

抽水蓄能电站过渡过程特性及调节控制研究综述

王林锁, 索丽生, 刘德有

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 简要介绍水力机组过渡过程特性及阀调节理论研究概况和进展, 针对抽水蓄能电站的特点, 重点分析和讨论了可逆式水泵水轮机全特性曲线的处理方法和机组导叶运行规律的优化问题, 对各种优化导叶运行规律方法进行了比较评价, 并就抽水蓄能电站工况调节过渡过程问题提出了研究方向和目标。

关键词: 抽水蓄能电站; 过渡过程; 工况调节; 综述

中图分类号: TV743

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2001)06-0005-06

随着社会经济的发展和人民生活水平的日益提高, 电力系统的日负荷峰谷差越来越大, 且电网越大, 调峰填谷、提高电站利用率和减少系统能耗问题以及提高供电质量和安全可靠等问题都愈趋重要。大容量抽水蓄能电站具有调峰填谷作用, 能提高火(核)电站设备利用率和担负调频调相、旋转备用, 可以提高电网供电质量和电网的灵活性及可靠性, 它已被证明是各种调峰机组中最经济的一种。目前世界抽水蓄能电站平均年增长超过 10%, 已建、在建总装机容量已超过 1 亿 kW, 其中装机 100 万 kW 以上的大型抽水蓄能电站有 40 多座, 抽水蓄能机组向高水头、大容量发展^[1]。

和常规水电站相比, 抽水蓄能电站具有水头高、工况转换频繁及输水系统中存在双向水流等特性, 其过渡过程除具有一般常规电站特性外, 还具有其特殊性: ①工况变换复杂, 并要求在尽可能短的时间内完成, 以满足负荷跟踪事故应急的需要, 抽水蓄能机组具有 5 种基本工况, 即静止、发电、发电方向调相、抽水、抽水方向调相, 各种工况间的变换排列组合多达 24 种, 实际常见的工况切换有 20 种; ②工况转换频繁, 机组需要在较短的时间内经常改变工况以适应电网的不同需要, 一般情况下工况变换为 1 d 数次, 有些抽水蓄能电站的工况变化达 1 h 数次^[2]。因此, 研究抽水蓄能机组各种过渡过程特性, 找出合理可靠的调节控制方法, 对抽水蓄能电站的稳定、可靠和高效运行有着极重要的意义。

1 国内外研究概况及现状分析

目前国内外对水力机构过渡过程的研究主要集中在单一工况下的水力过渡过程, 如抽水工况的启动和停泵, 发电工况的甩负荷等过渡过程, 而对抽水蓄能电站可逆机组工况转换过渡过程, 如抽水工况转向发电或发电工况转向抽水等工况调节过渡过程的研究则不够, 同时, 研究的重点主要是根据机组和管路等参数及其它边界条件、初始条件进行过渡过程计算, 对设计方案进行校核, 而对运行工况转换过渡过程的控制问题研究不够。

1.1 阀调节理论的研究与发展

抽水蓄能电站机组工况调节过渡过程控制问题实质是在一定的初始条件和边界条件下实现对系统的控制达到预定目标的工程反问题, 该反问题的研究起源于阀调节问题, 也即在规定了瞬变的持续时间或瞬变中的最大(最小)压力限的情况下计算为完成此任务而需的 $r-S$ 曲线。关于控制瞬变流的阀门关闭方案的研究工作早在半个多世纪前就已经开始。Knapp^[3,4]等建立了阀调节方法: 先将注意力集中在系统中的一根管上, 并十分仔细地建立它的瞬时变化, 然后使系统的其余部分适应这个所选瞬变, 同时计算系统的端部边界条件。Ruus^[5]和 Streeter^[6]在 20 世纪 50 年代后期也建立了类似的方法。到 1963 年, 一种无摩擦调节的完整处理方法开始建立, 它能在阀运动停止后消除最终瞬变。Streeter^[7]和 Wylie 适当考虑了摩擦, Propson^[8]对阀调节方法作了

基金项目: 江苏省水利动力工程重点实验室研究课题(K99082)

王林锁(1959—), 男, 江苏丹阳人, 扬州大学水利与工程学院教授, 河海大学博士研究生, 主要从事水利水电工程研究。

详尽的解释,并且给出了方法的证明,此外他还研究了一种给定时间内的调节,并且研究了迅速关阀,将时间降到 $2L/a$ 。此后,Drisls等^[9]也做了大量的研究工作。Wylie,Streeter^[10]对阀调节理论和方法进行了充分研究,并给出了单管无摩擦阀调节、单管有摩擦阀调节及复杂系统的阀调节计算方法和相关程序。

1.2 水力机组过渡过程研究概况

抽水蓄能电站过渡过程综合了水轮机和水泵过渡过程特性,就单个工况及单一过渡过程而言,它和水轮机或水泵各过渡过程并无本质区别,其一般过渡过程分析计算主要内容是:确定作用在各处压力管道内的最大水锤值、甩负荷时的最大转速上升、作用在机组转轮上可能的最大轴向力、事故停机水锤等,关于这类过渡过程的分析计算国内外许多学者作了大量的研究和探讨^[2,11,12],对水电站或泵站过渡过程研究已较为成熟,其理论基础主要有刚性水击理论和弹性水击理论,分析方法主要有解析法、图解法和数值计算法,自20世纪60年代以来,广泛采用的是利用特征线法借助电子计算机分析计算各种水锤问题。但是,抽水蓄能电站过渡过程问题除了具有水轮机和水泵的特性之外还有其特殊性,一是抽水蓄能机组多为高扬程可逆式机组,其全特性曲线和一般水轮机或水泵全特性曲线差异较大,故对过渡过程计算有较大的影响;二是除具有一般过渡过程特征之外,抽水蓄能机组工况变换过渡过程对水轮机组能否稳定、安全和高效运行起着决定性的作用。因此,研究抽水蓄能机组工况转换过渡过程特性,实现对系统的控制,达到预定的目标是抽水蓄能电站迫切需要解决的新课题,也是水力机械过渡过程问题研究的新任务和目标。

2 可逆机组全特性曲线处理方法

在过渡过程分析计算中,需要频繁利用可逆式机组的全特性曲线以求机组的瞬时参数,通常给定的全特性曲线在水轮机飞逸工况和制动工况区域出现“S”型,在水泵工况区有交叉和重叠现象,如直接利用该曲线进行插值计算会带来较大的误差,且由于多值性,可能使插值无法进行。因此,可逆机组全特性曲线的处理直接影响到抽水蓄能电站过渡过程分析计算,为此,国内外许多学者做了大量的研究工作。

2.1 Suter 转换曲线及其改进方法

Suter^[13]利用无因次参数引入 $WH(x)$ 和 $WB(x)$ 函数将原全特性曲线转换为 Suter 曲线,使原曲线两边被相对拉平,并有效地消除了多值性给插值带来的困难。但 Suter 曲线仍存在缺陷:①等开度线的分布不均匀,大开度时曲线过密,小开度过稀,从而使

插值计算产生较大的误差;②在曲线的两头仍出现交叉和重叠现象,对工况确定和插值极为不利;③在反水泵区有一段曲线几乎与 x 轴垂直,使插值出现多值现象。为此,国内外学者在 Suter 曲线的基础上进行了改进,Boldy^[14]把相对导叶开度 y 引入转换式:

$$\begin{cases} WH(x, y) = \frac{h_{PT}}{a^2 + q^2/y^2} \\ WB(x, y) = \frac{n}{a^2 + q^2/y^2} \end{cases} \begin{cases} x = \arctan(q/a) & a > 0 \\ x = \pi + \arctan(q/a) & a < 0 \end{cases} \quad (1)$$

该修正方法改善了等开度线的分布不均匀性,提高了插值效果,但此方法仅仅改善了 Suter 法中的第一个缺陷。

文献[15]根据相似理论推导出下列关系:

$$\begin{cases} WH(x, y) = \frac{h_{PT}}{a^2 + q^2/y^2} \cdot \frac{y}{|a|} \\ WB(x, y) = \frac{m}{a^2 + q^2/y^2} \cdot \frac{y}{|a|} \end{cases} \begin{cases} x = \arctan(q/a) & a > 0 \\ x = \pi + \arctan(q/a) & a < 0 \end{cases} \quad (2)$$

和 Suter 转换式比较,式(2)多了 $\frac{y}{|a|}$ 项,此项的效果是改善了 Suter 法中的前两项缺陷,但第三项缺陷依然存在,而且引入的 $\frac{y}{|a|}$ 项还带来了新问题:当 a 较小时 $WH(x, y)$ 和 $WB(x, y)$ 曲线坡度很陡,而当 $a=0$ 时, $WH(x, y)$ 和 $WB(x, y)$ 不存在。

文献[16]提出的转换关系式为

$$\begin{cases} WH(x, y) = \frac{h_{PT}}{a^2 + (q + c\sqrt{h_{PT}})^2} \\ WB(x, y) = \frac{m}{h_{PT}} \end{cases} \begin{cases} x = \arctan[(q + c\sqrt{h_{PT}})/a] & a > 0 \\ x = \pi + \arctan[(q + c\sqrt{h_{PT}})/a] & a < 0 \end{cases} \quad (3)$$

此方法完全消除了上述 Suter 法中的第三项缺陷,且对前两项曲线也有较明显的改善,但由其转换曲线可以看到其等开度线分布仍不均匀,且多次出现交叉和重叠现象,故其插值效果仍不理想。

为了充分弥补 Suter 法的缺陷,文献[17]提出了下列转换关系:

$$\begin{cases} WH(x, y) = \frac{h_{PT}}{a^2 + q^2} \cdot y^2 \\ WB(x, y) = \left(\frac{m}{h_{PT}} + \frac{k_1}{m_{1r}} \right) y \end{cases} \begin{cases} x = \arctan[(q + k_2\sqrt{h_{PT}})/a] & a > 0 \\ x = \pi + \arctan[(q + k_2\sqrt{h_{PT}})/a] & a < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中 k_1 和 k_2 为常数,一般取 $k_1 = 1.0 \sim 1.8$, $k_2 = 0.5 \sim 1.2$. 式(4)所得曲线消除了 S_{ur} 曲线分布不均匀、交叉和重叠及插值多值性等缺陷,能获得良好的插值效果,但该法 $WH(x, y)$ 曲线起伏较大且不够光滑,当 $\alpha = 0$ 时, $WH(x, y)$ 和 $WB(x, y)$ 不存在,这是其不足之处.

2.2 全特性曲线的其它处理方法

文献[18]将单位参数都作为流量特性图、力矩特性图上的等开度线长度 L_y 和 L_m 的函数,先用数学方程描述零开度线和与其相邻的两条小开度特性曲线,然后用样条函数法求取等开度线长度,其它小开度区特性可以从这三条开度线之间的插值得到,由此小开度特性可以得到很好地描述,并使零开度特性和有限开度特性得到较好地衔接.另外, Boldy^[19]提出了利用法线网格插值的方法,此法计算精度较高,但编制程序复杂,计算工作量较大.文献[20]对该法作了修正,提出了分区插值的折线网格法,从而减少了计算工作量,但此法在划分网格和输入数据时,工作量较大,误差也大,且不能直接使用实验所得到的离散数据.

2.3 全特性曲线处理新方法

无论是原始全特性曲线,还是 Suter 曲线,它们出现交叉和重叠的根本原因,是这些曲线都是以二维的形式表示的,导叶开度仅作为参变量,由于等开度曲线的相似性及某些区域(曲线两边)性能参数随导叶开度变化不大,势必导致局部交叉和重叠,因此要根本消除交叉和重叠,只有改变曲线的表现形式,文献[21,22]对此作了初步的探讨.文献[23]提出了可逆式水泵水轮机的新处理方法,即以 Suter 曲线为基础,将以 y 为参变量的二维曲线转换为以相对流动角 x 和导叶开度 y 为自变量的三维曲面形式,这样既保留了 Suter 曲线的优点,又弥补了其不足之处.实用中,对比转数一定的可逆式水泵水轮机,在 Suter 全特性曲线的基础上,以流动角 x 和导叶开度 y 为平面坐标,将 $WH(x, y)$ 和 $WB(x, y)$ 表示为曲面函数,根据矩形域正交多项式最小二乘法曲面拟合数学模型求得相应的曲面方程.计算中只要已知 x 和 y 值,就能求得任一瞬间的 $WH(x, y)$ 和 $WB(x, y)$,无需进行插值,其计算精度取决于曲面拟合精度,需要时可分区域进行拟合以提高精度.应用中还可以根据计算进程的需要利用已知的全特性曲线参数 $WH(x_i, y_i)$ 和 $WB(x_i, y_i)$ 用最小二乘法求得等 x 剖面拟合曲线方程 $WH_x(y)$,从而直接计算出任意 x 和 y 时的参数 $WH(x, y)$ 和 $WB(x, y)$,这样既保证了精度,也使计算过程简便.

3 水力机组导叶运行规律的优化

在水力机械装置基本技术参数已确定的条件下,水力机组甩负荷或停泵过渡过程特性主要取决于导叶运行规律,所以,水力机组导叶运行规律的优化是水力机组过渡过程特性研究和计算的重要内容.对抽水蓄能电站而言,因需频繁进行工况转换,在其它基本技术参数确定的条件下,导叶的运行规律对机组的工况调节过渡过程特性起着决定性的作用,因此,为了改善水力机组过渡过程中的品质,人们提出了寻求最佳导叶关闭(或开启)规律的问题,此问题属过渡过程计算中的反命题,亦即在已知水力机械装置各参数的情况下,给定某些工况参数欲达到的理想瞬变过程,通过计算确定相应的控制规律,亦就是导叶的运行规律.

3.1 甩负荷过渡过程的安全控制

到目前为止,对水力机组导叶运行规律的研究,主要集中在对水力机组甩负荷时导叶关闭规律的优化问题.甩负荷过渡过程中,机组转速上升和系统水压上升过高可能引起事故,虽然机组是按飞逸转速校核计算的,但由于机组在长时间运行中某些部件老化,由变应力引起材料疲劳及其它意外因素,均能使转动部件的强度降低造成破坏性事故,压力上升过高导致钢管破裂的事件在国内时有发生,严重的事故对整个电站会成为一场灾难.另外,在甩负荷过程中,当转轮上作用的轴向力大于转动部件重量时,转动部分被抬起,造成诸如集电环、导轴承与推力镜板等部件的事故.更应注意的是,由于导叶的快速关闭,导叶与转轮进口前的水流压力急剧下降而造成高度真空,因水汽化造成断流,由转轮区域流出的水将向转轮区反向流回,引起了强烈的反水锤.为确保机组和电站的安全,必须正确选择甩负荷过渡过程调节元件的运动规律和必要的安全技术措施.合理调节元件运动规律或称控制方式,有可能保证转速上升与压力上升值均不是很高,向上的轴向水推力不致过大.同时,为充分保证过渡过程中机组与压力引水系统的安全,还必须有相应的安全措施.机组全甩负荷转速上升最大值应不大于 40%,当设计水头超过 100 m 时,最大压力上升值一般不应超过 30%^[11].

3.2 预定导叶关闭规律形式的优化方法

导叶关闭规律的优化方法主要分为两大类,一类是事先假定某种导叶关闭规律形式,根据工程需要对其中的某些控制参数进行优化,从而达到优化整个关闭规律的目的;另一类是不事先假定关闭规律形式,直接根据过渡过程中的控制参数,如最大压

头升高值或最大转速升高值,作为控制条件,利用阀调节原理求取理想的导叶关闭规律。

在事先假定导叶关闭规律形式的方法中,最简单的是一段直线关闭规律,即当导叶开始关闭时,认为活塞运动速度不变,不考虑某些情况下关闭终了时活塞运动的减慢。在此规律下,主要是确定在调速器某一整定情况下,接力器关闭所需的最小时间——导叶关闭时间 T_s 。 T_s 越小,在引水系统中引起的水压力上升愈大,而转速上升愈小,合理的选择 T_s 可以调整水压上升与转速上升不超过规定要求。文献[24]提出了导叶直线关闭规律下水轮机甩负荷过渡过程转数瞬变规律的解析计算方法。一段直线法虽然简单,且关闭规律易实现,但对改善水轮机甩负荷过渡过程的品质作用很有限,有些情况下不能满足系统要求,所以该法在水电工程实践中应用较少,应用较多的是二段折线关闭规律和三段折线关闭规律。对于二段折线关闭规律,当水力机组甩负荷时,导叶首先以较快的速度等速关闭到某一开度,然后再以较慢的速度等速关闭到零,由于第一段关闭速度较快,转速上升值将降低,导叶第二段速度较慢,从而限制引水系统水压上升,所以该关闭规律下主要是选择最佳折点位置和两段关闭速度。和一段直线关闭规律相比,二段折线关闭规律无论对于限制机组转速上升,还是限制压力上升均有较大的优越性。三段折线关闭规律有两个折点,求取最佳关闭规律就是求取最优的各折点位置和各段关闭速度。

导叶关闭规律的形式确定后,需根据具体的要求优化过渡过程的控制参数,如导叶关闭时间、转折点的开度等。优化控制参数最简单的方法是试算法:设定一定的评判标准和目标函数,如最大转速升高值 β ,最大压力升高值 ξ ,压力脉动幅值 ξ_p 等,通过选择不同参数值进行计算比较,找出最佳的参数,从而确定导叶关闭规律。此方法虽然简单,但计算工作量大,且不适用多目标、多因数的优化过程,故一般用于初步设计计算或校核计算。文献[25]提出用正交设计法在水轮机模型试验台上直接优化方法寻求最佳控制规律,并根据相似律换算至原型,此方法因直接从试验中求取最佳关闭规律,对特定的工程具有较好的指导作用。但因受试验条件限制和测试的复杂性,只能对有限因素作有限组合的试验,故有一定的局限性。另外,该方法还存在换算方面的问题,因而其推广受到一定的限制。文献[2]提出了应用图解法求取导水机构最优关闭规律的方法,但需手工操作,工作量大,精度也受到一定的限制。文献[26]介绍了一种图解解析法,精度有所提高,且可根据不同设计要求采用不同的方法进行计算。文献[27]提

出了导叶二段和三段折线关闭规律下相应转速瞬变规律的解析计算方法。

3.3 不预定关闭规律形式的优化方法

事先假定某种关闭规律,然后对其中的某些参数进行优化,其优化结果难免带有某种局限性和缺陷,如在按此法确定的关闭规律下,导叶的主要关闭过程中仍然存在明显的压力波动。完善的关闭规律应使水击压力过程线呈梯形状,即导叶关闭的主要过程中,在保持水击压力不变的情况下,快速关闭导叶,从而有效地降低转速升值。由于水力机组流量特性和力矩特性的复杂性,完全用解析方法求解此种条件下的最优关闭规律困难较大。文献[28]提出了水轮机组导叶完善关闭规律的数值计算方法,即利用数值计算将整个关闭过程的优化转换成过渡过程计算中每一计算时步内的单变量寻优问题,并用改进后的外推内插法寻找每一时步内最优导叶关闭速度,以减少计算工作量。此方法可以方便地计算出完善关闭规律曲线,比优化后的分段关闭规律优化效果明显,但该法计算工作量大,且得出的导叶关闭规律曲线实际较难实现,另在小开度下优选出的导叶关闭速度过大。文献[29]提出了将每一步水轮机的瞬变计算转化为对某特定的目标函数在给定约束条件下寻求极小值的优化方法。文献[13]介绍了应用阀调节理论控制和改善水压力变化过程,该理论使水压力在第一相末达到最大值 $H_{\max}$,然后一直保持到第末相初,在最末相内压力由 $H_{\max}$ 降至稳态值。文献[30]给出了基于阀调节理论的导叶关闭规律的优化计算方法,按此理论算得的关闭规律可称为理想关闭规律,但因该法要求在第一相末达到水压力升高最大值,这对压力引水管路很长或很短的情况较难实现。为此,文献[31]提出求取理想关闭规律的直接法和在此基础上求出最佳多段关闭规律。该方法的基本思想是,在导叶关闭过程,水击压力变化过程线与时间坐标所包围的面积大致与甩负荷前稳态流量成正比,如果能使压力在整个导叶关闭过程中保持在某一常数值,则对相同全关闭时间来说,其压力上升值将最小,并假设水压力 H_p 在 t_0 时刻达到 $H_{\max}$,并在以后保持 $H_{\max}$ 至导叶全闭,由此求得导叶关闭规律。根据此假设求得的理想关闭规律是一条下规则曲线,实际运行中无法实现,故需在此基础上求出最佳多段关闭规律。此法中 t_0 不受相长限制,原则上可以任意给定,所以比较方便,但 t_0 也是一个新的不确定因素,其数值的选取直接影响最终的关闭规律。

4 可逆机组工况调节过渡过程研究展望

就一般水力机组而言,其过渡过程特性的研究

已较成熟,对其基础理论和计算方法的研究也取得了大量的成果.然而,由于抽水蓄能电站综合了水泵、水轮机的特性,其过渡过程不仅具有两种水力机械单独运行时的特性,更有其单独运行时所不具备的特性——工况调节过渡过程.所以,对抽水蓄能电站过渡过程的研究,一方面要借鉴以往对一般水力机械过渡过程研究的成果,特别是在优化导叶关闭规律方面所取得的经验;另一方面更需要根据可逆式水泵水轮机的特性和抽水蓄能电站的运行特点研究不同工况及工况变换的过渡过程特性,尤其是不同工况转换引起的过渡过程特性,找出合理、可靠的调节规律,目前国内外在该领域的研究还处在起始阶段.

4.1 基础理论和计算方法研究

对抽水蓄能电站过渡过程的研究主要应从基础理论和计算方法两方面着手.基础理论研究中较为重要的有:简单与复杂水力系统的不稳定流动理论、不稳定流动的相似理论与水力机械不稳定工况诸动态工况参数的解析理论等.计算方法的研究应在进一步完善现有有效方法的基础上,充分利用先进的科学技术,探讨和发展一些新的计算方法,特别是发挥阀调节理论在工况调节过渡过程计算中的优势,并进一步完善和发展阀调节理论.在计算方法上还可以结合具体的工程进行探讨性研究,如可以应用非线性规划和动态规划的方法求取最佳导叶关闭规律;或对灰色局势决策作点滴引伸,结合正交设计对水轮机导叶分段关闭作寻优分析^[32],利用行波方法把流体管路瞬态特性结果扩展到用来研究整个流体网络系统的瞬态特性问题^[33].该方法的实质是把一个复杂的流体网络瞬态特性问题分解为只是单独研究网络中各个连接点的瞬态特性问题,然后再将它们叠加起来.

4.2 研究内容和研究方式

在具体的研究内容方面,以往对水力机械过渡过程的研究主要集中在单一水力机械在单一运行工况下系统水锤压力与机组转数变化的分析方面,如停泵过渡过程和水轮机甩负荷过渡过程等.而对可逆式水泵——水轮机机组的研究则不够,特别是对抽水蓄能机组工况调节过程中的过渡过程特性,如由抽水工况直接转到发电工况或由发电工况到抽水工况的过渡过程特性研究不够.在研究方式方面,过渡过程的正命题研究得较多,而大多反命题的研究仅限于某单一工况下的调节规律的优化,如水轮机甩负荷导叶关闭规律的优化.要想获得较完美的各种工况及工况转换时的导叶关闭规律,应以反命题为主,正反命题交替应用,从而达到对抽水蓄能机组

工况调节进行目标控制的目的.

4.3 边界条件和调节机构

水力机构过渡过程的计算结果与边界条件密切相关,在计算过程中,常以水力机械的全特性曲线,即外特性作为过渡过程的边界条件,故各类型的水轮机、水泵均需在模型试验上进行全特性试验以获得全特性曲线.但并非所有的水力机械都具有这类全特性曲线,这给过渡过程计算带来了一定的困难,为此,近年来出现了以内特性解析为基础的数值计算方法,该计算方法及其相应的理论基础构成了一个完整的体系.该方法的基本特征和优越性在于:无需已知叶片或水力机械的全特性曲线就可完成过渡过程问题^[11].

当按某种理论和计算方法获得最佳调节机构运动规律后,其实施条件取决于调速器的类型.直线关闭规律容易实现,并且关闭时间在其调节范围内能任意调整;分段折线关闭规律需要在调速器中装分段关闭装置,如求出的关闭规律为复杂的曲线,尽管理论上为最优,但其实施较困难,所以调节机构的性能有时会限制调节规律的优化.如导叶关闭规律随着工作水头的变化以及转速升高极限值来改变导叶关闭规律可较大地改善调节保证条件^[34].文献[35]介绍了抽水蓄能机组调速器的设计方法,文献[36]提出了调速器的多调节模式,文献[37]介绍了国外采用导叶关闭规律非固定模式试验曲线,表明采用微机调速器可以实现一定的调节目标.

4.4 模型试验和原型实测

试验是研究水力机械过渡过程的重要手段,它可对计算结果进行必要的验证和补充.随着科技的发展和测试手段越来越先进,通过模型试验和原型实测获得大量有价值的数据和结果,不仅可为改善水力机械的动态品质提供依据,而且也可推动基础理论和计算方法的进一步发展.

参考文献:

- [1] 林明华.世界抽水蓄能电站建设特点与发展趋向[J].水力发电学报,1996(3):87~98.
- [2] 克里夫琴科 F H.水电站动力装置过渡过程[M].常兆堂,周文通译.北京:水利出版社,1981.
- [3] Knapp. Operation of emergency shutoff valves in pipe lines[J]. Trans ASEE, 1937(59):679~682.
- [4] Kerr S L. Water hammer control[J]. J Am Water Works Assoc, 1951, 43(12):985~999.
- [5] Ruus E. Bestimmung vor schliess functionen welche den kleinsten wert des maximalen druckstosses ergeben[D]. Karlsruhe: Univ of Karlsruhe, Germany, 1957.
- [6] Streeter V L. Fluid mechanics[M]. New York: McGraw-Hill

- Book Co. 1958. 372 ~ 374.
- [7] Streeter V L. Valve stroking for complex piping system[J]. J. Hydr. Div., ASCE, 1967, 93(3): 81 ~ 98.
- [8] Propson T P. Valve stroking to control transient flows in liquid piping systems[D]. Ann Arbor: The Univ of Michigan, 1970.
- [9] Dnells M R. Valve stroking in separated pipe flow[J]. J. Hyd. Div., Proc ASCE, 1974, 100(11): 1549 ~ 1563.
- [10] Wylie E B, Steeter V L, Sue L. Fluid transients in systems [M]. Prentice Hall New Jersey: Inc Englewood, 1993.
- [11] 常近时. 水力机械过渡过程[M]. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [12] 丁浩. 水电站有压引水系统非恒定流[M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [13] Suter P. Representation of pump characteristics for calculation of water hammer sulzer technical review[J]. Research Number, 1966(11): 9 ~ 100.
- [14] Boldy A P. Waterhammer analysis in hydroelectric pumped storage installations[A]. 2nd Intern Conf on Pressure Surges Bl[C]. New York: McGraw-Hill Book Co Inc, 1976. 60 ~ 80.
- [15] 容伟洪. 高水头可逆式水泵水轮机过渡过程的研究[D]. 北京: 清华大学, 1986.
- [16] 杨开林. 水泵水轮机突甩负荷的优化计算方法[J]. 水利学报, 1987(11): 29 ~ 36.
- [17] 刘启钊, 刘德有. 抽水蓄能电站过渡过程计算中的几个问题[A]. 抽水蓄能工程国际学术讨论会论文集[C]. 北京: 水利水电出版社, 1990. 30 ~ 50.
- [18] 陈乃祥, 张扬军. 水泵水轮机全特性的新表达方式及复合工况计算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1996(7): 62 ~ 66.
- [19] Boldy A P. Representation of the characteristics of reversible pump turbines for use in waterhammer simulations[A]. 4th Intern Conf on Pressure Sarges, Papor Gl[C]. New York: McGraw-Hill Book Co Inc, 1983. 56 ~ 65.
- [20] 叶跃平, 吴荣樵. 水锤计算中水泵水轮机的全特性[J]. 武汉水利电力学院学报, 1987(2): 202 ~ 210.
- [21] 江卫. 水轮机特性曲线的多项式拟合[J]. 水力机械技术, 1987(4): 30 ~ 33.
- [22] 赵林明. 水轮机全特性曲线的一种计算机存贮方法[J]. 水力机械技术, 1987(5): 31 ~ 34.
- [23] 王林锁, 索丽生, 刘德有. 可逆式水泵水轮机全特性曲线处理新方法[J]. 水力发电学报, 2000(3): 68 ~ 74.
- [24] 常近时. 水轮机运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [25] 沈祖诒, 严亚芳, 王煦时. 水轮机甩负荷过渡过程最佳控制的研究[J]. 华东水利学院学报, 1980(3): 14 ~ 24.
- [26] 张师华. 导叶二段关闭时机组转速升高的计算[J]. 武汉水利电力学院学报, 1991(4): 138 ~ 147.
- [27] 常近时. 导叶分析关闭对水轮机甩负荷过渡过程解析计算[J]. 水力机械技术, 1987(6): 27 ~ 43.
- [28] 陈乃祥, 梅祖彦. 导水叶完善关闭规律的数值计算方法[J]. 水力发电学报, 1985(3): 59 ~ 70.
- [29] 杨开林. 水轮机瞬变过程的特征线微增量计算方法[J]. 水利学报, 1987(1): 25 ~ 31.
- [30] 谢庆涛. 混流式水轮机甩负荷过程导叶关闭规律的优化计算[J]. 水利学报, 1987(8): 15 ~ 21.
- [31] 沈祖诒, 廖秋波, 沈宝飞. 机组甩负荷后导叶最佳关闭规律的确定[J]. 河海大学学报, 1989, 17(6): 16 ~ 20.
- [32] 李植鑫, 张森. 水轮机导叶分段关闭的灰色决策[J]. 水电能源科学, 1994(3): 9 ~ 12.
- [33] 罗志冒. 流体网络理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [34] 杨建东. 导叶关闭规律的优化及对水力过渡过程的影响[J]. 水力发电学报, 1999(2): 75 ~ 83.
- [35] 马劲松. 抽水蓄能机组调速器的设计[J]. 东方电机, 1998(12): 24 ~ 29.
- [36] 刘昌玉. 水轮机调速器的多调节模式及相互切换[J]. 水电能源科学, 1994, 12(4): 245 ~ 249.
- [37] 常兆堂, 姜之琦, 陈仲华. 水轮机调节系统原理等故障处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.

(收稿日期: 2000-05-23 编辑: 张志琴)

欢迎订阅 《人民黄河》

《人民黄河》由水利部黄河水利委员会主办, 中文核心期刊, 水利系统优秀科技期刊; 内容涉及防洪、治河、水文、泥沙、水资源、水土保持、灌溉、水利水电工程等多门学科, 旨在及时报道治黄的最新科技成果、学术争论及动态, 是全面反映黄河治理与开发成果的权威性技术刊物; 可供水利水电及相关专业的科技人员、高等院校师生, 特别是治黄工作者及广大关心治黄的人士阅读参考。

《人民黄河》创刊于 1949 年, 月刊, 国际标准开本(A4), 公开发行, 每月 20 日出版, 每期定价 4.50 元, 全年共 54.00 元; 国内统一刊号 CN41-1128/TV, 国际标准刊号 ISSN 1000-1379。

《人民黄河》为自办发行。国内订购处: 《人民黄河》杂志社(地址: 郑州市金水路 11 号, 450003; 电话: 0371-6022902, 6022409; 传真: 0371-6025672; 电子信箱: rmhh99@public2.zz.ha.cn; 开户行: 河南省郑州市交行紫支政二分; 开户: 黄河水利委员会宣传出版中心; 帐号: 6020149028852)。国外订购处: 中国国际图书贸易总公司(北京 399 信箱, 100044, 国外代号 M738)。