



逆向建模技术及方法

1.1 逆向工程技术简介

逆向工程(reverse engineering, RE)也称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, FE)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 分析和快速成型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,将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。逆向工程与传统的正向工程不同之处在于二者的设计起点不同,设计要求和设计自由度也不相同。

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原理进行研究分析,是一种产品再设计并超越现有产品的过程。

1.2 逆向建模的概念和常用方法

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 1-1 所示,可分为几个阶段。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的基础，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。



图 1-1 逆向建模流程

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型。

特征建模一般是指通过抽取表达原始设计意图以及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，忽略了曲面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，该方法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，应用范围比较狭窄。

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，在一定程度上提高了模型重建的效率。但其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。

1.3 正逆向混合建模

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起来，充分发挥各自的优点。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 1-2 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。

Geomagic Design Direct(构建于业界领先的 SpaceClaim® CAD API)是 Geomagic 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

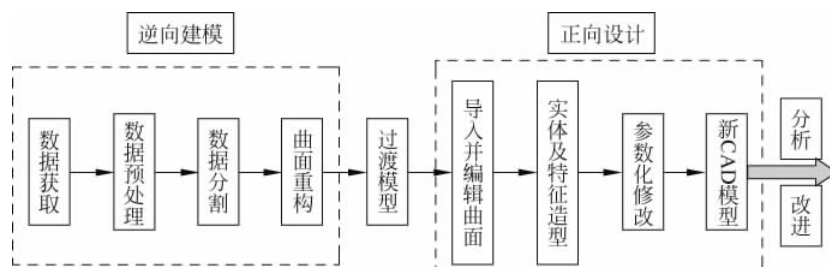


图 1-2 混合建模一般流程

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,用户同样可以自由地快速修改设计,并且无拘无束地更改特征的参数。

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,该软件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,该软件在只能提取一些必要的截面草图和特征信息的情况下,也能完整地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 1-3 所示。



图 1-3 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。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规则实体特征。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至正向建模软件,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。而 Geomagic Design Direct 就集成了对实体特征的编辑修改功能,可方便地实现对实体模型的再设计。

1.4 基于 Geomagic Studio 的逆向建模方法

传统的逆向建模技术是根据离散数据点重构一个完整、光滑、连续的曲面模型,因此曲面重构方法成为逆向建模技术中的一种关键方法。目前,已有学者展开研究的曲面重构的方法包括:函数曲面法、多边形模型法、隐函数法、细分曲面法、三角 Bézier 法、B 样条及 NURBS 法等。根据产品外观结构的几何特性分类,一般可将外观特征分为规则特征曲面和自由曲面。对于规则特征曲面,可通过平面、二次曲面和拉伸面等来进行拟合重构;对于自由曲面,可在连续性约束下,重构得到封闭、有向且各曲面之间能严格按拓扑关系连接的参数化曲面。现实生活中的工业设计产品,其外观结构往往既有规则特征曲面又有自由曲面,NURBS 方法可以统一表达解析曲线曲面和自由曲线曲面,因而 NURBS 方法在当今的 CAD/CAE 软件中得到广泛的应用,逆向建模软件 Geomagic Studio 也是应用该方法实现曲面模型重构的。

在 Geomagic Studio 中进行逆向建模重构一个曲面模型,通常需要经过三个阶段(有些原始测量数据是三角网格面形式,无需经过点云阶段)的处理:点阶段、多边形阶段和曲面阶段。点阶段的处理主要是对散乱点云进行对齐、过滤、采样等操作,以获得有序、便于处理的点云。多边形阶段的处理主要是对由点云三角化得到的三角网格面进行降噪、孔洞修补和光顺处理,以获得完整、光顺性较好的三角网格面。曲面阶段有两种处理模式:精确曲面重构和参数曲面重构,精确曲面重构适用于以复杂自由曲面特征为主的手工艺品等模型,参数曲面重构适用于以规则曲面特征为主的机械产品模型。在 Geomagic Studio 中,精确曲面模块采用非特征建模技术,其功能是将三角网格面模型划分为由多个较小的四边曲面片组成的集合体,然后在每个四边曲面片区域拟合 NURBS 曲面片,并保证相邻曲面片是全局连接和 G1 连续的;参数曲面模块采用了特征及参数化建模讲述,其功能可以对不同曲面的类型(二次曲面、旋转面、自由曲面等)进行定义,然后分别拟合得到相应的 NURBS 曲面,并可通过截面草图及施加约束等功能对模型进行调整,以及发送到正向软件中进行进一步的参数化修改。

下面以一个简单模型为例,分别介绍在 Geomagic Studio 中基于精确曲面和参数曲面的逆向建模方法,实现曲面模型重构的两种模式。

1.4.1 基于 NURBS 曲面片的精确曲面重构

在 Geomagic Studio 精确曲面模块下重构得到的曲面模型是由四边 NURBS 曲面片组成的集合体,可以在软件中自动重构得到,实际操作人员也可以应用精确曲面模块下的半自动编辑工具对其进行编辑后得到更为理想的结果。重构 NURBS 曲面模型的主要步骤可分为四个,分别是探测轮廓线或曲率、构造四边曲面片、构造格栅和拟合 NURBS 曲面。



1. 探测轮廓线或曲率

探测三角网格面模型表面的曲率或轮廓线以生成重构曲面的轮廓线,探测后提取出的轮廓线一般是由表面上高曲率变化所决定的,它们将整个网格面模型分成多个低曲率变化的主曲面,如图 1-4 所示。

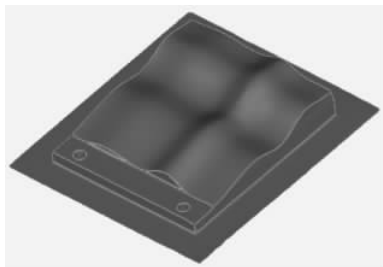


图 1-4 提取的轮廓线

2. 构造四边曲面片

构造四边曲面片是精确曲面重构阶段至为关键的一步,因为四边曲面片将为后续的拟合重构 NURBS 曲面模型创建曲面边界框架。创建的四边曲面片要满足三个基本要求才能重构得到表面质量较好的 NURBS 曲面模型,基本要求是:①规则的图形,每个曲面片要近似为矩形;②合适的形状,每个曲面片内部没有明显或较多的曲率突变;③有效的数量,曲面片在满足前两个要求的前提下,数量要尽量少。自动生成的四边曲面片通常会出现小曲面过多、曲面边界不规整等情况,在经过曲面片工具的编辑处理后的 NURBS 曲面片如图 1-5 所示。

3. 构造格栅

构造格栅是在每个四边曲面片里放置格栅,格栅线的交点准确地定位在三角网格面上,作为计算 NURBS 曲面的有序型值点,格栅线则作为计算 NURBS 曲面的样条曲线。构建的格栅越密集,从三角网格面上捕获并反映在最终 NURBS 曲面模型上的信息就越多。在每个四边曲面片中构造分辨率为 10×10 的格栅,其局部放大后的效果如图 1-6 所示。



图 1-5 编辑处理后的四边曲面片

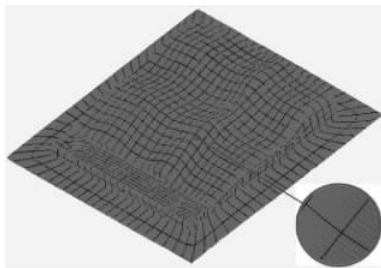


图 1-6 构造格栅

4. 拟合 NURBS 曲面

最后一步是根据前三步得到的中间结果,应用软件中自动拟合曲面的功能构造 NURBS 曲面模型,重构的 NURBS 曲面模型如图 1-7(a)所示,由 1104 片 NURBS 曲面组成。在精确曲面模块下的分析工具栏中还可对重构曲面与点云进行偏差分析,对比分析后的结果如图 1-7(b)所示。从图 1-7(b)中可以看到,除了存在突起的错乱网格面区域、数据不完整的孔洞区域和锐边区域,重构的曲面模型中绝大部分区域的误差很小,其中最大偏差为 0.198mm,平均偏差为 0.008mm,标准偏差为 0.020mm。

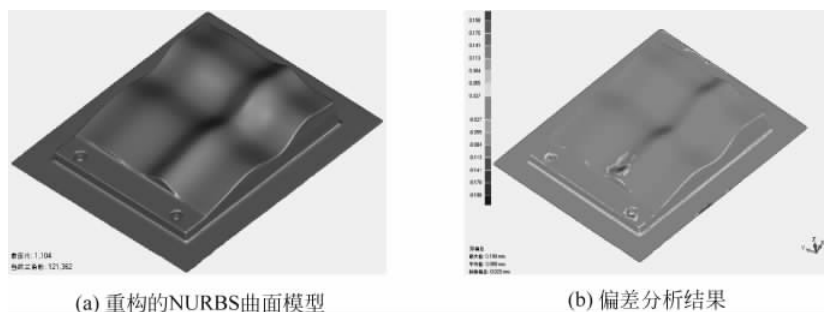


图 1-7 重构的 NURBS 曲面模型及其偏差分析

在精确曲面模块下重构得到的 NURBS 曲面模型精度高,拟合的曲面与点云之间的误差很小。但是它是由成百上千的四边 NURBS 曲面片组成,无法准确表达规则的曲面特征、曲面之间的连接特征(圆角连接或锐边连接等),导入正向软件后也无法进行编辑修改以实现逆向建模基础上的再设计。因此,精确曲面模块重构的 NURBS 曲面模型的实际应用面比较狭窄。

1.4.2 基于曲面特征的参数曲面重构

参数曲面模块重构的模型与精确曲面模块的不同,得到的是类似 CAD 的曲面模型——由几何类型明确的曲面拼接构成。以三角网格面模型为基础进行曲面重构时,由于受三角网格面片的表达限制,曲面模型可能存在不平整的平面区域,或是规则特征表达不准确的曲面(如圆柱面、圆锥面等规则曲面)。在参数曲面模块下进行曲面模型重构的过程中,可以在划分区域后的三角网格面模型中对各区域指定其所属的曲面类型(包括平面、二次曲面、拉伸面、旋转曲面等),再按曲面类型在各区域拟合曲面。曲面重构的主要处理步骤为:探测区域及编辑轮廓线、曲面的定义与拟合、连接面的定义与拟合、创建曲面模型。

1. 探测区域及编辑轮廓线

参数阶段下,首先在三角网格面模型中探测到高曲率区域,并自动使用红色分隔符将具有不同几何特征的区域分隔开,相邻区域的颜色不同以便直观地区分(如图 1-8(a)所示)。因为实际划分网格面模型的是从分隔符中自动提取的轮廓线,若探测区域后分割符划分区域的结果不理想,可以手动添加(或删除)分隔符或在参数对话框中更改区域敏感度的参数值。轮廓线是各几何特征区域的边界线,轮廓线是否光滑在很大程度上影响后续曲面拟合的效果,所以需对自动提取的轮廓线进行松弛、移动等编辑,处理后的结果如图 1-8(b)所示。

2. 曲面的定义与拟合

工业产品的表面通常混合了多种特征曲面。拟合曲面前,操作人员需对各区域指定其所属的曲面类型,Geomagic Studio 中可指定的曲面类型包括平面、二次曲面、自由曲面、拉伸曲面、拔模曲面、旋转曲面、扫掠曲面和放样曲面等。指定曲面特征类型后,软件将使用特定的特征曲面类型拟合出指定的区域。当拟合得到的曲面与三角网格面的偏差较大,会导

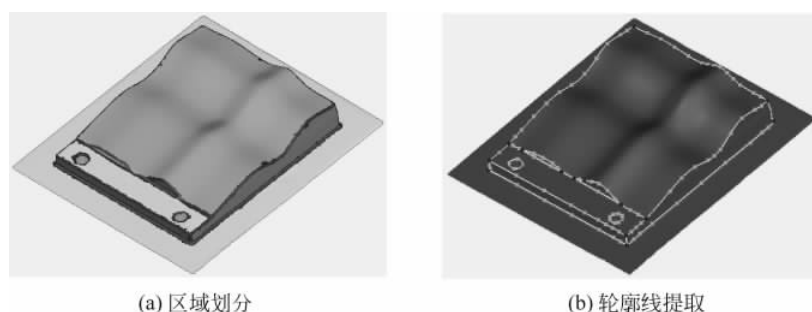


图 1-8 探测曲率并生成轮廓线

致后续的拟合曲面间的连接和裁剪缝合操作的结果不理想,需要修改拟合的参数后重新拟合。拟合曲面后的结果如图 1-9 所示。

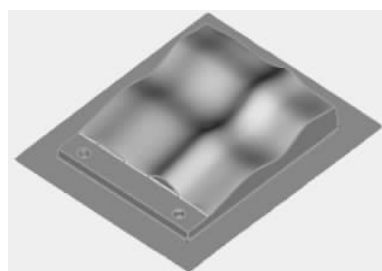


图 1-9 拟合曲面

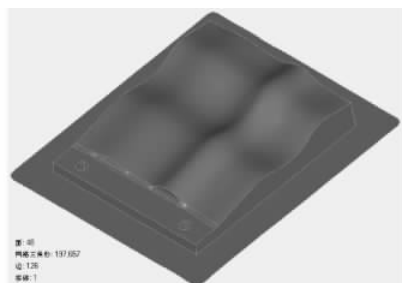
3. 连接的定义与拟合

工业产品模型上的曲面之间的连接方式(过渡特征),比较常见的有等半径圆角连接面、变半径连接面和倒直角连接面,Geomagic Studio 中拟合连接时相应的名称分别是:恒定半径、自由形态和尖角。由于三角网格面片会把曲面间的锐边过渡表达为圆角过渡面,软件自动识别曲面之间的连接曲面时通常会混淆尖角连接面和等半径圆角连接面,这就需要操作人员对曲面间过渡面的类型进行编辑修改。

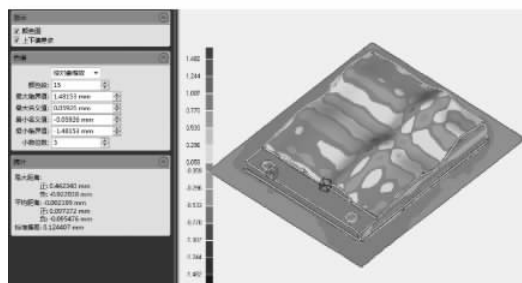
4. 创建曲面模型

拟合曲面及其相互之间的连接后,即可应用软件中的“裁剪并缝合”工具自动化处理,重构得到类似 CAD 的曲面模型。参数曲面模块下重构得到的结果如图 1-10(a)所示,主曲面及其相互之间的连接面共有 48 个面。拟合后的曲面模型与三角网格面之间的偏差分析的结果如图 1-10(b)所示,其中最大偏差为 0.442mm(立方体轮廓线标记处,即孔洞修补的区域内),平均偏差为 -0.002mm,标准偏差为 0.124mm。

参数阶段重构得到的曲面模型是按曲面的几何特征分别拟合后组合而成的,能在一定程度上反映出原始设计意图。另外,在拟合曲面及曲面间的连接后可通过软件的参数转换功能,将拟合的曲面模型输出至主流正向 CAD 软件(CATIA、SolidWorks、Pro/E 和 Autodesk Inventor)中,以便进行逆向建模基础上的再设计或创新。而且,在参数曲面模块下拟合规则曲面时还新增了功能,可通过施加约束(如圆柱面轴线的位置与角度),以



(a) 重构的参数曲面模型



(b) 偏差分析结果

图 1-10 重构的曲面模型及其偏差分析

及对曲面特征的截面生成草图进行编辑,来进一步提高建模精度。这也体现了逆向工程技术中,识别原始模型的设计意图,实现基于逆向建模模型的再设计功能,是重点发展的方向。



Geomagic Studio 逆向建模技术基础

2.1 Geomagic Studio 14 版软件介绍

Geomagic Studio 是由美国 Geomagic 公司提供的逆向建模软件,可将扫描所得的点云数据或多边形数据进行处理,并以处理后的多边形数据模型为依据,创建出逼近原扫描对象的 NURBS 曲面模型或 CAD 曲面模型,然后直接输出模型或将所创建模型输出至多款正向建模或正逆向混合建模软件。

Geomagic Studio 14 版软件在保留原有功能的基础上,新增了分析模块和曲线模块,并对点云阶段、多边形阶段、精确曲面阶段、参数化曲面阶段、采集模块、特征模块等功能模块进行了改进,且各阶段之间能够通过转换为多边形或点云相互连接起来。经上述改进后,不仅拓宽了 Geomagic Studio 逆向建模的建模方向,也使各阶段相互关联,提高了逆向建模的效率、精度。

Geomagic Studio 的主要优点如下:

(1) 更多样的建模。用户除可以在精确曲面阶段创建 NURBS 曲面模型和参数化曲面阶段创建 CAD 曲面模型外,还可以在曲线模块创建轮廓曲线模型,以及经采集模块获取特征数据后在特征模块创建具有规则特征的模型。

(2) 更快捷的建模。14 版本软件提供了多种自动建模操作,可快速创建模型。例如:在精确曲面阶段可以通过自动曲面化命令直接创建基于扫描数据的 NURBS 曲面模型。

(3) 高度兼容性。Geomagic Studio 可通过参数转换插件与多款正向建模软件进行参数转换,也可以实现正逆向混合建模软件的模型输出。

(4) 参数化程度更高。Geomagic Studio 所创建的 CAD 曲面模型可对草图中各线段参数加以修改,同时也可对线段间相互位置关系进行约束,便于用户获取更理想的尺寸、结构模型。

(5) 模块间联系更加紧密。针对复杂特征模型,如不易通过单一阶段操作获取的模型,可将多边形模型经后续某一阶段编辑后,重新转化为多边形,编辑部分经转化后会使该处多边形更符合原物特征,再进行另一阶段的编辑,获取理想模型。

(6) 提高产品设计效率。利用 Geomagic Studio 进行设计能够更快速地解决工程设计问题,并缩短设计开发时间。

综上所述,Geomagic Studio 14 版软件更好地实现了与三维扫描技术的完美结合,能够精简产品开发窗口、提供工作效率,为逆向工程提供了更有效的建模工具。



2.2 Geomagic Studio 逆向建模基本流程

Geomagic Studio 逆向设计的基本原理是对由若干细小三角形组成的多边形模型进行网格化处理,生成网格曲面,进而通过拟合出的 NURBS 曲面或 CAD 曲面来逼近还原实体模型。建模流程可划分为“数据采集—数据处理—曲面建模—输出”四个前后联系紧密的阶段来进行,如图 2-1 所示。

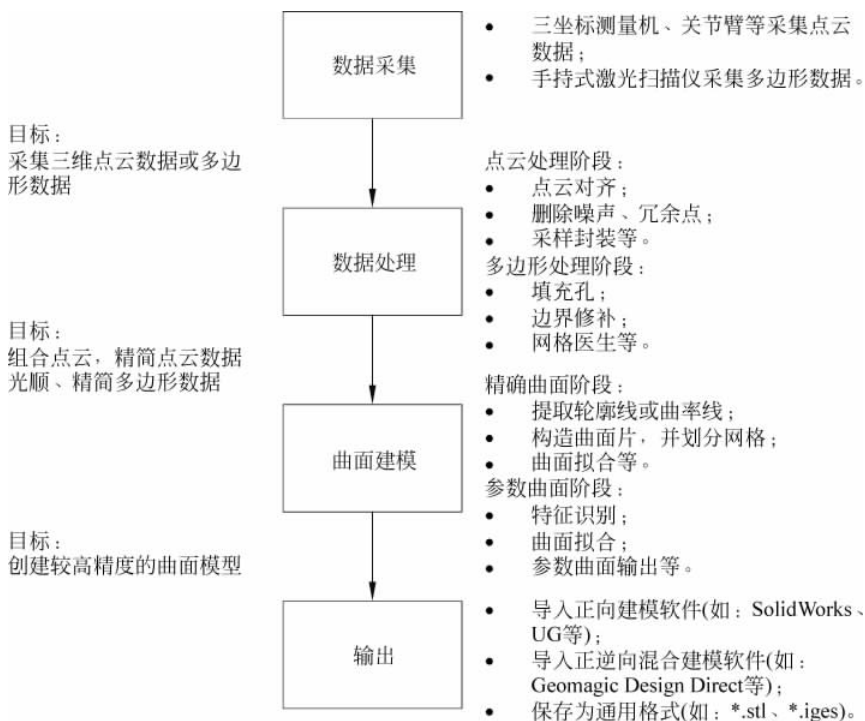


图 2-1 逆向建模流程

整个建模操作过程主要包括点阶段、多边形阶段和曲面阶段。点阶段主要是对点云进行预处理,包括删除噪音(噪声)和冗余点、点云采样等操作,从而得到一组整齐、精简的点云数据。多边形阶段的主要作用是对多边形网格数据进行表面光顺与优化处理,以获得光顺、完整的多边形模型。曲面建模可分为两个流程:精确曲面阶段和参数曲面阶段。精确曲面阶段主要作用是对曲面进行规则的网格划分,通过对各网格曲面片的拟合和拼接,拟合出光顺的 NURBS 曲面;参数曲面阶段的主要作用是通过分析设计目的,根据原创设计思路定义各曲面特征类型,进而拟合出 CAD 曲面。

2.3 Geomagic Studio 模块介绍

Geomagic Studio 的逆向建模操作主要包括以下九个模块:基础模块、采集模块、分析模块、特征模块、点处理阶段、多边形处理阶段、精确曲面阶段、参数曲面阶段和曲线模块。