

文章编号:1671-6833(2003)04-0001-05

# 水轮机传递系数计算方法的比较研究

刘宪林<sup>1</sup>, 高慧敏<sup>2</sup>

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘 要:** 介绍了基于模型综合特性曲线的外特性法、基于内特性解析模型的内特性法和基于简化非线性模型的简易解析法等 3 种混流式水轮机传递系数的计算方法, 分析比较了它们的特点和计算结果的差异, 指出三种方法计算所得传递系数, 在额定工况点附近数值较接近, 而在轻载工况下则差别较大. 所求取的传递系数曲线对认识其变化规律有所裨益.

**关键词:** 水轮机; 传递系数; 线性化模型; 稳定性

**中图分类号:** TK 730.1

**文献标识码:** A

## 0 引言

水轮机的动态特性非常复杂, 通常采用水轮机稳态特性近似替代动态特性研究水轮发电机组的稳定性和动态特性<sup>[1]</sup>. 水轮机的稳态特性具有很强的非线性, 在工程实际中一般采用其线性化表达式. 水轮机线性化模型中的传递系数对于水轮发电机组的稳定性和动态特性的分析计算结果有直接的影响. 目前, 在水轮机传递系数计算方面存在下述问题: 基准系统不统一, 不同文献的传递系数算式和数值不一致, 可比性差; 一般针对个别工作点进行计算, 对传递系数关于运行工况的变化态势缺乏全面认识; 主要采用基于模型综合特性曲线的所谓外特性法进行计算, 由于没有其它算法与其比较, 难以对其准确程度作出评价. 本文针对这些问题开展研究, 采用外特性法、基于水轮机内特性解析模型的内特性法和基于水轮机简化非线性模型的简易解析法共 3 种方法, 计算不同工作点的传递系数, 给出了传递系数关于水轮机出力的变化曲线, 分析了各种算法的特点, 比较了它们之间的差异.

## 1 水轮机的传递系数

混流式水轮机稳态特性表达式如式(1)、(2)所示<sup>[1]</sup>:

$$m_t = f(y, \omega, h) \quad (1)$$

$$q = g(y, \omega, h) \quad (2)$$

式中: 各参数均为标么值;  $m_t$  为机械力矩;  $q$  为流量;  $y$  为导叶开度;  $\omega$  为角速度;  $h$  为工作水头.

将式(1)和(2)在工作点 0 处线性化得

$$\Delta m_t = e_{m_y} \Delta y + e_{m_\omega} \Delta \omega + e_{m_h} \Delta h \quad (3)$$

$$\Delta q = e_{q_y} \Delta y + e_{q_\omega} \Delta \omega + e_{q_h} \Delta h \quad (4)$$

式中, 线性化系数  $e_{m_y} = (\partial m_t / \partial y)|_0$ ,  $e_{m_\omega} = (\partial m_t / \partial \omega)|_0$ ,  $e_{m_h} = (\partial m_t / \partial h)|_0$ ,  $e_{q_y} = (\partial q / \partial y)|_0$ ,  $e_{q_\omega} = (\partial q / \partial \omega)|_0$ ,  $e_{q_h} = (\partial q / \partial h)|_0$  统称为水轮机的传递系数, 它们的数值与水轮机的结构参数和工作点有关.

式(3)和(4)的变量基准值在文献中有不同的选取方案, 如导叶开度以其最大值为基准, 其余变量以额定参数为基准的方案和以工作点运行参数值为基准的方案等. 本文各运行变量均以水轮机的额定参数为基准, 这种基准系统的特点是变量标么值能够直观地反映运行参数相对于水轮机额定参数的大小.

## 2 传递系数计算的外特性法

水轮机模型综合特性曲线绘制在以单位转速  $N_1'(r/min)$  和单位流量  $Q_1'(m^3/s)$  为坐标的直角坐标系下, 包括等效率曲线和等导叶开度曲线等. 原型水轮机与模型水轮机间的标么值关系式为

$$m_m = q_1 h \eta / n_1' \quad (5)$$

$$q = q_1 \sqrt{h} \quad (6)$$

收稿日期: 2003-06-19; 修订日期: 2003-08-21

**作者简介:** 刘宪林 (1955-), 男, 河南省洛阳市人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事水电系统动态过程仿真和电力系统分析与控制方面的研究.

式中： $\eta$  为水轮机的效率； $q_1'$  和  $n_1'$  分别为  $Q_1'$  和  $N_1'$  的标么值。

将式 (5) 和 (6) 应用于式 (3) 和 (4) 中，可得

$$e_{ny} = \left. \frac{h_0}{n_{10}'} \frac{\partial (q_1' \eta)}{\partial y} \right|_0 \tag{7}$$

$$e_{nn} = \left. \sqrt{h_0} \frac{\partial (q_1' \eta / n_1')}{\partial n_1'} \right|_0 \tag{8}$$

$$e_{nh} = \left. \frac{\partial (q_1' \eta / n_1'^3)}{\partial (1/n_1'^2)} \right|_0 \tag{9}$$

$$e_{qy} = \left. \sqrt{h_0} \frac{\partial q_1'}{\partial y} \right|_0 \tag{10}$$

$$e_{qn} = \left. \frac{\partial q_1'}{\partial n_1'} \right|_0 \tag{11}$$

$$e_{qh} = \left. \frac{1}{n_{10}'} \frac{\partial (q_1' / n_1'^2)}{\partial (1/n_1'^2)} \right|_0 \tag{12}$$

采用外特性法计算水轮机的传递系数，一般采用正交网格法将模型综合特性曲线离散化<sup>[3]</sup>，各网格节点的  $n_1'$ 、 $q_1'$ 、 $\eta$ 、 $y$  的数值可直接从曲线上查得或用内插法求出，并以数组形式存入计算机。

根据给定的运行参数，可在模型综合特性曲线上确定工作点 0 及其穿越该点的等转速线和等导叶开度线。6 个传递系数中， $e_{ny}$  和  $e_{qy}$  在等转速线上求取，其余 4 个系数在等导叶开度线上求取。设该等转速线与左右两侧的垂直网格线的交点为 1 和 2，等导叶开度线与上下水平网格线的交点为 3 和 4，如图 1 所示。基于离散存储的水轮机特性曲线，采用插值算法求出点 3 和 4 处的单位流量、效率以及点 1 和 2 处的导叶开度、效率，便可通过式 (7)~(12) 的近似差分算式 (13)~(18) 求得水轮机的传递系数：

$$e_{ny} = \frac{(q_1' n_1')_2 - (q_1' \eta)_1}{y_2 - y_1} \times \frac{h_0}{n_{10}'} \tag{13}$$

$$e_{nn} = \frac{\left( \frac{q_1' \eta}{n_1'} \right)_4 - \left( \frac{q_1' \eta}{n_1'} \right)_3}{n_{14}' - n_{13}'} \times \sqrt{h_0} \tag{14}$$

$$e_{nh} = \frac{\left( \frac{q_1' \eta}{n_1'^3} \right)_4 - \left( \frac{q_1' \eta}{n_1'^3} \right)_3}{\frac{1}{n_{14}'^2} - \frac{1}{n_{13}'^2}} \times \frac{n_{1R}'}{Q_{1R}' \eta_0} \tag{15}$$

$$e_{qy} = \frac{q_{12}' - q_{11}'}{y_2 - y_1} \times \sqrt{h_0} \tag{16}$$

$$e_{qn} = \frac{q_{14}' - q_{13}'}{n_{14}' - n_{13}'} \tag{17}$$

$$e_{qh} = \frac{\left( \frac{q_1'}{n_1'^3} \right)_4 - \left( \frac{q_1'}{n_1'^3} \right)_3}{\frac{1}{n_{14}'^2} - \frac{1}{n_{13}'^2}} \times \frac{1}{n_{1R}' Q_{1R}'} \tag{18}$$

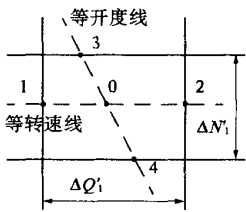


图 1 模型综合特性曲线正交网格

Fig. 1 Orthogonal grids of model synthetical characteristics curves of hydroturline

式中，带下标  $R$  的变量为额定工况下的有名值，其余变量取标么值。

模型综合特性曲线只是原型水轮机特性的近似描述，特性曲线的条数也有限，而且小导叶开度即水轮机轻载时的特性曲线也难以得到。同时，特性曲线的离散化处理和插值计算也存在误差。因此外特性法所得传递系数的数值可能出现跳跃；轻载工况下的传递系数还需要通过外插法求取，往往误差很大。此外，模型综合特性曲线离散化的工作量也较大。

对传递系数的离散值采用二次函数进行曲线拟合，并将拟合曲线延拓到轻载工况，这样既解决了传递系数的跳跃现象，也可以得到轻载工况的传递系数近似值。

4 传递系数计算的内特性法

文献[3]提出了基于原型水轮机基本结构参数的水轮机内特性解析模型，其中的混流式水轮机有名值稳态基本方程式为

$$Q = \frac{\Omega^2 + \frac{9.8 \eta H}{\Omega}}{\left[ \frac{2 \pi b_0 \alpha}{2 \pi b_0} + r \frac{2 \pi b_0 \beta_0}{F} \right]} \tag{19}$$

$$M_t = Q \left[ \left[ \frac{2 \pi b_0 \alpha}{2 \pi b_0} + r \frac{2 \pi b_0 \beta_0}{F} \right] Q - \Omega^2 \right] \tag{20}$$

式中： $H$  为水轮机工作水头，m； $M_t$  为稳态力矩，N·m； $\Omega$  为转子角速度，rad/s； $Q$  为流量，m<sup>3</sup>/s； $\alpha$  为导叶出流角，rad，它们均为运行参数。 $b_0$  为导叶高度，m； $F$  为转轮出口面积，m<sup>2</sup>； $r$  为转轮中间流面半径，m； $\beta_0$  为转轮中间流面出口角，rad，它们均是水轮机的结构参数。

将式 (19) 和式 (20) 在工作点处线性化并标么

化,便得到基于水轮机内特性描述的传递系数计算公式<sup>[3,4]</sup>:

$$e_{qy} = \frac{a}{1+a-c} \cdot \frac{q_0^2 \csc^2 \alpha_0}{\omega_0} \cdot \frac{Y_R Q_R}{2 \pi \sigma r^2 k_0 \omega_R} \quad (21)$$

$$e_{qw} = \frac{a-1}{1+a-c} \cdot \frac{q_0}{\omega_0} \quad (22)$$

$$e_{qh} = \frac{1}{1+a-c} \cdot \frac{q_0}{h_0} \quad (23)$$

$$e_{mh} = b e_{qy} \quad (24)$$

$$e_{m\omega} = b e_{qx} - \frac{m_0}{\omega_0} \quad (25)$$

$$e_{mh} = b e_{qh} + \frac{m_0}{h_0} \quad (26)$$

式中:  $a = \frac{\omega^2}{\eta} \cdot \frac{r^2 \omega_R^2}{9.81 H_R}$ ;  $b = (1+c) \frac{m_0}{q}$ ;  $r = 0.353 D_1$ ;  $c = \frac{2q(q-q^*)Q_R^2}{2d\eta_0-(q_0-q^*)^2Q_R^2}$ ;  $k_0 = (dy/d\alpha)_0$ ;  $d$  为与通流元件几何参数有关的常数;  $D_1$  为水轮机转轮直径, m; 下标 \* 表示水轮机的最优工况.

式(21)中  $k_0$  的求取利用了导叶开度  $Y$  与导叶出流角  $\alpha$  间的名值关系式<sup>[3]</sup>:

$$Y = D \sin \left[ \frac{\beta}{2} \right] \sin \left[ \alpha + \frac{\beta}{2} \right] - L \sin(\beta/2) \quad (27)$$

式中:  $D_0$  为导叶分布圆直径, m;  $L$  为导叶宽度,  $L = \pi D_0 / Z_0$ , m;  $\beta$  为两导叶的径向夹角,  $\beta = 2\pi / Z_0$ , rad;  $Z_0$  为导叶个数.

$c$  的求取利用了混流式水轮机效率与流量的近似关系式:

$$\eta = \eta_* - \frac{(q-q^*)^2 Q_R^2}{2d} \quad (28)$$

该式中  $d$  值的确定有一定难度. 式(28)在导叶小开度工况下的误差较大.

内特性法计算传递系数, 无需模型综合特性曲线, 只需与水轮机结构有关的参数, 且可以很方便地计算小开度时的传递系数, 但是有些结构参数不易取得, 对小开度的效率特性的描述不够精确, 存在一定误差.

4 传递系数计算的简易解析法

标么形式的水轮机简化非线性模型为<sup>[6,7]</sup>

$$m_t = (p - p_L) / \omega \quad (29)$$

$$p = qh \quad (30)$$

$$q = \sqrt{h} y / (1 - y_{NL}) \quad (31)$$

$$q_L = q_{NL} h \quad (32)$$

$$q_{NL} = \sqrt{h} y_{NL} / (1 - y_{NL}) \quad (33)$$

式中,  $q_{NL}$  为水轮机的空载流量;  $p_L$  为水轮机的损耗功率;  $y_{NL}$  为导叶空载开度.

将简化非线性模型在工作点线性化即得

$$e_{ny} = h_0 \sqrt{h_0} / (\omega_0 (1 - y_{NL})) \quad (34)$$

$$e_{m\omega} = -(q_0 - q_{NL}) h_0 / \omega_0^2 \quad (35)$$

$$e_{mh} = (q_0 - q_{NL}) / \omega_0 + h_0 y_0 / (2 \omega_0 (1 - y_{NL}) \sqrt{h_0}) \quad (36)$$

$$e_{qy} = \sqrt{h_0} / (1 - y_{NL}) \quad (37)$$

$$e_{qw} = 0 \quad (38)$$

$$e_{qh} = y_0 / (2 (1 - y_{NL}) \sqrt{h_0}) \quad (39)$$

若忽略损耗功率  $p_L$ , 水轮机简化非线性模型蜕化成为所谓理想水轮机模型, 如式(40)和(41)所示:

$$q = y \sqrt{h} \quad (40)$$

$$m_t = \frac{qh}{\omega} \quad (41)$$

在额定工况点线性化可得:  $e_{qy} = 1, e_{q\omega} = 0, e_{qh} = 0.5, e_{ny} = 1, e_{m\omega} = -1, e_{mh} = 1.5$ . 这组传递系数在电力系统稳定分析中应用非常普遍.

利用水轮机简化非线性模型计算传递系数, 只需知道导叶空载开度和额定开度, 非常简便, 也能够计算小开度的传递系数. 但由于其缺少对水轮机内部结构的描述, 所得传递系数的不够准确, 如  $e_{ny}, e_{qy}$  的数值与导叶开度无关以及  $e_{qw}$  恒等于 0 等, 结果就不够合理.

5 算例

采用前述三种方法计算 HL240-IJ-140 型水轮机的传递系数与功率的关系曲线. 水轮机基本参数为:  $D_1 = 1.4 \text{ m}, b_0 = 0.511 \text{ m}, Z_0 = 16, D_0 = 1.6 \text{ m}, n_R = 300 \text{ r/min}, Q_R = 12.75 \text{ m}^3/\text{s}, H_R = 30.5 \text{ m}, P_R = 3376 \text{ kW}, Y_R = 0.137 \text{ m}, Y_{NL} = 0.02 \text{ m}$ . 水轮机工作于额定水头. 计算结果如图 2 所示.

就本算例而言, 三种方法计算所得的传递系数在整体上有比较明显的差别, 但在额定工况点附近数值比较接近. 内特性法与外特性法所得结果, 除  $e_{q\omega}$  之外, 其余 5 个传递系数的变化规律相近. 而简易解析法在给定水头下, 所得  $e_{qy}, e_{q\omega}, e_{ny}$  三者均为常数, 这显然不够合理, 而其余 3 个传递系数的变化规律与内特性法和外特性法所得结果类似.

需要说明的是,图 2 中外特性法所得曲线,是对传递系数的离散数据进行曲线拟合并向小导叶开度延拓后的结果.在进行曲线拟合前,外特性法所得传递系数的离散性是比较严重的,即使在额定工况点附近也是如此.因此,将插值计算所得传递系数直接用于水电系统稳定性和动态过程计算是不可靠的.对离散的传递系数数据进行曲线拟合和延拓不但解决了求取小导叶开度传递系数的问题,而且对于保证水电系统各种工况下的稳定性和动态过程计算的质量也是必要的.

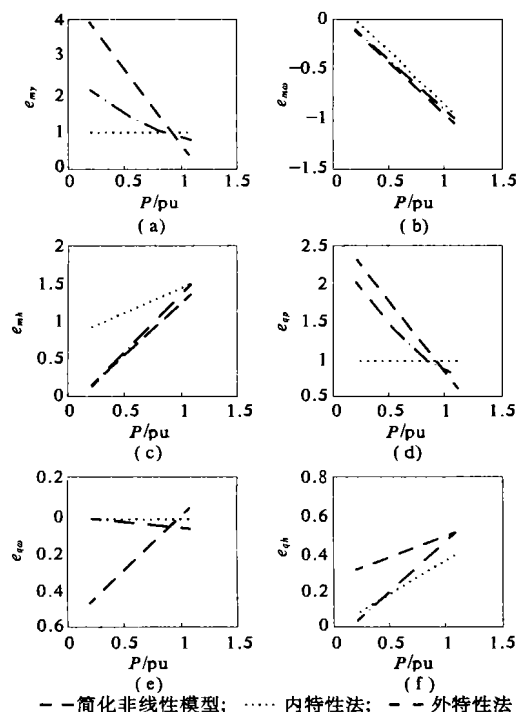


图 2 水轮机传递系数曲线

Fig. 2 Curves of hydropurline transfer coefficient

另外,由外特性法和内特性法所得结果可见,传递系数的取值范围并不是很小.因此,不区分运行工况,将理想水轮机额定工况下的传递系数用于水轮发电机各种工况下的稳定性和动态过程计算是很粗略的,可能会导致不正确的结果.

## 6 结论

(1) 外特性法利用模型综合特性曲线求取传

递系数,只能对大导叶开度工况进行计算,且所得数据离散性大,不宜直接使用,需对离散数据进行曲线拟合和外插延拓,以消除数据跳跃并获取小导叶开度工况下的传递系数.外特性法特性曲线离散化的工作量较大,小导叶开度工况下的传递系数误差也较大.

(2) 内特性法利用水轮机内特性解析模型计算传递系数,只需知道水轮机的有关结构参数即可通过解析算式完成计算.但水轮机的结构参数有时难以查取,而且效率特性描述的准确性对传递系数的误差有直接的影响.

(3) 利用水轮机简化非线性模型计算传递系数,只需知道导叶空载开度和额定开度即可,简单方便,易为电力系统稳定研究人员所接受.但由于模型的简化,使得流量与导叶开度、流量与角速度以及力矩与导叶开度增量间的关系粗略为线性关系,与内特性法和外特性法的结果有显著的差别.

(4) 三种方法计算所得传递系数,在额定工况点附近数值接近,在轻载工况下差别较大.三种方法所需原始资料和计算难度也有所不同,应根据原始资料和课题特点等具体情况选择合适的方法.

## 参考文献:

- [1] 沈祖诒. 水轮机调节[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [2] 刘玉梅, 王金华. 水轮机被控系统的特征及其数学模型的建立[J]. 大电机技术, 1999, (5): 44~50.
- [3] 寿梅华, 张秀彬. 水轮机线性控制系统动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 1984, 4(2): 48~57.
- [4] 刘宪林. 基于同步机和水系统详细模型的电力系统小扰动稳定研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
- [5] 严亚芳. 水力机组暂态特性及参数优化[M]. 北京: 水利水电出版社, 1995.
- [6] IEEE Working Group. Hydraulic turbine and turbine control model for system dynamic studies[J]. IEEE Trans on Power System, 1997, 7(1): 12~14.
- [7] SMITH J R. Assessment of hydraulic models for power system studies[J]. IEE Proc C, 1983, 130(1): 1~7.

## Comparison and Study of Algorithms on Hydropurline Transfer Coefficients

LIU Xian-lin<sup>1</sup>, GAO Hui-min<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. School of Electrical Engineering of Zhejiang

(C) 1994-2025 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

University ,Hangzhou 310027,China)

**Abstract :** The transfer coefficients of hydroturbine linear model have important effect on the analytic results of stability and dynamic behavior of hydroelectric generating unit .Three algorithms are induced which include external characteristics based on model synthetical characteristics curves of hydroturbine internal characteristics based on internal analytic model and analytic method based on simplified and nonlinear model in the paper .Their features and difference of results are analyzed .The given charts of transfer coefficients do good on realizing their variational law .  
**Key words :** hydroturbine transfer coefficients linear model stability

## 申长雨教授获国家杰出青年科学基金资助

近日传来喜讯,我校国家橡塑模具工程研究中心主任申长雨教授获 2003 年度国家杰出青年科学基金资助,资助经费 80 万元.

国家杰出青年科学基金是国家为了促进青年科学技术人才的成长,加速培养造就一批进入世界科技前沿的优秀学术带头人而特别设立的支持自然科学基础研究和应用基础研究的基金.自成立以来,培养了一大批高水平的学科带头人,其中一部分已经成为两院院士.在国家杰出青年科学基金资助下取得了一大批科研成果,带动了相关学科快速发展,国家杰出青年科学基金已成为国内乃至世界上颇具影响力的一项基金.

本年度的国家杰出青年科学基金共有近 100 个单位的 160 人获得资助,学科分为数理科学、化学科学、生命科学、地球科学、工程与材料科学、信息科学、管理科学七个学科.每一位获得者经过通过评审、答辩、专家投票等多轮的优中选优,最终确定.

申长雨教授长期从事模具及橡塑制品成型技术的研究,主要从事材料成型加工过程的计算机模拟和成型模具的设计与制造技术的研究.近些年,他在该研究方向上先后获得了国家“863”计划、“十五”国家科技攻关计划、国家自然科学基金重点项目等一大批国家项目的资助.经过几年的研究,申长雨教授及其课题组在注塑成型过程数值模拟、橡塑模具及制品的优化设计、相关软件的开发及应用等方面取得了重大进展.