

逆向工程

原理·方法及应用

刘伟军 孙玉文 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



JH122
195
10

逆向工程

——原理、方法及应用

刘伟军 孙玉文 等编著



机械工业出版社

逆向工程技术是根据已有的产品或零件原型构造产品或零件的工程设计模型,并在此基础上对已有的产品进行剖析、理解和改进。逆向工程技术已成为快速产品开发的重要支撑技术。本书主要内容包括:数据采集与所涉及到的关键测量技术;离散数据的预处理技术;散乱数据和截面轮廓数据三角剖分;细分造型技术的细分模式,收敛性、连续性和误差分析等;NURBS曲线、曲面的插值与逼近方法; G^0 、 G^1 、 G^2 几何连续性拼接;逆向工程软件Imageware主要模块的功能和实现方法;CAD几何模型的数控加工;刀具路径规划;数控机床的结构特点;后置处理和加工仿真实验证等;加工定位与质量评价问题的数学模型、对应关系的建立、变换矩阵求解、优化方法选择等。本书所论述的绝大部分内容均在工程中得到了应用和验证。

本书不仅适合初学者和高等院校本科生学习和辅导之用,对研究生和专业工程技术人员也具有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

逆向工程——原理、方法及应用/刘伟军等编著. —北京:机械工业出版社, 2008.9

ISBN 978-7-111-24984-9

I. 逆… II. 刘… III. 机械设计 IV. TH122

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第128932号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:李万宇 责任编辑:郑 铨 版式设计:霍永明

责任校对:陈延翔 封面设计:姚 毅 责任印制:杨 曦

三河市国英印务有限公司印刷

2009年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·19.25印张·375千字

0001—4000册

标准书号:ISBN 978-7-111-24984-9

定价:35.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68351729

封面无防伪标均为盗版

前 言

逆向工程技术是根据已有的产品或零件原型构造产品或零件的工程设计模型,并在此基础上对已有的产品进行剖析、理解和改进,是对已有设计的再设计,本质上是一个“认识原型—再现原型—超越原型”的过程。几十年来,人们不断地探索实用高效的逆向工程原理和方法,取得了颇为显著的成果。至今,逆向工程已成为快速产品开发的重要支撑技术。考虑到很多的研究成果仅能在一些期刊中查阅到,这给广大学生以及工程技术人员学习和了解逆向工程带来很大的不便。为此,结合多年的逆向工程研究和应用实践,我们写成此书,奉献给读者。

本书共分 10 章,内容包括以下 5 个方面:

(1) 数据采集与数据预处理部分 第 1 章至第 3 章分别叙述逆向工程的内涵与意义、关键技术、应用领域与发展趋势等;逆向工程中所涉及到的关键测量技术以及当前广泛使用的几种测量方法的原理和测量精度分析;离散数据的预处理技术,包括异常数据剔除、遗失点补齐、数据平滑、数据精减、数据融合与分割及特征提取等操作。

(2) 三角网格重建与细分造型 第 4 章详细介绍了散乱数据和截面轮廓数据三角剖分的准则和剖分方法以及基于体数据场的 Marching Cubes 方法。第 5 章详述了基于三角网格和混合网格的细分造型技术,主要包括细分曲面的概念和基本性质, Catmull-Clark、Doo-Sabin 和 Loop 等几种典型的细分模式,收敛性、连续性和误差分析等内容。

(3) NURBS 重构方法与工程软件功能简介 第 6 章阐述了 NURBS 曲线、曲面的插值与逼近方法; G^0 、 G^1 和 G^2 几何连续性拼接的条件与方法等内容。第 7 章主要介绍了逆向工程软件 Imageware 主要模块的功能和实现方法。

(4) 快速原型部分 第 8 章和第 9 章主要阐述了基于 CAD 几何模型的数控加工,主要包括数控加工的各种刀具路径规划方法的特点,路径规划方法实现的具体步骤及其适用的范围,数控机床和数控系统的基本概念,数控机床的结构特点,后置处理和加工仿真验证等内容。

(5) 加工定位与质量评价部分 第 10 章详述了加工定位与质量评价问题的数学模型、对应关系建立、变换矩阵求解、优化方法选择及在工程中的应用等内容。

本书在保留经典方法的基础上注重吸收最新研究成果,所论述的内容均经历

了学习和吸收阶段，编制了相应的计算机程序来加以实现，绝大多数内容均在工程中得到了应用和验证。全书内容较为新颖和全面，兼顾了广大读者的不同需求，适用面较宽。本书不仅适合初学者和高等院校本科生学习和辅修之用，对研究生和专业工程技术人员也具有重要的参考价值。值得说明的是，虽然本书各章均系独立的专题，但因篇幅所限，每章展开有限，因此读者如果想要更加深入和全面了解相关知识，建议查阅更多的文献。

本书由刘伟军、孙玉文主持撰写，有多位博士和硕士参加了写作、文字整理和图片搜集等工作。其中，第1、2、3、6、7章由孙玉文执笔；第4章由夏仁波、孙玉文和刘伟军共同执笔；第5章由刘伟军执笔；第8、9章由李论、刘伟军、田凤杰和普雄鹰共同执笔；第10章由刘伟军和徐金亭、孙玉文共同执笔。全书由刘伟军和孙玉文主审和统稿。吴剑煌对第5章的编写提出了宝贵的修改意见。此外，吴瑞敏、王刚和李国栋三位硕士按出版社要求制备插图和整理文字。

在本书出版之际，谨向参加本书编著工作的博士、硕士们表示由衷的感谢。同时，也感谢两位编著者此前指导的多位研究生为本书所做的工作。也感谢所有为丰富本书内容而写进本书的引用文献中的各位作者。

由于作者水平有限，书中难免会存在缺点和错误，恳请读者批评指正，在此提前向各位读者致谢！

刘伟军 孙玉文

中国科学院沈阳自动化研究所 大连理工大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 逆向工程的内涵与意义	1
1.2 逆向工程的关键技术	2
1.3 逆向工程的应用领域与发展趋势	3
第 2 章 数据获取方法	5
2.1 逆向工程测量技术	5
2.1.1 测量方法的综述	5
2.1.2 部分测量方法简介	6
2.2 三坐标测量机.....	8
2.2.1 三坐标测量机对三维测量的作用	9
2.2.2 三坐标测量机的原理及分类	9
2.2.3 测量过程	12
2.2.4 三坐标测量机的发展现状及趋势	13
2.3 激光三角测量技术	16
2.3.1 激光三角形测量原理	16
2.3.2 影响激光三角形法测量精度的因素	19
2.4 双目立体视觉测量技术	20
2.4.1 立体视觉测量技术简述	20
2.4.2 数学模型	22
2.4.3 双目立体视觉精度分析	26
参考文献	27
第 3 章 数据预处理技术	29
3.1 测量数据的剔除、修补	29
3.1.1 异常点处理	29
3.1.2 数据修补	31
3.2 点云数据的滤波	34
3.2.1 数据平滑	34
3.2.2 数据噪声检测、滤波算法	36
3.3 数据精简技术	39
3.3.1 最大允许偏差精减法	40
3.3.2 均匀网格法与非均匀网格法	40

3.4	点云数据特征提取	44
3.4.1	边界点提取	44
3.4.2	曲面离散数据特征点提取方法	45
3.5	点云数据的分割、对齐与分层	48
3.5.1	常用的数据分割方法	48
3.5.2	多视点云对齐	50
3.5.3	点云分层方法	52
	参考文献	55
第4章	数据三角化与数据重建	57
4.1	数据三角化的基本方法与优化准则	57
4.1.1	三角网格优化准则	57
4.1.2	Delaunay 三角化方法	59
4.1.3	生长三角剖分算法	62
4.1.4	螺旋边三角剖分法	63
4.2	散乱数据的三角剖分	65
4.2.1	基本概念	65
4.2.2	问题描述	65
4.2.3	剖分区域内数据提取方法	66
4.2.4	数据结构	66
4.2.5	初始三角剖分	67
4.2.6	网格优化	68
4.3	基于二维轮廓的三角网格重建	69
4.3.1	单轮廓线之间的三角网格重建	69
4.3.2	非凸单廓线之间的曲面重建	72
4.3.3	多廓线之间的曲面重建	74
4.4	基于体数据场的三角网格重建	77
4.4.1	体数据的构造	77
4.4.2	Marching Cube 算法	79
4.4.3	保证拓扑正确的高精度曲面重建算法	83
	参考文献	102
第5章	细分造型技术	106
5.1	细分曲面的发展及应用前景	106
5.1.1	细分曲面的研究进展	106
5.1.2	细分方法的应用	107
5.2	细分曲面的基本概念及性质	109
5.2.1	基本概念	109
5.2.2	细分曲面的收敛性及连续性分析	112
5.2.3	细分曲面的几何属性计算	114

5.3 典型的细分模式	115
5.3.1 细分模式的分类	115
5.3.2 典型的细分模式	116
5.3.3 细分模式比较	132
5.4 细分曲面的误差分析	134
参考文献	138
第 6 章 NURBS 曲线曲面重构	143
6.1 B 样条曲线和曲面基础	144
6.1.1 B 样条基函数的递推定义及性质	144
6.1.2 B 样条曲线	144
6.1.3 B 样条曲面	146
6.2 数据点的参数化方法	147
6.2.1 曲线数据点的参数化	148
6.2.2 曲面数据点的参数化	149
6.3 B 样条曲线重构	157
6.3.1 曲线拟合的概念	157
6.3.2 B 样条曲线插值	158
6.3.3 B 样条曲线逼近	159
6.4 B 样条曲面重构	161
6.4.1 B 样条曲面插值	161
6.4.2 B 样条曲面逼近	165
6.5 卷曲模型的自动建模策略	167
6.5.1 点集的平面映射	167
6.5.2 边界数据的自动提取	168
6.5.3 双线性 Coons 插值	170
6.5.4 曲面建模	171
6.6 曲面拼接	171
6.6.1 曲面拼接类型	172
6.6.2 B 样条曲面的几何连续性条件	173
6.6.3 G^2 约束的 B 样条曲面拟合	176
参考文献	181
第 7 章 Imageware 曲线、曲面基础	183
7.1 Imageware 简介	183
7.2 Imageware 模块	183
7.3 曲线创建	186
7.3.1 自由曲线	186
7.3.2 规则曲线和手工绘制曲线	189
7.4 曲面创建	189

7.4.1	常用命令	189
7.4.2	具体用法	190
7.4.3	具体实例	194
第8章	数控加工刀位轨迹生成	200
8.1	数控加工刀位规划的基础知识	200
8.2	刀具路径生成方法的分类	202
8.2.1	等参数法	203
8.2.2	笛卡儿法	205
8.2.3	APT法	207
8.2.4	构形空间法	209
8.3	粗加工刀具路径生成	213
8.3.1	粗加工的刀位曲面构造	213
8.3.2	刀具路径生成步骤	214
8.3.3	生成边界凹曲面曲线	216
8.3.4	生成轮廓平行偏置曲线	218
8.3.5	残余区域处理	219
8.3.6	轮廓平行偏置路径的连接	220
8.4	精加工刀具路径生成	221
8.4.1	精加工的基本问题	221
8.4.2	路径评价指标规划和刀具路径生成	223
8.4.3	刀具路径连接	224
8.5	清根加工刀具路径生成	227
8.5.1	清根加工刀具路径简介	227
8.5.2	基于Z-map模型的补加工刀具路径生成	228
8.5.3	铅笔切削刀具路径的生成	233
8.6	五轴数控加工刀位轨迹生成	233
8.6.1	等参数法	233
8.6.2	构形空间法	235
	参考文献	238
第9章	数控加工的后置处理	240
9.1	数字控制技术	240
9.1.1	数控机床和数控系统的基本概念	240
9.1.2	数控加工程序的编制	243
9.1.3	APT自动编程语言	248
9.2	五轴数控加工技术	250
9.2.1	五轴数控加工技术的优点	250
9.2.2	五轴数控机床的结构特点	251
9.2.3	五轴数控加工的技术难点	253

9.3 后置处理技术	253
9.3.1 五轴数控机床的运动学求解	254
9.3.2 通用后置处理程序	260
9.4 刀具路径仿真验证	261
参考文献	263
第 10 章 加工定位优化与加工质量评价方法	264
10.1 测量定位问题的描述及研究进展	265
10.1.1 测量定位问题的描述	265
10.1.2 测量定位方法的研究进展	265
10.1.3 测量定位实现的关键问题	266
10.2 测量定位的变换矩阵求解	268
10.2.1 刚体运动学基础	268
10.2.2 变换矩阵求解	269
10.3 基于最近点的对应关系计算	271
10.3.1 距离函数	271
10.3.2 点到参数曲面最近点的计算	272
10.4 精密复杂型面任意位姿寻位加工	279
10.4.1 基于曲率特征的初始定位	279
10.4.2 自由曲面零件的精确定位	284
10.5 复杂曲面整体、局部加工余量优化	286
10.5.1 加工余量优化问题的数学描述	286
10.5.2 加工余量均布的约束优化	287
10.5.3 复杂曲面加工余量优化算法	288
10.6 复杂型面加工质量评价方法	289
10.6.1 复杂型面上检测点的数量及分布	290
10.6.2 复杂型面加工检测中的精确定位方法	292
参考文献	294

第 1 章 绪 论

1.1 逆向工程的内涵与意义

逆向工程 (RE, Reverse Engineering) 又称之为反求工程、反向工程。广义的逆向工程包括形状 (几何) 反求、工艺反求和材料反求等诸多方面, 是一个复杂的系统工程。目前, 有关逆向工程的研究主要集中在形状反求方面。因此本书提及的逆向工程, 是指用一定的测量手段对实物或模型进行测量, 根据测量数据采用三维几何建模方法重构实物的 CAD 模型的过程; 是一个从样品生成产品数字化信息模型, 并在此基础上进行产品设计开发及加工制造的全过程。作为一种逆向思维的工作方式, 逆向工程技术与传统的产品正向设计方法不同。它是根据已存在的产品或零件原型来构造产品的工程设计模型或概念模型, 在此基础上对已有产品进行解剖、深化和再创造, 是对已有设计的再设计。开展逆向工程研究, 旨在通过对已有的较先进产品的设计原理、结构、材料、工艺装配等方面进行分析研究, 研制开发出性能、结构等方面与原型相似甚至更为先进的产品。因此逆向工程是一系列分析方法和应用技术的结合, 是一个“认识原型—再现原型—超越原型”的过程 (图 1-1)。

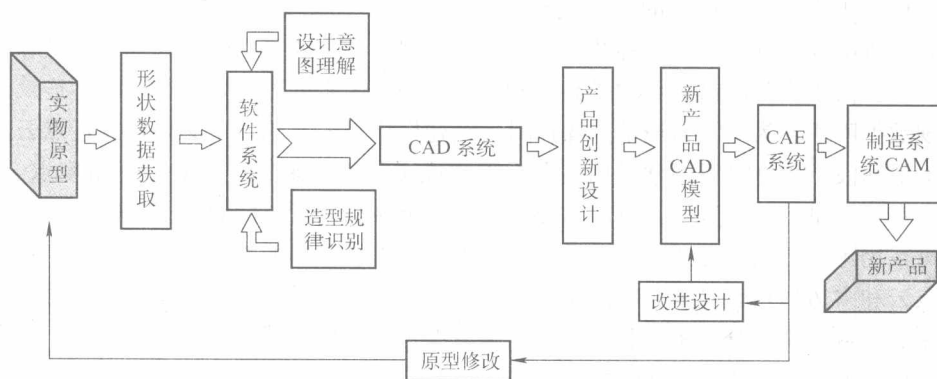


图 1-1 逆向工程流程

逆向工程技术历经几十年的研究与发展, 已经成为产品快速开发过程的重要支撑技术之一。它与计算机辅助设计、优化设计、有限元分析、设计方法学等有

机组合,构成了现代设计理论和方法的整体。目前,随着社会生产的不断发展,作为制造业三要素的质量、成本、生产率的重要性也在悄然发生变化。制造业已经经历了以价格、质量为主导因素的竞争时期,如今产品研发速度逐渐成为当代企业赢得全球竞争的第一要素。时间因素被提到了首要位置。在由工业经济时代迈向知识经济时代的进程中,制造业间的竞争特征也已经从竞争自然资源向竞争“创新”转变,产品的快速创新设计开发能力已经成为决定企业兴衰的重要因素。总之,技术创新是继承和创新相结合。它是在前人的基础上进行创新,以现有的产品为参照目标,确定出新目标。逆向工程正是实现这种技术创新的现代技术方法。

1.2 逆向工程的关键技术

逆向工程可分为数据获取、数据预处理、数据分块与曲面重构、CAD模型构造以及快速原型等五大关键技术。

(1) 数据获取 数据获取是逆向工程 CAD 建模的首要环节。根据测量方式不同,数据采集方法可分为接触式和非接触式测量两大类。接触式测量通过传感测头与样件的接触而记录样件表面点的坐标位置;非接触式测量主要是基于光学、声学、磁学等领域中的基本原理,将一定的物理模拟量通过适当的算法转换为样件表面的坐标点。

(2) 数据预处理 数据预处理是逆向工程 CAD 建模的关键环节,它的结果将直接影响后期重建模型的质量。此过程经常包括多视拼合、噪声处理与数据精简等多方面的工作。多视拼合的任务是将多次装夹获得的测量数据融合到统一坐标系中,亦可称为坐标归一或坐标统一。目前,多视拼合主要有点位法、固定球法和平面法等。由于实际测量过程中受到各种人为和随机因素的影响,所得数据不连续或出现数据噪声。为了降低或消除噪声对后续建模质量的影响,有必要对测量点进行平滑滤波。数据平滑通常采用高斯、平均或中值滤波来完成。对于高密度点云,由于存在大量的冗余数据,有时需要按一定要求减少测量点的数量。不同类型的点云可采用不同的精简方式。对于散乱点云可采用随机采样的方法来精简;对于扫描线点云和多边形点云可采用等间距缩减、倍率缩减、等量缩减、弦偏差等方法;网格化点云可采用等分布密度和最小包围区域法进行数据缩减。

(3) 数据分块与曲面重构 在逆向工程中,产品表面往往无法由一张曲面进行完整描述,而是由多张曲面片组成,因而必须将测量数据分割成属于不同曲面片的数据子集,然后对各子集分别构造曲面模型。数据分块大体可分为基于边(edge-based)、基于面(face-based)和基于边、面的数据分块混合技术。曲面重构是逆向工程的关键环节,其目的是要构造出能满足精度和光顺性的要求,

并与相邻的曲面光滑拼接的曲面模型。根据曲面拓扑形式的不同,可以将曲面重构方法分为两大类:基于矩形域曲面的方法和基于三角域曲面的方法。

(4) CAD 模型构造 目的在于获得完整一致的边界表示 CAD 模型,即用完整的面、边、点信息来表示模型的位置和形状。由于重构的曲面之间可能存在着裂缝,或者缺少曲面边界信息等因素,这就使得表示产品模型的几何信息和拓扑信息不完整。因此有时要使用其他的手段,比如延伸、求交、裁剪、过渡、缝合等信息的高级计算功能,建立模型完整的面、边、点信息。

对于构造的 CAD 模进行检验与修正,主要包括精度和模型曲面品质的检验与修正等方面。精度反映反求模型与产品实物差距的大小。其评价指标分为整体指标、局部指标、量化指标和非量化指标。模型与实物的对比问题可以转换为计算点到曲面距离的问题,其精度指标可以采用距离指标表示。精度评价是逆向工程的一项重要内容,产品性能达不到原设计要求,其中重建模型不能准确还原原型是主要原因之一。目前精度评价仍无标准,对反求模型的精度评价主要依靠一些能具体量化的指标,并通过最终产品的实际应用效果加以检验。在曲面品质评价时,可采用控制顶点、曲率梳、斑马线、反射线、等照度线、高光线和高斯曲率等方法,对曲面的内部品质和曲面拼接连续性精度进行评价。

(5) 快速原型 一般而言,快速原型也是逆向工程的一个必要的环节。在逆向工程中,快速成型机或者数控加工机床可用来快速制作实物,能实现原型的放大、缩小、修改等功能。通过对制得的原型产品进行快速、准确的测量,用来验证零件与原设计中的不足,可形成一个包括设计、制造、检测的快速设计制造的闭环反馈系统,使产品设计更加完善。

1.3 逆向工程的应用领域与发展趋势

(1) 应用领域 逆向工程主要是为了改善技术水平、提高生产率和增强经济竞争力,已经被世界各国应用于各个行业中来消化吸收先进技术和经验。随着计算机、数控和测量技术的飞速发展,逆向工程技术在许多领域中得到广泛应用,具体表现在以下几个方面。

1) 在飞机、汽车、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,由于设计师习惯于依赖实物模型。而不是依赖于高分辨率 2D 屏幕上的缩比模型阴影图像对产品设计进行评估,产品几何外形通常不是应用 CAD 软件直接设计的,而是首先制作木质或黏土全尺寸模型或比例模型,然后再利用逆向工程技术重建 CAD 模型。因此,逆向工程技术在此类产品的快速开发中显得举足轻重。

2) 由于工艺、美观、使用效果等方面的原因,人们经常要对已有的构件做

局部修改。在原始设计没有三维 CAD 模型的情况下,若能将实物零件通过数据测量与处理,产生与实际相符的 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。因此,逆向工程在改型设计方面可以发挥正向设计不可替代的作用。

3) 在缺乏二维设计图样或者原始设计参数情况下,需要将实物零件转化为计算机表达的 CAD 模型,以便充分利用现有的计算机辅助分析、计算机辅助制造等先进技术,并进行产品的创新设计。

4) 某些大型设备,如航空发动机、汽轮机组等,经常因为某一零部件的损坏而停止运行,通过逆向工程手段,可以快速生产这些零部件的替代零件,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、考古文物的复制,医学领域中人体骨骼、关节等的复制和假肢制造,特种服装、头盔的制造,需要首先建立人体的几何模型,在这些情况下都必须从实物模型出发得到 CAD 模型。

6) 借助工业 CT 技术,逆向工程不仅可以产生物体的外部形状,而且可以快速发现、定位物体的内部缺陷,从而成为工业产品无损检测的重要手段。

(2) 发展趋势 逆向工程在数据处理、曲面片拟合、规则特征识别、专用商业软件和三维扫描仪的开发等方面已取得非常显著的进步。但在实际应用中,整个过程仍需大量的人工交互,操作者的经验和素质影响着产品的质量,自动重建曲面的光顺性难以保证,因此逆向工程技术依然是目前 CAD/CAM 领域一个十分活跃的研究方向。以下几方面技术的发展值得期待:

1) 发展面向反向工程的专用测量系统,使之能高速、高精度地实现实物数字化,并能根据样件几何形状和后续应用选择测量方式及路径,能进行路径规划和自动测量。

2) 研究适应不同的测量方法和后续用途的离散数据预处理技术。

3) 拟合曲面应能控制曲面的光顺性和进行光滑拼接。

4) 有效的特征识别和考虑约束的模型重建以及复杂组合曲面的识别和重建方法。

5) 发展基于集成的逆向工程技术,包括测量技术、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等。

第 2 章 数据获取方法

本章将介绍逆向工程中所涉及到的数据获取方法，包括接触测量技术、非接触测量技术，并就目前几种应用广泛的三维测量技术从原理、测量精度等方面进行较为详细的阐述。

2.1 逆向工程测量技术

逆向工程不同于传统工程的设计过程。它是从已知事物的有关信息出发，对这些信息充分消化和吸收，对实物原型进行数据采集，经过数据处理和三维重构等过程，构造出具有形状结构的原型的三维模型，然后，再对原型进行复制或原型基础上进行再设计，实现创新。对实物原型的数字化是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实现的，在此基础上进行复杂曲面的建模、评价、改造和制造。高效、高精度地实现实物表面的数据采集，是逆向工程技术实现的基础和关键技术之一。

2.1.1 测量方法的综述

实物的数字化是逆向工程实现的第一步，是数据处理、模型重建的基础。该技术的好坏直接影响对实物（零件）描述的精确度和完整度，从而影响重构的 CAD 曲面和实体模型的质量，最终影响快速成型或数控加工出来的产品是否真实地反映原始的物体模型，因此，它也是整个原型反求的基础。逆向工程采用的测量方法主要有 2 种：

- 1) 接触式测量法，如三坐标测量机（CMM）、机械手；
- 2) 非接触式测量法，如投影光栅法、激光三角形法、立体视觉法、声波法、工业 CT 扫描法、核磁共振法、自动断层扫描法等（表 2-1）。

表 2-1 实物数字化方法

数据获取方法								
接触方法		非接触方法						
机械手	CMM	投影光栅法	激光三角形法	立体视觉法	声波法	核磁共振法	工业 CT 扫描法	自动断层扫描法

三坐标测量机、激光三角形法、立体视觉法（双目、多目视觉）作为发展成熟的三种方法，应用非常广泛。对于这三种方法将在本章的后几节中给予详细介绍。

各种测量方法在测量精度、速度、应用条件等方面都不尽相同。对于反求测量而言，数据测量应满足下面的要求：

- 1) 采集的数据应满足工程的实际需要，如汽车工业，其最终的整体精度不能低于 0.1mm/m 。
- 2) 快速的数据采集速度，尽量减少测量在整个逆向工程中所占的时间。
- 3) 数据采集要有良好的完整性，不能有缺漏，以免给后续的曲面重构带来障碍。
- 4) 数据采集过程中不能破坏被测量实体原型。
- 5) 尽可能降低测量成本。

表 2-2 给出了几种主要三维测量方法的特点。

表 2-2 各种三维测量方法的特点

	精度	速度	可否测内轮廓	形状限制	材料限制	成本
三坐标测量机	高, $\pm 0.2\mu\text{m}$	慢	否	无	无	高
投影光栅法	高, $\pm 0.2\mu\text{m}$	快	否	表面变化不能过陡	无	低
激光三角形法	较高, $\pm 0.5\mu\text{m}$	快	否	表面不能过于光滑	无	较高
立体视觉法	低	快	否	无	无	较高
工业 CT 扫描法	低, 大于 1mm	较慢	是	无	有	很高
逐层切削照相测量	高, $\pm 0.025\mu\text{m}$	较慢	是	无	无	较高

2.1.2 部分测量方法简介

1. 投影光栅法

投影光栅法的基本原理是将光栅投影到被测物体表面上，受到被测样件表面高度的调制，光栅影线发生变形。通过解调变形光栅影线，就可以得到被测表面的高度信息，其原理如图 2-1 所示。

入射光线 P 照射到参考平面上的 A 点，放上被测物体后， P 照射到被测物体上的 D 点，此时从图示方向观察， A 点就移到新位置点 C ，距离 AC 就携带了高度信息 $Z=h(x, y)$ ，即高度受到表面形状的调制。该方法的主要优点是实际测量范围大、速度快、成本低、易于实现。缺点是精度低，且只能测量表面起伏不大的较平坦物体，对表面变化剧烈的物体，在陡峭处会发生相位突变，使测

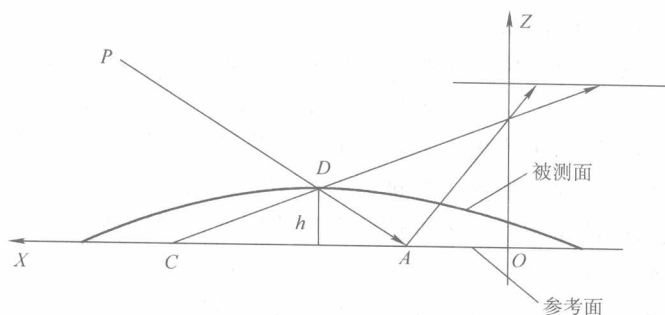


图 2-1 投影光栅法原理

量精度降低。

2. 超声波法

超声波法的原理是当超声波脉冲到达被测物体时，在被测物体的两种介质界面表面会发生回波反射，通过测量回波与零点脉冲的时间间隔就可以计算出各面到零点的距离。这种方法结构简单，但测速较慢，测量精度不稳定，目前主要用于物体的无损检测和壁厚测量。

3. 工业 CT 扫描法

工业 CT 技术 (Industrial Computed Tomography) 适合于测量具有复杂的内部几何形状的物体，利用它可直接获取物体的截面数据，正好与快速成型方法匹配。它是根据 CT 图像来重构三维模型，然后转化为可以为激光快速成型设备所采用的 STL 或 CLI 文件格式。工业 CT 是目前最先进的非接触测量方法，它可在不破坏零件的情况下，准确地对物体的内部形状、壁厚，尤其是内部结构进行测量，这是其他测量方式所难以做到的，而且对零件的材料没有限制。但是，CT 测量方法也存在着测量系统的空间分辨率低、获取数据时间长、重建图像计算量大、设备造价高的缺点。

4. 逐层切削照相测量

逐层切削照相测量是一种新兴的断层测量技术。它以极小的厚度去逐层切削实物 (最小可达 $\pm 0.01\text{mm}$)，并对每一断面进行照相，获取截面图像数据，其测量精度达 $\pm 0.02\text{mm}$ ，是目前断层测量精度最高的方法，且成本较低，与工业 CT 相比，价格便宜 70%~80%，但它的致命缺点是破坏了零件。在国外，美国 CGI 公司已生产层去扫描测量机，能快速准确地测量零件的表面和内部尺寸，片层厚度最小可达 0.013mm 。在国内，海信技术中心工业设计所和西安交通大学合作，研制成功具有国际领先水平的层去扫描三维测量机。从发展趋势看，工业 CT 和逐层切削照相测量将占逆向工程测量方法的主导地位，应用范围也会越来越广泛。