



正逆向混合建模技术

1.1 逆向工程技术简介

逆向工程(reverse engineering, RE)也称为反求工程或反向工程,是一种产品设计技术再现过程,即对目标产品进行逆向分析和研究,并得到该产品的制造流程、组织结构、功能特性及技术规格等设计要素,然后在理解其原始设计意图的基础上进行再设计,以制作出外形或功能相近,但又不完全一样的产品。逆向工程源于商业及军事领域中的硬件分析,其主要目的是在不能轻易获取产品必要的生产信息的情况下,直接对成品进行分析,推导出产品的设计原理。

逆向工程的概念是相对于传统的产品设计流程即所谓的正向工程(forward engineering)而提出的。正向工程是指产品设计人员根据市场的需求,提前对产品的外部形状、功能特性和部分参数等进行规划,再利用三维 CAD 软件得到其三维数字化模型,然后对三维数字化模型进行 CAE 分析和快速成形以便于细节修改和功能完善,最后测试完成便进入批量生产制造。广义的逆向工程是指针对已有产品,消化吸收其内在的产品设计、制造和管理等各方面技术的一系列分析方法、手段和技术的综合,其研究对象主要是实物、影像和软件。狭义的逆向工程是指运用三维测量仪器对产品进行数据采集,根据所采集的数据通过逆向建模技术重构出产品的三维几何形状,并在这基础上进行创新设计和生产加工的过程。逆向工程与传统的正向工程不同之处在于两者的设计起点不同、设计要求和设计自由度也不相同,正向工程和逆向工程的流程如图 1-1 所示。

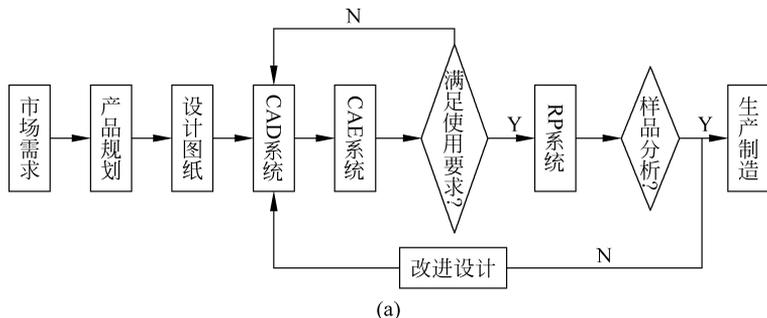


图 1-1 正向工程与逆向工程的具体流程

(a) 正向工程的流程; (b) 逆向工程的流程

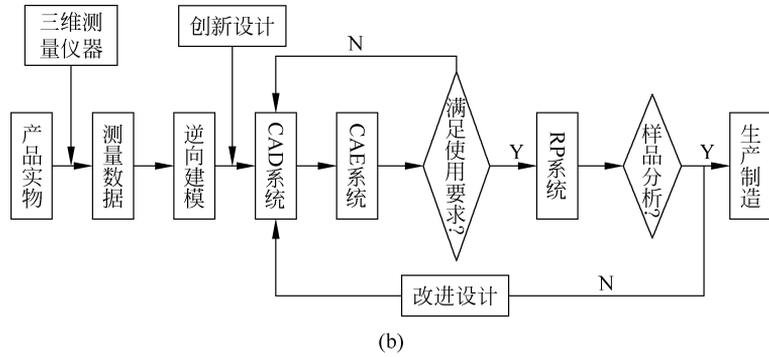


图 1-1 (续)

逆向工程不同于仿制,不是简单地复制产品模型,而是作为一种先进的设计方法被引入到新产品的开发和设计流程中,在重构产品 CAD 模型的基础上对产品的设计意图进行研究分析,是一种产品再设计和超越现有产品的过程。

1.2 逆向建模的概念和方法

国内外目前有关逆向工程的研究是以几何形状重构的逆向建模技术为主要目标。逆向建模就是针对已有的产品模型,利用三维数字化测量设备准确、快速地测量出产品表面的三维数据,然后根据测量数据通过三维几何建模方法重建产品 CAD 模型。逆向建模的具体流程如图 1-2 所示,可分为以下几个阶段。

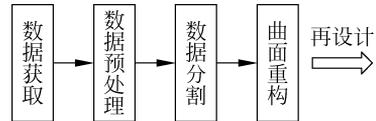


图 1-2 逆向建模流程

(1) 数据获取: 利用三维测量仪器对实物模型进行测量得到模型表面三维数据;

(2) 数据预处理: 对测量数据进行拼合、简化、过滤、三角化等预处理;

(3) 数据分割: 由于测量模型通常由多个不同几何特征的曲面组成,因此需要对测量数据进行分块;

(4) 曲面重构: 对各子曲面按其几何特征进行曲面拟合,最终重建得到产品完整的曲面模型。

逆向工程是基于对产品各部分进行功能分解,深刻理解各部分或功能的原始设计目的的逆向建模基础上,对其重构得到的 CAD 模型进行创新性修改,是基于原产品设计的再设计。

目前应用较多的逆向建模方法主要有: 非特征建模,特征建模,参数化建模和混合建模。以上逆向建模方法在逆向工程中应用比较广泛,但在实现基于逆向工程的曲面重构和再设计功能方面均有不足之处。

非特征建模一般是指应用矩形域曲面如孔斯曲面、贝塞尔曲面、B 样条曲面和 NURBS 曲面等来重建得到原产品的曲面模型,该方法虽然能表达形状复杂的产品模型,但是由于不能很好地反映产品的原始设计意图,所得到的 CAD 模型只是对原产品的简单复制,主要用途还局限于数据的可视化和产品的快速成形。

特征建模一般是指通过抽取表达原始设计意图的、蕴涵在测量数据中的特征,重建出基于特征表达的曲面模型,然后经过求交裁剪等处理后重构得到原产品的 B-rep 曲面模型。

但是该方法只是单纯地重建曲面特征,忽略了特征之间的几何约束关系,不利于对产品进行创新和再设计。而且,对于组合特征(孔、槽、凸台等)的提取要求零件呈序列化特征,只适用于可参数化修改的简单二次曲面,应用范围较窄。

参数化建模一般是指通过提取隐含在产品模型中的原始设计参数,然后在可参数化修改的 CAD 软件中对有参特征进行编辑,如进行圆整编辑等。该建模方法能够比较方便地进行参数化修改,一定程度上提高了模型重建的效率。但能提取到的参数信息有限,一般只适用于产品表面为规则曲面的模型,对于自由曲面等复杂曲面无法进行编辑修改。

混合建模是目前逆向工程中应用最为广泛的一种建模方法,其建模流程一般是首先在逆向建模软件中重构得到产品的三维表面数据,并将表面数据中有参特征的参数提取出来,然后将其导入正向建模软件中进行编辑修改和实体建模,即将逆向建模和正向设计有机结合,充分发挥各自的优势。该建模方法能有效反求产品的原始设计意图,能提高反求模型参数化修改能力,有利于产品的创新再设计。该建模方法的流程如图 1-3 所示,这种基于正逆向建模软件的混合建模方法在建模过程中人机交互操作比较多,而且重建得到的曲面精度不高,在正向软件中曲面重构后一般都要进行误差分析,若重要曲面重建的差值太大,还要重新修改,建模耗时长。

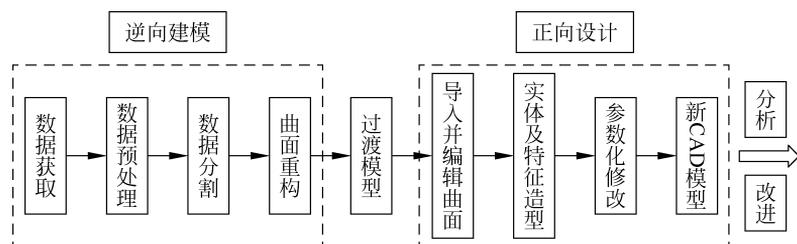


图 1-3 混合建模一般流程

其他混合建模方法还有:基于特征建模与非特征建模的混合建模方法和基于集成测量仪器的混合建模方法。基于特征建模和非特征建模的混合建模方法是指对同一产品模型中的不同几何特征的曲面采用相应的重构方法——将二次曲面、过渡曲面和规则曲面的特征信息抽取出来,再用 NURBS 曲面的形式重建各自由曲面,最后通过曲面间的拓扑约束和全局优化来生成最终的曲面模型。这种建模方法能处理融合了特征曲面和自由曲面的复杂模型,能提高对重建模型编辑修改的能力和建模效率。但是在进行曲面重构时,由于各曲面在公共边界及公共顶点处相互影响和制约,所以会出现无法精确表达 G1 连续性的情况。基于集成测量仪器的混合建模方法是指将多传感器——接触式与非接触式——组合成一个数据采集系统,然后应用不同传感器的优点以采集产品模型的数据更完整、精度更优良的表面信息。这种建模方法弥补了不同测量仪器的测量缺陷,数据采集的灵活性更高。但是这种建模方法中测量路径的优化亟待更深入的研究,而且存在不同仪器测量数据之间匹配精度不高的问题。

1.3 Geomagic Design Direct 软件混合建模技术

Geomagic Design Direct(构建于业界领先的 SpaceClaim® CAD API)是 Geomagic 公司推出的一款正逆向直接建模工具,兼有逆向建模软件的采集原始扫描数据并进行预处理的

功能和正向建模软件的正向设计功能。它在一个完整的软件包中无缝结合了即时扫描数据(点云或网格面)编辑处理、二维截面草图创建、特征识别及提取、正向建模和装配构造等功能。基于 Geomagic Design Direct 的混合建模,用户可以直接将点云扫描或导入至应用程序,然后使用丰富的工具命令快速地创建和编辑实体模型。无需复杂的特征历史树向后保留建模过程,用户同样也可以自由地快速修改设计,并且无拘无束地更改特征参数。

逆向建模技术和正向设计方法在构建产品的 CAD 模型时各有其长处,逆向建模的优势在于对原始测量数据的强大处理功能和曲面重构功能,正向设计的优势在于特征造型和实体造型功能,对几何特征的编辑修改比较方便。

Geomagic Design Direct 正逆向建模软件相对于其他逆向建模软件的优势在于融合了逆向建模技术和正向设计方法的长处,可以对原始扫描数据进行优化处理并封装得到网格面模型,能便捷地从网格面模型中获取截面草图并进行编辑,准确地识别并提取三维规则特征如二次曲面(平面、球面、圆锥面和圆柱面)与规则曲面实体特征(拉伸体、旋转体和扫掠体)。而且,具有强大的正向实体建模功能——既可对识别提取的规则特征进行编辑修改,还可对重构得到的实体模型进行创新性再设计。另外,对于不完整的原始扫描数据,在只能提取一些必要的截面草图和特征信息的情况下,也能重构得到产品完整的 CAD 模型。在 Geomagic Design Direct 中混合建模的具体流程如图 1-4 所示。

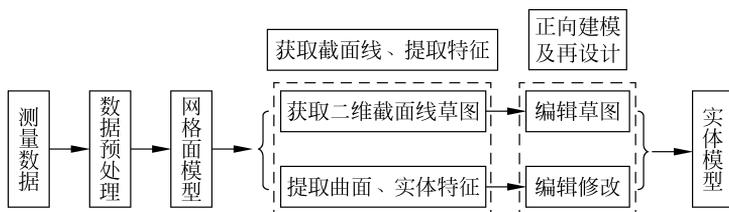


图 1-4 Geomagic Design Direct 混合建模流程

Geomagic Design Direct 正逆向建模软件与应用较为广泛的逆向建模软件 Geomagic Studio 二者之间的区别主要在于:重构得到的 CAD 模型的类型不同,能否对重构得到的特征参数便捷地编辑修改。在 Geomagic Design Direct 中重构得到的是实体模型,通过计算并提取三角网格面模型中不同区域的曲率、法矢方向等参数,拟合得到相应的三维实体特征。在 Geomagic Studio 中重构得到的是曲面模型,需对三角网格面模型按几何形状特征进行划分,然后在划分后的各子网格面中分别拟合得到相应的三维曲面特征。相对于曲面模型,实体模型能更加完整、严密地描述模型的三维形状。而且,若要对 Geomagic Studio 重构得到的曲面模型进行参数编辑修改以实现创新性再设计,首先需应用其参数转换功能将曲面模型传送到正向建模软件,再通过求交裁剪等操作重构得到实体模型,然后才能对部分特征参数进行编辑修改,过程比较繁杂。而在 Geomagic Design Direct 中可直接对重建的实体模型进行草图编辑和参数化修改,无需导入正向设计软件,可在同一软件中实现正逆向设计的结合。



● Geomagic Design Direct建模技术基础

2.1 Geomagic Design Direct 软件介绍

Geomagic Design Direct 是由美国 Geomagic 公司开发的一款功能强大的计算机正逆向混合设计软件。Geomagic Design Direct 可以从网格对象直接建模和抽取几何形状成 CAD 面和实体,是业界唯一一款结合了实时三维扫描、三维点云和三角网格编辑功能以及全面 CAD 造型设计、装配建模、二维工程图等功能的三维设计软件。

Geomagic Design Direct 的主要优点如下:

(1) 更快捷的建模。用户可以直接将点云扫描或导入至应用程序,然后使用动态推/拉工具集快速地创建和编辑实体模型。无需复杂的历史树,用户同样可自由地快速修改设计,无约束地更改参数。

(2) 更容易学习。Geomagic Design Direct 的直观控件和常规的正向造型思路使得设计人员可富有成效地实现 CAD 建模。

(3) 高度兼容性。Geomagic Design Direct 可通过第三方插件的组合进行定制,而且它很容易与主要的外部 CAD 软件包进行集成。

(4) 更高的工作效率。Geomagic Design Direct 有友好的界面和直观的直接建模工具,使得各种行业的工程人员无需成为 CAD 专家即可进行全面装配、设计和修改。

(5) 显著节约时间。利用 Geomagic Design Direct 进行设计的公司能够更快速地解决工程设计问题,并缩短设计开发时间。

(6) 丰富的标准模型库。通过免费的 TraceParts 库可访问超过一亿个一流零部件制造商的标准 CAD 模型。

综上,Geomagic Design Direct 将 CAD 功能与三维扫描结合,引领了一种全新的设计范式,它能够更好地精简产品开发窗口、加快加工效率、促进合作和加快产品上市。

2.2 Geomagic Design Direct 混合建模一般流程

Geomagic Design Direct 可以轻易地从扫描所得的点云数据中创建完美的多边形网格并提取几何形状创建 CAD 面和实体,对逆向工程各阶段提供了易于掌握的工具。

Geomagic Design Direct 逆向设计的原理是用许多细小空间三角网格来逼近还原 CAD

实体模型。其曲面、实体重建流程最重要的阶段是捕获阶段和设计阶段,捕获阶段共享了 Geomagic Studio 中的点处理和多边形处理功能,而设计阶段则在多边形网格上进一步抽取曲线、曲面和实体,最终建成 CAD 模型。具体的逆向设计流程如图 2-1 所示。

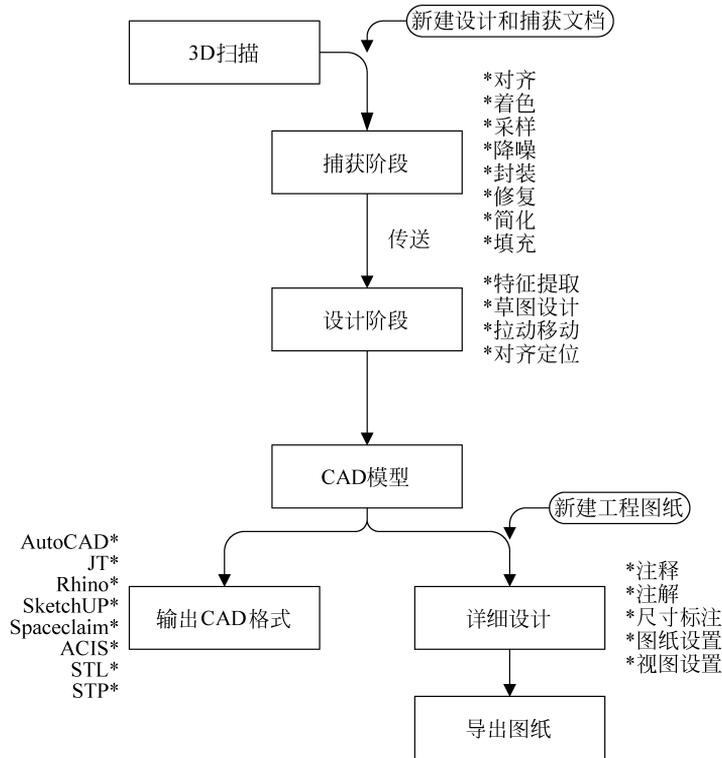


图 2-1 Geomagic Design Direct 混合建模基本流程

2.3 模块介绍

Design Direct 主要包含以下 6 个模块: 捕获模块、设计模块、详细模块、显示模块、测量模块、修复模块。

1. 捕获模块

此模块的主要作用是通过对点云或者多边形网格面数据模型进行预处理,将数据模型表面进行光顺和优化处理,以提高后续曲面或实体重建的质量。其界面如图 2-2 所示。



图 2-2 捕获模块

捕获模块包含的主要功能有:

- 通过点或对应特征集将两个或更多的对象相互对齐并优化;



- 计算点云的法线以提供着色；
- 通过采样减少对象点的数目；
- 通过降噪以弥补扫描仪误差,使点的排列更加平滑；
- 将点转换为网格对象；
- 诊断和修复选定网格对象上的问题；
- 减少网格中的三角形数目但不影响表面细节；
- 检测并拉平网格上的单点尖峰；
- 使用曲线、切线或者平面填充法填充网格孔；
- 创建对象平面；
- 对网格重新划分三角形生成更加一致的剖分曲面；
- 对曲面进行平滑处理,改善网格的外观；
- 删除非流形三角形或网格中孤立无连接的小三角形。

2. 设计模块

此模块的主要作用是二维和三维的草绘与编辑。通过设计工具,可以在二维模式中绘制草图,在三维模式中生成和编辑实体,以及提取实体的特征拟合自由曲面或规则特征、处理实体的装配体等。设计模块的界面如图 2-3 所示。



图 2-3 设计模块

设计模块包含的主要功能有：

- 绘制线条、矩形、圆、样条曲线等草图,并进行圆角、倒角、剪裁、延伸、镜像、移动等草图编辑；
- 偏置、拉伸、旋转、扫掠、拔模和过渡表面；以及将边角转化为圆角、倒直角或拉伸边；
- 移动任何单个的表面、曲面、实体或部件；
- 利用周围的曲面或实体填充所选区域；
- 将设计中的实体或曲面与其他实体或曲面进行合并和分割,也可以将实体或曲面与其他实体和曲面进行合并和分割、使用一个表面分割实体以及使用另一个表面来分割表面,还可以投影表面的边到设计中的其他实体和曲面；
- 插入部件、图像、平面、轴和参考轴系,以及在设计中的实体和曲面之间创建关系；
- 提取实体的特征拟合自由曲面,平面,圆柱面,圆锥面,球面,挤压,旋转,扫掠；
- 对部件进行操作时,可以指定它们彼此对齐的方式,对齐两个不同部件中对象的所选表面,对齐两个不同部件中对象的所选轴等。

3. 详细模块

此模块的主要作用是可以为设计添加注释、创建图纸以及查看设计更改。可通过自定义细节设计选项来遵循标准或创建自定义样式。详细模块的界面如图 2-4 所示。



图 2-4 详细模块

详细模块包含的主要功能有：

- 通过调整字体特征来设定注释文本格式；
- 使用文本、尺寸、几何公差、表格、表面光洁度符号、基准符号、中心标记、中心线和螺旋纹在设计上创建注释；
- 向图纸添加视图；
- 设定图纸格式；
- 创建标记幻灯片以展示设计的更改。

4. 显示模块

此模块的主要作用是可以修改显示选定对象、实体和边中显示的样式以及设计中显示的实体颜色，来自定义当前的设计。可以通过创建图层以保存不同的自定义操作和显示特性，创建窗口或分割窗口来自定义工作区以显示设计的多个视图。还可以显示或隐藏工作区工具。此外，也可以配置所有工作区窗口的停放/分离位置。其界面如图 2-5 所示。

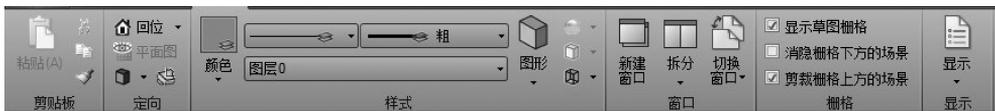


图 2-5 显示模块

显示模块包含的主要功能有：

- 确定设计中实体的显示方式；
- 新建设计窗口、分割窗口以及在窗口之间快速切换；
- 确定栅格之上或之下的草图栅格和几何图形的显示方式；
- 显示或隐藏设计窗口中的工具。

5. 测量模块

此模块的主要作用是通过用数据、图像对 CAD 模型特征进行描述，评估所构建的 CAD 模型的质量。其界面如图 2-6 所示。



图 2-6 测量模块

测量模块包含的主要功能有：

- 单击一个实体或曲面以显示其属性；
- 测量对象，如面积、周长；



- 检查几何体的常见问题；
- 搜索装配体中零件之间的小间隙；
- 显示相交的边和体积；
- 显示表面或曲面的法线、格栅、曲率、偏差、反射条纹的阵列、拔模角度；
- 单击一条边显示这条边上相交的表面之间的两面角。

6. 修复模块

此模块的主要作用是通过计算机自动检测并修复模型的质量问题。其界面如图 2-7 所示。



图 2-7 修复模块

修复模块包含的主要功能有：

- 将曲面拼接成一个实体；
- 检测并修复曲面体间的间距；
- 检测并修复曲面体上缺失的表面；
- 检测并修复未标记新表面边界的重合边；
- 检测并删除不需要的边以定义模型形状；
- 检测并修复重复表面、曲线之间的间隙；
- 检测并删除重复曲线；
- 检测并删除小型曲线，弥补它们留下的间隙；
- 将所选曲线替换为直线、弧或样条曲线进行改进；
- 将两个或更多的表面替换成单个表面；
- 检测靠近切线的表面并使它们变形，直到它们相切；
- 检测并删除模型中的小型表面或狭长表面；
- 将面和曲线简化成平面、圆锥、圆柱、直线等。

2.4 工作界面

有两种方法可以启动 Geomagic Design Direct 应用软件：

- (1) 选择开始→所有程序→Geomagic→Geomagic Design Direct 命令；
- (2) 双击桌面上的 Geomagic Design Direct 图标 。

进入 Design Direct 后将看到如图 2-8 所示的工作界面。

Geomagic Design Direct 的工作界面主要分为面板窗口、应用程序菜单、快速访问工具栏、工具向导、状态栏、设计窗口、工具栏。

(1) 面板窗口最初显示在应用程序窗口的左侧，并可以停靠和拆分。面板主要包括结构面板、图层面板、组面板、选择面板、视图面板、选项面板、属性面板等。



图 2-8 Geomagic Design Direct 的工作界面

单击面板右上角的  按钮将使所对应的面板自动隐藏到软件的左边，所有面板的名称显示在软件界面左边的边界上，光标停留在这些名称上时，将使相应的“面板”临时显示出来，当“面板”显示出来时，再次单击按钮将使“面板”窗口恢复到默认状态。

结构面板包含了结构树，它显示设计中的每个对象，如图 2-9 所示。可以使用该对象名称旁边的复选框快速显示或隐藏任何对象。还可以展开或折叠结构树的节点，重命名对象，创建、修改、替换和删除对象以及选择部件。

图层面板可定义多个图层，并将对象分组到不同图层以设置其视觉特性，如可见性和颜色，如图 2-10 所示。

选择面板可选择与当前所选目标相关的其他对象及属性，如图 2-11 所示。

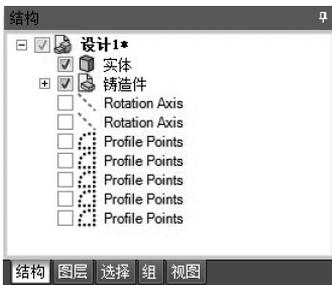


图 2-9 结构面板



图 2-10 图层面板

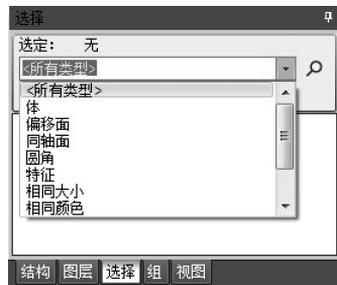


图 2-11 选择面板

组面板存储所选对象的组，组就是用户可以将属性、类型相同或者任何所选对象设置为一组，方便选择、管理以及属性设置等操作，如图 2-12 所示。选择、Alt+选择以及移动定位、轴和标尺尺寸信息均存储在组中。

视图面板显示设计的等角、正三轴测、上、下、前、后、左、右各面的主视图，还可创建、删除视图，更改视图的快捷键，如图 2-13 所示。

通过选项面板可修改、选择 Design Direct 命令工具的功能，如图 2-14 所示。例如，当使用拉动工具时，选择一条边，然后选择“拉动模式”中的“倒直角边”选项以在拉动该边时创建倒直角而不是圆角。