

增材制造技术系列丛书

丛书主编 史玉升



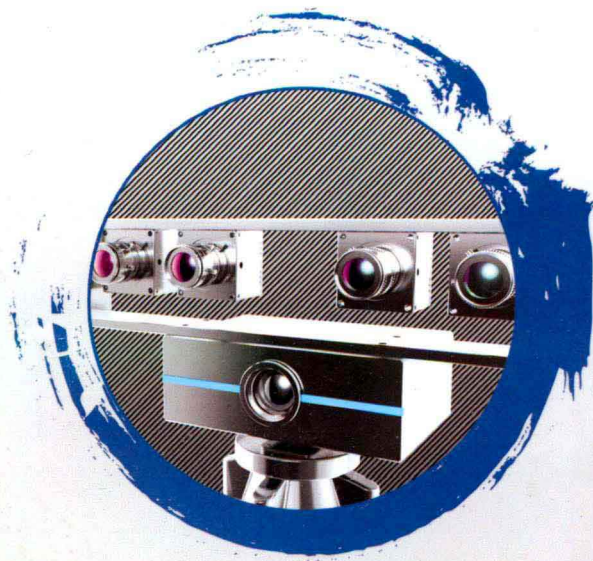
M

MIANJIEGOU GUANG SANWEI

CELIANG JISHU

面结构光三维 测量技术

编著 李中伟 等



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

增材制造技术系列丛书

丛书主编 史玉升

面结构光三维测量技术

编著 李中伟 王从军 周 钢
何万涛 钟 凯

华中科技大学出版社
中国·武汉

内 容 简 介

本书为增材制造技术系列丛书,全书分五章阐述相关内容:创新设计方法,三维测量原理与方法,面结构光三维测量技术原理,面结构光三维测量设备简介及操作,三维测量与数据处理实例。

本书以论述面结构光三维测量技术为主,介绍与之相关的正向工程、逆向工程,并以PowerScan系列三维测量设备为例详细介绍了设备操作方法及三维数据处理方法。

本书可作为高等院校机械工程专业、材料工程专业、职业教育制造工程类的教材与参考书,以及产品开发和制造业技术人员的参考书,亦可供关心制造技术发展的不同领域、不同行业的人士和大学、中学、小学学生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

面结构光三维测量技术/李中伟 等 编著. —武汉:华中科技大学出版社,2013.6
ISBN 978-7-5609-8613-5

I. 面… II. 李… III. 表面结构-三维-光学测量 IV. ①O643.32 ②TB22

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 311093 号

面结构光三维测量技术

李中伟 等 编著

策划编辑:俞道凯

封面设计:刘 卉

责任编辑:周忠强

责任校对:马燕红

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:华中科技大学惠友文印中心

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:6.25

字 数:113千字

版 次:2012年6月第1版第1次印刷

定 价:12.80元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

鸣 谢

华中科技大学
材料科学与工程国家级实验教学示范中心

资 助

增材制造技术系列丛书

编 委 会

主 任 史玉升

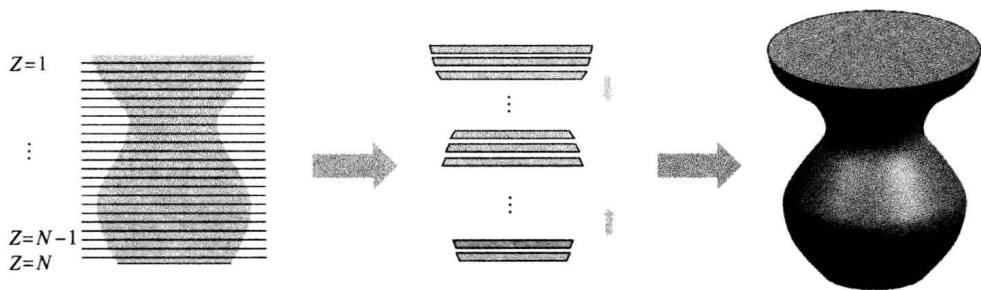
委 员 (按姓氏笔画排序)

王从军 文世峰 李中伟 刘 洁

闫春泽 张李超 周 钢 莫健华

陶明元 蔡道生 魏青松

增材制造技术属于一种非传统加工工艺,也称为 3D 打印、增量制造、快速成形等,是近 30 年来全球先进制造领域兴起的一项集光/机/电、计算机、数控及新材料于一体的先进制造技术。与切削等材料“去除法”不同,增材制造技术通过将粉末、液体或片状、丝状等离散材料逐层堆积,“自然生长”成三维实体,因此被通俗地称为“3D 打印”。增材制造技术将一个三维实体变为若干个二维平面,大大降低了制造的复杂程度。理论上,只要在计算机上设计出结构模型,就可以应用该技术在不需要刀具、模具及复杂工艺条件下,快速地将设计变为实物,这符合现代和未来制造业对产品个性化、定制化、特殊化需求日益增加的发展趋势。



“3D 打印”

增材制造技术将传统的复杂制造系统缩小到一台制造装备中,是制造技术的革命性进步。它使制造活动更加简单,使得每个家庭、每个人都有可能成为创造的主人。这一发展方向给社会的生产和生活方式带来新的变革,同时对制造业的产品设计、制造工艺、制造装备及生产线、材料制备、相关工业标准、制造企业形态乃至整个传统制造体系产生全面、深刻的变革。增材制造是提升制造业创新能力的重要途径,体现在以下几个方面:

- (1) 拓展产品的创意与创新空间,优化产品性能;
- (2) 极大降低产品研发创新成本,缩短创新研发周期;
- (3) 能制造出传统工艺无法加工的零部件,极大增强了工艺实现能力;

(4) 增材制造与传统工艺的结合,能极大优化和提升工艺能力。

增材制造将是增强创新能力的工具,实现绿色发展的重要途径。增材制造将变革传统制造模式,促进制造与服务融合发展,体现在以下几个方面:

(1) 变革传统制造模式,形成个性化、高性能、复杂零部件的增材制造系统,全面变革产品研发、制造、服务模式;

(2) 支撑个性化定制等高级创新模式的实现,并催生专业化创新服务模式;

(3) 带动相关支撑产业发展,促进高端制造业发展。

增材制造技术除了对工业和人们的生活等领域产生革命性的影响以外,还有一个重要的影响就是将其用于教学,开发学生的创造力。

为此,我们以华中科技大学快速制造中心在增材制造技术领域 20 多年的科研和教学成果为基础,以其研制的各类增材制造装备为实验平台,编写此系列丛书,以便将增材制造技术推广到各级教学过程中,提高学生的创造能力。

该系列丛书包括:《粉末激光熔化增材制造技术》(魏青松等)、《粉末激光烧结增材制造技术》(闫春泽等)、《薄材叠层增材制造技术》(王从军等)、《液态树脂光固化增材制造技术》(莫健华等)、《丝材熔融增材制造技术》(文世峰)、《面结构光三维测量技术》(李中伟等)。

由于以此类方式编写的系列丛书尚属第一次,且要满足不同层次学生的不同需要,涉及的内容非常广泛,因此丛书中的错误在所难免,殷切地希望同行专家和使用者的批评指正。

史玉升

2012 年 10 月于华中科技大学

前言

三维测量技术是增量(材)制造技术体系中的重要组成部分,可用于制造前期的逆向设计和制造后期的精度检测。在现有的三维测量技术中,面结构光三维测量技术由于具有测量速度快、测量精度高等优势,是目前最为先进的三维测量技术之一。

华中科技大学快速制造中心从 2001 年开始,在国家科技支撑计划、欧盟框架七项目、国家自然科学基金、湖北省自然科学基金创新群体和博士后科学基金等多项国家与省部级科研项目的资助下,完成了相位计算、系统参数标定、全局误差控制和高速计算模式等多项关键技术,研发了具有完全自主知识产权的 PowerScan 系列面结构光三维测量系统,并实现产业化,目前已在国防、航空航天、汽车、铁路、电力、生物医学、文物数字化、教学等领域得到了广泛应用。相关科研成果获国家发明专利 9 项、软件著作权 5 项,发表学术论文近 50 篇,获 2011 年度教育部科技进步一等奖和 2012 年度日内瓦国际发明展览会金奖各一项。

为了培养三维测量技术方面的科技人才,更深入地研究此项技术,并在各行各业进行广泛地推广应用,凝聚和总结华中科技大学快速制造团队在此方面的研究成果,而编写了本书。

本书对多种三维测量原理与方法、面结构光三维测量技术及操作方法、三维测量与数据处理等方面进行了全面系统的论述。全书共分为五章:第 1 章论述创新设计方法,主要包括正向工程、逆向工程和正向逆向混合设计;第 2 章论述现有的多种三维测量原理与方法,主要包括接触式测量和非接触式测量;第 3 章介绍面结构光三维测量原理;第 4 章介绍面结构光三维测量设备原理及操作,包括系统简介、系统操作指南、系统安装方法、软件界面介绍和系统操作说明;第 5 章介绍三维测量与数据处理实例,主要包括扫描流程和数据处理方法。

在撰写本书的过程中,我们以十几年来从事三维测量技术的科研成果为基础,兼顾了不同知识背景读者的要求,既保证内容新颖,反映最新研究成果,又注重理论知识探讨和实际应用实例介绍。因此,本书既可适用于不同领域的工程技术人员阅读,也可作为于相关专业在校师生的参考书。

本书集中反映了华中科技大学快速制造团队的有关成果,这些成果是由上



百人的研究团队经过几十年的长期坚持研究而取得的,本书的作者李中伟、王从军等只是该研究团队中从事三维测量技术研究的部分代表。因此,衷心地感谢华中科技大学快速制造团队的创始人黄树槐教授及现任领导史玉升教授的指导!衷心地感谢华中科技大学快速制造团队的各位教师、工程技术人员和历届研究生长期不懈的辛勤工作!衷心地感谢科技部、教育部、湖北省、武汉市等项目的资助,衷心地感谢中国科学院出版基金的资助!也向为本书作出贡献的所有人员表示感谢!在本书的撰写过程中,参考了相关的研究论文和成果,在此向这些研究论文和成果的 authors 表示感谢!

由于本书中部分内容是我们的最新研究成果,且有些研究工作还在继续之中,我们对该技术的认识还在不断深化之中,对一些问题的理解还不够深入,加之作者的学术水平和知识面有限,因此书中的错误和缺陷在所难免,殷切地期望同行专家和读者批评指正。

李中伟

2012 年 11 月于华中科技大学

目录

第 1 章 创新设计方法	(1)
1.1 正向工程	(1)
1.2 逆向工程	(4)
1.3 正向逆向混合设计	(16)
第 2 章 三维测量原理与方法	(19)
2.1 接触式测量	(19)
2.2 非接触式测量	(20)
第 3 章 面结构光三维测量技术原理	(25)
3.1 引言	(25)
3.2 国内外研究现状	(25)
3.3 测量原理简介	(27)
第 4 章 面结构光三维测量设备简介及操作	(36)
4.1 概述	(36)
4.2 PowerScan 系列快速三维测量系统简介	(36)
4.3 PowerScan 系列快速三维测量系统操作指南	(39)
4.4 三维测量系统安装	(43)
4.5 软件界面介绍	(48)
4.6 系统操作说明	(50)
4.7 扫描测量	(63)
第 5 章 三维测量与数据处理实例	(69)
5.1 扫描测量流程	(69)
5.2 扫描测量实例	(69)
5.3 数据处理	(80)
参考文献	(87)

第1章 创新设计方法

1.1 正向工程

1.1.1 正向工程的原理及意义

传统工业产品的开发均遵循着序列严谨的研发流程,从功能与规格的预期指标确定开始,构思产品的零部件需求,再由各个元件的设计、制造及检验零件组装、检验整机组装、性能测试等程序来完成。每个元件都保留有原始的设计图,此设计图目前已广泛采用计算机辅助设计(CAD)软件的图形文档来保存。每个零件的加工也有所谓的工令图表,对复杂形状零件需要三维数控机床加工的,则用计算机辅助制造(CAM)软件产生 NC 加工档案来保存。每个零件的尺寸合格与否以产品质量管理检验报告来记录。这些所记录的档案均属公司的知识产权,一般通称机密(know - how)。这种开发模式称为预定模式(prescriptive model),此类从零件的功能设计、结构设计开始,到图样绘制、制定工艺规程、生产出产品的开发工程,业界通称为正向工程(Forward Engineering, FE)。

然而,随着工业技术的提升以及经济环境的成长,任何通用性产品在消费者高品质要求之下,功能上的需求已不再是赢得市场竞争力的唯一条件。在近代高功能计算机辅助工程(CAE)软件的带动下,“工业设计”(又称“产品设计”)这一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,其物件外观(object appearance)上也需要做造型设计,以吸引消费者的注意力。这些设计理念在正向工程的流程中已不是传统训练下的机械工程师们所能胜任。一些具有美工背景的设计师们可在 CAE 的技术支持下构思出创新的美观外

形,再以手工方式,利用各种材料塑造出木模、石膏模、黏土模、蜡模、工程塑料模、玻璃纤维模等实体模型。用这些模型再以三维尺寸测量的方式,建立出具有自由曲面模型的 CAD 图形文档。这种建模方法具有逆向工程的观念,但仍属正向工程的一环,公司仍保有设计图的知识产权。

因此,正向工程可归纳为功能导向(functionally-oriented)以及物件导向(object-oriented)、预定模式(prescriptive model)、系统开发(system to-be)及所属权的系统(legacy system)。在还没有计算机绘图以前,工程图大多是由手绘制的,此时的工程图以二维(2D)草图为主要的施工图,组装部分则以轴测图来描述三维(3D)的立体结构,此时,以 2D 与 3D 的方式分开独立绘制,因此还称不上所谓的正向工程。在计算机软件与硬件发展成熟的今天,利用计算机绘图来取代手工绘图,此过程中,由计算机所绘制的 2D 图形文档,经由适当的排列后,可以方便地采用 3D 立体图绘制,此种将概念与尺寸表达在 2D 平面图上(早期大多数人只看得懂 2D 平面图),然后利用 2D 的图素与相关尺寸,绘制成 3D 立体图,此过程可以说是一种正向工程。

1.1.2 正向工程的设计实例:地球仪拼图

通常的拼图都是用小型平面图形拼接成一幅完整的图形。本设计的思想是用具有特殊轮廓的曲面小图块拼接成一个完整的球体,因此,仅用一套模具制作所有的曲面小图块就能实现地球仪的立体拼接。同时,为了减少曲面小图块的模具的种类,将所有曲面小图块的形状设计成完全一致。具体方法如下。

(1) 根据球面几何分析,可以将一个完整的球最多分成 20 个完全相同的基本正三角形铺满,然后将三角形的每条邻接边设计成拼图形状(见图 1-1)。

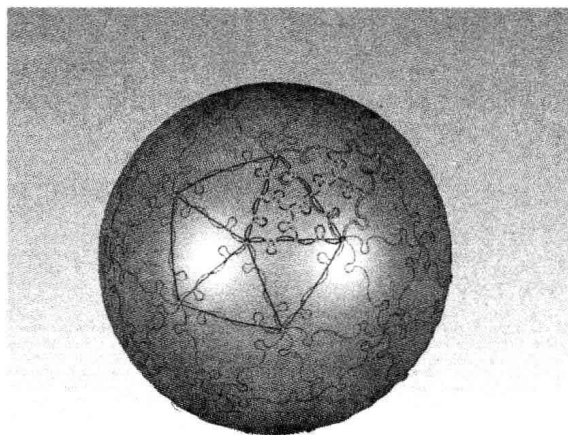


图 1-1 将圆球分割成 20 个完全一致的曲边正三角形



(2) 为了增加拼图数量及改善小图块的形状,以基本正三角形的中心为起点将每个正三角形进一步分成 3 个完全一致的基本小拼图图块(见图 1-2)。

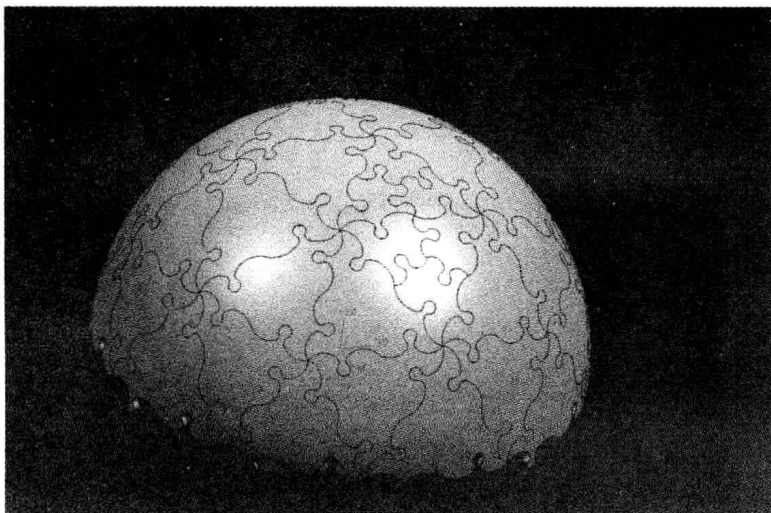


图 1-2 用基本三角形状拼接的球面

图 1-3 所示为基本小拼图块,图 1-4 为用基本小拼图块拼接的效果图。

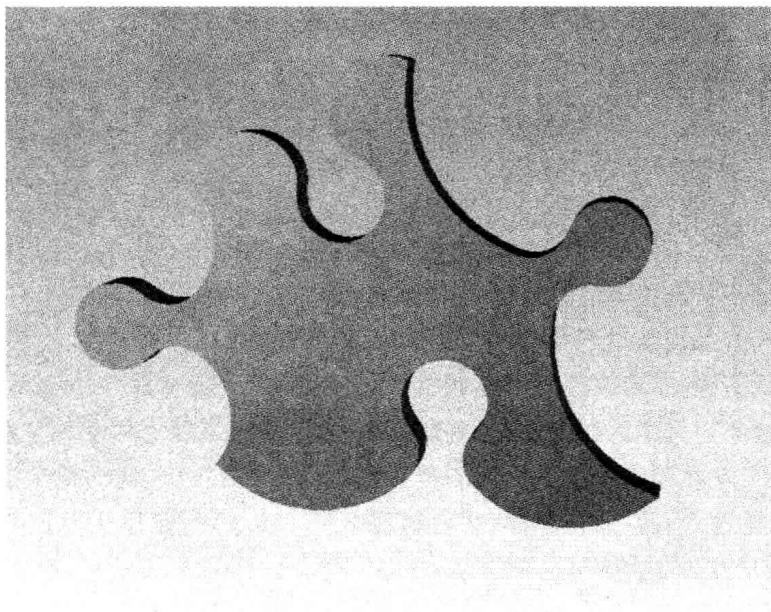


图 1-3 基本小拼图块

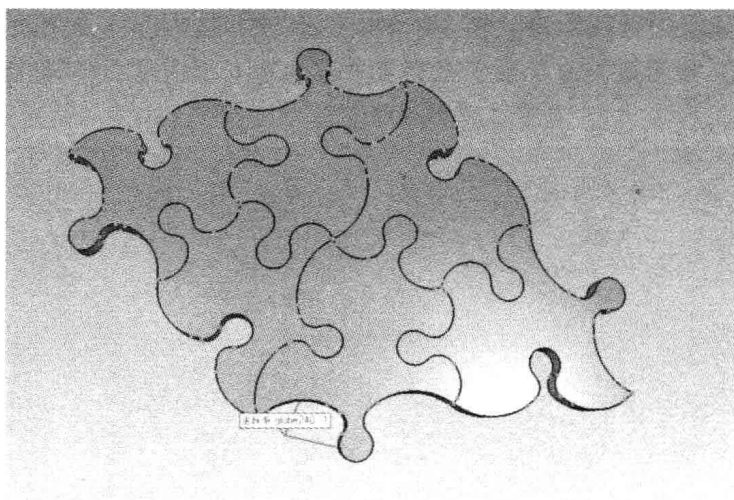


图 1-4 拼图效果



1.2 逆向工程

逆向工程(Reverse Engineering, RE)是通过各种测量手段及三维几何建模方法,将原有实体模型转化为计算机上的三维数字模型,并进一步对模型进行优化分析和加工。



1.2.1 逆向工程的原理及意义

传统的产品设计过程是根据功能和用途来进行设计的,从概念出发绘制出产品的二维图样,而后制作三维几何模型,经检查满意后制造出产品来。这时采用的是从抽象到具体的技术路线(见图 1-5(a))。逆向工程也称反求工程、反向工程等,是对已存在的实物模型进行测量并根据测得的数据重构出数字模型,进而进行分析、修改、检验、输出图样,然后制造出产品的过程(见图 1-5(b))。简单说来,传统设计和制造路线是从图样到零件(产品),而逆向工程的路线是从零件(或原型件)到图样,再经过制造过程到零件(产品),这就是反求的含义。在产品开发过程中,由于形状复杂,其中包含许多自由曲面,很难直接用计算机建立数字模型,常常需要以实物模型(样件)为依据进行仿型、改形或工业造型设计。

如汽车车身的设计和覆盖件的制造,通常先由工程师用油泥或树脂经手工制作出样车的设计原型,再用三维测量的方法获得样车的数字模型,然后进行零件设计、有限元分析、模型修改、误差分析和数控加工指令生成等一系列过程即可进行快速原型制造并进行反复优化评估,直到得到满意的设计结果。也可以说,逆向工程就是对模型进行仿型测量、CAD 模型重构、模型加工并进行优化评估的设计方法。逆向工程一般由产品数字化,数据编辑处理和分片,生成曲线、曲面和最终构造 CAD 模型四个步骤组成。

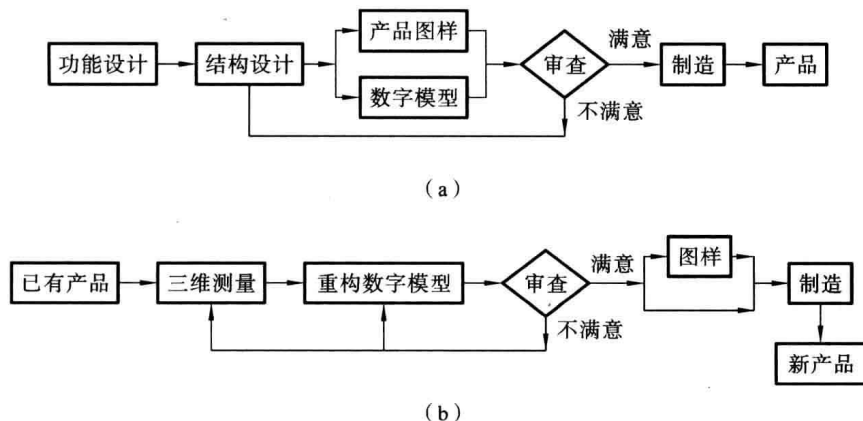


图 1-5 传统设计制造过程与逆向工程的比较

(a) 传统设计 (b) 逆向工程

逆向工程开发产品的技术路线是:首先用三维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 所产生的刀具轨迹的 NC 加工代码送至 CNC 机床加工制作所需模具,或者用增材制造技术将样品模型制作出来。其流程如图 1-6 所示。

简单说来,传统设计和制造是从图样到零件(产品),而逆向工程是从零件(或原型件)到图样,再经过制造过程到零件(产品)的循环过程。

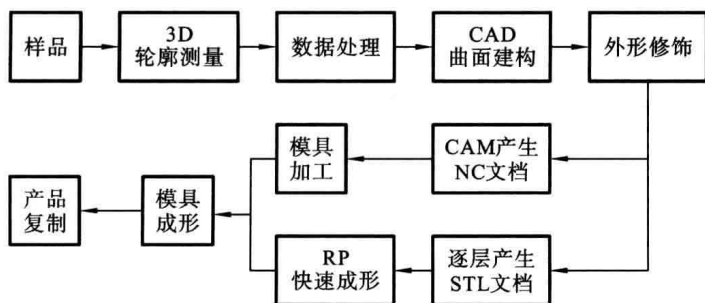


图 1-6 逆向工程流程图

1.2.2 逆向工程测量方法

数据测量是产品形状数字化建模的关键环节,是通过专用测量设备和测量方法获取实物表面离散点的几何坐标数据。根据这些数据,才能实现复杂曲面的建模、评价、改进和制造。而测量方法的好坏直接影响到对被测实体描述的精确、完整的程度,进而影响到重构的 CAD 曲面和实体模型的质量,并最终影响到采用增材制造技术制造出来的产品是否能真实地反映原始的实体模型。因此,它是逆向工程的基础。

目前有多种采集实物表面数据的测量设备和方法。不同的测量方法,有不同的测量精度、速度、经济性、数据类型及后续处理方式。逆向工程中实物形状三维数据的获取方法可以分为接触式和非接触式两大类。根据测头的形式不同,接触式又可分为基于力变形原理的触发式和连续式,其主要设备有三坐标测量机和关节式坐标测量机。非接触式按原理不同,可分为有光学式和非光学式。其中,光学式设备采用的测量方法包括激光三角测量法、激光测距法、激光干涉法、结构光法、光干涉法、机器视觉法、图像分析法等,非光学设备采用的测量方法则包括 CT 测量法、MRI 测量法、超声波法和采取破坏性测量的层析法。具体分类如图 1-7 所示。

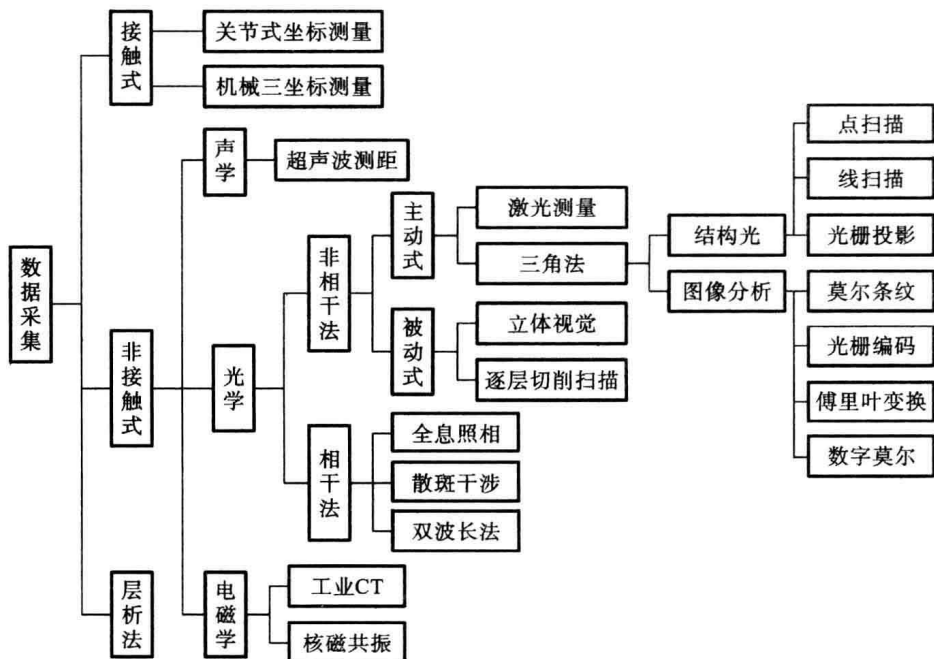


图 1-7 数据采集方法分类



1.2.3 接触式测量

三坐标测量机(Coordinate Measuring Machine, CMM)最初是作为一种检测仪器,对零件的尺寸、形状及相对位置进行精确检测。随着自动控制、触发式测头等技术的发展,形成了现在的计算机控制的三坐标测量系统,可应用于各种零件的自动检测与测量。三坐标测量机主要由主机、测头、电气系统三大部分组成,如图 1-8 所示。其测量原理是:被测零件置于三坐标测量机的工作台测量空间(见图 1-9),计算机控制测头点触各预设测点,并记录下被测点的坐标位置,根据这些点的空间坐标值,就可以计算出被测零件的几何尺寸、形状和位置。

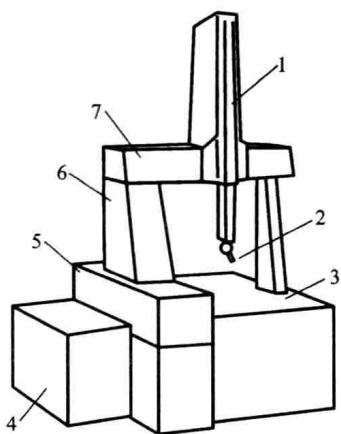


图 1-8 三坐标测量机结构

1—Z 轴驱动装置;2—测头;3—工作台;
4—电气柜;5—驱动装置;6—立柱;7—横梁

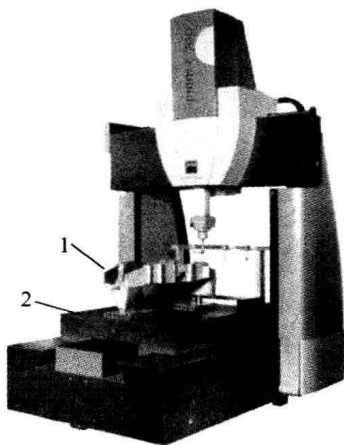


图 1-9 Brown & Sharpe 公司的
MM-C700 三坐标测量机

1—被测零件;2—工作台

1. 三坐标测量机的主机

机身结构主要由工作台、立柱、横梁组成;驱动装置由伺服电动机、滚珠丝杠系统、钢带驱动系统、无振动驱动系统等组成,实现二维时运动采用滑动、滚动轴承和气浮导轨,标尺系统包括线纹尺、气动平衡装置、感应同步器、光栅尺及数显电气装置等。

2. 三维测头

三维测头或称三维测量传感器,是测量机触测被测零件的发讯开关(见图 1-10(a))。三坐标测量机可以配置不同类型的测头传感器,其包括机械式、光学式和电气式。机械式主要用于手动测量,光学式多用于非接触测量,电气式多用于接触式的自动测量。