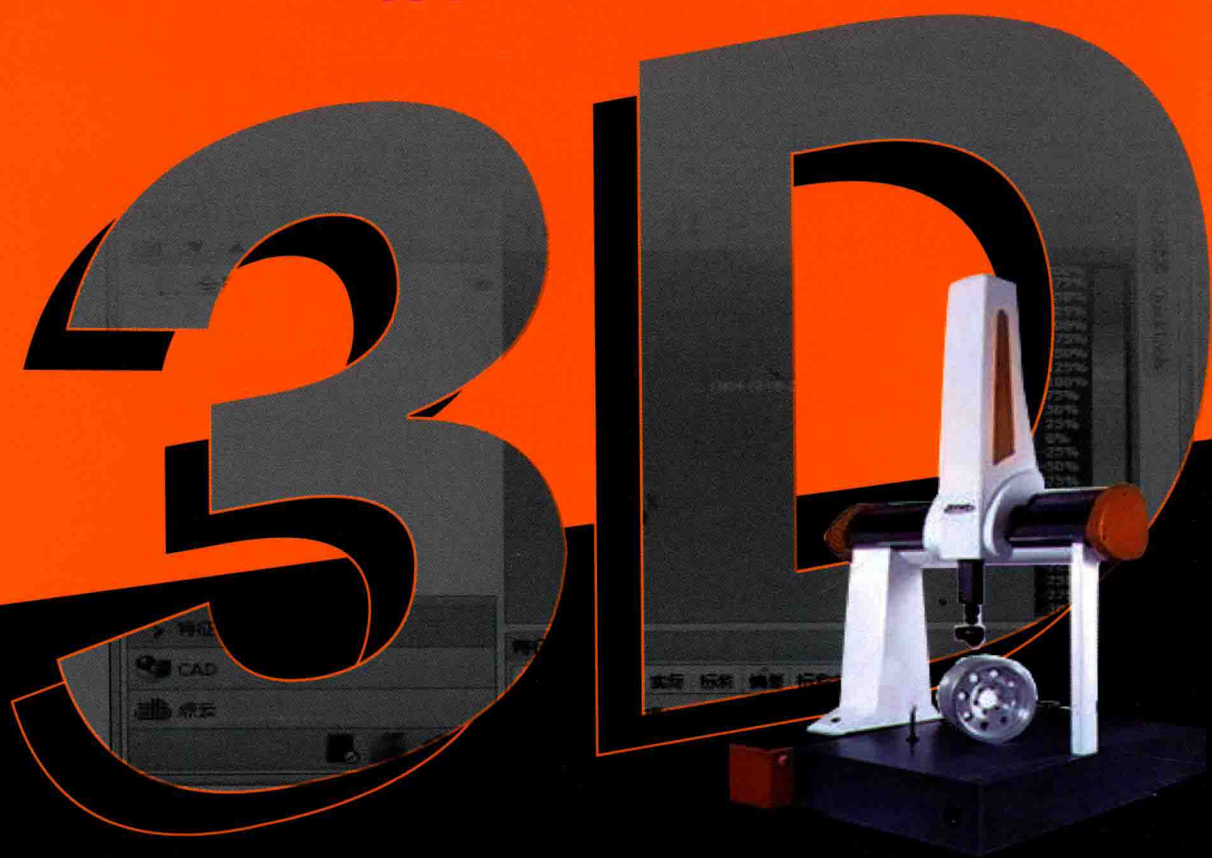




辛志杰 编著

逆向设计与 3D打印实用技术

NIXIANG SHEJI
YU 3D DAYIN SHIYONG JISHU



化学工业出版社

辛志杰 编著

逆向设计与 3D打印 实用技术

NIXIANG SHEJI

YU 3D DAYIN SHIYONG JISHU

3D



化学工业出版社

·北京·

逆向设计技术广泛应用于产品的复制、改进及创新设计。3D 打印技术是一种新兴的制造技术，已在装备制造、机械电子、军事、医疗、建筑、食品等多个领域开始应用，具有广阔的发展前景与光明的未来。

本书阐述了 3D 打印技术的原理和 3D 打印技术，介绍了 3D 打印的常用材料及其特性，还以金属构件、机电器件以及陶瓷等其他构件的 3D 打印成形为例，进行了 3D 打印技术的应用说明，用大量的数据、图片生动地展示了 3D 打印技术在诸多行业的应用。

另外，本书还详细介绍了逆向设计与 3D 打印技术的相关概念、逆向设计的应用范围和发展趋势。针对 Imageware、Geomagic Studio、Geomagic Design Direct、Pro/Engineer 和 UG NX 等当今流行的设计软件，结合逆向设计软件的设计实例进行了实际操作演示，具有较强的实际应用价值。通过对本书的学习，将逆向设计与 3D 打印技术相结合，能快速缩短产品设计和制造周期，提高产品质量并使产品尽快上市。

本书可供从事机电产品逆向设计、机械制造及其自动化、材料科学与工程等专业的科技人员和在校师生参考。也可供广大机械制造、材料成形、医疗、汽车制造、飞机零部件、商业机器、模型、玩具、服装等领域专业人士和众多 3D 打印 DIY 人士参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

逆向设计与 3D 打印实用技术/辛志杰编著. —北京:
化学工业出版社, 2016.10
ISBN 978-7-122-28101-2

I. ①逆… II. ①辛… III. ①立体印刷-印刷术
IV. ①TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 222252 号

责任编辑: 朱 彤
责任校对: 王 静

文字编辑: 王 琪
装帧设计: 刘丽华

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 北京云浩印刷有限责任公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16 字数 445 千字 2017 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究

逆向设计技术是现代产品设计理论与方法的重要组成部分，是正向设计的扩展和补充，是消化吸收先进技术和缩短产品设计开发周期的重要手段，目前已广泛应用于产品的复制、改进及创新设计。3D打印技术是具有工业革命意义的新兴制造技术，它正逐步融入产品的研发、设计、生产各个环节，是材料科学、制造工艺与信息技术的高度融合与创新，是推动生产方式向柔性化、绿色化发展的重要途径，是优化、补充传统制造方式，催生生产新模式、新业态和新市场的重要手段。当前，3D打印技术已在装备制造、机械电子、军事、医疗、建筑、食品等多个领域起步应用，产业呈现快速增长势头，发展前景良好。

3D打印是基于打印件的CAD模型，采用增材制造原理，应用不同的打印方法，高效、高精度地制造出产品或模型。逆向设计是通过获取产品尺寸结构数据，构建产品CAD模型，从而实现产品的复制或改造创新。将逆向设计与3D打印技术相结合，能够极大地缩短产品设计和制造周期，提高产品质量并使产品提前上市。本书阐述了3D打印技术的原理和3D打印技术的分类，介绍了3D打印常用的材料及其特性。详细介绍了光固化快速成形（SLA）、叠层实体制造（LOM）、选区激光烧结/熔化（SLS、SLM）、黏结剂喷射式（3DP）以及熔融沉积式（FDM）打印机的工作原理、技术特点、成形材料和典型的打印设备。以金属构件、机电器件以及陶瓷等其他构件的3D打印成形为例，进行了3D打印技术的应用说明。

同时，本书还介绍了逆向设计与3D打印技术的相关概念、逆向设计的应用范围和发展趋势。阐述了产品数据的采集方法与测量设备的选择依据，详细说明了三坐标测量机、关节式测量臂、数字摄影三维坐标测量系统和手持式激光扫描仪测量系统的测量原理、测量精度和测量方法。本书还论述了逆向设计的数据预处理、多视数据对齐、数据分割等先进的数据建模技术，介绍了逆向设计软件的分类和几种常用的逆向设计软件，针对Imageware、Geomagic Studio、Geomagic Design Direct、Pro/Engineer和UG NX共5种当今流行的设计软件，分别归纳了每种软件的功能特点和操作流程，并结合设计实例进行了实际操作演示，具有较强的实际应用价值和参考价值。本书可供从事机电产品逆向设计、机械制造及其自动化、材料科学与工程等专业的

科技人员和在校师生参考。也可供广大机械制造、材料成形、医疗、汽车制造、飞机零部件、商业机器、模型、玩具、服装等领域专业人士和众多 3D 打印 DIY 人士参考。

本书在编写过程中，张锦、郭世杰等同事参加了资料整理、实例应用和配图等工作，在此表示感谢。

由于编者水平和时间有限，疏漏之处在所难免，敬请各位读者率直批评指正。

编著者
2016 年 9 月

第 1 章 逆向设计与 3D 打印概述

1

1.1 逆向设计的概念	1
1.1.1 逆向设计的基本步骤	2
1.1.2 逆向设计 CAD 建模的要点	3
1.2 逆向设计的应用范围	3
1.3 逆向设计过程中的注意事项	6
1.4 逆向设计的数据采集技术	6
1.4.1 接触式数据采集方法	7
1.4.2 非接触式数据采集方法	7
1.5 测量数据的处理技术	8
1.5.1 扫描数据预处理	8
1.5.2 数据点群的平滑处理	9
1.5.3 数据点群的精简与压缩处理	9
1.5.4 数据分割	10
1.6 产品模型的重构技术	11
1.7 逆向设计的发展趋势	11
1.7.1 逆向设计技术的研究热点	11
1.7.2 逆向设计技术的瓶颈	13
1.8 逆向设计与 3D 打印技术	14

第 2 章 逆向设计数据采集

16

2.1 现代精密测量技术	17
2.1.1 数字化测量技术	17
2.1.2 激光测量技术和仪器	17
2.1.3 绝对式光栅尺	17
2.1.4 大尺寸、复杂几何型面轮廓测量技术	17
2.2 数据采集方法与测量设备的选择	18
2.2.1 三坐标测量机 CMM	18
2.2.2 数字摄影三坐标测量系统	18
2.2.3 经纬仪测量系统	18
2.2.4 全站仪测量系统	18
2.2.5 激光跟踪测量系统	19
2.2.6 激光扫描测量系统	19
2.2.7 关节式坐标测量机	19

2.2.8	室内 GPS	20
2.3	三坐标测量机及其操作	20
2.3.1	三坐标测量机的应用	21
2.3.2	三坐标测量机的组成及工作原理	22
2.3.3	桥式三坐标测量机	23
2.3.4	三坐标测量机的操作流程	35
2.3.5	箱体类零件的测量实例	38
2.4	关节式坐标测量机及其操作	39
2.4.1	FARO CAM2 Measure 10 软件	41
2.4.2	采用 FARO Edge 测量臂测量实例	41
2.4.3	采用 FARO Laser ScanArm 测量臂测量实例	47
2.5	数字摄影三维坐标测量系统	48
2.5.1	数字摄影三维坐标测量系统 V-STARS	48
2.5.2	3DSS 幻影四目型三维光学扫描仪	50
2.6	手持式激光扫描仪测量系统	52

第3章 逆向设计建模技术

55

3.1	数据预处理	55
3.1.1	异常点处理	55
3.1.2	孔洞修补	57
3.1.3	数据平滑	58
3.1.4	数据精简	60
3.2	多视数据对齐	63
3.2.1	基于三基准点的对齐方法	64
3.2.2	多视数据统一	66
3.2.3	多视数据对齐的误差分析	67
3.3	数据分割	69
3.3.1	数据分割方法	69
3.3.2	散乱数据的自动分割	70
3.4	模型重建技术	73
3.4.1	特征识别与数据分割	73
3.4.2	二次曲线曲面的拟合	74
3.4.3	对称平面的识别	79
3.4.4	自由曲线拟合	81
3.4.5	自由曲面拟合	82
3.5	点云的三角网格及三角曲面构造	86
3.5.1	点云的三角网格构造	86
3.5.2	Bezier 三角曲面拟合	86
3.6	基于断层图像数据的模型重建方法	89
3.6.1	图像边界轮廓的提取	89
3.6.2	轮廓分割和边界识别	91
3.6.3	切片间切片配准	93
3.6.4	表面识别	97
3.6.5	STL 模型的重建	97
3.6.6	实体模型的重建	98
3.7	模型光顺性检查方法	100

3.7.1	基于曲率的方法	101
3.7.2	基于光照模型的方法	101
3.7.3	等高线法	102

第4章 逆向设计常用软件及应用

103

4.1	逆向设计常用软件	103
4.1.1	逆向设计软件的分类	103
4.1.2	逆向设计常用软件	103
4.2	基于 Imageware 的逆向设计实例	104
4.2.1	Imageware 概述	104
4.2.2	Imageware 工作流程	107
4.2.3	Imageware 逆向设计实例	108
4.3	基于 Geomagic Studio 的逆向设计实例	118
4.3.1	Geomagic Studio 概述	118
4.3.2	Geomagic Studio 工作流程	119
4.3.3	Geomagic Studio 逆向设计实例	131
4.4	基于 Geomagic Design Direct 的逆向设计实例	137
4.4.1	Geomagic Design Direct 软件介绍	137
4.4.2	Geomagic Design Direct 建模流程	138
4.4.3	Geomagic Design Direct 模块功能	138
4.4.4	Geomagic Design Direct 逆向设计实例	141
4.5	基于 Pro/Engineer 的逆向设计实例	146
4.5.1	Pro/Engineer 软件介绍	146
4.5.2	Pro/Engineer 软件主要模块	147
4.5.3	Pro/Engineer 软件逆向设计功能	147
4.5.4	Pro/Engineer 软件逆向设计实例	149
4.6	基于 UG NX 的逆向设计实例	163
4.6.1	UG NX 软件介绍	163
4.6.2	UG NX 软件逆向设计功能	164
4.6.3	UG NX 逆向设计的基本技巧	164
4.6.4	UG NX 逆向设计实例	166

第5章 3D 打印技术

177

5.1	3D 打印技术原理	178
5.2	3D 打印技术分类	178
5.3	3D 打印材料	179
5.3.1	工程塑料	180
5.3.2	光敏树脂	180
5.3.3	橡胶类材料	181
5.3.4	金属材料	181
5.3.5	陶瓷材料	181
5.3.6	其他 3D 打印材料	182
5.4	3D 打印技术国内发展现状	182
5.4.1	高校与研究机构方面	182
5.4.2	企业方面	183

5.5	光固化快速成形	184
5.5.1	光固化快速成形工作原理	184
5.5.2	光固化快速成形技术特点	185
5.5.3	光固化快速成形机典型设备	186
5.6	叠层实体制造	189
5.6.1	叠层实体制造工作原理	189
5.6.2	叠层实体制造技术特点	190
5.6.3	叠层实体制造典型设备	191
5.7	选区激光烧结/熔化成形	191
5.7.1	选区激光烧结/熔化成形工作原理	191
5.7.2	选区激光烧结/熔化成形技术特点	192
5.7.3	选区激光烧结/熔化成形典型设备	193
5.8	黏结剂喷射	197
5.8.1	黏结剂喷射工作原理	197
5.8.2	黏结剂喷射技术特点	198
5.8.3	黏结剂喷射式打印机喷头	198
5.8.4	黏结剂喷射式打印机成形材料	199
5.8.5	黏结剂喷射式打印机典型设备	201
5.9	熔融沉积	211
5.9.1	技术概述	211
5.9.2	熔融沉积工作原理	211
5.9.3	熔融沉积技术特点	212
5.9.4	熔融沉积式打印机成形材料	213
5.9.5	熔融沉积式打印机典型设备	214

第6章 3D 打印技术的应用

222

6.1	金属构件 3D 打印成形	222
6.1.1	金属构件激光烧结式直接成形	222
6.1.2	金属构件激光熔化式成形	223
6.1.3	金属构件激光熔覆式成形	224
6.1.4	金属构件电子束熔覆式成形	225
6.1.5	金属构件的其他 3D 打印自由成形	226
6.2	机电器件 3D 打印成形	227
6.2.1	3D 打印无人机	227
6.2.2	3D 打印汽车	228
6.2.3	复杂器件的 3D 打印成形	229
6.3	3D 打印的其他广泛应用	231
6.3.1	陶瓷构件	231
6.3.2	建筑构件	234
6.3.3	食品	236
6.3.4	文物	237
6.3.5	生物医学	240
6.3.6	生活用品	243
6.4	我国 3D 打印面临的问题	245

1

第 1 章 逆向设计与 3D 打印概述

逆向设计是相对于传统的正向设计而言的，逆向设计类似于反向推理，属于逆向思维体系。作为一种逆向思维的工作方式，逆向设计技术与传统的产品正向设计方法不同，它是根据已经存在的产品或零件原型来构造产品或零件的工程设计模型，在此基础上对已有产品进行剖析、理解和改进。作为先进制造技术的一个重要组成部分，逆向设计已从最初的原型复制技术逐步发展成为支持产品创新设计和新产品开发的重要技术手段。

1.1 逆向设计的概念

逆向设计，又称反求设计、逆向工程（reverse engineering, RE），是一种基于逆向推理的设计，通过对现有样件进行产品开发，运用适当的手段进行仿制，或按预想的效果进行改进，并最终超越现有产品或系统的设计过程。逆向设计以设计方法学为指导，以现代设计理论、方法、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，对已有的产品进行解剖、分析、重构和再创造，在工程设计领域，它具有独特的内涵，可以说它是对设计的设计。它是将原始物理模型转化为工程设计概念和产品数字化模型：一方面为提高工程设计、加工分析的质量和效率提供充足的信息；另一方面为充分利用 CAD/CAE/CAM 技术对已有产品进行设计服务。

传统产品的开发实现通常是从概念设计到图样，再创造出产品，其流程为：构思—设计—产品，我们称之为正向设计或者顺向工程。它的设计理念恰好与逆向设计相反，逆向设计是根据零件或者原型生成图样，再制造产品。目前逆向设计的应用领域已扩展到包括机械、电子、汽车、自动化、生物医学、航空航天、文物考古、光学设备和家电等相关行业。

逆向设计把三坐标测量机、CAD/CAM/CAE 软件、CNC 机床、3D 打印技术有机而又高效地结合在一起，成为产品研发和生产的一个高效、便捷的途径。逆向设计不仅仅是产品的仿制，它更肩负着数学模型的还原和再设计的优化等多项重任。以往逆向设计通常是指对某一产品进行仿制工作，这种需求可能发生于原始设计文件遗失、部分零件重新设计，或是委托厂商交付一件样品或产品。传统的复制方式是立体雕刻机或靠模机床制造出等比例的模具，再进行生产。这种方法称为模拟式复制，无法建立工件尺寸图档，也无法做任何的外形修改，现在已渐渐被数字化的逆向设计系统所取代。

广义的逆向工程包括几何反求、材料反求和工艺反求等，是一个复杂的系统。目前逆向工程研究的重要领域集中在几何反求方面，即从现有的产品或模型出发，通过测量系统得到的离散点云数据，重构光滑连续的三维 CAD 几何模型，并加以修改、完善，以达到更加完美的效

果,其中构造具有复杂曲面的 CAD 模型是逆向工程技术研究的重点。逆向工程与传统设计最大的区别在于流程的不同。传统的设计流程是从概念到设计 CAD 模型或图纸。而逆向工程的流程则是从现有的设计和制造过程中的各个阶段的实物上获得数据信息,构建产品 CAD 模型。逆向设计过程见图 1-1。

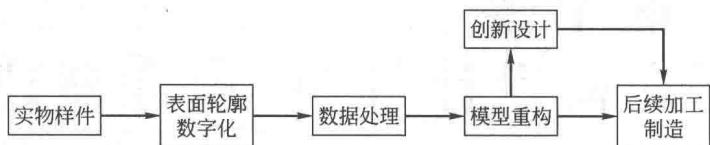


图 1-1 逆向设计过程

采用实物逆向技术可以以产品实物为依据、利用测量设备获得产品的三维点云数据,利用建模工具在计算机中重建三维模型,为开发出性能更先进、结构更合理的产品进行零部件的制造奠定系统的技术基础。逆向设计的技术体系包括数据采集技术、数据处理技术、模型重构技术等,如图 1-2 所示。

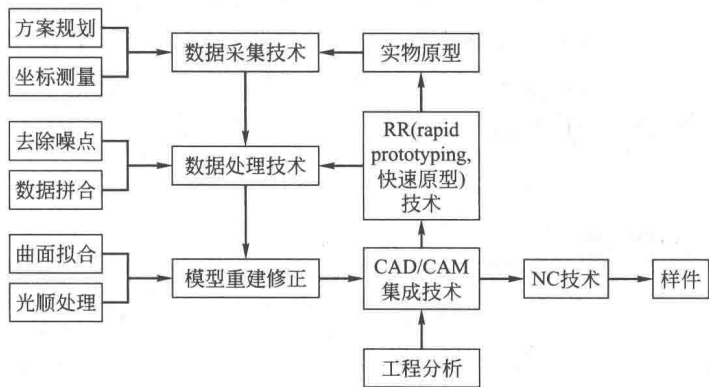


图 1-2 逆向设计的技术体系

1.1.1 逆向设计的基本步骤

逆向设计的基本步骤包括以下几个。

(1) 被设计、加工对象的试验样品制作。在对被设计加工对象进行样品数据采集前,要考虑到数据采集的设备和方式。为了保证数据精度,减少数据误差,要先对样品进行清洗、风干等预处理,对于激光扫描的工件要进行喷涂处理。对于特殊的零部件还要进行夹具设计,考虑数据采集的完整性。

(2) 零件原型的三维数字化测量。采用三坐标测量机(coordinate measuring machine, CMM)或激光扫描等测量装置,通过测量采集零件原型表面点的三维坐标值;使用逆向设计软件处理离散的点云数据。复杂零件多呈现多种形态的不规则特征,一次扫描只能针对一个表面进行。对于复杂的表面,很难从一个角度进行扫描而得到所需的全部数据。因此,在进行扫描时,需要根据特定零部件样品制作能够翻转的支架,转换各种角度进行扫描。扫描完成后要对多视扫描数据重新进行整合。

(3) 零件原型三维重构。按测量数据的几何属性对零件进行分割,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。将分割后的三维数据在 CAD 系统中做曲面拟合,并通过各曲面片的求解与拼接获取零件原型的 CAD 模型。

(4) CAD 模型的分析与改进。对于重构出的零件 CAD 模型,根据产品的用途及零件在产

品中的地位、功能等进行原理和功能分析、优化,确保产品良好的人-机性能,并进行产品的改进创新。

(5) 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。对不满足要求的样品找出原因,重新进行扫描、造型,直到达到零件的功能、用途等设计指标的要求。

(6) 正向与逆向融合的产品创新。“产品—逆向—产品”,即对产品的简单的仿制,这是逆向工程的初级应用。“产品—逆向—改良设计—改良产品”,即对产品改良设计,吸收国外先进技术,这是逆向工程的中级应用。“概念草图—比例模型—三维测量(逆向)—数据重建(设计评价修改的过程)—模具—真实产品”,这是逆向工程的高级应用。如在飞机、汽车和模具等行业的设计和制造过程中,产品通常由复杂的自由曲面拼接而成,在此情况下,设计者通常先设计出概念图,再以油泥、黏土模型或木模代替3D-CAD设计,并用测量设备测量外形,建构CAD模型,在此基础上进行设计,最终制造出产品。

逆向设计只是设计的一个环节,而不能作为设计的目的。设计的目的是创新,逆向设计技术是为设计创新服务的,应该确定运用逆向设计这个环节的正确位置,让逆向设计更好地为产品创新设计服务。

1.1.2 逆向设计CAD建模的要点

逆向设计CAD建模的要点有以下几个。

(1) 为了提高逆向设计重建产品数字化模型的能力,以便对其进行参数化或适应性设计,在开始建模以前,要对产品或零件的结构和功能进行分析,反推设计原理和设计方案,用以指导特征的提取和零件的建模。

(2) 在逆向建模时,需要对实物模型的设计意图及造型方法进行理解、分析,并基于测量数据进行原始设计参数的还原。

(3) 零件上总存在一些几何约束关系,如共线、共面,线与线、面与面平行或垂直等,这些可为特征的提取及建模提供指导,对反求尺寸进行一定的修正,例如在提取零件端面的轮廓时,要使轮廓线共面。有些产品的改型设计也是一样,只是对其中某些特征进行修改,进行修改的特征和不需要修改部分的结合处可以看成是几何约束关系,反求时就要考虑进去。逆向设计和正向设计需要考虑这部分设计曲面与其他曲面之间的连接问题,可以通过其他曲面的边界曲线提取出来作为这部分曲面设计的边界。有些零件和其他零件之间存在装配关系,这时就要把装配约束考虑进去,对与装配有关的尺寸要特别重视。

(4) 在逆向设计领域,模型的参数主要有三种:设计参数、实物参数和重构参数。设计参数是指在零件图样或者产品数字化模型上标注的尺寸,是设计、制造的依据;实物参数是指零件实物本身所固有的参数,是设计参数在实物上的体现;重构参数是基于测量数据处理得到的,体现在重构的产品数字化模型上。原始设计参数还原也就是要求重构参数与原始设计参数尽可能达到一致,它是逆向设计达到更高阶段的关键所在,其直接目的是解决实物逆向的去伪存真问题,即剔除可能包含在产品中的制造、装配、磨损、测量和计算等的误差,在防止误差扩散的前提下还原其设计参数。但是,其根本目的是从本质上理解设计中对于各种设计因素关系的处理方式和方法,找出经过实践证明是正确的设计思想及设计结果,从而提高自主设计能力。

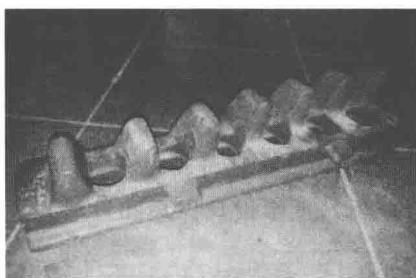
1.2 逆向设计的应用范围

逆向设计技术是数据测量技术、数据处理技术、图形处理技术和先进制造技术的有机结

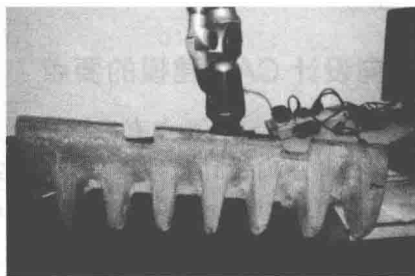
合。结合快速发展的 3D 打印技术和数字控制等技术,逆向设计在航天、汽车、工业制造、医疗等多个领域都得到了较快的发展和应用,集中体现在以下几个方面。

(1) 新产品研发 企业为了适应竞争需要不断完善自己的产品,并将工业美学设计逐渐纳入创新设计的范畴,使产品朝着美观化、艺术化的方向发展。在汽车、飞机等产品的外形设计中,首先由工业设计师使用油泥、木模或泡沫塑料做成产品的比例模型,易于从审美角度评价并确定产品的外形,然后通过逆向工程技术将其转化为 CAD 模型,进而得到精确的数字定义。这样不但可以充分利用 CAD 技术的优势,还能适应智能化、集成化的产品设计制造过程中的信息交换需求。

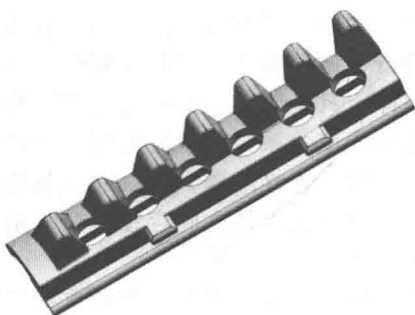
(2) 产品的仿制和改型设计 利用逆向设计技术进行数据测量和数据处理,重建与实物相符的 CAD 模型,并在此基础上进行后续的操作。如模型修改、零件设计、有限元分析、误差分析、数控加工指令生成等,最终实现产品的仿制和改进。这是常见的产品设计方法,也是消化、吸收国内外先进的设计方法和理念从而提高自身设计水平的一种手段。该方法被广泛地用于摩托车、家用电器、玩具等产品外形的修复、改造和创新设计。图 1-3 所示为矿山机械用齿盘的逆向设计。



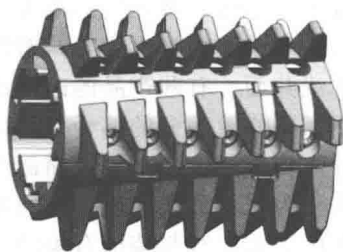
(a) 单片齿盘



(b) 单片齿盘的测量



(c) 逆向设计的单片齿盘



(d) 齿盘产品模型

图 1-3 齿盘的逆向设计

(3) 产品局部区域的还原修复 利用逆向工程技术可从破损的零部件中提取出相应的特征或特征参数,进行自主设计开发,或从表面数据中获取特征信息对其进行面貌恢复以及其结构的推算,或对产品的局部区域进行还原修复。

图 1-4 所示为模具局部区域的还原修复,其中图 1-4(a) 为模具的产品中需要还原修复的局部区域和扫描得到的局部区域的点云模型;图 1-4(b) 为通过对点云数据进行逆向设计得到的局部区域的 CAD 模型;图 1-4(c) 为修复后的模具实物。

(4) 快速模具制造 逆向工程技术在快速模具制造中的应用主要体现在两个方面:一种情况是以样本模具为对象,对已符合要求的模具进行测量,重建其 CAD 模型,并在此基础上生成加工程序,这样可以提高模具的生成效率,降低模具的制造成本;另一种情况是以实物零件为对象,逆向反求其几何 CAD 模型,并在此基础上进行模具设计。

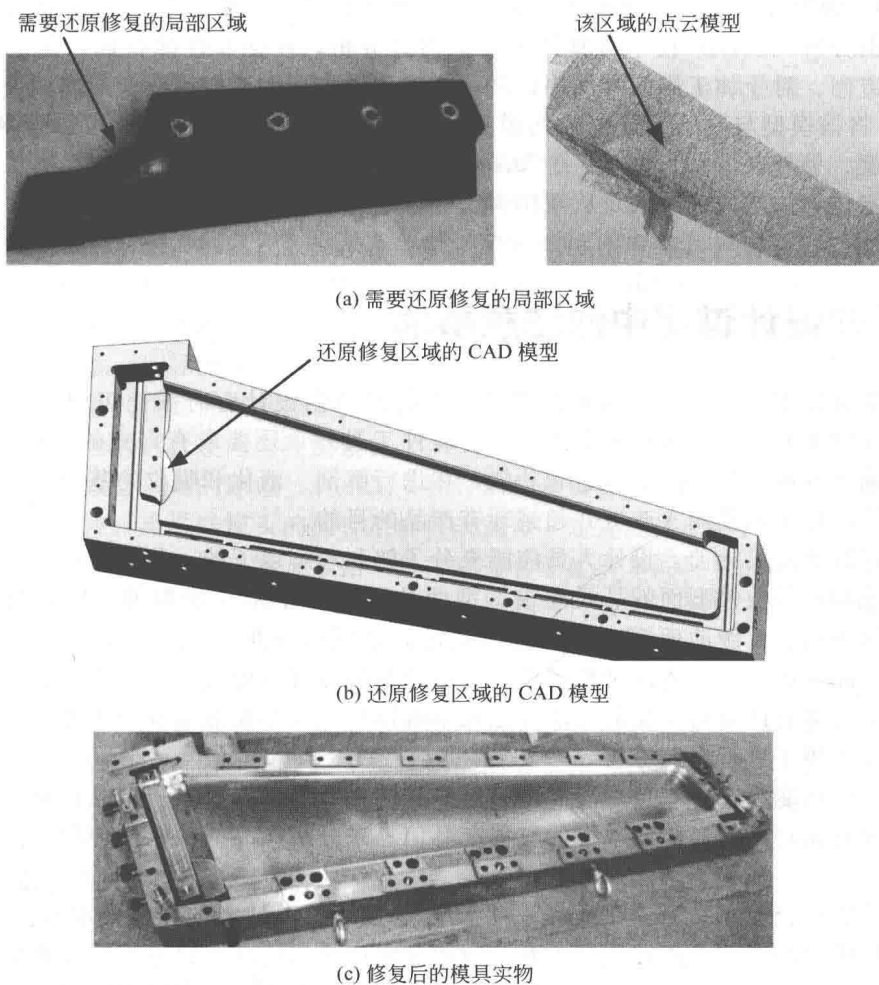


图 1-4 模具局部区域的还原修复

(5) 文物的保护和监测 大型的户外文物常年风吹日晒，容易发生风化而遭破坏。利用逆向设计技术定期对其进行测量扫描，把表面数据输入计算机进行模型重构，通过两次模型的比较，找出风化破坏点，从而制定相应的保护措施，或者进行相应的修复，使其保持原样。

(6) 医学领域的应用 结合 CT、MRI 等先进的医学技术，逆向设计可以根据人体骨骼和关节的形状进行假体的设计和制造。通过对人体表面轮廓测量所获得的数据，建立人体几何模型，从而制造出与表面轮廓相适应的特种服装，如头盔、座椅以及航空宇航领域中宇航服装的制造等。逆向设计方法结合 3D 打印技术在医学上有广泛的应用需求，如外科手术植入和修复设计等。图 1-5 所示为 3D 打印的缺损颅骨模型。

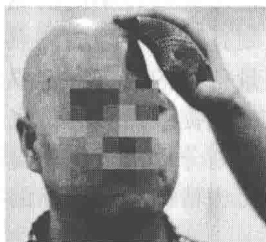


图 1-5 3D 打印的缺损颅骨模型

(7) CAE 模型分析 将实物零件转化为计算机表达的产品数字模型,以便充分利用现有的计算机辅助分析(CAE)技术对其进行模拟仿真分析,评估其性能指标,是逆向工程的一个新的发展方向。对于加工后的零部件,进行扫描测量,利用逆向设计中的曲面重构技术构造 CAD 模型,将该模型与原始设计的几何模型在计算机上进行数据比较,可以检测制造误差,提高检测精度。另外,借助工业 CT 技术,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,从而作为工业产品无损探伤的重要手段。

1.3 逆向设计过程中的注意事项

逆向工程设计不是简单的复制和抄袭,一个好的逆向设计有时候比正向设计更具有挑战性,逆向设计除了要求设计人员能掌握相应的软件工具外,还要求有一定的产品和工艺经验,这样才能准确地理解产品原型的构造和功能,在进行解剖、消化和吸收的基础上进行仿型设计或者变异设计,以达到复制、改进并超越现有产品的目的。

因此在进行逆向设计前,设计人员应能充分了解和理解以下的一些要求。

(1) 对重构产品数模型面的品质要求 型面品质主要分为 A 级曲面、B 级曲面及其他一些要求更低的曲面:A 级曲面要求曲面之间的过渡必须达到曲率连续,主要是一些对外观要求比较高的产品,如汽车车身的外覆盖件、家电产品的外观表面等;B 级曲面要求达到相切连续,一般可满足多数产品对型面的要求,如汽车内饰件、汽车底盘的钣金件等;其他一些要求更低的曲面则多用于进行误差分析。

(2) 产品的功能要求 满足功能需求是对产品的一个最基本要求。在进行逆向设计前,设计人员有必要根据自己的经验或掌握的有关产品信息来分析产品的功能机理和结构,做到知己知彼。

(3) 产品的配合要求 逆向工程是一个设计过程,所设计出的样件产品仅为整机的一部分,会与其相配合的零部件存在配合关系,因此逆向产品与已有周边零件配合处的结构设计的好坏,会影响一个逆向设计的成败。所以在逆向设计的过程中,一定要保证配合面的精度,以满足装配要求。

(4) 产品的工艺要求 设计和加工是联系非常紧密的两个环节。每个产品都有其相应的生产工艺流程,设计出来的产品不一定满足加工工艺的要求,因此设计人员要对生产工艺有一定的了解。逆向设计过程能更好地理解 and 吸收产品样件的加工工艺,避免由于细节遗漏而造成模型重构失败。

1.4 逆向设计的数据采集技术

数据获取是逆向设计的首要环节,可以通过不同的测量手段或方法获取所需数据。

测量前要对整个测量过程进行规划,选取合理的测点和方位是得到完整的测量数据并顺利进行模型重建的基础和保证。通过测量得到的数据一定要包括足够的完整描述物体几何形状的点,从而为获得建立满足精度的三维模型提供足够的信息。有时为获得物体完整的数据,要对测量表面进行分区,分区测量时边界的划分取决于物体自身的几何形态,也取决于造型软件所提供的造型功能。分区过大,会造成无法精确表示曲面的各个部位,分区过细,造成较多的数据拼接,影响重建模型的整体效果。

根据测量探头是否与样件表面接触,三维坐标数据采集方法可分为接触式数据采集和非接触式数据采集两大类。

1.4.1 接触式数据采集方法

该方法是通过传感测量设备与样件的接触来记录样件表面的坐标位置。主要包括触发式、连续扫描式等。

(1) 触发式数据采集的原理 当采样测头的探针刚好接触到样件表面时, 探针尖因受力产生微小变形, 触发采样开关, 使数据系统记录下探针尖的即时坐标, 逐点移动, 直到采集完样件表面轮廓的坐标数据。触发式数据采集方法的测量精度比较高, 但采集的速度较慢, 一般只适用于样件表面形状检测, 或需要数据较少的表面数字化的情况。

坐标测量机是一种大型、精密的三坐标测量仪器, 可以对具有复杂形状的工件的空间尺寸进行逆向工程测量。坐标测量机一般采用触发式接触测量头, 一次采样只能获取一个点的三维坐标值。坐标测量机主要优点是测量精度高, 适应性强, 但一般接触式测头测量效率低, 而且对一些软质表面无法进行逆向工程测量。

(2) 连续式数据采集的原理 利用测头探针的位置偏移所产生的电感或电容的变化, 进行机电模拟量的转换。当采样探头的探针沿样件表面以一定速度移动时, 就发出对应各坐标位置偏移量的电流或电压信号。连续式数据采集方法适合于生产车间环境的数字化, 它能保证在较短的测量时间内实现最佳的测量精度, 但易损伤被测样件表面, 而且不能测量软质材料和超薄形物体。

接触式测量方法的优点是测量数据不受样件表面的光照、颜色及曲率因素的影响, 物体边界的测量相对精确, 测量精度高; 缺点是需要逐点测量, 测量速度慢, 效率较低, 不能测量软质材料和超薄形物体, 对曲面上探头无法接触的部分不能进行测量, 应用范围受到限制, 测量过程需要人工干预, 接触力大小会影响测量值, 测量前后需做测头半径补偿等。

1.4.2 非接触式数据采集方法

主要包括激光三角测距法、图像分析法、计算机断层扫描成像技术、核磁共振测量法、逐层切削扫描法。

(1) 激光三角测距法 其在逆向工程的曲面数据采集中运用较广。测量原理是通过激光发射装置将激光束打到待测物体表面, 然后用感光器件接受物体表面的反射光, 根据反射时间、光源与感光设备间的距离、夹角等位置关系推算出物体表面点的坐标。

(2) 图像分析法 将一定模式的光照射到被测物体的表面, 摄取反射光的图像, 通过匹配确定物体上一点在两幅图像中的位置, 由视差计算距离。该法的缺点是不能精确地描述复杂曲面的三维形状。

(3) 计算机断层扫描成像技术 (CT) 通过对产品实物进行层析扫描后, 获得一系列断层图像切片和数据。通过切片和数据提供的工件截面轮廓及其内部机构的完整信息, 可以测量物体表面、内部和隐藏结构特征, 扫描仪可以作为三维数字化仪应用于逆向工程。工业 CT 是目前最先进的非接触式测量方法, 已在航空航天、军事工业、核能、石油、电子、机械、考古等领域广泛应用。其缺点是空间分辨率较低, 获得数据需要较长的积分时间, 重建图像计算量大, 造价高等。

(4) 核磁共振测量法 (MRI) 其理论基础是核物理学的磁共振原理, 是 20 世纪 70 年代以后发展的一种新式医疗诊断影像技术。基本原理是用磁场来标定物体某层面的空间位置, 然后用射频脉冲序列照射, 当被激发的核在动态过程中自动恢复到静态场的平衡时, 把吸收的能量发射出来, 利用线圈来检测这种信号并输入计算机, 经过处理转换在屏幕上显示图像。此种方法可以深入物体内部且不破坏物体, 对工件没有损坏, 但仪器造价高, 空间分辨率不及 CT, 目前仅适用于生物材料的测量。

(5) 逐层切削扫描法 其原理为以极小的厚度逐层切削实物, 获得一系列断面图像数据, 利用数字图像处理技术进行轮廓边界提取后, 再经过坐标标定、边界跟踪等处理得到截面上各轮廓点的坐标值, 是目前断层测量精度最高的方法, 但此种方法会破坏被测实物。

非接触式数据测量技术与接触式数据测量技术相比具有以下优点: 测量速度快; 易获取曲面数据; 测量数据不需要进行测头半径补偿; 可测量柔软、易碎、不可接触、薄件、皮毛及变形细小等工件; 无接触力, 不会损伤精密表面等。缺点是测量精度较差, 易受工件表面反射性的影响, 如颜色、粗糙度等因素会影响测量结果; 对边线、凹坑及不连续形状的处理较困难; 工件表面与探头表面不垂直时, 测得的数据误差较大。

接触式和非接触式测量方法各有优缺点, 各有不同的适应范围。接触式方法主要用于基于特征的 CAD 模型的检测, 特别是对仅需少量特征点的规则曲面模型组成的实物的测量与检测; 非接触式方法适于需要大规模测量点的自由曲面和复杂曲面的数字化。基于各自的优缺点, 集成各种数字化方法和传感器以便扩大测量对象和逆向工程应用范围, 提高测量效率并保证测量精度, 已成为国内外的研究趋势和重点。

1.5 测量数据的处理技术

1.5.1 扫描数据预处理

利用三维激光扫描仪扫描物体表面的三维坐标信息和色彩信息以后, 得到的数据是离散的点的集合, 这个点的集合称为点云 (point cloud)。

在测量过程中, 由于存在人为 (操作人员经验等) 或随机 (环境变化等) 因素的影响, 测量结果往往会存在误差, 也有可能会出现坐标异常点, 这些点在三维重建前都是要剔除的点。因为被测物体形状过于复杂或者外界环境因素的影响, 导致测量数据时因阻塞和可及性问题而产生测量数据缺损, 这时就要对测量数据加以延拓和修补; 而对于扫描数据过于密集的情况, 就要进行均匀化处理。另外, 由于对测量精度的提高, 形成的“点云”数据可能会很大, 高达几兆字节甚至几百兆字节, 而且其中会包括大量的冗余数据, 对数据进行压缩就势在必行。还有在不能一次测量全部实体模型的数据信息时, 就需要从不同角度, 对同一实体模型进行多次测量, 然后对所测得的数据点进行拼接, 以形成实体的整体表面数据点云。

信号最基本的描述形式是时域形式和频域形式。时域形式描述信号强度随时间的变化, 频域形式描述信号在一定时间范围内的频率分布。在实际工程应用中, 信号和噪声不同频率的部分可能同时叠加, 因此传统的滤波器不能解决问题。而且所分析的信号可能包含许多尖峰或突变部分, 噪声也不是平稳的白噪声, 要对这种信号进行去噪处理, 传统的频谱分析去噪方法就显得无能为力。

(1) 鲁棒滤波算法去噪处理 对带有离群点和噪声的点云数据进行去噪处理, 设这个点云的集合为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, 定义一个非参数核密度估计函数 f 作点聚类, 采用 Mean-Shift 迭代算法找到一个适当的核估计函数, 定义散乱点 p 的聚类中心为核估计函数的局部最大值, 而聚类中心又可以很好地逼近原始曲面, 所以可以用简单的阈值条件检测离散点的聚类, 并将之删除。这就实现了对点云数据的高效快速去噪。

(2) 小波阈值去噪 小波变换是一种线性变换, 将待处理信号与在时频域都有良好局部化性质的展缩小波函数进行卷积, 使信号成分分布于不同的时段和频带内。小波分析在高频部分具有较低的频率分辨率和较高的时间分辨率, 在低频部分具有较低的时间分辨率和较高的频率分辨率。小波分析是时频分析, 可以同时时在域和频域对信号进行分析, 因此, 能够有效地区