

基于 CT 的水泵叶轮三维重建*

施卫东 蒋小平 李伟 谈明高 刘厚林

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 针对当前常用的逆向工程方法不能处理水泵零件内部结构的局限性,提出了利用医用多层螺旋 CT 对水泵叶轮进行透视扫描的方法,并在 VC++ 6.0 开发平台上,利用一系列数字化图像处理算法对获得的含有叶轮设计与内部构造信息的 CT 断面图像进行处理,通过预处理、二维图像处理、二维几何处理以及三维图像重建等实现了水泵叶轮的三维表面重建以及表面模型到实体模型的转换,为水泵叶轮的逆向工程提供了一种新的思路。

关键词: 水泵 逆向工程 叶轮 模型重建 多层螺旋 CT

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0100-04

Three Dimensional Reconstruction on Impeller of Pumps Based on CT

Shi Weidong Jiang Xiaoping Li Wei Tan Minggao Liu Houlin

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

Abstract

Aimed at the limitation of the ordinary methods of reverse engineering at present in unable showing the inner construction of pump parts, a new way on reverse engineering for impeller of pumps was presented. It utilized the multi-slice CT to scan its inner construction, and used a series of algorithms on digital image processing to treat the obtained images which contained information of design and inner construction of impeller on VC++ 6.0, 3-D model of surface was reconstructed and transformation from surface model to solid model was also fulfilled by pre-processing, 2-D image processing, 2-D geometric processing and 3-D reconstruction.

Key words Pump, Reverse engineering, Impeller, Reconstruction of models, Multi-slice CT

引言

叶轮是水泵最重要的零件^[1]。叶轮逆向工程是消化、吸收国内、外优秀水力模型并加以改进的一种高效的产品设计思路和方法,通过逆向工程可以迅速提高叶轮的设计水平^[2]。叶轮逆向工程中非常关键的一个过程是叶轮的三维 CAD 模型重建,它是叶轮数字化加工制造、快速成形、数值模拟与仿真、有限元分析以及产品再设计的基础,同时可以提供数学模型的支持。逆向工程途径不同,其三维模型重建的方法也不同,目前常用的三坐标测量仪、三维激光测量仪等逆向工程设备只能获得原型零件外

表面的图像数据,不能获取内部结构与几何尺寸,不能检测零件的内部缺陷,对于水泵叶轮来说具有较大的局限性^[3-5]。

本文利用医用多层螺旋 CT 对材料为工程塑料的离心泵叶轮进行螺旋透视扫描,获得一系列含有其内部构造信息 CT 断层图像,然后在 VC++ 6.0 平台上分别通过平滑去噪等图像预处理、边缘检测及轮廓提取等二维图像处理、边界轮廓矢量化等二维几何处理、表面分片和曲面生成以及三角面片化等数字图像处理算法,编程实现水泵叶轮的三维表面重建以及表面模型到实体模型的转换,为水泵叶轮的逆向工程提供一种新的思路。

收稿日期: 2009-02-26 修回日期: 2009-09-30

*“十一五”国家科技支撑计划资助项目(2008BAF34B15)、江苏省“333 高层次人才培养工程”资助项目和江苏高等学校优秀科技创新团队计划(苏教科(2009)10号)

作者简介: 施卫东, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: wdshi@ujs.edu.cn

1 获取 CT 断层图像数据

叶轮断层图像的获取是在江苏大学附属江滨医院的多层螺旋 CT 机上完成的。该 CT 机为美国 GE 公司产品;与普通 CT 机相比,多层螺旋 CT 机具有高清晰度、高分辨率、高速扫描、性能优越等特点,而且旋转一圈就能采集出 8 层图像,实现了真正的高速透视成像^[6]。

根据叶轮的结构特点,为了重建时能充分利用叶轮的结构特征,同时也为了减少三维图像重建的难度与工作量,采集数据时尽可能使叶轮中心线与 CT 机水平轴心线重合(图 1)。采集精度采用 $512 \times 512 \times 1.25$,扫描后共获得 56 幅断层图像,如图 2 所示为第 20、25 幅图像。从图 2 中可以看出,经多层螺旋 CT 透视扫描后,叶轮的断层图像包含了水泵叶轮的所有内部结构,如叶片形状、轮毂、轴孔、键槽等的结构信息,为后续的数字图像处理与三维图像重建提供了可靠的数据与信息基础。

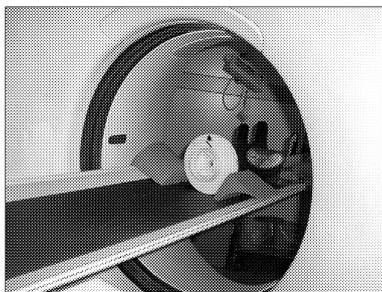


图 1 叶轮在 CT 中的放置图

Fig. 1 Location of the impeller on CT

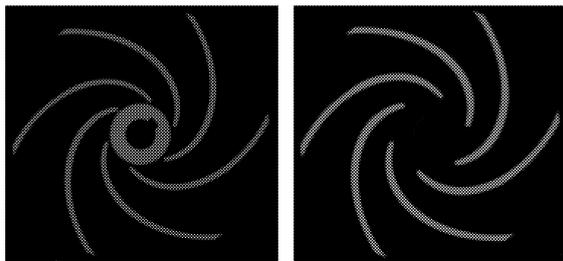


图 2 叶轮原始 CT 图片

Fig. 2 Original CT images of impeller

2 图像预处理

由于在 CT 断层图像获取过程中,CT 机硬件系统、外界干扰以及传输过程中的噪声等都会对图像的质量产生影响,使图像出现不同程度的质量下降,必须进行滤波去噪;另一方面,为了消除因外界干扰以及断层图像重建过程中各种客观因素的影响可能出现的伪迹现象,也很有必要通过灰度变换等措施使断层图像得到增强。

2.1 滤波去噪

一般在空间域内采用邻域平均即局部平均滤波

来减少噪声,而在频率域内,因噪声频谱多在高频段,故一般采用中值滤波和高斯滤波等低通滤波的办法。

中值滤波是一种非线性的信号处理方法,可以克服线性滤波器如均值滤波等带来的图像细节模糊,对滤除脉冲干扰及图像扫描噪声很有效。根据课题特点,采用中值滤波。

使用 3×3 模板分别对断层数据第 20、25 断层进行中值滤波,滤波后的图像如图 3 所示。可以看出,噪声已基本消除,同时边界也很好得到保护。

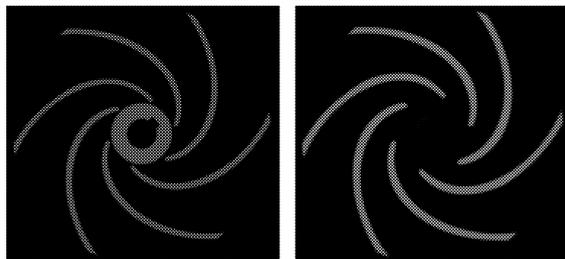


图 3 中值滤波后 CT 图片

Fig. 3 CT images after filtering

2.2 灰度变换

灰度变换的目的是增强 CT 断层图像的对比度,扩大图像灰度范围,从而达到增强图像的目的。为此采用局部分段线性变化法来实现灰度变化,该算法的数学模型为^[7]

$$G(x, y) = \begin{cases} \frac{c}{a}F(x, y) & (0 \leq F(x, y) < a) \\ \frac{d-c}{b-a}[F(x, y) - a] + c & (a \leq F(x, y) < b) \\ \frac{M_g - d}{M_f - b}[F(x, y) - b] + d_b & (d_b \leq F(x, y) \leq M) \end{cases}$$

图 4 是处理后的第 20、25 断层图像。需要注意的是,在处理时还可以通过小心调整折线拐点的位置并控制分段直线的斜率来动态地对任一灰度区间进行扩展或压缩,直至达到满意的效果。

3 二维图像处理

二维图像处理主要是对前面处理过的图像进行



图 4 灰度变换后得到增强的 CT 图片

Fig. 4 CT images after gray level threshold

边缘检测并跟踪、提取其轮廓,为二维几何处理提供数据准备。边缘检测的方法很多,而且新算法还在不断地出现。根据需要采用基于梯度的检测算子来进行边缘检测,用八邻域轮廓跟踪来实现轮廓提取。

3.1 边缘检测

基于梯度的检测算子有很多,本文采用 Robert 算子对灰度变换后的第 20、25 断层图像进行边缘检测。Robert 边缘检测算子是根据任意一对互相垂直方向上的差分可用来计算梯度的原理,采用对角线方向相邻像素之差。该算子的数学模型为

$$\Delta_x f = f(i, j) - f(i + 1, j + 1)$$

$$\Delta_y f = f(i, j + 1) - f(i + 1, j)$$

$$R(i, j) = \sqrt{\Delta_x^2 f + \Delta_y^2 f}$$

图 5 是处理后的图像,可以看出:叶片的边缘已比较完整、清晰地被检测出来,说明使用 Robert 边缘检测算子的定位精度高,效果较好。

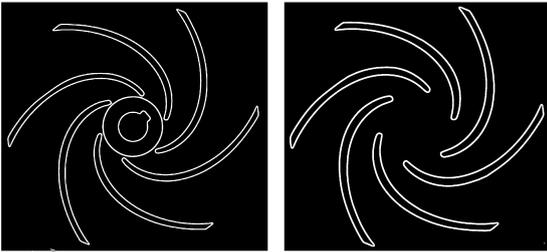


图 5 边缘检测后的 CT 图片

Fig. 5 CT images after edge-detection

3.2 轮廓跟踪与提取

边缘检测后得到的边缘轮廓是离散、独立、互不相关的各边界轮廓点的无序组合,需要利用轮廓跟踪算法,沿着图像的轮廓进行搜索,将搜索到的轮廓上点的坐标记录在点列中存储,供以后使用,其结果是,每一条轮廓线都表示成一个点列^[8]。

本文采用八邻域轮廓跟踪方法,在采用轮廓跟踪算法时,边缘灰度图中背景像素颜色为白色,边缘上的像素为黑色。

结果如图 6 所示。可以看出,叶轮断面的轮廓是封闭的,同一切片上的多轮廓也互不相交,实现轮廓跟踪后的每一条轮廓线是单像素宽的互不相交的曲线。同时也得到了每个轮廓的轮廓点序列,为矢

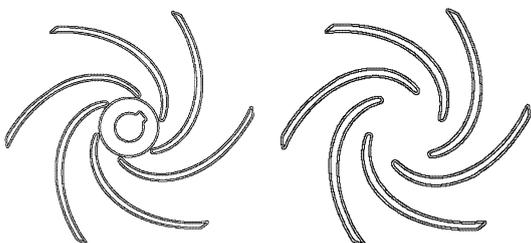


图 6 提取轮廓后的 CT 图片

Fig. 6 CT images after contour tracing

量化处理打下了良好的基础。

4 二维几何处理

经上述处理后,得到的是叶轮断层上每一个轮廓的离散点序列,由于存在大量的冗余信息,不能直观地描述断层上轮廓的几何拓扑结构,在商用 CAD 或自编软件中进行编辑处理时的工作量很大,必须进一步用直线、圆弧来拟合这些用离散点序列表达的轮廓,实现用几何的方式来描述这些轮廓,即对轮廓进行矢量化处理,通过坐标变换将以像素为单位的矢量数据变换为笛卡尔坐标系等以国际长度单位为单位的矢量数据。

采用直线段和圆弧对提取的轮廓进行拟合实现了二维轮廓的矢量化。基本步骤是:对跟踪得到的离散轮廓点序列,先提取轮廓上的特征点,利用特征点作为分界点将平面轮廓划分为若干分段,并判断各线段的曲线类型,再应用分段-合并算法实现轮廓的直线段拟合,最后应用垂直平分线求交法实现轮廓的直线圆弧拟合。

坐标变换的变换公式为^[9]

$$\begin{cases} x_i = (X_i - a)S \\ y_i = (Y_i - b)S \end{cases}$$

式中 (X_i, Y_i) 为图像像素位置, (a, b) 为笛卡尔坐标的原点相对于搜索起点的坐标, (x_i, y_i) 为图像像素位置在设定的笛卡尔坐标系下的坐标,坐标的单位均为像素; S 为系统标定参数,其含义为图像中一个像素长度代表的实际长度为 S mm。

5 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。前两种重建方法都属于表面重建,其中基于轮廓表面重建法是从一组平面轮廓重构通过这些轮廓的表面;基于体素的表面重建法首先要确定物体表面在每个小体素内的小面片,然后将这些小面片连接起来构成物体的表面。这两种算法可采用现有的图形学显示方法。直接体视法直接对体数据进行显示,而不是构造物体表面的几何描述,可显示体数据中所包含的所有物体,但由于不包含物体的几何拓扑结构关系,因而不能很好地表现空间层次。本文先用第一种重建算法实现了水泵叶轮的三维重建,然后再通过一系列算法将该模型转换成实体模型。

5.1 表面三维重建

首先在前面已提取并矢量化的轮廓线上寻找特征点,试图通过这些点的连线来近似地表达轮廓线

的形状。特征点按下面逐步逼近的方法来确定:设轮廓线上点列为 $P_i (i=0, 1, \dots, n)$, 则线段 $P_i P_m$ 与由 $P_i, P_{i+1}, \dots, P_m (i < m < n)$ 这 $m-i+1$ 个点连接而成的曲线段所围区域的面积(图7)为

$$A(P_i, P_m) = \frac{(P_i P_{i+1} \times P_i P_{i+2} + P_i P_{i+2} \times P_i P_{i+3} + \dots + P_i P_{m-1} \times P_i P_m)}{2}$$

如果用面积 $A(P_i, P_m)$ 的值来描述线段 $P_i P_m$ 与上述曲线段的逼近程度, 当 $A(P_i, P_m)$ 的累计值达到某个规定数值时, 就可用 $P_i P_m$ 来代替该曲线段。

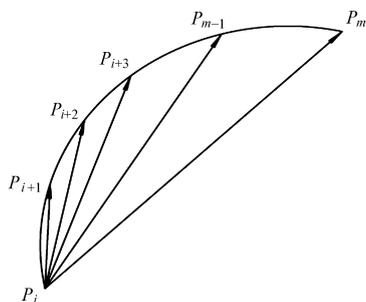


图7 轮廓点所围面积计算

Fig. 7 3-D calculating the area enclosed by edge-points

由于特征点数目远小于矢量化的轮廓线上的点数, 故构造三角面片的工作量大为减小。本文采用了一种基于 Delaunay 三角剖分思想的表面重建的算法, 算法考虑了组成最佳重建表面的三角片的形态特点, 按照剖分三角片集中的最小内角在整体上尽可能大的优化准则进行剖分, 算法简单, 重建表面质量较好。

5.2 表面模型转换为实体模型

由于实体模型的任意曲面可用多边形网格来逼近, 而边界模型(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形成的表面模型的基础上用边界模型来构造和表达重建的三维实体模型。

重建后的叶轮三维模型如图8所示。可看出, 该模型在基本形状、结构尺寸与叶轮原型基本一样, 但是在光顺程度上仍有欠缺, 需要在今后对算法与重建过程继续加以改进。

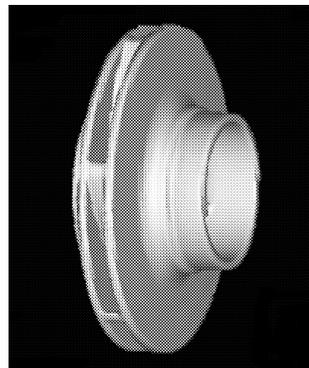


图8 重建后的水泵叶轮三维模型

Fig. 8 3-D model of impeller after reconstruction

6 结束语

利用多层螺旋CT对水泵叶轮进行透视扫描, 采集得到了含有叶轮设计及内部构造信息的CT断层图像; 在VC++6.0开发平台上, 对这些断层图像进行一系列数字图像处理, 实现了水泵叶轮的三维表面模型重建以及实体模型的转换, 为水泵叶轮的逆向工程提供了一种新的思路。

参 考 文 献

- 1 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1995.
- 2 金涛, 童水光. 逆向工程技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- 3 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): 1734~1737.
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): 1734~1737. (in Chinese)
- 4 付丽琴, 陈树越. 反求工程中的实的数据获取技术[J]. 华北工学院测试技术学报, 2001, 15(4): 248~252.
Fu Liqin, Chen Shuyue. Object data acquisition in reverse engineering[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2001, 15(4): 248~252. (in Chinese)
- 5 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)
- 6 Lee K H, Woo H, Suk T. Data reduction methods for reverse engineering[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(10): 735~740.
- 7 何斌, 马天宇, 王运坚, 等. Visual C++数字图像处理[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
- 8 Ma W. Constructing a CAD model from physical part through CT-scanning[M]. New York: McGraw-Hill, 1998.
- 9 孙家广. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998.