

基于内特性法的水轮机完整综合特性曲线

朱艳萍 时晓燕 周凌九

(中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要 为解决目前水轮机过渡过程计算中确定水轮机边界条件时通常使用的外特性法和内特性法的不足之处, 结合这 2 种方法的优点, 提出一种在水轮机过渡过程计算中处理水轮机边界条件的方法, 即根据综合特性曲线的数据, 利用统计分析和水轮机基本理论公式, 计算水轮机基于内特性解析方程的基本参数, 如出流角 α 、转轮出口安放角 β 、转轮出口相对宽度 b_2 、导叶相对高度 b_0 、转轮出口相对半径 r_2 , 在特性曲线上的规律。将求得的结果用于我国某电站机组用负荷过渡过程的计算, 得出了变量随时间的变化规律, 计算结果与实际情况相符合。这种外特性法和内特性法相结合的方法, 弥补了单独采用内特性法或外特性法计算特性曲线存在的问题, 而且对小开度区特性曲线的研究具有一定的参考价值。

关键词 特性曲线; 统计分析; 水轮机; 比转速

中图分类号 TK 733.1

文章编号 1007-4333(2006)05-0088-04

文献标识码 A

Study on complete characteristic curves based on internal characteristics

Zhu Yanping, Shi Xiaoyan, Zhou Lingjiu

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing, 100083)

Abstract A simplified method was proposed to deal with the boundary condition at the turbine unit for transient calculation. This method is based on the statistical analysis of turbine hill chart and the Euler equation for water turbines. According to the Euler equation, the basic geometry parameters of the turbine, such as guide vane opening α , blade outlet angle β , the relative blade width of outlet b_2 , the relative height of wicket gate b_0 and the relative turbine exit radius r_2 are obtained through curvilinear regression of the water turbine hill charts. As an example, the method was used to determine the boundary condition during transient calculation for a power station equipped with two Francis turbines and a surge tank. The simulated results are reasonable. The method is effective for estimating turbine characteristics under small opening conditions.

Key words characteristics curves; statistical analysis; hydraulic turbine; specific speed

水轮机及其装置过渡过程中的水力参数和运行参数的变化, 直接影响机组的运行安全性和总体经济性能。在水轮机过渡过程的计算中, 水轮机边界条件通常有 2 种处理方法: 一种是利用综合特性曲线外延或内插来取得其他部分的特性曲线, 由此获得开度、水头、流量、转速、力矩等参数间的静态关系, 目前国内外研究大多采用这种方法^[1-5]; 另一种是由常近时提出的“内特性解析法”^[6], 其核心思想

是从叶片式水力机械的广义基本方程出发, 推导流量、力矩与开度、水头、转速等参数的解析表达式, 将其作为水轮机边界条件。这 2 种算法在工程上都有成功的算例。由于水轮机的综合特性曲线一般缺乏小开度的实测数据, 因此前者需要对水轮机的模型特性曲线进行外插处理, 具体方法有图解法、列表函数插值法、拟合多项式算法和神经网络法; 其中, 神经网络法比其他外特性法的计算精度高, 近年来

收稿日期: 2006-03-22

作者简介: 朱艳萍, 硕士研究生; 时晓燕, 副教授, 博士, 通讯作者, 主要从事流体力学、地下热泵、流体机械及工程研究, E-mail: sxy36@163.com

应用广泛^[37-51]。常江等人利用前馈神经网络强大的非线性逼近能力,建立水轮机飞逸特性神经网络模型以及描述大开度及小开度下流量特性和效率特性的综合特性神经网络模型 NZZM,该方法在大开度区的计算精度比较高^[41];但这类方法仅从曲线拟合和曲线趋势预测的角度以纯数学的方法考虑特性曲线的延扩,没有考虑水轮机的基本工作原理,如果经验不足而处理不当,可能导致不合理的计算结果^[6]。从这个角度而言,“内特性解析法”具有严谨的推导和明确的物理意义,但计算时需要首先确定水轮机的基本几何参数,如导叶高度、叶片安放角、叶片进出口平均半径等,而在水电站规划和可行性研究阶段,或进行水轮机选型时,均没有水轮机的具体几何参数。过渡过程计算中对这些参数的选取在很大程度上也依赖于经验^[7]。

从水轮机的工作原理知,水轮机的几何参数决定了水轮机在不同工况下的内部流态,从而确定了水轮机的特性曲线^[8],因此在水轮机的特性曲线与水轮机的几何参数间存在必然的联系,故本研究拟结合以上 2 种方法的特点,以混流式水轮机为研究对象,根据混流式水轮机的特点和综合特性曲线数据^[9],利用水轮机的基本原理,统计转轮基本参数在综合特性曲线上的变化规律以及几何参数与开度的关系——这种方法能使小开度区特性得到很好的表达^[10-11],然后将统计结果代入内特性解析式中;以弥补分别采用外特性或内特性法计算特性曲线的不足,并通过实例计算某一工况下机组发生甩负荷过程中转速、流量、开度、力矩、涌浪高和水头的最大值,考察本方法的可行性。

1 根据已有模型特性曲线确定内特性法的基本参数

根据文献[6]中内特性法的基本原理,在稳定工况下,水轮机轴端力矩

$$M = Q (V_{u1} r_1 - V_{u2} r_2) \quad (1)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; V_{u1} 和 V_{u2} 分别为进、出口绝对速度的圆周分量, (m/s) ; r_1 和 r_2 分别为转轮进、出口水流相对转轴的半径, m 。取转轮中间流面翼栅的内特性参数,可得到水轮机有效水头的解析表达式

$$H_{eT} = H_T = \frac{g}{\left[\frac{\cot \alpha}{2 b_0} + \frac{\cot \alpha_2}{2 b_2} \right] Q - r_2^2} \quad (2)$$

式中: H_{eT} 和 H 分别为有效水头和设计水头, m ; T

为水轮机水力效率; ω 为圆周速度, rad/s ; α 和 α_2 分别为导叶出流角和出口液流角, $(^\circ)$; b_0 为导叶高度, m ; b_2 为转轮中间流面翼栅出口点的过水断面宽度, m 。根据水力机械参数的相似换算公式,式(2)可写成

$$Q_1 = \left[\tau + \frac{1}{g} \left(\frac{\omega}{30} \right)^2 r_2^2 n_1^2 \right] / \left[\frac{\cot \alpha}{2 b_0} + \frac{\cot \alpha_2}{2 b_2} \right] \quad (3)$$

$$M_1 = \left[\frac{\cot \alpha}{2 b_0} + \frac{\cot \alpha_2}{2 b_2} \right] Q_1^2 - \frac{\omega^2}{30} r_2^2 Q_1 n_1 \quad (4)$$

式中: Q_1 为单位流量, m^3/s ; n_1 为单位转速, r/min ; M_1 为单位力矩, $N \cdot m$ 。水轮机水力效率 τ 与效率之间存在一定比例关系,故 Q_1 和 M_1 的解析表达式可以写成

$$Q_1 = Q(\bar{b}_0, \bar{b}_2, \bar{r}_2, \alpha, \alpha_2, n_1) \quad (5)$$

$$M_1 = M(\bar{b}_0, \bar{b}_2, \bar{r}_2, \alpha, \alpha_2, Q_1, n_1) \quad (6)$$

式中: \bar{b}_0 为导叶相对高度, $\bar{b}_0 = b_0/D$; D 为转轮直径, m ; \bar{b}_2 为转轮相对中间流面翼栅出口点的过水断面宽度, $\bar{b}_2 = b_2/D$; \bar{r}_2 为转轮出口相对半径, $\bar{r}_2 = r_2/D$; 首先确定式(5)和(6)中的参数值与比转速之间的关系。

1) \bar{b}_0 、 \bar{b}_2 、 \bar{r}_2 的求取。根据文献[8]中不同比转速混流式转轮外形尺寸估算导叶相对高度 \bar{b}_0 、转轮出口相对宽度 \bar{b}_2 、转轮出口相对半径 \bar{r}_2 ,建立数据库,结果见图 1。

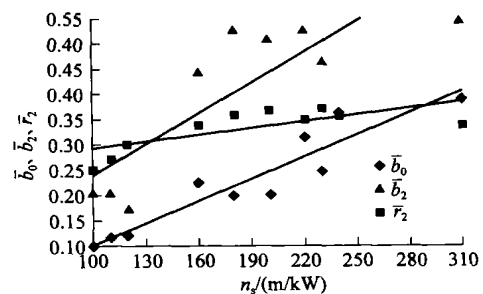


图 1 混流式转轮相对几何参数 \bar{b}_0 、 \bar{b}_2 、 \bar{r}_2 与比转速 n_s 的关系

Fig. 1 Relation between \bar{b}_0 , \bar{b}_2 , \bar{r}_2 and n_s of francis runner

2) 导叶出流角 α 。根据目前正在使用的不同比转速对称、非对称导叶布置图,查出对称、非对称导叶叶形断面尺寸系列表中的参数,计算混流式模型水轮机不同比转速导叶出流角 α 与导叶开度 a_{0M} 的关系曲线,建立数据库。图 2 示出对称和正曲度 2 种导叶翼型导叶出流角与导叶开度的关系曲线。

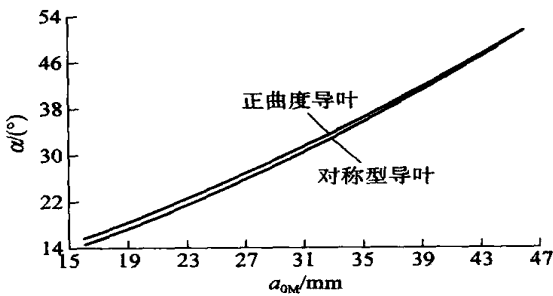


图2 导叶出流角与开度 a_{0M} 的关系

Fig. 2 Relationship between vane entrance flow angle and opening a_{0M}

3) 出口安放角 β_2 。根据模型水轮机特性曲线上所有效率与开度交点的数据,以及前面计算得到的导叶出流角与开度 a_{0M} 的关系曲线,由水轮机相似换算公式和速度三角形公式,求得特性曲线上 β_2 的值,建立数据库。计算过程中转轮参数选取图1中的数据。例如比转速 $n_s = 240 \text{ m} \cdot \text{kW}$ 时 β_2 的取值为 $18 \sim 21^\circ$,从结果可知,在特性曲线上 β_2 值的变化不大,所以应用内特性解析方程求解时, β_2 取所求值的平均值进行计算, $\beta_2 = 19.44^\circ$ 。

4) 转轮出口相对过水断面宽度 \bar{b}_2 和相对半径 \bar{r}_2 。根据计算得到的出流角 α 和出口安放角 β_2 ,利用水轮机基本公式,计算 \bar{b}_2 和 \bar{r}_2 。 \bar{r}_2 在特性曲线上变化不大,所以在过渡过程计算时可以直接使用图1中的值。 \bar{b}_2 和 a_{0M} 可以用多项式曲线来拟合,结果见图3。

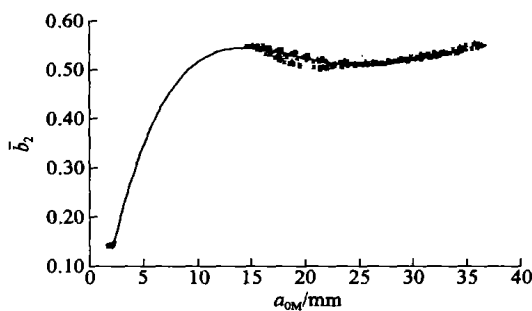


图3 比转速为240时转轮出口相对过水断面宽度 \bar{b}_2 与开度 a_{0M} 的关系

Fig. 3 Curve between \bar{b}_2 and opening a_{0M} at specific speed of 240

5) 空载开度 a_x 和飞逸工况点的确定。混流式水轮机等单位转速下空载开度 a_x 取特性曲线效率最大值的点所对应开度值的比值,一般取 $0.05 \sim 0.12$ 。飞逸工况点根据模型转轮的飞逸特性曲线 $n_{IP} - a_0, Q_{IP} - a_0$ 来确定。

6) 效率 η 与导叶开度 a_{0M} 的关系 $\eta = \eta(a_{0M})$ 的

确定。从图2可知,给定导叶开度 a_{0M} ,可以求出对应的出流角 α 。利用已知特性曲线上的数据,找出等单位转速时 $a_{0M} = a(Q_1)$ 和 $\eta = \eta(Q_1)$ 的关系,推导效率 η 与 a_{0M} 的关系,建立数据库,根据 η 与 a_{0M} 的关系,求出等单位转速下效率最大点处的值,以及效率和开度与最大值的相对值。图4为比转速为240时相对效率 $\bar{\eta}$ 与相对开度 \bar{a}_{0M} 的关系,以及统计的相对效率与相对开度的关系曲线。

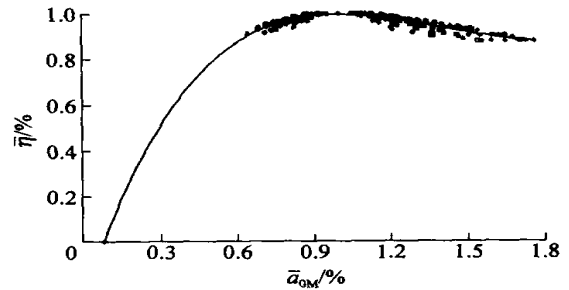


图4 比转速为240时相对效率 $\bar{\eta}$ 与相对开度 \bar{a}_{0M} 的关系

Fig. 4 Relationship between relative efficiency and relative opening at specific speed of 240

2 计算实例

采用内特性法的理论公式计算甩负荷过程运行参数随时间的变化情况,公式中转轮的几何参数取用前面计算出来的数值。基本参数取用我国某电站的数据:装机台数2台,水头 $H_{\max} = 41.4 \text{ m}$, $H_{\min} = 32.8 \text{ m}$, $H_t = 35.5 \text{ m}$,发电机转动惯量为 $1000 \text{ t} \cdot \text{m}^2$,额定转速 $n = 214.3 \text{ r/min}$,额定流量 $Q = 47.21 \text{ m}^3/\text{s}$,发电机额定出力 15 MW ,超发出力 16 MW 。由此计算得到水轮机额定出力 15.5 MW ,超发出力 16.5 MW ,机组安装高程 335 m ,引水隧洞长度 1232.12 m ,管径 6.0 m ,钢管长度 215.55 m ,管径 5.0 m ,蜗壳长度 21 m ,管径 3.4 m ,尾水管长度 12.5 m ,出口方型 $7.404 \text{ m} \times 3.28 \text{ m}$ (宽 \times 高),调压井直径 18.4 m ,导叶关闭按一段直线关闭,关闭时间 8 s 。

本文中给出工况为上游水位 390.89 m ,下游水位 350.9 m ,2台机同时甩负荷 16.55 MW 时的过渡过程历程情况。此工况下甩负荷计算过程各参数的最大值见表1,可知最大转速上升约 51.2% 。

表1 甩负荷计算过程中参数出现的最大值

Table 1 Max. of parameter on calculate of load rejection					
转速 n (r/min)	流量 (m^3/s)	初始开度 (mm)	转轮力矩 M ($\text{kN} \cdot \text{m}$)	调压井涌浪高 (m)	涡壳前水头 (m)
323.99	48.2	200	736.76	400.09	81.08

3 结 论

利用混流式模型水轮机综合特性曲线的数据计算内特性方程基本参数的方法,是一种综合运用内特性法和外特性法求解过渡过程计算中边界条件的方法,能很好解决单独使用内特性法或外特性法计算过渡过程存在的一些不足;而且由于在参数统计过程中使用了空载开度和飞逸工况点等边界条件,所以对小开度区特性曲线的研究具有一定意义。运用该方法对我国某电站转速、初始开度、转轮力矩、水头等运行参数随时间变化情况的计算结果与实际结果相符合,该方法可应用于实际工程计算。

参 考 文 献

- [1] Nicolet C, Avellan F, Allenbach P, et al. New tool for the simulation of transient phenomena in Francis turbine power plants[C]. Proceedings of the st IAHR Symposium on Hydraulic and Systems, Lausanne: IAHR, 2002
- [2] Boka P, Halasz G. Dynamic behaviour of centrifugal pumps[C]. Proceedings of the st IAHR Symposium on Hydraulic and Systems, Lausanne: IAHR, 2002
- [3] 唐岳灏, 杨建东. Fortran 和 MATLAB 的混合编程在水轮机特性曲线处理中的应用[J]. 武汉大学学报, 2002, 7(4): 45~49
- [4] 常江, 陈光大. 轴流转桨式水轮机神经网络建模与非线性仿真[J]. 中国农村水利水电, 2004(7): 82~85
- [5] 程芳, 王铁生, 陈守伦. 应用神经网络技术拟合水泵的特性曲线[J]. 中国农村水利水电, 2003(7): 44~45
- [6] 常近时. 水力机械装置过渡过程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005: 15~328
- [7] 赵顺萍. 混流式水泵水轮机全特性曲线的理论绘制及其应用[D]. 北京: 北京农业大学, 1994
- [8] Govatsos P A, Papantonis D E. A characteristic based method for the calculation of three-dimensional incompressible, turbulent and steady flows in hydraulic turbomachines and installations[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2000, 34(9): 1~30
- [9] 哈尔滨大电机研究所. 水轮机设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1976: 21~65
- [10] 陈乃祥, 张扬军, 祝宝山. 水泵水轮机全特性的新表达方式和复合工况计算[J]. 清华大学学报, 1996, 36(7): 62~66
- [11] 杨琳, 陈乃祥. 水泵水轮机转轮全特性与蓄能电站过渡过程的相关性分析[J]. 清华大学学报, 2003, 43(10): 1424~1427