

# 离心叶轮内流场的PIV实验\*

严敬 邓万权 杨小林 刘忠 万毅

**【摘要】** 离心叶轮内流场的流动规律是泵的扬程、效率等外特性指标的决定因素。以PIV测试系统在一自行研制的透明离心叶轮内多工况测试了相对速度分布。以大量实验数据为依据,总结了叶轮内流场一些流动规律,并以理论方法分析揭示了这些规律的力学原因。

**关键词:** 离心叶轮 内流场 PIV系统 实验 动力分析

**中图分类号:** TH331 **文献标识码:** A

## 引言

离心泵的扬程、效率等外特性实际是泵的叶轮等过流部件内水流流动现象的外部表现,充分认识叶轮内的流动规律成为预测泵的性能,改进叶轮设计方法的基础。

针对叶轮正问题的研究途径不只一种,但是只有测试方法获得的叶轮内流动信息才能最客观、最准确地反映叶轮内的真实流动状态。本文利用PIV系统对一专门设计的离心叶轮多工况进行测试和矢量计算、流体力学的定量分析。

## 1 实验装置

离心泵的内流场实验在西华大学流体机械省重点实验室的一开式实验台上完成。专项设计的离心叶轮有如下结构特点:叶轮前后盖板出口部分均垂直于叶轮轴心线,由文献[1~2]介绍,这种叶轮内的流动有明显的二维特征,因此测试平面仅取为最有代表性的叶轮中间流面。叶轮的4个圆柱形叶片的工作面和背面均为对数螺旋线,极坐标方程为: $r = 19\exp(\theta \tan 30^\circ)$ ,这种叶片的安放角 $30^\circ$ 是一个常数,曲线曲率半径随半径增大而增长,这些良好的几何特性保证了各实验工况下均未观察到叶片表面的脱流现象。叶轮进、出口半径为20、90 mm。为避免反光干涉,叶轮背面涂黑。叶轮和蜗壳均以有机玻璃制成。叶轮由日立公司J100三相交流变频调速电动机驱动。

测试系统的核心设备为美国TSI公司的PIV测试装置,测试过程具有无接触、全流场、瞬时的特点。测试装置的双YAG脉冲激光器产生脉冲片状光源,1024×1024 CCD摄像机与测试平面垂直布置,安装在电动机轴上的自制脉冲触发器实现锁相功能,保证始终仅测试同一叶片流道。水中散布的空心玻璃球示踪粒子具有良好的跟随性和光散射性<sup>[3]</sup>。

## 2 测试工况及运动转换

叶轮实验转速为400、600和800 r/min,每个转速下的3个实验流量分别为设计流量、1.167倍及0.779倍设计流量。不同转速的大、中、小流量与转速关系满足泵的相似定律。

PIV系统直接输出为测试平面上各点的时均绝对速度,不含脉动分量。

本文以Matlab软件编程计算各工况下半径分别为50、60、70、80、90 mm圆周上相对速度的大小与方向,获得要求的相对速度矢量图(图1)。

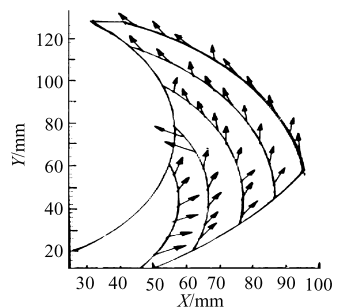


图1 相对速度矢量图

收稿日期:2006-07-17

\* 四川省教育厅重点科研资助项目(项目编号:0224954)和四川省重点学科资助项目(项目编号:SBZD0704)

严敬 西华大学能源与环境学院 教授,610039 成都市

邓万权 西华大学能源与环境学院 实验师

杨小林 西华大学能源与环境学院 讲师

刘忠 西华大学能源与环境学院 实验师

万毅 西南交通大学机械工程学院 博士生,610031 成都市

### 3 测试结果与分析

以大量的实验数据为依据,可以总结出离心叶轮内的流场流动有如下特点:

(1) 沿叶片工作面和背面从叶片进口到出口,

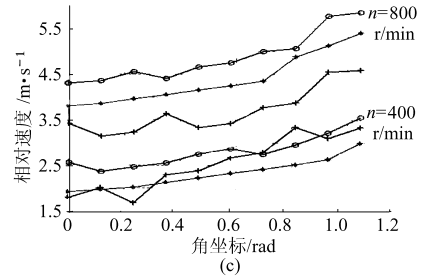
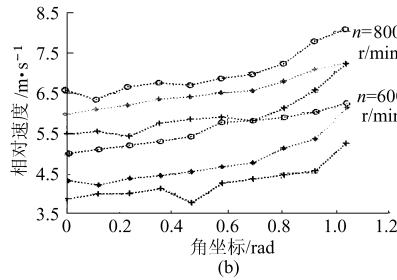
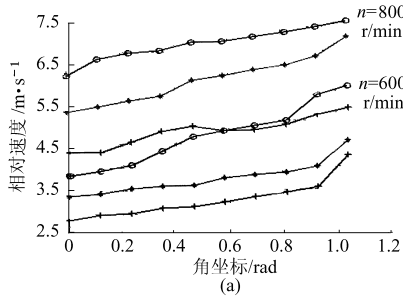


图2 叶片间相对速度分布

(a) 半径 90 mm (b) 半径 80 mm (c) 半径 70 mm

两相邻叶片间的相对流动为一均匀流与一轴向旋涡流动的叠加。本课题组曾在前期专项针对轴向旋涡流动,以相同实验设备进行了实验测试与分析。实验中,将同一叶轮进出口边封闭,发现叶轮旋转时,两叶片之间的封闭流道内确实出现了定义意义上的轴向旋涡,如图3所示<sup>[4]</sup>。

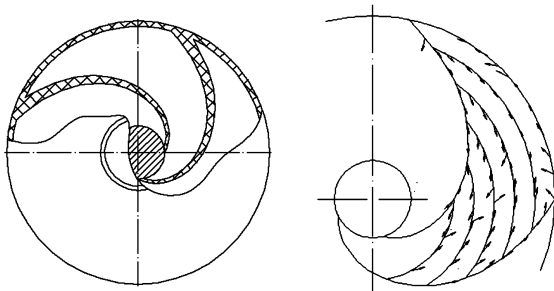


图3 叶片间轴向旋涡

可以看出,在叶片表面,轴向旋涡不能改变相对速度的方向。由于固态表面的不可穿透性,均匀流与轴向旋涡流都将沿叶片表面流动,它们合成之后的流动也不可能含有与叶片正交的分量。

上述两个特殊相对流动的方向在叶片工作面相反,在背面则一致,这就是实验所得到的背面相对速度较高的原因。

除了上述传统的解释外,还可以从另一个角度说明这一现象。由凯尔文定理,在理想正压流体中,沿任一条封闭流线的速度环量在流动中保持不变<sup>[5]</sup>。由此,进入叶轮之前,有势水流在叶片流道中将保持绝对流动的无旋

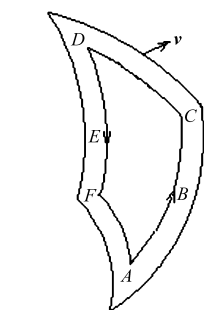


图4 绝对速度沿流道封闭曲线的环量

相对速度方向与叶片表面一致;在两个相邻叶片之间的同一圆周上,除液流从轴向转向径向的小半径部分,各工况下相对速度大小从工作面到背面几乎呈线性增长,如图2所示,图中以\*线、o线和+线分别表示各转速下设计流量及大、小流量工况。

性,绝对速度  $v$  沿图4中闭曲线  $ABCDEF A$  的曲线积分将为零:  $\oint v dl = 0$ , 或

$$\int_{ABC} v dl + \int_{CD} v dl + \int_{DEF} v dl + \int_{FA} v dl = 0 \quad (1)$$

在叶轮入口处,绝对速度方向基本为法向,因而与圆周方向正交,式(1)中左边第4项为零。由于水质点的绝对速度  $v$  等于相对速度  $w$  和牵连速度  $u$  的矢量和,式(1)左边的第1、3项之和可写成  $\int_{ABC} u dl + \int_{DEF} w dl + \int_{DEF} u dl$ , 在同一半径上,叶片工作面与背面的牵连速度  $u$  相等,在积分与路径全等,但方向相反情况下,  $\int_{ABC} u dl + \int_{DEF} u dl = 0$ , 于是式(1)成为

$$\int_{ABC} w dl + \int_{DEF} w dl + \int_{CD} v dl = 0 \quad (2)$$

叶轮出口边  $CD$  上,绝对速度  $v$  的方向,如图4所示,它与微元线段  $dl$  正向夹角大于  $90^\circ$ , 因而式(2)左边第3个积分是负值,同样,第2个积分也是负的。式(2)成立的条件是,左边第1个积分必须大于第2个积分的绝对值,在曲线  $ABC$  和  $DEF$  全等条件下,沿背面  $ABC$  相对速度平均值必须大于沿工作面  $DEF$  相对速度平均值。

根据有势流动的相对伯努利方程,叶片背面压力将小于同一半径上工作面压力,这是旋转叶轮能够对水做功的原因。

(2) 在两相邻叶片之间的出口圆周上,绝对速度圆周分量  $v_u$  基本是常量,比如,在  $n=400$  r/min 的设计流量下,在  $r=90$  mm 的出口圆周上的8个计算点处的  $v_u$  值分布在  $3.02 \sim 3.21$  m/s 之间,方差很小。同时,在出口半径上,除叶片表面处,其相对

速度方向基本与叶片相切,相对液流角均小于叶片安放角(图 1)。这是因为轴向旋涡改变了出口均匀流相对速度的方向,而且这种影响还比较一致。叶轮出口圆周上流动的均匀性有重要意义,这是因为由泵的基本方程决定的叶轮理论扬程仅与叶轮进、出口流态有关。在叶轮设计的反问题中,国内广泛使用斯托道拉导出的叶轮出口滑移公式,这一公式的可靠性已为实验证实<sup>[6]</sup>。斯氏在论证中作了叶轮出口圆周上相对速度为常数的假设,现在可以看到,这一假设与本研究的实验结果基本一致,这是斯氏公式可靠性的基础保证。

(3) 在叶轮转速和流量一定时,沿叶片压力面及吸力面相对流水质点从小半径到大半径相对速度大小呈不规律的非单调的变化趋势(图 2)。

由质点动能定理可知,水质点在旋转叶轮中相对动能的变化等于水质点所受外力和牵连惯性力在相对路径上作功之和。质点的绝对加速度是其所受外力的结果和表征。在叶轮以匀角速度  $\omega$  旋转时,水质点的绝对加速度为其相对加速度  $d'\mathbf{w}/dt$ ,法向牵连加速度  $-\omega^2\mathbf{r}$  及哥氏加速度  $2\omega\times\mathbf{w}$  的矢量和,这里  $d'/dt$  表示在旋转动坐标系上观察到的物理量的改变量,法向牵连加速度由质点指向轴心线,与矢量  $\mathbf{r}$  方向相反。牵连惯性加速度与法向牵连加速度等值反向,这样,单位质量的质点在相对流向方向的

功率为:  $(d'\mathbf{w}/dt + 2\omega\times\mathbf{w} - \omega^2\mathbf{r} + \omega^2\mathbf{r})\mathbf{w} = d'(\mathbf{w}\mathbf{w})/2dt + 2\omega(\mathbf{w}\times\mathbf{w}) = \omega d'\mathbf{w}/2dt$ ,此即单位质量水的相对动能的改变量,由于其正负值不确定,因而相对速度的变化也是不确定的。事实上,叶片间的相对流动已证实为一均匀流与轴向旋涡流动的叠加,而前者与叶轮结构决定的相对流动过流面积有关,结构不同则相对速度变化规律也不同。

在本实验各运行工况下,水质点沿相对流线前进时,其相对速度都经历了大、小、大的变化过程。这一变化规律是不理想的,这是由于设计叶轮时,只考虑了测试要求,并未追求叶轮效率指标。

(4) 在叶轮内一固定点处,当流量与转速关系满足相似定律时,相对速度基本正比于叶轮的转速(图 2),这种内流场的相似,无疑是泵外特性相似的基础。

## 4 结论

(1) 叶轮内液流沿相对流线的相对速度的变化是不确定的,而与叶轮结构有关。

(2) 离心泵在不同转速下相似工况点的外特性相似的基础是叶轮内流动相似。

(3) 证实了叶轮出口圆周上绝对速度的圆周分量的分布均匀性,与斯托道拉假定基本一致,从而肯定了叶片设计中应用斯氏公式的可靠性。

## 参 考 文 献

- 1 Visser F C. Fluid flow in a rotating low-specific-speed centrifugal impeller passage[J]. Fluid Dynamic Research, 1999,24(5):275~292.
- 2 Abramian M. Experimental investigation of the steady and unsteady relative flow in a model centrifugal impeller passage[J]. Journal of Turbomachinery, 1994,116(2):269~279.
- 3 严敬,杨小林,邓万权,等. 示踪粒子跟随性讨论[J]. 农业机械学报, 2005,36(6):54~56.
- 4 严敬,邓万权,杨小林,等. 轴向旋涡流动的 PIV 实验研究[J]. 农业机械学报, 2005,36(8):59~61.
- 5 吴达人. 离心泵流体力学[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- 6 严敬. 低比转速离心泵[M]. 成都:四川科学技术出版社,1998.
- 7 万毅,严敬,杨小林. 离心泵叶轮内水流相对速度的实验研究[J]. 机械设计, 2005,22(6):38~41.
- 8 严敬,何敏,王桃,等. 离心泵基本方程的建立与分析[J]. 农业机械学报, 2007,38(10):192~194.

(上接第 194 页)

- 14 贾洪雷. 东北垄作蓄水保墒技术及其配套的联合少耕机具研究[D]. 长春:吉林大学, 2005.
- 15 贾洪雷,马成林,刘昭辰,等. 东北垄作中耕作物蓄水保墒三年轮耕机械化耕作法: 中国, CN1596572[P]. 2005-03-23.
- 16 杨青,薛少平,朱瑞祥,等. 陕西黄土高原旱作农田机械化降水高效利用技术体系的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(增刊):49~53.
- 17 薛少平,杨青,朱瑞祥. 黄土高原地区机械化保护性耕作的回顾与展望[J]. 农业工程学报, 2003, 19(增刊):96~99.