

# 基于逆向工程的混流式水轮机转轮建模研究

李 航, 阾思蒙, 李茂杉, 宿 科

(华电金沙江上游水电开发有限公司拉哇分公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**随着科学技术的发展,逆向工程被广泛运用于工业设计中。逆向工程技术具有有效缩短产品设计、开发周期,降低新产品开发成本的优点。本文以一专用于大变幅水头条件下的混流式水轮机转轮为研究对象,探索研究混流转轮逆向建模过程中的重点与难点,最后通过水轮机全流道数值模拟验证了转轮逆向结果的可靠性,为混流式水轮机逆向工程持续深入的研究工作提供参考。

**关键词:**混流式水轮机;逆向工程;三维模型;结果验证

**中图分类号:**N945;TK733+.1;N945.12

**文献标识码:** A

**文章编号:**1001-2184(2022)03-0012-03

## Modeling Research of Francis Turbine Runner Based on Reverse Engineering

LI Hang, KAN Simeng, LI Maoshan, SU Ke

(Lawa Branch of Huadian Jinsha River Upstream Hydropower Development

Co., LTD, Chengdu, Sichuan, 610041)

**Abstract:** With the development of science and technology, reverse engineering is widely used in industrial design. Reverse engineering technology has the advantages of effectively shortening product design and development cycle and reducing the development cost of new product. In this paper, a Francis turbine runner specially designed for the operating condition of large variable water head is taken as the research object, and the key points and difficulties in the reverse modeling process of the Francis runner are explored and studied. Finally, the reliability of the research result is verified by numerical simulation of the turbine with full flow passage, which provides a reference for the continuous and in-depth research of reverse engineering of the Francis turbine.

**Key words:** Francis turbine; reverse engineering; 3D modeling; result verification

## 0 引言

随着工业技术发展的需要,逆向工程技术被广泛运用到各类工业产品的设计研发过程中。逆向工程技术具有有效缩短产品设计和开发周期,降低新产品开发成本的优点。对于水力发电工作者而言,面对由水轮机内部水流特殊流动所引起的振动、噪音<sup>[1]</sup>等故障时,因种种客观原因,往往很难通过直观流动现象进行故障诊断。针对这种情况,可以通过逆向工程技术获得转轮三维模型,进而通过流动数值模拟来进行故障诊断。多年来,众多学者对逆向工程技术进行研究。袁平<sup>[2]</sup>以发动机气道为基础,探究了在逆向工程中结合正向设计重构气道模型的新方法;张静<sup>[3]</sup>分析探讨了逆向工程在机械模具设计制造中的应用;龚

壮辉等<sup>[4]</sup>研究了逆向工程技术在闸门底枢蘑菇头磨损量测量方面的应用;周亚男<sup>[5]</sup>采用基于 KD-Tree 邻域搜索算法的三维激光扫描点云数据滤波方法有效地提高了点云数据的滤波品质。尽管有大量学者针对逆向工程在各个方面的应用以及逆向工程技术新方法展开了大量研究,但目前尚在水轮机转轮逆向工程方面的研究尚少。据此,基于专业逆向工程软件 Geomagic 探讨混流式水轮机转轮逆向工程中的重点及难点。

### 1 基于 Geomagic(逆向设计软件)的混流式转轮三维模型逆向

计算域水体模型是数值仿真的基础,水体模型的精确性对模拟结果影响很大。本文以某电站所使用的进口水头大变幅混流式转轮为研究对象,通过三维激光扫描获取其模型数据,然后通过

收稿日期:2022-05-01

数据处理获得其三维实体模型。

### 1.1 数据采集

激光三维扫描仪光学元件的特性受环境因素影响较大,故到达新的测量环境时需要在现场对扫描仪进行重新校准。对转轮进行几何形状及尺寸分析,因转轮直径约 5 m,整体扫描工作量大,所以,仅对单流道进行扫描,然后再通过建模软件对转轮进行整体造型。转轮高度约 3 m,考虑到实际扫描的可操作性和数据的存储,将转轮单流道分为四个部分进行扫描,并将扫描数据分别存储,再将四个部分进行拼接,扫描区域划分图见图 1。

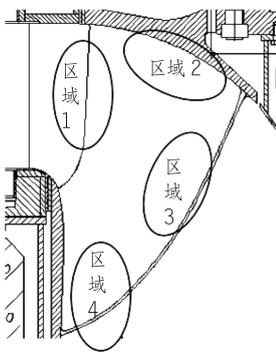


图 1 扫描区域划分图

以等距布置的方式在转轮单流道表面粘贴标签点,粘贴完成后进行显像剂喷涂,显像剂能够有效减少金属表面反光,从而提高扫描质量。

使用激光探头对标签点进行识别,识别完成后使探头与转轮表面保持垂直,同时与表面保持约 100 mm 距离匀速移动进行扫描。

### 1.2 点云数据处理

混流式转轮叶片作为压力面与吸力面扭曲程度不同的空间扭曲叶片,形状极其复杂,所以采用 geomagic 进行数据直接拟合处理。

#### 1.2.1 噪声点消除

噪声点指的是测量结果中出现的偏离被测部件表面的坏点、错误点以及超差点。受测量环境、人为误差、测量系统误差、被测部件表面的漫反射率等因素影响,点云数据结果或多或少会出现噪声点。噪声点的存在将影响后续点云对齐进而严重影响模型重构的质量,所以需要对其进行消除。对空间中离点云数据主体较远的噪声点采用手动删除,主体部分上的噪声点采用减小噪音命令进行消除。

#### 1.2.2 点云对齐与数据修补

由于本次扫描点云数量近 300 万个,所以采用基于最近点迭代算法的直接对齐方式。这种方式精度高,适合处理密集点云。

扫描出来的点云表面会存在孔、洞等数据缺失现象,数据缺失会使曲面造型困难。在点云处理阶段通过填充孔命令对缺失数据进行修复。

#### 1.2.3 数据精简及分块

扫描结果中点云数量总计约 300 万个,数据量巨大使处理效率较低,同时,并非所有数据都是建模所需,故需要对不必要的数据进行精简。

通过非均匀网格化法对数据进行精简,然后将点云进行分块,即将同属于一个曲面的点云分成若干小块,首先将每一个小块拟合合成小曲面片,再通过桥接、过度、裁剪、圆角、合并等曲面编辑命令将所有小曲面拼接为一个整体。考虑到后续叶片的处理,所以拼接结果分为上冠面、压力面、吸力面以及下环面四部分。分好块之后通过封装得到多边形,再将多边形转化为曲面。最终得到单流道结果。

## 2 基于 UG 的混流式转轮三维模型修复

作为专用的逆向工程后处理软件,Geomagic 具有强大的点云处理功能以及曲线拟合、检查功能,但其线面编辑功能以及实体造型功能较弱,所以采用拥有灵活线面编辑功能以及成熟实体造型功能的正向设计软件 UG 进行转轮三维造型。逆向软件与正向软件的综合使用是目前逆向工程界的主流思路。

### 2.1 叶片重塑

将 geomagic 处理的单流道保存为 IGS 片体格式并导入 UG,然后将工作面按照俯视顺时针方向旋转(360/叶片数)构成一个完整叶片。单流道旋转为单独叶片结果见图 2。

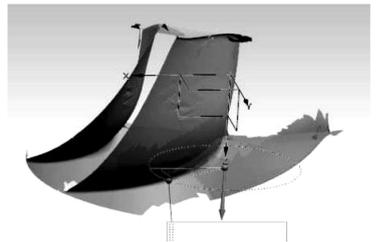


图 2 单流道旋转为单独叶片结果图

将下环面与上冠面切除,再通过曲面造型制

作出单个叶片实体进行基准检查。尽管之前的工作基本保证了叶片表面的光滑度,但如果基准不对将导致叶片安放角产生偏差,严重影响水轮机效率。将上冠型线以及叶片出口边型线旋转得到辅助面,通过移动、旋转等命令调整叶片位置实现基准调整。

考虑到前期处理出来的叶片表面存在不光滑区域,需要对叶片进行重塑。在流道间绘制流线,以流线旋转形成流面切割叶片,再通过艺术样条对切割面进行重新拟合,可以得到光滑的叶片翼型型线,通过网格曲线命令将型线塑造出全新的吸力面及压力面。同理,以等高线切割叶片并将翼型型线投影到同一平面便可制作出转轮水力图。

叶片表面塑造完成后,提取叶片与上冠、下环的相交线,并将其分别制作为片体,提取叶片出水倒圆面型线,再以叶片吸力面与压力面的出水边轮廓为引导线,通过扫描功能得到出口倒圆面,将上述 5 个片体缝合为实体便可得到重塑后的单个叶片。

## 2.2 水体建模

将转轮轴面投影图绕 Z 轴方向旋转为实体,然后将叶片绕 Z 轴方向进行环形阵列得到 11 个叶片,再将二者作差得到转轮水体域模型。将下环型线及上冠型线旋转得到的实体与叶片求和再打上螺纹孔,便得到完整的转轮结构模型。

## 3 逆向结果验证

通过 ANSYS 数值模拟计算出蜗壳、固定导叶、活动导叶等设备的网格体数,结合 CFD-Post 进行外特性验证,从而对逆向结果的准确性进行验证分析。

### 3.1 前处理

利用 ANSYS 进行数值模拟以验证逆向结果的可靠性。首先通过图纸建立蜗壳、固定导叶、活动导叶、尾水管等过流部件水体模型。利用 ANSYS ICEM 进行计算域网格划分,综合考虑计算资源与模型大小,最终经网格无关性验证后选定总网格数为 6 998 426,其中蜗壳水体网格数 1 048 465,固定导叶水体网格数 895 465,活动导叶水体网格数 995 173,转轮水体网格数 2 295 615,尾水管水体网格数 1 763 708。

通过 CFX 进行水轮机常数值模拟,湍流模型

选用 RNG  $k-\epsilon$  模型,计算域设置时将转轮定义为旋转域,转速  $-150 \text{ r/min}$ ,其余过流部件设置为静止域,参考压力  $1 \text{ atm}$ ,输送介质为  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  清水。动静交界面采用 Frozen Rotor 格式,Specified Pitch Angles 定为  $360^\circ$ ,残差精度设为  $0.00001$ ,计算步数设为 3 000 步。选取 70 m、100 m 水头下共 6 个开度工况作为计算工况,进出口分别采用总压进口以及静压出口。

### 3.2 外特性验证

通过 CFD-Post 读取质量流、扭矩等参数,计算得出水轮机外特性,并将模拟得出的外特性与运转综合曲线进行对比。通过 ANSYS 数值模拟计算出蜗壳、固定导叶、活动导叶等设备的网格体数,结合 CFD-Post 进行外特性验证,从而对逆向结果的准确性进行验证分析。

由 ANSYS 模拟结果可知,70 m、100 m 水头下水轮机模拟出力均高于实际运行情况,模拟效率均低于实际运行情况,且同一水头下随着开度增大,误差也随之增大。从总体来看,模拟误差均在 5% 以内,证明模拟结果具有一定的真实性,证明通过逆向工程得到的转轮模型是可靠的。

## 4 结 语

通过逆向工程与正向设计相结合的方式构建混流式转轮的三维模型,并以模型构建中的一些关键技术点为基础,通过计算机数值模拟验证了混流式转轮三维模型的可靠性。借助逆向工程技术获取转轮部件的实体及水体模型,能够为水力发电机组的安全可靠运行等提供关键的水力模型资料。同时,通过逆向工程对混流式水轮机转轮的三维模型模拟实验,可以延伸到冲击式水轮机转轮和轴流式水轮机等转轮的三维模型模拟中,为今后的多类型转轮安全稳定运行分析提供参考依据。

### 参考文献:

- [1] 宿科. 大变幅水头混流式水轮机空化特性研究[D]. 西华大学, 2021.
- [2] 袁平. 逆向工程技术的研究与工程应用[D]. 昆明理工大学, 2002.
- [3] 张静. 探析逆向工程技术在机械模具设计制造中的应用[J]. 现代农机, 2021, (5): 122-124.
- [4] 龚壮辉, 苏丹, 胡远航, 等. 基于逆向工程的闸门底枢磨损量测量[J]. 机械工程师, 2021, (6): 52-55.

(下转第 17 页)

大块石进占 5 m, 作为戽堤裹头护脚及初期防护, 施工从戽堤上游端头部位开始, 所采用的大块石的直径必须符合设计要求; ②河床护底, 根据龙口水位、水流流速、水面宽度、河床高程及钢筋石笼尺寸、重量等特性, 钢筋石笼采用 75 t 汽车吊吊放, 钢筋石笼从下游向上游分层安放, 两岸安排测量人员采用拉标尺线的方式进行精确放样、定位; 护底钢筋石笼安放时, 汽车吊机停放在 2 544.5 m 高程戽堤预进占平台, 钢筋石笼吊索与汽车吊挂钩间设置自动脱钩装置, 确保精确安放、安全施工; ③河床护底完成, 对右岸戽堤水位变幅区以下坡面采用反铲挖掘机抛投特大块石加强裹头防护, 防护厚度至少 2 m, 特大块石裹头修坡坡比不能大于 1:1.3, 保证裹头防护自身的稳定; ④对右岸戽堤水位变幅区以上部位补填至高程 2 550 m, 每填筑一层、整平一层, 钢筋石笼防护一层; 钢筋石笼防护厚度 4 m, 人工配合 75t 汽车吊机采用“一丁一顺”法摆砌, 每层钢筋石笼外侧均采用钢丝绳进行铰接, 钢筋石笼顶部采用 C25 mm 钢筋焊接成整体结构。

据统计, 在我国已完成的截流工程中, 只有极个别工程出现了实际来流量大于设计流量的情况<sup>[3]</sup>。为保障截流安全, 在戽堤右岸多准备一部分大块石、钢筋石笼, 作为裹头防护的应急措施, 裹头有被冲毁迹象时, 及时采取加强裹头防护等措施, 特殊情况将 3~4 块大块石串联在一起, 用推土机推入水中作为裹头临时防护。

### 3 实施效果

工程安排在 2021 年 11 月 27 日上午 10 时开始截流。截流期间, 随着戽堤进占、龙口宽度逐步缩窄, 右岸裹头并未出现塌陷。当龙口宽度缩窄到 30 m、戽堤上下游水位落差 6.46 m、流速 7.57 m/s 时, 抛填进入最困难期, 右岸戽堤下挑角裹头

水下部分大块石出现轻微脱空, 但因钢筋石笼仍保持整体稳定, 未发生下沉和塌陷。在历经 12 h 连续、高强度抛投后, 电站于 2021 年 12 月 27 日 21 时 58 分成功截流。

### 4 结 语

大型水电工程的截流过程十分复杂, 截流实施结果与原计划存在一定的差距。在裹头设计时, 考虑河床深厚软弱覆盖层的存在, 在使用传统经验公式计算的基础上, 利用截流模型试验确定边界条件, 裹头防护采用大块石、特大块石、钢筋石笼联组结构防护措施。截流过程中, 随着龙口宽度的束窄, 龙口最大流速的位置向龙口下游偏移, 深厚软弱覆盖层的存在导致右岸戽堤下挑角裹头水下部分大块石出现轻微脱空情况, 由于截流前准备的大块石、钢筋石笼充分, 设计科学, 使险情并未发生, 且取得良好效果, 可为类似工程截流裹头防护参考借鉴。

### 参考文献:

- [1] 水利水电工程施工导流设计规范[S]. SL 623-2013.
- [2] 曾少岳, 杨晟. 金沙江上游拉哇水电站截流模型试验报告(施工图阶段)[R]. 湖南长沙: 中南勘测设计研究院有限公司, 2021-10.
- [3] 水利水电工程截流施工技术规范[S]. DL/T 5741-2016.
- [4] 水利水电工程施工组织设计规范[S]. SL 303-2017.
- [5] 王智娟, 周赤, 宛良朋, 等. 深厚覆盖层河床截流问题探讨——以乌东德水电站截流模型试验研究为例[J]. 水利与建筑工程学报, 2021, (5): 64-66.
- [6] 范巍. 西藏尼洋河多布水电站工程截流设计[J]. 西北水电, 2015, (3): 65-67.

### 作者简介:

张 杰(1995-), 男, 四川广安人, 助理工程师, 学士, 从事质量管理工作;

廖 雯(1995-), 女, 四川广安人, 助理工程师, 学士, 从事工程技术工作;

陈 荣(1999-), 男, 甘肃天水人, 学士, 从事工程技术工作。

(责任编辑: 卓政昌)

(上接第 14 页)

- [5] 周亚男, 乔勋. 基于逆向工程的三维激光扫描点云数据滤波方法[J]. 激光, 2021, 42(9): 170-174.

### 作者简介:

李 航(1994-), 男, 四川成都人, 助理工程师, 华北水利水电大学能源与动力工程专业本科毕业, 从事水电站施工基建工作;

阚思蒙(1995-), 男, 四川成都人, 上海电力大学环境工程专业本科毕业, 从事水电站施工基建工作;

李茂杉(1995-), 男, 四川简阳人, 苏州大学机械工程专业研究生毕业, 从事水电站施工基建工作;

宿 科(1995-), 男, 四川乐山, 西华大学动力工程及工程热物理专业研究生毕业, 从事水电站维护及故障诊断工作。

(责任编辑: 卓政昌)