



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



CAD/CAM系列

逆向工程综合技能 实训教程

黄诚驹 主编

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
CAD/CAM 系列

逆向工程综合技能实训教程

Nixiang Gongcheng Zonghe Jineng Shixun Jiaocheng

黄诚驹 主编



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，共分7个项目：逆向工程技术概述、常规测量工具及其操作技能实训、MasterCAM X2 构建技术技能实训、Pro/E 构建技术技能实训、三坐标测量机及其操作技能实训、光栅扫描与数据处理技能实训、使用常规测量工具与 Pro/E 进行反求设计实训。

本书综合性强、工程实践特色突出，可作为高职高专或应用型本科模具设计与制造、数控技术等机电类专业的教材，也可供相关从业人员作为培训材料或参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

逆向工程综合技能实训教程/黄诚驹主编. —北京：高等教育出版社，2011.3

ISBN 978 - 7 - 04 - 030289 - 9

I. ①逆… II. ①黄… III. ①工业产品 - 计算机辅助设计 - 高等学校 - 教材 IV. ①TB472 - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 246117 号

策划编辑 徐 进 责任编辑 徐 进 封面设计 于 涛 责任绘图 尹 莉
版式设计 王 莹 责任校对 姜国萍 责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京鑫丰华彩印有限公司

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 18.25
字 数 440 000

购书热线 010 - 58581118
咨询电话 400 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2011 年 3 月第 1 版
印 次 2011 年 3 月第 1 次印刷
定 价 28.70 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 30289 - 00

前 言

逆向工程又称反求工程或反求设计,是以现代设计理论、方法、测量技术为基础,运用专业人员的工程设计经验、知识和创新思维,对已有的实物进行解剖深化的重新设计和再创造。本书以崭新的视角搜索机械工程应用领域中最前沿的实用技能、技术,以创新的方式加以提炼和整合,密切联系机械工程实际应用的需求,结合高职模具、机械制造、数控、机电一体化等专业课程改革的发展趋势,是为开设综合性强、实训特色突出的新型专业骨干课程而编写的高职教材。本书以工学结合的项目实训、知识与技能融合的教学内容、引导与启发的范例教学方式,探索高职教育的开放式教学改革形式和人才培养新模式。在全面突出职业素质与系统能力培养的指导思想下,以机械通识教育和逆向工程综合应用能力培养为教学目标,按范例、引导练习和综合性练习组织学生完成相关的技能与素质培训。

根据编者多年的机械及 CAD/CAM 的教学经验和近几年来对大机电类高职毕业生的跟踪调查,近年广泛运用的逆向设计技术是大机电类高职毕业生必须掌握的一项非常重要的应用技术。对这门综合性应用技术的学习、掌握,应按机械工程的养成素质培养过程进行,最好的方法是:让学生在较长时间的工程实践积累中去形成。指导学生从一进校就开始学习测量、计算机建模,随后开展综合职业技能的训练,并辅以同期开设的其他专业课程,可以实现上述目的。作为大机电类专业高职高专学生养成素质教育的教程,应在第一学年就将其发给学生,以开讲座、课外研修拓展结合导师制的方式,指导学生进行长时期的实践学习;作为大机电类专业高职高专学生关键职业能力培养的教程,可采取综合职业技能实训专周(4~5周)的形式,融合对应专业方向的其他关键职业能力(如模具设计与制造、快速成型、机电产品结构及造型设计等),开展实践与理论、工作与学习相结合的一体化教学形式组织实施。本书同时配有素材文件,使用本书的读者可登录 <http://hve.hep.com.cn> 进行下载。

本书由武汉职业技术学院黄诚驹担任主编并编写项目1、项目5、项目6(单元1、2、3),山西机电职业技术学院韩静国任副主编并编写项目4的单元3,武汉职业技术学院范瑜珍编写项目3,李鄂琴编写项目2及项目7(单元1),罗俊岭编写项目4(单元1、2)及项目7(单元2、3)北京博维恒信科技发展有限公司刘荣编写项目6(单元4),中山职业技术学院周敏与河北机电职业技术学院陈文杰参加了范例的编写;南京工程学院金茜曾参与项目6初稿的编写。江苏信息职业技术学院副教授王振华负责全书的标准化检索及专业词汇校勘并协助全书统稿工作。广东佛山金沙镇科技开发中心蒋经营、广州合力模具厂刘西奎为本书提供了大量宝贵的原始素材,在此对他们的大力支持和帮助表示万分感谢。

书中的疏漏和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2010年12月

目 录

项目 1 逆向工程技术概述	1	单元 1 三坐标测量机	127
项目 2 常规测量工具及其操作技能		单元 2 三坐标测量机基础测量技能	
实训	13	实训	130
单元 1 计算机桌穿孔盖及套筒的测量	14	单元 3 小汽车模型三坐标测量	136
单元 2 行李箱拉手的测量	35	项目 6 光栅扫描与数据处理技能	
单元 3 肥皂盒的测量	43	实训	152
单元 4 散热片的测量	53	单元 1 ATOS 测量系统的特点、组成结构及	
项目 3 MasterCAM X2 构建技术技能		初始化	152
实训	63	单元 2 熊猫形蛋糕模具壳 ATOS 测量	
单元 1 基础实训	63	实训	155
单元 2 典型曲面构建实训	71	单元 3 自行车坐垫 ATOS 测量实训	157
单元 3 使用常规测量工具与 MasterCAM X2		单元 4 人体工学鼠标 3D CaMega 测量实训	163
进行反求设计实训	83	项目 7 使用常规测量工具与 Pro/E	
项目 4 Pro/E 构建技术技能实训	88	进行反求设计实训	179
单元 1 基础实训	88	单元 1 双飞燕鼠标外壳底座尺寸的	
单元 2 引导式典型零件的构建练习	97	测量	179
单元 3 启发式典型零件的构建练习	110	单元 2 鼠标底座构建	195
项目 5 三坐标测量机及其操作技能		单元 3 调味盒逆向工程综合训练	230
实训	127	参考文献	285

项目1 逆向工程技术概述

[项目目的] 了解逆向工程技术相关的概念及关键技术,引导学生学习掌握逆向工程的基本操作技能,为今后深入学习逆向工程的综合技能奠定必要的基础。

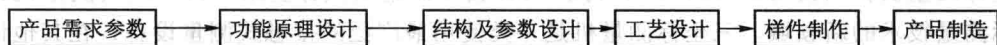
[项目内容] 本项目设有1个教学单元,推荐课时为2课时,主要包括:

- 1) 逆向工程的基本概念及其发展历程和现状。
- 2) 逆向工程的应用及软件。
- 3) 逆向工程技术中的数据测量与处理。
- 4) 逆向工程的发展趋势。

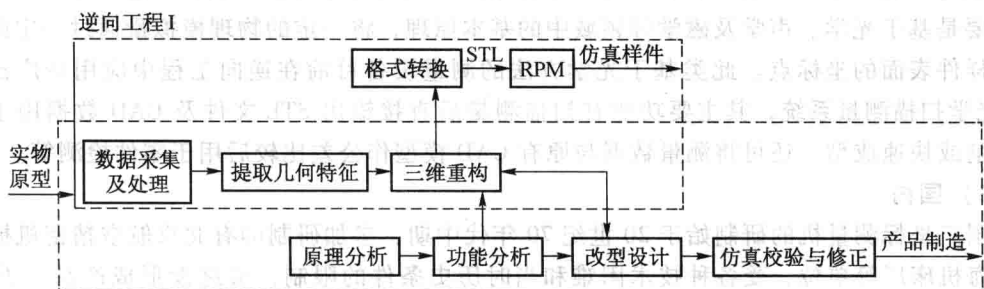
越来越多的电子及日用品的异形曲面采用逆向工程技术快速完成数字建模,加快了新产品问世的步伐,提高了产品的外观新颖性、复杂性及制造精度,并大大降低了产品研制开发的成本。逆向工程技术已作为成功企业的竞争法宝,并成为现代企业开发新产品的重要设计手段。

逆向工程(reverse engineering)又称反求工程或反求设计,是在现代产品造型理念的指导下,以现代设计理论、方法、测量技术为基础,运用专业人员的工程设计经验、知识和创新思维,对已有的实物进行解剖深化的重新设计和再创造过程。

逆向工程又是相对于传统正向工程(convention engineering)而言的。图1.1表示出逆向工程和传统正向工程的区别。传统设计是通过工程师创造性的劳动,将一个未知的设计理念变成人类需求的产品的过程。工程师首先根据市场需求,提出技术目标和技术要求,进行功能设计,确定原理方案,进而确定产品结构,再经过一系列的设计活动之后,得到新产品。由此可见,传统设计是一个“功能→原理→结构”的工作过程。而反求设计是对已知事物的有关信



(a) 传统正向工程流程



(b) 逆向工程流程

图 1.1 传统正向工程与逆向工程流程对照

息充分消化和吸收,在此基础上加以创新改型,通过数字化及数据处理后重构实物的三维原型。反求设计是“实物原型→原理、功能→三维重构”的工作过程。

一、逆向工程的发展历程及现状

(一) 国际

第二次世界大战后,百废待兴的日本为了民族工业的振兴,大量引进先进的制造技术和设备,在吸收、消化过程中日本开始研究逆向工程技术。他们提出“第一台引进,第二台国产化,第三台出口”的口号,通过近 20 年的不懈努力,终于使日本迅速崛起成为世界先进制造国家。20 世纪 60 年代,逆向工程作为独立的新兴学科出现在国际工业界。发展到 20 世纪 80 年代后期,逆向工程技术逐步应用到先进制造领域中。当今,逆向工程技术作为一种新产品开发的重要手段受到广泛的重视。国际、国内设计和制造方面的重要学术会议开始将逆向工程及相关技术的研讨作为一个重要的会议专题,如 Geometric Modeling and Processing Series、IEEE Transactions on Image Analysis and Modeling、SIGGRAPH 和 SPIE 等会议。著名的期刊《CAD》于 1997 年编发了一本逆向工程研究专集。从重要文献和会议情况看,国际上已经形成了一批长期从事逆向工程研究的单位和个人。目前逆向工程已发展为 CAD/CAM 系统中的一个相对独立的研究分支,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。除机械领域外,三维测量、模型重建技术还用于医学、地理、考古等领域的图像处理和模型恢复。

意大利、德国、英国、美国、日本等工业强国在逆向工程方面的研究依然走在世界的前列,他们对逆向工程技术进行了更为深入的研究,并取得了巨大的经济效益,开发出一系列可用于逆向工程的高精度三坐标测量机、接触式和非接触式扫描仪、激光跟踪仪等。

1956 年,英国 Ferranti 公司开发了世界上第一台三坐标测量机,这台具有现代意义上的测量机是以光栅作为长度基准并用数字显示的。1962 年,FIAT(菲亚特)汽车公司一位质量控制工程师在意大利都灵市创建了 DEA(Digital Electronic Automation)公司,成为世界上第一家专业制造坐标测量设备的公司。1963 年 10 月,DEA 公司制造出世界上第一台龙门式测量机,开创了坐标测量技术的新领域。三坐标测量机是一类使用最广泛的接触式测量设备,在其他设备尚未实用化时,它是逆向工程的研究重点。近十年来,随着传感技术、控制技术、图像处理和计算机视觉等相关技术的发展,出现了各种各样的样件表面的几何数据获取方法。非接触式测量方法主要是基于光学、声学及磁学等领域中的基本原理,将一定的物理模拟量通过一定的算法转化为样件表面的坐标点。此类基于光学方法的测量设备目前在逆向工程中应用最广泛。如 ATOS 光学扫描测量系统,其主要功能有扫描测量后直接输出 STL 文件及 CAD 数据用于数控成型铣削或快速成型,还可将测量数据与原有 CAD 模型作公差比较后用于零件检测等。

(二) 国内

我国三坐标测量机的研制始于 20 世纪 70 年代中期,参加研制的有北京航空精密机械研究所、上海机床厂等单位,受各种技术困难和当时历史条件的限制,最终没形成产品。进入 20 世纪 80 年代,许多公司引进国外的生产许可证进行生产,如北京航空精密机械研究所取得意大利 DEA 的许可证,生产 IOTA 系列测量机;上海机床厂和新天光学仪器厂分别购买了德国 LEITZ 的 PMM 许可证。鉴于成本等因素,除 IOTA 机型外,其他机型均没有批量生产。1993

年,青岛前哨精密机械有限责任公司与荷兰 INDIVERS 公司合资成立了中国第一家测量机合资公司——青岛前哨英柯发测量设备有限公司(QI TECH)。通过中外工程技术人员共同努力,先后开发出具有国际先进水平的多个测量机产品。从 1996 年开始,QI TECH 公司稳居国内测量机市场首位,产品远销英国、韩国、新加坡等 9 个国家和地区。1999 年 8 月,前哨与世界三大测量机制造商公司之一的 Brown & Sharpe 集团合资,成立了青岛前哨朗普测量技术有限公司(Brown & Sharpe 前哨),成为世界知名测量机集团的一员。进入 21 世纪,随着 Brown & Sharpe 集团被瑞典 HEXAGON 集团收购,Brown & Sharpe 前哨与其他世界知名的测量机品牌,包括美国 Brown & Sharpe、意大利 DEA、德国 LEITZ、美国 SHEFFIELD、瑞典 CE JOHANSSAN 以及著名的测量软件 PC-DMIS 专业开发商 WILCOX 和精密量具/量仪制造商瑞士 TESA 公司、关节臂测量机专业制造商法国 ROMERS A 以及美国 CIMCORE 公司一起成为 HEXAGON 计量集团的重要成员和生产制造基地之一,成为 HEXAGON 计量集团在亚太地区的重要研发、生产及技术支持基地。2004 年 6 月,Brown & Sharpe 前哨更名为海克斯康测量技术(青岛)有限公司。

在逆向工程技术的整体应用和研究上,除 CMM 外,我国对三维扫描技术应用领域的相关研究还非常有限。与国外相比,国内研究起步晚,经费投入少。国内三维信息获取理论和相关技术的研究大多局限于学术研究或样品阶段,投入生产应用的并不多,产业化发展程度较差。令人欣慰的是,目前已有一些突破。无论是在技术应用方面还是在学科研究与设备开发方面,均取得可喜的进展。近十多年来,在珠三角、长三角逆向工程已被广泛应用到轻工、电子和模具行业中,以至在这些地区的工业园内,抄数、逆向工程的广告比比皆是。此外,在设备开发方面,华中科技大学图像识别与人工智能研究所和北京邦文文化发展公司经过近两年的努力,合作研制成功了我国第一台小型三维激光彩色扫描系统 3DLCS95,并于 1996 年和 1998 年获得两项国家专利。在学科研究方面,西安交通大学 CIMS 中心面向 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对集成系统和自动建模技术的研究,浙江大学生产工程研究所对三角面片建模的研究,南京航空航天大学 CAD/CAM 工程研究中心基于海量散乱点的三角网格面重建和自动建模方法的研究,西北工业大学对数据点处理及建模的研究等,均在三维扫描、数据处理及后续建模方面取得进展。

二、逆向工程的应用

逆向工程技术实现了设计制造技术的数字化,为现代制造企业充分利用已有的设计制造成果带来便利,从而降低新产品开发成本,提高制造精度,缩短设计生产周期。据统计,在产品开发中采用逆向工程技术作为重要手段,可使产品研制周期缩短 40% 以上。

逆向工程的应用领域主要是飞机、汽车、玩具及家电等模具相关行业。近年来,随着生物、材料技术的发展,逆向工程技术也开始应用在人工生物骨骼等医学领域。在我国,逆向工程技术特别是在生产各种汽车、玩具配套件的地区、企业有着十分广阔的应用前景。这些地区、企业经常需要根据客户提供的样件制造出模具或直接加工出产品。在这些企业,测量设备和 CAD/CAM 系统是必不可少的,但是由于逆向工程技术应用不够完善,严重影响了产品的精度以及生产周期。因此,逆向工程技术与 CAD/CAM 系统的结合对这些企业的应用有着重要意义。一方面各个制造企业非常需要逆向工程技术,但另一方面又苦于缺乏必要的推广指导和合适的软件产品。这种情况严重制约了逆向工程技术在制造行业的推广。与 CAD/CAM 系统在我

国几十年的应用时间相比,逆向工程技术为工程技术人员所了解只有二十多年甚至几年的时间。时间虽短,但逆向工程技术广泛的应用前景已经为大多数工程技术人员所关注,这对提高我国制造行业的整体技术含量,进而提高产品的市场竞争力具有重要的推动作用。

目前,逆向工程技术的应用主要有以下几个方面:

(一) 无零件设计图样逆向生成样件

在没有设计图样或者设计图样不完整的情况下,通过对零件原型进行测量,生成零件的设计图样或 CAD 模型,并以此为依据产生数控加工的 NC 代码,加工复制出零件原型。无零件设计图样逆向生成样件的原理框图如图 1.2 所示。

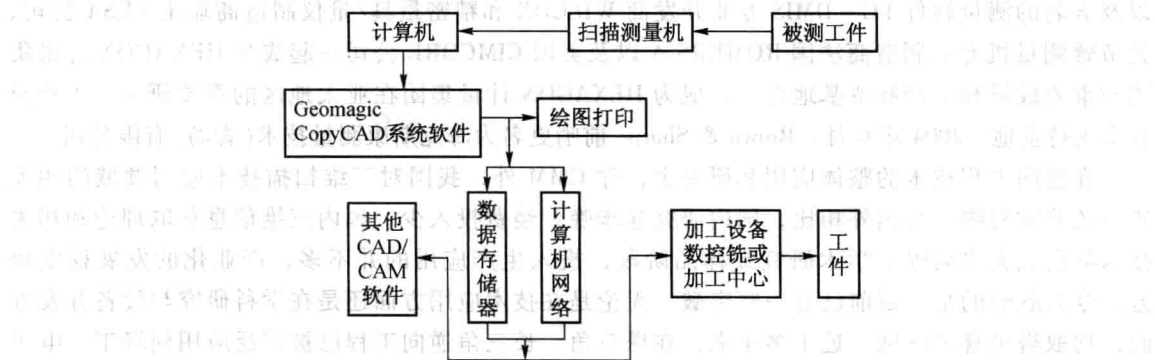


图 1.2 无零件设计图样逆向生成样件原理框图

(二) 以实验模型作为设计零件及反求其模具的依据

对通过实验测试才能定型的工件模型,也通常采用逆向工程的方法。比如航天航空领域,为了满足产品对空气动力学等的要求,首先要求在初始设计模型的基础上经过各种性能测试(如风洞实验等)建立符合要求的产品模型,这类零件一般具有复杂的自由曲面外形,最终的实验模型将成为设计这类零件及反求其模具的依据。

(三) 模具行业

由于模具制造过程中经常需要反复试冲后修改模具型面。对已达到要求的模具经测量并反求出其数字化模型,在后期重复制造或修改模具时,就可方便地运用备用数字模型生成加工程序,快捷完成重复模具的制造。从而大大提高模具备份、复制的生产效率,降低模具制造成本。

(四) 美学设计领域

例如汽车外形设计广泛采用真实比例的木制或泥塑模型来评估设计的美学效果。此外,如计算机仿形、礼品创意开发等都需要用逆向工程的设计方法。

三、逆向工程应用软件

逆向工程应用软件能控制测量过程,产生原型曲面的测量点云,以合适的格式传输至 CAD/CAM 系统中;或在生成及接收的测量数据基础上,通过编辑和处理直接生成复杂的三维曲线或曲面原型,选择合适的格式后,再转入 CAD/CAM 系统中,经过反复修改完成最终的产品造型。

从20世纪80年代开始,国外对逆向工程应用软件就展开了一系列的研究开发。近年国内的几所著名大学,如清华大学、浙江大学、南京航空航天大学等在这方面也相继开展研究,并前后推出一系列的逆向工程应用软件。除一些实验室的小型软件外,自主开发的商用逆向工程软件有浙江大学生产工程研究所的逆向工程CAD软件RE-SOFT和西北工业大学的实物测量造型系统NPU-SRMS。南京航空航天大学CAD/CAM工程研究中心从20世纪90年代初开始对逆向工程进行研究,近年来,课题组对逆向工程中散乱点云的三角化、三角网格模型的简化、优化调整,三角网格模型的区域划分和分片连续B样条曲面重建等技术进行了研究,开发了一套逆向工程原型软件系统,取得了一些阶段性成果。由于缺乏自主CAD/CAM软件的支撑,加之逆向工程的上游测试设备和下游应用(CAD/CAE/CAM)软件基本是国外产品,使得国产逆向工程软件在设备接口、数据转换和应用上一直滞后于相关产品,仅有的开发软件显得势单力薄,在与国外软件的竞争中处于相对劣势。

(一) 三大类应用软件

这些种类繁多的逆向工程应用软件,按其使用功能可划分为三大类:

1. 无曲线、曲面处理功能的测量软件

测量点云尚不能直接处理成曲线、曲面,需转换为合适的格式文件后,传入其他CAD/CAM系统中,通过主流CAD/CAM软件将测量点云处理成原型曲面。如配三坐标测量机的专用逆向工程软件PC-DMIS,虽具有可对工件几何特征量进行直接测量,能够完成几何关系的计算、构造和形位公差的评价与分析、交互式超级报告等功能,但仍不能直接生成测量零件的原型曲面。

2. 非独立的曲线、曲面处理的逆向工程软件

测量点云经后置处理后直接生成曲面,生成的曲面可采取无缝连接的方式或有冗余数据的过渡方式集成到CAD/CAM系统作后续处理。此类逆向工程应用软件中比较有代表性的有DELCAM公司的CopyCAD。作为系列集成软件中的专业模块,其数据模型及数据库管理均与系统的其他专业模块保持一致。当测量中产生的数字模型直接嵌入CAD/CAM模块时会自动延续成为同一数据模型,便捷生成复杂曲面和产品零件原型。此类逆向工程软件中还有一种属于外挂的第三方软件,如ImageWare、ICEM Surf等分别作为UG及Pro/E系列产品中独立完成逆向工程的点云数据读入与处理功能的模块,也能将测量点云直接处理成质量很高的原型曲面,但模型在CAD/CAM系统中延续时会产生冗余数据;另外还有一些CAD/CAM系统中集成的反求模块,如UG中的PointCloud功能、Pro/E中的Pro/SCAN功能、CATIA的RE2模块等。

3. 完全独立曲线、曲面处理的逆向工程软件

如美国Raindrop公司的Geomagic、法国Matra公司的Strim、韩国INUS公司的RapidForm等一些专业处理三维测量数据的应用软件,它们一般具有多元化的功能,即除了处理几何曲面造型以外,还可以处理以CT、MRI数据为代表的断层界面数据造型,从而使软件在医疗成像领域具有相当的竞争力。

(二) 典型的逆向工程软件

以下分别介绍几个典型的逆向工程软件,其中有完全独立的逆向工程软件,也有外挂的。

1. Geomagic Studio

Geomagic Studio是美国Raindrop(雨滴)公司的产品,可由扫描所得的点云数据创建完美的

多边形模型和网格,并可自动转换为 NURBS 曲面。该软件也是应用最为广泛的逆向工程软件。Geomagic Studio 主要包括 Qualify、Shape、Wrap、Decimate、Capture 五个模块。主要功能包括:

- 1) 能自动将点云数据转换为多边形(Polygons)。
- 2) 能快速减少多边形数目(Decimate)。
- 3) 能把多边形转换为 NURBS 曲面。
- 4) 能对模型曲面与测量点云曲面进行分析比较(提供公差分析报告等)。
- 5) 能输出与 CAD/CAM/CAE 匹配的文件格式(IGS、STL、DXF 等)。

2. Imageware

Imageware 是美国 EDS 公司的产品,广泛应用于汽车、航空、航天、消费家电、模具、计算机零部件等设计与制造领域。之初被应用于航空航天和汽车工业,是因为这两个领域对空气动力学性能要求很高,在产品开发的开始阶段就要考虑空气动力学对产品结构方面的要求。设计流程是:根据工业造型需要设计出结构→制作出油泥模型→将其送到风洞实验室去测量空气动力学性能→根据实验结果对模型进行反复修改,直到获得满意结果为止→对最终得到的油泥模型,利用三坐标测量机器测出模型表面点阵数据→利用 Imageware Surfacar 进行处理→获得 class 1 曲面。

Imageware 逆向工程软件的主要功能模块有:

- 1) Surfacar——逆向工程工具和 class 1 曲面生成工具。
- 2) Verdict——对测量数据和 CAD 数据进行对比评估。
- 3) Build it——提供实时测量能力,验证产品的制造性。
- 4) RPM——生成快速成型数据。
- 5) View——功能与 Verdict 相似,主要用于提供三维报告。

3. CopyCAD

CopyCAD 是英国 DELCAM 公司的产品,它能从已存在的零件或实体模型中产生三维 CAD 模型。该软件能够接受来自坐标测量机床的数据,同时跟踪机床和激光扫描器。CopyCAD 人性化的用户界面简便易学,用户可在极短的时间内快速掌握其功能。用户上手后,通过使用 CopyCAD 能快速编辑曲面点云数据,借以生成具有高质量的复杂曲面。该软件系统可以完全控制曲面边界的选取,并根据设定的公差自动产生光滑的多块曲面,同时, CopyCAD 还能够确保在连接曲面间正切的连续性。其主要的功能有:

- 1) 接收数字点云数据输入。
- 2) 输出 DUCT 图形和三角模型文件。
- 3) 控制 CNC 坐标测量机床。
- 4) 控制激光扫描器、三维扫描器和 SCANTRON。
- 5) 分隔 ASCII 码和 NC 文件。

4. RapidForm

RapidForm 是韩国 INUS 公司的产品,它提供了新一代运算模式,实时将点云数据运算出无缝的多边形曲面,能处理无顺序排列的点数据以及有顺序排列的点数据,为 3D Scan 的后处理提供了优化的接口。RapidForm 的主要功能如下:

1) 提供过滤点云工具以及分析表面偏差的技术, 消除 3D 扫描仪所产生的不良点云。

2) 具有彩色点云数据处理功能, 支持彩色 3D 扫描仪, 可以生成最佳化的多边形, 并将颜色信息映象在多边形模型中。在曲面设计过程中, 颜色信息将完整保存, 也可以运用 RP 成型机制作出有颜色信息的模型, 通过实时上色编辑工具还可以直接对模型编辑颜色。

3) 点云合并功能, 多个点扫描数据有可能经手动方式将特殊的点云加以合并。

(三) 逆向工程软件发展现状

市场上大多数反求软件或反求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, 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。

四、逆向工程设计制造的工作流程

逆向工程与传统设计制造流程中的各功能模块, 在序列上被相互换位倒置。在逆向工程中, 按照现有的零件原型进行设计生产, 零件所具有几何特征与技术要求都包含在原型中; 在传统的设计制造中, 按照零件最终所要承担的功能以及各方面的影响因素进行从无到有的设计。此外, 从概念设计出发到最终形成 CAD 模型的传统设计是一个确定的明晰过程, 而通过对现有零件原型数字化后形成 CAD 模型的逆向工程是一个推理、逼近的过程。逆向工程一般可分为 5 个阶段:

(一) 零件原型的三维数字化测量

采用三坐标测量机(CMM)或激光扫描等测量装置, 测量采集零件原型表面点的三维坐标值, 使用逆向工程专业软件接收处理离散的点云数据。

(二) 提取零件原型的几何特征

按测量数据的几何属性对其进行分割, 采用几何特征匹配与识别的方法来获取零件原型所具有的设计与加工特征。

(三) 零件原型三维重构

将分割后的三维数据在 CAD 系统中分别作曲面模型的拟合, 并通过各曲面片的求交与拼接获取零件原型表面的 CAD 模型。

(四) CAD 模型的分析及改进

对虚拟重构出的 CAD 模型, 从产品的用途及零件在产品中的地位、功用进行原理和功能分析, 确保产品良好的人机性能, 并实施有效的改进创新。

(五) CAD 模型的校验与修正

根据获得的 CAD 模型, 采用重新测量和加工出样品的方法来校验重建的 CAD 模型是否满足精度或其他试验性能指标的要求。对不满足要求者重复以上过程, 直至达到零件的功能、用途等设计指标的要求。

五、逆向工程关键技术

逆向工程的关键技术: 数据采集与处理(即数字化技术)和曲面构造(即建模技术), 辅以其他技术手段构成逆向工程技术体系。其支撑技术体系的原理框图系统如图 1.3 所示。

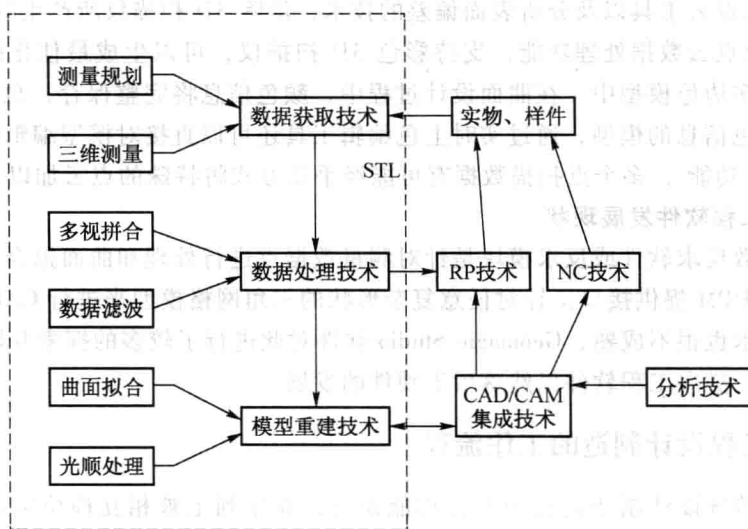


图 1.3 逆向工程支撑技术体系的原理框图

在逆向工程技术中，CAD 模型数字化是关键的第一步。只有获取正确的测量数据，才能进行误差分析和曲面比较，实现 CAD 曲面建模。下面对数据采集与处理方法进行介绍。

1. 数据采集方法

目前，数字化方法主要分为接触式测量和非接触式测量两类。接触式测量是通过传感测量与样件的接触来记录样件表面的坐标位置。接触式测量的精度一般较高，可以在测量时根据需要进行规划，从而做到有的放矢，避免采集大量冗余数据，但测量效率很低。非接触式测量方法主要是基于光学、声学、磁学等领域中的基本原理，将测得的物理模拟量通过适当的算法转化为样件表面的坐标点。非接触式测量技术测量效率高，所测数据能包含被测物体足够的细节信息。由于非接触式测量技术本身的限制，在测量时会出现一些不可测区域（如型腔、小的凹形区域等），可能会造成测量数据不完整。同时，此种测量方式所产生的数据过于庞大，会增大数据处理和曲面重建的负担。

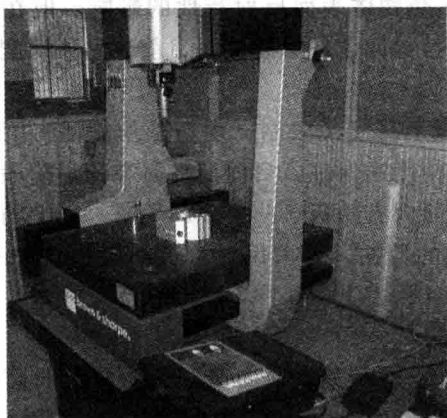
近年来，国内也开展了基于其他数字化方法的逆向工程的研究，如清华大学激光快速成型中心进行的照片反求、CT 反求及西安交通大学研创的激光扫描法、层析法等。其中三维激光扫描技术采用空间对应法测量原理，用激光束对物体表面进行扫描，由 CCD（光电耦合）摄像机采集被测表面的光轨迹曲线，然后通过计算机处理，最终得到物体表面的三维几何数据，根据这些数据可以进行快速成型和 NC 加工。

测量常用的数字化设备有三维坐标测量机、激光测量仪、工业 CT 和逐层切削照相测量、数控机床（NC）加工测量装置、专用数字化仪器等。逆向工程在实际应用中对三维表面的测量仍以坐标测量机为主，部分测量设备如图 1.4 所示。

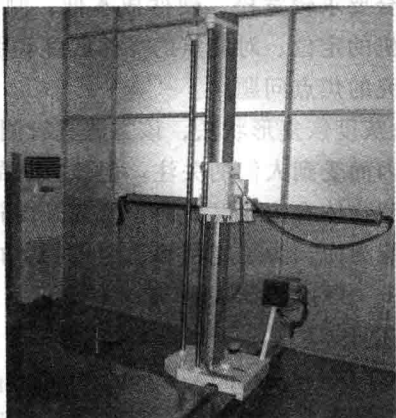
下面简要介绍几种常用测量方法：

（1）三维坐标测量法

坐标测量机（co-ordinate measure machine，简称 CMM）根据测量原理的不同，可分为机械接触式坐标测量机、光学坐标测量机和激光坐标测量机。



(a) 小型三坐标测量机



(b) 大型手动三坐标测量机

图 1.4 机械接触式三坐标测量机

1) 机械接触式三坐标测量机 机械接触式三坐标测量机通过监测测头与实物的接触情况获取坐标数据。三坐标测量机最早大多采用固定刚性测头。固定刚性测头的优点是测量原理及过程简单、方便,对被测物体的材质和颜色无特殊要求。但它的缺点也不少,主要是测头与工件之间的接触要靠测量人员的手感来把握,由此带来的系统误差较难克服;测量速度慢,测量数据密度低;必须对测量结果进行测头损伤及测头半径三维补偿,才能得到真实的实物表面数据,并且不能对软质材料或超薄物体进行测量。另外,测头半径三维补偿问题依然存在。

机械接触式三坐标测量机的最大优点是成本低,所以目前应用较为广泛。

2) 激光坐标测量机 激光坐标测量机由激光扫描实物,同时由摄像机录下光束与实物接触部位。激光扫描测量是非接触式测量。从测量学观点看,由于非接触式测量头在测量时不接触待测物体的表面,它可以从根本上解决接触式测量所产生的各种缺陷,非接触式测量可真正实现零接触力测量,这样有效避免了在高精度测量中测量力带来的系统误差和随机误差,且可方便实现对软质和超薄物体表面形状的测量。另外,还具有测量速度快、效率高等特点。缺点是在测量中,它受所测物体的材质和颜色的影响。当光束投射到物体表面上时,由于被测表面散射光含有正、反射成分,且被测表面倾斜引起接收光功率的质心偏移,测量精度随入射角(光束与被测点法线的夹角)的增加而降低,有时甚至使测量失效,造成一定的测量误差。

3) 光学坐标测量机 随着计算机技术和光电技术的发展,基于光学原理,以计算机图像处理为主要手段的三维复杂曲面非接触式快速测量技术得到飞速发展。光学坐标测量机由光源照射实物,利用干涉条纹技术计算实物坐标数据,主要有如下几种方法:

① 投影光栅法,采用普通白光将正弦光栅或矩形光栅投影到被测物体表面,根据 CCD 摄取变形光栅图像。投影光栅法的优点是测量范围大,可对整幅图像的数据进行处理;由于不需要逐点扫描,因而测量速度快,成本低,易于实现。这种测量方法的不足之处在于对表面变化剧烈的物体进行测量时,在陡峭处往往会发生相位突变,从而使测量准确度大大降低。

② 立体视觉法,利用立体视觉原理测量物体,从 2 个或 2 个以上的视点观察同一物体,把二维图像的分析推广到三维景物。这种方法的优点是测量原理清晰;设备简单,操作灵活;

对应用场合要求较宽松,硬件成本低;测量时不受物体表面反射特性的影响。但在这种方法中,摄像机的定位、对应点的立体匹配和图像拼接等问题较难解决。目前,立体匹配已成为立体视觉研究的焦点问题。

③ 由灰度恢复形状法,该方法具有测量过程不受光源限制、现场操作简便、测量范围广等优点,因而受到人们的关注。但该方法的测量精度难保证,目前尚在研究探讨阶段。

当被测物体有内轮廓曲面,尤其是内轮廓曲面内有肋板、凸块或凹块时,以上的测量方法就显得无能为力。为了能精确地测得物体内表面的数据,可采用计算机断层扫描——工业CT和层析法——逐层扫描法。

(2) 工业CT法

工业CT法(industrial computer tomography,简称ICT)是目前测量三维内轮廓曲面的最先进方法之一,属于非接触测量。它利用一定波长、强度的射线从不同方向照射被测物体,根据光电转换器件所采集射线的强弱,用图像处理技术,测得被测物体表面的形状。

该方法的优点是可对被测物体内部的结构和形状进行无损测量,对内部结构有透视能力。缺点是空间分辨率较低,物体外缘有时模糊不清,数据获取所需时间较长,重建图像的工作量很大,目前现场应用还很少。

(3) 层析法——CGI法

层析法,也称逐层切削扫描法,或CGI(capture geometry inside,简称CGI)。该方法将被测物体在工作台上装夹好,通过数控系统控制铣刀的进给速度,一层层地切削出被测物体的截面,再用CCD摄像获得每一个截面的轮廓图像,通过一系列的图像处理技术,得到每一层的数据。通过这种测量方法可以精确获得被测物体的内、外曲面的轮廓数据。

层析法比工业CT的测量精度更高,成本更低,测量更方便。但这种测量方法是一种破坏性的测量,并且一般用于对于刚性物体的测量,这些都限制了它的应用。

综上所述,非接触测量可以从根本上解决接触式测量所产生的种种缺陷,测量速度快,已成为自由曲面测量的一个发展方向。但非接触式测量的测量准确度受被测表面反射特性的影响很大,对非接触式测量的研究大都集中在非接触式测量方法和激光位移传感器的研制与革新上,以期进一步提高测量准确度、可靠性和测量范围。

(4) CNC坐标测量机

目前用于工业测量的典型数字化设备因使用成本过高,在实际使用中受到限制。而CNC和三坐标测量机使用同样的坐标系统,在信息转换方向上正好互逆,而在动作执行上是相似的,可以借助加工中心高精度的行走机构,通过使用机床测头并编制相应的测量软件,实现零件的在机测量,使得加工中心在某种程度上又兼备了测量中心的功能。另外,机床测头具有价格低、可靠性高、自身精度高等特点,非常适合国内企业的要求。

2. 数据的处理

为使测量数据具备合理性,需对测量数据进行噪声点去除、测头半径补偿、数据分块等;为使测量数据具备完整性,需对测量数据进行数据多视拼合、补测数据的融入等。

物体表面测量数据的处理方法一般可以分为两大类,一类是基于边界的分割法,一类是基于区域的分割法。其中基于边界的分割法首先估计出测量点的法向矢量或曲率,然后将法向矢量或曲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

围区域作为最终的结果。由于在分割过程中只用到边界局部数据,以及存在微分运算,因此这种方法易受测量噪声的影响,特别是对于缓变形面的曲面该方法并不适用。

曲面构造的方法详见项目 3、项目 4 及项目 7。

六、逆向工程存在的问题及发展趋势

(一) 存在的问题

综合起来,逆向工程技术的研究和应用存在如下的问题:

1. 数字化问题

对实物外形的数字化仍存在较大的误差,其数字化过程仍是一种无指导下的行为。

2. 点云的好、快、精的处理问题

在得到了实物外形的点云数据后,如何快速、准确地得到 NURBS 曲面或 B 样条曲面是一个难度很高的工作;另外曲面的光滑与精度是一对矛盾,这需要凭技术人员的经验来解决。

3. 便捷、兼容的数据传递问题

由 RE 软件经过曲面重构后,得到的模型为曲面模型,因此一般要将 RE 中的曲面模型输入 CAD 软件转换成实体模型。由于各种 RE、CAD/CAM 软件系统的数据格式不同,数据文件从一种软件系统输入另一种软件系统时,无法直接传递。另外,CAD 软件与 RP 软件的连接一般采用 STL 数据格式,而 STL 数据格式不仅本身存在着缺陷,而且零件越复杂、精度要求越高的 CAD 模型转化并输出时,出现的错误和缺陷就越多。

(二) 发展趋势

逆向工程是一门正在迅速发展中的新兴学科。它正处于不断发展、研究和探讨的过程中,有很多理论和关键技术未能得到彻底解决,造型精度有待进一步提高,测量建模算法的有效性、效率以及所建模型的误差(测量、算法误差)分析也有待于深入的研究,因此逆向工程系统应向自动化、柔性化、快速化、高精度化方向进一步发展,特别要向具有高度自动化的、集成的逆向工程平台 REW(reverse engineering workbench)方向发展。

1. 测量应用的发展趋势

目前,空间测量技术的研发主要集中在如何高速、安全、精确地获取三维几何体内、外轮廓曲面的数据。而这些又与计算机技术、图像传感器 CCD 技术、位置传感器等技术的发展息息相关。总之,测量技术的发展趋势主要体现于以下几点:

1) 利用新型计算机的智能化存储、分析和处理海量测量数据。

2) 提高各种传感器的工作可靠性,提高非接触测量中的测量精度。

3) 测量更简便,操作更人性化、智能化、自动化,可同时获得三维几何体内、外曲面轮廓的数据。

我国在高新技术研究发展计划(863 计划)中已明确提出了研制新型三维扫描仪的计划,由清华大学、西北工业大学和山东大学共同承担了这一任务,这必将对我国三维扫描技术的发展起到很大的推动作用。

2. 规模作业方式的发展趋势

企业规模实施逆向工程时,要实现逆向工程处理链的最优化,要研究和构建逆向工程优化处理的理论及体系。

3. 理论研究的现状及趋势

以匈牙利人 Varady 为首的研究小组对逆向工程中的数据分块、曲线曲面拟合、曲面过渡、自由曲面和规则曲面模型的建立等工作进行了研究。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 结构的建立等进行了研究。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。

4. 国内应用、研究的进展

国内的浙江大学、上海交通大学、西北工业大学、西安交通大学、北京航空航天大学、华中科技大学、南京航空航天大学等均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,负责模型的数据分块以及曲面拟合等)展开研究。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型,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。