

The Hydraulic Development and Research of Bulb Francis Turbine Runner Based on CFD

Wenwu Song, Jie Fu, Qianhai Zhou

School of Energy and Environment, Xihua University, Chengdu, China

Email: wenwus@163.com

Abstract: This article applies to Francis turbine runner of the bulb-type units, introduces the basic principles of Francis turbine and adopts CFD software to determine the drift-net boundaries and draw the flow line, calculate shaft surface speed and draw $V_m = f(L_m)$ curve, on the basis of the simulation of internal flow field, makes hydraulic design and runner's line drawing for the runner in 90 m section, Which provides a new set of research methods for the hydraulic design of the hydraulic turbine runner.

Keywords: Bulb-Francis turbine; CFD; Hydraulic Design

基于 CFD 的灯泡混流式水轮机转轮的水力开发与研究

宋文武, 符 杰, 周乾海

西华大学能源与环境学院, 成都市, 中国, 610039

Email: wenwus@163.com

摘 要: 本文将混流式水轮机的转轮应用于灯泡式机组中, 介绍了这种灯泡混流式水轮机的基本原理, 并采用 CFD 软件辅助进行了流网划分以及流线绘制、轴面速度的计算以及 $V_m=f(L_m)$ 曲线的绘制, 在模拟内部流场的基础上, 对 90 米水头段的转轮进行了水力设计与转轮型线的绘制, 为水轮机转轮的水力设计提供了一套新的研究方法。

关键词: 灯泡混流式水轮机; CFD; 水力设计

1 引言

灯泡混流式水轮机具有平直的通道, 水流基本上轴向通过流道和轴对称地流过转轮叶片, 水流几乎没有转弯, 水力损失很小, 水力效率高, 在水头和功率相同的条件下, 与轴流转桨式水轮机比较, 具有较高的过流能力和比转速, 其转轮直径要小 10% 左右, 而且机组卧式布置, 结构紧凑, 减小了电站的厂房高度和建筑面积, 减少了电站的开挖量和混凝土量, 土建费用可以节省 20%~30%。灯泡混流式水轮机是一种采用类似于混流式水轮机转轮和灯泡贯流式水轮机导水机构及流道形式的一种新型水轮机。国外还未见有类似的研究, 在国内也只有西华大学在进行此项研究^[1-7]。所以在对水轮机水力设计时是沿用混流式的设计方法, 但手工设计非常烦琐, 同时需要很高经验。另外, 由于设计方法中经验公式较多, 设计的精准度有待提高。所以本文利用了

Gambit 软件对灯泡混流式水轮机转轮的流道流网划分, 用 Fluent 流动分析软件对其内部流动进行数值模拟, 从而可以得到内部速度场、压力场的模拟变化。并找到划分流线的 $V_m=f(L_m)$ 曲线。再进行一系列的积分计算最后得出转轮叶片。这种方法依据传统的水力设计思想对设计方法进行了改进, 为灯泡混流式水轮机的水力设计提供了更快捷更准确的设计方法。

2 灯泡混流式水轮机的水力性能分析及流场解析

对于贯流混流式水轮机来说, 水流在整个流道中没有较大的拐弯, 自引水管道直线进入水轮机, 流经灯泡体后斜向流经转轮后轴向流出。整个流动先沿灯泡体外壳再沿转轮完成两次转向流出水轮机, 图 1 为灯泡混流式水轮机的流道形式, 可以看出水流正反两次转向使水流在整个轴面流场中分布较为均匀, 同时流线整体向上冠方向挤压, 说明这种流道形式对减轻

资助信息: 四川高等学校科技创新重大培育项目 (09ZZ031) 资助
西华大学流体机械重点实验室研究基金资助

下环区域的负荷分配是有利的，同时增大了上冠区域的过流量。

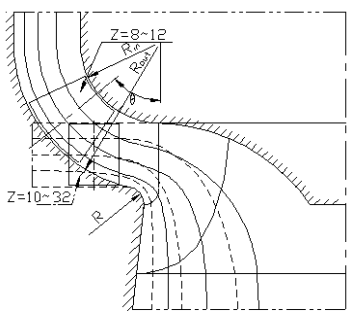


Figure 1. The compare of the passage about Bulb-Francis turbine and Francis turbine

图 1 灯泡混流式水轮机与常规混流式水轮机流道对比图

对于 $\omega_u = 0$ 的二元理论方法，可按轴面有势流动求轴面上的流线。连续方程为：

$$\frac{\partial(v_r r)}{\partial r} + \frac{\partial(v_z r)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

在轴对称有势流动的前提下，存在着流动流函数 Ψ 及势函数 ϕ ，且

$$\left. \begin{aligned} v_r &= -\frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial z} = \frac{\partial \phi}{\partial r} \\ v_z &= \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} = \frac{\partial \phi}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

同时，由连续方程得出流函数 Ψ 及势函数 ϕ 满足下列方程组

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

这样便可以利用有限元法求解 $(\phi - \Psi)$ ，得到流场中有节点的流函数 Ψ 及势函数 ϕ 的大小，有了 Ψ 或 ϕ 后便可求出各节点的轴面速度 v_m 的大小。

$$v_m = \frac{\partial \phi}{\partial L_m} = \frac{\Delta \phi}{\Delta L_m} \quad (4)$$

也可以将方程 (2) 从 $(r-z)$ 平面转换到 $(\phi - \Psi)$ 平面，进行数值求解，即采用差分方程迭代计算出等差分布的等势线和流线组成的流网。由于 Ψ 、 ϕ 均是 r 、 z 的函数， $\phi = \phi(r, z)$ ， $\Psi = \Psi(r, z)$ ，从 $(r-z)$ 平面转换到 $(\Psi - \phi)$ 平面有：

$$\left. \begin{aligned} r &= r(\Psi, \phi) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$z = z(\Psi, \phi)$$

方程组 (2) 就转换为，

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} \right) &= -\frac{1}{r} \left(\frac{\partial z}{\partial \Psi} \right) \\ \left(\frac{\partial^2 \Psi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \Psi}{\partial r} \right) &= \frac{1}{r} \left(\frac{\partial z}{\partial \phi} \right) \\ \left[\frac{\partial^2 r}{\partial \phi^2} \left(\left(\frac{\partial r}{\partial \Psi} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \Psi} \right)^2 \right) - \right. \\ &\quad \left. 2 \frac{\partial^2 r}{\partial \phi \partial \Psi} \left(\frac{\partial r}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial r}{\partial \Psi} + \frac{\partial z}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial z}{\partial \Psi} \right) + \frac{\partial^2 r}{\partial \Psi^2} \left[\left(\frac{\partial r}{\partial \phi} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \phi} \right)^2 \right] \right] \\ &\quad - \frac{J^{-1}}{|J|^2} \left[\frac{\partial^2 z}{\partial \phi^2} \left(\left(\frac{\partial r}{\partial \Psi} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \Psi} \right)^2 \right) - \right. \\ &\quad \left. 2 \frac{\partial^2 z}{\partial \phi \partial \Psi} \left(\frac{\partial r}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial r}{\partial \Psi} + \frac{\partial z}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial z}{\partial \Psi} \right) + \frac{\partial^2 z}{\partial \Psi^2} \left[\left(\frac{\partial r}{\partial \phi} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \phi} \right)^2 \right] \right] \end{aligned} \right\} = 0 \quad (6)$$

一般采用中心差分方法来对方程 (4) 进行数值求

解。设

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \left(\frac{\partial r}{\partial \Psi} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \Psi} \right)^2 \\ \beta &= \left(\frac{\partial r}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial r}{\partial \Psi} + \frac{\partial z}{\partial \phi} \cdot \frac{\partial z}{\partial \Psi} \right) \\ \lambda &= \left(\frac{\partial r}{\partial \phi} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial \phi} \right)^2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

计算时取 $\Delta \phi = \Delta \Psi = 1$ ，则采用中心差分格式后，选取一个差分格式，如下，

$$\begin{aligned} r_{i,j}^{(N+1)} &= \frac{1}{2(\alpha + \lambda)} \{ \alpha(r_{i+1,j} + r_{i-1,j}) + \lambda(r_{i,j+1} + r_{i,j-1}) - \\ &\quad 1/2\beta(r_{i+1,j+1} - r_{i+1,j-1} - r_{i-1,j+1} + r_{i-1,j-1}) - \\ &\quad \frac{|J|}{4r_{i,j}} [(r_{i+1,j} - r_{i-1,j})(z_{i,j+1} - z_{i,j-1}) + (r_{i,j+1} - r_{i,j-1})(z_{i+1,j} - z_{i-1,j})] \}^{(N)} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} z_{i,j}^{(N+1)} &= \frac{1}{2(\alpha + \lambda)} \{ \alpha(z_{i+1,j} + z_{i-1,j}) + \lambda(z_{i,j+1} + z_{i,j-1}) - \\ &\quad 1/2\beta(z_{i+1,j+1} - z_{i+1,j-1} - z_{i-1,j+1} + z_{i-1,j-1}) - \\ &\quad - \frac{|J|}{2r_{i,j}} [(z_{i+1,j} - z_{i-1,j})(z_{i,j+1} - z_{i,j-1})] \}^{(N)} \end{aligned} \quad (9)$$

并设 C、D 为流网中相邻的两次迭代节点，其坐

$$\varepsilon_i = \sqrt{(r_D - r_C)^2 + (z_D - z_C)^2}, \text{ 当所有的节点}$$

误差的最大值 $E_{\max} = \max\{\varepsilon_i\}$ (允许误差) 时便得到精确的流网，也可得到其轴面流速 V_m 的分布规律了。

通过上述方法，以 90 米水头的灯泡混流式水轮机为例，计算得出的轴面流线如图 2 所示。

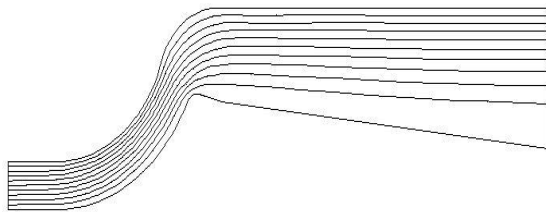


Figure 2. Calculated meridian streamlines
图 2 计算得出的轴面流线

3 基于 CFD 的灯泡混流式水轮机内部流场的数值模拟

仍以上述 90 米水头的灯泡混流式水轮机为例，并利用 Fluent 进行了内部流动计算。

先用 Atuo CAD 设计好的流道，导入到 Gambit 软件中，先对流道中的边沿进行划分。在出水边按 (i=1,2,3...,n+1) 规律进行划分点，进水边用等间距划分，其余壁面在水流转弯处把点划分的密一点，其结果如图 3 所示。

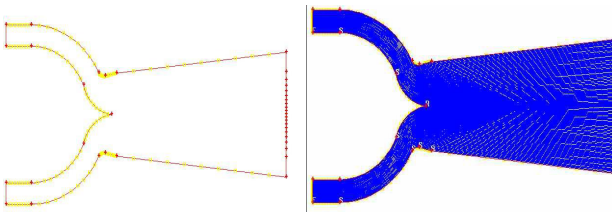


Figure 3. compartmentalized the passage and mesh diagram
图 3 流道边划分及网格图

采用标准的 $K-\varepsilon$ 湍流模型

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_\varepsilon \quad (10)$$

标分别为 (rD,zD), (rc,zc), 则其误差为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (11)$$

$$\text{其中: } \mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon}$$

式中, G_k ——层流速度梯度产生的湍流动能

G_b ——浮力产生的湍流动能

$C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ ——常数, $C_{1\varepsilon} = 1.44$ 、 $C_{2\varepsilon} = 1.92$ 、 $C_{3\varepsilon} = 1.52$

σ_k —— k 方程的湍流 Prandtl 数, $\sigma_k = 1.0$

σ_ε —— ε 方程的湍流 Prandtl 数, $\sigma_\varepsilon = 1.3$

S_k 、 S_ε ——用户自定义的源条件

μ_t ——紊流粘性系数

C_μ ——常数, $C_\mu = 0.09$

计算得到 90 米水头的灯泡混流式水轮机转轮流道以及流场中的压力分布图如图 4 所示。以及其中一条轴面流线及其轴面速度大小, 如图 5 所示。

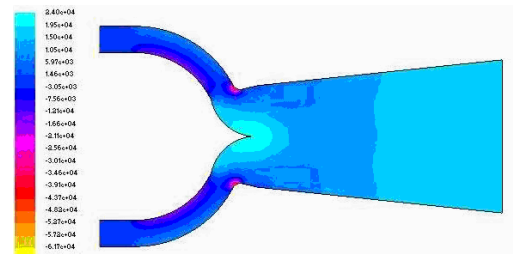


Figure 4. Pressure distribution on the passage of Bulb-Francis turbine

图 4 灯泡混流式流道压力分布图

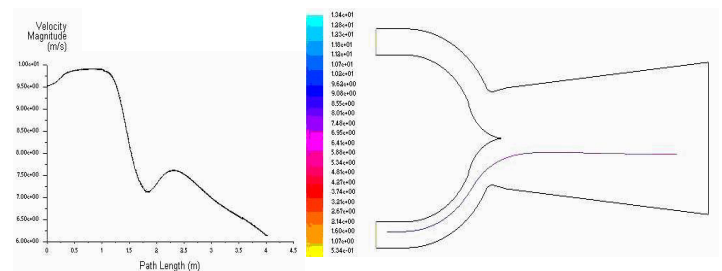


Figure 5. $V_m = F(L_m)$ curve of the fourthly meridian streamlines and axis velocity

图 5 第四条轴面流线及其轴面速度 $V_m = F(L_m)$ 曲线

由上述计算结果可以看出, 基于 CFD 的灯泡混流式水轮机内部流动的计算结果与前面通过流场解析, 然后采用中心差分方法进行流场计算的结果十分吻合。但是基于 CFD 的计算还能全面计算出流场中的压力分布规律, 对指导流道的优化和改善水轮机转轮内部的空蚀性能等均具有十分重要的参考意义。

4 轴面涡线的计算及叶片绘型

通过上述的计算可以绘制出每条流线的 $V_m=F(L_m)$ 曲线, 得到轴面流速的大小。由流体力学可知, 被绕流的叶片表面可以认为是一系列涡线所组成的涡面。因而求出这一系列的涡线, 也就得到了叶片的表面。在轴对称有势流动下的涡线具有以下几个重要特征:

(1) 涡线是在轴截面上的平面曲线。

(2) 沿轴面涡线速度矩保持常数, 即 $V_u r = \text{const}$ 。

(3) 轴面涡线 ($V_u r = \text{const}$) 就是叶片的轴面截线。

(4) 不同的轴面涡线位于不同的辐角的轴面内。

同时, 叶片的进、出口边上的 $V_u r$ 各为一定值(由水轮机基本方程式确定), 在 $\omega_u = 0$ 二元理论方法中, 叶片的进出口边分别位于不同的轴面上, 且两轴面的夹角就是叶片的包角 θ 。

水流质点在转轮中做相对运动时, 描述其轴面流线上的位移 dL_m 与位移 $d\theta$ 之间的关系式为:

$$d\theta_m = \frac{\omega r^2 - v_u r}{v_m r^2} dL_m \quad (12)$$

对(12)式积分, 即可得到转轮叶型的骨线方程:

$$\theta = \int_0^l \left(\frac{\omega r^2 - v_u r}{v_m r^2} \right) dL_m \quad (13)$$

通常计算时, 是将流线分成若干段进行的, 即

$$\theta = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\omega r^2 - v_u r}{v_m r^2} \right)_i \Delta L_{mi} \quad (14)$$

要对上式进行计算, 还必须确定 $V_u r$ 的变化规律。在这里先认为 $V_u r$ 是按等速度矩下降的, 根据以上的方法对叶片进行积分。沿第一条流线积分数据如表 1。

其余流线按此方法进行, 最后根据积分结果得出叶片的骨线图如图 6 所示。叶片采用等厚加厚法, 整个叶片靠锻压成型来保证等厚叶片, 这样制造出的叶片具有良好的刚度和强度以及抗空化空蚀性能, 只是在叶片的进水边和出水边修圆即可。

5 结束语

本文从流体动力学基础出发, 结合了混流式水轮机和灯泡式水轮机的特点, 优化出灯泡混流式水轮机的过流通道, 并对过流通道的水流运动规律进行了解析, 通过解析得出灯泡混流式水轮机的全流道的轴面流线及轴面流速的分布规律。通过 Gambit 对流道进行网格划分, 运用 CFD 软件进行数值模拟, 同样得到了其内部流动状况, 揭示流体在整个流道中的速度场和压力场, 其结果与流场解析计算的结果十分吻合, 然后求出各条流线的 $V_m=F(L_m)$ 曲线, 对叶片进行积分计算, 得到转轮叶片的轴面截线及木模图。此方法是基于 CFD 技术对传统设计方法的改良, 提高了设计速度与精度, 同时, 在叶片水力开发设计的同时, 就完全可以了解到转轮叶片的速度与压力分布以及叶片的空蚀性能等情况, 对研究和开发高性能的水轮机转轮模型具有重要的意义。这种方法也能应用于传统的混流式水轮机的设计与开发, 为水轮机的现代设计方法提供参考。

Table 1. The first flow line integral data sheet
表 1. 沿第一条流线积分数据表

Lm	ΔL_m	$L_m + \Delta L_m / 2$	r (mm)	$r^2 \omega$	L(m)	V _{ur}	$r^2 \omega - V_{ur}$	V _m	$V_m r^2$	$\Delta \theta (\text{rad})$	$\Delta \theta (\text{度})$
0	20	10	367.62	1.089129	0.1	0.9656	0.123529	0.716	0.096763	0.025532	1.463507
20	20	30	350.33	0.98909	0.3	0.7392	0.24989	0.69	0.084684	0.059017	3.382839
40	20	50	332.36	0.890223	0.5	0.5128	0.377423	0.68	0.075115	0.100492	5.760203
60	20	70	313.16	0.79034	0.7	0.2864	0.50394	0.66	0.064726	0.155716	8.925615

80	20	90	297.4	0.712792	0.9	0.06	0.652792	0.64	0.056606	0.230645	13.22055
100	20									0.571401	32.75271

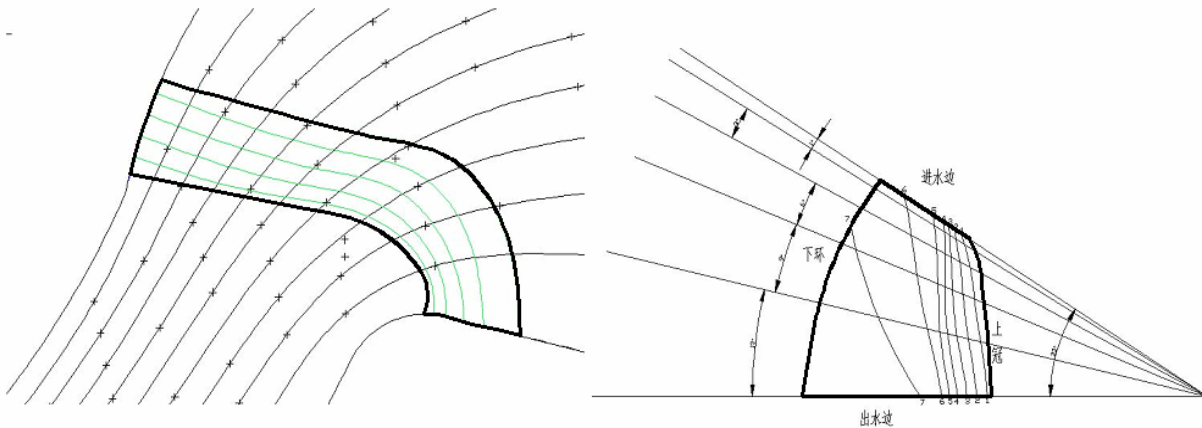


Figure 6. Camberline and wooden patterns of the blade
图 6 叶片骨线与叶片木模图

References (参考文献)

- [1] SONG Wen-wu, FU Jie, ZHANG Qing, Optimum Design of the Flow Passage Physical for the Bulb Francis Turbine[J], *CHINA RURAL WATER AND HYDROPOWER*, 2007,(9), P122-125(Ch).
宋文武, 符杰, 张青. 灯泡混流式水轮机过流通道几何尺寸的优化设计[J]. 中国农村水利水电, 2007, (9), P122-125.
- [2] SONG Wen-wu, Lin Qi-yu, Research and Design of Bulb-Francis Turbine[J], *Journal of Sichuan University of Science and Technology*, 2003,(2), P60-63
宋文武, 林其玉. 灯泡混流式水轮机的研究与设计[J]. 四川工业学院学报, 2003,(2), P60-63.
- [3] Song Wenwu, Chen Cichang, Du Tong, et al, Research and Design of the Straflo-Francis Turbine[J], *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2002, 33(6), P44-47
宋文武, 陈次昌, 杜同, 等. 贯流混流式水轮机的设计[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6), P44-47.
- [4] Song Wenwu, Du Tong, Luo Xiaoqing, Research and Design of a Novel Hydraulic Turbine[J], *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2000, 31(4), P47-49.
宋文武, 杜同, 骆晓晴. 一种新型水轮机的研究与设计[J]. 农业机械学报, 2000, 31(4), P47-49.
- [5] SONG Wen-wu, The Investigate of Vur Law in Value Integeation of Differential Equation for Blade[J], *Journal of Sichuan University of Science and Technology*, 1993,(4), P265-270.
宋文武. 叶片微分方程积分过程中的 Vur 变化规律的探讨[J]. 四川工业学院学报, 1993,(4), P265-270.
- [6] SONG Wen-wu, Lin Qi-yu, The Investigate of the Structure Design about Straflo-Francis Turbine[J], *Northwest Hydro-power*, 1999,(3), P34-37.
宋文武, 林其玉. 贯流混流式水轮机结构设计探讨[J]. 西北水电, 1999,(3), P34-37.
- [7] SONG Wen-wu, Study on Hydraulic Design of Tubular-Francis Turbine[J], *Large Electric Machine and Hydraulic Turbine*, 1992,(6), P44-49.
宋文武. 贯流混流式水轮机水力设计研究[J]. 大电机技术, 1992,(6), P44-49.