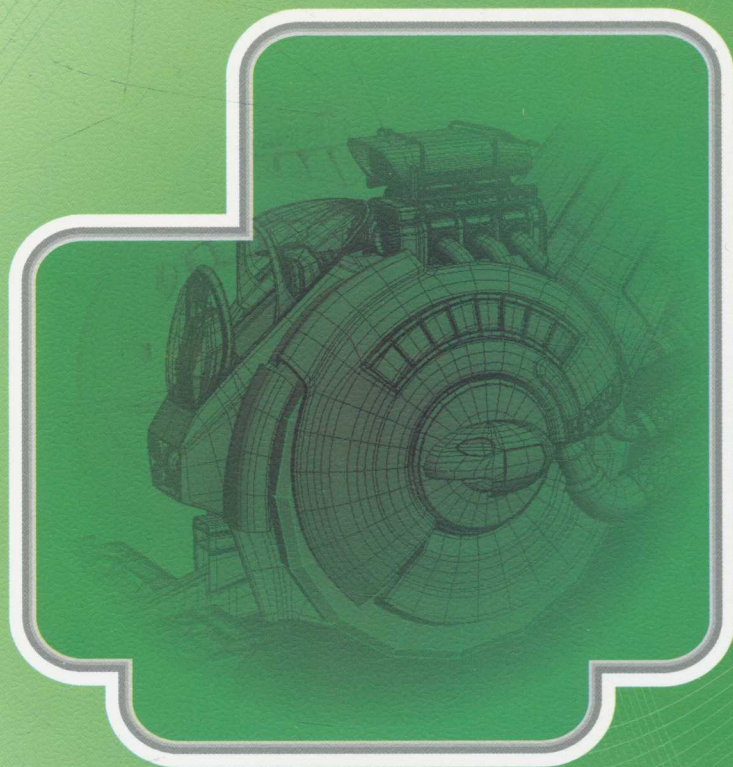




全国本科院校机械类**创新型**应用人才培养规划教材

三维数字化建模 与逆向工程

主编 张德海



教材预览、申请样书



微信公众号: pup6book



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材

三维数字化建模与逆向工程

主 编 张德海



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书以科研实践为基础,介绍了逆向工程 CAD 技术的基本原理、方法及流程;介绍了逆向工程涉及的先进测量技术,包括接触测量和非接触测量;论述了工业近景摄影测量技术和结构光扫描测量技术的内容、方法和关键技术;结合典型的应用需求,给出了点云处理的关键技术,并对市面上主流的逆向工程软件进行了梳理和归纳,最后以几个实例对本书的知识点进行了证明和串接。

本书可作为高等院校机械设计制造及其自动化、测控技术与仪器、检测技术等专业本科和研究生的参考教材,也可作为其他相近专业的学习参考书,同时可供相关领域相关专业的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

三维数字化建模与逆向工程/张德海主编. —北京:北京大学出版社,2016.4

(全国本科院校机械类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-25584-1

I. ①三… II. ①张… III. ①三维动画软件—高等学校—教材 IV. ①TP391.41

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 226904 号

- 书 名** 三维数字化建模与逆向工程
SANWEI SHUZHUA JIANMO YU NIXIANG GONGCHENG
- 著作责任者** 张德海 主编
- 责任编辑** 童君鑫
- 标准书号** ISBN 978-7-301-25584-1
- 出版发行** 北京大学出版社
- 地 址** 北京市海淀区成府路 205 号 100871
- 网 址** <http://www.pup.cn> 新浪微博: @北京大学出版社
- 电子信箱** pup_6@163.com
- 电 话** 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667
- 印 刷 者** 三河市北燕印装有限公司
- 经 销 者** 新华书店
- 787 毫米×1092 毫米 16 开本 18.75 印张 438 千字
2016 年 4 月第 1 版 2016 年 4 月第 1 次印刷
- 定 价** 42.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有, 侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话: 010-62756370

前 言

本书是为适应目前高等教育教学改革的需要，并根据高等学校机械类专业人才的培养要求而编写的。本书以加强基础、拓宽口径、提炼特色为宗旨，以提高学生创新能力、实际工作能力为目的，以培养适应目前社会需要的高素质人才为目标。

随着科学技术的快速发展和经济的日益全球化，国内传统制造业市场环境发生了巨大变化的社会环境，集中表现在消费者兴趣的短时效性和消费者需求日益主体化、个性化及多元化；同时由于区域性、国际性市场壁垒的淡化或打破，使得制造厂家不得不着眼于全球市场的激烈竞争。在这种环境下，逆向工程技术的重要性更加显示出来，敏捷制造、产品快速研发响应、三维数字化建模与逆向工程技术成为企业乃至一个国家赢得全球竞争的第一要素，逆向工程成为消化、吸收国外先进技术的有效手段。

逆向工程是对已有的产品零件或原型进行三维数字化模型重建，但不仅仅是对已有产品进行简单“复制”，其内涵与外延都发生了深刻的变化。逆向工程已成为航空、航天、汽车、船舶、家电、模具及各行各业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、结构产品、图样等快速获取工程设计概念和几何模型的重要技术手段；是消化、吸收、改进、提高原型产品的重要技术手段；是产品快速创新开发的重要途径。

国内关于三维数字化建模与逆向工程技术的教材较少。市面上有关逆向工程方面的书籍具有两方面的特点：一种以理论计算为主，实践性操作为辅，偏重于理论公式；另一种是以实践性为主，理论描述为辅，偏重于软件应用、实例操作。而我国大学研究生教育和本科教育培养出来的科学技术人员要求既要有一定的理论知识，又有一定的实践操作技巧。所以本书从逆向工程实际应用的角度出发，注重理论性和实践性相结合，创新性方法和逆向工程相结合，做到既有理论又有实践，通俗易懂，便于教师的教学和学生的学习，有助于教学质量的提高。本书在编写过程中以“理论联系实际”为原则，同时尽量将复杂深奥的数学问题用比较容易理解的方式进行介绍，将实例与方法融为一体，使读者从真实的工程实例应用中领会到逆向设计与三维建模思维方法的奥妙。

本书由郑州轻工业学院张德海担任主编，王辉担任副主编。其中，第2章、第3章、第5章、第6章、第7章由张德海编写，第1、4章由王辉编写。

本书在编写过程中得到了郑州轻工业学院李艳芹、刘红霞、白代萍的帮助，在此向他们表示感谢！

由于编者阅历浅、水平及经验有限，加之时间紧迫，书中难免存在不足之处，敬请广大同仁和读者不吝指正。

编 者

2016年1月

目 录

第 1 章 逆向工程 CAD 技术	1
1.1 现代设计方法	2
1.1.1 现代设计方法的历史和定义	2
1.1.2 现代设计方法的分类	4
1.2 正向设计	5
1.2.1 产品规划	6
1.2.2 方案设计	7
1.2.3 结构与技术设计	7
1.2.4 产品制造	8
1.3 逆向设计	9
1.3.1 逆向设计的工作流程	11
1.3.2 逆向设计的开发流程	13
1.3.3 逆向设计的应用前景	18
1.4 三维数字化建模 CAD 平台的选择	19
1.4.1 三维数字化建模与逆向工程	19
1.4.2 正向设计 CAD 建模软件选择要点	20
1.4.3 正向设计建模主流 CAD 软件	21
小结	24
习题	24
第 2 章 逆向工程的测量技术	25
2.1 先进检测技术	26
2.2 接触式测量	27
2.2.1 三坐标测量机	30
2.2.2 三坐标测量机软件分类	39
2.2.3 三坐标测量机测量过程	42
2.3 非接触测量	45
2.3.1 三维光学测量技术	45
2.3.2 三维光学测量设备	48
2.4 断层数据测量方法	53
2.5 测量中的问题	56
2.5.1 三维数据测量方法的选择	56
2.5.2 数据测量的误差分析	58
2.6 三维测量技术的应用	60
小结	64
习题	64
第 3 章 工业近景摄影测量技术	65
3.1 数字摄影测量	68
3.1.1 数字摄影测量的定义和分类	68
3.1.2 数字摄影测量要解决的主要问题	69
3.1.3 数字摄影测量系统的作业过程	69
3.2 数字影像的获取与重采样	70
3.2.1 光学影像与数字影像	70
3.2.2 影像的数字化	71
3.2.3 数字影像的重采样	72
3.3 数字影像解析基础	74
3.3.1 数字影像的内定向	74
3.3.2 同名核线的确定	75
3.4 数字影像匹配原理	78
3.4.1 数字影像相关原理	78
3.4.2 数字影像匹配基本算法	81
3.4.3 基于物方的影像匹配法	84
3.5 最小二乘影像匹配	85
3.5.1 最小二乘影像匹配原理	85
3.5.2 单点最小二乘影像匹配	87
3.6 基于特征的影像匹配	88
3.6.1 特征提取	89
3.6.2 基于特征点的影像匹配	90



3.7 数字影像纠正	91	4.2.1 双目立体视觉测量模型	136
3.7.1 像片纠正的基本思想	91	4.2.2 双目立体视觉传感器标定方法	137
3.7.2 中心投影影像的数字影像纠正	92	4.3 单摄像机测量	139
3.8 数字摄影测量系统	94	4.3.1 单摄像机测量数学模型	139
3.8.1 数字摄影测量系统的主要产品	94	4.3.2 控制点空间坐标求解的多义性	141
3.8.2 数字摄影测量系统的主要功能	95	4.4 光束平差测量	142
3.8.3 数字摄影测量系统的工作流程	95	4.4.1 光束平差测量数学模型	142
3.8.4 JX-4C 数字摄影测量系统	96	4.4.2 平差初值的获取	143
3.9 近景摄影测量	98	4.5 数字化视觉精密测量系统	145
3.9.1 近景摄影测量的摄影方法和基本公式	99	4.5.1 测量系统的构成	145
3.9.2 近景摄影测量的量测用摄影机	103	4.5.2 测量原理及工作流程	149
3.9.3 量测用立体摄影机	105	4.6 相机成像基站的外部方位	152
3.9.4 非量测摄影机	107	4.6.1 初始绝对方位	152
3.9.5 直接线性变换解法	110	4.6.2 相机成像基站的相对方位	159
3.9.6 近景摄影测量中相对控制的应用	118	4.7 空间特征点匹配	170
3.9.7 XJTUDP 系统简介	122	4.7.1 基于外极线约束的特征点匹配法	170
小结	124	4.7.2 基于外极平面角的特征点匹配方法	171
习题	124	4.8 三角测量与反推投影	172
第 4 章 结构光扫描测量技术	125	4.8.1 空间特征点三角测量原理	173
4.1 结构光测量	127	4.8.2 空间特征点反推投影	176
4.1.1 结构光视觉原理	127	4.9 空间优化平差及后处理	177
4.1.2 点结构光视觉传感器数学模型	128	4.9.1 基于共线方程的光束优化平差	177
4.1.3 线结构光视觉传感器数学模型	129	4.9.2 快速优化平差和后处理	179
4.1.4 多线结构光视觉传感器数学模型	130	小结	183
4.1.5 光栅投影传感器数学模型	131	习题	184
4.1.6 结构光视觉传感器标定方法	132	第 5 章 点云处理关键技术	185
4.2 立体视觉测量	136	5.1 测量数据前期修补技术	187
		5.1.1 点云预处理流程	187

5.1.2	点云采样	189	6.3.4	应用方式	238
5.1.3	噪声识别与去除	190	6.3.5	CAD 系统扩展	239
5.1.4	数据压缩, 精简	192	6.3.6	软件优势	242
5.1.5	数据补全	196	6.4	CopyCAD	245
5.1.6	数据平滑	197	6.4.1	概述	245
5.2	测量数据的多视配准技术	198	6.4.2	CopyCAD 的主要特性	246
5.2.1	ICP 匹配技术	198	6.4.3	Delcam CopyCAD Pro 软件特点	248
5.2.2	基于统计特征的模型 匹配初值获取技术	199	6.5	RapidForm	256
5.2.3	基于扩展高斯球的模型 匹配初值获取技术	202	6.5.1	概述	256
5.2.4	层次聚类法	208	6.5.2	主要特性	256
5.3	测量数据可视化分析技术	213	6.5.3	RapidForm 发布逆向工程 软件的最新版本	257
5.3.1	曲率分析	213	6.5.4	关于 Shiningform	258
5.3.2	点云网格化	219	小结		258
5.4	测量数据分割技术	221	习题		258
5.4.1	散乱数据的自动分割	222	第 7 章 实例应用分析		260
5.4.2	基于点云几何属性的特征 区域自动分割方法	226	7.1	基于近景摄影测量和结构光 测量的测量方法	261
5.4.3	交互分割方法	227	7.1.1	检测新方法的程序	262
5.5	应用实例	227	7.1.2	检测新方法的步骤	264
小结		229	7.1.3	近景摄影测量系统的 组成及程序界面	264
习题		229	7.1.4	三维光学面扫描测量 系统	265
第 6 章 逆向工程软件简介		230	7.2	应用实例	267
6.1	逆向软件简介	232	7.2.1	大型水轮机叶片检测	267
6.2	Imageware	233	7.2.2	某门外壳成形回弹量 检测的实例分析	268
6.2.1	Imageware 简介	233	7.2.3	皮带轮三维建模	277
6.2.2	主要模块	234	7.2.4	汽车驾驶室曲面建模	279
6.2.3	主要特点	235	7.2.5	某汽车后地板纵梁成形 回弹值及其精度评价	280
6.3	Geomagic Studio	236	参考文献		287
6.3.1	将实物零部件转化为可制造 的数字模型的唯一全面的 解决方案	236			
6.3.2	主要功能	237			
6.3.3	主要优势	237			

第 1 章

逆向工程 CAD 技术



本章教学要点

知识要点	掌握程度	相关知识
现代设计方法、正向设计、逆向设计	(1) 掌握现代设计方法的基本原理及定义、特点 (2) 熟悉正向设计、逆向设计的应用	(1) 现代设计方法的历史及溯源 (2) 现代设计方法的特点和优势
逆向设计的流程	(1) 掌握逆向设计的基本原理及特点 (2) 熟悉逆向设计各流程节点的定义及应用 (3) 了解逆向工程节点的算法原理	逆向工程相关的测量工具、测量方法及其优缺点
正向设计的流程	(1) 掌握逆向设计的基本原理及特点 (2) 熟悉逆向设计各流程节点的定义及应用 (3) 了解逆向工程节点的算法原理	正向设计相关的测量工具、测量方法及其优缺点



逆向工程在飞机制造业中的应用

随着信息技术的飞速发展,国际航空技术已经发展到产品数字化阶段,全面应用 CAD/CAM 技术,这是航空技术发展的大趋势。我国飞机近几年发展迅速,新的飞机机型都实现了数字化,但还有一些老飞机机型仍在使用。由于受当初的设计条件限制,老机型零件大部分没有数字化,现在这些零件的加工仍然是按照之前没有数模的图纸进行,加工后再用飞机零件外形的模线样板和模胎来检验,不合格的用钳工进行反复修整,直到符合样板要求为止,这种加工方法,延长了生产周期,降低了生产效率。因此需建立一种有效的数字化设计方法,在设计过程中,把模线样板检验的环节考虑进去,直接设计出合格的数模,再进行数控加工,从根本上解决原有加工方法产生的问题,进而提高生产效率。

例如某机身的某型面需用进行模线样板和模胎检测,合格后才能使用。根据此零件特点,采用德国 COMET L3D 三维光学扫描仪测量零件整体数据,再测量模胎型面(扫描仪测量误差为 0.02mm);运用接触式三坐标测量机测量模线样板轮廓;将获得的零件三维原始数据输入 CATIA 软件中,运用 CATIA 正、逆向模块按照图纸尺寸进行数字化设计,就能较好地完成任务。

为了能够提高加工效率,在零件逆向设计过程中最关键的技术是如何将不同的数据统一,即将模线样板和模胎检测的问题数字化解决。首先,在 CATIA 软件中按照零件图纸要求建立同一坐标系,将所有获得的原始数据转换到统一坐标系下;再按照零件机身型面要求建立曲面,曲面要符合模胎的型面要求,误差要控制在 0.1mm 以内;再按照坐标要求,调整零件曲面 U、V 方向控制点,使其符合模线样板轮廓要求,误差要控制在 0.05mm 内;最后再按照图纸要求设计其他相关特征。

数控加工后的零件曲面型面完全符合模线样板及模胎的检测要求,型面误差在 0.1mm 内。用一周时间完成了从零件的数据测量、设计到最后加工出成品,与原来用时 2 个月对比,大大提高了产品加工的效率。逆向工程技术开创了飞机零件数字化设计制造的一种新方法。

资料来源:肖胜兵,王铮·机械工程师·2013,7,78-79

1.1 现代设计方法

1.1.1 现代设计方法的历史和定义

所谓现代设计方法是与传统设计方法相比较而言的,“现代”与“传统”本就是继承与发展的关系,没有传统也就没有现代,没有传统的沉淀与升华,现代也就成了无本之木、无源之水;反之,没有现代对传统的发展与扬弃,传统也就成了古董,失去了活力,如同一潭死水。因此在历史的长河中,传统与现代本就是一对双子星,失去了一方,另一

方也就失去了存在的意义。古之传统，今之现代，明之创新，历史就这样交替地把握着传统与现代，按照自己的意愿前行。纵观科学发展史与人类文明发展史，可能历史更加喜欢传统一些，几乎每一次，现代都是在传统的阵痛中诞生的。从哥白尼慑于传统只能在弥留之际出版光辉的《天体运行论》，到达尔文的《物种起源》，无不体现着现代对传统突破的艰难。而历史似乎又将这种艰难不经意地抹去，当今连爱因斯坦的相对论也纳入了传统的怀抱。所以说，严格区分现代与传统没有太大的历史意义，现代由于时间的流逝终将归于传统。在历史的时间坐标轴上，现代只能是那个箭头，其后连绵不断的那根直线则是不断扩张的传统。18世纪的英国诗人亚历山大·蒲柏在牛顿的墓志铭中写道：自然和自然的法则在黑夜中隐藏，上帝说，“让牛顿去吧”，于是一切都被照亮。但到了20世纪，魔鬼说，“让爱因斯坦去吧”，于是一切又重新回到“黑暗”。

历史就是这样，传统无所不在，现代如同在传统土壤中蠕动的虫蛹，时不时地破土而出，照亮历史的前行方向。就设计方法而言，每一时代的设计方法都是与该时代的科技与人文发展水平紧密相连的。每一次设计方法的大突破都有时代科技与人文变更的大背景。人类的科技与人文发展历史大体上可分为古代、近代和现代3个时期。古代指的是16世纪之前；近代指的是16世纪到19世纪末，约400年；现代指的是19世纪末、20世纪初迄今。

16世纪之前，生产力水平以农业生产为主导，观察世界的方式主要靠直觉、猜测与经验，相应的设计方法也以直觉设计为主，以经验的方式薪火相传。16世纪到19世纪末，人类花了约400年的时间完成了对农业生产方式的突破，生产力水平渐以工业生产为主导；这一时期的自然科学完全从哲学中分化出来，走上了独立发展的道路，并且又逐步分化为物理学、化学、天文学、地学、生物学等多门学科，并相继成熟，形成了极为严密和可靠的自然知识体系，自然科学达到了全面发展的阶段；这一时期观察世界的方式从直觉、猜测与经验进化为理论、实证与定量分析和归纳；相应的设计方法也从直觉设计发展为理论与经验相结合的设计。19世纪末、20世纪初是现代科学技术的诞生期，尤其在物理学方面取得了一系列巨大的成就。自此以后，科学技术进入大发展时期，其发展速度越来越快，涉及领域越来越多，对社会经济的发展和贡献已难以用数字来表达。同时，科学技术呈整体化发展，一系列交叉学科、边缘学科、综合学科等新兴学科不断涌现，这表明科学越来越成为一个有机统一的整体。科学技术逐渐超前于生产，并对生产起到决定性的促进作用，成为第一生产力。在此期间，20世纪40年代计算机的发明及20世纪80年代后的普及，以及20世纪90年代后信息革命的兴起是一系列标志性的事件。设计方法也因此开始有了突破性的进展，传统设计方法也因计算机的使用开始更新为现代设计方法。

传统设计方法是以理论公式及长期设计实践中形成的经验、公式、图表和设计手册等为基础，通过安全系数设计、经验设计、类比设计、分离设计等半理论半经验的方式，完成方案拟订、设计计算、绘图和编写说明书等工作。传统设计方法的对象产品一般具有产量大、寿命长、开发周期长、创新程度不高等特点。但随着全球经济一体化的不断推进，市场竞争的日益激烈，产品越发呈现出个性化、多样化、寿命短、开发周期短、创新空间空前扩大等特点，同时产品开发所涉及的技术与科学领域也越来越宽广，因此传统设计方法就显得捉襟见肘、顾此失彼，越发难以满足当今产品的设计要求，凸显出自身的局限性。

现代设计方法是对传统设计方法的深入、丰富和完善，它是一门随着当代科学技术的



飞速发展和计算机技术的广泛应用,基于现代设计理论发展起来的,融信息技术、计算机技术、知识工程和管理科学等多领域知识于一体而发展起来的新兴的多元交叉学科。它是以设计产品为目标的知识群体的总称,它同时也是综合考虑产品特性、环境特性、人文特性和经济特性的一种系统化的设计方法。目前它的内容主要包括:优化设计、可靠性设计、计算机辅助设计、工业艺术造型设计、虚拟设计、疲劳设计、三次设计、相似性设计、模块化设计、反求工程设计、动态设计、有限元法、人机工程、价值工程、并行工程、人工神经元计算方法等。现代设计方法的目的是减少传统设计中经验设计的盲目性和随意性,在缩短设计周期的同时提高设计的科学性和准确性,从而获得富有创新性和竞争力的优质产品。

传统设计方法的特征是静态设计、经验设计与分离设计,而现代设计方法则是动态设计、优化设计与集成设计;传统设计方法的计算量小,以手工计算为主,而现代设计方法的计算量大繁多,是以计算机作为分析、计算、综合、决策、数据处理、图形处理的工具。计算机由于运算速度快、数据处理准确、存储量大,且具有逻辑判断功能、资源可共享,因此计算机成为现代产品设计中必不可少的重要工具。简单地讲,现代设计方法可近似理解为:

现代设计方法=计算机+传统设计理念

需要说明的是,按照传统与现代的历史辩证关系,不可静态狭隘地理解现代设计方法,不能把现代设计方法当作一把万能钥匙去开启未来的所有设计难题,所谓现代也是有时效性的,它只能在当前及其后的一小段时间内起主要作用。现代设计方法只能通过不断吸收各学科领域的最新成果而永葆“现代”。“现代”之所以现代,因为它比照的是传统,而不是时间。

1.1.2 现代设计方法的分类

现代设计方法主要包含计算机辅助设计、优化设计、可靠性设计、有限元法、工业艺术造型设计、反求工程设计等。

1. 计算机辅助设计

计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)是把计算机技术引入设计过程并用来完成计算、选型、绘图及其他作业的一种现代设计方法。计算机、绘图及其他外围设备构成 CAD 硬件系统,而操作系统、语言处理系统、数据库管理系统和应用软件等构成 CAD 的软件系统。通常所说的 CAD 系统是只由系统硬件和系统软件组成,兼有计算、图形处理、数据库等功能,并能综合利用这些功能完成设计作业的系统。

2. 优化设计

优化设计(Optimal Design)是把最优化数学原理应用于工程设计问题,在所有可行方案中寻求最佳设计方案的一种现代设计方法。

在进行工程优化设计时,首先把工程问题按优化设计所规定的格式建立数学模型,然后选用合适的优化计算方法在计算机上对数学模型进行寻优求解,得到工程设计问题的最优设计方案。

在建立优化设计数学模型的过程中,把影响设计方案选取的那些参数称为设计变量;设计变量应当满足的条件称为约束条件;而把设计者选定来衡量设计方案优劣并期望得到

改进的指标表示为设计变量的函数,称为目标函数。设计变量、约束函数、目标函数组成了优化设计问题的数学模型。优化设计需要把数学模型和优化算发放到计算机程序中用计算机自动寻优求解。常用的优化算法有:0.618法、鲍威尔(Power)法、变尺度法、复合型法、函数法等。

3. 可靠性设计

可靠性设计(Reliability Design)是以概率论和数理统计为理论基础,是以失效分析、失效预测及各种可靠性试验为依据,以保证产品的可靠性为目标的现代设计方法。

可靠性设计的基本内容是:选定产品的可靠性指标及量值,对可靠性指标进行合理的分配,再把规定的可靠性指标设计到产品中去。

4. 有限元法

有限元法(Finite Method)是以电子计算机为工具的一种数值计算方法。目前,该方法不仅能用于工程中复杂的非线性问题、非稳态问题(如结构力学、流体力学、热传导、电磁场等方面的问题)的求解,而且还可以用于在工程设计中进行复杂结构的静态和动力学分析,并能准确地计算复杂零件的应力分布和形变,成为复杂零件强度和刚度计算的有利分析工具。

5. 工业艺术造型设计

工业艺术造型设计是工程技术与美学艺术相结合的一门新学科。它是旨在保证产品使用功能的前提下,用艺术手段按照美学法则对工业产品进行造型活动,包括结构尺寸、体面形态、色彩、材质、线条、装饰等因素进行有机的综合处理,从而设计出优质美观的产品造型。实用和美观的最佳统一是工业艺术造型的基本原则。

这一学科的主要内容包括:造型设计的基本要素、造型设计的基本原则、美学法则、色彩设计、人机工程学等。

6. 反求工程设计

反求工程设计(Reverse Engineering)是消化吸收并改进国内外先进技术的一系列工作方法和技术的总和。它是通过实物或技术资料对已有的先进产品进行分析、解剖、试验,了解其材料、组成、结构、性能、功能,掌握其工艺原理和工作机理,以进行消化仿制、改进或发展、创造新产品的一种方法和技术。

1.2 正向设计

一个产品,从规划到投入市场,通常需要经过若干环节,并需要有很多工程技术人员共同劳动、协同工作才能完成。传统的工业产品开发均是按照严谨的研究开发流程,从市场调研开始,确定产品功能与产品规格的预期指标,构思产品最佳方案,对零部件功能分解,然后进行零部件的设计、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。每个零件都有原始的设计图纸,并有CAD文件来对此设计图纸存档。每个零部件的加工也有自己的工序图表,每个组件的尺寸合格与否都有产品检验报告记录,这些所记



录的档案均属企业的智能财产，一般通称机密(Know - How)。这种开发模式称为预定模式(Prescriptive Model)，此类开发工程称为正向设计，也称为正向工程(Forward Design)或顺向工程。对每一组件来说，正向设计的开发流程如图 1.1 所示。

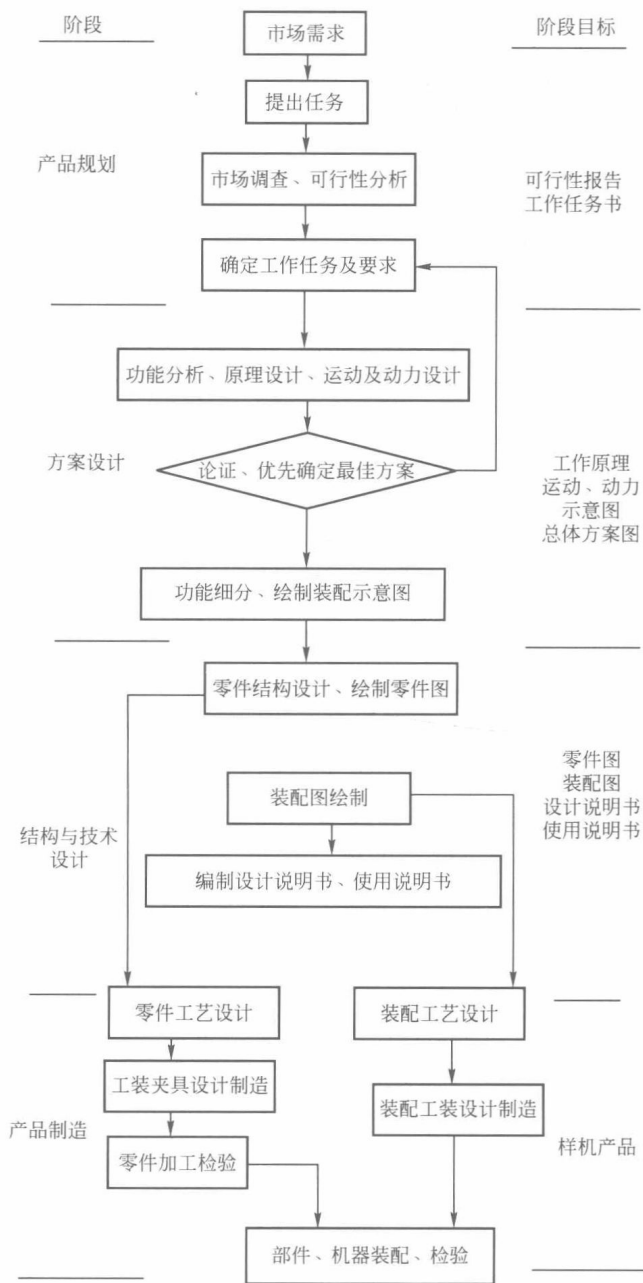


图 1.1 正向设计流程图

现对正向设计开发流程的各阶段分别加以简要说明。

1.2.1 产品规划

面对频繁变化的市场，好的产品不仅在功能上要顺应市场潮流，而且要在恰当的时间

被推向市场，从而占领市场主导地位，赢得企业效益最大化。因此，一个产品的研制需要进行充分的市场调研。

产品规划阶段就是在对产品进行充分调查研究和分析的前提下，进一步确定产品所应具有的功能，并为以后的决策提出由环境、经济、加工以及时限等各方面所确定的约束条件。在此基础上，明确地写出设计任务的全面要求及细节，最后形成设计任务书。设计任务书上应包括：产品的功能、经济性的估计、制造要求方面的大致估计、基本使用要求以及完成设计任务的预计期限等。

1.2.2 方案设计

本阶段对产品设计的成败起关键作用。产品功能分析就是要对设计任务书提出的机器功能中必须达到的要求及希望达到的要求进行综合分析，即这些功能能否实现，多个功能间有无矛盾，相互间能否替代等，最后确定出功能参数，作为进一步设计的依据。

确定功能参数后，即可提出可能的解决办法，亦即提出可能采用的方案。由于最后汇总的方案有很多，在如此众多的方案中，技术上可行的仅有几个。对这几个可行的方案，要从技术方面和经济方面进行综合评价。评价时可采用的方法很多，现以经济性评价来加以说明。根据经济性进行评价时，既要考虑到设计及制造时的经济性，也要考虑到使用时的经济性。如果产品的结构方案比较复杂，设计制造费用就要相对地增大，但产品的功能将更为齐全，生产率也较高，故使用经济性也较好。反过来，结构较为简单、功能不够齐全的产品，设计制造费用虽少，但使用经济性较差，使用费用会增多。因而把设计制造费用和使用费用加起来得到总费用，总费用最低时所对应的产品结构方案就是最佳方案。

在方案设计阶段，要正确地处理好借鉴与创新的关系。同类产品成功的先例应当借鉴，原有的薄弱环节及不符合现有任务要求的部分应当加以改进或者得到根本的改变。既要反对保守和照搬原有设计，也要反对一味求新而把合理的原有经验弃置不用这两种错误倾向。

1.2.3 结构与技术设计

结构与技术设计阶段的目标是产生总装配草图及部件装配草图。通过草图设计确定出各部件的外形及基本尺寸，包括各部件之间的连接，零部件的外形及基本尺寸。为了确定主要零件的基本尺寸，必须做以下工作。

1. 机器的运动学设计

根据确定的结构方案，确定原动机的参数(功率、转速、线速度等)，然后作运动学计算，从而确定各运动构件的运动参数(转速、速度、加速度等)。

2. 机器的动力学计算

结合各部分的结构及运动参数，计算各主要零件上所承载荷的大小和特性。此时所求出的载荷，由于零件尚未设计出来，因而只是作用于零件上的名义载荷。

3. 零件工作能力设计

已知主要零件所受的名义载荷的大小和特性后，即可做零、部件的初步设计。设计时所依据的工作能力准则需参照零、部件的一般失效情况、工作特性、环境条件等合理地拟



定，一般有强度、刚度、振动稳定性、寿命等准则。通过计算或类比，即可决定零、部件的基本尺寸。

4. 部件装配草图及总装配草图的设计

根据已定出的主要零、部件的基本尺寸，设计出部件装配草图及总装配草图。草图上需对所有零件的外形及尺寸进行结构化设计。在此步骤中，需要很好地协调各零件的结构及尺寸，全面地考虑所设计的零、部件的结构工艺性，使全部零件具有最合理的构形。

5. 主要零件的校核

在绘出部件装配草图及总装配草图以后，所有零件的结构及尺寸均为已知，相互邻接的零件之间的关系也为已知。只有在这时，才可以较为精确地定出作用在零件上的载荷，以及决定影响零件工作能力的各个细节因素，才有可能对一些重要的或者外形受力情况复杂的零件进行精确的校核计算。根据校核的结果，反复地修改零件的结构及尺寸，直到满意为止。

技术文件的编制是技术设计的一个必备环节。技术文件的种类很多，常用的有设计计算说明书、使用说明书、标准明细表等。编制设计计算说明书时，应包括方案选择及技术设计的全部结论性内容。CAD技术的普及使技术文件的编制及存档变得方便；ERP(Enterprise Resource Planning)技术的实施，使企业的技术信息及管理信息更加高度集成。

优化设计经过半个多世纪的发展与完善，越来越显示出它可使产品零件的结构参数达到最佳的能力。有限元素法可使以前难以定量计算的问题得以解决，并求得极好的近似定量计算的结果。运用有限元素法可以对零部件进行静、动力分析，通过应力分布确定出产品最容易失效的部位，从而引导产品设计。对于少数非常重要、结构复杂且价格昂贵的零件，在必要时还需用模型试验方法来进行设计，即按初步设计的图纸制造出模型，通过试验，找出结构上的薄弱部位或多余的截面尺寸，以增大或减小来修改原设计，最后达到更好的效果。机械可靠性理论用于技术设计阶段，可以按可靠性的观点对所设计的零部件结构及其参数做出是否满足可靠性的评价，提出改进设计的建议，从而进一步提高机器的设计质量。上述理论目前已广泛应用于产品设计中。

1.2.4 产品制造

精密的产品设计是依靠高精度的制造来实现的，高精度的制造是依靠高精度的检具来完成的。

产品制造离不开合理的制造工艺。制造工艺是产品制造质量的保证，是指在产品制造中各种机械制造方法和过程的总和。在产品制造的任何工序中，用来迅速、方便、安全地安装工件的装置，称为夹具。而将设计图纸转化成产品，离不开机械制造工艺与夹具，它们是机械制造业的基础，是生产高科技产品的保障；离开了它们就不能开发出先进的产品，就不能保证产品质量，也不能提高生产率、降低成本和缩短生产周期。

机械制造工艺技术是在人类生产实践中产生并不断发展的。目前，机械制造工艺技术向着高精度、高效率、高自动化方向发展。精密加工精度已经达到亚微米级，而超精密加工已经进入 $0.01\mu\text{m}$ 级。现代机械产品的特点是多种多样、批量小、更新快、生产周期短，这就要求整个加工系统及机械制造工艺技术向着柔性、高效、自动化方向发展。成组

技术理论的出现和计算机技术的发展,使计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助工艺设计(CAPP)、计算机辅助制造(CAM)、数控机床等在机械制造业中得到广泛的应用,这大大地缩短了产品的生产周期,提高了效率,保证了产品的高精度、高质量。

机械产品的质量、零件的质量和装配质量之间有着密切的关系,它直接影响着机械产品的使用性能和寿命。零件的加工质量包括加工精度和表面质量两个方面。机械加工精度是指零件加工后的实际几何参数(尺寸、形状和相互位置)与理想几何参数的符合程度。实际几何参数与理想几何参数的偏离程度称为加工误差,加工误差越小,加工精度就越高。任何一种加工方法都不可能将零件做得绝对准确,与理想零件完全符合。只要不影响机器的使用性能,允许误差值在一定的范围内变动。随着科学技术水平的提高和精密机械的迅速发展,对零件加工精度的要求愈来愈高,高精度的检具成为产品加工过程中不可缺少的工具。

由上述产品的正向设计过程可以看出,在充分地市场调研的基础之上,产品开发主要以功能导向为主。然而,随着工业技术的进步以及消费者对产品外形美观性要求的不断提高,任何通用性产品在消费者高质量的要求之下,功能上的需求已不再是赢得市场竞争力的唯一条件。复杂型面在产品设计中越来越多地得到应用。以具有灵活处理复杂型面的高性能CAD软件为支撑,工业设计(又称产品设计)在产品开发中逐渐受到重视,任何产品不仅在功能上要求先进,在产品外观(Object Appearance)上也要符合消费者的审美情趣,以吸引消费者的注意力。造型设计多指产品的外形美观化处理,在正向工程流程中受传统训练的机械工程师一般不能胜任这一工作。一些具有美工背景的设计师可利用CAD或图纸构想出创新的美观外形,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,然后再通过三维尺寸测量来构建出自由曲面模型的CAD文件。这个程序已有逆向工程的观念,但仍属正向工程,因为具有对象导向(Object Oriented)的观念,企业仍保有设计图智能财产。

因此,正向工程可归纳为:功能导向(Functionally Oriented)、对象导向(Object Oriented)、预定模式(Prescriptive Model)、系统开发以及所属权系统(Legacy System)。

1.3 逆向设计

逆向设计也叫逆向工程,逆向工程(Reverse Engineering, RE)就是对已有的产品零件或原型进行CAD模型重建,即对已有的零件或实物原型,利用三维数字化测量设备来准确、快速地测量出实物表面的三维坐标点,并根据这些坐标点通过三维几何建模方法重建实物CAD模型的过程,它属于产品导向(Product Oriented)。逆向工程不是简单地再现产品原型,而是对技术消化、吸收,并进一步改进、提高产品原型的重要技术手段;是产品快速创新开发的重要途径。通过逆向工程掌握产品的设计思想属于功能向导。

随着计算机、数控和激光测量技术的飞速发展,逆向工程不再是对已有产品进行简单的“复制”,其内涵与外延都发生了深刻的变化,已成为航空、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。

广义逆向工程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。广义逆向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,是一个复杂的系统工程。

目前,国内外有关逆向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,即集中在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来看,逆向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,逆向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。实物原型的设计是企业的智力财产,具有归属权,而由产品实物逆向建模所得的产品 CAD 模型所蕴含的产品设计意图对产品开发企业而言不具备归属权,但可以在现有产品技术之上改进创新,推出更具竞争力的产品。

作为一种逆向思维的工作方式,逆向工程技术与传统的正向设计方法不同。它是根据已存在的产品或零件原型来构造产品的工程设计模型或概念模型,在此基础上对已有产品进行解剖、深化和再创造,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(正向设计)的思维进行,是从收集市场需求信息着手,按照市场调查→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的步骤开展工作,是从未知到已知、从抽象到具体的过程。逆向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→再设计的框架进行工作,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模型或产品数字化模型。逆向工程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。正向工程中从抽象的概念到产品数字化模型的建立是一个计算机辅助的产品“物化”过程;而逆向工程是对一个“物化”产品的再设计,强调产品数字化模型建立的快捷性,以满足产品更新换代和快速响应市场的要求。在逆向工程中,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。

从产品逆向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、曲面光滑等。

开展逆向工程研究,旨在通过对已有的较先进产品的设计原理、结构、材料、工艺装配等方面进行分析研究,研制开发出性能、结构等方面与原型相似甚至更为先进的产品。因此逆向工程是一系列分析方法和应用技术的结合,是一个认识原型→再现原型→超越原型的过