

## 三峡水轮机转轮中三维空化流动的 解析理论与方法<sup>①</sup>

常近时<sup>②</sup>

任 静

(中国农业大学水利与土木工程学院) (清华大学)

**摘 要** 为了提高三峡水电站水轮机的空化性能,提出了水轮机转轮三维空化流场的分析理论与方法。通过数值模拟首次实现了混流式水轮机转轮内三维空化流场和叶片上三维空穴区域的预测。将流面  $S_1$  保角变换成圆柱或环列翼栅,用非线性贴体面元奇点法解映射二维平面上翼栅的空化流动。采用流线曲率法计算有厚叶片  $S_2$  流面的流动。对流面  $S_1$  与  $S_2$  空化流解进行迭代计算,以最终确定转轮中三维空化流场。计算结果表明它适用于任何一种型的反击式水轮机转轮中的三维空化流场分析。给出了三峡水电站水轮机转轮空化流场预测的结果。

**关键词** 三峡; 水轮机; 空化流动; 解析

**中图分类号** TK 730.2

## Analytic Theory and Method of 3D Cavitation Flow Field in Hydraulic Turbine Runner of Three Gorges Power Station

Chang Jinshi

Ren Jing

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, CAU) (Tsinghua University)

**Abstract** For the improvement of turbine cavitating performance of the Three Gorges Power Station, an analytic theory and method of 3D cavitation flow in the hydraulic turbine runner are established. The 3D cavitation flow field in the turbine runner and 3D cavity region on the blade are predicted by the numerical simulation firstly. The flow surface  $S_1$  is transformed by the conformal picture to the cylindrical or annular cascade and cavitation flow on the picture plane cascade is solved by the non-linear surface panel singularity method. The flow field in the  $S_2$  surface with thick blades is calculated by stream line curvature method. Iteration between solutions of  $S_1$  and  $S_2$  is accomplished in order to determine 3D cavitation flow field in the runner. The calculating results show that the present method is possible for the analyses of 3D cavitation flow field of all types of the reactive turbine runner. The predicting results of cavitation flow in turbine runner of Three Gorges P. S. are given.

**Key words** Three Gorges; hydraulic turbine; cavitation flow; analyse

水轮机转轮是水电站水力机组能量转化的主要部件。转轮的空化性能直接影响水轮机与水电站的运行质量和大修周期。特别是对于大型例如单机功率与尺寸均属世界第一的长江三

收稿日期:1997-11-12

①国家自然科学基金资助重大项目

②常近时,北京清华东路17号 中国农业大学(东校区)196信箱,100083

峡水轮机,研究并改善转轮的空化性能,具有重大的技术经济意义<sup>[1,2]</sup>。

以往,国内外研究水轮机空化性能的主要工作是通过模型转轮的空化内、外特性试验,来确定水轮机的空化系数。而传统的水轮机转轮水动力学正、反命题解法,均不涉及空化现象对流场的影响,即使以改进水轮机空化性能为目标的水动力学计算也是如此,因而计算结果与实际不符。水轮机运行过程中工况多变,发生空化难以避免。空穴的存在将改变流场的压力和流速分布,从而改变转轮的动力性能,并造成空蚀。因此,研究并确定伴有空化的转轮中的流场特性,是全面提高水轮机性能指标,优化水轮机设计的重要方面;而首要的是建立一种有效的转轮三维空化流场的分析理论与实用解法,用以确定转轮中空化发生的条件、发生部位和空穴尺寸等,为改进转轮叶片的几何形状和优化设计参数提供重要依据<sup>[1,2]</sup>。

笔者以三峡水轮机优化设计为目标,提出一种水轮机转轮中三维空化流场的解析理论与方法。它不仅适用于三峡水轮机,也通用于所有反击式水轮机。

## 1 三峡水轮机空化性能的研究重点

经过10年的可行性研究和技术可行性论证,最终确定三峡水电站装机26台,左岸置14台,右岸置12台,总装机功率1820万kW,单机功率70万kW。上游水库正常高水位175m,水轮机设计水头 $H_r=80.6$ m,最大水头 $H_{max}=113$ m,最小水头 $H_{min}=61$ m。水轮机额定转速 $75\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,转轮直径 $D_1=9.7$ m,吸出高度 $H_s<-5$ m,空化系数 $\sigma\approx 0.186$ ,水轮机总质量约3500t<sup>①,②</sup>。

考虑到三峡水轮机功率与尺寸巨大,设计工况比转数 $n_{sr}>250\text{ m}\cdot\text{kW}$ ,运行水头变幅 $H_{max}/H_{min}$ 达1.852,转轮出口相对流速约 $40\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 等因素,水轮机除必须满足很高的能量转化效益外,还必须满足具备良好的稳定性与空化性能的设计要求。任何一个国内外厂家均没有制造过如此巨大且运行条件严酷的混流式水轮机,必须开展深入的科学研究。

从改善三峡超大型水轮机空化性能考虑,仅靠传统的模型水轮机空化内、外特性试验来确定真机的空化系数是不够的,在设计时必须重点地针对变工况进行转轮中空化流场的分析,以便从改善空化性能的角度确定转轮叶片的合理型线。

三峡水轮机比转数相对较高,转轮空化与空蚀易发生在靠下环的叶片背面,这里应是决定空化性能好坏与流动分析的重要区域。

三峡水电站水头变幅过大,对于转轮叶片不可调的混流式水轮机,要使所有流面翼栅都能适应这种情况,在设计上存在相当的难度。特别在靠近下环的诸流面翼栅,由于具有很高的进、出口相对流速,有可能在高水头运行时出现转轮与尾水管严重的空化与空蚀,并诱发机组的强烈振动。笔者的经验表明,改进靠下环诸流面翼栅的进口安放角和翼型头部的几何形状,可以显著改善水轮机的空化性能<sup>[3,4]</sup>。

## 2 求解三峡水轮机三维空化流动的思路

基于射流理论的二维空化绕流的古典解法,早在50年前就已出现,它归结于求解描述势

①东方电机股份有限公司. 三峡工程700MW水轮发电机组方案设计资料. 1995

②长江水利委员会机电设计处. 三峡水轮机主要参数选择和结构初步研究. 1991

流的某一解析函数的非线性问题<sup>[1]</sup>。为了简化求解过程,对于单绕流体和翼栅空化绕流,线性理论解法在很长时期内得到广泛应用。只是到了80年代初,二维翼栅空化绕流的非线性理论解法才得以建立,并获得了与实验相近的计算结果<sup>[5]</sup>。

长期以来,国内外水轮机与叶片泵领域均缺少转轮三维空化流场的具体解法。文献[4,6]首次仅对轴流式水力机械转轮三维空化流场解析做了初步尝试,并将它应用于大型水轮机上。本文工作则是对该文献思路的进一步发展,建立并提出了主要针对混流式水轮机转轮三维空化流场的分析理论与具体的工程实用方法;对由三峡水电站水力参数所确定的若干个水轮机转轮初步方案做了计算;有的还同试验结果作了比较,确认所建立的计算方法的正确性和实用价值。

研究工作的主要内容包括:改进原有直列厚翼栅空化绕流非线性理论面元奇点解法;建立环列厚翼栅空化绕流非线性理论面元奇点解法;采用 $S_1$ 和 $S_2$ 相对流面迭代法,逐次逼近转轮三维空化流场解;为了提高计算精度,根据轴面流线倾角大小,将转轮叶间流面 $S_1$ 所截空间翼栅的空化流保角变换成直列或环列厚翼栅空化绕流进行计算;在模型水轮机空化试验台上做空化内、外特性试验,并与计算结果作比较;最后,将该方法用于三峡型水轮机转轮三维空化流场的计算。

### 3 流面 $S_1$ 解析

流面 $S_1$ 的基本方程<sup>[1]</sup>为

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 \psi'}{\partial m^2} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial \ln b}{\partial \theta} \frac{\partial \psi'}{\partial \theta} + \left[ \frac{\sin \alpha}{r} - \frac{\partial \ln b}{\partial m} \right] \frac{\partial \psi'}{\partial m} = -2b\omega \sin \alpha$$

式中: $\psi'$ 为流函数; $b$ 为流层厚度; $m$ 为轴面流线坐标; $\theta$ 为幅角; $r$ 为半径; $\alpha$ 为轴面流线倾角; $\omega$ 为角速度。

假定流面 $S_1$ 上流层厚度 $b$ 为常数,利用普拉舍变换,可将流面 $S_1$ 翼栅流变换成二维环列厚翼栅流,其基本方程为

$$\frac{1}{R_1^2} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial \varphi_1^2} + \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial R_1^2} + \frac{1}{R_1} \frac{\partial \psi_1}{\partial R_1} = -2\omega \sin \alpha \left( \frac{r}{E_1 R_1} \right)^2 \quad (1)$$

式中: $R_1$ 为环列翼栅的径向坐标; $\varphi_1$ 为幅角; $\psi_1$ 为流函数; $E_1$ 为变换平面与物理流面的幅角比。

同理,也可将流面 $S_1$ 翼栅流变换成二维圆柱翼栅流,相应的基本方程为

$$\frac{1}{R_2^2} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial \varphi_2^2} + \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial z^2} + \frac{1}{R_2} \frac{\partial \psi_2}{\partial z} = -2\omega \sin \alpha \left( \frac{r}{E_2 R_2} \right)^2 \quad (2)$$

式中: $R_2$ 为圆柱翼栅径向坐标; $\varphi_2$ 为幅角; $\psi_2$ 为相应的流函数; $E_2$ 为变换柱面与物理流面的幅角比。

式(1)和(2)均为泊桑方程,它的解由零解与特解组成。假定流经旋转翼栅的相对流动为理想、不可压缩的稳定流,绝对运动有势。根据奇点法原理,可把翼栅中翼型围线分成相当数量的 $n$ 个贴体面元,其上可分布若干种由点涡与面源(汇)匹配的奇点系,以替代翼型和翼栅影响,它们均能满足拉氏方程,即为泊桑方程的零解。给定角速度 $\omega$ 、翼栅进口速度环量 $\Gamma_0$ 和流量 $Q_0$ 等基本条件所确定的轴对称流动则为泊桑方程的特解。

面元上奇点分布的匹配采用3种形式:等源强与不等涡强奇点系;不等源强与等涡强奇点系;仅不等涡奇点系<sup>[7]</sup>。数值计算实践表明,无论对于圆柱厚翼栅还是对于环列厚翼栅,最后一种奇点系具有良好的计算稳定性和合理性<sup>[8,9]</sup>。

当采用不等涡强奇点系时,根据空化流动下空穴与固体壁面组成的复合体的切向条件和流场中轴对称流与厚翼上分布奇点系感生的速度相叠加的原理,可列出如下基本方程<sup>[9]</sup>:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{j=0}^{n-1} \Gamma_j E(i, j) &= - \left( \frac{\Gamma_c}{2\pi R_i} - \omega R_i \right) \cos \theta_i - \frac{Q_c}{2\pi} \sin \theta_i, & [i=0 \sim n_i, (n_m+1) \sim (n-1)] \\ \sum_{j=0}^{n-1} \Gamma_j F(i, j) - v_c &= - \left( \frac{\Gamma_c}{2\pi R_i} - \omega R_i \right) \cos \delta_i - \frac{Q_c}{2\pi R_i} \sin \delta_i, & (i=n_i \sim n_m) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $\Gamma_j$  为点涡环量;  $\theta_i, \delta_i$  分别为面元的切向和法向与径向的夹角;  $R_i$  为半径;  $n_i$  为空穴起点;  $n_m$  为空穴尾部点;  $v_c$  为空穴表面的速度常数;  $E(i, j)$  和  $F(i, j)$  分别为结合系数, 它们由下式表示:

$$E(i, j) = \frac{z}{2\pi R} (F_1 \cos \theta_i - F_2 \sin \theta_i)$$

$$F(i, j) = \frac{z}{2\pi R} (F_1 \cos \delta_i - F_2 \sin \delta_i)$$

式中:  $z$  为叶片数;  $F_1, F_2$  为与奇点所在点与讨论点位置有关的系数。对于环列翼栅有

$$F_1 = \frac{z}{2\pi R} \frac{\left(\frac{R}{R_j}\right)^z - \cos z(\varphi - \varphi_j)}{\left(\frac{R}{R_j}\right)^z + \left(\frac{R}{R_j}\right)^{-z} - 2\cos z(\varphi - \varphi_j)}$$

$$F_2 = \frac{z}{2\pi R} \frac{\sin z(\varphi - \varphi_j)}{\left(\frac{R}{R_j}\right)^z + \left(\frac{R}{R_j}\right)^{-z} - 2\cos z(\varphi - \varphi_j)}$$

式中:  $R_j, \varphi_j$  分别为环列翼栅中基本翼型围线上点涡所在点的径向与幅角坐标;  $R, \varphi$  分别为面元上讨论点的径向与幅角坐标。对于直列(圆柱)翼栅有

$$F_1 = \left(\frac{1}{2t}\right) \frac{\sinh \frac{2\pi}{t}(x - x_0)}{\cosh \frac{2\pi}{t}(x - x_0) - \cos \frac{2\pi}{t}(y - y_0)}$$

$$F_2 = \left(\frac{1}{2t}\right) \frac{\sin \frac{2\pi}{t}(y - y_0)}{\cosh \frac{2\pi}{t}(x - x_0) - \cos \frac{2\pi}{t}(y - y_0)}$$

式中:  $t$  为栅距;  $x$  和  $y$  为点涡所在点坐标;  $x_0$  和  $y_0$  为面元讨论点坐标。

将流面  $S_1$  保角变换成二维厚翼栅后, 先进行无空化绕流计算, 根据其结果判断是否发生空化。如发生空化, 则利用式(3)先以最低压力点作为空穴起点进行空化流动解析, 经反复迭代和调整空穴位置与形状, 直到使2次计算结果相近为止; 然后将二维翼栅中求得的相对流速  $\omega$ 、压力  $p$  以及空穴厚度与长度等换算到物理流面  $S_1$  中去, 获得流面  $S_1$  空化流场的计算结果。

## 4 流面 $S_2$ 解析

考虑到叶片厚度和空穴厚度的影响,在进行转轮内三维空化流场分析时,宜将流面  $S_2$  定义为中间吸力面  $S_{2s}$  与中间压力面  $S_{2p}$ ,计算时分别取用各自的几何参数和动力学参数。

根据流线分析法,流面  $S_2$  沿准正交线  $q$  的相对速度梯度方程<sup>[1]</sup>为

$$\frac{dw}{dq} = wA + B + \frac{C+D}{w} \quad (4)$$

式中

$$A = \left( \frac{\cos^2 \beta \cos \alpha}{r_c} - \frac{\sin^2 \beta}{r} \right) \frac{dr}{dq} - \left( \frac{\cos^2 \beta \sin \alpha}{r_c} \right) \frac{dz}{dq} - K_{pt} (\cos \beta \sin \beta \sin \alpha) \frac{d\theta}{dq}$$

$$B = K_{pt} \left[ \left( \cos \beta \sin \alpha \frac{dw_m}{dm} - 2\omega \sin \beta \right) \frac{dr}{dq} + \left( \cos \beta \cos \alpha \frac{dw_m}{dm} \right) \frac{dz}{dq} + r \cos \beta \left( \frac{dw_u}{dm} + 2\omega \sin \alpha \right) \frac{d\theta}{dq} \right]$$

$$C = g \frac{dE_1}{dq} - \omega \frac{dK_1}{dq}$$

$$D = B_b (r^2 \omega - K_1 - w r \sin \beta) \frac{d\eta}{dq} - \omega (1 - A_s) \left( 2r\omega \frac{dr}{dq} + r \frac{dw_u}{dq} - \frac{dK_1}{dq} - \frac{dr}{dq} \omega \sin \beta \right)$$

式中:  $K_{pt}$  为系数,对于水轮机工况等于  $-1$ ;  $A_s$  为水轮机效率  $\eta_T$  的倒数;  $B_b = -1/\eta_T^2$ ;  $\beta$  为水流角;  $E_1, K_1$  分别为转轮进口比能与速度矩;  $r_c$  为轴面流线曲率半径;  $g$  为重力加速度;  $w, w_u$  和  $w_m$  分别为相对流速及其圆周分量与轴面分量。

有关流面  $S_2$  相对速度梯度方程式(4)的解法,在文献[1]中已有详细论述,这里从略。

## 5 流面 $S_1$ 与 $S_2$ 的迭代计算

水轮机转轮三维空化流场解是以流面  $S_1$  与  $S_2$  准三维迭代解来逼近的。这 2 类流面迭代计算的过程大体如文献[1]所述。根据流面  $S_2$  解析结果,即式(4)解的结果,在满足总流量和分管流量的给定值的条件下,修改轴面流线后形成新的  $S_1$  流面群,并重新对流面  $S_1$  采用贴体面元奇点法求解空化流动。流面  $S_1$  与  $S_2$  在具有空穴的条件下,反复迭代,直到新旧流线位置之差满足精度条件为止。

## 6 空穴模型

空穴模型是空化绕流理论的重要组成部分,是空化流场计算的基础。一台设计良好的水轮机,一般只发生叶片的局限空化,只有当远离最优工况运行且转轮叶片进口冲角过大或头部形状极其不良时,才可能发生超空化流。在水轮机领域,局限空化应是研究的主要对象。

局限空穴模型主要涉及到它的起点与尾部。通常,起点以满足空穴与固体壁面相切的布里劳因条件,并靠近最低压力点来确定;而尾部可取用封闭、半开敞和全开敞 3 种类型。

笔者提出的自适应空穴模型,在空化流动计算数值化条件下使模拟精度提高,具有良好的适应性。这种自适应模型在确定空穴尾部形状时,取决于空穴围线上某一相对速度函数在尾部的累加值和相对速度方向,即空穴尾部形状由数值计算迭代过程自动确定,它可能是上述 3 种尾部的任何一种。

曾在哈尔滨大电机研究所空化试验台上,针对 HLA296-35 型水轮机做了空化内外特性试验。结果表明,上述自适应空穴模型与观测的形态一致<sup>[9]</sup>。

## 7 三峡型水轮机 HLD40 转轮三维空化流动解析结果

本文的理论与计算方法曾先后在 HL702, HLD187, HLD89, HLA296 和 HLD40 等多个水轮机空化流场分析中应用, 这些水轮机均为我国大型水电站采用, 其中 HLD40 型水轮机为三峡型水轮机。这里只介绍 HLD40 水轮机空化流动的部分计算结果<sup>①</sup>。

根据三峡水电站水轮机的运行条件, 取用 5 个工况进行转轮空化流场的预测。表 1 示出这 5 种工况的参数。

表 1 三峡水轮机的 5 种计算工况参数

工况	工作水头 $H/m$	单位流量 $Q_1/(L \cdot s^{-1})$	单位转速 $n_1/(r \cdot \min^{-1})$	模型导叶开度 $\alpha_M/mm$	模型效率 $\eta_M/\%$
1	102.4	920	73.0	20.2	91.7
2	80.6	1 032	82.3	24.4	89.0
3	113.0	831	69.5	17.9	91.0
4	71.0	1 045	87.6	24.7	87.0
5	80.6	843	82.3	18.7	86.5

图 1 为 HLD40 型水轮机工况 4 时转轮叶片空化区域的三维视图: 实线网格表示叶片吸力面, 虚线为压力面, 黑点的连线包围区域为叶片背面空化区。图 2 示出工况 1 时流面  $S_1$  和  $S_2$  迭代计算后新旧流线的比较: 实线表示迭代计算后的轴面流线, 虚线表示旧流线。空化流计算时取用 15 个  $S_1$  流面。图 3 示出工况 4 时转轮叶片第 12, 13 和 14 流面上翼型空化流动计算的相对速度分布。图 4 示出工况 1 时第 1 和第 6 两个流面保角变换成环列与直列翼栅翼型及其表面的流速分布。

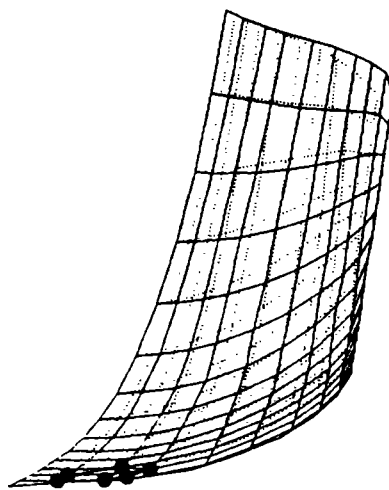


图 1 工况 4 时转轮叶片空化区域三维视图

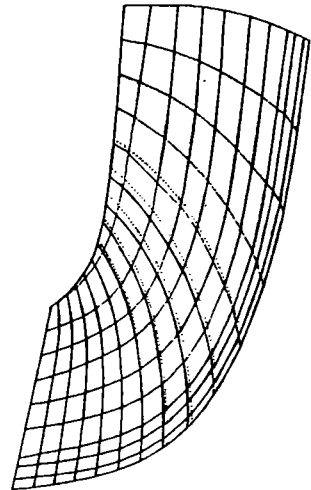


图 2 工况 1 时新旧流线的比较

HLD40 型水轮机转轮空化流场分析结果表明, 在 2 和 4 大流量工况运行时, 叶片背面靠下环诸流面出口发生空化。这个结果正常。只要适当改进该区域的叶片型线, 便可能消除空化。

<sup>①</sup>常近时, 任 静. 三峡水轮机转轮的汽蚀流动解析研究报告. 中国农业大学(东校区), 1997

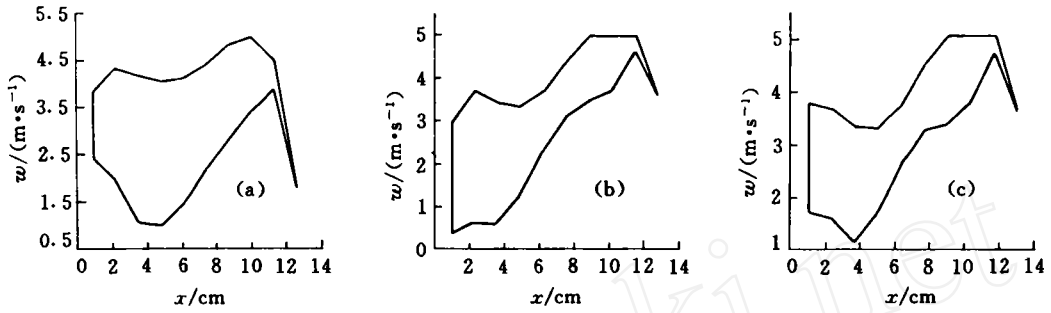


图3 工况4时转轮叶片第12(a),13(b)和14(c)流面流速分布

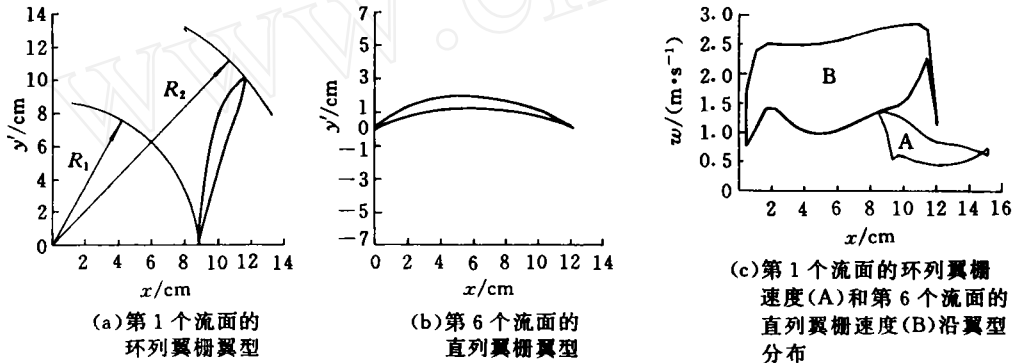


图4 工况1时第1和第6两流面保角变换的翼型与流速分布

### 参 考 文 献

- 1 常近时. 叶片式水力机械水动力学计算基础. 北京:水利电力出版社,1989. 395 页
- 2 常近时,寿梅华,于希哲. 水轮机运行. 北京:水利电力出版社,1983. 433 页
- 3 Chang Jinshi, Geng Yanfang, Liu Siqing. A francis runner blades modification of large prototype on field of power station. In: HYDROTURBO 93( I ). BRNO,1993. 261~269
- 4 常近时,耿延芳,刘四清. 潘家口水电站混流式水轮机改善空化性能的转轮修型. 水机磨蚀,1996(12):1~5
- 5 任 静,常近时. 叶片式水力机械中空化流动分析的新进展. 水机磨蚀,1995(12):14~19
- 6 刘四清,常近时. 轴流式水力机械转轮中局限空化流动的面元奇点解法. 工程热物理学报,1995,16(1):51
- 7 Ren Jing, Chang Jinshi. A nonlinear singularity solution for the cavitating flow in a 2D thick profile annular cascade. In: Wu Yulin, Zhao Bingzeng, eds. Proceedings of ISFMFE. Beijing: International Academic Publishers, 1996. 523~528
- 8 常近时. 任意二元厚翼栅正命题的奇点解法. 北京农业工程大学学报,1994,14(4):65
- 9 任 静. 水轮机转轮内三维空化流场分析:[博士学位论文]. 北京:中国农业大学,1997