

基于工业 CT 的水泵叶轮三维实体重建<sup>\*</sup>

蒋小平 施卫东 李 伟 刘厚林 谈明高

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 为实现水泵叶轮三维实体重建,利用工业 CT 获取含有叶轮原型内部构造信息的高精度断层切片图像,并编程实现切片图像 RAW 数据格式到 BMP 格式的转换。在 VC + + 6.0 平台上,应用 MFC、OpenGL、ADO 等,通过断层图像预处理、二维图像处理及二维几何处理等数字图像处理技术去除图像噪声并显著提高了图像清晰度;编程完成了叶轮断层图像序列表面轮廓的三角面片三维重建,最终实现以半边结构边界模型(B-Rep)为基础的叶轮三维实体转换。在开发的叶轮逆向三维重建软件 ReImpeller3D 上运行的重建实例表明,该重建方法能为水泵叶轮的数值模拟、有限元分析、快速成形、产品数字化加工制造以及优化设计等提供直接的几何模型支持,具有一定的可行性与实用性。

关键词: 水泵 叶轮 工业 CT 边界模型 三维重建  
中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)11-0085-04

3D Model Rebuilding of Pumps Impeller Based on ICT

Jiang Xiaoping Shi Weidong Li Wei Liu Houlin Tan Minggao

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

In order to rebuild 3D models of pump impeller, ICT fault images in high quality of two typical impellers were collected at first, and format conversion from RAW to BMP was fulfilled though a developed program. On the platform of VC + + 6.0, MFC, OpenGL, ADO were used, and with the technologies of fault images pre-processing, 2D image processing and 2D geometric processing, noise to these images was removed and image definition was greatly improved. Development tools like 3D model in surface were reconstructed, transformation from surface model to solid model was also realized by triangular facets and B-Rep model. Living rebuilt examples fulfilled on ReImpeller3D showed that the way of reconstruction can supply geometrical models for numerical simulation, FEM, RP, digitized production, and optimization design, so it is feasible to use ICT fault images to rebuild 3D models of the impellers.

Key words Pump, Impeller, ICT, Boundary representation model, Reconstruction of 3D models

引言

利用三坐标测量仪、三维激光测量仪等常规逆向工程设备只能扫描水泵叶轮原型可视表面,不能检测其内部结构尺寸参数与缺陷,具有一定的局限性<sup>[1~4]</sup>。工业 CT(ICT)可在不损伤实物的前提下精确获得物体内部轮廓,是测量复杂内部构造零件的

方法<sup>[5]</sup>。本文利用 ICT 先获取高精度的离心泵叶轮断层切片图像,在 VC + + 6.0 平台上应用 MFC、ADO、OpenGL 等开发工具,通过数字图像处理技术,编程实现基于叶轮断层图像序列的三维实体重建。在自行开发的水泵叶轮逆向三维重建软件 ReImpeller3D 上,分别导入 2 个典型离心泵叶轮原型的 367 个高精度 ICT 断层切片图像,通过预处理、

收稿日期: 2011-05-25 修回日期: 2011-07-05  
<sup>\*</sup> 江苏省科技支撑计划资助项目(BE2010116)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)和江苏大学高级人才启动基金资助项目(1281440007)  
作者简介: 蒋小平,高级工程师,博士,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: jxp2502@163.com

二维图像处理、二维几何处理以及三维模型重建等菜单操作,较精确地建立叶轮原型的三维表面重建模型及实体模型转换,为下一步的数值模拟、有限元分析、快速成形、数字化加工以及产品研发等提供直接的几何模型支持。

1 叶轮图像数据的获取及格式转换

用来试验的 2 个离心泵叶轮叶片几何参数相同,叶片数分别为 4、6(以下称 1 号、2 号叶轮),材料为树脂;叶轮原型如图 1 所示。

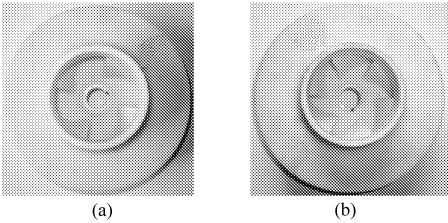


图 1 1 号、2 号叶轮原型图  
Fig. 1 Prototypes of impellers  
(a) 1 号叶轮 (b) 2 号叶轮

叶轮的断层图像序列是在首都师范大学的八自由度 ICT 装置上完成的。将 1 号、2 号叶轮如图 2 所示放置采样,经 27、28 min 各得到了 15 GB 左右的原始数据。利用滤波反投影算法进行图像重建后得到 2 个大小为 1.18 GB 的 RAW 格式裸数据文件。

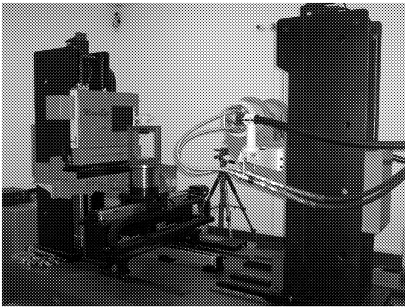


图 2 实验装置及叶轮放置图  
Fig. 2 Experimental device and location of impeller

由于 RAW 格式文件数据量庞大,不利于后续数字图像处理,需转换为常用的 BMP 位图格式文件,为此编写了转换程序来完成。处理后分别得到了 367 个 BMP 格式的断层图像文件,2 号叶轮的典型断层图像如图 3 所示(已做反色处理),1 号叶轮类似。

可以看出,ICT 处理后的叶轮断层图像清晰地包含了叶片形状、轮毂、轴孔、键槽等内部构造信息,为数字图像处理与重建提供了高精度的数据源。

2 断层图像数字处理

重建前必须对断层图像进行预处理、二维图像

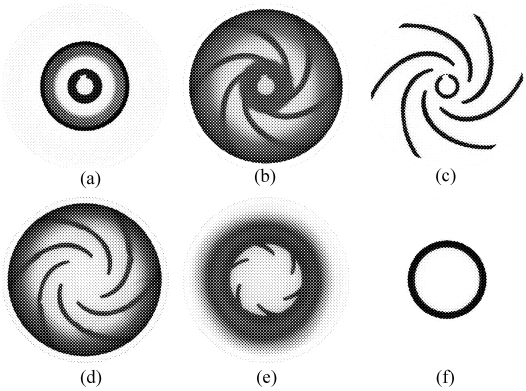


图 3 2 号叶轮典型断层图像  
Fig. 3 Typical images of the No. 2 impeller  
(a) 图像 1 (b) 图像 2 (c) 图像 3  
(d) 图像 4 (e) 图像 5 (f) 图像 6

处理以及二维几何处理等,分别达到滤波降噪与图像增强、边缘检测与轮廓提取及跟踪、轮廓矢量化等目标<sup>[6-7]</sup>。首先采用中值滤波消除图像中的噪声,保护边界信息的同时使图像得到明显加强;动态的局部分段线性灰度变换功能进一步加强了叶轮图像,图 4 所示的是 1 号叶轮第 155 断层与 2 号叶轮第 153 断层处理后的图像。



图 4 灰度变换后的图像  
Fig. 4 ICT images after gray transformation  
(a) 1 号叶轮 (b) 2 号叶轮

阈值分割及二值化准确地突出了含有叶片的叶轮特征区域;遍历掏空内部点的算法简单高效地完成了水泵叶轮断层图像的边缘检测,得到了只有单像素叶片特征轮廓的图像,叶片正、背面边缘等被提取了出来,轮廓线也比较光顺;通过八邻域的轮廓跟踪算法得到了单像素宽的互不相交的轮廓曲线及所有各轮廓的轮廓点序列,保证了轮廓的唯一性和准确性(图 5)。

最后通过像素坐标到笛卡尔坐标的转换,实现

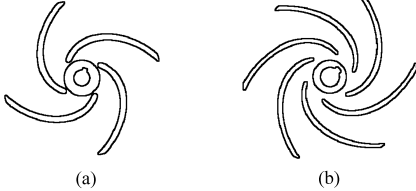


图 5 二维图像处理后的图像  
Fig. 5 ICT images after 2D processing  
(a) 1 号叶轮 (b) 2 号叶轮

叶轮图像轮廓离散点序列的矢量化处理,坐标转换公式为

$$G(x_i,y_i)=RTF(x_i,y_i)$$

其中 
$$T=\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

式中  $F(x_i,y_i)$  ——图像像素坐标点阵  
 $G(x_i,y_i)$  ——笛卡尔坐标点阵  
 $R$ ——坐标转换系数,由 ICT 断层切片图像大小和实物大小决定

本文叶轮尺寸  $175\times175$ ,重建图像为  $1\,024\times1\,024$ ,系数  $R=5.851$ 。

3 三维模型重建

三维重建主要有 3 种途径:基于轮廓的表面重建、基于体素的表面重建以及基于体素的直接体视法<sup>[8]</sup>。前者包含了物体的几何拓扑结构关系,能很好地表达空间层次,本文采用这种方式先后实现了 1 号、2 号叶轮的三维表面重建,并完成以 B-Rep 模型为基础的实体模型转换,具体过程如图 6 所示。

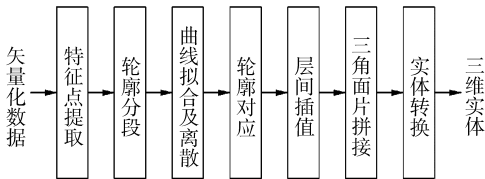


图 6 基于轮廓线的叶轮三维表面重建过程  
Fig.6 3D model of impeller after reconstruction

3.1 特征点的提取与轮廓分段

离心泵叶轮是标准回转体结构,具有显著的几何要素(圆、弧线等)以及造型特征(扫描、拉伸等)。可以先通过识别算法找出这些点列的特征点,在拟合出与叶轮原型的几何要素和造型特征相符合的曲线轮廓段之后再行均匀离散。特征点主要包括端点、极值点、拐点以及角点等。因叶片在进出口处轮廓形状变化剧烈,提取出的特征点主要集中在这 2 个地方。特征点提取后,轮廓线可以看成是以特征点作为中继的轮廓段的集合;特征点提取的同时也实现了轮廓的分段。

3.2 曲线拟合及离散

以特征点为中继的各轮廓段是离散点集合,为使重建的三角面片平滑过渡,必须加以处理才能使轮廓在几何上分段连续。本文采用形式比较灵活的抛物样条曲线作为拟合基函数。另外,因特征点数量有限,为防止重建表面模型失真,可对拟合后的轮廓曲线段再进行离散,通过增加点的数量来提高重建模型的质量。此时需重点控制离散点的数量,对于本文叶轮,均匀离散的方法足够保证重建叶轮的

精度;经反复试验,离散弧长取  $1.2\sim2.0\text{ mm}$ ,既可合理降低计算量,又能保证重建精度。

3.3 轮廓对应与层间插值

吸取 Perrin 和 Oliva 方法的优点,用离散距离场来进行一次中间插值,使层间距达到  $0.125\text{ mm}$ ,通过获得过渡轮廓同时又解决轮廓对应与层间插值问题,简单而有效地解决了轮廓对应与层间插值问题。

3.4 三角面片拼接

先通过计算距离场确定中轴,然后对断层轮廓进行表面三角化。表面三角化的核心算法为:利用中轴和与轮廓上已知的对应最近点进行曲面的三角划分,遍历中轴并将 2 个轮廓上与中轴每个像素对应的点连接形成边;即将  $Q$  上所有的离  $P_i$  比  $P_{i+1}$  近的顶点与  $P_i$  相连,其余的则与  $P_{i+1}$  相连,如图 7 所示。

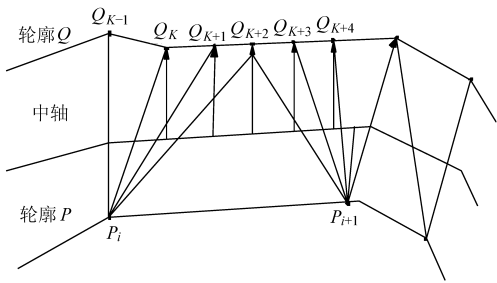


图 7 轮廓三角化拼接  
Fig.7 Joining together to triangles

使用以上算法重建得到的 1 号、2 号叶轮的三角面片模型如图 8 所示。

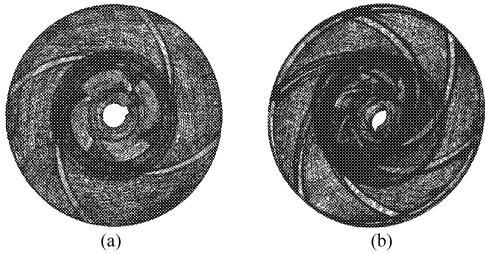


图 8 轮廓三角面片模型  
Fig.8 3D model in triangular facets  
(a) 1 号叶轮 (b) 2 号叶轮

3.5 表面模型转换为实体模型

实体模型的任意曲面一般是用多边形网格来逼近的。边界模型(B-Rep 模型)虽然是用实体的表面来表示实体的形状,但在具体处理时是将实体的表面形状表示为多面体,即用一组三维多边形所围成的形体来表示实体。所以可以在前面已经构造出的由三角面片链表构成的表面模型的基础上用边界模型来构造重建的三维实体模型。本文采用半边结构来表示水泵叶轮的三维实体模型。

重建后的叶轮的三维模型如图 9 所示。从图中可以看出,该模型在基本形状、结构尺寸上和叶轮原

型基本一致,光顺程度稍差,需要对算法与重建过程继续加以改进。

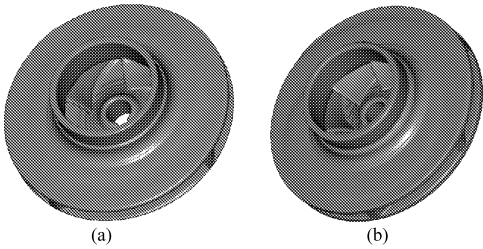


图 9 重建后的水泵叶轮三维模型

Fig. 9 3D impeller models after reconstruction

(a) 1 号叶轮 (b) 2 号叶轮

4 三维重建软件 ReImpeller3D 与重建实例

叶轮断层图像数字化处理的各种算法程序相互独立,为提高重建效率,本文综合应用 VC + + 6.0、MFC、OpenGL、ADO 等开发工具,利用模块化编程技术编制了水泵叶轮逆向工程软件 ReImpeller3D。程序流程图如图 10 所示。



图 10 主程序流程图

Fig. 10 Flow process chart of the main program

在如图 11 所示的主界面里,当点取子菜单“三维重建”的“三角面片法”菜单项时,程序自动将之前处理的数据生成图 11 所示的重建叶轮实体。

将重建叶轮与原型比较,二者形状上相似,尺寸基本一致,但叶片进口稍有增厚,叶片正、背面光顺性略差,分析与重建算法有关,需加以改正。

为检验叶轮重建精度,在 ReImpeller3D 上重建

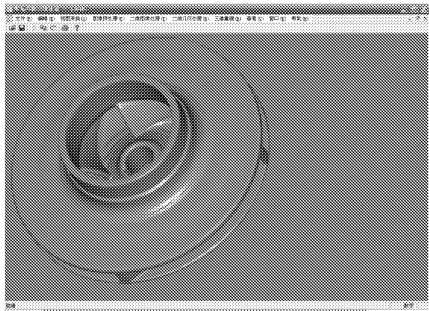


图 11 重建的叶轮三维模型

Fig. 11 3D impeller model after rebuilding by ReImpeller3D

的 1 号、2 号叶轮通过数据接口导出为 STL 文件进行 RP 快速成型,得到图 12 所示的重建叶轮零件。

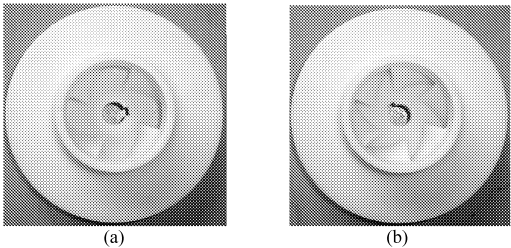


图 12 1 号、2 号快速成型叶轮零件

Fig. 12 Parts of RP impellers

(a) 1 号叶轮 (b) 2 号叶轮

观察发现 1 号、2 号 RP 快速成型叶轮的叶片进口圆弧半径偏大,造成叶片厚度有一定的增加,叶片正、背面的表面品质比原型略差。用游标卡尺对叶轮原型与快速成型叶轮测量后发现,1 号重建叶轮的厚度比原型大 0.45 mm,2 号叶轮大 0.97 mm,总体效果达到既定要求。

5 结束语

应用一系列数字图像处理技术编程实现了基于离心泵叶轮断层图像序列轮廓的三维表面重建,并完成三角面片表面模型到实体模型的转换。应用自行开发的逆向工程软件 ReImpeller3D 得到重建叶轮实例,快速成型叶轮与其原型的对比分析表明文中所述的三维重建方法可行。

参 考 文 献

1 施卫东,蒋小平,李伟,等. 基于 CT 的水泵叶轮三维重建[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 100 ~ 103.  
Shi Weidong, Jiang Xiaoping, Li Wei, et al. 3D reconstruction on impeller of pumps based on CT [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 100 ~ 103. (in Chinese)

2 蒋小平. 基于工业 CT 的泵叶轮逆向工程关键技术研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2009.  
Jiang Xiaoping. Study on the key-technologies of reverse-engineering to impeller of pumps based on ICT [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2009. (in Chinese)

3 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995

4 金涛,童水光. 逆向工程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

- Agricultural Mechanization Research, 2003(2):39~40. (in Chinese)
- 9 武志杰, 张海军, 许广山, 等. 玉米秸秆还田培肥土壤的效果[J]. 应用生态学报, 2002, 13(5):539~542.  
Wu Zhijie, Zhang Haijun, Xu Guangshan, et al. Effect of returning corn straw into soil on soil fertility [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(5):539~542. (in Chinese)
- 10 田慎重, 宁堂原, 王瑜, 等. 不同耕作方式和秸秆还田对麦田土壤有机碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(2):373~378.  
Tian Shenzhong, Ning Tangyuan, Wang Yu, et al. Effects of different tillage methods and straw-returning on soil organic carbon content in a winter wheat field [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(2):373~378. (in Chinese)
- 11 Kapkiyai J J, Karanja N K, Qureshi J N, et al. Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenyan nifisol under long-term fertilizer and organic input management [J]. Soil Biol Biochem, 1999, 31(13):1 773~1 782.
- 12 刘建国, 卞新民, 李彦斌, 等. 长期连作和秸秆还田对棉田土壤生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(5):1 027~1 032.  
Liu Jianguo, Bian Xinmin, Li Yanbin, et al. Effects of long-term continuous cropping of cotton and returning cotton stalk into field on soil biological activities [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(5):1 027~1 032. (in Chinese)
- 13 劳荣秀, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4):618~623.  
Lao Rongxiu, Sun Weihong, Wang Zhen, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility [J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(4):618~623. (in Chinese)
- 14 周怀平, 杨治平, 李红梅, 等. 秸秆还田和秋施肥对旱地玉米生长发育及水肥效应的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(7):1 231~1 235.  
Zhou Huaiping, Yang Zhiping, Li Hongmei, et al. Effect of straw return to field and fertilization in autumn on dryland corn growth and on water and fertilizer efficiency [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(7):1 231~1 235. (in Chinese)
- 15 贾伟, 周怀平, 解文艳, 等. 长期秸秆还田秋施肥对褐土微生物碳、氮量和酶活性的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(2):138~142.  
Jia Wei, Zhou Huaiping, Xie Wenyan, et al. Effects of long-term returning corn stalks to the field combined with applying fertilizer in autumn on microbial biomass C, N and enzyme activity in cinnamon soil [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2008, 23(2):138~142. (in Chinese)
- 16 杨治平, 周怀平, 李红梅. 旱农区秸秆还田秋施肥对春玉米产量及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6):49~52.  
Yang Zhiping, Zhou Huaiping, Li Hongmei. Effect of autumn fertilization combined with returning stalks to field on corn yield and water use efficiency in arid farming areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2001, 17(6):49~52. (in Chinese)
- 17 赵先丽, 张玉书, 纪瑞鹏, 等. 辽宁春玉米出苗期水分胁迫试验初探[J]. 气象与环境学报, 2010, 26(4):35~39.  
Zhao Xianli, Zhang Yushu, Ji Ruipeng, et al. Preliminary discussion on water stress of spring maize during seedling in Liaoning province [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2010, 26(4):35~39. (in Chinese)

(上接第 88 页)

- 5 Sattar, Farook, Gao Xinting. Image enhancement based on a nonlinear multi-scale method using dual-tree complex wavelet transform [J]. IEEE Pacific RIM Conference on Communications, Computers, and Signal Processing-Proceedings, 2003: 716~719.
- 6 郑卫国, 颜永年, 卢清萍, 等. 基于 CT 图像的快速成形数据建模方法[J]. 中国机械工程, 2002, 13(20):1 734~1 737.  
Zheng Weiguo, Yan Yongnian, Lu Qingping, et al. A modeling method for rapid prototyping based on CT images [J]. China Mechanical Engineering, 2002, 13(20):1 734~1 737. (in Chinese)
- 7 张京平, 张华, 王会. 富士苹果主要成分的 CT 无损检测[J]. 农业机械学报, 2008, 39(7):99~102.  
Zhang Jingping, Zhang Hua, Wang Hui. Non-destructive test of Fuji apple's major components by CT [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7):99~102. (in Chinese)
- 8 Lee K H, Woo H, Suk T. Data reduction methods for reverse engineering [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(10):735~740.