

## 绪 论

对水电站动力设备中的水力过渡过程进行分析的目的，是为了确定以下一些问题，这些问题与选择机组的最佳调节规律有关。它们包括：确定作用在各处压力管道内的最大水锤值，甩负荷时最大的转速上升值，查明作用在水轮机转轮上最大可能的轴向力值，以及对水电站工作有重要意义的其它参数等作出估计。这些指标对确定隧洞衬砌的结构和尺寸，决定压力钢管、水轮机蜗壳以及阀门外壳的壁厚都是有影响的。它们也决定了推力轴承所承受的最大荷载和发电机转动部件上的最大作用力。当压力引水管道相当长时，还需要根据过渡过程的条件，来解决是否需要建立调压井或装设空放阀的问题。上面所列举的各种因素，对水电站的造价和技术经济指标都有直接的影响。

由运行经验可知，属于水电站水力机械部分的事故和停机，大多数是在过渡过程时发生的。此时，系统中所产生的动荷载最大，水轮机进入非正常的飞逸和制动工况。在这些工况下，水流的不稳定性增高并出现强烈的脉动、振动和水锤现象。

近代的趋向是，让水电站和抽水蓄能电站愈来愈多地承担动力系统负荷图的变动部分。这就需要增加机组的调节次数，也就增多了机组的不稳定工况，而不稳定工况是对水电设备的安全和耐久起决定作用的，所以它的意义就大大加强了。普里雅文水电站（Плявиньская ГЭС）的运行指标，可以代表说明这方面的趋势。在该水电站上过渡工况的年平均次数（以机组在一小时工作中发生的启动、停机、转为调相或发电，以及其它的工况变化的总次数计）达到0.22~0.25，而在个别时期内当自动操作器工作时，在一昼夜内过渡工况平均次数达到2.0，即一小时工作中有两次工况变化〔122〕。在抽水蓄能水电站上工况变化的次数还更高（一小时内达到五次）。

水力过渡过程对水电站和抽水蓄能电站的建筑物和设备所产生的上述重要影响，引起许多专家的很大注意，促进国内外对此开展了广泛的研究工作。

在苏联，各个专门的科学研究所〔全苏水利工程科学研究所（ВНИИГ）、中央锅炉透平科学研究所（ЦКТИ）、技改局 ОРГРЭС）、格鲁齐亚电站科学研究所（Груз НИИ-ЭГС）〕，各个水电设计院的设计机构和科试所，列宁格勒水电设计院，列宁格勒金属工厂和哈尔科夫透平电机厂，以及列宁格勒工学院（ЛПИ）和莫斯科建筑工程学院等高等院校，都对水电站过渡过程以及与之有关的不稳定工况，从各个方面进行了广泛的研究。

莫斯科建筑工程学院的水能利用教研室，近年来又在高水头水工建筑动力学问题实验室里，长时间地进行了不稳定工况和过渡过程的综合研究工作。这些研究工作不但包括实验室的和理论上的，而且包括原型试验。所得成果已经在一系列水电站的设计中加以应用，其中包括如布拉茨克（Братская）、努雷克（Нурекская）、察尔瓦克（Чарвакская）、印古尔（Ингуурская）、科累姆斯克（Колымская）这样一些大型水电站。本书就是根据上述研究工作的成果，以及在电站设计中采用我们提出的方法和建议的使用经验所做的总结。

如能对水电站的建筑物和设备，选择最有利的参数和布置形式，就能较合理地解决不

稳定工况问题。这样，在保证必需的运行可靠性的同时，就能使安全裕量和备用量减少到最小，从而可以得到很大的经济效益 [ 7. 94 ]。为此，在计算中必须最大限度地全面考虑输水系统所有部件的实际工作条件，以及动力设备和整个压力系统的实际特性。此外，水力机组根据所给条件采用最佳调节规律后，还可以减轻过渡过程对建筑物和动力设备的不良作用。这些观点可从书中得到充分证明。

一、二两章简要介绍水电站和抽水蓄能电站水力系统的结构，并用示意图和从原型电站实测所得的示波图，对最重要的过渡过程和它们的参数变化进行介绍和说明。原型示波图能给出实际过渡过程最完整的图象。

在第三章中给出了水力和机械系统主要部件的微分方程，并对一些主要参数和常数给予了最大的注意。

四~七章专讲水轮机和可逆式水力机械——水泵水轮机的特性曲线。对特性曲线这样重视，是因为它们对过渡过程具有十分重要的意义。正如上述，在过渡过程期间，水力机械的工况将经过十分宽广的区域，这在通常的综合特性图上是无法反映的。为了进行计算，就必须要有更完整的全特性曲线，为此需进行专门的试验和研究。假如以后制造厂能针对所有的重要工程供给这种全特性曲线，那就好了。这种特性曲线不仅在工况的范围方面，而且在有重要意义的参数的数量方面，都应是更完整的。在这种特性曲线图上，应补充画出在流道各处的压力分布、轴向力的大小和水流不稳定性的指数，并给出补气和其它条件对过渡过程的影响。

在计算过渡过程时，我们借助“瞬时工况点”的概念，以便使用稳定工况时的特性曲线。在第四章里还研究了采用上述假定后，在不稳定的条件下可能引起的偏差。这个问题还远远没有解决，所以书中只介绍了某些一般性的考虑办法，但它们对实用是十分重要的。

第八章里研究水轮机自动调节系统的工作，它对过渡过程来说具有决定性的意义。在这一章中介绍了调速器的结构原理、特性以及调速器主要环节的相互关系；尤其对接力器的力特性和速度特性给予了很大的注意，因为调节规律正是通过这些特性来实现的。该章还介绍了如何通过原型试验来确定上述某些参数的方法，可在安装和运行调试中采用。

第九章中介绍机组甩负荷时确定水锤和转速上升值的近似方法。当然，所建议的公式不能作为《保证》依据使用，因为它们是近似公式，但为了得到初步的数据，以及估计输水系统各个参数和指标对过渡过程的影响，它们是有用的。

第十~十二章专讲分析研究水电站和抽水蓄能电站过渡过程的计算方法，第十三和十四章研究水力机组调节规律的设计原则。这些章节是主要章节，因为在这些章节中给出了完整的计算方法。根据计算结果，可以确定保证值和计算荷载。计算可以用手算、模拟机或数字计算机来完成。但这些方法都不是很简单的，主要困难在于要考虑设备的真实性。书中介绍得较详细的是图解算法，因它对实际设计工作来说较为方便，而且也能给出足够的精度。模拟计算机 ( *ABM* ) 则适合于分析复杂的闭环系统的工作，而电子数字计算机 ( *ЭЦВМ* ) 则适用于：当需要最全面地考虑系统各部件的全部特性和获得高精度解答时采用。

为了便于掌握书中所介绍的计算方法，对较重要的计算还用具体数字实例举例说明。

## 主要代表符号

- $H$ ——初始工作水头（净水头），米。  
 $H_0$ ——基准水头（按它计算相对值），米。  
 $H_{c,r}$ ——静水头，米。  
 $p$ ——某点压力，公斤/厘米<sup>2</sup>。  
 $p/\gamma$ ——表计压力，米。  
 $\Delta H$ ——表计压力或水头变化，米。  
 $\xi = \Delta H/H_0$ ——水锤压力的相对变化值。  
 $h = 1 + \xi$ ——相对水头（考虑水锤压力）。  
 $z$ ——相对于任意一个比较平面的高度位置，米。  
 $z_{H,0}$ ——相对于下游水位的标高，米。  
 $z_0$ ——导水叶的数量。  
 $\mu = \frac{p/\gamma + z_{H,0}}{H_0}$ ——某点的相对表计水头。  
 $M$ ——水轮机或水泵转轮的力矩，公斤·米，吨·米。  
 $M_0$ ——基准力矩（按它计算相对值），公斤·米，吨·米。  
 $m = M/M_0$ ——相对力矩。  
 $N$ ——水轮机的输出功率；水泵的输入功率，千瓦，兆瓦。  
 $Q$ ——水轮机或水泵的流量，米<sup>3</sup>/秒。  
 $Q_0$ ——基准流量（按它计算相对值），米<sup>3</sup>/秒。  
 $q = Q/Q_0$ ——相对流量。  
 $\eta$ ——水轮机、水泵或电机的效率。  
 $n$ ——转速，转/分。  
 $n_H$ ——正常（额定）转速，转/分。  
 $n_p$ ——飞逸转速，转/分。  
 $\omega$ ——转速的角频率，1/秒。  
 $f$ ——频率，赫芝；摩擦系数；截面积，厘米<sup>2</sup>，米<sup>2</sup>。  
 $\varphi = \frac{(n - n_H)}{n_H} = \frac{(f - f_H)}{f_H}$ ——转速（电流频率）的相对变化。  
 $\beta = \frac{n}{n_H} = 1 + \varphi$ ——相对转速。  
 $P$ ——作用在转轮上的轴向水推力，公斤，吨。  
 $P_{n,p}$ ——作用在转轮通流部件上的轴向水推力（对于混流式水轮机），公斤，吨。  
 $a$ ——导叶的开度，毫米。  
 $\alpha_0 = a/a_{max}$ ——相对开度。  
 $\alpha^\circ$ ——斜流式导叶的开度，度。  
 $s$ ——导水机构接力器推拉杆的行程，毫米。  
 $\alpha = s/s_{max}$ ——按接力器行程表示的相对开度。  
 $\varphi^\circ$ ——轴流式水轮机转轮叶片的安放角，度。  
 $T, T_p$ ——全部调节时间，秒。  
 $T_s$ ——接力器开始动作的滞后时间，秒。  
 $T_{s,p}$ ——从开度 $a_{max}$ 算起的接力器全行程时间，秒。  
 $T_d$ ——缓冲时间，秒。  
 $T_w = \frac{Q_0}{gH_0} \sum \frac{L}{f}$ ——压力管道的惯性（时间）常数，秒。  
 $T_a = \frac{GD^2 n_H^2}{365 N}$ ——机组时间（惯性）常数，秒（ $GD^2$ ——转动部件的飞轮力矩，吨·米<sup>2</sup>）。

# 第一章 水电站的水力过渡过程

## 1-1 水电站水力机械部分的结构和过渡过程的种类

当水电站的运行工况发生改变时，就会产生水力过渡过程。这种过程会在水电站中有相互联系的所有水、机部件中，即在上下游的引、排水管道中、水轮机和它的自动调节系统中，以及发电机的机械部件中都同时表现出来，并对水电站的工作产生非常重要的影响。此外，水电站电气部分的结构、自动控制和保护系统也对水力过渡过程的演变产生影响。可能发生的过渡过程的种类，它们发生的条件，以及过程变化的情形，与水电站的布置方式、参数以及电站的工作条件有关。其中以电站的水头、压力管道的结构和参数的影响为最大。这些，在水电站设计和运行中都是应该事先加以考虑的。

水头主要决定了电站中的水轮机型式。低水头时使用双重调节的轴流转桨式水轮机；中、高水头时则使用单调节的混流式水轮机；对于大型机组，当水头高于500~600米时使用冲击式水轮机，这种水轮机除了喷嘴可调节外，还装有折向器。目前应用愈来愈多的斜流式水轮机，已把双重调节的转桨式水轮机的使用范围扩大到更高的水头，大约达120~150米。

水电站压力引水管道的布置方式和结构是多种多样的[21, 22]。首先，它们可分为单独的和分叉的（成组的）。单独引水管道是把水引向一台水轮机（图 1-1a），河床式和坝后式水电站常具有这种引水管道，例如伏尔加水电站（Волжская ГЭС）、奇尔凯（Чиркейская）、托克托古列（Токтогульская）和某些引水式水电站：印古尔一级、埃兹明（Эзминская）、库班（Кубанские）等。

有分叉的引水管道可把水同时引向几台水轮机，并且可采用各种不同的布置方式来实现（图 1-1b）。采用这类引水管道的，例如有察尔瓦克、印古尔和努雷克水电站等。

当压力引水管道很长时，为了减小动荷载和改善水电站中机组的调节条件，常建造调压井。在这种情况下，压力引水管道分成两个部分：第一部分从进水口到调压井，其长度为 $L_d$ ，称之为压力引水管道；第二部分从调压井到水轮机，其长度为 $L_c$ ，称之为厂房压力管道（图 1-2a）。在地下式水电站的布置方式中，有时采用有压的排水管道，并设有尾水调压井（图 1-2b）。在某些情况下，水电站有时在上、下游同时具有压力引、排水管道和相应的调压井。有时，地下式水电站在尾水管与下游调压井之间，还带有作为尾水管延长部分的有压排水管道。

水力机组的机械部分，由水轮机和发电机组成，它们主要依靠水轮机的自动调速器（АРТ）来进行调节和控制（图 1-3）当机组转速与额定转速发生了偏差 $\Delta n$ 后（电流频率的偏差 $\Delta f$ ），或者接到控制作用 $y$ 和开度限制 $r$ 进行操作的信号后，调速器就能相应地改变接力器的行程 $s$ ，也就是改变水轮机的开度。为了通用起见，实用上常采取下列相对无因次参数来表示：

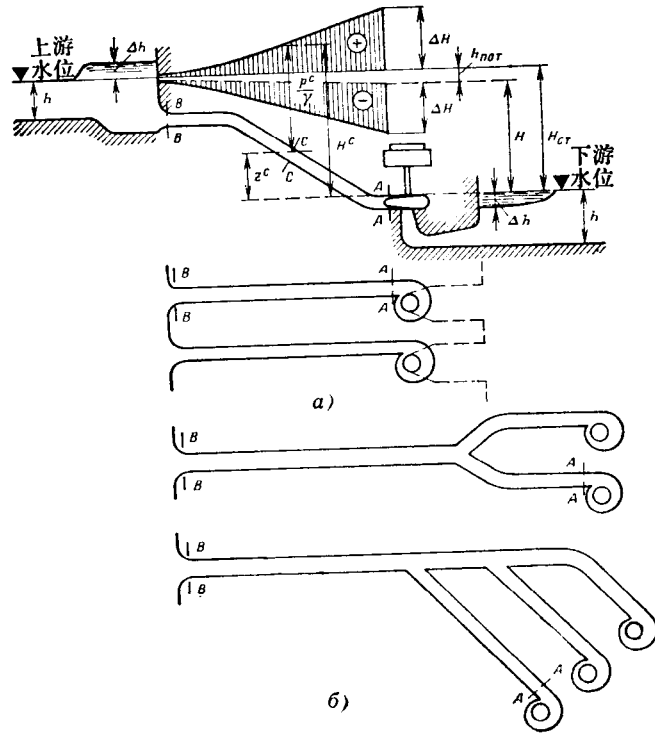


图 1-1 水电站的压力引水管道  
 a) 单独的; б) 分叉的 (成组的)

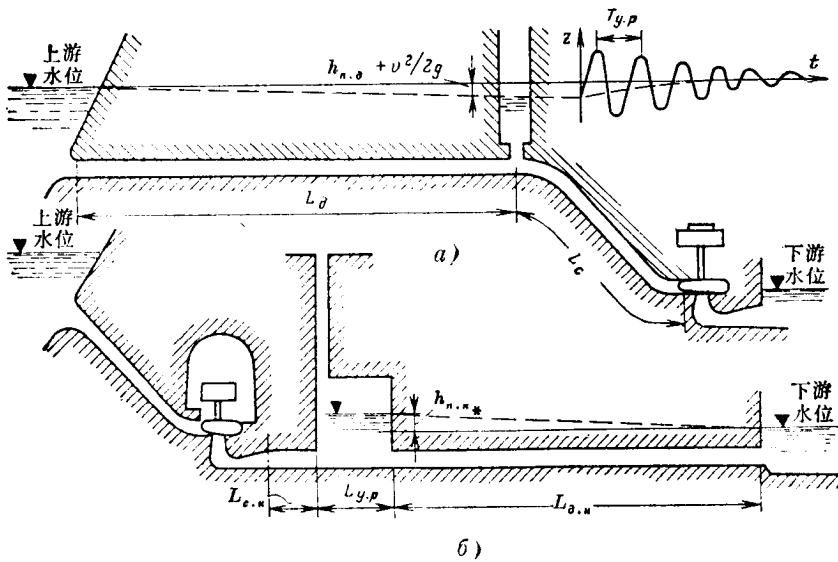


图 1-2 有压力管道的水电站示意图

转速  $n$  或电流频率  $f$  的相对偏差为

$$\varphi = \frac{n - n_H}{n_H} = \frac{f - f_H}{f_H} \quad (1-1)$$

式中  $n_H$ ——额定（同步）转速；

$f_H$ ——额定频率（50赫芝）。

开度的相对值为

$$\alpha = \frac{s}{s_n} \quad (1-2)$$

式中  $s$ ——从全关位置算起的接力器行程；

$s_n$ ——导叶开度从零到全开时的接力器行程。

采用双重调节时，第二套调节机构通常用协联装置与第一套调节机构相联，从而使其接力器跟着主动接力器动作。例如叶片可转动的轴流和斜流式水轮机，转轮叶片的接力器是跟随导水机构的接力器而动作的。在稳定工况时，导叶开度  $\alpha$  和转轮叶片安放角  $\varphi^\circ$  之间，则按相应的协联关系确定。

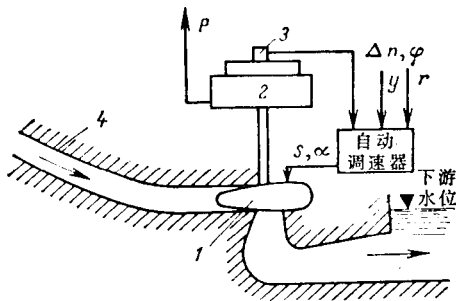


图 1-3 水力机组示意图

1—水轮机；2—发电机；3—测速发电机；4—引水管

水电站运行工况的改变，主要由机组负荷发生变化所引起，此时开度  $\alpha$ 、转轮的输出力矩  $M$  和水轮机流量也随之发生了变化。如发电机未并入电网，则机组的转速亦可能发生很大的改变。

由转速变化而引起的惯性力又将对过渡过程的变化过程产生很大的影响。在过渡过程中，还会产生水锤现象，使压力管道内的作用水头增大

（正水锤）或减小（负水锤）了一个动分量  $\Delta H^c$ （图 1-1a）。因此，在过渡过程中，压力管道内的压力，与稳定工况时有很大差异。对管道断面 C-C 而言，平均的表计压力值可按下式确定：

$$\frac{p^c}{\gamma} = H^c - Z^c = H_0^c + \Delta H^c - Z^c, \quad (1-3)$$

式中  $Z^c$ ——断面 C-C 离下游水位的高度；

$H_0^c$ ——相应于发生动压  $\Delta H^c$  时的瞬间流量，该流量在稳定工况时在断面 C-C 上的水头值。

由公式 (1-3) 看出，正水锤使管道中的压力比稳定工况时增大，而负水锤使压力减小。当负水锤的绝对值很大时，在管道的某些断面上的压力可能变为负值（ $p^c/\gamma < 0$ ），这就表明发生了真空。当真空达到一定数值时，水流连续性就可能遭到破坏，其条件为

$$\frac{p^c}{\gamma} + \frac{p_a}{\gamma} \leq \frac{p_{a \cdot n}}{\gamma}, \quad (1-4)$$

式中  $\frac{p_a}{\gamma}$  —— 大气压力；

$\frac{p_{a,n}}{\gamma}$  —— 与温度有关的水的饱和蒸汽的绝对压力。

为了叙述方便和通用起见，水锤可以用无因次的相对水头变化来表示。

$$\xi = \frac{\Delta H}{H_0} \quad (1-5)$$

当机组的过渡过程伴随有过流量的变化时，还会在无压的水道中引起不稳定工况，它是形成高度为  $\Delta h$  的波浪形式出现（在图 1-1a 中表示的是流量减少时的情况）。但由于这种波浪所引起的水轮机水头的变化相对很小，所以，在研究机组过渡过程时，通常可不予考虑。只有在水头非常低或者在研究某些特殊问题时，例如水电站按水流进行自动调节时，才有较大的影响 [46a]。

在有压的引水管道中，过渡过程主要表现为引水管道内的水体和调压井中水位的波动。通常，调压井中的水位  $Z$  常以上游水位作为基准来表示。那末，关闭水轮机时的水位变化曲线  $Z(t)$  将如图 1-2a) 所示。沿电站压力管道整个长度上的压力，以及水轮机的水头，将按周期  $T_{v,p}$  波动。在设计建筑物和设备时，应该考虑在不稳定工况时压力管道中的压力变化。压力的变化将会引起水轮机水头的变化，从而对机组调节的过渡过程将产生很大的影响。对水轮机来说，转轮输出的力矩，主要取决于下列参数：开度  $a$ （双重调节的水轮机则同时取决于导叶开度  $a$  和转轮叶片的转角  $\varphi^\circ$ ）、水头  $H$  和转速  $n$ 。

$$M = f(a, \varphi^\circ, H, n)。$$

力矩的具体表达式，可从试验得出的水轮机综合特性曲线中求得。开度减小时力矩  $M$  也随之减小，但是由于水锤而使水头增加了  $\Delta H$ ，两者作用是相反的。总的来说，水锤压力对力矩的作用总是与调速器的作用相反的。例如，如果为了减少机组出力，即减少力矩，调速器关闭水轮机，那末由此产生的水锤却会引起力矩的增大。这样一来，水电站的压力管道使机组出力的调节条件恶化。这一点在水电站设计和运行中，是必须加以考虑的。

机组过渡过程的特征是下列参数随时间而变化：开度  $a(t)$  和  $\varphi^\circ(t)$ 、力矩  $M(t)$ 、转速  $n(t)$  或  $\varphi(t)$ 、轴向水推力  $P(t)$ 、过流通道各处的压力  $\frac{p_i}{\gamma}(t)$  及其它。

机组在正常运行条件下所产生的过渡过程，主要有以下几种：

起动、同步和并入电网；

运行机组增减负荷；

停机（卸去负荷，发电机脱离电网，水轮机全部关闭，机组制动）；

发电机从电网切除时的甩负荷（通常由短路引起）；

转为同步调相机工况（水轮机关闭和发电机在不脱离电网的情况下卸去负荷，把水压出转轮室）。

此外，还可能发生特殊的事故过渡过程。例如，发电机脱离电网而调速器又发生故障时，机组进入飞逸，以及用事故配压阀或水电站引水管道上的阀门来关闭水轮机，使机组脱离飞逸等，都属于事故过渡过程。

## 1-2 机组的自动控制原理

对水电站机组进行自动控制的主要目的是，为了保证有效和经济的利用机组，以便降低发电成本和提高整个电网的工作可靠性。同时，对电站的控制实现自动化后，可以减少水电站的运行人员，从而提高水电站的技术经济指标。

水力机组具有可调节性，是水电站的特点之一，它能承担变化的负荷，同时又能保持很高的能量指标。水力机组能够快速起动和并网，又可迅速停机。所有这些特点，决定了利用水电站来承担峰荷是较适宜的。水电站的这种运行方式，也有利于最充分地利用电站的装机容量。

水电站所承担的负荷变化可分成两部分，第一部分是由调度计划预先规定好了的；第二部分为计划外的偶然负荷变化。后者与电网中各部分的工作条件以及负荷的意外情况有关。当电网发生事故时，水电机组具有能迅速改变出力的能力，因此，过渡过程常是水电站运行中不可分离的部分[21,41]。

机组的自动调节和控制系统，应能保证水电站执行它的职能，即满足电网在功率变化方面的要求。此外，还要保证对水电站本身动力设备的利用，处于最有利状态。这就归结为如何选择在某个时刻内，机组参加运行的最佳台数和机组间最有利的负荷分配，以便使水电站获得最高的平均效率。

如果水电站装有同样特性曲线的同一种水力机组，同时每台机组的引水管道损失也相同。那末，将负荷均匀分配在运行的机组上，也就是每台水轮机的开度相同，就能获得最高的效率。负荷的分配可用调速器的静特性  $\alpha=f(\varphi)$  来实现。静特性代表了稳定工况时水

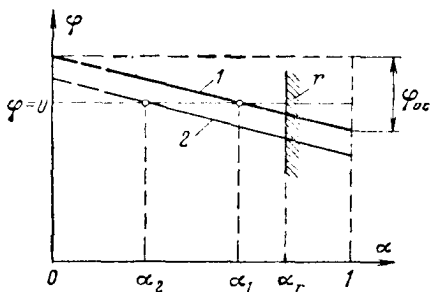


图 1-4 水轮机调速器的静特性

轮机开度和机组转速（电流频率）间的关系。静特性曲线在水轮机的工作开度部分接近于直线，如图 1-4 所示。由全程的  $\varphi_{0c}$  值所确定的斜率，称作残留不平衡度或静态调差率。通常，调速器的  $\varphi_c$  值可以在零（无差调节）到 0.04~0.06（静态调差率为 4~6%）范围内整定。当按有差特性工作时，调速器将维持与电网频率相对应的开度。例如，对特性曲线 1，如果在某个时刻电网频率为 50 赫芝，即机组

转速等于额定转速和  $\varphi=0$ ，那末水轮机开度将等于  $\alpha_1$ （图 1-4）。因此，如果对所有机组的调速器整定相同的静特性，那末所有运行的水轮机将自动保持相同的开度。在这种条件下，当电网频率偏离  $\Delta\varphi$  时，所有水轮机的开度将同时改变  $\Delta\alpha$ ，并且

$$\Delta\alpha = \frac{\Delta\varphi}{\varphi_{0c}} \quad (1-6)$$

机组出力也就相应地改变。但是要维持电网频率恒定，使用这种方法是办不到的。例

如，假使水轮机开度的调节范围为 60% ( $\Delta\alpha=0.6$ )，整定的静态调差率为 3% ( $\varphi_{oc}=0.03$ )，那末按照公式 (1-6)，只有在电网频率偏差达  $\Delta\varphi=0.03 \times 0.6=0.018$  或 1.8% 时，开度才能改变 60%。而根据运行规程 [93]，电网中长期的频率偏差不得超过  $\pm 0.2$  赫芝 或  $\pm 0.4\%$  要解决上述缺点似很容易，只要相应地减小  $\varphi_{oc}$  值就可以了。但这样一来，维持开度相等的精度就会降低，而在无差调节情况下即  $\varphi_{oc}=0$  时，机组之间的开度分配是不固定的。

近代机组的自动控制系统，特别是大型水电站，是采用对整个水电站或机组群进行集中控制为基础的。这类系统的原理图如图 1-5 所示。属于控制全电站或机组群的自动装置有：有功功率自动调节器 (APM)、无功功率自动调节器 (APPM) 以及与机组自动装置相联系的自动操作器 (AO)。而属于机组自动装置的，则可按功能特征分成四类：水轮机的自动调速器 (APT)；作用于励磁系统上的发电机电压自动调节器 (APB)；机组自动检测装置 (AKA) (检测温度、润滑、冷却、压力及其它)；操作自动装置系统 (CTA)，它是保证机组起动和停机，以及作调相工况运行时所需的操作程序和作为协调之用的。

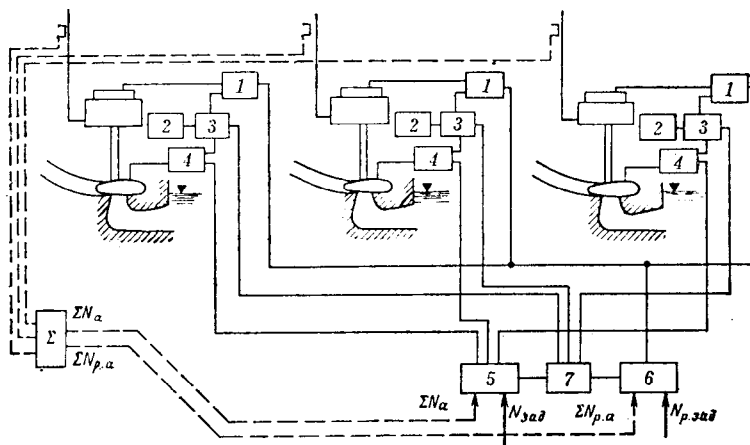


图 1-5 水电站机组自动控制原理图

- 1—APB——励磁电压自动调节器； 2—AKA——机组自动检测装置；
- 3—CTA——操作自动装置系统； 4—APT——水轮机自动调速器；
- 5—APM——有功功率自动调节器； 6—APPM——无功功率自动调节器；
- 7—AO——自动操作器

水电站或机组群的总功率  $\Sigma N_a$  是由有功功率自动调节器来调节的。调节信号  $N_s$  是从电网的调度点，按照电站在系统中所承担的职能，以遥控方式送来的 [77]。如果某水电站仅承担计划内的负荷变化，那末  $N_s = N_{n.a}(t)$ ，并且在某一阶段内维持运行机组的总功率  $\Sigma N_a$  不变。但如电站还承担意外的负荷变动，并需维持电网输电线路方面所规定的功率潮流，那末信号  $N_s$  的结构将变得十分复杂。它的一般表达式如下：

$$N_s = N_{n.a}(t) + K_1 \varphi + K_2 \int \varphi dt + C_1 \Delta P_{o.s.m} + C_2 \int \Delta N_{o.s.m} dt;$$

式中  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $C_1$  和  $C_2$  —— 有因次的系数。

公式第二项表示对频率瞬时偏差的反应，它决定了按频率来调节功率的调差率；而第三项表示对频率偏差积分值的反应；第四和第五项相应给出对交换功率 $N_e$ 。偏离规定值的瞬时值和积分值的反应。系数愈大，调差率愈小，水电站参加有功功率的调节作用就愈强。

有功功率自动调节器接到信号 $N_e$ ，以及从测量回路得到的 $\Sigma N_e$ 值后，就对各台运行机组的调速器进行操作，一直到满足下列条件为止：

$$\Sigma N_e = N_e$$

调速器分配负荷时，可采用各种不同的方式。例如，把某些调速器的特性整定在无差调节上，并且利用开度限制机构 $r$ 或者控制作用 $y$ ，使另一台调速器整定在较高的频率上（中心的功率调速器）[119]。

控制作用 $y$ 只使静特性曲线产生位移，而不改变调速器静特性的斜率（调差率），这就能够在系统的某个频率或机组某一转速下，改变水轮机的开度。例如，假使把图1-4中的静特性曲线从位置1移动到位置2，则开度将从 $\alpha_1$ 减小到 $\alpha_2$ 。

开度限制机构确定了极限的最大开度值（接力器行程），它与转速以及作用在调速器上的其它因素无关。这样，如果限制机构放在相当于开度为 $\alpha_r$ 的位置 $r$ 上（图1-4），那末无论系统频率和机组转速 $\varphi$ 有什么变化，或者静特性曲线无论怎样移动，调速器已不能使开度增大超过 $\alpha_r$ 。但是，如果转速增高或静特性曲线向小负荷侧移动时，此时开度限制机构就不会妨碍水轮机向关闭侧运动。当开度限制机构移动到零位（ $\alpha_r=0$ ）时，水轮机就完全关闭。所以，这种方法可用来使机组停机。

所有的机组成组调节的各种原理图，都预先规定好各台水轮机开度间的某种组合关系，这种关系应能使平均效率达到最高。实用上，经常采用相等的水轮机开度。但因各台水轮机实际的水力损失值不同，特性曲线也不完全一样，因此与真正的最优关系将略有偏差。

自动操作器AO按照储存好的计划，挑选运行机组的最佳台数，并把脉冲送到操作自动装置系统CTA中，使各台机组起动或停机。

无功功率自动调节器接到给定的信号 $N_{p.e}$ ，以及从测量回路得到的电站实际发出的无功功率信号 $\Sigma N_{p.e}$ 后，就发出相应的脉冲，作用到发电机励磁电压调节器APB上。

根据上述对水电站机组自动控制原则的介绍，可以对水电站产生过渡过程的条件作出某些结论。不论是由自动操作器的脉冲或电站控制台值班人员的操作，机组的起动都是依次进行的，即几台机组的起动和并入电网不是同时实现的。

机组停机可以由下述原因造成：根据 $N_e$ 由自动操作器或控制台值班人员的操作而进行停机（通常，各台机组也依次进行），或当机组运行中遇到某种严重故障时，由机组自动检测装置动作而引起停机。例如，当个别部件的温升超过允许值、润滑油的供给中断以及其它原因（当机组辅助设备采用独立系统时，这种停机一般只可能在一台运行机组上发生）。

成组运行机组在规定的调节范围内，以最大速度改变负荷（增或减），这只有在承担电网正常计划外偶然负荷变化的水电站上，才有可能发生。这种调节范围，主要取决于水轮机的特性。

几台机组（成组）的发电机同时脱离电网，即发生同时甩负荷的可能性，主要与电站的电气主结线图有关。一台机组的甩负荷值，可能是任意的，从零到最大，因为机组脱离电网也可能在起动或停机时发生。但对一组机组来说，所用负荷值应该处于所采用的调节范围内。

各种过渡过程的特点将在下面加以研究。

### 1-3 机 组 起 动

机组起动是一种使机组从静止状态转入转动，随后使之同步和将发电机并入电网的过程。研究机组的起动过程和在水电站设计中正确考虑这种过程，有很大的实际意义。首先是为了缩短起动时间、减轻推力轴承的工作条件以及为发电机并网时创造最优的同步条件。

图 1-6 给出转桨式水轮机在起动过程中水轮机力矩  $M$ 、机组转速  $n$ 、导叶开度  $a$ 、转轮叶片安放角  $\varphi^\circ$ 、作用水头的偏差  $\Delta H$  和轴向水推力  $P$  等随时间的变化曲线。

当给出机组起动脉冲后，调速器主配压阀就从“中间”位置向开启侧移动。接力器就把导叶从  $a=0$ （点 1）打开到起动开度值  $a_n$ （点 2）。导叶打开后，略过一会，转轮叶片（点 3）就从起动角  $\varphi_n^\circ$  转到符合协联关系的位置  $\varphi^\circ$ 。转轮叶片处于起动角，是在停机过程中就预先调整好了的。所以，在已经停机的机组上，转轮叶片总是已处于起动角位置。

随着导叶开度从  $a=0$  加大到  $a=a_n$ ，水轮机转轮的输出力矩逐渐增大。当输出力矩超过摩擦力矩  $M_{rp}$  时（点 4），机组就开始转动（点 5）。在转速达到调速器静特性的整定值后（点 6），接力器就减小导叶的开度（点 7），并在开度为  $a_x$  的空载运行工况下稳定下来。

轴向水推力  $P$  的变化特点与水轮机力矩  $M$  的变化相同。

可以指出，水轮机力矩  $M$  和轴向水推力  $P$  的变化过程有下列一些特点。随着导叶的开启，力矩  $M$  和轴向力  $P$  显著地增大，轴向水推力的最大值，将出现在机组开始转动点（点 5）和导叶起动开度点（点 2）之间。水轮机力矩一般在  $a=a_n$  时达到最大值。当机组转速继续增加时，水轮机力矩和轴向水推力就逐渐减小。当  $dn/dt=0$  转速达到最大时，水轮机力矩等于零。之后，随着导叶的关闭，机组转入制动工况。在该工况下力矩变为负

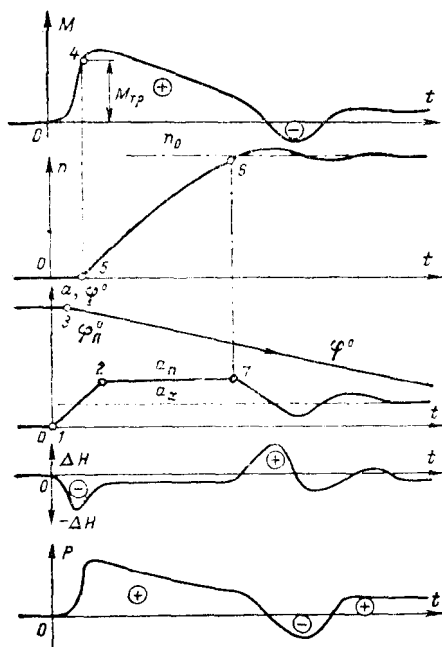


图 1-6 转桨式水轮机在起动时的过渡过程

值，这时机组就受到制动，即  $dn/dt < 0$ 。

当机组在开度  $a_x$  下（空载开度），建立起额定转速后，水轮机力矩将为正值，等于轴承摩擦力矩和机组转动部件的风损之和。此时，轴向水推力也将是正值（与正常水流方向一致），而其大小取决于水头、导叶开度和转轮叶片安放角的大小。作用水头的偏差值  $\Delta H$  是随导叶开度和流量而变化的。当导叶开度增大时，水轮机水头降低，即  $\Delta H$  为负值。 $\Delta H$  值包括水锤和水力损失。因此，当建立了空载工况后，实际水头将比机组起动前的静水头小，其差就等于水力损失。

上面介绍了转桨式水轮机机组起动时的过渡过程的一般概况。实际上，从示波图实测的主要水力参数的变化过程来看，过程是更为复杂的。作为例子，图 1-7 a) 给出察尔达利水电站机组起动时的示波图。该水电站装有四台单机容量为 25 兆瓦的转桨式水轮机。在给出起动脉冲后（A 线位置），接力器把导叶打开到起动开度  $s_n = 145$  毫米。接力器的平均移动速度约为 12 毫米/秒。应该指出，开始时，由于阻尼影响而产生某些迟后现象。在给出起动脉冲后大约经过三秒钟，转轮叶片从起动角度  $\varphi_n^\circ = +15^\circ$ ，以大约每秒 0.45 度的速度开始转动。

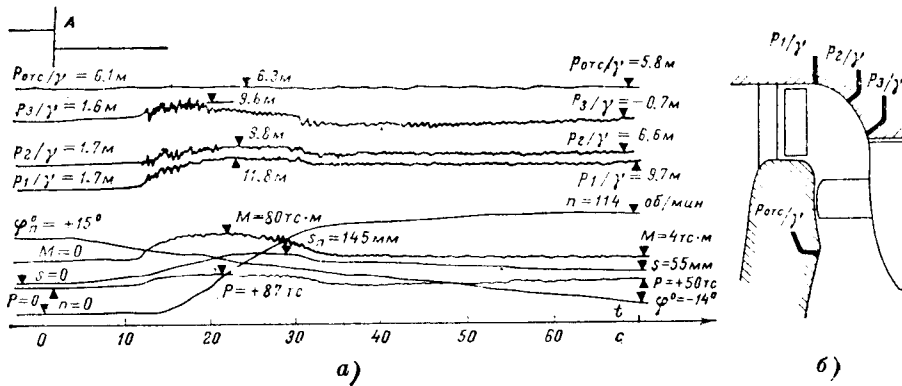


图 1-7 察尔达利水电站的转桨式水轮机在起动时的过渡过程示波图  
 об/мин—转/分；Tc·m—吨·米；mm—毫米；Tc—吨；m—米；c—秒

在导叶开启的初始阶段，力矩  $M$  和轴向力  $P$  基本上没有增大，仅在原始值上下略有小的波动。这可解释为当转轮叶片的角度很大（ $\varphi^\circ = +15^\circ$ ）而导叶开度很小时（ $a = 35$  毫米之前），大部分水流的能量，在导叶和转轮叶片间就已消耗了。

当接力器行程超过  $s = 40$  毫米后，力矩和轴向力开始迅速增大。同时，脉动分量也增大了，机组开始转动，并出现了扭振。与此同时，在水轮机的顶盖下面，也产生了压力脉动。转轮的轴向水推力的最大值达 87 吨，但因机组转动部件重为 200 吨，故转子未被抬起。

机组建立起额定转速后，水轮机力矩从 80 吨·米减少到 4 吨·米，而轴向水推力降到 50 吨。在本次试验中，水轮机室的压力实际上是不变的，这是因为导叶开度的变化速度不大的缘故。在转轮叶片下面的尾水管内的压力  $p_{0rc}/\gamma$ （图 1-7），在导叶达到起动开度时增加了 0.2 米。

混流式水轮机机组起动时的过渡过程总的说来，与上述相似。图 1-8 表示拉特柴努尔水电站（Ладжанурская ГЭС）机组，在正常起动时的实测过渡过程示波图 [70]。

给出起动脉冲后，调速器的主配压阀移动全行程  $\sigma_0$ ，导叶约在二秒钟内开启到起动开度  $s_n$ ，该开度等于接力器全行程的 18%（37毫米），它比空载开度大一倍以上。同时，随着导叶开度的增加，水轮机力矩也增大。注意到这时扭矩产生了强烈的波动，波动幅值与平均值相比是可观的。扭矩的波动在机组转速达到额定转速的 40% 以后就终止了。这时，尾水管内转轮下面的压力脉动亦有所降低。

在机组转速增加的主要时段内（ $t < 25$ 秒），旋转加速度几乎不变，平均为 1.5赫芝/秒。当接近同步转速时，旋转加速度降到约 1 赫芝/秒。从给出开启导叶的脉冲算起，一直到以自同期方式并入电网为止，整个起动时间将近 37秒。

混流式水轮机的起动特点是轴向水推力不大。从拉特柴努尔水电站机组的试验来看，整个轴向水推力的变化只有 1.2吨。

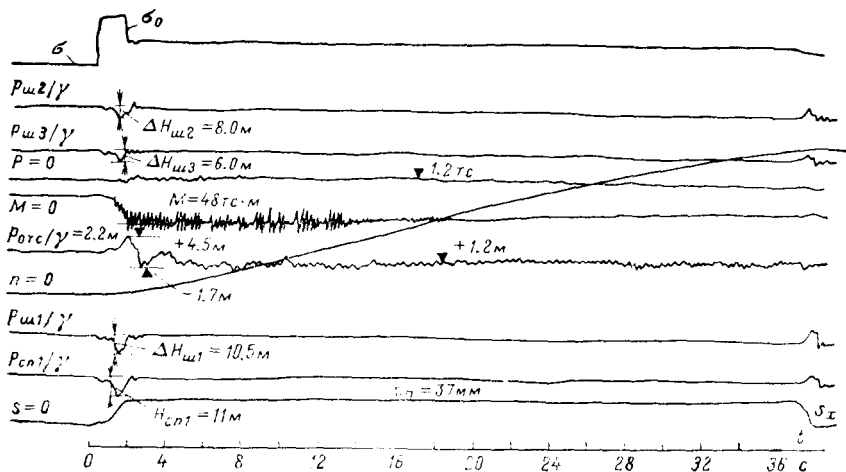


图 1-8 拉特柴努尔水电站的混流式水轮机的过渡过程示波图

$D_1 = 2.75$ 米； $H_{max} = 135$ 米； $H_p = 131$ 米； $N_H = 38.2$ 兆瓦

压力引水管道中的压力变化，是由起动时导叶开启的特性决定的。起动开度的数值愈大（ $s_p$ 愈大）和接力器推拉杆的移动速度愈快，压力降低（负水锤）也愈大。在输水系统各点上所进行的压力测量表明，压力变化的特性是相同的。1号机组起动时，它的蜗壳中的压力  $p_{cn1}/\gamma$  的降低和球阀前的压力  $p_{u1}/\gamma$  的降低两者差别不大。这是因为两个测点的位置很接近之故。而带负荷的 2 3号机组上，球阀前的压力（ $p_{u2}/\gamma$ 和 $p_{u3}/\gamma$ ）则比 1号机降低得少些。三台机组的压力变化图形很相似，这是因为拉特柴努尔水电站的机组，采用了一根压力引水管道供水，到电站厂房后才分成三根短管。应该指出，在这种供水布置方式下，其中一台机组起动，可能会引起其它运行机组在短时间内的水头和出力的降低。

图 1-9 表示拉特柴努尔水电站机组缓慢起动的示波图，从它可以详细观察机组开始转动的情形。随着导叶的打开，力矩慢慢地增大，这时脉动分量也随之增大。机组开始转动时（图中 A 线），尾水管中的压力  $p_{orc}/\gamma$ 、扭矩  $M$  和轴向水推力  $P$  的脉动也随之增大。当转

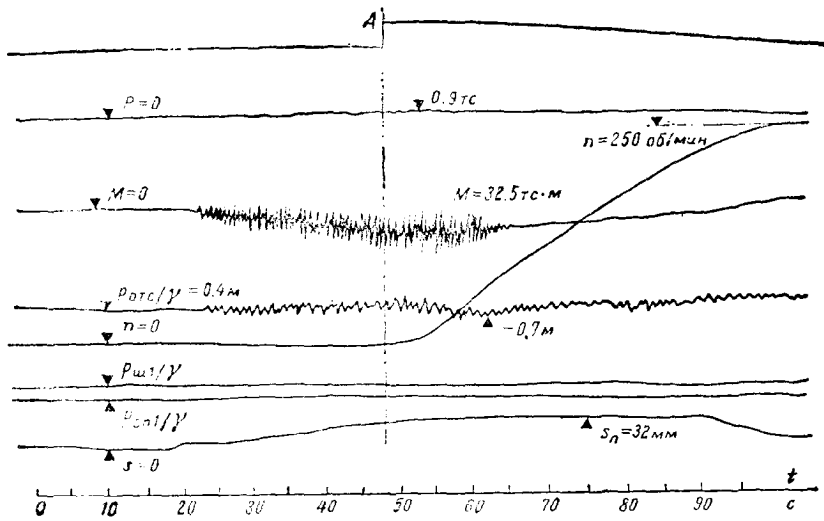


图 1-9 拉特柴努尔水电站混流式水轮机缓慢起动时的过渡过程示波图  
 об/мин—转/分; TC—吨; TC·M—吨·米; M—米; мм—毫米; с—秒

速达到额定值的 25% 时，各种脉动值就急剧降低。

机组开始转动所需的力矩  $M_{TP}$ ，与作用在推力轴承上的轴向力，以及静摩擦系数  $f_{TP}$  有关。通过一系列的原型试验，我们得到了推力轴承静摩擦系数  $f$  的实测数值，可供起动计算参考。对于立轴机组 [105a] 为：

$$M_{TP} = (G + P) f_{TP} r_{cP}, \quad (1-7)$$

式中

$$r_{cP} = \frac{2}{3} \frac{r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2}{r_1 + r_2} \quad (1-8)$$

其中  $G$  —— 考虑浮力后的机组转动部件重量；

$P$  —— 转轮的轴向水推力；

$r_1$  和  $r_2$  —— 推力轴承扇形瓦块的内径和外径；

$f_{TP}$  —— 静摩擦系数。

从原型条件下得到的某些静摩擦系数值  $f_{TP}$  列在表 1-1 中。

表 1-1

水	电站	推 力 轴 承 的 结 构	$f_{TP}$
	高 尔 基	双排刚性支柱形式	0.15
	伊 尔 库 茨 克	单排液压形式	0.20
	拉 特 柴 努 尔	单排刚性支柱形式	0.20

这些数据能够用来确定导叶起动开度的最小值。实用上，起动开度一般取略大一些，以保证机组能迅速旋转到同步转速。

对混流式水轮机而言，只需确定导叶的起动开度就够了，而对转桨式水轮机，则还

要选择转轮叶片最优的起动机角。图 1-10 给出高尔基电站的起动机试验结果。水轮机为 ИИ510-ВВ-900 型。试验时水头为  $H=10\sim 12$  米。由图可见，当转轮叶片的安放角  $\varphi = +8^\circ \sim +10^\circ$  时，可以使机组达到额定转速的时间为最短。但电站常采用较大的  $\varphi_n$  值来起动机组。这时机组所需的旋转加速时间增长，并需较大的导叶起动机开度，但起动机期间的轴向水推力则有所降低（图 1-11）。

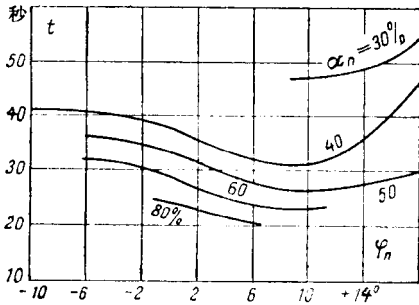


图 1-10 装有转桨式水轮机的机组达到同步转速的旋转加速时间与转轮叶片安放角和导叶开度的起动机值之间的关系

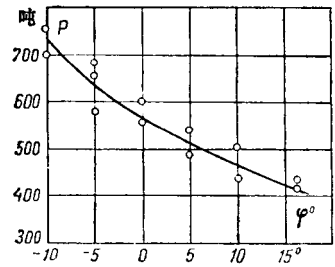


图 1-11 轴向水推力与转轮叶片的起动机安放角之间关系

上述情况表明，选择机组的起动机参数并非是一个很简单的问题。此外，起动机参数还与发电机的并网方法以及电机的结构有关。

同步发电机投入电网的方法，可以采用准同期或自同期来进行。采用准同期时，先给发电机加上励磁。这时，必须等电机的频率和电压相位与电网相同时，才能并入。故这种同期方法常需较长时间，甚至当电网的电压和频率很稳定时，并网时间仍长达 1~2 分钟 [77]。

在事故情况下（有时也用作正常起动机方式），允许水轮发电机以自同期方法并入电网。这时，机组先不加励磁，当达到或接近于同步转速时，在某种加速度和转差率下并入电网，再加上励磁。在这种情况下，靠发电机自身的力矩把发电机强行拖入同步。

采用自同期时，导叶的起动机开度，对于转桨式水轮机，还包括转轮叶片的起动机安放角，都与发电机的结构有关。例如，当带有阻尼绕组的发电机转差率很大时，为了快速拉入同步，在接近同步转速的范围内，水轮机的力矩应为额定值的 30~40%，而加速度不大于 2~3 赫芝/秒 [77]。

采用自同期方法并入电网的机组，当其发电机没有阻尼绕组时，起动机整定值应这样选择，使水轮机的力矩等于 0.15~0.2 的额定值，而加速度不超过 1~1.5 赫芝/秒。

#### 1-4 增负荷和卸负荷、正常停机

水电机组在电网中运行时，所发生的负荷变化，大致可以分成以下两类：

第一类：从空载增加负荷至指定值；或带负荷的机组卸负荷至零（空载），之后发电机脱离电网与停机（正常停机）。

第二类：机组在水轮机运转特性曲线所确定的功率调节范围内改变负荷，也就是研究机组在水轮机运转特性曲线所允许的最小出力到额定出力的范围内，增减负荷时的过渡过程。

图 1-12 为装有混流式水轮机的机组从空载工况增加负荷时的过渡过程。

开始时，导叶开度对应着空载工况（点 1）。机组已并入电网，功率等于零，但水轮机力矩为正值（点 3'），其值为通风和摩擦损失之和。蜗壳内的压力等于扣除水力损失和速度水头后的静水头，故  $\Delta H < 0$ （点 5）。

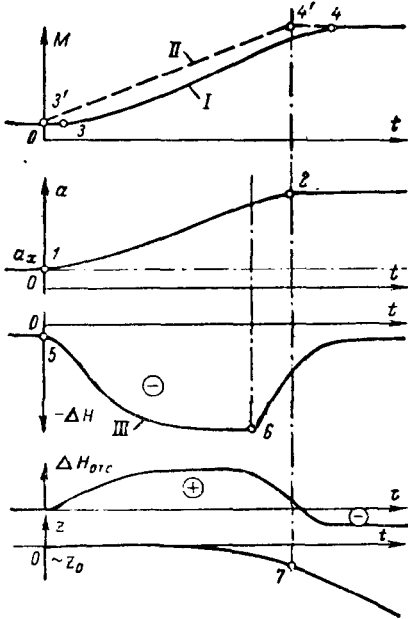


图 1-12 在装有混流式水轮机的机组上，从  $N = 0$  起加负荷时的过渡过程

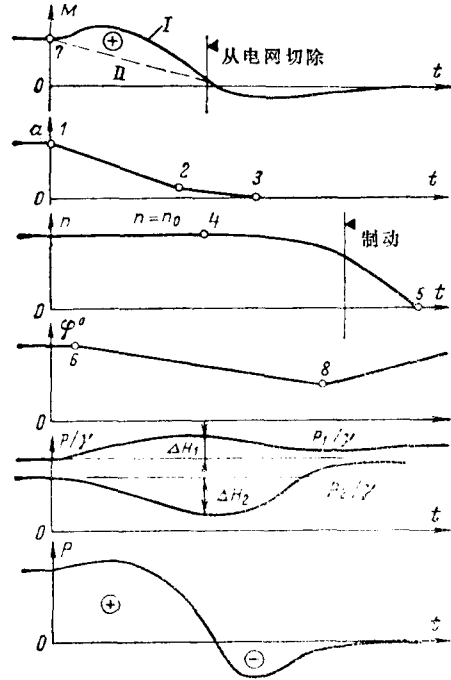


图 1-13 转桨式水轮机的机组在正常停机时的过渡过程

给出加负荷脉冲后，导叶开度的限制机构移动到与预定功率值相对应的位置。导叶打开，流量开始增加，水轮机力矩也随之改变（点 3），但比导叶开始动作的点（点 1）略迟。如果加负荷过程中的水头始终保持不变，那末水轮机力矩将与导叶开度同步变化，即从点 3' 开始沿着虚线 II 变化，而在点 4' 结束。该点同规定的导叶新开度（点 2）相对应。但在实际条件下，主要由于负水锤的作用使水头减小，水轮机力矩将变小，故力矩变化曲线（实线 I）在时间上（点 3 和 4）将产生迟后现象。水轮机水头的变化（曲线 III）与导叶开启（点 5）同时开始，而在导叶达到新的开度后才结束。最大的水头降低  $\Delta H$ （点 6）出现在流量变化速度为最大的区域内。除了引水管道内的压力变化外，影响水头的还有转轮后的压力变化  $\Delta H_{0rc}$ 。当水轮机打开时， $\Delta H_{0rc}$  为正值，即使作用于水轮机的水头减小。调压井内水位的降低也起同样的作用，水位变化速度是在导叶开启终了时达到最大（到点 7）。

分析变负荷时过渡过程的目的，在于寻找最佳的调节规律。在该种规律下，水轮机的力矩变化应在满足包括水锤在内的各种动力作用不超过限定值的条件下，将以最大的速度进行。转桨式和斜流式水轮机设备的过渡过程，也应同样满足这些要求。但这些水轮机的负荷不仅由导叶开度，而且同时由转轮叶片的转角来调节，从而增加了调节任务的复杂性。

图1-13介绍转桨式水轮机组卸负荷到零和停机时的全部过渡过程的变化曲线。在给出停机脉冲后，导叶关闭（点1-3），而稍迟片刻（点6），转轮叶片也开始关闭（ $\varphi^\circ$ 线），转轮叶片的关闭时间很长（一般比导叶的关闭时间长2~3倍），所以在过渡过程期间，协联关系遭到破坏。当机组出力接近零时，就将机组从电网切除，之后水轮机就进入制动工况，转速 $n$ 开始降低（点4），当转速下降到 $50 \pm 10\%$ 时，就投入制动使机组停机（点5）。当机组转速降低到某一值时，或者达到某个给定开度值时，就投入使转轮叶片角度重新增大到启动安放角的脉冲（点8）。

水轮机力矩 $M$ 的变化，其开始点（点7）在时间上略迟于导叶的开始关闭点（点1）。假如水轮机的作用水头始终是常数，那末水轮机力矩 $M$ 的变化应按直线II进行。实际由于蜗壳压力 $p_1/\gamma$ 的增高和导叶后的压力 $p_2/\gamma$ 的减小，使作用水头增大了（ $4H_1 + 4H_2$ ）。因此，水轮机的力矩也将增大（曲线I），甚至可以超过最初的数值。在机组从电网切除后（点4），导叶继续关闭，水轮机就转入制动工况，力矩的符号就变成相反。

轴向水推力 $P$ 的变化，与水轮机力矩的变化相似。也发现轴向水推力和最初值相比有暂时增高的现象，而当机组转为制动工况时，就出现与水流方向相反的向上的轴向水推力。

转桨式水轮机组停机时过渡过程的实际情况，可用示波图（图1-14）来举例说明。该示波图是在发电机初始出力为 $N_T = 25.5$ 兆瓦和水头为 $H = 16.4$ 米的察尔达利水电站上实测得到的。

从示波图可见，随着导叶的关闭，在 $s = 570$ 毫米到开始缓冲关闭（ $s = 180$ 毫米）的主要行程段间，发电机出力从 $N_T = 25.5$ 兆瓦下降到 $N_T = 0$ 。当继续关闭时，发电机转为电动机工况（机组从电网切除整定在 $s = 100$ 毫米处）。水轮机力矩最初为219吨·米，在导叶关闭过程中，起初增加到232吨·米（增加6%），而后在接近缓冲关闭的起始点时变

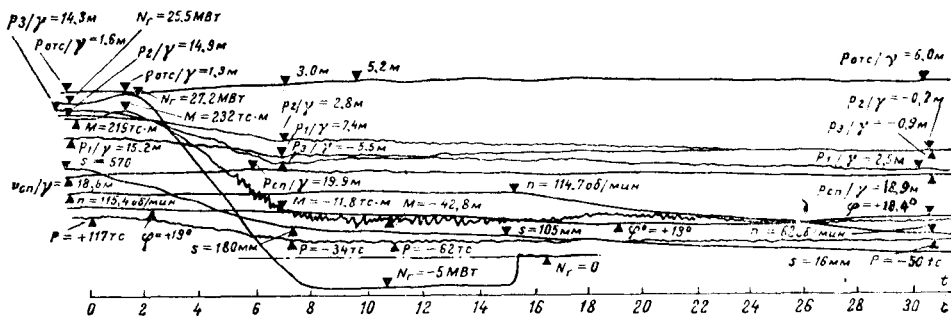


图 1-14 察尔达利水电站的转桨式水轮机在正常停机时的过渡过程示意图  
 $M$ —米； $tc$ —吨； $mm$ —毫米； $ob/min$ —转/分； $tc \cdot m$ —米·吨； $mw$ —兆瓦