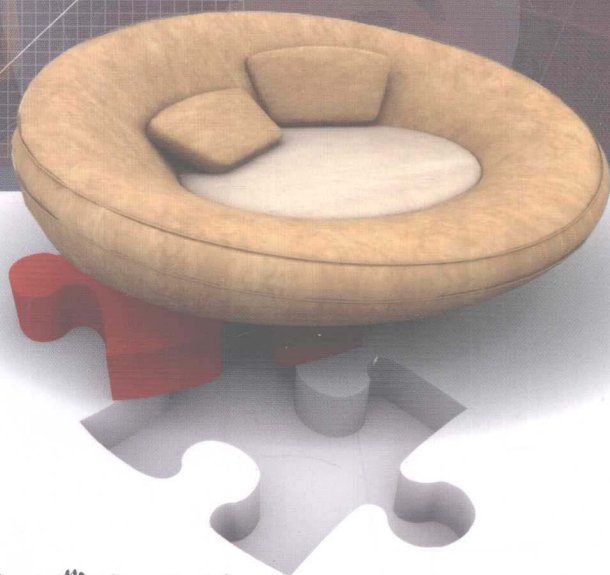
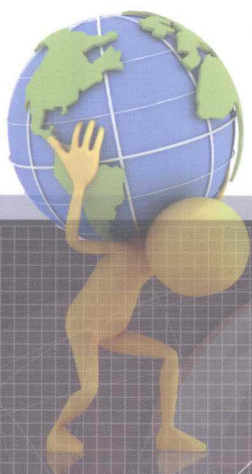


# 逆向工程技术

## 综合实践



成思源 主编  
洪树彬 杨雪荣 副主编



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

# 逆向工程技术综合实践

成思源 主 编

洪树彬 杨雪荣 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书综合和归纳了逆向工程中的关键技术及常用和新兴的软件、硬件系统，分为数据采集技术、数据处理与 CAD 建模技术、成型制造技术三篇共 13 章，对各软件、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逆向工程技术综合实践平台。

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。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有，侵权必究。

## 图书在版编目 ( CIP ) 数据

逆向工程技术综合实践 / 成思源主编. —北京: 电子工业出版社, 2010.10

ISBN 978-7-121-11850-0

I. ①逆… II. ①成… III. ①工业产品—计算机辅助设计 IV. ①TB472-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 182595 号

责任编辑: 万子芬 (wzf@phei.com.cn)

印 刷: 北京市顺义兴华印刷厂

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 15.75 字数: 353 千字

印 次: 2010 年 10 月第 1 次印刷

定 价: 36.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

# 前 言

目前,逆向工程技术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等方面也体现出其应用价值。

根据社会推广逆向工程技术和培训逆向工程专业人才的需求,我们编写了本书。

本书综合和归纳了逆向工程中的关键技术及常用和新兴的软件、硬件系统,全书共13章,分为逆向工程中的数据采集技术,数据处理与CAD建模技术和快速成型制造技术三大部分,对各软件、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逆向工程技术综合实践平台。

本书将专业理论知识与实践技术紧密结合,强调基础性和实践性,以解决相关系统应用的具体问题。书中对每一个系统都有对应的综合实践实例,以实例的方式提高读者的职业技能应用能力,使之通过综合实践掌握逆向工程的常用手段和方法,正确使用反求设备和相应软件,培养动手能力及实践创新能力,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,以拓宽就业面,增强就业竞争力。

本书突出逆向工程应用型人才工程素质培养的要求,系统性、实用性强,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有很高的参考价值。

本书提供配套的实训范例数据文件和视频文件,可在华信教育资源网([www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn))免费下载,供读者使用和参考。

本书由广东工业大学成思源任主编,澄海职业技术学校洪树彬和广东工业大学杨雪荣任副主编,哈尔滨工程大学谢韶旺参编,其中第1,3,4,6,9,10,12章由成思源编写,第8,11,14章由洪树彬编写,第2,7,13章由杨雪荣编写,第5章由谢韶旺编写,全书由成思源统稿。

本书还凝聚了广东工业大学先进设计技术重点实验室众多研究生的心血,他们在逆向工程技术的研究与应用方面开展了卓有成效的工作,其中余国鑫,吴问霆,梁仕权,吴艳奇,邹付群,黎波,刘军华,刘俊等研究生参与了部分章节的实验及文字整理工作,在此谨向他们表示衷心的感谢!

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，衷心地希望通过同行之间的交流促进逆向工程技术的进一步发展！

成思源

2010年8月

# 目 录

---

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 .....	(6)
1.3.1 数据采集技术 .....	(6)
1.3.2 CAD 建模技术 .....	(12)
1.4 逆向工程技术的发展 .....	(18)
第 2 章 三坐标测量机 .....	(21)
2.1 三坐标测量机 .....	(21)
2.1.1 三坐标测量机简介 .....	(21)
2.1.2 三坐标测量工作原理 .....	(23)
2.1.3 三坐标测量机的硬件及软件系统 .....	(24)
2.2 三坐标测量机的操作流程 .....	(26)
2.3 三坐标测量实训范例 .....	(28)
2.3.1 基于 CAD 模型的零件检测实例 .....	(29)
2.3.2 基于三坐标测量机的曲面数字化实例 .....	(32)
2.4 三坐标测量机的使用注意事项 .....	(34)
第 3 章 光栅式扫描测量 .....	(36)
3.1 光栅投影三维测量技术 .....	(36)
3.2 COMET 系统 .....	(37)
3.2.1 COMET 系统组成 .....	(37)
3.2.2 COMET 系统测量策略 .....	(40)
3.2.3 COMET 测量系统的操作流程及方法 .....	(42)
3.3 光栅投影扫描测量实训范例 .....	(43)
第 4 章 手持式激光扫描测量 .....	(54)
4.1 手持式激光扫描测量系统 .....	(54)

4.1.1	手持式激光扫描测量技术 .....	(54)
4.1.2	手持式激光扫描测量系统组成 .....	(55)
4.2	手持式激光扫描测量的操作流程及方法 .....	(58)
4.3	手持式激光扫描测量实训范例 .....	(62)
第5章	关节臂式测量 .....	(67)
5.1	关节臂式测量机 .....	(67)
5.1.1	关节臂式测量技术 .....	(67)
5.1.2	关节臂测量机系统组成 .....	(69)
5.2	关节臂式测量机的操作流程及方法 .....	(72)
5.3	关节臂式测量机激光扫描实训范例 .....	(76)
第6章	Imageware 逆向建模 .....	(79)
6.1	Imageware 概况 .....	(79)
6.1.1	软件简介 .....	(79)
6.1.2	技术优势 .....	(79)
6.1.3	包含的模块 .....	(80)
6.2	Imageware 处理流程 .....	(81)
6.3	Imageware 逆向建模实训范例 .....	(85)
第7章	Geomagic Studio 逆向建模 .....	(92)
7.1	Geomagic Studio 系统简介 .....	(92)
7.2	Geomagic Studio 操作流程、目标及功能 .....	(93)
7.3	Geomagic Studio 逆向建模实训范例 .....	(94)
7.4	Geomagic 曲面重建中的注意事项 .....	(100)
第8章	正逆向结合建模设计 .....	(102)
8.1	正逆向结合建模设计及操作流程 .....	(102)
8.1.1	正逆向结合建模设计 .....	(102)
8.1.2	Imageware 与 Pro/E、UG 结合建模流程 .....	(104)
8.2	正逆向结合建模设计实训范例 .....	(106)
第9章	Geomagic Qualify 质量检测 .....	(123)
9.1	计算机辅助检测技术简介 .....	(123)
9.2	Geomagic Qualify 软件系统 .....	(126)
9.2.1	Geomagic Qualify 系统简介 .....	(126)
9.2.2	Geomagic Qualify 系统操作流程及功能介绍 .....	(127)
9.3	Geomagic Qualify 质量检测实训范例 .....	(130)

第 10 章	FreeForm 触觉造型系统	(139)
10.1	FreeForm 系统简介	(139)
10.1.1	系统操作界面	(140)
10.1.2	力反馈设备 PHONTOM	(141)
10.2	主要功能模块介绍	(142)
10.2.1	构造 3D 曲线	(142)
10.2.2	2D 草图设计	(142)
10.2.3	构造黏土	(143)
10.2.4	雕刻黏土	(143)
10.2.5	黏土细节造型	(144)
10.2.6	变形黏土	(145)
10.2.7	选择/移动	(145)
10.2.8	曲面/实体	(146)
10.2.9	系统特点	(147)
10.3	基于 FreeForm 的数据修复实训范例	(147)
10.4	基于 FreeForm 系统的造型设计实训范例	(151)
第 11 章	交互式数控编程加工	(157)
11.1	刀具路径与交互式数控编程	(157)
11.1.1	自由曲面刀具路径	(157)
11.1.2	图形交互式数控编程系统	(158)
11.2	交互式数控编程加工操作流程	(159)
11.2.1	典型交互式数控编程加工流程	(159)
11.2.2	UG 数控加工编程操作流程	(160)
11.2.3	MasterCAM 数控加工编程操作流程	(162)
11.2.4	UG 与 MasterCAM 数控编程加工技术比较	(163)
11.3	交互式数控编程加工实训范例	(164)
11.3.1	UG 编程加工实训范例	(164)
11.3.2	MasterCAM 编程加工实训范例	(175)
第 12 章	FDM 快速成型系统	(183)
12.1	快速成型技术概述	(183)
12.1.1	快速成型技术的发展概况	(183)
12.1.2	主要类型	(183)
12.1.3	快速成型技术的优缺点及应用范围	(184)



12.2	FDM 快速成型技术 .....	(185)
12.2.1	FDM 成型技术特点 .....	(185)
12.2.2	FDM 设备的结构 .....	(186)
12.3	FDM 快速成型操作流程 .....	(188)
12.3.1	构造三维模型.....	(188)
12.3.2	三维模型的网格化处理.....	(188)
12.3.3	STL 文件的分层处理 .....	(188)
12.3.4	成型.....	(189)
12.3.5	后处理.....	(190)
12.3.6	成型前应注意的事项.....	(190)
12.4	FDM 快速成型实训范例 .....	(191)
第 13 章	数控雕刻快速成型制造 .....	(197)
13.1	数控雕刻快速成型系统.....	(197)
13.1.1	数控雕刻快速成型技术.....	(197)
13.1.2	数控雕刻快速成型系统组成.....	(198)
13.1.3	数控雕刻快速成型操作流程.....	(201)
13.2	数控雕刻快速成型实训范例 .....	(203)
13.3	数控雕刻快速成型机操作注意事项 .....	(214)
第 14 章	逆向工程技术综合应用实例.....	(216)
14.1	数据采集阶段 .....	(217)
14.2	建模设计阶段 .....	(220)
14.3	编程加工阶段 .....	(223)
14.4	生产发货阶段 .....	(230)
附录	.....	(233)
参考文献	.....	(242)

# 第1章 绪 论

## 1.1 逆向工程技术概述

逆向工程 (Reverse Engineering, RE) 是近年来发展起来的消化、吸收和提高先进技术的一系列分析方法及应用技术的组合,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,给人们有益的启示。

据统计,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,极大提高了生产率。因此,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。

在 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,运用各种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。概括地说,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 (3D) 数字化测量和构造实物的 CAD 模型并利用各种成熟 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如图 1.1 所示。

逆向工程的重大意义在于,它不是简单地把原有物体还原,而是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。

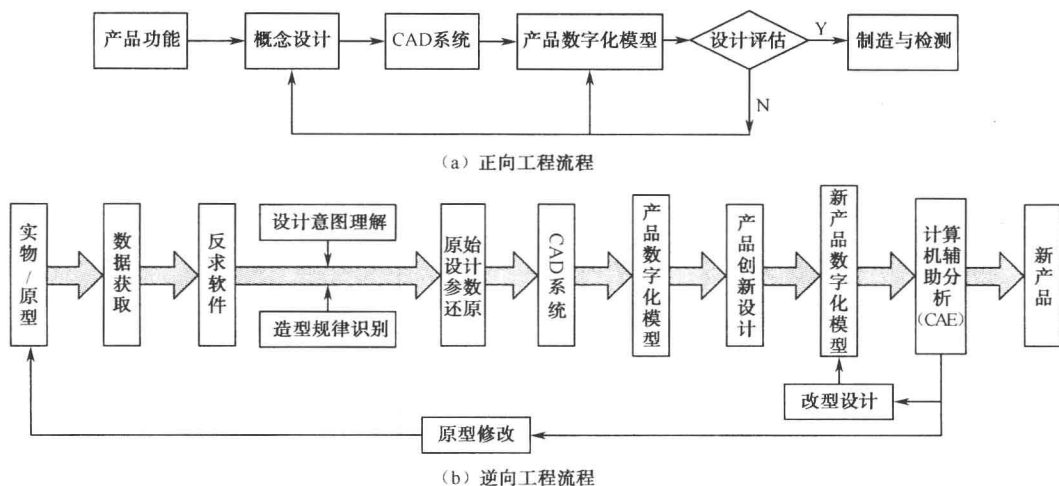


图 1.1 正向工程与逆向工程

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手段，在已有产品的基础上设计新产品，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，是一门跨学科、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等方面。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。由此可以将逆向工程定义：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。

逆向工程的大致过程：首先由数据采集设备获取样件表面（有时需要内腔）的数据，其次输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 模型的建立是逆向工程中的关键技术。图 1.2 是逆向工程应用领域最为广泛的工作流程图。

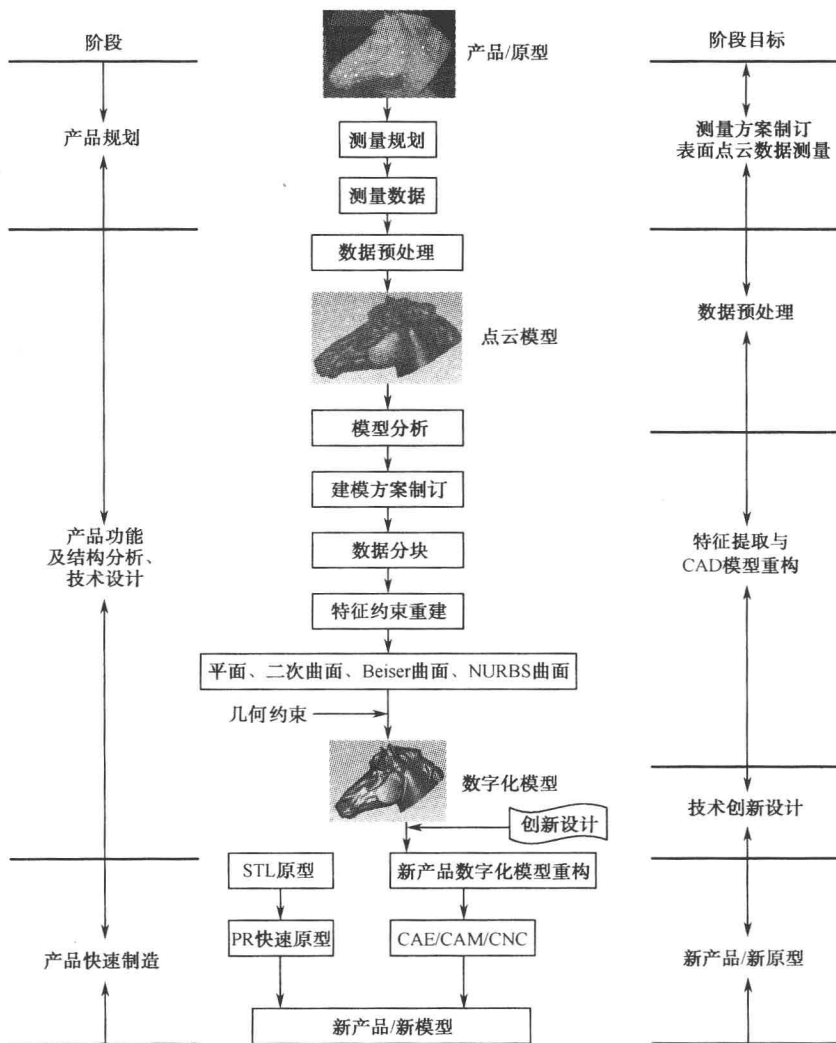


图 1.2 逆向工程的工作流程图

从逆向工程流程可以看出，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、硬件主要有以下几种。



### 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,非接触式测量系统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;二是专用的逆向工程软件,典型的有 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,有光固化成型、选择性激光烧结、熔融沉积制造、分层实体制造、三维打印等系统,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

随着新的逆向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,而且应用逆向工程消化吸收先进技术经验,并使产品研制周期缩短 40% 以上,极大提高了生产率和竞争力。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。具体来说,逆向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。由于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。因此,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,再利用逆向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尤为重要。

(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替代的作用。

(3) 当设计需要通过实验测试才能定型的工件模型时,通常采用逆向工程的方法,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 代码或快速原型加工所需的数据,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,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。逆向工程成为制造—检验—修正—建模—制造过程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。应用逆向工程技术,还可以对工艺品、文物等进行复制,可以方便地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,需要首先建立人体的几何模型。采用逆向工程技术,可以摆脱原来的以手工或者按标准制定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,可以方便地对快速原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，用逆向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，工业界已用逆向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。

从逆向工程的应用领域分析可以看出，逆向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。据资料报道和实验验证，应用逆向工程技术后，产品的设计周期可以从几个月缩短为几周；逆向工程也是支持敏捷制造、计算机集成制造、并行工程等的有效工具，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。因此，这一技术已成为产品创新设计的强有力的支撑技术。充分利用逆向工程技术，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，还造成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三维数据的采集方法基本上可以分为接触式（Contact）和非接触式（Non-Contact）两种。

接触式包括三坐标测量机（Coordinate Measuring Machining, CMM）和关节臂测量机；而非接触式主要有基于光学的激光三角法、激光测距法、结构光法、图像分析法以及基于声波、磁学的方法等。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，还没有找到一种完全适用于工业设计逆向测量方法。各种数据采集方法分类如图 1.3 所示。

在接触式测量方法中，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（ $\pm 0.5\mu\text{m}$ ），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。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。

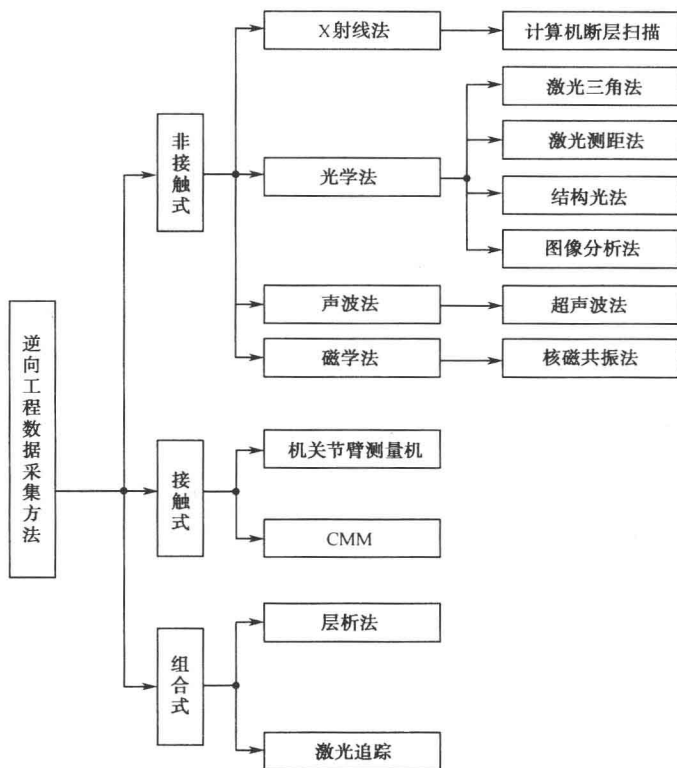


图 1.3 逆向工程数据采集方法分类

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为目前的计算机数字控制（CNC）型的高级阶段。目前，智能化是 CMM 发展的方向。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。一般常用的非接触式测量方法分为被动视觉和主动视觉两大类。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，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、光度立体法、立体视觉和由遮挡轮廓恢复形状等，其中在工程中应用较多的是后两种方法。

立体视觉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。

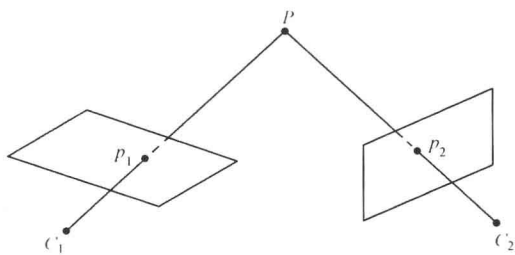


图 1.4 立体视觉原理图

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 6 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（相对误差为 1%~2%），因此在计算机被动测距中得到了广泛应用。但立体匹配始终是最重要也是最困难的问题，其有效性有赖于三个问题的解决，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，称为遮挡轮廓恢复形状，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。