

3D 逆向工程技术

许智欽 孙长库 编著

叶声华 范光照 主审



A0965901

中国计量出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

3D 逆向工程技术/许智钦, 孙长库编著. —北京: 中国计量出版社, 2002.3
ISBN 7-5026-1608-X

I. 3… II. ①许… ②孙… III. 三维—动画—图形软件, 3DS MAX
IV. TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 011831 号

内 容 提 要

本书系统地介绍了物体模型 3D 数据的获取、建模及处理等逆向工程技术。主要内容有: 逆向工程的基本理论; 物体模型 3D 数据的接触式和非接触式获取方法和各种实用设备; 各种点、曲线及曲面数据的建模和处理方法; 米老鼠卡通造型、雪橇板、茶壶、鞋楦、熨斗和机车脚踏板等实物的数据获取、曲面重建、图档转换以及模型制造的完整过程; 快速原型和快速模具的发展过程和制造原理; 各种逆向工程软件 DigiSurf、Unigraphics、Surfacer、SolidEdge 和 QuickShape 等的使用方法。

该书可作为从事逆向工程工作的专业技术人员的参考书, 也可作为逆向工程课程的教材和自学参考书。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 100013

电话(010)64275360

E-mail jlfxb@263.net.cn

迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm × 1092 mm 16 开本 印张 10.25 字数 240 千字

2002 年 4 月第 1 版 2002 年 4 月第 1 次印刷

*

印数 1—4 000 定价: 24.00 元

编 审 人 员 名 单

编 著： 许智钦 孙长库

主 审： 叶声华 范光照

参编人员： 郑义忠 张宝峰 陈津平
何昭庆 戴文智 姜至真
王献章 王翌全 张晋嘉
梁又仁

前 言

目前,在消费市场上部分商品已呈现少量多样化、尺寸难以掌握的趋势,产品生产周期也在不断缩短。利用逆向工程与快速原型系统,可有效地缩短产品开发时间,提高市场竞争力。非接触式激光扫描 3D 测量技术及计算机技术的快速发展,为逆向工程技术提供了坚实的硬件基础,应运而生的各种逆向工程软件使逆向工程技术更加完美和实用。

本书系统地介绍了物体模型 3D 数据的获取、建模及处理等逆向工程技术,结合实例介绍了常用的相关设备及软件的使用方法和技巧,有很强的实用性。该书可作为从事逆向工程工作的专业技术人员的参考书,也可作为逆向工程课程的教材和自学参考书。

全书内容共分五章。第一章是概论,介绍了逆向工程的基本概念、逆向工程系统及其使用方法和技巧;第二章介绍了物体模型 3D 数据的接触式和非接触式获取方法和各种实用设备;第三章介绍了各种点、曲线及曲面数据的建模和处理方法;第四章是应用实例,以米老鼠卡通造型、雪橇板、茶壶、鞋楦、熨斗和机车脚踏板等为实例,结合台湾智泰科技公司的 LSH-600 激光扫描仪和 DigiSurf、Unigraphics、Surfacer、SolidEdge 和 QuickShape 等逆向工程软件,详细介绍了模型的 3D 数据获取、曲面重建、图档转换以及模型制造的完整过程;第五章介绍了快速原型和快速模具的发展过程和制造原理。

本书主要由天津大学的许智钦博士和孙长库博士编著,天津大学的叶声华教授和台湾大学的范光照教授对本书进行了认真细致的审阅并提出了许多宝贵建议。参加编写的人员还有天津大学的郑义忠教授、张宝峰博士和陈津平博士及台湾智泰科技公司的何昭庆、戴文智、姜至真、王献章、王翌全、张晋嘉、梁又仁、陶立、王志雄、石红艳等同志为本书做了大量工作,在此一并表示衷心的感谢。

限于作者的水平和经验,书中缺点和错误在所难免,敬请读者和专家批评指正。

编著者

2001 年 10 月

目 录

第一章 逆向工程概论	(1)
第一节 顺向工程	(1)
第二节 逆向工程	(2)
第三节 逆向工程系统	(3)
第四节 逆向工程中的技术难题	(4)
第二章 逆向工程测量系统	(8)
第一节 测量方式	(8)
一、接触式测量	(8)
二、非接触式测量	(9)
第二节 接触式测量原理及技术	(10)
一、接触式探头种类及其工作原理	(10)
二、三坐标测量机	(12)
三、机械手臂	(12)
第三节 非接触式测量原理及技术	(12)
一、三角法位移测量原理	(13)
二、视觉测量基本原理	(16)
三、视觉传感器探头硬件结构	(27)
四、四自由度激光扫描测量仪	(29)
五、激光跟踪测量系统	(29)
第四节 激光扫描测量仪应用实例	(30)
一、LSH 600 激光扫描系统的特点	(30)
二、LSH 600 多面自动定位扫描操作说明	(31)
第三章 逆向工程后处理	(39)
第一节 概论	(39)
第二节 阶数与连续性	(40)
第三节 自由曲线与曲面的数学模型	(40)
一、Bezier 曲线/曲面的数学模型	(41)
二、B-Spline 曲线/曲面的数学模型	(42)

三、NURBS 曲线/曲面的数学模型	(45)
第四节 曲线拟合的原理	(46)
一、近似法	(46)
二、插值法	(47)
第五节 曲线拟合算法	(48)
一、曲线拟合	(48)
二、求曲线参数值	(49)
三、近似法拟合曲线	(49)
第六节 曲线构建	(50)
一、切割曲线	(50)
二、边界曲线	(50)
第七节 曲线修编	(52)
一、曲线修剪	(52)
二、曲线分割	(52)
三、曲线延伸	(53)
四、曲线连接	(55)
第八节 A 级曲面	(56)
第九节 点数据处理	(56)
一、点数据的坐标定位	(56)
二、杂点数据的删除	(59)
三、数据的噪声滤除、排序、平滑化以及筛减	(60)
四、利用特征搜寻功能找出曲面建构的概况或特征	(60)
五、点群或剖面点数据的切割	(61)
第十节 曲线的建构与分析	(62)
一、直线或曲线的建构	(62)
二、剖面曲线的建构	(63)
三、曲线修编	(64)
第十一节 曲面建构与分析	(65)
一、基本几何曲面的建构	(66)
二、利用点数据贴合自由曲面	(66)
三、利用点数据与边界曲线建构曲面	(69)
四、其他曲面建构工具	(69)
五、曲面编辑	(70)
第十二节 点数据网格化	(70)
一、点数据网格化及网格贴图	(70)
二、网格编辑	(71)
三、快速原型的应用	(71)

第四章 实例与软件介绍	(73)
第一节 自由造型曲面建构——米老鼠卡通造型	(73)
第二节 点数据网格化与快速曲面建构——雪橇板	(77)
第三节 产品逆向工程设计——茶壶	(81)
第四节 产品数据数字化——鞋楦	(111)
第五节 点数据坐标整合与定位——熨斗	(137)
第六节 工业用模具开发——机车脚踏板	(140)
第五章 快速原型与快速模具	(145)
第一节 快速原型系统的概念	(145)
第二节 快速原型发展史	(146)
第三节 快速原型种类	(148)
第四节 快速原型的经济效益	(151)
第五节 快速模具	(152)
参考文献	(154)

第一章 逆向工程概论

第一节 顺向工程

传统的工业产品开发均是按着严谨的研究开发流程，从确定功能与规格的预期指标开始，构思产品的组件，然后进行各个组件的设计、制造以及检验，再经过组装、整机检验、性能测试等程序来完成。每个组件都有原始的设计图纸，目前已广泛使用 CAD 来对此设计图纸存档。每个组件的加工也有自己的工序图表，每个组件的尺寸合格与否用产品检验报告来记录。这些所记录的档案均属公司的智能财产，一般通称机密 (know-how)。这种开发模式称为预定模式 (prescriptive model)，此类开发工程亦通称为顺向工程 (forward engineering)。对每一组件来说，其顺向工程的流程如图 1-1 所示。



图 1-1 组件的顺向工程开发流程图

然而，随着工业技术的进步以及经济环境的发展，任何通用性产品在消费者高质量要求之下，功能上的需求已不再是赢得市场竞争力的唯一条件。在近代高功能 CAD 软件的带动下，“工业设计”（又称“产品设计”）的新兴领域已逐渐受到重视，任何产品不仅是功能上要求先进，在产品外观 (object appearance) 上也需要做造型设计，以吸引消费者的注意力。此造型设计多指产品的外形美观化处理，在顺向工程的流程中受传统训练的机械工程师们不能胜任。一些具有美工背景的设计师们可利用 CAD 的技巧构想出创新的美观外型，再以手工方式塑造出模型，如木模、石膏模、黏土模、蜡模、工程塑料模、玻璃纤维模等等，然后再通过三维尺寸测量来建立出自由曲面模型的 CAD 图形文件。这个程序已有逆向工程的概念，但仍属顺向工程，具有对象导向 (object-oriented) 的观念，公司仍保有设计图智能财产。此顺向工程中的造型设计流程如图 1-2 所示，产品实例如图 1-3 所示。



图 1-2 顺向工程中的产品造型设计加工流程图

因此，顺向工程可归纳为功能导向 (functionally-oriented)、对象导向 (object-oriented)、预定模式 (prescriptive model)、系统开发 (system to-be) 以及所属权系统 (legacy system)。

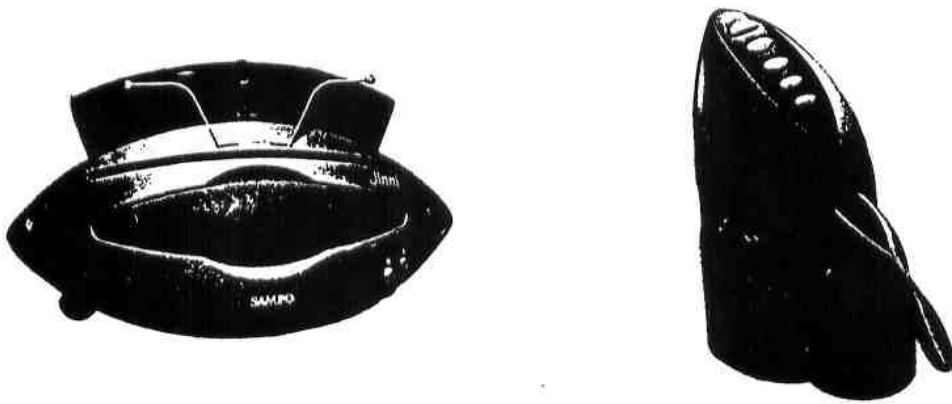
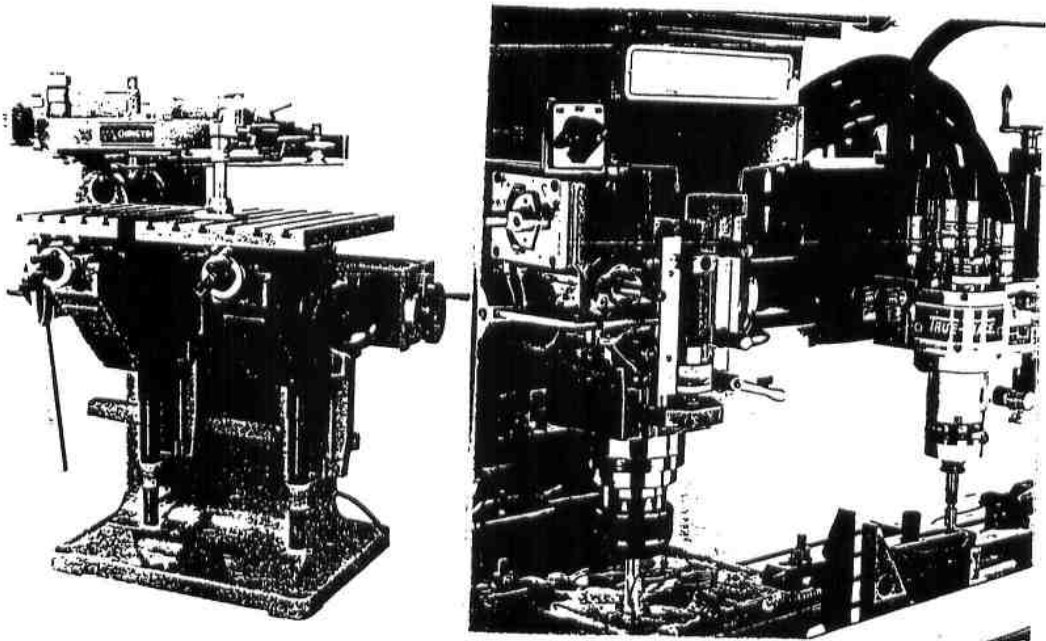


图 1-3 造型设计产品实例——家电产品

第二节 逆向工程

逆向工程 (Reverse Engineering) 通常是以工程方式执行某一模型的仿制工作。往往一件拟制作的产品没有原始设计图文件, 而是委托单位交付一件样品或模型, 如木鞋模、高尔夫球头, 请制作单位复制 (copy) 出来。传统的复制方法是用立体雕刻机或液压三维靠模铣床制作出 1:1 成等比例的模具, 如图 1-4 所示, 再进行批量生产。这种方法属模拟式 (analog type) 复制, 无法建立工件尺寸图档, 也无法做任何的外形修改, 已渐渐为新型的数字化逆向工程系统所取代。



(a)

(b)

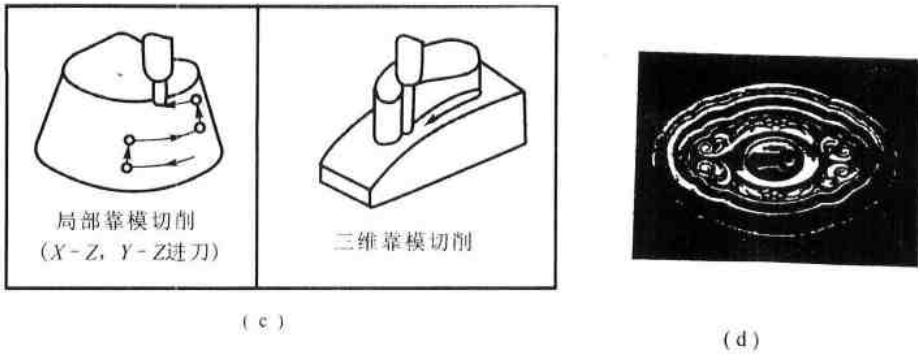


图 1-4 传统靠模方式
(a) 3D 雕刻机; (b) 3D 液压靠模铣床; (c) 靠模方式; (d) 样品

目前所谓的逆向工程是针对一现有工件（样品或模型，尤其适合复杂不规则的自由曲面），利用 3D 数字化测量仪器准确、快速地测量出轮廓坐标值，并建构曲面，经编辑、修改后，将图档转至一般的 CAD/CAM 系统，再由 CAM 所产生刀具的 NC 加工路径送至 CNC 加工机制作所需模具。或者以快速成型机（rapid prototyping）将样品模型制作出来，这一流程称为逆向工程，如图 1-5 所示。

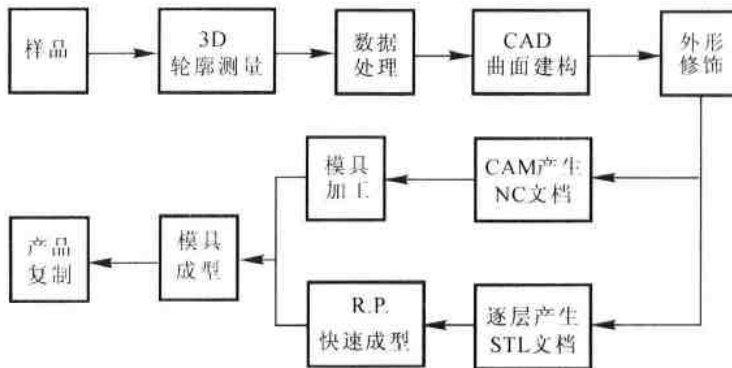


图 1-5 逆向工程流程图

因此，逆向工程可归纳为：功能导向（functionally-oriented）、描述模式（descriptive mode）、系统仿造（system as-is）以及非所属权系统（non-legacy system）。

第三节 逆向工程系统

如前所述，逆向工程首先必须使用精密的测量系统将样品轮廓三维尺寸快速测量出来，然后再以取得的各点数据做曲面处理及加工成型。故建立一套完整的逆向工程系统，需要有下列基本配备：

1. 测量探头

有接触式（触发探头、扫描探头）和非接触式（激光位移探头、激光干涉仪探头、线结构光及 CCD 扫描探头、面结构光及 CCD 扫描探头）两种。

2. 测量机

有三坐标测量机、多轴专用机、多轴关节式机械臂及激光追踪站等。

3. 点群数据处理软件

进行噪声滤除、细线化、曲线建构、曲面建构、曲面修改、内插值补点等。

4. CAD/CAM 软件

一般 PC 级或工作站级 CAD/CAM 系统。

5. CAE 软件

执行各种分析，增加设计成功率。

6. CNC 工具机

执行原型制作或模具制作。

7. 快速成型机

模型产生（有光化学法、粉末成型法、绕线成型法、切纸成型法等等）。

8. 批量生产设备

包括射出成型机、轧出机、钣金成型机等。

第四节 逆向工程中的技术难题

大多数的公司均能以充足的经费来选配出适合其产品开发所需的逆向工程设备，但是最大的难题是须有专业的人才及丰富的经验。要执行逆向工程项目，需要对产品的特性与制作流程有充分的了解。许多产品是由自由曲面组成，对模型上的凹槽、开孔或其他特征须做精确的辨识，以完成模型的建构（如手机机壳、汽车扰流板等）。如何将各点的数据正确无误地处理以建构出有用的曲线、曲面，需要有经验丰富的工程师。此外，逆向工程技术的挑战还包括测量技术上的难题，例如非接触式扫描时工件颜色对扫描结果的影响，超大型工件（如车身、人体雕像等）测量的困难等。

图 1-6 所示为顺向工程系统的流程范例，图 1-7 为逆向工程系统的流程范例，图 1-8 为逆向工程整厂规划的系统流程范例。

总之，逆向工程技术及应用涉及到下列问题：

- (1) 要准确及快速地将工件数据取得；
- (2) 要确实将数据建构成曲面及应有外形；
- (3) 要与各种 CAD/CAM 及 CAE 结合；
- (4) 要节省产品制造成本，提高产品竞争力。

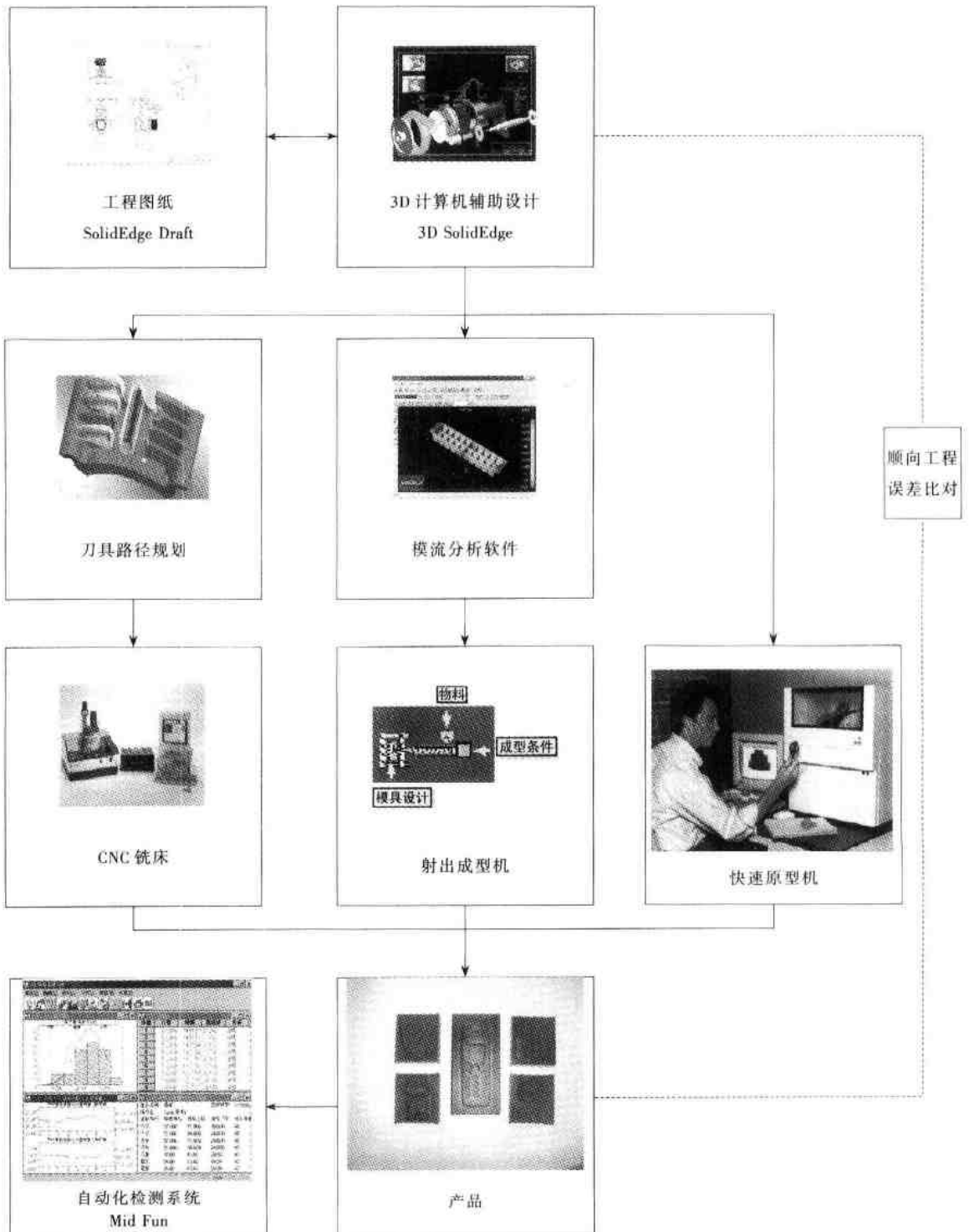


图 1-6 顺向工程系统流程图

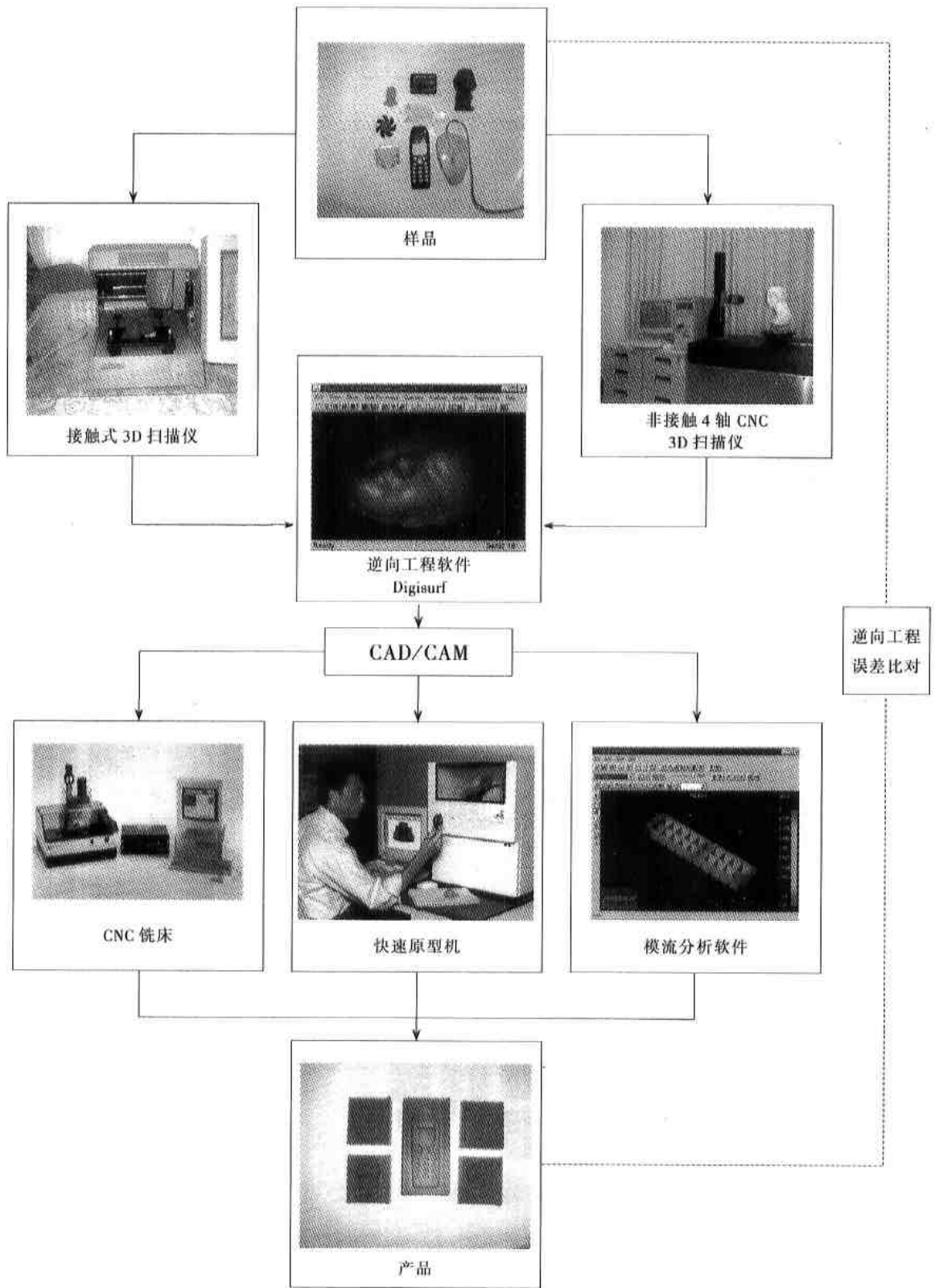


图 1-7 逆向工程系统流程图

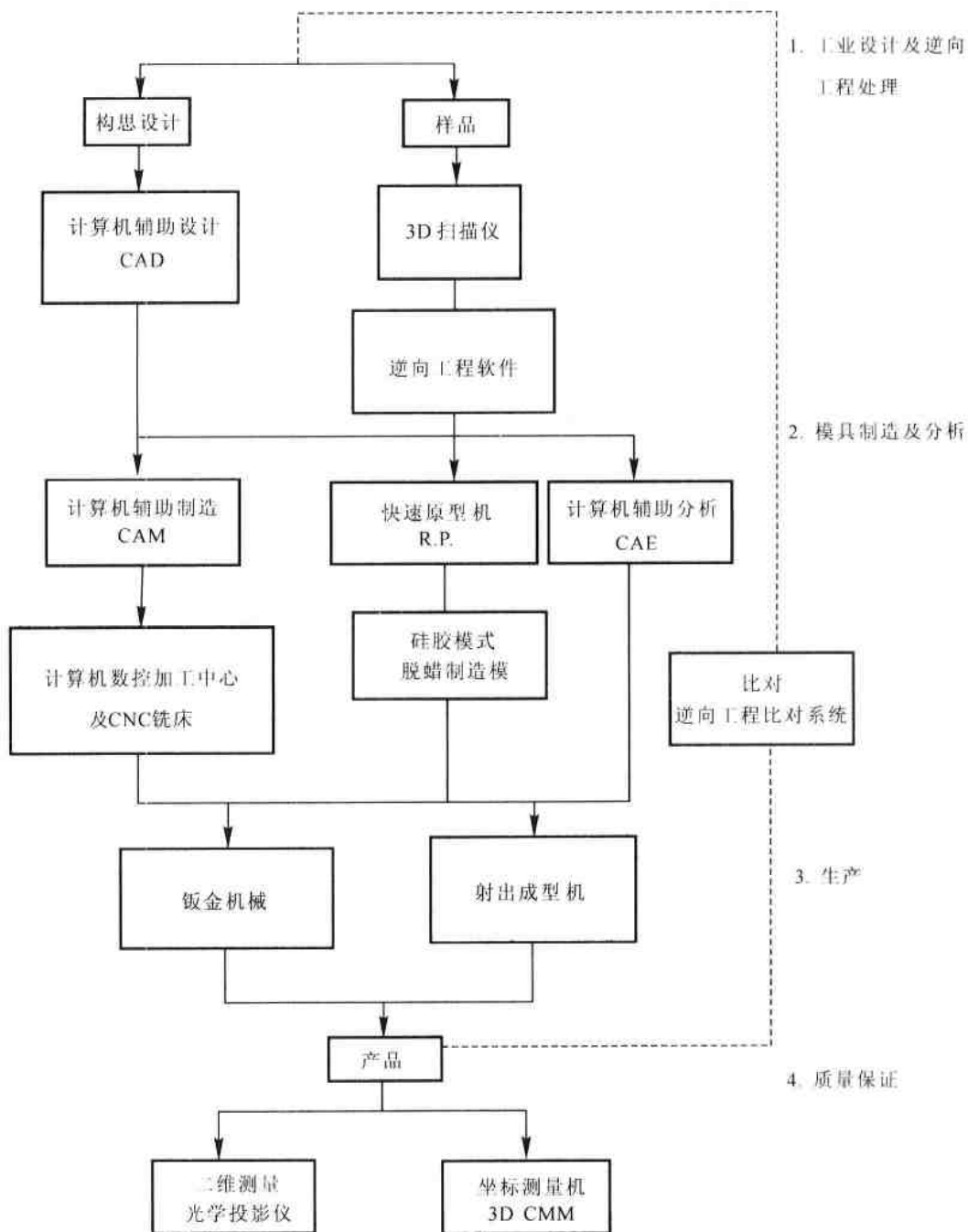


图 1-8 整厂规划流程图

第二章 逆向工程测量系统

在产品开发中,以逆向方式处理的产品往往具有尺寸不易掌握的特性,这包括外观上曲面的造型与结构上各种机构的位置。也就是说,该产品数字数据不是以直接绘制的方式就可获得的。因此,逆向工程的第一任务就是如何取得工程人员所需的点数据,以用于后续的模式建构。在本章中将介绍逆向工程的前处理——点数据的测量技术。

第一节 测量方式

逆向工程所需要的测量按其特性及应用,一般分为两大类:接触式测量与非接触式测量,这两种测量方式各有特色,其优缺点如下所述。

一、接触式测量

接触式测量有以下优点:

(1) 因接触式探头发展已有几十年,其机械结构及电子系统已相当成熟,故有较高的准确性和可靠性。

(2) 接触式测量为探头直接接触工件表面,故与工件表面的反射特性、颜色及曲率关系不大。

(3) 被测物体固定在三坐标测量机上,并配合测量软件,可快速准确地测量出物体的基本几何形状,如面、圆、圆柱、圆锥、圆球等。

接触式测量有以下缺点:

(1) 为了确定测量基准点而使用特殊的夹具,会导致较高的测量费用。不同形状的产品会造成原来的夹具不适用而使成本大幅度增加。

(2) 球形的探头易因接触力造成磨耗。所以,为了维持一定的精度,需要经常校正探头的直径。

(3) 不当的操作容易损害工件某些重要部位的表面精度,也会使探头损坏。

(4) 接触式触发探头是以逐点进出方式进行测量的,所以测量速度慢。

(5) 检测一些内部元件有先天的限制,如测量内圆直径,触发探头的直径必定要小于被测内圆直径。

(6) 对三维曲面的测量,因传统接触触发式探头是感应元件,测量到的点是探头的球心位置,故欲求得物体真实外形则需要对探头半径进行补偿,因而可能会导致修正误差的问题。图 2-1 是探头半径补偿原理图。测量某一曲面时,假设此时探头正好定位在此被测点的表面法线方向上,探头尖端与被测件之间的接触点为 A, A 点至球心 C 点有一偏差量产生,而实际上要求的位置是接触点 A。所以,沿法线负方向必须修正一个探头半径值。整个曲面修正需繁杂及冗长的计算,同时这也是测量误差的来源之一。

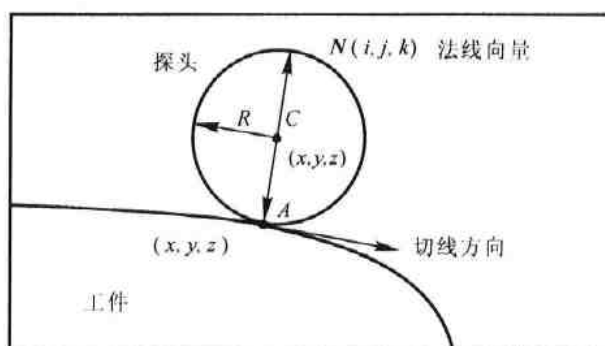


图 2-1 探头半径补偿原理图

(7) 接触探头在测量时，接触探头的力将使探头尖端部分与被测件之间发生局部变形而影响测量值的实际读数。

(8) 测量系统的支撑结构存在静态及动态误差。

(9) 由于探头触发机构的惯性及时间延迟而使探头产生超越(overshoot)现象，趋近速度会产生动态误差。

(10) 另外，测量接触力量即使一定，而测量压力并不能保证一定，这是因为接触面积与工件表面纹路的几何形状有关，不能保证为一样。

二、非接触式测量

近年来，光电技术、微电子技术以及计算机技术的快速发展，使得激光及光学在测量领域中的应用有了重大突破，开启了现代非接触式测量的时代。

非接触式测量主要有以下优点：

- (1) 不必做探头半径补偿，因为激光光点位置就是工件表面的位置。
- (2) 测量速度非常快，不必像接触触发探头那样逐点进出测量。
- (3) 软工件、薄工件、不可接触的高精密工件可直接测量。

非接触式测量主要缺点如下：

(1) 测量精度较差，因非接触式探头大多使用光敏位置探测器 PSD(position sensitive detector)来检测光点位置，目前的 PSD 的精度仍不够，约为 20 μm 以上。

(2) 因非接触式探头大多是接收工件表面的反射光或散射光，易受工件表面的反射特性(reflectivity)的影响，如颜色、斜率等。

(3) PSD 易受环境光线及杂散光影响，故噪声较高，噪声信号的处理比较困难。

(4) 非接触式测量只做工件轮廓坐标点的大量取样，对边线处理、凹孔处理以及不连续形状的处理较困难。

(5) 使用 CCD 作探测器时，成像镜头的焦距会影响测量精度，因工件几何外形变化大时成像会失焦，成像模糊。

(6) 工件表面的粗糙度会影响测量结果。

表 2-1 列出了激光扫描非接触测量和三坐标测量机接触测量的技术特点。

表 2-1 激光扫描非接触测量和三坐标测量机接触测量的技术特点

	激光扫描仪	三坐标测量机
测量方式	非接触式	接触式(接触压力 150 g 以上)
测量精度	10 ~ 100 μm	1 μm
传感器	光电接收器件	开关器件
测量速度	1 000 ~ 12 000 点/秒	人工控制(较慢)
前置作业	需喷漆, 无基准点	设定坐标系, 校正基准面
工件材质	无限制	硬质材质
测量死角	光学阴影处及光学焦距变化处	工件内部不易测量
误差	随曲面变化大	部分失真
优势	<ul style="list-style-type: none"> ①测量速度快, 曲面数据获取容易; ②不必做探头半径补偿; ③可测量柔软、易碎、不可接触、薄件、皮毛、变形细小等工件; ④无接触力, 不会伤害精密表面 	<ul style="list-style-type: none"> ①精度较高; ②可直接测量工件的特定几何特征
缺点	<ul style="list-style-type: none"> ①测量精度较差, 无法判别特定几何特征; ②陡峭面不易测量, 激光无法照射到的地方无法测量; ③工件表面与探头表面不是垂直, 则测得的误差变大; ④工件表面的明暗程度会影响测量的精度 	<ul style="list-style-type: none"> ①需逐点测量, 速度慢; ②测量前需做半径补偿; ③接触力大小会影响测量值; ④接触力会造成工件及探头表面磨损, 影响光滑度; ⑤倾斜面测量时, 不易补偿半径, 精度难保证; ⑥测量工件内部时, 形状尺寸会影响测量值

第二节 接触式测量原理及技术

一、接触式探头种类及其工作原理

接触式探头分为硬式探头(hard probe 或 mechanical probe)、触发式探头(touch trigger probe)及模拟式探头(analog probe)等三种, 其基本工作原理如图 2-2 所示。

1. 硬式探头

硬式探头是最早使用的探头, 通过手动探头接触工件表面, 由人眼及感觉做判断, 再利用脚踏开关触发, 将此点坐标传送到处理器。

因硬式探头成本低, 至今仍有人使用, 但因接触力的大小及接触点的判断极为困难, 故使用者需要有较多经验, 误差也较大。