

[新设备·新材料·新方法]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.04.019

基于逆向工程的叶轮叶片建模

李琦, 胡义刚, 朱建军, 周杨

(上海工程技术大学 工程实训中心, 上海 201600)

摘要:逆向工程(Reverse Engineering)主要的步骤包括点云的获取与预处理, 曲面重构, 模型重建及数控加工等技术。为了探索含有自由曲面特征的叶轮在逆向设计过程中点云处理及曲面重构的关键技术, 验证相关的预处理方法与曲面重构的原理。文章以叶轮叶片作为研究对象, 利用随机滤波的方法对激光线扫描法获取的数据进行噪声点处理, 去除了点云中的多余数据及随机噪声, 分析了曲面重构的原理并通过 NURBS 曲面操作方法完成了叶片的曲面重构, 得到叶轮整体的三维模型。最后, 对通过逆向得到的叶轮模型进行了精度检测与验证。研究表明, 利用逆向工程技术提高了产品的设计质量, 缩短了研发周期。

关键词:曲面重构; 逆向工程; 点云预处理; 精度检测

中图分类号: TP391 文献标志码: A 文章编号: 1005-2895(2015)04-0076-05

Impeller Blade Modeling Research Based on Reverse Engineering

LI Qi, HU Yigang, ZHU Jianjun, ZHOU Yang

(Engineering Training Center, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

Abstract: Reverse technology's main steps include acquisition and preprocessing of point cloud, surface reconstruction, model reconstruction and nc machining technology. To explore the key technologies of point cloud processing and surface reconstruction in reverse design process of impeller with free-form surface feature to validate the relevant pretreatment method and the principle of surface reconstruction, this study uses impeller as the research object. Random filter algorithm was used to deal with the point cloud data collected via laser line scan, to remove the excess in the point cloud data and random noise. The principle of surface reconstruction was analyzed. Through the operation method of NURBS surface, blade surface reconstruction was finished, and 3D model of the impeller was obtained. Finally, the test precision was examined and verified. Result shows reverse technology can improve product design quality as well as reduce the R&D cycle.

Key words: surface reconstruction; reverse engineering; preprocessing of point cloud; precision testing

逆向工程是指针对已有产品原型, 消化吸收和挖掘蕴含其中的涉及产品设计、制造和管理等各个方面的一系列分析方法、手段和技术的综合^[1]。逆向工程的主要任务是通过测量所得的点云数据, 重新拟合构造出其原始三维几何模型, 即模型重建。主要的步骤包括数据的采集和获取, 数据预处理, 曲面重构, CAD 模型重建。其中数据的预处理是非常重要的一个步骤, 数据预处理的好坏直接影响后续曲面模型重构的质量, 从而对 CAD 模型的建立产生很大的影响。数据

处理完成之后就要对其进行模型重构, 当前逆向工程一般采用 NURBS 曲面来进行曲面的重构^[2]。

1 点云数据的获取

逆向工程中初始点云数据的获取是其能够顺利进行的基础, 得到初始点云之后经过点云的预处理才能进行曲面的重构, 得到其三维模型, 其基本关系图如图 1 所示。在对原模型进行分析之后, 要根据其产品原型特点, 以有利于其后续工作进行的原则选择合适的测量手段对其表面数据进行数字化测量, 得到初始的

收稿日期: 2014-10-28; 修回日期: 2015-01-20

基金项目: 上海市 085 内涵建设项目“数控测量技术实验室”(nhjx-2014-11)

作者简介: 李琦(1988), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要研究方向为逆向工程设计及三维测量、CAM。E-mail: liqi3626@163.

com

点云数据。

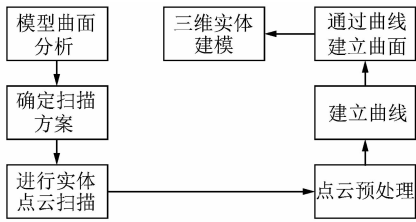


图 1 逆向建模一般流程

Figure 1 General process of reverse modeling

在点云数据获取方面,不同的测量方式会得到不同特征点云数据。通常反求工程中数据的测量方式有 3 种,即接触式测量,非接触式测量以及工业断层扫描测量。

非接触式测量是近些年快速发展起来的一种测量技术,它主要是利用光学的原理对扫描对象进行数据的采集获取。文中所提的点云数据的获取就是利用三角测量原理为基础,通过激光扫描仪获得非接触式三维数据的采集。初始点云数据及数据如图 2 和图 3 所示。

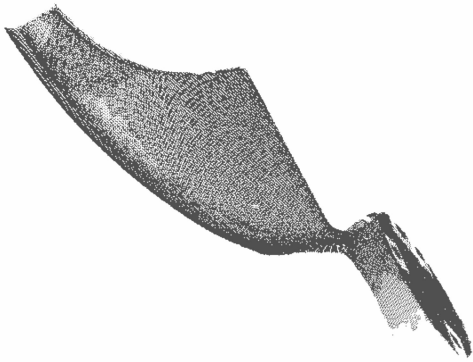


图 2 激光扫描得到的初始点云数据

Figure 2 Initial point cloud data by laser scan

点云信息	
标题	数值
名称	yepps
图层	iges_level 1
类型	点云
开始拐角	0.0000, 0.0000)
增量尺寸	0.0000, 0.0000)
数据点	75194
最大操作距离	55.5302
档案大小	
位移	原始位置

图 3 初始点云信息

Figure 3 Initial point cloud information

由图 2 可以看到,初始点云的点云数据量达到 7 万多个,数据量非常大,并且其中包含了定位点等多余的数据,边界处也存在着很多的噪声点,因此在进行逆向重构的时候必须进行预处理。

2 点云数据的预处理

2.1 数据精简

通过激光扫描仪扫描获得的数据通常是大量的无规则散乱点云,数量非常多,如果不加处理直接对其进行运算,那么在后期进行曲面拟合的过程中计算量极其庞大,并且运行速度也会非常慢;同时,由于操作者的经验、被测量零件表面的质量和环境等因素,得到的点云数据中不可避免会有很多的噪声点,在根据点云数据进行曲面重构之前,必须对这些噪声点及点云初始数据实行相应的预处理^[3]。

直接利用角度弦差法和八叉树法对点云进行精简一般都具有较高的效率,但是 2 种方法也有各自的适用范围,其针对的点云特征不同,因此在适用范围上均有限制,必须根据点云的特征来进行相应的选择。

2.2 点云数据去噪

通常传统的去噪光顺方法主要是采用频谱分析,传统滤波算法有高斯滤波、平均滤波和中值滤波 3 种。但是,在逆向工程实际操作应用中,其针对的点云特征各不相同,噪声的频率也不一样,有些点云噪声数据几个部分可能会有叠加现象。因此如果单纯利用传统的滤波算法往往达不到去噪和光顺的要求。同时,在测量得到的点云中,不是平稳噪声,可能会包含有尖峰以及突变的数据,要针对这种的点云数据进行去噪处理,传统去噪方法就达不到去噪的理想效果。以下是一种改进的新型去噪算法的原理。

2.2.1 改进的随机滤波去噪算法

在逆向过程的数据获取的时候,测量过程中会产生许多噪声误差,包含机器本身的精度误差噪声,操作人员的操作误差噪声以及在测量时产生的随机误差噪声。其中,随机误差噪声具有频率高,幅值大的特点,在其扫描线上会引起较大的尖峰噪声;同时,由于它的频率较高,因此在其扫描线上通常只会占很小的一段。除了上述强干扰噪声外,其点云数据中还有一些低频率的点云,这些随机信号与被测对象的表面变化接近,并且其幅值变化相对较小^{[4]48}。

对于具有上述特点的点云数据,在“一种点云数据噪声点的随机滤波处理方法”^[5]的基础上进行了改进,先采用估算数据点曲率的去噪算法去除明显噪声点,接着对有关阈值做了调整。

按照其去噪方法去除点云数据中的“坏点”后,为防止遗漏相关噪声数据,可以将数据点进行重新组合,按其判断的准则重复2至3次。另外,在对阈值进行选择的时候,如果选择的阈值太小则会出现漏判的可能,相反,如果选择的阈值过大,那么可能会删除多余的点,出现误判的现象,造成特征点及正确的点损失过多。因此,在对相关阈值进行选取的时候,需要根据点云数据的特点及其密度来综合确定,在保证去噪效果的前提下,避免出现漏判和误判^{[4]50}。

2.3 数据插补

在对其表面数据进行扫描获取的时候,对于一些扫描不到的区域以及表面缺失的部分的点云数据,可以通过点云数据插补的方法来进行补齐,本文的数据插补工作在点云获取的时候在扫描仪自带的处理软件中已经经过处理,因此不需要再次进行插补。

2.4 数据光顺

点云光顺又叫点云光滑。点云的光顺程度与其精度保持目前仍是一对相互对立的矛盾。若要求光顺度高,则必然会影响到点云的精度,但若要保持高精度的点云数据,则其光顺度就会相对较差。因此需同时考虑其精度及光顺要求,不能对数据点进行过程度的光顺操作;另一方面,由于逆向工程的操作对象其表面多为自由曲面,尤其是其边界曲面具有多样性,在边界上的特征点必须予以保留,而不能当作噪声点进行删除。

根据上述理论,对得到的初始点云进行处理,最终得到的点云如图4所示。由图中信息可以看到,经过处理后的点云数据量比初始点云减少了一半,多余的点云数据经过处理后已删除,并且处理后的点云噪声点减小了很多,边界处的噪声点也得到了很好的处理^[5]。

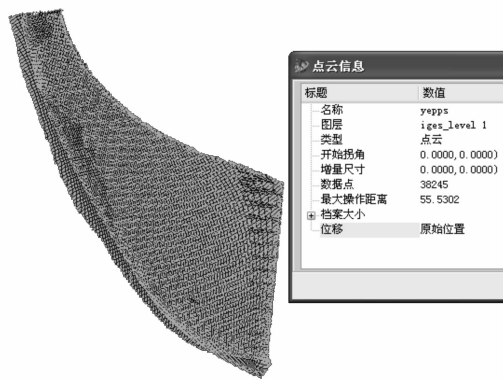


图4 经过预处理得到的点云

Figure 4 Point cloud data after preprocessing

3 曲面重构

点云经过预处理之后,就可以对点云进行逆向重

构了。曲面重构的过程是逆向工程中非常重要的一个步骤,它的目的就是根据经过预处理得到的点云数据,利用相关的曲面拟合操作,得到三维CAD模型,再对其进行相关的优化设计,然后进行数控加工或者快速成型得到与原产品相同或者更好的产品。

3.1 NURBS 曲线曲面

在逆向工程的设计过程中,根据重构曲面的方法,由当前的主要研究成果来分析,较为成熟的技术主要有以B样条或者NURBS(非均匀有理B样条)曲面为基础的矩形参数域曲面构造方法,当前逆向工程一般采用NURBS曲线曲面来进行曲面的重构。

3.1.1 NURBS 曲线的定义

一次 k 次NURBS曲线^[6]是由分段有理B样条多项式函数来定义的,它的形式为

$$P(u) = \frac{\sum_{i=0}^n \omega_i d_i N_{i,k}(u)}{\sum_{i=0}^n \omega_i N_{i,k}(u)}$$

上式中的 $\omega_i (i=0,1,\dots,n)$ 叫做权因子,也叫做权(weights),权因子分别与控制顶点 $d_i (i=0,1,\dots,n)$ 相联系。在权因子中,首末2段的权因子 ω_0 和 ω_n 均大于0,其余的 $\omega_i \geq 0$,以此来防止分母为0,并且能保留凸包性质以及曲线不至因权因子而退化为一个点。与非有理B样条曲线一样, $d_i (i=0,1,\dots,n)$ 叫做控制顶点,它们顺序连接成控制多边形。上式中的 $N_{i,k}(u)$ 是由节点矢量 $U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$ 所决定的 k 次规范B样条基函数。

基函数可以通过下列的递推公式来定义

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1, & \text{若 } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \\ N_{i,k}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_{i,k-1}(u) + \frac{u_{i+k+1} - u}{u_{i+k+1} - u_{i+1}} N_{i+1,k-1}(u) \\ \text{规定 } \frac{0}{0} = 0. \end{cases}$$

式中, k 为幂次; $u_i (i=0,1,2,\dots,n)$ 是节点。由此形成下式所示的节点矢量

$$U = [u_0, u_1, \dots, u_{n+k+1}]$$

节点矢量两端各有 $k+1$ 个相同的节点0和1,便于控制多边形首末2端点,并且使曲线与首末2端相切。

3.1.2 NURBS 曲面定义

将NURBS曲线以张量积形式推广,可以得到由双参数非纳凉分段有理多项式定义的NURBS曲面表达式:

$$P(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} d_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \omega_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}。$$

它的齐次坐标形式为

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

式中: $d_{i,j}$, $d_{i,j}^w$ 分别是控制顶点和带权控制顶点, 其中 $d_{i,j}^w = [w_i, d_{i,j}, w_{i,j}]$, $w_{i,j}$ 是相应的权值; $N_{i,k}(u)$ 、 $N_{j,l}(v)$ 分别为 k 次和 l 次的 B 样条基函数; 其节点序列为

$$U = [0, \dots, 0, u_{k+1}, u_{k+2}, \dots, u_m, 1, \dots, 1],$$

$$V = [0, \dots, 0, u_{k+1}, u_{k+2}, \dots, v_n, 1, \dots, 1]。$$

3.2 叶轮的曲面重构过程

首先利用 Imageware 软件^[7] 对处理得到的点云进行分析, 选择点云对其曲率作分析, 其分布图如图 5 所示, 根据曲率图结果显示可以得到叶片点云中上部过渡区域位置曲率变化比较大, 中间叶片大面与过渡连接处曲率变化相对较小, 而下部叶片大面的主体部分比较平坦, 曲率变化不大。

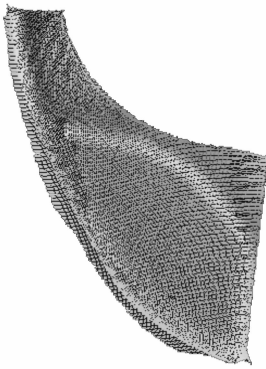


图 5 点云曲率分析图

Figure 5 Point cloud curvature analysis diagram

将点云数据进行分片截取, 并根据截取的点云构造曲线, 得到的点云截面线数据。如图 6 所示。

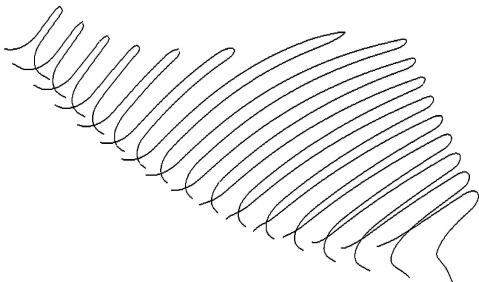


图 6 截取点云得到的截面线

Figure 6 Section line by intercept point cloud

根据得到的点云的截面线数据, 在逆向软件中对其进行曲面的逆向重构操作。经过曲面创建, 边界混合及边界修剪, 曲面合并等操作, 得到初步的单叶片重构模型, 然后对其转角处根据特征进行圆角操作, 得到最终的单叶片模型, 见图 7。

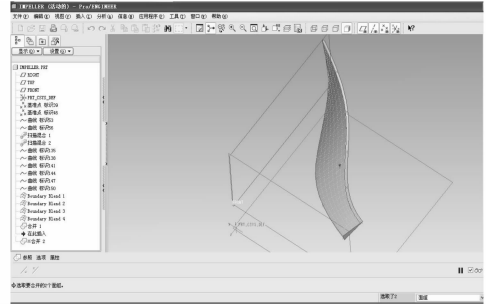


图 7 合并完成后的曲面

Figure 7 Surface after merger

以结束特征的定义, 对得到的叶片边界进行处理, 得到如图 8 所示的处理结果。

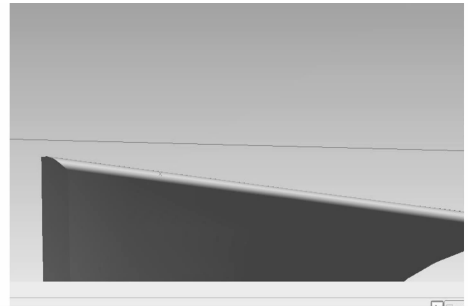


图 8 完成后边界圆角

Figure 8 Boundary rounded corner after completion

绘制轮毂曲线, 按主窗口右侧旋转工具的图标。按鼠标滚轮, 以结束特征的定义, 由此得到叶轮的轮毂, 以求得的交线修剪掉叶片埋进轮毂部分的曲面, 选叶片曲面为预备修剪掉的曲面。按主窗口右侧修剪工具的图标。选上一步骤叶片与轮毂的交线, 以对曲面进行修剪的动作。确认曲面修剪方向向外。按鼠标滚轮修剪后的叶片曲面如图 9 所示。

然后利用阵列命令得到最终的叶轮模型, 见图 10。

3.3 误差分析

将得到的叶轮模型与初始数据进行对比, 计算其拟合精度。Surfaces 里面选叶轮的整个面, 然后 Clouds 里面选 4 组原始数据点, 同时选择 Color Plot 按鼠标中键, 得到的误差分析结果如图 11 所示。根据图中信息我们可以看到, 右侧公差带显示其正法向偏差为 0.060 9 mm, 其几何偏差的最大值为 0.076 1 mm, 得到的叶轮的模型达到了精度要求。

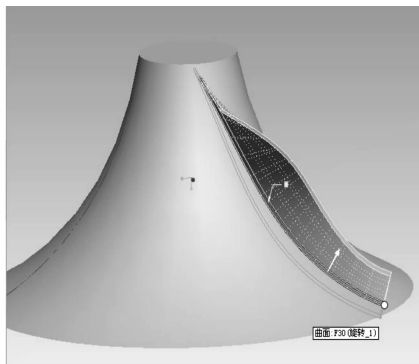


图9 合并后得到的叶片和轮毂

Figure 9 Blade and hub after merger

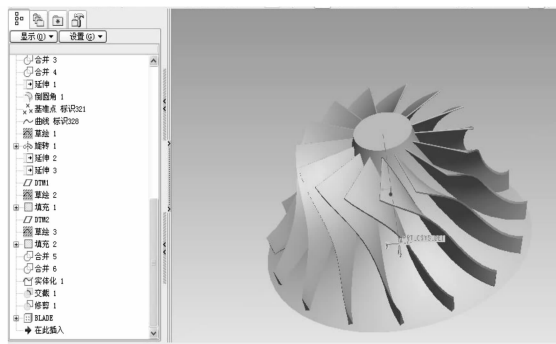


图10 完成群组阵列后的零件

Figure 10 Parts after completing group array

4 结语

利用逆向工程的相关技术,结合正向设计操作,提供了一条新的产品结构和外形的设计思路。逆向工程是对正向设计的补充和完善,有着不可替代的作用^[8],它是近现代迅速发展的新的产品设计方法,利用逆向工程可以提高产品的设计质量并且能缩短其设计开发的周期^[9-10]。

参考文献:

- [1] 刘伟军,孙玉文. 逆向工程原理方法及应用[M]. 北京:机械工业出版社,2009:1-3.

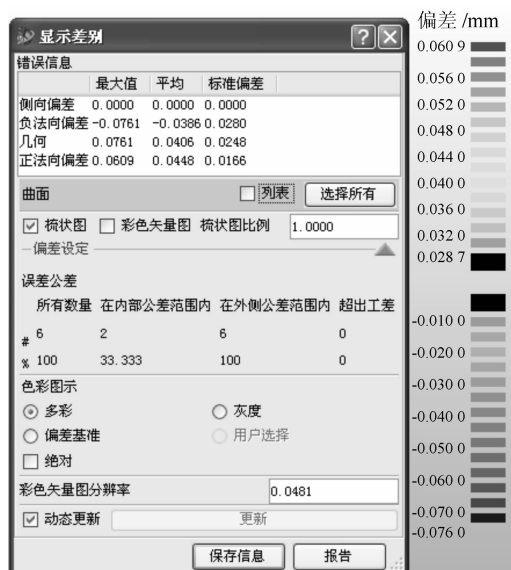


图11 误差分析

Figure 11 Error analysis

- [2] 柯映林. 反求工程 CAD 建模理论、方法和系统[M]. 北京:机械工业出版社,2005:1-10.
- [3] 周锋,刘占兵,鞠鲁粤. 逆向工程中点云数据的精简处理研究[J]. 机械工程师,2006(11):84-85.
- [4] 孟娜. 基于激光扫描点云的数据处理技术研究[D]. 济南:山东大学,2009:46-50.
- [5] 董明晓,郑康平. 一种点云数据噪声点的随机滤波处理方法[J]. 中国图象图形学报,2004,2(9):245-248.
- [6] 周纯江. 基于反求工程的自由曲面数控加工的研究与应用[D]. 杭州:浙江工业大学,2005:33-37.
- [7] 单岩,李兆飞,彭伟. Imageware 逆向造型基础教程[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2013.
- [8] 颜永年,张人佺,单忠德,等. 快速模具技术的最新进展及其发展趋势[J]. 航空制造技术,2002(4):17-21.
- [9] 崔建忠. 激光粉末快速成形技术[J]. CAD/CAM 与制造业信息化,2001(6):16-19.
- [10] 胡义刚. 导轮叶片反向设计[J]. 机床与液压,2002(5):127-128.

[信息·简讯]

· 产品介绍 ·

● 西门子推出可用于严苛环境的紧凑型高带宽工业交换机

西门子工业以太网通讯产品线添加了强健型新产品成员 Ruggedcom (罗杰康) RSG920P,它是一款高端口密度以太网交换机,可在气候及环境条件变化不定的严苛环境中工作。这款可耐受极端温度、振动和冲击的交换机,在交通系统和石油与天然气等行业应用中具备很高的可靠性。Ruggedcom RSG920P 拥有 20 个全千兆以太网端口,适合有高带宽需求且需要在未来进行网络扩容的应用。它配有四个 SFP(小型可插拔)插槽,

能够让用户按不同应用中的数据传输距离和不同的带宽灵活调整配置——它可同时支持选配千兆或百兆快速以太网光纤 SFP 插槽。

Ruggedcom RSG920P 的数据传输性能与 19 英寸标准尺寸交换机一样,它可以安装在空间有限的机柜里。由于体积较小,该交换机可以直接安装在 DIN 导轨上。设备上 Micro SD 卡插槽的设计能方便存储应用数据和固件,并便于设备运行调试和现场维修。

(朱建芸)