

水电站大波动过渡过程研究现状及发展趋势

何文学, 李茶青

(浙江水利水电专科学校水利工程系, 浙江 杭州 310016)

摘要:在对水力瞬变过渡过程历史背景简要回顾的基础上, 重点介绍了水电站大波动过渡过程问题的研究现状, 对其基础理论、计算方法、实验研究、模拟计算机方法等做了较为详细的介绍。特征线方法以其计算方便、能适应不同的边界条件等优点在水电站过渡过程计算中应用最为广泛。最后简要介绍了目前瞬变流问题研究的发展趋势, 包括非棱柱体管道中的水击、二维或三维管流场的数值模拟方法、一维有限元模拟管道瞬变流、LB方法在模拟水电站水击中的应用等。

关键词:水电站; 过渡过程; 水力计算; 数值模拟

中图分类号:TV131

文献标识码:A

文章编号:1006-7647(2003)04-0058-04

水电站在日常运行过程中, 由于工作条件的经常变化将必然导致水轮机处于不同工况点之间的过渡过程之中, 尤其是大波动过渡过程, 虽然历时短暂, 但伴随着工况参数大幅度的急剧变化, 由水流惯性与机器运动惯性引起很大的动态附加荷载和一系列复杂的物理现象, 对水电站的运行安全及运行质量有着极其重要的影响。文献[1]列出的一些水电站因过渡过程问题引发的实际事故, 从一个方面说明了过渡过程问题研究的重要性。

从水力学或流体力学角度考虑, 管道内液体的流动状态可分为稳定和 unstable 两大类。当水流状态从一种稳定状态变为另一种稳定状态时, 其中间的不稳定流态称为过渡过程或瞬变流。由流量或流速的急剧变化而引起的管道压力升降的水力瞬变(过渡过程)现象常称为水击。在水电站大波动过渡过程中, 除发生水击现象外, 还伴随机组转速的剧烈变化。对水击现象的认识与研究是水电站水力过渡过程分析的基础。

水电站过渡过程实质上是水机电联合过渡过程, 包括的内容比较多, 如大波动情况下的过渡过程(包括突甩负荷、突增负荷等)、小波动情况下调节系统的稳定、调压室及其波动、水力振动等, 但所有过渡过程问题的研究都是以水力过渡过程理论为核心的。有鉴于此, 本文只论述水电站大波动过渡过程问题的研究现状及其发展趋势, 旨在抛砖引玉, 以期能对该问题的研究起到积极的促进作用。

1 历史背景^[2~9]

水力瞬变基本理论的研究是从探讨声波在空气中的传播和波在浅水中的传播开始的, 但是, 在弹性理论、微积分学以及解微分方程的方法建立以前, 这些问题都未能得到解决。随着自然科学的发展, 1759年, 欧拉(Euler)建立了弹性波传播理论及波动方程; 1858年门纳布利亚(Menabrea)发表的有关水击笔记中曾提到水击计算必须考虑管道的弹性与水体的压缩性等论点, 奠定了弹性水击的理论基础。1878年, 柯特威格(Kortweg)首次同时考虑管壁弹性和液体弹性来确定水击波速; 1883年, 葛罗米克(Gromeka)在分析水击时第一次考虑了阻力损失。1897年, 儒可夫斯基在大量试验与理论研究的基础上, 发表了关于水击理论的经典报告, 并于1904年提出了众所周知的直接水击压强计算公式。阿列维(Allievi)由最初的一些原理得出水击的普遍理论, 1913年提出了水击连锁方程组, 并建立了阿列维水击图解曲线及末相水击计算式, 奠定了水击计算的理论基础。可以说, 直到20世纪40年代中期, 水电站水力过渡过程计算中广泛采用的还是阿列维公式。

1926年, 乌德(Wood)提出分析水击的图解法, 后来格伯朗(Bergeron)将图解法引申用于确定管道中间断面的状态; 而施耐德(Schnyder)第一次在图解分析法中计入了阻力损失。1939年, 安吉斯(Angus)提出了分岔管水击压力计算的图解法。1945年, 利

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(402044); 浙江省教育厅科研基金资助项目(20020311)

作者简介: 何文学(1964—), 男, 甘肃天水人, 副教授, 硕士, 主要从事水力学教学与科研工作。

席(Rich)提出应用 Laplace 变换进行水击压力分析. 1954 年, 格莱(Gray)介绍了计算机进行水击分析的特征线法. 1963 年, 斯特里特(Streeter)与赖(Lai)合作的论文是最早发表的用特征线法和计算机分析瞬变流的论文. 1963 年, 帕马京(Pamarkian)的《Waterhammer Analysis》一书的出版, 使水击理论与计算方法获得了较深入的发展. 其后, 斯特里特发表了很多特征线法的论文, 并与怀利(Wylie)合著了《Hydraulic Transients》(1967)一书, 清华大学流体传动与控制教研室将该书译为中文, 并于 1983 年正式出版^[3].

原苏联以克里夫琴科(Кривченко)为代表的一批学者致力于水电站水轮机装置过渡过程的研究, 取得了不少有价值的成果^[4]. 国内关于水电站水力过渡过程问题的研究大约始于 20 世纪 60 年代初期, 研究范围主要集中在系统水锤压力与机组转速变化的解析计算方面, 也进行了一些模型试验, 并在流溪河、长湖、龙源等水电站进行了一些原型观测, 获得了不少宝贵的试验资料, 出版了一些反映我国在过渡过程领域研究状况的学术著作^[5~9].

2 研究现状及存在的问题

自儒可夫斯基(Joukowski)^[6]1897 年创立水击理论以来, 水电站的水击一直是人们研究的重点课题, 其基础理论已日趋成熟, 计算方法也不断丰富. 同其他应用科学一样, 水电站水力过渡过程的研究也是采用理论分析与实验研究相结合的方法.

理论研究大体上可分为基础理论与计算方法研究两个部分. 基础理论的研究更多地依赖于水力学或流体力学基础理论的发展, 其研究现状基本能满足工程实际中的过渡过程问题求解的需要. 而计算方法的研究则是目前过渡过程研究中最活跃的内容. 传统的解析算法、图解法正在逐渐被电子计算机数值解法所取代.

电子计算机数值解法以计算机为工具, 以描述水电站过渡过程中水力现象的微分方程为核心, 依靠数值分析方法求得过渡过程问题的数值解. 目前电子计算机数值解法以其迅速、准确、通用性强等诸多优点成为国际上水轮机装置过渡过程问题求解应用最多的方法, 其过渡过程求解的数学方程多为一元非恒定管流基本微分方程^[10]:

$$\text{连续方程} \quad \frac{\partial H}{\partial t} + \frac{c^2}{g} \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\text{运动方程} \quad g \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{fv|v|}{2d} = 0 \quad (2)$$

式中: H 为瞬态水头; v 为瞬态流速; d 为管道直径; f 为阻力系数; c 为水击波速; g 为重力加速度; x 为

流程坐标; t 为时间坐标. 这一组微分方程结合具体的边界条件, 利用计算机程序就可求得数值解.

文献[11]对方程(1)(2)在推导过程中所作的简化进行了讨论, 文献[12]对方程中摩擦项的处理做了细致的分析. 文献[13~15]还专门对有压管道瞬变流的摩阻进行了数值模拟和影响研究.

拟线性双曲型偏微分方程(2)做略去或者线性化非线性项的处理, 即可得出相应的解析计算法和图解法公式. 当采用计算机求解时, 常用的方法^[2,3]有隐式有限差分法和特征线法. 隐式有限差分法具有绝对稳定, 能够采用较大时间步长的优点, 但要联解大量的非线性方程, 求解方法相当繁杂. 特征线法概念明确, 便于处理复杂边界, 但为满足 Courant 稳定条件必须采用较小的时间步长, 以致占用计算机时间较多. 随着计算机容量与运算速度的不断提高, 特征线法在实际中的应用更加普遍, 不少水电站工程中的实际过渡过程问题都利用该方法得到了比较满意的解答^[16~20].

在水电站大波动过渡过程问题数值解法的实际应用中, 边界条件的处理对计算结果有直接的影响. 一般有压引水系统的上(下)游边界、串联边界、分岔边界、调压阀边界等的处理在文献[2,3]中都有一定的阐述. 文献[21]对旁路、两水库分水、空气调压罐、上游边界可变、下游边界可变等的处理方法和技巧做了一定的分析论述. 水轮机边界的处理在水电站过渡过程问题的分析计算中具有重要的作用, 有必要作进一步的论述.

水轮机边界按水轮机特性曲线的处理方式不同, 可将数值解法大体上分为外特性数值解法和内特性数值解法两大类^[5].

外特性数值解法是一种传统的方法, 其基本思路是: 取用完整的水轮机综合特性曲线或全特性曲线, 以这些曲线作为求解过渡过程的边界条件, 联立机组转动部分运动方程式和弹性理论一元非恒定管流基本方程组, 并将该方程组沿特征线转化为常微分方程, 再将特征线方程改写为差分形式, 只要选择恰当的时间增量 Δt , 保证满足 Courant 稳定条件, 则由特征线法可方便地求出整个过渡过程中诸工况参数瞬变规律.

外特性数值解法在进行水力过渡过程计算时, 必须依赖于水轮机全特性曲线, 而全特性曲线必须在专用的试验台上, 针对每种型号的转轮进行大量的试验才能获得, 周期长, 耗资大, 世界上也仅有几种比转速的水轮机和水泵有此全特性曲线. 在我国工程中实用的 50 余种型号的水轮机转轮中, 也只有少数几种型号的水轮机才具有完整的模型综合特性

曲线.由于这些模型综合特性曲线是在恒定流状态下测得的,故也常称为静特性曲线,它与原型的动态特性有一定的差别.试验证明,在非恒定状态下水力机械的特性(动特性)与静特性是不相同的,呈现为扰动频率的函数,国际水力学研究协会(IAHR)曾组成了一个专家工作组,专门研究水力机械的动特性,但到目前仍然没有建立概括性较强、较为通用的、能给出与试验成果相符的计算结果的水力机械动特性理论^[22].根据已有的资料,除克里夫琴科等对水轮机过渡过程工况的特性曲线做过研究外,还未见文献中报导这方面的资料.目前只能认为静态特性曲线也适用于过渡过程计算,对小开度工况及飞逸工况只能将模型综合特性曲线进行外延处理,以满足过渡过程计算的需要,这是不得已而为之的.编程计算时可将水轮机全特性曲线离散之后以数组方式存入计算机,文献[23~26]等曾给出了水轮机特性曲线的不同处理模式.有必要说明的是,由于水轮机静特性曲线并没有包括尾水管和蜗壳不稳定工况水流惯性的影响,当引水管道较长时,可忽略蜗壳及尾水管对过渡过程的影响;如果引水道较短,或分析尾水管反水击和轴流转桨式水轮机抬机问题时,则必须考虑蜗壳和尾水管水流惯性的影响,实际计算中往往采用将蜗壳和尾水管当量化处理的近似方法,具体可参阅文献[2,6].

内特性解法^[5]的基本思路是:在无需已知水轮机完整综合特性曲线或全特性曲线的情况下,只需已知水轮机及其装置的几何参数和基本结构参数以及过渡过程计算的初始条件,根据叶片式水力机械的广义基本方程式建立不稳定工况下水轮机动态力矩和动态有效水头表达式,在调节元件运动规律已知的前提下,与有压非恒定管流基本方程组联立求解即可得到过渡过程时诸动态工况参数的瞬变规律.据文献[5]介绍,内特性解法较之传统的过渡过程计算方法简单准确,并经大量现场试验证实,具有工程实用的计算准确度.但该方法中水轮机动态力矩和动态有效水头表达式是在不可压缩理想液体的前提下建立的,并且认为相邻流层间互不干扰,转轮中的流动是轴对称的,而且利用转轮中间流面的几何参数和工况参数作为分析整个转轮工作过程的基础,即采用平均参数法,这显然与实际流动有一定的差别.

实验是研究过渡过程问题的重要手段,其研究内容可分为模型实验与原型实验两大部分.它们的研究内容各有侧重,并互有联系.在过去的100多年间,各国学者针对过渡过程问题进行了大量的模型实验与原型实验,为水电站过渡过程问题的逐步解决提供了大量的科学依据,也推动了该领域基础理论的全面发展.

模拟计算机解法是近几十年发展起来的一种新方法.模拟计算机中的电路和所有元器件,可以给出各种不同的输入与输出电压之间的关系.过渡过程中的诸工况参数,如流量、转速、轴端力矩等值均经过相应的比例尺转换为模拟机上的电压值.由于模拟机仅实现数学模拟,因此,只有当描述过渡过程的微分方程组正确时,模拟的过渡过程才与实际相符.此外,随着模拟对象与基本方程的变化,各环节的模拟单元接线也要相应地加以改变.

3 发展趋势

前述水电站大波动过渡过程问题的数值解法共同特点是将水流作为一元流处理,以差分法和特征线法为主要计算方法,并将蜗壳、尾水管的影响或忽略不计或作当量化处理.随着计算方法及计算技术的不断进步,水电站过渡过程的分析也呈现多元化的态势.文献[27,28]曾对非棱柱体管道中的水击问题进行了分析研究,而且自20世纪70年代以来,国内外先后出现过格子法(Latticework)、双特征线法(Bi-Characteristics)、近特征线法(Nearcharacteristics)、类特征线法(Characteristics-Like)等多种计算多维流体过渡过程的数值方法^[29].但这些方法有容易失稳、格式复杂和计算网格固定等不足,计算二维过渡过程问题一般尚可,但如果计算三维问题,难度会大大增加.从计算方法上来看,已出现了用有限单元法分析管路一维瞬变流的例子^[30].此外,Lattice-Boltzmann(LB)方法是近年来发展起来的一种由运动论原理出发的流动计算技术,具有算法简单、压力直接算出、并行度高、几何边界易处理等优点,目前在非线性偏微分方程求解、多相流、多孔介质流,特别是大规模三维流场的模拟上显示了较大潜力.文献[31,32]建立了LB一维水击计算模型,并通过典型算例的计算分析与特征线法进行了比较,结果表明LB方法计算一维水力过渡过程有效可行.文献[29]建立了LB法二维水力过渡过程模型,计算一些理想流动并尝试模拟混凝土蜗壳内的水力过渡过程.从目前情况来看,管道内流场^[33]的计算主要集中在层流和工程模型的湍流计算,最近出现了采用大涡模拟方法的数值计算,也有人尝试直接求解N-S方程进行数值模拟,但由于计算机速度与容量的限制,仍限于较低雷诺数的情况.文献[34]考虑水轮机转轮内的流场进行了过渡过程仿真研究.

为更好地控制水电站大波动过渡过程问题,确定理想的或合理的导叶关闭规律尤为重要.文献[35]提出了以状态方程优化方法为基础的数值解法,文献[36]介绍了以阀调节理论为基础的计算方

法,文献[37,38]提出了以特征方程、水轮机控制方程为主体的水轮机甩负荷过渡过程最优调节规律的数值解法,文献[39]利用优化理论对水轮机折线关闭规律进行了研究。

由于水电站水力过渡过程的分析计算方法已比较成熟,开发实用计算软件是大势所趋。国外已有开发的流体计算应用软件(如 FLUENT, Tecplot, Phoenix 等),但用于水电站水力过渡过程方面是否能完全满足工程需要,可能还要根据工程的具体情况通过进一步研究确定。国内不少学者和机构在尝试这方面的研究^[40,41],但尚未有完全商品化的水电站过渡过程计算软件。

水电站长尾水洞中的明满流过渡、液柱分离、调压室漏空以及可能出现的气液两相瞬变流等问题也是需要进一步研究的问题。实际工程中偶尔出现的因过渡过程问题而导致的水电站事故也在不断地向人们提出新的研究课题。

参考文献:

- [1] 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,1986.
- [2] Chaudhry M H. Applied hydraulic transients[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1979. 2~3.
- [3] 怀利 E B,斯特里特 V L.瞬变流[M].清华大学流体传动与控制教研组译.北京:水利电力出版社,1983.
- [4] 克里夫琴科.水电站动力装置中的过渡过程[M].常兆堂,周文通,吴培豪译.北京:水利出版社,1981.
- [5] 常近时.水力机械过渡过程[M].北京:机械工业出版社,1991.
- [6] 杨开林.电站与泵站中的水力瞬变及调节[M].北京:中国水利水电出版社,2000.
- [7] 蒲家宁.管道水击分析与控制[M].北京:机械工业出版社,1991.
- [8] 王树人.水击理论与水击计算[M].北京:清华大学出版社,1981.
- [9] 吴荣樵,陈鉴治.水电站水力过渡过程[M].北京:中国水利水电出版社,1997.
- [10] 何文学.汤峪水电站大波动过渡过程数值模拟[D].杨凌:西北农业大学,1995.
- [11] 骆如蕴,张洪楚.水击基本方程的近似性[J].水力发电学报,1985(2):52~58.
- [12] 叶宏开.水击计算中摩擦项的处理[J].水利学报,1987(6):40~45.
- [13] 李进平,李修树.有压管道瞬变流摩阻的数值模拟[J].人民长江,2000,31(6):34~36.
- [14] 杨建设.瞬变流动中水力磨损的影响研究[J].水利学报,1999(2):46~51.
- [15] Ghidaoui M S, Karney B W. Energy estimates for discretization errors in water hammer problems[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998(4):384~393.
- [16] 常近时,白朝平,寿梅花.天生桥二级水电站水轮机装置甩负荷过渡过程的动态特性[J].水力发电,1995(7):35~38.
- [17] 胡敏良,蔡维由,李佛炎.东风水电站水轮机调节系统大小波动过渡过程数值分析[J].水力发电,1995(4):39~42.
- [18] 何文学.汤峪水电站突甩负荷过渡过程的数值解[J].水电站设计,1996(4):35~39.
- [19] 何文学,李茶青,申景涛,等.碗牛坝水电站突甩负荷过渡过程数值计算[J].西北农业大学学报,2000(12):153~157.
- [20] 刘保华.太平驿水电站水力过渡过程计算与实测[J].水电站设计,1995(3):42~46.
- [21] 谢小成.过渡过程计算中几个问题的处理[J].水利水电工程设计,1998(2):47~48.
- [22] 索丽生.国外有压瞬变流研究进展[J].河海科技进展,1991,11(2):9~15.
- [23] 陈德新.水轮机综合特性曲线的二元多相式最佳拟合[J].华北水利水电学院学报,1986(2):24~38.
- [24] 董宏成.水轮机模型综合特性曲线的计算机处理[J].水电站设计,1992(3):59~62.
- [25] 晏敏,张期昌.水轮机特性的超曲面正交多相式最小二乘拟合[J].大电机技术,1986(4):60~63.
- [26] 任德记,吴刚.水轮机特性曲线的数值计算[J].葛洲坝水电工程学院学报,1994,16(1):44~49.
- [27] 朱承军,杨建东.非棱柱体管道的一维水击计算及分析[J].水力发电学报,1998(2):59~68.
- [28] 索丽生.锥管水击计算的特征线法[J].水力发电学报,1997(3):61~68.
- [29] 程永光,张慧.用 Lattice-Boltzmann 方法模拟二维水力过渡过程[J].水利学报,2001(10):35~39.
- [30] 程谋森,刘昆,张育林.推进剂供应管路内液体瞬变流一维有限元计算[J].推进技术,2000(4):22~26.
- [31] 程永光,张师华. Lattice-Boltzmann 方法应用举例——水电站水击计算[J].武汉水利电力大学学报,1998(5):22~26.
- [32] 程永光,张师华,陈鉴治.用 Lattice-Boltzmann 方法模拟水击[J].水利学报,1998(6):25~30.
- [33] 苏铭德,黄素逸.计算流体力学基础[M].北京:清华大学出版社,1997.
- [34] 陈乃祥,瞿伦富,张扬军,等.混流式水轮机准三元流动分析及性能预估基础上的水电站过渡过程仿真[J].工程热物理学报,1996(2):39~43.
- [35] 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):59~69.
- [36] 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):68~73.
- [37] 杨建设,段昌国.水轮机最优调节规律的数值计算方法[J].科技情报,1988,8(2):11~18.
- [38] 何文学.“机阀协联”完善关闭规律的数值解法[J].大电机技术,1997(2):52~56.
- [39] 陈乃祥,张扬军,于宗祥.水轮机导水叶折线关闭规律的优化计算[J].水力发电,1996(12):47~51.
- [40] 沈祖诒,孙昀. Windows 界面下水力-机械过渡过程仿真计算通用软件[J].水力发电,2000(7):57~59.
- [41] 程远楚.水电站水击通用计算程序设计[J].水电站设计,1997(2):59~65.

(收稿日期:2002-12-03 编辑:熊水斌)