



高等学校教材

水电站水力过渡过程

武汉水利电力大学 吴荣樵 合编
陈鉴治



高 等 学 校 教 材

水电站水力过渡过程

武汉水利电力大学 吴荣樵 合编
陈鉴治

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书全面、系统地阐述了水电站水力过渡过程的现象、理论和方法。主要包括有压非恒定流的基本方程式及其解法;带有反击式水轮机的管道系统的过渡过程;抬机事故和反水锤;抽水蓄能电站的水力过渡过程;调节规律优化;含气水锤等内容。

本书适用于高等学校水力发电工程专业的师生使用,也可供研究生和有关科学技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

水电站水力过渡过程/吴荣樵,陈鉴治合编. —北京:中国水利水电出版社, 1996

高等学校教材

ISBN 7-80124-329-3

I. 水… I. ①吴… ②陈… III. 水力发电站-水动力学-高等学校-教材
IV. TV131.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 22477 号

书 名	高等学校教材 水电站水力过渡过程
作 者	武汉水利电力大学 吴荣樵 合编 陈鉴治
出 版	中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044)
发 行	新华书店北京发行所
经 售	全国各地新华书店
排 版	北京市金剑照排厂
印 刷	北京市朝阳区小红门印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 7.5 印张 166 千字
版 次	1997 年 10 月第一版 1997 年 10 月北京第一次印刷
印 数	001—5000 册
定 价	7.60 元

318816

前 言

本书共分七章。第一章和第二章是有关水力过渡过程的基本概念和基本知识；第三章、第四章和第五章是本书的重点，讨论带有反击式水轮机的管道系统的过渡过程的一般和特殊问题；第六章和第七章分别介绍调节规律优化和含气水锤两个比较新的内容。第五章由陈鉴治执笔，其余由吴荣樵执笔，全书由我们共同讨论，最后由吴荣樵统稿。

本书可用作大学本科选修课和研究生教材，也可供有关科技人员参考。

在成书过程中，河海大学刘启钊教授对本书曾提出很多宝贵意见，在此，我们深致谢意。同时，我们还要感谢与我们长期合作的伙伴——武汉水利电力大学水电站水力过渡过程科研小组成员对本书的支持和贡献。

作 者

1992 年于武昌东湖畔

目 录

前 言

第一章 总论	1
第一节 定义和研究范围	1
第二节 研究目的及其重要性	1
第三节 发展过程和研究现状	2
第四节 水电站过渡过程的特征和分类	3
第五节 各种过渡过程在特性曲线上的轨迹	4
第六节 水流加速时间和机组加速时间	7
第七节 调节保证计算的条件和任务	8
第二章 有压非恒定流的基本方程式及其解法	11
第一节 基本概念	11
第二节 动量方程	11
第三节 连续方程	13
第四节 波速公式	14
第五节 特征线法	18
第六节 边界条件	23
第七节 网格划分	27
第三章 带有反击式水轮机的管道系统的过渡过程	30
第一节 反击式水轮机的过流特性	30
第二节 机组转速特性	31
第三节 蜗壳及尾水管的处理	32
第四节 计算方法和步骤	32
第五节 调压阀	34
第六节 计算实例	34
第七节 调速器的动力特性	37
第八节 计入调速器动力特性时过渡过程的计算	43
第九节 有关轴流式水轮机的几个问题	43
第四章 抬机事故与反水锤	47
第一节 轴流式水轮机在过渡过程中的事故	47
第二节 事故原因分析	48
第三节 反水泵工况及其轴向水推力	49
第四节 反水锤的物理实质和发展过程	51
第五节 恒定叶栅绕流的理论分析	54
第六节 叶栅绕流反水锤计算	56
第七节 空腔反水锤计算	59
第八节 补气时的反水锤计算	61

第九节	反水锤的全过程计算	63
第五章	抽水蓄能电站的水力过渡过程	66
第一节	可逆式水轮机的基本参数	66
第二节	可逆式水轮机的特性曲线	70
第三节	可逆式水轮机全特性的特征点	73
第四节	几种典型的水力过渡过程	75
第五节	抽水蓄能电站水力过渡过程计算	79
第六节	过渡过程主要参数的初步确定	80
第六章	调节规律优化	84
第一节	调节规律对水锤过程的影响	84
第二节	水锤过程线的形式和计算任务	85
第三节	简单管	85
第四节	复杂管	89
第五节	反击式水轮机	90
第六节	线性规划与调节规律优化	91
第七章	含气水锤	93
第一节	基本概念	93
第二节	气体释放	96
第三节	液柱分离	98
第四节	基本方程式	99
第五节	特征线法原理、基本方程和计算格式	102
第六节	含气水锤实验装置	109
主要参考文献		111

第一章 总 论

第一节 定义和研究范围

任何动力系统在运行的过程中,由于种种原因,正常的和非正常的,不可避免的要从某一恒定状态转换到另一种恒定状态。这种转换自然不是在一瞬间完成的,总得有一个过程,这个过程就叫做过渡过程。显然,在过渡过程中,整个系统将处于非恒定状态。水电站的水力过渡过程就是指水电站系统(包括设备和建筑物)中的水流,从某一恒定状态转换到另一恒定状态的过程。在这个过程中,水流呈现非恒定状态,所以,对水电站水力过渡过程的研究,实际上也就是对水电站过流部件中的非恒定流的研究。

水电站的过渡过程不仅有水力的,另外还有机械的、电气的。也就是说,当水电站的工作状况发生变化时,不仅从水库到尾水河渠中的水流处于非恒定状态,而且运行中的机械、电气设备以至整个电力系统也处于过渡过程之中。因此,这三个方面可以合称为水机电过渡过程。由于它们之间相互联系、相互影响,所以,严格说来,水、机、电三方面的过渡过程应该统一起来进行研究。现在,国内外有些学者试图从这方面探索,但是由于问题过于复杂,涉及的范围十分广泛,因而进展缓慢,短时间内还很难得到满意的成果。当前行之有效的方式仍然是割断一些不太密切的联系,将水、机、电三方面分别或者部分地结合进行探讨。

本书研究的范围限于水力过渡过程,但是在反击式水轮机系统中,由于水轮机特性与水流运动密切相关,因此必须将水力、机械两种过渡过程结合起来进行分析。水电站水力过渡过程中的水流现象包括压力管道非恒定流和明渠非恒定流。但因限于篇幅,而明渠非恒定流理论和计算又可自成系统,因此,本书讨论的对象主要是有压管道系统中的非恒定流。

应该指出:即使将水电站的过渡过程概括分成水、机、电三个方面也是不全面的,或者说不明确的。因为当水电站工况发生变化时,建筑物也处于过渡过程之中。例如管道应力波的传播,压力钢管的振动等就是建筑物对水力过渡过程的反应。从字面上看来,水、机、电三者哪一个也不包含建筑物。但水机电过渡过程一词已经通用,没有必要另创新词,所以,“水”字应作广义理解,即包括流体和水工建筑物。

有压管道中的非恒定流伴随着有明显的压力升高或降低,通常称之为水锤或水击。如果管道中的流体完全是水,称为水锤当然是合适的。如果水中含有少量气体并足以影响压力升降的大小时,则应称之为含气水锤,当气体所占比重较大时,就应改称气液两相非恒定流。

第二节 研究目的及其重要性

水电站的过渡过程,虽然是一种暂态现象,但是并不等于说,过渡过程是一种罕见的

现象。相反,水电站在运行的过程中,工况的改变是很常见的。据国外某些水电站的统计,过渡工况平均每小时可达 0.22~0.25 次。在个别情况下,每小时有两次工况变化。随着大型火电站和核电站的兴建,水电站,尤其是抽水蓄能电站将更多地担负系统峰荷,负荷的变化更为频繁,工况的改变次数更加增多,如停机、起动、增荷、减荷,以及调相、发电与抽水之间的转换、非正常甩负荷等等出现的次数,可以高达每小时几次。如此频繁出现的过渡过程,特别是一些足以引起严重事故的过渡过程应该予以特别重视。

我们研究水电站水力过渡过程的主要目的在于:探明过程的物理本质;确定控制工况下的最大压力和最小压力、调压室的最高水位和最低水位、机组转速的最大升高值以及其他重要参数;选择有效措施改善水电站的水力过渡过程。很明显,重要参数的确定和有效措施的选择,对于水电站的设计和运行都有十分重要的意义。例如:对于高水头引水式水电站,高压钢管管壁厚度主要决定于最大静水压力和水锤压力之和。如果通过对水力过渡过程的研究能适当降低正水锤压力,则不仅可以降低造价、节约钢材,而且能大大改善钢管的弯转、安装和焊接条件;对于一些中水头、引水道又不太长的水电站,如果能够取消调压室,则可节约大量土建投资。

水力过渡过程的研究,对于水电站的安全运行更有十分重要的意义。在工程实际中,由于对水力过渡过程考虑不周,设计不当,以致引起钢管破裂、机组损坏之类的严重事故,时有发生。例如我国云南以礼河三级电站在 1971 年 1 月就曾发生一起严重的钢管破坏事故。该电站装有 4 台水斗式水轮机,总装机容量为 144000kW,设计水头为 589m,设计总流量为 $30\text{m}^3/\text{s}$ 。事故是在一次运行中发生的。当阀门控制系统收到开启球阀的信号时,球阀背面没有充水而为空气所充填,因此,在球阀的开启过程中,阀前水流在特高的水压力作用下,冲向阀后的空气柱,猛烈压缩空气以致产生超常的压力升高(达 $9 \times 10^6\text{Pa}$ 以上)。事后检查,发现 1 号压力水管中某处产生 4~5mm 宽,4.4m 长的裂缝。当然这次事故也有钢材结构上的原因。又如福建古田二级电站也曾发生过由于水锤压力而使调压井闸门上抬被卡在门槽中的事故。广东长湖电站发生过严重的反水锤事故等等。

第三节 发展过程和研究现状

水力过渡过程总是伴随着水波(纵向的或横向的)的传播,所以它的研究历史可以追溯到上世纪关于水波传播理论的探讨。但是首先对水锤问题进行研究的是意大利工程师门那布勒(Menabrea)。他在 1858 年所发表的文章中,不同于前人只注意波速,而把着眼点放在由波的传播所引起的压力变化上面。他并且利用能量原理,考虑了管壁和流体的弹性,导出了波速公式。可惜的是,门那布勒对水锤理论本身并没有作出很大的贡献。

历史的进程有时会发生出人意料的巧合。几乎在相同的时间内,在美国、俄国和意大利的学者分别发表了比较全面系统的水锤理论的著作。1898 年,美国工程师弗里泽尔(Frizell)在美国土木工程师协会会报上发表了题为“管道中流速变化所产生的压力”的论文。文中弗里泽尔导出了水锤波速和由于流速突然变化所产生的压力的公式;并且指出,如果管壁弹性模量是无限大,水锤波速与声波在不封闭的水中的速度相等;文中还讨论了分叉管、波的反射以及连续波对速度的影响等问题。但是,弗里泽尔的工作不如同时代人茹

科夫斯基(Жуковский)和阿利维(Allievi)的影响那样大。

茹科夫斯基是俄国空气动力学家,莫斯科大学和高等技术学校教授。由于他在空气动力学理论和实践方面的卓越贡献,因而被誉为俄罗斯航空之父。茹科夫斯基于1897年在莫斯科用不同的管道对水锤现象做了大量的实验。在理论和实验的基础上,1898年他发表了题为“管道中的水锤”著名论文。文中建立了速度减少与压力升高之间的关系式,即著名的茹科夫斯基公式;讨论了压力波沿管道的传播和压力波在出流端点的反射;对调压室,安全阀以及阀门关闭速率等对水锤的影响也进行了研究;并且发现:当关闭时间 T 小于 $2L/a$ 时(L 表示管长, a 表示波速),压力达到最大值。

意大利工程师阿利维稍后于茹科夫斯基,于1902年发表了关于水锤理论的论文。茹科夫斯基的研究只解决了直接水锤的问题,阿利维则在理论分析的基础上,解决了间接水锤的问题。他在计算公式中引进了迄今仍在使用的的水锤常数。对于线性启闭规律条件下的阀门端的水锤压力,他提供了一套图表,便于实际应用。

从本世纪初到50年代末,在电子计算机用于水锤计算之前,对水锤的研究虽没有重大突破,但在此期间,仍然有一些值得称道的成果。例如:伍德(Wood)、洛威(Löwy)等人提出,伯格龙(Bergeron)、帕马金(Parmakian)等做了全面系统发展的图解法;吉布森(Gibson)等对于摩擦损失的考虑;莫斯特科夫(Мостков)、克里夫钦科(Кривченко)等对于水力机械特性的影响的研究;克里夫钦科、鲁丝(Ruus)等对于最优阀门规律的探讨以及沃格特(Vogt)、克勒姆(Calame)、加登(Gaden)、弗兰克(Frank)、托马(Thoma)等对于调压室理论和实际的贡献等等。

本世纪40年代中期诞生的电子计算机给科学技术添上了高速飞翔的翅膀。同样,它对水锤的研究开辟了新的途径,展现了广阔的前景。60年代初期,美国著名流体力学专家,密西根大学的斯特里特(Streeter)教授连续发表了几篇论文,系统地介绍了他们应用电子计算机的研究成果。由于电子计算机具有高速度、大容量的计算能力,因而突破了水力过渡过程中长期未能突破的几道难关。例如:复杂管路系统、摩擦影响、水力机械特性、调压室水位波与水锤的联合分析等等。

科学在发展,时代在前进。水电站水力过渡过程的研究并没有因电子计算机的出现而停止,而是进一步向纵深发展,许许多多的新课题有待于我们去探索、去解决。其中如抽水蓄能电站的水力过渡过程、反水锤、水力共振、尾水调压室、合理调节程序、液柱分离与气体释放、过渡过程中的明满流交替以及流体结构相互作用等问题,都具有重要的理论意义和生产价值。

第四节 水电站过渡过程的特征和分类

水电站在运行的过程中,由于情况的变化,调节阀门经常需要动作。阀门的动作一方面使上下游水道中将发生水锤,如果设有调压室,室中水位将发生波动;另一方面,水轮机的各种参数,如水头、流量、转速、开度、力矩、轴向力等也将因阀门的动作而发生变化。所以,水电站的过渡过程是比较复杂的。

水电站的过渡过程可分为正常的和非正常的两大类。正常的过渡过程主要有以下几种:

- 1) 起动。
- 2) 运行机组增减负荷。
- 3) 停机。
- 4) 甩负荷。
- 5) 发电工况转为调相工况。

非正常的过渡过程主要有以下两种：

- 1) 飞逸。
- 2) 脱离飞逸。

下面我们将以转桨式水轮机在甩负荷情况下的过渡过程为例，说明水轮机各种参数的变化规律。

当发电机因某种原因突然从电网切除，作用在机组上的负荷实际上瞬时降为零，水轮机导叶即开始关闭 [图 1-1(c) 中的开度 α]，动力力矩开始逐渐减小 [图 1-1(a)]，由于机组上的力矩不平衡，转速开始上升。当导叶关闭到某一时刻，动力力矩等于零，转速达到最大值 (图中的 n_{max})，相应的开度为 α_r 时，这时通过水轮机的水流能量已全部消耗在机械损失和水力损失之中。随着导叶的继续关闭，动力力矩转为负值，也就是说机组必须释放出能量以平衡高转速下的能量损失。于是转速开始下降，水轮机开始处于制动工况。当导叶完全关闭之后，水轮机逐渐被制动而回到正常转速，动力力矩等于零。

在以上所叙述的过程中，轮叶角 ϕ 、水头 H 和轴向力 P 都在作相应的变化。在甩负荷时，我们假定轮叶与导叶的协联关系未被切断，因此，随着导叶的关闭，轮叶角也在逐渐减小，最后稳定在 ϕ_r 。水头 H 随导叶的

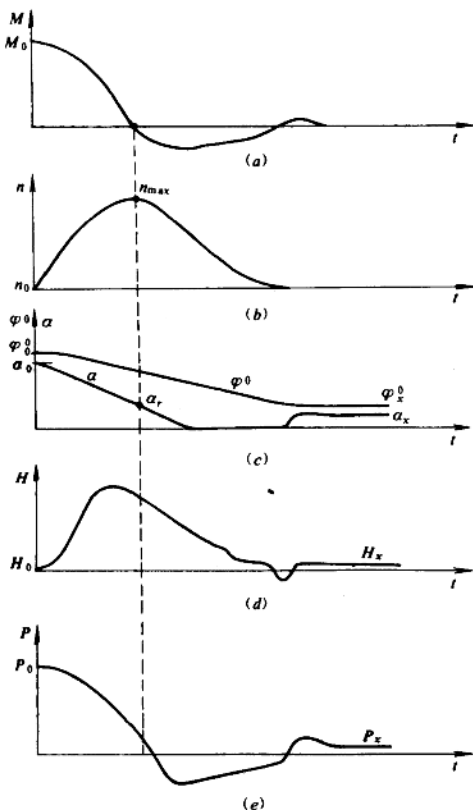


图 1-1 转桨式水轮机甩负荷过渡过程

关闭将升高。随后由于水锤波的反射，水头又逐渐下降，甚至下降到低于正常水头 H_0 ，最后稳定在一个新的水头 H_r 上。轴向力的变化过程与动力力矩基本相似，不过轴向力最终不等于零而是稳定在 P_r 上。

第五节 各种过渡过程在特性曲线上的轨迹

为了进一步了解各种过渡过程的特点，我们将把它们在水轮机综合特性曲线上的轨迹

表示出来。应该指出,特性曲线是在恒定工况下作出来的,所以各种轨迹线只能是定性地说变化情况。现将各种过渡过程归纳为三组分别绘制,即:①甩负荷、减荷、正常停机;②起动、增荷;③飞逸、脱离飞逸、发电转调相。各组的轨迹线分别绘于图1-2、图1-3、图1-4上。图中 $\eta=0$ 的线Ⅰ表示飞逸工况,该线将特性曲线图分成水轮机工况区Ⅰ和制动工况区Ⅲ。图中 n'_{10} 表示与正常转速相对应的单位转速, α_x 表示空载开度,A点表示初始工况点。

应该指出,飞逸和空载都是出力等于零但转速不等于零的工况。不过,空载对应的是正常转速,而飞逸则因开度不同而有不同的对应转速,在相当大的范围内,开度愈大,飞逸转速愈高。

一、甩负荷、减荷、正常停机(图1-2)

1. 甩负荷

甩负荷是一种事故停机,它常常是最危险的过渡过程。机组在甩负荷后即脱离电网。甩负荷过渡过程的轨迹如图1-2中曲线1所示。轨迹点随开度减小逐渐左移,穿过飞逸工况线Ⅰ后进入制动区。如果导叶连续运动直到完全关闭,则过渡过程轨迹将沿1a线直到原点O。如果导叶关到 α_x 即停止动作,则轨迹将沿1b线又回到水轮机工况区经过往复几次摆动后停止在直线 $n'_1=n'_{10}$ 与Ⅰ线的交点B上。

2. 减荷

减荷时,机组未脱离电网,而且是在接到减荷的脉冲信号后按正常规律操作的,所以,这时机组始终维持正常转速 n_0 。

设 n'_1 表示在过渡过程某一时刻 t 的单位转速, n'_{10} 表示相当于正常转速的单位转速, β 表示转速变化的相对值,即 $\beta = \frac{\Delta n}{n_0} = \frac{n - n_0}{n_0}$, ξ 表示水头变化的相对值,即 $\xi = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{H - H_0}{H_0}$, D_1 是水轮机的直径,根据有关水轮机的理论我们得到

$$n'_1 = \frac{nD_1}{\sqrt{H}} = \frac{n_0(1+\beta)D_1}{\sqrt{H_0(1+\xi)}} = n'_{10} \frac{1+\beta}{\sqrt{1+\xi}} \quad (1-1)$$

在减负荷初期,引水道将产生正水锤,即 $\xi > 0$,而 $\beta = 0$,所以,从式(1-1)可以看出, n'_1 将小于 n'_{10} ,减荷情况的轨迹线将在 $n'_1 = n'_{10}$ 的直线下部通过(图1-2中的曲线2)。如果全部负荷都卸掉了,则轨迹线将终于B点;如果只卸下部分负荷,则轨迹线将沿2a运动到新的工况点C。

3. 正常停机

正常停机的轨迹的前一部分与全减荷相同,但是当导叶运动到空载开度以后,并未停止动作,因此,其轨迹线(图1-2中的曲线3)将越过飞逸工况线Ⅰ进入到制动区,最后终止在原点O。

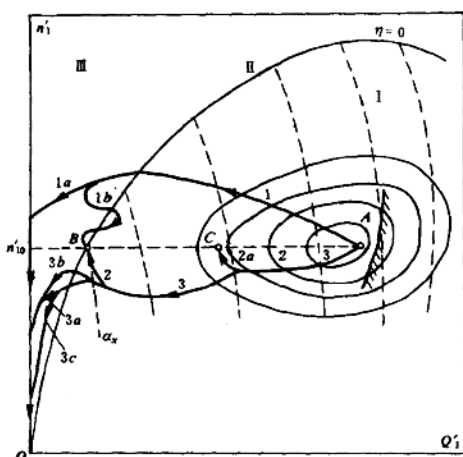


图1-2 甩负荷、减荷、正常停机过渡过程轨迹

轨迹线 3 在越过空载开度 α_x 以后的路径与机组从电网切除的时间有关。如果正好在机组出力等于零的时候切除, 那么, 过渡过程将沿 3a 平顺地运动到原点; 如果切除时间略有提前, 则因水轮机组尚有多余出力, 致使转速略有升高, 因此过渡过程将沿 3b 线运动; 反之, 如果切除时间略有滞后, 则当轨迹线越过飞逸线 I 之后, 由于电网负荷和水流本身的制动作用, 轨迹线将沿 3c 急剧下降。

二、起动、增荷(图 1-3)

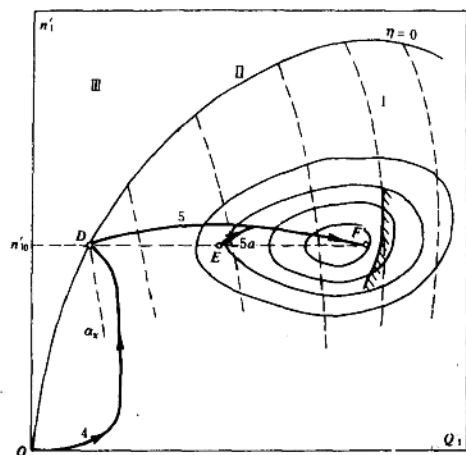


图 1-3 起动、增荷过渡过程轨迹

1. 起动

在起动过程中, 机组与电网尚无联系。转速从零开始, 当导叶越过空载开度 α_x 之后, 转速急剧上升直到等于正常转速(图 1-3 曲线 4)。这时, 轨迹线到达 D 点, 机组开始投入电网。

2. 增荷

增荷有两种情况: 一种是起动后, 从 D 点开始增荷, 在增荷过程中转速保持不变, 过渡过程沿曲线 5 运动到正常工作点 F; 另一种情况是机组已经带有负荷, 工作点在 E。机组在接到增荷信息之后, 在转速保持不变的情况下, 轨迹线从 E 点沿 5a 运动到 F。由于增荷在引水道中产生负水锤, 故轨迹线在 $n'_i = n'_{i0}$ 的上部通过。

三、飞逸、脱离飞逸、发电转调相(图 1-4)

1. 飞逸

当机组突然甩荷, 调速器因故障拒绝动作, 机组将被解列, 转速急剧升高, 而开度保持不变, 所以, 飞逸的轨迹线 6 将与初始等开度线重合, 最后到达飞逸点 G。

2. 脱离飞逸

在一般情况下, 机组是不允许飞逸到 G 点的。在电站的事故保护系统中, 通常都装有转速保护继电器。该继电器被整定在某一高于正常转速的转速 n_p 上, 相应的单位转速是 n'_{1p} 。当机组开始飞逸, 单位转速达到 n'_{1p} 时, 继电器发生信号, 通过事故配压阀强使导叶迅速关闭, 轨迹线将从 H 点开始沿 7a 线运动到停机时为止。

在特殊情况下, 机组已经飞逸到了 G 点。这时只有强使导叶关闭, 轨迹线将从 G 点开始沿 7b 线运动到停机时为止。

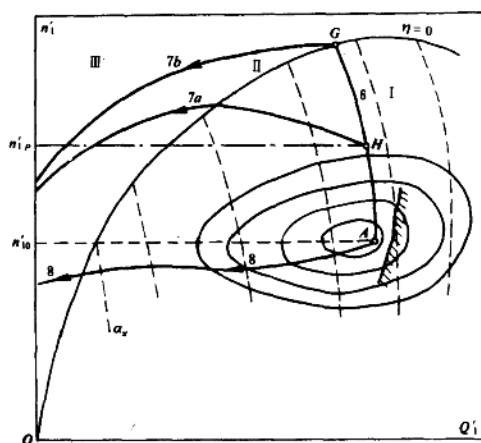


图 1-4 飞逸、脱离飞逸、发电转调相过渡过程轨迹

点开始沿 7b 线运动到停机时为止。

如果采用事故闸门使机组脱离飞逸。则导叶开度不变, 由于水头损失增加, 有效水头减小, 使转速、流量减少到最后都等于零。

3. 发电转调相

发电转调相的过渡过程, 在导叶没有完全关闭之前与正常停机相同。当导叶完全关闭之后, 由电网输入动力维持机组在正常转速下旋转, 其轨迹线如图 1-4 曲线 8 所示。

第六节 水流加速时间和机组加速时间

本节将介绍两个具有重要实际意义的参数。

一、水流加速时间

按照刚性水锤的理论, 可以导出水电站压力水管中水锤的计算公式

$$\xi = -\frac{LV_0}{gH_0} \frac{dq}{dt} \quad (1-2)$$

式中: L 是引水管长度; V_0 是管中初始流速; H_0 是初始水头; g 是重力加速度; t 是时间; q 是流量的相对值, 即 $q = \frac{Q}{Q_0}$ 。记

$$T_w = \frac{LV_0}{gH_0} \quad (1-3)$$

并称 T_w 为水流加速时间。这是因为: ①从量纲上分析, T_w 的量纲是时间; ②从物理意义上分析, 由于 $T_w = \frac{\rho LV_0}{\gamma H_0}$, 其中分子为管中水流单位面积的动量, 分母是压强, 所以, T_w 就是在水头 H_0 作用下, 水流从静止加速到 V_0 所需要的时间。

T_w 在实际中的重要意义在于:

(1) T_w 愈大, 表明水流惯性愈大, 相应地, 所引起的水锤愈大。所以, 从降低水锤压力的观点来看, T_w 愈小愈好。

(2) 在某种程度上, T_w 可以作为是否需要设置调压室的判别参数。过去曾经认为 $T_w > 1.5s$ 时, 就应考虑设置调压室, 现在这个数值已经提高到 $2 \sim 4s$ 。

(3) 水锤常数 σ ($\sigma = \frac{LV_0}{gH_0 T_i}$) 与 T_w 存在着如下的关系

$$T_w = \sigma T_i$$

可见 σ 不过是水流加速时间的相对值。

二、机组加速时间

根据机组转动部分的运动方程式不难导出

$$\frac{GD^2 n_0}{375 M_0} \frac{d\beta}{dt} = m - m' \quad (1-4)$$

式中: GD^2 为飞轮力矩, $N \cdot m^2$; n_0 为正常转速, r/min ; M_0 为额定力矩, 其值为在恒定正常转速下发额定出力时作用在主轴上的力矩, $N \cdot m$; m 为动力力矩相对值, $m = M/M_0$; m' 为阻力力矩相对值, $m' = M'/M_0$; β 为相对转速变化, $\beta = (n - n_0)/n_0$ 。

记

$$T_a = \frac{GD^2 n_0}{375 M_0} \quad (1-5)$$

并称 T_a 为机组加速时间。这是因为：①从量纲上分析， T_a 是时间；②从物理意义上分析， T_a 是在力矩 M_0 的作用下，使机组转速从零加速到正常转速 n_0 所需要的时间。

T_a 的重要实际意义在于：

(1) T_a 反映了机组旋转体的惯性， T_a 愈大，惯性愈大。

(2) T_a 愈大，转速变化率就愈小，从减小转速变化的观点来看， T_a 愈大对调节保证愈有利。

(3) 对于立式机组 $T_a = 6 \sim 11s$ ，对于灯泡式机组 $T_a = 1.5 \sim 3s$ 。

从以上的分析可以看出： T_w 和 T_a 都是分析水电站过渡过程的重要指标，但各自反映水流和机组的一个方面，因此，如果把两者综合起来，应用时就更加方便。为此，记

$$t_{av} = \frac{T_a}{T_w} \quad (1-6)$$

称 t_{av} 为加速时间比。很明显，加速时间比愈大愈好。经验表明 t_{av} 应不小于 3 (对于立式机组)。如果不能满足这个条件，不仅须对调节保证问题进行详细分析论证，并且还要校核机组的调节稳定问题。

第七节 调节保证计算的条件和任务

一、调节保证计算的含义

调节保证计算一词在工程实际中使用得十分广泛。实际上，在过渡过程中，机组必定要进行正常或非正常的调节，调节的结果如何，是否影响设备、建筑物以及电网的安全运行必然成为工程上十分关心的问题。例如，在过渡过程中，机组转速升高、水锤压力的上升和下降，调压室水位波动等在工程中都有一定的要求。调节的结果能否保证这些要求得到满足，必须进行一系列的过渡过程的计算。因此，调节保证计算的含义就是在初步拟定的系统条件下，进行各种危险工况的过渡过程计算，根据需要适当调整建筑物布置、机组惯性以及调节时间和规律，以保证工程设计标准得到满足。

二、调节保证计算的标准

调节保证计算的标准，不同国家不同时期会有所不同。因为标准的制定取决于人们的认识水平和科学技术发展的程度。在一般设计工作中，应使规定的标准得到满足。如不能满足，应有充分论证并得到有关部门的批准。现将我国现行的标准列举如下。

1. 压力变化标准

(1) 压力升高：不设调压阀时，蜗壳允许的最大压力升高的相对值 $\xi_{\max}$ 应满足以下的要求。

设计水头 $H_{ij} < 40m$ 时， $\xi_{\max} = 50\% \sim 70\%$ ；

设计水头 $H_{ij} = 40 \sim 100m$ 时， $\xi_{\max} = 30\% \sim 50\%$ ；

设计水头 $H_{ij} > 100m$ 时， $\xi_{\max} < 30\%$ 。

设有调压阀时， $\xi_{\max} \leq 20\%$ 。

(2) 压力下降:尾水管进口的允许的真空度为 8m 水柱。

机组突增负荷时,压力输水系统内任何一段均不允许产生负压。

2. 转速变化标准

当机组容量占电力系统总容量比重较大,且担负着调频任务时,机组全甩负荷后的转速升高的相对值 $\beta < 45\%$;

当机组容量在系统中所占比重不大,且担负基荷时, $\beta < 55\%$;

对于水斗式水轮机, $\beta < 30\%$ 。

三、调节保证计算的条件

这里所讲的条件是指在这些条件下可以计算出最危险的水位、压力和转速。如调压室中的最高和最低水位,管道系统中的最大和最小压力,机组的最大转速升高。我们知道,水头、流量、糙率系数、负荷、水位等参数对调保计算有直接的影响,而它们本身又互相关连并且多变,所以,正确的选取这些参数,也就是正确选择计算条件,不仅是必要的,而且还比较复杂。实际中,常需对多种计算条件进行比较计算,以满足工程实际的需要。

1. 负荷变化

调保计算所必需的负荷变化资料主要是电站运行可能出现的最大甩负荷与最大增负荷。最大甩负荷与机组台数、结线图等有关;而最大增负荷则往往决定于系统运行的要求。其具体数值由机电设计人员确定。在一般情况下,如果机组台数不多(2~4台),最大甩负荷就等于电站总装机容量;最大增负荷等于最大单机容量,但应不小于电站总装机的 1/3(增荷机组最后投入,其余机组满荷运行)。

上游调压室的最高水位、引水道中的最大水锤、尾水道中的最大真空、下游调压室的最低水位等以最大甩负荷进行计算。上游调压室的最低水位和下游调压室的最高水位应以最大增负荷和最大甩负荷两种条件进行比较计算。至于引水道中的最小压力,则只需计算增荷的情况,无需考虑甩负荷时阀门关闭后的负水锤。因为在接近全关时,调节阀门的实际关闭过程比较平缓,并且还将自动稳定在空转开度,所以,关闭后的负水锤是很小的,甚至没有负水锤,不可能构成危险工况。基于类似的理由,也无需对小负荷全甩时的正水锤进行计算。

对于转速升高,除特殊情况(如灯泡式机组)外,一般应取最大甩负荷为计算条件。

2. 水位

上、下游调压室中的最高和最低水位分别以上、下游最高和最低水位为计算条件;引水道中的最大压力和最小压力一般应以上、下游最高和最低水位为计算条件;尾水道中的最小压力应以下游最低水位为计算条件。但由于水锤计算与水头直接有关,而水头与水位互有关联,所以,在水锤计算时,应选取与水头相应的最高或最低水位。

3. 水头

对压力上升应取最大水头和设计水头分别计算;对压力下降应取最小水头和设计水头分别计算;对转速升高应取设计水头进行计算。

4. 流量

根据负荷和水头可以找出相应的效率,因而可以算出流量。至于调压室水位波动,一般可利用设计水头求出最大流量进行计算。

5. 糙率

在根据最大甩荷计算上、下游调压室最高水位和最低水位时,隧洞中的糙率取最小值;在根据最大增荷计算上游调压室最低水位和下游调压室最高水位时,隧洞中的糙率取最大值。管中糙率对调压室水位波动的影响不大,但原则上也可按下述方法选取:对于上游调压室最高水位和下游调压室最低水位,管中糙率取最大值;反之,取最小值。§

综上所述,可得表 1-1。

表 1-1 调节保证计算的条件

计 算 条 件			负 荷	水 位		水 头	糙 率	
计算项目				上 游	下 游		隧 洞	管 道
调压室水位	上 游 调压室	最高	最大甩荷	最高			最小	最大
		最低	最大甩荷	最低			最小	最小
			最大增荷	最低			最大	最小
	下 游 调压室	最高	最大甩荷		最高		最小	最小
			最大增荷		最高		最大	最小
		最低	最大甩荷		最低		最小	最大
水锤压力	引水道	最大	最大甩荷	相应最高水位		设计水头	最小	最小
						最大水头		
		最小	最大增荷	相应最低水位		设计水头	最大	最大
	最小水头							
	尾水道	最小	最大甩荷		相应最低水位	设计水头		
						最小水头		
最大转速升高			最大甩荷			设计水头		

四、调节保证计算的任务

在过渡过程计算中,有两类不同性质的参数:一类是固定参数,如建筑物系统的布置、尺寸、材料性质、机组尺寸、特性、工作参数、飞轮力矩等;另一类是变动参数,如调节规律、水锤压力、转速变化、调压室水位波动等。

调节保证计算的任务总的说来是要使有关的参数(固定的和变动的)达到最优的组合,以满足安全和经济的要求。具体的任务常常是:在给定固定参数的条件下,计算有关变动参数,校核变动参数是否在允许范围内。必要时,需根据计算结果适当调整固定参数,其中特别是对飞轮力矩、水道长度、调压室尺寸乃至型式等需进行反复计算,以满足工程上的要求。在给定固定参数的条件下,往往还需要给定或限定某类变动参数才能进行计算。因此,根据所限定的变动参数的不同,调节保证计算又可分为两类:

(1) 给定调节规律(或是给定其变化过程;或是给定调速器动力特性的有关参数)计算水锤、转速变化、调压室水位波动等。这类计算可以简称为水锤计算。

(2) 给定或限制水锤压力(或转速变化;或调压室水位波动)优化调节规律,这类计算可以简称为调节规律计算。

整个过渡过程的计算可能仅属于某一类计算;也可能在其中某一阶段是水锤计算,另一阶段是调节规律计算。本书大部分章节将讨论第一类,而在第五章将专门讨论第二类计算问题。

第二章 有压非恒定流的基本方程式及其解法

第一节 基本概念

有压非恒定流的基本方程式包括动量方程和连续方程。非恒定流必然涉及到波动问题,因此本章还要导出波速公式。非恒定流可能是单相的,也可能是多相的,但本章仅介绍单相流的基本方程式,至于两相流的基本方程式,本书第七章将作初步的讨论,而更为普遍的多相流的问题,则非本书所应包括的内容了。

在推导基本方程式之前,必须说明以下两点:

- (1) 对管道系统中的流体均作一维分析。
- (2) 假定管道系统中各个断面的水流均属渐变流。

因为我们对流体只作一维分析,所以流体的各种参数均采用断面平均值,例如平均压强、平均流速等等。

因为水流是渐变流,压强沿过水断面呈直线分布,因而断面的平均压强可以用断面的中心的压强代替;又因为水流是渐变流,所以用平均流速计算动量和动能时所应加的修正系数近似等于1。由此可见,以下我们所建立的基本方程式,严格说来,不能用于弯道、叉管和水轮机的尾水管。不过,一般说来,这些管段的长度都比较短,在整个管道系统所占的比重都比较小,因而不致引起明显的误差。但是,当水电站的引水道较短,而尾水管相对较长时,如果仍采用一维流动的基本方程式进行计算,其误差可能就不容忽略了。

求解基本方程式,必须有初始条件和边界条件。在水力过渡过程的分析中,我们总是以恒定流状态作为初始条件。至于边界条件,则因管道系统而异。本章将介绍除反击式水轮机以外的各种边界条件。有关反击式水轮机的问题,由于涉及面较宽,因而分别在第三、第四和第五章中讨论。

第二节 动量方程

从管道系统中取出长为 dx 的微分段 $ABCD$, 如图 2-1。我们规定沿中心线的坐标轴 x 与流速 V 的正方向取同一指向,图中均指向右方。

图中符号的含义如下: p 为 AB 断面上中心点的压强; A 为 AB 断面的面积; τ_0 为管壁作用在流体周边上的切应力; D 为管道内径; V 为 AB 断面处的平均流速; z 为管道中心线离基准面的高度; H 为测压管水头; γ 为流体容重; ρ 为流体密度; α 为管道中心线与水平线的夹角,当 z 沿 x 的正方向逐渐增加时, α 为正。

作用在微分段上的力如图 2-1 所示。微分段的质量、加速度以及各个作用力的含义、表达式和方向归纳在表 2-1 中。

根据牛顿第二定律可得