

低水头水电站调压室稳定断面研究

杨 灵 霞

刘子榕

(水力学教研室)

提 要

本文首先给出阻抗式调压室波动分析的基本方程式,用李亚普诺夫的直接法研究有限小波动时的稳定条件,导出了小于托马断面的调压室稳定断面计算公式,并用电算法进行了验证。用理论分析法和图解法探讨了大波动的稳定特性。考虑实际电站情况的各种因素,用现代控制理论研究了阻抗对实际电站调节稳定性的作用。还进行了阻抗实验和涌浪实验,电算涌浪与实验比较,验证了基本方程式的正确性。最后对南湾2号电站调压室稳定断面进行了具体研究,认为调压室稳定断面可以比托马断面减小百分之六十。

当水电站引水管道或尾水管道较长时,需要设置调压室,以限制水击波的传播,减轻水击压力,改善机组运行条件。但是调压室设置后,在“引水道—调压室—电站”系统中又出现了波动稳定性问题。不稳定现象首先在德国汉堡水电站发现,引起人们对波动稳定问题的注意。1910年,托马第一个研究了这个问题,对简单式调压室提出了著名的托马临界稳定断面公式。然而,托马断面是在理想的简单的条件下导出的,多年来的实践应用以及许多学者的研究都在逐步证明托马断面过大。从理论上研究减少调压室临界稳定断面已经引起人们的重视。

河南省地处中原,水电站多属于中、低水头电站,调压室尺寸大小取决于波动稳定条件。因此,针对河南的具体情况,进一步研究减小调压室临界稳定断面,对河南的水电建设将具有实际意义。

一、基本方程式

引水系统及调压室布置如图1所示。

1. 水库——调压室段的能量方程:

对如图1所示系统,普遍采用的能量方程为:

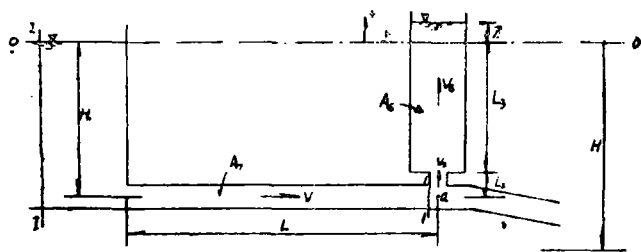


图 1

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} + Z + h_w + h_r = 0$$

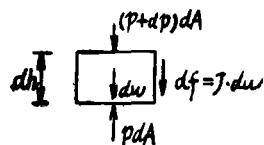
但是关于其中 h_w 和 h_r 的含意和具体表示,各家却不尽相同。Jaeger关于 h_w 和 h_r 的定义以及考虑调压室底部流速水头的能量方程在概念上不能成立。本文从水力学基本原理出发,重新推导了水

库——调压室段的能量方程。

列水库1—1断面与调压室底部引水洞断面的非恒定流能量方程为:

$$H_1 = \frac{p_0}{\gamma} + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} + h_w + \frac{c}{g} \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

其中: h_w 为水库至调压室底部的水头损失。



为求 \bar{p}_0/γ , 在调压室中取高度为 dh , 横断面为 dA 的微元体, 其形状及受力如图2所示, 其中 J 为单位重量水体所受的阻力。微元体的运动方程为:

$$\frac{r}{g} dA \cdot dh \frac{du}{dt} = p dA - dW - df - (p + dp) dA$$

$$\text{即: } \frac{dh}{g} \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial h} \right) = -dh - Jdh - d\left(\frac{p}{\gamma}\right)$$

将上式积分、化简、整理、最后得:

$$\frac{\bar{p}_0}{\gamma} = \frac{L_2}{g} \frac{dv_2}{dt} + \frac{L_3 + Z}{g} \frac{dv_3}{dt} + H_1 + Z + h_r + \frac{v_3^2}{2g} - \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} \quad (2)$$

当 $v_3 = v_2 = 0$ 时, $\bar{p}_0/\gamma = H_1 + Z_0$, 上式变为:

$$h_r = \alpha_0 v_0^2 / 2g$$

上式说明在稳定流情况下, h_r 不等于零, 而等于调压室底部流速水头。由此, 在不稳定流时, 我们视 h_r 由两部分组成: 一是室底动能头, 二是纯粹由进入调压室的水流产生的损失(用 h_t 表示), 即:

$$h_r = \alpha_0 v_0^2 / 2g + h_t \quad (3)$$

将(2)和(3)式代入(1)式并忽略联接管和调压室中的惯性水头及调压室的流速水头, 得:

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} + Z + \frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} + h_w + h_t = 0 \quad (4)$$

由于调压室底部流态复杂, 可用1—1断面的动能表示调压室底部动能, 即:

$$\frac{\alpha_0 v_0^2}{2g} = \frac{\alpha v_1^2}{2g}$$

此外, 取 $h_w = F_1 |v| v$, $h_t = \xi \left| \frac{dZ}{dt} \right| \frac{dZ}{dt}$, 则(4)式变成:

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} + Z + \frac{\alpha v_1^2}{2g} + F_1 v^2 + \xi \left| \frac{dZ}{dt} \right| \frac{dZ}{dt} = 0 \quad (5)$$

(5)式即为水库——调压室段的能量方程。

2. 连续方程和调速方程:

连续方程为:

$$Q = A_T V - A_s \frac{dz}{dt} \quad (6)$$

理想调节规律的调速方程为:

$$Q \left(H + Z + \xi \left| \frac{dz}{dt} \right| \left(\frac{dz}{dt} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \right) \right) = c \quad (7)$$

其中 c 为相应于稳定工况的出力常数。

式(5)、(6)和(7)即为本文将要采用的三大基础方程。

二、阻抗式调压室有限小波动稳定的理论研究

1. 化简基本方程式:

三大基本方程式没有大、小波动情况之分,但由此消去 Q 和 V 后所得出的波动方程则为一复杂的二阶非线性微分方程式,不仅稳定性难以求得,而且稳定分析也难以实现,因此,从数学角度分波动为大、小两种,可根据需要进行近似的求解或近似分析。托马假设小波动在波动方程式中忽略二阶以上小量,得出一、二阶常微分方程,从而导出托马公式。本文假定有限小波动在原波动方程式中保留二阶小量,忽略三阶以上小量,得出二阶非线性微分方程:

$$s'' + f(s, s') \cdot s' + g(s) \cdot s = 0 \quad (8)$$

2. 延用李亚普诺夫直接方法进行稳定性分析:

李亚普诺夫直接法的大意是:根据方程的特性,构造出一种所谓李亚普诺夫函数 v ,由函数 v 的特性去判断方程解的稳定性。

对于系统(8)式,构造的李亚诺夫函数为:

$$v(s, s') = \frac{1}{2} s'^2 + \int_0^s g(s) \cdot ds \quad (9)$$

$$\frac{dv}{dt} = -f(s, s') \cdot s'^2$$

李亚普诺夫判别稳定性准则要求 $v(s, s')$ 正定及 $\frac{dv}{dt} < 0$,即:

$$g(s) \cdot s > 0, \quad f(s, s') > 0 \quad (s \neq 0)$$

根据 $g(s)$ 的表达式知: $g(s) \cdot s > 0$ 在一般情况均能满足,而 $f(s, s')$ 的符号则是变化的,不能满足 $\frac{dv}{dt} < 0$ 条件。但我们认为 $\frac{dv}{dt} < 0$ 条件,可以放宽或延伸。理由简介如下:

由(9)式可知: $v(s, s')$ 表示的力学含意是单位质量振动体所具有的广义能量。 $\frac{dv}{dt} < 0$

就表示广义能量沿着轨道是减少的,波动不可能发散。基于这一点,我们可以设想:对于周期

性振动来说, 只要 $\frac{dv}{dt}$ 沿着轨道一周的积分值小于零, 即使 $\frac{dv}{dt}$ 在某一段轨道上大于零, 也能保证广义能量沿轨道一周的值仍然要减少, 在这种情况下, 波动就不能发散, 因此, 可以将条件 $\frac{dv}{dt} < 0$ 放宽为 $\frac{dv}{dt}$ 沿轨道一周的积分值小于零, 即 $f(s, s')$ 沿轨道一周的积分值大于零。

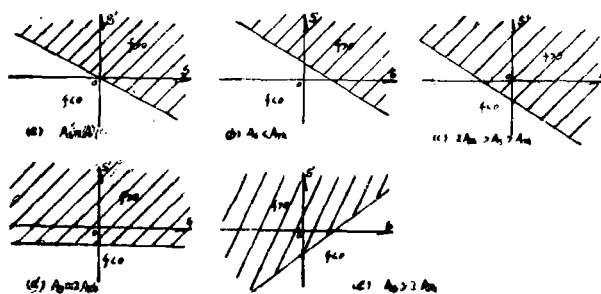


图3a、 $\xi=0$ 时 $f(s, s')$ 的正负区域图

$f(s, s')$ 在相平面 ($s-s'$ 平面) 上的正负区域如图3所示。

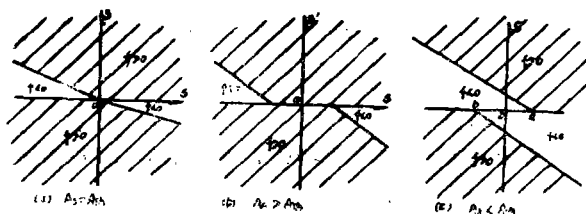


图3b、 $\xi \neq 0$ 时 $f(s, s')$ 的正负区域图

振据上述放宽条件, 分析图3中各种情况的稳定特性, 结果如表1所示。

情 况	$A_s > A_{Th}$	$A_s = A_{Th}$	$A_s < A_{Th}$
$\xi = 0$	渐 近 稳 定	保持等幅波动	发 散
$\xi \neq 0$	渐 近 稳 定	渐 近 稳 定	趋于等幅波动

3. 调压室稳定断面面积计算公式:

针对 $A_s < A_{Th}$ 情况进行推导。由于积分上的困难, 我们采用近似的方法推导, 假定稳定环通过图3b(c)中的a、b两点, 即 $|oa|$ 和 $|ob|$ 分别为等幅波动后的正向和负向幅值, 取 $\frac{1}{2}(|oa| + |ob|)$ 为允许的波动幅值 s_m , 取 $m = s_m / (H + Z_c)$ 为允许的相对波幅, 根据 $f(s, s')$ 在a、b两点的值为零, 就可以导出 A_s 与 m 、 ξ 等的关系式为:

$$A_s = n A'_{Th} \quad (10)$$

$$\text{其中: } n = 0.5(1 + \sqrt{1 - 16g^2 F \xi (H + Z_c)(H + 3Z_c) \text{ m/L}^2}) \quad (11)$$

A'_{Tb} 为Calame—Gaden考虑调压室底部流速水头后计算调压室稳定断面面积的公式, 当不考虑室底流速水头时, $A'_{Tb} = A_{Tb}$ 为托马公式。

由公式(10)可知: 当允许调压室中有一以相对波幅为 m 的等幅波动时, 调压室断面可以减小。

三、调压室有限小波动稳定的电算分析

电算不仅可以验证对数学模型的理论解析, 而且可以探讨理论上无法解决的问题。本次电算有两方面内容: 验证性电算和探讨性电算。

1、计算方法: 用了两种方法(为简单起见, 均不考虑室底流速水头)

(1)试算法:

在三大基本方程式中消去 Q 得两个程:

$$\begin{cases} \frac{L}{g} \frac{dv}{dt} + Z + FV^2 + \xi \left(\frac{dZ}{dt} \right)^2 = 0 \\ A_T V = \frac{c}{H + Z + \xi \left(\frac{dZ}{dt} \right)^2} + A \frac{dZ}{dt} \end{cases}$$

(12)

将上组方程写成差分形式, 用Jaeger介绍的试算法, 进行逐步求解, 得到 Z_1, Z_2, Z_3, \dots 等波动变化过程, 试算法程序框图如图4所示。

(2)四阶龙格——库塔法:

从方程组(12)中消去 v 得到一个微分方程:

$$\begin{aligned} & \left(A_s - \frac{2c\xi}{M^2} \frac{dZ}{dt} \right) \frac{d^2 Z}{dt^2} + \frac{2gFCA}{LA_T M} \frac{dZ}{dt} \\ & + \frac{gFA_s^2}{LA_T} \left(\frac{dZ}{dt} \right)^2 + \frac{g\xi A_T}{L} \cdot \left(\frac{dZ}{dt} \right)^2 \\ & - \frac{c}{M^2} \frac{dZ}{dt} + \frac{gA_T}{L} Z + \frac{gFc^2}{LA_T M} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{令 } \frac{dZ}{dt} = y, \quad \frac{d^2 Z}{dt^2} = \frac{dy}{dt}$$

则上式又变成了一阶微分方程组:

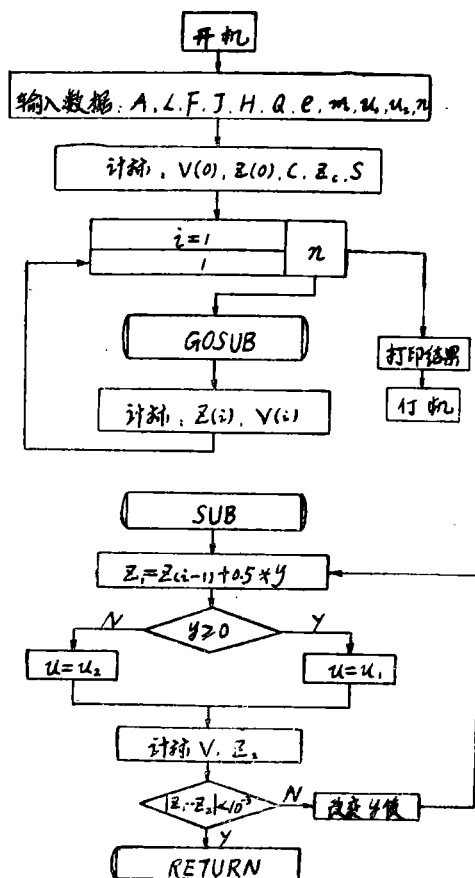


图4 试算法试算框图

$$\begin{cases} \frac{dZ}{dt} = y \\ \frac{dy}{dt} = \varphi(Z, y) \end{cases} \quad (14)$$

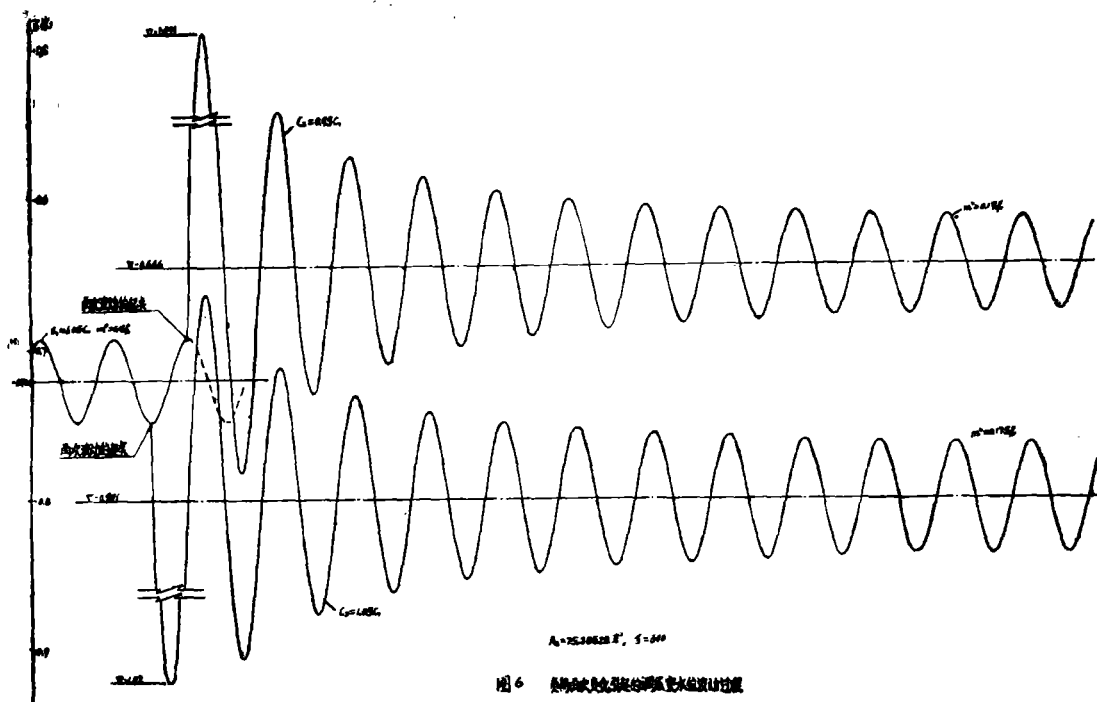


图6 波动最终幅值与调压室断面关系曲线图

性, 具体的有以下四个方面:

- (1) 在不考虑阻抗时, 对小波动情况, 托马理论是正确的。
- (2) 考虑阻抗时, 托马断面是渐近稳定的, 即波动可衰减至零。
- (3) 考虑阻抗时, 调压室断面小于托马断面, 稳定环确实存在, 如图5所示。
- (4) 波动最终幅值与调压室断面的关系基本满足公式(10)。

3. 探讨性电算:

弄清了两个理论分析无法解决的问题。

(1) 当波动达到等幅波动后, 由于负荷的再次变化所产生的叠加波动也能满足稳定要求。具体电算过程是先计算一个波动过程, 当波动达到等幅波动后, 分别在波动到达波谷和波峰的瞬时, 突增负荷和突减负荷, 再继续电算波动过程, 如图6所示。

(2) 进、出调压室的阻抗系数不等和相等, 在进、出阻抗系数之和一定的情况下, 对波动的稳定作用等价。

四、阻抗式调压室大波动稳定问题研究

Jaeger等人认为大波动比小波动危险,因此提出大波动要求的稳定断面比托马断面大。本文认为对阻抗式调压室来说,大、小波动稳定性一样,都可由公式(10)来确定调压室稳定断面。下面通过两个途径证明了这一点。

1. 理论分析

类似于前面对有限小波动的理论分析,只是在简化基本方程式时,保留到三阶小量而略去四阶以上小量,得到的波动方程式为:

$$s'' + f_1(s, s') + g_1(s) \cdot s = 0 \quad (15)$$

其中, $f_1(s, s')$ 为 s, s' 的二次函数, $g_1(s)$ 为 s 的二次函数。

仍然延用李亚普诺夫直接法进行稳定分析,与前述类似,将条件 $\frac{dv}{dt} < 0$ 放宽为 $\frac{dv}{dt}$ 沿轨道一周的积分值小于零。分析可知: $f_1(s, s')$ 的正负区域与前述 $f(s, s')$ 的正负区域十分接近。因此,大、小波动的稳定性一样。公式(10)对大波动也适用。

2. 用图解法分析:

本文采用应用较为普遍的一种图解法——等倾线法。

首先将基本方程写成相轨线微分方程。为此将方程组(14)的两式相除后即得系统的相轨线微分方程(其中令 $Z = Z_c + s$, $\frac{dZ}{dt} = \frac{ds}{dt} = s'$):

$$\frac{ds'}{ds} = F(s, s') \quad (16)$$

其中 $F(s, s')$ 为 s 和 s' 的复杂函数。

方程(16)的解即表示原系统的相轨线。对于每一条相轨线,其斜率为:

$$K = \frac{ds'}{ds} = F(s, s')$$

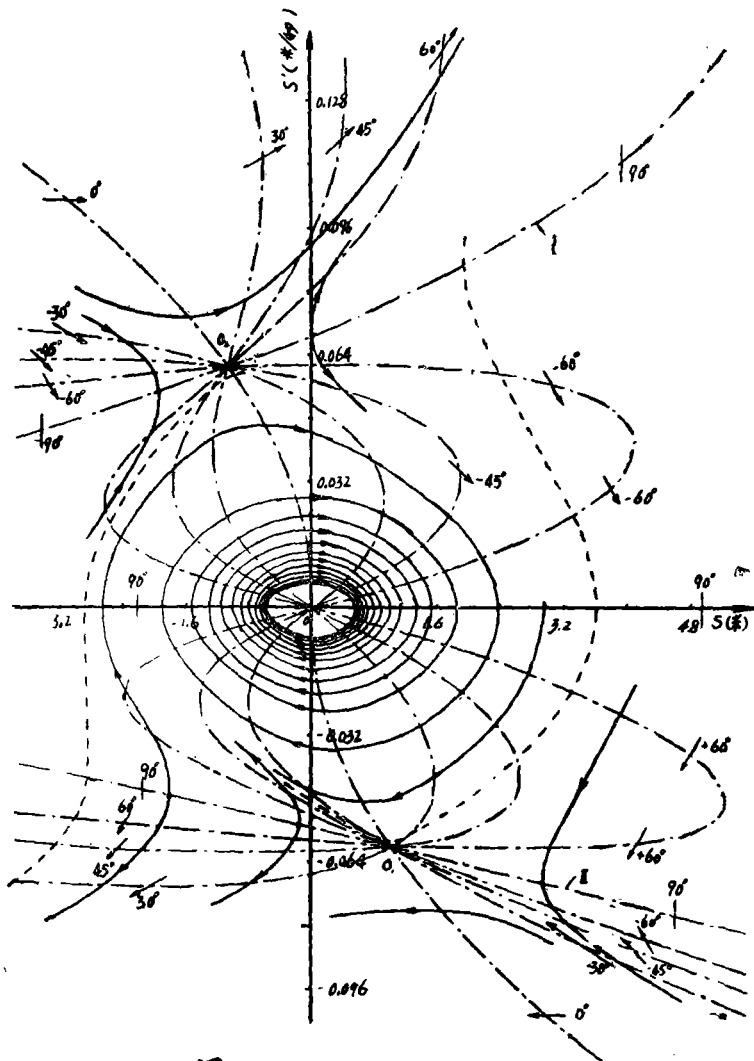
这表明在几何曲线(K 视为一常数)

$$F(s, s') - K = 0 \quad (17)$$

上所有点(s, s')处,相轨线具有相同斜率 K 。令 K 等于 $\text{tg}90^\circ$ 、 $\text{tg}60^\circ$ 、 $\text{tg}45^\circ$ 、 $\text{tg}30^\circ$ 、

$\operatorname{tg} 0^\circ$ 、 $\operatorname{tg}(-30^\circ)$ 、 $\operatorname{tg}(-45^\circ)$ 、 $\operatorname{tg}(-60^\circ)$ 等。由式(17)所确定的曲线就叫做等倾线。在各等倾线上画出其所对应的斜率小线段, 整个相平面就构成了一个表示轨迹线走向的方向场。在方向场中, 可以很容易的勾绘出一条条相轨线来, 根据相轨线的布置和趋势, 可判断系统的稳定特性。

本文改变调压室断面大小和阻抗系数大小, 分别绘制了对应的相轨线分布图, 图7为其中一种。通过对所有相轨线分布图的分析可知:



程、机组动力方程、水轮机流量方程和调速器方程即可。但是由于这些方程都是非线性的，又过于复杂，如何研究，目前正处在探讨之中。

本文比前人多考虑一项阻抗影响因素，运用现代控制理论，研究实际电站的小波动稳定问题。

在后面的实验研究中，将会发现：当进、出调压室的流量较小时，阻抗损失不与调压室中的流速的二次方成比例，方次小于2。因此对小波动情况，按阻抗损失与流速的一次方成比例，可能更接近实际情况。

1. 实际系统的数学模型：

如图8所示，管道和调压室的水力学方程为：

$$H_1 = \alpha Q^2 + \frac{L}{gA_T} \frac{dQ}{dt} + H + \xi \frac{dH}{dt}$$

$$H + \xi \frac{dH}{dt} = \beta q^2 + \frac{l}{gA_d} \frac{dq}{dt} + h$$

$$Q = A_s \frac{dH}{dt} + q$$

将上面三式在稳定工作点线性化、无量纲化以及进行拉氏变换，最后推导出引水洞——调压室——压力钢管的水力传递方程为：

$$\hat{\Delta h}^* = W_s(p) \cdot \hat{\Delta q}^* \quad (18)$$

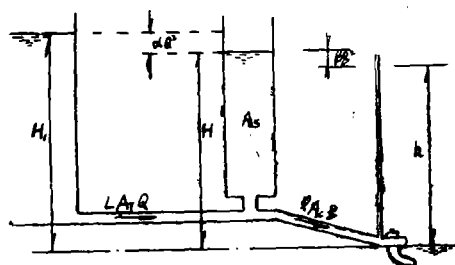


图8

其中：

$$W_s(p) = - \frac{[1 + \Omega \tau p (2k + \tau p) / 2k + \lambda p] (2k' + p) + (1 + \lambda p) (2k + \tau p)}{1 + \Omega \tau p (2k + \tau p) / 2k + \lambda p} \quad (19)$$

为引水洞——调压室——压力钢管的水力传递函数。

上面的推导也可以得出调压室水位变化与水轮机水头变化的关系式：

$$\hat{\Delta h}^* = W_s'(p) \cdot \hat{\Delta H}^* \quad (20)$$

其中：

$$W_s'(p) = \frac{[\Omega \tau p (p + 2k') / 2k + (1 + \lambda p)] (\tau p + 2k) + (1 + \lambda p) (p + 2k')}{\tau p + 2k} \quad (21)$$

水轮机流量和出力方程为：

$$q = q'_1 D^2 \sqrt{h}$$

$$n = n'_1 \sqrt{h} / D$$

$$N = 9.81 \eta g h$$

又 $q_1' = q_1' (n_1', u_m)$

$\eta = \eta (n_1', u_m)$

对上述五式进行推导, 可得水轮机流量和出力的传递方程:

$$\hat{\Delta q}^* = s_1 \hat{\Delta n}^* + s_2 \hat{\Delta u}^* + s_7 \hat{\Delta h}^* \quad (22)$$

$$\hat{\Delta N}^* = s_5 \hat{\Delta n}^* + s_6 \hat{\Delta u}^* + s_8 \hat{\Delta h}^* \quad (23)$$

发电机组动力传递方程为:

$$\hat{\Delta n}^* = -\frac{1}{e_1 + \tau_0 p} (\hat{\Delta Z}^* - \hat{\Delta N}^*) \quad (24)$$

如果忽略接力器时间常数 T_m , 按无差调节时, 调速器的传递方程为:

$$\hat{\Delta u}^* = W_g(p) \cdot \hat{\Delta n}^* \quad (25)$$

$$W_g(p) = -\frac{1 + \tau_1 p}{\beta \tau_1 p} \quad (26)$$

2. 系统的综合传递函数和特征方程:

(1) 由于负荷变化引起系统的稳定问题时, 系统的传递函数和特征方程。

根据式 (18)、(22)、(23)、(24) 和 (25) 可绘出系统的数学方框图如图9所示。

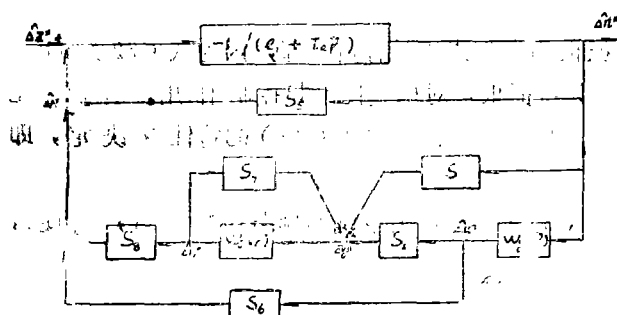


图9

由此得系统的传递方程为 (取 $s_1 = 0$, $s_7 = 0.5$, $e = e_1 - s_8$, $M = s_2 s_3 - s_6 s_7$):

$$\hat{\Delta n}^* = W(p) \cdot \hat{\Delta Z}^* \quad (27)$$

其中:

$$W(p) = -\frac{1/(e + \tau_0 p)}{1 - (MW_s + s_6) W_g / [1 - 0.5 W_s] (e + \tau_0 p)} \quad (28)$$

为系统的综合传递函数。

令传递函数的分母等于零, 可得系统的特征方程为:

$$a_5 p^5 + a_4 p^4 + a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0 \quad (29)$$

其中 $a_0 \sim a_5$ 中包含引水系统各几何参数和各水力学要素, 以及水轮机调速器等特性参数。

(2) 由于调压室水位扰动引起系统的稳定问题时, 系统的传递函数和特征方程:

取负荷变化 $\hat{\Delta Z}^*$ 为零, 根据式 (18)、(20)、(22)、(23)、(24) 和 (25) 可绘出系统的数学框图如图10所示。

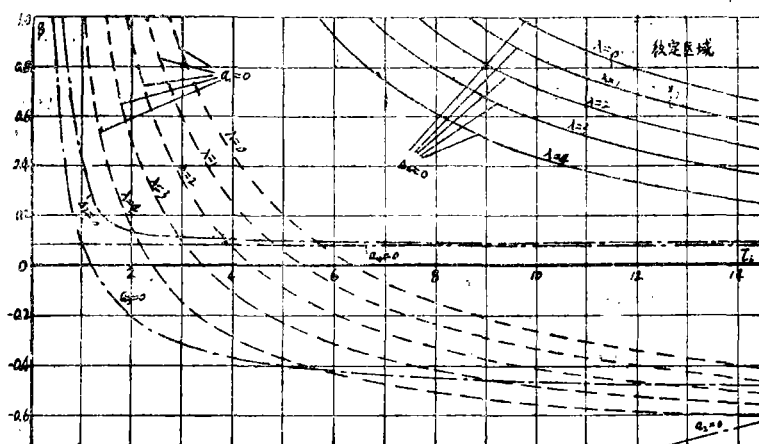


图11 $S_0=M=1, K=0.1, T=10, Z_0=10, \Omega=0.6, e=1$
变动 $\lambda=0, 1, 2, 3, 4$

图11 $S_0=M=1, K=0.1, \tau=10, \tau_0=10\Omega=0.6, e=1$ 变动 $\lambda=0, 1, 2, 3, 4$,

又由前文定义知: $h_r = h_t + \frac{\alpha v_1^2}{2g}$

故阻抗系数可表示为:

$$h_t = (Z_1 + \frac{p_1}{\gamma}) - (Z_3 + \frac{p_3}{\gamma}) + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_3^2}{2g} - \frac{\alpha v_1^2}{2g} \quad (34)$$

类似地, 对出流情况有:

$$h_t' = (Z_3 + \frac{p_3}{\gamma}) - (Z_2 + \frac{p_2}{\gamma}) + \frac{v_3^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} \quad (35)$$

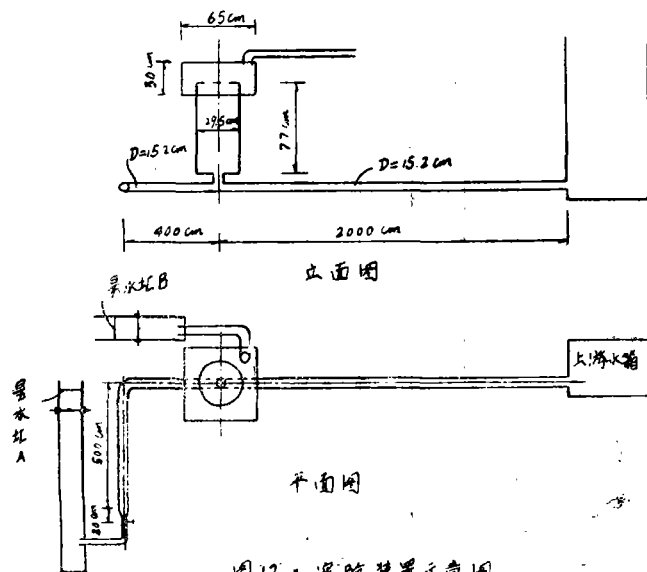


图12·实验装置示意图

其中 α, α_1 与Gardel关于分叉管的水头损失计算公式比较, 可近似为0.95和0.92, 其值的精确确定需通过大量的试验来探讨, 此问题留待以后专门研究。

2. 阻抗损失实验:

本文改变不同的阻抗孔口大小, 使孔口面积与开管面积之比为 $\beta=1.0, 0.5, 0.25$ 三种, 进行了有联接管、无联接管、水流进调压室和水流出调压室等情况的阻抗实验, 实验结果如图13(部分)所示。容易看出:

当通过阻抗孔口流量 Q 较小时, 阻抗损失不与流量的平方成比例, 流量的方次 m 小于2。

当通过阻抗孔口流量 Q_3 较大时,阻抗损失与流量的平方成比例,比例常数为阻抗系数 ξ_1 , ξ_1 随 β 值的变化情况如表2所示。

$\xi_1 \sim \beta$ 的关系曲线如图14所示,由表2和图14可知,按本文所定义的阻抗损失的表达式来整理实验资料,当通过阻抗孔口的流量较大时,阻抗系数仍然不失一般的规律性。

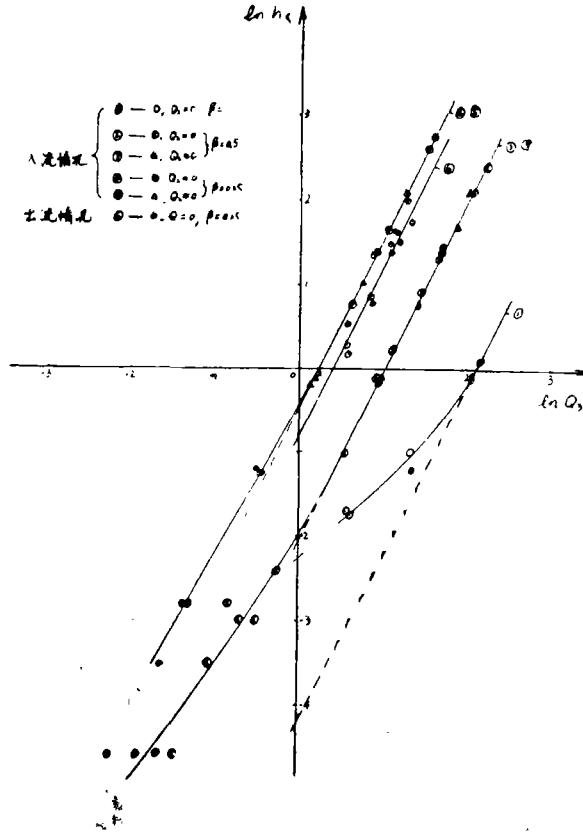


图13 有联接管时, h_{f1} 与 Q_3 的关系曲线

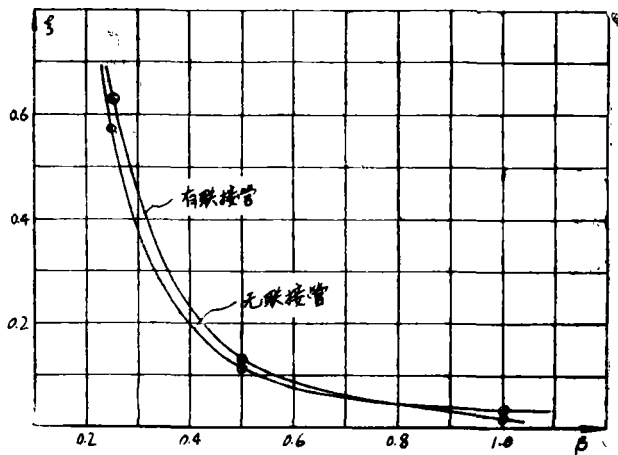


图14 $\xi_1 - \beta$ 关系曲线

表2

阻孔面积与接管面积之比 β	联接管面积与调压室面积之比	阻 抗 系 数 ξ_1 值			
		水 流 流 进 调 压 室		水 流 流 出 调 压 室	
		无联接管	有联接管	无联接管	有联接管
0.25	0.265	0.571	0.631		0.487
0.50	0.265	0.110	0.126	0.063	
1.00	0.265	0.033	0.0145		

3. 涌浪实验及与电算比较:

用KGy—5A型双线浪高仪和光电示波仪测量和记录调压室涌浪变化过程,同时,取实测的阻抗损失系数和管道水头损失系数,用四阶龙格—库塔法直接对基本方程式进行涌浪电算。二者比较如图15所示。可见电算与实测结果十分吻合,这说明,当一些水力学要素的取值符合实际时,本文所采用的数学模型是正确的,为本文的理论研究提供了可靠的依据。

此外,我们的实验过程中,当水流为稳定流,进入调压室中流量为零时,没有发现Jaeger所述调压室中水体成蘑菇状翻动,而是很静,这说明此时的调压室水位确实表示室底引水道断面上的压能。

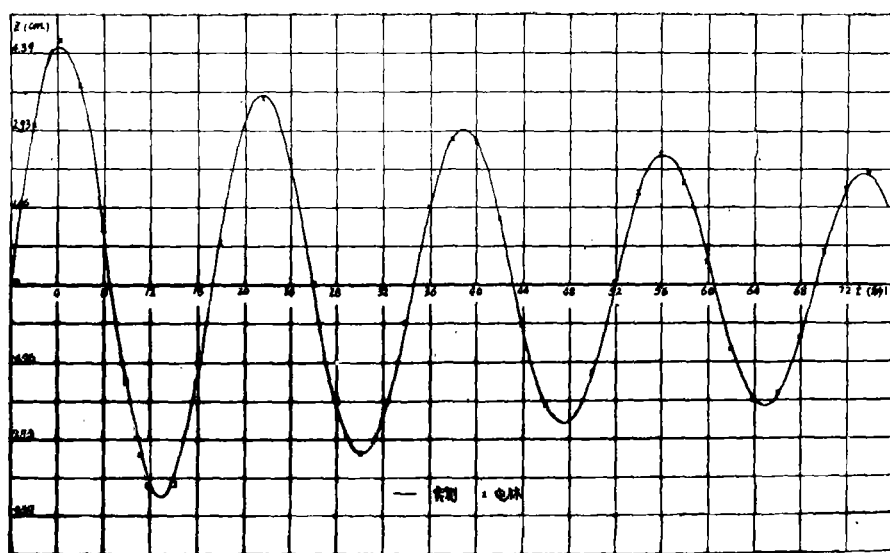


图15 涌浪比较图

七、南湾2号电站调压室稳定断面研究

本文仅研究稳定断面问题。基本资料由河南省水利勘测设计院提供: 电站装机容量为

2×3500千瓦,水轮机最大水头28.0米,设计水头22.0米,最小水头18.0米,选用两台HL240—LH—180型水轮机,水轮机转速 $n_0=187.5$ 转/分,机组飞轮力矩 $GD^2=130$ 吨·米²,调速器参数可调范围为: $\beta=0\sim0.8$, $T_i=0\sim20$ 。

1. 理想条件下,调压室的最小稳定断面:

假设无联接管,阻抗孔口与调压室底部引水洞面积之比为0.5,参考我们所做的实验,取阻抗系数 $\xi=5.14$ 米·秒²/米⁶;取电站最低水头、两台机同时运行工况进行设计,变化调压室水位允许相对波幅 m 值。由本文公式(10)计算的调压室最小稳定断面面积如表3所示。

表3

	$\xi=0$	$\xi=5.14$		托 马 断 面 A_{Th}
		$m=0.01$	$m=0.02$	
$As \geq$	61.89	60.99	60.07	108.53
$Ds \geq$	8.88	8.81	8.75	11.76
As/A_{Th}	0.57	0.56	0.553	1.0

由上表计算可知:不考虑阻抗作用,仅考虑调压室底部流速水头影响,调压室断面就比托马断面减少了43%,如果考虑了阻抗影响,当调压室水位允许相对波幅为1%时,断面减少44%,当允许相对波幅为2%时,断面可减少44.7%。

2. 实际情况下,较核电站——调压室系统的稳定性:

参考本文实验,按阻抗损失与水位变化速度的一次方成比例的规律所取的抗阻系数应为: $\xi=0.28$

借助于计算机,取四组参数:

- (1) $A_s = A_{Th} = 108.53$ 米², $\xi = 0$
- (2) $A_s = 0.56 A_{Th} = 60.99$ 米², $\xi = 0$
- (3) $A_s = 0.56 A_{Th} = 60.99$ 米², $\xi = 0.28$
- (4) $A_s = 0.4 A_{Th} = 0.7 A'_{Th} = 43.412$ 米², $\xi = 0$

分别进行调节稳定域边界(曲线 $\Delta_4=0$)计算,如图16所示。由图可见:当改虑实际水轮机特性后,调压室断面比Calame——Gardel断面小30%,比托马断面小60%时,电站仍有一定大小的稳定区域。

主 要 结 论

关于水电站——调压室稳定问题,如前言所述,前人从不同角度出發,考虑不同因素,已经进行了各种研究。本文主要研究阻抗因素及调速系统对波动稳定的影响,讨论并证实调压室底部流速水头对调压室波动稳定的作用。主要结论如下:

一、在理想条件下,通过延用李亚普诺夫第二方法进行大、小波动的稳定分析,得出 ..

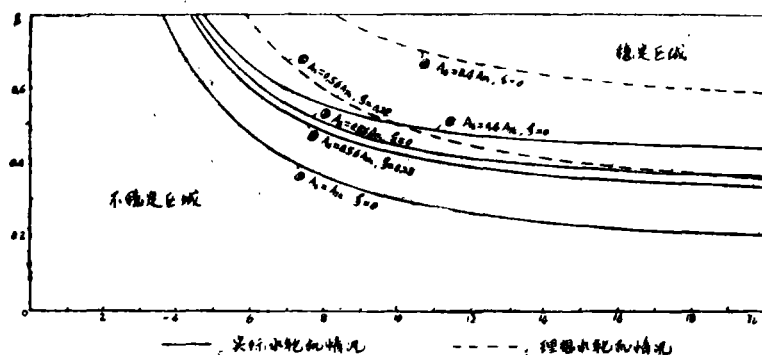


图16 南湾2号电站调压室稳定区域

1. 对于无阻抗的简单式调压室, 大波动比小波动危险。托马临界稳定断面仅适用于小波动情况。这一点与Jaeger等人的观点相同。

2. 对于阻抗式调压室, 大、小波动的稳定性一样。不同于Jaeger等人的结论。Jaeger认为大波动的稳定条件为:

$$A_s > n A_{Th}$$

$$\text{其中: } n = 1 + 0.482 \frac{Z^*}{H + Z_0}, \quad n > 1$$

本文认为: 当 n 取1时, 大、小波动均可衰减至零。

3. 考虑调压室底部流速水头的影响是正确的。波动衰减至零的稳定临界断面计算公式为:

$$A_{Th} = \frac{L A_T}{2g (F_1 + F_2) (H + Z_c + 3F_2 v_c^2)}$$

即Calame—Garden公式。波动趋于一个等幅波动的调压室断面与最终波幅的关系式为:

$$A_c / A'_{Th} = (1 + \sqrt{1 - 16g^2 F_2^2 (H + Z_c) (H + 3Z_c) m / L^2}) / 2$$

二. 在理想条件下, 通过用图解法探讨调压室水位波动稳定问题, 除了有上述认识外, 还认为: 阻抗系数太大时, 波动的稳定区域变小, 导致大波动发散。在设计中应注意。

三、在理想条件下, 通过用电算法研究证明:

1. 本文的研究方法是正确的, 李亚普诺夫的稳定条件: $\frac{dV}{dt} \leq 0$ 可以放宽为: $\frac{dV}{dt}$ 沿轨线一周的积分值小于、等于零。

2. 在考虑阻抗的情况下, 取调压室的断面小于托马断面时, 当波动达到等幅波动后, 由于电站负荷的再次变化引起的叠加波动也能满足稳定要求。

3. 对于进、出调压室的阻抗系数之和一定, 而各自大小不等的阻抗型式, 其对波动稳定的作用等价于进、出阻抗大小相等的阻抗型式。

四、通过对实际情况的电站——调压室系统稳定性的研究, 认为:

1. 在调压室断面小于托马临界断面时, 调速器参数 β 及 T_i 仍然存在一个可调范围来保证系统稳定运行。

2. 调压室底部的阻抗作用能扩大 β 及 T_i 的可调范围, 即能提高系统的稳定性和调节品质。

3. 实际电站的调节稳定性取决于条件 $\Delta_4 > 0$, 不同于文献[37]所述。

五、无论对理想情况, 或实际情况研究结果都证明: 调压室水面直接受扰和电站负荷变化, 二者所引起的电站—调压室系统的波动稳定性一样。

六、通过实验研究, 认为:

1. 采用本文所定义的阻抗损失的表达式

$$h_r = \frac{\alpha v_1^2}{2g} = \xi \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 = h\xi$$

不仅能反映室底流速水头因素, 便于引入基本方程中进行稳定分析, 而且按其整理实验资料, 阻投系数不失一般规律性。

2. 当通过阻抗孔口的流量较大时, 阻抗损失与过流量的平方成比例; 当通过阻抗孔口的流量较小时, 情况则不同, 流量的方次小于2。

3. 实验证实: 本文考虑阻抗和流速水头的基本方程是正确的。对低水头电站, 流速水头项对减少稳定断面影响巨大, 不应作为安全余量不参与计算, 而应象水头损失一样不能忽略。

4. 采用固定式阻抗, 其值不宜过大。否则, 突然关闭或开启水轮机时, 会引起过大水击穿室, 以及引起调压室内水面汹涌不平。

七、对南湾2号电站, 考虑以上因素, 调压室断面可以减少至43.412米², 比原设计的断面小60%。但最终决定调压室断面, 还要核算突然开关的波动和合理阻抗等方面的问题。

八、本文所得的结论, 有些与国内外权威著作的结论不同, 欢迎批评、指正。

注: 参考文献略。