

第十章 调压室

- 1 调压室的作用及工作原理
- 2 调压室的设置条件及位置选择
- 3 调压室的布置方式及类型
- 4 调压室水位波动计算
- 5 调压室水位小波动稳定问题
- 6 调压室水力计算条件
- 7 尾水调压室的水力计算
- 8 调压室结构设计

1 调压室的作用及工作原理

- ——调压室：有效减小引水道中的水锤压力；根据地形和地质条件，调压室设置在地面上，称为调压塔；设置在地面以下称调压井；**见图**
- ——作用：利用调压室扩大的断面积和自由水面，水锤波在调压室处反射到下游去；调压室之前的引水道，基本可避免水锤压力的影响；调压室之后的压力管道，因缩短了水锤波传递的路程，从而减小了压力管道中的水锤值，改善机组运行条件及供电质量；
- ——特点：大量水体往复运动，周期较长，伴随水体运动，引水道内有不大的和较缓的压力变化，与水锤特点不同；当调压室水位达到最高水位之前，水锤压力早已衰减消失，两者最大值一般不会出现。



1 调压室的作用及工作原理

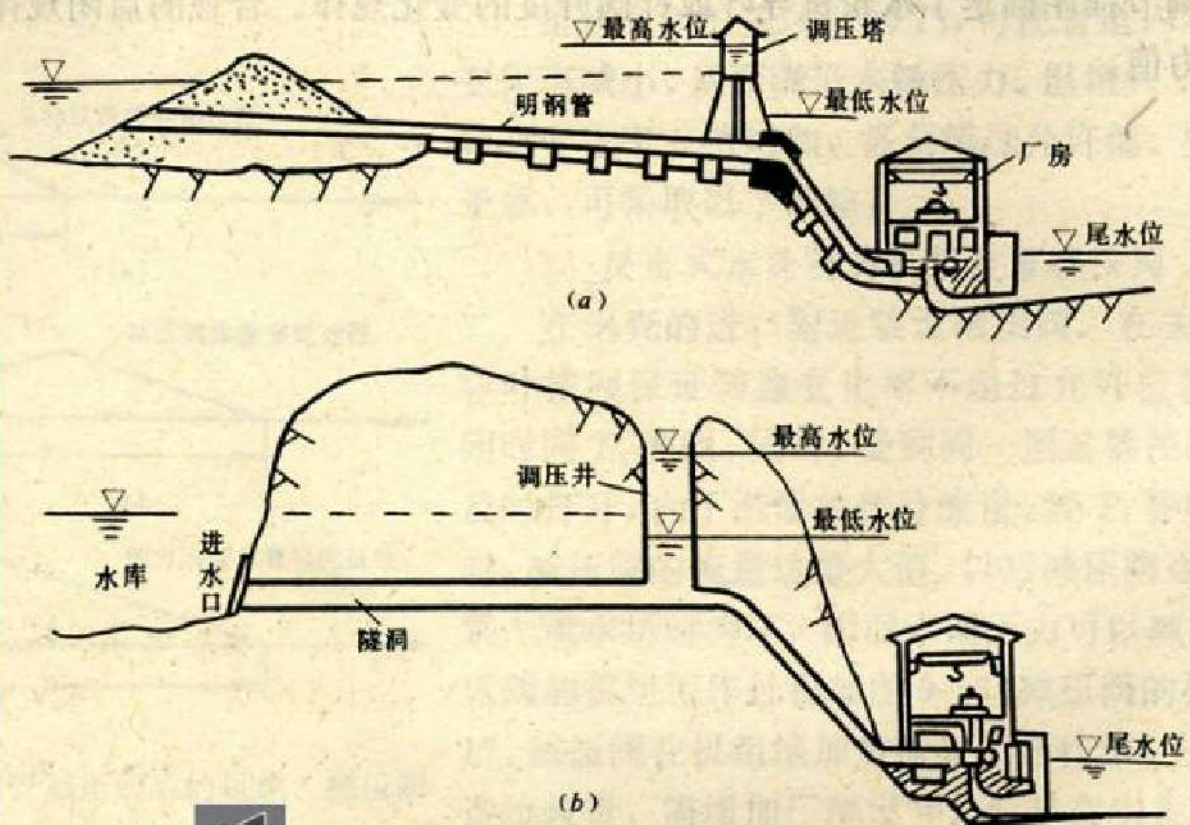


图 10-1 调压室示意图
(a) 调压塔; (b) 调压井

2 调压室的设置条件及位置选择

- (1) 调压室的设置条件
- ——调压室的设置要满足几个**要求**：
- (2) 调压室位置的选择
- 1) 应根据压力管道的地形、地质条件与厂房的位置同意考虑；应尽可能靠近厂房，以减小压力管道与水轮机的水锤压力；
- 2) 宜设在地下，当因地形、地质条件受到限制，调压室需部分或全部设在地面时，需进行综合技术经济比较，并满足机组调保计算要求；
- 3) 距厂房要近，多设在临近山坡处，宜避开不利的地质条件，以减轻电站运行后渗水对围岩、边坡稳定的不利影响，以免因地下水位的改变，导致围岩失稳塌滑。



调压室的设置要满足几个要求

- 1) 尽可能充分反射由压力管道传来的水锤波，以减少压力管道中水锤压力，并使传至引水道中的水锤值控制在合理范围内；
- 2) 应能保证调压室中发生的一切水位波动都具有逐渐衰减的性质，并衰减得愈快愈好；
- 3) 负荷变化时，引起的波动振幅小，频率低，以减小调压室的高度，以利于机组的稳定运行；
- 4) 在正常运行时，水流经过调压室与引水道连接处的水头损失应尽量小；
- 5) 满足电站引水系统与机组联合调保计算及电站稳定运行综合分析，进行技术经济比较论证。

2 调压室的设置条件及位置选择

——调压室的设置条件：初步分析时，可用表征压力引水系统惯性大小的水流加速时间，也称作压力引水道的惯性时间常数 T_w 值来判断设置上游调压室的条件，即 $T_w = \sum L_i v_i / gH_p \geq [T_w] = 2 \sim 4s$

—— T_w 物理意义：在水头 H_p 作用下，当不计水头损失时，管道内流速从0增到 v 所需时间；当采用最大流量时，应采用额定水头；若采用最小水头，则对应于计算流量；

——下游调压室的设置条件：

①尾水管内不产生液柱分离为前提，即

$$L_w > \frac{5T_s}{v_{w0}} \left(8 - \frac{\nabla}{900} - \frac{v_{wj}^2}{2g} - H_s \right)$$

②机组丢弃全负荷时，通过调保计算的尾水管内最大真空度不宜大于 $8mH_2O$ 。



3 调压室的布置方式及类型

- (1) 调压室的基本布置方式
- (2) 调压室的基本类型
 - ——简单圆筒式
 - ——阻抗式
 - ——双室式
 - ——溢流式
 - ——差动式
 - ——气垫式或半气垫式
 - ——混合式：根据地形、地质条件，吸取任意两种或两种以上基本类型调压室的特点，加以混合而成。



3 调压室的布置方式及类型

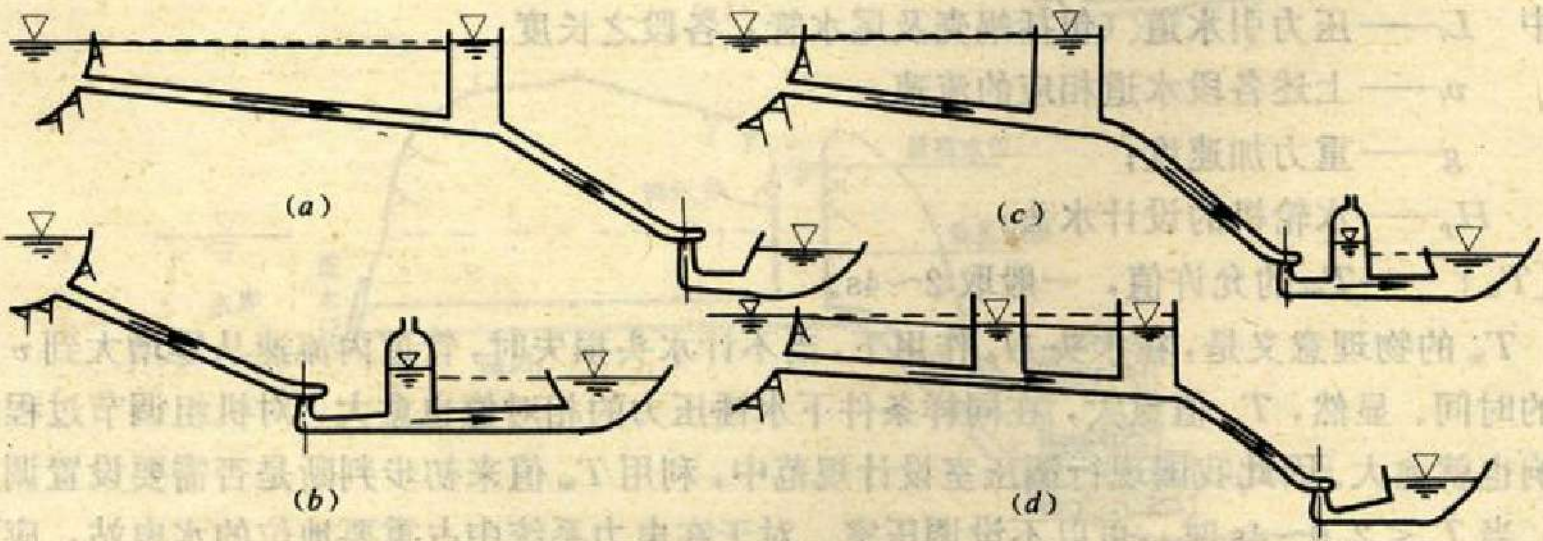


图 10-2 调压室的基本布置方式

(a) 上游调压室；(b) 下游调压室；(c) 上、下游双调压室；(d) 上游双调压室



3 调压室的布置方式及类型

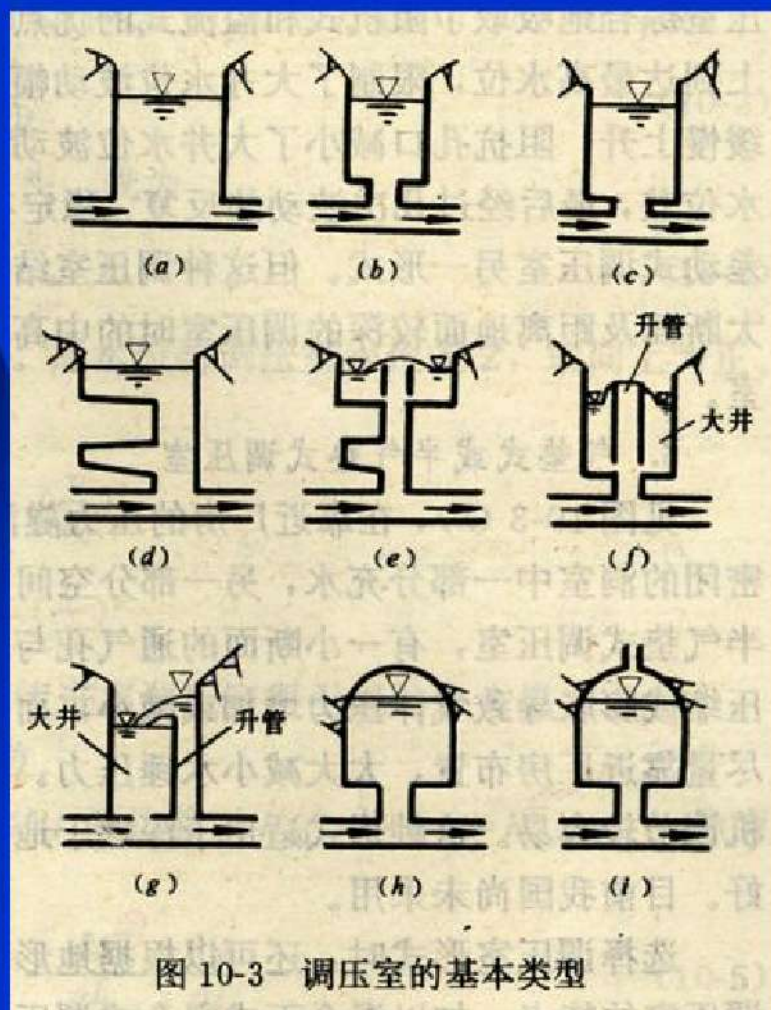


图 10-3 调压室的基本类型

简单圆筒式

- ——特点：①自上而下具有相同的断面，结构简单，反射水锤波好；②底部阻抗较小，引水系统摩阻消耗能量，故波动振幅大，衰减慢；③正常运行时，水流通过调压室底部水头损失较大；
- ——适用：①为减少底部水头损失，可以联接管的圆筒式调压室；②联接管的断面积不小于引水道的断面积；③多用于低水头小容量电站。
- ——见图

阻抗式

- ——阻抗式调压室：将简单调压室的底部收缩成孔口或小于引水道的联接管，成为阻抗式调压室；
- ——阻抗式的作用：在于减小调压室水位升高值和降低值，从而减小调压室的容积；



双室式

- ——特点：
- ①由一个断面较小的竖井和上、下两个断面扩大的储水室组成；
- ②上室供丢弃负荷时蓄水用，一般在最高静水位以上，稳定流时无水；
- ③下室在稳定流时大部分充满水，机组增荷时供水，位于最低静水位之下；
- 竖井用来连接上下室和引水道，断面小，井中水位升降很快；
- ④弃荷时，水进入上室后水位立刻缓慢下来，振幅减小；
- ⑤增荷时，下室有足够的水量供给水轮机；

双室式

- ⑥上室顶部高程由水库最高水位控制；
- ⑦下室底部高程由水库死水位控制；
- ⑧上下室的底部应有不小于1%的坡度倾向竖井，以便放空水流；
- ⑨下室顶部做成背向竖井的不小于1.5%的斜坡，使空气容易从下室逸出。
- ——适用：高水头、要求稳定断面较小，水库工作深度较大的水电站。



溢流式

- ——特点：顶部设有溢流堰；
- ——工作过程：
 - 弃荷时水位迅速升至溢流堰顶后开始溢流，限制水位继续上升，溢出的水排至下游，或储存与上室，待水位下降时经过上室底孔回流竖井；
- ——发展：
 - 调压室水位下降的波动无法限制，经常与双室式调压室结合使用，即上室设溢流堰而成为溢流双室式调压室。



差动式

- ——特点：吸收了阻抗式和溢流式的优点，即
- 由两个不同直径的同心圆筒组成；
- 外面圆筒为大井；中间圆筒直径较小；顶部设溢流堰；底部设阻抗孔口与外面大井相通，为升管；
- 弃荷时，水首先冲入升管升至溢流堰口达到最高水位，限制大井水位波动幅度，部分水流通过阻抗孔口流入大井，大井水位缓慢上升，阻抗孔口减小了大井水位波动振幅；
- 在水位波动过程中，升管和大井常保持水位差，最后经过几次波动反复，稳定在同一水位；
- ——适用条件：地形、地质条件不允许大断面、距离地面较深的调压室的中高水头电站；虽结构复杂，造价高，我国采用较多。

气垫式或半气垫式

- ——特点：靠近厂房，位于压力隧洞上的圆形狭窄洞室；
- ——气垫式：在密闭式中一部分充水，另一部分充满高压空气；
- ——半气垫式：设一小通气孔与大气相通的气垫式；
- ——工作原理：在水位波动过程中，调压室中的气体压缩或膨胀导致气体压力增加或减小，促使压力隧洞中的水流减速或加速；愈靠近厂房，水锤压力减小愈大；有利于反射水锤波，压力变化缓慢，水轮机调节较易；
- ——适用条件：深埋于地下的引水道式电站；水头愈高，经济性愈好。

4 调压室水位波动计算

- ——计算目的：决定调压室的尺寸和水位波动的周期与衰减程度；
- ——计算方法
 - 1) 解析法
 - 2) 图解法
- ——计算内容：
 - 1) 最高涌波水位，以确定调压室的顶部高程；
 - 2) 最低涌波水位，以确定调压室底部和压力管道进口的高程；
 - 3) 水位波动全过程。
- ——以等断面圆筒式及阻抗式调压室为例，计算以上三项内容



最高涌波水位

- 由连续方程和动力方程，可得：

$$1 + (1 + \eta)X_{\max} = [1 - (1 + \eta)\eta X_0] e^{-(1 + \eta)(X_0 - X_{\max})}$$

$$\ln[1 + (1 + \eta)X_{\max}] - (1 + \eta)X_{\max} = \ln[1 - (1 + \eta)\eta X_0] - (1 + \eta)X_0$$

- 其中 $\lambda = \frac{Lfv_0^2}{2gFh_{w0}}$ $X_{\max} = \frac{Z_{\max}}{\lambda}$

- 对于阻抗式调压室， $\eta = 0$ ，则：

$$X_0 = -\ln(1 + X_{\max}) + X_{\max}$$

- 上式适用于水轮机流量瞬时减为0的情况

最低涌波水位

- ——丢弃全负荷时产生的第二波动振幅

$$\ln[1 - (1 + \eta)X_2] + (1 + \eta)X_2 = \ln[1 - (1 + \eta)\eta X_{\max}] + (1 + \eta)X_{\max}$$

- 当 $\eta = 0$ 时, $X_2 + \ln(1 - X_2) = X_{\max} + \ln(1 - X_{\max})$
- ——增加负荷时的最低涌波水位

$$\varepsilon = Lfv_0^2 / gFh_{w0}^2 \quad \varepsilon = 2\lambda / h_{w0}$$

$$\frac{|z_{\min}|}{h_{w0}} = 1 + \left(\sqrt{\varepsilon - 0.275\sqrt{m}} + 0.05/\varepsilon - 0.9 \right) (1 - m) (1 - m/\varepsilon^{0.62})$$

- ——上述两种情况所得 z_2 和 z_{\max} , 取最大值



5 调压室水位波动的稳定问题

- ——调压室水位波动问题原因
- 1) 调压室在任何工况下水位波动都衰减：负荷变化，流量不变，摩阻影响，波动则衰减；实际上，不计电力系统对机组影响，水轮机调速器在调节过程中不是保持流量不变，而是保持出力不变。
- 2) 负荷减小，导叶适当关闭以减小流量，这时调压室水位随之上升。若调压室断面过小，水位升高较大，导致水头增大使出力反而加大；导叶继续关闭，流量进一步减小，出力不断加大；这样循环，使得水位波动逐渐加强，出现不稳定现象。
- ——水位波动稳定**条件**
- ——波动稳定条件的**分析**



水位波动稳定条件

- ——假定：
 - 1) 波动为无限小，使基本微分方程线性化，求得波动稳定条件的解析解；
 - 2) 调速器严格保持出力为常数；
 - 3) 电站单独运行，机组效率保持不变；
 - 4) 调压室与引水道直接连接，不考虑调压室底部流速水头的影响。
- ——假定分析go



水位波动稳定条件假定分析

- 1) 水流连续方程

$$Q_0 + q = f(v_0 + y) - F \frac{dz}{dt} \quad q = fy - F \frac{dz}{dt}$$

- 2) 水电站出力不变方程

$$N = 9.81Q_0 H \eta = 9.81Q_0 \eta (H_0 - h_{w0} - h_{wT_0})$$

- 3) 动力方程

$$\frac{L}{g} \frac{dv}{dt} = -z - h_w$$

- 4) 引水道-调压室系统在无限小扰动下的运动微分方程

$$x'' + 2mx' + \omega^2 x = 0$$

- go



水位波动稳定条件假定分析

- 其中，阻尼系数 $m = \frac{v_0}{2} \left(\frac{2\alpha g}{L} - \frac{f}{FH_1} \right)$
- 振动频率 $\omega^2 = \frac{gf}{LF} \left(1 - \frac{2\alpha v_0^2}{H_1} \right)$
- ——振动理论：当 $m > 0$, $\omega > 0$ 时，振动才衰减；
- ——调压室水位波动稳定条件：
 - 1) $m > 0$, 即：
$$F_k = F_{Th} > \frac{Lf}{2\alpha g H_1} = \frac{Lf}{2\alpha g (H_0 - h_{w0} - 3h_{wT_0})}$$
 - 2) $\omega > 0$, 即：
$$h_{w0} + h_{wT_0} < \frac{1}{3} H_0$$



水位波动稳定条件分析

- ——托马稳定条件是在一些假定基础上推导所得，实际应用时必须根据具体情况作出某些修正。
- 1) 大波动的稳定条件
- 2) 调压室底部流速水头的影响
- 3) 水轮机效率的影响
- 4) 电力系统的影响



大波动的稳定条件

- 分析方法：调压室水位波动幅值较大，则波动微分方程不是线性，所得理论解不严格；实用方法是先按托马断面初定调压室尺寸，再利用数值积分法求解，如电算、图解求出各种工况下的波动过程，分析水位是否稳定；
- 耶格根据稳定边界处水位波动为正弦曲线的假定，研究突然增加全荷的大波动情况，得出水位波动稳定的条件是：

$$F_k > \frac{Lf}{2\alpha g(H_0 - h_{w0})} \left(1 + 0.482 \frac{z^*}{H_0 - h_{w0}}\right) \quad z^* = v_0 \sqrt{\frac{Lf}{gF}}$$

- 研究表明，若小波动稳定不能保证，则大波动必不衰减，为保证大波动稳定，要求调压室断面大于托马断面，初步分析取 $(1 \sim 1.0)F_{Th}$ 作为调压室的设计断面。



调压室底部流速水头的影响

- 从调压室运动方程看，对引水道而言，流速水头的作用与水头损失相似，相当于加大了摩阻损失；对水轮机而言，并不减小水电站的有效水头；托马断面应修改为：

$$F_k > \frac{Lf}{2(\alpha + \frac{1}{2g})g(H_0 - h_{w0} - 3h_{wT_0} + \frac{v_0^2}{2g})}$$

- 即：引水道直径越大，长度越短，流速水头影响越显著；
- 实际中，调压室底部三通管处水流状态极不稳定，特别是连接管直径较大，调压室水位较低时更甚，这样考虑全部流速水头不妥；卡戴尔对于连接管与引水道直径相等时，考虑连接管处实际流速水头符合实际，则：

$$F_{Th} > \frac{Lf}{2(\alpha + \frac{0.7}{2g})g(H_0 - h_{w0} - 3h_{wT_0})}$$



水轮机效率的影响

- 联立水轮机效率方程与调速（出力）方程，可得：

$$\eta = \eta_0 + \frac{\partial \eta}{\partial Q} (Q - Q_0) + \frac{\partial \eta}{\partial H} (H - H_0)$$

$$F_k > \frac{Lf(1+\Delta)}{2\alpha g [H_0 - 2h_{wT_0}(1+\Delta)]} \quad \Delta = \frac{\frac{H_0}{\eta_0} \left[\frac{\partial \eta}{\partial H} \right]_0}{\frac{Q_0}{\eta_0} \left[\frac{\partial \eta}{\partial Q} \right]_0}$$

- 效率变化对于稳定断面最不利的影响，发生在 η 随 H 增加而增加（最高效率区的左边）、随 Q 增加而减小（最高效率区的右边）。由于调压室的稳定断面 F_k 取决于电站在最低水头和满负荷运行工况，在该工况下，若在效率水头曲线的左边和在效率流量曲线的右边，都对波动衰减不利。



电力系统的影响

- ——单独运行的电站，当调压室内水位变化而引起出力变化时，只能依靠本电站水轮机调速器的调节使出力保持常数；
- ——电站在系统中运行，则由系统中各电站机组共同保证系统出力不变；
- ——减小本电站流量变化幅度，有助于调压室水位波动稳定；
- ——若系统中所有担负变动负荷机组的调速器特性相同，即在系统中担任负荷变化的电站之间按容量大小成比例分配，则小波动稳定临界断面为：

$$F_k > \frac{Lf}{2\alpha g(H_0 - h_{w0})} \left[\frac{3E - 1}{2} \right] \quad E = \frac{N}{\sum N_i}$$



6 调压室水力计算条件

- 1、调压室的基本尺寸确定
- 2、水位波动的稳定性计算
- 3、最高涌波水位的计算
- 4、最低涌波水位的计算



调压室的基本尺寸确定

- ——调压室基本尺寸由水力计算来确定，其内容有：
 - 1) 由调压室水位波动的稳定条件，确定调压室的断面积；
 - 2) 计算调压室最高涌波水位，从而确定调压室的顶部高程；
 - 3) 计算调压室最低涌波水位，从而确定调压室底部和压力管道进口的高程。
- ——根据电站和引水道的实际，选择可能出现的最不利情况，作为水力计算的条件，使调压室既安全，又经济合理



水位波动的稳定性计算

- ——为保证稳定断面满足各种运行工况要求，由托马稳定断面可知，水位波动的稳定性计算，要求考虑：
 - 1) 按电站正常运行中可能出现的最小水头计算；
 - 2) 引水道系统的糙率无法精确预测，根据可能的变化范围选择一个偏于安全的数值：计算稳定断面时，引水道应选用可能的最小糙率，使 α 最小；压力管道应选用可能的最到糙率，使 H_1 最小；
 - 3) 水轮机效率、调速器和电力系统等因素的影响，需充分进行论证，才能加以考虑。



最高涌波水位的计算

- ——要求考虑：
- 1) 上游水库水位应取正常发电可能出现的最高水位，一般按设计洪水位计算；
- 2) 引水道糙率应取可能的最小值，能耗少，涌波高；
- 3) 计算工况应考虑配电和输电的条件，即应根据电气主接线的情况，一般按丢弃全荷考虑；
- 4) 若电站的机组和出线回路数较多，且母线分段，则经过论证分析，也可不按全丢负荷计算。



最低涌波水位的计算

- ——要求考虑：
 - 1) 上游水库水位应取可能的最低水位，引水道糙率取可能的最大值，即阻力大，供水慢；
 - 2) 初设时，按其余机组均满荷运行，最后1台机组投入运行的情况作为设计工况，但最后1台机组容量不小于电站容量的 $\frac{1}{3}$ ；
 - 3) 技设时，增荷条件应根据设计电站在系统中的工况，经专门研究确定；

最低涌波水位的计算

- 4) 机组一台接着一台投入系统，若机组投入系统所需时间与调压室波动周期成倍数关系，则可能使水位波动出现不利情况；若调压室水位波动的衰减时间相当长，则应补充研究丢弃负荷后不久重新带荷或相反情况下引起波动叠加的可能；
- 5) 对一般的调压室，应计算在水库各种水位下丢弃全荷后水位波动的第二振幅，以检验是否低于增荷时的最低涌波水位。



7 尾水调压室的水力计算

- ——目的：
 - 1) 减少尾水管内水锤，限制水锤压力向尾水隧洞传播，改善机组运行条件；
 - 2) 防止尾水管进口产生过大的负水锤以致产生真空，造成液柱分离，引起反水锤；
- ——工作特点：与上游调压室相反；
- ——型式：常采用圆筒式，或竖井与上室组合的双室式；几条尾水洞合用一个尾水调压室，或几座竖井公用一个上室；
- ——水力计算方法：与上游调压室相同；



8 调压室结构设计

- 1、调压井的整体稳定
- 2、调压井的荷载
- 3、调压井结构设计方法

