

## 弱辐射下光伏离心泵的流动计算与试验

丛小青, 贾自强, 张 建, 王光辉

(江苏大学 能源与动力工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘 要:** 在太阳弱辐射下, 推导了光伏离心泵入口附近的冲击损失公式. 分析了转速降低时二次流的部位和范围, 并讨论了辐射的锯齿波动和有向持续改变对流场造成的影响. 应用计算流体力学 Fluent 软件, 基于雷诺时均 Navier-Stokes 方程和标准  $k-\varepsilon$  湍流模型, 考虑 4 种不同的辐射条件, 采用 SIMPLEC 算法对设计的光伏离心泵进行计算, 并通过试验进行验证. 计算和试验结果表明, 入口冲击损失主要取决于圆周速度平方; 流场内会出现正反向交替的振荡脉动, 产生压力扰动波和稀疏波; 随着太阳辐射减弱, 入口先出现冲击损失, 然后变成与旋转方向相同的漩涡; 出口扰动滞后于入口扰动, 先发生在叶片背面附近, 然后迅速向下一叶片压力面发展.

**关键词:** 光伏离心泵; 弱辐射; 锯齿波动; 流动; 数值模拟

**中图分类号:** S277.9; TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2010)04-0305-04

## Flow calculation and experiment of photovoltaic centrifugal pump under weak radiation

Cong Xiaoqing, Jia Ziqiang, Zhang Jian, Wang Guanghui

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract:** The formula of inlet shock loss under week sun radiation was derived. The location and extent of secondary flow caused by speed reduction were analyzed. The effects of saw-tooth waving and continuous changing of radiation on the flow field were discussed. Based on Reynolds time-averaged Navier-Stokes equation and standard  $k-\varepsilon$  turbulence model, a self-designed photovoltaic centrifugal pump was simulated by computational fluid dynamics software of Fluent and SIMPLEC method under four kinds of radiation and tested by experiment. The results of calculation and experiment show that the inlet shock loss is mainly determined by square of circumferential velocity. The forward and reverse alternated oscillation pulse in flow field can lead to pressure disturbance waves and rarefaction waves. With the radiation decreasing, the shock loss first appears at the inlet and gradually evolves into a whirlpool in the same direction of the rotation. The outlet disturbance lags behind inlet one. It occurs near the blade suction side first, and then develops to the next blade pressure side rapidly.

**Key words:** photovoltaic centrifugal pump; weak radiation; saw-tooth wave; flow; numerical simulation

随着太阳能技术的发展和国家能源战略的调整, 光伏离心泵得到广泛应用. 独立光伏泵系统在太阳弱辐射时, 转速下降, 流量减小, 这类似于普通离心泵在低速下运行. 普通泵变频调速时, 平衡被打

破, 但短暂扰动后, 会在某一低速建立新的稳定状态. 而太阳辐射在白天先增强后减弱, 时刻改变, 并且辐射强度随时间呈不规则的锯齿变化, 瞬态波动使光伏场合下的流场时刻具有变加速趋势, 因此光

收稿日期: 2009-12-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50776040)

作者简介: 丛小青(1966—), 女, 山东威海人, 副研究员(ydq@ujs.edu.cn), 主要从事流体机械设计研究.

贾自强(1984—), 男, 河南周口人, 硕士研究生(jzq41@126.com), 主要从事流体机械设计研究.

伏离心泵难以维持在某一工况。近年来,泵内流动的研究较多<sup>[1-3]</sup>,但多针对设计工况,仅张人会等<sup>[4-5]</sup>对非设计工况做过分析,而有关光伏流场的研究则更少。因此,对光伏流场进行研究,分析流动规律,对于泵的性能改善和效率提高都很重要。

文中以光伏离心泵为研究对象,讨论不同太阳辐射时内部流动状况,对所设计叶轮进行流场计算,并进行试验验证。

## 1 弱辐射下低转速的二次流

### 1.1 进口冲击损失

辐射较强时,光伏泵在设计工况点附近运行,流体平滑地进入流道,不产生冲击。辐射较弱时,流量偏离设计点,液流角 $\beta_1$ 随之变小,此时,进口速度三角形发生变化,如图1所示,下标1表示进口。

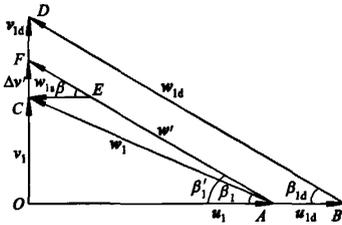


图1 进口速度三角形  
Fig.1 Velocity triangle of inlet

作 $AF$ ,使 $AF \parallel w_{1d}$ ,在 $AF$ 上取一点 $E$ 使得 $EC \parallel u_1$ ,记 $\angle \beta = \angle CEF$ , $\angle \beta'_1 = \angle OAF$ , $w_{1s} = EC$ ,则 $w_{1s}$ 为冲击速度。

$$w_{1s} = AC - AE = w_1 - w' = \Delta v' \cot \beta. \quad (1)$$

由于 $CF = |\Delta v'|$ ,根据三角函数关系,有

$$\tan \beta = \tan \beta'_1 = \tan \beta_{1d} = \frac{|v_1| + |\Delta v'|}{|u_1|}, \quad (2)$$

$$\tan \beta_1 = \frac{|v_1|}{|u_1|}, \quad (3)$$

可解出 $\Delta v'$ ,代入式(1)得

$$w_{1s} = \cot \beta (\tan \beta_{1d} - \tan \beta_1) u_1 = \left(1 - \frac{\tan \beta_1}{\tan \beta_{1d}}\right) u_1, \quad (4)$$

式中 $w_{1d}$ 为设计点相对速度; $w_1$ 为实际点相对速度; $u_{1d}$ 为设计点圆周速度; $u_1$ 为实际点圆周速度; $\beta_{1d}$ 为设计点相对速度方向角; $\beta_1$ 为实际点相对速度方向角; $w'$ 为实际点无冲击相对速度。

冲击损失为

$$h_{1s} = \xi_{1s} \frac{w_{1s}^2}{2} = \frac{\xi_{1s}}{2} \left(1 - \frac{\tan \beta_1}{\tan \beta_{1d}}\right)^2 u_1^2, \quad (5)$$

式中 $\xi_{1s}$ 为冲击系数,与冲角有关。

从式(5)可以看出,冲击损失与相对速度方向角有关。弱辐射时,方向角变化越大,括号内的值越接近0,此时冲击损失主要由圆周速度的平方决定。弱辐射使圆周速度减小,故冲击损失变小。

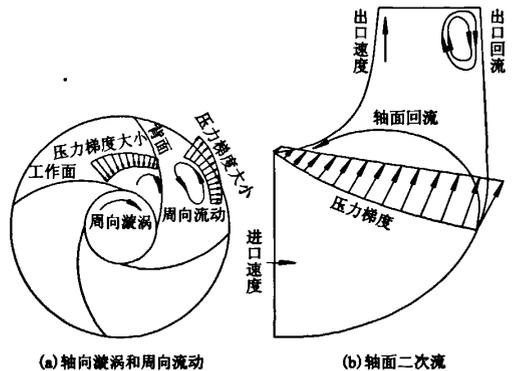
### 1.2 进出口附近的二次流

速度三角形的变化,导致进口处压力场的重新分布,加剧了流体圆周向运动<sup>[6]</sup>。叶轮进口处有

$$\frac{u_1^2 \sin \theta}{r} - \frac{v_1^2}{R} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n}, \quad (6)$$

式中 $v_1$ 为轴向速度分量; $u_1$ 为圆周速度分量; $r$ 为讨论点到轴线距离; $p$ 为入口边压力; $\theta$ 为等势线与半径夹角; $n$ 为等势线方向; $R$ 为轴面流线曲率半径。

在弱辐射时, $r$ , $\theta$ 和 $R$ 不变, $u_1$ 变化不如 $v_1$ 大,故压力梯度随转速降低而提高,而流体的动量则是减小的,因此容易在进口靠近前盖板处形成逆向液流。压力面压力高于背面,又由于液体在流道停留时间较长,叶轮带动液体在周围方向走过更长路程,导致液体由叶片压力面流向上游叶片背面,遇叶片受阻而折向进口,引起回流。辐射过弱时,靠近进口边处出现负的液流。使进口流道有效面积减小,二次流增强,导致回流进一步发展。出口附近,在旋转叶片作用下,叶片背面附近易出现液体分离。压力面附近压力较大,液体流向出口的同时向背面流动,过程中遇到向外流动的流体,造成撞击和摩擦。液体到达背面附近时能量有一定损耗,速度有所降低,形成尾流,如图2所示。文献[7]也表明,从前盖板到后盖板会有类似的运动。



(a) 轴向漩涡和周向流动

(b) 轴面二次流

图2 进出口处的二次流

Fig.2 Secondary flow at inlet and outlet

## 2 辐射波动下瞬变工况对流场的影响

### 2.1 辐射的锯齿波动对流场的影响

太阳辐射强度受温度、云层厚度、入射角等因素的影响,具有很大不可预测性。一天内的辐射强度具有明显的锯齿波动。锯齿波动是随机的,无规律可循,这种不规则变化使光伏泵流动变得很复杂。流动为非稳态,流场受力不平衡,同时存在着角加速度、科氏加速度和向心加速度,分别为

$$a_e = \frac{d\boldsymbol{\varepsilon}}{dt}, \quad (7)$$

$$a_k = 2(\boldsymbol{\varepsilon} \times \boldsymbol{w}), \quad (8)$$

$$a_c = -\boldsymbol{\varepsilon}^2 \cdot \boldsymbol{r}, \quad (9)$$

式中  $\boldsymbol{\varepsilon}$  为转动瞬时角速度;  $\boldsymbol{w}$  为瞬时相对速度;  $\boldsymbol{r}$  为瞬时旋转中心到质点的位移矢量。

任一控制体的加速度由其所受力的矢量和决定。工况突变后,质点受力重构,导致  $a_e$ ,  $a_k$  和  $a_c$  的大小与方向都会改变,因此流场会脱离原有平衡态,寻找新的平衡点。如果辐射强度突然增大,叶轮把驱动转矩传递给边界控制体,形成一压力扰动波  $f_1$ 。使相关流体质点微观上无规律,宏观上有规律地向上一叶片背面扩展。如果持续一定时间,  $f_1$  会达到前一叶片背面,完成整流道的加速。如果在此之前辐射强度下降,叶轮则会减速,从而在叶片背面出现对流场的阻力矩,进而产生另一压力扰动波  $f_2$ 。  $f_2$  与  $f_1$  反向,迎面扩展。两波能量较弱时,在相遇前消失。如果能量足够强,将在流道中的某一处相撞,彼此削弱或抵消。在随后的波动里,这种现象反复进行,从而破坏了整个流场的平顺性,致使流动域中的压力场分布疏密不均,形成新的涡点或流动分离,在涡的产生、破灭或合并过程中造成能量内耗。

### 2.2 辐射的有向持续改变对流场的影响

锯齿波动没有方向性。此外,辐射还存在持续的有向移动,即上午时段,移向强辐射;下午时段,移向弱辐射。

由于流场的轴对称性,质量力矩合成的结果为零,而压力脉动的存在使压力力矩合成难以为零。在非稳定流场里,质点速度矩对时间的导数项也难以抵消,结合控制体运输方程,可得

$$\sum (M)_s = \sum (\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{F} + \boldsymbol{T})_s = \frac{d}{dt} \int_{c,v} (\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{v}) \rho dV +$$

$$\int_{c,s} (\boldsymbol{r} \times \boldsymbol{v}) \rho (\boldsymbol{v} \cdot \boldsymbol{n}) dA, \quad (10)$$

式中  $\boldsymbol{F}$  为质点所受压力力矩;  $\boldsymbol{T}$  为所受的外界力矩。

在下午时段,辐射持续变弱,导致流场在常规阻力矩基础上产生另一个附加阻力矩。附加阻力矩源自流场旋转受叶片阻碍,该阻力矩改变了边界处的压力梯度分布和涡量生成率,进而出现涡量流。由于流体的粘滞性和惯性力,扰动沿叶片和回转方向扩展,把一部分附加阻力矩施加给流场中间的质点。扰动内移的同时,边界处形成新的扰动,新的涡动尾随而至。不同时刻的辐射变化率不同,由此形成的涡量流强度和范围也不同。所以相邻的涡在空间和时间上会相互影响,持续不断,流场处于动态的变化中。扰动的总体效果消耗了质点的部分速度,使之趋小。上午则情况相反。

## 3 流场计算与结果分析

应用计算流体动力学软件 Fluent 对一光伏泵进行模拟计算。水泵采用普通蜗壳式,设计参数为  $Q = 5.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H = 20 \text{ m}$ ,  $n = 2900 \text{ r/min}$ , 叶片数  $Z = 6$ 。

根据雷诺理论,把湍流平均动量雷诺方程与连续性方程写成便于计算的形式<sup>[9]</sup>。采用混合非结构网格<sup>[9]</sup>划分,如图3所示,最终网格数为698468。

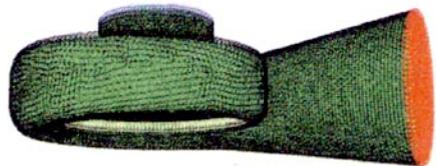


图3 流道网格

Fig.3 Grid of flow channel

采用速度进口,入口无旋。设定进口面中心为压力参考点,绝对压力为标准大气压。出口设定为自由出流。叶轮和蜗壳分别采用动静坐标系。壁面无滑移,近壁流动按标准壁面函数法处理<sup>[10]</sup>。使用SIMPLEC算法,二阶迎风格式离散差分方程。代数方程迭代计算采取亚松弛,各项系数选默认值。流体流动是三维的,限于篇幅,仅选进口附近圆周截面和叶轮回转面计算,以比较内部流场演变过程。

### 3.1 进口处圆周截面速度分布

进口处圆周截面速度分布如图4所示。从图中可看出,  $0.80Q_d$  工况时扰动仅限个别叶片进口,为冲击损失,流体较快恢复正常,未见回流。辐射更弱

时,流量和转速变小,流量变化更快.此时冲击减弱,但出现回流,总体流动变坏,扰动范围一方面扩展到更多流道,另一方面向出口方向发展. $0.60Q_d$ 工况时回流中一部分不能正常流向出口而折回进口,有效流道开始变窄.到 $0.25Q_d$ 工况时几乎所有流道都有回流,单流道回流范围也大大增加,流动受阻.回流在遇到前盖板和进口流动的阻力后,沿旋转方向折向前一叶片的背面.此时转速约为额定值的一半,若再降低转速、减小流量,则计算难以收敛.

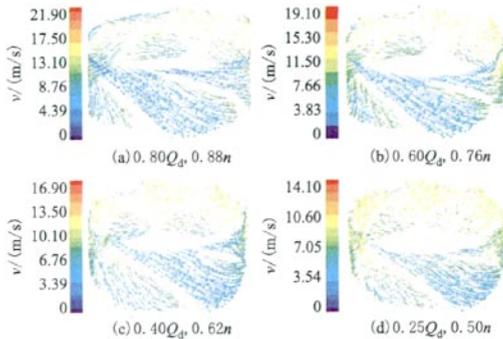


图4 进口圆周截面回流

Fig. 4 Back flow of inlet circular cross-section

### 3.2 叶轮中间回转面速度

选取稍靠近后盖板的回转面,以此为参考,比较不同工况下回转面上的速度分布,如图5所示.

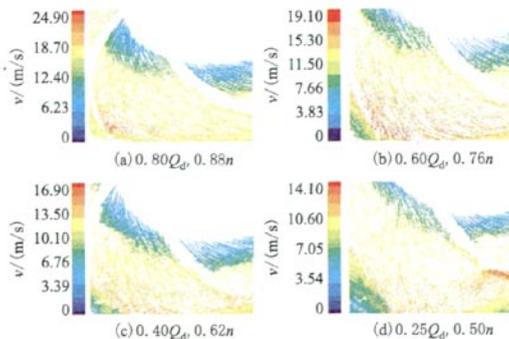


图5 回转面二次流变化

Fig. 5 Rotary section secondary flow change

从图5中可以看出, $0.80Q_d$ 工况时相对于进口,回转面流体运动较理想,无明显漩涡.随着转速降低,流量变小,回转面逐渐出现扰动. $0.60Q_d$ 工况时叶片出口的背面已有小范围紊乱. $0.40Q_d$ 工况时这种紊乱出现在更多流道的出口,小范围有回流.转速再低,流动会迅速恶化,到 $0.25Q_d$ 工况时的周向漩涡范围已经很大,向叶片压力面移动,漩涡的转向与叶轮转向相反,造成了压力面的绝对速度小于背

面绝对速度.与进口的二次流相互促进,使流道大范围被堵塞,有效流通截面减小.与此同时在进口与背面的交界处出现了一定的流动分离,一部分流向出口,另一部分折回进口.这是因为流速减小比转速减小更快.

## 4 试验对比

叶轮内的流动十分复杂,数值模拟的可靠性需要用试验进行验证.试验装置如图6所示.



图6 光伏泵系统试验台

Fig. 6 Photovoltaic pump system test platform

本试验在江大泵业有限公司水泵性能测试试验台上进行.系统由电池阵列、控制逆变一体机、水泵和测量显示系统等组成.以清水为介质,测定了5种工况下泵的效率,与数值计算效率进行对比,结果如表1所示.

表1 不同辐射强度下模拟与试验效率对比

Tab. 1 Contrast of simulated and tested efficiency under different radiation intensities

	辐射强度/ ( $W/m^2$ )	转速/ ( $r/min$ )	效率/%	
			模拟	试验
设计工况	1 025	2 900	56.89	53.48
非设计工况1	987	2 550	54.67	50.65
非设计工况2	851	2 200	49.72	42.44
非设计工况3	796	1 850	41.41	32.76
非设计工况4	710	1 500	28.32	17.25

由表1可以看出,随着辐射减弱,模拟效率和试验效率都降低,变化规律一致,说明数值计算总体正确.但同时存在较大的偏差,试验效率比模拟值低,可能由硬件功耗和锯齿波动等因素造成.这表明数值计算尚不能很好考虑锯齿波动等因素,有待进一步改进.

## 5 结论

弱辐射时光伏离心泵转速降低,进而改变入口处的冲击损失,绝对值减小,同时导致泵进出口处二

次流的生产,且辐射越弱二次流越严重.辐射的锯齿波动加速了流场的脉动和紊乱,使流场内出现不规则的扰动波.辐射的有向持续改变也会破坏流动的稳定.

数值计算结果表明,辐射越弱,流量和转速越小,内部回流也越严重,且成加速趋势.入口扰动比出口扰动发生早,强度也大.试验结果证明了分析和数值计算是合理的.

### 参考文献(References)

- [ 1 ] John S A. A fast numerical method for flow analysis and blade design in centrifugal pump impellers[J]. *Computers and Fluids*, 2009, 38(2): 284 - 289.
- [ 2 ] Cui Baoling, Zhu Zuchao, Zhang Jianci, et al. The flow simulation and experimental study of low-specific-speed high-speed complex centrifugal impellers[J]. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 2006, 14(4): 435 - 441.
- [ 3 ] Jalal M J, Khalaf H A, Hussein M Y. Three-dimensional numerical study of flow characteristics through a centrifugal pump[J]. *Al-Rafidain Engineering*, 2008, 16(1): 75 - 88.
- [ 4 ] 张人会, 张学静, 杨军虎. 非设计工况下叶轮进口附近的流动及其控制[J]. *甘肃工业大学学报*, 2003, 29(4): 64 - 66.  
Zhang Renhui, Zhang Xuejing, Yang Junhu. Flow field around intake of impeller under off-design conditions and its control[J]. *Journal of Gansu University of Technology*, 2003, 29(4): 64 - 66. (in Chinese)
- [ 5 ] Raúl B, Jorge P, Eduardo B. Numerical analysis of the unsteady flow in the near-tongue region in a volute-type centrifugal pump for different operating points[J]. *Computers and Fluids*, 2010, 39(5): 859 - 870.
- [ 6 ] 史宏超, 李意民. 离心泵进口回流及其控制研究[J]. *水泵技术*, 2000(3): 27 - 29, 37.  
Shi Hongchao, Li Yimin. Centrifugal pump inlet back flow and its control[J]. *Pump Technology*, 2000(3): 27 - 29, 37. (in Chinese)
- [ 7 ] Andrej P, Ignacij B. Influence of additional inlet flow on the prerotation and performance of centrifugal impellers[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2003, 41(2): 207 - 216.
- [ 8 ] 何有世, 袁寿其, 郭晓梅, 等. 分流叶片离心泵叶轮内变工况三维数值分析[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 2005, 26(3): 193 - 197.  
He Youshi, Yuan Shouqi, Guo Xiaomei, et al. Numerical simulation for inner flow of impeller with splitting vanes of centrifugal pump under different operating condition [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2005, 26(3): 193 - 197. (in Chinese)
- [ 9 ] 王洋, 张翔, 黎义斌. 离心泵变工况流场分析及径向力数值预测[J]. *排灌机械*, 2008, 26(5): 18 - 22.  
Wang Yang, Zhang Xiang, Li Yibin. Off-design flow field analysis and radial force prediction of centrifugal pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(5): 18 - 22. (in Chinese)
- [ 10 ] 沙毅, 李金磊, 李昌烽. 自吸旋涡泵内部流动分析[J]. *排灌机械*, 2008, 26(6): 10 - 14.  
Sha Yi, Li Jinlei, Li Changfeng. Analysis of interior flow in self-priming vortex pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(6): 10 - 14. (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)