[文章编号]1000-2782(1999) 04-0079-04

水轮机汽蚀系数的计算误差分析

甘雪峰[1],王培斌[1],武成烈[2]
(1.西北农业大学水利与建筑工程学院,陕西杨陵 712100)
(2.陕西省水利厅,西安 710003)

[摘 要] 利用水力学理论、汽蚀机理、水轮机叶片内水流各速度的矢量关系以及水轮机的运行工况,对各种不确切性假设带来的计算误差进行定量分析,并总结出各种计算误差的总误差趋势——目前的推导计算使汽蚀系数 σ值偏大。

[关键词] 水轮机;汽蚀系数;误差分析
[中图分类号] TV 734.737 [文献标识码] A

1 问题的提出

汽蚀破坏对水轮机极为不利,汽蚀发展到一定程度,导致水轮机出力和效率下降;汽蚀将引起水轮机过流部件,特别是转轮叶片的剥蚀和腐蚀,严重时会使叶片在较短时间内大面积蚀坏。此外,强烈的汽蚀会引起水轮机的有害噪音和整个机组的振动,致使水轮机不能安全运行。为了防止和减小汽蚀对水轮机的破坏和对运行带来的不良后果,人们采取了选择合理的水轮机安装高程的工程措施,而作为水轮机安装高程的选定依据——汽蚀系数 σ,在目前的推导计算与定义过程中,存在多处不确切性假设,因此,有必要对由此产生的计算误差进行定量分析。

2 σ计算误差分析

2.1 能量方程建立引起的 σ计算误差

在原推导公式中,对转轮叶片背面水流压力最低点 K与叶片出口点 2(图 1(*a*)),列出相对运动能量方程式[1,2]:

$$Z_K + \frac{P_K}{\gamma} + \frac{W_K^2}{2g} - \frac{U_K^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{W_2^2}{2g} - \frac{U_2^2}{2g} + h_{K-2} \tag{1}$$

由水力学理论知,K点断面与 2点断面绝对速度的能量方程为:

$$Z_K + \frac{P_K}{\gamma} + \frac{V_K^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_{K-2} \tag{2}$$

在原推导公式(1)中,用 $W^2 - U^2$ 代替 V^2。实际上,绝对速度 $\overline{V}$,圆周(牵连)速度 $\overline{U}$和相对速度 $\overline{W}$之间的关系为: $\overline{V} = \overline{W} + \overline{U}$(图 2)。只有当 $\alpha = 90°$时,才有 $V^2 = W^2 - U^2$的关系。

[收稿日期] 1999-03-09
[作者简介] 甘雪峰(1958-),男,讲师,博士研究生

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://w

一般情况下,绝对速度 $\overline{V}$,相对速度 $\overline{W}$,圆周速度 $\overline{U}$之间的代数关系式为

$$W^2 = U^2 + V^2 - 2UV\cos\alpha$$

即

$$V^2 = W^2 - U^2 + 2UV\cos\alpha \tag{3}$$

将(3)式对应的 V_K^2 与 V_2^2 代入(2)式得

$$Z_K + \frac{P_K}{\gamma} + \frac{W_K^2 - U_K^2 + 2U_K V_K \cos\alpha_K}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{W_2^2 - U_2^2 + 2U_2 V_2 \cos\alpha_2}{2g} + h_{K-2}$$

则

$$\frac{P_K}{\gamma} = (Z_2 - Z_K) + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{W_2^2 - W_K^2}{2g} + \frac{U_K^2 - U_2^2}{2g} + \frac{U_2 V_2 \cos\alpha_2 - U_K V_K \cos\alpha_K}{g} + h_{K-2} \tag{4}$$

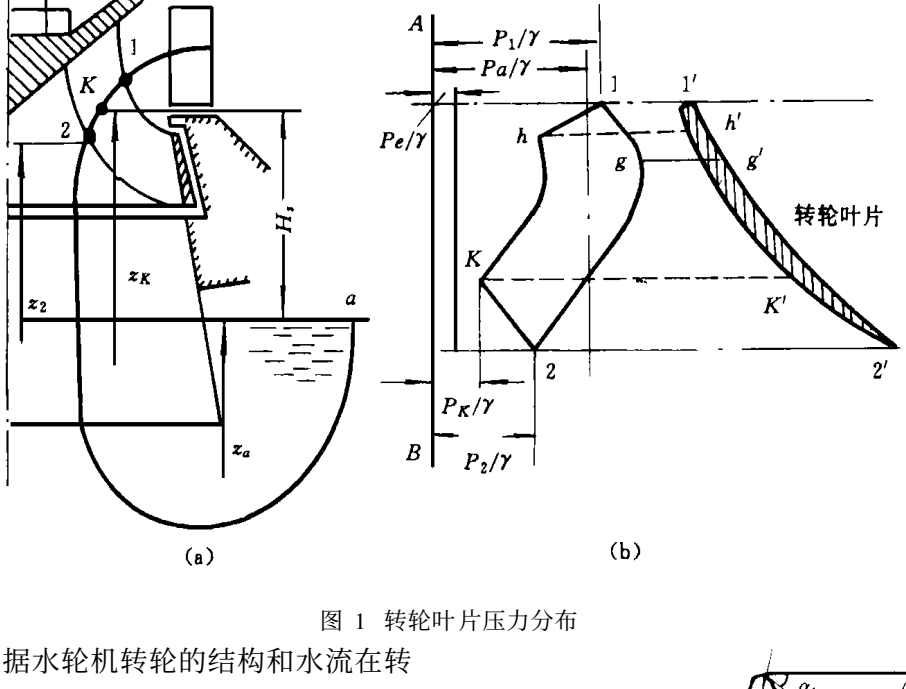

图 1 转轮叶片压力分布

根据水轮机转轮的结构和水流在转轮中的途径知: $R_K > R_2$(R_2: 水轮机转轮叶片出口处的旋转半径; R_K: 水轮机转轮叶片压力最低点 K处的旋转半径),所以 $U_K > U_2$;水流绝对速度的方向角 α,从叶片进口 $\alpha_1 < 90^\circ$的某一锐角到叶片出口是逐渐趋向 $\alpha_2 = 90^\circ$, K点在叶片进口 1到出口 2之间,所以 $\alpha_K < \alpha_2$;根据水轮机运行要求, V_2应略微正偏,即 $\alpha_2 \leqslant 90^\circ$,所以 $\cos\alpha_K > \cos\alpha_2$;转轮叶片沿水流质点运动途径的剖面在 K点处的厚度大于出口点 2处的厚度(图 1(*b*)),则 $W_K > W_2$,且 $\alpha_K < \alpha_2$,故 $V_K > V_2$. 由上述分析可知, $U_2V_2\cos\alpha_2 - U_KV_K\cos\alpha_K < 0$.

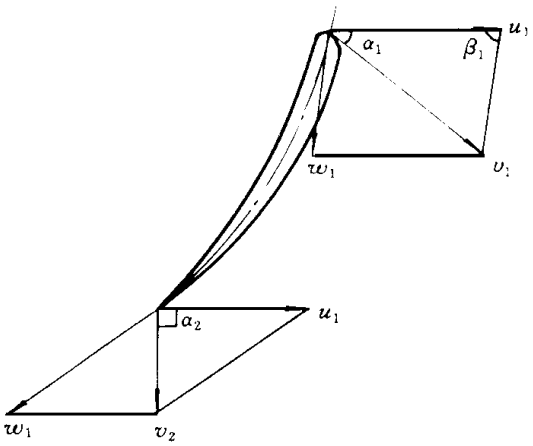

图 2 水轮机最优工况时叶片进出口流速三角形

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://w

对 (4)式和 (1)式进行比较,可以得出, K点的压力水头,用相对速度能量方程 (1),比用绝对速度能量方程 (2)计算其值增大了 $(U_K V_K \cos\alpha_K - U_2 V_2 \cos\alpha_2)/g$,这将导致汽蚀系数 σ 减小 $\frac{U_K V_K \cos\alpha_K - U_2 V_2 \cos\alpha_2}{gH} = \frac{U_K V_{UK} - U_2 V_{U2}}{gH} = \frac{n^C}{30} \cdot \frac{R_K V_{UK} - R_2 V_{U2}}{gH}$.

2.2　假定 $U_K = U_2$ 引起的 σ 计算误差

在原 e计算推导中,认为 K 点与 2点距离很近,假定 $U_K = U_2$,则 (1)式变为:

$$\frac{P_K}{\gamma} = (Z_2 - Z_K) + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{W_2^2 - W_K^2}{2g} + h_{K-2} \tag{5}$$

从汽蚀形成过程知,水在低压区汽化生成汽泡,汽泡随水流带到下游高压区破灭,对汽泡破灭处的过流表面产生汽蚀破坏,即水的汽化部位是在发生汽蚀位置的上游。叶型汽蚀是叶片背面出口处 2点,水汽化部位在压力最低的 K 点,也就是说 K 点到 2点是有一定距离的,即 $R_K > R_2$,所以 $U_K > U_2$. 假定 $U_K = U_2$,会引起 K 点压力水头 $\frac{P_K}{\gamma}$ 减小 $\frac{U_K^2 - U_2^2}{2g}$,将会引起 e的计算值增大 $(U_K^2 - U_2^2)/(2gH) = (n\pi/30)^2 (R_K^2 - R_2^2)/(2gH)$.

2.3　令 $h_{K-2} = 0$ 引起的 e计算误差

对转轮出口处 2点与下游尾水位 a点列能量方程得:

$$Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} = Z_a + \frac{P_a}{\gamma} + \frac{V_a^2}{2g} + h_{2-a}$$

因下游尾水渠水流速度很小,近似值为 $V_a = 0$,则上式变为:

$$\frac{P_2}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} - (Z_2 - Z_a) - \frac{V_2^2}{2g} + h_{2-a}$$

将上式代入 (5)式得: $\frac{P_K}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} - (Z_K - Z_a) - \frac{W_K^2 - W_2^2 + V_2^2}{2g} + h_{K-2} + h_{2-a}$

原推导计算认为 K点距 2点很近,忽略 h_{K-2} 不计,将上式简化为:

$$\frac{P_K}{\gamma} = \frac{P_a}{\gamma} - (Z_K - Z_a) - \frac{W_K^2 - W_2^2 + V_2^2}{2g} + h_{2-a} \tag{6}$$

由 2.2分析知, K点到 2点 (图 1(*a*))为叶型汽蚀关键部位,水流在此间经 2次汽—— 液态相变,尤其在汽蚀发生后,叶片表面粗糙,水流流态紊乱,此间的水力损失会进一步加大,所以,忽略水头损失 h_{K-2} 会引起汽蚀系数 σ 计算值增大 h_{K-2}/H.在最优工况下, $\eta = \eta_s \eta_\sigma \eta_j = 95\%$ 左右,按 3个分效率等值计算,则 $\eta_s > 98\%$,就是说水力摩阻造成的水头损失值不足 0.02 H,所以忽略 h_{K-2} 将引起汽蚀系数 σ 增大约 0.02.

2.4　η_d 的取值引起的 σ 计算误差

利用能量方程求得尾水管的动能利用系数为[3]:

$$Z_d = \frac{V_2^2/(2g) - (V_5^2/(2g) + h_{2-5})}{V_2^2/(2g)} \tag{7}$$

对尾水管出口断面与下游尾水位 a断面列能量方程求得:

$$V_5^2/(2g) = V_a^2/(2g) + h_{5-a}$$

将上式代入 (7)式得　　$\eta_d = \frac{V_2^2/(2g) - (V_a^2/(2g) + h_{2-a})}{V_2^2/(2g)}$ (8)

而原推导计算中令　　$\eta_d = \frac{V_2^2/(2g) - h_{2-a}}{V_2^2/(2g)}$ (9)

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://w

将(8)式值代入(6)式得 $\frac{P_K}{\gamma}=\frac{P_a}{\gamma}-(Z_K-Z_a)-\frac{W_K^2-W_{2'}^2+\eta_d V_{2'}^2+V_a^2}{2g}$

K点的真空值为 $H_V=\frac{P_a}{\gamma}-\frac{P_K}{\gamma}=H_s+\frac{W_K^2-W_{2'}^2+\eta_d V_{2'}^2+V_a^2}{2g}$

相应汽蚀系数为 $\sigma=\frac{h_B}{H}=(W_K^2-W_{2'}^2+\eta_d V_{2'}^2+V_a^2)/(2gH)$ (10)

以(9)式的值代入(6)式得 $\frac{P_K}{\gamma}=\frac{P_a}{\gamma}-(Z_K-Z_a)-\frac{W_K^2-W_{2'}^2+\eta_d V_{2'}^2}{2g}$

相应的汽蚀系数为 $\sigma=(W_K^2-W_{2'}^2+\eta_d V_{2'}^2)/(2gH)$ (11)

由(10)式和(11)式相比可知,原推导汽蚀系数计算值将小于用能量方程推导的尾水管动能利用系数 η_d 所对应的汽蚀系数值,其差值为 $V_a^2/(2gH)$.尾水渠的水流速度 V_a 很小,一般在 $2\ m\cdot s^{-1}$ 左右,所以 $V_a^2/(2gH)\approx 0.2/H$.

3 讨 论

从以上分析可知,原推导计算在 2.1中使汽蚀系数 σ 值减小 $(U_K V_{UK}-U_2 V_{U2})/(gH)$,在 2.2中使 σ 值增大 $(U_K^2-U_2^2)/(2gH)$,在 2.3中按设计工况分效率等值分析[2],σ 的计算值增大 0.02左右,在 2.4中使 σ 的计算值减小 0.2/H左右。水电站引用水头多在几十米至一百多米,2.3与 2.4的 σ 计算误差值相比将引起 σ 的增大。水轮机转轮叶片为流线形扭曲面,K点距 2点的距离较近,所以 α_K 略小于 α_2.在设计工况下,α_2 约为 90°,所以 $R_K V_{UK}-R_2 V_{U2}$ 的差值必然小于 $R_K^2-R_2^2$ 的差值,即 $(c_n/30)^2(R_K^2-R_2^2)/(2gH)$ 必然大于 $c_n(R_K V_{UK}-R_2 V_{U2})/(30gH)$,即 2.1与 2.2的 σ 计算误差值相比将引起 σ 的增大。所以原推导计算总的误差趋势是引起汽蚀系数 σ 的计算值增大了。

[参考文献]

[1] 华东水利学院,华北水利水电学院.水电站[M].北京:水利出版社,1982.
[2] 武汉水利电力学院.水轮机(上册)[M].北京:电力工业出版社,1980.
[3] 天津电传动设计研究所.水轮机设计与计算[M].北京:科学出版社,1971.

An Analysis of Error in the Calculafion of Cavitation Coefficient of Water Turbine

GAN Xue-feng[1], **WANG Pei-bing**[1], **WU Cheng-lie**[2]

(1. *College of water Canserancy and Architectural Engineering, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi* 712100, *China*)

(2. *Hydroelectric Office of Shaanxi Prorincial Hydraulic Departwent, Xi'an, Shaanxi* 710003, *China*)

Abstract Using hydraulics theory, mechanism of cavitation produced by turbine blade, vector relationship among various stream velocity in turbine blade and operation of water turbine. The calculation error from inexact hypotheses is quantitatively analysed. The general calculation error of cavitation coefficient e is tending to increase at present.

Key words water turbine; cavitation coefficient; error analysis

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://w