

# 水轮机蜗壳的优化设计与CFD分析

王飞<sup>1</sup>,王庆方<sup>1</sup>,王勇军<sup>2</sup>,李征<sup>2</sup>,光斌<sup>2</sup>

(1. 国家泵类产品质量监督检验中心, 山东 淄博 255200; 2. 淄博市博山区产品质量监督检验所, 山东 淄博 255200)

**摘要:**采用变速度矩法进行水轮机蜗壳的水力设计,在此基础上以变速度矩系数为设计变量,以蜗壳水力损失最小为目标函数建立数学模型,应用混合惩罚函数法针对实例进行优化设计,采用CFD数值模拟计算,将优化设计结果与传统设计结果进行比较分析,结果表明:采用变速度矩法设计的蜗壳尾端压力和水流流速都分布均匀,水力损失小,性能优越。

**关键词:**水轮机;蜗壳水力损失;CFD分析;变速度矩法;优化设计

**中图分类号:**TK730.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**1006-7647(2012)05-0086-03

**Optimization design and CFD analysis of spiral cases of water turbines**//WANG Fei<sup>1</sup>, WANG Qingfang<sup>1</sup>, WANG Yongjun<sup>2</sup>, LI Zheng<sup>2</sup>, GUANG Bin<sup>2</sup> (1. National Pump Product Quality Supervision and Inspection Center, Zibo 255200, China; 2. Boshan District Product Quality Supervision and Inspection Institute of Zibo, Zibo 255200, China)

**Abstract:** The hydraulic design of spiral cases of water turbines is conducted by means of the variable velocity moment method. On such a basis, a mathematical model is established by considering the coefficient of variable velocity moment as the design variable and the least hydraulic losses of spiral cases as the objective function. The mixed penalty function method is employed for the optimization design of a case study, and it is numerically simulated by use of CFD technology. The optimization results are compared with the traditional design ones. A conclusion is drawn that the pressure on spiral cases and flow velocity are both uniformly distributed after designed by the variable velocity moment method. The hydraulic losses are small, and the hydraulic performance is superior.

**Key words:** water turbine; hydraulic loss of spiral case; CFD analysis; variable velocity moment; optimization design

蜗壳是水轮发电机组的重要组成部件,对整个机组的性能有着很大的影响。蜗壳是水轮机的第一个过流部件,主要作用是保证水流沿圆周均匀地进入导水机构,并且具有一定的速度矩<sup>[1]</sup>。近年来,伴随计算机技术和计算流体力学(CFD)的发展,一些三维黏性计算流体动力学软件已成功地应用于水轮机内部的流动特性分析<sup>[2]</sup>。本文是在计算流体力学的基础上,针对蜗壳速度矩函数进行优化设计,且取得了良好的效果。

## 1 水轮机蜗壳的变速度矩设计方法

水轮机蜗壳一般采用等周向平均速度法和等速度矩法进行水力设计。采用等周向平均速度法设计的蜗壳,尾部断面较宽,水力损失较小,但蜗壳出流角沿周向不等于常数,导水机构进口环量沿周向分布不均匀,因此固定导叶的叶型就必须不一样。采用等速度矩法设计的蜗壳特点刚好相反,出流均匀且轴对

称,但蜗壳尾部过流面积过小,水力损失较大。除此之外,还可采用周向平均速度递减法进行蜗壳的水力设计,该方法可进一步降低蜗壳尾部流速,水力损失更小,其缺点与等周向平均速度法相同。

对于大型混流式水轮机,为了改善蜗壳的水力性能,根据对蜗壳水力损失的分析,人们又提出了给定速度变化规律的设计方法,即变速度矩法,速度矩是关于包角的函数,这种方法更符合蜗壳中流体流动的实际情况<sup>[3]</sup>。

采用变速度矩法来进行蜗壳的水力设计,需进行以下几点假设:①参数 $\varphi_0$ ,  $r_d$ ,  $h_d$ 和 $b_0$ 已知。如图1所示, $\varphi_0$ 为蜗壳鼻端至进口断面的包角, $r_d$ 为固定导叶外切圆直径, $h_d$ 为蝶形边至导水机构水平中心线高度, $b_0$ 为固定导叶高度。②蜗壳内流动为平面定常流动。③蜗壳出流量周向均匀。

### 1.1 蜗壳中间圆断面几何尺寸的计算

因变速度矩法的速度矩沿周向分布不均匀,即

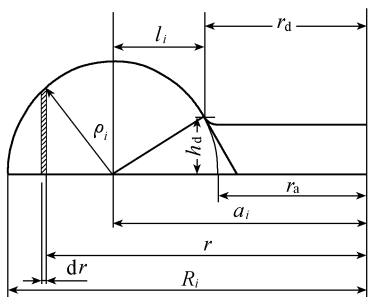


图1 蜗壳中间圆形断面

$v_u r = k(\varphi)$ ,  $v_u$  为蜗壳内任一质点的速度圆周分量,  $r$  为该质点到水轮机轴线的距离,  $\varphi$  为蜗壳断面周向位置角。在同一断面上速度矩为一常数, 故引入一系数:

$$\omega_i = \frac{k(\varphi_i)}{k(\varphi_0)} \quad (1)$$

式中:  $i$  为蜗壳断面编号。由文献[4]可知, 蜗壳系数  $C(\varphi_i) = \frac{720^\circ \pi k(\varphi_i)}{Q}$ , 进一步得到圆形断面各个几何尺寸表达式:

$$l_i = \frac{\varphi_i}{\omega_i C(\varphi_0)} + \sqrt{2r_d \frac{\varphi_i}{\omega_i C(\varphi_0)} - h_d^2} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \rho_i = \sqrt{l_i^2 + h_d^2} \\ a_i = r_d + l_i \\ R_i = a_i + \rho_i \end{cases} \quad (3)$$

$$C' = \frac{a_1 - \sqrt{a_1^2 - \rho_1^2}}{\varphi_0} \quad (4)$$

式中:  $\rho_i$  为蜗壳圆形断面半径;  $l_i$  为蝶形边到蜗壳断面中心的水平距离;  $a_i$  为蝶形边锥角顶点所在半径;  $R_i$  为蜗壳断面外径;  $C'$  为蜗壳常数;  $a_1$  为蜗壳进口断面中心线至机组轴线的距离;  $\rho_1$  为蜗壳进口断面半径。

## 1.2 蜗壳尾端椭圆形断面几何尺寸的计算

蜗壳的椭圆形断面如图2所示, 蜗壳临界角为  $\varphi_{ij}$ , 当  $\varphi_i < \varphi_{ij}$  时, 蜗壳的断面必须由圆形断面变成椭圆形断面以满足结构要求。

$$\varphi_{ij}/C' = r_d + h_d \tan \alpha - \sqrt{r_d^2 + 2r_d h_d \tan \alpha - h_d^2} \quad (5)$$

式中:  $\alpha$  为蝶形边锥角, 通常取  $55^\circ$ 。所以临界角  $\varphi_{ij}$  的大小只和  $C'$ ,  $r_d$  和  $h_d$  有关。

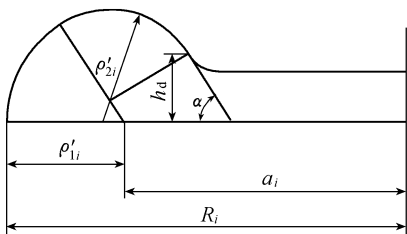


图2 蜗壳的椭圆形断面

椭圆形断面几何尺寸的计算公式为

$$\begin{cases} \rho_i = \frac{\varphi_i}{\omega_i C(\varphi_0)} \left( \frac{1}{\sin \alpha} + \sqrt{\cot^2 \alpha + 2(r_d - h_d \cot \alpha) \frac{\omega_i C(\varphi_0)}{\varphi_i}} \right) \\ A_i = \pi \rho_i^2 + \frac{h_d^2}{\tan \alpha} \\ \rho'_{2i} = \sqrt{1.045 A_i + 0.81 \frac{h_d}{\sin \alpha}} - 1.345 \frac{h_d}{\sin \alpha} \\ \rho'_{li} = \frac{h_d}{\sin \alpha} + 0.3 \rho'_{2i} \\ a_i = r_d - \frac{h_d}{\tan \alpha} + 1.221 \rho'_{2i} \\ R_i = a_i + \rho'_{li} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $A_i$  为蜗壳椭圆断面面积;  $\rho'_{li}$  为蜗壳椭圆断面长径;  $\rho'_{2i}$  为蜗壳椭圆断面短径。

## 2 优化的数学模型

### 2.1 设计变量

采用变速度矩法来设计蜗壳, 设计变量为  $v_u r = k(\varphi)$ 。为了方便计算, 本文取速度矩为周向位置的多项式, 即

$$k(\varphi_i) = \sum_{i=1}^n x_i \varphi_i^{n-1} \quad (7)$$

式中:  $n$  为蜗壳的断面数。故可用多项式中的系数  $x_i$  代替变速度矩函数  $v_u r = k(\varphi)$  来做设计变量。

### 2.2 目标函数

以蜗壳水力损失最小为目标函数, 蜗壳中的水力损失由进口直管段的沿程损失  $\Delta h_{w1}$ 、蜗形段的沿程损失与水流转弯损失  $\Delta h_{w2}$  以及水流流向座环时的局部收缩损失  $\Delta h_{w3}$  组成。  $\Delta h_{w1}$  仅与设计水头及直管长度有关,  $\Delta h_{w3}$  取决于水轮机的额定流量, 因此可以假定  $\Delta h_{w1}$  和  $\Delta h_{w3}$  是不可优化的固定损失。故本文以蜗形段的沿程损失与水流转弯损失  $\Delta h_{w2}$  为目标函数<sup>[5]</sup>:

$$\min f(x) = \Delta h_{w2} \quad (8)$$

其中

$$\Delta h_{w2} = \Delta h_{21} + \Delta h_{22}$$

式中:  $\Delta h_{21}$  为蜗形段的沿程损失;  $\Delta h_{22}$  为蜗形段的水流转弯损失。

由文献[4,6]知

$$\Delta h_{21} = \frac{\lambda C(\varphi_0)}{8 \pi g} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\omega_i \ln \left( \frac{R_i}{r_d} \right)}{\rho_i (R_i - r_d)} \varphi_i \Delta \varphi \right] \quad (9)$$

$$\Delta h_{22} = \frac{1}{\varphi_0} \sum_{i=1}^n \left[ 0.131 + 0.163 \left( \frac{D}{r} \right)_i^{3.5} \right] \frac{\bar{v}_i^2}{2g} \Delta \varphi \sqrt{\frac{\Delta \varphi}{90}} \quad (10)$$

式中: $\lambda$  为沿程摩擦损失系数; $l$  为进口直管长度; $D$  为进口直管直径; $\Delta\varphi$  为蜗壳微元包角; $\bar{v}_i^2$  为管内平均流。

2.3 约束条件

由经验知,为降低蜗壳尾部的水力损失,应减小其尾部流速,也就是要增加尾部的断面面积,由于蜗壳假设是均匀出流,所以蜗壳各断面径向速度分量 $v_r$ 相等。因此只有减小蜗壳尾部的速度矩,也就是减小周向速度分量 $v_\theta$ ,才能达到减小尾部流速的要求;为防止断面面积突然扩大而引起不必要的水力损失,必须保证蜗壳断面面积从进口到隔舌持续减小,也就是从进口到隔舌的速度矩必须单调递减,即 $k(\varphi)$ 单调递增,所以必须满足 $k'(\varphi) \geq 0$ 。隔舌处必须有速度矩且速度矩必须为正,以避免隔舌处出现回流现象,所以 $k(0) > 0$ 。进口速度系数一旦确定,则进口的几何参数及流动参数都相应确定,可确定进口的速度矩,因而不管速度矩的变化规律如何,其在进口处的值必须等于该值,即

$$k(\varphi_0) = \frac{QC(\varphi_0)}{720^\circ\pi} \tag{11}$$

3 实例计算

以 HL310 水轮机蜗壳为例,对上述优化模型进行验证,该水轮机的性能参数为:流量  $Q=6.86\text{ m}^3/\text{s}$ , 水头  $H=24\text{ m}$ 。

预先确定的设计参数:  $r_d=0.8\text{ m}$ ,  $h_d=0.28\text{ m}$ , 重力加速度  $g=9.81\text{ m/s}^2$ , 圆周率  $\pi=3.1416$ , 蜗壳包角  $\varphi_0=345^\circ$ , 断面包角  $\Delta\varphi=5^\circ$ 。

在对优化模型实施统一目标函数后选用混合惩罚函数法来求解,基于 Fortran 语言编写程序,计算得到以下数据<sup>[7-9]</sup>: 蜗壳的水力损失  $f(x) = 0.22640454$ ,  $x_1=0.6750$ ,  $x_2=1.5955$ 。

采用传统的等速度矩设计方法,可由公式(11)求得速度矩  $k(\varphi_0)=5.656$ , 即  $x_1=0$ ,  $x_2=5.656$ , 代人目标函数程序中计算得到蜗壳的断面几何尺寸<sup>[10]</sup>。对比两种方法得到的蜗壳型线如图 3 所示。

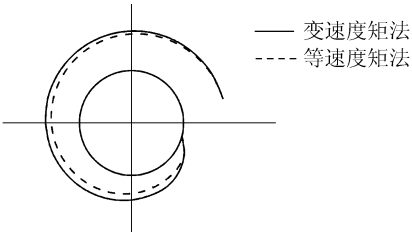


图 3 蜗壳型线比较图

对两种设计方法得出的蜗壳进行三维建模,采用 CFD 数值模拟<sup>[11-12]</sup> 计算对比两种蜗壳的优劣,结果如图 4 和图 5 所示。

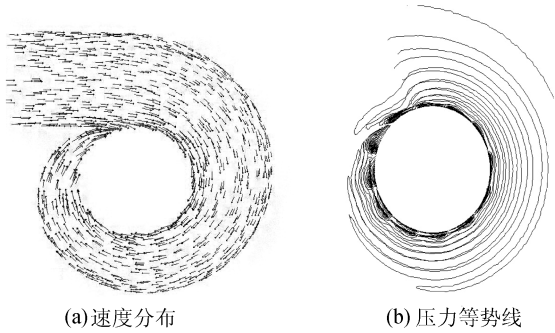


图 4 等速度矩法设计的蜗壳速度和压力

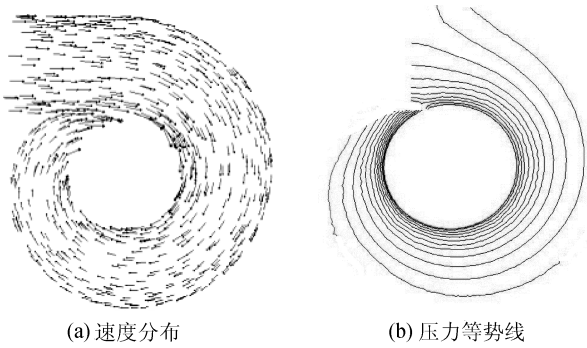


图 5 变速度矩法设计的蜗壳速度和压力

如图 5 所示,采用变速度矩法设计的蜗壳,蜗壳尾端压力分布均匀,流速均匀,且得出的计算结果表明采用此方法设计的蜗壳效率可达到 98%,水力损失明显下降。由此可见,应用变速度矩法设计的蜗壳能量损失明显低于采用等速度矩方法设计的蜗壳。

4 结 论

- a. 对水轮机蜗壳的水力设计进行分析,并在速度矩法的基础上建立了以蜗壳水力损失最小为目标函数的数学模型。
- b. 通过实例,应用 CFD 进行数值模拟计算,证明本文提出的优化方法和建立的数学模型合理可行,优化设计的蜗壳与传统方法所设计的蜗壳相比,可以明显降低水力损失。

参考文献:

[ 1 ] 曹鹏,姚志民. 水轮机原理及水力设计[M]. 北京:清华大学出版社,1991.  
[ 2 ] 刘胜柱,李任飞,罗兴琦. 椭圆型蜗壳设计与 CFD 分析[J]. 大电机技术,2003(5):33-35.  
[ 3 ] 郭奇胜,钱涵欣,林汝长. 水轮机蜗壳的水力设计方法[J]. 大电机技术,1998(5):37-40.  
[ 4 ] 李仁年,袁建平. 含沙水流条件下水轮机蜗壳优化设计方法[J]. 甘肃工业大学学报,1998,3(1):47-48.  
[ 5 ] 齐学义. 流体机械设计理论与方法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008.

(下转第 94 页)

- (2);259-261.
- [46] 刘冀,王本德. 基于组合权重的模糊可变模型及在防洪风险评价中应用[J]. 大连理工大学学报,2009,49(2):273-276.
- [47] LI Qiong,ZHOU Jianzhong,LIU Donghan,et al. Research on flood risk analysis and evaluation method based on variable fuzzy sets and information diffusion[J]. Safety Science,2012,50(5):1275-1283.
- [48] WANG X J,ZHAO R H,HAO Y W. Flood control operations based on the theory of variable fuzzy sets[J]. Water Resources Management,2011,25(3):777-792.
- [49] 张弛,宋绪美,李伟. 可变模糊评价法在洪涝灾情评价中的应用[J]. 自然灾害学报,2008,17(5):34-39.
- [50] 徐冬梅,陈守煜,邱林. 洪水灾害损失的可变模糊评价方法[J]. 自然灾害学报,2010,19(4):158-162.
- [51] 曹永强,伊吉美,罗麟,等. 可变模糊评价法在大连市干旱等级评定中的应用[J]. 水力发电,2010,36(4):14-16.
- [52] 徐冬梅,陈守煜,邱林. 基于可变模糊集理论的洪水分类研究[J]. 水电能源科学,2011,29(1):23-26.
- [53] 李敏,陈守煜. 基于可变模糊集理论的径流预报单要素近似推理法[J]. 大连理工大学学报,2008,48(4):587-590.
- [54] 李敏. 可变模糊近似推理方法在径流中长期预报中的应用[J]. 水电能源科学,2010,28(2):16-18.
- [55] 李敏,陈守煜. 径流中长期预报级别特征值特征展开模糊推理方法[J]. 大连理工大学学报,2010,50(4):576-579.
- [56] 徐晶,冀鸿兰,张宝森,等. 基于可变模糊综合分析的冰凌预测模型[J]. 水利水电科技进展,2011,31(3):6-9.
- [57] 陈守煜,柴春岭,苏艳娜. 可变模糊集方法及其在土地适宜性评价中的应用[J]. 农业工程学报,2007,23(3):95-97.
- [58] 苏艳娜,柴春岭,杨亚梅,等. 常熟市农业生态环境质量的可变模糊评价[J]. 农业工程学报,2007,23(11):245-248.
- [59] 费良军,谢志高,孙胜祥,等. 模糊可变模型在土地整理区农地可持续利用综合评价中的应用[J]. 沈阳农业大学学报,2009,40(1):70-75.
- [60] 赵然杭,刘晓丽. 模糊可变评价模型在山东省农村水利现代化水平评价中的应用[J]. 山东大学学报:工学版,2008,38(2):86-91.
- [61] 赵然杭,陈守煜. 模糊可变评价模型在评价农村水利现代化中的应用[J]. 水利学报,2008,39(2):218-222.
- [62] 曹永强,李香云,马静,等. 基于可变模糊算法的大连市农业干旱风险评价[J]. 资源科学,2011,33(5):983-988.
- [63] ZHANG Dan,WANG Guoli,ZHOU Huicheng. Assessment on agricultural drought risk based on variable fuzzy sets model[J]. Chinese Geographical Science,2011,21(2):167-175.

(收稿日期:2011-11-21 编辑:熊水斌)

(上接第88页)

- [6] 郭齐胜,钱涵欣等. 水轮机引水部件的水力损失模型[J]. 水利学报,1996(10):37-40.
- [7] 孙靖民,梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [8] 方世杰,綦耀光. 机械优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [9] 王飞. 高比转速混流式水轮机水力模型开发方案研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2011.
- [10] 齐学义,赵强,马惠萍,等. 全蜗壳的非圆形断面水力设计及其CFD分析验证[J]. 兰州理工大学学报,2009,35(2):41-45.
- [11] 王福军. 计算流体动力学分析:CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [12] 辛喆,张兰金,常近时. 混流式水轮机蜗壳与座环三维中湍流场的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展:A辑,2004(11):713-718.

(收稿日期:2012-02-13 编辑:周红梅)

## 《水资源保护》征订启事

中国科技核心期刊 RCCSE 核心期刊

《水资源保护》是河海大学和中国水利学会环境水利研究会共同主办的科学技术期刊,创刊于1985年,双月刊,国内外公开发行,国内统一连续出版物号:CN32-1356/TV。

《水资源保护》主要刊登与水资源保护有关的基础研究,应用技术,工程措施,综合述评,专题讲座,国外动态,书刊评介,科技简讯,水资源管理、评价、监测、优化配置,节水技术,水环境污染控制等方面的文章。近年来,重点关注与水有关的生态环境领域中的研究方向,新增设相关的基础研究、防治技术、城市水环境治理等内容。

主要读者对象:与水资源保护工作有关的工程技术人员、科研人员、管理人员以及大专院校的师生。

《水资源保护》邮发代号:28-298,双月刊,每期定价12元,全年共72元,逢单月出版。可在全国各地邮局订阅,也可直接与编辑部联系订阅。

地址:210098 南京市西康路1号 河海大学《水资源保护》编辑部

电话/传真:(025)83786642

E-mail:bh@hhu.edu.cn

http://kbb.hhu.edu.cn/web/indexbh.asp-d\_id=34