

离心泵闭式叶轮反求技术研究

唐健, 赖喜德, 宋威, 张伟

(西华大学能源与动力工程学院, 四川成都 610039)

摘要: 采用三维激光扫描仪采集模型数据, 利用激光三角法和叶轮快速曲面重构法相结合开发出了一套适用于离心泵闭式叶轮的叶轮反求方法。借助蜡模辅助成型技术测量叶轮内部流道, 解决了激光扫描无法采集封闭流道的数据问题; 基于 ICP(迭代最近点算法) 数据对齐理论进行流道与盖板精确定位, 提出了一种基于“点-三角网格-曲面片-曲面”和“点-线-面”相结合的曲面重构方法, 提高了建模精度与效率。通过某离心泵闭式叶轮重构实例, 利用水力性能模拟, 验证了该方法的可行性。

关键词: 离心泵; 闭式叶轮; 反求; 曲面重构; 水力性能模拟

中图分类号: TK263.3 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2015.03.031

引言

叶轮是离心泵内部的关键过流部件, 其叶片过流面的光滑性及几何准确性对叶片的水力性能和抗空蚀空化能力有着决定性的影响。传统的离心泵叶轮正向设计主要采用基于一元、二元理论的半经验设计方法, 所设计的叶轮性能对设计者的经验有很大的依赖^[1], 在木模图的绘制中采用两点间的弧线分段拟合成叶片流线来表述复杂空间曲面曲线的二维投影^[2], 其误差大, 研发周期长, 成本高。Reverse Engineering(反求工程), 作为一种通过三维几何建模的方法重构 CAD(计算机辅助设计) 模型, 为泵类产品的开发和创新提供了一种快速、高效的途径。

离心泵闭式叶轮反求过程主要由点云数据采集、处理和曲面重构, 评价两部分组成。其叶轮点云数据采集分为接触式测量和非接触式测量两种。接触式测量精度高, 可有效提取叶片边壁处点云数据, 但测量路径规划困难^[3]; 非接触式测量无需规划过多的数据采集路径, 但无法进行叶轮内部流道叶片的测量。常用的曲面重构参数曲面有 NURBS(非均匀有理 B 样条) 曲面、B-SPLINE 曲面、Coons

(1964年由 Coons 提出的自由型曲面设计方法) 曲面等^[4], 叶轮曲面重构策略分为“点-线-面”、“点-三角网格-曲面片-曲面”和“点-三角网格-初级参数化曲面-曲面”3种。基于三角曲面、B样条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叶片的特征信息。

本研究结合离心泵闭式叶轮的特点, 借助蜡模辅助成型技术, 提出了一种适用于离心泵叶轮三维数据采集和基于散乱点云数据快速处理、拼接的方法, 测量结果满足叶轮装配需要及叶片整体流动性; 针对叶轮曲面重构, 提出了典型离心泵叶轮多曲面三角网格曲面生成法。最终基于“点-三角网格-曲面片-曲面”和“点-线-面”的曲面重构方法, 开发出一套高效高精度的基于参数化建模的离心泵闭式叶轮反求技术。

1 离心泵闭式叶轮反求技术

1.1 离心泵闭式叶轮三维数据采集技术

1.1.1 离心泵闭式叶轮特点

离心泵叶轮由前后盖板和叶片构成, 盖板为绕轴旋转中心体, 具有规则的曲面外形; 叶片型面的组成包括工作面、背面、进水边、出水边, 其类型可分为前曲式、后曲式和径向式; 叶片工作面、背面被封闭在前后盖板之间, 表面曲率由进水边到出水边逐渐减小; 叶片出水边为与盖板外轮廓半径相同的圆柱面, 面积很小; 叶片进水边附近的工作面、背面曲面曲率变化很大; 从进水边到出水边不同的叶片类型其曲面的曲率变化也不同, 因此对叶轮测量和重构来说其测量难度大, 模型重构复杂, 很难完整的表达叶轮所包含的信息。

收稿日期: 2014-07-11; 修订日期: 2014-08-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51379179); 西华大学“西华杯”大学生科技创新项目(2014091); 西华大学研究生创新基金资助项目(yejj2014179)

作者简介: 唐健(1989-), 男, 四川泸州人, 西华大学硕士研究生。

1.1.2 离心泵闭式叶轮采集方法

数据的采集是逆向工程中关键的一步,数据采集质量直接影响到三维模型重构的精确度。传统离心泵叶轮行业三维数据采集技术多采用接触式测量法,通过三坐标测量机测量叶轮等复杂曲面其精度高,但测量之前需要进行复杂的测量路径规划,实物数字化周期长,已不能满足实际需要。工业 CT 扫描法可以较方便的测量狭窄流道区域,能够保证整个流道叶片几何型面测量的完整性,但精度较低、测量速度慢,成本很高,也不适合闭式离心泵叶轮的数据采集^[5]。

本研究采用激光三角法和蜡模成型技术相结合,它的测量范围广、偏置距离大、对待测表面要求低、效率高、精度好。将光源发出的激光照射在被测叶轮表面,通过反射由 CCD(计算机控制显示)检测器接收检测像移并得到真实物体的位移生成相应的点云数据^[6];由于激光无法打入叶轮流道内部,针对流道部分采用蜡模辅助成型技术,可以较好的表达叶轮内部流道情况,而且在后期点云数据处理中只需将叶轮外轮廓点云数据同流道蜡模数据对齐即可。蜡模的制作过程如图 1 所示,在测量中蜡模采用一次测量完成。

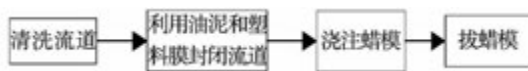


图 1 蜡模制作流程图

Fig. 1 Chart showing the flow path for fabrication of wax molds

1.2 离心泵闭式叶轮点云预处理技术

1.2.1 点云滤波

传统离心泵叶轮多采用高斯法对扫描点云数据进行噪声滤除,其对原始数据保形性好^[3],但对于蜡模得到的点云数据,其曲面光顺性较盖板低,采用传统的高斯滤波法得到的蜡模点云数据其光顺度难以保证,因此本研究针对叶片进水边、出水边、工作面及背面等复杂曲面采用平均值滤波法与中值滤波相结合以提高流道点云数据的光顺度。综合滤波法的采用可以提高不同曲面间过渡区域的平滑性,而且能够较好的保持部件的边缘锐度。

1.2.2 点云数据对齐

在激光扫描仪测量过程中,很多物体复杂曲面都存在视觉死区,无法通过一次测量完成,因此这就需要后续对通过多次测量得到的数据进行拼接处

理。目前常用的数据对齐方法有 ICP(多视数据最近迭代点对齐)法、四元组法、SVD(奇异值分解)法、三点法等。传统的点云数据对齐多采用三点法,该方法虽简单实用,但是模型数据对齐的精度完全取决于贴片中 3 个基准点的测量精度,不同的基准点也会使得对齐的精度不同^[7];本研究对叶轮流道集多边形、曲线和曲面为一体的扭曲三维模型数据对齐采用 ICP 算法有较高的精确度和适应性,在进行数据对齐前,首先利用交互式图形对齐技术对盖板和蜡模进行初步对齐,然后利用 ICP 法对盖板和蜡模精确对齐。根据离心泵闭式叶轮特点采用的 ICP 算法具体步骤:

(1) 给定叶轮前后盖板和蜡膜两组点集,分别为: $A = \{ a_i \mid a_i \in R^3, i = 1, 2, 3, \dots, N_a \}$ 和 $B = \{ b_i \mid b_i \in R^3, i = 1, 2, 3, \dots, N_b \}$ 。

(2) 对流道蜡膜和叶轮盖板对齐矢量初始化定义,设对齐初始矢量为 $A_0 = A, q_0 = [1, 0, 0, 0, 0, 0]^T$,给定迭代公差 τ ,设 $k = 0$ 。

(3) 进行扫描点对齐迭代计算。首先计算流道与前后盖板相交面点的最近点计算 $X_k = C(A_k, B)$,对流道和前后盖板对齐点计算 $(b_k, d_k) = Q(A_0, X_k)$,最终两者对齐 $A_{k+1} = q_k(A_0)$ 。

(4) 当盖板和流道对齐最小二乘误差阈值小于给定误差即: $d_k - d_{k+1} < \tau$ 时,迭代终止,完成流道与盖板的对齐。

1.3 离心泵闭式叶轮曲面重构

传统的曲面重构方法多采用基于“点-线-面”的曲面重构方法,文献[8]论述了运用 NURBS 曲线插值法合成样条曲线生成 NURBS 曲面,该方法对数据点云适应力好、构造曲线光顺度高、适用于大规模点云数据,但在曲线拟合过程需要多次迭代且构造曲线与点云之间必然存在偏差,其精度很难保证且重构周期长。“点-三角网格-曲面片-曲面”曲面重构是目前最常用的快速曲面重构方法,该方法重构周期短,适用于自由曲面重构,但对于标准曲面重构精度较低。

本研究综合采用基于“点-三角网格-曲面片-曲面”和“点-线-面”的重构技术。首先提取叶片部分点云数据,采用 Delaunay(德劳内)三角化方法对其三角剖分,并对局部凸四边形进行网格优化及简化处理,处理流程如图 2 所示,其次将叶轮叶片多边形模型划分为工作面、背面、进水边顶部和出水边 4 部分,如图 3 所示,并在此基础上构造分隔符,

基于分隔符提取轮廓线构造曲面片,为保证不同曲面片间过渡区域的光顺性,以统一延拓因子延伸叶片进水边、出水边附近轮廓线并调整相应区域轮廓线 T 型节点。按照流线方向细,轴线方向粗的原则细分轮廓线并以该细分结果拟合曲面片。等分曲面片相邻边并利用罚函数法建立 $u、v$ 方向参数线构建格栅,对相交格栅采用删除锐化点、移动格栅点、标记流线、制定锐化轮廓线等方式进行修复,并将修复后格栅拟合成 NURBS 曲面,最终生成的叶轮叶片曲面模型。叶轮外轮廓为绕轴中心线旋转的单项实体,其结构简单,采用“点-线-面”重构技术提取点云数据,基于逼近法拟合叶轮外轮廓线,将叶轮外轮廓线在三维建模软件中绕轴中心旋转即可得到叶轮外轮廓实体,其重构精度高。运用曲面延伸、剪切等命令,利用叶轮前后盖板剪切叶片曲面模型,并布尔求和最终可得到离心泵叶轮模型。

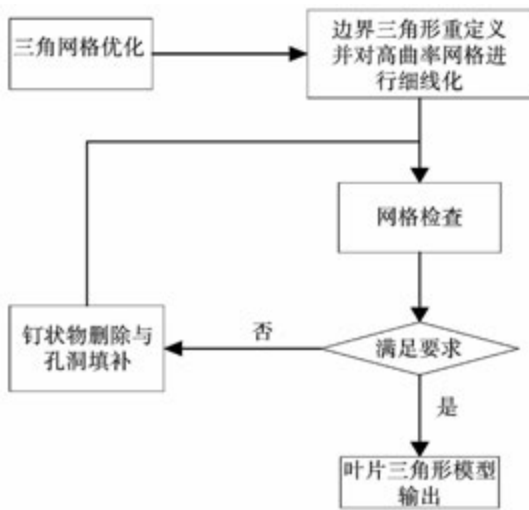


图 2 三角网格优化处理流程
Fig. 2 Flow path for optimization and processing of triangular grids

2 某型号离心泵闭式叶轮反求建模实例

2.1 反求建模实例

采用非接触式激光扫描仪,通过在叶轮外轮廓、叶轮流道蜡模布标记点的方法采集叶片点云数据如图 4 所示,叶轮外轮廓初始点云数为 373 030,流道蜡模点云数为 43 519。预处理后点云数据结果如图 5 所示。从图 5 中可看出点云精简率约为 28%,在较好保持原数据精度的条件下提高了曲面重构

效率。

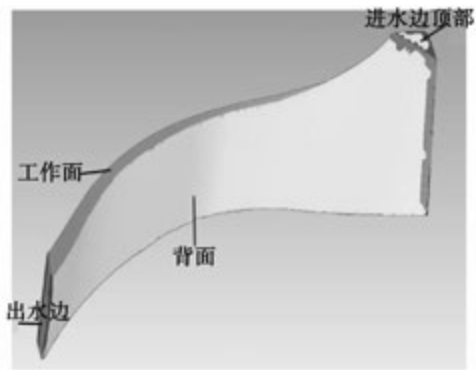


图 3 叶轮叶片模型划分
Fig. 3 Impeller blade model partitioning

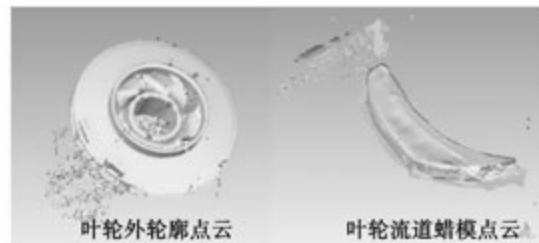


图 4 叶轮三维扫描点云数据
Fig. 4 Impeller 3D scanning point cloud data

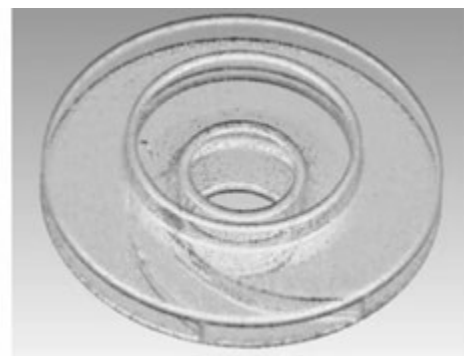


图 5 预处理后叶轮点云
Fig. 5 Impeller point cloud after pretreated

对叶轮叶片点云数据进行三角化处理。采用 Delaunay 三角化方法对其三角剖分,还应对局部凸四边形进行网格优化及简化处理,处理结果如图 6 所示。从图中可看出三角形无自相交,无高度折射边,钉状物很少,重构三角形模型符合实际需要。

构建叶片曲面片。根据最小轮廓线长度设置轮廓线阈值提取轮廓线。并检查轮廓线路径,从图 7 中可以看出叶片曲面片轮廓线无自相交,T 型节点数为 56,符合模型重构要求。通过对叶片曲面片拼

接生成叶片模型,将叶片进水边、出水边、工作面和背面进行曲面延伸与叶轮前后盖板形成自相交曲面,运用布尔求和最终得到的叶轮模型,如图 8 所示。

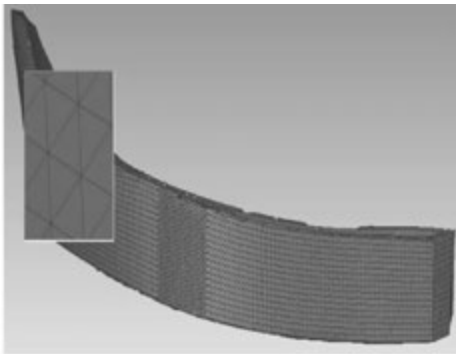


图 6 叶片三角形模型
Fig. 6 Leaf blade triangular model

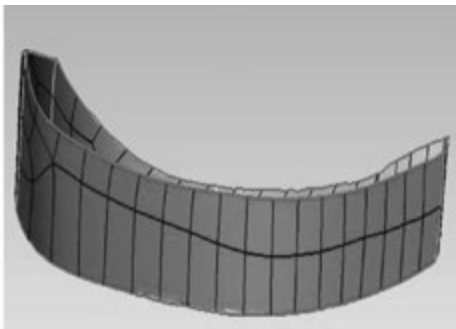


图 7 叶片曲面片构建
Fig. 7 Blade curved surface construction

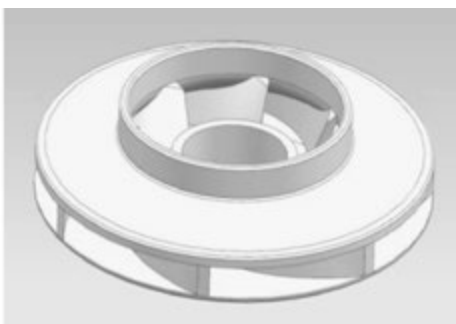


图 8 叶轮重构模型
Fig. 8 Impeller reconstruction model

2.2 检测

2.2.1 几何性检测

对泵类叶轮过流部件而言,其曲面重构的精度和光顺性检查是初步评价模型重构质量好坏的主要依据,因此显得十分重要。精度检查是比较点云数

据模型和 CAD 模型的差异来确定模型精度,对曲面的重构质量是通过模型的光顺性分析来评价。本研究采用量化局部评价法评估重构模型精度,采用等照度法以适当斑马线宽度对重构的离心泵叶轮进行光顺性分析。从图 9 中可看出叶轮斑马纹走向一致,粗细变化均匀,同一过流曲面内斑马纹光滑过渡满足曲面重构要求,精度检测出叶轮的最大偏差为 1.021 mm,平均偏差为 0.093 mm,标准偏差为 0.138 mm,如图 10 所示,绝大部分曲面精度很高,少部分误差较大点出现在前盖板与吸入口直锥段相交部位,是因为该部分曲率变化较大激光反射不均造成,此外叶轮外缘因为激光测量采用的是光滑曲面成型法影响了模型重构精度。

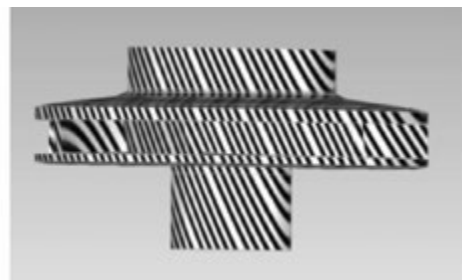


图 9 叶轮重构模型光顺性检查
Fig. 9 Text for impeller reconstruction model fairness

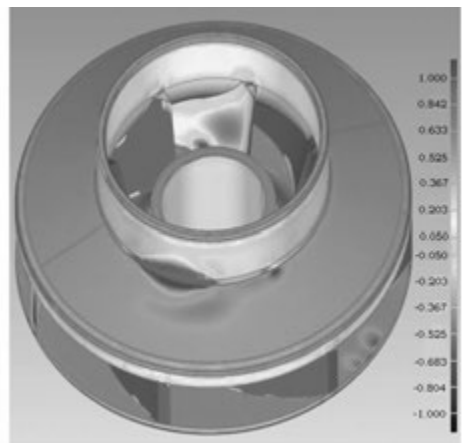


图 10 叶轮重构模型精确度分析
Fig. 10 Analysis of reconstructed surface accuracy

2.2.2 仿真模拟检测

除了上面的几何性检测外,利用现有的 CFD 商业软件对重构模型进行水力性能预测分析,对于模型重构成功与否有着直接的评价意义。该泵的主要参数:流量 $Q = 175 \text{ m}^3/\text{s}$,扬程 $H = 34 \text{ m}$,转速 $n = 1480 \text{ r/min}$,工作介质为清水。

本研究采用分区域网格生成法进行网格化分,分为叶轮、进水流道和蜗壳 3 部分,通过 ICEM CFD 软件划分后的网格数为 1 378 901,采用网格平滑处理来提高网格质量,以满足 CFD 计算要求。利用 CFX(做内部流动分析的数值模拟软件)商业软件,基于压力与速度耦合作用的 SIMPLE 半隐式算法,采用不可压缩流体质量守恒方程即 Navier - Stokes 方程配合 RNG $k - \epsilon$ 湍流模型对重构叶轮全流道进行数值模拟。

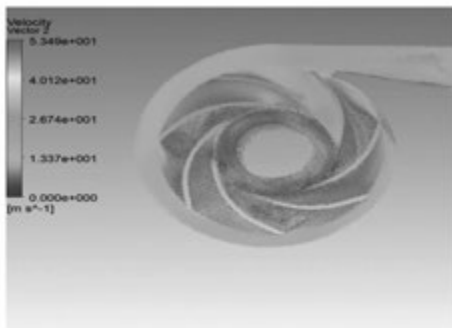
计算边界条件设置:

(1) 入口边界条件:采用压力入口,定义入口静压力为 0 MPa(相对压力)。

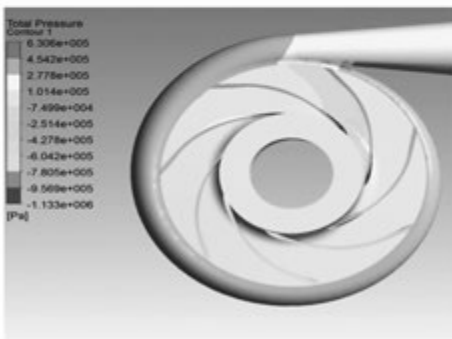
(2) 出口边界条件:采用质量流量出口,定义出口质量流量为 48.61 kg/s。

(3) 壁面边界条件:采用无滑移边界条件。

通过计算得出泵内流场速度分布和泵内压力分布如图 11 所示。



(a) 泵内流场速度分布(m/s)



(b) 泵内压力分布(Pa)

图 11 离心泵水力性能模拟

Fig.11 Centrifugal pump waterpower performance simulation

通过以上分析,可以得出泵的出口压力值,经过关系换算得出泵的扬程为 $H = 34.7 \text{ m}$ 。从泵内流场分布和速度分布图可以看出,叶轮内部流动稳定,计算工况下的各项参数对比如表 1 所示,从表中可以看出其各项数据相差不大,重构模型扬程高于真机扬程是因为在数值模拟中未考虑容积损失,表明重构模型满足要求。

表 1 真机与重构模型数值模拟数据对比

Tab.1 Comparison of real machine and reconstruction model numerical simulation data

参 数	真机	重构模型
转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	1 480	1 480
流量/ $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$	175	175
扬程/m	34	34.7
汽蚀余量/m	1.5	1.5

3 结 论

本研究针对传统离心泵闭式叶轮研发周期长,流道数据采集难度高等特点,提出了一套关于叶片点云数据采集和快速曲面重构技术进行叶轮重构的方法,开发了一套高精度高效率基于“点 - 三角网格 - 曲面片 - 曲面”和“点 - 线 - 面”相融合的快速曲面重构技术。基于该方法配合快速数据处理技术以实际例子实验证明该方法重构模型精度满足工程需要,而且该方法还可应用于其他离心泵闭式叶轮。这对缩短研发周期,节约成本,对泵的改良设计和提高泵的性能有很重要的意义。

参考文献:

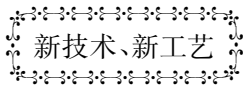
[1] 张人会. 离心泵叶轮的参数化设计[J]. 排灌机械, 2009, 27(5): 310 - 313.
ZHANG Ren-hui. Investigation on parametric design of centrifugal pump blade [J]. Drainage and Irrigation Machinery. 2009, 27(5): 310 - 313.

[2] 周 兵. 双吸流道离心泵叶轮三维造型研究[J]. 水泵技术, 2003(6): 15 - 18.
ZHOU bing. The 3D-model research for the impeller of double-suction centrifugal pump [J]. Technical pump, 2003. (6): 15 - 18.

[3] 张舜德. 反求工程中三维几何形状测量及数据处理[J]. 机电工程技术, 2001(1): 7 - 10.
ZHANG Shun-de. The measurement and data processing of three dimensional profiles in reverse engineering [J]. Mechanical and electrical engineering, 2001(1): 7 - 10.

- [4] 成思源,谢韶旺. Geomagic studio 逆向工程技术及应用 [M]. 北京,清华大学出版社,2010.
CHEN Si-yuan, XIE Shao-wang. The reverse engineering technology and application of Geomagic studio [M]. Beijing, Tsinghua university press. 2010.
- [5] 吴卫东. 反求工程中的点云数据采集 [J]. 航空制造技术, 2004, (11): 72 - 77.
WU Wei-dong. Point-Cloud data acquisition in reverse engineering [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004, (11): 72 - 77.
- [6] 王晓嘉. 激光三角法综述 [J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(4): 602 - 604.
WANG Xiao-jia. Survey on the laser triangulation [J]. Journal of instrument, 2004, 25(4): 602 - 604.
- [7] 刘尚蔚,朱小超,张永光,等. 多片点云数据拼接处理技术的研究 [J]. 水利与建筑工程学报, 2014, 12(1): 121 - 124.
LIU Shang-wei, ZHU Xiao-chao, ZHANG Yong-guang etc. Research on processing technique of multiple point cloud data registration [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2014, 12(1): 121 - 124.
- [8] 黄国权,杨显惠. 采用逆向工程技术对叶轮建模的研究 [J]. 机械设计与制造, 2010(2): 227 - 229.
HUANG Guo-quan, YANG Xian-hui. Research on impeller modeling by using reverse engineering technology [J]. Machinery Design & Manufacture, 2010(2): 227 - 229.

(姜雪梅 编辑)



额定 400 MW 功率和 59% 效率的快速启动联合循环装置

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.03.032

据《Gas Turbine World》2014 年 11 - 12 月刊报道,2009 年三菱重工推出了蒸汽冷却的 M501G 燃气轮机空气冷却的 GAC 变型。在那以后,总计 21 台空气冷却的 M501GAC 机组被销售用于美国和国外的 60 Hz 电力生产。

三菱重工已经研制了 M501GAC 的“快速启动”方案,以便满足应对迅速调度和低排放响应的需要。

□燃气轮机

在点火后的 10 分钟内,从 0 到 270 MW 输出功率并达到 39.4% 效率,以每分钟 50 MW 速率增加功率或减负荷到 50% 负荷,NO_x 排放低于 15 mg/m³。

□联合循环装置

对于热启动,在 30 分钟时间内,从 0 到 400 MW 并达到 58.8% 联合循环效率,最多需 8 小时可实现联合循环装置停机,并可频繁地在 50% 和 100% 负荷之间改变负荷。

□装置的排放

在热启动后,少于 20 分钟就可使烟囱排放的 NO_x 从 50% 到 100% 负荷时达到 2 mg/m³,并且在选择催化还原后处理时达到 5 mg/m³。

“M501GAC Fast”燃气轮机的额定性能:

基本负荷总输出功率	270 MW
总热耗率, LHV	9 136 kJ/kWh
燃气轮机效率	39.4%
压比	20:1
质量流量	598.8 kg/s
排气温度	619℃

(吉桂明 摘译)

Ash samples were taken from the slagging and contamination locations in a circulating fluidized bed seriously slagged by burning Zhundong-originated coal and the morphology and composition of the ash samples were analyzed by using the XRF and XRD method. It has been found that the Na element in the inner layer of the ash and slag on the wall surface of flue gas ducts at the outlet of the separator exists in the form of Na_2SO_4 and in the meantime, a great deal of CaSO_4 is present, forming a Na_2SO_4 - CaSO_4 low melting point compound salt system. The low melting point compound salts are captured by wall surfaces to form a viscous base course and at the same time, under a synergistic action of Fe and Ca, the mineral substances captured from ash rapidly turn to be a low melting point eutectoid and are solidified to form a compact slag layer. For tubes in the high temperature reheater, the low melting point compounds such as Na_2SO_4 , $\text{NaK}_3(\text{SO}_4)_2$ or $\text{NaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2(\text{SiO}_2)$ exist in the form of aerosol in the flue gases and in the meantime, adsorb particles in the flying ash and then, adhere to tube surfaces to form slags and contaminants.

Key Words: Zhundong-originated coal, slagging, contamination, CFB (circulating fluidized bed) boiler

离心泵闭式叶轮反求技术研究 = **Study of the Reverse-solution-seeking Technology for Closed Impellers in Centrifugal Pumps** [刊, 汉] TANG Jian, LAI Xi-de, SONG Wei, ZHANG Wei (College of Energy Source and Environment, West China University, Chengdu, China, Post Code: 610039) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 2015, 30(3) . - 435 - 440

To quickly assimilate and absorb advanced technologies relating to some blades of centrifugal pumps both in domestic and abroad excellent in performance and conduct a retrofit design, a three-dimensional laser scanner was used to acquire the data of models and in combination with the quick curved surface restructuring method for impellers, the laser triangle method was employed to develop a set of reverse solution seeking methods for closed impellers of centrifugal pumps. With the help of the wax-molding shape-taking technology, the flow passages inside the impeller were measured, solving the problem that the data of a closed passage cannot be acquired by using the laser scanning method. A precision positioning of a flow passage and its cover plates was conducted based on iterative closest point (ICP) data alignment theory and a curved surface restructuring strategy based on the “point-triangle grid-curved surface patch-curved surface” in combination with “point-line-surface” was proposed, thus enhancing the modeling precision and efficiency. With a closed impeller in a centrifugal pump serving as an example, the feasibility of the method in question was verified by utilizing the hydraulic performance simulation. **Key Words:** centrifugal pump, closed impeller, reverse solution seeking, curved surface restructuring, hydraulic performance simulation