文章编号：1007-2284(2015)04-0163-04

水电站调压井特征线法水力计算研究

洪振国，刘浩林

（云南省水利水电勘测设计研究院，昆明 650021）

摘　要：调压井特征线法水力计算不仅可以计算出调压井的涌浪水位波动过程，而且可以计算有压管道各计算断面的压力，并且可以计算出水轮发电机组的过渡过程，可以同时完成电站调节保证计算和小波动稳定性计算分析，因此特征线法方法对调压井水力计算具有重要作用。通过水电站调压井特征线法水力学计算，结果表明：选用合适调压井结构尺寸和合理水轮机导叶启闭时间，调速器具有较好的动态品质指标，蜗壳压强值和机组转速上升值均在经济合理的范围内，满足相关要求，保证了水电安全运行。

关键词：水电站；调压井；特征线法；水力计算

中图分类号：TV732^{+}.51　　**文献标识码：**B

引水式水电站中的调压井是用来反射水锤波，限制水锤波进入引水道，减少压力管道及水轮机的水锤压力，改善水轮机在负荷变化时的运行条件及系统供电质量的调压设施。调压井水力学计算对调压井的结构形式选取、结构尺寸和引水系统安全运行非常重要，目前水电站调压水力学计算常采用解析法，解析法直观简便，但仅能求出最高和最低涌浪水位，不能求出波动的全过程。调压井特征线法水力计算不仅可以计算出调压室的涌浪水位波动过程，而且可以计算有压管道各计算断面的压力，并且可以计算出水轮发电机组的过渡过程，可以同时完成电站调节保证计算和小波动稳定性计算分析，因此有必要对调压井特征线法水力计算进行研究。

本文根据庙林水电站工程实例，采用特征线法计算电站在甩负荷和增负荷2种工况下调压室水位波动的最高和最低涌浪水位，压管道各计算断面的压力、调节保证计算和小波动稳定性计算。

1　工程概况

庙林水电站位于云南省昭通彝良县和大关县境内，进水口位于金家渡下游900 m处的马府寨附近，是洛泽河下游河段梯级水能开发的第一级电站。洛泽河全长156 km，为金沙江一级支流横江的支流。庙林水电站为引水式电站，由首部枢纽、引水系统、厂区枢纽等组成。首部枢纽由拦河重力坝组成，坝顶高程818.00 m，坝高49 m。电站设计流量为111.3 m^3/s，设计水头94.413 m，安装2台立轴混流式水轮发电机组，总装机容量65 MW，年发电量27 883万kWh。

2　计算准则

计算依据的准则是中华人民共和国电力行业标准DL/5059-1996《水电站调压室设计规范》和《水力发电厂机电设计技术规范》中的有关规定。

(1)上游调压室最高涌波水位：按上游水库正常蓄水位时，共用同一调压室的全部机组满载运行瞬时丢弃全部负荷，作为设计工况；按上游水库校核洪水位时，相应工况作校核。

(2)上游调压室最低涌波水位：按上游水库死水位时，共用同一调压室的全部n台机组由($n-1$)台增至n台或全部机组由2/3负荷突增至满载作为设计工况，并复核上游死水位时共用同一调压室的全部机组瞬时丢弃全部负荷时的第二振幅。

(3)计算调压室涌波水位，丢弃负荷时引水道的糙率取小值；增加负荷时引水道的糙率取大值。

(4)调压室最高涌波水位以上的安全超高不宜小于1.0 m，上游调压室最低涌波水位与调压室处压力引水道顶部之间的安全高度应不小于2～3 m，调压室底板应留有不小于1.0 m的安全水深。

(5)机组甩负荷的最大转速升高率：当机组容量占电力系统工作总容量的比重较大，且担负调频任务时，宜小于45%；当机组容量占电力系统运行总容量的比重不大，或担负基荷时，宜小于55%。

3　数学模型

按照水电站引水发电系统水力过渡过程计算原理，建立水电站引水发电系统计算数学模型，数学模型包括进水口、引水

收稿日期：2014-11-17

作者简介：洪振国(1976-)，男，高级工程师，从事水工建筑物设计。E-mail：402897694@qq.com。

隧洞、调压井、压力钢管、岔管、支管、2 台水轮发电机组和调速器。引水发电系统计算模型示意图如图 1 所示，图中 1～9 代表引水隧洞不同衬砌段；10 代表压力管道主管斜井段；11 代表压力管道主管平洞段；12 代表 2 号机支管；13 代表 1 号机支管；14 代表 1 号机尾水管；15 代表 2 号机尾水管。将数学模型以离散数据点的形式储存于计算机中，对引水系统各管段进行分段处理，采用特征线法对调压井水力计算。

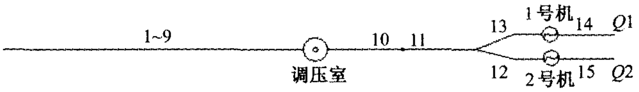

图 1 引水发电系统计算模型示意图

Fig. 1 Calculation model for water diversion and power generation system graphs

4 基本方程

(1)有压管道弹性水锤的基本方程。

运动方程：

$$\frac{\partial V}{\partial t}+V\frac{\partial V}{\partial x}+g\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{fV|V|}{2D}=0 \tag{1}$$

连续方程：

$$\frac{\partial H}{\partial t}+V\frac{\partial H}{\partial x}-V\sin\alpha+\frac{a^2}{g}\frac{\partial V}{\partial x}=0 \tag{2}$$

式中：H 为压头；V 为流速；x 为从管段左端起算的距离；g 为重力加速度；f 为沿程损失系数；D 为管径；a 为水锤波速；t 为时间。

由公式(1)、(2)可得普遍应用的特征线方程如下。

$$C+:\quad H_P=C_P-BQ_P \tag{3}$$

$$C-:\quad H_P=C_M+BQ_P \tag{4}$$

$$C_P=H_A+BQ_A-R|Q_A|Q_A \tag{5}$$

$$C_M=H_B-BQ_B+R|Q_B|Q_B \tag{6}$$

$$B=\frac{a}{gA} \tag{7}$$

$$R=F\Delta x\frac{1}{2gDA^2} \tag{8}$$

式中：H_A、Q_A 分别为 $t-\Delta t$ 时刻管段第 $i-1$ 节点处的压头和流量；H_B、Q_B 分别为 $t-\Delta t$ 时刻管段第 $i+1$ 节点处的压头和流量；Δx 为相邻两节点的距离；R 为阻力系数；C_P、C_M 分别与 $t-\Delta t$ 时刻的压头和流量有关，对 t 时刻是已知量。

(2)上游边界方程。

考虑进水口局部水头损失时，上游边界方程为：

$$H_P=H_R-\frac{1+k_1}{2gA^2}Q_P^2 \tag{9}$$

$$C-:\quad H_P=C_{M1}+B_1Q_P \tag{10}$$

式中：下标 1 表示 1 号管(隧洞)的参量；k_1 为进口损失系数。

由公式(9)、(10)即可求解上游边界节点的 H_P 和 Q_P 值。

(3)调压室边界方程。

调压室边界方程主要有：

$$C+:\quad H_{P1}=C_{P1}-B_1Q_{P1} \tag{11}$$

$$C-:\quad H_{P2}=C_{M2}+B_2Q_{P2} \tag{12}$$

$$H_{P1}=H_{P2}=H_{PS} \tag{13}$$

$$Q_{P1}-Q_{P2}=Q_S \tag{14}$$

$$\frac{dZ}{dt}=\frac{1}{F}Q_S \tag{15}$$

$$Z=H_{PS}-kQ_S^2 \tag{16}$$

式中：下标 1 和 2 分别表示调压室前面管(隧洞)和调压室后面管(压力钢管)的参量；Q_S 为流入调压室的流量；Z 为调压室的水位；k 为水流流入调压室时的阻力系数，流出时应取不同的值；式(15)为调压室连续方程，由公式(11)～(16)可求解调压室水位 Z 及对应节点压头值。

(4)水轮机边界方程。

水轮机边界条件主要方程为：

$$H_{PU}=C_{P1}-B_1Q_P \tag{17}$$

$$H_{PD}=C_{M2}+B_2Q_P \tag{18}$$

$$H_P=H_{PU}+\frac{Q^2}{2gA_1^2}-H_{PD}-\frac{Q^2}{2gA_2^2} \tag{19}$$

$$Q=Q_1^1D_1^2\sqrt{H_P} \tag{20}$$

$$\frac{d\omega}{dt}=\frac{1}{J}(M_t-M_g) \tag{21}$$

$$M_t=M_1^1D_1^3H\eta_P/\eta_M \tag{22}$$

$$\omega=2\pi n \tag{23}$$

式中：下标 1 和 2 分别表示压力钢管和尾水管的参量；H_{PU} 为水轮机进口断面压头；H_{PD} 为水轮机出口断面压头；Q_P 为水轮机过渡状态时引用流量；M_t 为过渡状态水轮机动力矩；M_g 为发电机阻力矩；ω 为过渡状态时水轮机旋转角速度；n 为过渡状态时水轮机转速；Q_1^1 为过渡状态时单位流量；J 为机组总转动惯量；由公式(17)～(23)可求解水轮机过渡状态中的水头 H_P 和转速 n 值。

(5)下游河道边界方程。

考虑尾水管出口局部水头损失时，下游河道边界方程为：

$$H_P=H_R-(1+k_2)/(2gA^2)Q_P^2 \tag{24}$$

$$C+:\quad H_P=C_{PS}-B_SQ_P \tag{25}$$

式中：k_2 为出口损失系数，由公式(24)和(25)可求解尾水管出口节点的压头和流量。

5 计算参数

水库正常蓄水位 815.00 m，设计洪水位 815.00 m，校核洪水位 817.33 m，汛前水位 809.00 m，最低发电水位 806.00 m，厂房正常尾水位 720.587 m。水轮机型号 HLA743-LJ-235，比转速 267 m・kW，水轮机直径 2.34 m，额定水头 75 m，最大水头 94.5 m，最小水头 69 m，额定流量 49.20 m^3/s，额定出力 33.51 MW，机组额定转速 300 r/min，水轮机最大水头 94.5 m，最小水头 69 m，机组安装高程 715.58 m。

引水隧洞总长 8 157.506 m，其中喷锚衬砌段长度 68%，为 5 540.304 m，直径 7.26 m，最大糙率 0.030，最小糙率 0.022，平均糙率 0.028。混凝土衬砌段长度 32%，为 2 607.202 m，直径 6.5 m，最大糙率 0.016，最小糙率 0.012，平均糙率 0.014。压力钢管主管长度 198.5 m，直径 5.4 m。1 号支管长度 26.1 m，2 号支管长度 25.5 m，直径 3.4 m，主管分岔引水至 2 台机组，钢管糙率 0.012。调压井为地下阻抗式，初拟井筒直径 19 m，调压井底部隧洞底板高程 765.70 m，调压井顶高程 833.70 m，根据水力计算结果确定调压井断面积和适宜的阻抗孔口