

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材



Reverse Engineering Technique

逆向工程技术

成思源 杨雪荣 © 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
现代机械工程系列精品教材

逆向工程技术

成思源 杨雪荣 等 编著



机械工业出版社

本书综合和归纳了反求设计与3D打印中的关键技术及常用和新兴的软、硬件系统。包括数据采集技术、数字化反求设计技术、快速制造及3D打印技术和逆向工程技术综合应用四部分共15章,对各软、硬件系统的基本原理、系统构成和操作流程进行了介绍,并通过典型实例为读者提供了一个全面的反求设计与3D打印技术综合实践平台。

本书可供高等院校本科和专科机械、汽车、模具及工业设计等相关专业的学生作为实践教材、培训教程或参考书,对相关领域的专业工程技术人员和研究人员也具有很高的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

逆向工程技术/成思源等编著. —北京:机械工业出版社, 2017. 10

“十三五”国家重点出版物出版规划项目 现代
机械工程系列精品教材

ISBN 978-7-111-57972-4

I. ①逆… II. ①成… III. ①工业产品—设计—
高等学校—教材 IV. ①TB472

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第221751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:余 皞 责任编辑:余 皞 王 良 刘丽敏

责任校对:刘志文 封面设计:张 静

责任印制:常天培

涿州市京南印刷厂印刷

2018年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17印张·419千字

0001-3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-57972-4

定价:45.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书综合和归纳了逆向工程中的关键技术以及常用和新兴的软硬件系统，全书共 15 章，分为数据采集技术、数字化反求设计技术、快速制造与 3D 打印技术和逆向工程技术综合应用四部分，对各软、硬件系统的基本原理、系统构成和操作流程进行了介绍，并通过典型实例为读者提供了一个良好的反求设计与 3D 打印技术综合实践平台。

本书将专业理论与实践紧密结合，强调基础性和实践性，以解决相关系统应用的具体问题。在本书中，对每一系统都有对应的综合实践实例，以实例的方式提高学生职业技能的应用能力，使学生通过综合实践，掌握逆向工程的常用手段和方法，正确使用逆向设备和相应软件，培养学生的动手能力以及实践创新能力，从而为社会培养出掌握先进设计技术、适应社会需求的综合应用型人才，以拓宽相关专业学生的就业面，增强学生的就业竞争力。

逆向工程技术目前已广泛应用于产品的复制、仿制、改进及创新设计，是消化吸收先进技术和缩短产品设计开发周期的重要支撑手段。现代逆向工程技术除广泛应用于汽车、摩托车、模具、机械、玩具、家电等传统领域之外，在多媒体、动画、医学、文物与艺术品的仿制和破损零件的修复、面向人体的个性化设计等方面的应用也在发展。

特别是随着 3D 打印技术的兴起，逆向工程技术可以自动、直接、快速、精确地将设计思想转变为具有一定功能的原型或直接制造零件，从而为零件原型制作、新设计思想的校验等提供一种高效低成本的实现手段，现已逐步应用于航天、军工、医疗等多个领域。因此，本书专门介绍了与 3D 打印技术相关的数据处理、软硬件系统等方面的内容，顺应产业界对人才培养的最新需求，有助于加深学生对先进设计和制造技术的了解和掌握，对于培养掌握先进数字化技术的未来工程师有着重要的意义。

本书第 1 章对反求设计的流程进行了概述，第 2~5 章对数字化测量技术，包括接触式三坐标测量、光学非接触扫描测量以及同时具有两种测量方式的关节臂测量进行了介绍。第 6~9 章对反求设计中的数据处理技术进行了介绍，包括基于 Geomagic Studio 的曲面反求设计和新兴的基于 Geomagic Design Direct 的实体反求设计，基于 Geomagic Qualify 的计算机辅助检测技术，以及基于 ThinkDesign 的变形再设计技术。第 10~14 章对快速制造及 3D 打印技术进行了介绍，包括了 FDM 快速成型制造、数控雕刻快速成型制造和最新的 3D 打印技术，以及基于面向 3D 打印技术的数字化点云设计技术，通过 Freeform 触觉设计系统和 3-matic 数字化设计技术实现反求设计与 3D 打印技术的集成。最后分别给出了基于反求设计和计算机辅助检测技术的工程应用案例，以及高校学生完成的反求创新设计案例。

本书获得了广东省精品资源共享课建设项目及广东省研究生示范课程建设项目的支持。

本书由成思源、杨雪荣等编著。其中第1章、3章、4章、6章、7章、8章、9章、10章、12章、14章由广东工业大学成思源编写，第2章、5章、11章、13章、15章由广东工业大学杨雪荣编写。全书由成思源进行统稿。

本书还凝聚了广东工业大学先进设计技术重点实验室历届研究生的心血，他们在反求设计与3D打印技术的研究与应用方面做了卓有成效的工作。其中余国鑫、吴问霆、梁仕权、吴艳奇、邹付群、黎波、刘军华、刘俊、蔡敏、王学鹏、罗序利、周小东、蔡闯、从海宸、林泳涛、冯超超、孟欢等研究生参与了部分章节的实验操作的文字整理工作，在此谨向他们表示衷心的感谢！

面对社会推广逆向工程技术的迫切需求和培训逆向工程专业人才的需求，我们编写了这本《逆向工程技术》。本书突出逆向工程应用型人才工程素质的培养要求，系统性、实用性强。本书可供高等学校和高等职业学校机械、汽车、模具以及工业设计等相关专业的学生作为教材、培训教程或参考书，同时，对相关领域的专业工程技术人员和研究人员也具有重要的参考价值。

由于编者水平及经验有限，加之时间紧迫，书中难免存在不足之处，欢迎各位专家、同仁批评指正。编者衷心地希望通过同行间的交流促进逆向工程技术的进一步发展！

编 者

目 录

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 逆向工程技术概述	1
1.2 逆向工程技术的应用	4
1.3 逆向工程中的关键技术	5
1.3.1 数据采集技术	5
1.3.2 CAD 反求建模技术	10
1.3.3 3D 打印技术	15
1.4 逆向工程技术的发展	19

第 1 篇 数据采集技术

第 2 章 三坐标数据采集系统	24
2.1 三坐标测量系统	24
2.2 三坐标测量系统的操作流程	26
2.3 PC-DMIS 软件介绍	28
2.3.1 PC-DMIS 软件简介	28
2.3.2 PC-DMIS 软件用户界面主要工具栏	29
2.4 三坐标测量实例	34
2.4.1 基于 CAD 数模的零件检测实例	35
2.4.2 基于三坐标测量机的曲面数字化实例	47

第 3 章 光栅式扫描测量	52
3.1 光栅投影三维测量技术	52
3.2 COMET 系统	53
3.2.1 COMET 系统组成	53
3.2.2 COMET 系统测量策略	55
3.2.3 COMET 测量系统的操作流程及方法	57

3.3 光栅投影扫描测量实例	58
第4章 手持式激光扫描测量	65
4.1 手持式激光扫描测量系统	65
4.1.1 手持式激光扫描测量技术	65
4.1.2 手持式激光扫描测量系统的组成	66
4.2 手持式激光扫描测量的操作流程及扫描方法	68
4.3 手持式激光扫描测量实例	71
第5章 关节臂式测量	75
5.1 关节臂测量机简介	75
5.1.1 关节臂测量机定义及产品介绍	75
5.1.2 关节臂测量机的工作原理及系统组成	78
5.2 关节臂测量机的操作流程	81
5.2.1 基于关节臂激光扫描的操作流程	81
5.2.2 基于关节臂接触式测头的检测流程	85
5.3 关节臂测量机的检测实例	88
5.3.1 关节臂测量机激光扫描实例	88
5.3.2 基于 PC-DIMS CAD 的关节臂零件检测实例	89

第2篇 数字化反求设计技术

第6章 Geomagic Studio 逆向建模	102
6.1 Geomagic Studio 系统简介	102
6.2 Geomagic Studio 操作流程及功能	103
6.3 Geomagic Studio 精确曲面建模实例	106
6.4 Geomagic Studio 参数曲面建模实例	112
第7章 Geomagic Design Direct 混合建模	116
7.1 Geomagic Design Direct 系统简介	116
7.2 Geomagic Design Direct 混合建模流程及模块	117
7.3 Geomagic Design Direct 混合建模实例	120
7.4 与 Geomagic Studio 建模方法的比较	127
第8章 Geomagic Qualify 计算机辅助检测	128
8.1 计算机辅助检测技术简介	128
8.2 Geomagic Qualify 软件系统	131
8.2.1 Geomagic Qualify 系统简介	131
8.2.2 Geomagic Qualify 操作流程及功能介绍	132

8.3 Geomagic Qualify 检测实例	134
第9章 ThinkDesign 变形设计技术	151
9.1 ThinkDesign 变形设计软件介绍	151
9.2 ThinkDesign 变形修改实例	155
第3篇 快速制造及3D打印技术	
第10章 FDM 快速成型系统	162
10.1 快速成型技术概述	162
10.2 FDM 快速成型技术	164
10.3 FDM 快速成型操作流程	166
10.4 FDM 快速成型实例	168
第11章 数控雕刻快速成型制造	173
11.1 数控雕刻快速成型系统	173
11.1.1 数控雕刻快速成型技术	173
11.1.2 数控雕刻快速成型系统组成	174
11.1.3 数控雕刻快速成型操作流程	177
11.2 数控雕刻快速成型实例	178
11.2.1 双面加工操作实例	178
11.2.2 旋转加工操作实例	183
11.3 数控雕刻快速成型机操作注意事项	186
第12章 3D 打印技术及系统	188
12.1 3D 打印技术概况	188
12.2 3D 打印系统及流程	189
12.3 3D 打印数据模型	190
12.4 Cube X 3D 打印系统	193
12.4.1 Cube X 3D 打印机介绍	193
12.4.2 Cube X 3D 打印机操作流程	194
12.4.3 Cube X 3D 打印机实例	196
12.5 Einstart 3D 打印机系统	200
12.5.1 Einstart 3D 打印机介绍	200
12.5.2 Einstart 3D 打印系统组成及功能	200
12.5.3 Einstart 3D 打印机操作	203
12.5.4 Einstart 3D 打印机实例	206
第13章 Freeform 触觉设计	210
13.1 触觉设计技术简介	210

13.2 Freeform 触觉设计系统	210
13.2.1 系统操作界面	211
13.2.2 力反馈设备 Phantom	212
13.2.3 主要功能模块介绍	212
13.2.4 系统特点	216
13.3 基于 Freeform 的数据修复实例	216
13.4 基于 Freeform 系统的造型设计实例	219

第 14 章 3-matic 数字化设计技术

224

14.1 3-matic 软件简介	224
14.1.1 3-matic 软件原理	224
14.1.2 3-matic 的主要功能优势	225
14.1.3 与传统逆向工程的工作流程对比	225
14.2 3-matic 软件界面	226
14.3 3-matic 功能模块	227
14.4 基于 3-matic 的数据修复实例	228
14.5 基于 3-matic 的 STL 模型再设计实例	230

第 4 篇 逆向工程技术综合应用

第 15 章 逆向工程技术综合应用实例

234

15.1 逆向工程技术工程应用实例	234
15.1.1 数据采集阶段	234
15.1.2 建模设计阶段	237
15.1.3 编程加工阶段	239
15.1.4 生产发货阶段	245
15.2 计算机辅助检测工程应用实例	247
15.2.1 传统检测方法	248
15.2.2 数据采集	249
15.2.3 CAD 模型导入与数据对齐	251
15.2.4 点云数据与 CAD 模型比较	252
15.3 逆向工程技术创新设计实例	255
15.3.1 个性化 U 盘设计	255
15.3.2 基于鼠型玩具的削笔刀创新设计	258

参考文献

261

第1章

绪论

1.1 逆向工程技术概述

逆向工程是近年来发展起来的消化、吸收先进技术的一系列分析方法以及应用技术的组合,其主要目的是为了改善技术水平,提高生产率,增强经济竞争力。世界各国在经济技术发展中,应用逆向工程消化吸收先进技术经验。据统计,各国70%以上的技术源于国外,逆向工程作为掌握新技术的一种手段,可使产品研制周期缩短40%以上,可以极大地提高生产率。综上所述,研究逆向工程技术,对我国国民经济的发展和科学技术水平的提高,具有重大的意义。20世纪90年代初,逆向工程的技术开始引起各国工业界和学术界的高度重视,特别是随着现代计算机技术及测量技术的发展,利用CAD/CAM技术、先进制造技术来实现产品实物的逆向工程,已成为CAD/CAM领域的一个研究热点,并成为逆向工程技术应用的主要内容。

逆向工程以产品设计方法学为指导,以现代设计理论、方法和技术为基础,运用各领域专业人员的工程设计经验、知识和创新思维,通过对已有产品进行数字化测量、曲面拟合重构产品的CAD模型,在探询和了解原设计意图的基础上,掌握产品设计的关键技术,实现对产品的修改和再设计,达到设计创新、产品更新及新产品开发的目的。

逆向工程(Reverse Engineering, RE)也称反求工程、反向工程等,是相对于传统正向工程而言的。它起源于精密测量和质量检验,是设计下游向设计上游反馈信息的回路。传统的产品开发过程遵从正向设计的思想进行,即从市场需求中抽象出产品的概念描述,据此建立产品的CAD模型,然后对其进行数控编程和数控加工最后得到产品的实物原型。概括的说,正向设计工程是由概念到CAD模型再到实物模型的开发过程;而逆向工程则是由实物模型到CAD模型的过程。在很多场合产品开发是从已有的实物模型着手,如产品的泥塑和木模样件或者是缺少CAD模型的产品零件。逆向工程是对实物模型进行三维数字化测量并构造实物的CAD模型,然后利用各种成熟CAD/CAE/CAM的技术进行再创新的过程。正向工程与逆向工程的流程图如图1-1所示。

逆向工程的重大意义在于,逆向工程不是简单地把原有物体还原,它还要在还原的基础上进行二次创新,所以逆向工程作为一种新的创新技术现已广泛应用于工业领域并取得了重大的经济和社会效益。

我国是最大的发展中国家,消化、吸收国外先进产品技术并进行改进是重要的产品设计手段。逆向工程技术为产品的改进设计提供了方便、快捷的工具,它借助于先进的技术开发

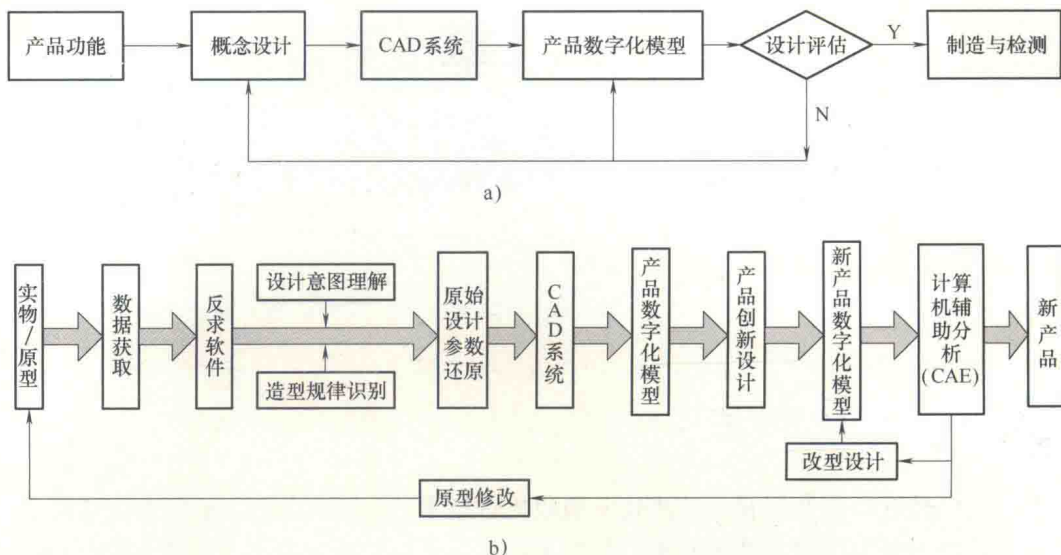


图 1-1 正向工程与逆向工程

a) 正向工程流程 b) 逆向工程流程

手段，在已有产品基础上设计新产品，缩短开发周期，可以使企业适应小批量、多品种的生产要求，从而使企业在激烈的市场竞争中处于有利的地位。逆向工程技术的应用对我国企业缩短与发达国家的技术差距具有特别重要的意义。

传统的产品实现通常是从概念设计到图样，再制造出产品，我们称之为正向工程，而产品的逆向工程是根据零件（或原型）生成图样，再构造产品。广义的逆向工程是消化、吸收先进技术的一系列工作方法的技术组合，是一项跨学科、跨专业的、复杂的系统工程。它包括影像逆向、软件逆向和实体逆向三方面。目前，大多数关于逆向工程的研究及应用主要集中在几何形状，即重建产品实物的 CAD 模型和最终产品的制造方面，称为“实物逆向工程”。

实物逆向工程的需求主要有两方面：一方面，作为研究对象，产品实物是面向消费市场最广、最多的一类设计成果，也是最容易获得的研究对象；另一方面，在产品开发和制造过程中，虽已广泛使用了计算机几何造型技术，但是仍有许多产品，由于种种原因，最初并不是由计算机辅助设计模型描述的，设计和制造者面对的是实物样件。为了适应先进制造技术的发展，需要通过一定途径将实物样件转化为 CAD 模型，再通过利用 CAM、RPM/RT、PDM、CIMS 等先进技术对其进行处理或管理。同时，随着现代测试技术的发展，快速、精确地获取实物的几何信息已变为现实。由此，我们可以将逆向工程定义为：逆向工程是将实物转变为 CAD 模型相关的数字化技术、几何模型重建技术和产品制造技术的总称。

逆向工程的过程大致分为：首先由数据采集设备获取样件表面（有时需要内腔）数据，其次导入专门的数据处理软件或带有数据处理能力的三维 CAD 软件进行前处理，然后进行曲面和三维实体重构，在计算机上复现实物样件的几何形状，并在此基础上进行修改或创新设计，最后对再设计的对象进行实物制造。其中从数据采集到 CAD 模型的建立是反求工程中的关键技术。图 1-2 所示为逆向工程领域应用最为广泛的工作流程图。

从逆向工程流程图可以看出，逆向工程系统主要由三部分组成：产品实物几何外形的数

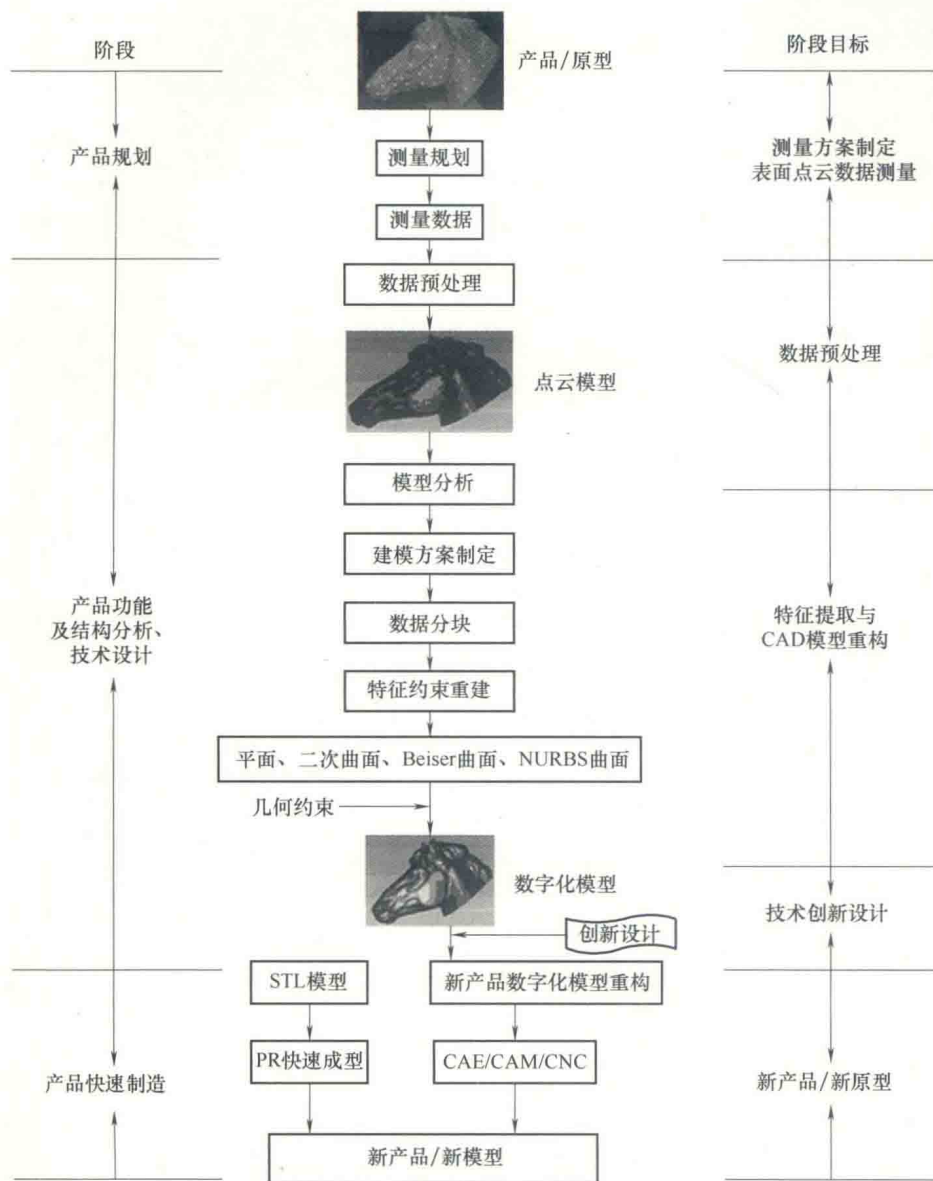


图 1-2 逆向工程的工作流程图

数字化、数据处理与 CAD 模型重建、产品模型与模具的成型制造。组成系统的软硬件主要有：

1. 数据采集系统

数据获取是逆向工程系统的首要环节。根据测量方式的不同，数据采集系统可以分为接触式测量系统与非接触式测量系统两大类。接触式测量系统的典型代表是三坐标测量机，非接触式测量主要包括各种基于光学的测量系统等。

2. 数据处理与模型重建系统

数据处理与模型重建软件主要包括两类：一是集成了专用逆向模块的正向 CAD/CAM 软件，如包含 Pro/Scan-tools 模块的 Pro/E、集成快速曲面建模等模块的 CATIA 及包含 Point cloudy 功能的 UG 等；第二是专用的逆向工程软件，典型的如 Imageware、Geomagic Studio、

Polyworks、CopyCAD、ICEMSurf 和 RE-Soft 等。

3. 成型制造系统

成型制造系统主要包括用于制造原型和模具的 CNC 加工设备，以及生成模型样件的各种快速成型设备。根据不同的快速成型原理，包括光固化成型、选择性激光烧结、熔融沉积制造、分层实体制造、三维打印等，以及基于数控雕刻技术的减式快速成型系统。

本书的后续章节也将主要围绕这三部分系统进行介绍。

1.2 逆向工程技术的应用

随着新的反求工程原理和技术的不断引入，逆向工程已经成为联系新产品开发过程中各种先进技术的纽带，在新产品开发过程中居于核心地位，被广泛地应用于摩托车、汽车、飞机、家用电器、模具等产品的改型与创新设计，成为消化、吸收先进技术，实现新产品快速开发的重要技术手段。逆向工程技术的应用对发展中国家的企业缩短与发达国家的技術差距具有特别重要的意义。据统计，发展中国家 65% 以上的技术源于国外，而应用逆向工程消化吸收先进技术经验，可使产品研制周期缩短 40% 以上，可极大提高生产率和竞争力。因此，研究逆向工程技术，对科学技术水平的提高和经济发展，具有重大意义。反求工程技术的应用主要集中在以下几个方面。

1) 在飞机、汽车、家用电器、玩具等产品开发中，产品的性能、动作、外观设计显得特别重要，这是因为设计过程通过模型信息与数字数据的转换能达到快速准确的效果。在对产品外形的美学有特别要求的领域，为方便评价其美学效果，设计师们广泛利用油泥、木头等材料进行快速且大量的模型制作，将所要表达的意图以实体的方式呈现出来。因而，产品几何外形通常不是应用 CAD 软件直接设计，而是首先制作木质或油泥全尺寸模型或比例模型，再利用反求工程技术重建产品数字化模型。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，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，进行修改以后再进行加工，或者直接在产品实物上添加油泥等进行修改后再生成 CAD 模型，能显著提高生产效率。因此，逆向工程在改型设计方面可以发挥正向设计不可代替的作用。

3) 当设计需要制造通过实验测试才能定型的工件模型时，在工件模型定形后，通常采用逆向工程的方法进行设计。比如航天航空、汽车等领域，为了满足产品对空气动力学等的要求，首先要求在模型上经过各种性能测试建立符合要求的产品模型。此类模型必须借助逆向工程，转换为产品的三维 CAD 模型及其模具。

4) 在缺乏二维设计图样或者原始设计参数的情况下，需要在对零件原型进行测量的基础上，将实物零件转化为计算机表达的 CAD 模型，并以此为依据生成数控加工的 NC 代码或快速成型加工所需的数据，复制一个相同的零件，或充分利用现有的 CAD/CAE/CAM 等先进技术，进行产品的创新设计。

5) 一些零件可能需要经过多次修改才能定型。如在模具制造中，经常需要通过反复试冲和修改模具型面，方可得到最终符合要求的模具，而这些几何外形的改变却未曾反映在原

始的 CAD 模型上。借助于逆向工程的功能和在设计、制造中所扮演的角色,设计者现在可以建立或修改在制造过程中变更过的设计模型。反求工程成为制造—检验—修正—建模—制造这一环节中重要的快速建模手段。

6) 某些大型设备,如航空发动机、汽轮机组等,经常因为某一零件的缺损而停止运行,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。

7) 很多物品很难用基本几何来表现与定义。例如流线型产品、艺术浮雕及不规则线条等,如果利用通用 CAD 软件、以正向设计的方式来重建这些物体的 CAD 模型,在功能、速度及精度方面都将异常困难。这种场合下,必须引入逆向工程,以加速产品设计,降低开发的难度。应用反求工程技术,还可以对工艺品、文物等进行复制,可以方便的生成基于实物模型的计算机动画,虚拟场景等。

8) 在生物医学工程领域,人体骨骼、关节等的复制和假肢制造,特种服装、头盔的制造等,都需要首先建立人体的几何模型。采用反求工程技术,可以摆脱原来的以手工或者按标准制造为主的落后制造方法。通过定制人工关节和人工骨骼,保证重构的人工骨骼在植入人体后无不良影响。在牙齿矫正中,根据个人特点制作牙模,然后转化为 CAD 模型,经过有限元计算矫正方案,大大提高矫正成功率和效率。通过建立数字化人体几何模型,可以根据个人定制特种服装,如宇航服,头盔等。

9) 在 RPM 的应用中,逆向工程的最主要表现为:通过逆向工程,可以方便地对快速成型制造产品进行快速、准确的测量,找出产品设计的不足,进行重新设计,经过反复多次迭代可使产品完善。

10) 借助于工业 CT,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。

11) 产品制造完成以后,用反求工程方法测量出该产品的点云数据,与已有标准的 CAD 数据进行比较,分析误差,也称为计算机辅助检测。特别是在模具和快速成型等领域,工业界已用反求工程来定期地抽样检验产品,分析制造误差的规律,作为质量控制和分析产品缺陷的有力工具。

从反求工程的应用领域介绍可以看出,反求工程在复杂外形产品的建模和新产品开发中有着不可替代的重要作用。据资料报导和实例验证,应用反求工程技术后,产品的设计周期可以从几个月缩短为几周;反求工程也是支持敏捷制造、计算机集成制造、并行工程等的有力工具,是企业缩短产品开发周期、降低设计生产成本、提高产品质量、增强产品的竞争力的关键技术之一。因而,这一技术已成为产品创新设计的强有力的支撑技术。充分利用反求工程技术,并将其和其他先进设计和制造技术相结合,能够提高产品设计水平和效率,加快产品创新步伐,提高企业的市场竞争能力,为企业带来显著的经济价值。

1.3 逆向工程中的关键技术

1.3.1 数据采集技术

目前,用来采集物体表面数据的测量设备和方法多种多样,其原理也各不相同。测量方法的选用是逆向工程中一个非常重要的问题,不同的测量方式,不但决定了测量本身的精

度、速度和经济性，还决定了测量数据类型及后续处理方式的不同。根据测量探头是否和零件表面接触，逆向工程中物体表面数字化数据的收集方法基本上可以分为接触式（Contact）和非接触式（Non-Contact）两种。接触式测量包括基于力-变形原理的触发式和连续式数据收集；而非接触式测量主要有激光三角测量法、激光测距法、光干涉法、结构光法、图像分析法等。这些方法都有各自的特点和应用范围，具体选用何种测量方法和数据处理技术应根据被测物体的形体特征和应用目的来决定。目前，还没有找到一种适用于所有工业设计逆向测量方法。各种数据收集方法如图 1-3 所示。

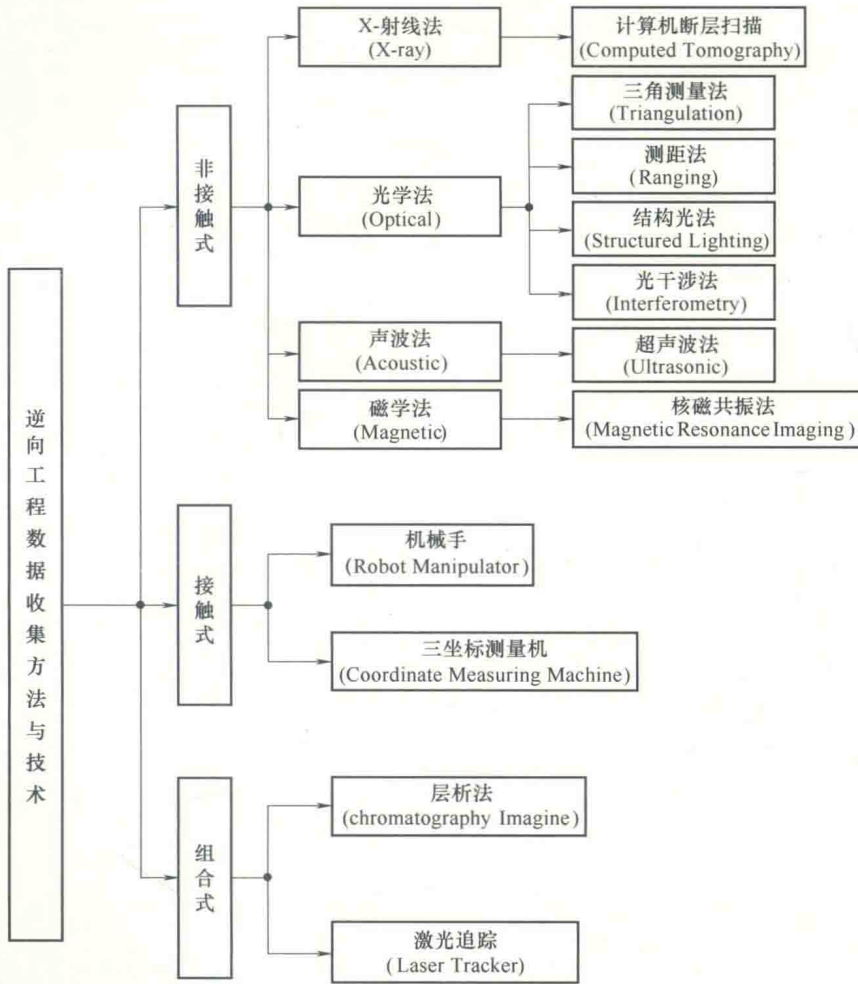


图 1-3 逆向工程数据收集方法与技术

在接触式测量方法中，三坐标测量机（CMM）是应用最为广泛的一种测量设备。CMM 通常是基于力-变形原理，通过接触式探头沿样件表面移动并与表面接触时发生变形检测出接触点的三维坐标，按采样方式又可分为单点触发式和连续扫描式两种。CMM 对被测物体的材质和色泽没有特殊要求，可达到很高的测量精度（±0.5μm），对物体边界和特征点的测量相对精确，对于没有复杂内部型腔、特征几何尺寸多、只有少量特征曲面的规则零件反求特别有效。CMM 的主要缺点是效率低，测量过程过分依赖于测量者的经验，特别是对于

几何模型未知的复杂产品，难以确定最优的采样策略与路径。随着电子技术、计算机技术的发展，CMM 也由以前的机械式发展到目前的计算机数字控制（CNC）型的高级阶段。目前，智能化是三坐标测量机发展的方向^[2]。智能测量机的研究是利用计算机内的知识库与决策库确定测量策略，其关键技术包括零件位置的自动识别技术、测量决策智能化和测量路径规划、CAD/CAM 集成技术等。

随着快速测量的需求及光电技术的发展，以计算机图像处理为主要手段的非接触式测量技术得到飞速发展。该方法主要是基于光学、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化为样件表面的坐标点。一般的，常用的非接触式测量方法分为被动视觉（Passive vision）和主动视觉（Active vision）两大类。被动式方法中无特殊光源，只能接收物体表面的反射信息，因而设备简单，操作方便，成本低，可用于户外和远距离观察中，特别适用于由于环境限制不能使用特殊照明装置的应用场合，但算法较复杂。主动式方法使用一个专门的光源装置来提供目标周围的照明，通过发光装置的控制，能使系统获得更多的有用信息，降低问题难度。

被动式非接触测量的理论基础是计算机视觉中的三维视觉重建。根据可利用的视觉信息，被动视觉方法包括由明暗恢复形状（shape from shading, SFS）、由纹理恢复形状（shape from texture）、光度立体法（photometric stereo）、立体视觉（shape from stereo）和由遮挡轮廓恢复形状（Shape from silhouette）等，其中在工程中应用较多的是后两种方法。

立体视觉（shape from stereo），又称为双目视觉或机器视觉。其基本原理是从两个（或多个）视点观察同一景物，以获取不同视角下的感知图像，通过三角测量原理计算图像像素间的位置偏差（即视差）来获取景物的三维信息，这一过程与人类视觉的立体感知过程是类似的。双目立体视觉的原理如图 1-4 所示。其中 P 是空间中任意一点， C_1 、 C_2 是两个摄像机的焦点，类似于人的双眼， p_1 、 p_2 是 P 点在两个成像面上的像点。空间中 P 、 C_1 、 C_2 形成一个三角形，且连线 C_1P 与像平面交于 p_1 点，连线 C_2P 与像平面交于 p_2 点。因此，若已知像点 p_1 、 p_2 ，则连线 C_1p_1 和 C_2p_2 必交于空间点 P ，这种确定空间点坐标的方法称为三角测量原理。

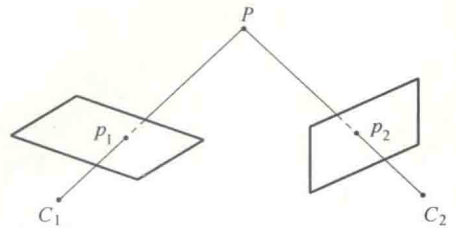


图 1-4 立体视觉原理图

一个完整的立体视觉系统通常由图像获取、摄像机标定、特征提取、立体匹配、深度确定和内插六个部分组成。由于它直接模拟了人类视觉的功能，可以在多种条件下灵活地测量物体的立体信息，而且通过采用高精度的边缘提取技术，可以获得较高的空间定位精度（相对误差 1%~2%），因此在计算机被动测距中得到了广泛地应用。但立体匹配始终是立体视觉中最重要也是最困难的问题，其有效性有赖于 3 个问题的解决，即：选择正确的匹配特征，寻找特征间的本质属性以及建立能正确匹配所选特征的稳定算法。虽然已提出了大量各具特色的匹配算法，但由于涉及场景中光照、物体的几何形状与物理性质、摄像机特性、噪声干扰和畸变等诸多因素的影响，至今仍未有很好地解决。

利用图像平面上将物体与背景分割开来的遮挡轮廓信息来重构表面，称为 shape from silhouette，其原理如图 1-5 中所示。将视点与物体的遮挡轮廓线相连，即可构成一个视锥体。当从不同的视点观察时，就会形成多个视锥体，物体一定位于这些视锥体的共同交集

内。因此，通过体相交法，将各个视锥体相交便得到了物体的三维模型。

Shape from silhouette 方法通常由相机标定、遮挡轮廓提取和物体与轮廓间的投影相交三个步骤完成。shape from silhouette 方法在实现时仅涉及基本的矩阵运算，因此具有运算速度快、计算过程稳定、可获得物体表面致密点集的优点，缺点是精度较低，难以达到工程实用的要求，目前多用于计算机动画、虚拟现实模型、网上展示等场合，而且该方法无法应用于某些具有凹陷

表面的物体。美国 Immersion 公司开发了 Lightscribe 系统，该系统由摄像头、背景屏幕、旋转平台以及软件系统等组成。系统使用时首先对放置在自动旋转平台上的物体进行摄像，将摄得的图像输入软件后利用体相交技术可自动生成物体的三维模型。但对于物体表面的一些局部细节和凹陷区域，该系统还需要结合主动式的激光扫描进行细化。

随着主动测距手段的日趋成熟，在条件允许的情况下，在工程应用中更多地使用的是主动视觉方法。主动视觉是指测量系统向被测物体投射出特殊的结构光，通过扫描、编码或调制，结合立体视觉技术来获得被测物的 3D 信息。对于平坦的、无明显灰度、纹理或形状变化的表面区域，用结构光可形成明亮的光条纹，作为一种“人工特征”施加到物体表面，从而方便图像的分析处理。根据不同的原理，主动视觉方法可主要分为主动三角法和投影光栅法两类。

激光三角法是目前最成熟，也是应用最广泛的一种主动式视觉方法。激光扫描的原理如图 1-6 所示。由激光源发出的光束，经过一组可改变方向的反射镜组成的扫描装置变向后，投射到被测物体上。摄像机固定在某个观点上观察物体表面的漫射点。图中激光束的方向角 α 和摄像机与反射镜间的基线位置是已知的， β 可由焦距 f 和成像点的位置确定。因此根据光源、物体表面反射点以及摄像机成像点之间的三角关系可以计算出表面反射点的三维坐标。激光三角法的原理与立体视觉法在本质上是一样的，不同之处在于在将立体视觉方法中的一个“眼睛”置换为光源，而且在物体空间中通过点、线或栅格形式的特定光源来标记特定的点，可以避免立体视觉中对应点匹配的问题。

激光三角法具有测量速度快，而且可达到较高的精度 ($\pm 10\mu\text{m}$) 等优点。但存在的主要问题是对于被测表面的粗糙度、漫反射率和倾角过于敏感，存在由遮挡造成的阴影效应，对突变的台阶和深孔结构易于产生数据丢失。在主动式方法中，除了激光三角法以外，也可以采用光栅或白光光源投影法。

投影光栅法的基本思想是把光栅投影到被测物表面上，受到被测样件表面高度的调制，光栅投影线发生变形，变形光栅携带了物体表面的三维信息，通过解调变形的光栅影线，从而得到被测表面的高度信息，其原理如图 1-7 中所示。入射光线 P 照射到参考平面上的 A

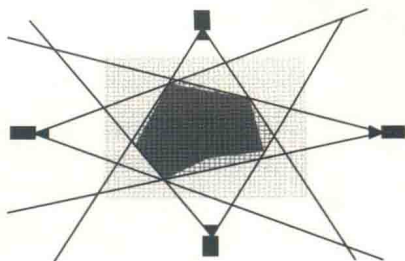


图 1-5 体相交法原理

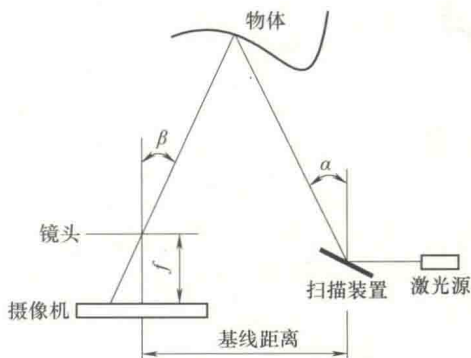


图 1-6 激光三角法原理