

轴流泵 3D 实体造型的自动实现

王海松¹, 王福军¹, 严海军¹, 张志民², 刘自贵², 王国玉³

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2 中国水利水电科学
研究院, 北京 100038; 3 北京理工大学机械与车辆工程学院, 北京 100081)

摘要: 针对目前轴流泵三维(3D)实体造型缺乏自动实现的特点, 提出了一种自动实现轴流泵 3D 实体造型的方法。该方法将数据文件作为水力设计软件和三维造型软件 Pro/Engineer 之间的桥梁, 利用叶片表面离散点表达方式灵活的特点, 来构造任意形式的叶片柱面截线的平面展开图, 以此生成具有足够精度的叶片特征曲线。在该方法中, 轮毂利用二次开发工具 Pro/Toolkit 和特征描述法直接完成造型; 叶片则由特征曲线混成叶片的正背面, 再融合叶片的所有表面得到封闭曲面, 根据封闭曲面得到实体造型。这种方法的特点是: 充分利用了 Pro/Toolkit 快速灵活的优势, 所完成的造型程序适用性强, 精度高, 可实现任意形式的轴流叶轮的三维自动实体造型。文中给出了叶轮实体造型实例。

关键字: 轴流泵; CAD; 实体造型; Pro/Engineer; 二次开发

中图分类号: TH318 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-6819(2004)02-0122-04

0 引言

轴流泵 3D 实体造型不仅是计算机辅助设计(CAD)系统中进行产品装配、干涉检查、加工模拟的基础, 还可以为结构有限元分析(FEA)和内部流场的计算流体动力学分析(CFD)提供初始网格, 从而让用户有效地进行零件应力分析、速度场和压力场求解^[1]。但目前对轴流泵实体造型的研究很少, 现有的方法^[2,3]大多是利用 CAD 支撑软件手工交互造型。这种方法不仅效率低下、修改困难, 且不能有效地与水力设计结果紧密耦合^[4], 因此, 研究专门的面向水力设计结果的自动实体造型方法和应用程序是轴流泵设计与分析过程中急需解决的关键问题之一。作者曾在文献^[6]提出了一种借用 Pro/Engineer 实现参数化的轴流泵自动建模技术, 但在所提出的方法中, 自定义特征的参数的数量不能太多, 对叶片这类复杂曲面的控制有限, 从而导致精度不高。为此, 需要对轴流泵 3D 实体造型作更深入的研究。本文从提高轴流泵造型的精度和通用性出发, 针对泵体和轮毂、叶片和导叶的不同特点, 提出了一种新的自动实体造型机制, 特别是解决了直接利用二维水力设计结果自动生成 3D 实体模型的问题。所提出的新方法具有使用方便、精度高、适用性强等特点。

1 轮毂体的造型

1.1 轮毂体造型的基础和特点

轴流泵水力设计的方法有多种, 但设计得到的最终图形表达几乎是一样的, 主要是泵的轴面图、叶片和后导叶的截面图^[5]。轴面图如图 1 所示。

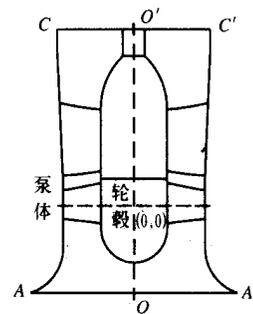


图 1 轴流泵的轴面图

Fig 1 Meridian section of axial flow pump

轮毂体从特征造型的角度来看, 属于隆起特征中的回转体, 即由封闭截面绕轴线向一个方向或者向两个方向旋转一定的角度而生成。轮毂体的特征截面包括组成轮毂轴截面的所有几何描述和完整的尺寸标注, 以及轴心线。轮毂体的旋转角度是 360°; 因此逆时针、顺时针旋转都可以。

1.2 轮毂体造型的自动实现

要实现轮毂体的自动造型, 首先要合理表达二维水力设计的结果。自定义格式的数据文件不依赖于水力设计软件, 也便于三维 CAD 软件的识别。按照约定格式, 将轴面图中的旋转轴、组成轮毂的直线、圆弧等信息数字化, 写到一个数据文件中。

轮毂造型采用 Pro/Engineer 的二次开发工具 Pro/Toolkit 和特征描述法最为合适^[6], 下文给出的是基本过程和关键代码。

1) 按照回转体特征树的要求, 定义轮毂的特征树:

```
static ElemTreeData tree[] = {
    {0, PRO_E_FEATURE_TREE, {- 1}},
    {1, PRO_E_FEATURE_TYPE,
    {PRO_VALUE_TYPE_NT,
    PRO_FEAT_FIRST_FEAT}},
    {1, PRO_E_FEATURE_FORM,
    {PRO_VALUE_TYPE_NT, PRO_
    REVOLVE}},
```

收稿日期: 2003-09-22 修订日期: 2003-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(10372114)

作者简介: 王海松(1976-), 男, 湖北黄冈人, 博士生, 研究方向为水力机械。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083

通讯作者: 王福军(1964-), 男, 河北丰润人, 教授, 博士生导师, 院长, 主要研究方向为水力机械。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: wangfj@cau.edu.cn

```
{1, PRO_E_STD_SECT DN, {- 1}},
{1, PRO_E_REV_ANGLE, {- 1}},
{2, PRO_E_REV_ANGLE_FROM, {- 1}},
{3, PRO_E_REV_ANGLE_FROM_VAL,
{PRO_VALUE_TYPE_DOUBLE}},
```

};

2) 根据特征树创建特征, 得到不完整的特征:

```
ProUtilelemtreecreate(tree, SIZEOFARR(tree),
NULL, &elem_tree);
```

```
ProFeaturecreate(model_sel, elem_tree, options,
SIZEOFARR(options), &feature, &err_list);
```

3) 读取数据文件中轮毂的信息, 如轴心线、直线、圆弧等, 据此定义完整的特征截面:

```
ProSection section;
```

```
Pro2dLineDef line;
```

```
Pro2dArcDef arc;
```

```
Pro2dCLineDef centerline;
```

.....

```
ProSectionEntityAdd(section, (Pro2dEntDef *)
&line, &line_id1);
```

```
ProSectionEntityAdd(section, (Pro2dEntDef *)
&arc, &arc_id1);
```

```
ProSectionEntityAdd(section, (Pro2dEntDef *)
&centerline, &center_id);
```

4) 最后根据定义好的轮毂截面重新生成特征, 使特征完整, 得到轮毂实体:

```
ProTestFeatureSectionInit(&feature, section,
NULL);
```

2 叶片的造型

叶片表面扭曲, 造型较复杂。水力设计得到的是多个叶片截面图, 即以叶轮旋转轴为中心线的圆柱面与叶片表面的交线的平面展开图。为了获得叶片的三维实体造型, 需要将这些截面图还原为三维柱面截线, 根据柱面截线混成得到叶片正背面, 最后由叶片的各个表面得到实体。

2.1 数据输入

鉴于目前水力设计使用的软件大多是 AutoCAD, 因此以 AutoCAD 为例, 仍以独立的数据文件为桥梁, 探讨设计结果如何从水力设计软件输入到 Pro/Engineer 中。

叶片的截面图可能由直线、圆弧、样条曲线、多义线等组成, 本身并无规律可循, 如图 2 所示。另一方面, 在 Pro/Engineer 中, “特征曲线(Curve)”具有良好的光顺性和灵活性, 适合用来表示空间柱面截线。特征曲线还可以由约定格式的文件得到, 这样做可以尽可能的减少手工操作, 实现自动化。因此, 作者将截面图离散为多个点, 然后按照特征曲线要求的格式将点的信息写入到数据文件中。

特征曲线可由三种类型的文件来生成: BL、IGES 或者 VDA 类型。作者选用了 BL 类型, 这种文件格式

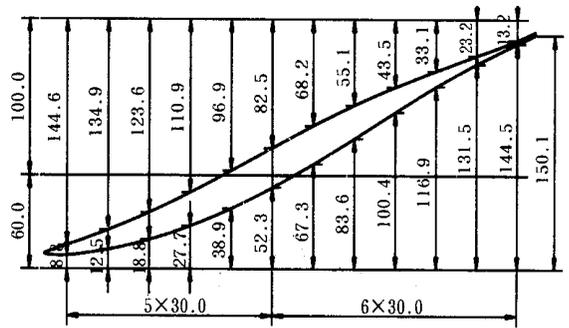


图 2 叶片的截面图

Fig 2 Blade section

简单, 要求如下:

```
Open Index ArcLength
```

```
Begin section
```

```
Begin curve
```

```
1 14 142 - 14 142 - 10 000
```

```
2 20 000 0 000 0 000
```

.....

文件的前三行是文件格式约定, 从第四行开始是点的信息, 每一行中依次是点的序号、点的 X 坐标、Y 坐标和 Z 坐标, 中间用空格或者分隔符隔开。

假定叶片截面图的中心和叶轮的中心都在原点, 柱面半径大小为 r , 截面线的离散点在平面展开图中的坐标是 (x_0, y_0) , 对应的空间坐标是 (x_1, y_1, z_1) , 则:

$$x_1 = r \cdot \cos\left(\frac{x_0}{r}\right), \quad y_1 = r \cdot \sin\left(\frac{x_0}{r}\right), \quad z_1 = y_0$$

叶片表面形状对泵的水力性能有着非常重要的影响, 因此要保证截面转换过程中数据的有效性。一个简单的办法就是增加截面控制点的数量, 尤其是在曲率比较大的位置。经测试, 每条截面线采用近 2000 个控制点, Pro/Engineer 中的特征曲线仍然保持了良好的光顺性, 并且对以后的工作毫无影响。注意叶片截面的特征曲线是封闭的, 那么 BL 文件中的第一个点和最后一个点的坐标是相同的。

采用以上方法, 利用 Object ARX 和 Visual C++ 对 AutoCAD 进行二次开发, 只需指定组成截面图的几何元素, 程序就能生成相应的 BL 文件, 从而实现了截面图的输出。在 Pro/Engineer 中根据 BL 文件得到空间柱面截线, 如图 3 所示, 这样就完全将设计结果还原到三维 CAD 软件中。

2.2 由柱面截线生成叶片工作面和背面

以空间柱面截线为主要特征, 得到光滑的叶片工作面和背面。Pro/Engineer 实体造型功能强大, 曲面处理更是独到。其中创建曲面有一种高级方式称为“融合”, 可以根据多条线生成面, 具体操作是调用瀑布式菜单:

```
Feature-> Create-> Surface (New)-> Advance
(Done)-> Boundaries (Done)-> Blended surf
(Done)
```

接下来提示选择第一方向的曲线, 依次选择图 3 中的 5 条柱面截线, 确定生成曲面, 就得到叶片的正背面。需要说明的是, 这里使用的柱面截线是封闭的, 可一次

得到叶片的正背面, 而且不需要选择第二个方向的曲线, 也可以将柱面截线断开, 分为正面线和背面线, 分别生成正面和背面。

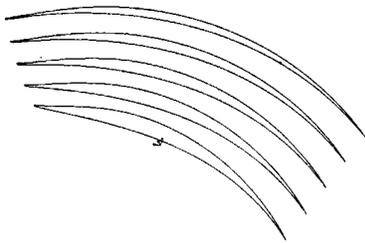


图 3 空间柱面截线

Fig 3 3D cylindrical curve

2.3 叶片的其他面和面的融合

因为这些柱面截线都介于轮毂半径和轮缘半径之间, 所以得到的叶片正背面还是不完整的。一个办法是做面的延伸, 使正背面伸展, 分别和轮毂面、轮缘相交。实际操作中, 截面线的控制点多, 叶片扭曲程度高, 延伸不易成功, 或者即使成功了, 延伸得到的面的也不够光滑。另一办法是设计的时候在稍小于轮毂半径的位置得到一个截面图, 在稍大于轮缘半径的位置也得到一个截面图, 这样, 利用 7 个截面图得到的叶片正背面, 既能够和轮毂面、轮缘面相交, 也能保证叶片表面的连续性和光滑性。

轮毂面和轮缘面都是回转面, 生成的方法和回转体的生成方法类似, 因此不作详述。由轮毂面、轮缘面、叶片正背面包围起来的内部空间就是叶片。将这个三个面融合 (Merge) 得到一个包围叶片实体的封闭曲面, 具体操作是:

Feature-> Create-> Surface (Merge)

弹出如图 4 所示的对话框。



图 4 面融合对话框

Fig 4 Dialog of surface merge

先融合叶片正背面和轮毂面, “主面 (Primary Quilt)”选择叶片的正背面, “附加面 (Additional Quilt)”选择轮毂面, “融合类型 (Merge Type)”为相交 (Intersect), “主面的边 (Primary Quilt Side)”和“附加面的边 (Additional Quilt Side)”根据图示进行选择。

图 5 是叶片的正背面和轮毂面融合得到的曲面, 同样的方法融合叶片正背面和轮缘面, 最终得到的就是叶片的封闭表面。

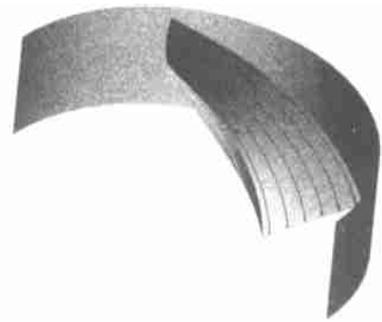


图 5 面融合的结果

Fig 5 Result of surface merge

2.4 由叶片表面获得实体

根据叶片封闭表面, 得到叶片实体:

Feature-> Create-> Solid (Protrusion)-> Use Quilt (Solid & Done)

在弹出的对话框中用鼠标选择封闭曲面, 完成后得到叶片实体, 如图 6 所示。



图 6 叶片实体

Fig 6 Solid entity of a blade

3 叶轮实体的生成

叶轮实体由轮毂体、多个叶片和后导叶组装而成, 也可以在同一实体模式以特征组合的方式得到。从设计和实体生成的方式看, 后导叶和叶片类似, 轮毂和泵体类似, 因此只对轮毂和叶片的造型做了详细陈述。

本文使用了一直径为 650 mm 的叶轮, 轮毂直接为 300 mm, 共有 4 个叶片, 5 个后导叶, 在同一实体模式下得到的造型如图 7 所示。

4 结论

本文在轴流泵二维水力设计的基础上, 研究了轮毂体和泵体、叶片和后导叶的不同特点, 在 Pro/Engineer 中, 采用二次开发技术 Pro/Toolkit 和特征描述法完成了轮毂等回转体的造型。利用 BL 格式的文件作为桥梁, 将二维设计结果直接还原为三维特征曲线, 再由线到面, 由面到体, 完成了叶片的实体造型。这种自动造型方法具有以下特点:

1) 精度高。三维特征曲线的控制点可以足够多, 如一条特征曲线使用近 2000 个控制点, 仍然取得了很好的效果。这样由特征曲线最终得到的叶片必然具有较高

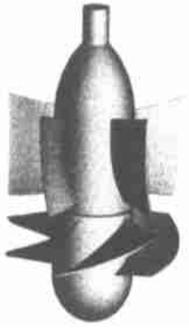


图 7 叶轮实体

Solid entity of impeller

[参 考 文 献]

- [1] Tcacenco V. Some aspects concerning the hydrodynamic design of reversible axial flow pumps for piscicultural and hydroam elioration arrangements[J]. U PB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering, 1998, 60 (3): 1147- 158
- [2] Butts Vertical turbine pumps: Basic Design Features[J]. Water Well, 2003, 57(6): 52- 57.
- [3] 刘厚林, 关醒凡, 施卫东, 等. 我国泵 CAD 技术的特点及发展[J]. 流体机械, 2002, (3): 26~ 29
- [4] Boehle, M artin Using the fluid mechanical equations for the design of impeller pumps[A]. Proceedings of the 1998 3rd International Conference on Pumps and Fans [C]. ICPF, Beijing, 1998, 110- 120
- [5] 关醒凡. 泵的理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [6] 王海松, 王福军, 张志民, 等. 基于特征的轴流泵叶轮自动建模[J]. 水利学报(待刊).
- [7] 王海松, 王福军, 张志民, 等. 基于面向对象技术的轴流泵 CAD 软件设计[J]. 流体机械(专刊), 2002, (10): 357- 360
- [8] 赖朝安. Pro/E 二次开发的关键技术[J]. 机械设计与制造工程, 2001, 30(1): 43- 45.
- [9] Craig Hornsby. CFD-driving pump design forward [J]. World Pumps, 2002, (8): 18- 22

的精度。

2) 通用性好。使用数据文件作为桥梁, 不依赖于设计平台。使用离散点表达柱面截线, 不依赖于设计结果的表达形式。

3) 运行效率高。只需要给定水力设计结果, 所有造型过程便可迅速完成。

本文所给定的方法可与轴流泵水力设计程序紧密连接在一起, 不仅解决了轴流泵水力 CAD 与结构 CAD 的耦合问题, 而且可为轴流泵的 FEA 及 CFD 分析提供了一种新的、快速生成计算模型的方法。所提出的方法对其它型式的水泵、风机等流体机械, 也有参考价值。

Automatic 3D solid modeling of axial flow pump

W ang Haisong¹, W ang Fujun¹, Yan Haijun¹, Zhang Zhimin², Liu Zigui², W ang Guoyu³

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

3. School of Mechanical and Vehicle Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: An automatic 3D solid modelling program used to model the axial-flow pump is put forward. This method takes the data file as interface between hydraulic-design software and 3D modelling software. Because they have the flexibility for representing blade surface, the discrete points are used to construct the blade profile with any style. Thus, characteristic blade lines that are in enough precision could be obtained. In this method, the hub is directly produced based on the secondary development tool, Pro/Toolkit, and the feature describing modeling technique. The blades are generated by: first, blending working face, back face, and characteristic blade lines; second, merging other faces. This method takes the flexibility and efficiency of Pro/Toolkit and results the implementation of a good program that has the property of applicability and high accuracy. It can be used to model axial-flow impeller with any type. An example of impeller solid model is given in this paper to demonstrate the feasibility of the method.

Key words: axial flow pump; CAD; solid modeling; Pro/Engineer; second development