

# 不同叶片包角的离心泵试验与数值模拟\*

杨 华<sup>1</sup> 刘 超<sup>1</sup> 汤方平<sup>1</sup> 谷传纲<sup>2</sup>

(1. 扬州大学能源与动力工程学院 扬州 225009;

2. 上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030)

**摘要:** 在离心泵叶轮的基本外尺寸(叶轮内外半径、叶轮进出口宽度、叶片进出口安放角及叶片数)和设计转速相同的情况下, 采用三次曲线对叶片进行造型。设计叶片包角分别为 59°、75°和 91°的三副离心叶轮 C1、C2、C3, 其中叶轮 C1 与传统的单圆弧叶型非常接近。三副叶轮的同台试验结果显示, 叶轮 C2 的最高效率比叶轮 C1、C3 的效率高 1.28%、1.43%。采用数值模拟得到设计工况下三副叶轮内的相对速度场和各流道内的载荷分布, C1 叶轮内有明显的回流区, 且各流道内的载荷存在较大差异。研究表明: 在叶轮外尺寸相同的情况下对叶片造型设计时, 存在最佳的叶片包角, 单圆弧叶型不是最佳叶型。

**关键词:** 离心泵 数值模拟 试验测量

**中图分类号:** TH311

## 0 前言

离心泵叶轮设计包括叶轮的基本外尺寸设计(叶轮内外半径、叶轮进出口宽度、叶片进出口角及叶片数)和叶片造型设计两个步骤。许多学者对离心泵叶轮参数进行了优化设计。汪建华<sup>[1]</sup>以叶轮圆盘摩擦损失和压水室内水力损失之和的极小值为目标, 求解最优的叶轮外径、出口宽度、出口安放角和叶片数。王幼民等<sup>[2-3]</sup>分别提出了以泵的总能量损失最小和叶轮直径最小为目标函数, 对叶轮进口直径、叶片进出口角, 叶片数等设计变量进行优化计算。孙建平等<sup>[4]</sup>采用射流一尾迹模型进行三维流动分析和性能预测, 建立了以效率为目标函数的优化模型, 对进口冲角等参数进行优化。朱玉才等<sup>[5]</sup>通过控制叶片压力面边界层无分离, 设计叶片的型线并进行试验对比。郭鹏程等<sup>[6]</sup>在对离心泵进行三维紊流数值计算的基础上, 对叶轮吸力面的旋涡和出口液流角进行优化。

对于低比转速离心泵叶轮, 叶片几乎全部在轴面流道的径向部分, 各流线上叶片进出口速度三角形基本相同, 叶片扭曲很小。由于圆弧型曲线易于加工, 工程上常常采用单段或多段圆弧进行叶片造型设计。事实上, 在满足叶轮基本外尺寸相同的条件下, 对叶片进行造型设计的方法很多, 叶片形状的差异也很大, 因而泵的整体性能也各不相同。

本文将在保证叶轮的基本外尺寸相同的情况

下, 采用三次曲线对离心泵叶片进行造型, 设计了三副具有不同包角的离心泵叶轮, 并对它们进行了性能试验和数值模拟研究。

## 1 叶轮的基本外尺寸

为了研究方便, 本文对一被广泛应用的离心泵叶轮进行相似换算, 得到在转速  $n=1\ 125\ \text{r/min}$ , 设计流量  $q_V=5.3\ \text{L/s}$  的工况下, 叶轮的基本外尺寸如表 1 所示。轮盘与轮盖以直线连接, 这样叶轮的轴面流道形状可以确定。若选用单圆弧进行叶片造型设计, 可以得到唯一的叶型; 而选用三次以上的高次曲线造型时, 理论上可以得到无数条叶型。由于三次曲线的可变参数少、叶片易于控制且叶片光滑, 故本文采用三次曲线对叶片进行造型, 着重研究包角  $\gamma$  分别为 59°、75°、91°的 C1、C2、C3 三副叶轮的性能。三副叶轮的叶型如图 1 所示, 由图 1 可见叶轮 C1 的型线与单圆弧叶型非常接近。

表 1 离心泵叶轮的基本参数

进口宽度 $b_1/\text{mm}$	出口宽度 $b_2/\text{mm}$	进口半径 $R_1/\text{mm}$	出口半径 $R_2/\text{mm}$
13.7	8.8	37.5	90
进口安放角 $\beta_1/(\text{°})$	出口安放角 $\beta_2/(\text{°})$	叶片数 $Z$	叶片厚度 $\delta/\text{mm}$
39.5	32.3	5	5

## 2 三副叶轮试验测量结果与比较

本文所采用的试验装置在文献[7]中有详细的描述, 图 2 为三副叶轮在转速  $n=1\ 125\ \text{r/min}$  时的性能曲线图。由图 2 可见, 对于流量扬程性能曲线,

\* 国家自然科学基金(50136030)、江苏省自然科学基金(BK2007558)、江苏省高校自然科学重大基础研究(05KJA57005)和扬州大学引进人才科研启动基金资助项目。20061129 收到初稿, 20070613 收到修改稿

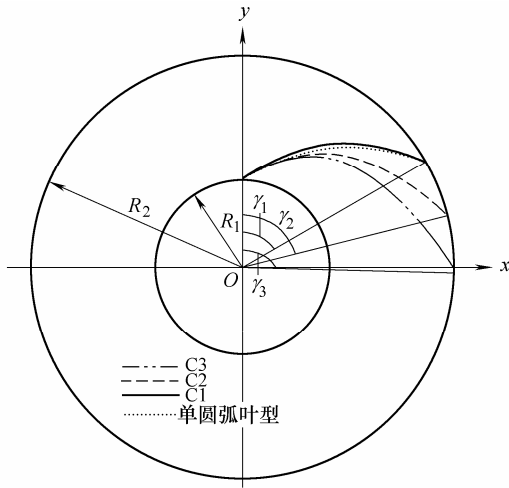


图1 三副叶轮的叶型示意图

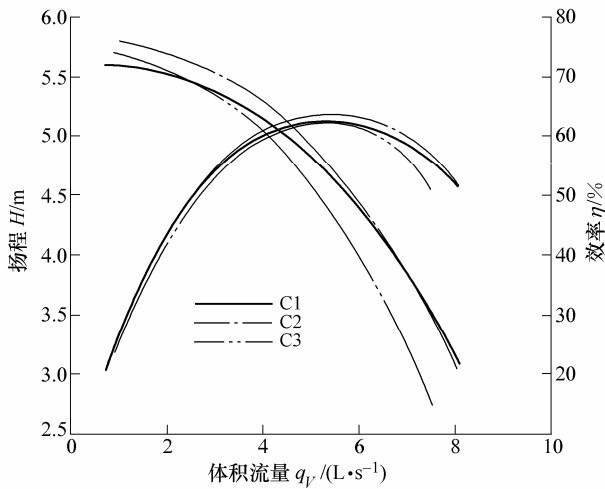


图2 三副叶轮的性能曲线图

C2 与 C3 基本平行，在相同的流量工况下，C3 的扬程比 C2 低，在大流量区两者相差尤其明显。对于 C1 与 C2，在大流量工况下两副叶轮的流量扬程性能接近，在小流量工况 C1 的扬程低于 C2。由流量效率曲线可见，流量在 3.0~7.6 L/s 之间时，C2 的效率比 C1 高，而在此以外的区域，C1 与 C2 两副叶轮的效率曲线基本重合。在相同的流量工况下，C3 的效率均低于 C1、C2 两副叶轮的效率值，在大流量工况相差较大。

三副叶轮的高效点性能参数如表 2 所示，C1、C2、C3 三副叶轮的最高效率分别为 62.48%、63.76% 和 62.33%，C2 的最高效率值比 C1、C3 分别高出 1.28%、1.43%。由三副叶轮的性能测量结果可见，C2 叶轮的性能优于其他两副叶轮。叶轮 C2 的最高效率点的流量、扬程均大于 C1、C3 的值。在叶轮外尺寸确定后，根据欧拉公式计算得到的理论扬程应相等，但由于不同的叶型，使得叶轮内部的流场结构不同，根本原因在于滑移系数不同，使得扬程

相差较大。

表 2 三副叶轮高效点性能参数

叶轮	流量 $q_V/(L \cdot s^{-1})$	扬程 $H/m$	效率 $\eta/\%$	比转速 $n_s$
C1	5.37	4.68	62.48	94.57
C2	5.48	4.74	63.76	94.62
C3	5.34	4.42	62.33	98.43

三副叶轮性能的差异完全由叶片的包角不同而引起。随着包角的增大，叶片变长，当量扩散角变小，叶轮对水流的约束增强，叶轮内脱流的可能性减小；另一方面叶片越长，摩擦损失将加大。理论上，在叶轮基本外尺寸确定的情况下，必定存在最优的叶片包角。通过本文的性能试验研究同样证明存在最优叶片包角。

### 3 数值模拟方法与结果分析

本文采用时间推进法求解三维定常雷诺平均 Navier-Stokes 方程组，应用格子中心有限体积法，空间差分采用中心差分格式，添加人工粘性项，时间项采用 4 阶 Runge-Kutta 法迭代求解，紊流模型采用 Baldwin-Lomax 模型，关于数值计算的方法与参数设置在文献[8-9]中有详细描述。

#### 3.1 叶轮内相对速度场

图 3 为在  $n = 1125 \text{ r/min}$ ,  $q_V = 5.4 \text{ L/s}$  的工况下，叶轮中间断面上的相对速度云图，由图 3 可见 C1 叶轮的五个叶槽内的相对速度分布各不相同，有两个叶槽的吸力面存在回流区。C2、C3 叶轮的各个叶槽内的相对速度分布比较均匀，没有出现回流，相对速度分布比 C1 叶轮内的好。由于叶轮 C1 的包角较小，导致当量扩散角大，在叶槽内容易引起脱流。虽然叶轮 C2、C3 内的流动没有分离，但 C3 的叶片较长，摩擦损失增大，因此 C3 叶轮的效率没有 C2 的高，这与前面试验测量得到的结果相吻合。

#### 3.2 叶片上的载荷分布

叶片上的载荷定义为相同半径上同一个叶槽内叶片压力面与吸力面上的压力之差，即： $\Delta p = p_p - p_s$ ，如图 4 所示。式中  $p_p$  为叶片压力面的压力， $p_s$  为叶片吸力面的压力。图 5 为三副叶轮在计算工况点，不同叶槽内叶片上的载荷随叶轮半径的变化图。图 5 中  $\bar{r}$  为叶轮的相对半径， $\bar{p}$  为载荷  $\Delta p$  与参考压力  $0.5\rho u_2^2$  的相对比值，其中  $\rho$  为水的密度， $u_2$  为叶轮外径处的圆周速度。由图 5 可见，三副叶轮叶片上的载荷随半径的增加而减小。叶轮 C1 各叶槽内的载荷分布存在较大的差异，而叶轮 C2、C3 各叶槽

内的载荷的差异小。在水泵高速运行时，不同叶槽内载荷分布的差异会导致叶片受交变负荷的作用，叶片容易形成疲劳破坏。理论上，载荷分布与速度分布有密切联系，载荷分布的不光滑必然导致速度分布的不均匀<sup>[10]</sup>。

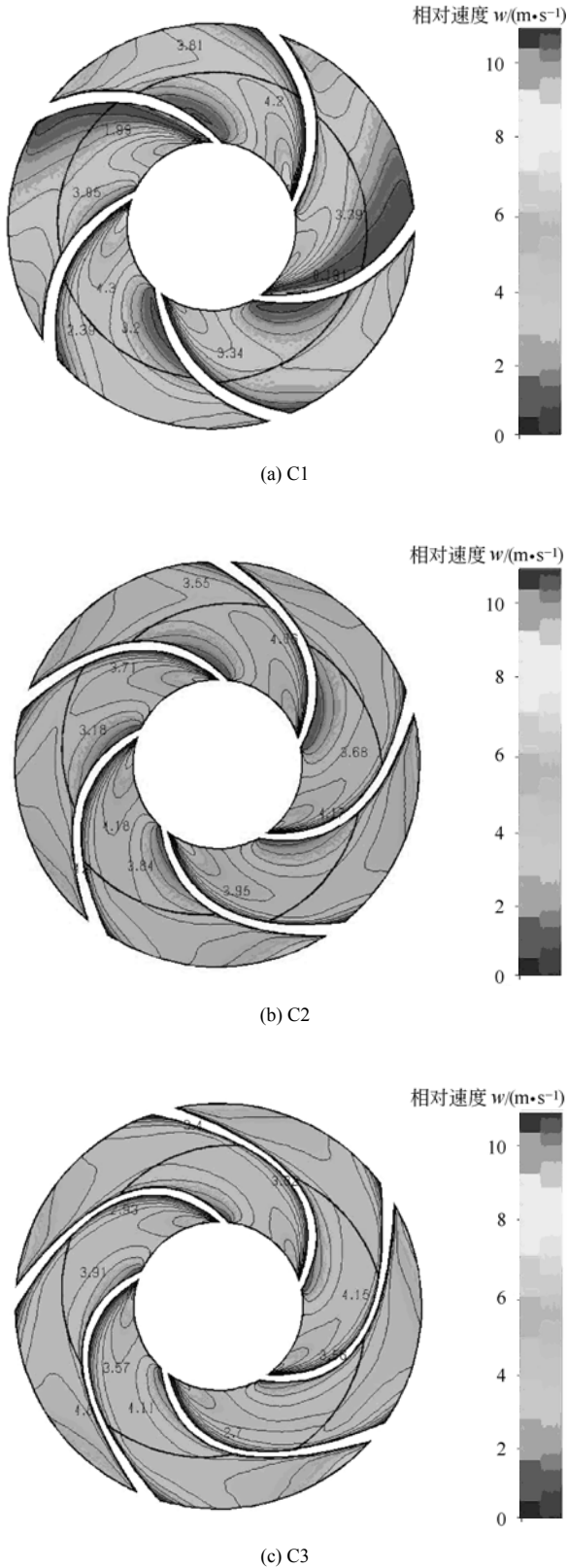


图3 三副叶轮内的相对速度云图

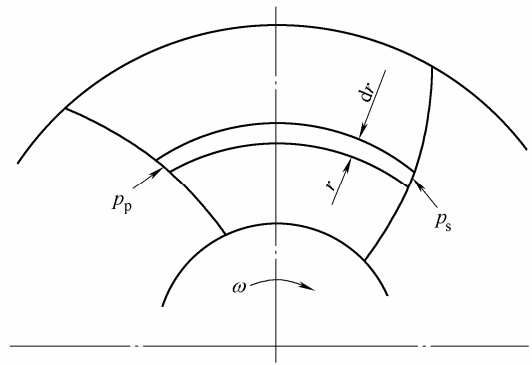


图4 叶片上的载荷定义

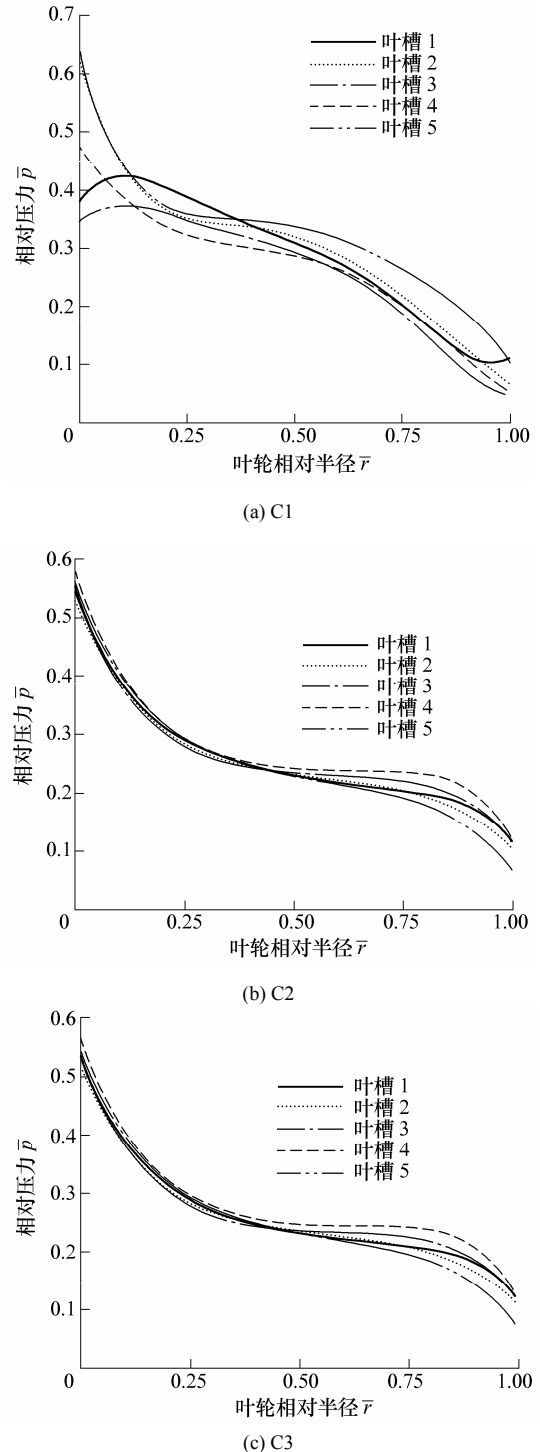


图5 叶片上的载荷随半径分布

## 4 结论

(1) 三副叶轮内的相对速度分布及性能的差异完全由叶片的包角不同而引起的。在离心泵叶轮外尺寸不变的情况下, 存在最优包角。

(2) 通过对三副叶轮的试验测量和数值模拟的对比研究, 表明 C2 叶轮的性能优于 C1、C3 叶轮。单圆弧叶型不是最佳叶型。

### 参 考 文 献

- [1] 汪建华. 离心泵叶轮参数的优化设计[J]. 排灌机械, 1994(2): 13-17.
- [2] 王幼民, 唐铃凤, 苏应龙. 离心泵叶轮的优化设计模型[J]. 北京工业大学学报, 2000, 26(2): 115-118.
- [3] 王幼民, 杨国太, 桂诗祥, 等. 中低比转速离心泵叶轮几何参数优化[J]. 安徽机电学院学报, 2001, 16(1): 40-43.
- [4] 孙建平, 张克危, 刘龙珍. 离心泵叶片形状的优化[J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(2): 60-62.
- [5] 朱玉才, 梁冰, 张永利, 等. 离心泵无分离条件下叶片型线方程研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39(3): 71-75.
- [6] 郭鹏程, 罗兴铸, 刘胜柱. 基于三维紊流数值计算的离心泵叶轮优化设计[J]. 机械工程学报, 2004, 40(4): 181-184.
- [7] YANG Hua, GU Chuangang, WANG Tong. Two-dimensional particle image velocimetry (PIV) measurements in a transparent centrifugal pump[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 18(1): 98-102.
- [8] 杨华, 谷传纲, 王彤. 时间推进法求解离心泵内部不可压流场[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(1): 61-65.
- [9] 杨华. 基于整机紊流模拟的离心泵叶型优化方法与实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.

- [10] 吴达人. 离心泵流体力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

## EXPERIMENT AND NUMERICAL SIMULATION OF CENTRIFUGAL PUMP WITH DIFFERENT WRAP ANGLE

YANG Hua<sup>1</sup> LIU Chao<sup>1</sup> TANG Fangping<sup>1</sup>  
GU Chuangang<sup>2</sup>

(1. College of Energy and Power Engineering,  
Yangzhou University, Yangzhou 225009;  
2. School of Mechanical Engineering, Shanghai  
Jiaotong University, Shanghai 200030)

**Abstract:** Centrifugal impellers C1, C2 and C3 are designed by using of three-order blade profile with the same basic geometry, such as radius, blade width and angle in the inlet and outlet, the number of the blades, and the designed rotating speed is also the same. The wrap angle of C1, C2 and C3 is 59°, 75° and 91° respectively. The profile of impeller C1 is very close to the ones of traditional single-arc. The test results indicate that the best efficiency of C2 is 1.28%, 1.43% higher than C1 and C3 respectively. By numerical simulation at the designed flow rate, the distribution of the relative velocity and load in the impeller is obtained. In the impeller C1 there is recirculation flow and load distribution in different passage is different. The study indicates that there is a best wrap angle and the single-arc is not the best blade profile.

**Key words:** Centrifugal pump Numerical simulation  
Experimental measurement

**作者简介:** 杨华, 男, 1975 年出生, 博士。主要从事流体机械内部流场试验测量、数值模拟及叶轮优化设计方面的研究。

E-mail: yanghua@sjtu.org