

水力机械固液两相流设计方法探讨

彭维明^① 陈家远

(四川联合大学)

程良骏 余波 曾庆川

(华中理工大学)

提 要 对水力机械中转轮叶片的磨蚀进行了简略的分析,并运用水力机械固液两相流动理论,探讨了含砂水中水力机械转轮叶片的设计方法,在一小电站的应用取得了较满意的效果,该文仅适用于稀疏颗粒的精形。

关键词 固液两相流 磨蚀 水轮机 泵

Design Method of Two-phase Flow in Hydraulic Machinery

Peng Weiming Chen Jiayuan

(Sichuan Union University)

Cheng Liangjun Yu Po Zeng Qinchuan

(Central China University of Science and Technology)

Abstract Analyzing the corrosion and wear in hydraulic machinery, this paper presents a new design method for hydraulic runner in sandy water. A good result is achieved when the approach is applied to a small water power station.

Key words Two-phase flow Corrosion and wear Water turbine Pump

1 引 言

在含砂介质中运行的水力机械的磨蚀问题十分严重,尤其在我国的黄河流域上表现得较为突出。为此,国内、外水机界学者进行了广泛的实验研究,取得了很大的成就。然而,要彻底解决水机的磨蚀问题,需研究水力机械中的多相流动理论。从目前发表的文献来看,大多以蔡保元教授的两相流设计理论^[1]作为指导。

2 含砂水中水力机械转(叶)轮的破坏浅析

从文献[2~5]的计算和实验知:颗粒偏向于转(叶)轮叶片的工作面。另外,从许多文献的实验中可以看出:在叶片的工作面出现了严重的鱼鳞和沟槽,故可认为转轮叶片的工作面在磨蚀中泥砂磨损占主导作用,而转轮叶片背面是低压区。且从文献[6]的计算结果可知:汽

收稿日期:1994-10-06 1995-05-17 修订

① 彭维明,博士,讲师,成都市 四川联合大学水利系水动室,610065

泡偏向转轮叶片的背面。因此,转(叶)轮叶片背面的破坏在磨蚀中汽蚀占主导作用。为此,我们水力设计的主要思想是:针对含砂水中的流场进行叶型设计,将设计出来的无厚度的叶片作为背面。然后,以背面为基准,根据颗粒的运动轨迹逐次替代加厚得到叶片工作面,使得型线与轨迹的误差尽量小。这样,可减少工作面的撞击磨蚀,使得磨损尽量为接触性磨损,而不致于产生破坏性的磨损,使得叶片工作面越磨越光。由于背面是按含砂流场设计的,可避免汽蚀,故可达到减少水力机械转轮叶片的磨蚀、增加转轮寿命的目的。关于计算颗粒的运动轨迹并连结成型面,可在有关文献中查阅。

3 稀疏颗粒下的固液两相流设计方法探讨

假定所研究的流场是轴对称的,且稀疏颗粒不破坏有势流场,因此,假定所研究的稀疏颗粒的流场为一个“理想的轴对称有势场。故由于水流含砂后,使得按清水流场设计的叶片所对应的流网就不适合含砂流场,应按含砂流场来设计叶片背面。

3.1 浓度沿准正交线的分布规律

设 ε 为轴面准正交线(含砂流场)与 Z 轴的夹角,则有:

$$\frac{dl}{dr} = \frac{1}{\sin\varepsilon} \quad \frac{dl}{dz} = \frac{1}{\cos\varepsilon}$$

为了便于研究,作如下基本假设:1)固液两相之间无质量交换;2)把固相看作“拟流体”;3)两相湿度相同;4)所有颗粒为尺寸相同的球粒。故,由在柱坐标下的连续方程,有

$$\frac{\partial(\alpha_i V_{ri})}{\partial r} + \frac{\partial(\alpha_i V_{zi})}{\partial z} + \frac{\alpha_i V_{ri}}{r} = 0 \quad (1)$$

式中 α_i 为浓度($i=s, f$)

故可得 $\alpha_i(l) = \alpha_{i0} \cdot e^{\int \delta_i dl}$ (2)

式中 $h_i = - (V_{ri}/r \cdot \sin\varepsilon \cdot \cos\varepsilon + \frac{\partial V_{ri}}{\partial l} \cdot \cos\varepsilon + \frac{\partial V_{zi}}{\partial l} \cdot \sin\varepsilon) / (V_{ri} \cdot \cos\varepsilon + V_{zi} \cdot \sin\varepsilon)$

式(2)便是浓度 α_i 沿准正交线的分布公式, α_{i0} 为(固、液)初始浓度分布。

3.2 轴面速度(固、液两相)沿准正交线的分布及流网校核式

为了建立轴面速度沿准正交线的速度梯度方程,如图1所示取坐标(本文以水轮机为例), β 为

轴面流线切线与 Z 轴的夹角, $\delta = \alpha - (\frac{\pi}{2} + \varepsilon)$

则有:
$$\begin{cases} V_{ri} = V_{mi} \cdot \sin\beta \\ V_{zi} = V_{mi} \cdot \cos\beta \end{cases} \quad (3)$$

及
$$\begin{cases} dr/dm = \sin\beta \\ dz/dm = \cos\beta \end{cases} \quad (4)$$

根据连续方程,考虑到有势流动时: $\text{rot } \vec{V}_i = 0$ (固、液两相近似认为满足),则有:

$$\frac{\partial V_{ri}}{\partial z} - \frac{\partial V_{zi}}{\partial r} = 0 \quad (5)$$

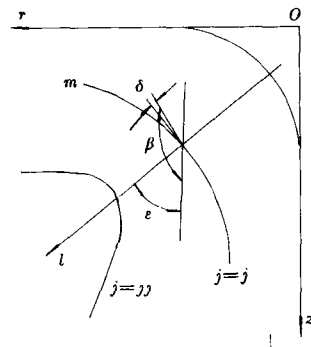


图1 水轮机转轮轴面图示^[8]

$$\text{又} \quad \frac{dV_{mi}}{dl} = \frac{\partial V_{mi}}{\partial r} \cdot \frac{dr}{dl} + \frac{\partial V_{mi}}{\partial z} \cdot \frac{dz}{dl} \quad (6)$$

则由(1)、(3)、(5)式,得:

$$\frac{dV_{mi}}{dl} = V_{mi} \left[-\frac{\partial \beta}{\partial r} \cdot \cos \varepsilon + \frac{\partial \beta}{\partial z} \cdot \sin \varepsilon + \left(\frac{\sin \beta}{r} + \frac{\partial \ln \alpha_i}{\partial r} \cdot \sin \beta + \frac{\partial \ln \alpha_i}{\partial z} \cdot \cos \beta \right) \cdot \sin \delta \right] \quad (7)$$

δ 为准正交线与轴面流线切线的夹角

$$\text{由} \quad \begin{cases} d\beta/dm = (\partial\beta/\partial r) \cdot \sin \beta + (\partial\beta/\partial z) \cdot \cos \beta \\ d\beta/dl = (\partial\beta/\partial r) \cdot \sin \varepsilon + (\partial\beta/\partial z) \cdot \cos \varepsilon \end{cases} \quad (8)$$

得:

$$\begin{cases} \partial\beta/\partial r = [(d\beta/dm) \cdot \cos \varepsilon - (d\beta/dl) \cdot \cos \beta] \cdot \frac{1}{\cos \delta} \\ \partial\beta/\partial z = [(-d\beta/dm) \sin \varepsilon + (d\beta/dl) \cdot \sin \beta] \cdot \frac{1}{\cos \delta} \end{cases} \quad (9)$$

同理可得:

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln \alpha_i}{\partial r} = \left(\frac{d \ln \alpha_i}{dm} \cos \varepsilon - \frac{d \ln \alpha_i}{dl} \cos \beta \right) \cdot \frac{1}{\cos \delta} \\ \frac{\partial \ln \alpha_i}{\partial z} = \left(-\frac{d \ln \alpha_i}{dm} \sin \varepsilon + \frac{d \ln \alpha_i}{dl} \sin \beta \right) \cdot \frac{1}{\cos \delta} \end{cases} \quad (10)$$

则有:

$$\frac{dV_{mi}}{dl} = V_{mi} \left[-\frac{d\beta}{dm} + \frac{d\beta}{dl} \cdot \sin \delta \right] \cdot \frac{1}{\cos \delta} + \left(\frac{\sin \beta}{r} + \frac{d \ln \alpha_i}{dm} \right) \cdot \sin \delta \quad (11)$$

$$\text{故} \quad V_{mi}(l) = V_{mhi} \cdot e^{\int_{l_h}^l P_i(l) dl} \quad (12)$$

式中 $V_{mhi} = V_{mi} |_{l=l_h}$, 按下式计算:

$$V_{mhi} = \frac{Q_i}{\int_{l_h}^{l_s} 2\pi r \cdot \alpha_r \cdot e^{\int_{l_h}^l P_i(l) dl} \cdot \cos \delta \cdot dl}$$

l_h, l_s 为上冠及下环处准正交线的长度。

$$P_i(l) = - (d\beta/dm + d\beta/dm \cdot \sin \delta) \cdot \frac{1}{\cos \delta} + \left(\frac{\sin \beta}{r} + \frac{d \ln \alpha_i}{dm} \right) \sin \delta \quad (13)$$

$$\text{流量校核式为:} \quad Q_j = \int_{l_h}^{l_s} 2\pi r \cdot \sum (\alpha_i \cdot \rho_i \cdot V_{mi}) \cdot \cos \beta \cdot dl$$

式中 j 为轴面流线的编号; 补充条件: $\alpha_j + \alpha_s = 1$

3.3 计算步骤

首先,在流网给定的条件下,式(13)中的 $\beta, \delta, d\beta/dl, d\beta/dm$ 均可用数值方法求解。因此,用清水流场的流网作为第一次的初始流网,这样,采用落后一次的方法,计算出 $\alpha_f^{(1)} \rightarrow \alpha_s^{(1)} \rightarrow V_{ms}^{(1)}, V_{mj}^{(1)} \rightarrow$ 修改流网 $\rightarrow \alpha_f^{(2)}, V_{mj}^{(2)} \rightarrow \alpha_s^{(2)}, V_{ms}^{(2)} \rightarrow \dots$, 最后, $Q_j^n - Q_j^{(n-1)} \leq \Delta?$ (Δ 为给定的精度),若成立,则得到含砂流场的流网。否则,根据流量偏差反插,修改流网,直到满足给定精度为止。

3.4 设计方法

在含砂流网计算出来之后,则我们所要设计的叶片必须适应此流场,以使叶片的能量转换(含砂粒的能量转换)最高、汽蚀性能最好,因此,采用积分叶片的一般积分方程,即:

$$\Delta m = \frac{V_m \cdot r^2}{\omega r^2 - V_n \cdot r} \cdot \Delta \theta \quad \text{式中 } V_m \text{ 近似用所计算微段的平均值来代替(固液两相), 把根据含砂流场所积分出的无厚度叶片型线作为叶片背面, 然后, 根据颗粒的运动轨迹, 对叶片以背面为基准向工作面加厚。通过本方法得到的水力机械转(叶)轮叶片, 其能量性能高, 汽蚀性能好, 且抗磨蚀能力最优, 因而, 可达到出力大、寿命长的目的。对泵而言, 可提高其效率, 减少能耗。}$$

4 应用

应用上述方法, 对一小电站进行了改造, 主要参数为: $Q=2.358 \text{ m}^3/\text{h}$, $b_0=0.23 \text{ m}$, $H=16 \text{ m}$, $\rho_s=2670 \text{ kg/m}^3$, $n=500 \text{ r/min}$, $D_1=600 \text{ mm}$, 实际出力在原基础上增加了近 100 kW 。改造前后, l_4 流面的对比如图 2、3 所示。

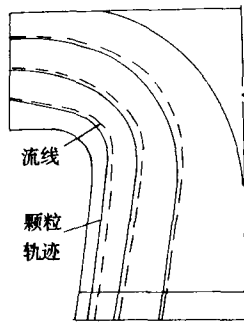


图 2 改造电站的轴面图

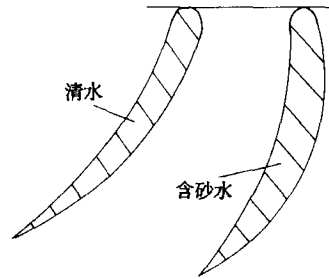


图 3 l_4 流面对比

目前, 该转轮叶片背面完好, 工作面磨得很光。故, 若在杂质泵的设计中采用本方法, 预计会带来满意的效果。

参 考 文 献

- 1 蔡保元. 离心泵的二相流理论及其设计原理. 科学通报, 1983(8)
- 2 赵敬亭, 赵振海. 离心泵流道中固体颗粒的运动. 水泵技术, 1990(1): 1~6
- 3 朱金曦, 赵敬亭. 叶轮内固体颗粒运动轨迹的计算. 水泵技术, 1989(2): 14~19
- 4 彭维明, 程良骏. 颗粒在水轮机转轮内的运动轨迹研究. 华中理工大学学报, 1993, 105(3): 160~166
- 5 吴培豪. 水力机械在含砂水流中破坏性质的讨论. 第十一次学术讨论会论文集, 山东长岛, 1993. 23~29
- 6 彭维明. 水轮机机械中的多相流动理论研究:[博士论文]. 武汉: 华中理工大学. 1993
- 7 Weiming Peng, Liang jun Cheng. On Design Method of Runner in Sandy Water. Cavi. and Multi. Flow Form of Fluids Eng. Div. of ASME, 1994
- 8 林汝长等. 水泵—水轮机的准三元流动计算. 水力发电学报, 1982(1)