

梯级电站联合发电模型(上)

——水能发电量计算方法探讨

吴杰康 辛保江 李杰科

(广西大学电气工程学院,广西 南宁 530004)

摘要 根据水库的特性将水体按高程划分为 3 层水体,建立二次曲线型三层水体模型。考虑水体质量和水体重心,分析水库水体压力和分层水体微元在压力管道轴线方向的重力分量,对引水管入口处水体进行力学分析。最后通过计算 3 层水体的重力对水体微元在管道轴线方向的压力做功、压力管道进水管和出水管处的水体微元压力做功、重力做功及其动能和势能构建水电能源形成模型。结果表明,采用微元法对水库水体分层建模,能够比较准确地描述水电能源的形成过程。

关键词 梯级水电站 水能发电量 水库分层水体 力学分析

中图分类号 :TV214 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2010)03-0001-04

Co-generation model of cascaded hydropower plants(Part 1)—a method to calculate hydro-energy generating capacity//
WU Jie-kang , XIN Bao-jiang , LI Jie-ke(*School of Electrical Engineering , Guangxi University , Nanning 530004 , China*)

Abstract : According to the characteristics of reservoirs , the water body was divided into three layers . A quadratic curve three-layer water body model was established . Considering its gravity and the center of gravity , the mechanical analysis of the water body at the inlet of conduit was performed through the analysis of water pressures and the gravitational components of layered water body in the axial direction . A hydropower energy generation model was proposed by calculating the work of water micro-elements in the axial direction of the conduit and the work of water micro-elements at the inlet and outlet of the pressure conduit by the gravity of the three-layer water body as well as its kinetic and potential energies . The results show that the layered model for the water body of reservoirs by use of the micro-element method can accurately represent and describe the generation process of hydropower energy .

Key words : cascaded hydropower plant ; hydro-energy generating capacity ; layered water body of reservoir ; mechanical analysis

我国河流众多,水能资源蕴藏量和可开发利用量均居世界首位,但其开发利用效率较低,仅为 24% 左右^[1],人均装机容量也只有美国的 1/7。因此,要在坚持节约用电的同时,加强各级电站间的最优化调度,提高水能利用效率,减少弃水电量损失。由于大型水力发电是一个具有约束条件的大型、动态、有时滞的复杂非线性优化过程^[2],涉及水能和电能的相互转化,建立一个能够简单、直观地将水能和电能联系起来的数学模型有重要的现实意义。

水能计算是指针对枢纽设计的不同水能参数的运用规划,计算各种水文情况下水电站的能量指标,即水电站的保证出力和年发电量^[3]。目前水能计算的主要方法有典型年法^[4]、简化等流量法^[5]、方·米法^[6]、模拟曲线方程法^[7]和二元三点拉格朗日插值

法^[8]。这里的多数方法主要应用于小水电站,是经过改进的简便算法,某些假设也只应用于一些特定的场合,其中广泛采用的利用综合出力系数进行水能计算的方法存在较大的不准确性,在水电站优化调度及水电站节能考核等需要精确计算的工作中,会存在较大的误差甚至错误^[3]。笔者应用经典的微元法建模,对水库的水能进行分析。这种方法直观准确,避免了以往水能计算中工作量大、速度慢、精度差等缺点^[8],并且考虑了水库底面构造给计算带来的影响。

1 水库水体模型

根据各水库的水文特征、水库底面构造、水轮机组及压力管道安装情况等将水体按高程划分为底

基金项目 国家自然科学基金(50767001);国家高技术研究发展计划(2007AA04Z197);高等学校博士学科点专项科研基金(20094501110002);广西高校百名中青年学科带头人资助计划(RC20060808002);广西壮族自治区教育厅科研项目(200808MS150);广西壮族自治区研究生教育创新计划(105930901001 ;105930904068)

作者简介 吴杰康(1965—)男,广西隆安人,教授,博士,从事电力系统运行与分析研究。E-mail :wujiekang@163.com

层、中层、上层 3 层水体,分别记为水体 s, m, e ,如图 1~2 所示。 s, m, e 层水体底面均为二次曲面,各层水体在 xOz 坐标面上的投影分别为二次曲线 SN, MS, EM 称为二次曲线型三层水体。

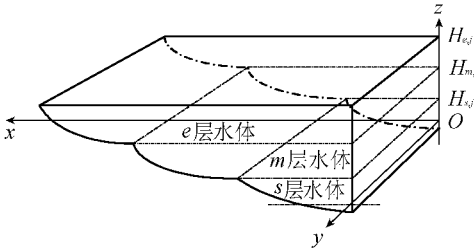


图 1 水库水体

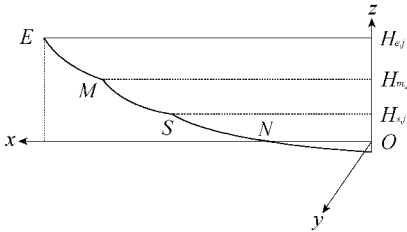


图 2 水体截面图

图 2 中平行于 xOz 坐标面的所有截面形状相同。水体纵截面(平行于 xOz 坐标面)为曲边梯形,如图 2 所示 $[0, H_{s,j}][H_{s,j}, H_{m,j}][H_{m,j}, H_{e,j}]$ 分别为 s, m, e 层水体的高度区间。假设 SN, MS, EM 曲线方程分别为:

$$\begin{aligned} x &= a_1 z^2 + b_1 z + c_1 \\ x &= a_2 z^2 + b_2 z + c_2 \\ x &= a_3 z^2 + b_3 z + c_3 \end{aligned}$$

式中: $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2, a_3, b_3, c_3$ 均为系数。

在不同水文条件下,水库蓄水位 H_j 位于不同水层 ①高水位: $H_{m,j} < H_j \leq H_{e,j}$;②中水位: $H_{s,j} < H_j \leq H_{m,j}$;③低水位: $0 < H_j \leq H_{s,j}$ 。本文主要讨论水库蓄水位在高水位时的情况,中、低水位的计算与高水位类似。

2 水体形体分析^[8]

2.1 s 水体

s 水体对下层水体产生的重力 $G_{s,j}$ 为

$$G_{s,j} = \rho Y_j \left(\frac{a_1 H_{s,j}^3}{3} + \frac{b_1 H_{s,j}^2}{2} + c_1 H_{s,j} \right) \quad (1)$$

s 水体重心($X_{s,j}, Y_{s,j}, Z_{s,j}$)为

$$\begin{aligned} X_{s,j} &= \frac{6a_1^2 H_{s,j}^4 + 15a_1 b_1 H_{s,j}^3 + 10(b_1^2 + 2a_1 c_1) H_{s,j}^2 + 30b_1 c_1 H_{s,j} + 30c_1^2}{10a_1 H_{s,j}^2 + 15b_1 H_{s,j} + 30c_1} \quad (2) \\ Y_{s,j} &= 0 \quad (3) \end{aligned}$$

$$Z_{s,j} = \frac{3a_1 H_{s,j}^3 + 4b_1 H_{s,j}^2 + 6c_1 H_{s,j}}{4a_1 H_{s,j}^2 + 6b_1 H_{s,j} + 12c_1} \quad (4)$$

式中: ρ 为水的密度, $\rho = 1\,000\text{ kg/m}^3$; Y_j 为水坝宽度。

2.2 m 水体

m 水体对下层水体产生的重力 $G_{m,j}$ 为

$$\begin{aligned} G_{m,j} &= \rho Y_j (H_{m,j} - H_{s,j}) \left[\frac{a_2}{3} (H_{m,j}^2 + H_{m,j} H_{s,j} + H_{s,j}^2) + \frac{b_2}{2} (H_{m,j} + H_{s,j}) + c_2 \right] \quad (5) \end{aligned}$$

m 水体重心($X_{m,j}, Y_{m,j}, Z_{m,j}$)为

$$\begin{aligned} X_{m,j} &= \left[\frac{a_2^2}{5} (H_{m,j}^4 + H_{m,j}^3 H_{s,j} + H_{m,j}^2 H_{s,j}^2 + H_{m,j} H_{s,j}^3 + H_{s,j}^4) + \frac{a_2 b_2}{2} (H_{m,j} + H_{s,j}) (H_{m,j}^2 + H_{m,j} H_{s,j} + H_{s,j}^2) + \frac{b_2^2 + 2a_2 c_2}{3} (H_{m,j}^2 + H_{m,j} H_{s,j} + H_{s,j}^2) + b_2 c_2 (H_{m,j} + H_{s,j}) + c_2^2 \right] / K_1 \quad (6) \end{aligned}$$

$$Y_{m,j} = 0 \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Z_{m,j} &= \left[\frac{a_2}{4} (H_{m,j} + H_{s,j}) (H_{m,j}^2 + H_{s,j}^2) + \frac{b_2}{3} (H_{m,j}^2 + H_{m,j} H_{s,j} + H_{s,j}^2) + \frac{c_2}{2} (H_{m,j} + H_{s,j}) \right] / K_2 \quad (8) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{2a_2}{3} (H_{m,j}^2 + H_{m,j} H_{s,j} + H_{s,j}^2) + b_2 (H_{m,j} + H_{s,j}) + 2c_2 \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_2 &= \frac{a_2}{3} (H_{m,j}^2 + H_{m,j} H_{s,j} + H_{s,j}^2) + \frac{b_2}{2} (H_{m,j} + H_{s,j}) + c_2 \quad (10) \end{aligned}$$

2.3 e 水体

e 水体对下层水体产生的重力 $G_{e,j}$ 为

$$\begin{aligned} G_{e,j} &= \rho Y_j (H_j - H_{m,j}) \left[\frac{a_3}{3} (H_j^2 + H_j H_{m,j} + H_{m,j}^2) + \frac{b_3}{2} (H_j + H_{m,j}) + c_3 \right] \quad (11) \end{aligned}$$

e 水体重心($X_{e,j}, Y_{e,j}, Z_{e,j}$)为

$$\begin{aligned} X_{e,j} &= \left[\frac{a_3^2}{5} (H_{m,j}^4 + H_{m,j}^3 H_j + H_{m,j}^2 H_j^2 + H_{m,j} H_j^3 + H_j^4) + \frac{a_3 b_3}{2} (H_{m,j} + H_j) (H_{m,j}^2 + H_j^2) + \frac{b_3^2 + 2a_3 c_3}{3} (H_{m,j}^2 + H_{m,j} H_j + H_j^2) + b_3 c_3 (H_{m,j} + H_j) + c_3^2 \right] / K_3 \quad (12) \end{aligned}$$

$$Y_{e,j} = 0 \quad (13)$$

$$Z_{e,j} = \left[\frac{a_3}{4} (H_j + H_{m,j}) (H_j^2 + H_{m,j}^2) + \frac{b_3}{3} (H_{m,j}^2 + H_{m,j} H_j + H_j^2) + \frac{c_3}{2} (H_{m,j} + H_j) \right] / K_4 \quad (14)$$

其中

$$K_3 = \frac{2a_3}{3} (H_j^2 + H_j H_{m,j} + H_{m,j}^2) + b_3 (H_{m,j} + H_j) + 2c_3 \quad (15)$$

$$K_4 = \frac{a_3}{3} (H_j^2 + H_j H_{m,j} + H_{m,j}^2) + \frac{b_3}{2} (H_{m,j} + H_j) + c_3 \quad (16)$$

3 压力引水管入口处水体力学分析

3.1 水库水深形成的压力

设梯级水电站 j 的发电机组 i 的圆柱形压力管道直径为 $D_{j,i}$, 则压力管道横截面面积 $A_{j,i}$ 为

$$A_{j,i} = \frac{1}{4} \pi D_{j,i}^2 \quad (17)$$

进水口处沿压力管道轴线方向长度为 dx 的水体微元的体积 $dV_{W,j,i}$ 为

$$dV_{W,j,i} = \frac{1}{4} \pi D_{j,i}^2 dx \quad (18)$$

设梯级水电站 j 在时刻 t 的蓄水位高程为 H_j , 发电机组 i 在压力管道入口处的高程为 $H_{l,j,i}$, 设 xyz 坐标系原点高程也为 $H_{l,j,i}$, 则在 xyz 坐标系内, 梯级水电站 j 在时刻 t 的蓄水位 H_j 为

$$H_j = H_j - H_{l,j,i} \quad (19)$$

在 xyz 坐标系内, 发电机组 i 在压力管道入口处的高度 $H_{l,j,i}$ 为零, 则发电机组 i 在压力管道入口处的水体微元压强 $p_{l,j,i}$ 和压力 $F_{l,j,i}$ 分别为

$$p_{l,j,i} = \rho g (H_j - H_{l,j,i}) \quad (20)$$

$$F_{l,j,i} = \frac{1}{4} \rho g (H_j - H_{l,j,i}) \pi D_{j,i}^2 \quad (21)$$

3.2 水库分层水体形成的重力分量

在雨量充沛的季节, 水库水位为高水位, 此时 $H_{m,j} < H_j \leq H_e$ 。水体 s 对压力管道入口处水体微元在压力管道轴线方向的重力分量为

$$G_{s,j} (\beta_{s,j}, \alpha_{j,i}) = \rho g Y_j \left(\frac{a_1 H_{s,j}^3}{3} + \frac{b_1 H_{s,j}^2}{2} + c_1 H_{s,j} \right) \cdot \sin \beta_{s,j} \cos (\alpha_{j,i} - \beta_{s,j}) \quad (22)$$

$$\text{其中 } \beta_{s,j} = \cot \left(\frac{\frac{a_1}{2} H_{s,j}^3 + \frac{2b_1}{3} H_{s,j}^2 + c_1 H_{s,j}}{K_7} \right) \quad (23)$$

$$K_7 = \frac{a_1^2}{5} H_{s,j}^4 + \frac{a_1 b_1}{2} H_{s,j}^3 + \frac{b_1^2 + 2a_1 c_1}{3} H_{s,j}^2 + b_1 c_1 H_{s,j} + c_1^2 \quad (24)$$

式中: $\beta_{s,j}$ 为水体 s 重心和原点的连线与 x 轴所形成的夹角; $\alpha_{j,i}$ 为梯级水电站 j 的发电机组 i 压力管道的轴线与坐标轴 x 形成的夹角。

水体 m 对水体微元在压力管道轴线方向的重力分量为

$$G_{m,j} (\beta_{m,j}, \alpha_{j,i}) = \rho g Y_j (H_{m,j} - H_{s,j}) \cdot \left[\frac{a_2}{3} (H_{m,j}^2 + H_{m,j} H_{s,j} + H_{s,j}^2) + \frac{b_2}{2} (H_{m,j} + H_{s,j}) + c_2 \right] \sin \beta_{m,j} \cos (\alpha_{j,i} - \beta_{m,j}) \quad (25)$$

其中

$$\beta_{m,j} = \cot \left(\frac{Z_{m,j}}{X_{m,j}} \right) \quad (26)$$

式中: $\beta_{m,j}$ 为水体 m 重心和原点的连线与 x 轴所形成的夹角; $X_{m,j}$ 和 $Z_{m,j}$ 分别为水体 m 重心在 x 轴和 z 轴上的坐标。

水体 e 对压力管道进水口处水体微元形成的重力分量为

$$G_{e,j} (\beta_{e,j}, \alpha_{j,i}) = \rho g Y_j (H_j - H_{m,j}) \left[\frac{a_3}{3} (H_j^2 + H_j H_{m,j} + H_{m,j}^2) + \frac{b_3}{2} (H_j + H_{m,j}) + c_3 \right] \sin \beta_{e,j} \cos (\alpha_{j,i} - \beta_{e,j}) \quad (27)$$

其中

$$\beta_{e,j} = \cot \left(\frac{Z_{e,j}}{X_{e,j}} \right) \quad (28)$$

式中: $\beta_{e,j}$ 为水体 e 重心和原点的连线与 x 轴所形成的夹角; $X_{e,j}$ 和 $Z_{e,j}$ 分别为水体 e 重心在 x 轴和 z 轴上的坐标。

4 水电能源形成模型

水体 s, m 和 e 的重力分量对机组 i 压力管道进水口处水体微元在压力管道入口处截面所形成的压强分别为

$$p_{s,j,i} = \frac{G_{s,j} (\beta_{s,j}, \alpha_{j,i})}{A_{j,i}} \quad (29)$$

$$p_{m,j,i} = \frac{G_{m,j} (\beta_{m,j}, \alpha_{j,i})}{A_{j,i}} \quad (30)$$

$$p_{e,j,i} = \frac{G_{e,j} (\beta_{e,j}, \alpha_{j,i})}{A_{j,i}} \quad (31)$$

考虑到机组沿坝体水平排列, 引入 $\delta_{s,j,i}$, $\delta_{m,j,i}$ 和 $\delta_{e,j,i}$ 分别代表经过梯级水电站 j 水体 s, m 和 e 的重心垂直于坝体的轴线与经过水体重心垂直于机组 i 所在铅直线的轴线之间的夹角。因此, s, m, e 层水体的重力对压力管道进水口处水体微元在压力管道

入口截面所形成的压力在压力管道方向的分量所做的功(水体微元所具有的能量)分别为

$$E'_{s\ j\ i}=\rho gY_j\left(\frac{a_1H_{s\ j}^3}{3}+\frac{b_1H_{s\ j}^2}{2}+c_1H_{s\ j}\right)\cdot\sin\beta_{s\ j}\cos(\alpha_{j\ i}-\beta_{s\ j})\cos^2\delta_{s\ j\ i}dx\quad(32)$$

$$E'_{m\ j\ i}=\rho gY_j(H_{m\ j}-H_{s\ j})\left[\frac{a_2}{3}(H_{m\ j}^2+H_{m\ j}H_{s\ j}+H_{s\ j}^2)+\frac{b_2}{2}(H_{m\ j}+H_{s\ j})+c_2\right]\cdot\sin\beta_{m\ j}\cos(\alpha_{j\ i}-\beta_{m\ j})\cos^2\delta_{m\ j\ i}dx\quad(33)$$

$$E'_{e\ j\ i}=\rho gY_j(H_j-H_{m\ j})\left[\frac{a_3}{3}(H_j^2+H_jH_{m\ j}+H_{m\ j}^2)+\frac{b_3}{2}(H_j+H_{m\ j})+c_3\right]\cdot\sin\beta_{e\ j}\cos(\alpha_{j\ i}-\beta_{e\ j})\cos^2\delta_{e\ j\ i}dx\quad(34)$$

设水电站*j*的发电机组*i*装机容量最大利用小时数为*T*_{max*j i*},则在水电站*N_{R j}*年调节期内*β*层水体在1 s中的分配量*E_{s j i}*、*E_{m j i}*、*E_{e j i}*分别为

$$E_{s\ j\ i}=\frac{\rho gY_j\left(\frac{a_1H_{s\ j}^3}{3}+\frac{b_1H_{s\ j}^2}{2}+c_1H_{s\ j}\right)}{3\ 600T_{\max\ j\ i}N_{R\ j}}\cdot\sin\beta_{s\ j}\cos(\alpha_{j\ i}-\beta_{s\ j})\cos^2\delta_{s\ j\ i}dx\quad(35)$$

$$E_{m\ j\ i}=\rho gY_j(H_{m\ j}-H_{s\ j})\left[\frac{a_2}{3}(H_{m\ j}^2+H_{m\ j}H_{s\ j}+H_{s\ j}^2)+\frac{b_2}{2}(H_{m\ j}+H_{s\ j})+c_2\right]\sin\beta_{m\ j}\cdot\cos(\alpha_{j\ i}-\beta_{m\ j})\cos^2\delta_{m\ j\ i}dx/(3\ 600T_{\max\ j\ i}N_{R\ j})\quad(36)$$

$$E_{e\ j\ i}=\rho gY_j(H_j-H_{m\ j})\left[\frac{a_3}{3}(H_j^2+H_jH_{m\ j}+H_{m\ j}^2)+\frac{b_3}{2}(H_j+H_{m\ j})+c_3\right]\cdot\sin\beta_{e\ j}\cos(\alpha_{j\ i}-\beta_{e\ j})\cos^2\delta_{e\ j\ i}dx/(3\ 600T_{\max\ j\ i}N_{R\ j})\quad(37)$$

5 电能计算

令压力管道*dt*时段水流量*Q_{G j i}* = $\frac{1}{4}\pi D_{j\ i}^2\frac{dx}{dt}$,则梯级水电站*j*的发电机组*i*的出力为

$$P_{G\ j\ i}=\frac{1}{4}\pi\rho gD_{j\ i}^2(H_j-H_{I\ j\ i})\lambda dx+\frac{1}{8g}\pi\rho gD_{j\ i}^2v_{I\ j\ i}^2dx+\frac{1}{4}\pi\rho gD_{j\ i}^2H_{I\ j\ i}dx+\frac{\rho gY_j\left(\frac{a_1H_{s\ j}^3}{3}+\frac{b_1H_{s\ j}^2}{2}+c_1H_{s\ j}\right)}{3\ 600T_{\max\ j\ i}N_{R\ j}}\cdot\sin\beta_{s\ j}\cos(\alpha_{j\ i}-\beta_{s\ j})\cos^2\delta_{s\ j\ i}dx+$$

$$\frac{\rho gK_1Y_j(H_{m\ j}-H_{s\ j})}{7\ 200N_{R\ j}T_{\max\ j\ i}}\cdot\sin\beta_{m\ j}\cos(\alpha_{j\ i}-\beta_{m\ j})\cos^2\delta_{m\ j\ i}dx+\frac{\rho gK_4Y_j(H_j-H_{m\ j})}{3\ 600N_{R\ j}T_{\max\ j\ i}}\sin\beta_{e\ j}\cos(\alpha_{j\ i}-\beta_{e\ j})\cdot\cos^2\delta_{e\ j\ i}dx-\frac{1}{4}\pi D_{j\ i}^2p_{O\ j\ i}dx-\frac{1}{8g}\pi\rho gD_{j\ i}^2v_{O\ j\ i}^2dx-\frac{1}{4}\pi\rho gD_{j\ i}^2H_{O\ j\ i}dx\quad(38)$$

进而得出梯级水电站*j*的发电机组*i*的出力为

$$P_{G\ j\ i}=9.8(H_j-H_{I\ j\ i}-p_{O\ j\ i})Q_{G\ j\ i}+\frac{4.9}{g}\cdot(v_{I\ j\ i}^2-v_{O\ j\ i}^2)Q_{G\ j\ i}+9.8(H_{I\ j\ i}-H_{O\ j\ i})\cdot Q_{G\ j\ i}+\frac{39.2Y_j\left(\frac{a_1H_{s\ j}^3}{3}+\frac{b_1H_{s\ j}^2}{2}+c_1H_{s\ j}\right)}{\pi D_{j\ i}^2(3\ 600T_{\max\ j\ i}N_{R\ j})}\cdot\sin\beta_{s\ j}\cos(\alpha_{j\ i}-\beta_{s\ j})\cos^2\delta_{s\ j\ i}Q_{G\ j\ i}+\frac{39.2K_2Y_j(H_{m\ j}-H_{s\ j})}{\pi D_{j\ i}^2(3\ 600T_{\max\ j\ i}N_{R\ j})}\cdot\sin\beta_{m\ j}\cos(\alpha_{j\ i}-\beta_{m\ j})\cos^2\delta_{m\ j\ i}Q_{G\ j\ i}+\frac{39.2K_4Y_j(H_j-H_{m\ j})}{\pi D_{j\ i}^2(3\ 600T_{\max\ j\ i}N_{R\ j})}\cdot\sin\beta_{e\ j}\cos(\alpha_{j\ i}-\beta_{e\ j})\cos^2\delta_{e\ j\ i}Q_{G\ j\ i}\quad(39)$$

式中:*v_{I j i}*为压力引水管入口处的水流流速;*v_{O j i}*、*p_{O j i}*、*H_{O j i}*分别为压力管道出水口处的水流流速、压强和高程。

参考文献：

- [1]周孝信,曹一家.我国发展大规模非水可再生能源发电的前景[J].电力科学与技术学报,2008,23(1):2-7.
- [2]宗航,李承军,周建中.POA算法在梯级水电站短期优化调度中的应用[J].水电能源科学,2003,21(1):46-48.
- [3]海陵春.水电站水能设计[J].广西电力工程,1996(2):54-57.
- [4]李俊杰.黄洋河供水发电工程水能计算的简捷方法[J].小水电,1997(6):25-27.
- [5]冯永健.小水电水能计算的简化等流量法[J].小水电,2003(3):12-15.
- [6]江祖溪.有年调节水库的小型水电站的水能计算简便方法[J].小水电,1997(4):20-21.
- [7]刘小林.模拟曲线方程在水文水能计算中的应用[J].小水电,1997(6):28-30.
- [8]颜何生.二元三点拉格朗日插值法在水能计算中的应用[J].中国科技信息,2005(13):86,92.

(收稿日期 2009-04-02 编辑 骆超)