

基于激光扫描的离心泵闭式叶轮反求技术

张 伟, 赖喜德, 宋 威, 雷明川
(西华大学 能源与环境学院 四川 成都 610039)

摘 要: 针对激光扫描无法探测到闭式叶轮内部流道的问题, 采用油泥填充方式代替内部流道结构进行数据采集。采用截面特征约束技术对盖板进行回转特征曲线重构并构建盖板三维模型, 基于散乱点云数据的多视角拼接技术对油泥模型和盖板整体对齐, 提取轴面组与油泥模型上、下端面相交数据进行型值点约束, 构造出叶片与上、下盖板的交线并放样得到叶片曲面。重构模型精度检测表明, 基于交线数据型值点约束与截面特征曲线约束相结合的重构技术可以满足泵类零件的工程精度需求, 为激光扫描数据的闭式叶轮重构提供了一种准确、快速的反求方法。

关 键 词: 闭式叶轮; 激光扫描; 逆向重构; 多视角拼接

中图分类号: TP391. 72

文献标识码: A

引 言

叶轮作为泵产品的核心部件, 在泵实际运行中起着主导作用, 其叶片几何形面的准确性对于水力性能有决定性的影响。目前, 叶轮的逆向设计方法主要采用基于一元流动理论和欧拉方程基础上的模型相似算法和速度系数法计算出流道、叶片轴面截线及等高线^[1-2]。根据图纸制造成模型, 并在试验台反复试验, 最终得到符合要求的叶形。此方法, 产品研发周期长, 制造精度低。逆向工程也称反求工程, 作为一种根据测量数据重构实物 3 维 CAD 模型的方法, 为此类产品的开发和创新提供了一种快速、可靠的途径。

离心泵闭式叶轮反求过程主要由点云数据采集、预处理与叶片曲面与盖板重构组成。近年来, 国内外学者对这两个部分进行了大量研究。点云数据采集方法分为接触式测量和非接触式测量两种^[3-5]。其中接触式测量法具有采集精度高的优点, 但不易采集大密度数据; 非接触式测量法采集数据密度大, 测量周期短。常用的曲面重构方法有双 3 次 Besier 法、最小能量法、三次 B-Spline 法、

NURBS 法等^[6-7]。叶片曲面重构策略主要分为两种: 基于三角面的自由曲面重构和基于特征的参数化重构。基于三角曲面、N 边域曲面的传统逆向工程方法, 只能简单地满足产品原型复制, 很难提取和表达隐藏在点云数据中的特征信息和原始设计信息; 基于特征的建模策略可以更加深刻地还原设计者意图, 为产品再创新奠定基础, 目前该方法已成为叶片类曲面重构最流行的技术。

从实际工程应用方面考虑, 利用激光扫描仪进行盖板和流道油泥模型点云数据采集, 并利用散乱点云数据拼接技术进行整体对齐, 基于截面特征约束技术对盖板进行回转特征曲线重构, 并通过回转方式得到盖板三维模型, 通过对油泥模型与盖板上、下端面相交数据进行型值点约束, 构造出叶片与上、下盖板的交线并放样得到叶片曲面, 最后将盖板与叶片求和得到完整的闭式叶轮三维模型。以某离心泵叶轮为研究对象, 通过以上方法重构三维模型水力性能分析表明, 基于交线数据型值点约束与截面特征曲线约束相结合的方法为激光扫描数据的闭式叶轮重构提供了一种准确、快速的反求方法。

1 离心泵闭式叶轮点云数据采集及预处理

1.1 激光三角法原理

采用激光三角法原理进行测量, 其实质是光学三角型测量原理, 利用光源和光敏元件之间的位置和角度关系来计算零件表面点的坐标数据。其原理是: 通过规则的激光投射到被测量物体表面, 形成反射光信号被空间另一侧的图像传感器吸收, 根据信号的偏移, 通过被测物体的平面、角度、距离等关系, 按照三角几何原理反映出被测物体空间坐标, 本研究采用测量方法基本原理如图 1 所示。

收稿日期: 2013 - 12 - 23; 修订日期: 2014 - 03 - 11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379179); 流体及动力机械教育部重点实验室(西华大学) 项目(SBZDPY - 11 - 7); 西华大学研究生创新基金项目(ycyj2014176)

作者简介: 张 伟(1987 -), 男, 四川双流人, 西华大学硕士研究生。

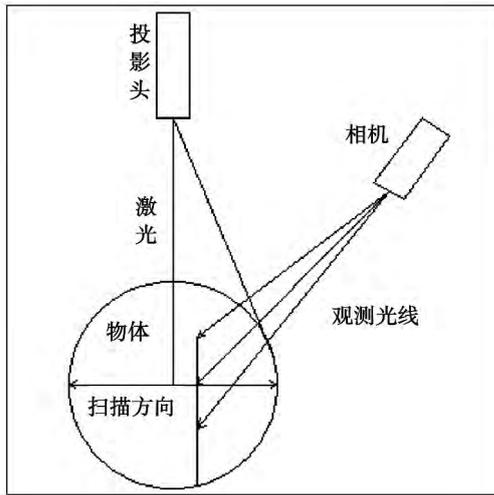


图 1 线光源测量法原理

Fig.1 Principles of the line light source measurement method

1.2 离心泵闭式叶轮测量方法

离心泵闭式叶轮主要由前、后盖板以及前、后盖板之间的叶片所组成。前、后盖板的一般形状为围绕叶轮中心轴的回转特征曲面，叶片则是复杂的空间曲面。针对激光扫描仪无法采集内部流道点云数据的问题，采用油泥模型代替内部流道结构的方式获得点云数据。按照“先整体后局部”的原则采集前、后盖板表面数据，通过增加辅助平面的方法提高叶片进出口较薄边壁数据采集效率与精度。值得注意的是，在进行油泥模型制作时完成后要进行盖板和油泥模型的点云定位标记，以便后期点云数据拼接建立基准点。油泥模型与闭式叶轮盖板分别如图 2、图 3 所示。



图 2 油泥模型

Fig.2 Oil sludge model



图 3 闭式叶轮盖板

Fig.3 Closed type impeller cover

1.3 点云数据预处理

激光扫描仪所获得数据为散乱点云数据类型，存在大量噪音点、异点以及冗余数据，为提高建模精度，减小数据处理量，必须分别对盖板和油泥模型点云数据进行预处理流程如图 4 所示，其中点云滤波数据前后对比精度如图 5 所示。叶轮滤波前后点云最大偏差为 0.08 mm，平均偏差为 0.019 mm，标准偏差为 0.018 mm；滤波前后点云偏差较大，满足工程需要。

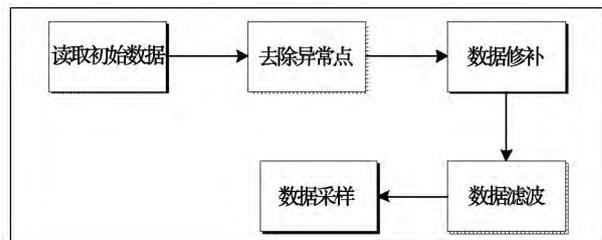


图 4 点云预处理流程

Fig.4 Flow path for preprocessing the point clouds



图 5 叶轮点云滤波偏差

Fig.5 Filtration deviation of the point clouds of the impeller

1.4 点云数据拼接

在反求设计中,实物模型的点云数据有时不是一次完成采集,需要多次测量并通过数据拼接达到模型数据统一和坐标一致,点云数据的拼接精度直接影响后续建模的准确性。目前,常用的数据拼接技术主要有:基于约束的拼接、多视标签定位拼接、自由拼接等^[8-10],其中多视标签定位法具有稳定性好、精度高、拓扑结构任意性和局部特性等优势,本研究根据所采集数据量较小和模型结构特点综合考虑,选择多视角标签定位法进行点云数据拼接,其拼接结果如图 6 所示。3 点定位具体实现原理步骤:

(1) 设定测量基准点 p_1, p_2, p_3 , 其油泥模型空间坐标为 $p_1(x_1, y_1, z_1), p_2(x_2, y_2, z_2), p_3(x_3, y_3, z_3)$; 盖板空间坐标为 $p'_1(x'_1, y'_1, z'_1), p'_2(x'_2, y'_2, z'_2), p'_3(x'_3, y'_3, z'_3)$;

(2) 以油泥模型空间数据点为基准,进行相关矩阵坐标变换。设 p_i 到 p'_i 变换矩阵为 A ,即表达为 $p_i(x_i, y_i, z_i) = Ap'_i(x'_i, y'_i, z'_i)$; 其中变换矩阵具体包括如下步骤:第 1 个点进行平移,第 2、3 个点进行平移和旋转则可以满足坐标变换。

(3) 对于两片点云数据的拼接则可表示为: $p_{1i}(x_i, y_i, z_i) = Ap'_{2j}(x'_j, y'_j, z'_j)$, 其中 $p_{1i}(x_i, y_i, z_i)$ 代表油泥模型点云数据; $p'_{2j}(x'_j, y'_j, z'_j)$ 代表盖板点云数据。



图 6 盖板与油泥模型拼接结果
Fig.6 Putting-together results of the cover and oil sludge model

2 离心泵闭式叶轮模型重构

2.1 盖板重构

盖板具有规则的回转特性,只要重构出盖板的回转特征曲线,即可很容易通过回转方式得到盖板的三维模型。按照“盖板截面点云截取-截面曲线拟合-曲线回转”的流程重构盖板模型。

2.1.1 盖板截面点云数据获取

从整体点云数据中分块得到将要提取截面的点云数据,采用切片法^[11],即用某一平面和点云数据相交,来获得截面点云。以盖板回转中心轴为中心,间隔 30° 建立环形截平面并与盖板点云数据相交获得多个相交平面数据,并回转至同一轴向平面内,其截面数据如图 7 所示。这种方法避免了单个平面点云数据截取不完整的误差,提高了截面点云数据精度。

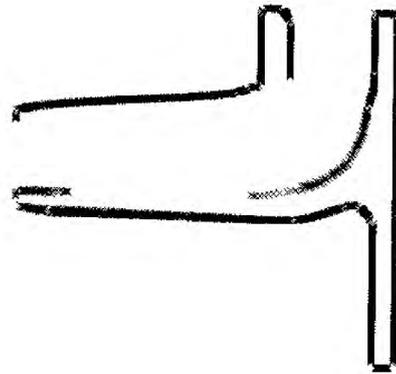


图 7 截面点云数据
Fig.7 Sectional point cloud data

2.1.2 盖板截面曲线重构

由于整体拟合无法表达曲线元之间的约束关系,因此直接将切片法得到的截面点云数据拟合得到的曲线不能准确反映盖板截面特点。盖板截面曲线,其主要是由直线、圆弧、自由曲线来表达的,其精度主要受直线和圆弧的相切、圆弧与圆弧的相切、自由曲线与圆弧的相切等约束关系影响。通过对截面特征分段拟合的方式,构造出各个曲线元,并根据各部分之间的约束关系利用正向设计软件中的二维草图约束功能进行约束处理,构造出满足整体要求的截面二维图形,将二维草图通过回转得到实体三维模型如图 8 所示。

2.2 叶片曲面重构

2.2.1 叶片曲面轮廓线拟合

曲线是构建曲面的基础,在逆向工程中,通常利用插值或逼近的方式进行拟合生成样条曲线(或参数曲线),再利用扫描、拉伸、放样等手段生成曲面。插值方式建立的曲线,必然会通过所有测量的数据点,因此曲线与数据点的误差为零。但是,在数据量过大和存在噪声点的情况下,会导致曲线控制点过大,插值结果会出现不平滑现象。逼近方式可以允

许一个指定误差和可以设定控制点数目,基于最小二乘法求出曲线与数据点之间的距离,进行控制点调整,达到满足误差要求。



图 8 盖板截面二维草图及三维模型

Fig. 8 Two-dimensional sketch of the section of the cover and three-dimensional model

从叶片型面准确性考虑,采用插值方式进行轮廓线拟合。根据叶片复杂的空间扭曲结构,建立以叶轮转轴为中心的轴面组并与叶片点云数据进行相交得到叶片工作面和背面的轮廓线,在此基础上放样生成曲面,叶片背面轮廓数据拟合结果如图 9 所示。

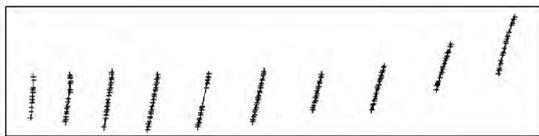


图 9 叶片背面轮廓数据拟合

Fig. 9 Contour data fitting of the back of the blade

2.2.2 叶片三维模型重构

目前,商用的逆向软件有一定的局限性,其针对性强,算法效率较高,能够容易实现点线拟合,但是在曲面拟合上的质量却不如正向软件。通过叶片延伸可以与上、下盖板相交可以得到交线样条数据点,采用先前建立的轴面组分别与对应的各个型值点进行几何重合约束,以保证交线数据的准确性,将离散的型值点进行生成样条,并通过梳型图检查光顺性是否满足要求,最终生成样条曲线如图 10 所示。



图 10 样条曲线

Fig. 10 Spline curves

通过修改和检验的 4 条样条曲线,可以更加准确还原叶片形状,再次放样、修剪、缝合得到叶片三维模型及叶片与盖板求和所得离心泵闭式叶轮三维模型如图 11 所示。

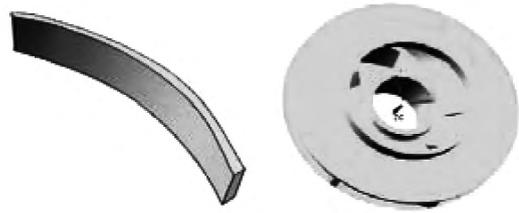


图 11 叶片及叶轮三维模型

Fig. 11 Three-dimensional model for blades and impellers

3 重构模型精度检测与流体分析

3.1 重构模型精度检测

精确度分析反映的是重构模型与所测样件之间的偏差,将原始点云数据设置为测试对象,重构曲面设置为参考对象进行 3D 比较,其检测结果最大偏差为 1.021 mm,平均偏差为 0.093 mm,标准偏差为 0.138 mm;重构模型偏差较大的部分基本集中在部件边角处;各部件平均偏差在 0.1 mm 之内,大部分过流部件曲面精度很高,重构模型精确度符合泵类零件精度工程需要,如图 12 所示。

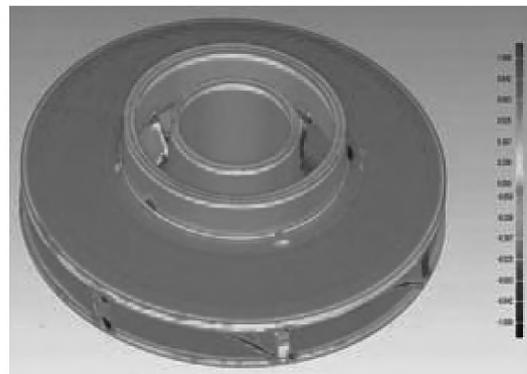


图 12 重构模型精度

Fig. 12 Precision of the model restructured

3.2 重构模型流体分析

采用分区域网格生成法进行网格剖分,即将叶轮分为叶轮与进水流动两部分进行网格区域划分,各区域相连部分采用交界面拼接技术来减少交界面

数据误差,保证界面数据的一致性。基于 ICEM CFD 软件采用混合网格技术对其叶轮和进水流道部分进行划分,并通过平滑处理来提高网格质量,保证其网格质量都在 0.35 以上,以满足 CFD 计算要求。采用“冻结转子法”(Frozen Rotor)处理进水流道与转轮之间的耦合关系。控制方程采用离散的有限元体积法,采用 RNG $k-\varepsilon$ 作为内流场模型方程。通过计算得出叶轮内流静压力分布和叶轮内流速分布分别如图 13 所示。

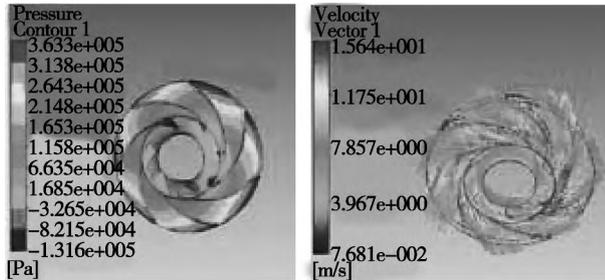


图 13 内流静压力及流速分布

Fig. 13 Static pressure of the inner flow and flow velocity distribution

通过以上分析,结果可以得出叶轮出口处液体压力和速度值。根据压力值和速度值换算出叶轮的扬程和流量,并根据叶轮进出口压力差值、流量等数据计算出叶轮效率,将这些值与原样本叶轮相应的参数经过比较,其结果相近,表明重构模型满足要求。

4 结 论

传统的闭式叶轮逆向设计都借助于接触式测量设备和工业 CT 探测机对其进行反求研究,通过激光扫描法利用油泥模型对其进行了闭式叶轮三维模型重构技术研究。对于盖板部分的重构采用抽取特征截面曲线大大简化了重构难度,提高了精度和效率;对于叶片部分通过拟合工作面和背面轮廓线的方式重放样出初级叶片曲面并利用与盖板相交的数据进行重合约束,构造出满足约束和逼近原始数据的叶片曲面。通过重构模型的精度检测结果与流体性能分析,得出该方法为离心泵闭式叶轮重构提供了一种准确、快速的途径。

参考文献:

[1] 丁成伟. 离心泵与轴流泵原理及水力设计[M]. 北京: 机械工

业出版社, 1981.

DING Cheng-wei. Centrifugal and axial flow pump principles and hydraulic design [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1981.

[2] 吴玉林等. 叶片泵设计与实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.

WU Yu-lin, et al. Vane pump design and examples [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2011.

[3] 印玉明, 李明, 卓军, 等. 基于三坐标测量计对涡轮叶片测量的研究与实践[D]. 上海: 上海大学, 2003.

YIN Yu-ming, LI Ming, ZHUO Jun, et al. Study and practice of the measurement of turbine blades based on the three-coordinates measuring meters [D]. Shanghai: Shanghai University, 2003.

[4] 武俊平, 韩中合, 丁常富. 汽轮机叶片动态测量方法的比较分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2003.

WU Jun-ping, HAN Zhong-he, DING Chang-fu. Comparison and analysis of the dynamic methods for measuring the blades of a steam turbine [D]. Baoding: North China University of Electric Power, 2003.

[5] 赖喜德. 叶片式流体机械的数字化[M]. 成都: 四川大学出版社, 2007.

LAI Xi-de. Digitization of blade type fluid machinery [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 2007.

[6] 王春林, 袁春元等. 基于 Bezier 函数的流体机械叶片造型研究[J]. 水泵技术, 2005, 1: 10-11.

WANG Chun-lin, YUAN Chun-yuan, et al. Study of the modeling of the blades of fluid machinery based on the Bezier function [J]. Pump Technology, 2005, 1: 10-11.

[7] 齐涤非, 杨劲松, 刘国淦, 等. 应用 NURBS 实现飞机叶片的三维重构[J]. 光学精密工程, 2001, 9(3): 223-225.

QI Di-fei, YANG Jin-song, LIU Guo-gan, et al. Three-dimensional restructuring of the blades in an aeroplane realized by using the NURBS [J]. Optics and Precision Engineering, 2001, 9(3): 223-225.

[8] 张舜德, 卢秉恒, 丁玉成. 光学三维形面分区域测量数据的拼接研究[J]. 中国激光, 2001, 28(6): 536.

ZHANG Shun-de, LU Bing-heng, DING Yu-cheng. Study of the putting-together of the data measured in various regions of an optical three-dimensional shape and surface [J]. China Laser, 2001, 28(6): 536.

[9] 刘德连, 张建奇. 基于 3 点匹配的图像拼接算法[J]. 计算机工程, 2006, 32(13): 203-205.

LIU De-lian, ZHANG Jian-qi. Image putting-together algorithm based on the three-point matching [J]. Computer Engineering, 2006, 32(13): 203-205.

[10] 刘晓利, 彭翔, 殷永凯, 等. 借助标志点的深度数据全局匹配方法[J]. 2009, 23(4): 1010-1014.

LIU Xiao-li, PENG Xiang, YIN Yong-kai, et al. A method for overall matching in-depth data with the help of the landmark points [J]. 2009, 23(4): 1010-1014.

[11] 刘云峰. 基于特征的反求工程 CAD 建模关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.

LIU Yun-feng. Research of the key technologies for CAD modeling in reverse solution seeking engineering based on the characteristics [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004, 33-40.

(陈 滨 编辑)

During the rotating and cooling movement of ash and slag in a roller type slag cooler, introduced was a concept of the diffusion coefficient, investigated were the law governing the diffusion of granular materials and the influence of the radial diffusion on the heat transfer. By using the discrete element method, a model for the movement of particles was established and the diffusion movement was studied. The authors had arrived at the conclusion as follows: the mutual collision and action of particles during the process of their sliding down from the active layer result in a recombination of their relative positions after entering into the inactive layer are regarded as the root cause for radial diffusion. The radial diffusion intensities in various material layer zones are different. The diffusion of particles can speed up the heat transfer inside the material bed and the locations, where the diffusion coefficient is bigger, have a smaller inner temperature difference and vice versa. **Key Words:** radial diffusion, particle movement, roller type slag cooler, discrete element method

基于激光扫描的离心泵封闭式叶轮反求技术 = **Technology for Seeking Solutions Reversely to the Closed Impellers of a Centrifugal Pump Based on the Laser Scanning** [刊, 汉] ZHANG Wei, LAI Xi-de, SONG Wei, LEI Ming-chuan (College of Energy Source and Environment, West China University, Chengdu, China, Post Code: 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2014, 29(5). - 539 - 543

In the light of the problem that the laser scanning cannot detect the flow passages inside a closed type impeller, by using a flow passage filled with oil sludge, obtained was an oil sludge model. The sectional characteristics restriction technology was used to restructure the axisymmetric characteristic curves of the covers and obtain a three-dimensional model for the covers in the axisymmetrical way. Based on the multi-view-angle putting-together technology for scattered point-cloud data, the oil sludge model and the covers were made flush as a whole. With the rotating shaft center serving as the center, the shaft plane groups were established to intersect with the oil sludge model and obtain the point cloud data of the contour of the working surface and back surface of the blades. From the point cloud data obtained after the oil sludge model and the covers had been made flush as a whole, the point cloud data of the intersectional lines of the oil sludge model and the upper and lower end surface of the covers were extracted. The contours of the blades and the intersectional lines of the oil sludge model and covers were fitted and their spline curves were obtained. Finally, the curved surfaces of the blades were obtained through a lay-off. The precision of the restructuring model indicates that the restructuring technology based on the restriction and fitting of the intersectional line data combined with the restriction of the sectional characteristic curves can meet the precision requirements of engineering projects for parts of pumps and the same kind, thus offering an accurate and quick solution reverse seeking method for restructuring closed type impellers based on the data scanned by use of laser. **Key Words:** closed type impeller, laser scanning, reverse restructuring, multi-view-angle putting-together