

# 贯流泵扩管内流场的三维 LDV 测量\*

金燕 刘超 周济人

(扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009)

**【摘要】** 贯流泵扩管对贯流泵装置性能的改善有一定作用,采用三维多普勒激光测速仪(LDV)对贯流泵扩管内流场进行流动测量,获得了扩管内各速度分量的分布规律,周向速度从进口到出口逐渐减小,靠近轮毂处和轮缘处周向流速逐渐减小;轴向速度呈“U”形分布,靠近壁面流速很小,中间区域的流速比较大,随着扩管的扩散,轴向速度有减小的趋势;径向速度的分布情况也是中间速度比较大,靠近壁面处流速减小。同时将测量结果与 CFD 计算结果进行了比较。结果表明:计算值与试验值的流速分布趋势基本一致,两者的周向速度和轴向速度比较接近,但是径向速度由于其本身的流速较小,所以从相对值来说计算值和试验值偏差比较大。

**关键词:** 贯流泵 扩管 内部流动 三维 LDV

**中图分类号:** TV136; TH312 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)09-0057-05

## Flow Field in Diffuser of Tubular Pump Measurements by 3D-LDV

Jin Yan Liu Chao Zhou Jiren

(College of Hydraulic Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

### Abstract

Diffuser can improve the performance of tubular pump to a certain extent. Three dimensional laser Doppler velocimetry (3D-LDV) technique was used to measure the flow field in guide vane of tubular pump, and the velocity distribution inside the diffuser was obtained. The circumferential velocity gradually decreased from inlet to outlet, the axial velocity distributed like U-shaped, the velocity close to the wall was low, and the velocity of middle area was relatively high, the radial velocity distribution velocity was also relatively high speed. The flow field between experimental and numerical results agreed well with each other. It showed that the distribution of circumferential velocity and axial velocity were similar, but the radial velocity deviation between the LDV results and the CFD ones was big.

**Key words** Tubular pump, Diffuser, Internal flow, 3D-LDV

## 引言

贯流泵的导叶一般采用扩散导叶,但目前扩散导叶的设计并不成熟,配无导叶片扩管的贯流泵装置性能可能优于有扩散导叶的贯流泵装置性能<sup>[1]</sup>,说明扩管对改善贯流泵性能有一定的作用。近年来随着南水北调工程的开工建设,贯流泵装置的研究逐渐引起学者的重视<sup>[2]</sup>,不少研究者采用模型试验的方法得到了贯流泵装置的外特性<sup>[3-4]</sup>,也有不少

研究者采用 CFD 技术对贯流泵装置内流场进行了数值模拟<sup>[5-7]</sup>,采用流场测试技术对泵内流场测量是一种先进的研究手段<sup>[8-11]</sup>,但是针对扩散导叶对贯流泵性能影响的相关文献很少<sup>[12]</sup>,尚无学者对贯流泵内流场进行试验测量。

本文采用三维多普勒激光测速仪(LDV)技术对灯泡贯流泵装置无导叶扩管内的流场进行测量研究,获得无导叶扩管内三维流速的分布规律,由测试结果对数值计算结果进行验证。

收稿日期: 2011-09-26 修回日期: 2011-12-02

\* 江苏省产学研前瞻性联合研究资助项目(BY2009138)、江苏省高校自然科学研究资助项目(11KJD570002)、江苏省重点实验室开放课题(K08019)和扬州大学科技创新培育基金资助项目(2011CXJ029)

作者简介: 金燕,讲师,主要从事泵及泵装置内流场数值模拟和实验研究,E-mail: jinyan\_yz@163.com

## 1 试验装置与测点布置

### 1.1 试验装置

图1为测试系统装置图,包括贯流泵装置、激光多普勒测速仪、流量计、扭矩仪、变频电动机、计算机等。

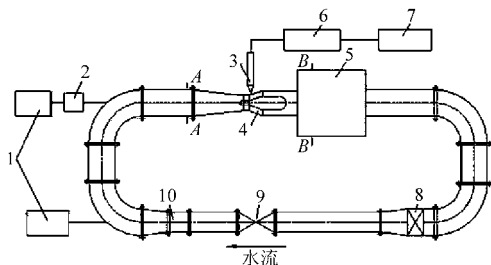


图1 测试系统装置示意图

Fig.1 Experimental set up

1. 变频电动机 2. 扭矩仪 3. 光纤探头 4. 测试泵段 5. 压力水箱 6. A/D转换 7. 计算机 8. 流量调节阀 9. 电磁流量计 10. 辅助泵

### 1.2 LDV 测量

激光多普勒测速技术是利用运动粒子发出散射光的多普勒效应,产生干涉条纹,当粒子通过两光束交汇点时,产生和粒子速度呈线性关系的多普勒信号,原理示意图如图2所示。它建立在激光多普勒频移基础上,是通过测量频移来测量流动速度的,其多普勒频移表达式为

$$f_D = 2U \sin \theta / \lambda \quad (1)$$

式中  $f_D$ ——多普勒频率

$\theta$ ——光束之间半夹角

$\lambda$ ——波长  $U$ ——流速

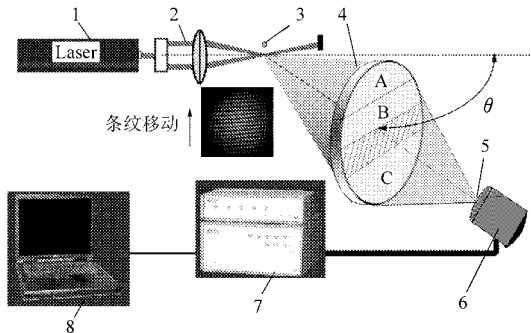


图2 LDV测量原理示意图

Fig.2 Schematic diagram of LDV measurements

1. 激光发生器 2. 光纤 3. 示踪粒子 4. 接收光纤 5. 图像倒立 6. 接收器 7. 信号处理器 8. 计算机

#### 1.2.1 测量窗口

导叶扩散段外壳是圆形的,圆形壁面会使激光在壁面产生折射、反射等现象而影响测量精度,对于后向接收式LDV圆形壁面会使反射光无法返回到接收透镜、入射光路偏折,从而使信噪比大大增加,

甚至造成聚焦困难、接收不到粒子信号,从而无法得到测量数据。因此,为了减小壁面曲率对测量的影响,在测量导叶扩散段流场时在透明泵壳外安装了一个水槽(图3),用2mm厚的有机玻璃制作而成,其测量面平整,且平行于泵壳外壁、垂直于水泵通过轴线的水平面,在水槽中注满与水泵内部一样的水,以尽量减少折射的影响,也能保证光束在内流场中的聚焦。

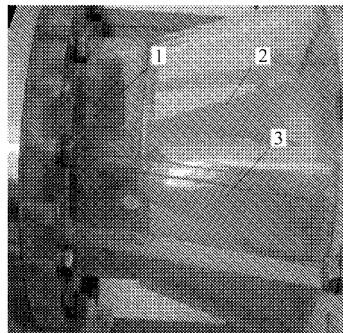


图3 LDV测量窗口示意图

Fig.3 Sketch map of test window for LDV

1. 叶轮 2. 导叶轮壳体 3. 测量窗口

#### 1.2.2 测点布置

对导叶扩散段的测量,共测量垂直于无导叶扩管外壳的8条线上的速度场,相邻测线之间的距离为10mm,测点也是按照与每条测线总长的相对值布置,按照边壁密集、中间稀疏的原则布置测点,如图4所示。

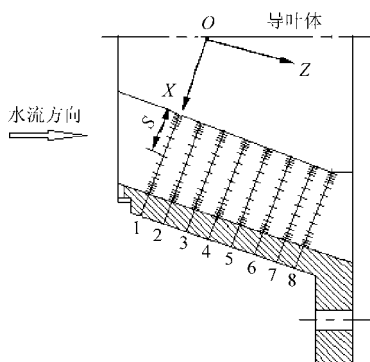


图4 测点布置示意图

Fig.4 Measurement points arrangement

#### 1.2.3 示踪粒子选择

流体中自然存在一些微粒,但是其散射光很弱。为了提高测量效率和信号质量,就要加入专用的示踪粒子。本次测量采用了跟随性较好的空心玻璃球(其粒径为8~12 μm),在向流体中投放前先用少量水稀释。

### 1.3 泵装置基本参数

试验台贯流泵装置的主要参数:主泵叶轮直径为120mm;叶片数为3片;叶轮转速为1450 r/min;设计流量为20 L/s,导叶扩散角为19°。

## 2 数据处理

试验采用的五光束单透镜三维 LDV 系统,光路结构简单,可以测量具有多层不同折射率的介质。透镜焦距越短,光束之间的夹角越大,越是对三维测速有利,考虑到贯流泵内的测量距离,选用焦距  $f = 261 \text{ mm}$  的透镜。LDV 的光路对应测量的速度分量如图 5 所示,蓝光处于上下的位置,所测为垂直于夹角中心线的速度分量  $V_1$ ,由于两束蓝光的夹角中心线垂直于测量窗口 ( $\gamma = 0$ ),所以  $V_1$  的速度就是泵内测点的周向速度  $V_u$ ,绿光和紫光在同一个 YZ 平面内,用于测量运动粒子的两个非正交速度分量  $V_2$  和  $V_3$ , $\alpha$  是两束绿光的角平分线与透镜轴线之间的夹角, $\beta$  是两束紫光的角平分线与透镜轴线之间的夹角, $\alpha = \beta = 2.76^\circ$ 。经过非正交到正交的坐标变换,得到正交系下速度  $V$  的轴向速度分量  $V_a$ 、径向速度分量  $V_r$ 。

坐标变换矩阵为

$$\begin{bmatrix} V_u \\ V_r \\ V_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \cos\gamma & 0 \\ \cos\alpha & 0 & \cos\beta \\ \sin\alpha & \sin\gamma & -\sin\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

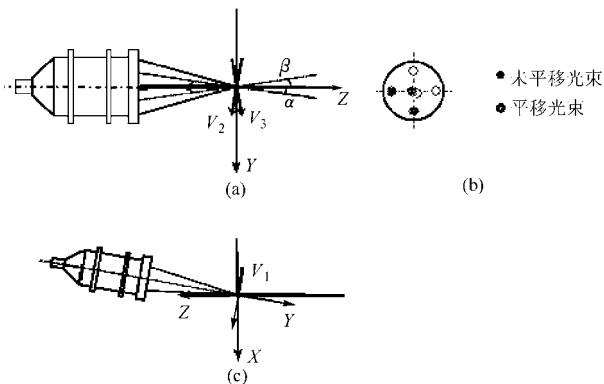


图 5 五光束探头光路

Fig. 5 Light path of 5-beam probe

(a) 顶视图 (b) 左视图 (c) 侧视图

## 3 测量结果与分析

为了与测试结果作比较,应用雷诺时均方程和 RNG  $k - \varepsilon$  紊流模型对贯流泵内部流动情况进行定常流动数值模拟。计算区域包括进水通道、叶轮、导叶、灯泡段和出水通道 5 部分(图 6)。进口条件设为质量流进口,出口采用自由出流,固体壁面处规定无滑移条件,速度分布由标准壁面函数来处理,叶轮和导叶的动静交界面采用多参考系模型(MRF)来处理数据传递,以保证交界面的连续性。采用适应性较强的非结构化网格进行剖分,并对叶轮和导叶部分的网格进行了加密。

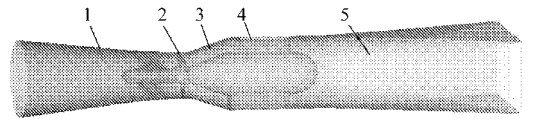


图 6 计算区域

Fig. 6 Computational domain

1. 进水通道 2. 叶轮 3. 导叶扩散段 4. 灯泡段 5. 出水通道

将 LDV 的测试结果和数值模拟的结果进行比较,总体来说,计算值和试验值表现出的流动规律基本一致,但也存在一定的偏差。

图 7 是无导叶扩管内水平纵剖面上各速度分量的等值线云图(测线 1~8)。从周向速度等值线图来看,试验值和计算值的分布规律基本上一致,且流速大小比较接近,流速从导叶进口到出口逐渐减小,靠近壁面处流速较小,但是在导叶进口处的流速分布有所不同,试验值的主流偏向轮毂,而计算值的主流偏向轮缘;从轴向速度等值线图来看,流速从轮毂到轮缘先是逐渐增大后逐渐减小,且沿着水流方向呈逐渐减小的趋势,试验值和计算值的流速范围大致相同;从径向速度等值线图来看,试验值和计算值的速度等值线分布规律基本相似,沿着水流方向有减小的趋势,但是两者的速度大小相差较大。

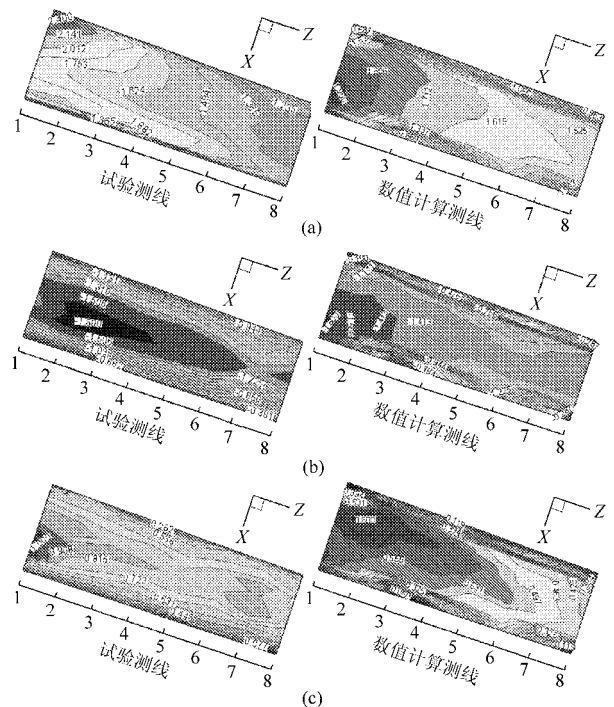


图 7 无导叶扩管内水平纵剖面的速度等值线云图

Fig. 7 Velocity contour of guide cane longitude

(a) 周向速度 (b) 轴向速度 (c) 径向速度

为了更细致地了解导叶内的流动状况,分别将导叶内每根测线上的流速分布与测试结果进行了对比分析(图 8~10)。图中  $L_i (i = 1, 2, \dots, 8)$  表示每根测线的总长度, $S$  表示每个测点沿测线方向与轮

毂壁面的距离。

周向速度在靠近轮毂壁面处试验值比计算值高,中间区域流速变化不大,计算值和试验值比较接近,而在靠近无导叶扩管轮缘处试验值表现出壁面流动,CFD不能很好地模拟贴近壁面的流动情况。

轴向速度的分布基本上呈“U”形,轮毂和轮缘处的流速都趋向于零,在靠近无导叶扩管进口和出口处计算值都高于试验值,而中间测点上的流速跟试验值相差不多,计算值的中心区域曲线比试验值平坦。

径向流动速度相对于轴向和周向速度而言较小,从分布曲线看,计算值和试验值的流动趋势一

致,但由于径向流速较小,所以从相对值来讲,计算与试验的偏差就比较大。引起误差的原因主要有:①紫光能量弱,其能量相当于绿光和蓝光的1/2,甚至只有1/3,作为合成径向速度的混合光,紫光这一缺陷导致了径向速度测量的误差。②五光速单探头的LDV,光束夹角很小,绿光和紫光的光束夹角只有 $2.76^\circ$ ,一旦探头和测试窗口之间有一点不垂直就会对测量结果带来很大的偏差。③无导叶扩管弧形外壳是弧形的,而且有机玻璃厚度有10 mm,入射光不但要穿过2 mm的测量窗口,还要穿过这个弧形的有机玻璃,这个过程中引起的折射和反射都会影响测量精度。

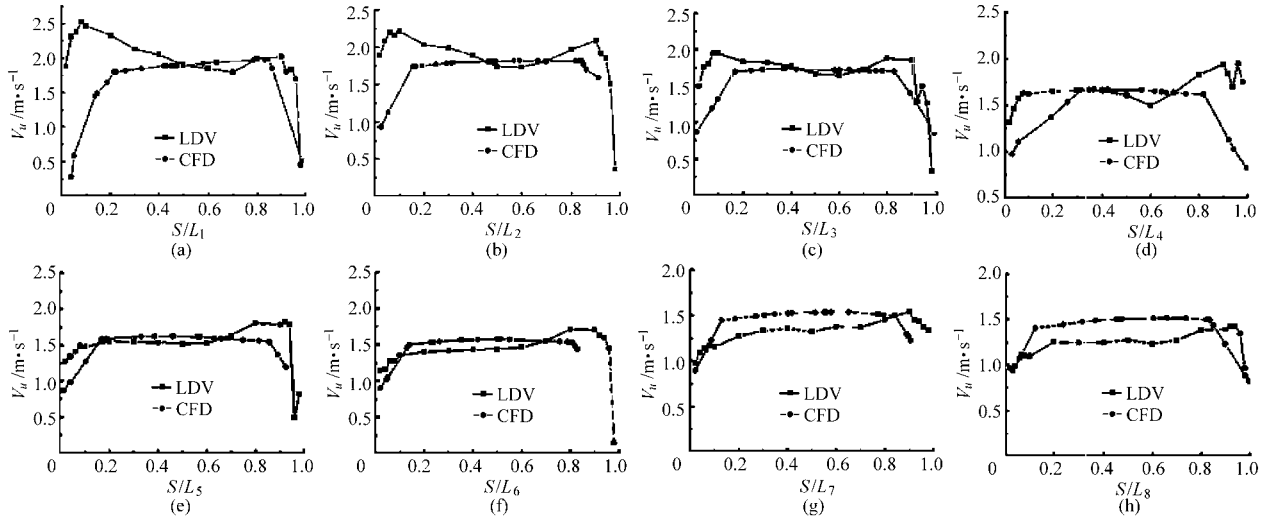


图8 测线上的周向速度分布

Fig. 8 Circumferential velocity distribution of test lines

(a) 测线1 (b) 测线2 (c) 测线3 (d) 测线4 (e) 测线5 (f) 测线6 (g) 测线7 (h) 测线8

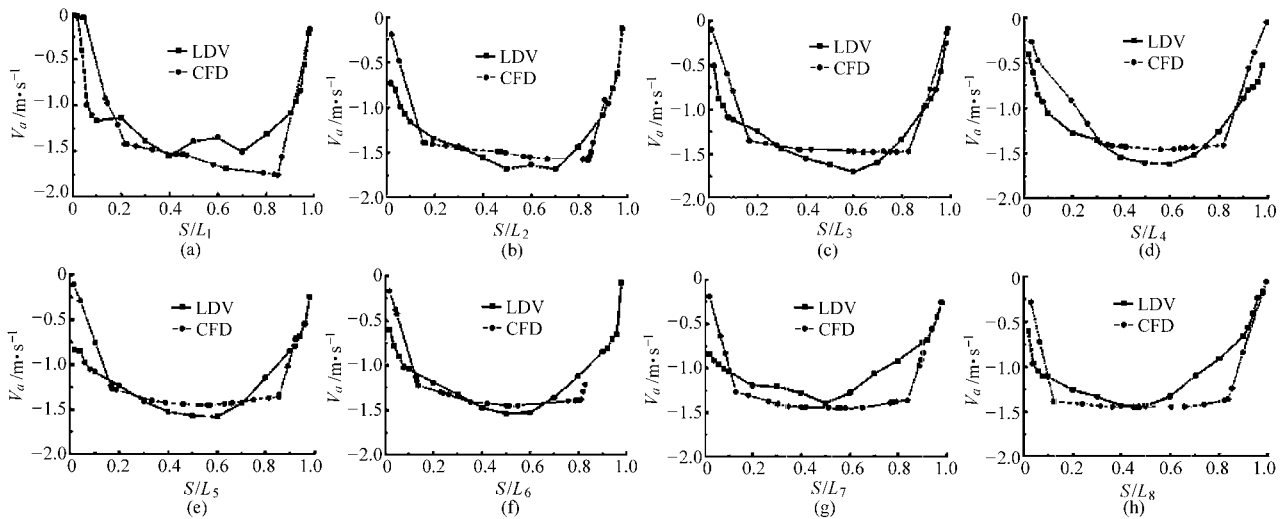


图9 测线上的轴向速度分布

Fig. 9 Axial velocity distribution of test lines

(a) 测线1 (b) 测线2 (c) 测线3 (d) 测线4 (e) 测线5 (f) 测线6 (g) 测线7 (h) 测线8

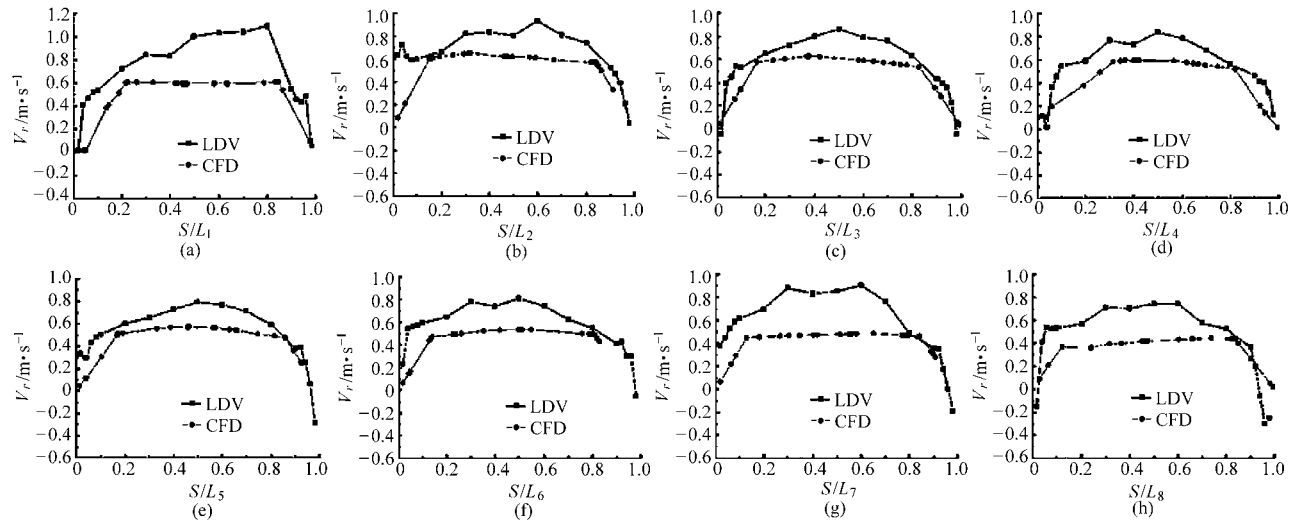


图10 测线上的径向速度分布

Fig. 10 Radial velocity distribution of test lines

(a) 测线1 (b) 测线2 (c) 测线3 (d) 测线4 (e) 测线5 (f) 测线6 (g) 测线7 (h) 测线8

## 4 结论

(1) 无导叶扩管内测得水流流动的周向速度从进口到出口逐渐减小,符合叶轮出口水流的流动规律,靠近轮毂处流速降低,在轮缘内壁面周向流速逐渐减小;轴向速度分量基本上呈“U”形分布,靠近壁面流速很小,中间区域的流速比较大,随着无导叶扩管的扩散,轴向速度有减小的趋势;径向速度的分布

情况也是中间速度比较大,靠近壁面处流速减小。

(2) 通过 LDV 测量对 CFD 计算进行了验证,结果表明两者的周向流速和轴向流速分布规律十分接近且大小相差不大,而两者的径向流速相差较大。

(3) 分析了影响三维 LDV 测量精度的影响因素,紫光能量相对绿光和蓝光较弱,单探头的光束夹角小以及光线在穿越多层有机玻璃时易产生折射和反射都会影响到测量精度。

## 参 考 文 献

- 1 汤方平,刘超,周济人,等. 低扬程贯流泵装置模型试验研究[J]. 水泵技术,2004(4):28~31.
- 2 徐辉. 贯流式泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.
- 3 陈容新,关醒凡,王伟,等. 双向竖井贯流泵站模型泵装置模型试验[J]. 排灌机械,2007,25(1):33~37.  
Cheng Rongxin, Guan Xingfan, Wang Wei, et al. Devicemodel experiments of shaft-well two-direction tubular pumping station[J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2007, 25(1):33~37. (in Chinese)
- 4 郑源,张德虎,刘益民,等. 贯流泵装置能量特性试验研究[J]. 流体机械,2003,31(2):1~4.  
Zheng Yuan, Zhang Dehu, Liu Yimin, et al. Experimental study on equipment energy characteristic of tubular pump [J]. Fluid Machinery, 2003,31(2):1~4. (in Chinese)
- 5 李龙,王泽,胡荣霞,等. 双向贯流泵装置水力性能数值分析的数值分析[J]. 农业机械学报,2007,38(1):76~79.  
Li Long, Wang Ze, Hu Rongxia, et al. Numerical simulation of the influence of guide vanes on tubular pumping station performance in dual-directional operation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(1):76~79. (in Chinese)
- 6 Jin Yan, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Analysis of the influence of passage components on the efficiency of bulb tubular pumps [C]//Proceedings of the ASME 2008 Fluids Engineering Division Summer Meeting (FEDSM 2008), 2008,2:203~208.
- 7 刘君,郑源,周大庆,等. 前、后置竖井贯流泵装置基本流态分析[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):32~38.  
Liu Jun, Zheng Yuan, Zhou Daqing, et al. Analysis of basic flow pattern in shaft front-positioned and shaft rear-positioned tubular pump systems [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(Supp.):32~38. (in Chinese)
- 8 Liu Chao, Li Daliang, Zhou Jiren, et al. An application of 3D-PIV to the flow measurements in pump sump [C]// Proceedings of 5th Joint ASME/JSME Fluids Engineering Conference, 2007:69~72.

## 参 考 文 献

- 1 黄兴法,李光永. 地下滴灌技术的研究现状与发展[J]. 农业工程学报,2002,18(2):176~181.  
Huang Xingfa, Li Guangyong. Present situation and development of subsurface drip irrigation [J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(2): 176~181. (in Chinese)
- 2 仵峰,彭贵芳,吕谋超,等. 地下滴灌条件下土壤水分运动模型[J]. 灌溉排水,1996,15(3):24~29.  
Wu Feng, Peng Guifang, Lü Mouchao, et al. Mathematical model for soil water movement under subsurface drip irrigation [J]. Irrigation and Drainage, 1996, 15(3):24~29. (in Chinese)
- 3 王建东,龚时宏,马晓鹏,等. 地下滴灌条件下水热运移数学模型与验证[J]. 水利学报,2010,41(3):368~373.  
Wang Jiandong, Gong Shihong, Ma Xiaopeng, et al. Verification and application of mathematical model for simulating water flow and heat transport in subsurface drip irrigation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2010, 41(3): 368~373. (in Chinese)
- 4 隋娟,龚时宏,王建东,等. 滴灌灌水频率对土壤水热分布和夏玉米产量的影响[J]. 水土保持学报,2008,22(4):148~152.  
Sui Juan, Gong Shihong, Wang Jiandong, et al. Effects of drip irrigation frequency on the distribution of soil water, soil temperature and maize grown in North China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4):148~152. (in Chinese)
- 5 王洪源,李光永. 滴灌模式和灌水下限对甜瓜耗水量和产量的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(5):47~51.  
Wang Hongyuan, Li Guangyong. Effect of drip irrigation model and irrigation start point on water consumption and yield of sweet melon [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(5): 47~51. (in Chinese)
- 6 Pablo R G, O'Neill M K, McCaslin B D, et al. Evaluation of corn grain yield and water use efficiency using subsurface drip irrigation [J]. Journal of Sustainable Agriculture, 2007, 30(1):153~172.
- 7 康绍忠,史文娟,胡笑涛,等. 调亏灌溉对于玉米生理指标及水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报,1998,14(4):82~87.  
Kang Shaozhong, Shi Wenjuan, Hu Xiaotao, et al. Effects of regulated deficit irrigation on physiological indices and water use efficiency of maize [J]. Transactions of the CSAE, 1998, 14(4): 82~87. (in Chinese)
- 8 刘玉春,李久生. 毛管埋深和土壤层状质地对地下滴灌番茄根区水氮动态和根系分布的影响[J]. 水利学报,2009,40(7):782~790.  
Liu Yuchun, Li Jiusheng. Effects of lateral depth and layered-textural soils on water and nitrate dynamics and root distribution for drip fertigated tomato [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 782~790. (in Chinese)
- 9 张孝中,韩仕峰,李玉山,等. 渭北旱原土壤水分动态规律研究[J]. 干旱地区农业研究,1990(4):27~36.  
Zhang Xiaozhong, Han Shifeng, Li Yushan, et al. The laws of soil water behaviors on Weibei rain fed highland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1990(4):27~36. (in Chinese)

~~~~~

(上接第61页)

- 9 Liu Chao, Tang Fangping, Sun Sun. The PIV measurements on the flow fields in an unshrouded centrifugal pump [C] // Proceedings of the 7th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, 2004: 273~277.
- 10 Hamkins C P, Flack R D. Laser velocimetry measurements in shrouded and unshrouded radial flow impellers [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1987, 109(1): 70~78.
- 11 刘超, Deotte R E, Rashid K M. 离心泵叶轮内旋转流场激光测量研究[J]. 江苏农学院学报,1994,15(4):64~71.  
Liu Chao, Deotte R E, Rashid K M. Study on laser velocimeter measurements of rotational flow field in a centrifugal pump [J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1994, 15(4):64~71. (in Chinese)
- 12 冯旭松,金燕,刘超. 扩散导叶对贯流泵装置性能影响[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(4):344~348.  
Feng Xusong, Jin Yan, Liu Chao. Effects of diffusion guide vane on performance of tubular pump system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(4):344~348. (in Chinese)