

通用技术

选择性必修11
产品三维设计与制造

TONG YONG JI SHU

通用技术

普通高中教科书



普通高中教科书

通用技术

选择性必修11

产品三维设计与制造

选择性必修11

产品三维设计与制造

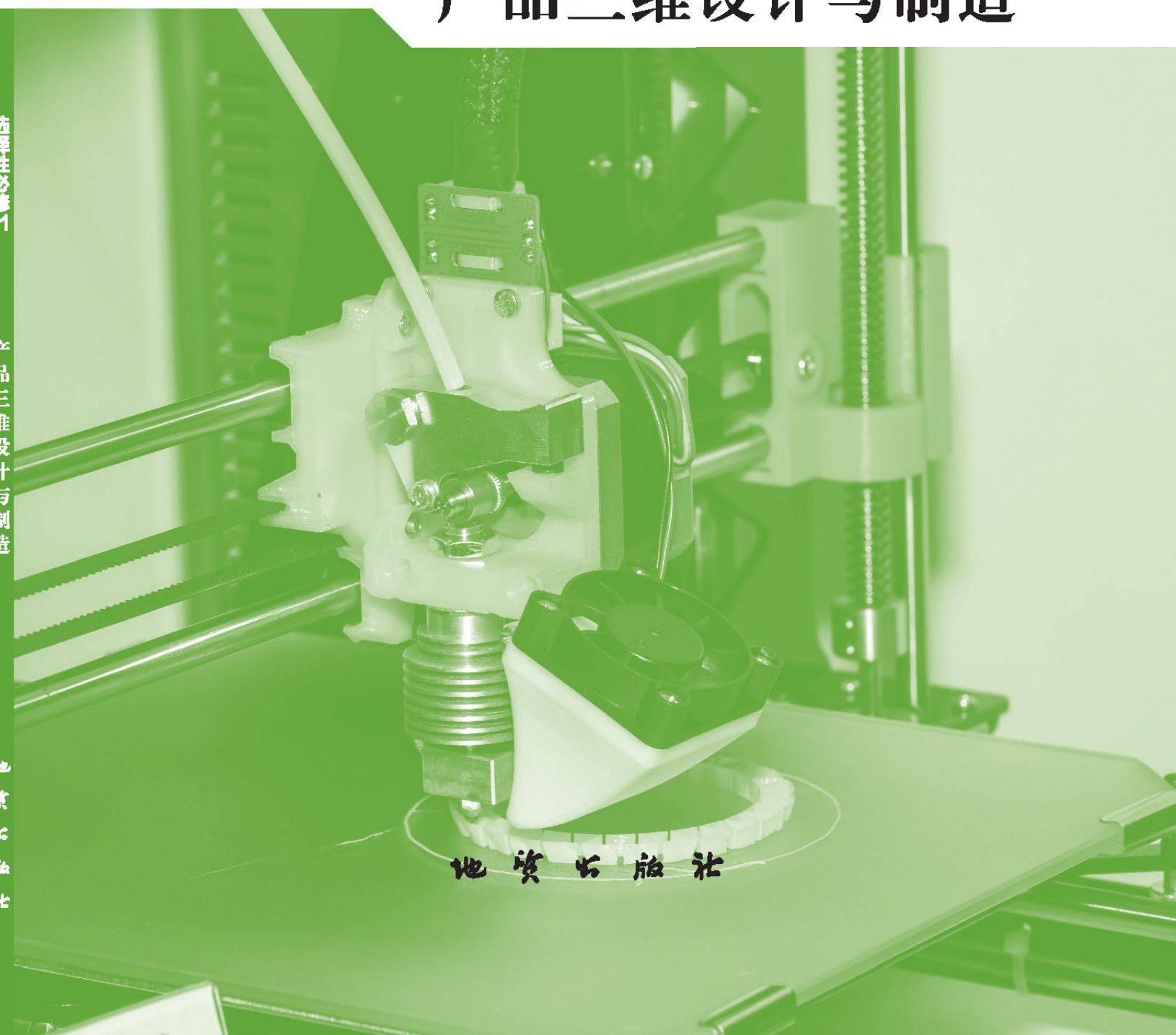
地质出版社



批准文号：京发改规 [2016] 13号 举报电话：12315



地质出版社



普通高中教科书

通用技术

选择性必修 11

产品三维设计与制造

CHANPIN SANWEI SHEJI YU ZHIZAO

通用技术编写组 编

地质出版社

· 北京 ·

主 编：陈玲玲 王永奉

副 主 编：王明彦

本册主编：邹 越

编 写 者：邹 越 曹多莲 刁彬斌 张锦良 李英杰 董长勇 孙洪波

普通高中教科书 通用技术 选择性必修 11

产品三维设计与制造

策划编辑：王永奉

责任编辑：李 斐 胡庆翠

责任校对：关风云

出版发行：地质出版社

咨询电话：(010) 66554599；(010) 66554602

网 址：<http://www.gph.com.cn>

电子邮箱：huqingcui@163.com；dzhjyfsh@163.com

传 真：(010) 66554601

社址邮编：北京市海淀区学院路31号，100083

经 销：各地新华书店

印 刷：山西华文科杰印业有限公司

开 本：890mm×1240mm 1/16

印 张：5.25

版 次：2020年2月第1版·2021年7月第3次印刷

定 价：6.40元

书 号：ISBN 978-7-116-11989-5

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社出版处负责调换)

致同学们

我们将要学习的“产品三维设计与制造”这门课程，是“技术与创造系列”模块之一，它面向具有科技创新兴趣和创造发明意愿的学生，以强化学生的特长培养、技术综合运用和创新能力培养为主旨。

我们通过本课程的学习，能够运用三维设计与制造技术的思想、方法与工具解决实际技术问题，能了解常见的三维打印技术及其原理，初步掌握一款三维设计软件。具体来说包括以下内容：

(1) 能举例比较分析三维打印技术与传统制造技术在产品制造领域中各自的优势与不足，形成技术的敏感性和责任意识；能正确、安全使用三维打印机；能把三维设计数据转化为三维打印机加工数据，同时对加工中出现的常见问题进行分析和处理。

(2) 能掌握一款常用三维设计软件的功能与使用方法；能根据技术设计分析建立产品数字模型，绘制三维图样，并做产品外观渲染；了解在虚拟空间进行产品性能测试，以及根据测试结果对设计产品进行优化的方法。

(3) 初步了解现代产品设计与制造的技术方法和发展趋势；了解三维设计与制造技术在各行业领域的应用，以及对我们的学习方式、生活方式的影响。

在学习过程中要注意以下几方面：

(1) “产品”是一个非常宽泛的概念，门类庞杂，涉及的领域多，设计和制造技术千差万别。本课程以简单工业产品为对象，介绍三维设计与制造技术及其应用。希望同学们以此为线索，开阔视野，培养创新意识，充分发挥自己的想象力，勤于思考，勤于实践，举一反三，在更加广阔的世界中创造出更丰富的产品。

(2) 技术的学习有非常强烈的实践性，同学们在学习过程中要以科学的态度，严谨的学风对待实践活动，认真分析，总结规律，不断提高分析问题和解决问题的能力。同时，技术本身又具有艺术性，尤其是产品的设计与制造，有很强的时代性和审美价值，同学们在学习的过程中要善于观察，深入体会，不断提高自己的文化和艺术修养，培养人文精神。

(3) 三维设计和三维打印技术仍处在不断发展、不断完善的过程中，受到技术条件的限制，同学们在学习和实践的过程中，可能会遇到各种各样的困难，希望同学们结合实际情况，采取合理、灵活的学习方式。

三维打印技术为我们的学习和生活打开了一扇新的大门，祝愿同学们用创新、创造为梦想插上翅膀，让三维打印走进我们的世界，改善我们的学习和生活！

目 录

第一章 三维打印原理	1
第一节 三维打印技术的发展	2
一、三维打印概念的形成.....	2
二、三维打印技术的发展历程.....	5
三、三维打印的应用领域.....	6
第二节 三维打印工艺与材料	8
一、三维打印工艺原理.....	9
二、三维打印材料性质.....	12
第三节 FDM 桌面级三维打印机	16
一、影响三维打印机性能的主要因素.....	16
二、FDM 桌面级三维打印机.....	17
三、FDM 桌面级三维打印机的相关操作.....	20
第二章 三维产品技术分析	26
第一节 三维产品的技术要求	27
一、产品的技术问题概述.....	27
二、基于 FDM 的产品技术要求.....	28
三、三维切片软件与设置.....	30
四、三维打印常见问题的预防.....	33
第二节 三维产品技术方案	33
一、三维打印技术应用方案.....	33
二、三维打印技术应用案例.....	36
三、三维打印后处理.....	40
第三章 三维模型设计	42
第一节 三维设计方法	43
一、三维设计的发展.....	43
二、几何形体的建模方法.....	44

第二节 三维设计中的三维建模	45
一、利用基本体建模.....	46
二、实体建模.....	48
三、曲面建模.....	51
四、转换与组合.....	53
第三节 逆向建模技术	61
一、三维激光扫描技术应用.....	62
二、影像逆向建模技术.....	62
第四章 三维图样设计	65
第一节 产品的技术图样	66
一、工程特征的表达.....	66
二、装配设计.....	72
第二节 三维图样	74
一、从二维图样到三维图样.....	74
二、二维和三维剖视图.....	75
三、三维装配图样.....	76

第一章 三维打印原理

人类在不断探索中创造出日益进步的物质文明，造物技术是人类生存发展的基本能力。人类的制造活动为人类社会进步服务，有着明确的目的和目标。受自然条件和生产力水平的约束，技术的发展依赖于人们对自然规律的认识、对工具的研究。

三维打印技术是人类众多生产制造技术中的一种，也是最新应用的制造技术之一。不同于以往的技术方法，三维打印技术采用了增材制造的原理，更接近人们对自然的感悟，更加自由，更能满足人们的创造性思维。

三维打印是如何实现的呢？让我们来一探究竟吧！



第一节 三维打印技术的发展

本节介绍三维打印技术的形成与发展历程，以及三维打印技术的应用领域。同学们通过阅读文献、亲身体会，感悟三维打印技术对自然和人类的生产、生活方式产生的影响。

问题思考

有人说，三维打印是19世纪的思想，20世纪的技术，21世纪的市场。你是如何认识的？



一、三维打印概念的形成

产品的设计涉及产品的需求分析、功能定位、制造技术，以及外观形式、推广方案等诸多内容。制作产品模型起到呈现设计思想、推敲分析技术方案的重要作用，在大规模生产产品之前，通过对模型进行各种测试和检验，最终确定产品的设计方案和制造工艺。对产品进行模拟分析的原始模型称为原型，现代设计方法非常重视对原型的研究。

模型的制作要及时跟上设计的进程、适应设计的变化。如何高效、低成本地制作出产品模型呢？在对传统模型工艺不断完善、革新的基础上，借助计算机技术，出现了快速成型技术、数字样机技术。

1. 快速成型技术

快速成型（Rapid Prototyping）技术，或者说快速原型制造（Rapid Prototyping Manufacturing）技术，是相对于传统模型制作而言的。传统的模型制作采用切削加工方法，机床切削加工必须有刀具和夹具，刀具磨损和切削力的影响不能忽视。快速成型技术是直接堆积材料、固化成型的技术，节省了刀具、夹具，还有模具设计制作环节，从而提高了生产效率，大大降低了生产成本，缩短了生产周期。

2. 数字样机技术

数字样机技术（Digital Prototyping）是相对于实物的“物理样机”而言的，是虚拟的数字化模型（图1-1）。

数字样机技术可以直观、形象地对数字化的虚拟产品原型进行设计优化、性能测试、制造仿真和使用仿真，使得概念设计、工程设计、制造、销售和市场部门可以在产品制造之前虚拟地体验完整的产品（图1-2），创建产品的实景环境模拟，以便向客户推销。在获得客户的认同之后，再开始进行实物样机的制造，大大降低了产品研发的风险。



图1-1 数字化模型



图1-2 应用虚拟现实技术进行产品体验

阅读材料

成型技术与增材制造

产品制造在将原材料转变为具有一定形式和功能的物品这个过程中，材料成型技术是关键之一。成型技术通常可以分为以下几种。

受迫成型 (Forced Forming)，是利用材料的可成型性，在特定的边界和外力约束条件下成型的方法，例如打铁的过程。生产中，在模膛 (型腔) 内通过铸、锻、挤压、注塑等工艺成型，因为材料的质量基本不变，也称为等材制造。受迫成型还未完全实现计算机控制，多用于毛坯成型、特种材料成型等。

去除成型 (Dislodge Forming)，是按照要求把部分材料有序地从基体上分离出去而成型的加工方式，类似食品加工中制作萝卜花的过程。例如，传统的车、铣、刨、磨以及现代的电火花加工、激光切割、打孔等加工方法均属于去除成型。去除成型最先实现了数字化控制，是目前主要的制造成型方式。采用去除成型技术为制造方式，也称为减材制造。

添加成型 (Adding Forming)，是指利用机械、物理、化学等手段添加材料，合并连接而成型，类似拼装组合的玩具，也称堆积成型 (Stacking Forming) 或增材制造 (Additive Manufacturing, AM)。增材制造是将材料连接制造物体的过程，通常依据三维数字模型，逐层堆积成型。

生长成型 (Growth Forming)，是利用生物材料的活性进行成型的方法。自然界中生物个体的发育均属于生长成型。克隆技术是在人为干预下的生长成型方式。



增材制造可在一台设备上快速精密地制造出任意复杂形状的零件，从而实现了零件“自由制造”，解决了许多复杂结构零件的成型难题。由于减少了加工工序，缩短了加工周期，在提升复杂产品的制造速度方面效果显著。快速成型技术一般采用的是增材制造技术，由于工艺过程中供料、喷射等环节与打印机相似，有人形象地称之为三维打印，这个说法逐渐被大众接受。三维打印以数字模型为基础，设计师进行计算机辅助设计后，可以

直接将模型文件通过三维打印设备输出，即使模型设计有所不同，也不需要更换设备，因而工作效率高，在产品原型制作领域迅速普及。创意产品、工艺品等不需要进行大批量生产的行业，三维打印技术非常受欢迎。

问题思考

观察贝壳的外形（图 1-3）与砖砌城墙（图 1-4），结合贝壳的生长过程和城墙的砌筑过程，思考增材制造的技术原理是什么。



图1-3 贝壳的外形

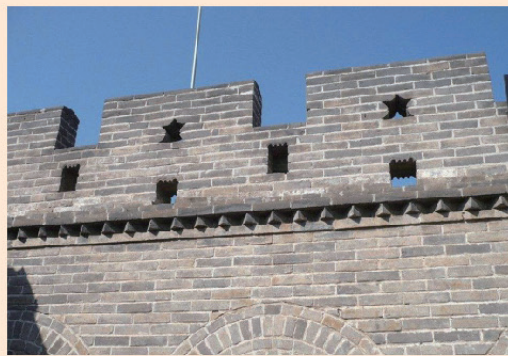


图1-4 砖砌城墙



创客坊

依据离散—堆积原理，先建立实物或所设计形状的三维数字模型，三维打印机对数字模型进行解析，每次制作一个特定厚度和特定形状的截面，然后把它们逐层累加起来，得到立体形状。分层的过程类似天然堆积地貌（图 1-5）的形成，分层添加材料堆积起来。不过分层是人为设计的，无数层切片像叠加起来的纸张上的图形（图 1-6）。去除成型技术考虑的是如何从便笺纸立方体上裁去多余的便笺纸，留下的部分便是模型，被裁去的纸张成为废料。而添加成型技术考虑的是直接制作模型部分，分层制作后进行叠加，基本上没有废料。同学们根据这个思路，尝试利用纸张或纸板制作一些创意小物品。

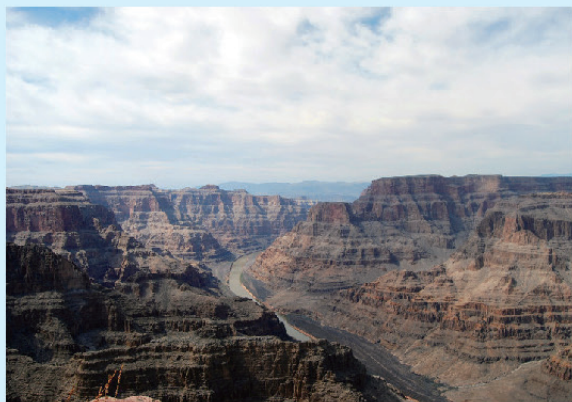


图1-5 天然堆积地貌

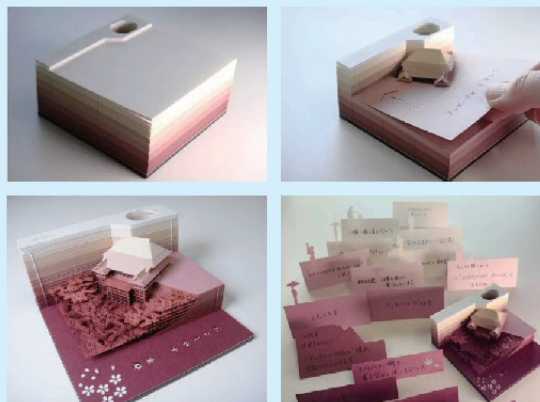


图1-6 多层便笺纸构成的模型



三维打印将复杂的三维加工转变为一系列的二维切片的加工，使用实体材料印刷的切片被直接固结成为三维实体。三维打印技术需要数字化设计软件、数控打印设备、特殊的原材料和后处理设备相配合。

二、三维打印技术的发展历程

增材制造技术的思想和方法是逐步发展起来的。根据相关专利和技术的调查，人们认为现代的增材制造有两个源头：照相雕塑（Photo Sculpture）技术和地貌成形（Topography）技术。1860年，照相雕塑技术获得专利，该技术使用24个照相机同时环绕拍摄，然后利用投影原理进行雕塑。发展到现代，照相雕塑仍然通过照相、三维扫描和三维打印实现，用微小的局部合成整体。1892年获得专利的等高线地形图制作技术，用蜡版层叠的方法制作等高线地形图。该方法在一系列蜡版上压印地形等高线，然后对蜡版进行切割，再将每一层蜡版堆叠起来。其后，人们不断改进，产生了更多相关专利和技术，并应用到制造加工业、生产铸模等下料工具、成型工具和注塑工具。

1956年，一种具备现代光固化技术的设备系统被开发出来，十分清楚地展示了现代立体印刷（Stereo Lithography）的特征。这种系统分层曝光透明的感光乳剂，每层来自被扫描物体的横截面。当每一层曝光结束后，通过降低圆筒中的活塞来加入适量的感光乳剂和固定剂。在通过一系列的曝光和固定之后，所得到的实心透明圆柱体包含物体的图像。随后可以手动雕刻或者光化学蚀刻出该三维物体。

1968年到1979年，激光三维聚合成型、直接粉末沉积和粉末激光烧结等增材制造技术申请了专利。1972年利用激光能量光束进行粉末沉积，实现分层叠加成型的技术，是世界上第一个成功的现代增材制造过程。

从20世纪80年代起，各种各样的增材制造技术大量出现，并在许多领域里进行了创造性的应用。

这些研究和专利为三维打印技术奠定了基础。

阅读材料

三维打印技术主要大事记

1986年，世界上第一家生产三维打印设备的公司成立，研发出通用的STL文件格式。

1988年，采用立体光刻（SLA）技术的第一台工业级三维打印机问世，同年，熔融沉积成型（FDM）技术产生。

1989年，选择性激光烧结（SLS）工艺出现，理论上所有粉末材料都可以用来打印，如陶瓷、蜡、尼龙和金属等。

1991年，第一台分层实体成型（LOM）机推出。

1992年，第一台基于FDM技术的工业级三维打印机、第一台基于SLS技术的三维打印机推出。

1993年，三维喷墨打印技术（三维印刷）出现。

1995年，基于三维喷墨打印技术的三维打印机推出。

1998年、2003年，金属激光沉积技术LENS、金属激光烧结技术DMLS分别出现。

2005年，第一台高精度彩色三维打印机推出。

2008年，第一台同时使用几种不同原料的三维打印机推出。

2014年，开发出的全功能制造设备，兼具金属三维打印（增材制造）、车床（减材制造，包括铣削、激光扫描、超声波检具、等离子焊接、研磨/抛光/钻孔）及三维扫描功能。

2015年，连续液体界面制造技术（CLIP）发布，极大地提高了打印速度。

桌面级三维打印机的发展

2001年，第一代桌面级三维打印机推出。

2008年，第一台开源的桌面级三维打印机发布，三维打印机开始从工业生产变得大众化，进入人们的生活。

2012年，基于SLA技术的个人三维打印机发布，助力广大创客。

2013年，基于液体金属打印工艺（LMJP）的家用金属三维打印机推出。

2014年，基于3DP技术的桌面级三维打印机推出。



讨论交流

自20世纪80年代末，增材制造技术逐步发展。增材制造技术也被称为“材料累加制造”（Material Increase Manufacturing）、“快速原型制造”（Rapid Prototyping Manufacturing）、“分层制造”（Layered Manufacturing）、“实体自由制造”（Solid Free-form Fabrication）、“三维印刷”（3DP）等。请讨论这些说法的区别。



三、三维打印的应用领域

1996年以后，三维打印技术快速发展，三维打印精度提高，材料更加多样，并在一些领域投入应用。

阅读材料

技术的进步影响着生活的方方面面。据介绍,未来用户只需在跑步机上跑几步,就能快速获取跑步者的足部特征及相关数据,再利用三维打印技术制造出适合该跑步者的跑鞋。三维打印通过性能数据来驱动定制鞋子中底(图1-7,图1-8),满足任何运动的需求。三维打印改变了制鞋的生产流程,传统的流程是:设计、原型、模具、生产,现在依靠三维打印技术可以直接从设计到生产,用标准化工艺和设备制造出过去不可能实现的个性化产品和形状。



图1-7 2015年三维打印的运动鞋中底

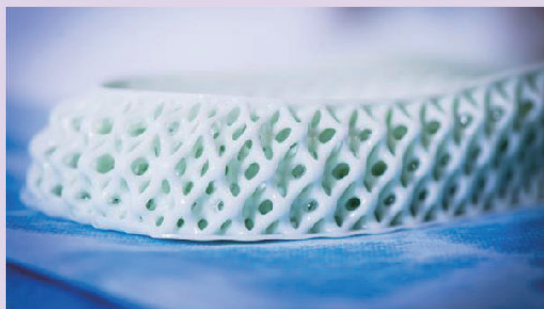


图1-8 2017年三维打印的运动鞋中底



1. 生物、医疗领域

三维打印技术在生物、医疗领域取得了一定成果。科学家使用涂有患者细胞的三维合成支架进行膀胱扩大手术,基本没有排斥反应的风险;通过三维打印技术能打印出正常工作的肾,膝盖、脚、关节等复杂结构一次成型的整个假肢,还有完整血管等;利用人体细胞打印出人造肝脏组织;科学家利用三维打印的定制下颚假体,移植到人身上用来促进新的骨组织生长。

2. 汽车、航天领域

目前,已经出现了三维打印的无人机和汽车。美国国家航空航天局(NASA)测试三维打印的火箭部件,结果可承受 $8.9 \times 10^4 \text{ N}$ 推力,并可耐 $3300 \text{ }^\circ\text{C}$ 的高温。NASA对机械加工的推进器进行了修改,制作的三维打印版本只使用了两个部件,而机械加工的版本所需部件多达115个。由于三维打印的部件复杂性大大降低,故障点也更少,提高了安全性。

三维打印主要应用在原型制作,工具、模具的制造和最终零部件打印等领域。其中,最大的应用领域是原型制作,借助三维打印可以缩短产品设计环节,加速产品推向市场。纳米级三维打印技术在航空航天、医学领域也有很大应用前景。食品行业研发了三维巧克力打印机。金银首饰行业也出现了三维打印服务。

三维打印能够在航空航天、汽车、消费电子和医疗保健行业得到广泛应用,是因为这几个行业存在大量定制化需求。每个病人对要打印的牙齿或骨骼需求都不一样;每架飞机上可能只需一个或几个零部件,没必要进行大批量生产。现阶段三维打印还无法承担大规

模的汽车零部件制造，但对于那些成交量较低的定制化订单或者赛车制造，三维打印无疑是更优越的制造方式。

调查研究

请查阅资料，了解三维打印技术的发展，以及在各行业领域的最新应用。教师可以提供三维打印样品，学生观察和体验三维打印产品。



三维打印在常规大批量生产领域的应用，还需要克服材料、性能、精度、速度、成本等一系列问题，期待未来三维打印技术不断进步，为我们的生产、生活提供更加丰富的产品。

3. 三维打印技术的两面性

和任何一项技术一样，三维打印技术也有两面性。一方面三维打印技术推动了制造业的发展，与传统制造技术形成互补，为人们的创新设计提供了便利。另一方面，三维打印的负面效应也不可忽视。如某些材料的毒性会对环境造成污染；通过从网站下载相关三维数据文件，任何人都可以使用三维打印机打印枪支的部件，经过简单组装就可以实现真枪的所有功能，这对公共安全造成了威胁；任意下载模型数据对知识产权的保护也是一个挑战。

三维打印技术对自然和人类的影响还要经过时间的检验，同学们在学习技术的同时，要学会理性思考和分析判断。

讨论交流

三维打印技术的应用越来越普及，我们在使用的同时，应如何看待技术的两面性问题？请大家查阅文献资料，结合实际事例展开对话与探讨。



第二节 三维打印工艺与材料

三维打印机所用的成型材料不同，相应的分层厚度、供料方法、固化和黏结方法也不一样。切分的厚度，即截面层的厚度，会影响模型的精度、成型的速度等。本节主要介绍三维打印的工艺与材料。

问题思考

三维打印技术依靠材料堆积成型，材料是如何堆积，又是如何结合成一体



一、三维打印工艺原理

三维打印的材料首先加工成为液体材料、粉末状材料或片状材料，以供三维打印机使用。液体材料的快速成型，有液态树脂固化和熔融沉积固化，代表性工艺是 SLA、DLP、PolyJet 和 FDM。粉末状材料通过激光烧结熔合或黏结剂黏结，代表性工艺是 SLS 和 3DP。片状材料通过黏结剂黏结或 UV 黏结，代表性工艺是 LOM。

1. 立体光固化成型 (SLA)

立体光固化成型 (Stereo Lithography Appearance, SLA)，也称立体光刻或立体平版印刷。该工艺用特定波长与强度的激光 (紫外激光) 照射到液态光敏树脂表面，使之由点到线，由线到面逐渐固化，完结一个层面的绘图作业，然后升降台在 Z 轴方向向下移动一个层片的高度，再固化另一个层面，这样层层叠加构成一个三维实体 (图 1-9)。一般层厚为 0.1~0.15 mm，成型的零件精度较高。对 SLA 技术的改进技术有连续液体界面制造技术 (CLIP)，可以加快打印速度。

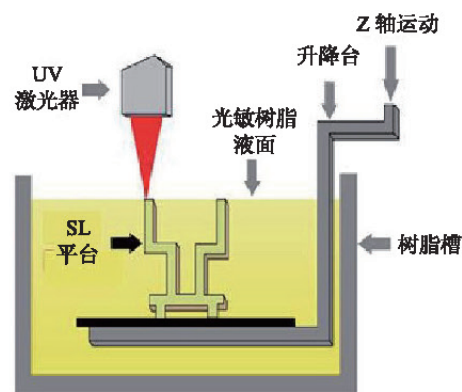


图1-9 SLA工艺原理

2. 分层实体成型 (LOM)

分层实体成型 (Laminated Object Manufacturing, LOM)，又称层叠成型法。LOM 工艺采用薄片材料，如纸、塑料薄膜等，片材表面事先涂覆上一层热熔胶。加工时，热压辊热压片材，使之与下面已成型的工件黏结；用 CO₂ 激光器在刚黏结的新层上切割出零件截面轮廓和工件外框，并在截面轮廓与外框之间多余的区域内切割出上下对齐的网格；激光切割完成后，工作台带动已成型的工件下降，与带状片材 (料带) 分离；供料机构转动收料轴和供料轴，带动料带移动，使新层移到加工区域；工作台上移到加工平面；热压辊热压，工件的层数增加一层，高度增加一个料厚；再在新层上切割截面轮廓。如此反复直至零件的所有截面黏结、切割完，得到分层制造的实体零件 (图 1-10)。

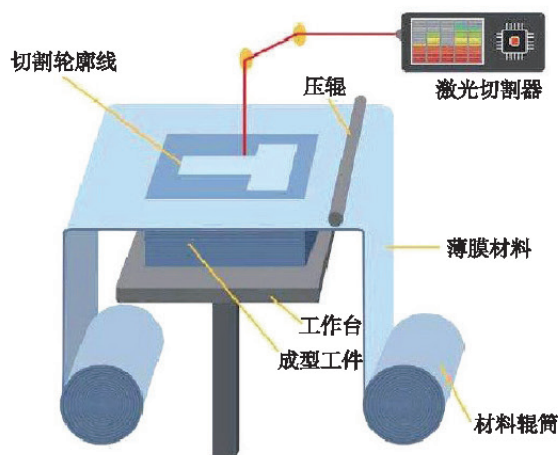


图1-10 LOM工艺原理

3. 选择性激光烧结 (SLS)

选择性激光烧结 (Selective Laser Sintering, SLS) 是将材料粉末铺洒在已成型零件的上表面，并刮平；用高强度的 CO₂ 激光器在刚铺的新层上扫描出零件截面；材料粉末在高强度的激光 (红外激光) 照射下被烧结在一起，得到零件的截面，并与下面已成型的部分

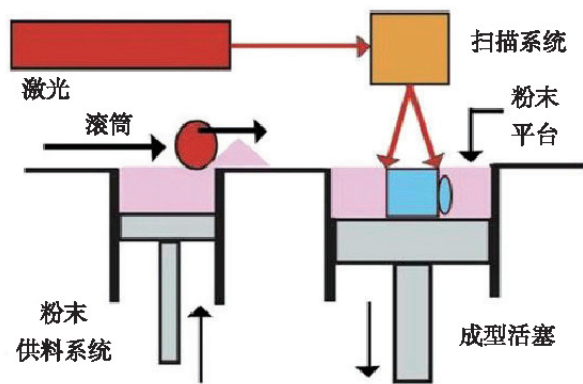


图1-11 SLS工艺原理

黏结；当一层截面烧结完后，铺上一层新的材料粉末，烧结新层截面（图 1-11）。

SLS 常采用金属粉末、陶瓷粉末、蜡粉末和塑料粉末等，是使用材料较为广泛的一类工艺。

4. 熔融沉积成型 (FDM)

熔融沉积成型 (Fused Deposition Modeling, FDM) 使用热塑性材料，如蜡、ABS、PC、尼龙等，以丝状供料。材料在喷头内被加热熔化，喷头沿零件截面轮廓和填充轨迹运动，同时将熔化的材料挤出，材料迅速固

化，并与周围的材料黏结（图 1-12）。每一个层片都是在前一层上堆积而成，前一层对当前层起到定位和支撑的作用。当形状发生较大的变化时，前一层轮廓就不能给当前层提供充分的定位和支撑作用，这就需要设计一些辅助结构——“支撑”，对后续层提供定位和支撑，以保证成型过程的顺利实现。

熔丝制造 (FFF)、塑料喷射打印 (PJP)、熔丝建模 (FFM) 等都属于丝材挤出热熔成型工艺。

5. 三维印刷 (3DP)

三维印刷 (Three-Dimensional Printing, 3DP) 与 SLS 工艺类似，采用粉末状材料，不同的是，该工艺不通过烧结，而是用黏结剂将截面黏结起来。首先铺粉机构在工作台上铺上薄层粉末材料，然后打印

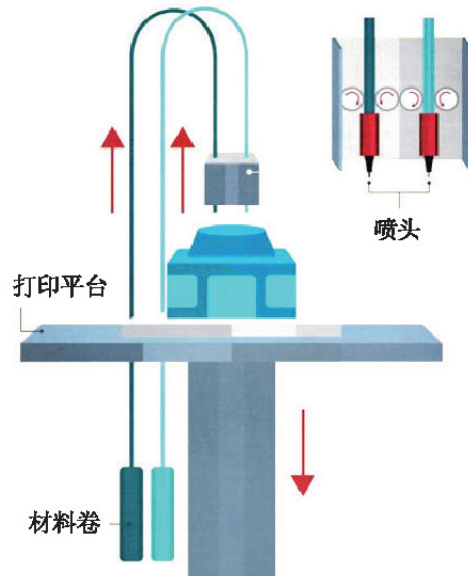


图1-12 FDM工艺原理

喷头根据相应的截面形状在粉末上喷出一层特殊的胶水，被喷胶水的粉末发生固化。如此循环往复，从下往上层层叠加得到立体形状，最后清理未固化的粉末，得到立体形状（图 1-13）。2011 年该技术更名为 ColorJet Printing，是最早的全彩打印技术。

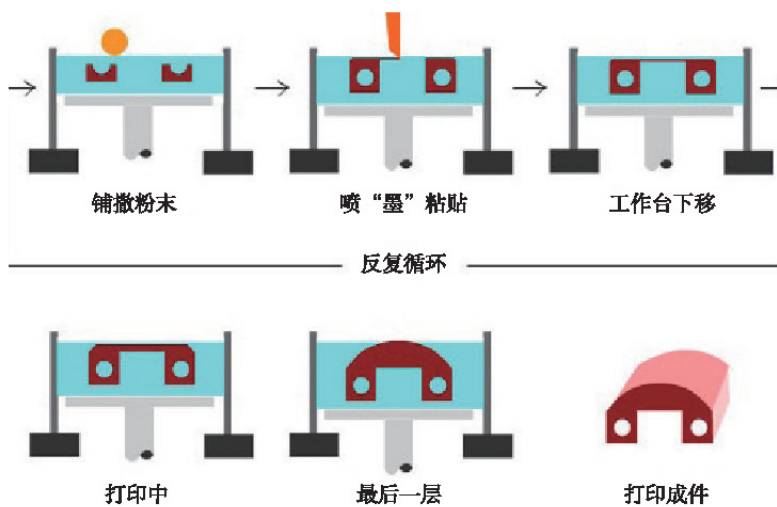


图1-13 3DP工艺原理

6. 聚合物喷射 (PolyJet)

聚合物喷射以 $16\mu\text{m}$ 厚度将可固化液态光敏树脂喷射到构建托盘上, 并立即用紫外线将其固化。打印机会在必要的地方喷射可清除的凝胶状支撑材料 (图 1-14)。采用喷头阵列 (PolyJet Matrix) 可以实现彩色和多种材料的三维打印, 实现用基本树脂以特定浓度和结构复合成数字材料 (图 1-15)。

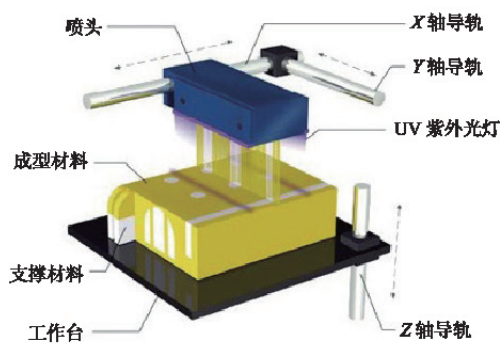


图1-14 PolyJet工艺原理



图1-15 数字材料产品

7. 数字光处理快速成型 (DLP)

数字光处理快速成型 (Digital Light Processing, DLP) 和 SLA 有很多相似之处, 其工作原理也是利用液态光敏聚合物在光照下固化的特征。DLP 技术使用一种较高分辨率的数字光处理器来固化液态光敏树脂聚合物, 逐层对液态聚合物进行固化, 循环往复直到最终模型完成。打印过程就像产品是从下方树脂池中“拔”出来 (图 1-16)。

以上介绍的工艺和技术各有千秋。例如 DLP、SLA、PolyJet 都是光固化类型, DLP 由于是光投影, 每次照射一个面, 理论上速度会比 SLA 要快, 而且产品截面尺寸大小不影响成型速度, 但是受到投影仪分辨率的限制, 打印尺寸比 SLA 要小。DLP 使用灯泡, 没有激光头, 成本较低。PolyJet 结合了液体喷印和光固化, 速度上比 SLA 有优势, 但是喷头维护成本较高。其他各类工艺都有其优势与劣势, 同学们应跟进技术发展, 结合下表, 对三维打印的工艺、主要技术方法和材料进行深入调查和了解。

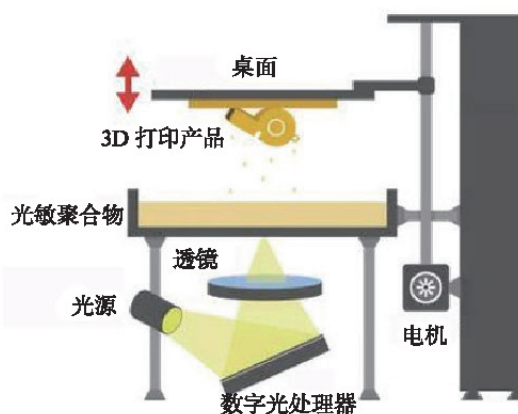


图1-16 DLP工艺原理

三维打印主要技术方法和材料

原 料	成型技术	典型工艺
液体材料	(选择性) 固化	立体光固化成型 (SLA)
		聚合物喷射 (PolyJet)
		多头喷射 (MJP)
		数字光处理快速成型 (DLP)

续表

原 料	成型技术	典型工艺
丝状材料	(选择性)沉积	熔融沉积成型(FDM)
		熔丝制造(FFF)
粉末状材料	(选择性)沉积	电子束选区熔化成型(EBM)
		选择性激光熔化(SLM)
		激光近净成型(LENS)
	(选择性)烧结	直接激光烧结(DMLS)
	(选择性)烧结	选择性热烧结(SHS)
		选择性激光烧结(SLS)
(选择性)黏结	三维印刷(3DP)	
片状材料	(选择性)黏结	分层实体成型(LOM)

在使用环境和安全性方面,LOM和SLS使用的CO₂激光器是依靠热量对成型材料进行切割和融化的,因此在机构发生机械故障时(如传动失灵、激光器无法自动关闭等),有发生火灾的可能,工作时必须有专人值守。SLA的紫外激光器是利用光敏树脂对紫外光敏感凝固的特性进行成型,不产生高热;FDM的热压喷头温度远低于成型材料的燃点;因此SLA和FDM在安全性方面可实现无人值守。LOM和SLS使用时产生烟尘,SLA、LOM和SLS使用激光,具有危险性,因此在严格意义上说SLA、LOM和SLS均不适合在办公室内使用。

二、三维打印材料性质

问题思考

请查阅资料,思考三维打印材料的选择要考虑哪些影响因素。



三维打印使用的材料主要有聚合物材料、金属材料、陶瓷材料和复合材料等。

1. 聚合物材料

聚合物材料应用广泛,例如ABS、PA等。

(1) ABS塑料。ABS塑料是一种综合性能良好的热塑性塑料,是三维打印材料中最稳定的一种材料。ABS塑料在工业中应用极为广泛,常用来制作壳体、箱体、零部件、玩具等。ABS塑料还是理想的木材代用品和建筑材料。

ABS塑料综合了丙烯腈(A)、丁二烯(B)、苯乙烯(S)三种组分的性能,其中丙烯腈具有高的硬度和强度、耐热性和耐腐蚀性;丁二烯具有抗冲击性和韧性;苯乙烯具有

表面高光泽性、易着色性和易加工性。调整 ABS 三组分的比例，其性能也随之发生变化，以适应各种应用的要求，如高抗 ABS、耐热 ABS、高光泽 ABS 等。

ABS 塑料的成型加工性好，可采用注射、挤出、热成型等方法成型，可进行锯、钻、锉、磨等机械加工，可用三氯甲烷等有机溶剂黏结，还可进行涂饰、电镀等表面处理。ABS 塑料强度高，轻便，表面硬度大，非常光滑，易清洁处理，尺寸稳定，抗蠕变性好，宜作电镀处理材料。

ABS 塑料是熔丝材料之一（图 1-17），这种材料的打印温度为 $210\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，加热板的温度为 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上。考虑到加工时的收缩率，对其成型精度不易控制，尤其是大尺寸产品要注意翘曲变形的问题。ABS 塑料加热时会产生刺激性气味，有研究认为有微量毒性。还有研究认为在桌面三维打印机中使用 ABS 塑料时，会散发超细颗粒（颗粒直径小于 100 nm 的颗粒），进入呼吸系统后，被血液循环系统吸收，长期积累有可能引发健康问题。因此要注意必要的通风条件和防护措施。



图1-17 ABS丝材

（2）尼龙 PA。PA 强度高，同时具有一定的柔韧性，因此可直接利用三维打印制造设备零部件。利用三维打印制造的 PA 碳纤维复合塑料树脂零件强度、韧性很高，可用于机械工具、代替金属工具。另外，由于 PA 的黏结性和粉末特性，可与陶瓷粉、玻璃粉、金属粉等混合，通过黏结实现陶瓷粉、玻璃粉、金属粉的低温三维打印。

尼龙需要高温喷头和特殊的加热平台表面，要注意可能会释放出有毒挥发物或者含有堵塞喷头的杂物。



图1-18 PLA材料产品

（3）聚乳酸 PLA。PLA 具有多种半透明色和光泽质感（图 1-18），是一种环境友好型塑料。聚乳酸可生物降解为活性堆肥，它源于可再生资源玉米淀粉和甘蔗，而不是非可再生资源的化石燃料。PLA 加热融化时气味小，成型时收缩率较低，大型零件边角不易起翘，不需要加热平台。PLA 的加工温度为 $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，温度高于 $220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时会出现鼓泡，甚至碳化引起喷头堵塞。

与 ABS 相比，PLA 更脆、更光亮，但是 PLA 材料遇热会变软，延展性大。

（4）光敏树脂。光敏树脂是由聚合物单体与预聚体组成，由于具有良好的液体流动性和瞬间光固化特性，使得液态光敏树脂成为三维打印耗材用于高精度制品打印的首选材料。光敏树脂因具有较快的固化速度，表干性能优异，成型后产品外观平滑，可呈现透明至半透明磨砂状。光敏树脂是由高分子组成的胶状物质，遇光会改变化学结构。这些高分子如同散乱的链式交联的篱网状碎片，在紫外线照射下，这些分子结合成长长的交联聚合

物高分子。在键结时，聚合物由胶质树脂转变成坚硬物质(图 1-19)。

(5) 其他聚合物材料。

1) 工程塑料。用于工业级三维打印机的材料，如聚碳酸酯 PC，强度高，可用于制造高承受负荷的制品，成为替代金属、陶瓷的首选材料。聚醚醚酮 PEEK 是理想的人骨替换材料，可制造仿生人工骨，适合长期植入人体。弹性塑料 EP (Elasto Plastic) 是一种新型柔软的三维打印材料，产品具有相当好的弹性，易于恢复形变。这种材料可用于制作鞋、手机壳和衣物等三维打印产品。

2) 生物塑料。共聚酯 PETG 是采用甘蔗乙烯生产的生物基乙二醇为原料合成的生物基塑料。聚己内酯 PCL 是一种生物可降解聚酯，常用作药物传输设备、缝合剂等，熔点较低，只有 60 °C 左右，所以并不需要很高的打印温度，从而达到节能的目的。PCL 还具有形状记忆性，在医学领域，PCL 可用来打印心脏支架等。

3) 热固性塑料。热固性树脂如环氧树脂、不饱和聚酯、酚醛树脂、氨基树脂、聚氨酯树脂、有机硅树脂、芳杂环树脂等具有强度高、耐火性特点，三维打印成建筑结构件用在轻质建筑中。

4) 高分子凝胶。高分子凝胶具有良好的智能性，海藻酸钠、纤维素、动植物胶、蛋白胍、聚丙烯酸等高分子凝胶材料用于三维打印，在一定的温度及引发剂、交联剂的作用下进行聚合后，形成特殊的网状高分子凝胶制品。如受离子强度、温度、电场和化学物质变化时，凝胶的体积也会相应地变化，用于形状记忆材料；凝胶溶胀或收缩发生体积转变，用于传感材料；凝胶网孔的可控性，可用于智能药物释放材料。

2. 金属材料

金属三维打印机采用的金属粉末，常用的粉体为钛粉、合金粉和不锈钢粉。不锈钢具有耐化学腐蚀、耐高温和力学性能良好等特性，由于其粉末成型性好、制备工艺简单且成本低廉，是最早应用于金属三维打印的材料(图 1-20)。



图1-20 不锈钢粉末产品

钛合金具有耐高温、高耐腐蚀性、高强度、低密度以及生物相容性等优点，在航空航天、化工、核工业、运动器材及医疗器械等领域得到了广泛的应用。高温合金是指以铁、镍、钴为基，能在 600 °C 以上的高温及一定应力环境下长期工作的一类金属材料，具有较高的高温强度、抗热腐蚀性和抗氧化性能，以及良好的塑性和韧性。目前按合金基体种类大致可分为铁基、镍基和钴基合金三类。钴铬合金具有高强度、耐腐蚀性强、良好的生物相容性和无磁性的性能，主要应用于外科植入物，



图1-19 光敏树脂产品

包括合金人工关节、膝关节和髋关节，还可用于发动机部件以及时装、珠宝行业等。

3. 陶瓷材料

三维打印的陶瓷材料主要是氧化锆、氧化铝、磷酸三钙、碳化硅等制成的陶瓷粉末，可以利用硅溶胶作为陶瓷颗粒黏结剂，基于三维印刷成型技术制造陶瓷模具。由于陶瓷材料的熔点比较高，激光难以直接对陶瓷粉末进行烧结或者熔化，将难熔的陶瓷粉末外表面包裹上高分子黏结剂，激光逐点扫描粉体表面，扫描的部位局部受到高温，颗粒在黏结剂的作用下很好地黏结，完成部件成型（图1-21）。高分子聚合物、石蜡等材料与陶瓷粉体混合制成丝材，可以制备陶瓷坯体。此外，可以将陶瓷粉体与分散剂、表面活性剂等混合，配置成陶瓷墨水，或者将陶瓷制备成具有固化特性的陶瓷悬浮液。光敏液态树脂与陶瓷粉末混合均匀的浆料可光固化成型。陶瓷毛坯件还需热处理、烧结等工艺来增强坯体的致密度以及机械强度。陶瓷流延片和纸片、塑料薄膜、金属薄片等一样，可作为三维打印的薄层材料。



图1-21 陶瓷材料产品

4. 复合材料

为了更好地满足生产、生活的需要，新型复合材料层出不穷，提高了三维打印的技术水平，扩展了三维打印产品的应用领域。例如生物三维打印技术将细胞、活性因子和材料组成的浆料通过层层叠加成型，应用于组织工程中，在体内或体外构建组织或器官。

阅读材料

什么是4D打印

所谓的4D打印，比三维打印多了一个“D”，也就是时间维度，人们可以通过软件设定模型和时间，变形材料会在设定的时间内变形为所需的形状。准确地说，4D打印是一种能够自动变形的材料，直接将设计内置到物料当中，不需要连接任何复杂的机电设备，就能按照产品设计自动折叠成相应的形状。4D打印是一种无须打印机器就能让材料快速成型的革命性新技术。

4D打印最关键的是记忆合金，一种“智能材料”。通过对材料进行编程，使其能够对某些刺激做出反应，比如冷、热和湿度等。4D打印可以生产智能产品，它可以自动适应外部变化，进行自我修复。比如，管道可以设计成根据水流量进行膨胀或收缩，或者在破裂时自我修复。自适应或自修复技术也能在灾难救援或太空等恶劣环境中派上用场。



调查研究

查阅相关资料或去当地三维打印中心实地调研，了解不同三维打印原理制造的实物，比较、体验和分析打印材料、打印原理和应用领域之间的相互关系及所受到的限制。



第三节 FDM桌面级三维打印机

三维打印是一种增材制造技术。三维打印机当然也不是普通意义上的打印机，而是一套制造系统和设备，包含控制组件、机械组件、耗材等组成部分。三维打印机根据数字模型的切片指令，在计算机系统控制下完成对特定材料进行分层加工、累积成型等一系列的工序。三维打印机有面向工业生产的，也有面向个体消费者的，有面向高精密制造、生物制造等特殊需求的，也有面向一般创意、模型制作等设计行为的。我们以 FDM 桌面级三维打印机为例，学习简单的三维打印机的工作机制，对三维打印机的工作流程进行解析，理解三维产品的技术方法。

一、影响三维打印机性能的主要因素

问题思考

三维打印机是一个一体化设备，输入原材料，得到产品。我们如何选择合适的三维打印机？



三维产品的打印精度、加工时间、材料成本等是选择三维打印机时要考虑的问题，影响三维打印机性能的主要因素有以下几个方面。

1. 打印空间

打印空间的大小是由打印平台面积和 Z 轴高度决定的，这决定了产品或者模型的大小。如果产品或模型尺寸大于打印区域，则要考虑进行分解，先打印零件，然后进行组装。

2. 输出精度

三维打印模型实际成型精度是指模型成品与设计尺寸之间的误差，受到出料控制和材料收缩等方面的影响。一般 FDM 桌面级三维打印机在成型过程中，丝材经小孔挤出，熔丝在喷头出口形成膨化现象，实际的线宽与喷头直径、分层厚度、挤出速度、扫描速度、材料收缩都有关系，模型受这几个参数的影响较大。FDM 桌面级三维打印机喷头直径一般为 0.4 mm，Z 轴层厚精度在 0.1 ~ 0.3 mm 之间。出丝的线宽为喷头直径的 1.3 ~ 2 倍。

三维打印机的定位精度指 X 、 Y 、 Z 轴的机械定位精度， X 、 Y 轴可达 0.0128 mm， Z 轴可达 0.0025 mm。综合考虑三维打印分层加工和材料沉积的特点，定位精度一般都能满足成型精度的要求。

3. 打印速度

三维打印速度可以用在 Z 轴上打印一定高度所需时间来表示，也有用打印一定体积所需时间表示的。如前所述，打印速度实际上和模型大小、复杂程度和精度控制相互联系。

4. 材料性质

三维打印技术会限制材料的种类。材料的选择要考虑模型或产品的需要，例如外观、功能、色彩、强度、耐热性、防水性等，还要考虑成本的限制。如果材料在加工时有挥发性，环境污染和健康安全也是必须考虑的问题。

5. 打印成本

三维打印成本可以用每单位体积的成本表示。模型成本取决于模型消耗的材料总量，与模型设计有关，例如支撑材料的使用、模型结构等。而打印成本还要综合考虑材料维护、打印过程损耗、材料是否可回收再利用等方面。ABS、PLA、石膏粉都是相对廉价的材料。

阅读材料

三维打印机性能测试卡是典型的经验总结的成果，做成一个包含多种功能的综合型钥匙扣（图 1-22），可以让初学者了解自己打印机的性能和常见尺寸关系。它有如下功能：

- a. 字号测试；
- b. 圆柱体测试；
- c. 矩形和圆形孔测试；
- d. 厚度测试；
- e. 活动轴测试；
- f. 简单的直尺；
- g. 可以挂钥匙串的孔。



图1-22 三维打印机性能测试卡



二、FDM桌面级三维打印机

FDM 桌面级设备需要解决三个方面的问题：机械部分、电子部分和软件。我们通过三维设计软件生成三维图样，并转换为特定格式文件；应用切片软件检查并修正模型文件，把数字模型转换为三维打印机可识别执行的运动路径，进行打印设置，生成命令文件。一般三维打印机自带切片软件，也有开源的通用切片软件。三维切片软件的主要功能是对模型进行分割，生成层片，层的厚度由精度和三维打印机的性能决定，然后转化成打

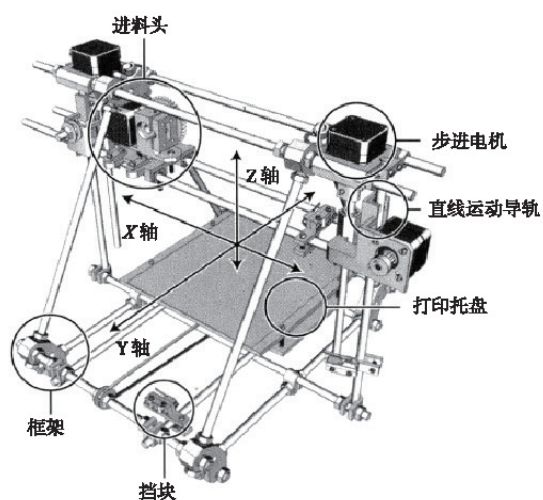


图1-23 FDM桌面级三维打印机结构示意图

印的坐标命令，控制机械部分执行。目前的三维建模和切片软件通常是两种不同的软件。电子部分缓存指令和数据，根据指令控制电机、控制温度。机械部分在电子控制下送料、定位、出料、承托模型，包括步进电机、机械轴、传送、打印喷头、打印平台等。

FDM 桌面级三维打印机采用塑料丝材熔融沉积技术，硬件基本构成应包括机架、打印平台、运动机构、挤出机、丝材卷轴和控制电路，如图 1-23 所示。各组成部分有不同的解决方案，FDM 桌面级三维打印机有不同机型，如图 1-24 所示。

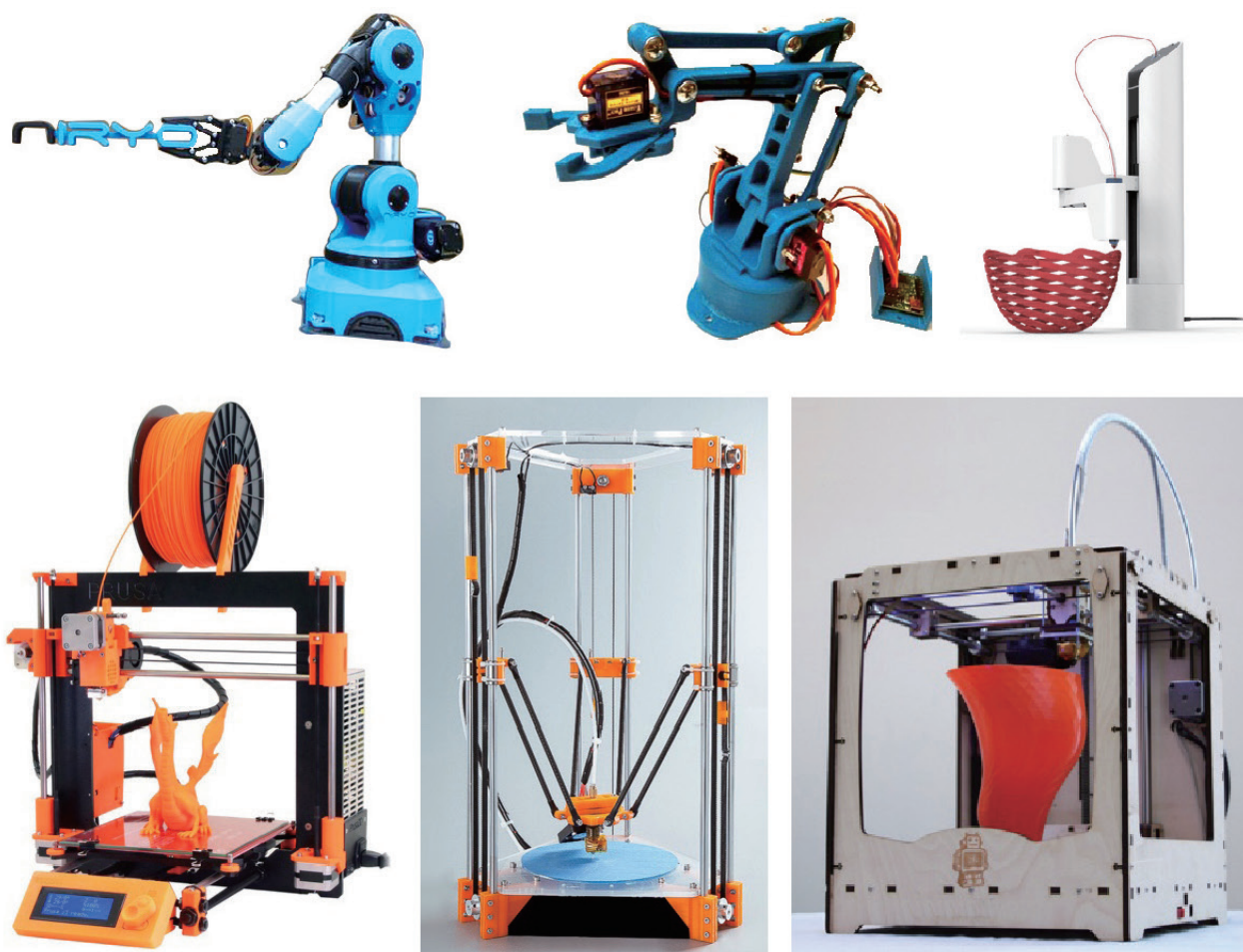


图1-24 不同类型的FDM桌面级三维打印机

1. 机架

机架提供稳定可靠的结构。应确保运动部件运行流畅，打印空间合理，装卸模型操

作方便。机架的稳定也是成型精度的前提条件，要尽量减轻喷头部件质量，提高机架的刚度。

2. 打印平台

打印平台（托盘）承托模型，应与机架稳固连接，能装卸、调平。打印平台本身应平整，打印前应调试位置，与打印头的运动平面平行。

为了兼容对温度敏感的材料，打印平台可能需要加热功能。

3. 运动机构

运动机构控制挤出机在打印空间里的运动。通常在 XY 平面为加工层，在 Z 轴上下移动到新的一层。打印空间的大小受到运动部件和机架设计的限制。主流的传动方式有以下几种：

(1) 笛卡尔型 (XYZ 型)， XYZ 型三维打印机的三轴传动互相独立：三个轴分别由三个步进电机独立控制（有些机器 Z 轴是两个电机，传动同步作用）。 XYZ 结构清晰简单，独立控制的三轴使得机器稳定性、打印精度和打印速度能维持在比较高的水平。许多开源三维打印机都是采用 XYZ 型结构。

(2) 并联臂结构 (Δ 型)，借鉴了 Δ 并联式机械臂的特点，通过一系列互相连接的平行四边形来控制目标在 X 、 Y 、 Z 轴上的运动，适应狭小空间，并能在其中有效、快速工作。 Δ 型三维打印机打印尺寸更大，三轴联动的结构使得传动效率更高、速度更快。但是由于 Δ 的坐标换算是采用插值的算法，弧线是用很多条小直线进行插值模拟逼近的，小线段的数量直接影响着打印的效果，造成 Δ 的分辨率不足，打印精度相对略有下降。

(3) CoreXY 结构，采用 XY 联动结构（图 1-25），除了 Z 轴以外， X 、 Y 轴都是两个步进电机协调配合进行传动，使得三维打印机传动效率更高，能设计出更加低功耗的三维打印机。

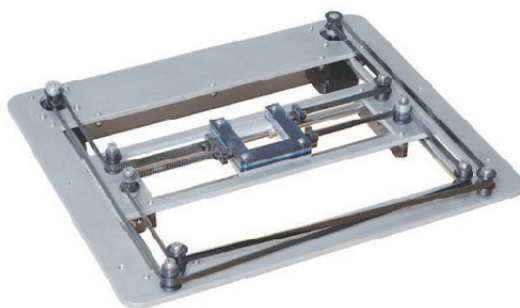


图1-25 CoreXY结构的运动机构

4. 挤出机

挤出机主要分为直接挤丝、齿轮挤丝和液体挤出三种类型。丝材在管道内加热至熔点，熔浆从喷头挤出到打印平台上。挤出机包括送料电机和齿轮、导管、加热和冷却、喷头等零件。这是三维打印的关键部件，也是消耗强度较高的地方，应注意维护保养。为了添加支撑材料，可以采用双喷头设计，且各自独立加热。

5. 丝材卷轴

通常有卷轴或抽屉两种方式收纳丝材。一般的三维打印机使用一定型号和性质的耗材。

6. 控制电路

控制电路的基本结构是由单片机、步进电机驱动、控制喷头和热床的场效应管以及各种外出接口构成的。此外还有电源、显示器等。

问题思考

不同类型的FDM桌面级三维打印机(图1-24)对所制造的产品或模型有什么影响?



三、FDM桌面级三维打印机的相关操作

基于FDM技术的桌面级三维打印机操作主要包括安装三维打印机和配套软件、机器设置和机器维护。

1. 打印准备阶段

学习安装打印机、软件 and 材料, 学习设置打印选项。

技术实践

三维打印机的安装和初始设置

1. 三维打印机的安装要求和方法

三维打印机的安装要求和方法要以具体的说明书为准。我们以图1-26所示三维打印机及其配套软件的安装为例。



图1-26 三维打印机示例

按照说明书依次安装软件, 组装机(安装喷头、打印平台和材料挂轴), 安装丝材。安装丝材时将打印材料插入送丝管, 启动配套软件, 按照说明操作, 直到喷头挤出细丝。

2. 初始化打印机

点击三维打印菜单下面的初始化选项, 当打印机发出蜂鸣声时, 初始化即开始。打印喷头和打印平台将返回打印机的初始位置, 准备好后, 打印机会再次发出蜂鸣声。

3. 调平打印平台

在正确校准喷头高度之前，需要检查喷头的喷嘴和打印平台四个角的距离是否一致。可以借助配件附带的“水平校准器”进行平台的水平校准（图 1-27）。

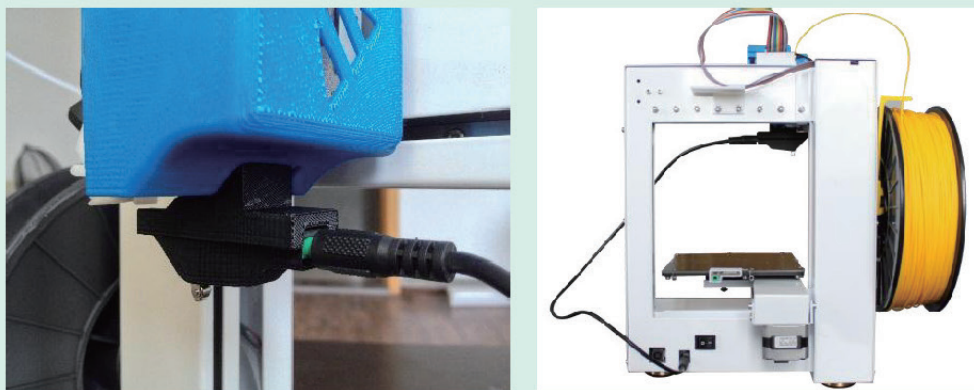


图1-27 水平校准器的安装和连线

4. 校准喷头高度

校准喷头高度对于三维打印机的成功打印起着至关重要的作用。为了确保打印的模型与打印平台黏结正常，防止喷头与工作台碰撞对设备造成损害，需要在打印开始之前进行校准，设置喷头高度。该高度以喷嘴距离打印平台 0.2 mm 时的喷头的高度为佳。请将正确的喷嘴高度记录于“校准”下的“平台校准”选项中（图 1-28）。

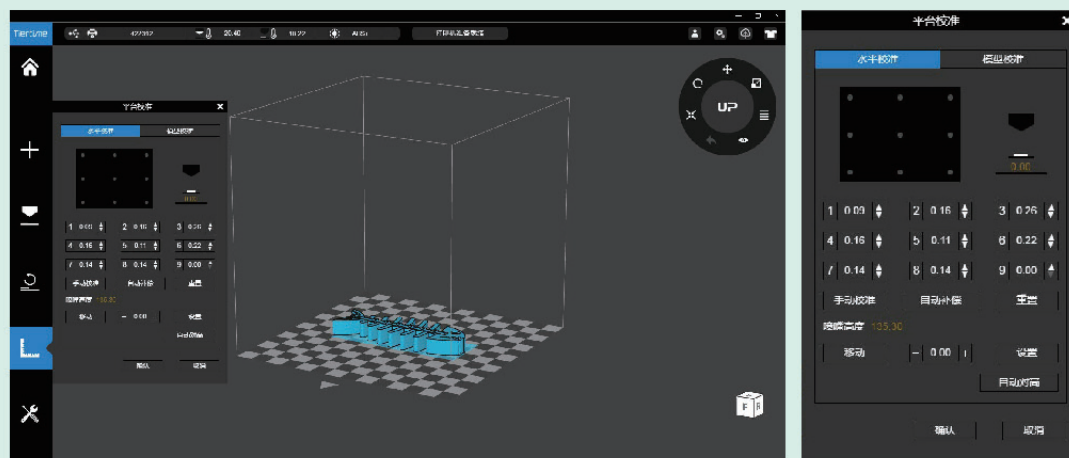


图1-28 校准喷头高度

5. 准备打印平台

打印前，须将平台备好，才能保证模型稳固，避免在打印的过程中发生偏移。借助平台自带的八个弹簧固定打印平板，将平板按正确方向置于平台上，然后轻轻拨动弹簧以便卡住平板。平板上均匀分布孔洞（图 1-29）。一旦打印开始，塑料丝将填充板孔，这样可以为模型的后续打印提供更强有力的支撑结构。如需取下打印平板，请将弹簧扭转至平台下方。

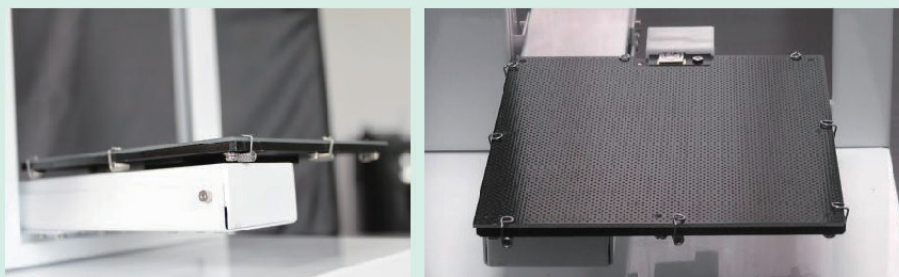


图1-29 打印平板孔洞

6. 打印设置

点击软件“打印”按钮，将会出现“设置”的界面（图1-30）。

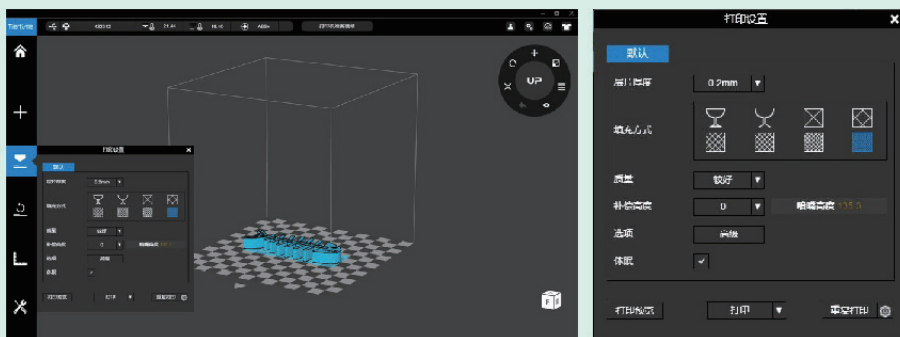


图1-30 打印设置

(1) 层片厚度。设定打印层片厚度，根据模型的不同，每层厚度设定在0.2 ~ 0.4 mm 之间。

(2) 填充选项。有八种方式填充内部支撑，分别为 Shell、Surface、13%、15%、20%、65%、80%、99%（图1-31）。

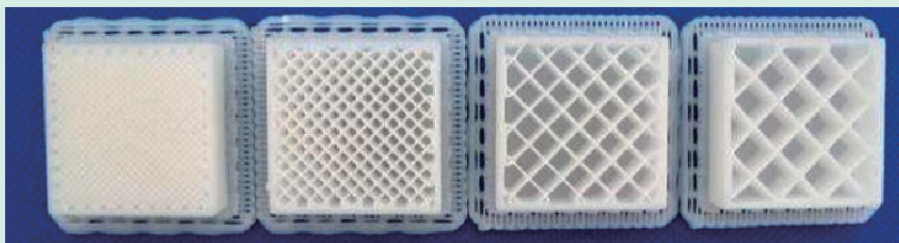


图1-31 内部支撑填充示例

(3) 打印质量。打印质量分为默认、较好、较快三个选项。此选项同时也决定了打印的成型速度。通常情况下，打印速度越慢，成型质量越好。对于模型较高的部分，以最快的速度打印会因为打印时的颤动影响模型的成型质量。对于表面积大的模型，由于表面有多个部分，打印的速度设置成“较好”也容易出现为题，打印时间越长，模型的角落部分更容易卷曲。

(4) 高级选项。打印模型时有关支撑的相关选项。第二章中将进一步讨论这些设置对打印和设计的影响。所有的设置都会被存储在配套软件所在的计算机中，而不是打印机中，如果更换计算机，必须重新设置所有的选项。



2. 打印过程

在软件中导入数字模型，检查并修复模型，调整模型，打印，移除模型。

技术实践

导入并处理数字模型

1. 导入数字模型

配套软件可以导入 STL 文件，即自带的部分标准的基本形体，还支持从某些设计软件中直接调用和传输三维模型。

2. 检查并修复模型

配套软件会用不同颜色来标明一个模型是否正确。当打开一个模型时，模型的默认颜色通常是灰色或粉色。如模型表面的法线方向错误，则模型错误的部分会显示成红色，软件具有修复模型破损表面的功能（图 1-32）。

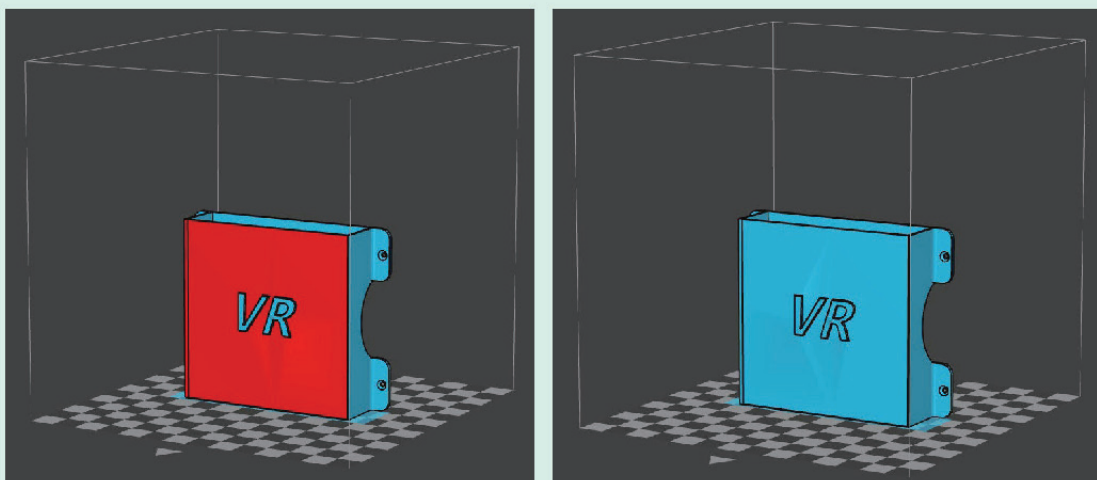


图1-32 模型修复前后

3. 调整模型

软件通过移动、旋转、缩放等功能使模型处于相对合理的位置。自动布局可以安排多个模型，每个模型之间至少保持 12 mm 以上间距。

4. 打印

可以使用打印预览（参见图 1-30 打印设置）计算所需材料用量和打印时间。确保设置合理、位置适当、材料充足，平台加热到 100 ℃ 时开始打印。打印平台应预热完全，温度均匀，对成功打印起到重要作用。

5. 移出模型

当模型完成打印时，先从打印机上撤下打印平台。把铲刀慢慢地滑动到模型下面，来回撬松模型。切记在撬模型时要佩戴隔热手套以防烫伤（图 1-33）。



图1-33 使用铲刀撬松并移出模型

移除支撑材料。模型由两部分组成，一部分是模型本身，另一部分是支撑材料。支撑材料和模型主材料的物理性能是一样的，只是支撑材料的密度小于主材料。图1-34中，左面的图片是还未移除支撑材料的状态，右面的图片展示了支撑材料移除后的状态。支撑材料可以使用多种工具来拆除，部分可以用手拆除，接近模型的支撑材料，使用钢丝钳或者尖嘴钳更容易移除。



图1-34 模型与支撑材料示例

移除支撑材料需要进行一些练习。支撑材料和工具都很锋利，在从打印机上移出模型时请佩戴手套和防护眼罩。注意在移除支撑材料时，尤其是PLA材料，一定要佩戴防护眼罩。



3. 三维打印机维护

应养成正确使用三维打印机的习惯，定期维护三维打印机。掌握垂直校准、更新材料、清洗或更换喷头等操作，定期检查喷头高度，校准打印平台。

创客坊

尝试从共享网站上获取免费的三维模型数据，最好是STL格式文件，如果不是标准格式，可以使用设计软件转换格式。将三维模型数据导入软件，进行三维打印，观察和体验完整的三维打印过程。



小结与评价

一、小结

三维打印技术对产品三维设计与制造起到了重要的推动作用，明确三维打印的技术内涵，理解三维打印代表的增材制造技术与传统制造技术的区别，用辩证、发展的眼光看待各种制造技术。

请根据以下线索，将本章的学习内容和自己的实践过程进行小结。

- (1) 什么是三维打印？三维打印有什么特征和优势？
- (2) 简述三维打印技术的发展历程。
- (3) 三维打印机的基本原理、技术构成和工作方式是什么？
- (4) 简述三维打印与其他制造技术的关系。
- (5) 三维打印对自然和人类的生产、生活会产生什么影响？

二、评价

三维打印技术是制造技术的重要组成部分，不同制造技术相互补充，实现了人类不断创新梦想。结合本章对三维打印原理的学习，以“三维打印技术的发展方向”为题撰写小论文，并对论文进行评价。

自我评价：_____。

同学评价：_____。

老师评价：_____。

第二章 三维产品 技术分析

三维产品最大的特色是产品的成型工艺。其实任何产品都是功能、结构、材料、工艺的综合体，虽然被包装在造型的外壳里，但是优质的产品一定是内外兼顾的。三维产品的制造技术有什么技术特征？三维制造是如何影响产品设计的？让我们从产品制造的角度，对三维产品进行技术分析。本章主要以熔融沉积成型(FDM)工艺特点为例，分析哪些是符合使用三维打印成型工艺进行物化的设计方案，如何对几个方案进行比较、权衡和优化，以期确定最佳方案。



第一节 三维产品的技术要求

产品区别于电脑造型，是制作出来的实际物体。电脑上显示的造型的视觉效果，不一定存在于现实生活中，例如光点、线，或者没有厚度的面。电脑中的造型没有物理属性，例如重力，相互之间可以穿插，可以悬浮。三维产品需要解决造型的物化问题。

一、产品的技术问题概述

“埴埴以为器，当其无，有器之用。”这句话的意思是，糅合黏土制作器物，当器物中间被掏空，就有器皿可用。产品的设计与制造也是这个道理，合理使用材料，巧妙利用材料的成型工艺，正是产品技术性的体现。FDM 三维打印机的主要材料是工程塑料类材料（例如 ABS），我们通过塑料制品可以了解三维产品的特点。

问题思考

生活中使用的塑料制品，用很薄的外壳，如塑料瓶（图 2-1），它的结构是什么样子的？为什么设计成这样？

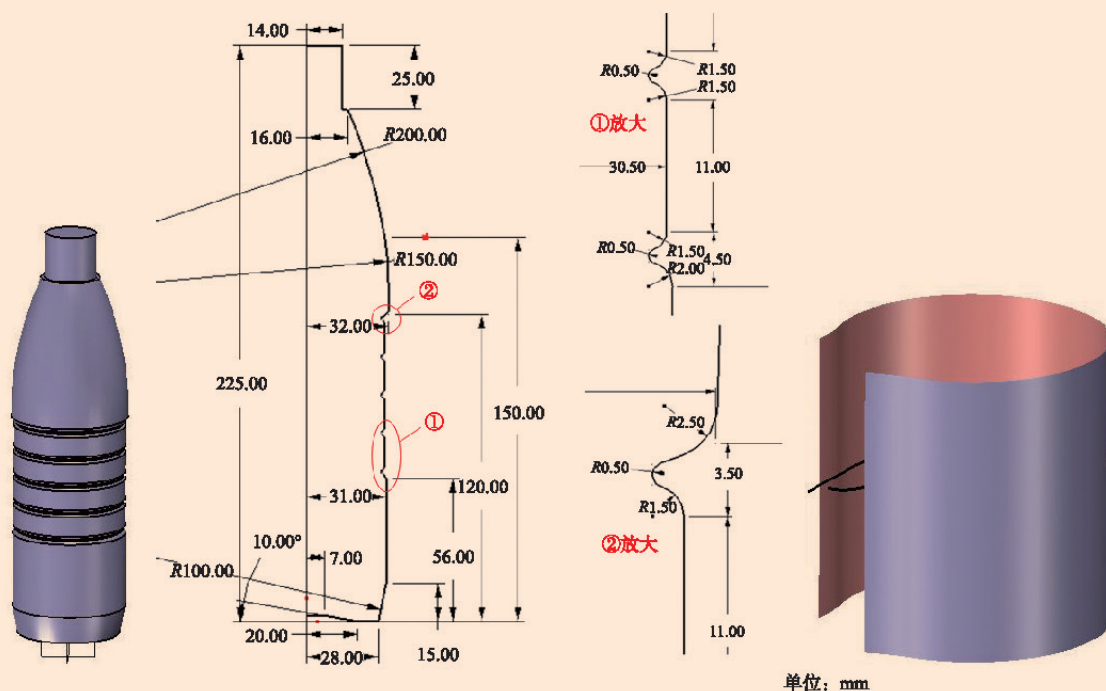


图2-1 塑料瓶的原料与产品结构

产品除整体成型或打印的结构外，各个零件、部件或组件需要以各种方式连接和固定起来形成整体。根据各部分之间的关系，有人将连接分为静连接和动连接。静连接就是一般意义的固定连接，各部分有其相对固定的位置关系，即“结构”。动连接是活动连接，意味着传动，在部件之间有运动和力的传递，即“机构”。各种连接与固定结构在设计上都要求可靠、稳定、简便、耐用。

固定连接结构可以分为不可拆卸和可拆卸两大类。不可拆卸的固定连接一般用于封闭性功能的部件，有一定的密封效果，常见的形式有焊接、铆接和胶接等。胶接特别适用于不同材质、不同厚度，尤其是超薄材料和复杂结构件的连接。可拆卸的固定连接既不能松动或失效，又要考虑拆卸方便，其形式有螺纹连接、销连接、键连接、过盈配合连接、弹性变形连接和管箍连接等。

现代产品中许多功能性构件要固定在外壳上，外壳本身设计成分体组装的结构，方便使用时装拆。弹性锁扣结构利用材料允许一定弹性变形的特点，设计相应的弹性锁扣结构实现固定功能。产品在设计时要综合考虑材料弹性变形能力、固定力和装拆频繁程度等因素。例如手机、鼠标等。

插接结构是在需要相互固定的零部件的相关部位设置相应的插装配合，方便装拆。例如榫卯结构，古埃及、中国都有记载。距今约 7000 年的河姆渡遗址中就发现有利用榫头和卯眼穿插咬合的情况。

传统产品中对可生产性、可装配性的考虑较为全面，现代绿色设计对产品的可回收和再循环利用十分重视。可拆卸性设计原则上尽量使用搭扣式、插接式的连接，减少连接件和零部件数量，模块化、标准化零部件重复利用，节约运输空间，可快速装配与拆卸，易于维护维修，延长使用周期，节约成本，实现绿色设计理念。

调查研究

查阅资料，同时进行实际调查，看看常用的产品都有哪些连接方式。



二、基于FDM的产品技术要求

1. 产品结构设计需要注意的问题

采用 FDM 技术的打印机通过挤出热塑性塑料丝构建零件。热塑性塑料层厚度范围一般为 0.127 ~ 0.508 mm。最精细的分辨率也就是层的最小厚度。塑料产品结构设计通常会注意以下问题：

(1) 零件壁厚(图 2-2)：适中，考虑喷丝线宽，太薄容易变形。壁厚尽量均匀，如果壁厚有变化，也要光滑过渡。塑料产品的壁厚与产品的强度、刚度、尺寸稳定性有

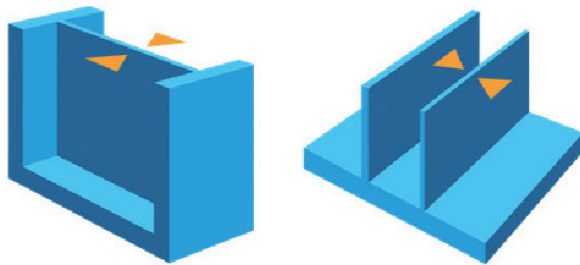


图2-2 零件壁厚示意

关。在满足功能要求的前提下，壁厚要尽可能小。一般电子产品外壳壁厚为 2.5 ~ 3 mm，日用品外壳壁厚为 1.5 ~ 2 mm，薄壁类壳体壁厚为 0.5 ~ 0.8 mm。

(2) 避免尖角 (图 2-3)：零件外部、内部过渡和连接处成圆角。圆角可以避免应力集中，提高产品强度，防止产品变形，还可以提高产品的美观性。

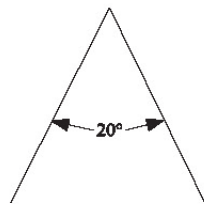


图2-3 零件尖角示意

(3) 加强筋 (加强肋)：用于提高零件强度、提供定位和支撑等功能，其尺寸设计应根据材料特性适当控制各参数比例关系。筋厚不能大于壁厚，形状采用圆弧过渡。

(4) 支柱设计：注意与零件壁连接、设加强筋、均匀壁厚等。

(5) 孔的设计：注意各部分尺寸比例，间距、受荷部位关系等，提高孔边强度的方法等。孔径过小容易堵住，根据打印机的参数设计最小孔径 (图 2-4)。

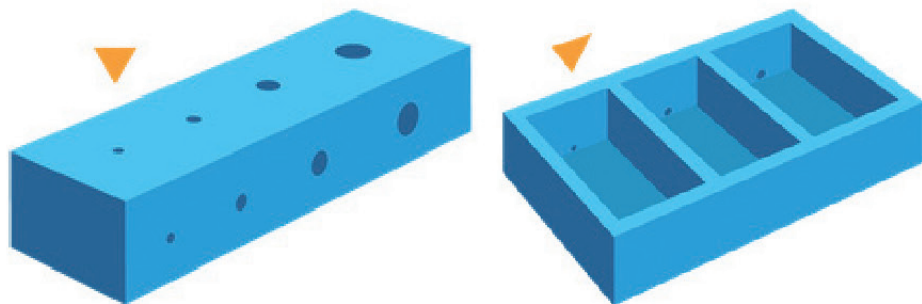


图2-4 零件不同孔径示意

(6) 提高塑胶件强度的方法：添加和合理布置加强筋。

(7) 装配方式：卡扣是常见连接，应注意其受力和自身连接细节等。打印材料受热膨胀，所以在零件装配处要留有间隙，间隙建议值为 0.2 mm，也可以根据实际情况对间隙值进行增减。

2. 建立数字模型时要考虑的问题

(1) 是否会悬空？悬空是指模型的一部分平行于构建平台水平突出 (图 2-5)，易产生变形，而且会随着外悬部分的长度增加，变形会更加严重。建议调整摆放方式或加支撑材料。

(2) 柱体模型应注意最小尺寸和长细比。过于纤细的柱体容易变形 (图 2-6)。

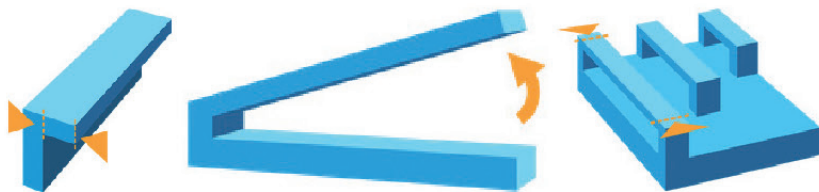


图2-5 模型悬空示例

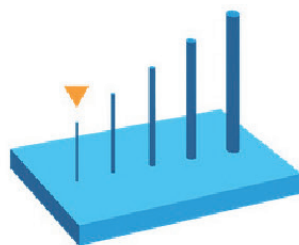


图2-6 柱体模型尺寸与长细比示例

(3) 凸台、凹槽等的细节。凸台是在模型上浅浅凸起的那部分，比如打印的文字，如果厚度和高度都小于 0.5 mm，就可能看不到。凹槽是模型上不需要打印或者凹进去的部分，如果厚度和高度都小于 0.4 mm，可能会看不到，因为它们会和模型的其他部分融合在一起（图 2-7）。

(4) 螺纹。牙型角度是指螺纹牙型两侧边的夹角，螺距是指螺纹上相邻两牙对应点之间的轴向距离（图 2-8），打印机的精度会影响螺距和牙型角度。

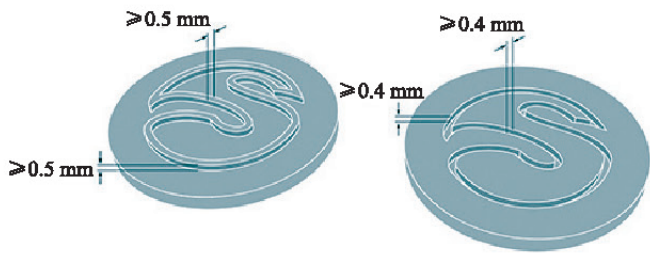


图2-7 凸台、凹槽细节示意

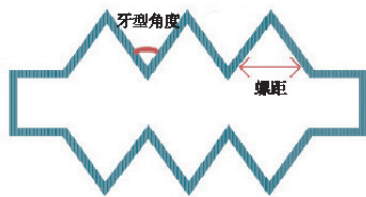


图2-8 螺纹牙型角度与螺距

三、三维切片软件与设置

问题思考

三维打印模型的文件格式都有哪些？为什么经常用 STL 格式文件？三维建模导出 STL 格式文件后能不能直接打印？



阅读材料

什么是 STL 格式文件

STL 格式是立体印刷模型文件格式 (Stereo Lithography, STL)。

STL 格式文件是 1988 年制定的一个接口协议，是一种为快速原型制造技术服务的三维图形文件格式。STL 格式文件由多个三角形面片定义组成。STL 格式模型是以三角形集合来表示物体外轮廓形状的几何模型。在实际应用中对 STL 格式模型数据是有要求的，尤其是在 STL 格式模型广泛应用的快速成型领域，STL 格式模型数据均需要经过检验才能使用。这种检验主要包括两方面的内容：STL 格式模型的有效性和封闭性检查。有效性检查包括检查模型是否存在裂隙、孤立边等几何缺陷；封闭性检查则要求所有 STL 格式模型的三角形围成一个内外封闭的几何体。

STL 格式文件本身具有格式简单清晰、易于理解和接受、生成容易、分层算法简单以及易于分割等优点。STL 格式文件的主体内容是小三角形面片，每个三角形面片用三个顶点和指向模型外部的法向量表示，所以 STL 格式文件的可读性强，便于测试。目前流行的 CAD 系统几乎均具有生成 STL 格式文件的功能，同

时还可以控制 STL 格式模型的输出精度。STL 格式文件分层处理只涉及平面与一次曲线求交，分层算法相对简单。

除了 STL 格式文件，三维打印机支持的三维数据交换格式还有 OBJ 格式、3MF 格式，以 STL 格式文件为基础修订的 AMF 格式，等等。

什么是 G 代码

G 代码 (G Code) 是计算机控制打印机的命令。打印机按照顺序每次解释一条 G 代码，完成一个动作或完成一个设置。切片程序完成的 STL 格式文件里包含 G 代码，把这个文件传送到三维打印机就可以完成模型的制作。



1. STL 格式文件的问题

在打印前需要将三维模型保存为 STL 格式，实际上是将实体模型或曲面模型转换为用三角形面片描述，即使用三角形面片包裹模型。但是不同建模软件生成的三维模型文件格式不同，转换为 STL 格式的过程中可能出现缺陷，影响三维打印。例如三角形面片之间存在缝隙，或者三角形面片重叠等。

三维打印前必须事先对 STL 格式文件的有效性进行检查，以保证三维打印成功。经常需要用修复软件来修改 STL 格式文件，切片软件一般也有检查的功能。

2. 三维切片软件

三维切片软件可以将数字三维模型转换为三维打印机可识别的打印代码。切片软件根据选定的设置将 STL 等格式的数字模型进行水平切割，得到一个个的平面图，并计算打印机需要消耗多少耗材及时间，将这些信息统一存入 G 代码文件中，发送到三维打印机中，三维打印机执行其中的命令，完成三维打印。

切片软件的设置选项有：

(1) 层高。层高可以被视为三维打印中的分辨率。此设置指定每层耗材的高度。每层的高度小，成品表面平滑，但耗时多。把层高值调大，图层较厚，表面粗糙，有层次感，有利于提升打印速度。模型的细节要求通过层高设置调节。

(2) 外壳厚度。打印中空部分的外壳，设置所打印的外墙次数。增加外墙厚度可以打印出更厚、更结实的外墙。设置外壳过多，会影响表面的细节。

(3) 抽丝。此功能主要是三维打印机需要越过中空部分时，将耗材回拉并停止挤出耗材的过程。如果在打印过程中始终开启此功能，有可能导致耗材在喷头中堵塞，要及时关闭该功能。

(4) 填充密度。填充是指模型外壳内的空间密度，通常用百分比做单位，如果设置的是“100%”填充，那么该模型内部将被完全填充。填充的比例越高，物体的强度、质量也会一同增加，打印时间加长，消耗耗材更多。通常情况下，填充密度为 10% ~ 20%，如果需要更坚固的产品，可以选择 75% 以上的填充密度。

(5) 打印速度。挤出机挤出耗材和行进时的速度，最佳设置是在挤出和移动速度中寻找最佳平衡点，涉及耗材、层数、温度等多个因素。简单地追求速度，可能导致最终模型出现垂丝等杂乱的现象。较慢的速度可以提高打印质量。在打印过程中可以根据情况随时改变。

(6) 支撑。当打印的模型倾角超过 45° 时，三维打印机挤出的耗材将无法

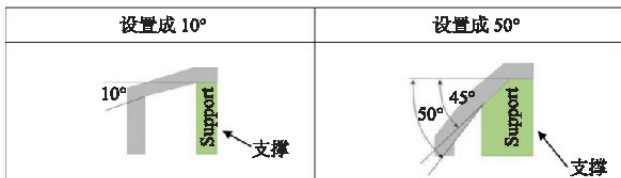


图2-9 打印支撑

正常平铺在原有层面中。如果长时间进行超过 45° 的打印度数，将会导致模型外表粗糙、垂丝等现象，通过添加支撑的方式可以改善这种现象（图 2-9）。常见的支撑类型有“树状”“网格”等形状，用户可以根据自己的需求进行选择。

(7) 首层粘连。有时由于平台的附着力不够，第一层材料无法有效地贴在打印平台上。在切片软件中通过设置选项来增加耗材对平台的附着力。例如在物体底面周围增加环绕一层，对减少底面边角的卷曲变形有较大的帮助，在打印后也比较容易去除。或者设底板支架，在物体下打印单独的一层支架，如果打印特别小的物体，或者底面不平时，支架会改进物体底面结合。但打印后移除支架会影响底面打印质量。

(8) 初始层厚度。三维打印机在平台上打印的第一层厚度。如果想给模型一个更坚固的打印底座，可以增加初始层的厚度。通常切片软件中默认的厚度为 $0.3 \sim 0.5 \text{ mm}$ ，这个数值可以较为快速地构建坚固的底座，并且会很稳定地贴在平台上。

在打印大幅平面时，遇到最多的问题就是翘曲，所以在打印这种形状的物体时，我们需要加大壁厚参数（图 2-10）。

(9) 喷头温度、打印床温度。温度低，流动性不好，挤出困难，不利于成型；温度太高，流动性太强，成型不稳定。此外，打印床预热，不能散热太快，否则热胀冷缩不均匀，容易变形。

(10) 风扇速度。丝材挤出后冷却成型，风扇负责散热冷却，风扇速度决定了冷却速度。速度太快会热胀冷缩，速度太慢影响细节。

(11) 各种补偿。用各种手段抵消加工误差。

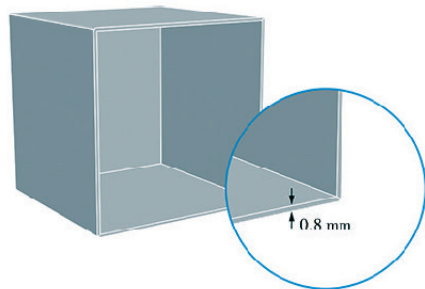


图2-10 大幅平面的壁厚参数

技术实践

在共享网站下载一个免费的三维模型文件（STL 格式），将三维模型文件导入切片软件，通过修改设置选项的参数，在打印预览中对比材料用量、打印时间等数据的变化。



四、三维打印常见问题的预防

三维打印过程中常会出现一些意外问题，与模型设计、材料和打印机都有关系。下面讨论几个主要的共性问题，同学们在实践过程中应认真研究打印机使用说明书，注意积累经验，通过网络学习相关的经验和处理方法。

1. 模型方面

使用切片软件或者修复软件检查三维模型的水密性，即有没有漏洞和破面，并修复问题。模型必须是流形，即模型中不会有三个或三个以上的面共有一条边，如果存在这种情况，应考虑将其分开为几个独立的部分。应根据使用材料和打印机的精度来设计模型的细节。有些模拟软件可以预览三维打印过程和效果，并对可能出现的问题进行纠错。

2. 打印机的准备工作

打印前我们要估计耗材量是否充足，要检查喷嘴、温度、回抽设置等。调平打印平台，清理平台表面。如果出现模型与平台黏结不牢的情况，可以从喷嘴与平台距离、温度、出料量这几个方面进行检查，还可以在打印平台上贴美纹胶纸，或者选择打印底座。

3. 材料

使用 ABS 材料打印大尺寸模型或者底面积较大时，翘边也是常见问题。由于模型底部边缘与平台黏结不牢，温度降低造成材料收缩。应注意 ABS 材料的弹性和收缩性，另外打印平台预热应均匀，打印速度适当。相比 ABS 材料而言，PLA 材料在硬度、弹性和收缩性等性能上有优势，不受平台温度影响。

4. 喷嘴定位异常

喷嘴定位不准，导致模型变形、错位等问题，应检查和校准运动机构，例如 X 轴与 Y 轴的正交度、同步滑轮松紧度、光轴清洁度和阻力等。

5. 拉丝

喷嘴在移动到一层中的空白区域时，打印机应回抽材料，以免塑料滴落形成不需要的丝材。回抽设置不正确时会出现拉丝现象。

第二节 三维产品技术方案

三维产品的设计与制造是一个系统工程，应根据三维打印的工艺特点，从构思、设计、分析、加工、后期处理等方面全面规划，形成完整的技术方案。在实施过程中，不断进行评估和调整、优化。同学们在这个实践过程中，不仅要学会应用三维打印技术，更重要的是培养工程意识、工程思维，提高工程实践能力。

一、三维打印技术应用方案

技术方案是为研究解决各类技术问题，有针对性、系统性地提出方法、措施和计划。

在三维打印技术应用的项目中，我们既要满足创意设计的要求，又要满足三维打印成型工艺的技术要求。这就要求我们要充分了解两者的总体目标、技术需求、技术条件和限制，找出其中的一致性和矛盾性；要全面调查各种技术方法，进行对比、评估、权衡，进而完善设计思想，优化技术路线，经过多个方案的比较和评价，完善项目流程；充分利用数字化设计手段，模拟、测试，找到最佳解决方案（图 2-11）。

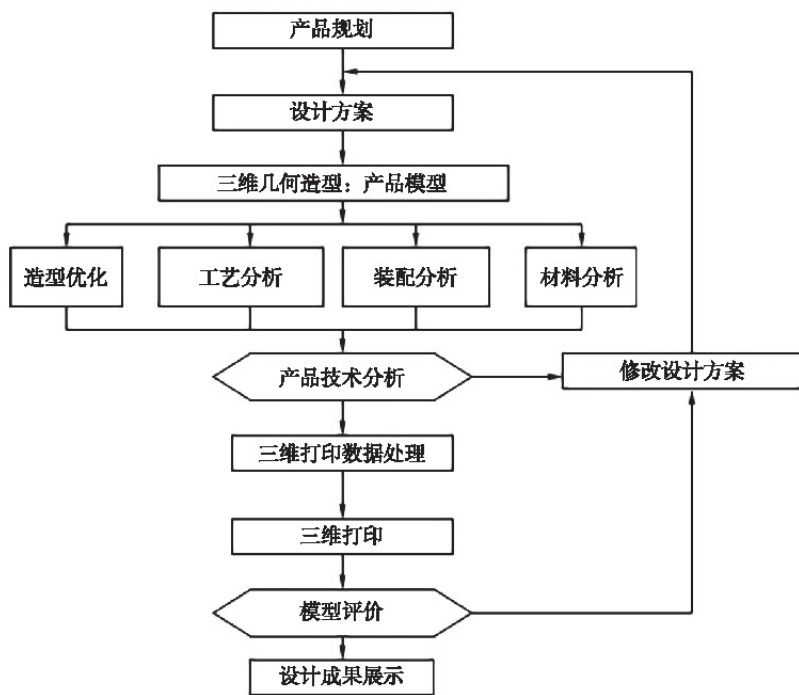


图 2-11 三维打印技术应用方案

问题思考

请思考以下问题：

- (1) 我们如何开始产品设计？是自己设计，还是合作设计？
 - (2) 我们如何进行三维原型设计？从构思开始还是从现有产品开始？如果从构思开始，我们要做哪些准备工作？如果从现有产品开始，我们是从网络获取模型，还是从实物采集数据？
 - (3) 我们的产品模型采用哪种加工工艺？是三维打印还是其他工艺？如果采用三维打印工艺，是基于 FDM 技术的三维打印机吗？如果采用其他工艺，如激光雕刻机等，对材料、工艺有哪些要求？
 - (4) FDM 桌面级三维打印机的基本技术参数，例如模型尺寸、模型材料，有哪些规定？模型是实心还是空心？模型的强度要求、功能要求、外观要求有哪些？
 - (5) 我们要设计的产品模型是否超出打印机的限制条件，如果尺寸大于打印机的打印空间尺寸，是缩小比例，还是进行模型拆分？如果缩小比例，是否满足细节、精度的要求？如果拆分模型，如何拆分，如何连接？零件组合如何解决公差配合问题？
 - (6) 产品是否需要后期处理？
- 根据三维产品打印流程，每个阶段都会有不同的选择，可以不断提问，形成不同的技术方案。而不同的技术方案，都会有利有弊。如何权衡？

阅读材料

塑料的成型工艺

由聚合物制成塑料制品的方法有注塑成型、挤出成型、压制成型、吹塑成型等。

(1) 注塑成型, 使用注塑机将热塑性塑料熔体在高压下注入模具内, 经过冷却、固化获得产品的方法。注塑成型的成型周期短, 由几秒到几分, 一次成型复杂形体, 尺寸精确。

(2) 挤出成型, 使用挤出机将加热到黏流状态的树脂通过挤塑模具挤出而成为与口模形状相仿的连续体, 然后进行定型, 冷却为玻璃态, 经切割得到具有一定几何形状和尺寸的塑料制品。主要用于连续型材制品, 如管、筒、棒、膜、片, 等等。

(3) 压制成型, 将塑料在模具型腔内加热、加压, 使其成型固化, 脱模得到制品。包括模压成型和层压成型。电器开关、插座、餐具、厨具日用品常用模压成型。增强塑料板材、管材、棒材和胶合板等使用的是层压成型。

(4) 吹塑成型, 将树脂坯料在模具中加热到高弹性状态, 利用压缩空气的压力吹胀, 与模具结合, 冷却后取出, 得到空心制品的方法。包括薄膜吹塑成型和中空吹塑成型两种, 生产薄膜制品、瓶、桶、壶类容器及儿童玩具等。

此外, 还有发泡成型, 例如泡沫塑料。压延成型, 例如各种薄膜、片材、人造革、地板砖等。

上述方法加工生产的一次成型制品, 还可以进行二次加工。例如切削、连接、热成型、表面处理等。可以采用切削加工设备对塑料进行机械加工, 如车、铣、刨、钻、锯等。连接方式有机械连接、焊接、溶剂黏结、胶黏结。热成型包括真空成型、气压成型和机械挤压成型。

这些传统制造方法需要模具制作环节, 模具研发成本高, 一旦设计发生变化, 就需要开发新的模具。



基于 FDM 桌面级三维打印机, 产品或模型的设计与制作技术方案主要考虑如下因素。

1. 尺寸因素

三维打印时, 尺寸越小, 三维打印模型能展现出来的细节就越少。方案可以在设计时简化一些不必要的细节。如果模型包含很多小细节, 希望表现这些细节, 在建模时就要考虑拆分模型, 分成几个组成部分, 以保证每个部件都能打印出足够的细节(图 2-12)。

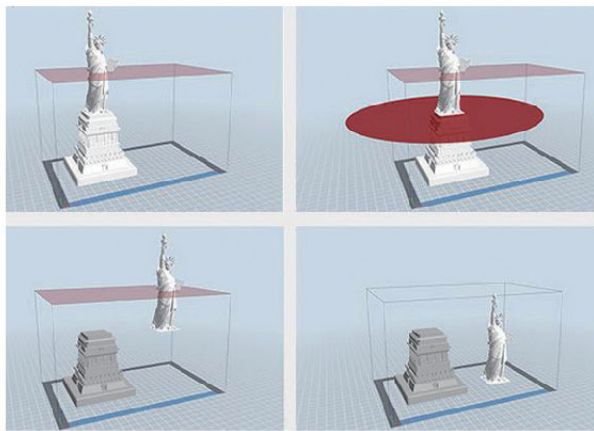


图2-12 模型拆分示例

2. 材料因素

选择的三维打印材料是否符合设计模型的要求，如应选择 PLA 还是 ABS。模型设计时，壁厚要根据材料、形状、受力决定，还要考虑材料表面的后期处理问题。

3. 重力因素

合理设计产品结构，避免重力分布不均时整个模型可能发生倒塌。可以通过切片软件调整模型的摆放，或者进行必要的分解。

4. 打印技巧

打印时造型摆放也需要一定技巧。打印机在打印时遇到悬空的部分会自动打印支撑结构。支撑会对造型表面质量造成一定的影响，并且为了减少材料浪费和打印时间，造型摆放要尽量减少悬空部分。如果无法避免悬空，造型摆放则要优先考虑装配处的表面质量，尽可能减少装配处的支撑（图 2-13）。

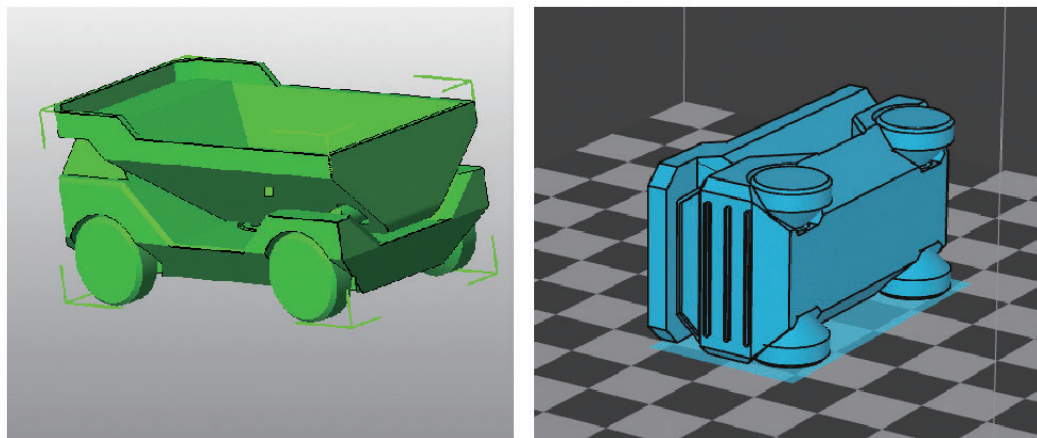


图2-13 打印造型摆放示例

二、三维打印技术应用案例

技术方案的制订不仅要有理论知识，更需要丰富的实践经验，通过大量实践，才能获得成熟的技术方案。

创客坊

项目：倒流壶设计与模型制作

倒流壶，又有倒装壶、倒灌壶、内管壶之称。这一名称的得来，与其独特的使用方式有关。倒装壶虽然具有壶的形貌，但壶盖却与器身连为一体，无法像普通壶那样从口部注水。原来，在这种壶的底部有一个小孔，使用时把壶倒转过来，才能注水入壶，所以有倒装之称。注水时，水不会从口部流出来；注满水后，将壶放正，也不用担心壶底的小孔漏水（图 2-14）。

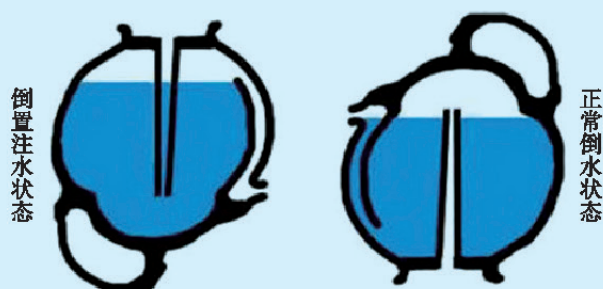


图2-14 倒流壶结构示意图



图2-15 倒流壶剖面图

通过倒流壶剖面图（图 2-15）可以看到，壶里面有一个连接壶嘴的出水管和一个连接底部孔洞的注水管。而实现倒流壶“魔法”的关键，就在于壶中的这两个导管。当壶身倒过来时，可以将水沿着注水管倒进壶内，只要壶中水的高度不超过出水管的高度，水就不会从壶嘴流出。而当壶身正过来时，只要壶中水的高度不超过注水管的高度，水就不会从底部的孔洞中流出来。所以，虽然倒流壶底部有洞，却能做到滴水不漏。

倒流壶在制作过程中也要“倒”着制作。首先用陶泥拉出壶形；将准备好的导管放进壶胎内部，然后将成型壶口封上，送进窑炉烧制。烧制倒流壶的窑炉，体现出古代的陶瓷工匠已掌握了先进技术。根据考古分析，在唐代，耀州窑的烧窑温度就已经达到了 1310°C 。能达到这样的高温主要归功于一种窑顶完全封闭的马蹄窑。这种窑的先进之处在于，当火从火塘升起后先到窑顶，因为窑顶是封闭的，火只能沿着窑床往下运动。这样在火焰从窑顶到窑底的运动过程中，就可以对窑内的产品进行均匀烧制。最后的火从底部烟道排出。

类似的结构还有九龙公道杯、毕达哥拉斯杯（图 2-16）。

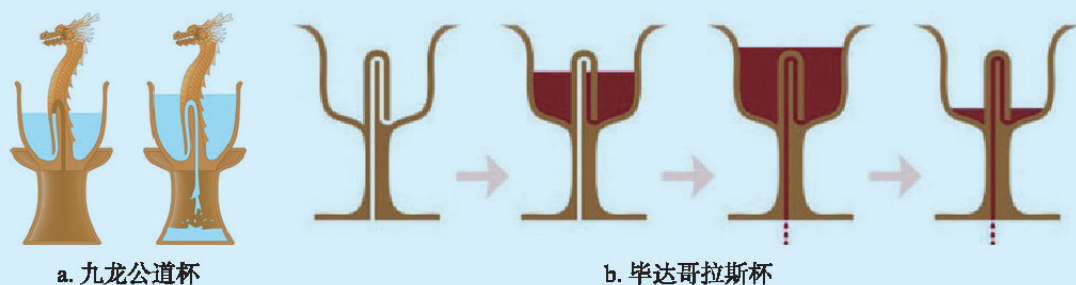


图2-16 九龙公道杯、毕达哥拉斯杯示例

三维设计并打印倒流壶，有两个关注点：

- (1) 无支撑结构的设计。
- (2) 防水性模型的打印。

我们在前面已经有所了解，三维打印时，打印支撑是平台调平补偿、悬空结构设计中非常重要的功能。良好的支撑结构可以保证三维物体在打印过程中不出现坍塌的问题。但有些模型打印过程中必须完全摒弃模型内部的支撑，还要保证

模型的可用性，倒流壶就是一个很好的例子。

寿桃型倒流壶技术分析

图 2-17 为三维设计最终渲染图和打印结果，原型为寿桃型倒流壶。壶的主体为红色的桃型壶体和底座，壶嘴和壶把儿为黑色的树枝，配以装饰性的树叶组成整个作品。三维设计时主要完成壶体、壶嘴、壶把儿、上水的空心锥形等部分。

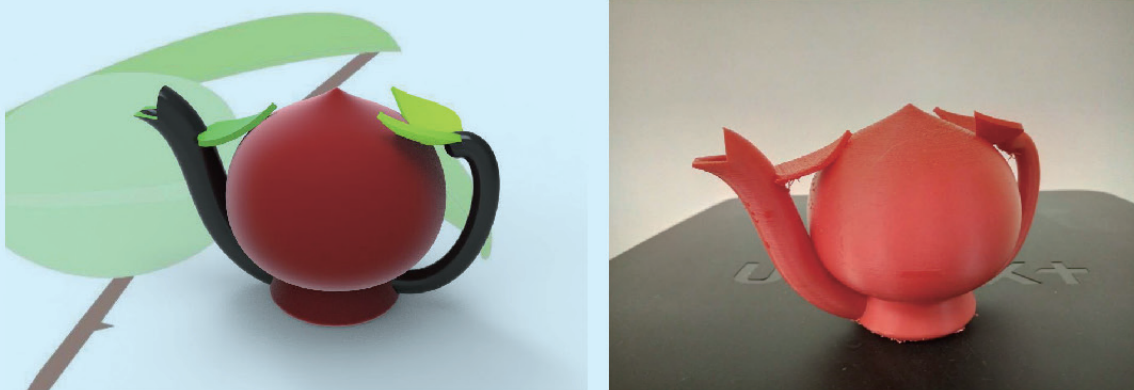


图2-17 寿桃型倒流壶三维设计效果和打印结果示意



图2-18 壶壁结构示意图

倒流壶在进行三维设计时，就要考虑制作、使用时可能会出现的问题。

第一，整个作品需要一体化打印，且这个物件只有两个非常小的开口，这就要求作品打印环节不能给壶内部添加支撑。

三维打印是层层累积的过程，材料固化过程中逐步受力和传力。如图 2-18 中，A 点处是结构的最低点，如果下面没有支撑，一定会出现坍塌的问题。倒流壶内部自然不能设支撑，这就需要我们仔细考虑壶壁的曲线形式，使得先打印的下层对后打印的上层起到支撑作用，不会出现这种向下弯曲的面。在整个作品造型的设计过程中，一定要让曲面缓慢地扩张或收缩。这在三维设计阶段就要考虑好，才能确保打印质量。

在三维打印阶段，需要调整打印机参数，更改打印菜单中“无支撑”选项（图 2-19）。

第二，如何使这个作品打印完后能盛水，且不漏水。

常规打印作品时不必考虑壶体的水密性，但打印的作品需要保证作品的强度，常规作品经常以 2.5 mm 作为壳的厚度。倒流壶这个作品在设计阶段选择 3.0 mm 作为壳的厚度。增加壁厚，是为了在打印阶段打印更多的密闭层，保证壶体的水

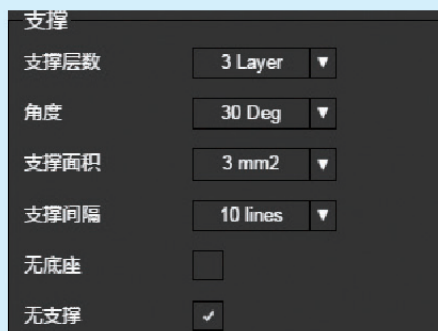


图2-19 打印支撑参数设置

密性。系统默认的密闭层数为3层，在打印本作品时需要更改密闭层参数为6层，在打印高级设置里面，进行如图2-20所示参数的修改。

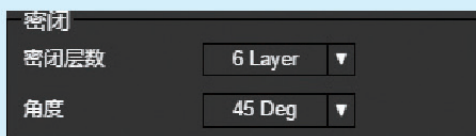


图2-20 打印密闭层设置

第三，ABS和PLA材料的选择问题。

PLA虽然打印过程中无味道，且为食品级材料，似乎可以作为打印壶的材料，但PLA却有溶于水，特别是热水的缺点。考虑作品要多次使用，我们只能摒弃PLA材料。ABS具有耐水性，但不是食品级材料，所以这个模型使用ABS打印，只能用作原理演示，而不能把它当成喝水、泡茶的壶而投入使用。

掌握三维打印技术是一个反复动手实践、积累经验的过程。参数的设置、设计的经验不仅来自对设计软件的熟练程度，也有制作过程的经验反馈。



问题思考

案例中的技术方法有什么优点和不足？请你尝试优化倒流壶的设计与制作方案。



符合使用三维打印成型工艺进行物化的设计方案有很多，这就需要我们对其进行比较、权衡和优化，以期确定最佳方案。我们理解了产品设计的功能要求、产品加工的工艺特点，就能抓住主要矛盾，找到优化的途径，如把复杂的模型进行模块化分解，通过分解后的一个个模块进行无支撑打印，再组合，最后形成我们想要的模型。在某些结构不影响外观或者不影响使用的情况下，尽量减少悬空结构等。

技术实践

选择其中一个项目展开技术实践。

项目1：茶器公道杯技术分析

茶器公道杯，又称匀杯、分茶器、茶海、茶盅。茶席上，用公道杯分茶，每只茶杯分到的茶水一样多，以示一视同仁，升华到精神层面，继承了“公道”精神。图2-21为晓琳同学设计的公道杯最终渲染图，请参考寿桃型倒流壶案例，对其进行技术分析。



图2-21 茶器公道杯

项目2：艺术台灯技术分析

图2-22为宇佳同学设计的艺术台灯，请对此进行技术分析。

技术提示：台灯要实现照明功能，需要有灯泡、灯罩、灯座、电源电路和开关等，所以，在台灯的三维设计分析中，首先，应分析台灯的基本组成部分之间的逻辑关系；其次，台灯的造型应考虑结构稳固，灯罩要薄一些、内填充值要低一些，以减轻质量，提高透明度，灯座内支撑值要高一些，以提高支撑杆强度。



图2-22 艺术台灯



三、三维打印后处理

表面处理使相同的材料具有不同的感觉特性，尤其是视觉和触觉感受。表面处理的方法通常有以下三类。

(1) 表面被覆，分为镀层、涂层和珐琅方法。

(2) 表面层改质，通过化学处理或氧化技术改变原有材料表面的性质。

(3) 表面精加工，通过切削、研磨、喷砂、抛光的技术对表面进行精细加工，改变表面的质感。

三维打印出模型后，我们常利用砂纸、抛光机、打磨机、锉刀等进行表面打磨，或者喷砂，初步消除 FDM 打印带来的层状效应，进而涂抹光滑液、光油等，用牙膏或者打磨膏打磨，最后打蜡，恢复光泽。

化学处理是利用溶剂，例如丙酮试剂，采取浸泡、熏蒸的方法提升表面光滑度。

最后还可以对模型进行上色。

开眼界

通过 FDM 桌面级打印机打印出来的模型，表面经常会出现一圈一圈的纹路，降低了样品的美观度（图 2-23）。为了提高样品美观度，一般会进行抛光处理（图 2-24）。有以下几种抛光方法。



图2-23 表面有纹路的模型



图2-24 表面化学抛光后的模型

(1) 丙酮抛光法。丙酮蒸汽熏蒸三维模型，利用 ABS 溶于丙酮的特性对模型实现抛光。使用丙酮抛光要注意安全问题，丙酮有毒、易燃易爆、有刺激性，所以操作时，建议在良好的通风环境下，佩戴防毒面具等安全装备。

(2) 三维模型抛光液。将抛光液放入操作器皿后，用铁丝或者绳子挂着模型底座，将模型浸入抛光液中8秒左右，不宜浸泡太久。因不同地区温度和环境的影响，根据需要的抛光效果适当调整浸泡时间。

(3) 震动抛光机。使用震动抛光机进行抛光，或者离心抛光机进行抛光，主要原理是通过介质与模型之间的碰撞摩擦实现抛光。

(4) 珠光处理。珠光处理是手持喷嘴朝着抛光对象高速喷射介质小珠从而达到抛光的效果。它的优点是一般比较快，5~10分即可处理完成，处理后产品表面光滑，比打磨的效果要好，而且不同材料有不同效果。珠光处理的缺点是价格昂贵，而且一般是在密闭的腔室里进行的，所以它能处理的对象是有尺寸限制的，通常处理的模型都比较小。

(5) 砂纸打磨法。使用砂纸打磨，工具比较简单，主要是砂纸、打磨棒等。各种规格的水砂纸加水打磨完零件之后，零件会没有光泽，可以把牙膏抹在布上对零件进行打磨，帮助恢复光泽。但砂纸打磨的效率低，效果一般。



小结与评价

一、小结

本章我们学习了三维产品的技术分析方法，我们对三维产品的技术问题有了基本认知，对三维产品的技术实现有了相关实践。产品的技术问题会影响到产品的设计，在现代化的制造系统内，设计与制造是相互关联，甚至是并行发展的。我们在选择三维产品加工制造技术时，应该密切注意数字技术在各个领域的最新发展，保持技术的敏感性。思考以下几个问题，对本章的学习进行小结。

- (1) FDM 桌面级三维打印机的工艺特点是什么？
- (2) 产品如何根据功能要求选择材料和工艺？
- (3) 产品的技术分析对我们的技术设计有什么帮助？
- (4) 如何制订产品的技术方案？

二、评价

通过组合结构模型的三维设计与三维打印，总结设计与制造两个阶段工作的配合经验，并从案例设计到制造全过程进行评价，得到优化的技术方案。

自我评价：_____。

同学评价：_____。

老师评价：_____。

第三章 三维模型设计

三维模型是三维打印和三维产品技术分析的基础。三维模型及其三维图样不仅用来表达设计意图，还可以进行产品技术分析、虚拟仿真和指导生产。三维模型的获得可以从无到有通过三维设计建立，也可以从现实到数字，即通过三维扫描技术来建立。随着计算机技术的发展，三维建模的方法更加灵活，很多设计软件既支持从无到有的正向设计，也支持三维扫描后的点云处理，实现逆向设计。对现有物体，例如文物，进行三维建模，可以记录相关信息，便于研究者分析研究。本章主要介绍三维模型设计和逆向三维建模技术。



第一节 三维设计方法

随着数字技术的发展,产品设计软件逐步实现了三维设计功能。三维设计与传统的计算机辅助设计有哪些区别呢?首先,两种设计流程不同,传统的计算机辅助设计是人工在计算机里输入各种图样,包括二维图样、三维图样等,所以也称二维设计;三维设计是先三维建模,后出图样,如二维图样、三维图样、信息表等,都由数字模型导出。其次,三维设计中数字模型和图样是自动对应关系,可以降低修改的难度,而二维设计需要设计者协调和修正图样之间的关系,容易出错,难度也大;三维设计从设计之初就具有非常直观的可视化效果,使产品方案的讨论更加便利和高效。

问题思考

实物模型、数字模型在产品设计中各有哪些作用呢?



一、三维设计的发展

在传统的生产方式中,设计和制造是依次分别进行的串行关系,产品的信息通过图纸传递。各环节中人为因素的影响较大,信息易流失、误判,沟通效率和质量难以满足产品制造业的发展需要。

数字化技术是以计算机软硬件、周边设备、协议和网络为基础的信息离散化表示、定量、感知、存储、传递、控制、处理、联网的集成技术。将数字化技术应用到产品生产的各个阶段,人们不仅可以对产品本身进行数字化描述,还可以对产品的非几何属性以及制造过程进行管理和控制,产生了产品的数字化设计与制造。基于计算机技术和互联网技术,产品数字模型支持从产品开发、设计、制造、使用到淘汰的全生命周期管理。在数字空间中进行的产品设计、分析、仿真、制造,不仅缩短了产品研发周期,有效地保障了产品的质量,降低了产品研发和生产成本,有利于进行批量化、全球化生产,还实现了绿色设计与绿色制造。

除了计算机辅助绘图、计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、计算机辅助工程分析(CAE)、产品数据管理(PDM),还有准确、快速测量产品的数字化测量技术,如三维激光扫描、逆向工程技术,它们同时提供了新的数字化模型创建工具。20世纪90年代制造技术领域的重大突破是快速成型(RP)技术,加快了设计思想物化进程,对提高产品设计的评估、优化效率起到重要作用。

阅读材料

CAX是指各种计算机辅助工具，其中X可以代表生命周期中的各种因素，如设计、分析、工艺、制造、装配、拆卸、检测、维护和支持等。最典型的有计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助工艺过程设计（CAPP）、计算机辅助制造（CAM）、计算机辅助夹具设计（CAFD）等。

DFX是指面向某一应用领域的计算机辅助设计工具，能够使设计人员在早期就考虑设计决策对后续环节的影响，是实现并行设计的最有效的方法之一。如面向装配的设计（DFA）、面向制造的设计（DFM）等。



当产品实现的全过程、各种信息都可以在设计阶段进行虚拟仿真和集成分析，就形成了并行工程的概念，即原来串联的工作阶段和内容，可以在时间和空间上实现重叠，并行推进，准确预判，这是当今先进制造技术的基础。在产品的设计阶段，数字样机技术在产品思想展示、性能分析、功能测试等环节逐步取代传统的实物模型技术。产品数字化定义已发展到基于模型定义（MBD）的阶段，三维模型与物料表一体化定义。

三维设计正是在这个背景下，对以三维建模为核心的设计方法的通俗说法。

调查研究

请查阅资料，了解常见设计软件的功能定位。具备哪些功能的设计软件，我们称之为三维设计软件？



二、几何形体的建模方法

产品数字模型首先是建立产品的几何形体，即三维建模。现实世界里，三维形体都是三维实体。但是在计算机图形学中，可以有不同的表现方法来节约计算机的计算工作量，加快显示速度。

几何形体建模有实体建模和曲面建模两种不同的方法。实体建模通过使用封闭的实体特征进行组合，可以得到直观的实体模型，模型内部是填充的，可以提取剖面。曲面建模则是通过创建无限小厚度的物体表面，进行连接闭合，从而得到最终的物体造型，如果剖切来看，只能看到外形的边缘轮廓（图3-1）。

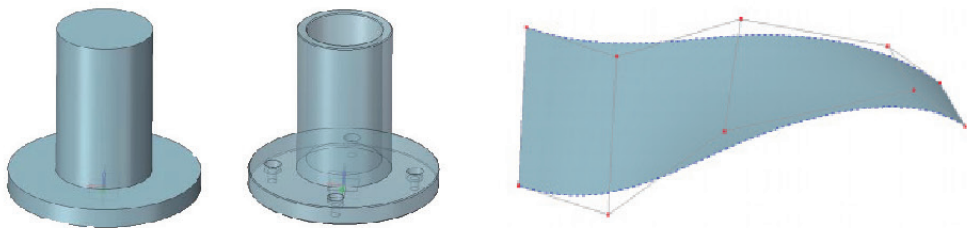


图3-1 实体建模（左）和曲面建模（右）示意

实体建模通过确认曲面边界和拓扑定位来明确地呈现物体特征，建模过程更为简单快捷，通常用于规则形状。曲面建模不需要任何特征信息，只要定义边界的几何描述就能得到复杂的效果，多用于复杂表面。实体建模主要用于工业设计与制造行业，曲面建模常用在影视娱乐、创意表现领域。

随着产品的个性化需求不断提高，三维打印技术（增材制造）的普及，复杂形状的制作不再是难题，带动三维建模技术也与时俱进，混合建模、直接建模是目前的发展趋势。混合建模充分整合了原有两种建模技术的优势，让用户能在实体和曲面间实现自由交互，设计更加灵活自如（图 3-2）。



图3-2 混合建模允许用实体修剪曲面形状

阅读材料

面向三维打印技术的三维建模软件，通常有专业建模软件和通用建模软件两大类。面向入门者有许多简化建模软件。为了让大家更好地理解从设计到制造的全过程，在设计时能进行技术分析、加工仿真模拟等功能，建议以一款基于CAD/CAM一体化技术的三维设计软件为例，学习三维建模、三维图样设计的具体操作。



技术探究

选择一款简单易学的三维建模软件，熟悉它的操作界面，点击工具命令图标，了解软件的三维建模功能。



第二节 三维设计中的三维建模

三维建模设计经常指设计者根据自己的设想，运用三维设计软件进行三维模型建立和设计的过程。三维产品的基本形态经过设计者构思、绘制草图后，使用三维设计软件的建模或绘制功能模块，把二维草图转化为三维图样，以便进一步推敲和设计。虽然不同的三

维设计软件操作界面与方式各不相同，但是基本的建模原理和方法是相通的。请结合自己熟悉的软件学习下面介绍的基本思路。

问题思考

同学们学过素描或者简笔画吗？为什么有的图画了几笔就能让人想象出具体的形象呢？三维形体不仅要看其外表轮廓，还要善于解构，找到其中最能体现形体特征的控制性的点、线或者截面。

对于复杂形体，可能会有多种构成形体的方法，这时要根据产品的功能、零件组合需要、形体变化的灵活性，甚至是产品加工工艺要求，进行综合评判和选择。



一、利用基本体建模

基于形态的点、线、面、体基本特征，三维建模是从基本形态到复杂形态的过程。基本体造型包含六面体、圆柱体、圆锥体、球体、椭球体，一般可以直接生成，也可以通过修改参数规则变形。

(1) 六面体，又称长方体，包含6个平行面、8个角点、12条边（图3-3）。通常可以单独对各个面、边、点进行以调整以生成变形体，也可以通过提取这些要素形成新的实体。

(2) 圆柱体。圆柱体的主要特征是沿长度方向保持一致的圆截面。可以通过修改长度和截面圆形的半径来改变大小（图3-4）。

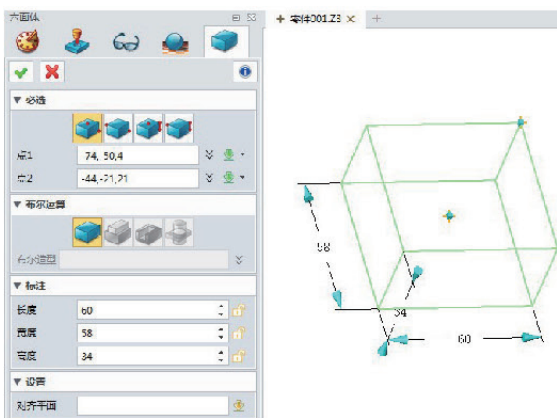


图3-3 六面体

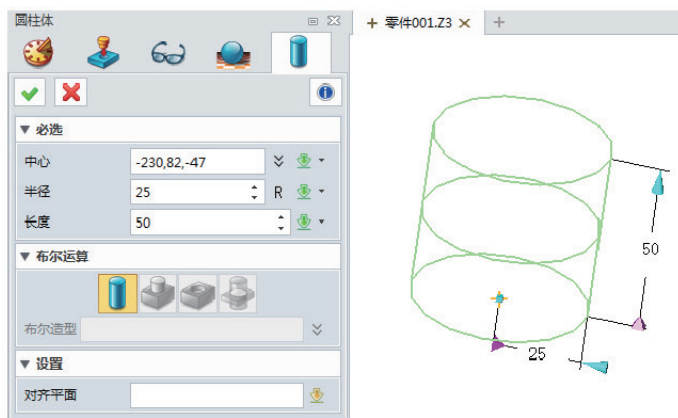


图3-4 圆柱体

(3) 圆锥体，或者圆台。与圆柱体相比，圆锥体沿长度方向两端的圆的半径不同（图3-5）。

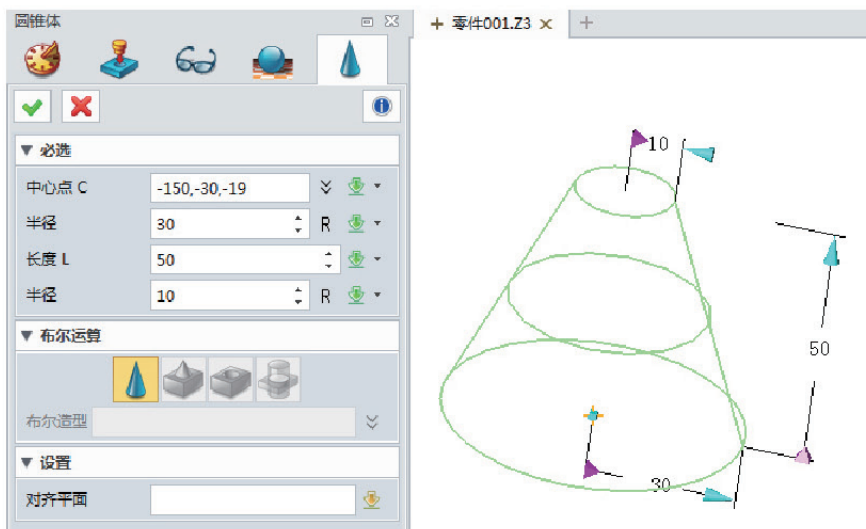


图3-5 圆锥体

(4) 球体。由中心点和球体半径控制的形体(图 3-6)。

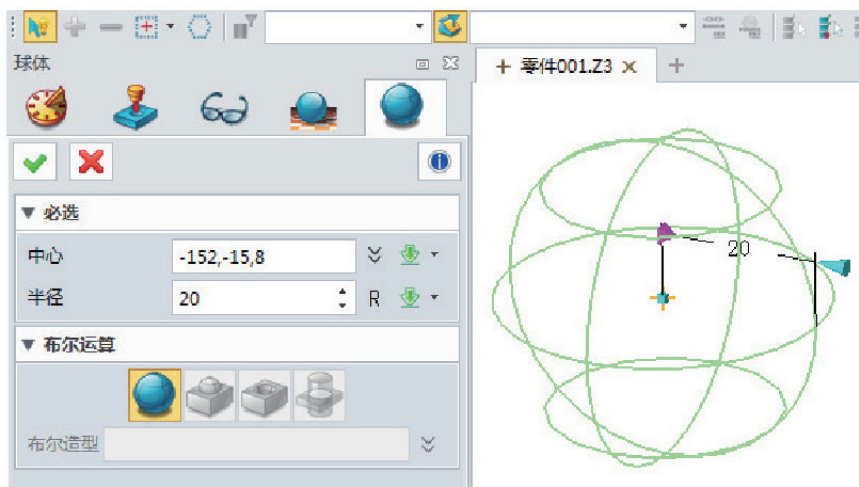


图3-6 球体

(5) 椭球体。通过中心点的三个方向的轴有各自不同的长度。可以看到三个方向上的椭圆形轮廓(图 3-7)。

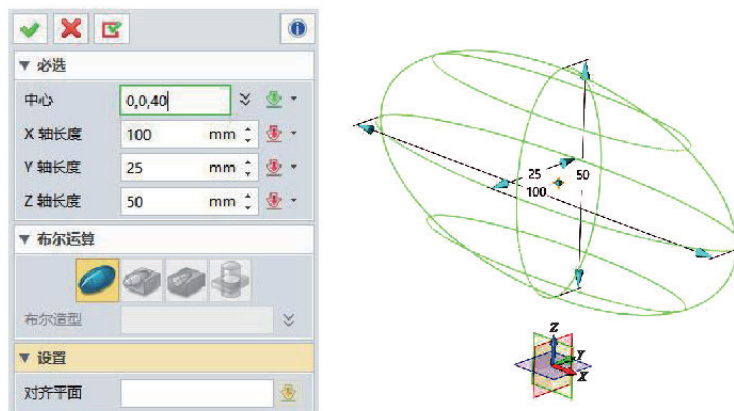


图3-7 椭球体

技术实践

利用基本体建模，尝试建立一个雪人模型（图3-8）。雪人模型的大小可以自行确定。

技术提示：雪人模型的头部、眼睛和嘴巴为球体，身体和手臂为圆台，纽扣为椭球体。



图3-8 雪人模型



二、实体建模

从这些基本体的参数可以看出，任何三维形体都可以用二维的线来描述，因此，我们可以创建更为自由的形体。最基本的方法有拉伸、旋转、扫掠和放样四种方法。

(1) 拉伸。拉伸是将一个截面轮廓按一定方向进行扫描，完成曲面或实体特征的创建。拉伸轮廓支持草图、面、线框、面边界和曲线列表，同时，拉伸时可以与其它造型进行布尔运算，将曲面拉伸成实体（图3-9）。

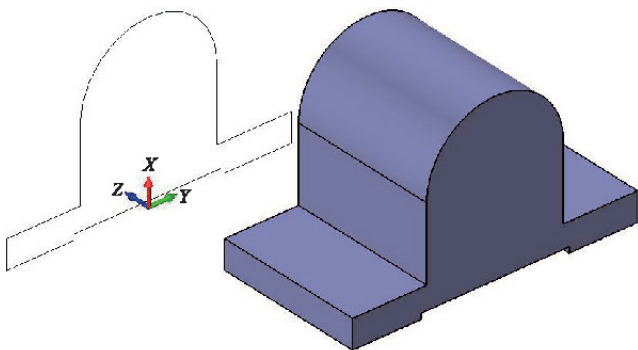


图3-9 拉伸

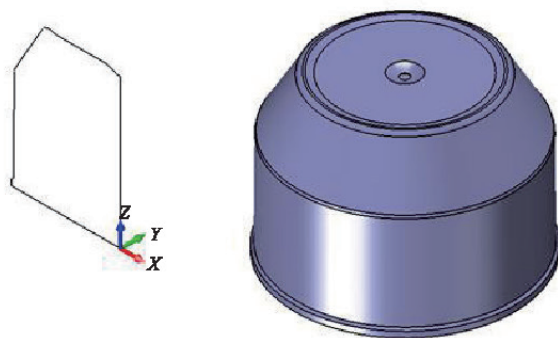


图3-10 旋转

(2) 旋转。旋转体是一个截面轮廓围绕一根轴旋转创建造型特征。同拉伸一样，旋转轮廓支持草图、面、线框、面边界和曲线列表，同时，可以与其他实体进行布尔运算（图3-10）。

(3) 扫掠。扫掠是将一个截面轮廓沿一条轨迹线进行扫描，完成曲面或实体特征的创建（图3-11），分为扫掠、变化扫掠、杆状扫掠和螺旋扫掠四种扫掠方法。螺旋扫掠可以创建螺纹、弹簧、线圈等。

(4) 放样。放样是利用多个图形的截面形状光滑连接形成实体，分为放样、驱动曲线放样

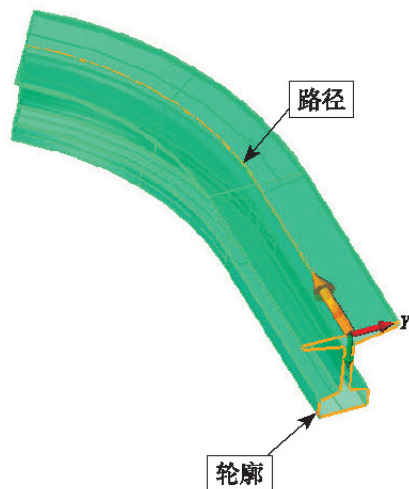


图3-11 扫掠

(图 3-12) 和双轨放样 (图 3-13) 三种。放样功能中截面图形和引导路径可以组合出多种变化, 需要仔细体会和研究。

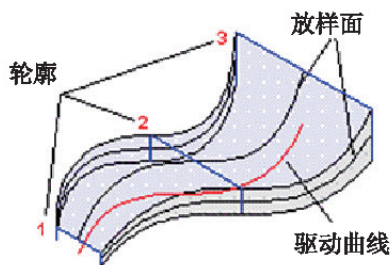


图3-12 驱动曲线放样示例

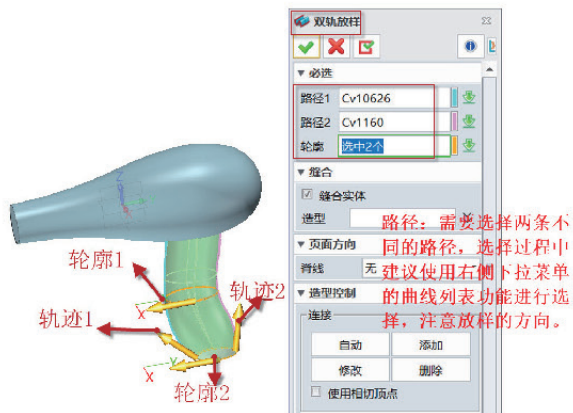


图3-13 双轨放样示例

技术实践

以第二章的寿桃型倒流壶为例, 利用所学的建模命令进行建模练习。

技术提示: 壶体设计可以用旋转的方法, 壶嘴设计用扫掠的方法, 壶嘴细节和桃叶装饰部分可以在今后学习更复杂的建模命令时完成。

(1) 壶体设计。打开三维设计软件, 进入草图界面, 画出半个桃子形状 (图 3-14), 桃形尖部要倒角, 避免角度过小影响抽壳。然后使用旋转 360 度的方式形成实体, 最后抽壳 -3 mm, 完成壶体的制作。

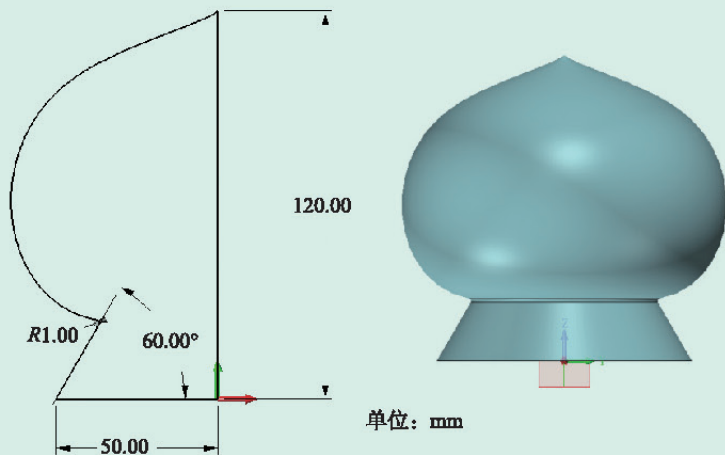


图3-14 壶体设计示意

(2) 壶嘴的设计。壶嘴采用杆状扫掠的方式完成, 当然扫掠方式也可以, 具体操作可以自己摸索。首先通过辅助几何体, 在壶的中心平面绘制曲线, 曲线样式如图 3-15 所示, 然后退出草图, 通过杆状扫掠操作完成实体造型。再将两个实体进行组合。

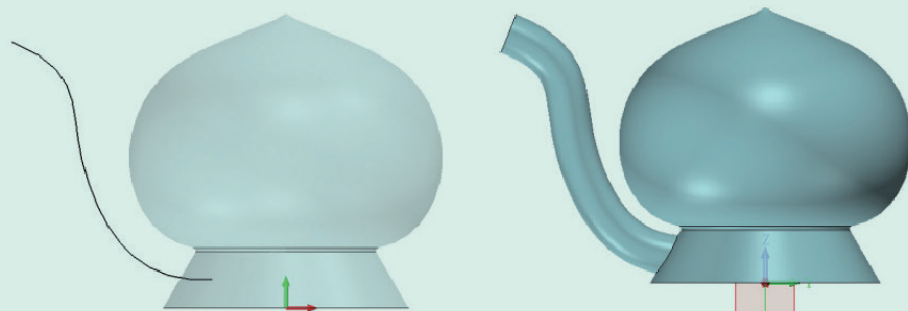


图3-15 壶嘴设计效果

(3) 壶把的设计。壶把的设计与壶嘴类似，不同点是抽壳的时候，无须开放两个底面。还可以在壶把头做一个半径与之相等的球体，与其组合做美观处理(图3-16)。

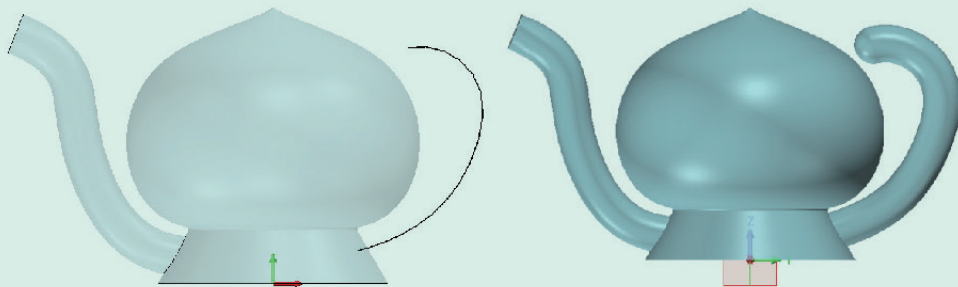


图3-16 壶把设计效果

(4) 倒水管的设计。设计倒水管前，需要在壶底面使用抽壳命令抽出孔洞，以孔洞圆心为基准，使用造型中圆锥体创建上半径为7 mm、下半径为9 mm的圆锥体，并对锥体进行-3 mm的抽壳，同时选择上下两面为开放面。为方便操作，可以隐藏壶的主体(图3-17)。

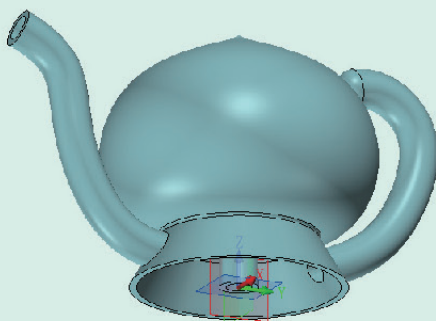


图3-17 倒水管设计示意

(5) 壶底设计。使用圆柱体命令，创建半径为47 mm、高度为3 mm的圆柱体(图3-18)。

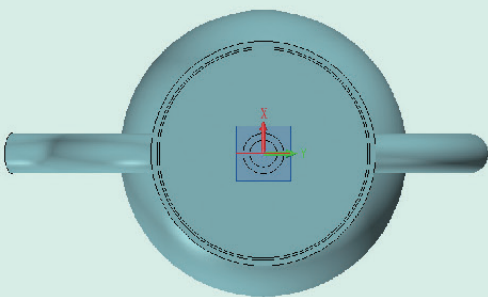


图3-18 壶底设计示意

(6) 修饰壶嘴。使用草图、拉伸、组合等命令修饰壶嘴(图3-19)。

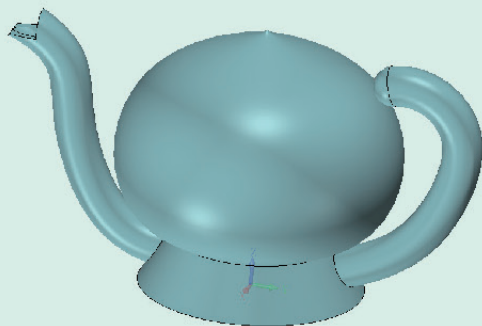


图3-19 修饰壶嘴示意



(7) 组合倒流壶的各个部件。使用组合操作中，加运算将各个部件组合为一个整体，组合之后可以快速判定壶是否是一个整体，可以通过鼠标单击壶的任意部分查看，若整体变色，则说明组合成功。



三、曲面建模

曲面建模的思路与实体建模相似，可以创建草图线框，也可以提取现有的特征轮廓或边。具体方法包括：

(1) 直纹曲面，根据两条路径线建立曲面，横截面线上的对应点以直线方式连接，但是选点的位置（方向）不同会生成不同的曲面（图 3-20）。



图3-20 直纹曲面示例

(2) 圆形双轨曲面，在两条路径线间创建圆形横截面的曲面，创建的方式有常量、变量、中心和中间四种，选择不同的方式，设置稍有变化（图 3-21）。

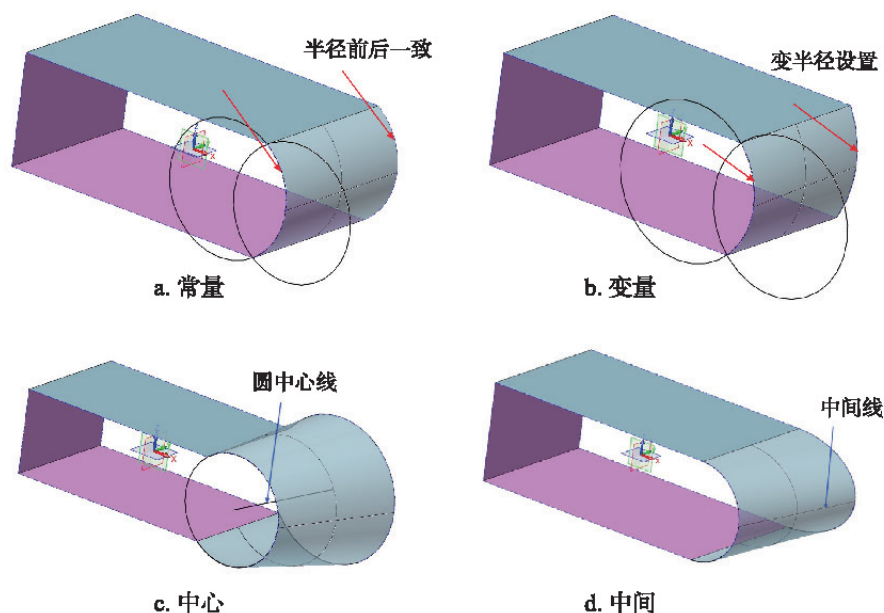


图3-21 圆形双轨曲面示例

(3) 二次曲线双轨曲面，同圆形双轨曲面类似，但创建的曲面的截面是二次曲线（图 3-22），创建的方式有六种：常量、变量、肩点、切点、中心、切边。

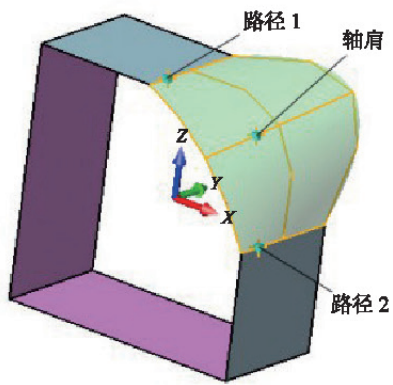


图3-22 二次曲线双轨曲面示例

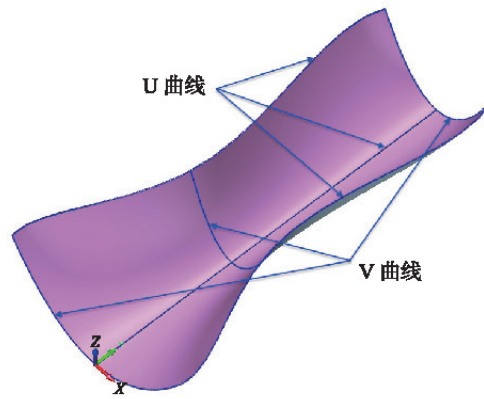


图3-23 U/V曲面示例

(4) U/V 曲面，利用网格的 U/V 线生成曲面 (图 3-23)。

(5) 桥接曲面，将曲面或线进行连接，生成连接曲面。有两种方式：通过实体桥接和通过设定半径桥接 (图 3-24)。

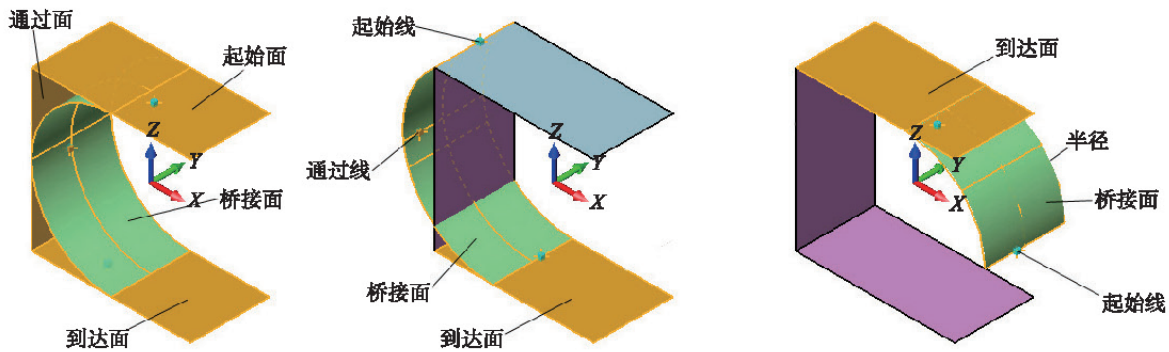


图3-24 桥接曲面示例

(6) 角度曲面，利用投影在面上的线，按一定角度拉伸生成曲面 (图 3-25)。

(7) N 边形面， N 边形面是以闭合的多边形线为边界生成 NURBS 曲面。 N 边形面是基于四边构建原理，当边界为四边时，曲面效果最好；如果边界多于四边，构建的 N 边形面会由 N 个四边形面构成。掌握了 N 边形面的操作，很多曲面设计就可以轻松地完成 (图 3-26)。

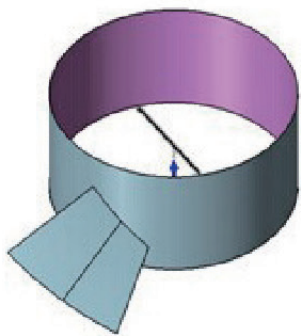


图3-25 角度曲面示例

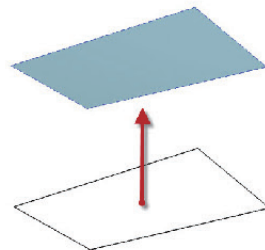
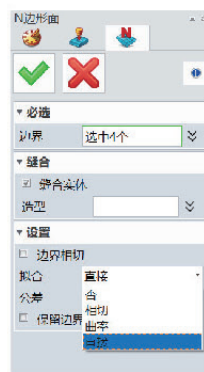


图3-26 N 边形面示例

(8) FEM 面, 利用穿过边界曲线上的点的集合, 拟合为一个曲面 (图 3-27)。

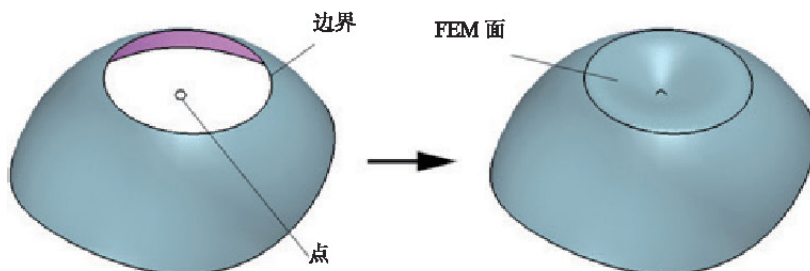


图3-27 FEM面示例

自学技术

请你进行曲面建模命令练习, 注意各参数变化带来的形状变化。



四、转换与组合

曲面和实体可以相互转换, 多个曲面封闭后可以转换为实体造型。同时实体造型删除一些曲面可以自动转换为开放的曲面造型。根据上述基本建模方法, 我们可以得到产品初步的造型, 进一步通过变形、特征操作等方法对实体、曲面进行操作, 逐步实现设计者的构思 (图 3-28)。

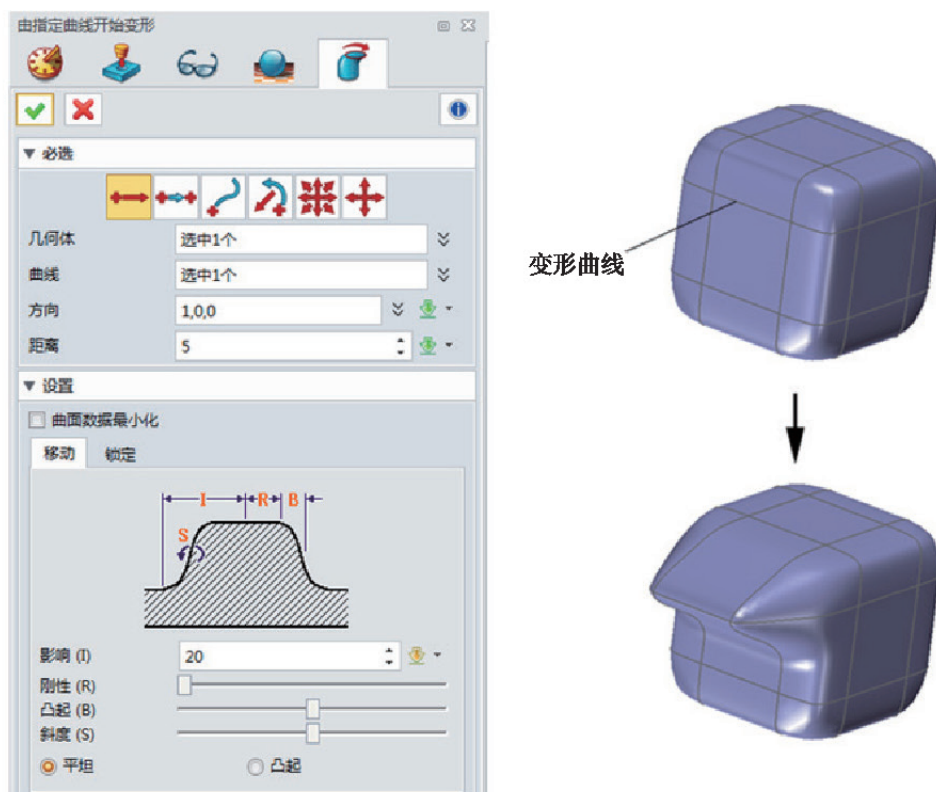


图3-28 造型转换示例

组合(图 3-29)是对已经存在的多个实体进行布尔运算,操作中可设置多个基体和合并体,操作后多个实体成为一个实体。布尔运算有三种:加运算、减运算和交运算。

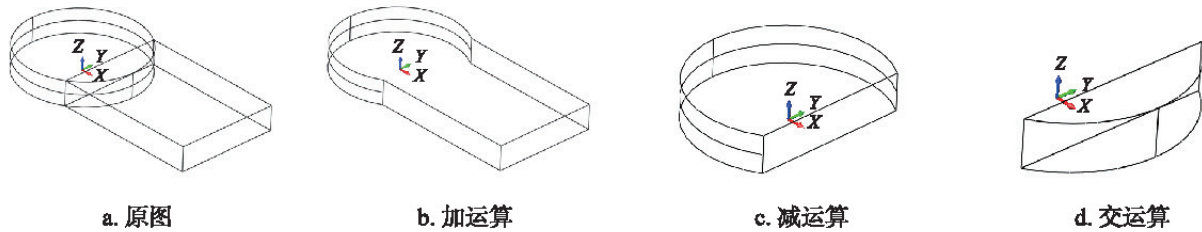


图3-29 造型组合示例

分割实体是利用实体造型或面,将实体进行分割或修剪,被分割或修剪后的实体单独成为造型。同时,分割和修剪功能支持对开放造型的操作(图 3-30)。

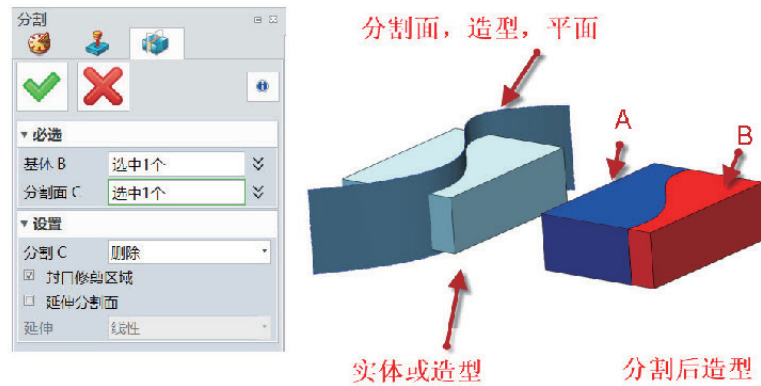


图3-30 造型分割示例

需要分割的实体或造型定义为基体,用边界面或实体造型进行分割(图 3-31)。

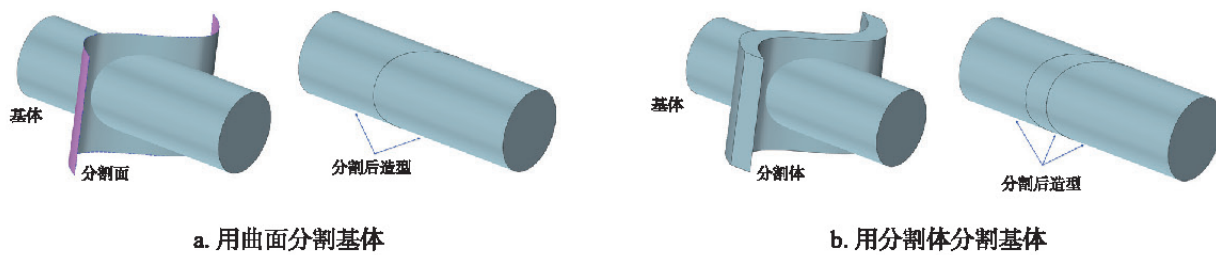


图3-31 基体分割示例

与分割相似的命令有修剪,但是修剪只保留分割面方向一侧的造型(图 3-32)。

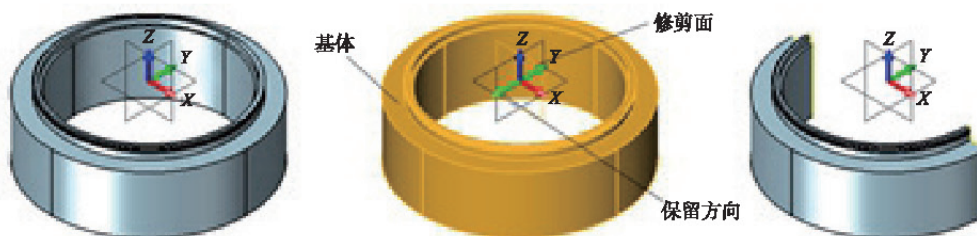


图3-32 造型修剪示例

技术实践

埙(图 3-33)是中国古老的吹孔乐器,在世界原始艺术史中占有重要的地位。它可能来源于古代人民狩猎用的投击鸟兽或模仿鸟类鸣叫、诱捕鸟兽的工具石流星(一种能发出哨声的球形飞弹)。有了制陶工艺后,石器工具逐渐为陶器工具所代替,石流星逐步发展衍变为陶埙(用陶土烧制而成)。随着社会文明的进步,埙演化为单纯的乐器,并逐渐增加音孔,发展成可以吹奏曲调的旋律乐器。

请选择合适的埙实体造型,进行特征操作和布尔运算,建立一个埙体三维模型。



图3-33 埙



创客坊

自然界中的生物很少有规则几何体,我们应该如何建立不规则形体的三维模型?为什么人造产品多选用有规则的形体?

传统制造技术中,常常以规则的模具铸造毛坯料,再用切削工艺加工成型。如何利用三维打印技术设计不规则形体的模具,简化工序,直接铸型呢?

笔筒的设计:简单、规则的形体建模

我们以简单造型的笔筒为对象,学习三维建模的基本方法。三维设计中,一个重要思想是“复杂模型简单化,简单模型平面化”,即把复杂模型拆解为简单模型的组合,简单模型是平面图形的演变。请你观察图 3-34 的笔筒,并分析它是如何建模的。

方法一,使用一个平面的矩形,拉伸为长方体,进行抽壳处理。

这个思路中,首先看到的是整体形状,其次是笔筒的结构,它是一个壳状物体。在建模时,由于圆柱体、长方体都是基本形体,定义起来非常方便。抽壳是产品设计软件中的常用命令。因此,该方法思路简洁,技术简单易行。

方法二,直接使用长方体,生成大小两个形体,进行布尔减运算。

方法三,以中心位置重合的两个矩形为基础,先拉伸外侧的矩形形成基体柱体,然后拉伸内侧的小矩形,通过拉伸去除的方法去除中心的矩形。

此外,圆角、贴图等技巧使笔筒形象更加直观。

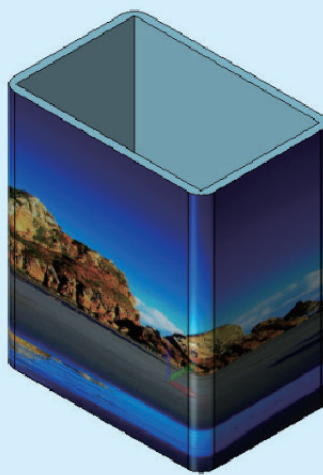


图3-34 矩形笔筒

这些思路的核心是形体构成及其虚实关系，即筒体是两个共轴形体相减的结果，包含了布尔运算，求差的方法。

还可以有其他生成笔筒形体的方法，每种方法都代表了一种建模思路。如果我们需要在设计过程中经常变化笔筒的形状，如何建模？哪种建模方法又快又好呢？

花瓶的设计：复杂形体的设计

通过笔筒案例，我们进行了基本操作训练后，现在来学习比较复杂的形体的建模。花瓶是日常生活中十分常见的摆设品。本例中我们学习花瓶的设计与渲染。笔筒与花瓶形态相近，请大家注意比较它们的建模方法。先参考以下步骤进行建模：

1. 新建“花瓶”文件
2. 绘制草图

在 XZ 工作平面上创建草图，设置标注属性为整数（图 3-35）。

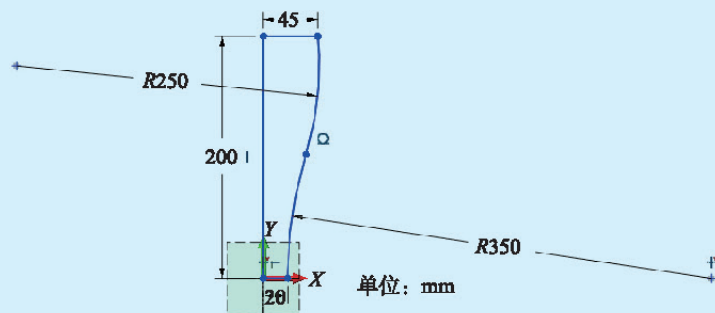


图3-35 花瓶草图

3. 创建旋转体，同时进行抽壳

对草图进行旋转，创建旋转体；对造型进行抽壳，厚度为 -5 mm（负号代表内部）。顶部为开放面（图 3-36）。

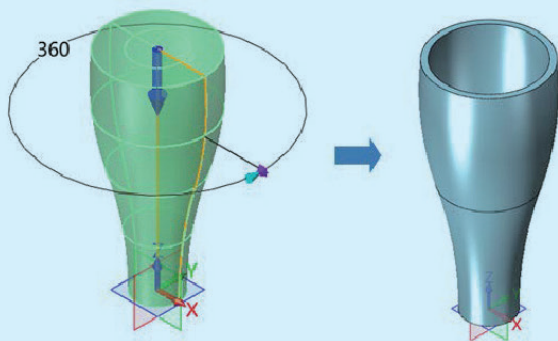


图3-36 旋转体抽壳

4. 瓶底增厚，设置面偏移参数

对花瓶底部进行面偏移，增厚 3 mm。

5. 瓶口造型拉伸切除

在 YZ 工作平面上创建草图，绘制草图后退出，并对草图进行拉伸切除，把花瓶上部分造型切除（图 3-37）。

6. 瓶身凹槽设计

(1) 在 YZ 工作平面上创建草图，绘制草图后退出；对草图进行对称拉伸，布尔运算为基体，距离超过花瓶边界即可（图 3-38）。

(2) 使用相交曲线，提取上步创建曲面和花瓶外面瓶身的相交曲线，再一一提取剩下的相交曲线（图 3-39）。

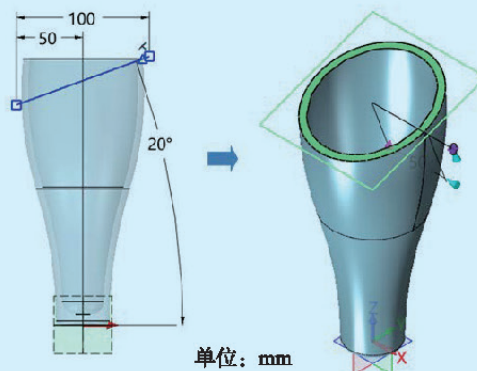


图3-37 花瓶拉伸切除

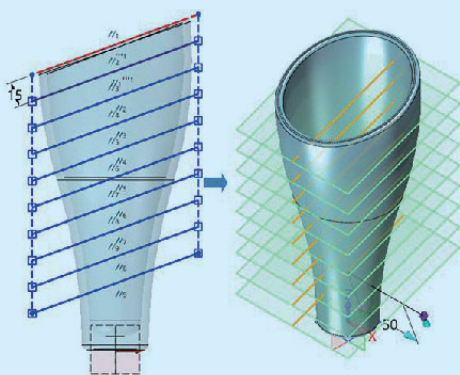


图3-38 瓶身造型与凹槽位置的拉伸

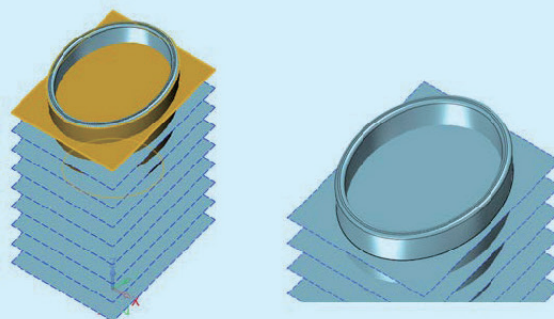


图3-39 提取瓶身造型和拉伸面的相交曲线

(3) 隐藏不需要的曲面（图 3-40）。

(4) 使用偏移，距离为 2 mm，偏移所有曲线（图 3-41）。



图3-40 隐藏瓶身方便编辑相交曲线

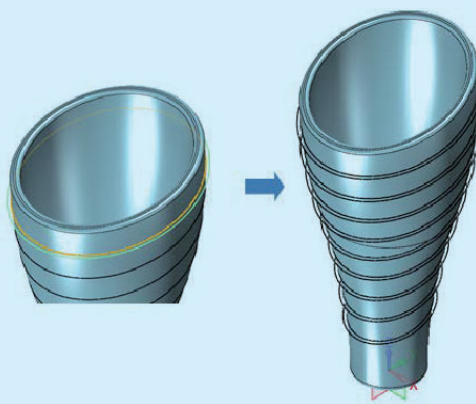


图3-41 相交曲线偏移

(5) 使用杆状扫掠，外部直径为 5 mm，曲线为上步偏移所得曲线，完成所有杆状扫掠操作 (图 3-42)。

(6) 使用组合，花瓶为基体，杆状扫掠所获得的造型为合并体，布尔运算为减运算，并隐藏所有曲线 (图 3-43)。

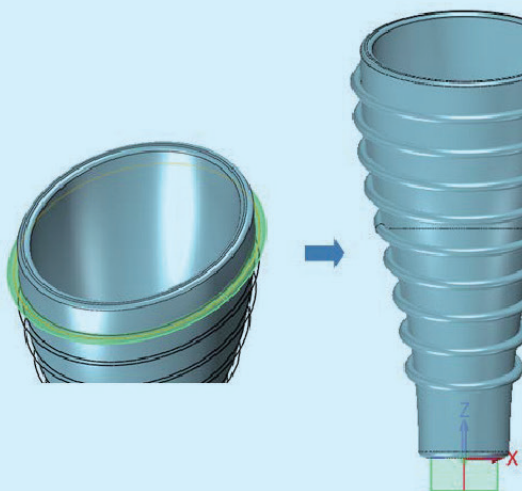


图3-42 杆状扫掠生成基于相交曲线的形体

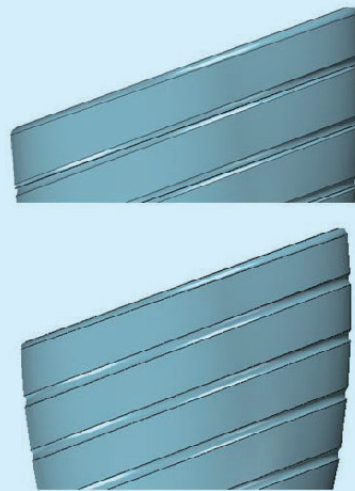


图3-43 造型选择布尔运算选项

7. 边缘细节，内外边倒圆角 (图 3-44)

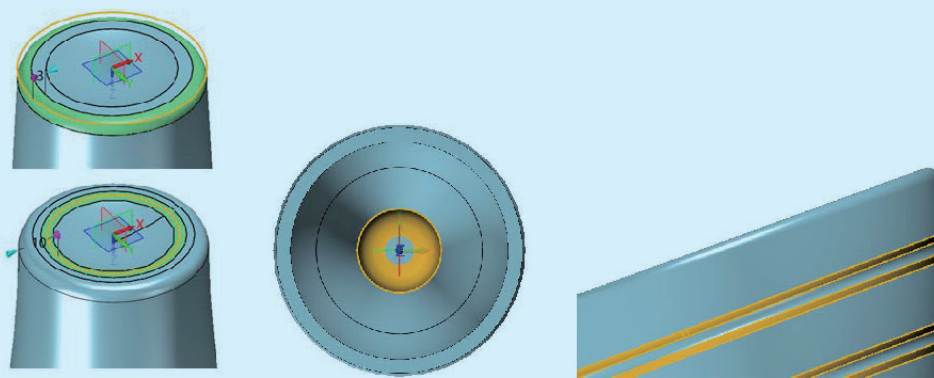


图3-44 造型倒圆角示意

8. 保存文件

9. 渲染效果图的制作

有的软件具有强大的渲染功能，有的软件渲染功能很弱，用它们建立三维模型时，一般可以配合一些渲染器来制作效果图。为了进行场景渲染，新建文件“花瓶”，插入几个花瓶，对其进行移动、旋转，并创建一个桌面 (图 3-45)。

(1) 启动渲染软件，进行地面设置：添加地面反射；照明设置为室内模式，选择等角标准视图；在场景下选择花瓶装配模型，解除链接材质；精确调整视图角度，绕 Y 轴旋转 90°。

(2) 对桌面和花瓶添加不同纹理和材质, 调整比例, 设置桌面为漫反射 (图 3-46)。

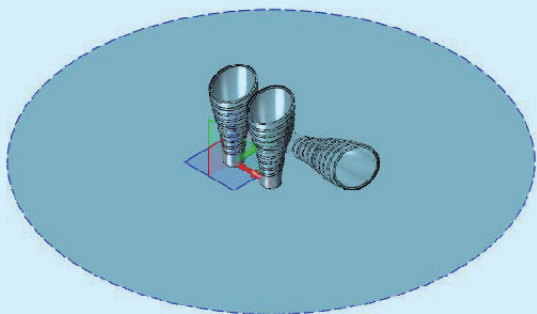


图3-45 花瓶桌面示意



图3-46 花瓶模型渲染效果

问题思考

经过以上两个案例, 同学们是不是对三维建模更加有信心了? 接下来可以进入产品的三维打印流程。根据第二章学习的内容进行技术分析、切片检查, 然后生成 G 代码文件进行打印。请大家注意观察花瓶表面的凹槽, 思考应如何控制打印精度。如何进行后处理加工, 使产品模型与效果图呈现的效果更加接近。

技术探究

在花瓶设计的表现中我们使用了渲染功能, 除了渲染效果图, 三维设计中还可以设计动画, 甚至使用虚拟现实设备来辅助设计的可视化。请查阅相关资料, 研究三维设计软件功能, 探究更加丰富的视觉效果。

创客坊

我们使用的普通水杯 (图 3-47) 正常放在桌上, 容易落灰。把水杯倒放在桌上, 虽然可以避免灰尘落入, 但是杯口会和桌面接触, 照样存在卫生风险。针对这种情况, 有设计师巧妙地在水杯的把手上做文章, 让水杯可以 40° 倾斜倒放在桌上 (图 3-48), 这样既可以沥干水, 又能避免灰尘等落入, 而且杯口还不会和桌面直接接触。

请选择你熟悉的一款三维建模软件, 参照图 3-48, 或重新设计一个既可以沥干水, 又能避免落灰的水杯, 建立三维模型, 并用三维打印机打印出来。

3. 基于角度缠绕

基于角度缠绕与基于长度缠绕类似，它是将草图围绕旋转曲面映射 X 方向，但是角度缠绕假设不论该草图有多大，它应该一直围绕着旋转曲面缠绕，草图的 Y 方向也映射为高度，而不是沿曲线的距离进行映射。

在基于角度缠绕模式中，可指定草图缠绕圆柱体的面积范围（即包括的角度）。角度越大，草图的 X 方向将越宽，缠绕草图的 Y 方向高度保持不变。当只使用一个特定的圆柱体曲面角度，而不考虑实际宽度时，角度选项对设计方案尤为重要。

4. 基于曲面缠绕

该模式假设拥有一个已知参数化的曲面，一个曲线集投影在一个曲面上，然后使用一个直接的 U/V 到 U/V 的映射，将曲线移动到第二个曲面。



第三节 逆向建模技术

问题思考

你听说过三维人像打印吗？这是如何实现的呢？



对于已有产品的原型，例如传统汽车工业中的油泥模型，或者特殊的、难以描述的复杂形体，或者无法找到原始设计文件时，常采用逆向工程或者逆向设计的工作流程：获取实物形状数据，构建数字模型。逆向建模技术相对于从设计、数字模型、物理模型到制造的流程，似乎是逆向的。广义的逆向工程研究的对象实际上包括产品实物、软件（图纸、程序、技术文件）或影像等，除了要实现形状（几何）的逆向重建外，还包括功能、材料等许多方面的逆向追溯。它是通过综合运用专业人员的工程设计经验、知识和创造性思维，对已有产品进行解剖、消化吸收和再创造的过程。大多数逆向工程的研究一般集中在几何形状反求，即重建产品实物的三维模型方面。

逆向建模的关键技术有数字化测量、测量数据处理、数字模型重构（图3-50）。

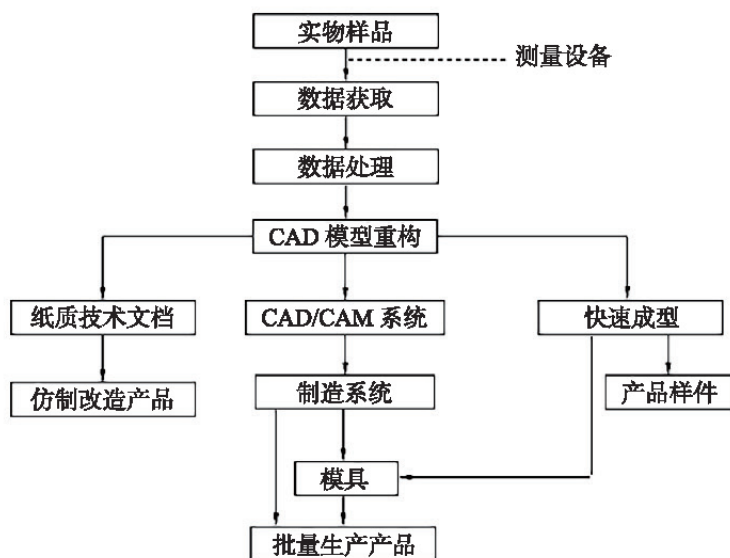


图3-50 逆向工程技术流程

一、三维激光扫描技术应用

三维激光扫描是常用的逆向工程工具，通过数据测量收集三维形体在空间的点，生成点云，然后根据点云和专业知识，构建曲面或实体模型。

1. 数字化测量

数字化测量是逆向工程技术的基础，包括接触式测量（三坐标测量机 CMM、机械臂）和非接触式测量（三维激光扫描、结构白光等）。对产品内部结构进行数据测量的，通常称为内窥测量系统，包括自动断层扫描仪和工业 CT。

2. 测量数据处理技术

采用非接触方法获取的数据通常非常庞大，被称作点云（Point Cloud）。为了获得完整、准确的数据，需要在模型重建前进行数据处理，包括点云数据拼合、特征边界提取、数据精简，具体有坏点去除、点云精简、数据插补、数据平滑、数据分割等工作。

3. 数字模型重构技术

用于计算机图像显示、动画制作、干涉检查、快速原型制造等需要的重建模型，往往需要建立三角网格模型；如果只需要对样件进行简单的仿制，可以直接对点云模型进行处理，直接产生快速原型切片数据或数控加工刀具轨迹；对连续性要求较高的模型，则应建立分片连续的曲面模型；如果需要有限元分析、物性计算或者需要与目前通用的计算机辅助设计系统完全兼容，则可能需要边界表示法（B-Rep），建立实体模型或者更进一步建立特征模型。

二、影像逆向建模技术

使用二维图像序列可以直接形成三维面形数据。其原理是根据照片的成像原理，反求形成照片的三维原物（图 3-51）。分析从多个角度对同一个物体拍摄的照片，比对不同角度所拍摄照片上的特征点，推算出这些特征点的空间位置，最终计算出物体表面的三维数字模型。如果是透明的、发光的、高反光的物体照片，特征点对比困难或失败，就无法生成三维模型。

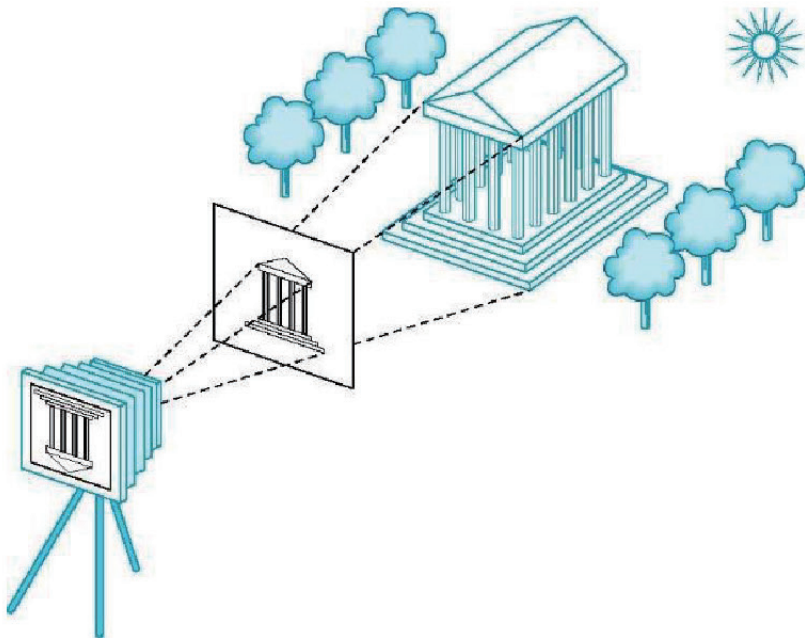


图3-51 虚拟照相机模型

对于大型或固定的物体，我们可以围绕被摄物体拍摄（图 3-52）。对于小型物体，我们也可以转动物体，以便从不同角度拍摄。此外，还可以采用无人机拍摄（图 3-53），或者在摄影棚中使用相机阵列拍摄（图 3-54）。

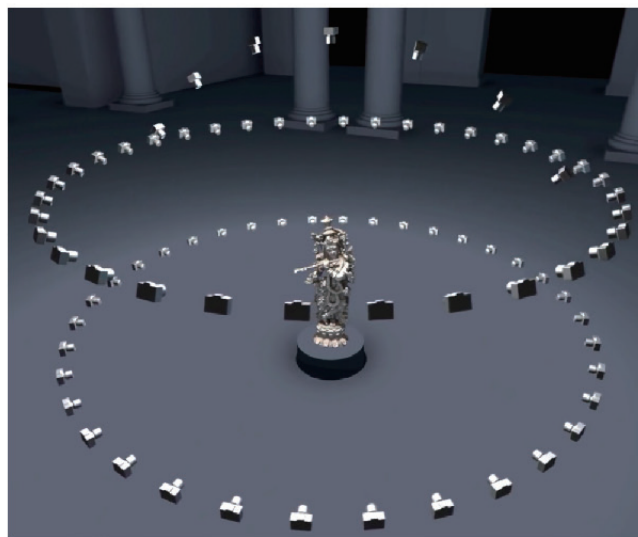


图3-52 多个水平高度的环绕拍摄

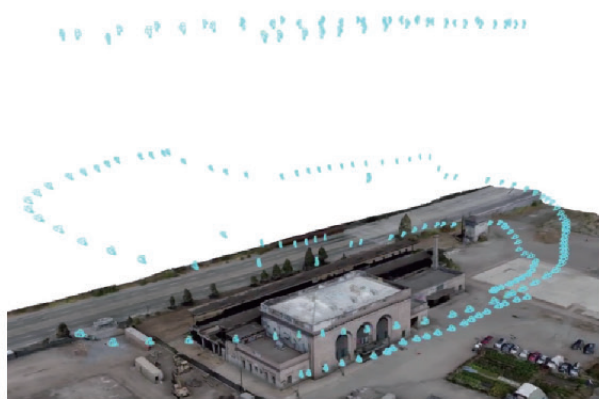


图3-53 无人机拍摄



图3-54 摄影棚的相机阵列拍摄

某些软件可以上传照片到云服务中进行分析运算，模型生成后可以下载到本地。一个三维模型可以使用 2000 张照片来完成（图 3-55，图 3-56）。

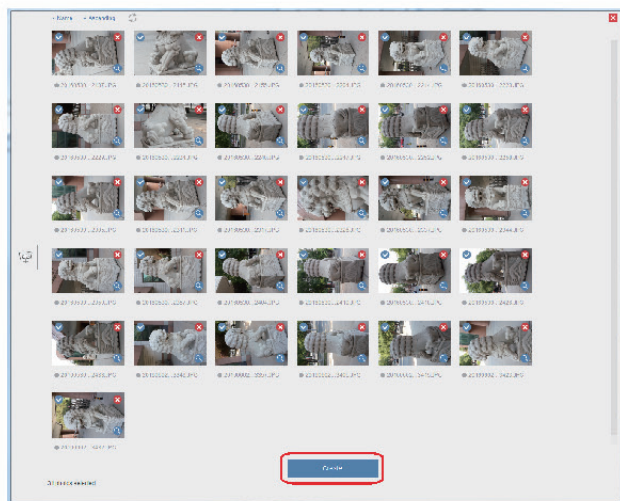


图3-55 上传照片

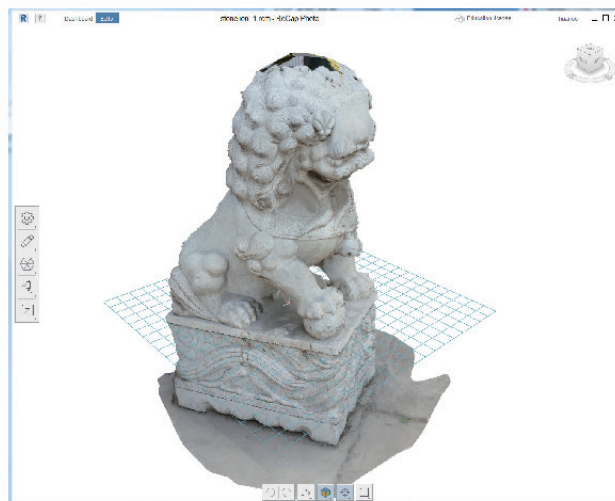


图3-56 下载的三维模型

技术探究

根据条件，选择适当的小物品进行逆向工程实践。



小结与评价

一、小结

回顾本章的学习，同学们学习了使用三维设计软件设计模型，并建立三维数字模型的方法，也了解到三维逆向建模技术的基本情况，能够在三维设计软件中快速表现自己的创意。请通过以下问题进行小结：

- (1) 你是否掌握了一款三维设计软件？
- (2) 你是否体验过三维扫描技术？
- (3) 产品三维建模的技术方法有哪些？
- (4) 如何建立复杂形状的模型？有哪些方法和技术路线？
- (5) 建立了三维模型后，你是否想过如何制作产品的问题？

二、评价

开展一次调查和研讨活动，针对三维设计方法进行讨论，并撰写专题小论文，考查自己对三维设计的认知程度。希望能结合数字模型和三维打印实物，加深对论文的技术分析（参见第二章）。

自我评价：_____。

同学评价：_____。

老师评价：_____。

第四章 三维图样设计

我们能够直观、形象地进行产品三维设计，主要是采用了三维图样表达设计对象。不论是在电脑屏幕上显示产品，还是打印输出产品设计图纸，三维图样都有一定的要求和规则。三维图样应方便我们观察产品、完整清晰地反映出物体的几何特点和结构特征。本章主要介绍三维图样的设计方法，包括产品工程特征的表达，剖视图、装配图的类型和应用方法等。通过学习，同学们能掌握三维视图、三维图样的操作，掌握将三维数字模型转换成相应三维图样、二维机械加工图的方法，把产品三维设计与二维加工制造技术结合起来。



第一节 产品的技术图样

本节针对产品造型、技术分析和技术要求，学习绘制产品的三维图样，为指导加工生产做好准备。

问题思考

产品并非虚有其表，有些看上去天衣无缝的物品，其实是由多个零件巧妙组合而成。三维设计中如何处理零件与零件之间的配合关系？



一、工程特征的表达

产品有多个组成部分或零件，相互之间有关联。产品建模时不能仅考虑造型，还要考虑零件组装与配合。充分利用计算机、网络系统的数据处理和管理能力，把产品零部件的几何尺寸、定位关系等转换为参数，统一管理和协调，就是参数化设计与制造。

讨论交流

查阅相关资料，调查并讨论大型客机的设计与制造流程，它是如何实现全球化、24小时不间断作业的？



特征是有一定拓扑关系的一组实体体素构成的特定形体，它还包括附加在形体之上的工程信息，对应于零件上的一个或多个功能，能够被固定的方法加工成型。特征可以分为成型特征（Form Feature）、装配特征（Assembly Feature）、精度特征（Precision Feature）、材料特征（Material Feature）、分析特征（Analysis Feature）、补充特征（Additional Feature），还有技术特征、管理特征等不同说法，从造型和过程角度加以区别。

技术实践

在设计带盖的茶杯的项目中，如何把杯盖内径和杯口尺寸联系起来，改变其中一个对象时，另外一个对象的尺寸能自动更新？如何通过技术图样，实现产品各部分之间的尺寸协调与配合？



阅读材料

GPS 导航仪外壳造型和结构一体化设计过程

一个完整的导航仪包含电路板、操控按钮和显示屏等，要基于这些已有的零部件设计外壳和其他结构，起到保护、易用和美观的作用（图 4-1）。

（1）上盖设计：使用拉伸、拔模、圆顶曲面等功能（图 4-2 至图 4-9）。

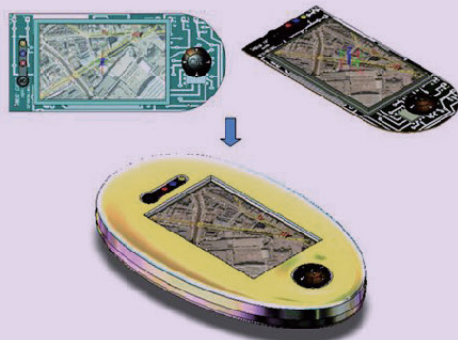


图4-1 导航仪结构示意图

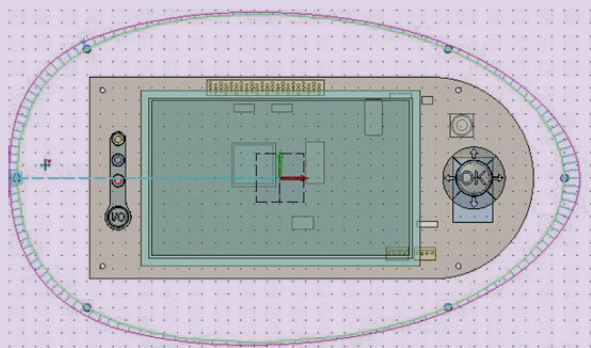


图4-2 绘制草图

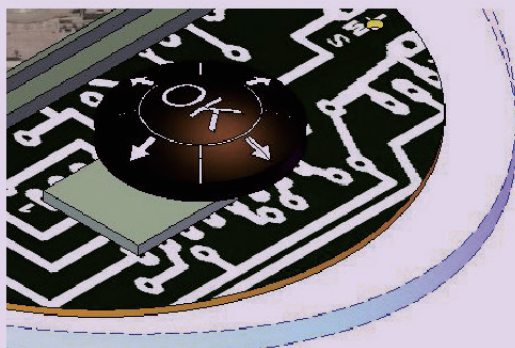


图4-3 拉伸曲面



图4-4 圆顶曲面

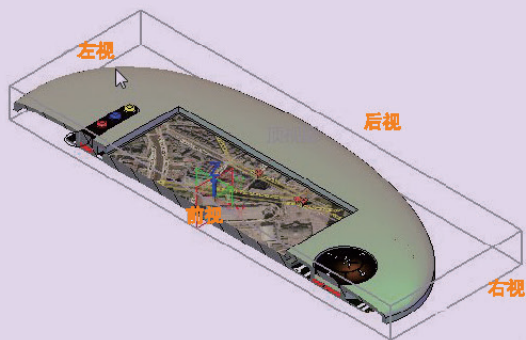


图4-5 经过拉伸、减运算、抽壳形成上盖，注意切口边缘

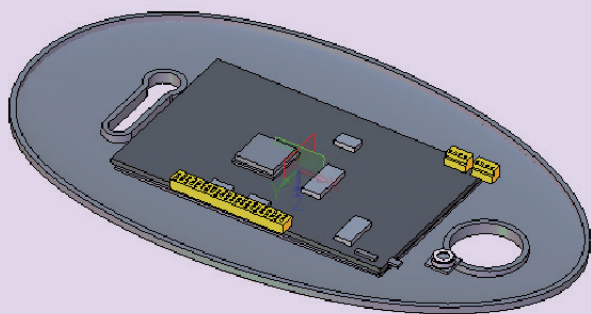


图4-6 内部

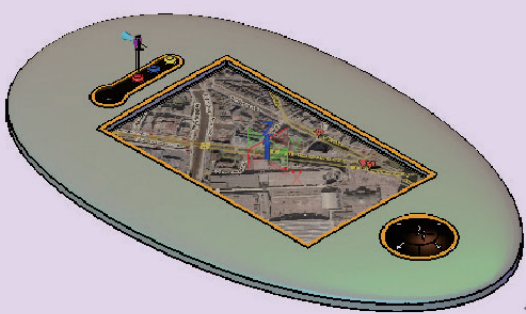


图4-7 切口边倒圆角

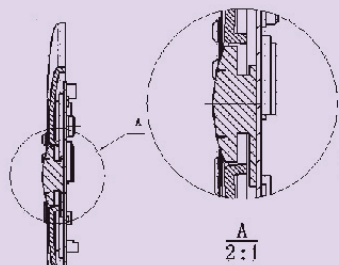


图4-8 工程图纸局部放大

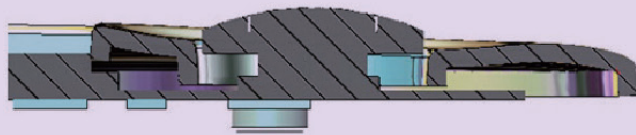


图4-9 剖视图可以清楚显示上盖的结构特征

(2) 底盖设计：使用变形功能，其他与上盖相同（图 4-10 至图 4-12）。

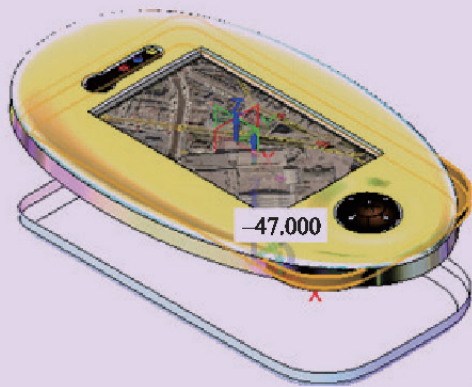


图4-10 插入基本造型

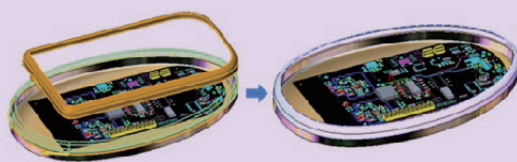


图4-11 使用“变形为另一曲线”

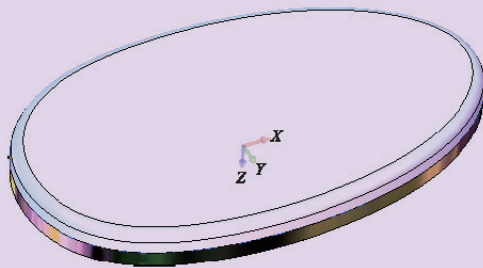


图4-12 使用N边形面完成底面

对 GPS 导航仪机盖的进一步讨论

我们发现很多产品的上下机盖之间并非无缝贴合，而是有一定的间隙（图 4-13），采用“凸缘”特征形成假止口（美工线）。为什么这么做呢？其实是考虑到塑胶制品的材料变形。为了避免随机变形出现在分型面处，造成贴合面错开，影响外观和手感，设计时利用微小的间隙可以消除可能的隐患，也美化了外观。

上下机盖的连接方式常采用卡扣设计（图 4-14），利用塑胶的弹性变形能力，扣合后能恢复原来的形状。卡扣可一体化成型，不需要其他配件，安装和拆卸都比较方便。

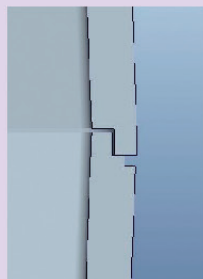


图4-13 机盖间隙

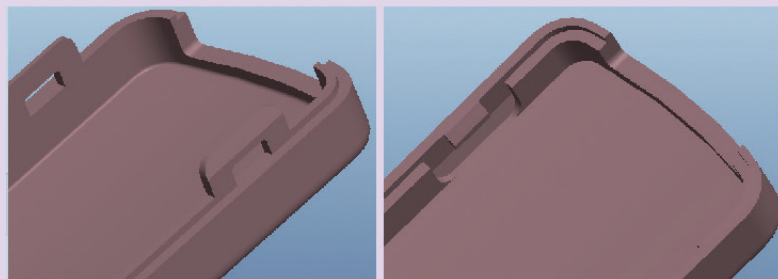


图4-14 卡扣设计



问题思考

请同学们继续完善 GPS 导航仪外壳造型和结构一体化设计，通过产品技术分析，看看还需要哪些结构组成，需要采取哪些技术手段和措施。



在第二章第一节中我们学习了产品的技术要求，下面通过软件操作学习常见工程特征的图样表达。

1. 工程特征操作

工程特征操作基于加工、装配需要，包括倒圆角、倒角、拔模、孔、筋、螺纹、凸缘、坯料。建模示意如下。

(1) 倒圆角 (图 4-15)。

(2) 倒角 (图 4-16)。

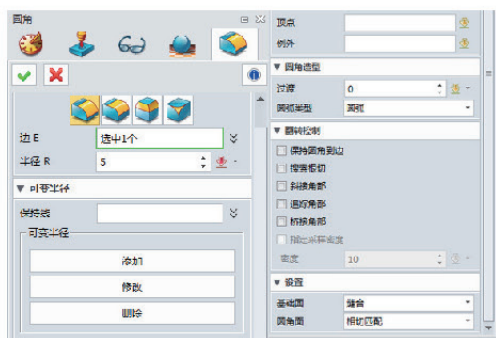
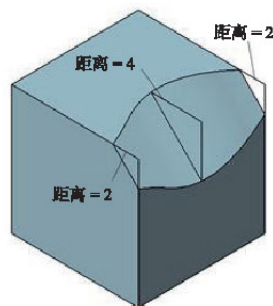


图4-15 倒圆角操作



图4-16 倒角操作



(3) 拔模 (图 4-17)。

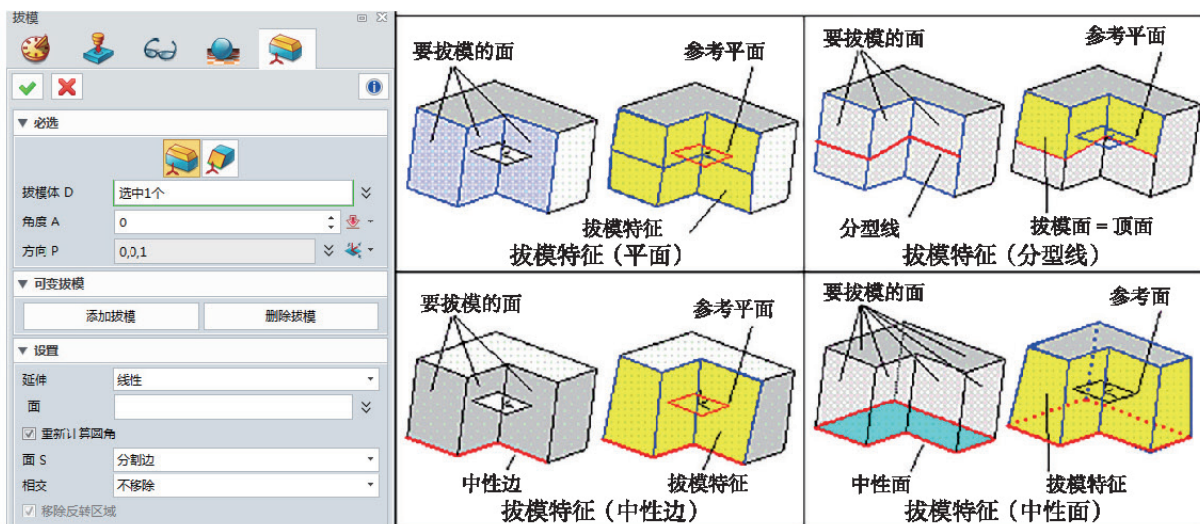


图4-17 拔模示例

(4) 孔设置 (图 4-18)。

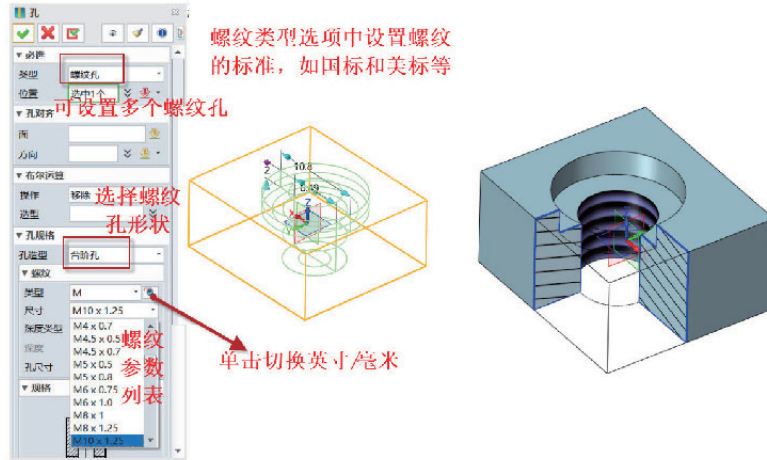


图4-18 孔设置操作

(5) 加强筋 (图 4-19, 图 4-20)。

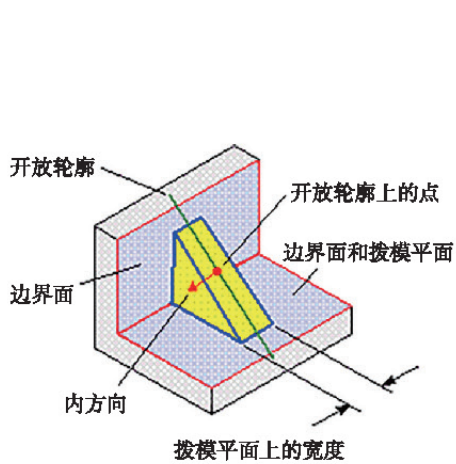
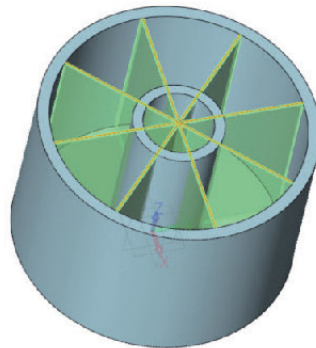


图4-19 加强筋示例

草绘轮廓



选择不同的草绘, 设置不同的加强筋厚度

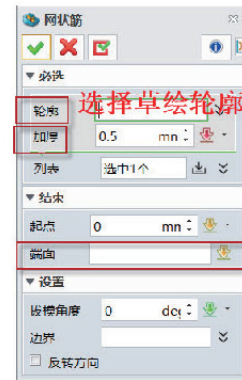


图4-20 加强筋操作

(6) 螺纹 (图 4-21)。

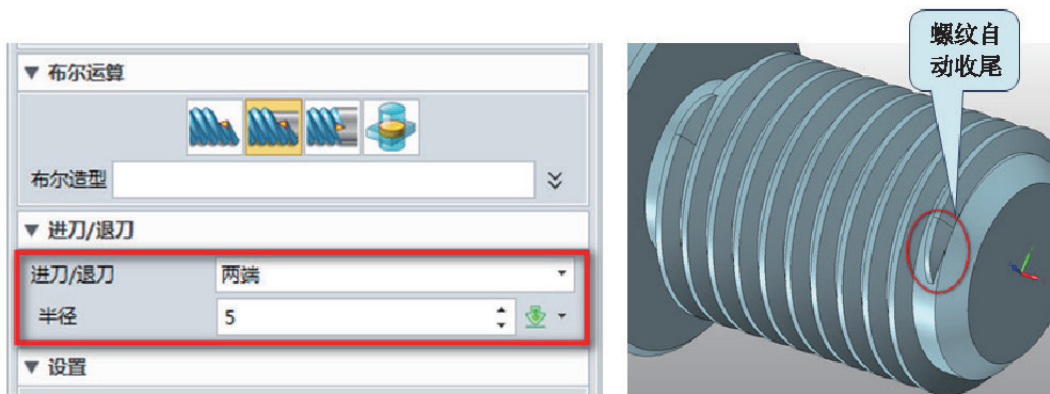


图4-21 螺纹设置

(7) 凸缘(图 4-22)。

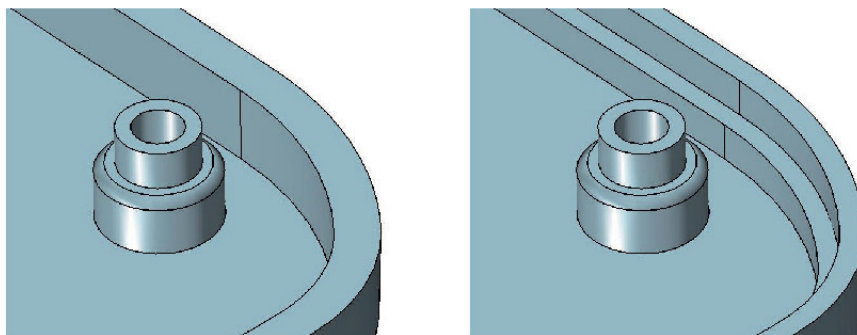


图4-22 凸缘示意

特征可以作为造型编辑,进行阵列(图 4-23)和镜像(图 4-24)等操作。

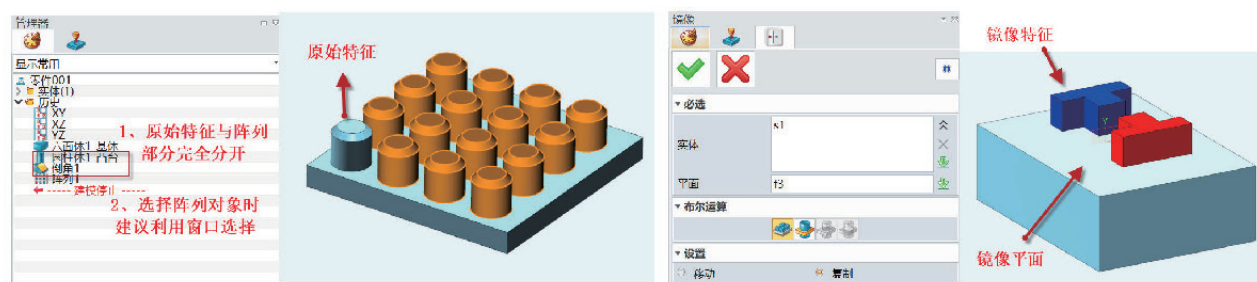


图4-23 阵列示意

图4-24 镜像示意

经过直接建模和工程特征操作后的产品外壳如图 4-25 所示。

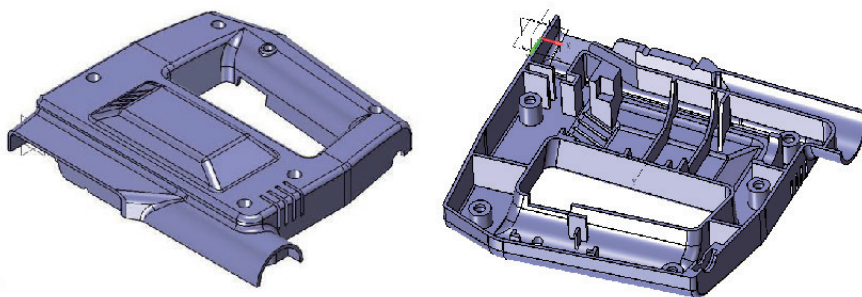


图4-25 产品外壳

技术探究

请以鼠标为例,观察各组成部分造型内部的“特征”设计。



2. 基准面的概念

建立基准面是所有产品参数化设计过程中必不可少的环节,对于特征的建立也是非常重要的,它的作用主要是作为草绘平面、参考面、尺寸标注、特征建立、零件剖截面、镜

射特征与零件组合装配的参考。建模过程中，系统都会默认三个基准面，但是对于复杂结构建模是远远不够的，往往需要根据设计需求建立适当的基准面。基准面帮助我们更加方便地找准视角观察模型、绘制二维线框等。

新建零件图时，系统会自动在 origin 处生成 XY 、 YZ 、 ZX 三个标准基准面，同时可以使用基准面功能，自行创建需要的参考基准面。单击工具栏“造型”→“基准面”功能图标，系统将弹出“基准面”对话框（图 4-26）。

(1) 平面法：根据参考基准建立基准面，例如一条曲线、一条边、一个圆弧面或者一个平面。

(2) 三点法：选择定义原点、 X 点和 Y 点建立基准面。

此外，可以利用原始基准面进行偏移、旋转生成新的基准面。利用当前视角方向的视图创建基准面，利用两个实体的点、线、面等特征生成基准面，这种方法多用于建立组装件的基准面。

拖拽基准面功能用于调整基准面的大小（图 4-27）。

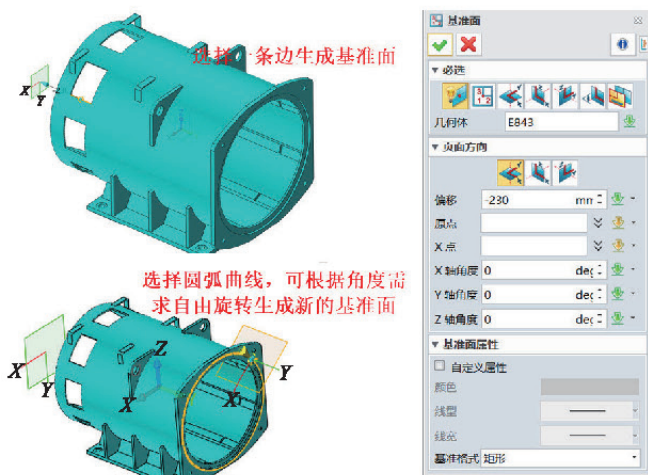


图4-26 选择曲线或边建立基准面

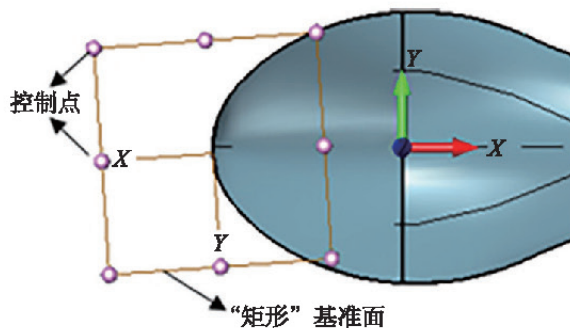


图4-27 拖拽基准面

技术探究

如何利用特征和基准面快速设计杯盖，例如给杯盖和杯口加上螺纹口？

二、装配设计

装配设计是产品设计中重要的环节之一，因为产品往往包含很多零部件和组件模块。装配就是在完成零件设计后，将设计好的零部件按设计要求的约束条件或连接方式组织在一起形成一个完整的产品或机构装置。模型装配的过程就是将各零件组装成一个整体并能满足设计功能的过程。装配管理器用树形图表示装配结构（图 4-28），每一个组件的装配关系作为树形结构的节点，可以查看每个部件的装配关系。

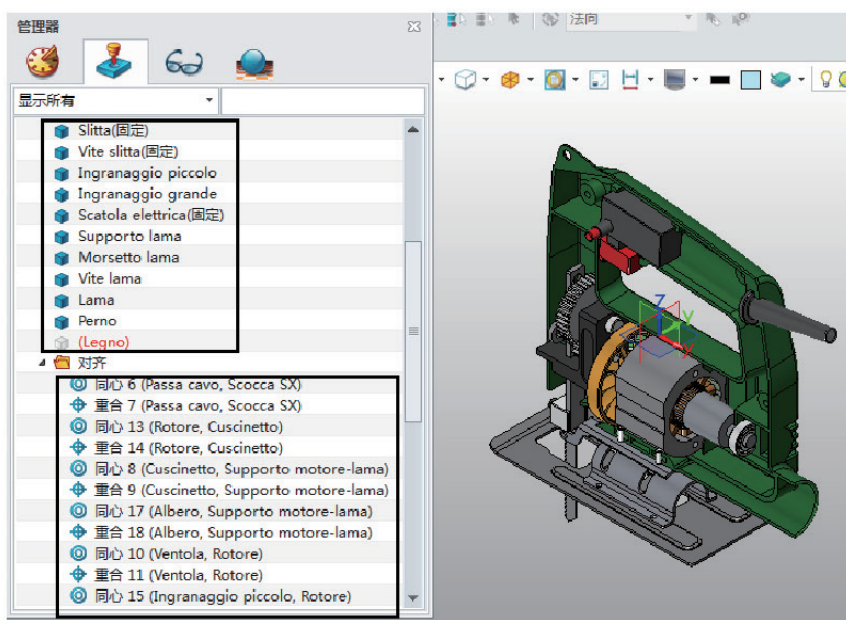


图4-28 装配管理器

在装配模式下，零件或组件插入装配体文件中，一些组件，如底盘，被定义为“固定组件”，其他零件与固定组件通过各种方式对齐（图 4-29）。

▼ 对齐

选项	约束						
值 / 范围:	•	•	•			•	
偏移 / 最小 / 最大:	•	•	•				
角度 / 最小 / 最大:						•	•
共面 / 相反:	•	•	•	•			
比例 # 齿数:							•
齿数 1/2 齿数:							•

图4-29 对齐选项示意

在大型、复杂的工业产品中，装配功能决定了产品从设计到生产的效率——如何协调各个部件之间的关系，避免干扰等。装配通过约束关系将零件进行装配组合，在装配环境下生成部件并进行编辑，装配的零件在任何情况下都保持相关性。

建立装配的方式有“自底向上”和“自顶向下”两种方式。

使用“自底向上”方式时，首先用软件绘出全部零件，然后新建一个装配图，将零件调入，并约束零件间的关系，达到最后装配的效果。“自顶向下”方式则相反，首先在装配图中绘出各个部件，然后用提取零件的功能，将装配中的零件提出，形成零件图，从而完成整个图纸。

二、二维和三维剖视图

对于内部结构复杂的产品，剖视图是非常重要的图样。三维设计中获得剖切视图的方法有以下几种，同学们结合设计多加练习。

1. 平面剖切

通过定义一个对齐平面和一个偏移量来显示截面（可调节单个截面）。

2. 切割截面

通过定义一个对齐平面和一个偏移量及厚度来显示截面（可调节两个截面）（图 4-31，图 4-32）。

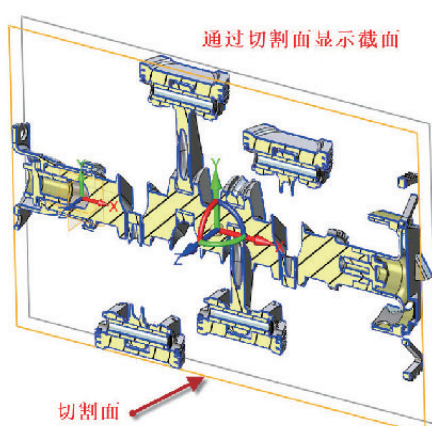


图4-31 切割面位置

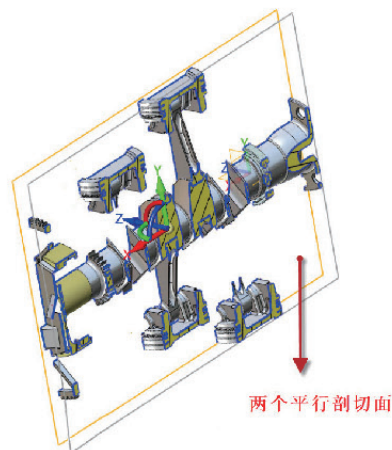


图4-32 截面图

3. 线框范围截图

通过定义一个对齐平面和其顶面、前面、右面、左面、后面、底面六个面中任意一个面的偏移量来显示截面（可调节六个截面）。在该模式下，我们可以根据视图和设计的需要同时调用六个平面对实体进行剖切。

4. 通过轮廓显示截面

通过草绘剖面轮廓来显示截面（截面自定义）(图 4-33)。

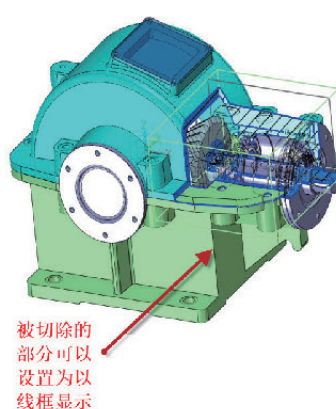
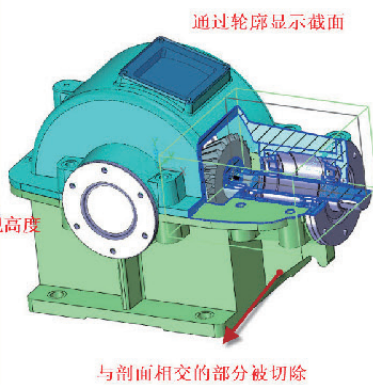


图4-33 剖面轮廓显示截面

阅读材料

有些铸件具有复杂内腔，通过正常视图很难看到内腔结构，即使通过剖切视图也无法看到全部内腔结构（图 4-34）。而型芯是铸型的一个重要组成部分，是形成铸件的内腔、孔洞和形状复杂阻碍取模部分的外形以及铸型中有特殊要求的部分。针对这种结构，需要快速抽取内腔并进行型芯设计。

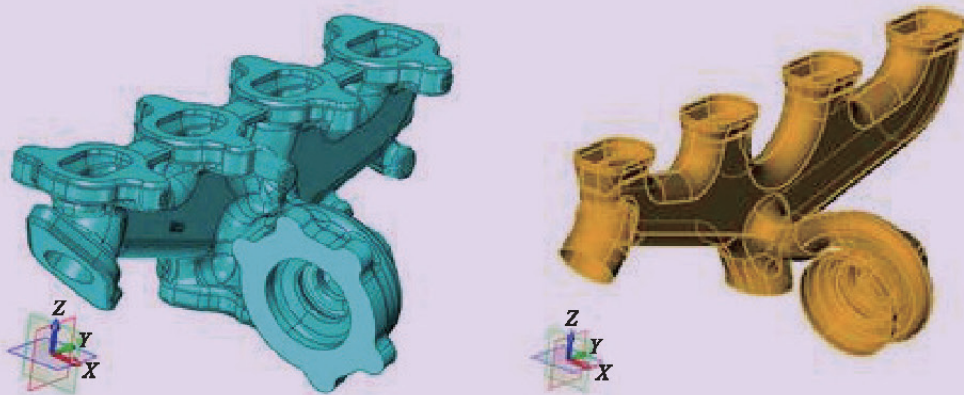


图4-34 复杂铸件及其内腔示意



三、三维装配图样

在设计阶段，为了更好地厘清思路，产品结构更加直观，经常使用的三维图样是分解图，也叫“爆炸图”。爆炸图常出现在加工指导和产品说明书中。下面简要介绍制作爆炸图的主要步骤。

(1) 完成产品的设计及装配后，点击爆炸视图图标后出现对话框。

(2) 点击对话框中的“添加步骤”，进入移动对话框，选择要移动的零件做位移或者旋转操作。

(3) 移动完成后点“确认”退出，再点击“添加步骤”，重复操作，直到把各零件移动到相应的位置，最后完成分拆（图 4-35）。

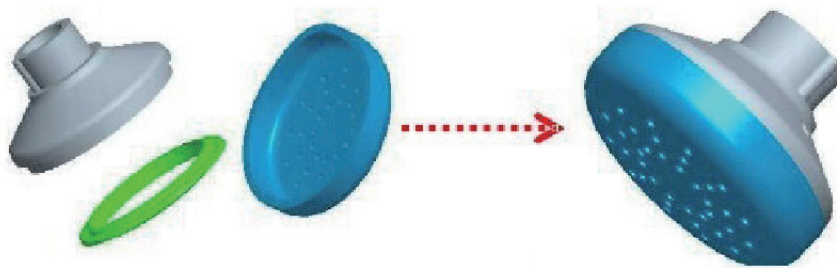


图4-35 分解图示意

(4) 完成组件分拆后，还可以通过动画来展示分拆及组装过程。

(5) 工程师可以根据需要, 点击“爆炸视频”功能, 把需要输出的爆炸视图输出为 AVI 格式的视频。

以上是自定义爆炸视图的相关操作步骤。也可以通过自动爆炸功能来添加爆炸视图。点击“由自动爆炸添加”, 根据需要指定炸开距离, 即可自动生成爆炸视图。通过以上自定义和自动炸开这两种方式, 工程师能高效便捷地获得爆炸视图, 以便在出工程图时, 根据需要进行爆炸视图的调用。

三维图样得到广泛应用, 依赖于三维数字模型的成熟, 三维数字模型的进步也推动了三维图样技术的研究。未来的智能制造技术为产品设计与制造带来更多的可能性。

小结与评价

一、小结

三维图样是以三维数字模型为基础, 根据投影原理、计算机图学原理, 加深对产品设计的技术表达、分析、测试和优化, 随着三维设计和三维制造技术的发展, 三维图样技术将更加强大。通过以下问题对本章的学习进行小结:

- (1) 三维图样的技术背景是什么? 传统设计时绘制的轴测图和透视图, 与三维设计的三维图样有什么区别?
- (2) 如何从三维设计中得到二维图样?
- (3) 如何通过三维图样全面表现三维产品设计?

二、评价

在本课程的学习过程中, 我们尝试了许多三维产品的设计与制作, 希望大家能进行回顾与总结。例如创意台灯的设计与制造, 现在结合了三维设计与三维打印技术知识, 你能否结合三维打印机的成型工艺特点, 再次对设计的产品进行技术分析, 重新进行三维设计, 并在软件中进行预装配和测试, 分析台灯的受力状况, 解决平衡与稳定的问题。将台灯的构思转化为台灯的三维设计模型数据后, 通过三维打印机进行打印, 并转化为数控加工或者其他机械加工图样, 开展实践, 最终对不同的技术方案三维模型进行后期处理、模型组装并进行设计作品功能验证和测试。

请撰写以上实践过程的技术分析报告或者心得体会, 向大家介绍你的发现和收获。

自我评价: _____。

同学评价: _____。

老师评价: _____。

后 记

本教材是根据教育部颁布的《普通高中通用技术课程标准（2017年版）》编写的。在编写过程中，我们以落实立德树人为宗旨，以培养学生的正确价值观、必备品格和关键能力为目标，通过案例引入、任务引领、问题嵌入的方式，整合基础知识和实践内容。在教学内容的选择及教材内容结构的架构上，力求从学生的真实需求出发，让学生面向真实世界的真实问题，采用任务驱动的形式体现学生为中心、实践为核心的学习过程，以促进学生创新思维能力的提高和学科核心素养的养成。

本套教材的原主编为孙世强、鲍琰、陈玲玲。本套教材的修订主编为陈玲玲、王永奉，副主编为王明彦；本册教材的主编为邹越，由邹越、曹多莲、刁彬斌、张锦良、李英杰、董长勇、孙洪波编写。

本册教材的编写工作得到了北京教科院孟献军老师、山东省教科院王秀玲老师、湖南省教科院董仲文老师、贵州省教科院刘惠平老师、河北省教科所王秋岩老师及石家庄市教科所胡刚老师等的大力支持和指导，在此深表感谢。

本册教材在山东、北京、河北、湖南、贵州、四川、广东等多个省（市）进行了试教，并请了一批一线教师进行了审读，根据师生的反馈意见，我们对本册教材先后进行了多次修改。在此，对参加审读与试教的各位老师和同学一并表示感谢。