

反求工程技术 及应用

康兰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

反求工程技术 及应用

康兰 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要在破损产品的数字化修补、特征和约束的重建、正向设计与反求设计相结合等方面进行了探索和研究。全书共分5章,分别介绍了反求工程技术、数据测量及预处理、产品数字化修补技术研究、反求工程中特征和约束重建研究、正向与反求相结合的零件反求设计。

本书可作为工科院校机械数、计算机类专业的研究生教材,也可供相关专业的教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

反求工程技术及应用 / 康兰著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2012. 12
ISBN 978-7-5170-0516-2

I. ①反… II. ①康… III. ①机械设计—计算机辅助设计 IV. ①TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第315260号

书 名	反求工程技术及应用
作 者	康 兰 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	140mm×203mm 32开本 5.25印张 141千字
版 次	2012年12月第1版 2012年12月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	20.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言

反求工程 (Reverse Engineering), 也称逆向工程, 是指通过对一设备、实物模型或系统进行结构、功能及操作方面的分析得到其技术原理的过程。反求工程技术是测量技术、数据处理技术、图形处理技术和加工技术相结合的一门结合性技术。随着计算机技术的飞速发展和上述各技术的逐渐成熟和发展, 近年来反求工程技术在新产品设计开发中发挥着越来越重要的作用。

从广义上讲, 反求工程包括许多方面, 如对机械产品、电子元件、软件程序、生物制品、化学制品等的分析与反求, 以便得到其原始的技术数据, 用于后期产品的维修保养或软件程序的管理维护等方面, 或为了一个特定目的得到原来产品的复制品。在工业产品设计领域, 反求工程是指用数据采集设备获取实物样件表面或内腔数据, 输入专门的数据处理软件或带有数据处理功能的三维 CAD 软件进行处理和三维重构, 用计算机重建实物样件的几何形状, 并在此基础上进行原样复制, 修改或重新设计。该方法主要用于对难以精确表达的曲面形状或对未知设计方法的构件形状进行三维重构和再设计。

目前, 虽然反求工程技术在实际中得到了较好的应用, 国外已开发出许多用于反求设计的软件, 但目前反求中所用的方法都是以基于边或基于面的方法进行数据分块, 再通过分块数据完成线或面的拟合, 得到若干小曲面片, 将这些曲面片通过拼接得到物体的各个面, 从而重建出产品的数字化 CAD 模型。这种方法重建的产品 CAD 模型只是对已有产品表面形状的简单复制, 反求模型是表面模型, 没有实体的特征信息, 也没有包含能为下游 CAE、CAM 等后续分析及加工所用的有关特征及工程约束等高层次的产品信息, 因而不能对 CAD 模型进行更进一步的编辑修

改和再设计，这一问题也是目前制约反求工程向更高方向发展的瓶颈问题。

因此，在未来反求工程技术中，如何借鉴产品正向设计的过程和建模方法，引入参数化技术、特征技术及基于约束的设计思想，是至关重要的。在反向工程建模后期应用正向设计的建模思想，通过特征和约束关系的重建不仅完成物体形状的重建，更主要的是从离散的点云数据中重建包含在产品原型中的设计者的设计意图，重建出产品的参数化几何信息及各种隐含的约束关系，从更高的层次上复原实物的“本来面目”。这些都将是未来反求CAD建模技术的发展趋势和研究方向。

本书主要在破损产品的数字化修补、特征和约束的重建、正向设计与反求设计相结合等方面开展了一些探索和研究工作。全书共分5章，第1章在介绍国内外对反求工程技术研究现状的基础上，探讨了反求技术在各个不同领域中的应用现状、前景及未来的发展趋势。第2章从数据测量的源头开始对扫描误差源进行分析，找到测量误差来源，并通过对误差源的分析，找到减小误差的测量方法，力争使测量误差减小到最小。同时如何对较大的零件或具有大面积的零件及零件的细小特征部分等非常规件进行测量方面，给出了测量的方法，为实际工程中物体的测量提供一些参考，并对组件数据的测量及分割给出了切实可行的解决方案，同时对海量点云数据的精简算法进行了探讨，提出了基于八叉树的数据精简算法，在曲率小的型面减少大量的冗余数据，在曲率大的型面保留较多的数据点，从而有效地保留零件的局部特征。第3章对缺损点云模型的数字化修补进行了研究，并提出了一种点云孔洞修补算法。算法在边界提取时采用了三角网格划分的方法，提高了搜索效率，在点云填充阶段增加了点云网格细分优化处理，并利用Laplacian算子对顶点进行了更进一步的优化，实现新插入内点与原始点云的光滑过渡。第4章通过对反求工程中如何定义和识别特征及约束的研究，在反求工程领域引入特征、约束及参数化技术这一领域作了一些初步的基础研究工

作。第 5 章中为解决反求工程中存在的前面所提到的瓶颈问题，使得反求技术能更好地应用于实际工程中，提出将反求设计与正向设计相结合，利用现有逆向设计软件及三维 CAD 特征建模软件各自在处理数据及建模方面的优势，实现反求设计中特征和约束的重建及参数化设计，使最终反求的产品符合正向设计理念，为设计者提供快速实用的基于特征和约束的反求设计思想和方法，并在实践中应用这一集成的方法为企业提供服务。实践证明，这一集成方案是较好的解决方案。

由于作者水平有限，书中还存在许多的不足，欢迎读者批评指正，欢迎对反求工程技术感兴趣的同行们一起和作者进行交流与沟通。衷心感谢各位读者能够提出宝贵意见。

作者

2012 年 9 月 1 日

目 录

前言

第 1 章 反求工程技术	1
1.1 反求工程技术概述	1
1.2 反求工程建模方法	12
1.3 反求工程的应用领域	14
1.4 反求工程技术的发展	25
第 2 章 数据测量及预处理	31
2.1 数据测量	32
2.2 测量实例的分析	38
2.3 组件数据的分割	42
2.4 海量点云数据的精简	43
第 3 章 产品数字化修补技术研究	56
3.1 国内外研究综述	57
3.2 数字化修补技术研究	58
3.3 三角网格化点云模型	59
3.4 孔洞边界提取及填充算法	62
3.5 孔洞填充区域的网格优化	69
3.6 孔洞填充效果的验证实例	70
3.7 数字化修复系统的开发及应用实例	73
第 4 章 反求工程中特征和约束重建研究	86
4.1 反求工程中特征的研究	87
4.2 B 样条曲线反求	93
4.3 特征曲面反求	99

4.4 反求工程中约束重建的研究	107
第5章 正向与反求相结合的零件反求设计	117
5.1 正向与反求相结合的设计流程	118
5.2 特征点	120
5.3 Imageware 简介	121
5.4 数据预处理	134
5.5 曲线重建	142
5.6 曲面重建	146
5.7 正向与反求设计相结合的设计	147
参考文献	156

第 1 章 反求工程技术

1.1 反求工程技术概述

1.1.1 反求工程简介

反求工程 (Reverse Engineering), 也称逆向工程, 这一术语起源于 20 世纪 60 年代, 属于逆向设计的一种思维方式。反求工程技术是测量技术、数据处理技术、图形处理技术和加工技术相结合的一门结合性技术。随着计算机技术的飞速发展和上述各技术的逐渐成熟和发展, 反求设计技术近年来在新产品设计开发中越来越多地得到应用, 因为在某些产品的开发过程中需要以实物 (样件) 作为设计参考模型或作为最终验证设计的依据时尤其需要应用该项技术。所以在汽车、摩托车的外形覆盖件和内装饰件的设计、家电产品外形设计、艺术品复制中, 反求工程技术有着广泛的应用前景。

反求工程技术是指通过对一设备、实物模型或系统进行结构、功能及操作方面的分析得到其技术原理的一个过程^[1]。从广义上讲, 反求工程包括许多方面, 如对机械产品、电子元件、软件程序、生物制品、化学制品等的分析与反求, 以便得到其原始的技术数据, 用于后期产品的维修保养或软件程序的管理维护等方面, 或为了一特定的目的得到原来产品的复制品。在工业产品设计领域, 反求工程是指用数据采集设备获取实物样件表面或内腔数据, 输入专门的数据处理软件或带有数据处理功能的三维 CAD 软件进行处理和三维重构, 在计算机上再现实物样件的几何形状, 并在此基础上进行原样复制, 修改或重设计, 该方法主要用于对难以精确表达的曲面形状或未知设计方法的构件形状进

行三维重构和再设计。

反求工程技术最初的目的主要是用于以硬件分析为目的的商业领域及军事领域中^[2]，其主要的目的是在对硬件设备或其软件所包含的原始设计意图及原理不知道或所知甚少的情況下，利用各种分析手段推断出产品或软件的原始设计方案，在原始技术数据不全或缺失的状况下，通过反求获取其原始的设计数据，补充没有或缺失的数据及技术文档，以便对设备及软件进行维护。

反求工程技术得到较快发展的时期可追溯到第二次世界大战及其后的冷战时期。战争时期交战双方获得对方的核心产品的实物模型后，迅速组织技术力量进行反求，从而复制出完全一样的产品，或对原来的产品在原有技术水平的基础上进行改进，得到功能或性能等方面比原始产品更好的产品，以便在装备上不输给对方。历史上比较著名的反求例子例举如下：

(1) 德国在 20 世纪 30 年代初为军用目的而设计的能装 20L 燃料的汽油桶，如图 1.1 所示。这一产品使用时只需要一个漏斗就可装油，不同的颜色代表里面所装燃料的不同，上面特有的手柄可供一个人或两个人方便携带，如图 1.2 所示，其设计在当时是军事机密。即使在今天，类似的装水、装油等的容器仍然广泛应用于人们的日常生活中。1939 年美国工程师 Paul Pleiss 从德国人那里得到这样的一只汽油桶^[3]，其后送到美国的有关军事设计部门进行了反求，美军在保留原来的把手、大小及形状的基础上对其进行了改进设计，并且改进后的设计优于德国人的原始设计，之后这些汽油桶被用于美国在第二次世界大战时期的各个战区。后来英国人及苏联人先后也在德国人原始设计的基础上通过反求得到了更好的设计产品^[3]。

(2) 第二个与反求设计相关的著名例子是第二次世界大战时期由德国研制的 V-2 火箭，是世界上第一个采用液体燃料推进的火箭，战后西方盟国根据从战争中得到的实物进行反求，此后英国、美国、苏联等国家先后相继研制出了以 V-2 为雏形的火箭系统，如苏联的 R-1、R-2 及 R-5 火箭系统。透过残酷的

战争，我们从技术发展的层面上可以看出，反求工程技术最初的广泛应用是在军事领域中。



图 1.1 德国制造的汽油桶

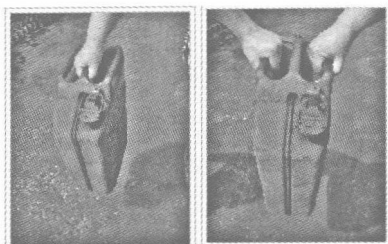


图 1.2 可供一人或两人方便携带的汽油桶

第二次世界大战后反求技术除应用于军事领域外，逐步被应用于民用工业领域，产品设计的过程实际上也是信息处理和表达的过程，在社会发展的不同时期，由于生产力发展水平和科学技术水平的不同，产品信息的表达方式也不同。在 20 世纪 60 年代末，随着计算机图形生成和处理技术及计算机硬件和软件的飞速发展，产品信息的处理和表达开始采用计算机模型来表达。计算机建模技术的发展先后经历了线框几何模型、表面几何模型、实体模型、参数化特征模型几个主要发展阶段。综观 CAD 技术的发展历程，可以看出，居于 CAD 技术理论核心的建模技术的每一次重大进展，都会带来 CAD 技术的重大进步和 CAD 技术的发展，也推动了反求技术的发展，为反求技术的研究提出了更多的研究领域。由于反求工程是要以从实物模型上所获得的相互间没有空间拓扑关系的点来建立产品的 CAD 模型，因而对计算机图形生成和处理技术方面带来了许多挑战。其中涉及各种复杂的算法及集成处理技术。

1.1.2 CAD 设计流程

目前，工业产品的设计从产品的概念设计开始，直到产品的加工制造等各个环节都离不开 CAD/CAM/CAE/CAPP 等计算

机技术的支持，三维计算机数字化模型是表达产品信息的主要表达方式。现在的 CAD 设计方式是从产品的概念设计阶段开始，通过对产品的功能要求进行分析、定义设计约束，进行设计构思、方案制定和筛选，逐步形成产品的概念模型，并进行详细的设计，用计算机数字化三维模型将产品的最终设计结果表达出来，并进行有关的计算机辅助分析和模拟，最终完成产品的设计。再以此模型为数据源进行后期的 CAE/CAPP/ CAM 设计等，最终完成产品的制造，产品从无到有的这一建模设计过程在产品设计中占主导地位，这种建模的方式是一种正向设计方式。

在工业设计领域，产品的反求主要包括形状反求、功能结构反求、工艺反求和材料反求等几个方面。从形状反求的角度出发，正向建模技术是从无到有的设计过程，而反求工程则是从产品原型出发，进而获取产品的三维数字化模型。目前工业领域中对反求技术的研究主要是针对形状反求方面的研究，这也是本书所关注的研究领域。正向设计与反求设计从概念上讲虽然是两个不同的领域，但两者在实际应用中又有许多交叉的地方，它们都为产品从设计开始、制造、投入使用及使用中的维护整个产品生命周期提供原始的产品设计数据，如图 1.3 所示。

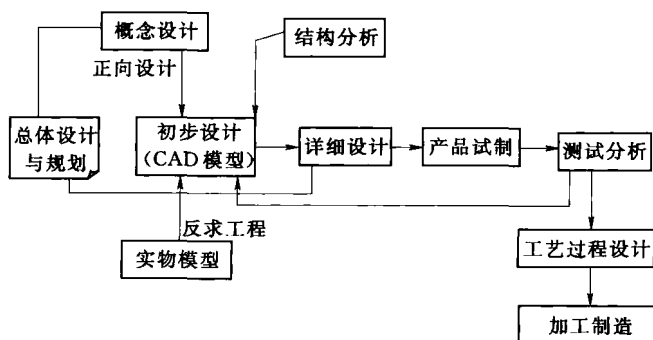


图 1.3 正向与逆向设计为产品加工制造提供数据源

1.1.3 反求 CAD 设计

由于 CAD 技术及先进的测量技术的发展，推动了反求设计的发展及应用，使得在基于实物的基础上能够利用 CAD 技术及测量技术通过反求得到实物的数字化 CAD 模型。从大的方面讲，反求设计包括数据测量及模型重构两个方面，通过测量将被测实物表面离散为无数个点，获得这些点的三维空间坐标，由这些离散的三维空间坐标组成的点集来表示原来的实物模型，这一点集模型被称为是点云模型。点云模型并不包含物体的有关拓扑信息，而且这些点除了空间的坐标信息外，相互间也没有任何的关系信息。

目前数据的测量可通过多种三维扫描技术来完成，如三坐标测量机（CMM）、三维激光扫描、工业计算机断层扫描等。完成数据测量后，后期模型的重构成为反求的关键和核心技术，其关键是如何在基于物体表面这些离散点的基础上，通过 CAD 技术来构建物体的表面，在保证重构误差满足使用要求的前提下，数字化还原再现物体的原有表面。之后在 CAD 模型的基础上完成产品的加工制造，或在原有模型的基础上进行再设计创新，得到改进的产品模型后，再进行加工制造投入使用。

反求工程技术从基于实物的设计开始直到完成最终产品的设计，得到产品原型，最终的 CAD 模型主要用于四个方面：一是将产品的点云模型导入，与产品的原 CAD 模型进行分析比对，以检测制造误差，给出制造误差分析的详细报告；二是由反求的表面 CAD 模型输出成 STL 格式的模型，将数据导入快速成型机中，完成产品原型的加工；三是将表面 CAD 模型输入至三维 CAM 系统中，进行数控仿形加工，完成产品表面的仿形加工；四是如果产品是需要模具来加工成型，则根据产品的 CAD 表面模型，设计出成型该表面模型的模具，完成模具的制造加工，再由此模具制造出所需要的产品原型来，如图 1.4 所示。

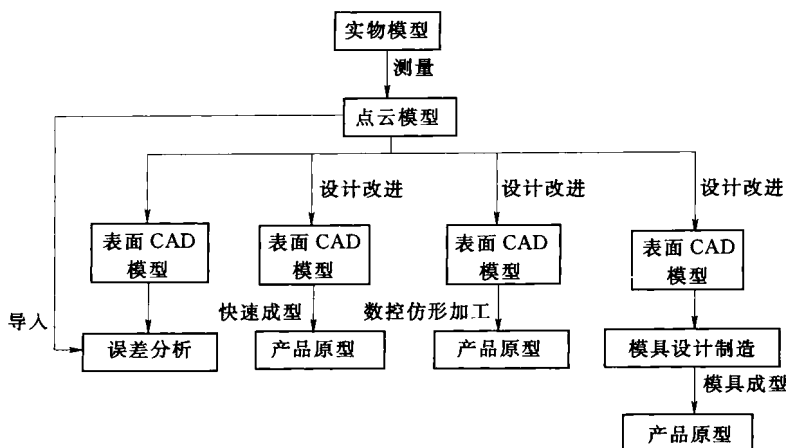


图 1.4 反求模型在产品设计与制造中的用途

1.1.4 反求工程系统的组成

1.1.4.1 硬件系统

从前面分析可看出，逆向工程的原始数据来源是已有的产品模型，因此，首先要对产品实物样件表面进行测量，将物体表面离散为空间点，得到各空间点的三维坐标，然后依据得到的数据再利用有关的反求技术及有关反求软件反求出物体的 CAD 模型，并进一步利用 CAD/CAE/CAM 系统进行分析、再设计、数控编程、数控加工，得到所需要的产品。因此要建立一套完整的逆向工程系统，必须要有相应的硬件设备，首先是测量系统。目前测量方法及设备主要有三种：一是接触式测量法，如触发式、连续扫描式；二是非接触式测量法，如超声波法、电磁法、全息法、光学测量法；三是逐层扫描测量法，如工业法、核磁共振法、断层扫描法等。目前在工业产品的反求工程中主要用接触式测量法和非接触式光学测量法，其中三坐标测量机（CMM）是应用广泛的接触式测量设备，由德国 GOM 公司研制的 ATOS 系统是非接触式光学测量系统的典型代表。

三坐标测量机（CMM）是通过其测量传感器探针沿被测物体表面运动时，探针尖因受力产生微小变形，触发采样中的开关，使数据采集系统记下探针中心点的当时坐标，逐点移动，就能采集到样件表面轮廓点的三位空间坐标数据。常用的三坐标测量机如图 1.5 所示，可用于对不同工件的测量。由于接触式探针有一定的大小，不能对一些孔、槽等内尺寸较小的工件进行测量；接触探头在测量时，探头的力将使探头尖端部分与被测件之间发生局部变形，从而影响测量的精度，因而不能测量软工件、不可接触的高精度工件。接触式测量的探头是以逐点方式进行测量的，所以测量速度慢。测量的路径需要人工设置，目前还无法实现全自动测量。CMM 主要用于制造误差的检测中，在表面形状的反求测量中主要用非接触式光学测量系统，尽管非接触式测量其测量精度会受到测量环境及工件表面质量的影响，如工件表面颜色、反射特性、工件表面的反射光或散射光、工作表面的粗糙度等都会影响测量的精度，但由于其测量速度快，不必逐点进行测量，因此在工业产品的测量中可测量表面为不规则的自由曲面的物体表面，还可测量大面积物体表面，可以获得海量点云数

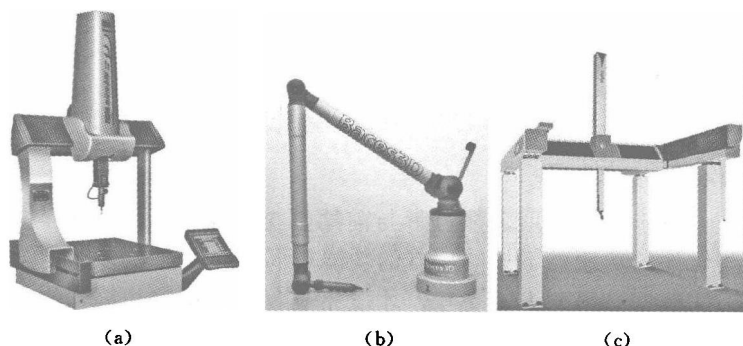


图 1.5 三坐标测量机

- (a) 小型手动精密测量机；(b) 便携式三坐标测量机；
(c) 龙门式三坐标测量机

据，这样后期反求建模的精度会较高，因此总体的反求精度比 CMM 要高，本书中所有的数据都是由 ATOS 测量系统测量得到的。ATOS 测量系统如图 1.6 所示。光栅测量原理如图 1.7 所示。

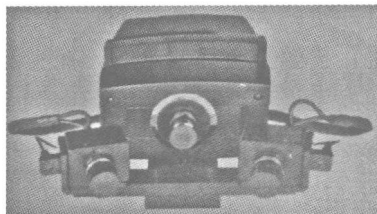


图 1.6 ATOS 测量系统

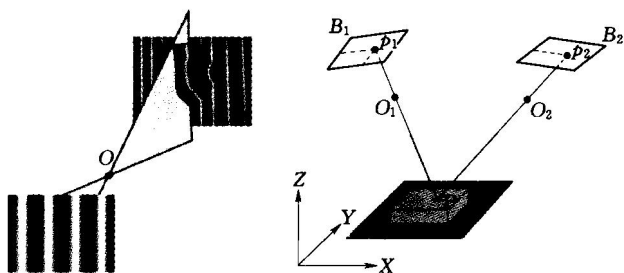


图 1.7 光栅测量原理图

1.1.4.2 软件系统

一般来讲测量系统都自带与前期数据测量相关的处理软件，这些软件的功能各不相同，有的功能较弱，经过多次多角度测量得到的数据必须要人工交互，才能完成数据的拼接，得到物体表面完整的点云模型。有的软件功能较为强大，在测量的过程中能自动完成多次测量数据的拼接。但无论其功能如何，这些硬件系统自带的软件都是为测量得到物体表面完整的点云模型提供服务的。但要根据点云模型反求物体的 CAD 模型，必须要有专门的反求设计软件来进行后期数据的处理与重建。

目前,国外一些公司已开发出了用于逆向设计的商业化软件,其中著名的逆向工程软件有:由美国 EDS 公司开发的 Imageware,美国 Raindrop 公司开发的 Geomagic Studio,由英国 DELCAM 公司开发的 CopyCAD,韩国 INUS 公司开发的 RapidForm。此外还有英国 Renishaw 公司的 TRACE,英国 MDTV 公司的 STRIM and Surface Reconstruction 等系统。除此之外,一些参数化的 CAD/CAM 系统,如美国 PTC 公司的 Pro/Engineer、美国 UGS 公司的 Unigraphics 与美国 IBM 公司的 CATIA 等在其系统也集成了可实现逆向三维造型设计的模块,但与专业的逆向工程软件相比,它们在功能上有较大局限性。由于理论和科学技术的限制,目前这些逆向设计软件的数据处理技术和造型技术仍不完善,这是由于大多数软件是针对具体的应用开发的,数据处理往往通用性差,有时需要借助几个软件才能实现产品的快速开发与制造。有许多与反求有关的技术问题还有待进一步的研究与开发。

不同的逆向工程软件其采用的反求工程建模策略和系统建构方式不同,在特征的定义和运算上有较大的差异,因而适用于不同领域。如 Imageware 提供了各种二次曲面特征和辅助特征的拟合提取功能;可以提供诸如任意截面的连续性、曲面反射线情况、高亮度线、光谱图、曲率云图和圆柱形光源照射下的反光图等多种方法,在设计的过程中可以检查出曲面的微观缺陷,可以生成更准确和光顺的曲面。还可利用表面曲率的变化将具有不同特征表面的点云数据分割开来,按各自的曲面特征采用不同的建模策略进行重建,再进行缝合等处理得到完整的表面模型。由于 Imageware 在计算机辅助表面检查、曲面造型等方面所具有的强大功能,因而成为逆向工程领域中的一应用最为广泛的软件。Geomagic Studio 提供了数据测量 (Capture)、数据网格化 (Wrap)、曲面构件 (Shape)、网格压缩 (Decimate) 等功能程序包,在曲面重建时,可依基于网格识别特征并进行特征分块及曲面参数化。在 Metris 的 Surface 模块中,可以直接基于点云数