

第一章

计算机辅助工业设计概述

第一节 计算机辅助工业设计简介

第二节 计算机辅助设计的起源和发展趋势

第三节 计算机辅助工业设计流程与方法

章节提示

本章主要介绍了计算机辅助工业设计的概念、起源、发展、趋势及意义，并着重分析了计算机辅助工业设计的能力要素、设计流程与方法。计算机辅助工业设计的核心是型面设计，型面设计的核心是提升型面品质，型面品质关系到产品的外观品质。通过对计算机辅助工业设计课程的学习，为产品设计、专题设计、毕业设计等专业课程打下坚实的专业基础。

第一节 计算机辅助工业设计简介

一、定义

计算机辅助工业设计 (computer aided industrial design, CAID) 是在计算机及其相应的计算机辅助工业设计系统支持下, 进行工业设计领域内各类创造性活动, 参与新产品开发的新型设计模式。其意义在于提高了设计效率, 增强了设计过程的多样性和结果的准确性, 使得产品开发周期大大缩短。目前常用的计算机辅助工业设计的参数化软件有很多种, 如 Rhino、Pro/E、Alias、CATIA、SolidWorks、UG 等。这些软件不一定要全部学, 但学精一门是非常必要的。

计算机辅助制造 (computer aided manufacturing, CAM) 是在计算机及其相应的计算机辅助制造系统支持下, 在生产加工领域内进行各类创新的新型敏捷制造模式。相对于传统制造流程, CAM 的核心变化是模型数据化和加工手段智能化。尤其是 3D 打印技术的发展, 为设计效果的实体呈现提供了更加方便的手段。

在计算机辅助工业设计流程中, 型面设计是影响产品最终造型效果和外观质量的重要环节, 这是因为型面设计的结果 (型面数据) 是产品外观件模具开模的依据, 它紧密关联产品最后的外观品质。型面设计是保证造型效果得以实现的重要环节, 这是因为型面设计是把定案的产品造型构思由 2D 草绘效果图推进成可用于生产的 3D 数据模型的设计过程。

二、能力目标

不同行业的产品设计对型面设计能力的要求差别很大, 汽车等交通工具产品的型面设计能力要求最高。学生应以业界有两年工作经验的汽车数模设计师的型面设计能力为学习目标, 能根据草图对产品的外形和细节进行分析, 整理三视图和建模, 渲染和展示最终真实效果, 以及能进行结构推敲, 输出三维数据文件, 制作实体三维模型。

三、技能要点

学习计算机辅助工业设计需掌握以下技能要点:

(1) 正确利用计算机辅助设计软件对产品进行准确的三维数字模型制作的能力, 对材质、色彩效果和设计细节的渲染表现的能力, 绘制三视图的能力。

(2) 对所建构型面的质量进行判断和调整控制的能力。

(3) 运用设计软件制作结构和输出制作模型的能力。

四、本质学能要点

学习计算机辅助工业设计可获得以下本质学能要点:

(1) 掌握型面设计的设计方法和流程。

(2) 形体分析能力: 根据照片或草图对产品的形体进行结构分析的能力, 对产品造型的体感判断能力, 对曲面线条感的修饰能力, 这些能力是本项目包学习的难点; 根据曲面的走势对构成产品形体的曲面进行解构的能力, 对曲面特性的判断能力, 这些能力是本项目包学习的重点。

(3) 三视图的整理能力: 将设计构思的草图进行三视图转换的能力。

(4) 结构分析能力: 根据生产成型工艺特性和产品视觉美感需要, 对产品进行结构拆分和判断的能力。

(5) 材质色彩推敲能力: 根据设计定位, 为设计的产品进行材质搭配和色彩搭配的能力, 创造和发掘新的材质和色彩搭配的能力, 材质色彩准确度的判断能力。

(6) 设计效果的整体和细节的展示能力: 对产品的全局视角的选择, 即对整体真实美感的设计判断和展示; 对产品的细节角度的选择, 即对微观真实美感的设计判断和展示。

第二节 计算机辅助设计的起源和发展趋势

计算机辅助工业设计的发展大致可以分为两个阶段——做效果阶段和做数据阶段。早期计算机辅助设计的技术主要取代了设计师的表现技法，即取代了其用手绘制产品效果图的工作方式，如 3ds Max、Photoshop 等软件可以快速、真实地通过计算机软件表现出产品的真实材质和色彩效果，但把设计效果输出给生产制造端时还没有实现参数化，主要依靠人工重新定义，效率不高，还不是真正意义上的计算机辅助工业设计，故此阶段称为做效果阶段。真正打通全设计流程，实现从设计到生产制造全程的无缝对接，是在以非均匀有理 B 样条 (non-uniform rational b-splines, NURBS) 数学表达式为内核的参数化软件应用到工业设计之后逐渐发展并成熟起来的。例如，Rhino、Pro/E、Alias、CATIA、SolidWorks、UG 等参数化软件，它们之间都拥有通用的数据格式 (如 iges 格式、step 格式等)，而这些数据是可以和数控机床等加工设备对接的，这样，设计效果就可以准确无误地直接输出给生产制造端，大大缩短新产品的开发周期，故此阶段称为做数据阶段。

随着智能技术和物联网技术的发展，计算机辅助工业设计也进入了新的发展阶段，出现了越来越智能化的设计工具和智能化的加工制造手段，帮助设计师更好地发挥着设计创造智慧。

计算机辅助工业设计是计算机辅助设计的一个主要分支，计算机辅助设计的发展历程就是计算机辅助工业设计的发展历程。

一、计算机辅助设计的起源

计算机辅助设计 (computer aided design, CAD) 这一概念是麻省理工学院的一个 CAD 开发小组率先于 20 世纪 60 年代初提出的。1967 年，美国洛克希德公司开发出商用的 CADAM 系统，CAD 的利用 (主要在航空、汽车及船舶制造领域) 开始进入实用化阶段。不过，当时绝大多数的 CAD 系统都是以自行开发、自行使用为主，而且往往是

针对某个课题独立研发，针对具体使用目的编制专业程序来完成设计的自动化，因此无法将设计者的意图及时反映到设计中去。到了 20 世纪 70 年代中期，计算机的主流由大型机向个人机及微型机的方向转变，CAD 系统的开发者与使用者开始分化，出现了专业的 CAD 系统开发商。进入 20 世纪 80 年代，CAD 与微型机及工作站相结合，CAD 的利用不仅在传统领域 (如机械、电子电路等) 不断发展，而且在建筑产业、家用电器等工业设计领域呈现出多样化的利用形态。20 世纪 80 年代后期，CAD 与计算机图形处理技术 (computer graphics, CG) 相融合，由二维平面制图系统向三维生产加工数据系统方向飞速发展。进入 20 世纪 90 年代后期，网络技术的迅猛发展为 CAD 的集成与协同提供了强有力的支持，使并行工程处理作业成为可能。此时，以工程项目为核心，不同地域的生产“虚拟群体”能及时地共享图形库、数据库、材料库及一切上网资源。

二、计算机辅助设计的发展

CAD 最早的应用是在汽车制造、航空航天及电子工业的大公司中。随着计算机的价格越来越低，CAD 的应用范围也逐渐变广。

20 世纪 70 年代，小型计算机费用下降，美国工业界才开始广泛使用交互式绘图系统。20 世纪 80 年代，由于个人计算机的应用，CAD 得以迅速发展，出现了专门从事 CAD 系统开发的公司。当时的 VersaCAD 是专业的 CAD 制作公司，其开发的 CAD 软件功能强大，但因价格昂贵，故不能普遍应用。而当时的 Autodesk 公司是一个小公司，其开发的 CAD 系统虽然功能有限，但因其 CAD 系统的可免费复制性和开放性，在社会上得以广泛应用。CAD 真正质的飞跃是 NURBS 数学表达式的提出和应用，NURBS 数学表达式使 CAD 软件 (如 Rhino、Pro/E、Alias、CATIA、SolidWorks、UG 等参数化软件) 升级迅速。

NURBS 由美国学者 Versprille 在其博士学位论文中提出。1991 年, 国际标准化组织 (International Organization for Standardization, ISO) 颁布的工业产品数据交换标准 STEP, 把 NURBS 作为定义工业产品几何形状的唯一数学方法。1992 年, 国际标准化组织又将 NURBS 纳入独立于设备的交互图形编程接口的国际标准 PHIGS (程序员用层次交互图形系统) 中, 作为 PHIGS Plus 的扩充部分。Bezier、有理 Bezier、均匀 B 样条和非均匀 B 样条都被统一到 NURBS 中。

NURBS 曲线和 NURBS 曲面在传统的制图领域是不存在的, 是为使用计算机进行 3D 建模而专门建立的。在 3D 建模的内部空间用曲线和曲面来表现轮廓和外形。它们是用数学表达式建构的, NURBS 数学表达式是一种复合体。

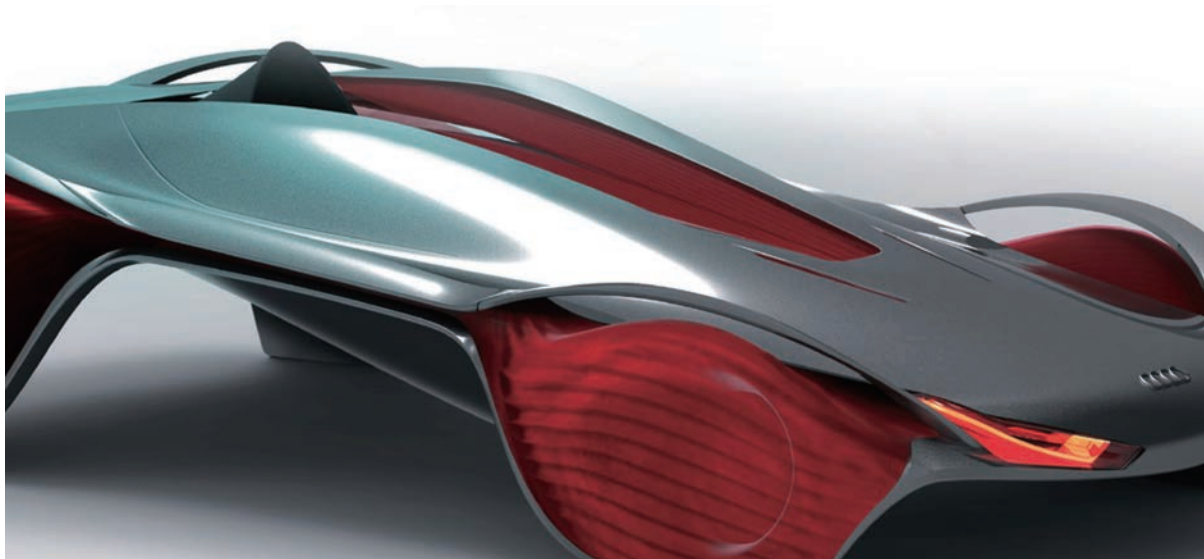
在手绘领域, Wacom 手绘屏幕的出现很好地实现手绘和计算机辅助设计的结合。有人认为美国计算机科学家 Ivan Sutherland 于 1963 年在麻省理工学院开发的 Sketchpad 是一个转折点。Sketchpad 的突出特性是允许设计者用图形方式和计算机交互: 设计者用一枝光笔通过阴极射线管屏幕, 可以将草图绘制到计算机里。实际上, 这就是图形化用户界面的原型, 而这种界面是现代

CAD 不可或缺的特性。

三、计算机辅助设计的趋势

21 世纪是一个科技的时代, 各种新的技术层出不穷, 如物联网、智能硬件、智能软件、虚拟现实 (virtual reality, VR)、增强现实 (augmented reality, AR) 等。以艺术设计教育为核心的各高校的发展方向必然离不开计算机辅助设计, 同样, 计算机辅助设计也必须与现代艺术设计发展趋势相一致。在设计模式上结合虚拟技术、动画技术、网络技术、人机工程、智能系统等, 代表了计算机辅助设计发展的方向。

从现代艺术设计的角度来看, 个性品位的提高大大增强了设计师对创意能力的要求, 如何把概念草图很快地利用计算机模拟出来成为当前计算机辅助设计的首要挑战目标。实现人机互动一体化, 真正做到智能系统设计是计算机辅助设计的最终目标。简单实用的工具让设计师可以很快地掌握建模技巧, 为那些看到 CATIA 等设计软件就望而却步的设计师带来了新的曙光, 使人人都能做 3D 不再是梦想, 智能设计系统的出现将指日可待。



第三节 计算机辅助工业设计流程与方法

一、计算机辅助工业设计流程

对于一般产品，计算机辅助工业设计流程主要包含设计概念构思、草图绘制表现、草模辅助验证、定案造型三视图整理、计算机辅助型面正向制作（CAS制作）、色彩材质表面工艺设计、虚拟可视化效果制作、输出制作功能样机、输出开模制作等专业化分工过程。而对于交通工具中像汽车这样的贵重大型产品，计算机辅助工业设计流程则略有不同，主要包含设计概念构思、草图绘制表现、2D效果图制作、定案造型三视图整理、计算机辅助型面正向制作（CAS制作）、虚拟可视化效果制作、油泥模型修正、计算机辅助型面逆向制作（逆向A面制作）、色彩材质表面工艺设计

等专业化分工过程。

定案造型三视图整理、计算机辅助型面正向制作（CAS制作）和计算机辅助型面逆向制作（逆向A面制作）是计算机辅助工业设计的核心内容，也是影响计算机辅助工业设计型面质量的重要环节。其中计算机辅助型面正向制作（CAS制作）和计算机辅助型面逆向制作（逆向A面制作）是计算机辅助工业设计数模能力的核心内容，是影响计算机辅助工业设计型面数模质量的重要环节。

关于控制型面数模质量的关键因素的讲解，请阅读第二章第六节“汽车型面设计与制作”的对应内容。

常规的计算机辅助工业设计流程如图1-1所示。

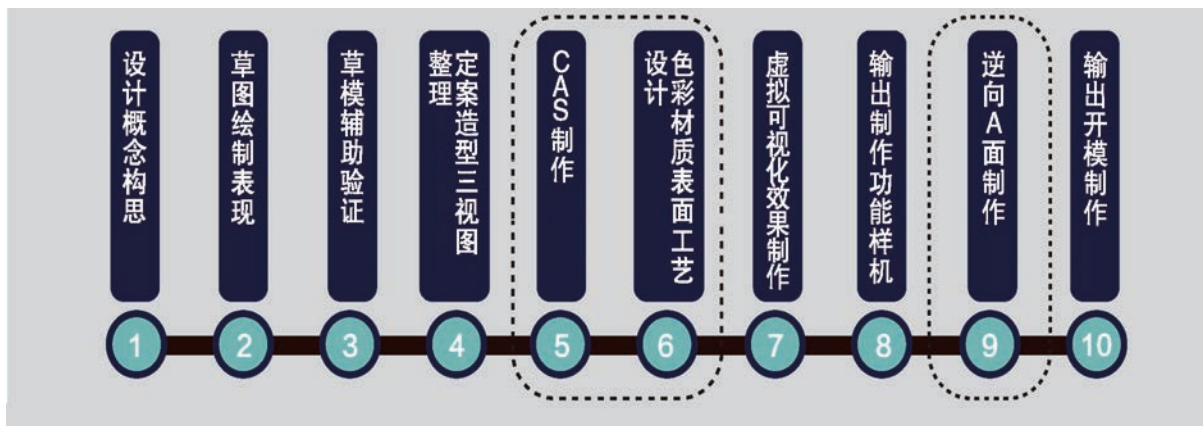


图1-1 计算机辅助工业设计流程



二、计算机辅助工业设计方法

计算机辅助型面正向设计（CAS 设计）指在定案的造型草图基础上进行三视图整理绘制，按照定案三视图通过计算机辅助设计手段快速地将产品造型建构成数字模型，渲染出材质和色彩，供专家团队进行评估推敲，对评估认可后的数模进行结构设计，输出制作实体模型样机进行功能验证。

一般产品的设计开发都是采用 CAS 设计方法设计的，以下面的设计为案例展示这一方法的标准步骤和基本知识点。

第一步：形体分析。(图 1-2)



图1-2 形体分析

第二步：三视图整理绘制。(图 1-3)

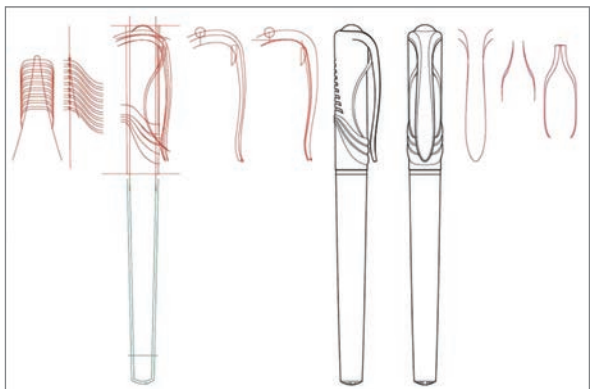


图1-3 三视图整理绘制

第三步：计算机辅助型面正向制作。(图 1-4)



图1-4 计算机辅助型面正向制作

第四步：色彩材质可视化效果渲染。(图 1-5)



图1-5 色彩材质可视化效果渲染

第五步：外观件结构设计。(图 1-6)

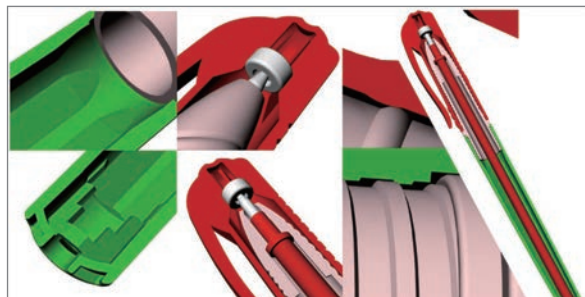


图1-6 外观件结构设计

下面对每步的具体思路进行讲解，但是详细的理论讲解和应用分布在第二章的六个设计项目之中，每个项目的设计方法都一样，不同项目训练的侧重点不一样，对应的知识点和技巧也不一样。

计算机辅助工业设计的理论和实践是联系在一起的，它没有特别高深的理论，更多的属于经验，就像手艺人一样，需要靠时间去累积和感悟。

1. 形体分析

形体分析主要包括两方面内容，即产品装配中的外观结构件（零件）拆解和型面分析。其详细应用在第二章的六个具体的设计项目中展开。

1) 产品装配中的外观结构件拆解

按照产品的功能、生产工艺和造型审美的需求，将产品外形分割成不同的外观结构件（零件）。这是设计师应该具备的设计意识和能力。

例如，吸尘器主体造型按照产品的功能、生产工艺和造型审美的需求分为吸尘罩、上壳、底座三个外观件。（图 1-7）

2) 型面分析

可以运用草图或其他表现方法对产品的大型及细节进行分析，找出主要造型特征线和关键结构线，首先对造型的型面进行分面，然后对分面进行拆解和还原。

特征线包括产品外形轮廓线与曲面之间的交线。大部分特征线在造型上能直接观察到，如吸尘器上的①号、②号和③号特征线；也有部分特征线是看不见的，需要设计师去分析，如吸尘器上的④号和⑤号特征线。（图 1-8、图 1-9）

结构线是反映曲面走势的关键线条，是从曲面中提取的截面线，这种线条在造型上是看不见的，需要设计师去分析，如吸尘器上的⑥号、⑦号和⑧号结构线。（图 1-8、图 1-9）

型面分析的方法是光影分析法，即方块原理，按照方块在光影中亮部、暗部的光影变化，还原特征线和结构线不明确的曲面在光影中亮部、暗部的光影变化，找出曲面之间的明暗交界线（相交线）和曲面内部走势特征的结构线。例如，速度感造型上的②号、④号和⑤号特征线。（图 1-10）



图1-7 外观结构件拆解

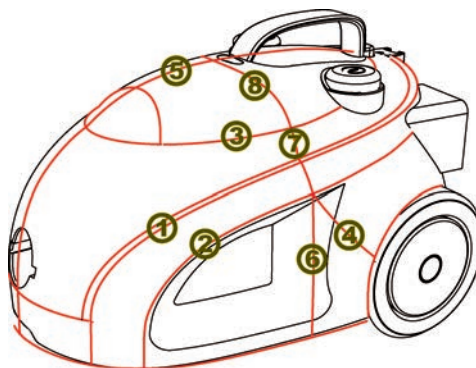


图1-8 外观特征线与结构线（一）

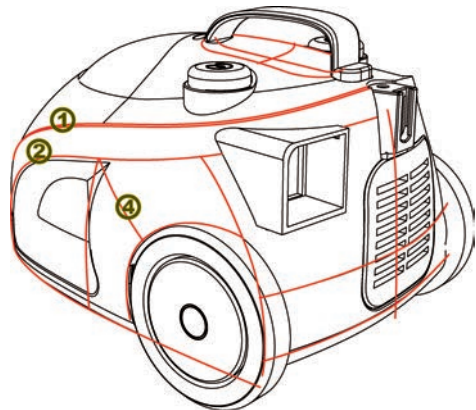


图1-9 外观特征线与结构线（二）

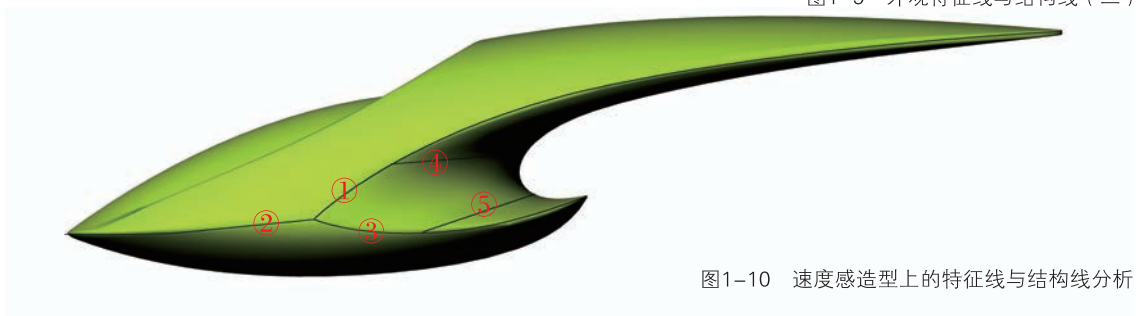


图1-10 速度感造型上的特征线与结构线分析

分面是指在找出的特征线基础上，对造型的型面进行分割，化整为零。例如，速度感造型的型面分割。(图 1-11)

拆面是在分面的基础上，参照结构线对复杂的分面进一步拆解，拆解的原则是易制作和符合四边面，化繁为简。例如，速度感造型的曲面二拆解。(图 1-12)

还原面是在拆面基础上，将一些不符合四边面原则的曲面，按照曲面走势特征还原成四边面，为后面曲面数模建构提前做好分析。(图 1-13)

按照这套型面分析的思路，即使再复杂的曲面也可以化繁为简，分解和还原成简单的曲面，便于后续的三视图整理和型面数模建构。

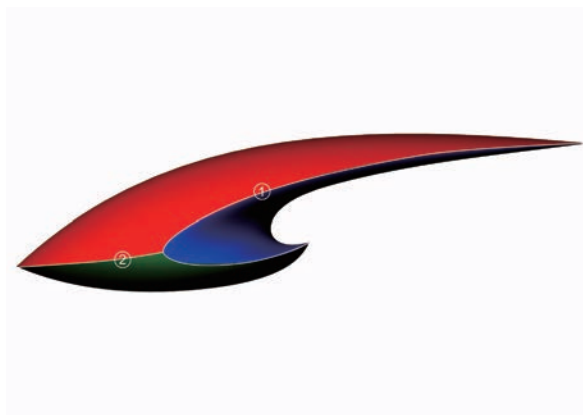


图1-11 速度感造型的型面分割



图1-12 速度感造型的曲面二拆解

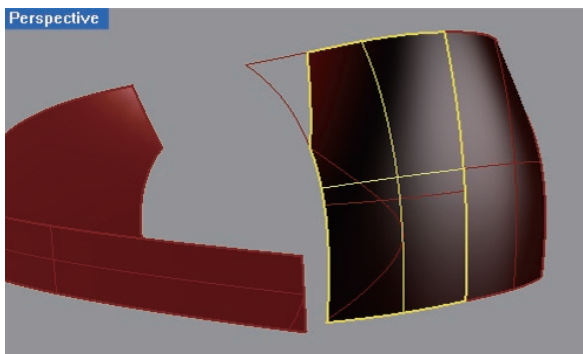


图1-13 曲面还原

2. 三视图整理绘制

三视图整理是从三视图平面对造型整体比例、线条和细节进行推敲，是把造型构思转换为精确的三视图的重要环节。其主要包括两方面内容，即读懂三视图和绘制三视图。其详细应用在第二章的六个具体的设计项目中展开。

只有弄清什么是三视图、三视图怎么摆放、三视图之间的尺寸关系，才能读懂每个零件的三视图及其中的尺寸关系，才能在头脑中想象出待建构的立体几何造型，才能正确地绘制造型特征的三视图，并把三视图的三个视角关系和软件中的三个视窗关系理顺，才能在计算机辅助三维建模软件中正确地建构出想象的立体造型。善于利用三视图的某一个或两个视图进行造型的思维发散，也是一项重要的本质学能。

1) 三视图概念

三视图是工程界一种约定俗成的叫法，是指够正确反映物体长、宽、高尺寸的三个正投影工程图，即主视图、俯视图和左视图。作为设计师，则需要根据形体表达的需要来选择相应的视图。(图 1-14)

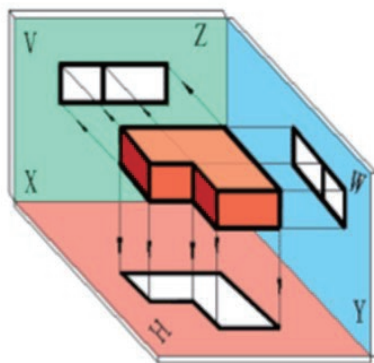


图1-14 三视图投影原理

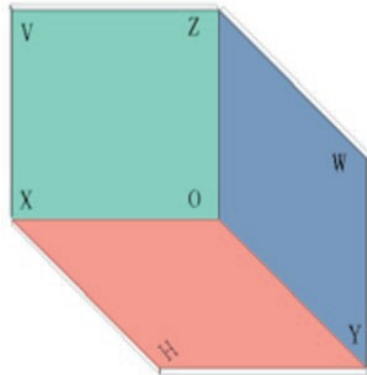


图1-15 三视图投影平面

将人的视线规定为平行投影线，然后正对着物体看过去，将所见物体的轮廓用正投影法在投影平面（图 1-15）上绘制出来的图形称为视图。

一个物体有六个视图：从物体的前面向后面投射所得的视图称主视图（正视图）——能反映物体的前面形状，反之称为后视图——能反映物体的后面形状；从物体的上面向下面投射所得的视图称为俯视图——能反映物体的上面形状，反之称为仰视图——能反映物体的下面形状；从物体的左面向右面投射所得的视图称为左视图（侧视图）——能反映物体的左面形状，反之称为右视图——能反映物体的右面形状。（图 1-16）

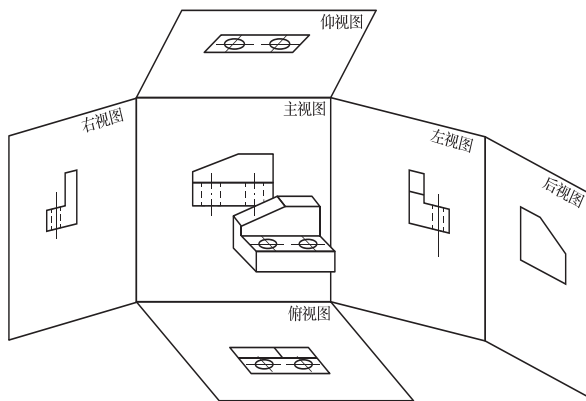


图1-16 六视图

2) 三视图的摆放

形体在三投影面体系中摆放及三视图位置摆放时应使形体的多数表面（或主要表面）平行或垂直于投影面（形体正放）。

在三个投影面上作出形体的投影后，为了作图和表示的方便，将空间三个投影面展开摊平在一个平面上。其规定的展开方法是： V 面保持不动，将 H 面和 W 面按图中箭头所指方向分别绕 OX 和 OZ 轴旋转，使 H 面和 W 面均与 V 面处于同一平面内（图 1-17），即得到形体的三面投影图（图 1-18）。主视图在图纸的左上方，左视图在主视图的右方，俯视图在主视图的下方。这样规定主要是为了绘图、读图的方便和研究问题的方便。若不按上述顺序放置，则应注明三个视图的名称。另外还应有剖面图、半剖面图等作为辅助，以完整地表达物体的结构。

主视图是最主要的视图，应选最能反映组合体的形体特征及各个基本体之间的相互位置，并能减少俯视图和左视图上虚线的方向，作为主视图的投影方向，如把手的三视图。（图 1-19）

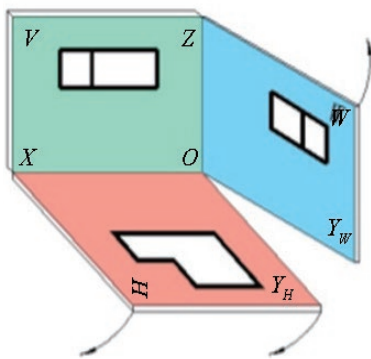


图1-17 三视图的展开

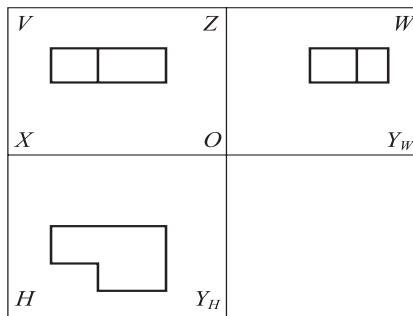


图1-18 展开的三视图

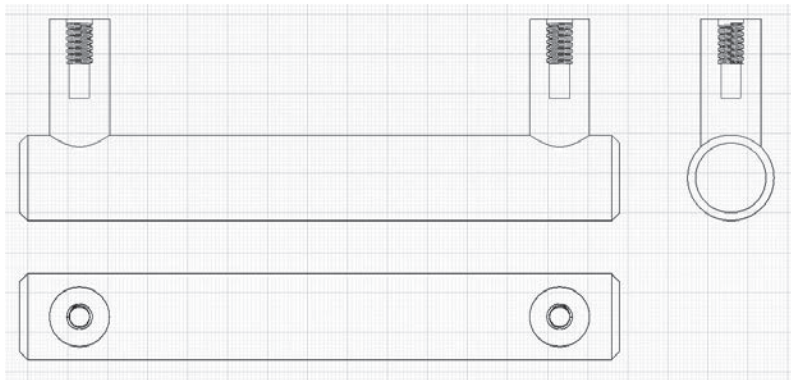


图1-19 把手三视图

在计算机辅助三维建模软件中，主视图的选择应根据物件的放置来确定，物件的放置位置应以自然平稳为原则，并使组合体的表面相对于投影面尽可能多地处于平行或垂直的位置。例如，在工具箱把手的建模过程中，把手三视图中的主视图设为软件视窗中的俯视图，考虑的原则是把手和工具箱的摆放应该是平放的位置。(图 1-20)

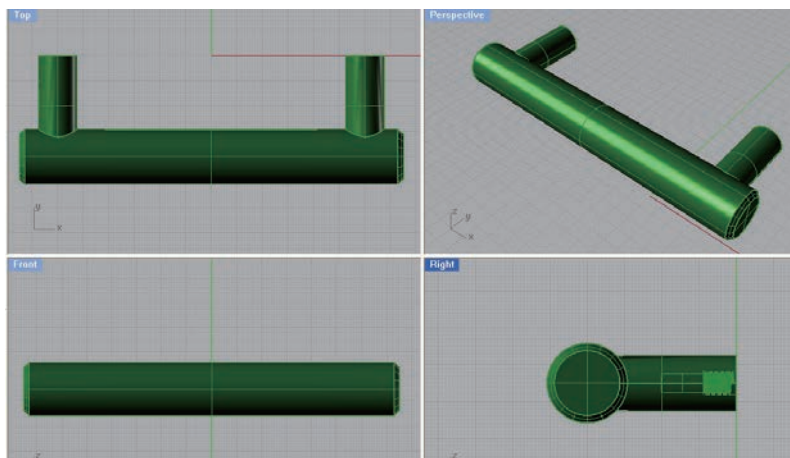


图1-20 软件视窗中的把手摆放

3) 三视图之间的尺寸关系

规定形体的左右为长，上下为高，前后为宽。主视图长度与俯视图长度应对正(简称长对正)，主视图高度与左视图高度应保持平齐(简称高平齐)，左视图宽度与俯视图宽度应相等(简称宽相等)。(图 1-21)

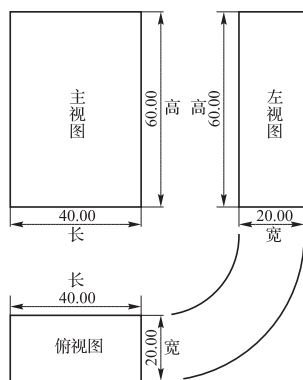


图1-21 三视图的尺寸关系

三视图中的尺寸包括定型尺寸(描述造型特征形状的尺寸，图中所示尺寸为 270.00)和定位尺寸(描述造型特征位置的尺寸，图中所示尺寸为 120.00)。(图 1-22)

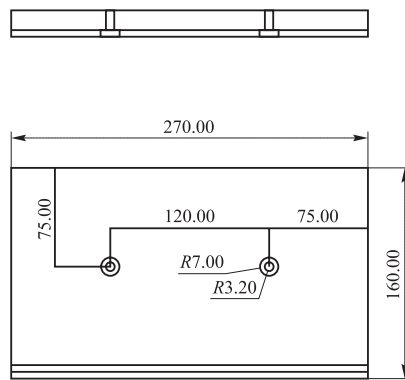


图1-22 三视图的尺寸类型

4) 绘制三视图

尽量选用 1 : 1 的比例，以便于直接估量形体的大小，也便于画图。按选定的比例，根据形体长、宽、高预测出三个视图所占的面积，并在视图之间留出标注尺寸的位置和适当的间距，据此选用合适的标准图幅。

画出各视图的基准线后，每个视图在图纸上的具体位置就确定了。基准线是指画图时测量尺寸的基准，每个视图需要确定两个方向的基准线。一般常用对称中心线、轴线和较大的平面作为基准线，逐个画出各形体的三视图。

根据各形体的投影规律，逐个画出形体的三视图。画形体的顺序为：一般先实(实形体)后空(挖去的形体)；先大(大形体)后小(小形体)；先画轮廓，后画细节。画每个形体的三视图时，要将三个视图联系起来画，并从反映形体特征的视图画起，然后按投影规律画出其他两个视图。对于对称图形、半圆和大于半圆的圆弧要画出对称中心线，对于回转体一定要画出轴线。对称中心线和轴线用细点画线画出。(图 1-23、图 1-24)

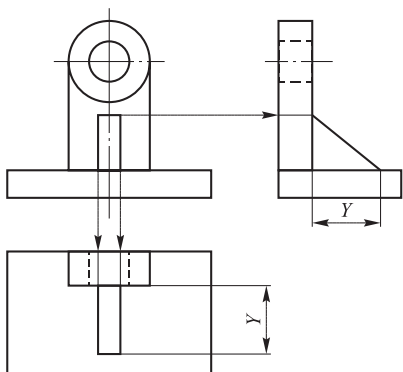
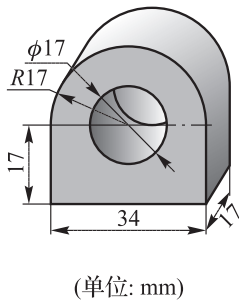
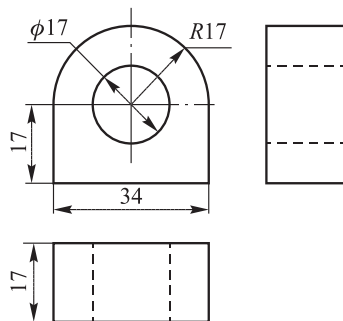


图1-23 三视图的画法(一)



(单位: mm)



(单位: mm)

图1-24 三视图的画法(二)

5) 三视图读图训练

在许多情况下,只用一个投影而不加任何注解,是不能完整、清晰地表达和确定形体的形状和结构的。虽然三个形体在同一个方向的投影完全相同,但是三个形体的空间结构却不相同(图1-25)。三视图的这一特点可以作为设计师进行造型想象力和思维发散的一种练习手段。

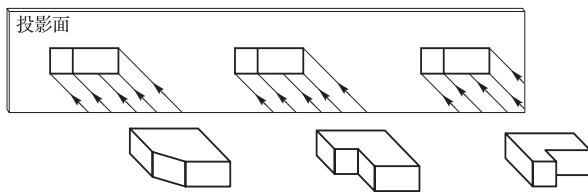


图1-25 相同投影视图

例如,主视图和侧视图完全一样,想象能符合这样两个视图的立体造型有几种,这样的读图练习可以很好地训练立体空间思维。(图1-26、图1-27)

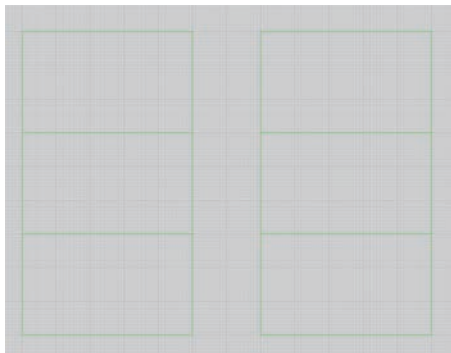


图1-26 三视图

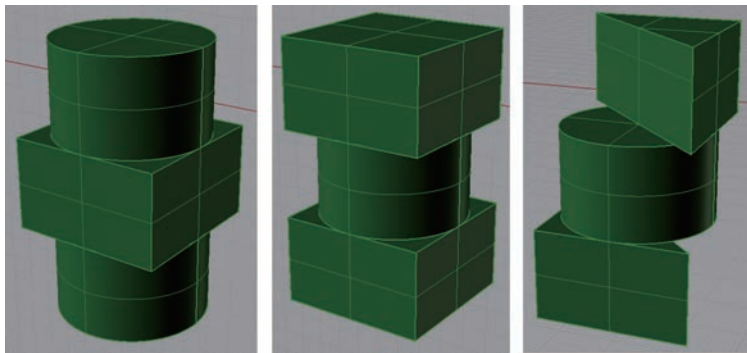


图1-27 立体图

3. 计算机辅助型面正向制作

计算机辅助型面正向制作是以绘制的三视图为标准,按照形体分析,先建构大面后完善细节,运用计算机辅助设计软件快速建构出造型的三维数字模型,并对数模的型面质量进行调整控制的制作过程。计算机辅助型面正向制作主要包含三方面内容,即绘制空间线、建构曲面和调整控制型面数模质量,其详细应用在第二章的六个具体的设计项目中展开。

1) 绘制空间线

绘制空间线是指通过控制点(CV点)绘制建构曲面所需要的空间线。调整控制点的位置可以改变和控制曲线的形状及顺滑度。无论是评价一条曲线的顺滑度还是评价两条曲线间的顺滑度,都是通过连续性这个指标来衡量的。而控制曲线连续性的主要元素除了曲线的控制点以外,还有曲线的阶数,将曲线连续性进行视觉化的是曲线的曲率图。

相连曲线之间有相交、相切和曲率三种连续关系，分别用 G0、G1 和 G2 表示。在数学定义中，相邻曲线之间的关系不止这三种，还有更高的 G3、G4 等，只不过由于人眼感知能力有限，高于 G2 的连续性人眼很难分辨出来。如图 1-28 所示，从左到右相邻曲线之间依次为相交 (G0)、相切 (G1) 和曲率 (G2) 三种关系。其中，G0 连续是完全不顺滑的，肉眼很容易分辨；G1 连续在相连点是顺滑的，但整体变化还不是很流畅；G2 连续不仅在相连点顺滑，而且曲面整体变化流畅。



图1-28 曲线的三种关系

要想准确判断曲线之间的连续性关系，则需要通过观察相邻曲线的曲率图来分辨。曲线是由不同的点组成的，曲线上的每个点都对应一个曲率，把所有的点的曲率连起来，就形成曲线的曲率图。如图 1-29 所示，从左到右相邻曲线之间依次为相交 (G0)、相切 (G1) 和曲率 (G2) 三种关系的曲率图。当为 G0 关系时，相邻曲线间的曲率梳状图是断开的；当为 G1 关系时，相邻曲线间的曲率梳状图是共线连接在一起的，但是共线长度不一样；当为 G2 关系时，相邻曲线间的曲率梳状图是共线连接在一起的，且共线长度一样。



图1-29 曲线的三种曲率图关系

曲线之间的三种连续关系的判断是造型设计思考中的一部分，设计时应根据造型感觉的需要来选择，不同的曲线连续关系决定画出来的曲面的连续关系：G0 看上去棱角分明，略显现代感；G1 看上去刚中带柔，很有线条感；G2 看上去圆润流畅，富有速度感。

曲线除了有曲线之间的连续性以外，还有内部连续性，无论哪种连续性都和曲线的控制点数目及阶数有关。控制点越多，曲线变化越大，形状和连续性越难控制；阶数越高，曲线连续性越好，但形状越难控制。

对开放的曲线来讲，曲线的控制点与阶数的关系是曲线的控制点数等于曲线的阶数加 1，即满足一条曲线的阶数所需要的控制点数目至少是阶数加 1，这样画出的曲线正好为一个跨度，曲线内部的连续性最好，在此基础上，再增加控制点的数目，曲线内部的连续性就会变得复杂，这是因为随着控制点的增加，曲线内部的跨度也会增加，每增加一个控制点，就会增加一个跨度。如图 1-30 所示，三条曲线的控制点数目都是六个，而且位置一样，但三条曲线的阶数不一样，蓝色曲线是 3 跨度 3 阶曲线，红色曲线是 2 跨度 4 阶曲线，绿色曲线是单跨度 5 阶曲线。三条曲线形状不一样，内部连续性不一样：蓝色 3 阶曲线的内部连续性为 G2 连续；红色 4 阶曲线的内部连续性为 G3 连续，比 3 阶曲线流畅；绿色 5 阶曲线的内部连续性为 G4 连续，优于 4 阶曲线，但已很难识别。故曲线连续性做到 G3 足矣，同理，曲面亦如此。

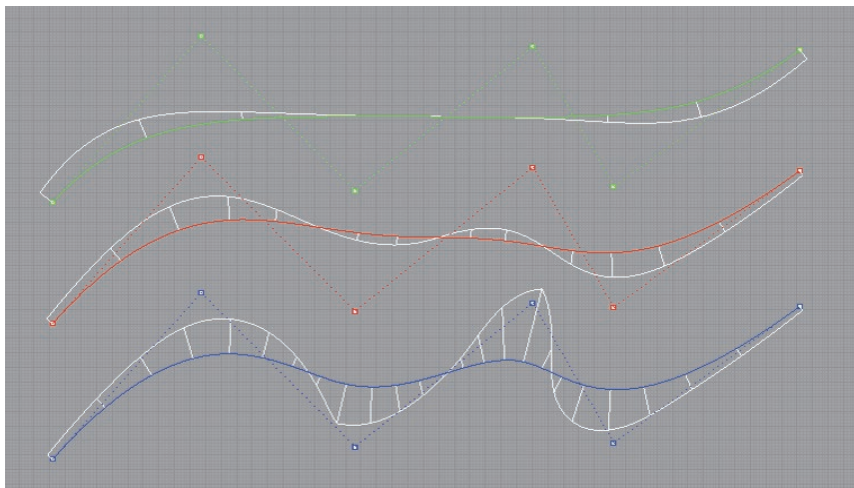
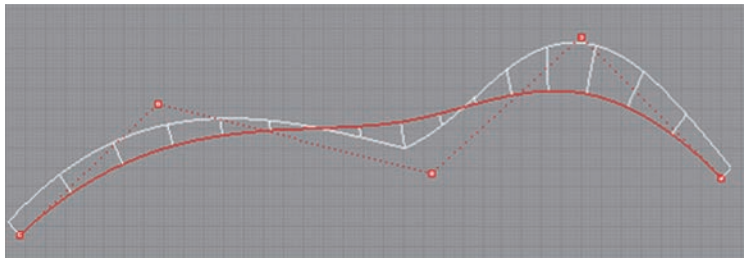


图1-30 曲线的阶数与曲率图的关系

单纯地直接增加曲线的阶数并不能改变曲线的连续性和形状，但会改变曲线的控制点的数目，增加曲线的变化，反之则会改变曲线的连续性和形状，如图 1-31 所示。



开放的 NURBS 曲线

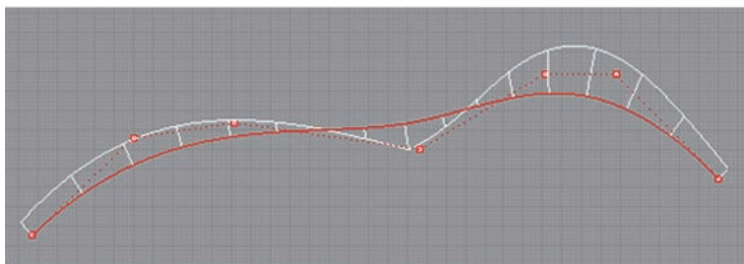
起点 = (123.835, 342.927, 0)

终点 = (300.13, 357.393, 0)

阶数 =3

控制点: 非有理, 数目 =5

节点: 均匀 (差异值 =1)



开放的 NURBS 曲线

起点 = (123.835, 342.927, 0)

终点 = (300.13, 357.393, 0)

阶数 =4

控制点: 非有理, 数目 =7

节点: 非均匀, 定义域 =0

图1-31 增加曲线的阶数和连续性的曲率图关系

调整曲线之间的连续性是通过调整曲线相邻处的控制点的位置来实现的。对于 G1 连续，只需要调整相邻处旁边第一个控制点就可以实现；对于 G2 连续，只需要调整相邻处旁边第一个和第二个控制点就可以实现，对于 G3 及以上连续，依此类推。如图 1-32 所示，蓝色曲线和红色曲线已经是 G1 连续关系，保证相邻处旁边的第一个控制点不动，移动其他控制点，可以发现曲线之间的 G1 关系没变；移动第一个控制点，则曲线之间的关系变为 G0。如图 1-33 所示，蓝色曲线和红色曲线已经是 G2 连续关系，保证相邻处旁边的第一个和第二个控制点不动，移动其他控制点，可以发现曲线之间的 G2 关系没变；移动相邻处的第二个控制点，则曲线之间的关系变为 G1；第一个和第二个控制点都移动，则曲线之间的关系变为 G0。

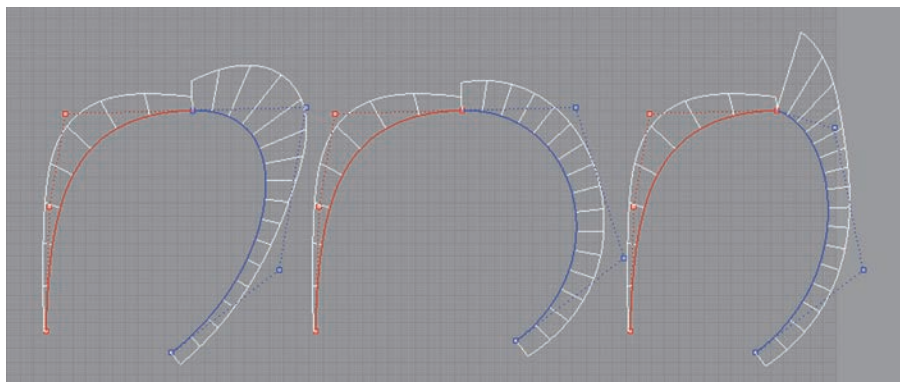


图1-32 曲线的控制点和G1连续性关系

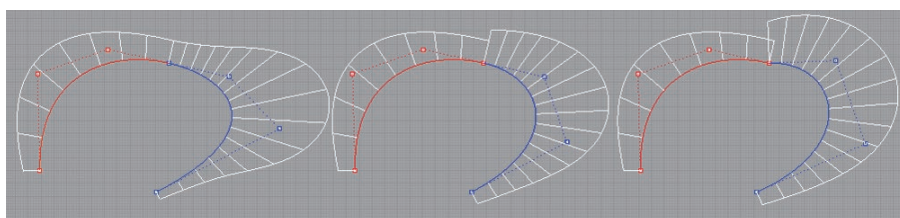


图1-33 曲线的控制点和G2连续性关系

2) 建构曲面

建构曲面是指通过绘制的空间线，运用四边建面、双规扫描建面或网格建面三种方式绘制曲面。对 NURBS 曲面来讲，就是由一些横竖 NURBS 曲线构成的网格面，其阶数与控制点的关系、曲面之间连续性与曲率图的关系同曲线，唯一不同的是检查曲面之间连续性关系的常用工具是斑马纹 (Zebra)。如图 1-34 所示，从左到右相邻曲面之间依次为相交 (G0)、相切 (G1) 和曲率 (G2) 三种关系。其中，G0 连续关系是完全不光滑连续，肉眼很容易分辨；G1 和 G2 连续关系用肉眼来分辨稍有难度，因为在视觉上，两者相邻曲面间都是顺滑连续，不过从曲面相邻部分的反光和明暗变化，还是可以分辨出为 G1 和 G2 连续关系的：可以看到 G2 连续的曲面的反光更加连续，过渡更柔和，感觉造型更饱满顺滑。

图 1-35 为通过斑马纹工具检查从左到右依次是相邻曲面之间为相交 (G0)、相切 (G1) 和曲率 (G2) 三种关系的 Zebra 条纹。当为 G0 关系时，相邻曲面间的 Zebra 条纹是断开的；当为 G1 关系时，相邻曲面间的 Zebra 条纹是连接在一起的，但是有明显的折线，不够顺滑；当为 G2 关系时，相邻曲面间的 Zebra 条纹是顺滑地连接在一起的。

3) 调整控制型面数模质量

调整控制型面数模质量是在绘制空间线和建构出曲面时，及时进行质量检查和调整控制。调整和控制型面数模质量的关键因素主要包括三个方面，即型面分析拆解、CV 点排布控制和曲面光顺度控制。

型面分析拆解时，型面设计要求准确反映设计造型意图，在理解造型设计意图的基础上，对产品型面的构成进行分析，力求以尽量简单的曲面构造形体，这是保证型面数模质量的前提。型面分析拆解的控制要点见表 1-1。

求出和控制主要特征线：通过对型面的整体走势进行分析，结合相邻曲面理论交线，求出型面的主要特征线。这要求特征线的曲率梳流畅均匀，尽量避免 S 型交线。

分解和简化型面：结合主要特征线，判断和拆解构成形体的大曲面，按照四边面和最简洁原则逐步对大曲面进行拆解，对不完整曲面先进行复原。这要求分解的四边面的四条边界最好是单跨度，选择合理的阶数，不要超过 7 阶。

阶数越高，曲线的顺滑性越好，但阶数越高，曲线的 CV 点 (控制点) 越多，越难控制，常用的阶数为 3 阶、5 阶和 7 阶。单跨度曲线所需要的 CV 点个数为阶数加 1。例如，单跨度 3 阶曲线需要四个 CV 点，单跨度 5 阶曲线需要六个 CV 点，单跨度 7 阶曲线需要八个 CV 点。若一条曲线的 CV 点为六个，则将曲线阶数设为 5 阶比设为 3 阶合理，这是因为设为 3 阶的曲线会有 3 跨度，得到的曲面就不是最简洁的曲面。

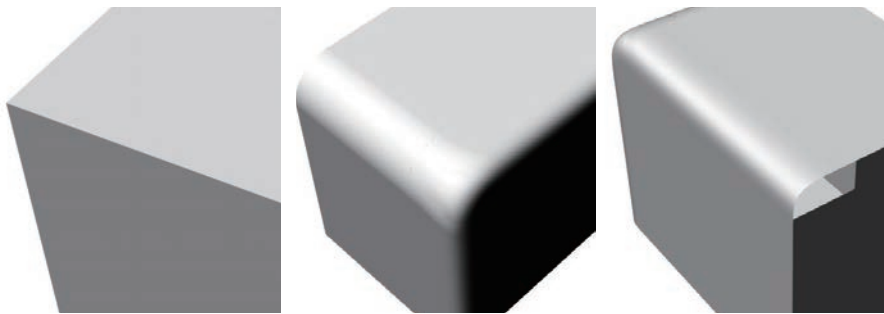
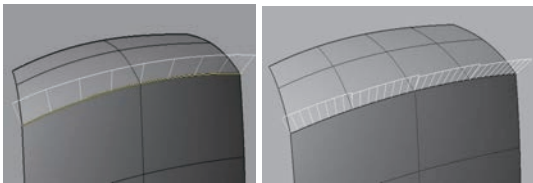
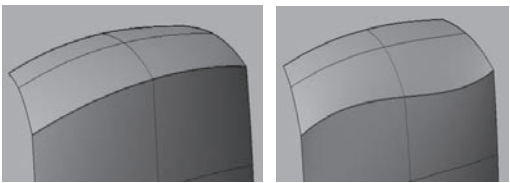
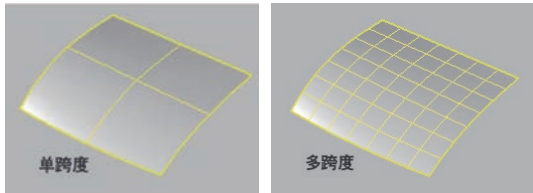
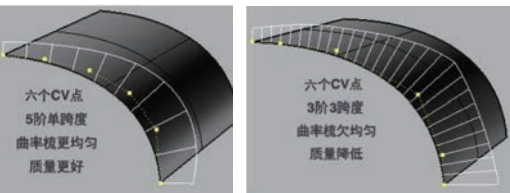


图1-34 相邻曲面的三种关系



图1-35 三种曲面关系的Zebra条纹

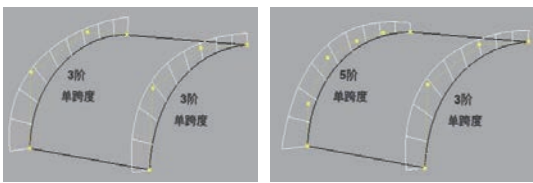
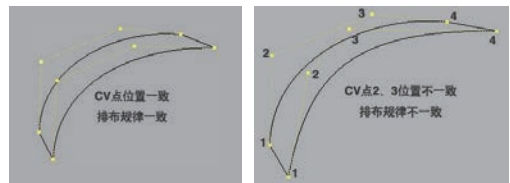
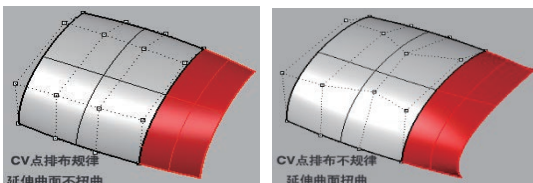
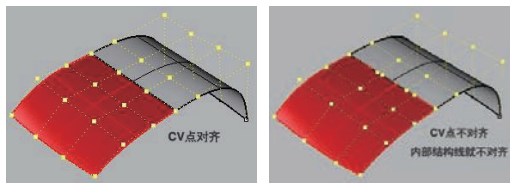
表 1-1 型面分析拆解的控制要点

内容	质量控制要点			
求出和控制主要特征线				
	曲率梳流畅均匀		尽量避免 S 型交线	
分解和简化型面				
	曲面四边最好是单跨度		选择合理阶数，不要超过 7 阶	

CV 点的排布决定线和曲面的质量，CV 点的排布出现问题，必然导致曲面出现问题，故 CV 点的排布是最根本的决定因素。对于 CV 点的排布调整：首先，要求四边面的两对相对边界 CV 点的数目相同，即相对的两边界保持相同的阶数和跨度。其次，要求相对边界 CV 点的排布有规律，即相对的两边界 CV 点排布均匀且位置相对应。通过这样的边界建构出来的四边面，不仅 CV 点排布不会出现跳跃和 W 型，而且曲面通过边缘可进行延伸编辑，并且延伸出来的曲面不会出现扭曲。其实，曲面可延伸的实质是 CV 点排布的规律性，延伸出来的曲面自然且不扭曲，则说明曲面内部 CV 点的排布合理，没有出现杂乱和跳跃。最后，要求相邻曲面在共同边界上的 CV 点排布一致，而且与共同边界同方向的另一边界的 CV 点排布也需要同共同边界 CV 点排布相呼应，这样可保证相邻曲面之间 CV 点排布连续对齐，即业内常说的 CV FLOW。CV 点排布的控制要点见表 1-2。

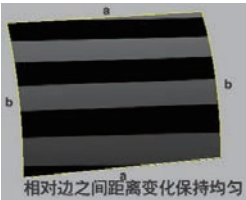
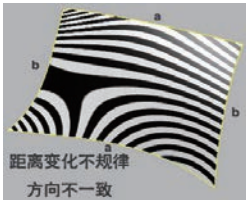
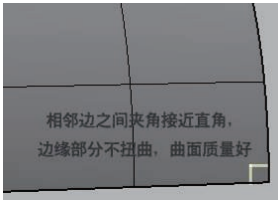
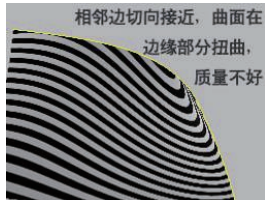
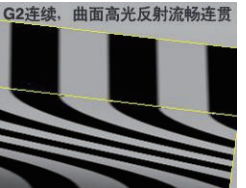
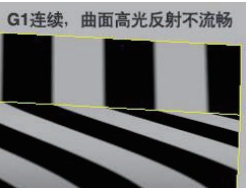
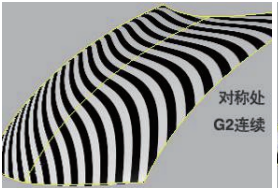
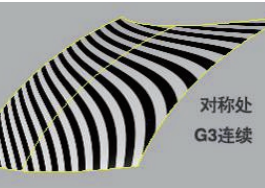
若 CV 点排布规律，则型面在所有 U 方向上的曲率梳流畅均匀且走势一致，同理在 V 方向上的曲率梳也一致。因此，可以通过检查曲率梳的方法检查曲线和曲面上的 CV 点的排列是否合理。如果 CV 点排布合理、规律，型面的内部质量就高，就必然会提升整个造型的外观品质。

表 1-2 CV 点排布的控制要点

内容	质量控制要点			
CV 点的排布调整				
	相对的两边界保持相同的阶数和跨度		相对的两边界 CV 点排布规律且位置对应	
				
	曲面 CV 点排布均匀且延伸不扭曲		相邻曲面对应 CV 点连续对齐	

曲面光顺度控制对产品外观型面品质的判断最重要，是指视觉上型面的高光反射光顺而连贯，因此，对于可见的外观型面，尤其是高反光材质部分，控制型面的光顺度至关重要。曲面光顺度的控制要点见表 1-3。

表 1-3 曲面光顺度的控制要点

内容	质量控制要点			
控制型面的高光反射				
	相对的两边保持相似走势		相邻的两边尽量接近正交	
控制曲面的连续性				
	可视区所有曲面要求 G2 以上连续		对称曲面之间要求达到 G3 连续	

控制型面的高光反射——控制四边面相对的两边保持相似走势，同时控制相邻的两边尽量接近正交。这要求可视外观型面的高光反射光顺、均匀，变化有规律，不出现突变和扭曲。

控制曲面的连续性——定义相邻曲面之间的连续关系 [相交 (G0)、相切 (G1)、曲率 (G2)]，对于可视区所有曲面要求 G2 以上连续，对于基于对称轴的对称曲面要求达到 G3 连续，对于小于肉厚的翻边倒角至少要求 G1 连续。

给曲面上打斑马条纹，检查条纹变化趋势是否一致，是否出现突变。如果条纹走向一致，分布均匀，没有出现突变，则说明曲面的光顺度好。如果相邻曲面间的斑马条纹是断开的，则说明相邻曲面间连续性为 G0 关系；如果相邻曲面间的斑马条纹是连接对齐在一起的，但在对齐处有明显的折线，不够顺滑，则说明相邻曲面间连续性为 G1 关系；如果相邻曲面间的斑马条纹是顺滑地连接对齐在一起的，则说明相邻曲面间连续性为 G2 关系。

型面数模质量控制的三要素的具体应用详见第二章第六节。

4. 色彩材质可视化效果渲染

色彩材质可视化效果渲染是指通过材质色彩规划，对产品的外观零件进行色彩材质搭配设计，根据确定的材质色彩搭配设计方案，运用计算机辅助渲染软件对产品外观材质色彩效果进行渲染，并对渲染效果的材质色彩进行调整控制。其主要包括材质选择和表面效果控制，色彩的明度、纯度和色相调整。其详细应用在第二章的六个具体的设计项目中展开。

(1) 材质选择和表面效果控制是指根据设计效果定位，选择合适的材料，赋予材料合适的状态和表面肌理。按属性的不同，材料的种类有金属、塑料、玻璃、陶瓷、木材、皮革、布艺、石材、竹材等；按状态的不同，材料可分为实色、半透明和透明三种状态；按表面肌理的不同，材料有亮光、亚光和磨砂三种效果，见表 1-4。

表 1-4 材质状态和表面肌理对照表

状态	种类	亮光	亚光	磨砂
实色	金属			
	塑料			
	木材			
	皮革			
	布艺			
	石材			
半透明	塑料			
	玻璃			
透明	塑料			
	玻璃			
	宝石			

(2) 色彩的明度、纯度和色相调整，是指根据设计效果定位，选择合适的颜色，并调整颜色的明度和纯度，其根据具体情况选择调整产品的漫反射 (diffuse)、高光反射 (specular) 和暗部反射 (ambient) 三部分色彩的明度和纯度。

5. 外观件结构设计

外观件结构设计是对评估认可的外观件数模进行结构设计，输出制作实体模型样机，进行功能、造型、材质和色彩验证。其主要包括两方面内容，即生产工艺考量和结构工程考量，对于设计师主要考量生产工艺，对于结构工程师主要考量结构工程。

对于塑料件注塑生产工艺的限制，主要考量 5 个重要参数，即分模线控制、肉厚控制、脱模斜度控制、浇口位置控制和顶出位置控制。其详细应用在第二章的插线板型面设计与制作中展开。