

## 汽车覆盖件逆向工程的曲面重构

### 摘要

在汽车产品开发中,车体成型技术是汽车行业的关键技术之一,而车体覆盖件成型技术又是汽车车体制造的关键。覆盖件特别是车身覆盖件的市场生命周期最短,变化最快。它直接关系到汽车产品的质量、外观和生产成本、开发周期以及产品的更新换代,是提高汽车竞争力的主要因素之一。由于汽车覆盖件具有形状复杂、结构尺寸大、精度高、表面质量要求严格等特点,因此,如何高效、高质量和低成本地开发设计与快速制造出具有流线外形的汽车覆盖件,已成为工业界竞争的焦点。

逆向工程是根据已有物理模型的测量数据来重建其数字化模型的过程,目前该技术已成为快速产品开发的四大支撑技术之一。海量点云的曲面重构是逆向工程的核心技术之一。它是根据曲面的数字信息,去恢复曲面原始几何模型的过程。

本文在全面分析国内外反求工程领域研究现状的基础上,把反求工程 CAD 建模中三维表面重构作为研究重点,对曲面重构中各软件间的数据交换进行了深入研究。提出了基于三角化模型截面线提取产品特征线的四边域曲面重构的方法。该方法不但对特征点提取进行了降维简化,把在三维数据点云中直接求取特征点,转化为在截面线上求点,而且综合了三角曲面法快速、灵活、边界适应性好和四边曲面法精确、光顺的优点。并以 THUNDER RACER 赛车模型的整车曲面造型为例,介绍了其复杂曲面的重构过程;以某汽车部分车体的一块曲面的快速制造为例,介绍了如何在各个造型软件中实现数据的交换及互补。

**关键词:** 逆向工程, 曲面重构, 集成建模, 特征提取, 曲线(面)拟合

## Reverse Engineering Surface Reconstruction for Automobile Panels

### ABSTRACT

In the development of automobile products, the technique of bodywork moulding is one of the key techniques, and the technique of moulding of panels is key to the manufacture of the bodywork. The panels, especially the panels of automobile bodywork, have the shortest lifecircle, and are most variable. And it is one of the most important factors to increase the automobile's competition ability. Because it not only has a direct impact on its quality, external appearance and production costs as well as its development circle, but also can make it renovated more quickly. The panels commonly have complicated shape and big-sized structure, which requires high accuracy and appearance quality. Consequently how to efficiently design and manufacture high-quality panels of a car with streamline shape at low costs has become the competition focus in the motor industry.

The reverse engineering is a process of rebuilding its digital model according to the physical data that we already have, which has been one of the four greatest supportive techniques of quick development of some products. The surface reconstruction of point cloud, which is the process of reverting the curved surface to its original model according to the digital information, is one of the core techniques.

After made a comprehensive analysis in both domestic and international research area of contrary engineering, I took the rebuilding of three-dimensional surfaces as my emphasis, and made a further research in alternate modeling. I presented a method that four-side territories surface reconstruction based on characteristic curves extracted by section curves of triangle model. This method not only simplifies and reduces the dimension in characteristic point withdrawn by transformed directly taking characteristic point in the three dimensional data point clouds to asks the spot on the truncation facial suture, moreover synthesized the triangle surface's merit which was fast, nimble and the boundary compatibility good with four side curved surface's merit which was precise and smooth. What's more, I took the shape of a model of THUNDER RACER-named racing car as an example to introduce how to rebuild the complicated curved surfaces. And I introduced how to exchange data among various shape softwares by the example of fast manufacturing a curved face of a piece of adornment inside the car.

**Keywords:** Reverse engineering, surface reconstruction, integration bulid model, pick up feature, fitting surface (curve)

## 独创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表和撰写的研究成果，也不包含为获得华东交通大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

本人签名 孙剑萍 日期 06.6.1

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解华东交通大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅。学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

保密的论文在解密后遵守此规定，本论文无保密内容。

本人签名 孙剑萍 导师签名 周洪波 日期 06.6.2

# 第一章 绪论

## 1.1 论文背景

科技进步使人类进入信息时代,同时也加剧了世界市场的竞争,产品生命周期越来越短。美国等发达国家把敏捷制造技术列为 21 世纪制造业发展的策略,也逐渐得到世界上其他国家的普遍重视。<sup>[1]</sup>作为敏捷制造技术重要分支的逆向工程技术为快速设计和制造提供了很好的技术支持,已经成为制造业信息传递重要而简洁的途径之一<sup>[2]</sup>。逆向工程技术在加快产品开发速度、降低成本以及借鉴和吸收现代高新技术成果方面越来越显示出强大的威力,该技术已经开始成为人们实现产品概念设计与复杂设计的强有力武器。

逆向工程技术(Reverse Engineering, RE),也称反求工程、反向工程等<sup>[3]</sup>。反求思维在工程中的应用源远流长,提出这种术语并成为一门学问去研究,出现于 20 世纪 60 年代,起源于精密测量和质量检验。90 年代,随着现代计算机技术及测试技术的发展,逆向工程发展成为一项以先进产品、设备为研究对象,利用 CAD/CAM 等先进设计、制造技术来进行产品复制、仿制乃至新产品开发的一种技术手段,其相关领域包括几何测量、图像处理、计算机视觉、几何造型和数字化制造等。在娱乐、工业设计和加工、医学、仿真与虚拟现实及网络等领域具有广泛的应用。

逆向工程使得设计师可以在设计和制造过程的各个阶段从物体模型(实物)上获得数据信息。这种方法不但可以生成准确的设计替代模型,获得物体模型和设计模型之间的比较差异,而且可以在整个的设计过程中建立起从物体模型到数字模型的桥梁。作为 CAD 技术的重要组成部分的反求工程,其内涵早已超出了仿制的发展阶段,意在创新,而创新则需要反求构建的模型是可修改和可编辑的。

目前,日本、美国等工业强国在逆向工程方面的研究走在世界的前列。英国 Cardiff 大学的 Martin 和 Varady 紧密合作,他们对规则曲面的拟合、约束的识别和添加、B-rep 结构的建立等方面进行了研究;美国 Utah 大学的 Thompson 等对约束的添加、基于特征的模型反求、基于知识的逆向工程等进行了研究;Ohio 州立大学的 Menq 等对三坐标测量技术、自由曲线曲面拟合、数据分块等进行了研究。

我国已把逆向工程作为国家 863 高新技术项目,在 CIMS 研究中的重要单元技术,国内许多单位在逆向工程研究方向中也作了许多工作,取得了一定的成果。如西安交通大学测量 CIMS 中心的面向 CMM 的逆向工程测量方法和基于线结构光视觉传感器的光学坐标测量机的研究;上海交通大学国家工程模具中心的集成系统和自动建模技术;浙江大学生产工程研究所的三角面片建模;南京航空航天大学 CAD/CAM 工程研究中心的基于海量散乱点三角网格面重建和西北工业大学的数据处理与建模等。

当前,逆向工程技术在我国汽车工业的生产过程的应用主要从实物模型或油泥模

型到基于三坐标测量的空间点云数据,再利用逆向工程软件得出其 CAD 模型,最后通过 CAD 软件进行参数化设计,形成优化及系列化的 CAD 模型。只有建立了基于逆向工程的 CAD 模型,才能利用先进的 CAD/CAM 技术,进行新产品设计、工艺设计、模具设计、模具制造和质量检验等后续生产过程。

由于国外 CAD/CAM/CAE 技术应用较早,软硬件系统功能强大,各大汽车公司普遍建立了完整的虚拟产品开发系统(VDPS),采用并行工程(CE)、敏捷制造、快速原型技术(RP)及可视化等先进的制造技术,已积累了大量的经验和品牌特征。所以,对于汽车覆盖件的三维重构,国外更多着眼于研究二维图向三维模型转换的智能识别与自动重构系统和对实物逆向的曲面重构技术<sup>[4-6]</sup>,并提出了许多有效的理论和方法<sup>[7,8]</sup>。

国内对由二维工程图纸重构出三维 CAD 模型的研究也比较广泛、深入,发表了大量的研究论文,但对汽车覆盖件等特别复杂的部件研究相对较少,尤其是没有形成成熟的系统理论和行之有效的方法。对于逆向工程技术,在跟踪国外的研究理论、算法和方法进展的基础上进行了较多的应用研究。对三维重构模型的质量评估与品质分析,国内外取得了较大的理论成果,并成功应用于汽车车身的开发实践。

汽车覆盖件,作为汽车车身开发技术的关键,是影响汽车开发周期和整车质量、性能的关键因素之一。其外形多是由尺寸大,不能用简单的数学解析来表示的、形状复杂的三维曲面,对其进行实物逆向的曲面重构技术是国内外的研究热点之一。

### 1.2 课题意义

快速地开发一个产品,是赢得市场的关键。产品的模型可以用各种各样的方法实现。逆向工程的出现,为先进制造技术的发展开拓了新的前景。在工业领域中,逆向工程技术应用可以缩短产品研制周期 40%以上,是提高生产率的重要手段之一。

在 20 世纪 90 年代,国际汽车界兴起一种基于反求工程的汽车产品开发新模式。在设计一款新车型时,外观设计师首先从概念构思开始,综合美学、性能、气动等诸多因素,手工绘制出效果图,再利用 Rhinoceras 等工业造型软件进行 3D 外观设计。这些 3D 效果图,并不能直接用于生产加工,而要做出 1:1 的实物模型,然后进行数据测量得到点云数据,再用 Strim、Imageware 等专业反求软件进行曲面重建,并将这些曲面数据导入到 CATIA、UG 等 CAD 软件中建立实体模型,进行内部结构设计。

中国是一个制造大国,能够制造出很多高质量的机电产品,但在这些产品中鲜有自己的技术,也没有自己的知识产权。实事求是地说,我们在相当长的时期里还不具备创新能力,这个阶段更多的是学习和模仿,积累自己的经验,为今后的创新打下坚实的基础。因此,通过逆向工程,在消化、吸收先进技术的基础上,建立和掌握自己的产品开发设计技术,进行产品的创新设计,即在 COPY 的基础上进行改进,这是

提升我国制造业的必由之路。

汽车工业是我国国民经济五大支柱产业之一。汽车覆盖件是汽车产品最重要的组成部分<sup>[10-12]</sup>，在制造费用上，汽车覆盖件占整个汽车制造费用的 70% 以上。目前，汽车覆盖件生产技术已成为衡量一个国家及企业汽车生产水平的重要标准。

汽车车身覆盖件多是由尺寸大，形状复杂的三维曲面构成，不能用简单的数学解析来表示，它不仅要求具有设计所规定的使用功能，而且要求优良的外观质量、高的配合精度和形状、尺寸的一致性以及好的互换性来保证其焊接和装配质量<sup>[13]</sup>。其造型很大程度上体现了整车的艺术性和个性风格。

这种艺术效果决定了其无论是新产品设计，还是新产品仿制，应以实物模型为设计与生产主要依据的逆向工程技术为主。

国内几家大汽车厂先后与国外著名的汽车制造企业合作生产了许多新型轿车，在“引进—组装—再引进”的汽车生产实践中，制造企业往往缺乏 CAD 模型。只有建立了基于逆向工程的 CAD 模型，才能利用先进的 CAD/CAM 技术，进行新产品设计、工艺设计、模具设计、模具制造和质量检验等后续生产过程。汽车覆盖件曲面重构技术是建立 CAD 模型的基石，是促进我国汽车工业发展的重要环节。因此，研究汽车覆盖件曲面重构的逆向工程技术具有重要的现实意义。

目前，曲面造型、实体造型的理论和算法已基本成熟，并在 CAD/CAM 系统中得到广泛的应用，而面向逆向工程的曲面、实体造型技术尚达不到理想的实用水平，究其原因不在于造型技术的本身，而在于建模中难以获得零件的结构特征数据，而导致原型表达不合理引起的。对于由柱、锥、球、环等基本体素拼合而成的零件，特征数据的提取较简单，建模也易于实现，但对于具有复杂曲面外形的零件，如家电产品外壳件、摩托车的外形塑件等复杂结构件，其外形曲面件是由许多基本子曲面，通过光滑连接、修整、裁剪、过渡拼合而成的复合曲面。因此，通过对测量数据的处理，提取建模所需的、表征零件形状特征的数据是反求 CAD 建模的核心所在。如何准确地依据所采集的测量数据实现曲面重构，如何填补孔域的数据信息，如何解决分区测量建模的不合理性等问题有待进一步研究。

### 1.3 文献综述

反求工程是一个非常广阔的概念。广义的逆向工程是指消化吸收已有产品先进技术的一系列分析方法和应用技术的结合，包括影像逆向、软件逆向和实物逆向<sup>[14]</sup>。

实物逆向是逆向工程最主要的应用领域。实物逆向可定义为：在没有产品原始图纸、文档或 CAD 模型情况下，通过对已有实物或样件的测量和分析，反求出产品的几何模型、工艺过程、物理和材料特性等，从而复制或开发出同类新产品的过程。

当前，关于逆向工程的研究主要集中于几何反求。即从产品的实物样件或模型反求几何模型，是将实物转化为 CAD 模型的数字化技术和几何模型重建技术的总称

[15,16]。它一般包括数据采集、数据预处理、曲面重构和建立产品模型等几个阶段。其流程通常是利用 3D 数字化量测仪器准确、快速地测量出现有工件（样品或模型）轮廓坐标，再通过各种软件对曲面进行建构、编辑、修改，传至 CAM 系统，生成刀具的 NC 加工路径，最后送至 CNC 加工机制作所需模具，或送到快速成型机（Rapid Prototyping）将样品模型制作出来。其流程图如图 1-1 所示。

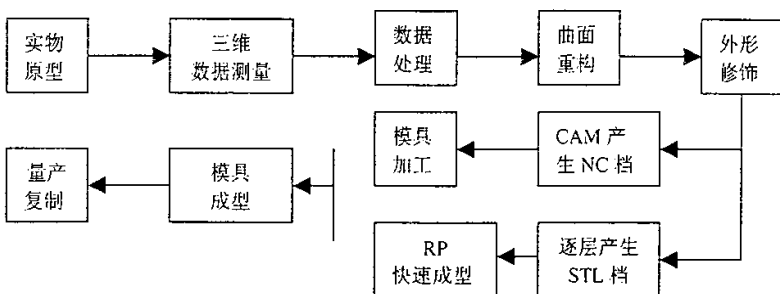


图 1-1 流程图

Fig1-1 Flow Chart

### 1.3.1 数据采集

数据采集是指通过特定的测量设备和测量方法获取零件表面离散点的几何坐标数据。开发高精度、快速的数字化测量系统和测量软件，以及如何根据几何外形选取不同的测量方法和测量路径，一直是数字化技术的主要内容<sup>[17-19]</sup>。

随着传感技术、控制技术、制造技术等相关技术的发展，出现了各种各样的数据采集方法，主要分为接触式、非接触式和逐层扫描法三大类，其中代表性的数据采集设备有三坐标测量机(CMM)、光学扫描仪和断层扫描仪。数据采集方法分类如图 1-2 所示。

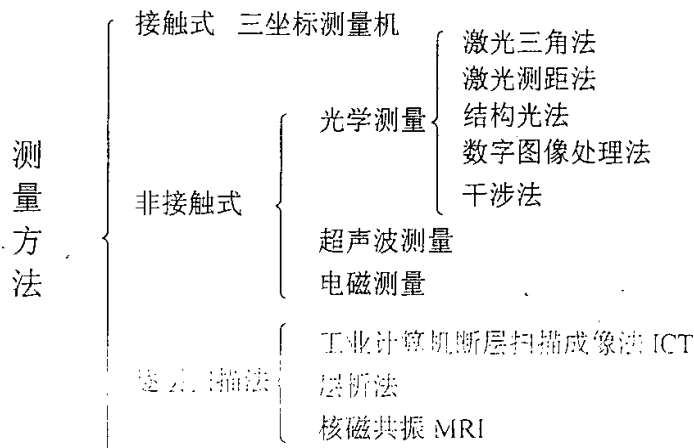


图 1-2 数据采集方法分类

Fig1-2 Data Acquisition Method Classification

(1) 接触式测量法主要是指三坐标测量机（Coordinate Measuring Machine,

CMM)。CMM 是目前应用最广的数据采集设备,可以对复杂形状工件的空间尺寸进行测量。其主要优点是测量精度高、适应性强。其测头可分为硬测头(机械式测头)、触发式测头和模拟式测头三种。触发式测头是英国 Renishaw 和意大利 DEA 等公司于 20 世纪 90 年代研制生产的新型测头,测量精度可达 0.03mm,测量速度一般为 500 点/s,具有测量准确性高、对被测物体的材质和反射特性无特殊要求且不受表面颜色及圆率影响等优点。接触式测头一般测量效率低,而且对一些软质表面无法进行测量。

(2) 非接触式测量法的优点是测量速度快,但精度低。主要包括光学测量、超声波测量、电磁测量等方法。较为成熟的是光学测量法,一般包括激光扫描、莫尔条纹、双像合成法等。

(3) 逐层扫描法主要有工业计算机断层扫描成像法 ICT (Industrial Computer Tomograph)、核磁共振 MRI (Magnetic resonance imaging) 和层析法。

ICT 对被测物体进行断层截面扫描,以 X 射线的衰减系数为依据,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,但造价高,测量系统的空间分辨率低,获取数据时间长,设备体积大。美国 LLNL 实验室研制的高分辨率 ICT 系统测量精度为 0.01mm。

层析法是近年来发展的一种逆向工程技术,可对任意形状,任意结构零件的内外轮廓进行测量,其实质是快速成形的逆过程,是一种破坏性的测量方法。它将研究的零件原形填充后,采用逐层铣削和逐层光扫描相结合的方法获取零件原形不同位置截面的内外轮廓数据,并将其组合起来获得零件的三维数据。

数据采集阶段的技术要点是实物边界的确定和表面形状的数字化的,其中难点是边界的确定。目前边界的确定除了实物表面延拓求交法外,工程上也常采用人工测量边界或人机交互方式来定义实物的边界。用于反求工程的数字化技术最大的不足在于,各种测量方法的测量过程仍是一个孤立行为,测量方案并没有考虑后续的模式重建和数字化加工的要求。因此测量技术的开发除了先进仪器设备和测量手段多样化的要求外,还应重视面向反求的测量软件的研究与开发,软件应具备人工交互及自动编程、规划及优化测量路径,以及特殊曲线、曲面的自动测量等功能。

目前,测量设备的发展趋势是向着高速、高精度、系统化、集成化、智能化的方向发展。由传统的接触式测量向快速非接触式测量发展,特别是随着“光机电一体化”技术发展,结合了计算机、图像处理,激光技术以及精密机械的三维激光扫描机逐渐成为了反求工程的主流。而且形式上又从点扫描测量向线扫描测量、场测量发展。其中线扫描与点扫描测量同样基于“三角法测量原理”,同时借助于高精度,高分辨率的面阵 CCD (Charge Coupled Device) 图像采集系统,具有与点扫描形式类似的高测量精度以及可与场测量方式媲美的高效率。另外,采用步进电机带动旋转平台,可以获取被测物体的全轮廓数据信息,能真正做到采用三维扫描方式获取物体三维形状信



息。

对传统的三坐标测量机,一方面是提高测量速度,另一方面是三坐标测量机与光学系统组合的自动测量系统<sup>[20-23]</sup>。我国深圳市鑫磊镭瑞精密仪器有限公司开发的基于激光线扫描方式的 Laser-RE 镭瑞系列三维激光扫描机,是在国内最先推出的拥有完全自主知识产权的逆向工程专用扫描(抄数)设备。

### 1.3.2 数据预处理

通过测量设备对零件进行测量,所得的点数据一般比较多,尤其是应用激光测量设备所得的数据有时多达几兆甚至十几兆(通常把用激光扫描法所测得的大量的点形象地称为点云, Point Cloud),在对这么多的点数据进行曲面重构前,应对数据采集所得到的大量数据进行预处理。数据预处理一般包括数据平滑、数据清理、补齐遗失点、数据分割、数据对齐和零件对称基准的构建等。

数据平滑通常采用标准高斯、平均或中值滤波算法。高斯滤波能较好地保持原数据的外形;中值滤波用于消除数据毛刺。

数据清理是清除点云中的异常数据和冗余数据,但有时会造成有用数据的丢失,如实物中的尖角、棱线或圆率变化较大的区域。

数据分割是数据处理的一项重要内容。对含有自由曲面的复杂表面,整个表面往往不能用一个曲面完成构建,而是由多个曲面通过曲面编辑(如延伸、过渡、裁剪等)进行构建。数据分割是指根据组成复杂曲面的曲面片的类型,将点云数据合理地分割成同类曲面片的数据子集,使测量数据分类转变为造型数据,各子集分别进行曲面构建,最后通过曲面编辑形成一个整体。

数据对齐是指在数据采集时,由于测量仪器及被测实物结构的原因,有时需多次装夹才能完成实物的测量,这样便得到了多块数据。造型时需将各块数据进行归并,将所有数据转换到一个统一的坐标系中进而完成整个实物的造型。

对称基准是对称零件基本的几何特征,数据采集后,基准信息往往不能直接和准确地在零件上得到反映。因此,数据采集结束后,需要通过测量数据人工地对基准进行重建。

### 1.3.3 曲面重建

在科学计算可视化雕塑曲面造型和反求工程等领域,经常需要从一个离散点集出发,恢复点集所在的原有曲面,这就是曲面重构问题,曲面重构是建立CAD模型的基础和关键。

根据重构方法的不同,曲面重构分为基于点——样条的曲面重构法和基于测量点的曲面重构法。基于点——样条的曲面重构即为由测量所得的点拟合出曲线,再由这些曲线生成曲面。基于测量点的曲面重构通常采用曲面拟合的方法,曲面拟合包括曲面插值和曲面逼近。曲面插值是构造一个顺序通过一组有序的数据点集的曲面,适合

于测量设备精度高,数据点坐标比较精确的场合;曲面逼近是构造一个在满足精度要求的前提下最接近给定数据点集的曲面,用曲面逼近方法所生成的曲面不必通过所有的数据点,适用于测量数据较多,测量数据含噪声较高的情况。

曲面拟合常用隐式方程或参数方程来表示。

采用隐式方程表示的曲面一般是无界的,需要人为限定其范围。其优点在于对拟合曲面离散数据点的分布形式没有提出要求,进行求交运算时比较方便;主要缺点是不能用统一的方程表示所有类型的曲面。

参数化曲面(线)一般要求拟合区域的形状是较为规整的四边形,对于分割获得的任意 $N$ 边形区域需作进一步插值划分处理以获得若干较为规整的四边形。此外,参数化曲面(线)要求区域内数据点大体上呈矩形网格状的分布形式,因此对于区域内散乱分布的数据点,通常采用局部插值的方法来计算规则的网格数据。

曲面重构常用的曲面模型有 Bezier, B-spline, NURBS 和三角 Bezier 曲面。在参数化曲面重构中,根据源数据特征分:

- (1) 栅格数据重构——Bezier、B 样条、NURBS。
- (2) 散乱数据重构——三角 Bezier。

#### 1.3.4 模型重建

模型重建是指由测量点还原成实体。目前较为成熟的模型重建技术是通过构建曲面来实现模型重建。但通过曲面拟合所建立的表面模型中,常常会存在间隙、重叠等缺陷,因而不能满足实体模型对几何实体的拓扑要求。为了建立实体模型,需对拟合生成的曲面进行必要的处理编辑。

在模型重建的过程中,特别要注意特征技术的应用。特征不仅包含产品或零件的几何信息,而且包括非几何的功能信息、工艺信息及其他工程语义。因此在建立产品模型时,一个重要目标就是还原这些特征以及它们之间的约束,如果仅还原几何特征而未还原它们之间的几何约束所得到的产品模型是不准确的。

目前,对特征建模技术尤其是特征和约束的自动识别方法的研究已逐渐展开。这种建模方法认为孤立地拟合测量点形成曲面片的原型重建方法存在两个不足:一是没有准确还原几何特征,二是拟合过程没有考虑特征间的约束关系和模型的整体信息。由于不能表达零件对象更高层次的结构特征信息,对只要求提供零件的位置信息的下游应用,其数据模型描述是基本合适的,但涉及到产品改型、创新设计、CAPP/CAM 集成等,就存在编辑、修改和表达困难。基于特征的重建技术需要解决的是如何从离散的数据点识别和抽取原有的形状几何特征信息,现有的研究多集中在应用于数据分割的表面棱线、区域边界和规则表面(平面、柱面、等半径过渡曲面)的特征识别上<sup>[25]</sup>,对自由曲面的重建,只是从曲面拟合的角度研究了旋转、扫成、放样<sup>[26]</sup>等的曲面重建问题,目前尚无完整的特征建模方法。可以认为,在机械领域,基于特征及约束的三维模型重建技术是反求造型追求的目标和发展方向,目前研究尚处于起步阶段。

### 1.3.5 集成反求工程技术

重建实物的 CAD 模型的目之二就是为后续应用提供几何支持, 反向建模往往和其他先进制造技术相结合, 应用于产品设计和制造。图 1-3 给出了反求工程集成系统框架<sup>[27]</sup>。

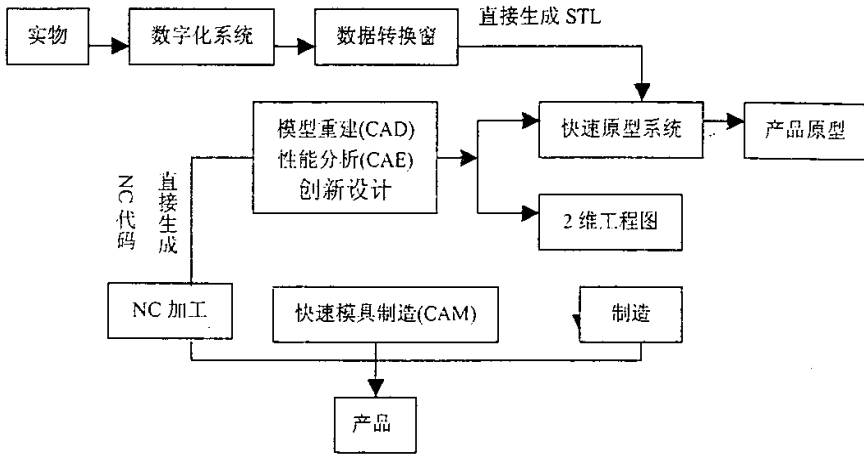


图 1-3 集成反求系统工程框架

Fig1-3 The Integration Reverse System Engineering Frame

实物数字化后, 根据需要可以不建立 CAD 模型, 直接转换为 NC 代码和 STL 文件。目前, 集成反求工程现存的问题不仅仅在于各计算机辅助子模块和系统能较好地独立完成各项工作, 很大程度上还取决于各个子模块和系统的计算机集成度。由于测试技术、CAD 系统以及加工制造手段多样性, 适应不同手段和技术的集成反求工程系统有以下关键技术问题需要解决:

(1) 集成反求工程系统框架构成, 各个分系统的接口技术研究。坐标测量机和 CAD 系统、快速原型系统以及数控加工系统接口, CAD 系统和快速原型系统以及数控加工系统接口等;

(2) 模型重建技术, 基于特征和约束的模型构建;

(3) 基于网络异地协同设计制造技术;

(4) 面向反求工程的计算机辅助测量技术, 包括测量规划、采样点选择、路径优化等。

### 1.3.6 反求软件

逆向工程中常采用通用的逆向工程软件、具体应用的逆向工程系统及一些 CAD/CAM 系统中集成的反求模块完成模型重建。

市场上比较常用的通用逆向工程软件主要有: 美国 Imageware 公司的 Surfacer、美国 PTC 公司 Pro/E 中的 Pro/Scan 及 PTC ICEM / Surf、法国 Matra 公司的 Strim 100、英国 DelCAM 公司的 CopyCAD、英国 Renishaw 公司的 Trace、美国 EDS 公司的 UG/PointCloud、以色列 Cimatron 公司的 Cimatron90/RE、英国 MDTV 公司的 Strim 和

Surface Reconstruction、美国 Raindrop 公司的 Geomagic Studio 等。

DelCAM 公司的 Copy CAD 软件采用三角化曲面造型法,具有强有力的曲面生成能力,可以接受多种坐标测量机的数字化数据,也可以进行多种数据格式的输出以进行其他后续处理。Cimatron 软件的 ReEnge 模块可以直接读入多种格式的测量数据,提供了多种可以用点云生成样条曲线、网格和 NURBS 曲面,最终生成 CAD 模型; ReEnge 模块和 Cimatron 软件的其他模块实现完全集成, ReEnge 模块所生成的三维曲线和曲面可以进行编辑,也可以对曲面进行数控加工。

具体应用的反向工程系统主要有: Evans 开发的针对机械零件识别的逆向工程系统; Dvorak 开发的仿制旧零件的逆向工程系统; H.H.Danz 的 CNC CMM 系统。这些系统对逆向设计中的实际问题进行处理,极大地方便了设计人员。CAD/CAM 系统中集成的反求模块主要有:UG 中的 PointCloud 功能、Pro/E 中的 ICEM Surf 和 Pro/Scan 模块、CATIA 的 RE2 模块等。

大多反求软件、系统或模块是针对测量数据点进行处理和曲面拟合,软件中的三角化功能大多是为 RPM 提供接口。针对任意复杂形状的三角网格模型来进行 CAD 模型重建的研究还很不够,技术也很不成熟,主要不足是,曲面拟合精度差,交互定义多,自动化程度低,接收和适用的点云数据范围小,多视图拼合问题无法自动处理等。Geomagic Studio 软件对此进行了较多的探索并取得了较好的结果。但总的来说,逆向工程软件仍然落后于硬件的发展。

在软件开发方面,国内研究起步较晚,除一些实验室的小型软件外,自主开发的商用软件仅有:西安交通大学的 JdRE 软件、浙江大学的反求工程 CAD 软件 RE-SOFT 和西北工业大学的实物测量造型系统 NPU-SRMS,以及上海交通大学、昆明理工大学、中科院沈阳自动化所所做的研究和开发的 CAD/CAM 软件支撑。

逆向工程的上游测试设备和下游应用(CAD/CAM/CAE)基本为国外产品,使得国产软件产品在设备接口、数据转换和应用上一直滞后于相关产品,开发的软件显得势单力薄,与国外软件相比处于竞争劣势。总体上逆向工程的应用研究仍滞后于理论研究,在许多方面仍有相当不足与缺憾,需要在此方向进行更多的研究与开发。

#### 1.4 本文的主要内容及研究重点

论文选自于江西昌河汽车股份有限公司的课题——汽车覆盖件逆向工程造型与模具设计。

文章在分析国内外反求工程领域研究现状的基础上,把反求工程 CAD 建模中三维表面重构作为研究重点,对曲面重构中各软件间的数据交换进行了深入研究。提出对汽车覆盖件等复杂的表面进行曲面重构时,先进行三角曲面造型,得到三角化模型,接着对三角化模型求截面线,将立体的三维数据转化成截平面上的二维数据,利用平面截面线一维变量自动识别与提取特征点、特征线,再实现四边域 NURBS 曲面造型

的曲面重构新观点。既简化了特征点、特征线的识别与提取的步骤，又实现了四边域 NURBS 曲面精确的模型重构。并以 THUNDER RACER 赛车模型的整车曲面造型为例，对零件截面测量数据线型提取、测量数据预处理、组合曲面的子曲面的边界提取和曲线建模、数据交换等关键技术进行了系统深入地研究，旨在建立组合曲面逆向工程建模的有效方法，从而为产品逆向设计的开展奠定工程实施基础；以某汽车部分车体的一块曲面的快速制造为例，介绍了如何在各个造型软件中实现数据的交换及互补，为快速制造的实现探索出一条简单有效的方法。本文研究的技术路线如图 1-4 所示。

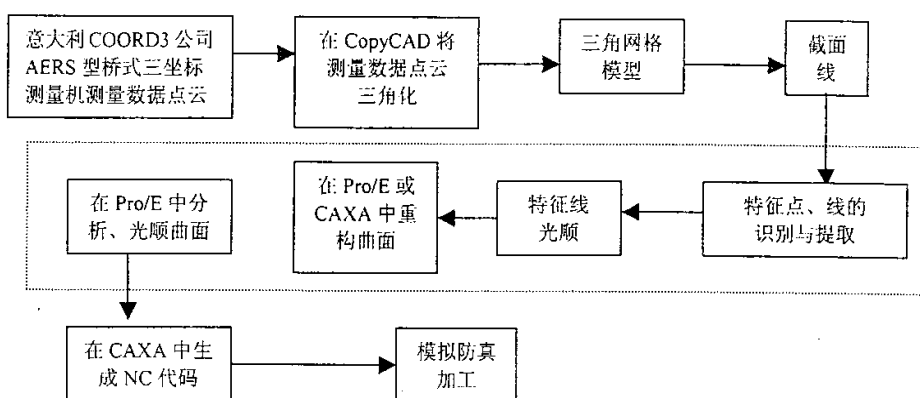


图 1-4 本文研究的技术路线

Fig1-4 The Studies Technical Route in This Article

由于逆向工程曲面重构是一个庞大的系统工程，因此，在对其进行深入研究时，不可能作到面面俱到，本论文重点分析了图 1-4 虚线所圈的部分，具体内容如下：

(1) 分析了国内外反求工程领域研究现状，阐述了论文的选题依据和主要研究内容。

(2) 研究了曲面造型理论、方法、曲面重构技术、曲面重构的算法，重点阐述了 B 样条和 NURBS 曲面、三角曲面等曲面造型方法。

(3) 提出了对汽车覆盖件等复杂表面进行曲面重构时，先进行三角曲面造型，得到三角化模型，接着对三角化模型求截面线，将立体的三维数据转化成截平面上的二维数据，利用平面截面线一维变量自动识别与提取特征点、特征线，再实现四边域 NURBS 曲面造型的曲面重构新观点。

(4) 结合汽车覆盖件的 NURBS 曲线重建实例，介绍了曲线模型的重建理论，突出 NURBS 曲线的数学形式及其特点、重建步骤及计算方法。这是后续曲面作复杂曲面重建的基础和理论依据。

(5) 研究了曲线和曲面的光顺及评价准则、方法在实际曲面重构中的指导意义。

(6) 以 THUNDER RACER 赛车模型的整车曲面重构为例，介绍了整车复杂外表面造型的技巧；以 CAXA 软件作为主导，分析了如何利用国产软件，实现逆向工程中的快速制造。

## 第二章 曲面造型基本理论及曲面重构技术

### 2.1 曲面造型基本理论及方法

曲面造型 (Surface Modeling) 是计算机辅助几何设计 (Computer Aided Geometric Design, CAGD) 和计算机图形学 (Computer Graphics) 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。它起源于汽车、飞机、船舶、叶轮等的外形放样工艺,

1963年美国 Boeing 飞机公司的 Ferguson 首先提出了将曲线表示为参数的矢函数方法, 引入参数三次曲线, 构造出组合曲线和由四个角点的位置矢量及两个方向的切矢量定义的 Ferguson 双三次曲面片。之后, 参数形式的曲线曲面就迅速成为设计中进行形状数学描述的标准形式。1964 到 1967 年之间, 美国麻省理工学院的 Coons 提出四边域 Coons 曲面模型, 解决了一般性的四边域曲面描述问题。但 Coons 曲面描述时由给定需要给定四条边界曲线及其切矢、扭矢条件混合等完整信息, 给实际应用带来困难, 同时, 在曲面的光滑拼接中, Coons 曲面插值方法难以保证曲面片间在角点处的扭矢协调。为了解决上述问题, Deboor, Coons, Ferguson 等人对 Coons 曲面模型进行了简化, 提出了 Ferguson 曲面模型。Gordon, Gregory 等人则通过引入有理项, 提出了 Gregory 曲面模型, 解决了角点扭矢协调问题。1971 年, 法国 Renault 汽车公司的 Bezier 提出了一种由控制多边形或网格顶点定义曲线、曲面的方法。设计人员只要移动控制顶点就可以方便的修改曲线、曲面的形状, 而且形状的变化完全在预料之中。1973 年, R.E.Barhill, G.Birkhoff 和 Gordon 将 Gregory 曲面推广到三角域上, Gregory 于 1986 年进一步提出了  $N$  边曲面的数学模型, 为不规则域的曲面造型奠定了基础。上述曲面造型方法具有一个共同特点: 一旦边界信息确定, 曲面的形状也随之而定, 缺乏对曲面形状进行调节控制与动态修改能力, 难以满足交换设计的要求, 给实际应用带来不便。

后来, A.R.Forrest, W.I.Gordon 等人相继发现了 Bezier 基函数和 Bernstein 基函数的内在联系, 从而使 Bezier 造型方法有了坚实的数学理论基础。1972 年至 1976 年间, Resenfeld, Gordon, Forrest 等人拓展了 Bezier 方法, 用 B 样条基函数代替 Bernstein 基函数, 提出了 B 样条曲线和曲面。1974 年, Versprille 发表的博士学位论文中首次提出了有理 B 样条方法, 解决了二次曲线、曲面的样条表示问题。随着应用数学和 CAD/CAM 技术的发展, 在 Schoenberg, Mansfield, de.Boor 和 Cox 奠定和完善了 B 样条的基础理论。七十年代中期, W.Gordon 和 R.Riesenfeld 将 B 样条理论引入曲线曲面设计系统, Bezier 曲线曲面被看作 B 样条曲线曲面的一种特例, 而 B 样条方法比 Bezie 方法更具一般性, 即任何分段光滑多项式曲线曲面均可用 B 样条曲线曲

面表示。其后,为了统一平面、二次曲面及其它曲面的表达,人们从数学及工程应用角度,对 Bezier 和 B 样条方法的有理形式作了深入的研究。

目前,曲面造型现在已形成了以有理 B 样条曲面(Rational B-spline Surface)参数化特征设计和隐式代数曲面(Implicit Algebraic Surface)表示这两类方法为主体,以插值(Interpolation)、逼近(Approximation)这二种手段为骨架的几何理论体系。

作为当今曲面造型的两大主要方法的 B 样条、Bezier 曲线曲面,共同特点在于都是用控制多边形、多面形逼近被表示的曲线、曲面,其逼近程度与多项式的次数有关。Bezier 曲面则有装配灵活、适应性强的优点,且其曲面的角点通过控制多边形的角点,广泛应用于离散点数据曲面插值。B 样条基函数具有计算稳定、快速的特点,同时 B 样条曲线曲面具有局部可修改性和强的凸包性,故 B 样条方法具有较强的几何造型能力。八十年代后期, NURBS 方法成为曲线曲面造型方法中最为流行的技术。非有理与有理 Bezier 曲线曲面形式和有理的 B 样条曲线曲面形式都被统一在 NURBS 形式之中。从此, NURBS 逐渐成为工业界标准。

## 2.2 曲面重构技术

离散数据的曲面重构方法对于复杂曲面的测量、造型具有十分重要的意义。对于散乱数据的曲面造型问题,是离散数据曲面造型的难点。

根据离散点分布类型,曲面造型方法可分为两类:四边曲面和三角曲面造型方法。目前,两种造型方法相互独立,平行发展。当数据点在曲面的横、纵方向等数目分布时,数据点间存在规则的四边拓扑关系,四边曲面造型方法可以有效地解决这类数据点曲面重建问题,目前商品化的 CAD/CAM 系统普遍采用了四边曲面的造型方法。在工程中应用广泛的四边参数曲面是 B 样条曲面和 NURBS 曲面,许多高级曲面功能,如裁剪、过渡、延伸、拼合、修改等都是针对样条曲面。

三角域的 Bezier 曲面插值的研究是非规则边界参数曲面拟合的研究中的备受关注的要点,从形式上看,三角曲面更具有一般性,其它曲面都可以退化为三角曲面来表达,但在实际应用中,存在各种曲面形式,若仅从曲面的表达形式的统一性出发,将曲面统一退化为三角曲面,难以满足实际应用的需要。将两种曲面造型方法有机结合在一起,是解决任意离散点数据分布曲面造型的有效途径。

### 2.2.1 B 样条曲面和 NURBS 曲面

B 样条曲面和 NURBS 曲面均是基于矩形参数域的张量积曲面。

在逆向工程中,型值点数据具有大规模、散乱的特点,其 B 样条曲面的拟合有自身的特点。在 B 样条曲面拟合中,研究的首要问题是单一矩形域内曲面的散乱数据点的曲面拟合问题。在众多的研究中,Wei Yin Ma & J P Kruth 的工作较具有代表性。他们首先根据边界构造一初始曲面,然后将型值点投影到这个初始曲面上,接着根据

投影位置算出其参数分布,从而解决散乱数据的参数分配问题。

根据这一型值点的参数分配,拟合出一张新的 B 样条曲面,然后,再对型值点参数进行优化,使得所拟合的曲面与给定型值点误差最小。

在实际的产品中,只由一张曲面构成的情况不多,产品型面往往由多张曲面混合而成(如过渡、相交、裁剪等),因而,只用一张曲面去重构其数学模型是很难保证其模型的精度的。于是,人们采用不同的方法来处理数据的分块问题。

对于图像形数据(具有行 X 列)特点的数据,B Sarkar&C-H Menq 运用图像处理的原理,获取曲面的特征线,然后根据这些曲线将曲面划分为不同的块,每块用 B 样条曲面拟合,最终将所有块拼接成一体。Tamas Varady 等提出一种四叉树方法。首先构造一张整体的曲面,若不能满足要求,则将其一分为四,再对每一小块进行处理,直到所有小块均满足要求为止。另一种方法则是基于曲线网格,首先估算各型值点的局部性质,找出特征线(如尖角、C1 连续、及对称线等),将特征线拟合成曲线网格,对每一个网孔构造一张曲面,使网孔内部的点对其对应曲面具有最佳的逼近性,最终将所有曲面上构造拓扑矩形网格。交互定义特征线,利用此矩形网格数据构造曲面。1996 年,他们又提出另外一种称为 Orthogonal Cross Section (OCS)的方法,首先对每块测量数据进行数据三角剖分,得到几张插值于测量点的基于三角平面的曲面模型,然后用三组正交的等间隔的平行平面与上述曲面求交,在各个截面线内去除各曲面内的重叠部分,求出各交线的交点即得所谓 OCS 模型。然后利用根据曲面网格建立曲面的方法构造曲面。

在以 B 样条曲面为基础的曲面构造中,能够构造出作为标准的 B 样条曲面,并且其最终的曲面表达形式也较为简洁,但是, B 样条曲面在构建中存在以下不足:

- (1) 由于建立在两次优化计算基础上的曲面构造对曲面的光顺性难以保证、计算量大;
- (2) 曲线网格的建立、分块等很难自动完成,需要较强的交互参与;
- (3) 曲面构造精度难以控制,在所介绍的算法中,往往是若不能满足要求,则必须从头开始重算;
- (4) 除 OCS 模型外,不能处理多视的拟合问题。

NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline 非均匀有理 B 样条)方法,是非有理 B 样条方法在三维空间的直接推广,它能把有理和非有理 Bezier 曲线和 B 样条曲线曲面及圆锥曲线和初等解析曲面统一在一种表示之中。在 Pigel 和 Tiller 等学者努力下,80 年代后期逐步形成了一整套丰富的 NURBS 曲面造型理论。因其可以精确地表示二次规则曲线曲面,能用统一的数学形式表示规则曲面与自由曲面;具有可影响曲线曲面形状的权因子,易于控制和实现曲面造型,国际标准化组织 (ISO) 于 1991 年在颁布关于产品数据交换的 STEP 国际标准时,将 NURBS 方法作为定义工业产品几何



形状的唯一数学描述方法。自此 NURBS 方法成为了目前通用的 CAD 系统中曲面的标准表示形式。

NURBS 曲面重构的难点有:

- (1) 权值、节点、参数和控制点值的确定。
- (2) 先后顺序和约束准则的确定, 往往不明确。
- (3) 由于有理式存在, 需寻求求解方程的方法 CAD 模型重建是反求工程的关键, 目前比较成熟的方法是通过重构外形曲面来实现实物重构。

### 2.2.2 三角曲面重构

逆向工程中, 三角曲面因其构造灵活、边界适应性好的特点, 一直受到重视。三角曲面最初是由 de Castel jau 于 50 年代末提出的, 但其成果直至 1975 年才被 Boehm 发现, 此后, 国内外学者对其进行了大量的研究。三角曲面重构的一般过程是(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, 构造初始三角曲面。(3)构造整体  $G^1$  连续的散乱数据插值曲面。1994 年, Xin Chen & Francis Schmitt 在研究图像数据的曲面重建时, 首先, 利用型值点估算出曲面的局部几何性质, 得到曲面的特征线, 以这些特征为基础建立初始的三角网格, 三角划分中, 未用到的点都当作冗余数据。其次, 通过三角 Bezier 曲面的构造得到一张光滑的曲面。1995 年, Hyungjun Pa K&Kwanqsooking 提出了一种自适应的光滑曲面逼近大规模散乱点的方法, 他们用分段三次 Bezier 三角代数曲面作为最终输出结果, 而使各三角曲面片之间达到跨边界  $C^1$  连续。该方法从插值于产品的边界曲线开始, 不断插入最大误差点来精化逼近曲面, 直到所有测点都在规定的误差内, 若逼近的允许误差为 0, 则曲面插值于所有数据点。但是这一方法中采用非参数的形式, 逼近结果受到坐标系的影响, 并且只能适应单值曲面。H Hoppe 通过研究大量散乱测量数据的曲面重构问题, 他得出的方法概括起来分为三个步骤:

(1) 初始曲面估计: 利用函数方法构造一张插值于测点的曲面, 接着, 估算测点到此曲面的距离, 最后, 采用一种轮廓线抽取算法来提取曲面。

(2) 网格优化: 该步骤主要目的在于减少三角形数目, 提高曲面的逼近精度。

(3) 分段光滑曲面片: 通过一种分段细分的方法来将曲面的尖角特征构造出来, 提高曲面的逼近精度。

在逆向工程中曲面重构主要采用四边曲面(B样条和NURBS曲面等)和三角曲面技术, 两种重构方法相互独立, 并行发展。其中三角域的 Bezier 曲面插值的研究是非规则边界参数曲面拟合的研究中的备受关注的要点。在工程中应用广泛的参数曲面是 B 样条曲面和 NURBS 曲面, 许多高级曲面功能, 如裁剪、过渡、延伸、拼合、修改等都是针对样条曲面。

### 2.3 曲面重构的算法<sup>[28,29]</sup>

逆向工程的目标就是建立能够被 CAD 系统接收的曲面模型以便于后续数据处理,因此曲面重构算法一直是逆向工程领域国内外学者研究的重点。而 B 样条以其计算稳定、快速、几何直观性强以及具有保凸性,并且易于实现分割、升阶、插入和删除节点等操作得到广泛应用,关于 B 样条已经建立了一整套有效而实用的算法。

按点集的组织方式,输入点集可分为高度点元数据、截面线元数据和散乱点元数据三种。在理论上,前两种数据可以看成是第三种数据的特例。在实践中,除了工业 CT 法之外,多数测量或实验方法,尤其是点集所属的基础场曲面具有比较复杂的拓扑结构和几何形状时,给出多方向的高度点元数据或无结构的散乱数据,即散乱点集。因此,基于散乱点集的曲面重建问题,无论在理论上还是在实践中都更具普遍性。解决散乱点集的曲面重建问题一般需要拓扑重建、网格简化与几何重建三个步骤。

按原曲面的拓扑类型是否已知,拓扑重建问题可分为任意拓扑与既定拓扑两类。重建任意拓扑曲面,尤其是重建有边界的任意拓扑曲面的方法是很少的。其中,美国华盛顿大学计算机系 Hoppe 等人对这一问题进行了开创性的研究。Hoppe 等人首先给出了一个刻画点集密度的方法,引入了  $r$  密度样本的定义,提出了一个基于等值面抽取的隐式曲面重建算法。加拿大多伦多大学 Guo 等人提出了一个基于  $a$ -shape 壳抽取的算法。美国犹他州 Amenta 等学者提出了一个基于 Voronoi 邻域特性的重建算法,王青等人提出了一个基于局部构造的快速增量算法。较有特色的处理散乱点的曲面重建的方法还有 RuPrecht G 和 Witkin<sup>[30]</sup> 提出的变形曲面的方法,变形通过模拟一定外力作用来定义,但物理属性和外力大小较难给定的,而且变形方法一般要事先给定物体的拓扑结构,如球形拓扑、盘形拓扑等。虽然有不少研究,但还没有达到实用的地步。其他还有将神经网络的学习机制用于自由曲面重建的,但目前仅限于较为简单的应用。

目前,逆向工程曲面重构算法根据构造曲面的边数主要分为两类:三边域曲面重构方法和四边域参数曲面重构方法。三边域曲面构造以三角 Bezier 曲面为理论基础<sup>[31]</sup>,该方法适合于表现无规则复杂型面的物体,如人体外形、地貌等自然物体。其基本方法是:首先将待处理的原始测量数据进行三角剖分构造三角网格,然后运用三角 Bezier 曲面在网格基础上构造  $G^1$  连续的三角曲面。这种方法的主要缺点是三边曲面在常用的 CAD/CAM 软件中不被采用,并且三角曲面不能反映零件的高层次几何特征,在光顺性和可编辑方面都不太理想。与三边域曲面相比,基于测量数据的四边域参数曲面是一种更为精确的模型表示方式<sup>[32-35]</sup>。所有的四边域参数曲面,包括 Bezier 曲面、B 样条曲面和 NURBS 曲面,都是将参数  $(u,w)$  的矩形域映射到三维空间中的一个具有矩形边界的曲面。虽然四边域参数曲面的形式和原理比较简单,但是要由测量点云自动拟合曲面却很困难。在文献<sup>[36]</sup>中详细的论述了这个问题,并指出:在 NURBS 曲面重构中,由于缺乏对曲面的特征识别,直接影响了重构模型的保形性

或微分性质。

存在的主要问题:

(1) 由型值点反求控制点。Opengl 提供的算法是由已知控制点求曲线, 然而计算出的曲线并不经过控制点。而我们实际工作中往往需要曲线经过一组点(即型值点)。

(2) 搜索特征区域。物体表面中存在圆率变化剧烈的特征, 将代表这些特征的带状点集搜索出来是很耗时的问题。

(3) 求特征曲线。在实际物体上, 总有一些表征它的主要特征的边界曲线。怎样由散乱的海量数据自动求得特征曲线是一个很复杂的问题。

(4) 曲面重构。由于用高阶 Bezier 曲面逼近复杂形状的曲面片是十分困难或不太可能的。因此, 在实际应用当中, 人们一般采用将复杂的曲面分割成许多子曲面片, 然后用低阶的 Bezier 曲面去逼近每一子曲面片, 以获得对复杂曲面的逼近。曲面片间的光滑拼接是一个难点。

综合考虑以上因素, 本论文在第六章中, 对 TUUNDER RACER 赛车及车的一内饰件复杂的表面进行曲面重构时, 尝试先利用英国 DelCAM 公司的 CopyCAD 软件进行三角曲面造型, 得到三角化模型, 接着对此三角化模型进行求截面线, 将立体的三维数据转化成一个个截平面上的二维变化的数据, 利用平面截面线一维变量自动识别与提取特征点、特征线, 从而实现四边域 NURBS 曲面造型。实践证明, 这种曲面重构的思路既完成了特征点、特征线的自动识别与提取, 又实现了四边域 NURBS 精确的模型重构。

### 第三章 曲线模型的重建理论<sup>[31]</sup>

#### 3.1 NURBS 曲线数学形式及其性质

非均匀有理 B 样条 (NURBS), 既可用于表示解析几何形状 (如圆锥曲线), 也可用于表示自由曲线和曲面。它已经成为当前 CAD/CAM 系统中曲线和曲面表示的标准。NURBS 曲线为一段的矢值有理多项式函数, 其表达式为:

$$p(u) = \frac{\sum_{i=0}^n B_{ik}(u)W_iV_i}{\sum_{i=0}^n B_{ik}(u)W_i} \quad (3-1)$$

式中,  $V_i$  为控制顶点,  $W_i$  为权因子,  $B_{ik}(u)$  为  $k$  次 B 样条基函数。

基函数由递推公式定义:

$$\begin{cases} B_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ B_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} B_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} B_{i+1,k-1}(u), k \geq 1 \end{cases} \quad (3-2)$$

式中,  $k$  为幂次;  $u_i$  ( $i=0,1,\dots,m$ ) 为节点, 由其形成节点矢量  $U$ :

$$U = [u_0, u_1, u_2, \dots, u_m]$$

当节点数为  $(m+1)$ , 幂次为  $k$ , 控制顶点数为  $((n+1))$  时,  $m$ ,  $k$  和  $n$  三者之间的关系  $m=n+k+1$ 。对于非周期的 B 样条, 节点矢量为:

$$\left[ \underbrace{0, 0, \dots, 0}_{k+1}, u_{k+1}, \dots, u_{m-k-1}, \underbrace{1, 1, \dots, 1}_{k+1} \right] \quad (3-3)$$

节点矢量两端各有  $k+1$  个相同的节点, 使曲线通过控制多边形首、末端点并且与首、末两边相切。NURBS 曲线的节点矢量采用 Riesenfeld 的算法确定, 即节点的分布与各 B 样条曲线段的长度直接相关, 计算上则以对应于 B 样条曲线段的多边形边长作为节点区间值。但当型值点间的距离变化比较均匀时, 可用均匀 B 样条曲线插值, 当变化很不均匀时, 用 NURBS 曲线插值可得较满意的结果。关于“均匀”和“非均匀”的标准, 可以用比值  $1/3 \sim 3$  为界。若相邻型值点的间距之比不超过  $1/3 \sim 3$ , 可用三次均匀 B 样条曲线插值; 否则, 以应用三次 NURBS 曲线插值为好。

### 3.2 NURBS 曲线的性质及特点

NURBS 方法在 CAD/CAM 与计算机图形学领域获得越来越广泛的应用,这是因为它具有下述的性质及优点:

#### (1) NURBS 曲线的性质

- 1) 线性变换不变性;
- 2) 无内重节点, 则  $k$  次 NURBS 曲线是可  $k-1$  阶可微的;
- 3) 对控制顶点网络的逼近具有局部性;
- 4) NURBS 曲线曲面包含在控制顶点所形成的凸包内;
- 5) NURBS 曲线具有变差减小的性质。

#### (2) NURBS 曲线的优点

1) 既为标准解析形状曲线、曲面, 如圆锥曲线、二次曲面、旋转曲面等, 也为自由型曲线、曲面的精确表示与设计提供了一个公共的数学表达式。因此, 一个统一的数据库就能存储这两类形状信息。

2) 由于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。权因子的引入成为几何连续样条曲线曲面中形状参数的替代物。

3) 计算稳定且速度相当地快。

4) NURBS 有明显的几何解释, 使得它对有良好的几何知识尤其是画法几何知识的设计者特别有用。

5) NURBS 有强有力的几何配套技术(包括插入节点、细分、消去、升阶、分裂等), 能用于设计、分析与处理等各个环节。

6) NURBS 在比例、旋转、平移、剪切以及平行与透视投影变换下是不变的。

7) NURBS 是非有理 B 样条形式以及有理与非有理贝齐尔形式的合适的推广。

#### (3) NURBS 曲线的缺点

1) 需要额外的存储以定义传统的曲线曲面。例如, 为用一个外切正方形作为控制多边形定义一个整圆, 至少需要 7 个控制顶点和 10 个节点。而传统的表示只要求给出圆心、半径和垂直于所在平面的法矢。这意味着, 在三维空间, 用 NURBS 方法定义一个整圆要求 38 个数据, 而传统方法只要求 7 个数据:

2) 权因子的不合适应用可能导致很坏的参数化, 甚至毁掉随后的曲面结构;

3) 某些基本算法例如反求曲线曲面上点的参数值, 存在数值稳定性问题, 如曲面与曲面求交, 尤其是刚好接触的情况, 甚至不如一些传统形式算法。

然而这些问题并非 NURBS 所特有, 除第二条外, 其它自由型方法如非有理贝齐尔、B 样条以及孔斯和戈登的那些方案也存在同样的问题。

### 3.3 NURBS 曲线重建步骤

NURBS 曲线的插值可以表述为:根据给定的型值点  $P_i$  及其权因子  $h_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, n$ ), 计算符合该条件的  $k-1$  阶连续的  $k$  次 NURBS 曲线, 其控制顶点和权因子分别为  $W_j$  和  $V_j$  ( $j=0, 1, \dots, m$ )。为此, 我们可先在四维空间插值型值点  $[h_i, P_i, h_i]$ , 再将在四维空间求得的控制顶点  $[W_j, V_j, W_j]$  向三维空间映射, 最后得到三维空间内 NURBS 曲线的控制顶点  $V_j = \frac{W_j V_j}{W_j}$  及其权因子  $W_j$  ( $j=0, 1, \dots, m$ ), 其计算步骤如下:

(1) 节点矢量的选择会影响曲线的几何形态, 而后者是三维空间内考虑的问题, 故可用三维坐标下的累加弦长确定节点矢量。以三次 NURBS 曲线的节点矢量为例, 其节点矢量为:

$$U = [u_0 = u_1 = u_2 = u_3 = 0, l_1 + l_2 / L, \dots, \sum_{i=1}^{n-2} l_i / L, u_{n+2} = u_{n+3} = u_{n+4} = u_{n+5} = 1] \quad (3-4)$$

式中  $l_i$  为个节点区间的长度,  $L = \sum_{i=1}^n l_i$ , 即边长的总和, 如图 3-1 所示。

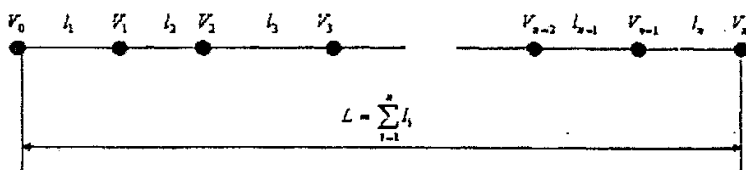


图 3-1 三次 NURBS 曲线基函数的节点矢量

Fig3-1 Three NURBS Curve Primary Function Pitch Point Vector

(2) 建立方程组

NURBS 曲线插值的方程组为:

$$\sum_{j=0}^{n+1} B_{j,k}(u_{i+2}) W_j V_j = h_i P_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3-5)$$

式中的方程个数为  $n$  个, 而未知数为  $n+2$  个, 故需要补充两个方程, 补充方程可根据给定的边界切矢求得。

(3) 构造补充方程

插值计算所需的边界条件是四维空间内的切矢, 利用三维和四维空间的对应关系:

$$\begin{cases} (W(0)P(0))' = W(0)P'(0) + W'(0)P(0) \\ (W(1)P(1))' = W(1)P'(1) + W'(1)P(1) \end{cases} \quad (3-6)$$

式中  $P(0)=V_0, P(1)=V_n, W(0)=h_1, W(1)=h_n$ ;  $P'(0)$ 和  $P'(1)$ 分别为用户给定的首、

末切矢,  $W'(0)$ 和  $W'(1)$ 则可由数值微分方法求得。

(4) 求解方程组

式(3-5)、式(3-6)构成了求解四维空间控制顶点的方程组, 其系数矩阵呈带状, 带宽不大于 3, 故利用追赶法可以就其解, 四维空间的控制顶点除以该顶点的权因子, 即可得到三维空间内的控制顶点的坐标。一般情况下设计自由曲线曲面时, 权因子常取为 1。当组合曲线中含有解析曲线(如圆锥曲线)时, 则需处理权因子不为 1 的情况。

### 3.4 NURBS 曲线计算方法

根据上述 NURBS 曲线重构的步骤, 我们通过如下计算方法来完成三次 NURBS 曲线的重构, 由于我们线型提取时阈值的设定一般不大于 3.0, 因此三次 NURBS 曲线可以用三次均匀 B 样条曲线来表示。

三次均匀 B 样条曲线段的矩阵表示为:

$$P_i(u) = 1/6 \begin{bmatrix} u^3 & u^2 & u & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

$$P_i(u) = \sum_{j=0}^3 B_{j,3}(u) V_{i+j} \quad (3-8)$$

式中  $u$  为参数,  $u \in [0,1]$ ,  $V_{i+j}$ , 为特征多边形的顶点;  $B_{j,3}(u)$ ,  $j = 0,1,2,3$  为三次 B 样条基函数, 其表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} B_{0,3}(u) = 1/6(1-u^3) \\ B_{1,3}(u) = 1/6(3u^3-6u^2+4) \\ B_{2,3}(u) = 1/6(-3u^3+3u^2+3u+1) \\ B_{3,3}(u) = 1/6u^3 \end{array} \right\} \quad (3-9)$$

则各曲线段的首点为:

$$P_i = P_i(0) = 1/6(4V_{i-1} + V_{i,2}), i = 1,2,\dots,n-1 \quad (3-10)$$

最后一段曲线的末点为:

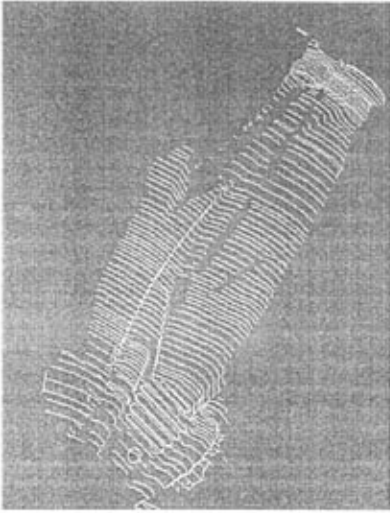
$$P_n = V_{n+2} \quad (3-11)$$

预求顶点数为  $n+2$ , 而方程数为  $n$ 。因此, 我们利用节点矢量两端为四重节点且给定曲线两端端点条件时的计算方法。

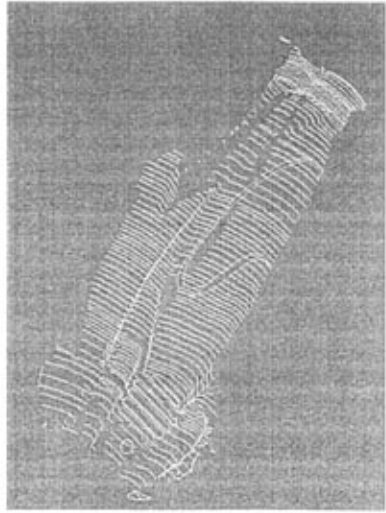
由附表 A 可知, 应用重节点后, 由于基函数的变化, 致使各段 B 样条基函数也







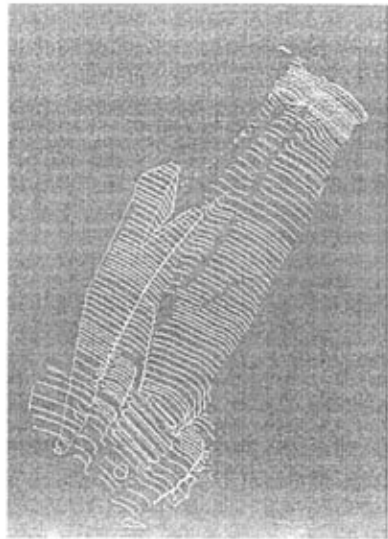
(a) THUNDER RACER 赛车车身



(b) NURBS 曲线重建



(c) THUNDER RACER 赛车左翼



(d) NURBS 曲线重建

图 3-2 NURBS 曲线重建实例

Fig3-2 NURBS Curve Reconstruction Example

## 第四章 特征点和线的识别及提取技术

几何特征是几何造型的关键要素，它对控制几何形体的形状具有极为重要的作用。一般复杂曲面均为多个子曲面拼接而成的组合曲面，当对组合曲面进行逆向设计时，准确提取各子曲面片的边界曲线是组合曲面逆向设计的基础。基于边界的位置，测量点可分为不同的区域，从而可以对每个曲面片进行重构，进而拼接成 CAD 模型。一般的做法是对复杂曲面进行分区测量建模，但由于被测物体的多样性，特征线和区域划分要依赖于测量者的经验，难以准确把握。另外，在数据采集集中，以截面为单位密集布置测量点，也缺乏对几何特征的自动识别，不能准确地反映几何形体的特征。因此，在曲面模型重建前，识别和提取出组合曲所包含的各个子曲面边界信息，根据子曲面的边界信息对组合曲面进行分区处，对于提高曲面模型精度、曲面外观质量均有重要意义。

目前，对物体表面测量数据进行分割、提取曲面特征的方法可以分为两类，一类是基于区域分割法，一类是基于边界分割法。

基于区域的分割法是将具有相似几何特征的空间点划为同一区域，由于这种方法分割依据具有明确的几何意义，因此是目前较为常用的分割方法。根据其分割过程的不同分从下至上、从上至下两种。

从下至上的区域分割方法以若干个简单表面片作为种子区域，根据表面片的微分几何性质来判断其周围的数据点是否属该表面片，将与之有相似几何性质的点划入该种子区域，并更新与种子区域对应的表面片的类型，当在该表面片周围没有几何性质一致的时候，种子区域停止生长。这种分割方法的优点在于分割结果的可靠性高，分割结束后各个区域之间的关系也随之确定。

从上至下的区域分割方法首先假设所有的数据点属于同一个表面区域，然后根据提出性能指标做统计分析，进行假设检验，若假设成立，则分割结束；否则，将数据点集进行划分，并对各个子集重新作假设检验，如此划分直至各个区域满足性能指标。

基于边界的分割法首先估计出测量点的法向矢量或圆率，然后将法向矢量或圆率的突变处判定为边界的位置，并经边界跟踪等处理方法形成封闭的边界，将各边界所围区域作为最终的分割结果。

### 4.1 特征点、特征曲线与特征曲面

在 CAD 模型中，各曲面片一般由连续的曲面函数表达，如二次曲面、B 样条曲面、NURBS 曲面等。而在曲面片的公共边界处，按照不同的要求分别达到零阶、一阶或二阶连续。所以，在曲面片公共边界处的二阶连续。所以，在曲面片公共边界处的数据点一般具有特定的圆率性质。在逆向工程中，这些数据点被定义为特征点。由于点

特征主要是隐特征，很难直接从测量数据点中识别出来。在实际造型过程中，一般是根据拟合曲线的圆率及其变化来确定特征点。我们定义  $D^i$  特征点表示测量数据中具有  $C_{i-1}$  连续性但不具有  $C_i$  连续性的数据点。根据曲线或者其它测量数据的连续性质，特征点可以分为：跳跃点 ( $D^0$  特征点)、尖点 ( $D^1$  特征点)、折痕点 ( $D^2$  特征点)、以及圆率极大值点，如图 3-1 所示。其中，离散曲线的  $C_k$  几何连续性的定义为：在离散点处，曲线的  $k$  阶导数的跃度小于某给定的小正数  $\epsilon$ ，即：

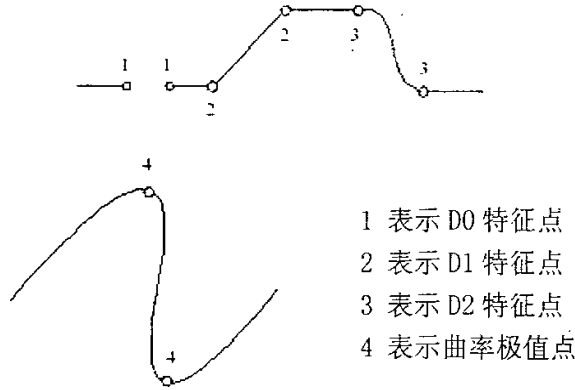


图 4-1 特征点的分类

Fig4-1 Characteristic Point Classification

$\|r^{(i)}(t^-) - r^{(i)}(t^+)\| < \epsilon(i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, k$ ；相反，离散曲线的  $C_k$  不连续为曲线的  $k$  阶导数的跃度大于某给定的正数  $M$ ，即： $\|r^{(k)}(t^-) - r^{(k)}(t^+)\| > M$ 。

所谓特征线就是指具有相同的圆率特征的点连接而成的线，同一点不可能同时属于两个不同的特征，所以特征线不能相交。线特征主要是两类：边界轮廓线和表面棱线，目前已提出多种特征线识别方法，较为成熟的是通过表面曲面的圆率变化来进行特征识别，我们在造型过程中也采取这种方法，其基本思想是根据拟合曲线的圆率及其变化来确定特征点，连接特征点即得到特征线。特征线构造的过程为：首先是对不同类型的特征点做相应标志，然后连接同类型的特征点，最后由特征线段组成完整的特征线。

特征曲面的提取能够在数据分割的同时完成局部曲面模型的构造，因此对于特征曲面的分类，不仅影响了数据分割的准确性，更重要的是决定了零件模型描述的准确性。在逆向工程应用领域，很多学者对曲面模型进行了研究。Besl 和 Jain<sup>[37]</sup>单纯从数据分割角度出发，根据曲面高斯圆率和平均圆率的取值，将曲面分为八种类型如图 4-2 所示。同样，Vemuri<sup>[38]</sup>也根据曲面高斯圆率和平均圆率的取值，将曲面分为抛物面(parabolic)、脐面(umbilic)、双曲面(hyperbolic)、平面(planar)和椭圆面(elliptic)等五种类型。以上两种曲面分类方法都是为了便于测量数据分割和曲面重构，

而未考虑重构模型的特征信息。

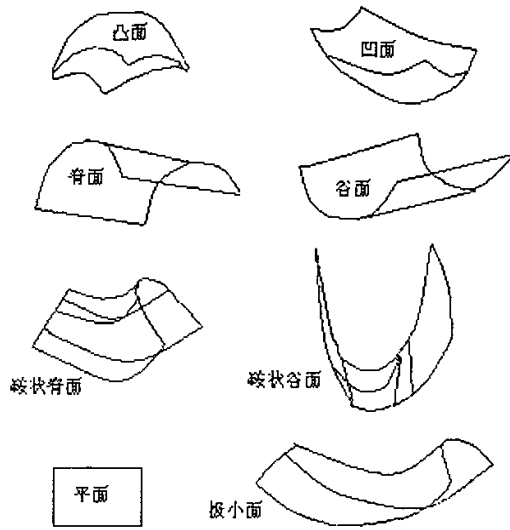


图 4-2 根据圆率的基本曲面分类

Fig4-2 According to Circle Rate Fundamental Surface Classification

## 4.2 曲面局部性质的基本理论<sup>[39][40][41][42][43]</sup>

### 4.2.1 曲面主圆率计算的基本原理

计算曲面的主圆率，首先要计算曲面的第一基本量和第二基本量。曲面的第一、第二基本量决定了曲面的内在性质，下面讨论曲面论中关于曲面圆率计算的基本知识。

#### 4.2.1.1 曲面的第一基本公式

设有参数曲面片  $S: r = r(u, v), (u, v) \in D$ ，另

$$E(u, v) = r_u^2, F(u, v) = r_u \cdot r_v, G(u, v) = r_v^2 \quad (4-1)$$

则：

$$I = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2 \quad (4-2)$$

式(3-1)为曲面的第一基本量，式(3-2)为曲面的第一基本公式。曲面的第一基本公式在参数变换  $u = u(\bar{u}, \bar{v}), v = v(\bar{u}, \bar{v})$  下是不变的，曲面的第一基本公式确定了曲面的内在性质。

#### 4.2.1.2 曲面的第二基本公式

曲面的第二基本式确定曲面与其外围空间的性质，为了研究曲面上一点临近的弯

曲状况，需要考虑曲面离开该点邻近的点到其切平面的有向距离。

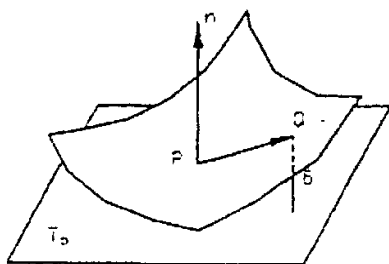


图 4-3 邻近点到切平面的距离示意图

Fig4-3 The Distance Schematic Drawing of the Neighbouring Point to Cuts the Plane

如图 4-3 所示，设点  $P(u, v)$  的切平面为  $T_p$ ，单位法向量为：

$$n = \frac{r_u \times r_v}{\sqrt{EG - F^2}} \quad (4-3)$$

$$\text{令 } L(u, v) = r_{uu}|_{u,v} \cdot n, M(u, v) = r_{uv}|_{u,v} \cdot n, N(u, v) = r_{vv}|_{u,v} \cdot n, \quad (4-4)$$

$$\text{则: } II = Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2 \quad (4-5)$$

$II$  表示  $r(u, v)$  附近点  $r(u + \Delta u, v + \Delta v)$  到点  $r(u, v)$  的有向距离的主要部分，它反映了曲面在  $r(u, v)$  处的弯曲程度。它与曲面上保持定向的容许参数变换是无关的。由于  $r_{u,n} = r_{v,n} = 0$ ，故  $L, M, N$  还能表示为：

$$L(u, v) = -r_{uu}|_{u,v} \cdot n, M(u, v) = -r_{uv}|_{u,v} \cdot n, N(u, v) = -r_{vv}|_{u,v} \cdot n, \quad (4-6)$$

式(4-4)为曲面的第二基本量，(3-5)为曲面的第二基本式。曲面的第一、第二基本形式  $I, II$  与曲面的保持定向不变的参数变换是无关的，与  $E^3$  中直角坐标变换是无关的。总之， $I, II$  是曲面的两个不变式，也就是说，若曲面  $S_1, S_2$  在对应点有相同的第一类基本形式和第二类基本形式，则曲面  $S_1$  和  $S_2$  在  $E^3$  的一个刚体运动下是彼此重合的。

#### 4.2.2 主圆率和主方向的计算

过曲面上某点  $P$  及其法矢  $n$ 、切矢  $P'$  的平面与曲面的交线称为法截线。在该点处沿  $P'$  方向的主圆率大小为：

$$K_n = \frac{II}{I} = \frac{Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2}{Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2} \quad (4-7)$$

圆率的正负号取决于  $P'$  在曲面法矢方向的投影，该投影分量的方向与法截线在该点的主法矢方向一致。故当法截线的主法线的主法矢与曲面的法矢同向时  $k_n > 0$ ；

反向时,  $k_n < 0$ 。

令曲面上曲线在 P 点的圆率矢  $P^0$  与曲面在该点的法矢  $n$  间夹角为  $\theta$ , 则曲线在点 P 的圆率  $k$  与曲面在该点沿曲线切矢  $P'$  方向的法圆率  $k_n$ , 有如下关系

$$k \cos \theta = k_n \quad (4-8)$$

曲面在其上一点处沿不同的方向可能有不同的法圆率  $k_n$ 。将  $k_n$  对表示方向的比值  $du/dv$  求导, 令其为 0, 就可导出称为主圆率的  $K_n$ 。的最大值与最小值

$$\begin{vmatrix} k_n E - L & k_n F - M \\ k_n F - M & k_n G - N \end{vmatrix} = 0 \quad (4-9)$$

消去  $k_n$ , 即可确定主方向的方程

$$\begin{vmatrix} Edu + Fdv & Fdu + Gdv \\ Ldu + Mdv & Mdu + Ndv \end{vmatrix} = 0 \quad (4-10)$$

两个主方向相互垂直, 求出曲面在一点的两个主圆率  $k_1, k_2$ , 就可由 Euler 公式

$$k_n = k_1 \cos^2 \varphi + k_2 \sin^2 \varphi \quad (4-11)$$

求出曲面在该点沿任意方向的法圆率  $K_n$ , 其中  $\varphi$  为该方向与主圆率  $K_t$ , 所在那个主方向的夹角。

Gauss 圆率亦称全圆率, 系主圆率  $k_1, k_2$  的乘积, 以大写字母  $K$  表示, 平均圆率亦称中圆率, 系主圆率  $k_1, k_2$  之和的平均值, 以大写字母  $H$  表示, 由根与系数的关系可得:

$$K = k_1 k_2 = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} \quad (4-12)$$

$$H = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) = \frac{NE - 2MF + LG}{2(EG - F^2)} \quad (4-13)$$

$$k_1 = +\sqrt{H^2 - K} \quad (4-14)$$

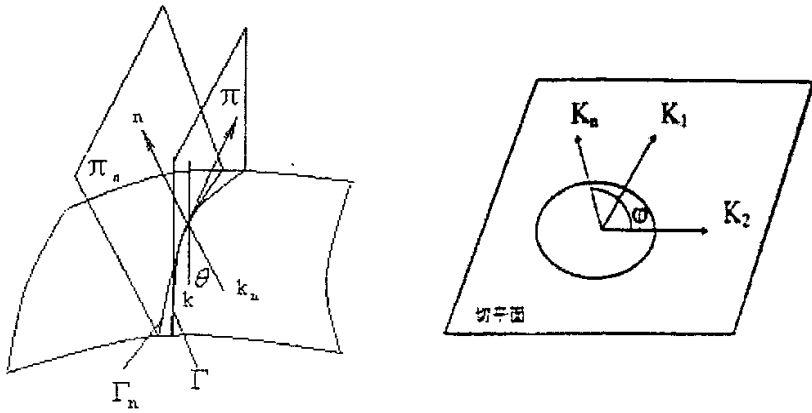
$$k_2 = H - \sqrt{H^2 - K} \quad (4-15)$$

#### 4.2.3 截面线圆率与曲面的主圆率关系

根据微分几何理论, 截面线圆率和曲面主圆率有如下关系。

设图 4-4 中曲线  $\Gamma$  为平面  $\pi$  与曲面的交线, 在点 P 处的圆率为  $k$ , 平面  $\pi_n$  为过点 P 和曲面在点 P 处的法矢及曲线  $\Gamma$  的切线的平面, 它与曲面交于曲线  $\Gamma_n$ ,  $k_n$  为曲线  $\Gamma_n$  圆率, 称曲面的法圆率。则:

$$k = k_n \cos \theta \quad (4-16)$$



(a) 截面线圆率与曲面的法圆率的关系 (b) 法圆率与曲面主圆率的关系

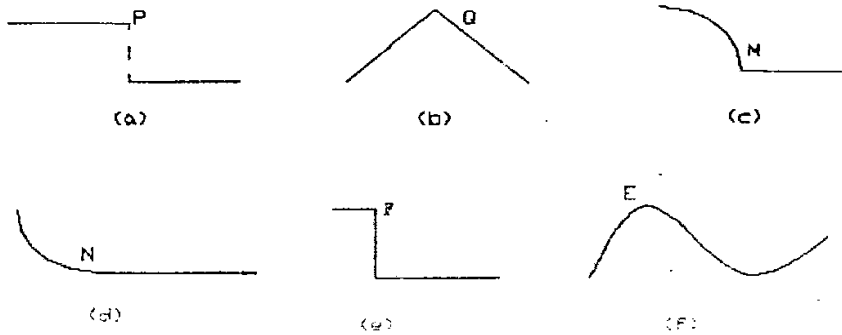
图 4-4 截面线圆率与曲面主圆率关系图

Fig4-4 Truncation Facial Suture Circle Rate and Surface Main Circlerate.Relations Chart

### 4.3 曲线特征点及其圆率特性

#### 4.3.1 曲线特征点分类

曲面上各截面线的特征分布，在一定程度上反映了曲面的特征分布。因而，抽取曲面的几何特征，可以从截面线的几何特征入手。根据曲线的连续性，曲线的特征点可分为：跳跃点  $G^0$  (不连续点)、尖点 ( $G^0$  连续、 $G^1$  不连续点)、折痕点 ( $G^1$  连续、 $G^2$  不连续) 以及脊线点 (圆率极大值点)。图 4-5 所示为特征点的分类。图 4-6 所示为曲面上尖点、脊线点、折痕点提取情况。



(a) 跳跃点; (b) Q 点为尖点; (c) M 点为尖点;  
(d) N 点为折痕点; (e) F 点圆率无穷大; (f) E 点为脊线点

图 4-5 特征点类型

Fig4-5 Characteristic Point Type

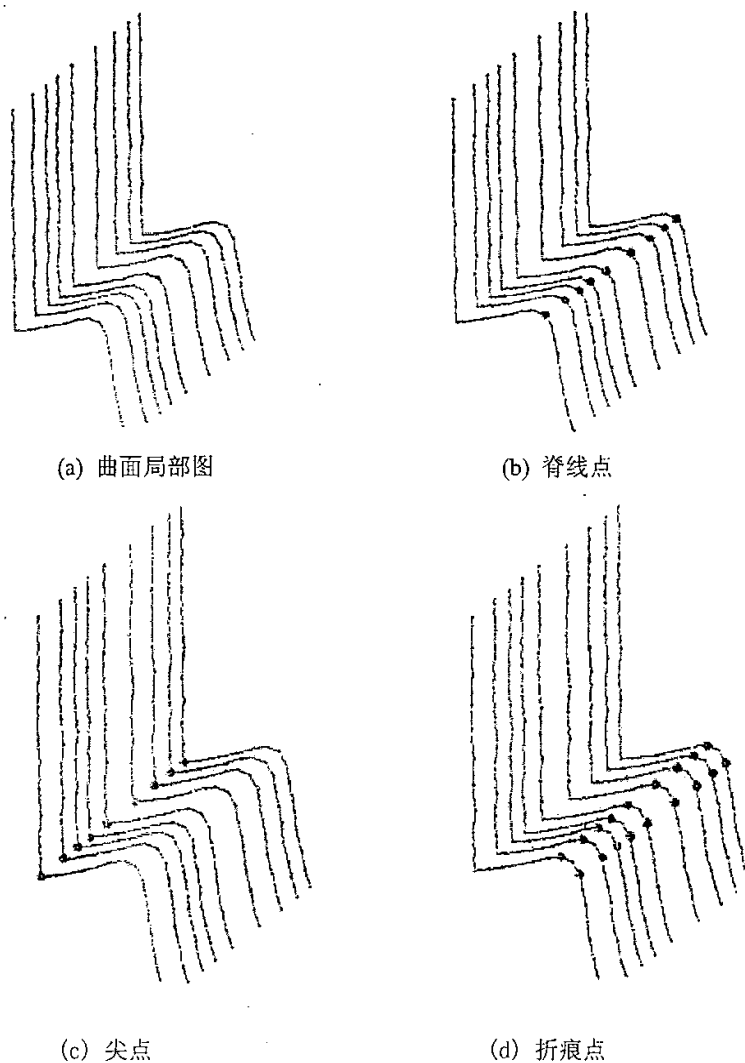


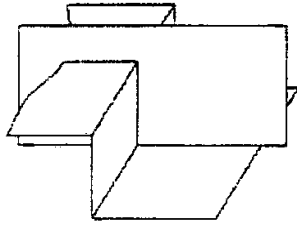
图 4-6 尖点、脊线点、折痕点提取情况

Fig4-6 The Withdraw Situation of the Sharp Apex, the Keel and the Crease spot

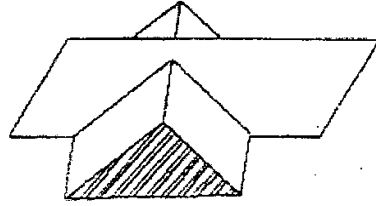
### 3.3.2 截面线特征点的圆率与曲面特征线的关系

由图 4-5 所示，截面与组合曲面相交形成了图 4-7 所示的截面线，从图 4-7 中可以直观地看出，组合表面上的边界线是由截面线上的特征点连接构成。因此，提取截面线上的特征点就可以实现组合曲面的分割。截面线的特征点与圆率的关系如图 4-8 所示，由此可利用截面线圆率的突变来识别截面线上的特征点。

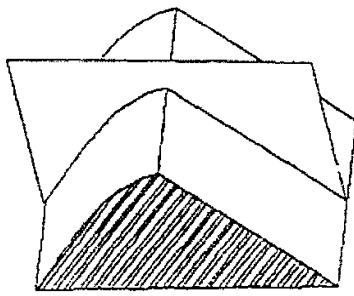




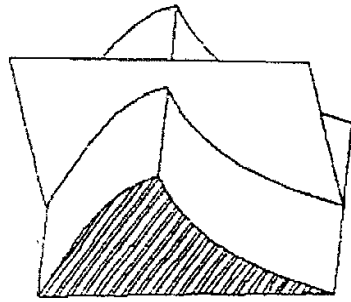
(a) 阶梯面形成的棱边



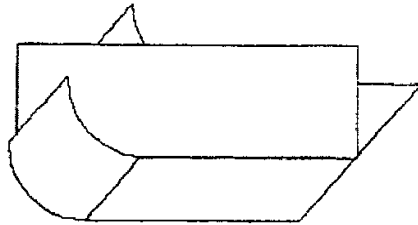
(b) 两个平面形成的棱边



(c) 凸面和平面形成的棱边



(d) 凹面和凸面形成的棱边



(e) 光滑过渡形成的棱边

图 4-7 截面线与棱边的关系

Fig4-7 Truncation Facial Suture and Prominent Edge Relations

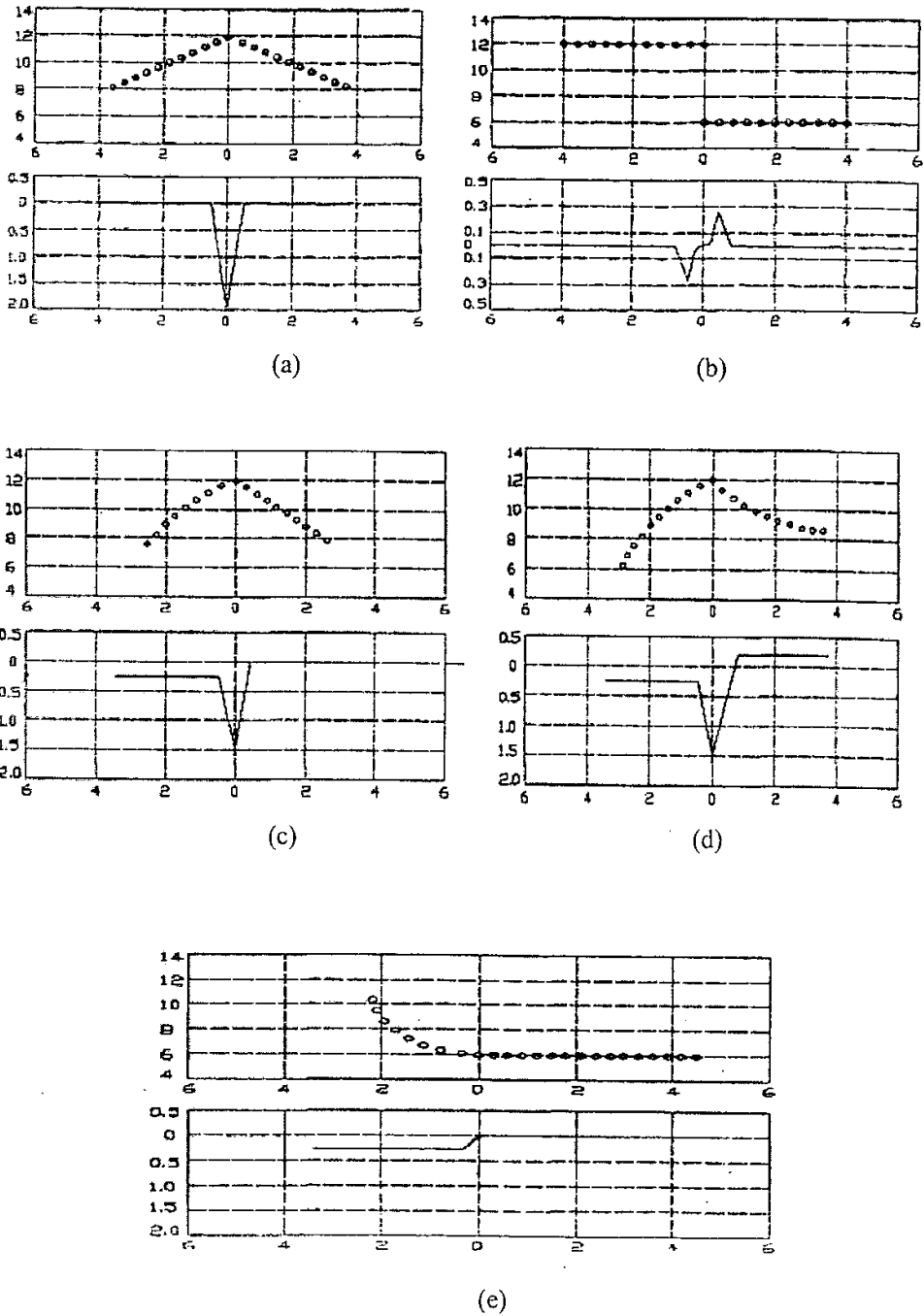


图 4-8 截面线的特征点与圆率的关系

Fig4-8 Truncation Facial Suture Characteristic Point and Circle Rate Relations

## 4.4 截面线圆率计算及圆率差分线的构造

### 4.4.1 截面线圆率计算

离散点圆率的变化可以反映曲面的特征变化,通过构造全局截面测量曲线的圆率差分曲线,可以交互识别圆率的突变点。

截面线是平面曲线,由于实物零件的复杂性,需要改变零件的不同位置完成表面数据采集。因而,虽然截面线是平面曲线,但是需要对点位数据进行坐标变换。截面线投影到 X-Y、X-Z、Y-Z 平面后,计算测点的圆率就不能真实的反映特征点的变化。因而,我们将利用空间三个离散点构造平面的方法,来计算截面线的圆率,离散点的圆率计算如图 4-9 所示。

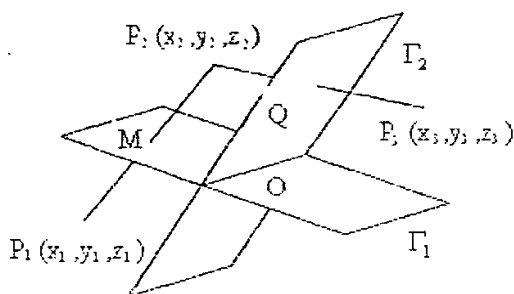


图 4-9 离散点的圆率计算

Fig4-9 Separate Circle Rate Computation

设截面线上连续三个离散点的坐标为  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2, z_2)$ 、 $P_3(x_3, y_3, z_3)$ ,  $M$ 、 $Q$  为  $|P_1P_2|$ 、 $|P_2P_3|$  的中点。根据圆率法计算圆率的基本思想,截面线的圆率中心位于平面  $P_1P_2P_3$ 、 $\Gamma_1$ 、 $\Gamma_2$  三平面的交点上。因此,圆率的计算过程如下:

平面  $P_1P_2P_3$  方程:

$$[(X-x_2)(Y-y_2)(Z-z_2)] \times \begin{bmatrix} i & j & k \\ (x_2-x_1) & (y_2-y_1) & (z_2-z_1) \\ (x_3-x_2) & (y_3-y_2) & (z_3-z_2) \end{bmatrix} = 0 \quad (4-17)$$

平面  $\Gamma_1$  方程:

$$[(X-x_M)(Y-y_M)(Z-z_M)] \times [(x_2-x_1)(y_2-y_1)(z_2-z_1)] = 0 \quad (4-18)$$

平面  $\Gamma_2$  方程:

$$[(X-x_Q)(Y-y_Q)(Z-z_Q)] \times [(x_3-x_2)(y_3-y_2)(z_3-z_2)] = 0 \quad (4-19)$$

联立上述三个方程得:

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

其中  $a_{ij}$  ( $i=1, 2, 3; j=1, 2, 3$ ) 和  $d_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 为系数, 这样可以解得  $P_2$  点的圆率圆中心点的坐标, 即通过  $P_1 P_2 P_3$  三个离散点所得圆的圆心。根据空间两点距离

$$k = 1/R = \sqrt{(X-x_2)^2 + (Y-y_2)^2 + (Z-z_2)^2} \quad (4-21)$$

$P_i$  点的法矢方向即为:

$$N_i = \frac{P_{i-1}P_i}{|P_{i-1}P_i|} + \frac{P_iP_{i+1}}{|P_iP_{i+1}|} \quad (i=1, 2, \dots, n-1) \quad (4-22)$$

$$\eta_i = \frac{N_i}{|N_i|}$$

#### 4.4.2 圆率差分曲线的构造

由微分学可知, 函数的导数是函数的增量之比的极限, 即:

$$u'(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{[u(x+\Delta x) - u(x)]}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{[u(x) - u(x-\Delta x)]}{\Delta x} \quad (4-23)$$

$$u''(x) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{[u'(x+\Delta x) - u'(x)]}{\Delta x} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{[u(x+\Delta x) - 2u(x) + u(x-\Delta x)]}{(\Delta x)^2} \quad (4-24)$$

当  $(\Delta x)$  很小时,  $u'(x)$  可以近似地用差分代替:

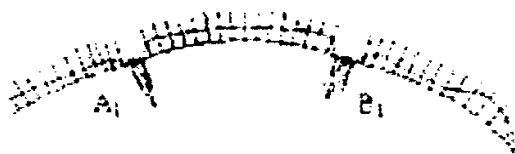
$$u'(x) = \frac{[u(x+\Delta x) - u(x)]}{\Delta x} = \frac{[u(x) - u(x-\Delta x)]}{\Delta x} \quad (4-25)$$

而  $u''(x)$  可以近似地表示为:

$$u''(x) = \frac{[u'(x+\Delta x) - u'(x)]}{\Delta x} = \frac{[u(x+\Delta x) - 2u(x) + u(x-\Delta x)]}{(\Delta x)^2} \quad (4-26)$$

由上述差分公式可知圆率的一阶、二阶差分, 即可构造圆率曲线的圆率差分线。由于离散点空间分布不均匀, 因此圆率二阶差分曲线可为式 4-27 所示的形式, 图 4-10 为圆率二次差分曲线图。

$$\begin{aligned} D_i &= \lambda k_{i-1} + \mu_i k_{i+1} - k_i & (i=1, 2, 3, \dots, n-i) \\ \lambda_i &= \frac{L_{i+1}}{L_i + L_{i+1}}, \mu_i = \frac{L_i}{L_i + L_{i+1}}, L_i = |P_{i+1}P_i| \end{aligned} \quad (4-27)$$

图 4-10 圆率差分曲线 (A<sub>1</sub>、B<sub>1</sub>为圆率差分突变点)Fig4-10 The Circle Rate Difference Curve (A<sub>1</sub>, B<sub>1</sub> are discontinuity point of circle rate difference)

#### 4.5 脊线点的识别及提取

所谓脊线就是相邻的圆率极大值点连成的线,要提取脊线点就要确定圆率的极大值点,图 4-11 所示为截面线圆率直方图。

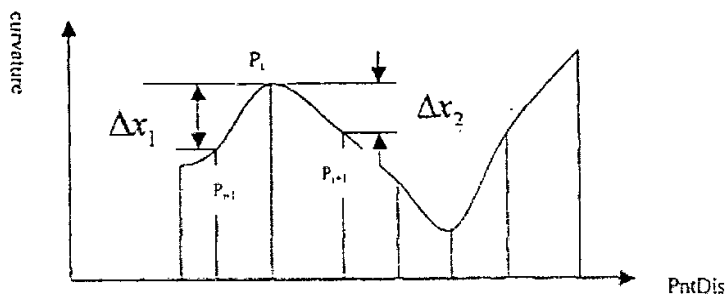


图 4-11 截面曲线圆率直方图

Fig4-11 Cross-section Curve Circle Rate Histogram

$P_{i-1}, P_i, P_{i+1}$  为截面线上任意相邻三个离散点,则:

$$\Delta x_1 = kp_i - kp_{i-1} \quad (4-28)$$

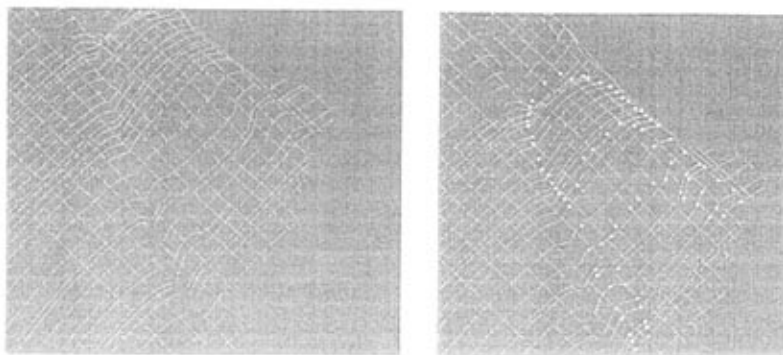
$$\Delta x_2 = kp_{i+1} - kp_i \quad (4-29)$$

若  $\Delta x_1 \cdot \Delta x_2 < 0$ , 则  $P_i$  为圆率极大值点:

通过圆率直方图可以直观地看出截面线上有多少个圆率极大值点,可以利用上述方法遍历截面线上的离散点,可方便地确定截面线上的极值点。在极值点集中,我们可以得到圆率的极大值点,构造脊线。

#### 4.6 特征点提取实例

下面是通过对 THUNDER RACER 赛车车灯、车身点云三角模型截面线上特征点提取的实例,通过对全局截面线圆率线和圆率差分线的分析,自动识别及提取截面线上的特征点,取得了满意的效果,如图 4-12、4-13 所示。

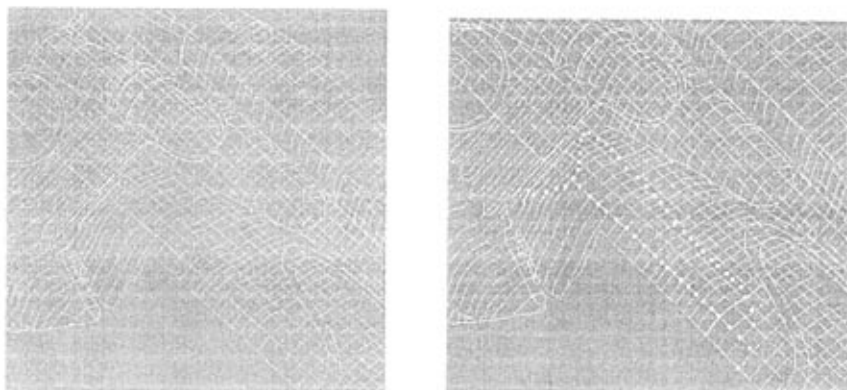


(a) 赛车车灯三角模型截面线构造

(b) 截面线极值点提取

图 4-12 THUNDER RACER 赛车车灯极值点确定

Fig4-12 THUNDER RACER Headlight Extreme Point Determination



(a) 赛车部分车身点云三角模型截面线构造 (b) 车身截面线特征点提取(圆率差分突变)

图 4-13 THUNDER RACER 赛车部分车身点云三角模型截面线特征点识别及提取

Fig4-13 Distinguishes and Withdraw Struncation Facial Suture Characteristic Point of THUNDER RACER Partial Automobile Bodies Point Cloud Triangle Model

## 4.7 特征线构造

在前面我们讨论了曲面特征点的确定方法，在这里我们探讨如何将特征点连接成线，从而构造相应的特征线。所谓特征线就是指具有相同的圆率特征的点连接而成的线。由于同一条截面线上不会出现两个相邻同类型的特征点，所以特征线的连接只能在两相邻的截面线之间进行，由于同一点不可能同时属于两个不同特征，因而，所连接的特征不能相交。

图 4-14 为图 4-11、4-13 中所提取的特征点的特征线连接情况。

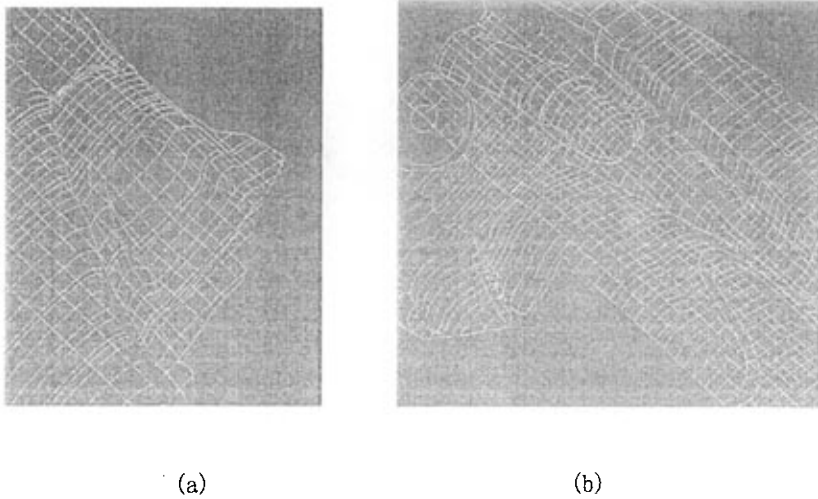


图 4-14 特征点构造特征线实例

Fig4-14 Characteristic Point Structure Characteristic Line Example

从图 4-14 (a)中可以看出, 该零件的特征线, 经上述过程自动连接及交互处理后, 得到图 4-14 (a)中所示的光滑的特征线。有的特征线可以与边界形成封闭的环, 将曲面分块。通过特征点提取、特征线构造, 大大减少了特征线连接的交互工作量, 提高了交互连接特征线的质量。

基于以上原则, 我们采用如下方法构造特征线

- (1) 采用特征点分类的方法进行分类提取特征点;
- (2) 对每类特征点作以不同的标志, 形成各类特征点链表;
- (3) 对每类特征点链表分别构造特征线段;
- (4) 交互将各个线段连接成多义线;
- (5) 若特征线与边界线能形成封闭的区域, 则可以依据特征线交互将其曲面分块, 这里一般需要交互补充特征线, 以便特征线能与边界一起形成多个封闭的区域, 一般每个区域为一块。

## 第五章 曲线和曲面的光顺及评价

在车身外覆盖件的设计中, 曲面最基本的要求是表面光顺。光顺的含义包括数学定义和主观美学描述。曲面光顺的数学条件是满足没有多余的凸区和凹区, 一般用任意一张平面与曲面的截面曲线的光顺性作为曲面光顺的判据。车身曲面的主观美学描述主要体现在几项局部和整体的视觉效果上:

(1) 单个曲面本身所形成的光反射效果;

(2) 曲面之间的拼接和转折处形成的明暗变化。该项描述对整车的最后美观审查将起到决定性的作用;

(3) 用高光灯照在曲面的边界、过渡面等处形成高光线和高光轮廓, 从视觉效果上看应该连续、流畅, 不允许局部多余的凸凹、褶皱或散乱的明暗对比等缺陷存在。

通常曲面质量分为 3 个等级: A、B、C 级。A 级曲面要求满足上述所有光顺条件。从逆向工程角度来讲, A 级曲面应在符合设计意图、圆率连续的基础上, 应尽可能地与点云数据接近。根据不同软件标准, 边界与内部的曲面与测量的点云数据偏差不大于 0.5mm 左右, 在制造过程中不出现几何形状的变化和光照时视觉效果的差异。B 级曲面要求满足曲面光顺的基本条件, 在圆率变化和局部视觉效果方面可适当降低标准, 在制造过程中允许出现微小变形。但多用于车身的内板冲压件, 如轮罩、地板等。C 级曲面即指 A、B 两级曲面之外的其他曲面。

曲面的光顺主要对以下几个方面产生影响:

(1) 造型效果: 在外部光源的照射下, 光线反射和明暗光影效果应该比较好。

(2) 冲压工艺性: 光顺的曲面, 在冲压过程中材料的流动性比较好, 尤其对于车身外覆盖件来说, 褶皱是绝对不被允许的。

(3) CAD、CAE、CAM 的要求: 曲面如果不光顺, 在执行某些功能模块时将产生不良的影响, 最简单的例子就是 OFFSET (平移) 模块。

另外, 如果曲面不光顺, CAE 划分有限元网格过程中, 会出现由于网格过密而导致运算时间过长; 在某些情况下甚至无法划分网格。不光顺的曲面还导致模具的加工工艺性差, 对数控加工的编程造成困难, 加工时还可能产生扎刀现象。

### 5.1 曲线光顺准则和光顺方法

#### 5.1.1 曲线的光顺准则

曲面光顺品质的评价及优化技术是逆向工程中曲面质量的保证。曲面的光顺品质检查方法包括各种圆率绘制、高亮度线显示等<sup>[44,45]</sup>, 算法比较成熟。光顺品质优化通过调整原始曲面的形状, 在其形状变化满足给定约束的前提下, 使曲面变得更光滑。



在工程上给定的约束一般为精度条件。算法以几何法为辅<sup>[46]</sup>，能量法为主<sup>[47,48]</sup>。

光顺是工程上的术语，它很难用严格的数学关系来定义，从物理效应上看，它与光线照射到曲线曲面上形成的反射线的形状特性有关，光顺曲线一般应满足以下几个基本准则：

(1) 对于平面曲线，苏步青、刘鼎元和施法中给出了如下的光顺准则四<sup>[49]</sup>：

- 1) 二阶参数连续 ( $C^2$  连续)；
- 2) 没有多余拐点；
- 3) 圆率变化较均匀；
- 4) 应变能较小；

(2) 对于空间曲线，马利庄、石教英给出如下的光顺准则<sup>[50]</sup>

- 1) 二阶光滑连续性

曲线的二阶导矢或圆率连续，从而圆率连续。对于低次(二次)样条曲线和低阶连续 ( $C^1$  和  $GC^1$  连续) 曲线，应尽量减少结点处存在的圆率跃度，即：

$$\sum |k(V_i^-) - k(V_i^+)| < \varepsilon \quad (5-1)$$

- 2) 不存在多余拐点

，保证设计得到的样条曲线和物理曲线的拐点数目一致且拐点的分布和物理曲线吻合。

- 3) 圆率均匀变化

当曲线上的圆率出现大幅度改变时，尽管没有多余拐点，但曲线仍不光顺，因此要求光顺后曲线的圆率变化比较均匀。

- 4) 不存在多余变挠点且挠率变化比较均匀

变挠点是指挠率为零的点，通常与挠率的变号相关，对于空间曲线，曲线除了要满足上述三个准则外，其变挠点的数目和分布应和物理曲线一致，当挠率不连续时，应尽量减少结点处的挠率跃度，即：

$$\sum |\tau(V_i^-) - \tau(V_i^+)| < \varepsilon \quad (5-2)$$

### 5.1.2 曲线的光顺方法

根据上述的光顺准则，人们对曲线的光顺处理进行了大量研究，并提出了各种曲线的光顺方法。如最小二乘法、能量法、局部回弹法、弯矩松弛法、剪力变化极小法、线形规划法、圆率法、磨光法等。光顺对象从函数样条、大挠度样条发展到参数样条。从光顺处理域的角度，光顺方法可分为整体修改和局域修改两类。

曲线光顺处理的研究始于 20 世纪 60 年代，最小二乘法是当时最有影响的一种光顺方法。1969 年，Hosaka 在能量极值的基础上提出用于空间三次参数样条曲线光顺和网格光顺的能量法<sup>[51]</sup>；1974 年，山东大学和沪东造船厂协作，在船体放样实践中

提出了圆率光顺的概念<sup>[50]</sup>；同年，苏步青和忻元龙提出基样条法<sup>[52]</sup>；1975年，齐东旭等提出了一种强调保凸性质的数值拟合方法，称磨光法<sup>[53]</sup>；1978年，董光昌提出了回弹法<sup>[54]</sup>；1983年，K. jel lander 提出了三次参数样条曲线光顺和双三次参数样条曲面的局部光顺方法<sup>[55][56]</sup>；1987年，Farin 等提出了一种通过“节点删除与插入”对 B 样条曲线进行光顺的方法<sup>[57][58]</sup>；1988年，穆国旺等提出的参数三次 B 样条曲线的一种整体光顺方法<sup>[59]</sup>。

上述大多数方法主要是通过调整曲线的控制顶点来实现曲线的光顺，不能直接从离散型值点分布的位置出发判断离散型值点列的光顺性并对其进行修改，并受制于曲线的生成和表达方式。上述曲线光顺处理方法的优化计算中，均是通过求解大规模的数据矩阵，找到最优的控制顶点。这些方法的计算量大，而且计算复杂。目前，直接对离散型值点列进行光顺处理的方法很少。

### 5.1.3 离散点的交互光顺<sup>[60][61]</sup>

在逆向设计中，对测量点数据进行光顺处理的目的是消除手工采点的测点定位误差和测头打滑引起的随机误差。根据圆率法光顺的基本准则，光顺曲面分布的测点应满足以下两个准则：

- (1) 测点的圆率符号序列无连续变号；
- (2) 测点圆率差分的符号序列无连续变号。

对一于空间分布的边界测点，将测点分别投影到正交的两个坐标平面上，分别计算两个坐标平面上各测点的圆率个准则，则测点分布光顺性良好，若测点在两个坐标平面上的圆率满足以上两个准则，否则，需要对测点进行双向光顺处理。

如图 5-1 所示，设  $P_{i-1}$ ,  $P_i$ ,  $P_{i+1}$  为相邻的三个测点， $\alpha_i$  为线段弦向量  $P_{i-1}P_i$  和  $P_iP_{i+1}$  的夹角， $L_i$  和  $L_{i+1}$  分别为线段弦向量  $P_{i-1}P_i$  和  $P_iP_{i+1}$  的长度，则  $P_i$  点的圆率  $k_i$  为：

$$k_i = \frac{2 \sin \alpha}{P_{i-1}P_{i+1}} \quad (5-3)$$

$P_i$  点的圆率二次差为：

$$D_i = \lambda_i k_{i-1} + \mu_i k_{i+1} - k_i \quad (i=1, \dots, n-1) \quad (5-4)$$

$$\lambda_i = \frac{L_{i+1}}{L_i + L_{i+1}}, \quad \mu_i = \frac{L_i}{L_i + L_{i+1}}, \quad L_i = |P_{i-1}P_i| \quad (5-5)$$

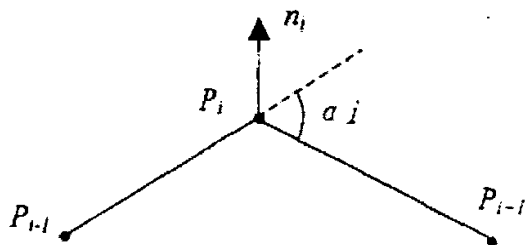


图 5-1 型值点圆率计算

Fig5-1 Value Spot Circle Rate Computation

由测点连接形成的多义线难以直观判定测点的特征分布形态的优劣,应用计算机图形交互手段,在投影方向上,通过测点的法矢方向及其圆率曲线可以有效分析测点的光顺性。如图 5-1 所示,多义线上的测点  $P_i$  的单位法矢  $\eta_i$ ,可定义为:

$$N_i = \frac{P_{i-1}P_i}{L_i} + \frac{P_iP_{i+1}}{L_{i+1}} \quad (5-6)$$

$$\eta_i = \frac{N_i}{|N_i|} \quad (5-7)$$

多义线上的测点单位法矢的方向实际上表示了测点圆率符号的变化情况。当测点的单位法矢分布在多义线的两侧时,测点的圆率符号发生突变。设多义线上的测点  $P_i$  的圆率为  $k_i$ , 单位法矢为  $\eta_i$ ,  $\xi$  为圆率显示放大因子, 则与测点  $P_i$  对应的圆率曲线上点  $V_i$ , 可表示为:

$$V_i = P_i + \xi k_i \eta_i \quad (5-8)$$

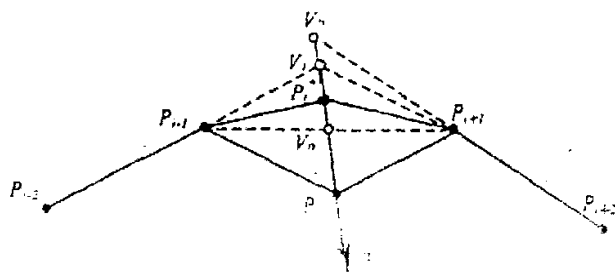


图 5-2 型值点的光顺处理

Fig5-2 Value Spot Smooth Mindful Processing

依次连接点  $V_i$ , 可构造得到离散点的  $P_i$  的圆率曲线, 若测点法矢不存在突变、

圆率曲线为光滑曲线，则离散点  $P_i$  为光顺分布点。否则，需对测点进行光顺处理。若测点  $P_i$  的法矢方向存在突变或在该点邻域内圆率曲线不光滑，则需对  $P_i$  点进行光顺处理。如图 5-2 所示， $P_{i-2}$ 、 $P_{i-1}$ 、 $P_i$ 、 $P_{i+1}$ 、 $P_{i+2}$  为相邻的五个测点， $P_i$  点为待光顺处理的型值点，其法矢为  $\eta_i$ ， $V_0$ 、 $V_1$ 、 $V_2$  分别为法矢  $\eta_i$  方向线与  $P_{i-1}P_{i+1}$  连线、 $P_{i-2}P_{i-1}$  和  $P_{i+2}P_{i+1}$  延长线的交点。则三角形  $P_{i-1}P_{i+1}V_i$  为  $P_i$  点的保凸修正域。

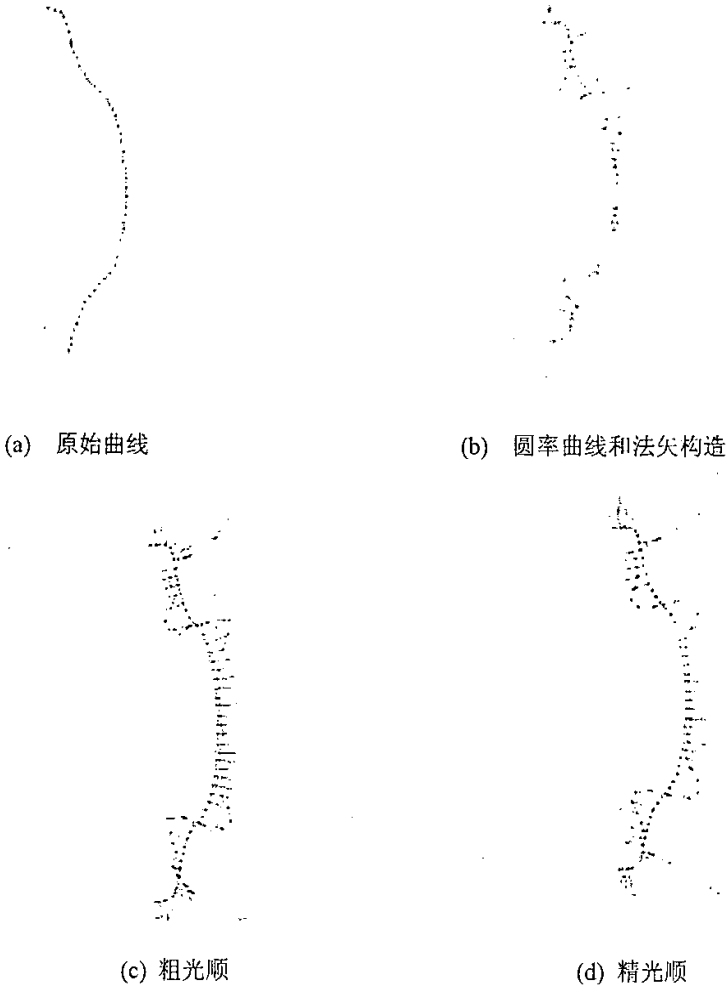


图 5-3 曲线光顺实例

Fig5-3 Curve Smooth Mindful Example

当  $P_i$  点的修正点  $P_i^*$  位于  $V_0V_1$  之间时，点的法矢方向不存在突变，即该点的圆率符号不变号；当  $P_i^*$  位于  $V_0$  时，其圆率二次差大于零；当  $P_i^*$  位于  $V_1$  时，其圆率二次差小于零；而当  $P_i^*$  点位于  $V_0V_1$  之间且圆率二次差为零时，则该点和相邻点之间的圆率变化均匀， $P_i^*$  点为光顺分布的型值点。光顺处理后的型值点  $P_i^*$  可用以下二分法迭代算法 (Divided Procedure) 得到：

- (1) 令  $P_i^0 = V_0$ ,  $P_i^1 = V_i$ ;
- (2) 计算二分点,  $P_i^2 = (P_i^0 + P_i^1)/2$ ;
- (3) 分别计算点  $P_{i-1}$ 、 $P_i^2$ 、 $P_{i+1}$  的圆率和点  $P_i^2$  的圆率二次差  $D_i$ ;
- (4) 若  $D_i < \varepsilon$  ( $\varepsilon$  为圆率二次差允差), 则  $P_i^* = P_i^2$ , 计算结束, 否则, 若  $D_i < \varepsilon$ , 令  $P_i^1 = P_i^2$ ; 若  $D_i > \varepsilon$ , 令  $P_i^0 = P_i^2$ , 返回步骤 2 继续。

应用上述方法可以实现对空间离散数据的交互光顺处理, 图 5-3 所示为曲线光顺实例。

## 5.2 重构曲面的误差分析和评价

为了保证重构的曲面的质量, 有必要对重构曲面进行品质分析。重构曲面的品质分析主要包括曲面误差分析和光顺品质检查。

近似处理在逆向工程过程中处处可见, 从最初对点云的滤波以去除噪声点, 到提取特征点、光顺曲线、曲面拟合、曲面光顺以及过渡面重构等工作, 经过多次处理后才能得到零件的实体模型。于是很自然地带来这样的问题: 最后得到的零件实体模型与原始的测量点云之间的误差有多大? 这实际上和传统的轮廓误差评定问题是一致的, 细微的差别仅仅在于逆向工程中假设建立的 CAD 模型有误差, 而零件误差评定时假设零件有误差。这是一个相对的问题, 在本质上需要研究的问题是一样的。

在对数据点进行参数估计、计算曲面对数据点的拟合误差等过程中, 经常需要计算三维点到曲面的最小距离。设空间数据点  $p$  到参数曲面  $S(u, v)$  的最近点为  $q$ , 则矢量  $(p-q)$  必须与曲面在  $q$  点的法矢具有相同的方向。即:

$$(p-q) \times (S_u \times S_v) = 0 \quad (5-9)$$

式(5-9)是关于参数  $u$ 、 $v$  的矢量方程。该方程可以用 Newton-Raphson 迭代法求解。初始值的选取方法如下: 首先对曲面进行  $2(m+1) \times 2(n+1)$  网格划分, 其中  $m+1$  和  $n+1$  分别为两个参数方向控制顶点的个数; 然后计算数据点  $p$  到网格点的距离, 取与  $p$  点距离最小的网格点作为初始迭代点。计算三维点  $p$  到曲面的最小距离的主程序主要由两部分组成: (1) 确定初始迭代点; (2) 迭代计算曲面上  $p$  点的最近点  $q$  的参数。

除了方程(5-9)的求解结果外, 还应检查  $p$  点与曲面边界曲线的距离。设  $P_u$  为曲面的一条边界, 曲线上与  $p$  距离最近的点  $q$  应满足:

$$(p-q) \times P_u = 0 \quad (5-10)$$

式(5-10)是关于参数  $u$  的矢量方程。同样可以用 Newton-Raphson 迭代法求解。首先对曲线进行  $2(n+1)$  分割; 然后计算数据点  $p$  到分割点的距离, 取与  $p$  的距离最小的分割点为初始迭代点。三维数据点  $p$  到曲面  $S$  的最小距离为所求所有距离中的最小值。可以用这一距离计算曲面在该数据点的拟合误差。

曲面对数据点的拟合精度可用一定数量数据点的最大拟合误差、最小拟合误差和平均误差来评价。为了更直观地表达曲面对数据点的拟合程度，本文还提供了以下两种表示方法。

(1) 用不同的颜色显示不同误差范围的点。以数据点的拟合误差驱动其颜色级差，这样根据数据点的颜色就可以了解误差的分布情况，以及曲面各部分的拟合精度。图 5-4 是用此法表示的拟合曲面误差。

(2) 直接用数据点和曲面上最近点的连线直观地表示误差的大小，这种表示方法被形象的称为针状图。线段的方向和数据点的投影方向一致，线段的长度代表在该点曲面拟合误差的大小。图 5-5 是用此法表示的。

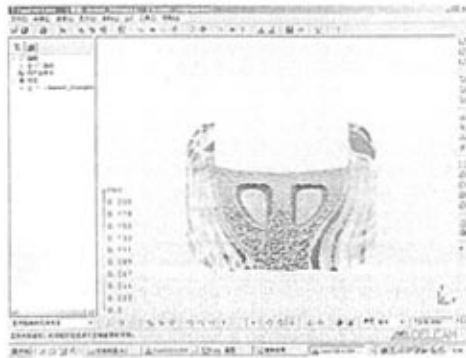


图 5-4 用颜色图表示的曲面拟合误差图

Fig5-4 Curved Surface Fitting Error Chart Which is Expressed With the Color Chart

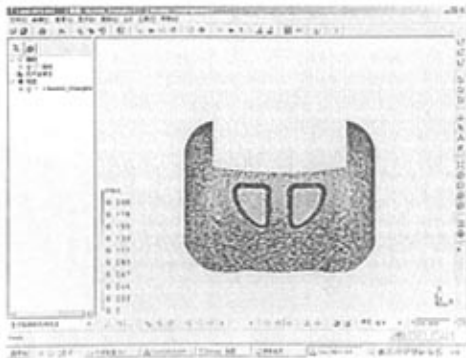


图 5-5 用针状图表示的曲面拟合误差图

Fig5-5 Curved Surface Fitting Error Chart Which is Expressed With the Acicular Chart

## 第六章 整车复杂外表面造型的方法及各软件间的数据交换

车身逆向技术是计算机辅助造型几何设计 CAGD(Computer Aided Geometrical Design)的重要方法和手段之一。它主要研究工程中的几何造型问题,是对各种几何外形信息的计算机表示、分析和综合,通过计算机对所求模型进行数学描述和控制,其主要数学理论为计算几何(Computation Geometry),由函数逼近论、微分几何、计算数学、计算机图形学等形成。车身外覆盖件的逆向工程应用是由手工模型求表面数学模型的过程,有别于一般的产品实物求数学模型的过程。在全新车身外覆盖件产品开发阶段实施逆向工程的过程中,不但要最大限度的忠实再现造型设计师的设计理念,还要充分考虑结构设计的要求。在曲面的建模过程中,还要注意消除手工制作油泥模型的表面缺陷和测量资料的离散误差,从一定的意义上来说,车身外覆盖件的逆向工程技术应用包含了一定的正向设计方法。在整个车身的外覆盖件的设计实施过程中,表面数据的采集、曲面建模所占时间比重较大,曲面质量要求高,而且随着市场的不断变化,产品外形设计的周期也越来越短。

目前,逆向工程软件种类较多,但各软件各有所长,在整个造型过程中,仅应用一种软件来完成是比较费力的事。如何取长补短,发挥各种软件的优势,实现快速、完美建模,是我们设计人员孜孜以求的。本文尝试了在 Pro/E、CopyCAD、CAXA 中各软件间的数据交换,达到了良好效果。

### 6.1 整车复杂外表面造型的技巧

整车覆盖件属于造型难度很大的复杂曲面,一般技巧性很强。下面以 THUNDER RACER 赛车车模整车表面为例,采用意大利 COORD3 公司 AERS 三坐标测量机采集的数据,运用逆向工程软件——英国 DelCAM 公司的 CopyCAD 和美国 PTC 公司的 Pro/E,运用本文前面几章的理论,对它进行曲面重构,总结出了对汽车覆盖件的曲面进行重构的方法、步骤和经验,为后续的车身覆盖件的逆向造型设计和快速制造提供了理论和操作技术保障。

#### 6.1.1 车身覆盖件的表面分块

车身覆盖件的表面是由若干个自由曲面片所组成的。这些曲面片大小、形状都存在着差异。如何将车身覆盖件表面分成合理的自由曲面分块,是构造车身覆盖件曲面数学模型的关键准备技术。图 6-1 为 THUNDER RACER 整车覆盖件外形;图 6-2 为 THUNDER RACER 车的自由曲面分块。

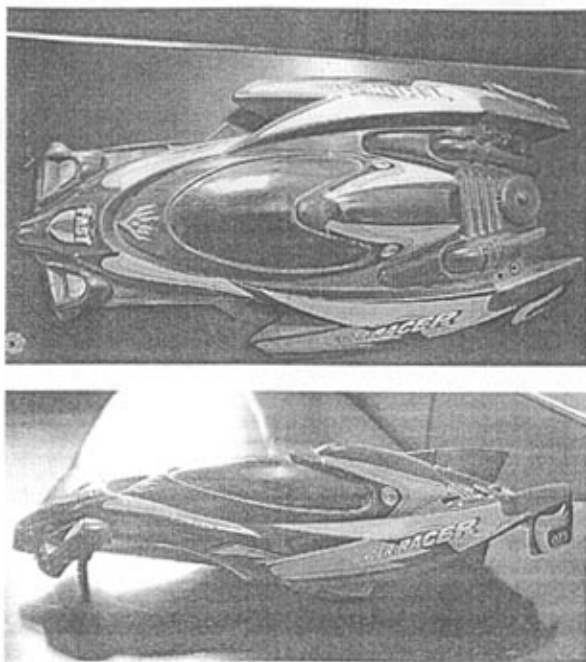


图 6-1 THUNDER RACER 赛车整车覆盖件外形

Fig6-1 THUNDER RACER Entire Vehicle Cover Contour

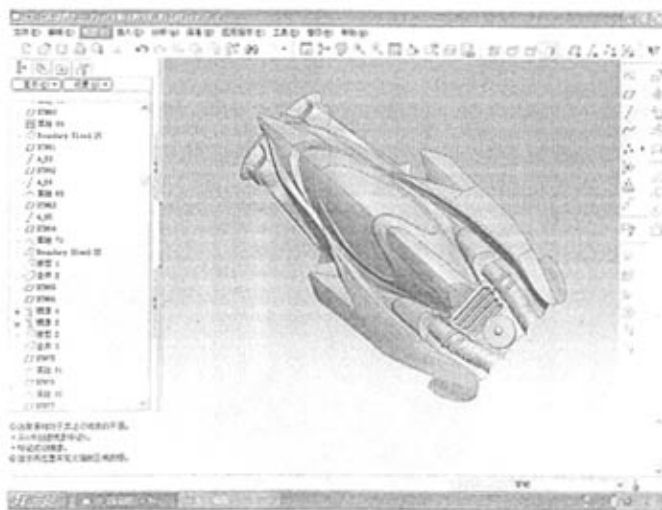


图 6-2 THUNDER RACER 赛车整车外形自由曲面分块 (图中曲线为清晰棱线)

Fig6-2 THUNDER RACER The Entire Vehicle Contour Free Curved Surface Piecemeal  
(Curve is Clear Pprominent Line in Chart)



由图示我们可以看出,划分车身表面的曲面片的主要依据是测量点云数据中的车身特征棱线和曲面的圆率变化规律。其中,车身表面的特征棱线又可分为清晰棱线和模糊棱线。清晰曲线是车身主要曲面的交线,对于现代车身的一些造型来说,车身上的某些清晰棱线能够表现出车身造型的显著特点,它主要用于将车身表面的功能区域进行划分,表现造型的力度、动感的视觉效果。模糊曲线是主要曲面之间用过渡面连接而形成高光轮廓,在构建曲面的过程中,模糊棱线是连接主要曲面的重要依据。另外,在划分车身自由曲面片是还应考虑以下因素:

- (1) 造型的要求;
- (2) 车身结构的可行性;
- (3) 曲面片的建立和曲面之间的拼接方法。

车身自由曲面的划分,直接影响后续的设计工作。在划分的整个过程中,造型师、测量工程师、逆向工程工程师需要进行充分的讨论、研究,甚至还要重复进行几次,在一定程度上采用了并行工程的一些方法。

本文对 THUNDER RACER 赛车进行整车曲面重构时,充分考虑到该车外观属于左右完全对称,决定采用扫描约大于一半,以保证在保证造型顺利的前提下,减少扫描及造型工作量。



图 6-3 THUNDER RACER 赛车的扫描点云

Fig6-3 THUNDER RACER Scanning Point Cloud



图 6-4 THUNDER RACER 赛车的扫描点云的三角化模型

Fig6-4 Triangle Model of THUNDER RACER Scanning Point Cloud

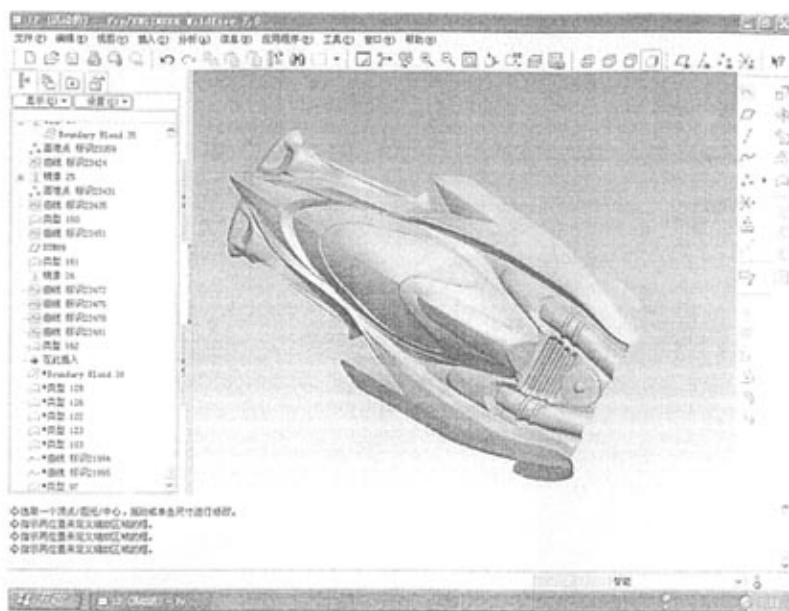


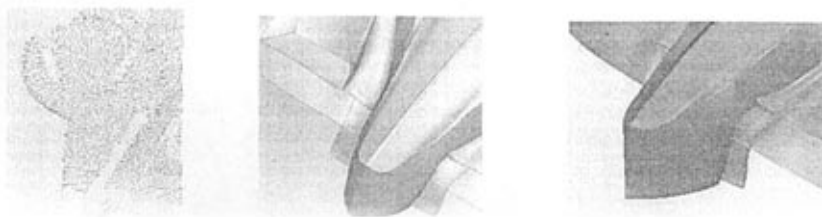
图 6-5 THUNDER RACER 赛车的曲面造型图

Fig6-5 THUNDER RACER Surface Modelling Chart

### 6.1.2 曲面的建立和光顺

在车身外覆盖件曲面模型的建立过程中，通常的构造方法有三种：

(1) 网格曲面：又称点到面。即直接由点云数据生成曲面片，软件直接通过从点云数据中提取的纵横交错的点云网格，使用 U、V 两个方向参数线逼近点云数据的方法拟合曲面，该方法多用于风挡玻璃的曲面模型的构造中。图 6-6 为 THUNDER RACER 赛车车头曲面的建构实例。



(a) 点云

(b) 由点云生成曲面

(c) 生成最终曲面

图 6-6 THUNDER RACER 赛车车头曲面的建构实例

Fig6-6 THUNDER RACER Front Surface Construction Example

(2) 截面驱动曲面：是应用最广泛的曲面构造方法。通过控制生成曲面不同位置的截面形状，在确立了生成曲面的四个边界后，按确定的脊线运动所形成的曲面，该

种方法是应用最广泛的曲面构造方法。通常用于建立车身覆盖件的主要曲面。

(3) 规律描述曲面：对构成曲面的某一特征量如角度、半径、面积等按定义进行规律变化所生成的曲面。

在车身外覆盖件曲面数学模型的实际工程应用中，每种方法都可以单独使用，但多数情况下，需要对不同种方法进行综合运用，对生成曲面模型的元素进行反复调整，最终得到理想的光滑曲面。图 6-7 为 THUNDER RACER 赛车整车曲面几何曲率上色分析。

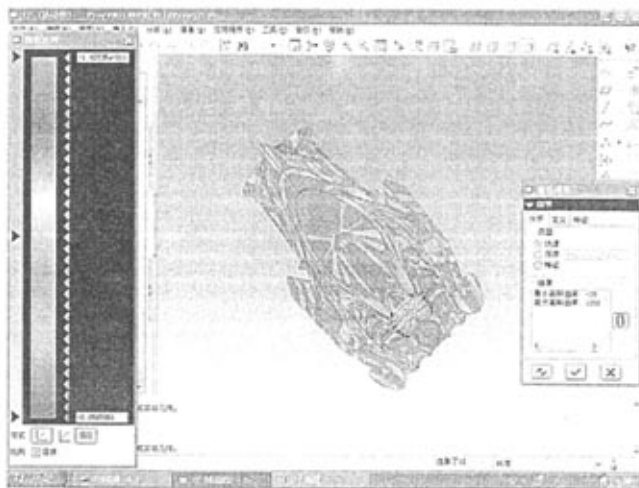


图 6-7 THUNDER RACER 赛车整车曲面几何曲率上色分析

Fig6-7 THUNDER RACER Entire Vehicle Surface Geometry Curvature Color Analysis

### 6.1.3 自由曲面的拼接与裁剪

自由曲面的拼接，就是将已经光顺好的自由曲面用过渡曲面连接起来。在车身外覆盖件应用逆向工程的过程中，曲面的拼接与裁剪是一个很重要的环节。曲面的拼接处多是高光轮廓线和明暗对比效果明显的部位，曲面的拼接质量将直接影响到车身整体的视觉效果。

连接用的过渡曲面总体上分为两种。第一类是各种倒圆角曲面。可分为等半径和变半径、狭义圆角和广义圆角。圆角面的原则是先大后小，圆角曲面的阶数应高于基础曲面，按自然边界和特制线对曲面进行裁剪。第二类过渡面是连接两个或多个主要曲面并保证切矢连续或曲率连续的曲面，该类曲面多用于曲率变化较大，截断线形状比较复杂的情况。图 6-8 为 THUNDER RACER 赛车车头曲面连接前后的对比。

在车身外覆盖件逆向工程设计中，有几个重要的过渡曲面对整车的造型效果影响很大，需要从不同的视觉角度进行正常光和高光检查，对曲面进行适当的光顺调整，以确保达到造型设计师的效果要求。这些面中包括 A 立柱表面、发动机罩棱线、车身侧围腰线等处的曲面。

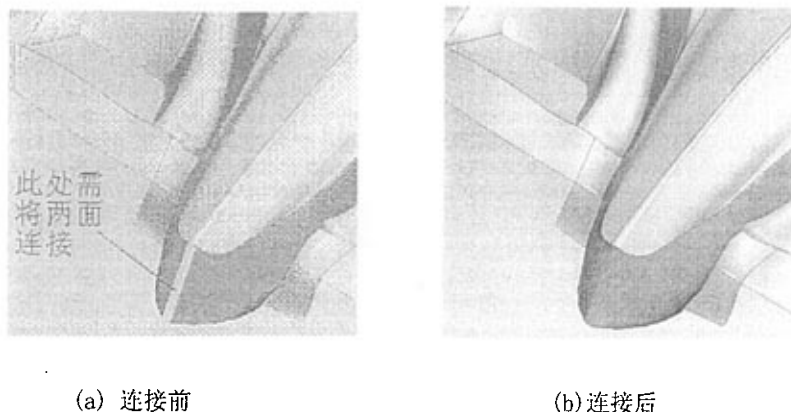


图 6-8 THUNDER RACER 赛车车头曲面连接前、后

Fig6-8 Before and After Connect the THUNDER RACER Front Surface

#### 6.1.4 曲面质量的分析与评估

曲面质量的分析与评估主要包括几何精度分析与评估和光顺效果分析与评估。在车身外覆盖件逆向工程设计中，曲面质量的分析与评估主要分以下几种：

(1) 在初步构造曲面和光顺曲面过程中对单一曲面的检查：对单一曲面的分析与评估中，利用软件中检查工具模块，首先对生成的单个曲面进行简单的上光着色检查，以确认构造的曲面光顺，无扭曲、凸凹等现象。在保证曲面光顺的基础上，对曲面进行与点云数据的几何分析评估。

(2) 构造过程中对多个曲面进行检查：通过软件中的检查功能，对多个相连曲面进行光顺检查。不当的连接会使曲面的修改产生困难。两个曲面的连接处不能出现 T 型连接和错位连接。曲线的连接偏差按照控制软件不同控制范围在 0.05mm 以内，过大的偏差将会对派生曲面 (offset 曲面) 和数控加工造成困难 (扎刀)。

(3) 在曲面精修完成后，对曲面的光顺性做最终检查：该项检查是在所有外覆盖件曲面模型建立完毕后进行的。通过构建的曲面模型，通过数控加工制出钢制车身外覆盖件模型表面，组成一个完整的车身外覆盖件主模型。在光照间用不同光源性质的检测灯，从不同的角度对车身外覆盖件主模型进行光谱检查，最终由造型设计师来确认整个车身外覆盖件曲面模型是否符合设计要求，如在光照下有不完善或为完全突出所设计的造型效果的地方，则对曲面进行进一步的修改，直至达到造型的效果要求 (光谱检查基本要求：光谱形状的疏密变化应均匀，在曲面的连接处不应有错位)。

## 6.2 基于 CAXA 的逆向工程实现技术

由于逆向工程技术源于美国等发达国家,给我国企业的工程技术人员开发和应用带来极大的不便,以致一些单位从国外购入几百万元的先进加工中心,却长期闲置,或仅通过落后的手工编程,作两轴或两轴半加工,没有充分发挥现代制造技术及数控加工设备应有的作用。

究其原因,其一,国外原版的 CAD / CAM 应用软件存在语言障碍。给生产一线的工程技术人员造成应用上的困难。很难在企业中推广。

其二,工程习惯不同。要进行零件的数控加工,必须先进行零件的造型 / 绘图 / 设计,国外的软件与其本国的设计标准、作图方法和工程习惯等相适应,与我国有较大差别,国内工程技术人员不易掌握。

其三,价格不菲,大多数生产单位受购买能力限制被拒之门外。

其四,后续服务不到位,人员培训不足,技术问题沟通不便。

本人经过长期的调研和实践,采用中国北航—海尔的 CAXA 制造工程师软件(以下简称 CAXA)重构曲面,并生成 NC 程序,能较好地完成零件的造型,且易掌握。

CAXA 是北京北航海尔软件有限公司和青岛海尔集团研制推出的,它的造型方法分为三大类,一类为线架,二类为曲面,三类为实体。这三类造型方法各有特色,可以独立造型,也可以混合造型,并提供了十二种数控加工刀具轨迹生成方法,形成强大、实用的加工编程能力,足以对付平面和各种复杂曲面的加工,只要由三轴铣加工出来的曲面,CAXA 都能进行刀具轨迹生成并自动生成数控加工的 NC 代码,从而在数控机床上直接进行金属切削加工。

本节以一车内饰件外表面的逆向工程设计、制造为例,采用意大利 COORD3 公司 AERS 三坐标测量机采集的数据,利用英国 DELCAM 公司的 CopyCAD 软件系统进行数据处理,导入中国北航—海尔的 CAXA 重构曲面,并生成 NC 程序,从而实现零件的快速制造。

### 6.2.1 三维数据的采集

本次测量采用了意大利 COORD3 公司 AERS 的三坐标测量机,通过对某汽车部分车体的一块外表面进行多向有序扫描,扫描点达 10339 个,得到数据点云。该点云以文本文件格式(.txt)存储,可供 AutoCAD、SolidWorks、UG 等应用软件使用。

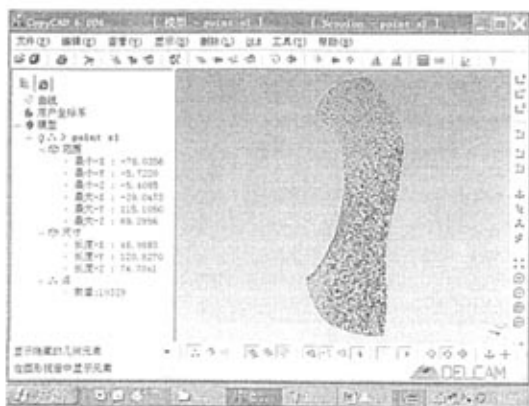












图 6-9 CopyCAD 中的扫描数据点云图


Fig6-9 Scanning Data Point Cloud Chart In CopyCAD

### 6.2.2 数据处理

数据处理是逆向工程的关键一步，其处理效果将直接影响后期模型重构的质量。本设计采用最简洁的方法，即通过人机交互判别明显坏点，然后将坏点、噪声点去除。接着对曲面的特征点、特征线进行判定，获得满意的曲线，并光滑处理，为下一步曲面重构作好准备。

考虑到 CAXA 不能直接读取文本格式的点云文件，而 Pro/E、UG 等软件读取点云数据时，也会因为数据庞大，造成一定的困难。Surfacer 或 CopyCAD 等读取点云数据时，系统工作速度较快，点线拟合容易，因此数据处理选择在 CopyCAD 中进行。

首先在 CopyCAD 软件中，单击标准工具栏中的 Point Editing 图标 ，选中坏点，用左侧子工具栏的 Delete Points 图标  删除坏点；单击 Triangle Generation 图标 ，用其子工具栏的 Triangulation Wizard 图标  作出三角形模型；单击 Model Editing 图标 ，用其子工具栏的 Limit Model 图标  限制模型周边多余三角形；再单击 Triangle Editing 图标 ，选中坏的三角形，用其子工具栏的 Delete Triangles 图标  删除坏的三角形。经过上述步骤，最终得到所需三角形模型（图 6-10）。单击标准工具栏中 Curve Generation 图标 ，利用 Boundaries、Horizon line、Discontinuities、Scan lines 或 Triangle Model Cross Section 等曲线生成方式，生成曲面重构所需的特征曲线。最后单击 Curve Editing 图标 ，用其

子工具栏的 Curve Smoothing 图标进行光滑处理。

为了使下一步 CAXA 的曲面重构中能重构出光滑、误差极小的曲面，我们还必须由 CopyCAD 得到足够的特征曲线（图 6-11），并保存为曲线文件（.igs 文件）。



图 6-10 CopyCAD 中的三角形模型

Fig6-10 Triangle Model In CopyCAD

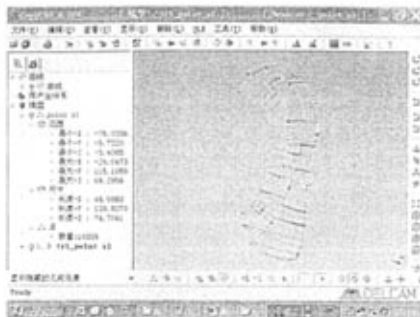









图 6-11 CopyCAD 中的特征曲线

Fig6-11 Characteristic Curve In CopyCAD

### 6.2.3 曲面重构

进行面的拟合时，CopyCAD 所提供的工具较少，且面的质量不高。在很多时候，它做成的面，常需要在 PowerMILL、PowerSHAPE 软件中修改。Pro/E、UG 做的面质量较高，但是软件使用难度大。综合考虑，我们选用 CAXA 重构曲面。

在 CAXA 中打开上述由 CopyCAD 导出的曲线文件（.igs 文件），利用其边界面、网格面、放样面、导动面等曲面工具进行分片曲面造型，最后进行曲面过渡、拼接、缝合等操作，形成理想曲面。












CopyCAD 导入的每条特征线，CAXA 都认为是独立曲线，且线上的每一点都可以用最近点进行捕捉。更为重要的是，CAXA 曲面造型不需要草图，因此导入的每条特征线一般都可直接用来重构曲面。若某些特征线不符合曲面造型条件时（如边界面要求曲线首尾相连等），则可方便地对它们进行如曲线裁剪、过渡、打断、组合、延伸、删除等编辑处理。当然，也可以通过捕捉方式，利用曲线工具，如直线、圆弧、圆、样条线等重绘曲线。由于曲线是由 CopyCAD 导入的或通过捕捉导入的特征线上的点绘制的，因此只要在 CopyCAD 中控制好特征线误差，就可简便地得到误差很小的曲面（图 6-12）。



图 6-12 CAXA 中的曲面造型图

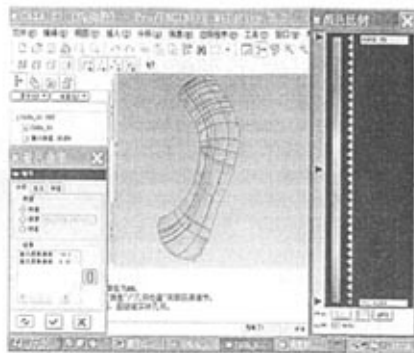


图 6-13 Pro/E 中的曲面着色圆率分析图

Fig6-12 Surface Modeling Chart In CAXA

Fig6-13 Color Circle Rate Analysis Chart In Pro/E

造型中遇到最沮丧的事莫过于费了好大力气造出的曲面根本不光顺。笔者的心得是：某些导入的曲线由于本身的原因，或在导入过程中数据丢失造成不光顺，这时可用样条曲线工具<sup>√</sup>，利用端点、最近点在原曲线上捕点重新绘制。这也是我为什么强调在 CopyCAD 中要取得足够特征线的原因（少了不好补，多了可删除）。捕点的数量及位置需通过经验判定，前提是保证光顺及误差小。若要检验曲面的光顺程度，可将曲面存成\*.igs 文件，再在 Pro/E 中进行着色圆率分析（图 6-13）。

#### 6.2.4 数控加工

CAXA 能直接对曲面进行虚拟数控加工。先单击主菜单“应用”中子菜单“轨迹生成”，选择合适的加工方式、加工参数、刀具、切削用量、进退刀方式，生成加工轨迹（图 6-14）；再单击子菜单“轨迹编辑”，进行刀位裁剪、反向、插入、删除等处理及轨迹的打断、连接、参数修改等编辑。最后单击子菜单“轨迹仿真”，进行仿真加工（图 6-15），观察满意后再单击子菜单“后置处理”，生成、校核 G 代码及生成工序单，经手工修改、调试、检验送至电火花线切割机或加工中心加工。

用 CAXA 作逆向工程曲面重构时，总体觉得比较简便、好用。除与 Pro/E 一样具有曲面造型功能强大的特点外，还具有以下明显优势。

首先，CopyCAD 软件导出的特征曲线，Pro/E 认为是一个整体，不能直接对其中线条进行独立的编辑。而且只认可曲线的起点或终点，其余点则一概不识，给绘制自由曲线、创建自由曲面带来不便。CAXA 认为导入的每条曲线是一个独立的对象，可直接进行各种编辑，而且认可曲线上的所有点。

其二，Pro/E 除绘制自由曲线、创建自由曲面不需创建草图，其余的曲面造型都得按部就班，先作草图平面、参考基准，再创建草图，最后才能生成曲面，过程烦琐，对空间概念要求很高。CAXA 作面，无须草图，特别是可直接利用导入的特征曲线重



构曲面，并进行模拟数控加工。



图 6-14 CAXA 中生成的虚拟加工轨迹

Fig6-14 Produces Hypothesized Processing Path In CAXA

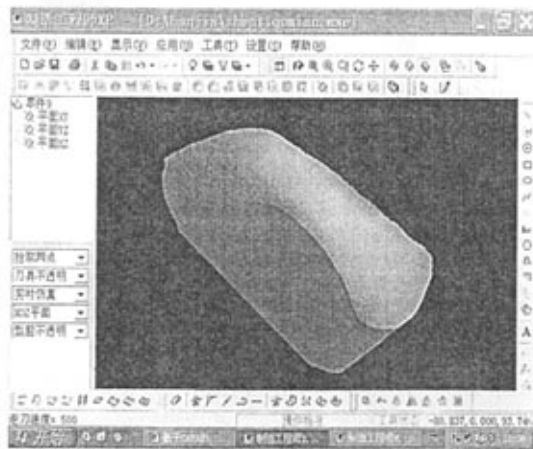


图 6-15 CAXA 中虚拟加工出来的曲面

Fig6-15 In CAXA hypothesized processes curved surface

美中不足的是，在 CAXA 中，渲染的曲面颜色单调、干涩，缺乏对曲面光滑、误差等分析模块。另外，其自动生成的 NC 程序需手工大量修改、调试后方能使用。

## 第七章 结论与展望

### 7.1 结论

本文在分析了国内外反求工程领域研究现状的基础上,把反求工程 CAD 建模中三维表面重构作为研究重点,对曲面重构中各软件间的数据交换进行了深入研究。提出了对汽车覆盖件等复杂的表面进行曲面重构时,先进行三角曲面造型,得到三角化模型,接着对三角化模型求截面线,将立体的三维数据转化成截平面上的二维数据,利用平面截面线一维变量自动识别与提取特征点、特征线,再实现四边域 NURBS 曲面造型的曲面重构新观点。既简化了特征点、特征线的识别与提取的步骤,又实现了四边域 NURBS 曲面精确的模型重构。并以 THUNDER RACER 赛车模型的整车曲面造型为例,对零件截面测量数据线型提取、测量数据预处理、组合曲面的子曲面的边界提取和曲线建模、数据交换等关键技术进行了系统深入地研究,旨在建立组合曲面逆向工程建模的有效方法,从而为产品逆向设计的开展奠定工程实施基础;以某汽车部分车体的一块曲面的快速制造为例,介绍了如何在各个造型软件中实现数据的交换及互补,为快速制造的实现探索出一条简单有效的方法。

本论文研究的重点内容如下:

(1) 分析了国内外反求工程领域研究现状,阐述了论文的选题依据和主要研究内容。

(2) 研究了曲面造型理论、方法、曲面重构技术、曲面重构的算法,重点阐述了 B 样条和 NURBS 曲面、三角曲面等曲面造型方法。

(3) 提出了对汽车覆盖件等复杂表面进行曲面重构时,先进行三角曲面造型,得到三角化模型,接着对三角化模型求截面线,将立体的三维数据转化成截平面上的二维数据,利用平面截面线一维变量自动识别与提取特征点、特征线,再实现四边域 NURBS 曲面造型的曲面重构新观点。

(4) 结合汽车覆盖件的 NURBS 曲线重建实例,介绍了曲线模型的重建理论,突出 NURBS 曲线的数学形式及其特点、重建步骤及计算方法。这是指导后面作好复杂曲面重建的基础和理论依据。

(5) 研究了曲线和曲面的光顺及评价准则、方法在实际曲面重构中的指导意义。

(6) 以 THUNDER RACER 赛车模型的整车曲面重构为例,介绍了整车复杂外表面造型的技巧;以某汽车部分车体的一块曲面的快速制造为例,介绍了如何在各个造型软件中实现数据的交换及互补。

## 7.2 展望

逆向工程技术发展至今,在数据处理、曲面拟合、规则特征识别、专用软件开发等方面已取得了明显的进步,但针对任意拓扑的三角网格模型的 CAD 模型重建,如三角网格模型的去噪、优化等预处理工作;复杂模型的数据分块以及曲面拟合等工作,还有许多亟待解决的问题。例如:如何在去噪的同时减少模型的变形,如何使数据分块的结果符合零件的构形,如何对复杂模型实施分片 B 样条曲面的整体拟合,如何对既有自由曲面又有规则曲面的复杂模型进行 B-rep 表示,如何提高几百万以上的海量数据的处理速度等等,均是逆向工程中的难点问题。

另外,在实际应用中,整个过程的自动化程度并不高,许多工作仍需由人工完成,技术人员的经验对最终产品的质量仍有较大影响。

尽管本文研究的方法达到了预期的目标,但仍有如下几个方面需要进一步研究:

(1) 进一步研究线型自动提取技术,使线型构造更加合理化,减少交互修改的工作量。

(2) 进一步研究组合曲面子曲面边界的提取方法,减少边界线提取过程中的交互工作量,或者实现完全自动化的边界提取和曲面的分割。

(3) 有效控制拟合曲面的光顺性和光滑拼接;提高曲面重构的通用性和适用面(有序点云、无序点云;Bezier、B 样条、NURBS、三角 Bezier);提高曲面重构的精度和自动化程度。

(4) 研究反向工程的接口技术,包括测量数据与快速成形系统的接口(STL 文件),测量数据与 CNC 设备的接口(DXF、IGES、点云文件),测量数据与 CAD/CAM 系统的接口(DXF、IGES、STEP 文件),以实现与现有的制造设备、CAD/CAE/CAM 等软件的数据交换。开发基于特征和集成的模型重建技术、基于网络的协同设计和数字化制造技术,实现逆向工程技术与现有商品化 CAD/CAE/CAM 系统及快速成形制造系统的集成。

## 参考文献

- [1] 郑飞.基于全景图像的快速体元造型[J].《机械工程学报》,1999,Vol.35(4):21-24
- [2] 胡国军,钱荣芳等.基于逆向工程的数字化技术研究[J].《机床与液压》,2004. Vol.(5):86-87
- [3] Tamas Varady, Ralph R Martin, Jordan Cox. Reverse Engineering of Geometric Models-an Introduction[J].Computer-Aided Design, 1997, Vol.29(4): 255~268
- [4] Dori.D,et al.From engineering drawings to 3D models:are we ready now?[J].CAD, 1995, Vol.27 (4):243-253
- [5] Takashi Maekawa.An overview of offset curves and surfaces[J].CAD,1999, Vol.31.165
- [6] Janos Vida, et al.A survey of blending methods that use parametric surfaces[J].CAD,1994,26(5): 341-365
- [7] K.H.Lee,et al.Data Reduction Methods for Reverse Engineering[M].The International Journal Advanced Manufacturing Technology.2001,17:735-743
- [8] Pál Benk, et al.Algorithms for reverse engineering boundary representation models[J].CAD,2001, 33:839-851
- [9] Sacid Motavalli.Review of Reverse Engineer Application[J].Computers Ind Engineering ,1993, 35(1):25-28
- [10] 第一汽车制造厂工装设计室.汽车覆盖件冲模[M].北京:机械工业出版社,1979
- [11] 侯义馨, 冲压工艺与模具设计[M].北京:兵器工业出版社,1994
- [12] 王新华, 汽车冲压技术[M].北京:北京理工大学出版社,1999
- [13] 乐玉汉,轿车车身设计[M].北京:高等教育出版社,2000:15-30
- [14] 刘之生, 黄纯颖. 反求工程技术[M].北京:机械工业出版社,1992
- [15] 田晓东, 史桂蓉, 阮雪榆. 复杂曲面实物的逆向工程及其关键技术[J].机械与制造工程, 2000, Vol.29(4): 1-6
- [16] Sabry F, Hakim E I, and Nicolino J P. Multicamera Vision-Based Approach to Flexible Feature Measurement for Inspection and Reverse Engineering[J].Optical Engineering, 1993,Vol.32(9):2201-2215
- [17] 王文深, 狄文辉.反求工程技术及其应用[J].河南机电高等专科学校学报.2001.9(2):6-9.
- [18] 刘之升, 黄纯主编.反求工程技术[M].北京:机械工业出版社,1992.4
- [19] 金涛, 陈建良, 童水光.逆向工程技术研究进展[J].中国机械工程,2002,13(16)1430-1436
- [20] 高晓辉, 蔡鹤皋.三维数字化测量系统[J].中国机械工程,2000, 11(10) :1161-1164
- [21] 雷刚, 邹昌平, 黄剑鸣.快速逆向工程研究进展[J].机械工艺师,2000,10:54-56
- [22] Wohler T. 3D Digitizing for Engineering[J].Computer Graphics World,1995,18(2): 51-53

- [23] CHAN V H, Bradley C, Vickers G W. A Multi-sensor Approach to Automating Co-ordinate Measuring Machine-based Reverse Engineering[J]. Computer in Industry, 2001, 44(2): 105-115
- [24] Tamas Varady, Ralph Martin, Jordan Cox. Reverse Engineering of Geometric models-an introduction[J]. Computer Aided Design, 1997, 29(4): 253-268
- [25] 阳道善, 陈吉红, 周济, 孙德保. 测量数据云中规则表面的自动识别[J]. 计算机工程, 2001, 27(5): 22-24
- [26] LIN CY, LIOU C S, LAI J Y. Surface-lofting Approach for Smooth-surface reconstruction From 3D Measurement data[J]. Computer In Industry, 1997, 34(1): 73-85
- [27] 王文深, 狄文辉. 反求工程技术及其应用[J]. 河南机电高等专科学校学报, 2001, 9(2): 6-9.
- [28] Carlos F, Borges, Tim Pastva. Total Least Squares Fitting of Bézier and B-spline Curves to Ordered Data[J]. Computer Aided Geometric Design, 2002, 19: 275-289
- [29] V Weissa, L Andorb, G Renner. Advanced Surface Fitting Techniques[J]. Computer Aided Geometric Design, 2002, 19: 19-42
- [30] 张舜德, 朱东波, 卢秉恒. 反求工程中三维几何形状测量及数据处理机电工程技术[J]. 计算机工程, 2001, 1: 7-10
- [31] 朱心雄等. 自由曲线曲面造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2000
- [32] Sharka B, Menq C H. Smooth-Surface Approximation and Reverse Engineering[J]. Computer-Aided Design, 1991, 23(9): 623-628
- [33] Mar W Y, He P R. B-Spline Surface Local Updating with Unorganized Points[J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(11): 853-862
- [34] Ma W, Kruth J P. NURBS Curve and Surface Fitting for Reverse Engineering[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998, Vol. 14: 918-927
- [35] 来新民, 黄田. 基于 NURBS 的散乱数据点自由曲面重构[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 1999, 11(5): 432-436
- [36] 杜晓明. 逆向工程中直纹面零件的几何建模. [D]. 武汉: 华中科技大学, 2003
- [37] Paul J Besl, Ramesh C Jain. Invariant Surface Characteristic for 3D Object Recognition in Range Images[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1986, 33: 33-80
- [38] B C Vemuri, A Mititche, J K Aggarwal. Curvature-based Representation by Incorporating Constraints in Reverse Engineering[J]. Computer-Aided Design, 1999, 31: 363-399
- [39] 丘维声. 微分几何讲义[M]. 北京: 人民教育出版社, 1959
- [40] 许自军. 计算机辅助设计与制造的几何基础[M]. 江苏: 江苏科学技术出版社, 1989
- [41] 谭建荣. 工程曲线曲面的计算机辅助设计[M]. 河海大学出版社, 1993
- [42] 梅向明, 黄敬. 微分几何[M]. 北京: 高等教育出版社, 1981
- [43] 《曲线与曲面》编写组. 曲线与曲面[M]. 上海: 上海科技出版社, 1978
- [44] Poeschl T. Detecting Surface Irregularities Using Isophotes[J]. Computer Aided Geometric

- Design,1984, Vol.1(2):163-168
- [45] Hagen H, et al. Surface Interrogation Algorithm. IEEE Transactions on Computer Graphic and Application [J].Computer Aided Geometric Design,1992, Vol.12(5):53-60
- [46] 马利庄, 石教英. 曲线曲面的交互光顺算法. 谭建荣主编. 计算机工程图学的探索与实践[M] 北京: 电子工业出版社, 1994
- [47] Guan Z D, Jing L, Ning T, et al. Study and Application of Physics-based Deformable Curves and Surfaces. Computers & Graphics, 1997, Vol.21(3):305-313
- [48] 经玲. 用有限元法整体构造 B 样条曲面的理论与应用研究[D].北京:北京航空航天大学, 1997
- [49] 苏步青, 刘鼎元. 计算几何[M].上海:上海科学技术出版社, 1981
- [50] 马利庄, 石教英. 曲线曲面的几何光顺算法[J].计算机学报, 1996(19):210-216
- [51] Hosaka, M. Theory of Curve and Surface Synthesis and Their Smooth Fitting Information Processing in Japan,1969(9): 60-68
- [52] 复旦大学数学系, 江南造船厂. 单根曲线光顺的基样条法[R].江南造船厂技术资料,1974(7)
- [53] 齐旭东等. 曲线拟合的数值磨光方法[J].数学学报, 1975(18):173-184
- [54] 董光昌等. 船体数学放样一回弹法[M].北京:科学出版社, 1978
- [55] Ellander, J.A.P. Smoothing of Cubic Parametric Spline[J]. CSA, 1983, 15(3):175-179
- [56] Llander, J.A.P. Smoothing of Cubic Parametric Spline[J]. CSA, 19233 [R]. 15(3): 288-293
- [57] Farn G, Rem G, Sapidis N, Worsey A.J, Fairing Cubic B-Spine curves[J]. CAGD, 1987(14):91-103
- [58] Sapidis, N. and Farin. G., Automatic Fairing Algrithm for B-Spine Curves[J]. CAD, 1990, 22(2): 121-129
- [59] 穆国旺. 参数三次 B 样条曲线的一种整体光顺方法 [J] .工程图学学报, 1988, 8(1):28-34
- [60] 赵东福. 空间离散点的交互光顺 [J] .机械设计, 2003, 20(4):30-32
- [61] 穆国政, 雷毅. 一种离散型值点列的光顺方法[C]. chinagrap' 98 桂林会议论文集, 1998:80-85

## 致谢

深深地感谢我的导师周新建教授。在课题的研究和论文的撰写过程中，始终都得到了周老师的悉心指导和热情的鼓舞；同时，周老师渊博的知识，严谨踏实的治学态度，诲人不倦的工作作风、优秀的品质和宽厚的为人都给我留下了深刻的印象，将永远成为我学习和工作的榜样。在课题的研究和论文的撰写过程中得到了他的悉心指导和大力协助，他对工作一丝不苟的态度，以及对逆向工程、CAD/CAM 技术方面的渊博知识使我钦佩不已，也让我难以忘怀。

同时感谢学校机电学院的教授和老师以及研究生处的同志对我学业的指导和帮助，感谢江西昌河汽车股份有限公司的大力支持。

深深感谢我的家人对我的理解和支持，使我能够完成学业，我将永远铭记在心。

孙剑萍

## 附录 A B 样条基函数系数表

曲线总 段数 N	曲线段 序号	$b_{11}$ $b_{21}$ $b_{31}$ $b_{41}$	$b_{12}$ $b_{22}$ $b_{32}$ $b_{42}$	$b_{13}$ $b_{23}$ $b_{33}$ $b_{43}$	$b_{14}$ $b_{24}$ $b_{34}$ $b_{44}$
1	1	-1 3 -3 1	3 -6 3 0	-3 3 0 0	1 0 0 0
2	1	-1 3 -3 1	7/4 -9/2 3 0	-1 3/2 0 0	1/4 0 0 0
	2	-1/4 3/4 -3/4 1/4	1 -3/2 0 1/2	-7/4 3/4 3/4 1/4	1 0 0 0
3	1	-1 3 -3 1	7/4 -9/2 3 0	-11/12 3/2 0 0	1/6 0 0 0
	2	-1/4 3/4 -3/4 1/4	7/12 -5/4 1/4 7/12	-7/12 1/2 1/2 1/6	1/4 0 0 0
	3	1/6 1/2 -1/2 1/6	11/12 -5/4 -1/4 7/12	-7/4 3/4 3/4 1/4	1 0 0 0
$\geq 4$	1	-1 3 -3 1	7/4 -9/2 3 0	-11/12 3/2 0 0	1/6 0 0 0
	2	-1/4 3/4 -3/4 1/4	7/12 -5/4 1/4 7/12	-1/2 1/2 1/2 1/2	1/6 0 0 0
	N-1	-1/6 1/2 -1/2 1/6	1/2 -1 0 2/3	-7/12 1/2 1/2 1/6	1/4 0 0 0
	N	-1/6 1/2 -1/2 1/6	11/12 -5/4 -1/4 7/12	-7/4 3/4 3/4 1/4	1 0 0 0
$\geq \geq$	3-N-2	-1/6 1/2 -1/2 1/6	1/2 -1 0 2/3	-1/2 1/2 1/2 1/6	1/6 0 0 0

【注】：此表为两端四重节点二次均匀 B 样条基函数的系数



## 附录 B 追赶法

在曲线曲面设计中,经常会遇到形如式(A)的方程组。由于该类方程组的特点,无需采用传统的消去法,而可应用一种效率更高的算法,称追赶法。现简述如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} b_0 x_0 + c_0 x_1 = d_0 \quad (0) \\ a_1 x_0 + b_1 x_1 + c_1 x_2 = d_1 \quad (1) \\ a_1 x_0 + b_1 x_1 + c_1 x_2 = d_2 \quad (2) \\ \dots \dots \dots \\ a_{n-1} x_{n-2} + b_{n-1} x_{n-1} + c_{n-1} x_n = d_{n-1} \quad (n-1) \\ a_{n-1} x_{n-1} + b_n x_n = d_n \quad (n) \end{array} \right. \quad (A)$$

解:

$$\text{由式(0)} \quad x_0 + \frac{c_0}{b_0} x_1 = \frac{d_0}{b_0}$$

$$\text{令 } p_0 = b_0, q_0 = \frac{c_0}{p_0}, u_0 = \frac{d_0}{b_0}$$

$$\text{则 } x_0 = q_0 x_1 + u_0 \quad (n+1)$$

由式(1)及式(n+1)得到

$$x_1 + \frac{c_1}{b_1 + a_1 q_0} x_2 = \frac{d_1 - a_1 u_0}{b_1 + a_1 q_0}$$

$$\text{令 } p_1 = b_1 + a_1 q_0, q_1 = -\frac{c_1}{p_1}, u_1 = \frac{d_1 - a_1 u_0}{b_1 + a_1 q_0}$$

$$x_1 = q_1 x_2 + u_2$$

同理可得:

$$x_k = q_k x_{k+1} + u_k$$

$$p_k = b_k + a_k q_{k-1}$$

$$q_k = -\frac{c_k}{p_k}$$

$$u_k = \frac{d_k - a_k u_{k-1}}{p_k}$$

对最后一个方程 (n), 有:

$$p_n = b_n + a_n q_{n-1}$$

$$q_n = -\frac{c_n}{p_n} = 0$$

$$u_n = \frac{d_n - a_n u_{n-1}}{p_n}$$

从而可求得  $x_n = u_n$ , 然后可按如下步骤进行回代:

$$x_n = u_n$$

$$x_{n-1} = q_{n-1} x_n + u_{n-1}$$

.....

$$x_0 = q_0 x_1 + u_0$$

最后求得全部未知量  $x_0, x_1, x, \dots, u_n$

## 个人简历、攻读硕士学位期间发表的论文

### 个人简历:

孙剑萍, 女, 江西丰城人, 副教授, 1971 年出生;

1992 年毕业于长沙铁道学院起重运输与工程机械专业, 大学本科, 工学学士;

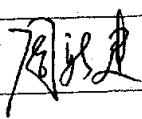
2002 年 7 月入华东交通大学读硕士研究生。

### 攻读硕士学位期间发表的论文:

- [1] 孙剑萍, 周新建. 基于 CAXA 的逆向工程实现技术[J]. 华东交通大学学报, 2006, Vol. 23(2): 71-74
- [2] 孙剑萍, 汤兆平. 车用柴油机达到欧 4 排放标准的策略[J]. 小型内燃机与摩托车, 2005, Vol. 34(5): 20-23

# 华东交通大学

## 硕士学位论文任务书

研究生姓名	孙剑萍	学 号	
学院 (系)	机电工程学院		
专 业	机械制造及其自动化		
专业方向	CAD/CAM		
论 文 题 目	汽车覆盖件逆向工程的曲面重构		
要求完成时间	2006年4月12日		
选 题 来 源	江西省科技厅: <汽车覆盖件逆向工程造型与模具设计>		
<p><b>主要研究任务:</b></p> <p>(1) 分析了国内外反求工程领域研究现状, 阐述了论文的选题依据和主要研究内容。研究了曲面造型理论、方法, 曲面重构技术, 曲面重构的算法, 重点阐述了 B 样条和 NURBS 曲面、三角曲面等曲面造型方法。</p> <p>(2) 提出了对汽车覆盖件等复杂表面进行曲面重构时, 先进行三角曲面造型, 得到三角化模型, 接着对三角化模型求截面线, 将立体的三维数据转化成截平面上的二维数据, 利用平面截面线一维变量自动识别与提取特征点、特征线, 再实现四边域 NURBS 曲面造型的曲面重构新观点。</p> <p>(3) 结合汽车覆盖件的 NURBS 曲线重建实例, 介绍了曲线模型的重建理论, 突出 NURBS 曲线的数学形式及其特点、重建步骤及计算方法。</p> <p>(4) 研究了曲线和曲面的光顺及评价准则、方法在实际曲面重构中的指导意义。</p> <p>(5) 以 THUNDER RACER 赛车模型的整车曲面重构为例, 介绍了整车复杂外表面造型的技巧; 以 CAXA 软件作为主导, 分析了如何利用国产软件, 实现逆向工程中的快速制造。</p>			
接受任务时间	2005年4月10日	学生签名	孙剑萍
导 师 签 名		日 期	05年4月10日