排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2016 年 11 月 Nov. 2016 | 第 34 卷 第 11 期 Vol. 34 No. 11
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0107

JP75 型卷盘喷灌机用水涡轮能耗贡献率分析

程俊，汤跃，汤玲迪
（江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心，江苏 镇江 212013）

程俊

摘要：为对 JP75 水涡轮各过流部件展开能耗贡献率研究，探究水涡轮性能，利用水涡轮试验台对 JP75 水涡轮在不同转速下进行外特性试验，并确定水涡轮最优转速（250 r/min）；采用 CERO 和 STAR-CCM+前处理对水涡轮全流道内流场进行三维建模、多面体网格划分以及数值计算，计算得到水涡轮在固定转速下的外特性曲线. 计算不同工况下流场内部各处能耗，发现叶轮与进出水管道连接处平均总能耗达到 52.18%，其中叶轮与进水管道连接处能耗贡献率达到 44.80%，分析云图发现此处压力梯度较大，分布不均匀，叶片工作面涡旋现象明显，说明此处能量耗散现象最为严重，在此基础上，对 JP75 水涡轮采取优化设计，优化后其效率得到显著提升，水头有明显降低且输出功率得到保证.

关键词：卷盘式喷灌机；水涡轮；数值计算；能耗；优化设计
中图分类号：S277.9　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2016)11-1008-05

程俊，汤跃，汤玲迪. JP75 型卷盘喷灌机用水涡轮能耗贡献率分析[J]. 排灌机械工程学报，2016，34(11)：1008-1012.
CHENG Jun，TANG Yue，TANG Lingdi. Energy consumption analysis of hydraulic turbine of JP75 hose reel irrigator[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2016，34(11)：1008-1012.(in Chinese)

Energy consumption analysis of hydraulic turbine of JP75 hose reel irrigator

CHENG Jun，*TANG Yue*，*TANG Lingdi*
(National Research Center of Pumps，Jiangsu University，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China)

Abstract：For study on energy consumption of various hydraulic components of the hydraulic turbine of JP75 hose reel irrigator，the external characteristic of the turbine is tested and the flow field is numerically simulated based on a commercial software STAR-CCM+. According to an analysis of pressure and velocity distributions in the turbine，the energy consumption in the connection between the impeller and the inlet pipe is 44.80%，while the whole consumption of the connection is 52.18%. It is also shown that a serious energy consumption are associated with a high pressure gradient and appearance of vortex. Based on this，the original hydraulic turbine design is optimized. As a result，the turbine total efficiency is significantly improved，the total head is reduced obviously and the nominal output power is guaranteed，eventually the goal of optimization has been achieved.

Key words：hose reel irrigator；hydraulic turbine；numerical calculation；energy consumption；optimal design

收稿日期：2016-05-15；**网络出版时间**：2016-11-14
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20161114.1444.022.html
基金项目：江苏省自然科学基金资助项目(BK20140565)；国家自然科学基金资助项目(51509107)
作者简介：程俊(1990—)，男，安徽桐城人，硕士研究生(784642336@qq.com)，主要从事流体机械内部流动及优化研究.
汤跃(1957—)，男，江苏镇江人，研究员(tomt@ujs.edu.cn)，主要从事农业灌溉装备及职能化研究.

卷盘喷灌机自引入中国以来,在节水灌溉工程中担任着不可或缺的角色. 其凭借单位灌溉投资低、机械化程度高、移动方便等优点,得到了广泛应用,特别是在东北节水增粮行动以及农村土地流转中发挥了重要作用[1-3].

近年来,国内一些高校及企业逐渐展开了针对卷盘喷灌机的系统研究,如文献[4-6]通过对卷盘喷灌机卷盘回收系统进行试验,发现了卷盘回收软管过程中的螺旋管摩擦特性与卷盘负载特性,还创建了一套可用于无线信号传输的喷头喷洒量监测系统;葛茂生等[7]基于最小二乘法构建了一种移动喷洒均匀度计算模型并得到了试验验证. 然而,卷盘喷灌机的研究大多集中在智能控制、喷头喷洒特性、软管阻力损失等方面,针对其核心动力驱动部件水涡轮的研究却鲜有报道. 目前国内市场主要的水涡轮产品为 JP50 与 JP75,前者适用于小型卷盘式喷灌机,后者则适用于大中型卷盘式喷灌机. 其中,JP50 结构较为简单,针对其性能及优化,文献[8-9]展开了系列研究,并取得了一定研究成果. 但 JP75 型水涡轮结构较为复杂,针对其性能的系统研究的文献较少.

文中以 JP75 水涡轮为研究对象,开展外特性试验,确定其最优转速,同时创建水涡轮全流道内流场模型,运用多面体网格技术和 $k-\omega$ SST 模型进行定常数值模拟. 对比试验与模拟结果以验证模拟可行性并进一步探究水涡轮内部压力与速度分布,确定其中能耗现象较为严重的部位并计算能耗贡献率,为下一步优化设计指导方向.

1　水涡轮数值模拟

1.1　主要几何参数

JP75 型水涡轮是目前国内常见的卷盘式喷灌机用水涡轮,如图 1 所示.

图 1　JP75 卷盘式喷灌机水涡轮

Fig. 1　Hydraulic turbine of JP75 hose reel irrigator

JP75 型水涡轮的主要几何参数如下:叶片数 $Z=24$,叶片长度为 54 mm,叶片轴向宽度 $b_1=30$ mm,叶片厚度 $\delta=4$ mm,叶片外缘直径 $D_1=274$ mm,内缘直径 $d_1=166$ mm,涡轮腔直径 $D_0=280$ mm,宽度 $b_0=34$ mm.

1.2　网格设置

将整个水体分为 2 个流域:进口段与出口段组成静止域,叶轮与壁面间隙组成旋转域. 文中选择对复杂结构兼容性较好的多面体非结构网格,对全流域分别划分了 500 000,1 000 000 和 2 000 000 量级的 3 套网格,并通过计算对比发现,500 000 量级网格的误差为 9.34%,1 000 000 量级网格与试验对比的平均误差为 3.28%,2 000 000 量级的网格误差为 2.87%,综合考虑计算时间与精度,最终确定水涡轮静止域和旋转域的网格数分别为 404 123,1 162 316,网格总数为 1 566 439. 全流场三维建模及网格模型如图 2,3 所示.

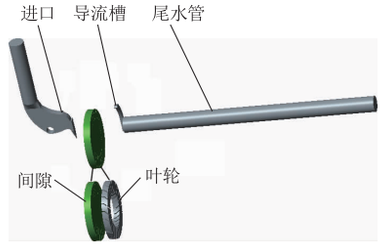
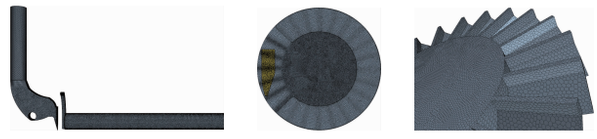


图 2　水涡轮全流场三维图

Fig. 2　3D fluid domains of hydraulic turbine



(a) 静子域　(b) 转子域　(c) 叶轮局部网格

图 3　水涡轮网格模型

Fig. 3　Mesh pattern in fluid domains

1.3　控制方程

水涡轮的内部流动是以水为介质的不可压缩三维黏性流动,可以用 Navier-Stokes 方程描述.

质量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=0, \tag{1}$$

动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_j)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i)=-\frac{\partial p}{\partial x_j}+\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}+S_{ij}, \tag{2}$$

式中:u 为速度分量;p 为压强;ρ 为介质密度;τ_{ij} 为剪切应力;S_{ij} 为附加源项.

1.4　湍流模型

为了较好地模拟湍流中转捩和流体分离并减

小壁面函数对近壁区流动的舍入误差，文中基于STAR－CCM＋流场分析软件，运用 $k-\omega$ SST 湍流模型对全流场进行稳态分析[10]，即

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_k\frac{\partial k}{\partial x_i}\right)+G_k-Y_k+S_k, \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho w u_i)=\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Gamma_w\frac{\partial w}{\partial x_i}\right)+G_w-Y_w+D_w-S_w, \tag{4}$$

上述式中：G_k 为层流梯度产生的湍动能，$G_k=u_iS^2$；S 为表面张力系数；$G_w=a\omega G_k/k$，ω 为单位耗散率；Γ_k，Γ_ω 分别为 k，ω 的有效扩散项；D_ω 为正交发散项；S_k，S_ω 为自定义项；Y_k，Y_ω 为扩散项产生的湍流.

边界条件设置为速度进口与压力出口（绝对压力为 1.01×10^5 Pa），近壁面采取无滑移壁面（No slip）条件. 计算中选用多重坐标系（MRF）来给予叶轮旋转速度. 求解算法采用 SIMPLE 算法，离散格式采用二阶迎风格式，残差收敛精度为 10^{-4}.

1.5 外特性比较

1.5.1 外特性试验

为验证数值计算准确性，建立 JP75 卷盘式喷灌机水涡轮试验台，对现有 JP75 冲击式水涡轮进行外特性试验，图 4 为水涡轮试验台示意图. 试验所选择运行工况点根据水涡轮的运行参数确定. 经试验比较不同转速下全流量下的外特性，最终试验选择的流量为 19～37 m^3/h，转速为 250 r/min，进出口压力、流量、转速及扭矩均由电脑端同步记录，由此计算水涡轮轴功率、扬程和效率.

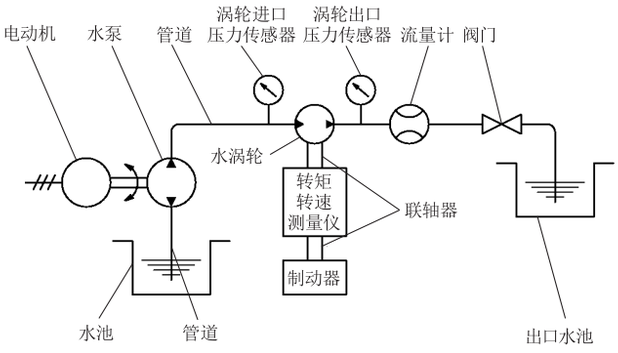


图 4 水涡轮试验台示意图

Fig. 4 Hydraulic turbine test rig

1.5.2 模拟与试验比较

图 5 为水涡轮试验与数值计算得到的外特性曲线. 对比试验与数值计算结果可以看出，数值计算得出的外特性曲线与试验所得的较为吻合；最高效率的数值计算与试验结果平均误差仅为 3.28%，且发现模拟过程中未考虑轴承和机械密封摩擦引起的机械损失是数值计算效率要略高于试验效率的主要原因.

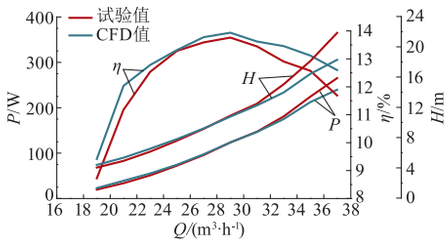


图 5 水涡轮试验与数值计算外特性曲线

Fig. 5 Comparison of experimental and numerical performance of turbine

2 能耗贡献率分析

计算在叶轮进口、叶轮导流槽和叶轮尾水管各连接处的能耗占比，综合有效功率，沿程损失等，如表 1 所示，其中 Q 为流量，σ 为能耗贡献率，C_1 为叶轮进口连接 1 处，C_2 为叶轮导流槽连接 2 处，C_3 为叶轮尾水管连接 3 处，N 为总能耗.

表 1 不同流量下连接处能耗贡献率分布

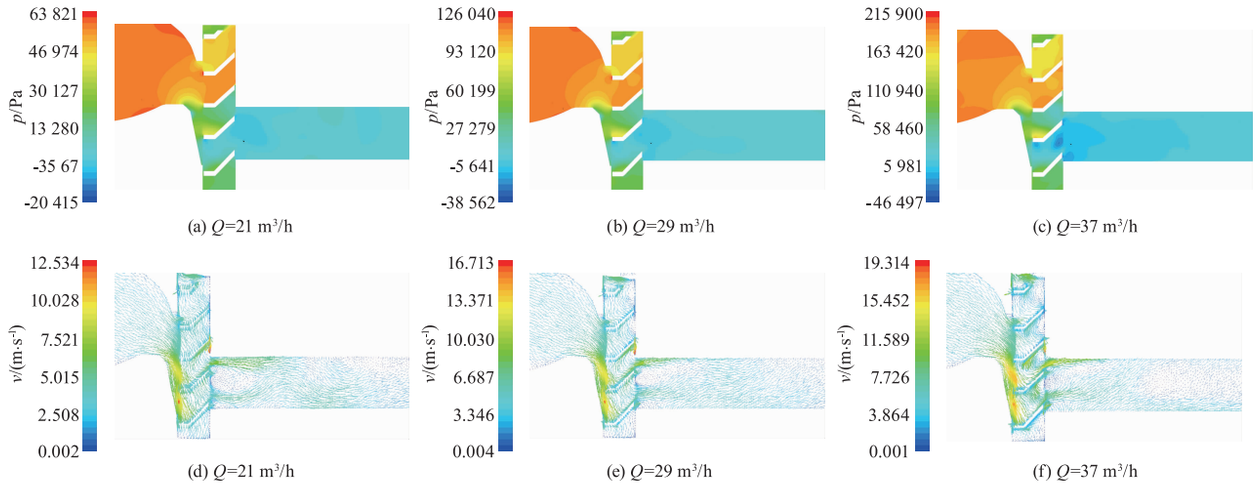
Tab. 1 Energy consumption distribution in different flow rates

参数	$Q/(m^3\cdot h^{-1})$	σ/%			
		C_1	C_2	C_3	N
数值	19.00	56.95	2.58	2.61	62.14
	21.00	43.50	3.15	3.66	50.31
	23.00	43.35	3.13	3.53	50.01
	25.00	43.25	2.81	3.65	49.72
	27.00	42.80	2.60	3.48	48.88
	29.00	42.38	2.47	3.44	48.29
	31.00	43.72	2.83	3.75	50.31
	33.00	43.80	3.90	4.10	51.81
	35.00	44.03	5.54	5.07	54.63
	37.00	44.22	6.24	5.28	55.74
平均		44.80	3.52	3.86	52.18

由表 1 可以看出不同流量下叶轮进出口连接处的能耗贡献率分布，其连接处能耗贡献率在总体能耗贡献率中占比最大，因此对此处展开内流分析，观察叶轮进出口连接处压力速度分布，进一步探究此处不良流动特性.

3 内流场分析

图 6 为不同流量下水涡轮叶轮连接处压力和速度分布情况.



(a) Q=21 m³/h　(b) Q=29 m³/h　(c) Q=37 m³/h

(d) Q=21 m³/h　(e) Q=29 m³/h　(f) Q=37 m³/h

图 6　不同流量下叶轮进口连接处截面压力、速度分布

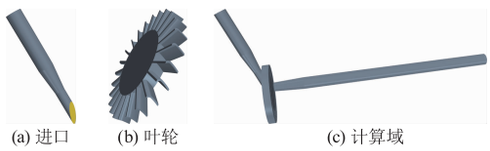
Fig. 6　Pressure and velocity distributions at different flow rates

分析叶轮进出口连接处截面压力分布,叶轮进口处压力梯度较大. 在进口面上部,压力基本保持不变,说明势能未有效转化为动能驱动叶片转动,进口面下部,液流未进入叶轮压力就已急剧下降,可以转化为动能的能量极少. 在叶轮出口处,随着流量增大,局部低压区的面积也在增大,这是由于尾水管中的压力势能未得到有效回收所致.

分析进出口段与叶轮交界面处叶片间流体速度矢量分布可以看出,液流还未进入叶轮就已扩散,且由于冲角不合理,在叶片间形成了旋涡,造成能量损失. 叶轮出口处未采取锥形管设计以回收能量,在出口处同样形成了旋涡,旋涡的大小随着流量的增大逐渐减小,但未消失.

4　优　化

因现有水涡轮在工作原理、结构形式上类似于斜击式水轮机,文中参考斜击式水轮机设计参数在速度三角形的理论基础上,将试验得到的最优工况为设计工况对水涡轮进口结构与叶片进行优化. 主要优化参数有:入射角 $\alpha = 22.5°$,叶片进口安放角 $\beta = 45°$,出口安放角 $\beta_2 = 120°$,进口射流直径 $d_0 = 39.4$ mm. 优化结构如图 7 所示.



(a) 进口　(b) 叶轮　(c) 计算域

图 7　改进后的进口、叶轮以及计算域

Fig. 7　Inlet, impeller and computational domains of optimized turbine

对优化后的结构进行数值计算,并与原型机试验结果进行对比,对比结果如图 8 所示.

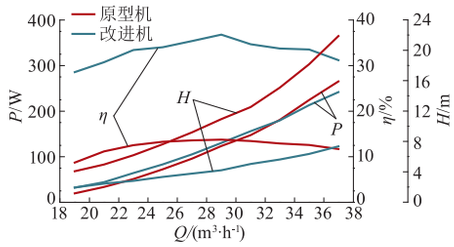


图 8　原型机与改进机外特性曲线对比

Fig. 8　Comparison of original and optimized turbine

对比外特性曲线可知,优化后的机型的效率得到很大提升,水头相对原型机有显著降低,输出轴功率相对原型机也有一定提升.

5　结　论

1）采用多面体网格技术对水涡轮进行了数值计算与内流分析,试验与数值计算结果对比表明:数值与试验结果较为接近,外特性曲线趋势相吻合,平均误差为 3.28%,说明数值计算可靠.

2）对不同流量下水涡轮的内流场研究分析可知,在进口与叶轮的连接处、导流槽、尾水管与叶轮的连接处均出现压力分布不均匀,局部压力梯度较大,同时这些部位存在旋涡、二次流等不合理流态,综合说明在这些部位能耗较大,其中,进口与叶轮的连接处能耗所占比例最大,各连接处总能耗贡献率为 52.18%,叶轮进口连接处的能耗贡献率高达 44.80%.

3）参考斜击式水轮机设计参数,对现有 JP75

水涡轮进口结构及叶片优化设计,改进后,发现效率得到显著提升,同时水头得到大幅度降低,输出功率得到保证,可见改进达到了预期效果.

参考文献(References)

[1] ALBAJI M, GOLABI M, NASAB S B, et al. Investigation of surface, sprinkler and drip irrigation methods based on the parametric evaluation approach in Jaizan Plain[J]. Journal of the Saudi society of agricultural sciences, 2015, 14(1):1-10.

[2] 李宗礼,赵文举,孙伟,等. 喷灌技术在北方缺水地区的应用前景[J]. 农业工程学报,2012,28(6):1-6.
LI Zongli, ZHAO Wenju, SUN Wei, et al. Application prospect of sprinkler irrigation technology in water-short areas of Northern China[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(6):1-6. (in Chinese)

[3] RODRIGUES G C, PAREDES P, GONÇALVES J M, et al. Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: ranking for water saving vs. farm economic returns[J]. Agricultural water management, 2013, 126(8):85-96.

[4] 赵进,邱志鹏,彭涛,等. 基于行星齿轮的卷盘喷灌机传动设计与优化[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(8): 724-730.
ZHAO Jin, QIU Zhipeng, PENG Tao, et al. Design and optimization of transmission system for hose reel irrigators based on planetary gears[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2015, 33(8): 724-730. (in Chinese)

[5] 顾哲,汤跃,汤玲迪,等. 卷盘式喷灌机卷盘驱动负载计算与分析[J]. 农机化研究,2015(8):70-73.
GU Zhe, TANG Yue, TANG Lingdi, et al. Calculation and analysis on load of hose reel irrigators[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2015(8): 70-73. (in Chinese)

[6] 汤跃,李晨. 基于无线信号传输的喷头水量分布测试系统[J]. 农业工程学报,2015,31(17):27-34.
TANG Yue, LI Chen. Water distribution test system of sprinkler based on wireless transmission technology[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(17): 27-34. (in Chinese)

[7] 葛茂生,吴普特,朱德兰,等. 卷盘式喷灌机移动喷洒均匀度计算模型构建与应用[J]. 农业工程学报, 2016,32(11):130-137.
GE Maosheng, WU Pute, ZHU Delan, et al. Construction and application of mobile spraying uniformity model of hard hose traveler[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(11):130-137. (in Chinese)

[8] LI Y, BAI G, YAN H. Development and validation of a modified model to simulate the sprinkler water distribution[J]. Computers & electronics in agriculture, 2015, 111:38-47.

[9] 汤跃,朱相源,梅星新,等. JP50卷盘喷灌机水涡轮水力性能试验[J]. 中国农村水利水电,2014(2):26-29.
TANG Yue, ZHU Xiangyuan, MEI Xingxin, et al. Performance test of water turbine of JP50 hose reel irrigator [J]. China rural water and hydropower, 2014(2):26-29. (in Chinese)

[10] ZHANG W, MA Z, YU Y C, et al. Applied new rotation correction $k-\omega$ SST model for turbulence simulation of centrifugal impeller in the rotating frame of reference [J]. Journal of hydrodynamics, 2010, 22(5): 404-407.

(责任编辑 谈国鹏)

热烈祝贺本刊入选中国高校百佳科技期刊

2016年10月26日,中国高校科技期刊研究会正式公布了“2016年度中国高校杰出·百佳·优秀科技期刊”入选名单. 其中,本刊入选“中国高校百佳科技期刊”.

中国高校科技期刊研究会是教育部主管的由高等学校主办或承办的科技期刊结成的学术性、全国性、非营利性的社会组织,是国家一级学会,也是国内科技期刊的权威组织. 此次评选采用定性和定量相结合的方法,由数十位评审专家组成的评委会对期刊学术质量和编辑出版质量进行严格审查,利用国内外重要数据库及评价机构的学术指标进行客观评分,并充分考虑期刊的学术影响力及行业影响力,共评选出“中国高校杰出科技期刊”20种、“中国高校百佳科技期刊”104种、“中国高校优秀科技期刊”254种,“中国高校编辑出版质量优秀科技期刊”69种.

(本刊编辑部)