

机械设计丛书

反求工程 CAD 建模理论、方法 和系统

柯映林 等著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



机械设计丛书

反求工程 CAD 建模理论、 方法和系统

柯映林 等著



机械工业出版社

本书主要介绍了以点云曲面造型为核心的反求工程 CAD 理论、方法和系统。全书共 9 章, 具体内容包括: 反求工程 CAD 技术的内涵和定义, 点云数据预处理算法, 反求工程 CAD 建模中的特征与约束理论, 基于点云切片的草图设计与简单自由曲面(拉伸、旋转、蒙皮)再设计方法, 二次曲面(平面、圆、柱、锥)特征提取与约束重构, 过渡曲面特征提取; 规则自由曲面(拉伸、旋转、对称)特征的自动提取, 自由曲面重建及局部编辑技术, 反求工程 CAD 软件 RE-SOFT 的结构、功能和典型应用举例。

本书可用作计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)专业、汽车工程专业、飞机设计与制造专业和模具设计专业的研究生教学参考书, 也可作为汽车、飞机、模具设计专业技术人员的工程应用参考书。

图书在版编目(CIP)数据

反求工程 CAD 建模理论、方法和系统/柯映林等著. —北京: 机械工业出版社, 2005.7

(机械设计丛书)

ISBN 7-111-17351-1

I. 反... II. 柯... III. 机械设计: 计算机辅助设计
IV. TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 103120 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 刘小慧 责任编辑: 张亚秋 版式设计: 冉晓华

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 姚毅 责任印制: 洪汉军

北京双青印刷厂 印刷·新华书店北京发行所发行

2005 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·7 印张·270 千字

定价: 22.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

前 言

以点云几何造型为核心的反求工程技术,广泛涉及计算机图形学、计算机图像处理、微分几何、计算几何、概率统计、数据结构、软件工程等交叉学科和专业,是CAD领域最活跃的研究分支之一。尤其是20世纪末期,随着计算机、激光测量和数控技术的飞速发展,反求工程技术的内涵和应用领域都发生了巨大变化,成为飞机、汽车、船舶、模具和组织工程领域最为重要的产品数字化设计制造手段之一。

在1986~1994年期间,作者结合硕士、博士学位论文工作和博士后专题研究工作,在离散点三角网格化处理、三角曲面造型和工程应用方面开始了有益的尝试,开发了地下矿床三维几何描述和评价原型系统。通过基于三角曲面过渡模型的NURBS曲面分区重构理论应用和研究,开发了具有自主知识产权的反求工程CAD软件RE-SOFT V1.0~5.0。在1995~2004年期间,我们集中力量着重研究了基于大规模离散点的曲面造型问题,尤其是研究探讨了如何从大规模离散点中快速把握和准确抽取隐含于大规模离散点数据中的产品特征问题,成功开发了能够广泛应用于飞机、汽车、船舶、模具工业领域的产品化软件RE-SOFT V6.0~7.X。从正反两个方面深刻体会了后来被国内外学术同行们统称为反求工程点云造型问题的特点和难点。为了与国内外同行共享我们的成果,作者以浙江大学的15篇博士学位论文和近100篇学术论文为基本素材,重点整理了近10年来在点云造型方面取得的部分研究成果,写成此书,奉献给国内外读者。

本书共9章,具体内容包括:

第1章主要介绍反求工程CAD技术的内涵和定义,简要介绍反求工程CAD建模的特点、步骤和应用领域。

第2章介绍点云数据预处理的相关算法。点云数据预处理是反求工程CAD建模的重要一环,作者利用空间散乱数据的三维划分建立了点云数据的拓扑结构,并基于此结构利用四维Shepard曲面实现了点云数据曲率的快速计算。提出了边界直接抽取、大规模数据区域分割等一系列独特、高效的算法,这些预处理算法为后续的产品数字化模型构建奠定了基础。

第3章系统阐述作者有关反求工程CAD建模中特征与约束的理论。提出了基于特征与约束的反求工程CAD建模框架,给出了反求工程中特征与约束的定义、分类及表达,将反求工程中的特征划分为三个层次,并分析了不同特征层次之间的映射关系。

第4章主要论述基于截面复合曲线约束重构的拉伸、旋转与扫成等简单自由曲面的再设计方法。截面曲线设计是拉伸、旋转、扫成等自由曲面重构的关键,作者系统研究了截面曲线设计中数据预处理、分段特征识别、截面特征曲线分段拟合以及整体约束优化求解等关键算法,并对重构曲线的逼近误差与约束误差分别进行了分析。

第5章给出二次曲面特征提取与约束重构算法。主要分析了二次曲面的统一表达、简单表达和几何参数化表达在反求工程中的不同应用,提出了拟合误差控制下的二次曲面区域分割方法和二次曲面整体约束重构算法。

第6章详细论述过渡曲面特征的提取算法。首先,基于过渡曲面的曲率特征对过渡曲面数据点进行自动分块,然后,基于微积分概念,应用圆柱面分段拟合的方法提取过渡曲面在不同脊线位置的过渡半径,最后,应用概率统计的方法分析过渡半径随脊线位置的变化规律。

第7章论述规则自由曲面特征的自动提取算法。拉伸方向和旋转轴是拉伸面与旋转面重构的主要特征参数,作者给出了基于统计理论的适用于拉伸方向与旋转轴直接提取的算法。基于ICP算法,作者研究了对称面的提取方法。

第8章阐述自由曲面重建技术以及曲面高级编辑技术。给出了基于散乱数据点和复杂边界约束的自由曲面重构算法,解决了蒙皮曲面重构中的截面曲线几何特征相容性问题,应用非均匀基B样条小波技术实现了曲线和曲面的光顺,提出了复杂曲面间的局部协调设计技术,从而解决了复杂曲面间的局部光滑修补设计问题。

第9章专门介绍由浙江大学和杭州一茗软件有限公司合作开发的反求工程CAD软件RE-SOFT的结构和功能,分析了RE-SOFT软件在解决复杂产品反求工程CAD建模中提供的策略、路线和方法,最后给出RE-SOFT在不同领域的几个应用实例。

本书适用于计算机辅助设计与制造(CAD/CAM)专业、汽车工程专业、飞机设计与制造专业和模具设计专业的研究生教学参考书,也可作为汽车、飞机、模具设计专业技术人员的工程设计参考书。

本书由柯映林主持撰写,八位博士参与了部分内容的写作及表格、图片整理工作:单东日(第3章、第5章、第9章);刘云峰、朱伟东(第4章、第9章);陈曦、范树迁、王青(第2章、第8章、第9章);李岸、吕震(第5章、第6章、第7章)。单东日、张旭参与了全文校订工作。

浙江大学副校长冯培恩教授自始至终关心和支特本书的创作,仔细阅读了手稿并提出了许多宝贵的修改建议。北京航空航天大学唐荣锡教授、西安交通大学卢秉恒教授、重庆大学张根保教授、华中科技大学熊有伦院士、浙江大学程耀东教授、南京航空航天大学周儒荣教授、同济大学李爱萍教授、浙江大学

石教英教授、浙江大学彭群生教授、成都飞机工业集团有限公司许德研究员、南京航空航天大学廖文和教授、上海交通大学彭颖红教授、大连理工大学贾振元教授和浙江大学谭建荣教授对我们的研究工作给予了长期的支持和鼓励。在此谨向各位教授致以深切的感谢。

在本书出版之际，谨向参与本书创作的八位博士及其家人表示感谢，感谢他们对我国科学事业的支持。

本书还凝聚了在浙江大学反求工程 CAD 实验室工作和学习过的所有博士后研究人员、博士研究生和硕士研究生的心血，他们在反求工程 CAD 软件 RE-SOFT 的研制和市场化方面做了卓有成效的工作，在此谨向他们表示衷心的感谢！

感谢所有支持过我们工作的国内外近百家 RE-SOFT 软件用户。

此外，我要特别感谢我的夫人和孩子，是他们无微不至的关爱和鼓励使我完成了此书。

最后需要说明的是，尽管我们花大力气创作此书，但由于水平有限，缺点和错误在所难免，恳请广大读者批评、指正。

柯映林

2005 年 2 月于浙江大学求是园

目 录

前言

第1章 反求工程 CAD 技术 1

- 1.1 反求工程 CAD 技术的
 内涵 1
- 1.2 反求工程 CAD 技术的
 应用 3
 - 1.2.1 反求工程 CAD 建模目的 ... 3
 - 1.2.2 反求工程与新产品开发 ... 3
 - 1.2.3 反求工程 CAD 技术的
 主要应用领域 5
- 1.3 反求工程 CAD 建模的
 基本步骤 6
 - 1.3.1 数据获取 7
 - 1.3.2 建模方案制定 7
 - 1.3.3 测量数据预处理 9
 - 1.3.4 特征抽取 9
- 1.4 反求工程涉及的相关
 学科 10
 - 1.4.1 反求工程中产品
 数字化模型表达 10
 - 1.4.2 反求工程 CAD 系统开发
 涉及的主要数学方法 12
- 参考文献 13

第2章 点云数据预处理 16

- 2.1 点云拓扑关系的建立 16
- 2.2 点云数据曲率计算 17
 - 2.2.1 给定公差下的点云
 数据采样 18
 - 2.2.2 基于快速邻域点搜索
 算法的曲率估算 21
 - 2.2.3 基于 4D Shepard 曲面的
 曲率插值算法 22

- 2.2.4 计算实例 23

2.3 简单多边形方向及点在 简单多边形内外的判断 ... 24

- 2.3.1 简单多边形方向的判断
 方法 25
- 2.3.2 点在多边形内外的判断
 方法 26

2.4 点云切片 28

- 2.4.1 平面与点云求交 29
- 2.4.2 切片厚度的确定 29
- 2.4.3 切片曲线的构造 29
- 2.4.4 应用举例 30

2.5 基于边界邻接特征的 数据分块计算 31

2.6 边界直接抽取 33

- 2.6.1 网格划分 34
- 2.6.2 种子边界栅格识别 35
- 2.6.3 种子边界栅格生长 36
- 2.6.4 从边界栅格中提取
 边界点集合 37

参考文献 39

第3章 反求工程 CAD 建模中的 特征与约束理论 41

3.1 反求工程中特征的定义、 分类与表达 41

- 3.1.1 反求工程中特征的
 定义 42
- 3.1.2 反求工程中特征的
 分类与表达 43
- 3.1.3 不同特征层次之间的
 映射关系 48

3.2 反求工程中约束的定义、

分类与表达	49	4.6.3 实例 3: 直线、圆弧、B 样 条曲线间的约束优化	75
3.3 基于特征及约束的反求 工程 CAD 建模	52	4.6.4 截面特征曲线全局约束 优化的应用实例分析	77
参考文献	54	参考文献	78
第 4 章 点云切片及截面特征		第 5 章 二次曲面区域分割与 约束重构	80
曲线约束优化	56	5.1 二次曲面的参数表达	80
4.1 截面数据获取	58	5.1.1 二次曲面模型	81
4.1.1 CMM 扫描数据	58	5.1.2 二次曲面拟合	82
4.1.2 点云切片	58	5.2 二次曲面区域分割	88
4.2 截面数据预处理及分段 特征识别	59	5.2.1 拟合误差控制下的二次 曲面区域分割	88
4.2.1 截平面数据离散曲率 估算	59	5.2.2 二次曲面数据区域分割 实例	90
4.2.2 基于特征点的截平面 离散曲线分段	61	5.3 二次曲面约束逼近	91
4.2.3 基于曲线拟合的特征 识别技术	62	5.3.1 约束最优化数学模型	92
4.3 截面特征曲线的拟合 模型及约束表达	64	5.3.2 二次曲面之间约束的数学 表达	93
4.3.1 直线、圆弧的最小 二乘拟合	64	5.3.3 二次曲面约束逼近实例及 分析	94
4.3.2 误差控制下的 B 样条 曲线自适应拟合	65	参考文献	98
4.3.3 曲线单元间的约束表达 ..	66	第 6 章 过渡曲面特征提取及 概率统计分析	99
4.4 分段曲线的整体约束 优化	68	6.1 过渡曲面特征及其曲率 特性分析	99
4.4.1 数学模型建立	68	6.1.1 过渡曲面基本特征	99
4.4.2 全局优化模型的求解	68	6.1.2 过渡曲面曲率特性	100
4.5 全局约束优化误差分析 ..	70	6.2 过渡曲面数据自动分块 算法	100
4.5.1 逼近误差分析	70	6.2.1 数据精简	100
4.5.2 约束误差分析	71	6.2.2 曲率比较	101
4.6 截面特征曲线全局约束 优化实例分析	72	6.3 过渡曲面特征参数 提取	103
4.6.1 实例 1: 直线间的全局 约束优化	72	6.3.1 圆柱面拟合	103
4.6.2 实例 2: 直线与圆弧间 的全局约束优化	73	6.3.2 过渡区域跟踪	104
		6.4 过渡曲面特征参数的	

统计分析	105	8.1 散乱数据的自由曲面逼近	145
6.4.1 统计数学模型	105	8.1.1 问题描述	146
6.4.2 等半径/变半径过渡特征参数的准确提取与概率统计分析	108	8.1.2 B 样条曲面逼近	146
6.5 计算实例	110	8.1.3 误差分析与评价	150
6.5.1 模拟设计数据	110	8.2 基于截面特征的蒙皮技术	152
6.5.2 实际测量数据	111	8.2.1 问题描述	153
6.5.3 误差分析	113	8.2.2 几何特征相容性	154
参考文献	114	8.2.3 曲面蒙皮	156
第 7 章 拉伸、旋转和对称面特征的自动提取	115	8.2.4 实例与结论	157
7.1 拉伸面特征提取	115	8.3 局部协调设计技术	158
7.1.1 拉伸面的最小主曲率方向	115	8.3.1 区域构建	159
7.1.2 方向数据的平均方向及噪声处理	116	8.3.2 协调曲面构建	162
7.1.3 初始拉伸方向的确定	118	8.3.3 实例与结论	164
7.1.4 拉伸方向优化	119	8.4 基于非均匀 B 样条小波的曲线、曲面光顺	166
7.1.5 拉伸面计算实例	120	8.4.1 非均匀 B 样条小波分解	167
7.2 对称面提取	122	8.4.2 非均匀 B 样条小波分解实现 NURBS 曲线光顺	169
7.2.1 算法原理	123	8.4.3 非均匀 B 样条小波分解实现 NURBS 曲面光顺	171
7.2.2 算法实现步骤	124	8.4.4 实例与结论	172
7.2.3 对称面的优化计算	126	参考文献	175
7.2.4 实例分析	127	第 9 章 反求工程 CAD 建模系统 RE - SOFT	179
7.3 旋转面特征提取	129	9.1 RE - SOFT 的系统结构	180
7.3.1 旋转面的曲率线	130	9.1.1 系统体系结构	180
7.3.2 主方向高斯映射	131	9.1.2 系统功能结构	181
7.3.3 基于快速聚类分析的数据分离	132	9.1.3 系统基本数据结构	182
7.3.4 旋转轴获取	136	9.2 RE - SOFT 建模策略	183
7.3.5 旋转轴优化	137	9.2.1 基于截面特征曲线的建模策略	184
7.3.6 旋转轴计算实例	138	9.2.2 基于曲面特征的建模策略	191
7.3.7 轮廓线的获取及旋转面的重构实例	140		
参考文献	143		
第 8 章 复杂曲面设计与编辑	145		

9.2.3 基于两种建模策略的	应用	207
综合应用实例		197
9.3 RE - SOFT 应用实例		207
9.3.1 航空领域的应用		207
9.3.2 汽车、摩托车领域的		
	应用	207
	9.3.3 组织工程领域的应用	211
	9.3.4 艺术品仿制及玩具制造	
	领域的应用	212
	参考文献	212

第1章 反求工程 CAD 技术

1.1 反求工程 CAD 技术的内涵

随着计算机、数控和激光测量技术的飞速发展,反求工程不再是对已有产品进行简单“复制”,其内涵与外延都发生了深刻变化,成为航空、航天、汽车、船舶和模具等工业领域最重要的产品设计方法之一,是工程技术人员通过实物样件、图样等快速获取工程设计概念和设计模型的重要手段。

反求工程(RE, Reverse Engineering)指的是针对已有产品原型,消化吸收和挖掘蕴含其中的涉及产品设计、制造和管理等各个方面的一系列分析方法、手段和技术的综合。它以产品原型、实物、软件(图样、程序、技术文件等)或影像(图片、照片等)等作为研究对象,应用系统工程学、产品设计方法学和计算机辅助技术的理论和方法,探索并掌握支持产品全生命周期设计、制造和管理的关键技术,进而开发出同类的或更先进的产品。广义反求工程的研究内容十分广泛,概括起来主要包括产品设计意图与原理的反求、美学审视和外观反求、几何形状与结构反求、材料反求、制造工艺反求、管理反求等^[1~3]。

目前,国内外有关反求工程的研究主要集中在产品几何形状以及与“功能”要素相关的结构反求,即重建产品原型的数字化模型方面。从产品几何模型重建的角度,反求工程可狭义地定义为将产品原型转化为数字化模型的有关计算机辅助技术、数字化测量技术和几何模型重建技术的总称。基于这一定义,反求工程可以看成是从一个已有的物理模型或实物零件构造相应的数字化模型的过程。

作为一种逆向思维的工作方式,反求工程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,是对已有设计的再设计。传统的产品开发过程遵从正向工程(或正向设计)的思维进行,是从收集市场需求信息着手,按照“产品功能描述(产品规格及预期目标)→产品概念设计→产品总体设计及详细的零部件设计→制定生产工艺流程→设计、制造工夹具、模具等工装→零部件加工及装配→产品检验及性能测试”这样的步骤开展工作,是从未知到已知、从抽象到具体的过程。而反求工程则是按照产品引进、消化、吸收与创新的思路,以“实物→原理→功能→三维重构→再设计”框架进行工

作, 其中, 最主要的任务是将原始物理模型转化为工程设计概念或产品数字化模型。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先进的 CAD/CAE/CAM 技术对已有的产品进行再创新设计服务。图 1-1 是正向工程与反求工程过程的对比框图。两者比较, 区别在于: 正向工程中从抽象的概念到产品数字化模型建立是一个计算机辅助的产品“物化”过程; 而反求工程是对一个“物化”产品的再设计, 强调产品数字化模型建立的快捷性和效率, 以满足产品更新换代和快速响应市场的要求。在反求工程中, 由离散的数字化点或点云到产品数字化模型的建立是一个复杂的设计意图理解、数据加工和编辑的过程。

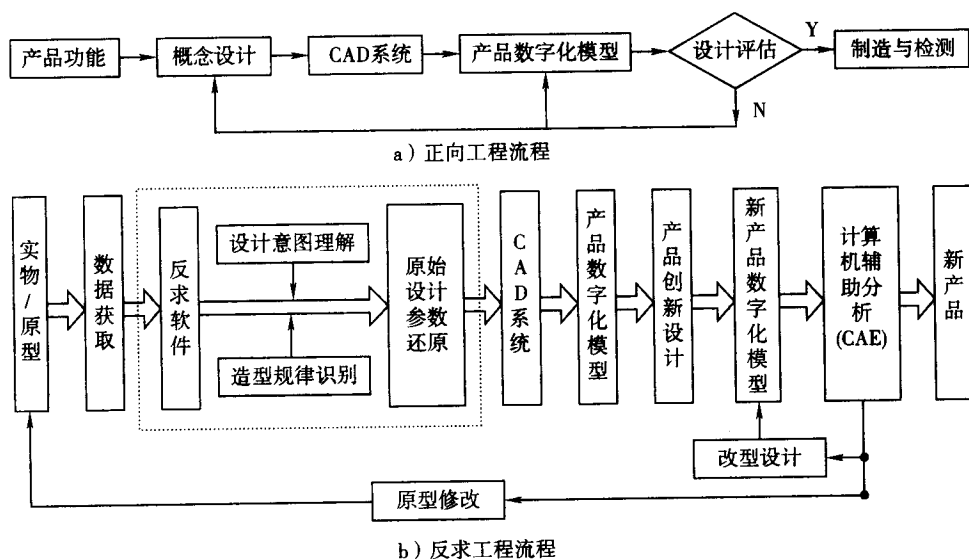


图 1-1 正向工程与反求工程

从产品反求工程建模的本质过程可以看出, 基于原型的数字化点云分析、设计意图理解和模型重建过程, 充分体现了计算机辅助几何设计 (Computer Aided Geometric Design, CAGD)、计算机图形学 (Computer Graphics, CG)、非线性规划 (Nonlinear Programming, NLP) 等数值计算和图形表示方法的深入交叉和综合应用特点, 是计算机辅助设计领域目前最活跃、最有特色的研究方向。如何从数字化点云中分析、推断出产品原型所隐含的设计意图, 如具体的产品设计和制造功能等特征, 是一个非常复杂的数学运算、计算机理解和表达的过程, 涉及的数学和计算机问题主要包括: 支持快速搜索和特征分析的点云表达机制、特征建模和概率统计分析、曲线曲面几何特征之间的复杂约束与优化、曲面美化等。本书将这种依赖于特色数学方法和工具, 通过计算机辅助设计手段来解

决产品反求工程设计的理论、方法和系统统称为反求工程 CAD。更确切地说,反求工程 CAD 技术包括了产品反求工程设计所涉及的相关数学理论、计算机图形表示方法和专门的计算机辅助设计系统^[3~4]。

1.2 反求工程 CAD 技术的应用

1.2.1 反求工程 CAD 建模目的

从反求工程的基本概念可以看出,反求工程的应用可分为两个层次。反求工程的基本目的主要是复制原型和进行与原型有关的制造(如设计出加工原型的模具),包含有“三维重构”、“反求制造”两个阶段,快速成型制造正好体现了反求工程的基本目标。从发展的角度看,只有支持进一步创新功能的反求工程技术才具有更加广阔的应用前景,其包含了“三维重构”与“基于原型或重建数字化模型的再设计”,后者真正体现了反求工程技术的核心和实质。

1.2.2 反求工程与新产品开发

新产品开发是关系到企业可持续发展的一项重要活动,也是带给企业活力和竞争优势的源泉。对当代成功企业来说,产品创新是推动其不断发展壮大的动力,不断推出新产品正是其竞争策略的核心要素。据 PDMA(产品开发与管理协会)的一项统计,经营成功的高技术企业 50% 以上的销售额来源于新产品,表现出色的企业则高达 60% 以上的销售额来源于新产品^[5]。我国企业市场竞争力比较弱的主要原因正在于产品自主开发能力不足。因此,研究和系统掌握产品快速开发技术,对于提高企业的自主创新能力、加速新产品开发过程,具有重要的现实意义和显著的经济价值。

新产品的开发过程通常包括产品规划、产品设计、生产准备和样品试验四个阶段。它是一项复杂的系统工程,涉及范围广、参与人员多。在普遍采用 CAX 技术进行产品开发的今天,如何建立产品的数字化模型是产品设计的中心内容。可以说,在现代产品的无纸开发方式中,只有建立正确的产品数字化模型,才有可能采用各种虚拟技术进行产品分析、虚拟装配、虚拟制造,直至完成产品的实际制造。离开了产品数字化模型,一切分析与制造工作将无从谈起。在产品数字模型建立过程中,反求工程技术的应用越来越受到人们的重视,综合利用 RE 技术和 CAD 技术可以显著提高复杂外形产品的数字化建模工作质量和效率,增强企业对市场的快速响应能力。但反求工程在新产品开发中的应用又不局限于数字化模型重建,三维重构只是实现产品创新的基础,再设计的思想应始终贯穿于反求工程的整个过程,它将反求工程的各个环节有机地结合起

来,集成 CAD/CAM/CAE/CAPP/CAT/ RP 等先进技术,使之不再孤立,成为互相影响和制约的有机整体,并形成了以反求工程技术为中心的产品快速开发体系,如图 1-2 所示。

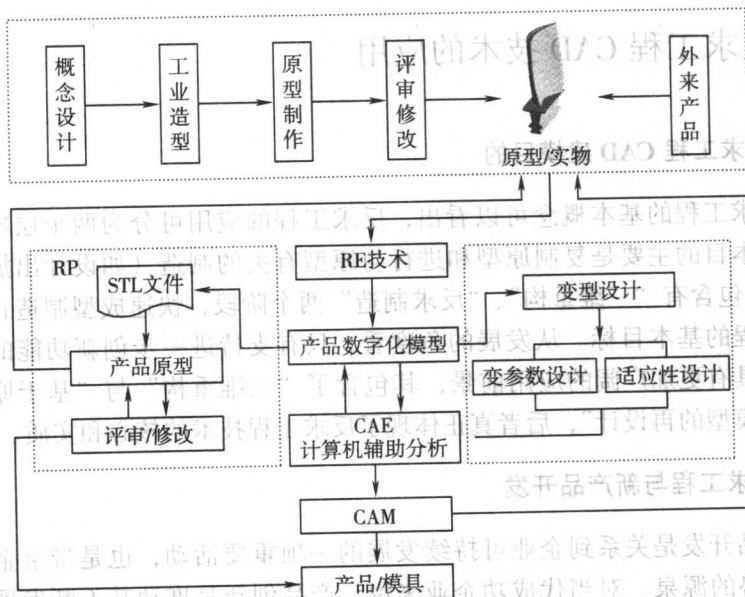


图 1-2 以反求工程技术为中心的产品快速开发体系

“引进、消化、吸收、创新”是被证明了的新产品快速开发的有效途径。通过反求工程分析可以全面地理解原型的设计思路,发现其优点及不足,增加反求设计产品及工程的可靠性;通过反求工程技术,可以完成基于数字化模型的产品优化设计,以达到进一步改进原型设计的目的;采用反求工程技术可避免走自行开发中不可避免的许多弯路,从而大大缩短新产品开发周期,适应消费者对产品的个性化与多样化的要求,为企业快速占领市场创造条件。

工业设计是科学技术与艺术的相互渗透、交叉与结合,对具有复杂曲面外形的家用电器、汽车、摩托车的外覆盖件经常是首先由工业造型人员基于设计概念、设计思想按照美学要求手工制作产品原型(木模/油泥模/粘土模),再利用反求工程技术快速将产品原型转换为产品数字化模型,从而实现“基于原型设计”的产品创新。而利用快速成型技术(Rapid Prototyping, RP)、快速模具制造技术(Quick Tooling)、快速精铸技术(Quick Casting)、快速金属粉末烧结技术(Quick Powder Sintering),又可自动、直接、快速、精确地将数字化模型物化为具有一定功能的原型或零件,从而可以对产品进行快速评价、修改及功能实验。RE/CAD/CAM/CAE/ RP 等诸多技术的有机组合形成了以“原型设计(先

进产品)、反求工程 CAD 建模、CAE、快速成型(数控加工)、原型(数字化模型)修改”为主要步骤的新产品快速开发闭环系统,如图 1-2 所示。基于这一闭环系统进行新产品开发可有效缩短产品研发周期、提高新产品的设计水平^[6~7]。

1.2.3 反求工程 CAD 技术的主要应用领域

随着新的反求工程原理和技术的不断引入,反求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手段。具体来说,反求工程技术的应用主要集中在以下几个方面:

(1) 在诸如飞机、汽车、摩托车、家用电器等产品开发中,产品的空气动力学性能和美学设计显得特别重要,由于设计师习惯于依赖 3D 实物模型对产品的设计进行评估,而不是依赖于高分辨率 2D 屏幕上的缩比模型彩色图像,因此产品几何外形通常不是应用 CAD 软件直接设计的,而是首先制作木质或粘土全尺寸或比例模型,然后利用反求工程技术重建产品数字化模型。因此,反求工程技术在此类产品的快速开发中显得举足轻重。

(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产品数字化模型的情况下,若能将实物零件通过数据测量与处理产生与实际相符的产品数字化模型,对模型进行修改以后再进行加工,将显著提高生产效率。因此,反求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) 在缺乏二维设计图样或者原始设计参数情况下,需要将实物零件转化为计算机表达的产品数字化模型,以便充分利用现有的计算机辅助分析(CAE)、计算机辅助制造(CAM)等先进技术,并进行产品创新设计。

(4) 某些大型设备,如航空发动机、汽轮机组等,经常因为某一零部件的损坏而导致整机停止运行,通过反求工程技术,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并延长其使用寿命。

(5) 一些特殊领域,如艺术品、考古文物的复制,医学领域中人体骨骼、关节等的复制、假肢制造,特种服装、头盔的制造时需要首先建立人体的几何模型,这些情况下都必须从实物模型出发得到产品数字化模型。

(6) 借助于工业 CT 技术,反求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探伤的重要手段。

1.3 反求工程 CAD 建模的基本步骤

基于实物原型进行产品创新设计需要经过数据获取、建模方案制定、数据预处理、特征参数抽取、CAD 建模、创新设计及产品制造等步骤，具体内容如图 1-3 所示。设计人员在对反求工程 CAD 建模目的、产品表面组成及重构方法、重建精度、重建过程充分理解的基础上，根据提取的特征设计参数，按照正向

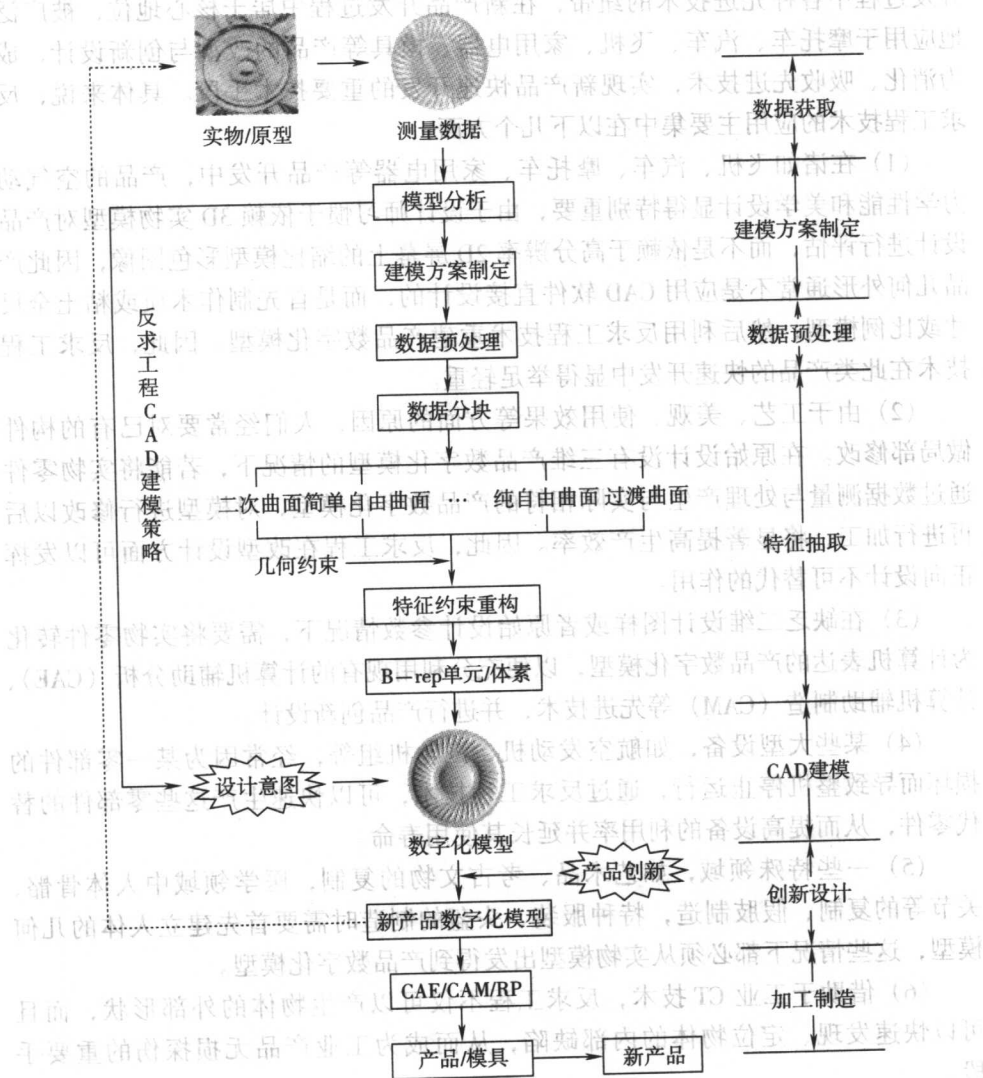


图 1-3 反求工程的基本步骤

设计的方法完成产品数字化模型重建。

1.3.1 数据获取

数据获取是反求工程 CAD 建模的首要环节, 根据测量方式不同, 数据采集方法可分为接触式测量和非接触式测量两大类。接触式测量方法通过传感测头与样件的接触而记录样件表面点的坐标位置。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, 将一定的物理模拟量通过适当的算法转换为样件表面的坐标点^[7]。使用不同的测量方法及测量软件, 得到的测量数据组织方式不同。按照测量数据的组织方式可将测量数据分为四类:

- 1) 散乱数据: 测量点没有明显的几何分布特征, 呈散乱无序状态。
- 2) 扫描线数据: 测量数据由一组扫描线组成, 扫描线上点在扫描平面内有序排列。
- 3) 网格化数据: 点云中所有点都与参数域中一个均匀网格的顶点对应。
- 4) 多边形数据: 测量点分布在一系列平行平面内, 用小线段将同一平面内距离最小的若干相邻点依次连接可形成一组有嵌套的平面多边形^[8~11]。

1.3.2 建模方案制定

为了提高反求工程重建产品数字化模型的再设计能力, 以便对其进行变参数或适应性设计, 就需要在反求工程 CAD 建模时分析、理解实物模型的设计意图及造型方法, 并基于测量数据进行原始设计参数还原。在反求工程领域, 模型的参数主要有三种: 设计参数、实物参数、重构参数。设计参数是指零件在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, 它是反求工程达到更高阶段的关键所在, 其直接目的是解决实物反求的去伪存真问题, 即剔除可能包含在产品中的制造、装配、磨损、测量、计算等误差, 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对于各种设计因素关系的处理方式、方法, 找出经过实践证明是正确的设计思想及设计结果, 帮助提高自主设计能力。

众所周知, 在支持 TOP-DOWN 的 CAD/CAM 技术中, 产品正向设计过程一般首先进行功能分解, 即将总功能分解成一系列的第一级子功能, 并通过设计计算确定每个子功能参数; 其次进行结构设计, 即根据总的功能及各个子功能要求, 设计出总体结构(装配)及确定各个子部件(子装配体)之间的位置关系、连接关系、配合关系。位置关系、连接关系、配合关系及其它参数(如子