

引用格式: Min Zheng, Yue Qiaoping, Liang Changping, *et al.* CFD-based Renovation for Horizontal Francis Turbine Draft Tube [J]. Journal of Gansu Sciences, 2015, 27(4): 74-77, 124. [敏政, 岳巧萍, 梁昌平, 等. 基于 CFD 的混流卧式水轮机尾水管改造[J]. 甘肃科学学报, 2015, 27(4): 74-77, 124.]
doi: 10.16468/j.cnki.issn1004-0366.2015.04.016.

基于 CFD 的混流卧式水轮机尾水管改造

敏 政, 岳巧萍, 梁昌平, 张友亮

(兰州理工大学 能源与动力工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘 要 混流卧式水轮机常用等截面尾水管, 为破坏尾水管涡带、降低水力损失及减轻尾水管振动, 通常在尾水弯管段加了中隔板。中隔板的存在不仅增加了摩擦损失, 水流撞击隔板后还使得隔板严重受损。为了验证混流卧式水轮机隔板存在的必要性, 研究以青海省铁吾电站 HL220-WJ-71 水轮机组为例, 数值模拟了等截面无隔板和等截面有隔板尾水管在 50%、80%、100% 开度下的特性, 对比分析了两种尾水管在不同工况下的流动状态及机组的效率, 得出隔板在大流量工况下有害无益的结论, 为同类电站尾水管的使用提供了参考。

关键词 混流卧式水轮机; 数值模拟; 等截面尾水管; 隔板

中图分类号: TK733+.1

文献标志码: A

文章编号: 1004-0366(2015)04-074-05

卧式水轮机尾水管能够影响到水轮机的效率, 尾水管中水流状态对机组运行的稳定性也有很大影响。因此, 研究尾水管的结构并了解其中水流运动状态的基本特点是十分必要的^[1]。

尾水管对高比转速水轮机及低比转速水轮机的影响不同。高比转速水轮机的出口动能可达水头的 40% 左右, 而低比转速水轮机却不到 1%。以尾水管的恢复系数都等于 75% 来估算, 则高比转速水轮机的相对水力损失达 10% 而低比转速仅为 0.25% 左右^[2]。由此可见, 尾水管对高比转速水轮机起着重要的作用, 必须提高恢复系数。而低比转速混流式水轮机从保证水轮机效率的基础出发, 尾水管的作用不是很大, 恢复系数降低 10%, 效率才降低 0.1%, 这是微不足道的。

铁吾电站 HL220-WJ-71 水轮机为 中比转速水轮机, 因而其尾水管的重要性亦不可小觑, 其对效率的影响也是较为显著的。在低比转速机组中, 尾水管对水轮机效率的影响较小, 但是尾水管结构不良, 恢复系数低, 就没有被恢复利用的部分能量用来冲蚀破坏尾水管和制造运行噪音, 尤其是因为卧式机组尾水管

完全暴露于厂房内, 是机组一个重大的噪音来源。因此, 需要对卧式水轮机的尾水管进行改造研究。

1 几何建模以及网格划分

1.1 几何建模

由于研究是基于 CFD 全流道流场进行模拟, 因此必须对 HL220-WJ-71 机组进行全流道建模, 包括蜗壳、导叶、转轮、等截面无隔板尾水管(见图 1)和等截面有隔板尾水管(见图 2)。采用的三维造型软件是 Pro/e。

1.2 网格划分

在研究中采用的网格划分软件是 ICEM, 所有部件的网格质量均在 0.2 以上, 网格总数为 400 万。

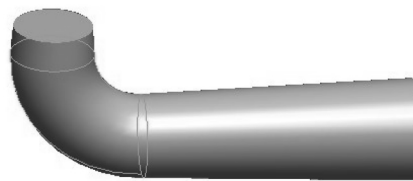


图 1 等截面无隔板尾水管

Fig. 1 Prismatic draft tube without clapboard

收稿日期: 2014-05-20; 修回日期: 2014-06-09.

作者简介: 敏政(1965-), 男, 青海同仁人, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为水力发电工程. E-mail: 13993162205@qq.com.

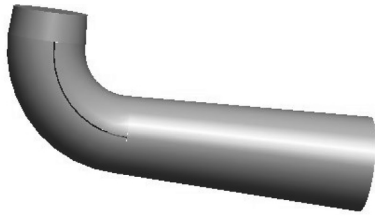


图 2 等截面有隔板尾水管

Fig. 2 Prismatic draft tube with clapboard

2 数值计算

2.1 水轮机内部流动的基本方程

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0, \quad (1)$$

动量方程为

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho F_b - \text{grad} p + \text{div}(2\mu S) - \frac{2}{3} \text{grad}(\mu \text{div} V), \quad (2)$$

能量方程为

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \text{div}(EV + pV - \tau V + Q) = \rho f V. \quad (3)$$

2.2 湍流模型及边界条件

我们计算的混流式水轮机是中比转速,旋转剪切流很小,强旋度出现的可能性不大,鉴于标准 $\kappa-\epsilon$ 稳定、经济且模型较为简单,研究采用标准 $\kappa-\epsilon$ 模型。根据电站所给的设计参数,研究进口边界条件采用速度进口,出口边界条件采用自由出流,壁面采用无滑移壁面。在用 CFD 技术模拟旋转机械内部流场时,转动部件和静止部件之间的数据的准确传递是保证计算正常的关键因素,因此要将两个交界面进行耦合。

3 尾水管的 CFD 分析

(1)等截面无隔板尾水管和有隔板尾水管在小流量工况下,流速为 3.5 m/s,导叶开度为 50%时,无、有隔板速度分布见图 3、图 4,流线图见图 5、图 6。

由图 3~图 6 可以看出,在两种尾水管的进口阶段,由于受到弯曲部分的影响,内侧水流的速度要大于外侧水流的速度,这种内侧高外侧低的速度分布容易造成外侧低速流动的滞流。而当水流经过弯管部分进入直扩散管后,内侧水流的速度急剧变小,相反,外侧水流的速度则缓慢变化,这种速度变化会造成直扩散管内的流动滞流以及微小的二次回流。但是比较两种尾水管可以看出,加上隔板以后,内侧高外侧低的速度分布以及直扩散管内的速度变化得到了明显的改善,因此能有效减少尾水管内的滞流现象以及二次回流现象。在无隔板尾水管中,从尾水管



图 3 等截面无隔板尾水管速度分布(导叶开度 50%)

Fig. 3 Velocity distribution in the prismatic draft tube without clapboard(gate opening 50%)

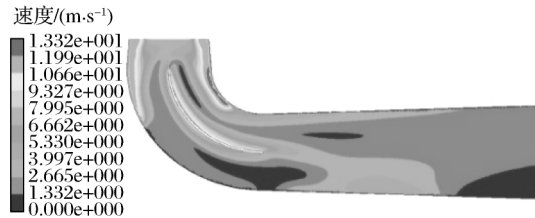


图 4 等截面有隔板尾水管速度分布(导叶开度 50%)

Fig. 4 Velocity distribution in the prismatic draft tube with clapboard(gate opening 50%)

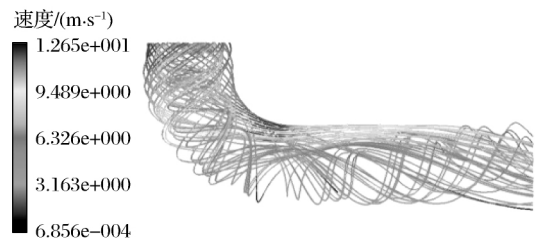


图 5 等截面无隔板尾水管流线(导叶开度 50%)

Fig. 5 Flow lines in prismatic draft tube without clapboard(gate opening 50%)

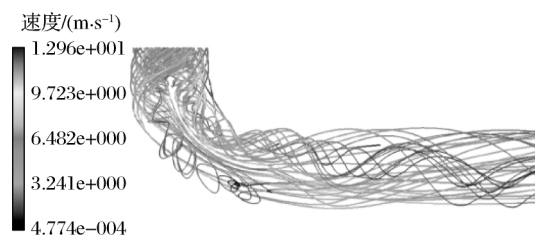


图 6 等截面有隔板尾水管流线(导叶开度 50%)

Fig. 6 Flow lines in prismatic draft tube with clapboard(gate opening 50%)

进口到出口流线非常紊乱,有明显的涡带,流线以曲线为主,这是因为尾水管进口速度正向圆周分量较高,环量较大。而在加上隔板之后,虽然流线整体上依然比较紊乱,但是进口处的涡带被隔板一分为二,分别在隔板两侧形成两个小涡带,水流在隔板后汇聚,涡带得到了明显的减弱,改善了水流流态。通过上述分析可以得出,在小流量工况下,尾水管加上隔

板以后,管内的流动状态得到了大幅改善,虽然隔板增加了摩擦损失,部分水流会与隔板相撞击,但是这些损失与增加隔板所提升的效率相比是微弱的^[3]。因此,在小流量下增加隔板能有效提升尾水管的恢复性能,也能使整个机组的效率有较大幅度地提升。

(2)等截面无隔板尾水管和有隔板尾水管在最优工况下,流速为 6.5 m/s,导叶开度为 80%时,无、有隔板速度分布见图 7、图 8,流线图见图 9、图 10。

由图 7~图 10 可以看出,在最优工况下,两种尾水管的速度分布沿径向变化很小,无隔板尾水管的速度分布比有隔板的要均匀一些。与小流量工况相比,最优工况下,两种尾水管进口部分出现的内侧速度高外侧速度低的现象有很大程度的减弱,因此滞流以及二次回流现象就不明显^[4]。无隔板尾水管弯管部分的上侧出现了局部高速,但是整体分布较



图 7 等截面无隔板尾水管速度分布(导叶开度 80%)
Fig. 7 Velocity distribution in the prismatic draft tube without clapboard(gate opening 80%)

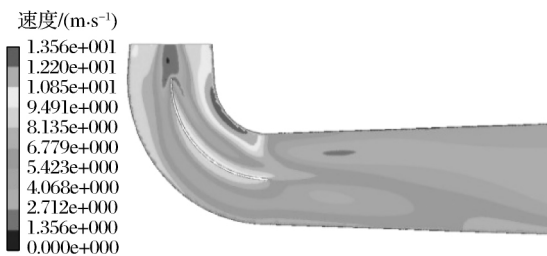


图 8 等截面有隔板尾水管速度分布(导叶开度 80%)
Fig. 8 Velocity distribution in the prismatic draft tube with clapboard(gate opening 80%)

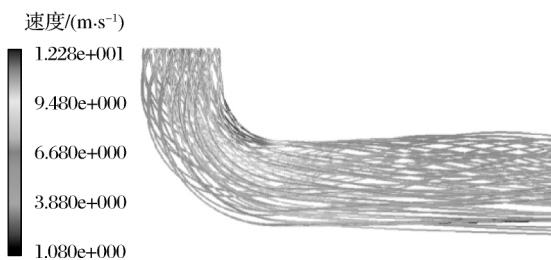


图 9 等截面无隔板尾水管流线(导叶开度 80%)
Fig. 9 Flow lines in prismatic draft tube without clapboard(gate opening 80%)

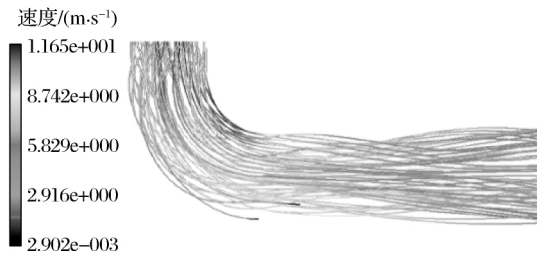


图 10 等截面有隔板尾水管流线(导叶开度 80%)
Fig. 10 Flow lines in prismatic draft tube with clapboard(gate opening 80%)

为均匀。加上隔板之后,弯管部分的局部高速并没有得到任何改善,反而使得管内的速度分布更加紊乱,但整体上两种尾水管的速度分布相同。无隔板尾水管从进口到出口,没有出现明显的涡带、横向流动以及回流现象,流线以直线为主,流态较为稳定,流线顺畅。加上隔板之后,在直锥段内流线基本垂直向下,但在经过弯管后,由于受到隔板的影响,在进入扩散段后,在管的上下侧形成了较小的涡带,使得扩散段内的流线出现了曲线,流态变得不稳定。随着流线的扭曲,必定会产生离心力。因此可以得出,在最优工况点附近,无隔板尾水管压力、速度分布较为均匀,管内流动稳定;相反,加上隔板之后,不仅没有改善管内流态,反而使得管内流动更加紊乱,加上隔板的摩擦损失和撞击,尾水管的恢复性能大大降低,也使得整个机组的效率有略微的降低。

(3)等截面无隔板尾水管和有隔板尾水管在大流量工况下,流速为 8.4 m/s,导叶开度 100%时,无、有隔板速度分布见图 11、图 12,流线图见图 13、图 14。

在大开度下,由于转轮的出口没有横向流动以及回流,而且有较大的径向速度,所以水流向尾水管的中心区域聚集,在尾水管进口阶段的中心流域出现了最大速度^[5]。但是比较两种尾水管后发现,加上隔板后,这种速度分布不仅没有改善,反而使尾水管进口阶段的高速区域增加。但是整体来看,两种尾水管的速度分布大致相同。由图 11~图 14 可以



图 11 等截面无隔板尾水管速度分布(导叶开度 100%)
Fig. 11 Velocity distribution in the prismatic draft tube without clapboard(gate opening 100%)

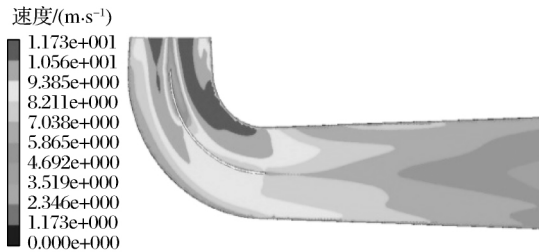


图 12 等截面有隔板尾水管速度分布(导叶开度 100%)

Fig. 12 Velocity distribution in the prismatic draft tube with clashboard(gate opening 100%)

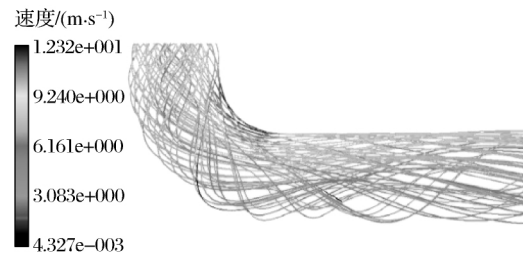


图 13 等截面无隔板尾水管流线(导叶开度 100%)

Fig. 13 Flow lines in prismatic draft tube without clashboard(gate opening 100%)

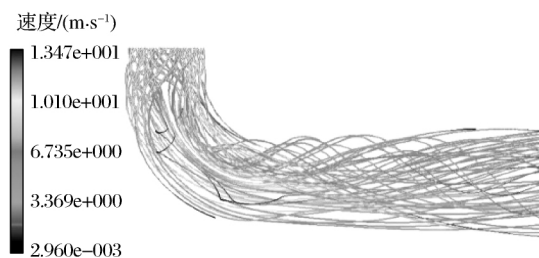


图 14 等截面有隔板尾水管流线(导叶开度 100%)

Fig. 14 Flow lines in prismatic draft tube with clashboard(gate opening 100%)

看出,在大开度下,无隔板尾水管的直锥段内有一较小的涡带,进入弯管后,在弯管的下部出现了明显的涡带而弯管的上部流动较为平稳。进入扩散段后,管的上侧流线以直线为主而下侧以曲线为主,水流流态基本稳定,流线较为顺畅^[6-8]。而加上隔板之后,直锥段内仍有较小的涡带伴随主流。在经过隔板之后,主流被隔板一分为二,隔板上方出现了明显的涡带而隔板下方只有微小的涡带。两部分带有涡带的水流在扩散段内汇聚后使得主流伴随明显的涡带,流线基本以曲线为主,流态虽然稳定,但是较无隔板的情况相比,流态变得紊乱,整体上看两种尾水管流态大致相同。因此可以得出,在大开度下,两种尾水管的速度、压力分布以及流线无明显差别。但是无隔板尾水管压力、速度分布较为均匀,管内流动基本稳定。相反,加上隔板之后,不仅没有改善管内

流态,反而使得管内流动更加紊乱,加上隔板的摩擦损失和撞击,使尾水管的恢复性能降低,也使得整个机组的效率有略微的降低。

4 结论

为了研究等截面尾水管在有、无隔板的情况下,涡带的破坏、机组的振动和噪声以及管内流动情况,对比两种尾水管的效率改善情况,如图 15 所示。

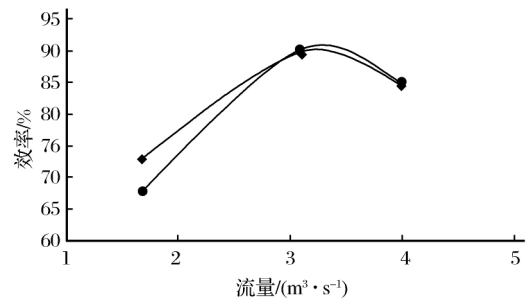


图 15 两种尾水管在不同工况下的效率对比

Fig. 15 Efficiency comparison for two kinds of draft tube in different conditions

HL220-WJ-71 型水轮机的尾水管采用的是等截面尾水管,为了避免在非最优工况时尾水管出现涡带,生产时在尾水管的中间加了隔板。研究对原型等截面尾水管以及加上隔板后的尾水管进行了验证:在小开度下,等截面尾水管加上隔板后,管内主流涡带受到了明显的破坏,管内流动状态有了明显的改变,改善了机组的振动和噪声。但由于隔板的存在,进入管内的水流撞击隔板导致水力损失并且对隔板造成破坏,使得机组在运行较长一段时间后,隔板被冲刷掉一部分。但整体来看,加上隔板不仅改善了管内流动状态,还使得整个机组的效率有了较大幅度的提升。由于电站在冬季处于枯水期,一般在小流量下运行,因此在枯水期可以采用有隔板尾水管,而且隔板的制作工艺较为简单且制作成本也较低,所以在小开度下使用不仅不会提高成本,还会使得电站的发电量有一定程度的提高,增加了水电站的效益。在最优开度以及大开度下,等截面无隔板尾水管内的流动稳定,流线较为顺畅,没有明显的涡带。所以加上隔板后没有起到改善流动状态以及减缓涡带的作用,反而增加了摩擦损失,使得整个机组的效率不升反降(最优开度下下降了 0.5%,大开度下下降了 0.4%),由于卧式机组尾水管的拆卸非常方便,铁吾电站可以制造等截面无隔板以及等(下转第 124 页)

evitable way of realizing the economic model of resource saving and environment friendly. The paper discussed a low-carbon background strategic industry selection evaluation system in Qingdao industrial. Combining with the actual situation and by analyzing the principle of selection of strategic industries to build strategic industries choosing evaluation, and from the perspective of low-carbon development, select relevant index evaluation of carbon emissions in order to build a strategic industry selection index system under conditions of low-carbon. Using the Weaver-Thomas model to analyze strategic industries selected under the traditional and low-carbon conditions. Finally, from the perspective of the overall development, the paper proposes the policy recommendations for strategic industries in Qingdao City.

Key words Low-carbon economy; Strategic industries; Weaver-Thomas model

(上接第 77 页)

截面有隔板两种尾水管,在枯水期使用等截面有隔板尾水管,在丰水期使用等截面无隔板尾水管。

参考文献:

- [1] 徐天茂. 水轮机尾水管的研究状况综述[J]. 云南工学院学报, 1991, 7(2): 95-101.
- [2] 逯鹏. 水轮机尾水管内部流态研究进展[J]. 企业科技与发展, 2009, 25(16): 63-65, 73.
- [3] 章登成. 弯肘型尾水管的改型设计对其回能系数影响的研究[D]. 南昌: 江西理工大学, 2011.
- [4] K. 阿卜杜拉赫扎德赫, 马元斑. 尾水管三维水流的计算机模拟[J]. 水利水电快报, 2003, 24(20): 30-31.
- [5] 张慧. 基于数值模拟的窄高型尾水管内部流动分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2012.
- [6] 于波. 弯肘型尾水管三维粘性流动计算与分析[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 39(2): 161-166.
- [7] 魏先导, 冯军, 陈华泉. 混流式水轮机窄高型尾水管的应用研究[J]. 武汉水利电力大学学报, 1993, 37(1): 1-8.
- [8] 王正伟, 周凌九, 黄源芳. 尾水管涡带引起的不稳定流动计算与分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 88(12): 1 647-1 650.

CFD-based Renovation for Horizontal Francis Turbine Draft Tube

Min Zheng, Yue Qiaoping, Liang Changping, Zhang Youliang

(School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract The prismatic draft tube is always used for horizontal Francis turbine, the clapboard is added to draft tube elbow segment by manufacturer to wreck draft tube vortex, reduce hydraulic loss and the draft tube vibration. However, due to the presence of the clapboard, it not only increases the friction losses, water also makes serious damage after collision bulkhead clapboard. Therefore, in order to verify the necessity of the existence of clapboard, in this paper, HL220-WJ-71 turbine set of Tiewu Power Station, Qinghai Province was taken as an example, numerically simulated the characteristic under 50%, 80%, 100% of the opening of prismatic draft tube with clapboard and without it, comparative analysis the efficiency and flow conditions of the two types of draft tube in different conditions, obtained clapboard in high flow conditions detrimental conclusions, provided reference and basis for the use of the same type of power plant draft tube.

Key words Horizontal francis turbine; Numerical simulation; Prismatic draft tube; Clapboard