

逆向工程的车身三维造型数字化技术

何 龙

(成都航空职业技术学院 航空维修工程系, 四川 成都 610100)

**摘要:** 针对汽车车身设计的特点,提出基于逆向工程技术的车身数字化设计平台框架,并对车身复杂曲面的造型方法和实施逆向工程的关键技术进行研究.首先根据已有的汽车车身外形,采用逆向工程技术和数字化技术,依据 STEP 标准建立起车身数据的统一数据模型,建立相应的工程数据库;然后,通过分布式 PDM 解决数据集成和过程集成,把车身数字化设计系统的各个子系统综合起来,最后,利用网络协议和分布式操作平台,架构车身虚拟数字化设计平台.

**关键词:** 汽车车身;逆向工程;曲面重构;数字化设计;NURBS 曲线;NURBS 曲面

**中图分类号:** U 463.820.2; TP 391.7 **文献标志码:** A

传统的车身设计过程要付出大量的劳动,还存在着精度低、修改调整困难、设计周期长等问题.逆向工程是从一个存在的物理模型构造出与之对应的特征是计算机辅助设计(CAD)仿真模型或实体物理模型的过程<sup>[1-5]</sup>.该技术作为现代复杂工业产品快速设计与批量制造的常见重要技术手段,深受计算机辅助设计及制造领域和现代工程技术届的广泛重视,而数字化设计与制造技术是逆向工程(逆向技术)中的关键技术之一<sup>[6-10]</sup>.近年来,逆向工程在车身设计中得到了广泛的重视.本文提出基于逆向工程技术的车身数字化设计平台框架,并对车身复杂曲面的造型方法和实施逆向工程的关键技术进行研究.

1 车身逆向工程三维计算机模型的建立

由于汽车整体车身是由高度复杂的、不规整的三维曲面组成,为了汽车整车设计制图的便利,根据现有参数化曲面理论通常把汽车整体车身划分为较多的相对比较简单、易于输入以及处理的曲面形状,提取这些曲面的有关信息,建立数字化工程数据库,为车身加工制造提供支持<sup>[11-17]</sup>.从油泥模型或者实体车身到建立车身三维计算机模型的流程图,如图 1 所示.

2 车身逆向工程三维数据的获取

车身逆向工程的工作过程之一就是整车车身外表面的数字化,而外表面数字化技术方法就是利用现代测量设备获取实物或物理模型的外表面数据<sup>[18-21]</sup>.因此,整车车身外表面数据采集是在整车车身外边面逆向工程设计工程中最基本和必需的一环,只有采集测量数据,才能进行车声曲面对比和误差分析,进一步进行计算机辅助设计中的曲面重新构造.

造型师所设计的油泥物理模型或者实体整车车身外表面模型通常都由极其复杂的自由曲面组成,

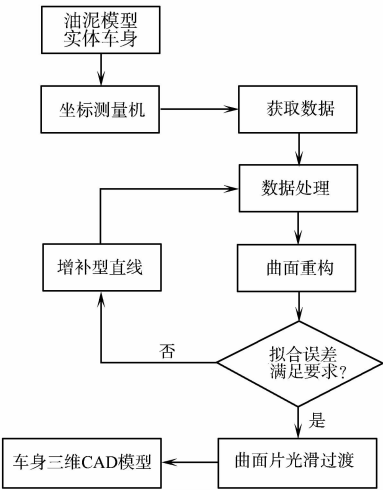


图 1 车身逆向工程流程图  
Fig. 1 Flow chart of the auto body reverse engineering

对其进行设计再现或者直接构建数字化模型是非常困难的，必须依据测量点的数据进行计算机辅助设计曲面建模。此外，被测物理点的分布及密度也会影响到后续几何曲面重新构造的快慢和车身外表曲面的质量。测量的目的是将造型师的设计理念及车身物理模型转化成三维数据点，然后根据数据点重构车身的 CAD 模型或直接生成 CAM 模型获取数控加工的轨迹。因此，车身外表面形状的三维空间离散采样速度、精度在逆向工程的工业过程中显得尤为重要。目前，表面数字化测量的实现手段已由过去的手工数字化测量过程转变为以现代测量设备和计算机控制全自动测量过程。

测量设备一般采用三坐标测量仪(CMM)，也有一些应用是在数控机床或工业机器人末端加装测量部件来实现数据测量和采集工作。根据测量元器件与被测对象的相对位置关系，可以将测量设备划分为接触式测量和非接触式测量，如图 2 所示。

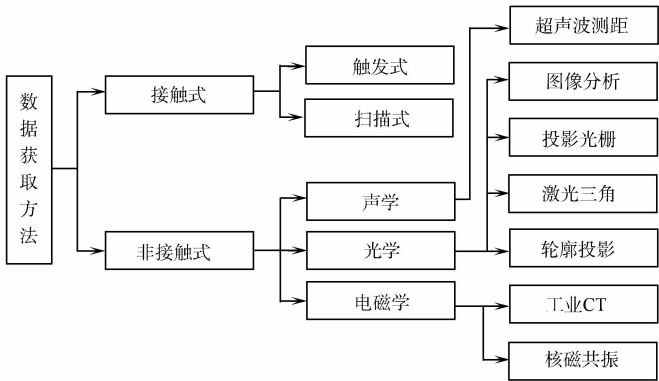


图 2 数据采集方法的分类

Fig. 2 Classification of the data collection methods

接触式测量主要包括基于力触发原理的触发式数据测量和连续式数据测量，通过提取测头上的探针与物件表面的接触情况进行数据测量和提取。在接触式测量方法中，三坐标测量仪(CMM)发展较为成熟，使用范围较广。它利用传感器来完成测量探头在物件表面上移动，然后记录下路径点的三维坐标值，由一系列二维测量获取复杂的三维曲面的相应数据。这种数字化测量数据的特点是位置点的高精度和被测点分布的低密度。接触式测量精度高，噪声低、可重复性好，并能按曲面曲率的变化不均匀地布点。但是其测量速度相对较慢、效率低，而且容易受到被测对象材料的限制；探头与被测对象间的摩擦力和接触力的存在也会引起被测对象的弹性变形，从而产生测量的误差，对刚性较差的物件难以做到高精度的测量，需要对探头的半径以及探头的表面损伤进行相应的补偿。此外，由于微细高精度曲面因探头不能触及而无法测量，所以不容易获取连续的三维坐标点。

非接触式测量一般采用光学原理进行数据测量。它是根据结构光三角形测量原理，把激光的光源投射到被测对象的表面；然后，利用光电敏感元器件在另一特定的位置接受激光的反射，根据反射的光点或光条在被测对象上成像的偏移，通过被测对象基于平面、像点和像距等之间的关系取得深度信息。通常典型的测量方法有激光三角测量法、激光测距测量法、结构光测量法等。非接触式测量的特点是测量装置不与被测对象接触，因而可以有比较高的测量速度，并可以测量材质较软的材料，但对被测对象的颜色、光照要求较高。测量方式也决定了非接触式测量的精度较低，后续数据处理过程较为复杂。

从国内目前的逆向工程中的实际应用来看，逆向工程中数据测量手段主要采用三坐标测量仪来实现。随着社会对效率和速度的要求在现代科技、工业设计和工业生产中的地位日益增长，非接触式测量方法和设备在工业设计与生产中的应用会越来越广泛。

### 3 车身逆向工程三维数据的处理

对数字化测量中得到的被测点的数据进行后续处理是逆向工程技术中的关键环节之一。基于逆向工程技术的车身数字化数据处理系统与传统的 CAD/CAM 系统相比，有两个显著的不同特点<sup>[11]</sup>：一是数据量巨大，测量的扫描点具有大量数据，通常一个小的零部件都有十几万个点，整车车身表面的数据量则可以达到几千万个点，并且密度非常大，常用的计算机辅助设计软件难以处理如此海量的数据；另

一个是测点数据离散,通常将车身逆向工程中测量得到的数据形象地称为点云.数据量大并不意味着能得到比较好的结果,其计算成本也会过高.

点云测量数据与其他各种类型的测量数据相对比,具有以下几个显著的特点:1)点云数据中比较容易出现噪声点,也就是误差很大的点,也会形成某些背景上的无用数据;2)当被测对象较大或三坐标测量仪测量区域不够大时,就要划分为不同区块来测量,这也就必然导致所测量的各个区块点云数据对应的区块坐标系不一致;3)当被测量对象的曲面较粗糙时,点云数据会形成比较大的随机误差;4)点云数据通常为海量,很难直接用于构建曲面,甚至有时是不可能,需要进行过滤、精简;5)虽然数字化系统能够自动地对实物在规定的区域内进行扫描,可是扫描方法往往缺乏一定的智能与灵活性,如在相对平坦的表面获取大量的重复数据点,而在曲面曲率变化较大的区域却没有记录反映曲面特点的关键点.鉴于以上原因,有必要在曲面重构之前先对点云进行数据预处理,以改善数据点的质量和提高了后续曲面重构的效率.

数据的后续处理和分析包括数据误差的修正与数据的规则化.由于被测对象的表面精度的不同,以及测量本身误差、测量设备自身误差等的影响,测量获取的空间三维坐标值一定有着一定范围的误差值.为了得到满足工业实际需要的精度及性能要求的整车车身外形数据,需要依据整车车身外形曲面的几何特性及形成规律,在实施外形曲面重新构造之前,进行三维坐标数值的误差修正.误差修正包括去噪、均化,以及冗余数据的去除、不完整数据的修正补充等处理.数据的规则化就是根据被测对象本身具有的基本特征,将测量获取的三维坐标值的点云数据划分成若干个不同的区块,在各个不同的区块内得到相应数量的截面图形,各截面图形之间的间隔可以不相等.将每个划分得到的截面上的三维坐标数值拟合成一条平滑的曲线.最后将三维坐标值的点云数据修正成为由曲线组成的网格图形.坐标三维数值数据规则化时如果截面分割得很少,就会导致造型与被测对象之间误差很大;而如果界面分割得太多,又会导致造型生产的曲面不平滑,曲面效果不理想.

获取的点云数据后续处理需要完成以下几个方面的工作.

1)点云数据的除噪与滤波,提高数据的规整性和有效性.三维坐标测量设备在扫描获取数据的实际过程中,特别容易受测量的方式、被测对象的物理性质、所处测量环境的温度和湿度等因素的干扰,这就会导致获取的三维坐标数值存在较大误差甚至失真的点.因此在处理三维坐标数值时,首先是删除误差大的数值点和失真点,即直接浏览获取的图形,把与截面上偏离较大的点以及计算机上显示的孤立点删除;然后,运用曲线检查方法,把截面线上的全部坐标点拟合成样条曲线,曲线的阶次应该依据截面的几何外形来确定,一般选取3~4阶;最后,分别计算得出数据点与样条线之间距离,再依据误差控制的大小删除坏点.

2)三维坐标系统的变换.由于三坐标测量设备所测量获取的三坐标值是在该测量设备三坐标系统中的数据,而在三坐标数据后续的计算处理中,通常希望点云三维坐标数据值是对应于原始坐标系统中的三维坐标数据值.但是在实际测量数据中都存在着一定程度的偏离,这就带来测量三维坐标系统与原始三维坐标系统的三坐标系统变换的问题.另外,当被测量对象过大的远离了测量三坐标系统的基准原点,那么点云数据中就会出现一些点的三坐标值很大,导致后面的曲面模型的构建难于处理.为了有利于后续的全部数据计算处理,也需要把坐标数据值进行三坐标系统的相应转换.

3)点云数据的对齐拼接.对于分区域测量的点云数据,为了获取被测对象的全部数据,反映出被测对象的完整面貌,需要将分区域获取的多片点云数据拼接在一起,消除不同测量区域间的重叠区域,也就是点云数据的对齐拼接.常见的数据计算处理方式有两种:一种是采用专门的测量设备去完成各个区快点云数据值的对齐拼接,这样就要设计一个专门用来采集并记录被测对象在测量中的移动数据和转动度数的自动转换平台;另一种是运用专用的计算机数据处理软件实现多区域点云数据的对齐拼接,从而实现重新构造原始模型,这也是目前最常用的多区域点云数据对齐拼接的方法.

4)特征提取.CAD建模中的关键要点,它对控制几何物理外形的形状具有极其重要的作用.一般把二次曲面和曲面间的过渡曲面统称为特征曲面,把局部曲面之间的交线和局部曲面的边界统称为特征曲线.这些特征对于重新构造物理模型的质量具有决定性的作用.整车车身外形曲面构造一般都要加入脊线、棱线等几何外形特征线,才有利于提高模型所需要的精度、提高“云点”数据的压缩比例.复杂

几何外形曲面有时需要混入用于过渡的曲面和平面, 曲面模型建模前把这些有显著曲率几何特征的曲面取出进行计算和处理, 将有利于提升几何曲面模型的精度. 几何特征提取依据的是几何曲面曲率变化程度, 来识别点云数据值中的棱边、边界和圆弧孔等突变特征, 根据估算曲面、曲线上点的几何法向矢量来确定曲面的不连续性几何特征, 从而得到几何特征点. 然后, 通过几何特征点的连接构造特征线和特征面. 关于几何特征识别和提取的研究, 通常是对物理模型构建中简单几何外形的识别和提取, 还没有特别理想的几何形状特征提取与识别方法.

5) 数据精简, 去除点云不必要的数据点, 减少计算量. 数据精简一般是在几何外形曲面曲率变化显著的位置留下较多的三坐标数据点, 曲率变化比较小的位置留下比较少的三坐标数据点. 不同形式的点云三坐标数据, 它的精简方式方法也不同, 散乱点云三维坐标数据通常运用随机采样精简; 扫描线以及多边形点云三坐标数据运用等量、等间距、弦偏差以及倍率变化等方式精简数据. 除此之外点云数据精简的方法还有均匀网格数据精简法和非均匀网格数据精简法. 均匀网格数据精简法不改变点的位置, 只是选取其中的某些点, 可以较好的保留原始数据, 这种方法比较适合于需要快速处理的简单表面; 非均匀网格数据精简法可以根据被测对象几何形状特征的实际需要来确定网格的密度, 能在确保曲面重新构造精度的前提下适当减少数据的数量, 该方法较适合处理几何形状变化较大的自由曲面.

## 4 车身逆向工程的曲面重新构造

曲面重新构造是逆向工程中极其重要的工程环节, 它的作用是依据数据处理后得到各区块的曲线网格. 首先, 需要将各区块分别拟合计算出各自的曲面, 再利用曲面求交、过渡、拼接、裁剪、延伸和平顺等方法把拟合计算出的曲面连接, 得到被测对象的表面形状以及尺寸几何精度内的曲面模型. 在实际应用中, 评价曲面重新构造的关键性指标是模型的几何不变性、光顺性、精确性.

工程实际中, 对自由曲面的数学描述, 业界普遍采用非均匀有理 B 样条曲线(non-uniform rational B-spline, NURBS)方法的数学描述. NURBS 比过去的网格建模方法能较好地控制模型表面的曲线度, 从而可以构造出更加真实、生动的模型<sup>[5]</sup>. 其数学表达式为

$$P(u, v) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n d_{i,j} R_{i,k,j,l}(u, v).$$

式中:  $d_{i,j}$  ( $i=0, 1, \dots, m; j=0, 1, \dots, n$ ) 为呈拓扑矩形阵列的控制顶点网格;  $R_{i,k,j,l}(u, v)$  是双变量有理基函数( $C^2$  连续)且有

$$R_{i,k,j,l}(u, v) = \frac{W_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n W_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}.$$

其中:  $W_{i,j}$  是与顶点联系的权重因子, 初始状态取  $W_{i,j} = 1$ ;  $N_{i,k}(u)$  为  $u$  向  $l$  次规范样条基, 一般  $l=3$ ;  $N_{j,l}(v)$  为  $v$  向  $l$  次规范样条基, 一般  $l=3$ ; 取重复度为  $r=4$ ; 即

$$\begin{cases} u_0 = u_1 = u_2 = u_3, \\ u_{m+3} = u_{m+4} = u_{m+5} = u_{m+6}. \end{cases}$$

$W_{i,j}$  越大, 曲面就越靠近控制顶点, 四角顶点处权重因子为非负; 曲面拟合的第一步是确定插值曲面的节点矢量. 设  $u, v$  两个方向分别获得  $m \times n$  个数据点, 则曲面上应有  $(m+3) \times (n+3)$  个控制顶点. 因此有

$$\begin{cases} U = \{u_0, u_1, \dots, u_{m+6}\}, \\ V = \{v_0, v_1, \dots, v_{n+6}\}. \end{cases}$$

用积累弦长参数法求  $(u_0, u_{m+3})$  内的节点值, 得切点矢量值. 则可根据方程求得控制顶点为

$$P(u_{i+3}) = \sum_{j=1}^{i+3} d_j N_{j,3}(u_{i+3}) = P_i.$$

NURBS 曲面能够精确表示解析实体和自由曲面, 具有灵活性大、效率和简洁度高等特点. NURBS 曲面与非有理 B 样条曲面都具有同样的凸包性, 以及几何不变形性. NURBS 方法已成为自由曲线曲面形状表示方面事实上的标准, 是 STEP 标准中描述产品几何形状的唯一方法. 曲面重构的流程图, 如图

3 所示.

5 车身逆向工程的 CAD 建模

车身逆向工程的 CAD 建模方法主要有:参数法建模、基于工程图纸的三维建模方法、三坐标测量建模、车身外表面分块造型,以及基于图像技术的模型重建等<sup>[18]</sup>. 实际应用中,三维参数化造型技术应用最广泛. 参数化建模的本质是实现设计人员与计算机交互式的智能化设计,其主要工作是要在不同的集合元素或特征信息之间构建尺寸的关联或集合特征的约束关系.

当通过测量油泥模型或实物车身进而建立起车身曲面或曲线的参数方程后,以 CAD 软件 UG 为例,生成几何空间曲线的参数方程,其过程<sup>[17]</sup>如下:

- 1) 构建形成三维坐标系统和二维平面坐标系统;
- 2) 选取合适的曲线构成方式;
- 3) 编辑曲线构成数学公式;
- 4) 计算测量数据,生成相应的几何曲线.

6 车身数字化设计平台结构框架

面向整车车身设计开发的数字化设计平台结构图,如图 4 所示. 该平台采用开放式的系统架构,一般分为工作层、应用层、协同平台层和基础服务层 4 个层次.

- 1) 基础服务层. 它主要包括汽车外形数据库、产品知识库、网络协议、计算机操作系统等,这些都是该平台架构的主要硬件和软件设施.
- 2) 协同平台层. 它由信息集成平台应用集成接口、过程集成平台流程管理系统、协同工作平台支撑工具、数据管理平台 VPM. 该平台层通常采用标准的、通用的系统软件,实现对系统软件支持的多样化;通过对车身设计过程中,不同类型数据的集中统一管理,制定各软件之间接口的标准,将有关车身三维 CAD 信息分类、封装并存入到车身数据库中,对车身的数字化快速集成设计提供了可能.
- 3) 应用层. 该层由汽车概念设计系统、虚拟油泥造型系统、计算机辅助设计系统、拓扑优化系统、汽车车身气动力学设计系统等构成整车车身数字化设计平台的主体. 系统由一系列专用功能的模块构成,通过调用、协调、控制和集成这些专用功能模块,来实现相应的通用平台.

- 4) 工作层. 这是车身数字化设计平台的集成用户界面. 软件界面具有良好的人机交互功能,能够为用户提供尽量分别,可以降低技术人员操作的要求,为在汽车企业的应用推广创造条件.

7 结束语

文中分析和介绍了实施逆向工程技术各阶段的关键技术,分析逆向工程中不同部分的特点和解决方案,重点讨论 NURBS 曲线曲面理论在车身曲面重构中的应用. 在汽车车身的开发设计中采用逆向工程技术,能够大大地缩短设计开发周期,降低设计费用. 对产品的改进和仿形设计以及对车身复杂型面

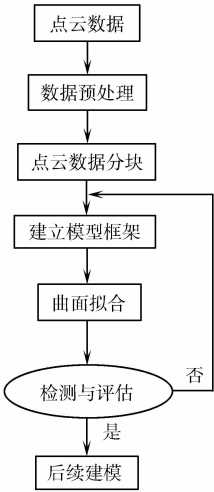


图 3 曲面重构流程图  
Fig. 3 Flow chart of the surface reconstruction

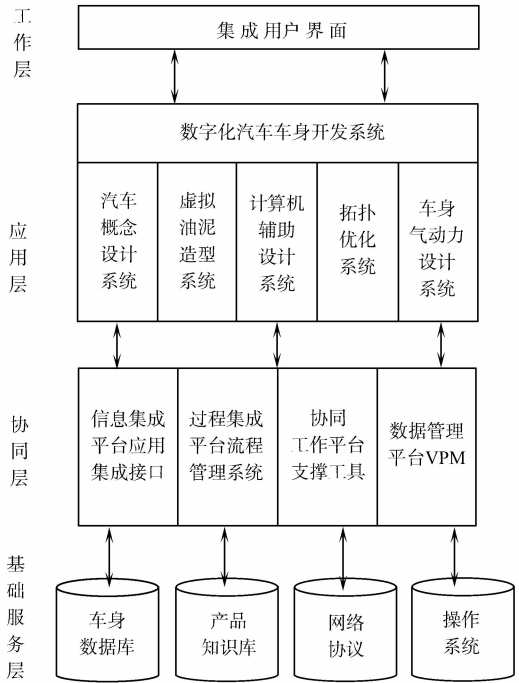


图 4 车身数字化设计平台框图  
Fig. 4 Block diagram of the auto body digital design platform

的数控加工具有较大意义。

参考文献：

[1] 高三德,周济,李志刚,等. CIMS 环境下汽车车身几何建模技术[J]. 计算机集成制造系统: CIMS, 1996(12): 19-22.

[2] 王明礼,彭文生,周济,等. CAD/CAM 集成环境下汽车车身 CAD 系统的研究与设计[J]. 汽车工程, 1993, 15(2): 19-22.

[3] 孙林夫. 面向产品开发过程的数字化设计技术研究[J]. 计算机集成制造系统: CIMS, 2003(12): 1088-1091. DOI: 10.13196/j.cims.2003.12.45.sunlf.008.

[4] 田晓东,史桂蓉,阮雪榆. 复杂曲面实物的逆向工程及其关键技术[J]. 机械设计与制造工程, 2000, 29(4): 1-3, 6.

[5] 陈浪,秦大同,谢勇. 逆向工程中自由曲面的数字化模型研究[J]. 机械设计与研究, 2002, 18(2): 38-40.

[6] 黄小平,杜晓明,熊有伦. 逆向工程中的建模技术[J]. 中国机械工程, 2001, 12(5): 539-542.

[7] 蒋祖信. 自由曲面的三维测量与反求工程[J]. 机电一体化, 2003, 14(4): 15-18.

[8] 陈勇,刘雄伟. 反求工程 CAD 建模技术[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 2001, 22(4): 376-379.

[9] 柯映林,肖尧先,李江雄. 反求工程 CAD 建模技术研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(6): 570-575.

[10] 段明德,马伟,李济顺. 反求工程中实物表面的数字化技术[J]. 矿山机械, 2004, 32(8): 80-81.

[11] 钟志华,黄海沙,杨旭静. 反求工程中的数据筛选与优化的研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004, 49(4): 107-113.

[12] 李康举. 反求工程技术在机械产品设计中的应用[J]. 机械设计与制造, 2006, 44(7): 41-42

[13] 许文全,何文学,陈国金. 反求工程技术及其应用[J]. 铸造, 2005, 54(8): 749-753.

[14] 何连英,陈勇. 反求工程在工业设计中的应用[J]. 新疆大学学报: 自然科学版, 2004, 30(1): 81-83.

[15] 谢斌,谢峰,何升立. 反求工程在汽车覆盖件模具设计与制造中的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2004, 46(12): 70-71.

[16] 刘之生,黄纯颖. 反求工程技术[M]. 机械工业出版社, 1992: 6-47.

[17] 高卫民,王宏雁. UG 软件在白车身 CAD 建模中的应用[J]. 汽车研究与开发, 2001, 16(1): 13-17.

[18] 何杰,孙庆鸿,陈南. 汽车覆盖件 CAD/CAM 逆向工程[J]. 机械设计与制造工程, 2000, 37(5): 40-42.

[19] 朱浩,方宗德. 汽车外形设计的三维数模重建[J]. 计算机辅助设计与制造, 1999, 6(10): 12-13.

[20] 李江雄,柯映林,程耀东. 基于实物的复杂曲面产品反求工程中的 CAD 建模技术[J]. 中国机械工程, 1999, 27(4): 38-41.

[21] 贾志勇,邱士均,贾志强. 车型 CAD 中的曲线和曲面造型[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 1999, 20(2): 111-114.

## Digital Technology of the Auto Body Three-Dimensional Model Based on the Reverse Engineering

HE Long

(Aeronautic Maintenance Engineering Department, Chengdu Aeronautic Polytechnic, Chengdu 610100, China)

**Abstract:** According to the features of auto body contour design, this paper puts forward a framework of digital design platform for auto body based on the reverse engineering technology, and studies the complex surface modeling method of auto body and some key technologies during the application process of the reverse engineering. In the first place, a corresponding engineering database according to the existing auto body shape is established. Then, the various subsystems of the auto body digital design system are colligated through the distributed PDM to solve the data integration and process integration. Finally, using the network protocol and the distributed operation platform, the virtual auto body digital design platform is constructed.

**Keywords:** auto body; reverse engineering; surface reconstruction; digital design; NURBS curve; NURBS surface

(责任编辑：黄仲一      英文审校：杨建红)