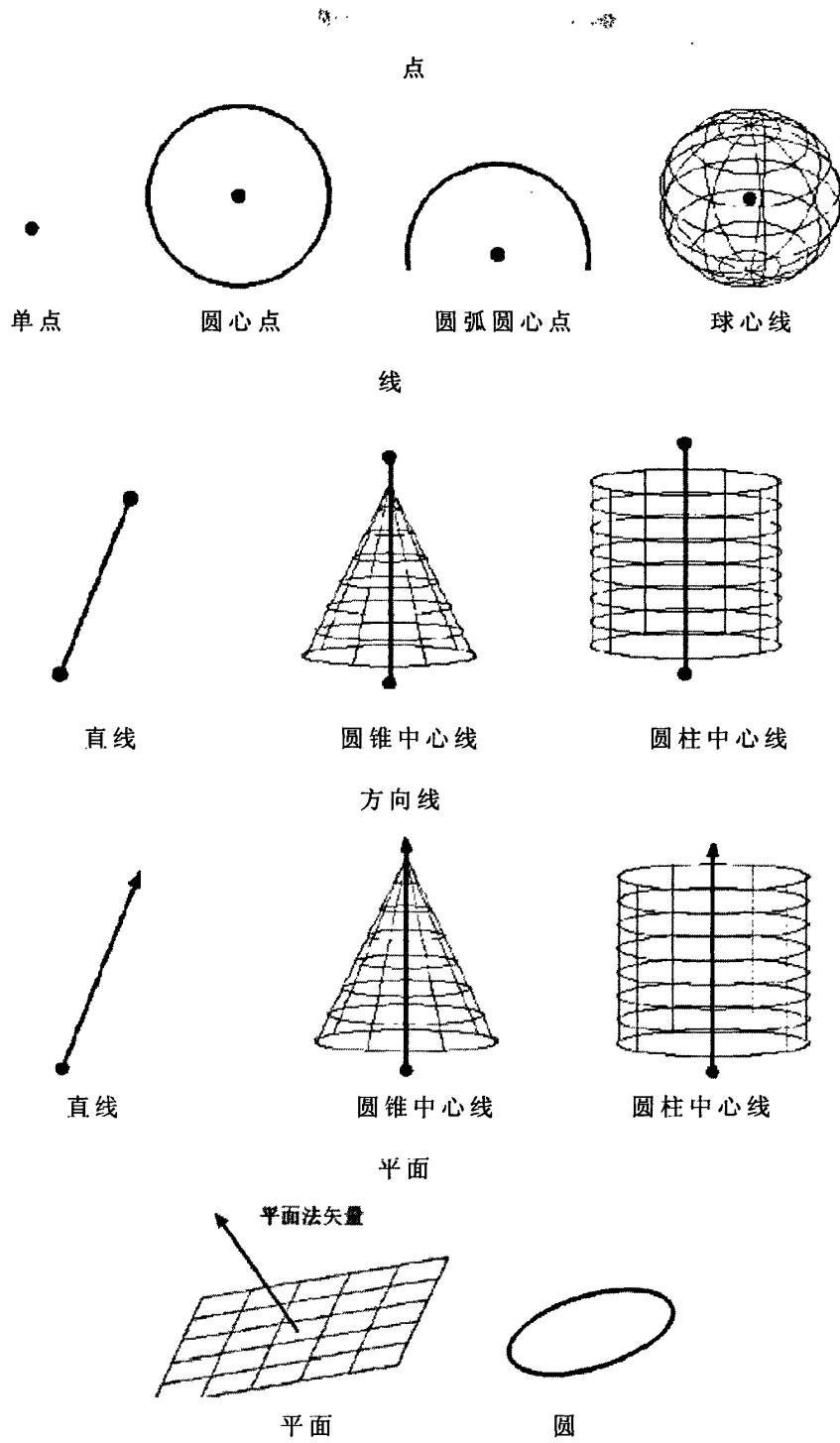


图 2-6 拼合特征

表 2-1 常用的特征拼合方式

方式	特征来源	拼合前	拼合后
点拼合	单点, 圆心 弧心, 球心		 两点重合
线拼合	单线条 圆锥轴线 圆柱轴线		 两条线同轴
方向拼合	单方向线 圆柱、圆锥方向轴 线 平面法矢量 圆、弧法矢量		 两条线平行且同向
方向线拼合	单方向线 圆锥方向轴线 圆柱方向轴线		 两条线同轴且同向
组合线拼合	单方向线 圆柱、圆锥方向轴 线 平面法矢量 圆、弧法矢量		 两条线有相同的起 点和方向
平面拼合	平面 圆、弧		 两平面共面

2.3.5 数据精简

在获取模型的测量数据时,无论是接触式的数据测量机还是非接触式的激光扫描机,不可避免地会引入数据杂点、数据误差,尤其是尖锐边和产品边界附近的测量数据。测量数据中的坏点,可能使该点及其周围的曲面片偏离原曲面,需要对测量所引入的多余的数据进行删减。另外,由于激光扫描的应用,曲面测量时会产生大量的数据点,这样在造型之前应对数据进行精简。

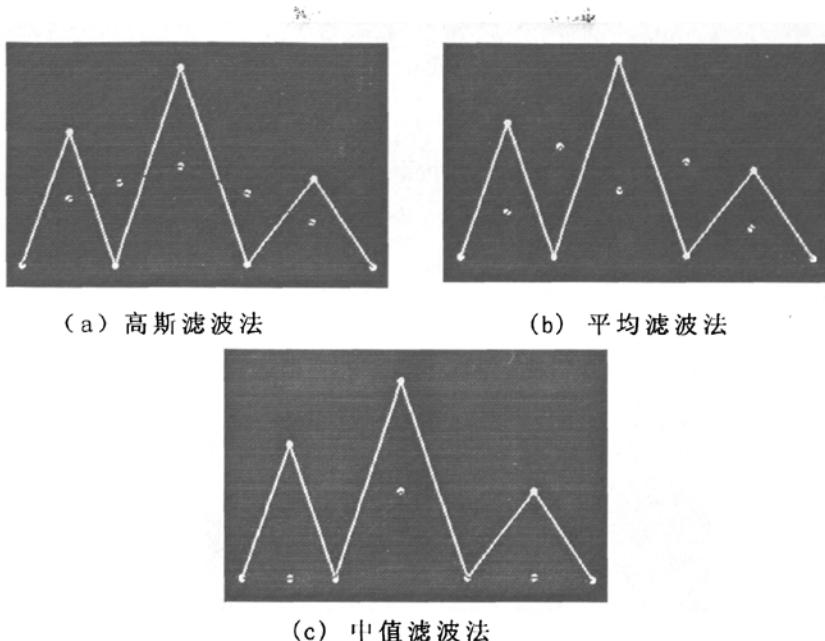


图 2-7 平滑方法

首先进行异常点的处理，依据测量点的布置情况，测量数据可分为两类：扫描线点云和散乱点云。对于扫描线点云，常用的检查方法是将这些测量数据点显示在图形终端上，或者生成曲线曲面，采用半交互半自动的方法对测量数据进行检查、调整。对于散乱点云，由于拓扑关系散乱执行光顺预处理十分困难，只能通过图形终端人工交互检查、调整。

扫描线点云的扫描通常是根据被测量对象的几何形状，锁定一个坐标轴进行数据扫描，这样得到的数据是一个二维数据点集，由于数据量大，测量时不可能对一个点重复测量，这容易产生测量误差。在曲面造型中，数据中的“跳点”和“坏点”对曲线的光顺性影响较大，“跳点”也称失真点，通常由于测量设备的标定参数发生改变和测量环境突然变化造成，对人工手动测量，还会由于操作误差如探头接触部位错误使数据失真。因此测量数据的预处理首先是从数据点集中找出可能存在的“跳点”。如果在同一截面的数据扫描中，存在一个点与其相邻的点偏距较大，可以认为这样的点是“跳点”，判断“跳点”的方法有：

(1) 直观检查法 通过图形终端, 用肉眼直接将与截面数据点偏离较大的点或存在于屏幕上的孤点剔除。这种方法适合于数据的初步检

查，可从数据点集中筛选出一些偏差比较大的异常点。

(2) 曲线检查法 通过截面数据的首末数据点，用最小二乘法拟合得到一条拟合曲线，曲线的阶次可根据曲面截面的形状设定，通常为3-4阶，然后分别计算中间数据点到样条曲线的欧氏距离，如果 $\|e_i\| \geq [\varepsilon]$ ， $[\varepsilon]$ 为给定的允差，则认为 p_i 是坏点，应以剔除，如图 2-8 所示。

同时，由于激光扫描的点云，数据量较大，所以对杂点、坏点去除后，还要进行数据的采样，减少数据的数量。

目前比较成熟的自动精简方法为采样法，有均匀采样、间距采样和弦偏差采样。

(1) 均匀采样方法根据用户定义的采样率来进行采样，该方法要求点云数据采样前已经排好序，适合处理有序点。

(2) 间距采样法利用给定的三维空间邻域大小采样，当某一点与点云数据之间的距离大于给定值时保留该点，否则删去该点。可以给定点间距或点的总数量来进行采样，即适合处理有序点也适合处理散乱点。

(3) 弦长偏差法根据给定的精度要求，对点云数据进行采样。采样时需要给定两个参数最大距离偏差值和两点之间的最大距离值。最大距离偏差确保欲删去的数据点与余下的数据点之间的偏差在给定范围内，以防止删去一些包含有用几何信息的点，两点之间的最大距离值是确保欲删去的数据点与余下的数据点之间的距离值在给定的范围内，以防止点云数据内部特别是几何形态变化不大的地方出现大的空隙。该方法使余下的点云较好地保留了原始点云的几何信息。

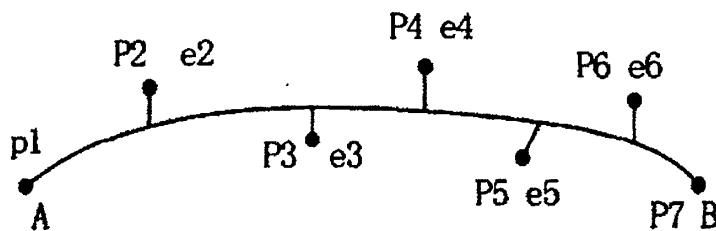


图 2-8 点到线的距离

Martin^[32]等于 1996 年在欧盟的哥白尼项目中提出了使用均匀网格

的数据精简方法，在该法中，首先建立一个垂直于扫描方向的矩形栅格平面，其中每个栅格的大小均相同，点云精减的比例是由由用户定义的栅格的尺寸决定的，栅格越小，从点云中提取的点越多，然后，所有的点被投影到栅格平面中，每个栅格都分配了相应的点。最后，从每个栅格的点中根据中值规则挑选出一个到平面的距离居中的点，其它的点则被剔除，该方法克服了均值和样条曲线简化的阻滞，缺点是由于使用均匀网格对零件的形状捕捉不灵敏。

韩国的 K.H.Lee 等^[33-34]于 2001 年提出了一种用于激光扫描测量的数据精简方法：非均匀网格法，栅格大小可以根据样件外形变化。他们使用了两种非均匀网格法以适用于不同外形的样件：1、简单曲面，如二次曲面；2、自由曲面的复杂外形。单向非均匀栅格法(one-directional non-uniform grid method)适用于前者，而双向非均匀栅格 (bi-directional non-uniform grid method) 适用于后者，单向非均匀栅格使用角度偏差法从有显著曲率变化处提取出一定数目的点，然后根据这些点在 v 方向生成非均匀的栅格。如果栅格过长，则根据用户定义的最大容许长度分割之。最后，基于中值过滤法，每个栅格中最具代表性的点被提取出来。

2.3.6 数据分割

在曲线、曲面拟合之前还要进行的工作是数据分割。在实际的产品中，只由一张曲面构成的情况不多，产品形面往往由多张曲面混合而成，由于组成曲面类型不同，所以 CAD 模型重建分为：先分别拟合单个曲面片，再通过曲面的过渡、相交、裁减、倒圆等手段，将多个曲面缝合成一个整体，即模型重建。

数据分割是测量数据分类转变为造型数据，方法是根据每一个自然曲面，将测量点分割同时并决定每一个点集属于哪一种曲面。由于曲面预先确定的困难，数据分割、分类和曲线、曲面的拟合三种情况并不是顺序进行的，有时可以是同步进行。目前存在两种基本的分割方法：基于边和基于面的数据分割。

基于边的方法首先是从数据点集中，根据组成曲面片的边界轮廓特征、两个曲面片之间的相交、过渡特征，以及形状表面曲面片之间存在

的棱线或脊线特征，确定出相同类型曲面片的边界点，连接边界点形成边界环，判断点集是处于环内还是环外，实现数据分割。基于边的技术必须考虑下列问题：寻找边界特征点，主要是由数据点集计算局部曲面片的法矢量或者高阶导数，通过法矢的突然变化和高阶导数的不连续来判断一个点是否是边点。因为反射光以及边界附近的曲率变化大，靠近尖锐边的测量数据是不可靠的，而且可用于分割的点的数量较少，只有接近边的点是可用的，这意味着判断依据对“假”数据具有高的敏感性，同时找出的具有相切连续或者高阶连续的光滑边也是不可靠的。

基于面的技术是确定哪些点属于某个面，这种方法和曲面的拟合结合在一起，在处理点数据的过程中，这种方法同时完成了曲面的拟合。因此，相比较基于边的方法，基于面的方法是数据分割中具有发展前途的一种技术。

2.4 小结

数据采集和处理是反求工程中的首要环节。本章首先介绍了接触式、非接触式测量方法及复合式测量等数据采集方法，接着给出了数据采集设备和策略，然后讨论了多视图点云数据的拼合、点云的平滑、精简、分割等点云数据的处理技术。

第三章 模型的三维实体重构

在反求工程中，实物的三维 CAD 模型重建是整个过程中最关键、最复杂的一环，因为后续的快速原型制造、产品加工制造、虚拟制造仿真、工程分析和产品的再设计等应用都需要 CAD 数学模型的支持。这些应用都不同程度地要求重建的 CAD 模型能准确的还原实物样件。模型的三维实体重构工作的进行受两个因素的影响，一是设备硬件，包括数字化设备和造型软件；二是操作者的经验。整个环节具有工作量大、技术性强的特点，因此，针对产品外形的不同的几何特性，选用合适的模型重建方法是非常重要的。

3.1 曲线曲面重构理论

曲面造型(Surface Modeling)是计算机辅助几何设计和计算机图形学的一项重要内容，主要研究在计算机图像系统的环境下对曲面的表示、设计、显示和分析。想要获得良好的曲面反求效果，必须对曲面造型技术有所了解^[61]。

1963 年，美国波音飞机公司的费格森(Ferguson)首先提出了将曲线、曲面表示为参数矢函数方法。并最早引入参数三次曲线，构造了组合曲线和由四角点的位置矢量及两个方向的切矢定义的费格森双三次曲面片。

1964 年，美国麻省理工学院的孔斯(Coons)发表了一个具有一般性的曲面描述方法，给定围成封闭曲线的四条边界就可定义一块曲面片。但这种方法存在形状控制与连接问题。

1971 年，法国雷诺(Renault)汽车公司的贝齐尔(Bezier)提出了一种由控制多边形设计曲线的新方法。设计员只要移动控制顶点就可方便地修改曲线的形状，而且形状的变化完全在预料之中。该方法简单易用，又较好地解决了整体形状控制问题。为曲面造型的进一步发展奠定了坚实基础。

1972 年, De-Boor 总结出关于 B 样条的一套标准算法, 1974 年, 美国通用汽车公司的戈登(Gordon) 和里森费尔德(Riesenfeld)将 B 样条理论应用于形状描述, 提出了 B 样条方法。它几乎继承了贝齐尔方法的一切优点, 克服了贝齐尔方法存在的缺点, 较成功地解决了局部控制问题, 又轻而易举地在参数连续性基础上解决了连接问题。与控制多边形和节点相联系, 1980 年分别由伯姆(Boehm)和科恩(Cohen)等人给出的节点插入技术是 B 样条方法中最重要的配套技术。

上述几种方法尤其是 B 样条方法较成功地解决了自由型曲线曲面形状的描述问题。然而, 将其应用于圆锥截线及初等解析曲面却是不成功的, 都只能给出近似表示, 不能满足大多数机械产品的要求。为了解决这个问题, 1975 年, 美国锡拉丘兹大学的费斯普里尔(Versprille)在他的博士论文中首先提出了有理 B 样条方法。美国的皮格尔(Piegl)和蒂勒(Tiller)将有理 B 样条发展为非均匀有理 B 样条(Non-Uniform Rational BSpline, 简称 NURBS)方法。20 世纪 80 年代后期, 非均匀有理 B 样条方法成为用于曲线曲面描述的最广泛流行的数学方法。非有理与有理贝齐尔曲线曲面和非有理 B 样条曲线曲面都被统一在 NURBS 标准形式之中。20 世纪 80 年代美国就首先把 NURBS 纳入初始图形交换规范 IGES, 成为美国国家标准。国际标准化组织 ISO 于 1991 年颁布了关于工业产品数据交换的 STEP 国际标准, 把 NURBS 作为定义工业产品几何形状的唯一数学方法。

当今主要流行的三维 CAD 软件如 UG, Pro/E, CATIA, IDEAS 等, 其自由曲面造型模块主要采用 NURBS 作为数学理论基础, 有的同时也采用 B 样条、Bezier 做数学理论基础。

曲面重构是反求工程中最为关键也是最困难的一步, 它是指根据测量得到的离散数据点云将被测物体的表面用一些分片光滑、整体连续的曲面(在一定的误差范围内)表达出来, 其目的在于寻找某种数学描述形式, 精确、简洁地描述一个给定物理曲面的形状, 并以此为依据对曲面本身进行分析、计算、修改和绘制。

目前, 在反求工程中, 主要有两种曲面重构方案^[62]: 一是以三角

Bezier 曲面为基础的曲面重构方案，二是以一般 B 样条或 NURBS 曲面为基础的曲面重构方案。

3.1.1 三角 Bezier 曲线曲面重构

Bezier 曲线是法国雷诺汽车公司工程师 Bezier^[63]于 1962 年创立的。Bezier 的方法是用折线组成的多边形来定义一条曲线，设计者先用折线多边形描绘这条曲线的大致轮廓，再用 Bezier 曲线表达式产生一条光滑的曲线，如图 3-1 所示。若达不到要求，再改变多边形顶点位置，直到构造出满意的曲线为止。由于其几何造型的设计可依据较少的控制点来操作和控制，对于造型的设计有相当大的弹性。

Bezier 的曲线方程式为：

$$C(u) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(u) \quad (0 \leq u \leq 1) \quad (3-1)$$

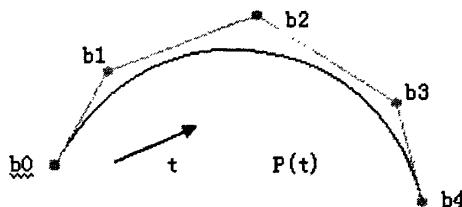


图 3-1 Bezier 曲线

式中： $B_{i,n}(u)$ —Bezier 基函数；

p_i —控制点或控制端点；

n—阶数；

u—参数值。

Bezier 基函数 $B_{i,n}(u)$ 定义为：

$$B_{i,n}(u) = C_n^i u^i (1-u)^{n-i} = \frac{n!}{i!(n-i)!} u^i (1-u)^{n-i} \quad (3-2)$$

Bezier 曲线具有直观性、几何不变性、凸包性及保凸性等优点。但同时，它也有局部修改能力差的缺点。

Bezier 曲面方程表示为：

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n B_{i,m}(u) B_{j,n}(v) P_{i,j} \quad u, v \in [0, 1] \quad (3-3)$$

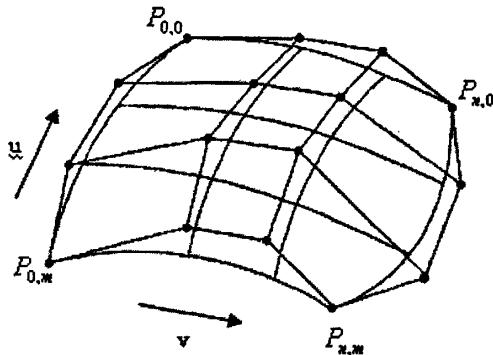


图 3-2 Bezier 曲面

式中: $p_{i,j}$ —曲面的控制点;

$B_{i,m}(u) = C_m^i u^i (1-u)^{m-i}$, $B_{j,n}(v) = C_n^j v^j (1-v)^{n-j}$ 为基函数;

m, n —在 u 和 v 方向上的阶数。

三角 Bezier 曲面重构的一般过程为:(1)对给定的散乱数据点进行三角剖分, 并作必要的修正; (2)计算三角网格边界条件; (3)构造整体 G^1 连续的散乱数据插值曲面。三角 Bezier 曲面具有构造灵活、边界适应性良好的特点, 在复杂曲面的反求工程中一直受到重视, 尤其是在处理像人面那样无规则复杂型面的物体特别适用。但它同时也具有相当致命的缺点, 三角 Bezier 曲面和通用的 CAD/CAM 系统中的曲面表达形式不兼容, 使得它和通用 CAD/CAM 系统的数据和图形交换难以实现; 同时三角 Bezier 曲面的修改也比较困难, 此外有关三角 Bezier 曲面的一些计算方法的研究也还不成熟, 这些因素限制了它在实践中的应用。

3.1.2 一般 B 样条曲线曲面重构

对于像飞机、汽车、船舶等曲面零件, 既不像单独的二次曲面那样简单, 也不像人脸曲面那样毫无规律, 常采用一般 B 样条或 NURBS 曲面重构技术。原因在于 B 样条或 NURBS 曲面表示是目前成熟的商品化 CAD/CAM 系统中广泛应用的曲面表示方法, 所以采用一般 B 样条或 NURBS 进行曲面重构和主流的 CAD 系统兼容性好, 便于进行数据交换,

同时可以利用现有 CAD 系统强大的曲面曲线生成和编辑功能来完善曲面的重构。在反求工程中，一般 B 样条或 NURBS 曲面重构的通常过程为：(1)对分割后的区域先进行曲线拟合；(2)曲面拟合；(3)曲面的光滑拼接；(4)曲面的修改和优化。

20 世纪 70 年代初期，Riesenfeld^[64]等人在研究 Bezier 方法的基础上，把 B 样条函数作以推广，从而形成了 B 样条曲线。B 样条曲线继承了 Bezier 曲线的优点，同时又克服了其局部修改能力差的缺点。B 样条曲线已成为目前 CAGD 中最受设计者欢迎的一种设计工具。

B-Spline 曲线方程式表示为：

$$C(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(u) \quad (3-4)$$

式中： P_i — 控制点；

$N_{i,k}(u)$ — B-Spline 的基函数；

u — 参数值；

k — 阶数。

B-Spline 基函数定义如下：

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & \text{若 } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (3-5)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u)$$

B-Spline 基函数对 B-Spline 曲线的影响如同 Bezier 基函数对 Bezier 曲线的作用一样，都是属于混合函数的一种。不同的是在 B-Spline 基函数的定义中 B-Spline 增加了节点向量，使得当控制点改变时，只会影响部分曲线，使其有较好的局部控制性。B-Spline 曲线具有良好的区域控制性、直观性、凸包性、保凸性和磨光性。

B-Spline 曲面方程表示为：

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n P_{ij} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) \quad u, v \in [0, 1] \quad (3-6)$$

式中： P_{ij} — 曲面的控制点；

$N_{i,k}(u)$, $N_{j,l}(v)$ —B-Spline 基函数。

B-Spline 曲面则具有和 B-Spline 曲线相同的性质，基本上是由一维参数延伸至二维参数(u, v)。B 样条方法在表示与设计自由型曲线曲面形状时显示了强大的威力，然而在表示与设计由二次曲面与平面构成的初等曲面时却遇到了麻烦。因为 B 样条曲线包括其特例的 Bezier 曲线都不能精确表示除抛物线以外的二次曲线弧，B 样条曲面包括其特例的 Bezier 曲面都不能精确表示除抛物面以外的二次曲面，只能给出近似的表示。近似表示将带来处理上的麻烦，使本来简单的间题复杂化，还带来原来不存在的设计误差问题。

3.1.3 NURBS 曲线曲面重构

为了解决上述问题，精确的表示二次曲线弧与二次曲面，就必须采用非均匀有理 B 样条方法。NURBS 方法是一种既能描述自由型曲线曲面又能精确表示二次曲线与二次曲面的数学方法^[65]。

非均匀有理 B 样条曲线(NURBS)方程式表示为：

$$C(u) = \sum_{i=0}^n \omega_i p_i N_{i,k}(u) / \sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u) \quad 0 \leq u \leq 1 \quad (3-7)$$

式中： p_i —控制顶点； $N_{i,k}(u)$ —k 次 B-Spline 基函数； ω_i —加权值； u —参数值。

由于加权值的加入，使得控制点对曲线的控制产生不同比例的影响，当加权值修改时会使曲线远离或接近控制多边形。NURBS 曲线具有与一般 B 样条曲线类似的性质，如局部性、连续性、凸包性等，它是描述样条曲线的一种有效方法，它能够将二次圆锥曲线和自由曲线统一起来，并且给了用户更多的控制调整曲线形状的能力。

NURBS 曲面方程表示为：

$$C(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{ij} P_{ij} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) / \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{ij} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v) \quad u, v \in [0, 1] \quad (3-8)$$

式中： P_{ij} —曲面的控制点； $N_{i,k}(u)$, $N_{j,l}(v)$ —B-Spline 基函数； ω_{ij} —加权值。U 向和 V 向的节点矢量分别为：

$U(0, 0, \Lambda, 0, u_0, u_1, \Lambda, u_{m+k+l}, 1, 1, \Lambda, 1)$ 和 $V(0, 0, \Lambda, 0, v_0, v_1, \Lambda, v_{n+k+l}, 1, 1, \Lambda, 1)$ 。

NURBS 方法具有很多优点，突出的有：

- (1) 可用一个统一的数学形式精确描述初等曲线曲面和自由型曲线曲面，是 B 样条和 Bezier 曲线、曲面的推广。
- (2) NURBS 方法计算稳定，且速度快。
- (3) 由操纵控制顶点及权因子为各种形状设计提供了充分的灵活性。修改曲线曲面形状时，即可以借助调整控制点，也可以利用权因子。
- (4) NURBS 在比例、旋转、平移、剪切以及平行和透视投影变换下是不变的。
- (5) 强的凸包性质，整条 NURBS 曲线位于所有定义各曲线段的控制点的凸包的并集内。

由于 NURBS 方法的突出优点，它在 CAD/CAM 与计算机图形学领域获得越来越广泛的应用。

3.2 基于特征的反求建模技术

传统的反求工程中，无论采用三角曲面还是四边域曲面建模，所得到的曲面模型只能实现对样件的原样拷贝。很难提取和表达隐含在点云数据中的特征信息和原始设计信息，而且重建的模型也很难进行修改。无法实现创新设计和系列化设计。正向设计中的特征造型技术已经比较成熟，由于特征是几何参数、约束信息、拓扑信息等各种信息的综合表达，显然，采用特征表达的反求工程模型，相对于传统的曲面模型具有无可比拟的优势。

基于特征的反求工程是将正向设计中的特征技术引入到反求工程中产生的一种新的反求工程 CAD 建模思路，它通过抽取表达原始设计意图的、蕴涵在测量数据中的特征，重建出基于特征表达的参数化 CAD 模型。目前主要形成了 3 种具有代表性的基于特征的反求工程 CAD 建模方法：特征模板匹配法、特征元提取方法、直接基于点云数据的特征处理方法^[40]。

3.2.1 特征模板匹配法

特征模板匹配法主要针对特定领域的反求工程建模问题，在对同类

零件的事物或 CAD 模型进行大量分析的基础上找出其公共特征，建立所有公共特征的参数化特征模板库。在反求工程建模时，将特征模板与测量数据进行匹配，按匹配结果对点云数据进行分块，然后基于模板与分块点云进行约束优化求解来修改特征参数，最后组装、编辑得到 CAD 模型。该方法在针对特定领域的某一类实物的反求工程建模时具有优势，可以快速、准确地重建出参数化特征表达的 CAD 模型。

3.2.2 特征元提取方法

特征元提取方法是通过提取测量数据中的各种曲面基元，实现数据的分块，然后根据提取参数来重建特征曲面，或直接基于分块点云进行曲面拟合，最后基于分块曲面重建 B-rep 表达的 CAD 模型。特征元提取方法则适用范围较广，通过曲面元的提取可以获取平面、球面和柱面等二次曲面，以及拉伸、旋转等简单自由曲面，为各种复杂组合特征(如汽车钣金件上大量存在的凸台、压陷、孔、槽等)的提取打下了坚实的基础。由于特征元提取方法具有更为广泛的适用性、符合正向设计的思路，逐渐成为基于特征的反求工程技术的主要发展方向。一般提到的基于特征的反求工程就是指这种反求工程 CAD 建模方法。

3.2.3 直接基于点云数据的特征处理方法

直接基于点云数据的特征处理方法是对点云数据特征提取与区域分割分割的基础上，进行过渡曲面、二次曲面、提取及拉伸、旋转等简单自由曲面特征提取。直接基于点云数据的特征提取及曲面重建方法可避免大规模散乱点云的复杂三角化计算，满足了产品快速开发中对效率的要求，而且由于近年来各种新的数学方法和工具的引入，使直接基于点云的各种微分几何量的估算精度可以满足较高的要求，在反求工程 CAD 建模方法中，直接基于点云数据的特征处理和计算方法正受到越来越广泛的关注和研究，其相关技术正逐步成熟，成为基于特征的反求工程中特征处理的主要方法。下面所提到的基于特征的处理方法皆为直接基于点云数据的特征处理方法。在该方法中对于曲面特征和截面特征，通过用基于曲面特征的反求工程建模策略和基于截面特征反求工程建模策略来分别处理。

(1) 基于曲面特征的反求工程建模策略

基于曲面特征的反求工程 CAD 建模策略, 如图 3-3 所示。通过该策略, 识别并提取出蕴涵在点云数据中的二次曲面、简单自由曲面(拉伸、旋转等)、过渡曲面等曲面特征, 然后基于提取的参数进行曲面重建, 剩下的纯自由曲面区域则可以通过直接基于点云数据和边界曲线的约束重构得到。利用基于曲面特征的反求工程建模策略可以分析并制定模型的重建方案, 并得到特征表达的反求工程曲面模型。

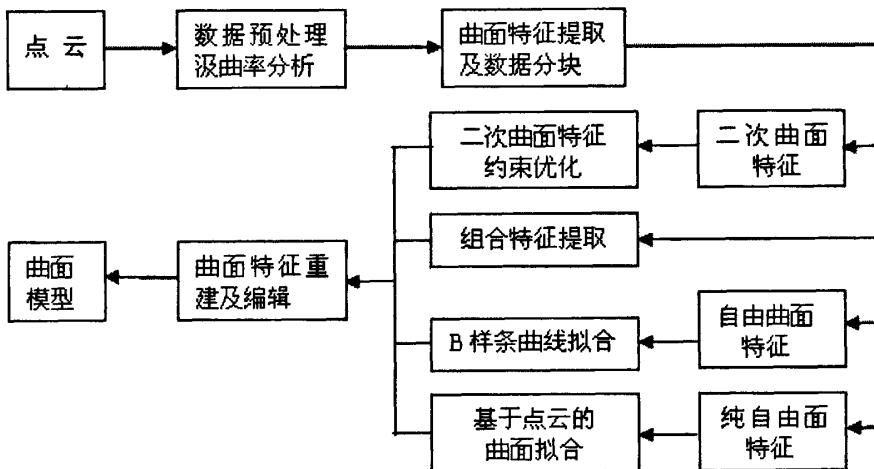


图 3-3 基于曲面特征的反求工程建模策略

(2) 基于截面特征的反求工程建模策略

正向设计过程中, 很多零件的设计都是从二维草图开始的。因此, 在基于特征的反求工程中, 随着 2 维截面特征处理技术研究的系统和深入, 形成了一种基于截面特征的反求工程建模策略。孤立的基于曲面特征的反求工程 CAD 建模策略并不能完成完整特征表达的 CAD 模型的重建, 例如, 拉伸曲面在特征提取时只获得了拉伸方向, 而拉伸截面线一般是由直线和圆弧组成的组合曲线, 直接用一条 B 样条曲线来重建, 既不准确也不能表达设计意图。基于截面特征的反求工程建模策略成为基于特征的反求工程中的一种重要的建模策略, 进一步推动了特征技术在反求工程中的应用和发展。基于截面特征的反求工程 CAD 建模策略的流程如图 3-4 所示。

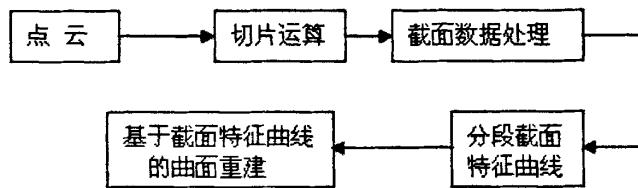


图 3-4 基于截面特征的反求工程建模策略

通过对点云数据进行切片得到截面数据，然后对截面数据在 2 维局部坐标系下进行处理得到分段表达的特征曲线，最后基于截面特征曲线重建曲面，得到特征表达的曲面。通过基于截面特征的建模方法得到的特征曲面与通过基于曲面特征的方法重建的特征曲面进行求交、裁剪、过渡等曲面操作，得到完整特征表达的曲面模型，将曲面模型用 IGES 格式输出到 UG, CATIA 等通用 CAD 软件中完成最终的实体模型。该实体 CAD 模型由于是特征表达的参数化的模型，易于通过参数修改实现模型的创新设计。

3.3 RE/CAD 复合建模技术

在反求工程中，很多时候最终需要得到的是产品的实体模型，产品的实体模型是后续 CAD/CAM/CAE 的需要。在后续的产品改型、快速原型加工以及数控加工产品、模具等都需要用到产品的实体模型。目前专用的反求软件一般可以得到产品的曲面模型，而一般的三维 CAD 软件在处理大数据量点云上的功能较弱，无法直接从大数据量点云构造产品的实体模型。因此有必要将专用的反求软件和一般的三维 CAD 软件结合起来，利用反求软件的点云处理和曲线、曲面建模功能结合一般三维 CAD 软件的特征和参数化建模功能，发挥二者的长处重构产品的最终实体模型。

大多数情况下，在反求软件中重构的特征曲线和曲面并不能在正向 CAD 软件中直接使用，主要是由于 CAD 平台的曲线曲面控制点、光顺性和表达方式的不同，在反求专用软件中得到的曲线、曲面在导入到三维 CAD 软件中时常常出现 CAD 实体建模方法无法完成的情况（如交并

差操作抽壳裁剪等）。例如本文是基于反求软件 Imageware 和 CAD 软件 UG 进行 RE/CAD 复合实体建模研究，在将反求重构得到的曲线曲面导入到 UG 中时，原先光顺的曲线出现控制点增多、局部发生振荡等问题。因此，需要对重构得到的几何元素进行特征重建。同时，也可在对海量点云数据处理过程中，采取提取截面特征线点云（也称造型线点云）的方法，得到模型的提取后的点云，该点云由于数据量小，因而可直接导入到 UG 中处理，避免了曲线、曲面导入的一些问题，对模型造型线的提取也是一个认识模型造型方法的过程，会使在后续的 CAD 建模中提高建模的效率。

本节主要讨论复合实体建模方法，从 RE 的点云、曲线、曲面模型得到产品的 CAD 实体模型。如图 3-5 所示为 RE/CAD 复合实体建模技术流程图。

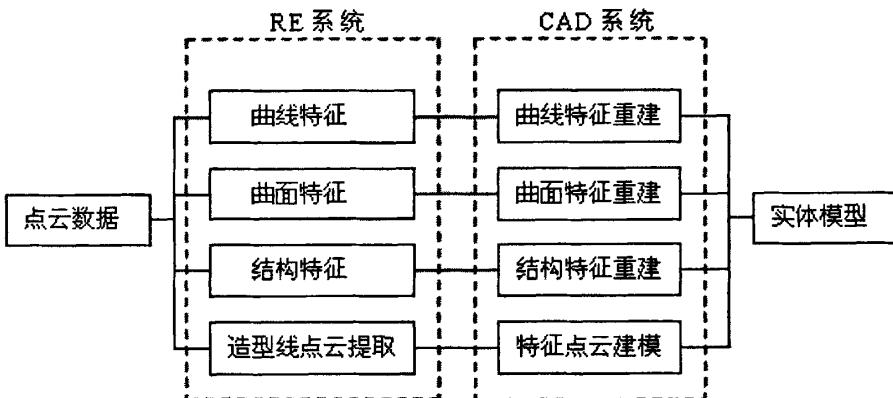


图 3-5 RE/CAD 复合实体建模技术流程图

3.3.1 特征重建

由于反求工程软件与 CAD 软件对几何元素的描述方法差异，在反求软件中重构得到的曲线和曲面在导入到 CAD 软件中时，出现对导入曲线无法完成正常的 CAD 编辑操作，如：无法进行曲线曲面的延伸、裁剪、缝合等编辑操作。因此为了在 CAD 系统中利用反求软件中重构得到的曲线曲面，以及提取的参数信息进行实体建模，必须对这些特征曲线和曲面进行重建。

(1) 曲线重建

如图 3-6 所示(a)图为在反求软件中重构得到的曲线图，这是一条光滑的样条曲线，为 4 阶 7 控制点的曲线。图(b)为导入到 CAD 软件 UG 以后该曲线示意图，查询该曲线信息可以得知曲线阶次为 3 次，控制点为 7，也就是说原先一条光滑的样条线现在成了一个降阶的由直线组成的折线段。图(c)为从原曲线上用等弧长的采样得到 16 个点，然后拟合得到的曲线。曲线阶次为 3 次顶点数为 16，最后将重建的曲线和原曲线进行误差比较，图(d)为重建曲线与原曲线误差比较图。当满足公差要求时，则完成曲线的重建，当误差太大时，可以通过增加采样点进行重新拟合重建曲线。

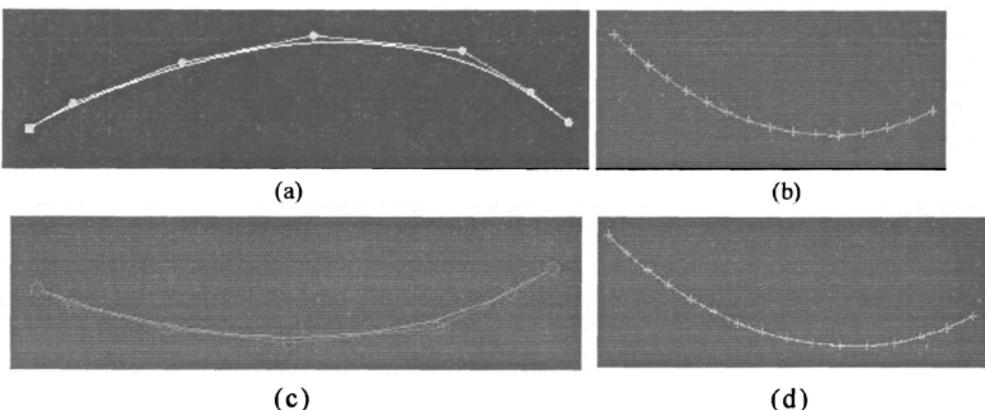


图 3-6 CAD 中曲线重建

(2) 曲面特征重建

在将曲面导入到 CAD 软件中时，曲面的几何描述也会发生变化，使得无法对这些重构曲面进行裁剪、缝合等编辑操作，因此在 CAD 实体建模的过程中，需要对反求软件中导入的曲面进行重建。就曲面类型来说，重构的曲面主要是二次曲面和自由曲面，二次曲面的重建比较简单，本节主要就自由曲面的重建进行讨论，自由曲面主要是由特征曲线通过蒙皮扫掠等方法得到，因此曲面的重建最终还是归结到曲线的重建上，下边以一个具体的曲面重建为例说明曲面重建中应注意的问题。如图 3-7 所示(a)图为在反求软件 Imageware 中重构的 7×4 阶曲面在导入到 UG 中以后曲面。如图(b)所示由曲面的控制节点可以看出，曲面在边界

处控制结构发生了变化，使得曲面和邻近曲面的连续性和光顺性发生了变化，从而无法进行后续的曲面裁剪和缝合等编辑操作，查询信息可知曲面也出现了降阶为 $6*3$ 阶，因此需要对该曲面进行重建，从原曲面上采样拟合得到放样曲线，然后通过放样的方法重建曲面。

(3) 结构特征重建

在一个具有复杂特征反求工程产品中还带有许多结构特征，如加强筋、凸台、定位孔等。这些结构特征对于产品来说，仅仅是起到增强结构强度以及辅助定位等作用。因此这些结构特征并不需要在反求阶段进行精确建模，只要在 CAD 实体设计阶段通过正向设计的方法，在重构的实体上添加这些结构特征就可以了，例如如图 3-8 所示的汽车阀体模型上由许多的加强筋、安装孔、凸台等结构件。对于这些结构特征只需要在 CAD 实体设计时，通过正向设计方法加上去就可以了。

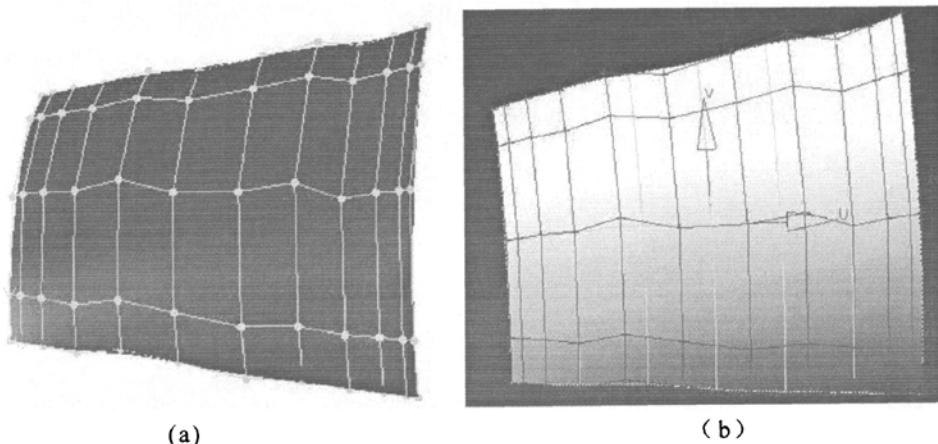


图 3-7 CAD 中曲面重建

3.3.2 基于截面特征线数据的造型

截面特征线数据的点云提取是该方法造型中较为关键的一步，该方法与 3.2.3 节的建模理念是相同的，区别在于该方法在反求系统中对截面特征线点云数据提取后，就以 IGES 的格式转入 CAD 软件，相比较而言该方法避免了大规模散乱点云的复杂三角化计算，提高了建模效率，减少了重构误差。

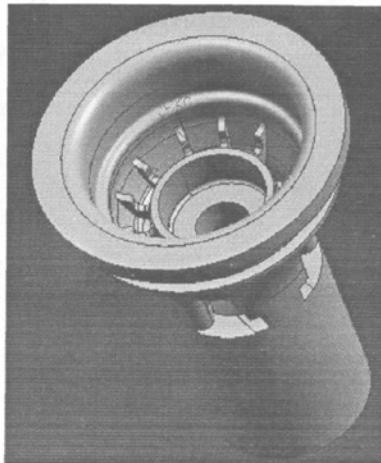


图 3-8 阀体模型中的结构特征

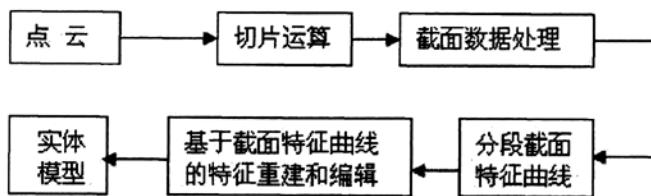


图 3-9 基于截面特征线数据的建模策略

该建模策略流程如图 3-9 所示, 主要可以分为截面特征线点云提取、在局部坐标系构建曲线、实体特征操作。

(1) 截面特征线点云提取

在提取点云时提取关键的截面特征造型线时, 使其和坐标轴或坐标平面重合、平行或成一定角度。具体措施为在需要提取点云的位置所在平面或垂直的平面内建立一过原点的直线, 在坐标轴或直线矢量方向上投影, 创建造型线点云, 取得该位置的特征点云。提取还可以进一步对所提取的特征点云进行去噪、光滑等工作。

提取时需要分析零件原型的结构且考虑后续的建模中所要采取的方法。根据原来物体的结构, 包括物体的逻辑结构、功能结构, 物体包含哪些标准件, 材料构成。物体表面颜色分布, 各个部件的几何尺寸, 不同部件之间的装配方式及不同部件之间的几何尺寸约束等。据此提取

截面特征数据，例如：零件主体为回转体，则应提取方便在 UG 中采用旋转来直接建立零件主体的截面特征线点云，如图 3-10 所示。

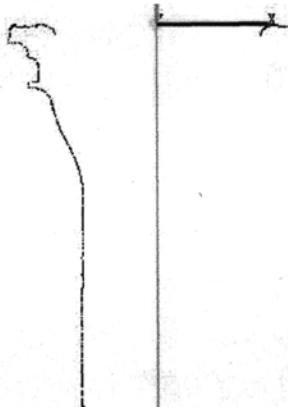


图 3-10 截面特征线数据提取

(2) 曲线构建

构线时，采用基于基准面的构线方法。可以采用三点法在特征线点云上建立基准面，如图 3-11 所示。据此基准面建立草图，在局部坐标系下完成对曲线的构建，构建时，尽量采用直线，三点圆弧构线如图 3-12 所示。然后以约束保证其相切。这样既可以保证曲线的光顺性，又达到了对其曲线特征的提取。通过剪切和桥接等曲线编辑工具使其成为一条曲线。通过曲率梳可以查看其光顺性。如果曲线不光滑可以通过曲线编辑来修改至光顺。

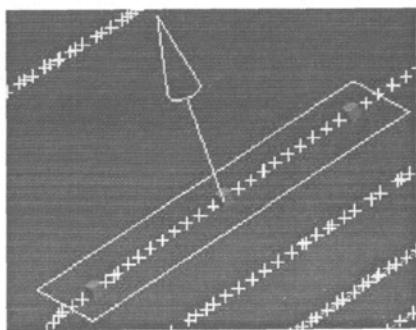


图 3-11 三点建立基准面

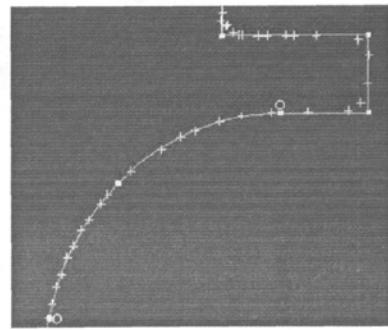


图 3-12 曲线构建

(3) 实体建模

由于提取的为截面特征，所以在建模时，可以采取多种方法完成模

型的构建：

① 对于结构简单的零件,用体素或扫描、旋转、拉伸等特征成型如图 3-13 所示；

② 用简单或复杂的实体作布尔运算，生成复杂的实体，用前面所求得的曲面去切割已有的实体，得到具有所需形状表面的实体；

③ 如果难以一次性地生成复杂曲面体，可以分别生成几个必要的复杂曲面，同时作出必要的起闭合作用的曲面或平面，然后将这些表面缝合起来生成实体，最后再进行产品结构设计，如加强筋、安装孔等，最后通过装配完成三维实体模型。

在实践中发现，采用该方法能够加快零件的设计，因为通过提取截面特征线的点云数据对零件的造型过程已经比较清楚。不过，在 UG 中造型时，由于经验欠缺或考虑不周等，难免在建模时发生缺少部分造型线的现象。这时，可以在 Imageware 中零件点云的相关位置提取造型线的点云，然后导入到当前 UG 零件中。在零件坐标不变的情况下，该点云即为所需造型点云。

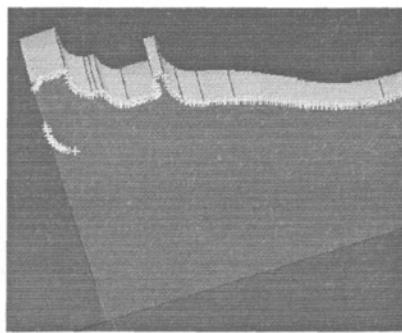


图 3-13 截面特征线旋转造型

3.4 模型质量评价

对重建模型的质量评价是反求工程研究的一项重要内容。反求产品性能达不到原设计要求，其中重建模型不能准确还原实物原型是主要原因之一，目前仍无精度评价标准，对反求模型的精度评价主要依靠一些能具体量化的指标。评价可以分为模型精度评价和表面品质评价。

3.4.1 模型精度评价

模型精度反映反求模型和实物以及模型和产品差距的大小，但在实际中一般比较反求模型和点云数据间的误差来评价反求模型和实物间的误差。此方法忽略了数字化过程的误差，应该说不是一个完整的方法。但在目前的技术条件下，还是采用该方法。

评价模型和点云之间的误差分为整体指标和局部指标。整体指标是指实物或模型总体性质，如整体几何尺寸、体积、面积以及几何特征间的几何约束关系，如孔、槽之间的尺寸和定位关系；局部指标指的是曲面片与实物对应面的偏离程度。

由于在反求工程中，可以用一系列采样点来描述实物样件，因此，实物样件与模型曲面之间的误差，表现为采样点与模型曲面之间的误差。模型与实物的对比问题转换为计算点到曲面的距离，其精度指标可以采用以下几个距离指标表示：最大距离、平均距离和距离误差估计等。当采样参考点到模型曲面的距离指标的最大值不超过给定的阈值，则可认为重建模型是合格的。用距离作为判定指标实际上反映的是造型拟合误差，其数值小于实际的反求模型精度值。

一般的做法是通过对比不同模型对应点之间的距离来检验实物模型和数字化模型的差异。根据测量学原理，对应点可以这样确定：在统一坐标下，对于实物上的点 P，曲面上的对应点是点 P 到模型曲面的最短距离。这样，模型曲面对比问题就转换为计算点到曲面的最短距离，当所有采样点到模型曲面的最短距离的最大值不超过给定的界限值，则认为重建模型是合格的。

3.4.2 表面品质评价

表面品质评价主要是评价曲面的光顺性，尽管可以通过曲面的曲率变化来评价光顺效果，但并无具体的曲率值作依据，主要以人的眼光来判断曲面是否光顺，通过曲面的高斯曲率分布、光照效果、反射分析和主曲率图观察和检验光顺效果。下面介绍一些常用的评价方法。

(1) 等曲率线法 等曲率线是曲面上具有相同曲率值的点连成的曲线，如 Gaussian 曲率，平均曲率和主曲率等，等曲率线也被称为相应

曲率的等高线。等曲率线可以用下面的方法得到，首先用式(3-9)为参数曲面 $S(u,v)$ 定义一标量函数 k ， k 是某种曲率。

$$k(u,v) = k(S(u,v)) \quad (3-9)$$

可以用它定义新的曲面：

$$p(u,v) = p(u,v,k(u,v)) = p(u,v,k(S(u,v))) \quad (3-10)$$

然后计算曲面 p 和一组平面 q 的交线，平面的个数等于预显示的等曲率线的条数，最后将参数空间中的等曲率线映射到曲面 $S(u,v)$ 上得到等曲率线。

(2) 反射线法(Kaufmann, 1986) 反射曲线是显示一线性光源由某一特定方向反射在曲面上的反射线。图形中只能显示通过特定点的反射曲线，或是特定范围内反射曲线。曲面上的细微缺陷，可以通过反射线的不规则扭曲反映出来。

(3) 高光线法 反射线的存在与视点有关，必须合理选择视点，Beizer 和 Chen(1994)研究了一种新的曲面评价方法—高光线法。该方法是一种简化的反射线法，取消了视点。高光线是曲面上一些点的集合，这些点的发矢和光线的垂直距离等于零，它可以通过计算等高线获得，具有较快的速度，是一种有效的、适合于实时曲面质量评价。

(4) 等照度法 等照度线法由 Poeschl 1984 年提出，等照度线是由曲面上具有相同光照度的点集合而成的曲线，如果 $S(u,v)$ 是参数曲面， L 为平行光线方向矢量，则等照度线的条件为：

$$[N(u,v), L] = c \quad (3-11)$$

式中， $N(u,v)$ 为曲面一点处法矢的方向矢量， c 为常数，如果曲面为 G^n 连续的，则其等照度线是 G^{n-1} 连续。如果等照度线连续性好且分布均匀则该曲面光顺性良好。

3.4.3 误差分析

在反求工程的每一个环节，从产品原型制造、数据测量、处理到模

型重建，均会产生误差，从而导致相当数量的积累误差，图 3-14 表示反求建模的误差源。

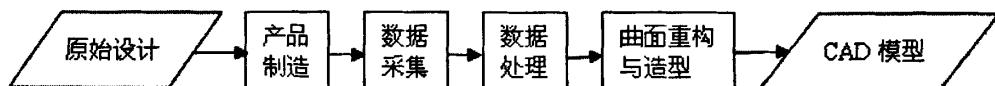


图 3-14 反求建模误差源

反求模型与实物样件的总误差即是各个环节的传递累积误差，其数学式为：

$$\varepsilon_{\text{总}} = f(\varepsilon_{\text{原}} + \varepsilon_{\text{测}} + \varepsilon_{\text{处}} + \varepsilon_{\text{构}}) \quad (3-12)$$

一般定义各项误差的均方根之和为精度误差，即精度量化指标，则有

$$\varepsilon_{\text{总}} = \sqrt{\varepsilon_{\text{原}}^2 + \varepsilon_{\text{测}}^2 + \varepsilon_{\text{处}}^2 + \varepsilon_{\text{构}}^2} \quad (3-13)$$

式中， $\varepsilon_{\text{原}}$ 为原型误差， $\varepsilon_{\text{测}}$ 为测量（数据采集）误差， $\varepsilon_{\text{处}}$ 为数据处理误差， $\varepsilon_{\text{构}}$ 为曲面重构误差。

下面将详细讨论上述几个误差的来源。

(1) 原型误差

反求工程基于实物样件来重构 CAD 模型，而基于原始设计制造样件时就存在制造误差，并且在使用过程中样件会产生磨损或变形，使得被测量原型的外形几何尺寸与原始设计间存在偏差。

(2) 测量误差

测量误差包括测量设备系统误差和人员操作误差。对于非接触式的测量设备，其系统误差有些是由各个子系统单独引起，有些则是由所有子系统共同引起的。传感器子系统的误差基本上都是由光学问题引起的，处理系统的误差则与测量设备的标定方法有关。

(3) 数据处理误差

在对数据点集处理时数据点云光顺和点云对齐等步骤时都会产生误差。

① 光顺误差。在使用高斯中值法，平均滤波法和中值滤波法对点云进行光顺时，点云中数据点的位置都会发生变化，这就导致了光顺误差的产生。

② 对齐误差。在点集的对齐过程中也会产生误差。在基于特征的对齐中，对齐误差主要来源于特征的测量误差和特征拟合误差。

(4)曲面重构误差

该误差主要来源于曲线和曲面的拟合误差，并且与反求工程软件和 CAD 软件的系统误差密切相关。

对于由点集体 P_j , $j=1,2,\dots,m$, 拟合得到的 B-spline 曲线 $S(u)$, 平均拟合误差 e_{av} 为

$$e_{av} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (e_j)^2} \quad (3-14)$$

$$e_j = |P_j - S(u_j)| \quad (3-15)$$

上述两式中， e_j 为点集中第 j 个点 P_j 到曲线的最短距离。

对于由点集 $P_{i,j}$, $i=1,2,\dots,m$, $j=1,2,\dots,n$, 拟合得到的 NURBS 曲面 $S(u,v)$, 平均拟合误差 e_{av} 为

$$e_{av} = \sqrt{\frac{1}{mn} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (e_{ij})^2} \quad (3-16)$$

$$e_{ij} = |P_{ij} - S(u_i, v_j)| \quad (3-17)$$

3.4.4 误差控制

如上一节所述，在反求工程中从数据测量到实物加工，误差是不可避免地存在的。为提高精度必须将各项误差减小或控制在产品允许的范围内，但误差的大小难以提出一个量的要求。总的控制原则是满足产品的几何尺寸装配和力学性能的要求。在考虑技术措施时，应根据不同的产品反求要求采取不同的策略。当反求产品出现偏差时，找出误差原因加以修正和控制。针对不同的误差来源采取相应的措施如下：

(1) 综合考虑样件的磨损、表面粗糙度的影响，降低原型误差对整

个反求工程的影响；

- (2) 研究更加实用的测量方法和设备，尽量减少人为因素如操作人员的视觉误差、操作误差的影响，从而减小测量误差；
- (3) 提高计算精度，减少数据的转换，在测量过程中尽量减少基准变换的次数，尽量一次完成对工件数据的采集，减小数据处理误差；
- (4) 在造型方法中尽量减小造型误差。

为了提高拟合精度，使重构参数最大限度地接近原始设计参数，利用重构参数制造出的产品能够在公差配合要求的范围内，应用于被反求物体的工作环境中。在处理的数据是顺序测量而得到的规则数据且无法获知原始设计参数的情况下采取三种方法来提高重构精度：增加采样点个数；采用合理的拟合方法；修改坏点。

(1) 增加采样点个数

增加采样点个数主要通过两种方法实现，仅在误差较大的点附近进行采样点加密后重新重构 B 样条曲线，这种方法若在计算机上实现需要先找到误差最大点的位置。然后在它附近适当地，有规律地选择几个数据作为数据加密点。若加密后不再计算误差就直接生成 B 样条曲线，则以上算法在计算机上实现起来很复杂。若加密后还需计算误差，则在选取中间采样点进行误差计算时其算法实现起来更是困难。为了便于计算机自动实现误差计算，可在预先选定的采样点之间，等距地成倍加密采样点数量，如图 3-15 所示(a)图为 13 个采样点拟合后的曲线，(b)图为拟合误差比较图最大误差为 0.89mm，(c)图为采样点增加到 26 个时的拟合曲线，(d)图为拟合误差比较图最大误差为 0.10mm。

(2) 合理的拟合方法

若仅靠增加测量点个数来提高拟合精度，当数据点个数增加到一定数量，反算控制点时，速度会变慢。这就需要找到如何用最少的点来拟合出精度最高，重构形状最为接近原始形状的插值曲线的方法，即如何采用合理的拟合方法来提高拟合精度，在对各种拟合方法进行研究及测量数据进行分析的基础上，对曲线的拟合采用三次均匀 B 样条曲线直接插值和等距曲线插值的方法。

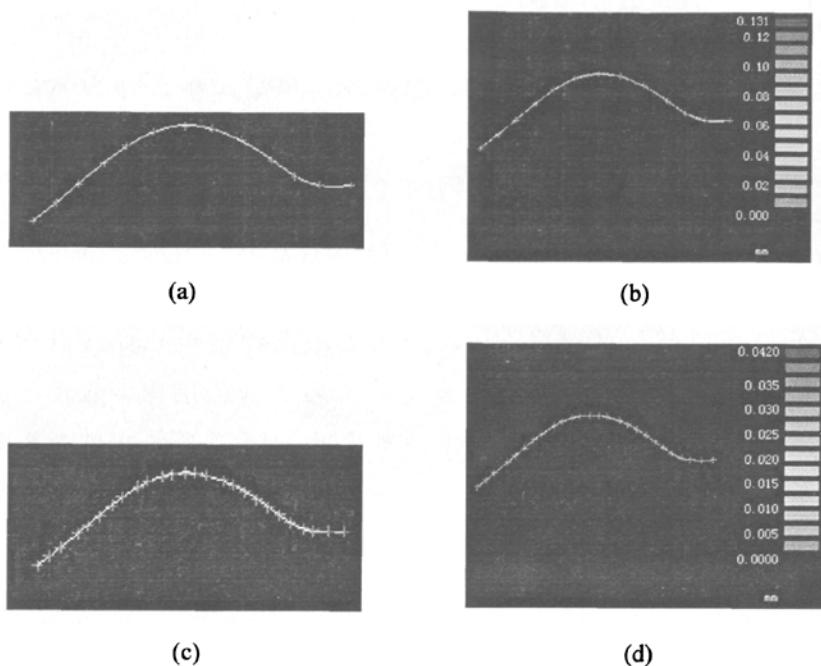


图 3-15 曲线拟合

(3) 修改坏点

通过最大误差和标准误差可以判别是否存在有坏点及坏点是否需要修正，从曲线曲面造型的角度来讲，修正坏点的方法有两种：去除坏点和对坏点处进行局部光顺处理。若坏点较多则需对所有型值点进行光顺处理，如图 3-16 所示 (a) 为修改前拟合曲线，(b) 为修改后拟合的曲线。

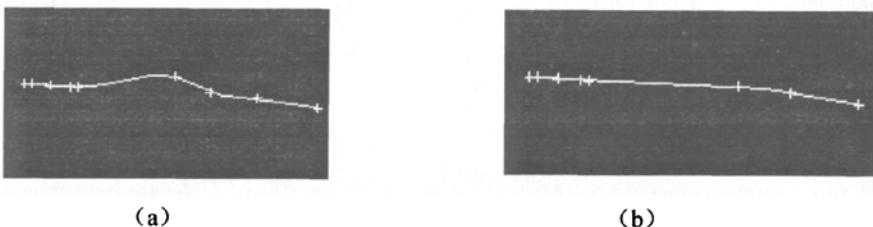


图 3-16 修改坏点

3.5 小结

实物的三维 CAD 模型重建是敏捷制造整个过程中最关键、最复杂的一环，需针对产品外形的不同几何特性，选用合适的模型重建方法。

首先，阐述了曲面模型重构的理论。当今主流三维 CAD 软件其自由曲面造型模块主要采用 NURBS 作为数学理论基础，有的同时也采用 B 样条、Bezier 做数学理论基础。

其二，讨论了基于特征的反求建模技术，着重介绍了对基于曲面特征和基于截面特征的反求工程建模策略。

其三，对 RE/CAD 复合实体建模的关键技术进行了分析和研究，提出了一种基于点云切片的截面特征线提取建模方法，避免了大规模散乱点云的复杂三角化计算，提高了建模效率，减少了重构误差。

其四，对反求模型的质量评价进行了讨论，提出了误差控制的方法和提高造型精度的方法。

第四章 基于反求工程的产品制造

集成反求工程系统中，产品制造子系统主要是加工制造设备，包括各种数控机床、快速成型机等，测得的数据经数据处理和转换，输入到加工制造系统，最终得到产品样件、实物和模具。在完成 CAD 模型重构后，其后续应用可利用快速原型、快速模具和数控加工技术来制造原型、模具和批量产品。另一方面，利用快速原型和快速模具制造技术制造产品毛坯，再进行数控加工，可有效地提高产品制造的效率和质量。

4.1 快速原型制造技术

RP 技术产生背景是现代工业已从大规模批量生产转变为小批量个性化生产，产品的生命周期越来越短，同时对产品质量和外观设计水平的要求也越来越高。它在航空航天、机械电子及医疗卫生等领域有着广阔的应用前景，并迅速成为制造领域的研究热点^[66]。

4.1.1 基本原理

快速原型制造（Rapid Prototyping & Manufacturing, RP&M）又称为层加工，其基本原理是：根据三维 CAD 模型，对其进行分层切片，从而得到各层截面的轮廓。依照这样的截面轮廓，用计算机控制激光束固化一层层的液态光敏树脂，或切割一层层的纸，或烧结一层层粉末材料，或利用某种热源有选择地喷射出一层层热熔材料，从而形成各种不同截面并逐步叠加成三维产品。层加工法弥补了传统的材料切削加工方法的不足。它不含有切削、装夹和其他操作，从而可以节省大量的时间。与传统方法相比其具有独特的优越性和特点：

- (1) 产品制造过程几乎与零件的复杂性无关，可实现自由制造(Free Form Fabrication)，这是传统方法无法比拟的；
- (2) 产品的单价几乎与批量无关，特别适合于新产品的开发和单件小批量零件的生产；

(3) 由于采用非接触加工的方式，没有工具更换和磨损之类的问题，可做到无人值守，无需机加工方面的专门知识就可操作；

(4) 无切割、噪音和振动等，有利于环保；

(5) 整个生产过程数字化，与 CAD 模型具有直接的关联，零件可大可小，所见即所得，可随时修改，随时制造；

(6) 与传统方法结合，可实现快速铸造，快速模具制造，小批量零件生产等功能，为传统制造方法注入新的活力。

4.1.2 快速原型制造工艺

目前，已研制成功并有商品化产品的快速原型系统按其工作原理可分为以下 4 种^[50,67]：

(1) 分层实体制造 (LOM—Laminated Object Manufacturing) 方法，指用激光束将单面涂有热熔胶的纸片切割成形，最终层叠成纸质模型的方法。

(2) 选择性激光烧结 (SLS—Selected Laser Sintering) 方法，指用树脂、蜡、塑料、陶瓷或金属等粉末通过激光束的照射使之烧结、熔着、固化而层积成实物模型。

(3) 熔融沉积造型 (FDM—Fused Deposition Modeling) 方法，指用 CAD 分层数据控制并使流动状态的熔丝材料从喷头中挤压出来，经凝固形成轮廓形状的薄层，从而堆砌成整个实物模型。本文所使用的快速成形机就是采用 FDM 方法加工出实物的。

(4) 光固化立体造型 (SLA—Stereolithography) 方法，指通过激光扫描，逐层固化液状树脂，层积为实物模型。

4.1.3 基于反求工程的快速原型加工过程

随着快速原型技术的快速发展，基于 RP 的快速工、模具制造新技术不断涌现。RE 与 RP 结合使得 RP 技术在制造领域的应用更加广泛，因为 RP 离不开 CAD 软件系统设计出的 CAD 模型；没有 CAD 模型，RP 将无从谈起。而现有 RP 制造系统大多采用成熟的 CAD 系统，都需首先在 CAD 系统中建起 CAD 模型，而复杂实体很难或根本就无法建立其 CAD 模型，这给 RP 的数据来源带来了不小的限制，也正好与 RP 善

于制造复杂三维形体的优势相矛盾。利用反求技术则可以解决这个问题，它能根据多种数据来源(如三维测量数据、相片、CT 等)重构出实体的 CAD 模型，从而成为 RP 技术有益甚至是十分必要的手段。反求工程在 RP 中的应用主要集中在以下方面：

- ① 利用反求技术生成 STL 文件(Stereo Lithography File)，供 RP 系统的数据处理软件直接使用，产生 NC 代码；
- ② 利用反求技术生成层片文件—CLI 文件，这种输出比较适用于对各种散乱点数据和 CT 图像的反求，并且由于 RP 本身就是分层制造法，用反求得到的矢量化层片轮廓信息直接驱动 RP 设备逐层叠加而成为三维实体；
- ③ 利用反求技术来重构出实体模型，借助于 CAD 系统来转化成 STL 文件。

基于反求工程的快速原型制造技术的工艺流程，如图 4-1 所示。基于反求工程的快速原型加工过程分为三个步骤，分别是前处理、快速原型系统工作、后处理。

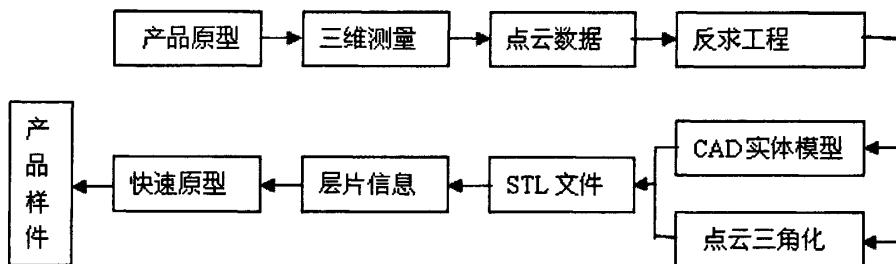


图 4-1 基于反求工程的快速原型制造技术工艺流程

(1) 前处理

① 构造三维模型

通过反求工程，可以很方便的对已有工件进行复制和局部的改型。在汽车、摩托车的开发设计中，常常通过反求工程模仿国外的先进车型，或是对制作的油泥车进行扫描以得到车型的三维几何模型。结合本文第二章、第三章的反求工程技术，在 UG 或其它三维软件中完成对模型的三维实体重构后，由于模型上往往有一些不规则的自由曲面，加工前必

须进行近似处理，通常的方法就是用一系列小三角形平面来逼近模型的自由曲面，通过选择三角形的大小，从而得到不同的精度，经过这种近似处理的三维模型文件称为 STL 格式文件。

对曲面复杂而精度要求不高的（如玩具、雕塑）零件，在完全仿制的情况下，也可以不建立 CAD 模型，由测量数据直接生成 STL 文件，送至快速原型设备进行加工。一般来说，由 UG 或其它软件导出的 STL 格式的文件，不同的文件格式转换的时候，容易产生一些误差，所以在进行 RP 加工前，要采用 Magics 修复 RP 软件对其进行修补，以保证 STL 格式模型的完整性。

② 成型方向的选择

不同的成型方向会导致不同的材料消耗量。对于需要外支撑结构的快速原型技术，如 SLA 和 FDM 等，材料消耗量应包括制作支撑结构所需要的材料。对于原材料可回收的成型方法如 SLS 等，由于工件的体积是恒定的，成型时未烧结的原材料可回收再使用，因此成型方向对所需材料影响不大。而对于 LOM 成型，由于其废料不能再利用，因此材料消耗量与不同成型方向时产生的废料量有很大关系。

成型方向对成型时间也有很大的影响。工件的成型时间由前处理时间、分层叠加成型时间和后处理时间组成。其中，前处理是成型数据的准备过程，通常只占总制作时间的很小部分。一般成型方向对后处理时间的影响比较明显。对于无需支撑结构的成型方法，后处理时间可以看作与成型方向无关。当需要支撑结构时，后处理时间与支撑的体积有关，从而与成型方向有关。成型时间等于层成型时间及层与层之间的中间处理时间之和，它随着成型方向的变化而变化。对于 SLA、SLS 和 FDM 成型方法，其成型时间可用下式表示^[67]：

$$T_f = N \cdot T_w + (V/\Delta Z) \cdot T_u \quad (4-1)$$

式中， T_f —总成型时间； N —层数； T_w —一层与层之间的中间处理时间； V —需成型的材料体积； ΔZ —层厚； T_u —单位材料面积所需的固化时间。

对于需要支撑结构的成型法，不同的工件成型方向可能导致不同的

支撑结构的体积，因此会影响成型时间。

(3) 切片处理

由于快速原型是按一层一层截面轮廓来进行加工的，因此，加工前必须对 STL 格式的三维几何模型进行切片处理，即用切片软件，沿成型的高度方向，每隔一定的间隔进行切片处理，以便提取截面的轮廓。切片间隔的范围为 $0.05\sim0.5$ mm，间隔越小，精度越高，成型时间越长，否则反之。常用 0.1 mm 左右，在此取值下，能得到相当光滑的原型曲面。成型时每层叠加的材料厚度应与所选的间隔相等，需要注意的是切片间隔不得小于每层叠加的最小材料厚度。各种快速成型系统都带有切片处理软件，能自动提取模型的截面轮廓。它的实质是将几何模型变成轮廓线表达，这些轮廓线代表模型在切片层上的边界，它由一个个以 Z 轴正方向为法向的平面与 STL 格式化的模型相交计算而得到。

在实践中通常采用的是等厚度分层方法，即自上而下对 STL 格式化的三维模型按相等的层厚进行切片。显然，这种分层方法比较简单，但是，当选定的厚度比较大时，容易造成工件较大的误差，当选定的厚度较小时，虽然可较好地保证工件的精度，但成型效率会降低。

为了克服经过 STL 格式化后再切片的弊病，近年来进行了许多对原始的 CAD 模型进行直接切片的研究。这样不仅能克服三角形近似处理造成的误差，提高成型工件的精度，还可克服 STL 格式文件数据量过大的缺点，减少模型文件的规模。

当前一些学者也在研究对离散数据点云直接进行自适应性分层的方法^[69]。由于是从点云直接到可用于 RP 制造的分层文件，这样可以大大提高图形处理的效率，而且也避免了点云到 CAD 模型及 STL 格式模型文件的转化过程中的误差。通过设定公差，可以把误差控制在很小的范围内。

(2) 快速原型系统工作

快速原型系统的工作过程就是根据计算机提供的经过切片处理的三维模型，在快速原型机上按照每一层截面的轮廓，在计算机的控制下，用激光切割纸、烧结粉末材料或用喷头喷吐粘结剂、热熔材料，形成每

一层相应的截面轮廓，并顺序分层叠加从而形成快速制件的过程，它是快速原型技术的核心部分。

(3) 后处理

从快速原型上取下的制品往往需要进行剥离，以便去除废料和支撑结构，有的还需要进行后固化、修补、打磨、抛光和表面强化处理等。可采用喷漆、金属电弧喷涂、电化学沉积等工艺。

① 剥离

剥离是将成型过程中产生的废料、支撑结构与工件分离。一般来说，SLA（立体印刷成型）、FDM（丝状材料选择性熔覆）、MJM（喷墨式三维打印）成型基本无废料，但有支撑结构，必须在成型后剥离，LOM（分层物体制造）成型无需支撑结构，但有网格状废料，也需要在成型后剥离。剥离是一项细致的工作，有时也很费时，常用的有三种方法：

a 手工剥离法

就是操作者用手和一些简单的工具去除废料和支撑结构的方法，这是最常见的剥离方法。

b 加热剥离

当支撑结构为蜡，成型材料为熔点较蜡高的材料时，可用热水或适当温度的热蒸汽使支撑结构熔化并与工件分离。这种方法剥离效率高，工件表面较清洁。

c 化学剥离

当某种化学液能溶解支撑结构而又不会损伤工件时，可以用这种化学液体使支撑结构与工件分离，这种方法同样具有效率高、工件表面较清洁的特点。

② 修补、打磨与抛光

当工件表面有缺陷时，需要进行修补，可以将热熔塑料、乳胶与粉料调和而成的腻子，或用湿石膏进行修补，然后用砂纸打磨、抛光。打磨、抛光常用的工具有各种粒度的砂纸、小型电动或气动打磨机。

③ 表面涂覆

当快速原型经过修补、打磨和抛光后，为了提高其强度、刚度和防

潮能力等性能，一般要进行表面涂覆。典型的表面涂覆方法有：喷刷涂料、金属喷涂、电化学沉积（Electro Chemical Deposition，简称 ECD 或电镀）、无电化学沉积（Electroless Chemical Deposition，简称 CD 或无电电镀）等。

4.2 快速模具制造

快速原型制造对于零部件设计审查、造型设计评估、装配检验、减少设计和生产过程中的差错以及商业投标等具有独特的优越性，大幅度地降低了新产品的开发研制成本和投资风险，缩短了新产品研制和投放市场的周期，提高了企业的竞争力。但是，快速原型由于其制造方法要求使用材料的限制，并不能够完全替代最终的产品。在新产品功能检验、投放市场试运行和准确获得用户使用后的反馈信息等方面，仍需要由实际材料制造的产品。因此，需要利用 RP&M 原型作母模来翻制模具并生产实际材料的产品，这便产生了基于 RP&M 的快速模具制造技术。

基于 RP&M 的快速模具(Rapid Tooling, RT)制造方法一般有直接法和间接法两种。直接制模法是直接采用 RP&M 技术制作模具，在 RP&M 技术诸方法中能够直接制作金属模具的是选择性激光烧结法(SLS 法)。用这种方法制造的钢铜合金注射模，寿命可达 5 万件以上。但此法在烧结过程中材料发生较大收缩且不易控制，故难以快速得到高精度的模具。目前，基于 RP&M 快速制造模具的方法多为间接制模法。间接制模法指利用 RP&M 原型间接地翻制模具。依据材质不同，间接制模法生产出来的模具一般分为软质模具(Soft Tooling)和硬质模具(Hard Tooling)两大类。

4.2.1 软质模具

软质模具因其所使用的软质材料(如硅橡胶、环氧树脂、低熔点合金、锌合金、铝等)有别于传统的钢质材料而得名，由于其制造成本低和制作周期短，因而在新产品开发过程中作为产品功能检测和投入市场试运行以及国防、航空等领域的单件、小批量产品的生产方面受到高度重视，尤其适合于批量小、品种多、改型快的现代制造模式。目前提出的软质

模具制造方法主要有树脂浇注法、金属喷涂法、电铸法、硅橡胶浇注法等。

(1) 硅橡胶浇注法

硅橡胶浇注法制作的模具由于具有良好的柔性和弹性。能够制作结构复杂、花纹精细、无拔模斜度或倒拔模斜度以及具有深凹槽的零件。因而倍受关注。其制作过程为：

- ① 对 RP&M 制作的原型进行表面处理。提高作为母模的原型表面质量；
- ② 在原型表面上涂洒脱模剂。固定原型并放置型框；
- ③ 硅橡胶计量、真空脱泡后进行混合；
- ④ 浇注硅橡胶混合体得到硅橡胶模具；
- ⑤ 硅橡胶固化；
- ⑥ 刀剖开模，取出原型。

硅橡胶鞋质模具适用于批量不大的注塑件的生产，一般为 20~50 件。

(2) 树脂浇注法

硅橡胶模具仅适用于较少数量制品的生产，若制品数量增大时，可用快速原型翻制环氧树脂模具。该方法是将液态的环氧树脂与有机或无机材料复合作为基体材料，以原型为母模浇注模具的一种制模方法。其工艺过程为：

- ① 采用 RP&M 技术制作原型；
- ② 将原型进行表面处理并涂洒脱模剂；
- ③ 设计制作模框；
- ④ 选择和设计分型面
- ⑤ 树脂浇注
- ⑥ 开模并取出原型。

树脂浇注法快速制作模具工艺简单、成本低廉，树脂型模具传热性能好、强度高且型面不需加工，适用于注塑模、薄板拉伸模、吸塑模及聚氯酯发泡成形模等。

(3) 金属喷涂法

金属喷涂法是以 RP&M 原型作基体样模，将低熔点金属或合金喷涂到样模表面上形成金属薄壳，然后背衬充填复合材料而快速制作模具的方法。金属喷涂法工艺简单、周期短，型腔及其表面精细花纹可一次同时成型，耐磨性能好，尺寸精度高。在制作过程中要注意解决好涂层与原型表面的贴合和脱离问题。

(4) 电成型制模法

电成型制模法的原理和制造过程与金属喷涂法比较类似。又称电铸制模法。它是采用电化学原理，通过电解液使金属沉积在原型表面，背衬其它充填材料来制作模具的方法。电成型法制作的模具复制性好且尺寸精度高，适合于精度要求较高、形态均匀一致和形状花纹不规则的型腔模具。如人物造型模具、儿童玩具和鞋模等。

4.2.2 硬质模具

软质模具生产制品的数量一般为 50~5000 件。对于上万件乃至几十万件的产品，仍然需要传统的钢质模具，硬质模具指的就是钢质模具，利用 RP&M 原型制作钢质模具的主要方法有熔模铸造法、电火花加工法、陶瓷型精密铸造法等。

(1) 电火花加工法

电火花加工法是利用 RP&M 原型制作 EDM 电极，然后利用电火花加工制作钢模，其制作过程一般为：RP&M 原型→三维砂轮(原地振动磨削)→石墨电极→钢模。

(2) 熔模精密铸造法

在批量生产钢质模具时可采用熔模精密铸造。该方法是利用 RP&M 原型或根据原型翻制的软质模具生产蜡模，然后利用熔模精铸工艺制作钢质模具。几乎所有的 RP&M 原型都可以作为熔模精密铸造的母模。

(3) 陶瓷型精密铸造法

对于单件或小批量钢质模具的生产可采用陶瓷型精密铸造法。其工艺过程为：RP&M 原型作母模→浸挂陶瓷砂浆→在焙烧炉中固化模壳→烧去母模→预热模壳浇注钢模型腔→型腔表面抛光。

利用 RP&M 原型在改造传统的既费时又耗成本的 CNC/电火花加工

钢质模具的同时，又产生了多种基于 RP&M 原型的软质模具的制造技术。可满足批量小、品种多、改型快的现代制造模式的要求，将增强企业的竞争力，为企业带来显著的经济效益。快速模具制造技术的研究刚刚起步，尚有许多问题需要进一步探索和完善。

4.3 数控加工

数控加工的核心是加工工艺优化及编制NC代码，其应用对象主要为复杂形状零件，复杂形状零件是指形状特征复杂、工序多的零件，一般分为箱体类零件（如变速箱）和复杂曲面与异形件（如叶轮、模具、人工假体等）。加工这一类零件，经常会遇到加工特征复杂、工序多、工装种类多、加工周期长、装夹、手工测量次数多等问题，而且定位、装夹和找正难度相当大，这类零件，常规加工方法难以实现。

但是要获得较好的加工质量并同时保证生产效率，选择合适的工艺参数和要素就显得尤为重要。加工工艺的合理确定对实现优质、高效、经济的数控加工具有极为重要的作用，其内容包括选择合适的机床、刀具、走刀路线、主轴速度、切削深度和进给速度等，只有选择合适的工艺参数与切削策略才能获得较理想的加工效果。

数控加工工艺最终需要通过数控代码来实现，本文采用 UGII 平台中的 CAM 模块来产生数控加工的代码，极大地减轻了劳动强度。

4.3.1 切削刀具选择

数控加工对刀具的刚性和耐用度要求较普通加工严格。因为刀具的刚性不好，一是影响生产效率；二是在数控自动加工中极易产生断刃的事故；三是加工精度会大大下降。刃具的耐用度差，则要经常换刀、对刀，从而增加辅助的工装调整时间，也容易在工件轮廓上留下接刀痕迹，影响加工精度和表面加工质量。所以刀具的选择很重要^[71]。常用刀具参数包括刀具种类、直径、伸出长度、材料等。

(1) 刀具类型

应用于数控铣削加工的刀具主要有平头刀（平底立铣刀）、端铣刀、球头刀、环形刀、鼓形刀和锥形刀。其中端铣刀主要用于面积较大的平

面铣削，鼓形刀和锥形刀是在单件、小批量生产中取代多坐标加工的一种变通方案，如图 4-4 所示。

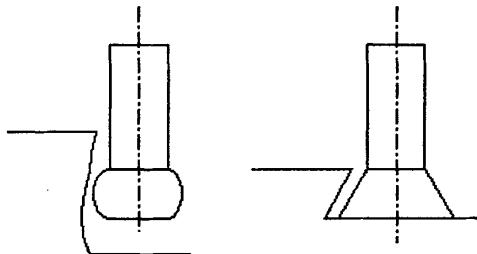


图 4-4 鼓形刀和锥形刀特殊应用

平头刀切削力较小，刀具平均回转切削线速度较大，可以选择较大的切削用量，适合于粗加工；球头刀切削力较大，刀具平均回转切削线速度较小（球头端中心回转线速度为零），适合于精加工，能获得较好的表面光洁度。一般情况下，球头刀适用于曲面加工，因为球面与曲面接触能获得较好的表面粗糙度，同时也能提高加工精度。

(2) 刀具直径和长度

为了提高刀具的刚性，加大切削用量，刀具直径应尽可能大，长度应尽可能短。用于曲面铣的球头刀，直径应不小于凹面的最小曲率半径。同时应保证刀具伸出长度足够以致切削时刀柄与夹具之间最小距离大于 3~4mm。一般情况下，刀具伸出长度与直径比值应小于 3。加工特征按方位面划分进行加工，特征加工时可能经过工件中心，所以应能保证刀具足够长，能到达工件高度的一半。

(3) 刀具材料

质量和效率是数控加工的目标，刀具应尽可能选择硬度高，刚性好的材料。对于不锈钢、钛合金等难切削金属，一般选用硬质合金刀具；对于铝合金、铜、ABS 塑料等易切削材料，一般选用高速钢刀具，ABS 塑料等硬度偏低的非金属材料可以使用碳钢。

粗加工中由于切深较大，对于易切削材料，可采用大的进给率，此时可以选用硬质合金刀具，这样加工效率可大大提高；对于难切削材料，进给率不宜过大，加工时间较长，刀具磨损增加，在考虑加工成本的前提下，可使用高速钢刀具；精加工工序由于切深浅，进给率可提高，对

于难切削材料采用硬质合金刀具切削可大大提高加工效率。

4.3.2 走刀方式与切削方向

走刀方式是指生成刀具轨迹时，刀具运动轨迹的分布方式。切削方向是指在切削加工时刀具的运动方向。这两个概念在数控加工中是非常重要的，其选择合理与否将影响零件的加工精度和生产成本。其选择原则为：根据被加工零件表面的几何形状，在保证加工精度的前提下使切削加工时间尽可能短，且在切削过程中刀具受力平稳。

在三维曲面区域加工的刀具轨迹生成技术中，可采用如下三种走刀方式：

(1) 往复型走刀方式：切削加工过程中顺铣、逆铣交替进行。其加工效率高，但加工精度稍低一些。

(2) 单方向走刀方式：在切削加获过程中能保证顺铣或逆铣的一致性，加工精度较高。实际加工时，可根据要求选择顺铣或逆铣。由于该走刀方式在完成一条走刀轨迹后，附加了一条空走刀轨迹，因此增加了加工工时。

(3) 环切走刀方式：刀具运动轨迹是由一组被加工曲面的包络曲面等参数曲线组成。

4.3.3 切削用量的优化

(1) 工步切深与切削宽度

由于精加工工步切深、切削宽度较小，这里只讨论粗加工（型腔铣）分层铣削的每层切深。选择切深、切宽时应考虑刀具的类型、半径、材料和工件材料等因素的影响，同时考虑产生的切削力大小。

切深、切宽对加工质量和效率有很大的影响。如果数值太大，会有以下不良影响：

- ① 进给率大大降低，加工效率低下；
- ② 容易引起工件受力、受热变形和让刀，严重影响加工质量，甚至零件报废；
- ③ 刀具磨损情况严重，甚至导致断刀；
- ④ 主轴振动剧烈，会引起机床受损；

⑤ 残余应力影响：

另一方面，切深、切宽太小，受机床性能限制，不允许进给率过高。这样，加工效率一样很低。以不锈钢材料为例，它属于难切削材料，一般地，切深不宜大于 0.4 mm，否则除了会引起上述不良影响以外，加工后工件表面过于粗糙，余量不均匀，影响后续工步的加工质量；同时切深也不宜小于 0.3 mm，因为切深太小，加工效率低下，粗加工就失去了意义。此时，需要合理地选择切削宽度。

(2) 主轴转速

根据允许的切削速度来选择，切削速度由刀具耐用度决定。

(3) 进给速度

由于进给速度受多种复杂因素影响，较难给出定量的最优值域。影响进给速度与主轴转速比值的因素主要包括零件加工精度、表面粗糙度、刀具材料、毛坯材料、刀具直径、切深和切削宽度。UGII 软件平台提供了进给率计算功能，能根据后五个参数自动确定主轴转速和切削速度。

4.3.4 进退刀方式

进刀方式是指加工零件前，刀具接近工件表面的运动方式。退刀方式是指零件(或零件区域)加工结束后，刀具离开工件表面的运动方式。其进、退刀方式有如下几种。

(1) 沿坐标轴的 Z 轴方向进刀或退刀

该方式是数控加工中最常用的进、退刀方式。其优点是定义简单，缺点是在工件表面的进刀、退刀处会留下微观的驻刀痕迹，影响工件表面的加工精度。

(2) 沿给定的矢量方向进刀或退刀

该方式要先定义一个矢量方向来确定刀具进刀或退刀的方向。其特点与方式 1 类似。

(3) 沿工件表面曲面的切矢方向进刀或退刀

该方式是以被加工曲面的切矢方向切入(或离开)工件表面。其优点是在工件表面的进刀、退刀处，不会留下驻刀痕迹，有利于提高表面的

加工质量。

(4) 沿曲面的法矢方向进刀或退刀

该方式是以被加工曲面切入点(或离开点)的法矢方向切入(或离开)工件表面。

(5) 沿圆弧段方向进刀或退刀

该方式是刀具以圆弧段的运动方式切入(或离开)工件表面，该方式必须先定义切入(或离开)圆弧段。

对于加工精度要求很高的曲面来说，应选择沿曲面的切矢方向或沿圆弧方向的进刀、退刀方式，这样不会在工件的进刀或退刀处留下驻刀痕迹。

4.3.5 编程零点与加工坐标系的确定

编程时，一般是选择工件或夹具上某一点作为程序的原点，即编程零点，也称“程序原点”。编程零点是数控加工过程中切削加工的参考点，以该点为原点且平行于机床各移动坐标轴 X, Y, Z，可建立一个坐标系，即数控编程的参考坐标系。

编程零点的选择原则是：应使编程零点与工件的尺寸基准重合；应使编制数控程序时的运算最为简单，避免出现尺寸链计算误差；引起的加工误差最小；编程零点应选在容易找正，在加工过程中便于测量的位置。

4.4 小结

在完成 CAD 模型重构后，其后续应用可利用快速原型、快速模具和数控加工技术来制造原型、模具和批量产品。本章首先阐述了快速原型与快速模具制造技术的基本原理、制造工艺及其适用场合，着重讨论了基于反求工程的快速原型加工过程；然后讨论了数控加工工艺的优化。

第五章 工程应用研究

随着经济的发展，企业间的竞争加剧，如何能够快速的响应市场，缩短产品的开发周期，已成为企业能否长久的关键因素。对航空航天、汽车业而言，国外的关键技术仍对我国封锁，如何在技术封锁的情况下进行技术的引进，提高我国航空航天、汽车业的技术水平是一个关系产业发展的大问题。本章利用前文所研究构建的集成反求工程系统，针对某型汽车刹车制动器的阀体进行了反求工程建模、基于反求工程的快速原型制造的应用方面进行研究，并对其关键特征处进行了数控加工的研究，以验证系统的有效性。

5.1 某型汽车阀体的反求建模

5.1.1 模型要求与分析

反求模型要求为：精度整体 $< 0.5\text{mm}$ ，关键配合处 $< 0.1\text{mm}$ ，得到数字化模型，可以在此基础上进行改进和创新设计。

对模型进行分析，目的是决定采用哪种测量方法，以及制定相关的测量方案，得到模型工件的完备的数字化信息。分析时，要明确模型重构要求的精度，根据工件的特征（包括形状、材料）和测量方法的适用范围（详见第二章数据采集章节的测量方法的介绍）来决定要采用的测量方法。然后，制定模型的测量方案及准备工件的装夹。

针对某型汽车刹车制动器阀体进行分析，如图 5-1 所示，图中(a)为工件的外部，(b)模型的顶部，(c)为模型的底部。该工件材料为塑料，硬质，为回转体，有复杂的内部型腔结构，对称，模型外部有几圈细微凸台特征，在模型锥形与圆柱形部分结合处，特征较复杂，有一曲面特征。同时，由图 5-1(b)可以看到该模型的内腔结构，同样有细微的筋特征，还有四个对称的深孔。由于测量机设备所配的测头直径最小为 1.5mm ，不能采集到特征的详细的数据，或者会导致测量测头出现碰撞，

所以不能采用接触式测量。

决定采用非接触式测量后，使用的为 WIZProbe 激光扫描设备。由于设备取点距离的限制，工件的内部型腔同样不易扫描。经分析后，决定利用快速模具技术做出阀体的硅胶模具，然后扫描工件的硅胶模来获得工件的内部型腔的点云数据。

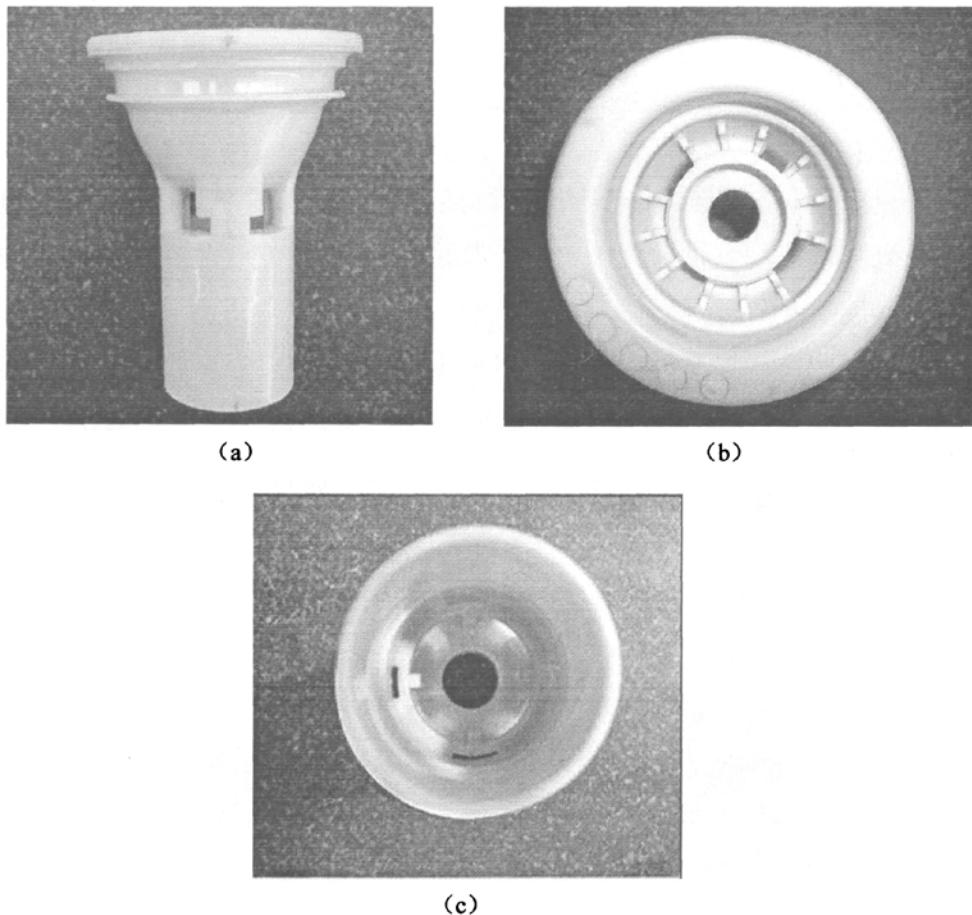


图 5-1 阀体实体模型

5.1.2 阀体的快速模具制造

分析可知，阀体的内型面的数据比较复杂，特征较多。为了得到充分反映内部特征的替代品，采用硅胶模的快速制造。硅橡胶有很好的弹性和复印性能，用它来制造模具时，可不考虑脱模斜度，基本不会影响

尺寸精度，所以对于阀体的快速模具制造采用硅胶模具来进行。方法为刀割分型面制造法，采用室温硫化硅橡胶。具体制造流程如下：

(1) 彻底清洁阀体零件，用薄的透明胶带建立分型线，由于该工件内部型腔非常复杂，为了脱模方便，决定硅胶模具分为上、中、下三个模块来进行该阀体的硅胶模具的制造；

(2) 用彩色、清洁胶带纸将阀体边缘围上，以作后期分模用；

(3) 用薄木板围成合适的方框，把阀体固定在围框内，使原型周围距模框的距离均匀，在模框内表面及平板上涂刷脱模剂，加注一些通风杆。由于阀体的内部有四个深孔，为了防止脱模时不易脱模和导致变形，在深孔的中间加入四根细铁丝。同时，由于本模为上中下三个模块，所以，为了提高其定位精度，在阀体四周加入六根铁棒，铁棒为两边对称，中间两根与其它不在同一直线上；

(4) 计算硅橡胶 RTV141、固化剂用量，称重、混合后放入真空注型机中抽真空，并保持真空 10min；将抽真空后的硅胶倒入构建的围框内，之后，将其放入压力罐内，在 0.4~0.6MPa 压力下，保持 20min 以排除混入其中的空气；

(5) 硅橡胶固化。浇注好的硅橡胶，放入烘箱内 150℃ 下保持 2h 左右，这样即可使硅橡胶充分固化；

(6) 脱模 随分模边界用手术刀片对硅胶模分型。为防止浇注时模具的错位，切割模具时，切口应切成波形状或锯齿形状，但在靠近内模面的附近应尽量平滑，这样有利于保证模具精度即得到阀体的硅胶模。

所得到的工件的硅胶模具如图 5-2 所示，图 5-2(a)为硅胶模的上部，(b)为硅胶模的中部，(c)为硅胶模的下部。

5.1.3 数据获取

数据采集的准备工作是决定数据的对齐方式及获取点数据的策略，由于该工件为小尺寸复杂件，无法粘贴参考点，因为若粘贴参考点则易造成数据空洞，导致数据残缺。该工件数据对齐采取特征对齐的方式。所以扫描时，注意扫描图 5-1(b)中的阀体的顶端面的特征点云及硅胶模对应处的特征信息。由于硅胶模表面的光敏性会影响测量的结果，所以

在测量前一般都要在物体的表面喷上一层显像剂，图 5-3 为对硅胶模具的测量，其中白色部分为喷涂的显像剂。

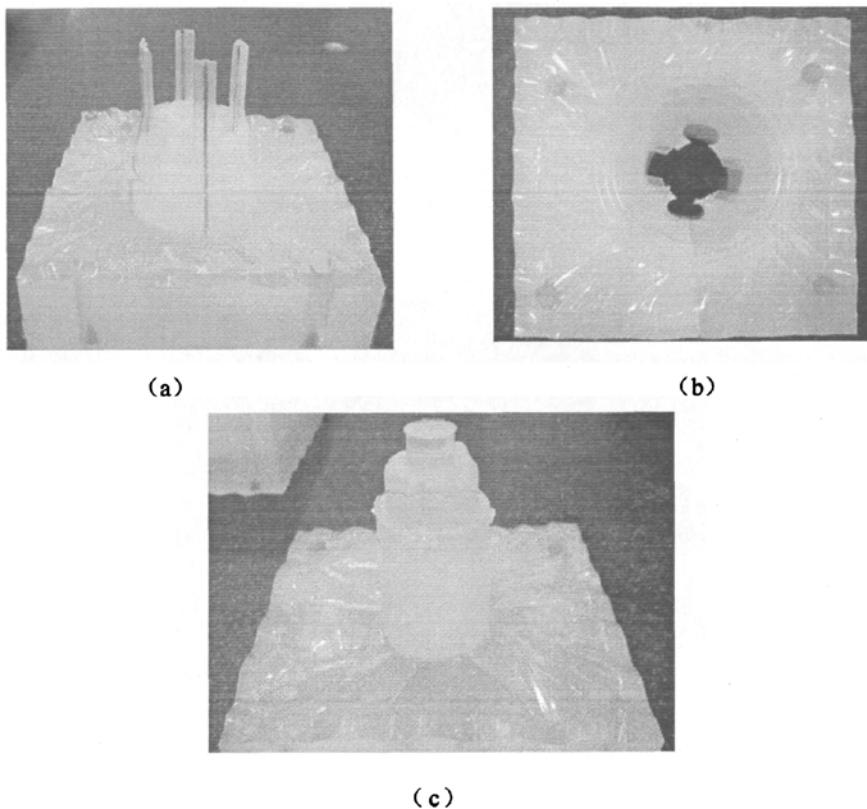


图 5-2 阀体的硅胶模具

在对硅胶模的扫描过程发现，对于如图 5-4 (a) 所示意的硅胶模的上半部，仍有一些死角激光不能扫描到，如图 5-4 (b) 所示，模型中间的凸台和模型伸出支撑之间有一深槽，激光头难以扫描。针对该情况，依据本文第二章中，对扫描死角的解决方法结合将来造型方法的考虑，采用了扫描凸台和支撑内壁的数据，来限制槽的宽度，同时扫描了槽底部的一部分数据来给出槽的深度方面的尺寸信息，如图 5-5 所示。对模型各部分测量的点云数据如图 5-6 所示。

5.1.4 数据预处理

(1) 多视点云的拼合

得到点云数据后，可以保存为 TXT 或 IGES 格式，然后导入到反求

软件 Imageware 中，对各部分点云数据对齐，同时把坐标移动到阀体的

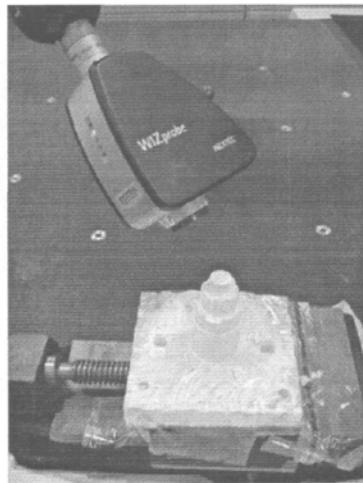


图 5-3 硅胶模具的扫描

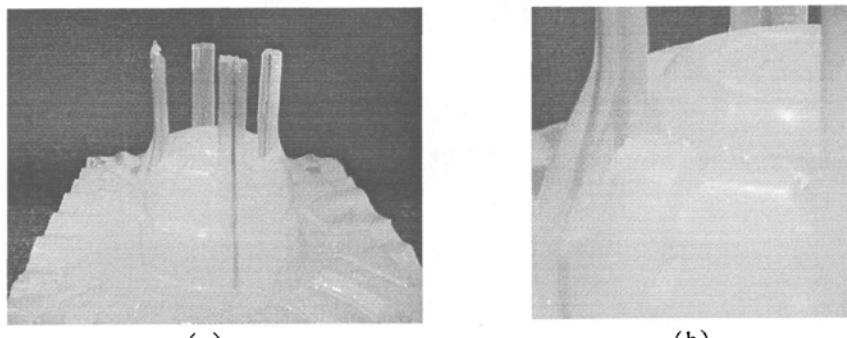


图 5-4 硅胶模上半部

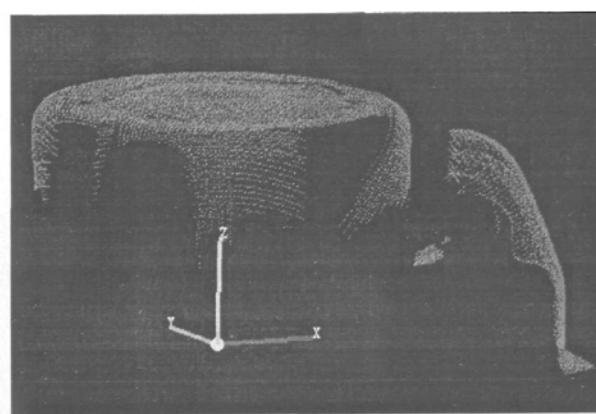


图 5-5 扫描死角

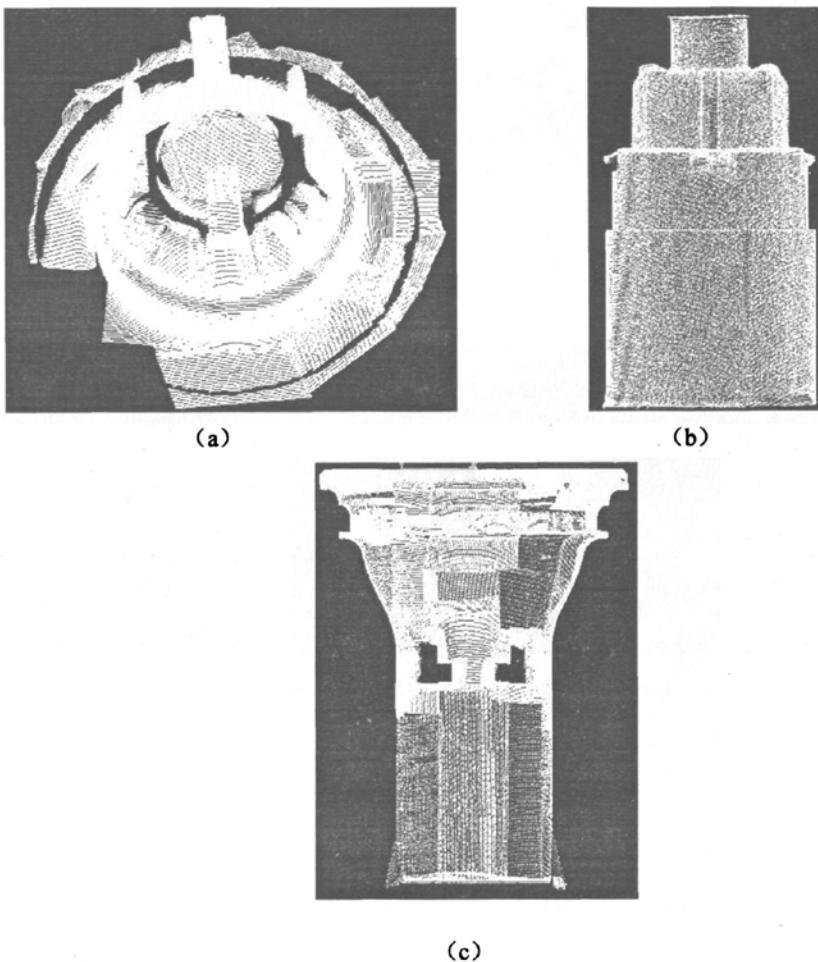


图 5-6 点云数据

中心，以方便后续的建模。Imageware 中提供了多种特征对齐方式，利用点云数据的几何特征来定位，如：点、线、面。本例采用圆心点对齐，根据三点定位原理，在中部和上部点云中如图 5-7 所示，中顶部 00、5、39 三个圆特征进行点云提取和构建圆特征。在对齐过程中可使用栅格来辅助点云的找正和对齐，评价对齐效果，如图 5-8 所示。对下部和中上部的对齐，采取构建平面的方法，由三个平面特征来进行点云对齐，对齐后的数据如图 5-9 所示。

(2) 点云优化处理

数据对齐后，要对数据进行杂点去除、噪声过滤、点云精简，可以自动或手动选取因装夹导致扫描出现的杂点，得到完备的点云数据，如图 5-8 所示，为对图 5-6 (a) 中点云进行去除杂点后的点云数据。点云精简时要注意的是，设定合适的精简间距，可以预先对点云进行距离测量，来决定间距的大小，以确保获得数量合适的点云数据，其原则为：既保留了工件所具有的轮廓特征，又使留下来的点数方便后续的模型重建。

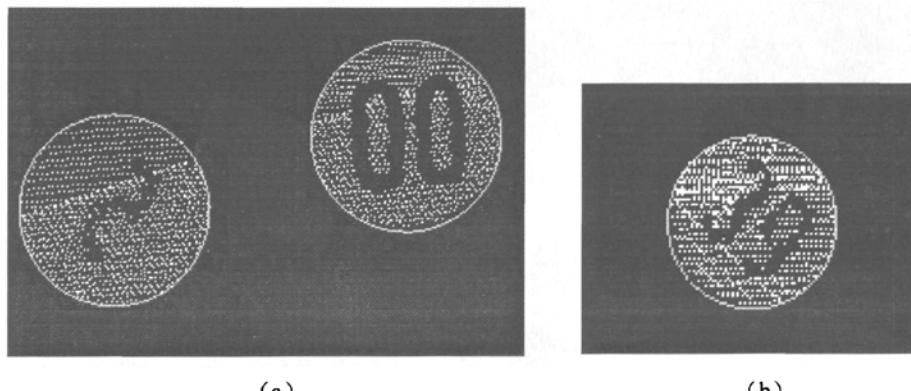


图 5-7 圆特征的点云提取和构建

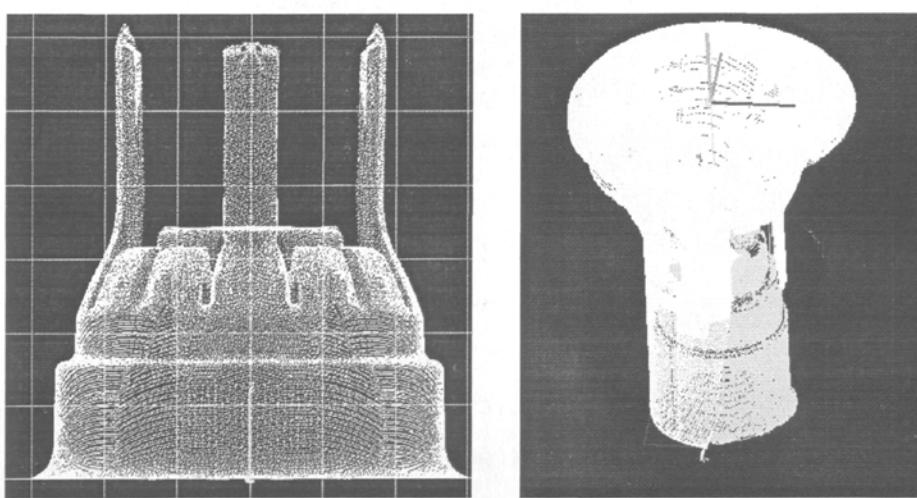


图 5-8 栅格显示下的点云

图 5-9 点云数据拼合结果

5.1.5 残缺点云的三维建模

对阀体数据综合评价后，阀体数据包含了模型的全部特征信息，但

是数据不完整，为残缺点云。

在前期准备阶段，对模型进行分析时，已经充分的认识了工件的结构特征。其主要特征为回转体，基本特征有深孔、凹槽、凸台、对称的筋条、过渡曲面等。综合考虑后，结合本文第三章提到的 RE/CAD 复合建模方法，决定阀体的造型分三部分来完成，即对图 5-6 所示的点云数据分别进行造型，然后采用布尔运算，充分利用 UG 造型的强大功能，完成三维实体的建模。具体步骤可分为特征提取、曲面建模、实体建模。

(1) 截面特征提取

主要包括构造线点云的提取，曲线、曲面特征的构建。针对该零件为回转体零件，采取了构造线点云提取的方法，在 Imageware 中采用交互式的对点云截面的提取方法来获取所需的构造线，例如：阀体外形为回转体，那么就提取可以在 CAD 软件中利用旋转来生成实体的构造截面线，提取时注意使其在坐标轴方向上。由其坐标系原点处向 X 轴负方向构建一条直线，依此直线为基准向 Z 轴负方向来提取构造线点云，提取过程如图 5-10 所示。

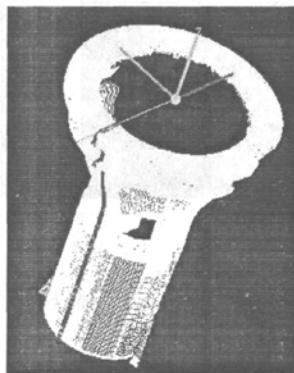


图 5-10 提取构造线点云

对残缺部分的造型信息的点云提取，通过间接的方法得到其造型信息，提取凸台的回转造型数据及内壁的造型数据，对所获取的底部的信息进行保留。如图 5-11 所示，图中两部密集的点云为底部数据和小凸台数据。对过渡曲面部分，进行了特征线和曲面特征的构造点云的提取，如图 5-12 所示。最后提取的各部分数据结果如图 5-13 所示，对其进行分层保存。

(2) 建模

将上述提取的特征造型线点云保存为 IGES 格式后导入 UG，由于在反求软件中已进行过分层，所以不需要对点云进行再分层。整个实体建模分为三部分，分别进行实体造型。造型完后进行实体的布尔运算来产生最终的实体模型。

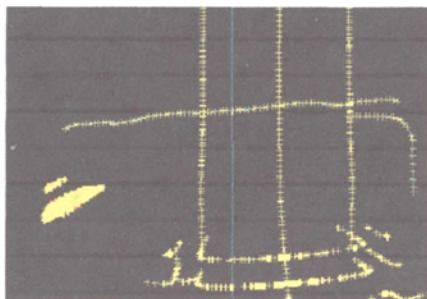


图 5-11 残缺点云的提取

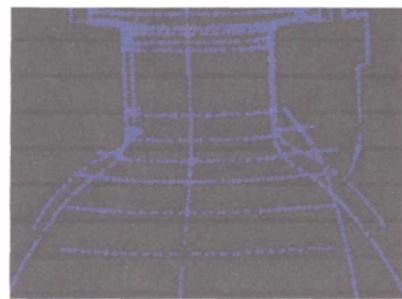


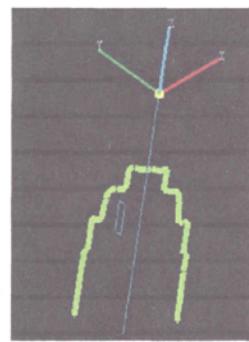
图 5-12 过渡曲面特征点云



(a)



(b)



(c)

图 5-13 各部分截面特征构造线点云

① 上部的建模

首先进行图 5-13 中(a)的构建，针对该部分点云，其建模难点主要是残缺点云的造型和筋槽特征的造型。对此，充分结合 UG 造型软件的草图和实体拉伸、旋转、剪切等功能，完成其造型，具体过程如下。建立草图，使用三点建立基准面的方法对造型线点云创建基准面。如图 5-14 所示，由于点云提取时，是以坐标原点为基准的，所以可以对提取任何一条造型线在其点云上进行基于三点的基准面的创建。然后基于该基准面创建草图，创建草图时需要注意的是：作图时尽量采用直线，三点圆

弧构线，然后以约束保证其相切，这样可以保证曲线的光顺性。通过剪切和桥接等曲线编辑工具使其成为一条曲线。通过曲率梳可以查看其光顺性，如果曲线不光滑可以通过曲线编辑来修改至光顺如图 5-15 所示。通过旋转创建上部模型的主体实体。如图 5-16 所示。

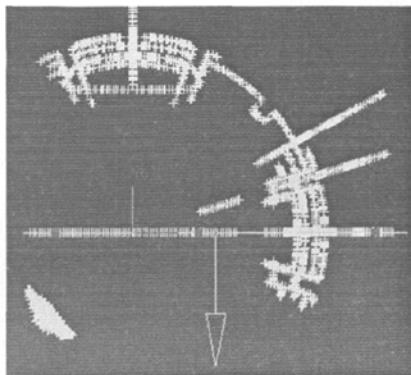


图 5-14 创建基准面

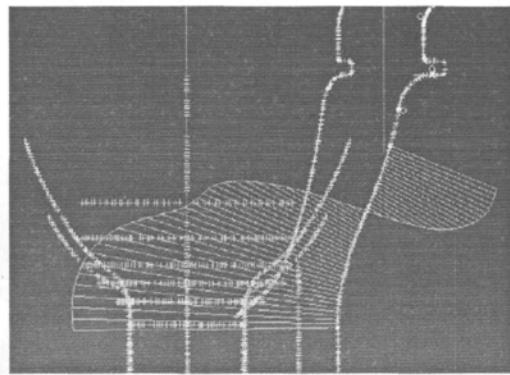


图 5-15 曲线光顺

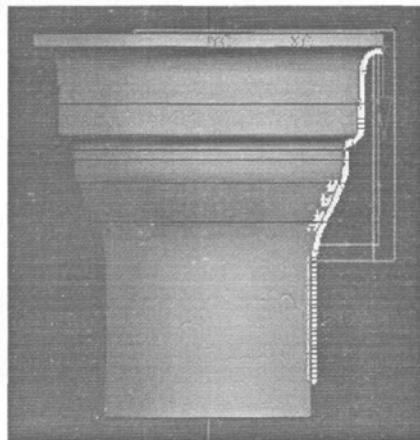


图 5-16 上部建模实体

对于其内部凸台、槽、筋槽等特征，采用拉伸、切除的方法来完成其造型。筋槽的造型如图 5-17 所示。对于模型中部的大凸台特征可以采取先剪切，再拉伸的造型策略，先依点云建立圆草图，如图 5-18 所示。同时，对其他部分进行切除，造型实体如图 5-19 所示。对模型进行镜像，合并实体后可得出上部的 CAD 实体，如图 5-20 所示。

② 中部的建模

中部建模为对图 5-13 中(b)的点云的反求建模，所用方法与上部模型的建模相同，依然通过参数化造型方法来完成对其造型。其难点在于过渡曲面的建模以及片体的增厚，采用三点圆弧、直线的方式通过点云建立建立曲线。然后，结合本文第三章的曲线、曲面建模知识，采用通过曲线网格的构造方法，对其进行过渡曲面的构建。所建立的为片体模型，如图 5-21 所示。还需要对其进行缝合增厚来生成实体模型，实体模型如图 5-22 所示。曲面的品质分析如图 5-23 所示。

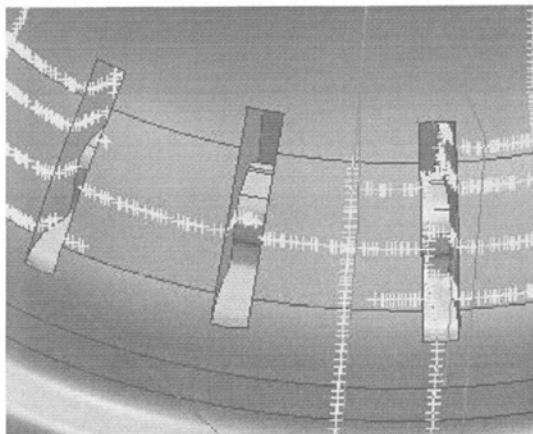


图 5-17 筋槽的特征造型

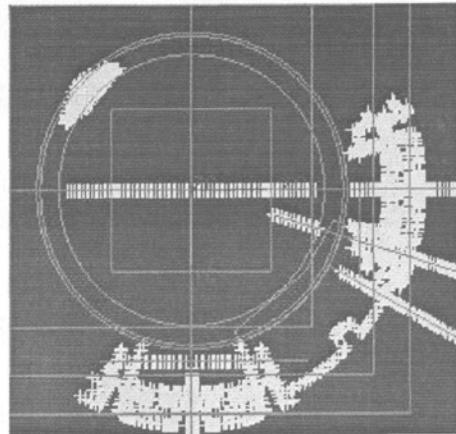


图 5-18 凸台特征草图

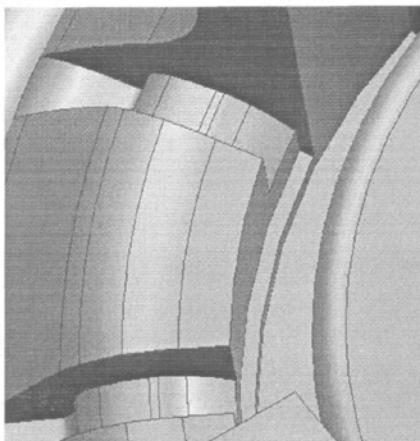


图 5-19 结构特征造型

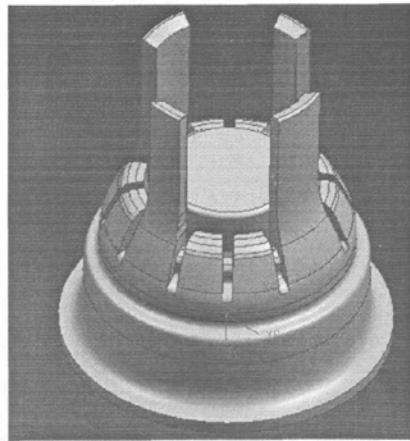


图 5-20 硅胶模 CAD 实体

主体模型的构建，主体为回转体，采用旋转建模的方法建立起主体模型，其它小特征的建模采用上部建模时所用的方法，然后将曲面模型

和主体模型进行合并，得到中部的实体模型，如图 5-24 所示。

③ 下部的建模

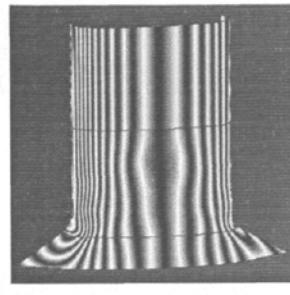
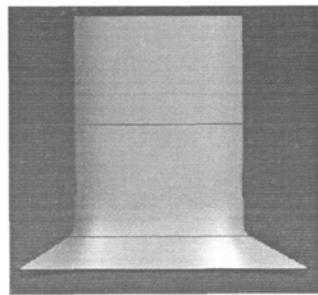
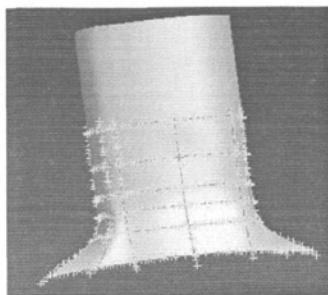


图 5-21 过渡区面片体模型 图 5-22 过渡曲面实体模型 图 5-23 曲面品质分析

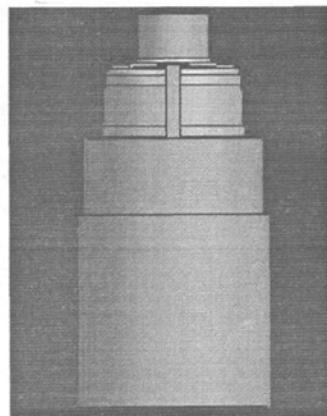
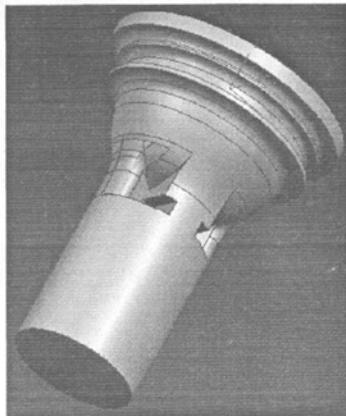


图 5-24 中部阀体模型

图 5-25 下部阀体模型

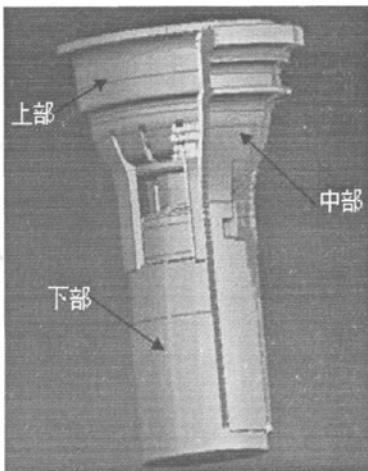


图 5-26 分部造型

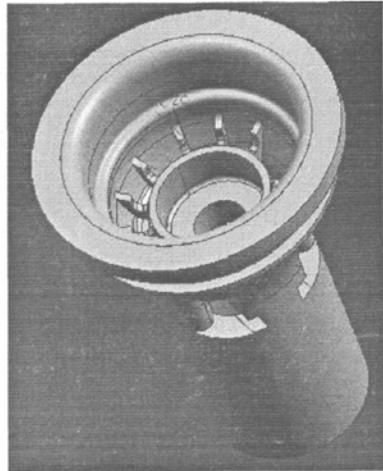


图 5-27 阀体的 CAD 实体

下部的建模比较简单，主要为回转体的建模和凹槽的构建，其造型

后的实体如图 5-25 所示。三部分实体建模完成后对其进行布尔运算，见图 5-26，中部实体减去上下两部分的实体，即可得到物体的实体模型，完成其建模工作，如图 5-27 所示。

5.2 阀体的快速原型制造

在 UG 中将工件的 CAD 实体文件转化为 STL 格式后，快速成型前期要导入到 Magics RP 软件中对其进行检查修补。以保证 STL 格式模型的完整性。经过修补后导入基于 FDM 原理的 TSJ-200 台式塑料熔覆型快速成形机所附带的软件，对即将要进行的成型工作设置各项参数。该设备基于 FDM 工艺，如图 5-28 所示，主要用于工业产品的样件制造，成形件最大尺寸为 $280 \times 250 \times 200\text{mm}$ ，成形件精度为 $\pm 0.2\text{mm}$ 。可以迅速将三维数学模型转化为立体实物，满足样件外观评审及简单装配等技术要求。所用材料为专用的 ABS 塑料丝材。



图 5-28 TSJ-200 台式塑料熔覆型快速成形机

5.2.1 FDM 快速成形参数影响

(1) 加工方向（切片方向）

加工方向即材料在成形过程中的堆积方向，也是切片平面的法向矢量。不同的成形方向会导致不同的材料消耗量，因为 FDM 工艺中不同的加工方向需要不同程度的支撑。不同程度的材料消耗，也造成了加工时间的长短。切片方向是一个很重要的参数。因为快速原型这种技术存在一个理论上难以消除的缺陷，即在生成原型时会产生原理误差—台阶效应，如图 5-29 所示。选择最优的切片方向，即选择使台阶效应最小的

加工方向。

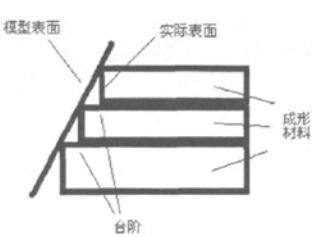


图 5-29 台阶效应

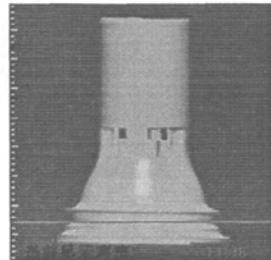


图 5-30 加工方向

(2) 切片厚度

由于快速成形是按一层层截面轮廓来进行加工的，通过软件，沿成形的高度方向，每隔一定的间隔进行切片处理切片厚度即指间隔的宽度。切片厚度也是快速成形中十分重要的控制参数。FDM 中熔丝铺平的最小厚度即分层厚度的最小值受材料属性的影响，而分层厚度的最大值受成型机加工动力的限制。因而加工厚度的取值范围是非常有限的，一般取值为 0.05mm 至 0.3mm。从原理误差可知，当取较小的加工厚度时，“台阶效应”小，原型精度高。但同时加工时间和加工成本也会增加。取较大的加工厚度，“台阶效应”大，同时，加工厚度过大时，还有可能遗失切片间的小特征（例如：窄槽，小筋片，小凸台等）。因此，在实际选择分层厚度时，片面强调精度和加工成本都是不正确的，应当针对不同精度要求、不同曲面特性以及不同成型系统，在精度和加工时间之间进行优化选择。根据试制试验，本件的切片厚度为 0.18mm。

5.2.2 加工过程

(1) 零件 STL 文件载入完成后首先选择零件的摆放姿态，这将影响到零件的加工方向（切片方向）。加工方向在 TSJ 软件中默认为坐标 Z 轴方向。模型的切片方向如图 5-30 中加工高度标尺的方向所示。

(2) 选择零件合适的加工参数，对话框如图 5-31 所示。其中：层高表示每一层的高度，即喷头在 Z 轴上每次上升的高度；填充宽度指丝与丝之间的距离；补偿值指填充丝到轮廓的距离（轮廓是指切片完成后，每一加工层的二维边界轮廓）；支撑补偿值指支撑边到轮廓距离。设定

过小，支撑可能太密集而无法剥离。设定过大，支撑可能无法起到应有的支撑效果。

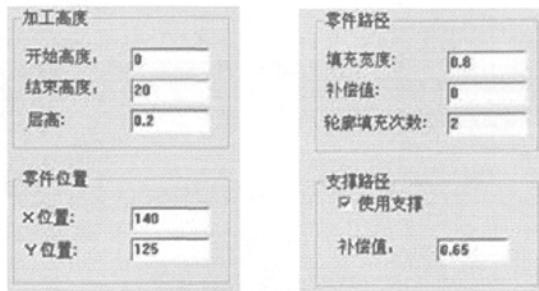


图 5-31 参数设定对话框

(3) 生成支撑，针对坡度较大以及悬空部位要生成支撑，根据材料的性质、零件结构需要等，设定支撑栅格的角度、支撑轨迹之间的间距，如图 5-32 所示。生成之后，编辑支撑，舍去一些细小的或不需要的支撑，如图 5-33 所示。

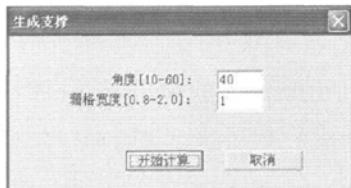


图 5-32 支撑设定对话框

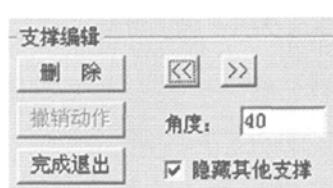


图 5-33 支撑编辑对话框

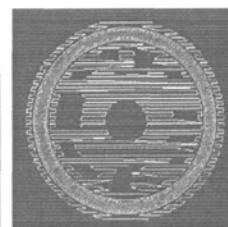


图 5-34 某一层的切片

(4) 生成支撑完毕后，需要生成加工路径，即做切片处理，得出每一层的加工轨迹如图 5-34 所示，其中蓝色区域为工件截面，黄色为支撑栅格路径。

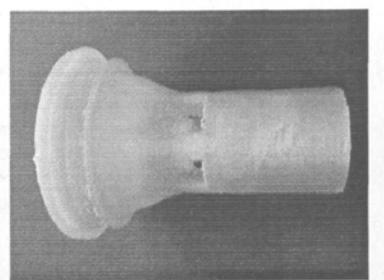


图 5-35 快速原型产品

(5) 成型加工，经过3.5个小时的加工后得到阀体的快速原型的制件。

(6) 后处理，主要是将制件上的支撑剥离，如有后续应用则还需要诸如：修形、抛光、表面涂覆等后置处理。阀体快速原型制件如图5-35所示。

5.3 阀体曲面特征的数控加工

5.3.1 加工特征

由于快速原型设备的精度较低，仅能达到对产品的一个概念的直观评价，所以在完成了对模型的实体重构、快速原型加工出阀体的样件后，对阀体的部分特征进行了数控加工，目的是进一步分析重构实体数控加工后与原型的误差。

阀体模型的最主要的特征是宽的一侧外形中的曲面，选择这个特征的理由有两方面：曲面模型的重构正是反求工程的一个重要方面，也是造型中误差的主要来源；其次，这个模型在使用过程中，表面会有微小的损坏，比如曲面可能并不是非常的光顺，表面可能会有凹陷等。通过比较，可以从测量数据中得知，反求工程对模型表面特征的复制，精度的高低。另外，该模型的内部结构比较复杂，不适于数控直接加工，所以本文中选择了比较重要的特征进行数控加工来达到对其精度的分析。在经过上述的分析后，最终确定加工零件宽的一侧曲面特征，如图5-36所示。

5.3.2 加工方法

该阀体模型，在理想状态下，模型的外形是一个完整的回转体。对于回转体模型的加工，最理想的加工方法是车削加工。虽然回转体表面形状略微复杂，可通过数控编程完全可以解决这些问题。

该阀体造型时采用了基于截面特征线点云的造型方法，外部曲面特征部分采用了回转体和曲面实体合并的造型方法，CAD模型与原型误差产生的一个方面为点云的对齐过程中，回转体中心坐标的偏差，曲面偏置产生的实体与回转体拼合的偏差。为了体现这些偏差所产生的误差，

进而对重构后模型与原始模型之间形状进行评价，采用了铣削的加工方法直接加工模型。

5.3.3 加工过程

(1) 毛坯设计

该零件的毛坯设计比较简单，材料选用的是 ABS 工程塑料，在数控车床上完成对毛坯的加工如图 5-37 所示。

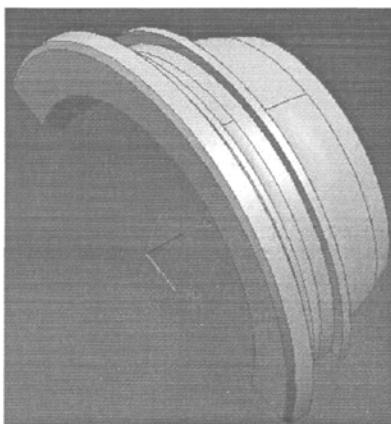


图 5-36 阀体曲面特征

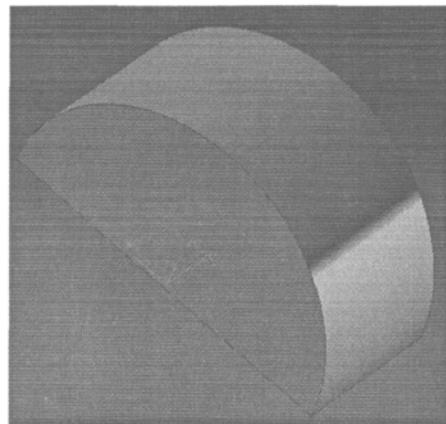


图 5-37 毛坯

(2) 工件的安装方案

由于坯料本身就是圆柱形棒料，对于曲面模型的加工只需要一半圆的部分，剩下一半则可作为装夹使用，由台虎钳对其进行夹紧（图 5-38）。

(3) 数控加工

具体的数控加工工艺参数的设置和数控代码的产生主要基于 UGII 平台的 CAM 模块来实现，对反求所得的实体模型进行加工前的编辑，剪切出要加工的特征模型。

刀具设置和加工几何体的选择，分为粗加工和精加工。粗加工时选用直径 10mm 的平头铣刀，进给量为 3mm，精加工时采用 4mm 的球头铣刀，进给量为 0.2mm。切削方式选择跟随工件走刀。进行进给速度的设置。各项参数设置完成后，进行刀具轨迹仿真及加工效果仿真，查看加工效果，如图 5-39 所示，图中(a)为刀具轨迹仿真，(b)为加工效果仿真。然后由后处理导出工件的加工数控加工程序，见附录 2。在倒入机

床的数控系统之前，对其进行修改，使之适合该数控系统的指令要求。

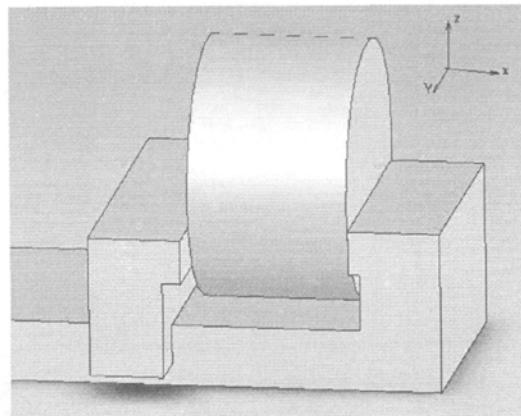


图 5-38 曲面模型装夹示意图

加工时坐标系的确定。当装有毛坯的夹具安装到工作台上时，首先要确定加工坐标系是否和机床坐标系在同一个方向上。由于在数控编程的时候已经确定了毛坯在加工坐标系中的位置，所以这一点需要注意，也就是要让加工坐标系 X、Y、Z 轴的方向和机床坐标系一致。

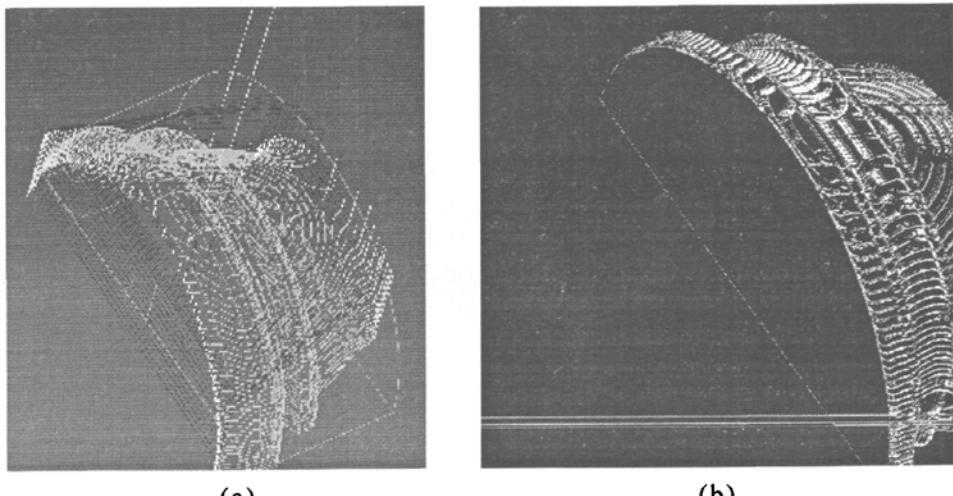


图 5-39 加工仿真

在铣削过程中，由于使用的是 ABS 工程塑料，硬度较低，所以可以把倍率相对调高。同时为了避免由于发热导致工件变形，根据实际情况喷撒冷却液（比如有塑料的焦臭味或者有白色的烟冒出）。加工工件

如图 5-40 所示。

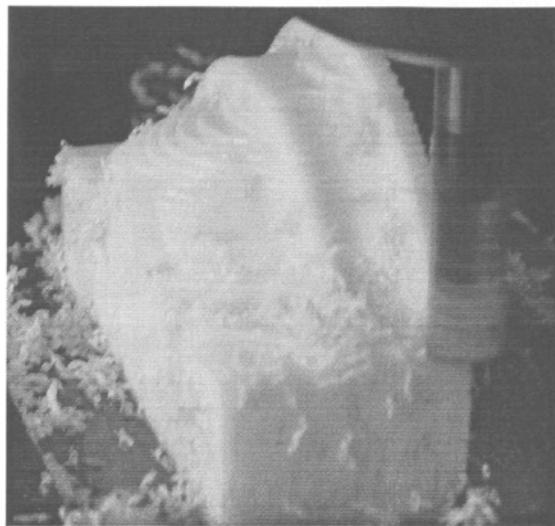


图 5-40 特征的数控加工样品

5.4 模型质量评价

结合本文第二章的模型质量评价，对模型重构的误差和加工后的产物与实物的总体误差进行评价，分析误差产生的原因。

5.4.1 模型精度评价

(1) 模型重构误差

对模型的重构误差的评价，采用点到面的距离的方式对模型误差进行评价。利用分析/距离功能进行分析，分别由内表面到外表面均匀取 49 点。距离值如表 5-1 所示。由表中数据可以看出本例中造型的精度最高为 0.00mm，出现这种情况的原因是该点在作为造型基准的造型线上，且刚好与面重合。除去该种情况外，精度最高为 0.001mm，最低为 0.275mm，平均值为 0.0479mm，达到了反求建模的较高要求，也就是说，该阀体模型的反求建模是成功的。

对数据分析发现距离较大的几个数据如 0.2189、0.2750、0.2580 都是对阀体型腔内的凸台测量时产生的。进一步分析发现，造成该种情况的原因是该部分的点云质量较差，可见点云质量的提高对造型精度的提高

有着重要的作用。

表 5-1 原始数据点到表面的 3D 距离

距离 (mm)						
0.0154	0.0966	0.0209	0.0070	0.2580	0.0201	0.0420
0.0303	0.0012	0.0236	0.0000	0.0537	0.0024	0.0155
0.0535	0.0336	0.0289	0.0051	0.0158	0.0651	0.1194
0.0034	0.0200	0.0622	0.0027	0.0304	0.1160	0.0947
0.0499	0.0357	0.0143	0.0156	0.0215	0.0137	0.0502
0.00	0.0123	0.0744	0.2189	0.128	0.0239	0.0010
0.0617	0.0256	0.0126	0.2750	0.0532	0.0175	0.0026
平均距离=0.0479 mm						

(2) 总体误差

总体误差的评价为制造产品与实物原型的评价，对于本文中的快速制造产品而言，可用于对产品设计效果评价和简单装配检查，但是由于设备精度和材料的原因，产品样件的硬度和强度不够，故选择了经数控加工的部分特征来进行总体误差的评价。对于数控加工的模型，通过模型正面的平面及模型和毛坯连接的底平面，来确定测量坐标系。测量路径以曲面径向最高的曲线，每 10mm 取一点（三次测量取其平均值），来获得曲面上部分截面的直径，其误差如表 5-2 所示。

表 5-2 部分特征的总体误差

测量特征位置	原始模型	加工模型	误差
距离大端面 10mm	62.862	62.065	0.797
距离大端面 20mm	55.364	54.851	0.513
距离大端面 30mm	48.543	48.287	0.476

5.4.2 误差分析

该阀体在基于大规模点云数据的基础上，采用了本文提出的基于截

面特征线的建模方法，对点云与实体模型进行误差分析，达到了较高的建模精度，而数控加工的曲面特征与原型的总体误差较大。分析原因如下：

(1) 原型误差

基于特征的建模方法是通过抽取表达原始设计意图的、蕴涵在测量数据中的特征，重建出基于特征表达的参数化CAD模型。最后得到实物的原始设计信息。是对工件原始设计的还原。但是由于阀体本身在制造和使用中，产生诸如表面粗糙度不好、形状位置度偏差、磨损等缺陷，导致了总体误差的加大。

(2) 测量误差

由于该工件比较复杂，所以采用快速模具制造技术来做出其硅胶模具，进而采集硅胶模具的外表面来得到阀体内表面的数据，硅胶模材料为半透明状，激光扫描时，会产生光敏性，导致数据采集较差。在喷涂了显像剂后，得到了一定的改善，但是显像剂又引入了误差。同时，工件的复杂性导致点云采集的不完整，如深窄槽无法扫描其特征，只能采取扫描其它特征的方法来间接得到可以对其造型的数据。测量设备本身也存在误差，扫描时发现，如果扫描时，主轴为联动时，会发生轻微的震动，是误差的一大来源。

(3) 数据拼合误差

点云对齐也是误差产生的主要因素之一，在数据拼合时由于工件为内型面复杂工件，不能采用粘贴标准球的方法，采用特征对齐，在提取特征时存在特征拟和的误差，点云的视图越多越会加大这种误差。

(4) 建模误差

建模时的误差主要为软件系统的拟和算法的误差及采用造型方法所导致的误差，同时与个人造型的经验也有一定的关系。

(5) 制造误差

对快速原型制造而言，成形过程中，除了机器本身的运动精度外还有多种原因导致误差：

① 原材料的变化

成形时，原材料由液态变为固态，或由固态变为液态、熔融态再凝结成固态，而且可能同时伴随加热作用，这将引起工件形状、尺寸发生变化。例如，FDM 成型所用材料为 ABS 丝或尼龙丝，各种材料甚至每一卷材料的合适工艺参数都不一样，换料后很容易导致加工质量变化，影响精度。

② 不一致的约束

由于相邻截面层的轮廓有所不同，它们的成型轨迹也可能有差别，因此，每一层成型截面都会受到上下相邻层不一致的约束，导致复杂的内应力，使工件翘曲变形。

③ 加工中断

体积较大零件的加工过程需要较长的加工时间，很多情况下，一个零件的加工需要分成几天或几次才能够完成，一段加工完成后受温度、湿度、材料收缩等影响，完成的部分产生形变等，继续加工完成后的零件，在每段加工的连接处可能会有明显的接缝。

④ 工艺参数不稳定

在长时间成型期间，可能出现工艺参数（如温度、压力、功率、速度等）不稳定的现象，从而导致层与层之间或同一层的不同位置处的成型状况的差异。例如，FDM 成型方法中工艺参数有喷嘴温度、挤压腔温度、挤料因子等，长时间加工后容易出现喷嘴堵塞现象导致出料不顺畅，使成型质量下降，可能导致支撑剥不干净如图 5-41 所示，甚至零件未能完整成形如图 5-42 所示。

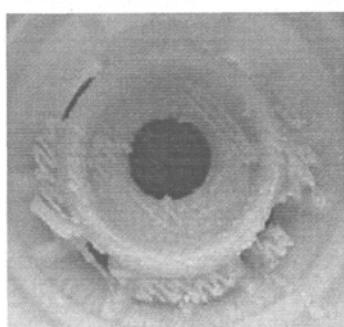


图 5-41 未能除净的支撑

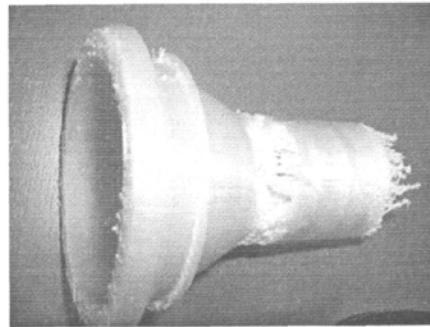


图 5-42 成形不完整件

⑤ 从成形机上取下已成型的工件后，由于温度、湿度环境状况的变化，工件可能继续变形并导致误差。成形过程中残留在工件内的残余应力，也有可能由于时效作用而部分消失并导致误差。

⑥ 成型后处理不当也会引起制件产生误差，例如，FDM 成型后支撑的剥离时不慎剥下支撑以外的一部分材料或引起断裂、裂痕等。

对于数控加工而言，误差的产生主要与加工材料、刀具、加工工艺和机床精度有关。

5.5 小结

本章利用所研究构建的集成反求工程系统，在 Imageware 和 UGII 软件平台环境下，对一个汽车阀体对反求工程技术中数据采集、数据处理、复合实体建模进行了应用研究，采用硅胶模快速制造得到充分反映内部特征的替代品，针对阀体残缺点云的建模提出了解决方法。结合 TSJ-200 台式塑料熔覆型快速成形机加工出得到质量较好的样件模型。以阀体的曲面特征为对象进行了数控加工的应用研究。并对重构模型和总体误差进行了误差分析，得到了较满意的精度。对阀体的反求建模和快速原型制造样件总时间在一周之内，且得到了可以进行修改再创新的特征模型，极大的缩短了产品的开发时间，对于产品的开发和技术的引进有着重要的意义。

第六章 总结与展望

本文是以国家 863/机器人主题“面向任意形状工件的通用夹具研制与工业化装备”、“支持产品快速开发的主动寻位自动化通用安装系统”等项目的研究成果为背景而进行的推广应用研究。作者在参考国内外相关文献的基础上，研究面向敏捷制造的使能技术，进行集成反求工程系统的研究开发。主要进行的工作包括以下几个方面：

(1) 数据的采集与处理。分析比较了接触式、非接触式测量方法及复合式测量等数据采集方法，给出了数据采集设备和策略，讨论了多视图点云数据的拼合、点云的平滑、精简、分割等点云数据的处理技术。

(2) 模型的三维重构。讨论了模型重构过程中常用曲线曲面的理论基础、模型重构的方法及基于特征的反求建模技术。研究了直接基于点云数据的特征建模策略，对 RE/CAD 复合实体建模的关键技术进行了分析和研究。提出了一种基于点云切片的截面特征线提取建模方法，避免了大规模散乱点云的复杂三角化计算，提高了建模效率，减少了重构误差。

(3) 基于反求工程的产品制造。在完成 CAD 模型重构后，其后续应用可利用快速原型、快速模具和数控加工技术来制造原型、模具和批量产品。阐述了快速原型与快速模具制造技术的基本原理、制造工艺及其适用场合，讨论了基于反求工程的快速原型加工过程和数控加工工艺的优化。

(4) 工程应用。利用所研究构建的集成反求工程系统，在 Imageware 和 UGII 软件平台环境下，对一个汽车阀体对反求工程技术中数据采集、数据处理、复合实体建模进行了应用研究，采用硅胶模快速制造得到充分反映内部特征的替代品，针对阀体残缺点云的建模提出了解决方法。

结合 TSJ—200 台式塑料熔覆型快速成形机加工出得到质量较好的样件模型。以阀体的部分特征为对象进行了数控加工的应用研究。并对重构模型和总体误差进行了误差分析，得到了较满意的精度。

本文的研究对于我校敏捷制造工程中心和敏捷制造研究生实验平台等的建设有着重要的意义。由于本选题尚处于初步研究阶段，尽管作者做了大量的前期工作，但一些装备仍处于选购和调试阶段，有待于今后的进一步努力。

本文只是做了面向敏捷制造的使能技术的一些基础研究，需要做的工作还很多，作者认为应继续做以下深入研究：

- (1) 提高数据采集、点云多视图拼合等的精度，与现有的三维软件更好的集成，从而进一步提高反求工程的精度与效率；
- (2) 提高模型重构系统的优化创新设计能力，充分发挥反求工程的创新和再设计特点；
- (3) 进一步研究解决复杂件的模型重构问题，与快速原型与快速模具制造技术更好的结合应用。
- (4) 利用快速原型和快速模具制造技术制造产品毛坯，再进行数控加工，满足复杂产品敏捷制造的迫切需求。

参考文献

- [1] Nagel R N. 21th Century Manufacturing Enterprise Strategy. Bethehem, Lacocca, Lehigh University, 1992
- [2] 荣立润. 敏捷制造—21世纪制造企业的战略. 机电一体化, 2005, 11 (6): 6-10
- [3] 李蓓智. 敏捷制造中的若干使能技术研究与应用[博士学位论文]. 上海: 东华大学, 2005
- [4] 真彤, 邱国亭. 敏捷制造的总体技术研究. 计算机集成制造系统, 1999, 5 (3): 1-10
- [5] Arokiam I, Ismail H, Reid I et al. The application of agile techniques for manufacturing flexibility. International Journal of Agile Manufacturing, 2005, 8(2): 71-83
- [6] 周焕明, 邓宏筹. 敏捷制造使能技术开发研究. 航空制造技术, 1999, (5) : 23-26
- [7] 卢秉恒, 唐一平. 21世纪新产品快速开发技术. 西安: 陕西科学技术出版社, 2000
- [8] 马正元, 杜丽敏, 王玉生. 反求工程中的数据预处理和建模技术. 沈阳工业大学学报, 2004, 26 (6): 601-604
- [9] Sokovic M, Kopac J. RE(reverse engineering) as necessary phase by rapid product development. Journal of Materials Processing Technology. 2006, 175: 398-403
- [10] 金涛, 陈建良, 童水光. 逆向工程技术研究进展. 中国机械工程, 2002, 13 (16): 1430-1437
- [11] 张三元, 孙守迁, 潘云鹤. 基于产品反求工程的产品创新设计方法. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12 (11) : 851-855
- [12] 柯映林, 肖先生, 李江雄. 反求工程CAD建模技术研究. 计算机辅助设计与图形学学报. 2001, 13 (6) : 570-575
- [13] Motavalli S. Review of Reverse Engineering Approaches. Computers & Industrial Engineering, 1998, 11: 25-28
- [14] Puntambekar N V, Jablokow A G, Sommer H J. Unified review of 3D model generation for reverse engineering.Computer Integrated Manufacture System. 1993, 4(1): 223-232
- [15] Hoppe H. Surface reconstruction from unorganized points[PhD Dissertation]. Washington: University of Washington, 1994
- [16] Varady T, Martin R R, Cox J. Reverse engineering of geometric models and introduction. Computer Aided Design, 1997, 29 (4): 255-268
- [17] 柯映林, 刘云峰, 范树迁等. 基于特征的反求工程建模系统RE-SOFT. 计算机辅助设计与图形学学报, 2004, 16 (6) : 799-810
- [18] 张舜德, 魏正英, 卢秉恒. 逆向工程技术及其工业应用. 甘肃工业大学学报, 2001, 27 (2) : 25-28
- [19] Livio D L, Philippe V, Michel F. Reverse engineering of architectural buildings based on a hybrid modeling approach. Computers & Graphics, 2006, 30: 160-176
- [20] 黄雪梅, 林艳萍, 王成焘. 基于逆向工程的个性化人工膝关节CAD建模. 机械设计与研究. 2004, 20 (4) : 81-82
- [21] 杨义. 反求工程技术在磨损分析中的应用[硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2006
- [22] Wang W, Hu Z, Shun Z. 3-D shape measurement based computer-vision. Proceedings of 2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2002, (2): 910-914

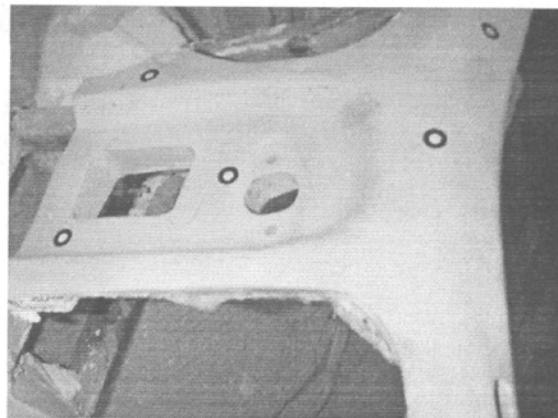
- [23] 吴家升, 张义力, 王军杰. 逆向工程数据采集方法的研究和展望. 机械制造, 2005, 43(5) : 14-17
- [24] Vosniakos G C, Giannakakis T. Reverse engineering of simple surfaces of unknown shape with touch probes: Scanning and compensation issues. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 2003, 217(4): 563-568
- [25] Giovanna S, Franco D. Three-dimensional Optical Measurements and Reverse Engineering for Automotive Applications. Robotics and Computer Integrated- Manufacturing, 2004, 20(5): 359-367
- [26] Stanley J H. CT-assisted solid freeform fabrication. Proceedings of the sixth International Conference on Rapid Prototyping, Dayton, 1995, 267-274
- [27] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256
- [28] Masuda P, Yokoha M. A robust method for the registration and segmentation of multiple range images. Computer Vision and Image Understanding, 1995, 61(3): 295-307
- [29] 孙世伟, 梁培志, 李志刚. 基于曲率RGB的多视点云拼合方法. 中国机械工程, 2005, 16(10) : 882-884
- [30] Karbacher S, Hausler G. A new approach for modelling and smoothing of scattered 3D data. SPIE, 1998, 3313: 168-177
- [31] Tai C, Huang M. The processing of data points basing on design intent in reverse engineering. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2000, 40(12): 1913-1927
- [32] 王宵. 逆向工程技术及其应用. 北京: 化学工业出版社, 2004
- [33] Lee K H, Woo H, Suk T. Data Reduction Methods for Reverse Engineering. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(11): 735-743
- [34] Lee K H, Woo H, Suk T. point data reduction using 3D grids. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 18(3): 201-210
- [35] 柯映林, 单东日. 基于边特征的点云数据区域分割. 浙江大学学报, 2005, 39(3) : 377-396
- [36] Yang M, Lee E. Segmentation of measured point data using a parametric quadric surface approximation. Computer-Aided Design, 1999, 31(7): 449-457
- [37] 武剑浩, 王启付, 黄运保等. 逆向工程中曲面重建的研究进展. 工程图学学报, 2004, (2): 133-142
- [38] Bae S H, Choi B K. NURBS surface fitting using orthogonal coordinate transform for rapid product development. Computer Aided Design, 2002, 34(10): 683-690
- [39] 李江雄. 反求工程中曲面建模技术及相关软件分析. 计算机辅助设计与制造, 1999, (10): 14-16
- [40] 刘云峰, 柯映林, 王秋成等. 基于特征的反求工程技术研究. 计算机集成制造系统, 2006, 12 (1) : 32-37
- [41] 柯映林, 周儒荣. 显式Bezier三角曲面的构造及其在离散数据插值中的应用. 计算机工程, 1992, 18 (6) : 16-20
- [42] Farin G. Triangular Bernstein-Bezier surface patches. CAGD, 1986, 3: 83-127
- [43] Yang J, Karim A M. Approximate swept volumes of NURBS surfaces or solids. Computer Aided Geometric Design, 2005, 22(1): 1-26

- [44] Yin Z. Reverse engineering of a NURBS surface from digitized points subject to boundary conditions. *Computers & Graphics*, 2004, 28: 207-212
- [45] Moreton H P, Sepuin C H. Functional optimization for fair surface design. *Computer Graphics*, 1992, 26(2): 167-176
- [46] 金涛, 匡继勇. 产品反求模型的精度评价. *机械*, 2001, 28 (2) : 3-4
- [47] 王广春, 赵国群. 快速成型与快速模具制造技术及其应用. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [48] Zhang Y F, Wong Y S, Loh H T et al. An adaptive slicing approach to modeling cloud data for rapid prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 140: 105-109
- [49] Wit Y F, Wong Y S, Loh H T et al. Modelling cloud data using an adaptive slicing approach. *Computer Aided Design*, 2004, 36: 231-240
- [50] Zhou J, He Z. A new rapid tooling technique and its special binder study. *Journal of Rapid Prototyping*, 1999, 5(2): 82-88
- [51] 范晋伟, 闫邵泽, 关佳亮等. 数控机床通用几何误差补偿关键技术的研究. *航空精密制造技术*, 2005, 41 (5): 19-22
- [52] 彭芳瑜, 穆海华, 周云飞等. 大型叶片五坐标数控加工进给速度优化. *机械科学与技术*, 2003, 22 (2): 215-217
- [53] Lim E M, Menq C H. Integrated Planning for Precision Machining of Complex Surfaces. Part 1: Cutting Path and Feedrate Optimization. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1997, 37 (1): 61-75
- [54] 牛文铁, 徐燕申. 自由曲面数控加工走刀方向的优化研究. *组合机床与自动化加工技术*, 2003 (4): 54-59
- [55] 林朝平. 数控加工编程中工序划分的原则与要点. *组合机床与自动化加工技术*, 2003(1): 26-27
- [56] Xie Z, Wang J, Zhang Q. Complete 3D measurement in reverse engineering using a multi-probe system. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2005, 45: 1474-1486
- [57] <http://www.hexagonmetrology.com.cn/>
- [58] 吴卫东, 刘德仿. 反求工程中的点云数据采集. *航空制造技术*, 2004, (11): 72-77
- [59] 吴立军, 王卫兵, 谢龙汉. 逆向工程中三维测量的若干技巧. *模具工业*, 2004, (10) : 47-49
- [60] 姜元庆, 刘佩军. UG/Imageware逆向工程培训教程. 北京: 清华大学出版社, 2003
- [61] 朱心雄. 自由曲线曲面造型技术. 北京: 科学出版社, 2000
- [62] 金涛, 童水光. 逆向工程技术. 北京: 机械工业出版社, 2003
- [63] Bezier P E. Numerical control Mathematics and applications. London: Forresttrans Wiley, 1972
- [64] Barnhill R E, Riesenfeld R F. Computer Aided Geometric Design. Academic Press, 1974
- [65] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理B样条. 北京: 高等教育出版社, 2001
- [66] 聂信天, 史立新. 快速原型技术在机械制造中的发展及应用. *农机化研究*, 2006, (4) : 49-53
- [67] 杨孟涛. 基于反求工程和快速原型技术的快速模具制造技术的理论与实践[硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2004
- [68] 孙玉文, 贾振元, 王越超等. 基于自由曲面点云的快速原型制作技术研究. *机械工程学报*, 2003, 39 (1) : 56-59

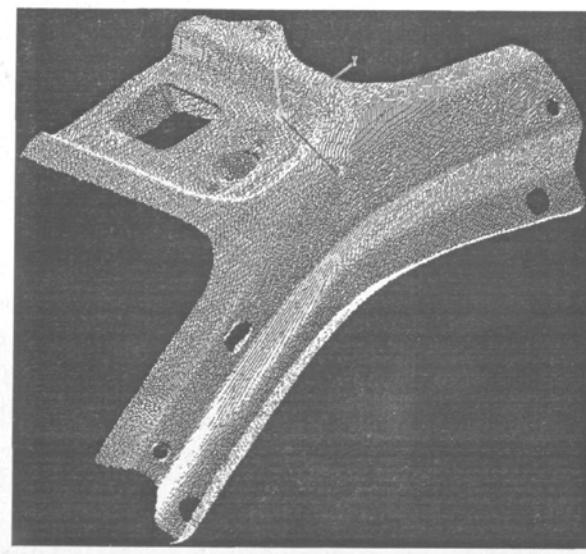
附录一 其它方面的反求建模应用

1 汽车内板件的建模

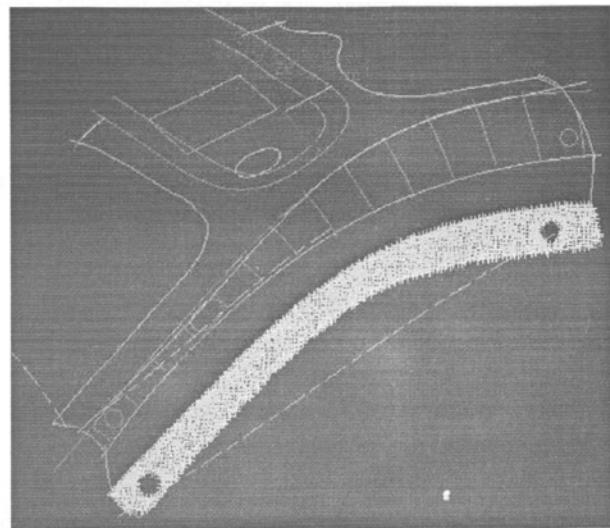
(1) 汽车内板件



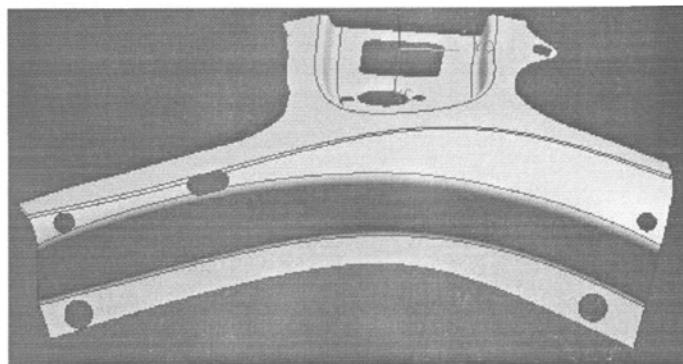
(2) 汽车内板件的点云



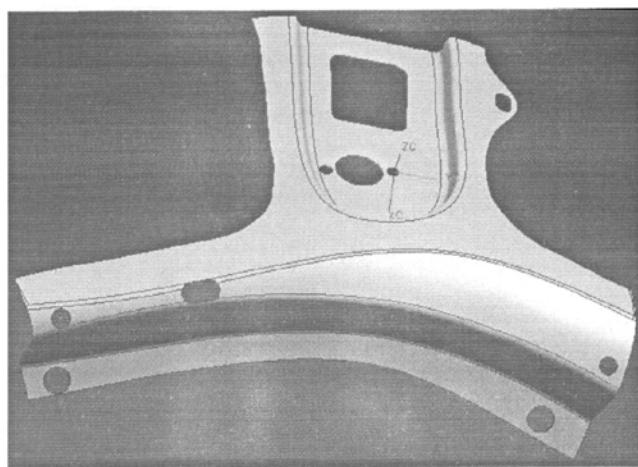
(3) 内板件的特征线提取



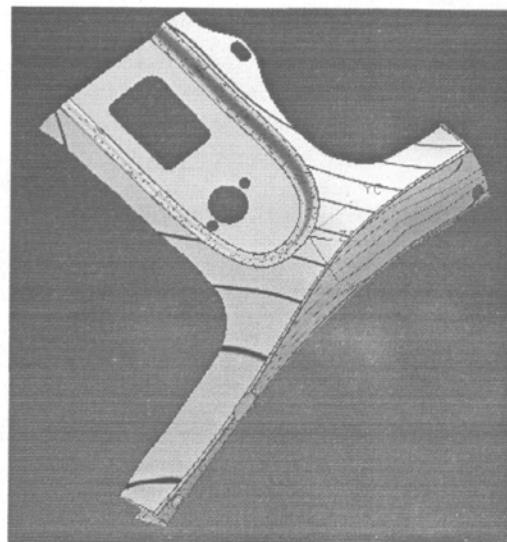
(4) 内板件的片体模型



(5) 内板件的实体模型

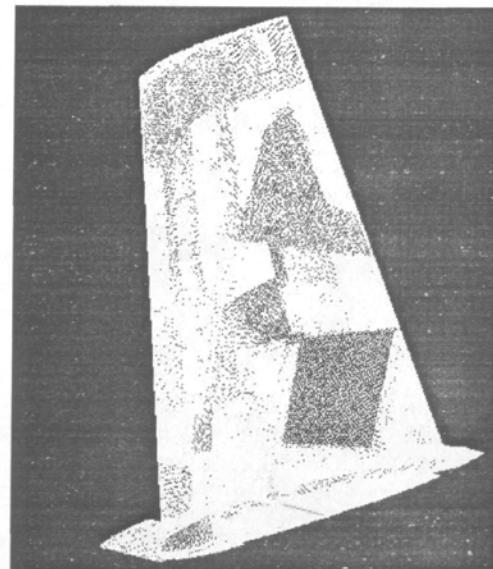


(6) 表面的品质评价

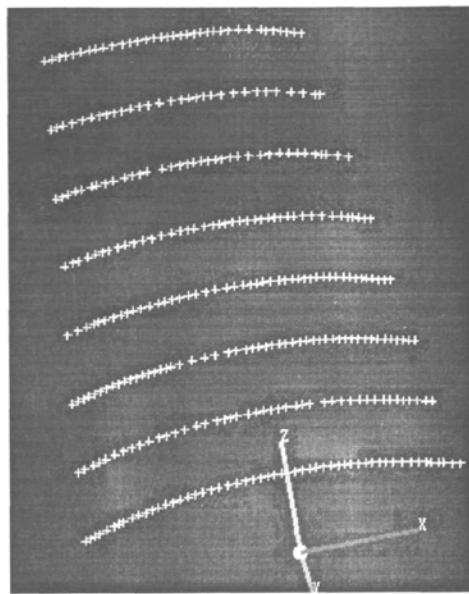


(二) 某型叶轮的反求建模

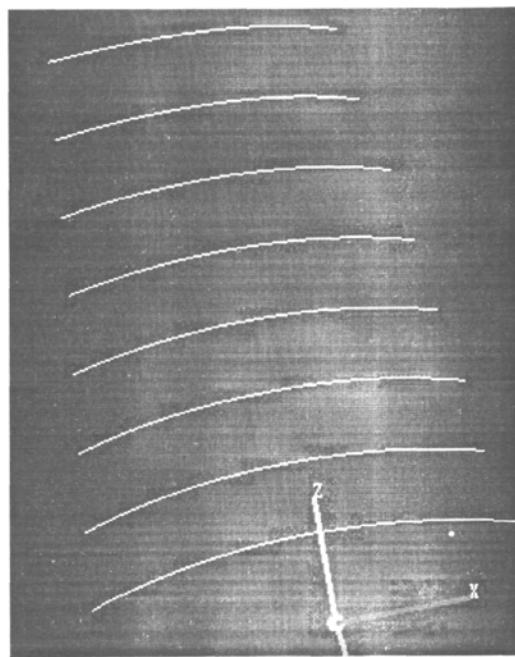
(1) 叶轮的扫描点云



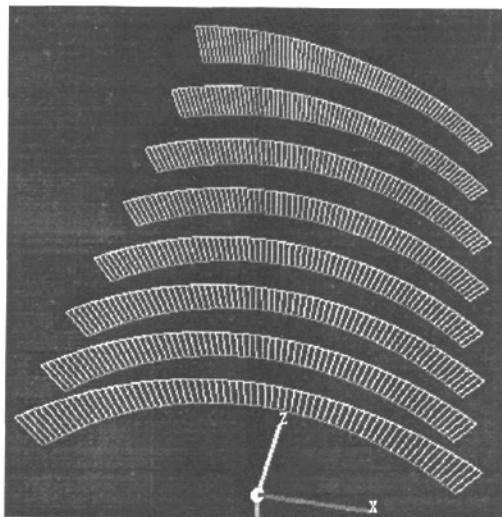
(2) 提取的叶轮造型线点云



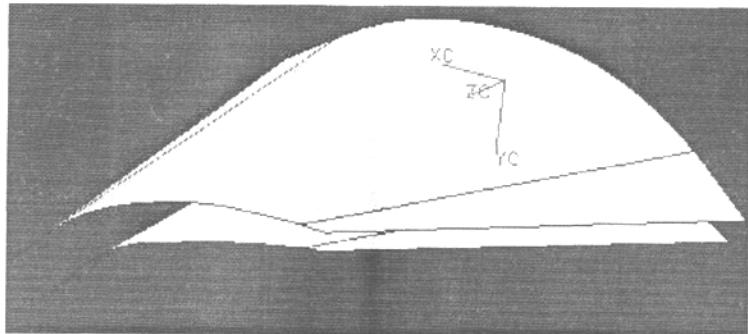
(3) 曲线的构建



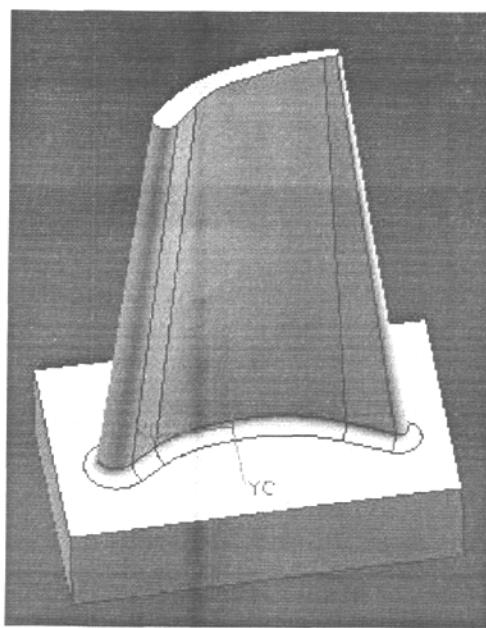
(4) 曲线的曲率分析。



(5) 曲面构建



(6) 缝合成为实体



附录二 阀体曲面特征的部分加工程序

```

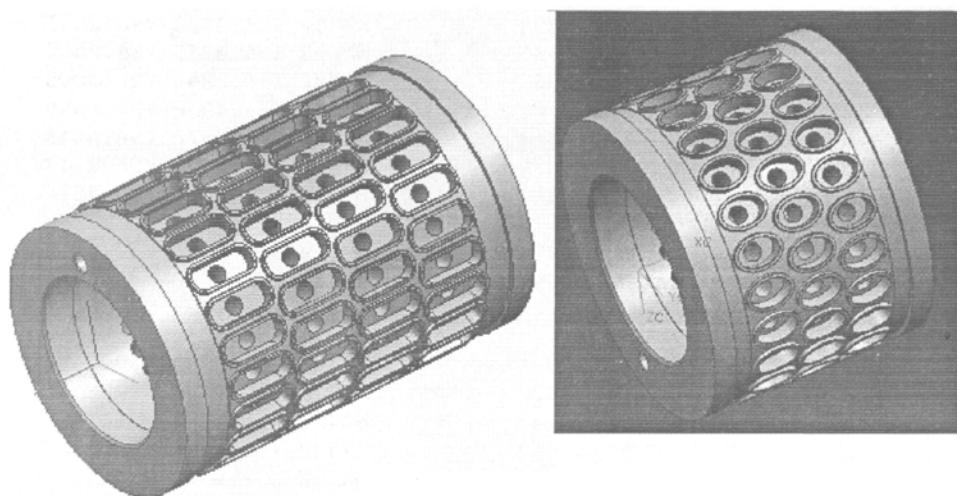
N2500 X-39.0991 Y23.5567
N2510 G1 Z-1.
N2520 X-37.9821 Y23.4188
N2530 X-36.8575 Y23.4617
N2540 X-35.7543 Y23.6842
N2550 X-34.781 Y24.0807
N2560 X-33.9391 Y24.4398
N2570 X-31.1804 Y25.8585
N2580 X-28.219 Y27.1883
N2590 X-26.2981 Y27.957
N2600 X-24.3439 Y28.6367
N2610 X-22.1809 Y29.2875
N2620 X-19.9844 Y29.8144
N2630 X-19.3604 Y30.1505
N2640 X-18.8238 Y30.6134
N2650 X-18.3998 Y31.1813
N2660 X-18.1085 Y31.8273
N2670 X-18.1525 Y32.7421
N2680 X-18.1403 Y33.2304
N2690 X-18.1002 Y33.7188
N2700 X-18.0468 Y34.1268
N2710 X-17.8252 Y34.7642
N2720 X-17.4379 Y35.3168
N2730 X-16.9142 Y35.7425
N2740 X-16.2941 Y36.0089
N2750 X-15.6249 Y36.0956
N2760 X-14.9266 Y36.1097
N2770 X-14.2423 Y35.9662
N2780 X-13.6094 Y35.6723
N2790 X-13.1518 Y35.302
N2800 X-12.7933 Y34.8352
N2810 X-12.5537 Y34.2975
N2820 X-12.4463 Y33.7188
N2830 X-12.4193 Y33.2304
N2840 X-12.4123 Y33.1086
N2850 X-11.2654 Y33.1301
N2860 X-10.781 Y33.1479
N2870 X-10.4136 Y33.1929
N2880 X-10.2966 Y33.2387
N2890 X-10.0515 Y33.3828
N2900 X-9.9472 Y33.4699
N2910 X-9.8841 Y33.5363

N2920 X-9.8195 Y33.7188
N2930 X-9.6926 Y34.4664
N2940 X-9.358 Y35.1469
N2950 X-8.8434 Y35.7039
N2960 X-8.359 Y36.0019
N2970 X-7.8746 Y36.1693
N2980 X-7.3903 Y36.2417
N2990 X-6.4215 Y36.2365
N3000 X-6.2244 Y36.3043
N3010 X-6.1458 Y36.3659
N3020 X-5.8976 Y36.6416
N3030 X-5.8093 Y36.7712
N3040 X-5.7825 Y36.8374
N3050 X-5.7682 Y37.1374
N3060 X-5.7983 Y37.6258
N3070 X-5.7878 Y38.1141
N3080 X-5.7708 Y38.6025
N3090 X-5.701 Y39.0909
N3100 X-5.4592 Y39.7697
N3110 X-5.0245 Y40.3444
N3120 X-4.4371 Y40.7619
N3130 X-3.7514 Y40.9835
N3140 X-3.0308 Y40.9887
N3150 X-2.5464 Y40.9439
N3160 X-2.062 Y40.9037
N3170 X-1.5776 Y40.8893
N3180 X-.6088 Y40.9083
N3190 X.0636 Y40.862
N3200 X.7107 Y40.6737
N3210 X1.3029 Y40.352
N3220 X1.8131 Y39.9116
N3230 X2.2 Y39.5021
N3240 X3.0332 Y38.751
N3250 X3.9756 Y38.1427
N3260 X5.0032 Y37.6927
N3270 X6.0894 Y37.4126
N3280 X7.2065 Y37.3096
N3290 X8.3256 Y37.3864
N3300 Z100.0
M30
%

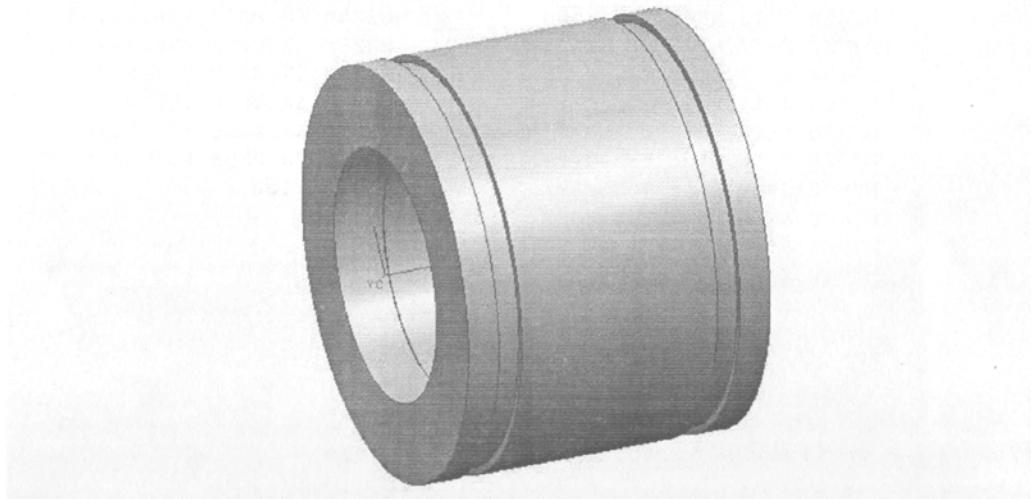
```

附录三 医药模具的制造

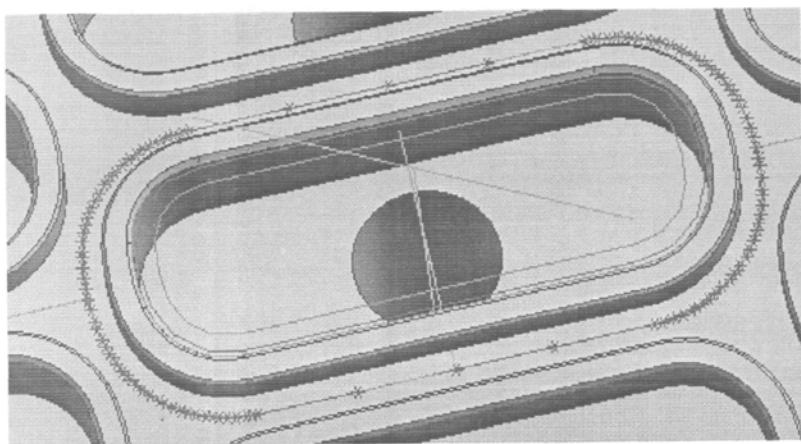
(1) 医药的 CAD 模型



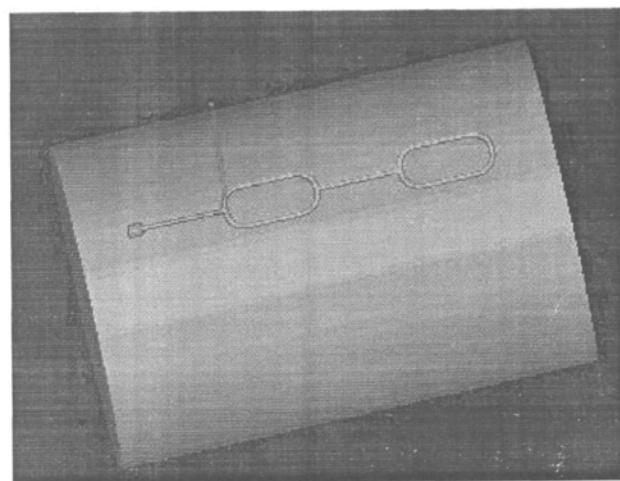
(2) 医药模具的毛坯



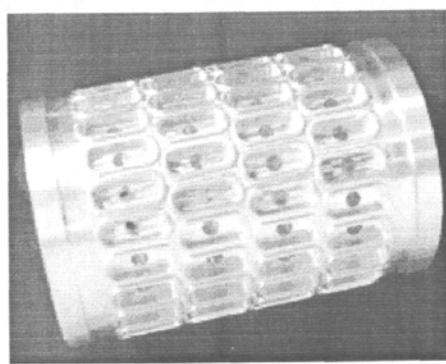
(3) 刀具轨迹设置



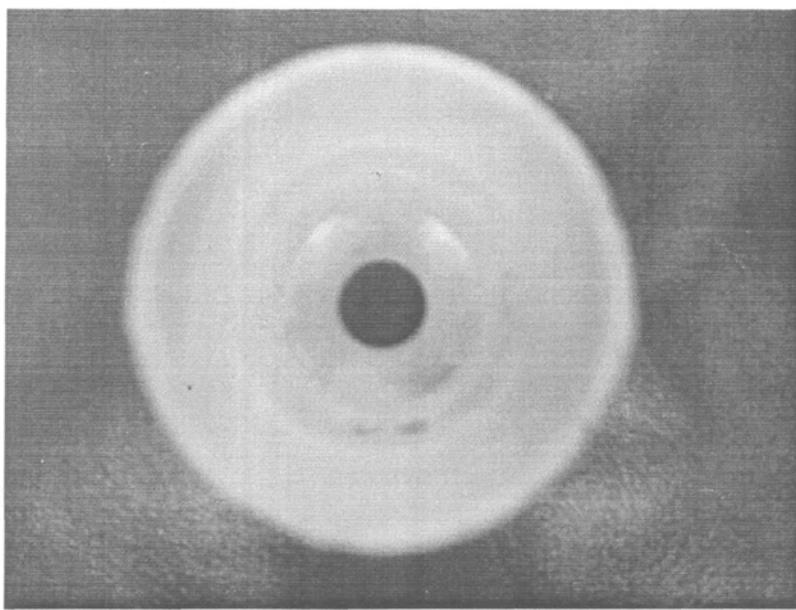
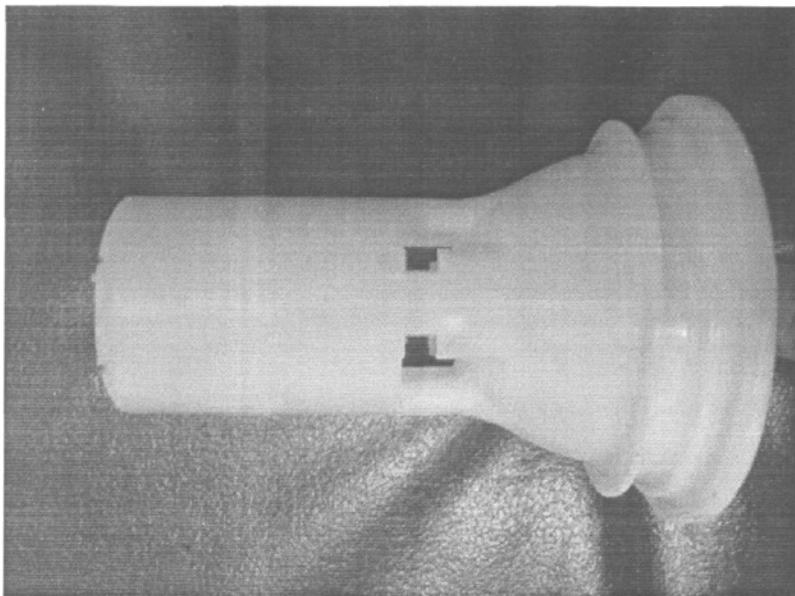
(4) 刀具轨迹仿真

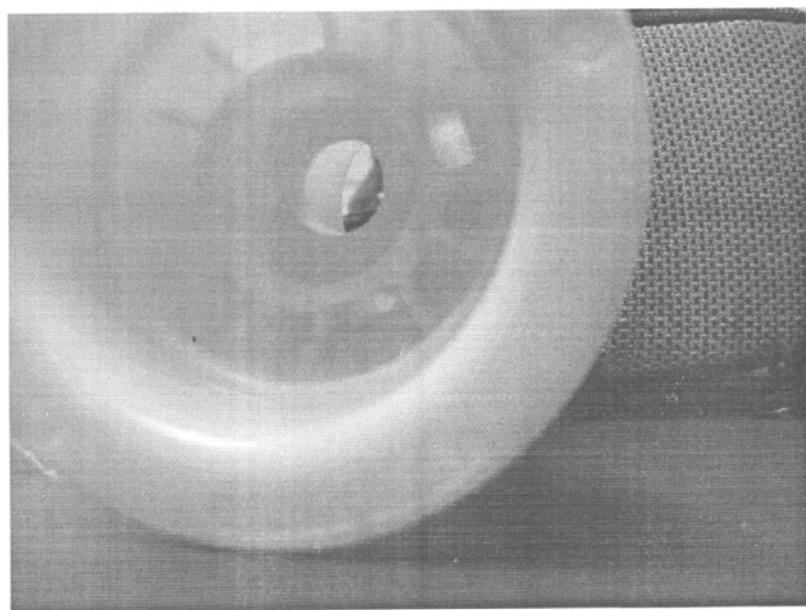
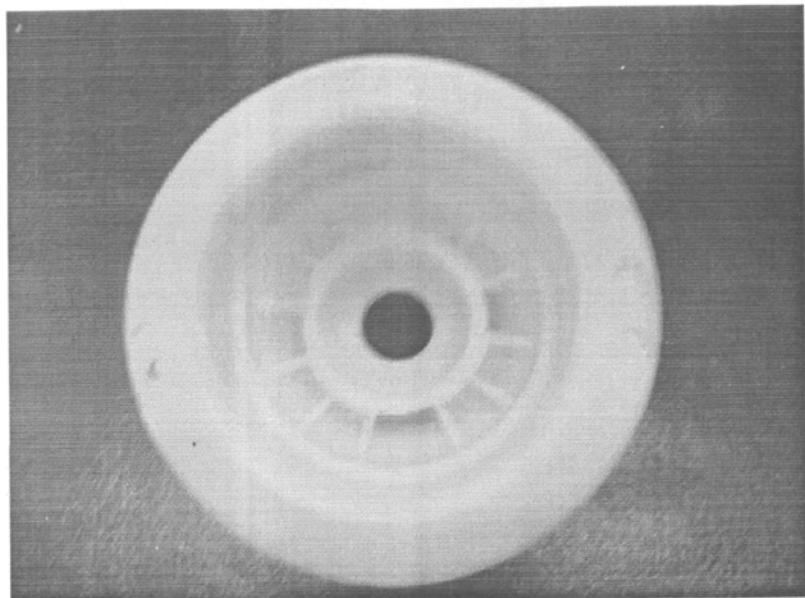


(5) 加工后的产品



附录四 快速模具制造的阀体产品





攻读硕士学位期间发表的论文

徐建华，李蓓智，张家梁，史哲. 基于 **imagedware** 和 **UG** 的汽车阀体的反求设计. 机械设计与制造，已录用.

致 谢

光阴似箭，时光荏苒，转眼间已临近毕业，在这里我衷心感谢对我的学习和生活关怀帮助的各位老师和同学。

首先感谢导师张家梁副教授、李蓓智教授对我在课题研究中的悉心指导，为我创造了很好的工作和学习环境，并给我提供了许多宝贵的锻炼机会，使我能够完成自己的学业。同时，导师渊博的知识、严谨治学的作风和对学科前沿敏锐的把握也将使我终身受益，杨建国教授严谨治学的作风和高度的负责精神使我受益匪浅，衷心感谢张老师、李老师和杨老师在学习、科研、生活上给予的精心指导和无微不至的关怀。

感谢东华大学先进制造中心的王庆霞老师、吕志军老师、项前老师、陈晓川老师、周虎老师、闫如忠老师和周亚勤老师，感谢他们在生活和科研工作中对我的关怀和帮助，特别是王庆霞老师在我的课题研究过程中提供了极大的帮助。

感谢刘佳亮、慕少鹏等师兄对我的帮助，感谢等实验室学友对我的支持与配合，同时感谢张晖、黄昊等师弟在课题中给我的帮助和配合。

感谢上海职业培训中心的史哲老师和中心的工作人员富雅娟，感谢他们在我的课题研究中的提供的帮助和支持，史哲老师的谦和、严谨使我受益匪浅。

同时，也将本论文献给我的父母，感谢他们长久以来给与我的理解，支持和关心帮助。

感谢参加论文答辩和评审、评阅的各位专家。

徐建华

2007年3月于上海