



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水力 SHUILI

机组过渡过程

JIZU GUODU GUOCHENG

郑源 张健 主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

水力机组过渡过程

郑 源 张 健 主 编
周建旭 周大庆 副主编



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书为教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书介绍了水力过渡过程的基本理论体系,包括运动方程、连续方程、特征线方法、明满流计算方程及各种边界条件;阐述了水电站水轮机组过渡过程数值计算方法,大、小波动过渡过程与水力干扰过渡过程;分析了离心泵系统过渡过程数值计算方法、大型轴流泵站的过渡过程计算方法以及水泵机组过渡过程中的水锤防护;研究了抽水蓄能电站水泵水轮机组过渡过程的特点及大、小波动水力过渡过程计算方法。本书结合实例,进行了水电站、泵站和抽水蓄能电站机组过渡过程实例分析。

本书可作为水利水电、能源动力类专业本科高年级学生和研究生的教材,也可作为相关专业师生和工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水力机组过渡过程/郑源,张健主编. —北京:北京大学出版社,2008.4

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-301-13049-0

I. 水… II. ①郑…②张… III. 水力机组—过渡过程 IV. TV734

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第192164号

书 名:水力机组过渡过程

著作责任者:郑 源 张 健 主编

责任编辑:胡伟晔

标准书号:ISBN 978-7-301-13049-0/TV·0001

出版发行:北京大学出版社

地 址:北京市海淀区成府路205号 100871

网 址:<http://www.pup.cn> 电子信箱:xxjs@pup.pku.edu.cn

电 话:邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765126

出版部 62754962

印 刷 者:河北滦县鑫华书刊印刷厂

经 销 者:新华书店

850毫米×1168毫米 32开本 7.375印张 204千字

2008年4月第1版 2008年4月第1次印刷

定 价:28.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

前 言

本书所介绍的水力机组是指水轮机组、水泵机组和水泵水轮机组。水力机组水力过渡过程是指水力机组由一种稳定工况或状态转换到另一工况或状态的瞬态或短时间的变动过程。通常而言，不同于主要运行工况的所有可能工况统称为过渡过程工况。水轮机工况机组甩负荷、增负荷以及其他一系列过程，水泵工况从静止、不工作状态下起动的过程，电动机断电后的过程等都是这种过渡过程。过渡过程的主要特征表现在水力机组和引水系统的水力和机械参数值及工况的变化。

水力机组过渡过程是决定水电站（泵站）稳定性的关键因素，在一定程度上将决定水电站（泵站）的主要参数和规模。因此，过渡过程计算同水利水电工程整体的综合技术经济水平密切相关，是一项直接影响工程安全性和经济性的重要技术工作。

目前，我国对水力机组过渡过程计算主要采用特征线方法。特征线法是将管道系统非恒定流的水锤偏微分方程，沿其特征线，变换为常微分方程，然后再近似地变换为差分方程进行数值计算。此法具有物理概念清晰、数值方法比较简便，尤其对复杂的系统，边界条件处理比较方便，该方法得到了广泛应用。因此，本书对水力机组过渡过程的计算主要采用特征线方法。

本书共分五章。第一章是概述，主要介绍水力机组过渡过程的意义和目的，水力机组过渡过程研究的现状与方法及水锤现象等。第二章介绍了水力过渡过程计算的基本理论，包括运动方程、连续方程、特征线方法、明满流计算方程及各种边界条件。第三章介绍了水轮机组过渡过程，包括水轮机组特性曲线和过渡过程的历程线，水轮机组过渡过程的数值算法，大、小波动过渡过程与水力干扰过渡过程。第四章介绍了水泵机组水力过渡过程，包括离心泵系统过渡过程数值计算，大型轴流泵站的过渡过

程计算和水泵机组过渡过程中的水锤防护。第五章介绍了水泵水轮机过渡过程,包括抽水蓄能电站水泵水轮机组过渡过程的特点,大、小波动水力过渡过程的计算方法和实例分析。

本书第一章和第二章由郑源编写,第三章由周建旭编写,第四章由周大庆编写,第五章由张健编写。

本书能够正式出版,感谢河海大学教务处和水电学院领导的大力支持,以及河海大学教材出版基金的资助。

最后,衷心感谢北京大学出版社胡伟晔编辑对本书所做的精心审定、编辑加工和大力帮助。

作 者

2008年2月

目 录

第一章 概述	(1)
第一节 研究水力机组过渡过程的意义和目的	(1)
第二节 水力机组过渡过程研究的现状和方法	(5)
第三节 水锤现象	(9)
第四节 直接水锤和间接水锤	(11)
一、直接水锤	(11)
二、间接水锤	(12)
第二章 水力过渡过程计算的基本理论	(13)
第一节 运动方程	(13)
第二节 连续方程	(15)
第三节 特征线方法	(18)
第四节 明满流计算方程	(23)
一、明渠流动	(23)
二、隧洞有压流	(24)
三、隧洞水流的特征线式格式法	(24)
第五节 边界条件	(26)
一、上游水库	(26)
二、管道下游为盲端	(27)
三、管道末端为阀门	(27)
四、管道中的阀门或局部阻抗元件	(28)
五、分叉连接节点	(29)
六、串联管	(31)
七、集中惯性元件	(32)
八、阻抗式调压室节点	(33)
九、差动式调压室节点	(34)
十、气垫式调压室节点	(36)

十一、隧洞水流的边界条件	(36)
第六节 计算的时间步长	(39)
第三章 水轮机组过渡过程	(40)
第一节 水轮机组特性曲线和过渡过程的历程线	(40)
一、概述	(40)
二、水轮机综合特性曲线	(41)
三、过渡过程的历程线	(44)
四、水轮机组特性曲线的拓展	(48)
第二节 水轮机组过渡过程的数值计算方法	(50)
一、尾水管和蜗壳当量管的计算	(50)
二、水轮机组边界条件	(53)
第三节 水轮机组调节保证计算及大波动过渡过程	(55)
一、调节保证计算	(55)
二、大波动过渡过程计算流程	(57)
三、大波动过渡过程优化的措施	(58)
第四节 水轮机组的小扰动过渡过程	(76)
一、小扰动过渡过程概述	(76)
二、描述压力管道动态特性的数学模型	(77)
三、水轮机流量和力矩方程	(80)
四、基于压力管道刚性模型的水力 机械系统状态方程	(82)
五、结合特征线法和状态方程分析的 联合算法	(88)
六、工程实例分析	(88)
第五节 水轮机组的水力干扰过渡过程	(93)
一、水电站的水力干扰现象	(93)
二、水力干扰的算法	(93)
三、机组调节品质评价指标	(94)
四、工程实例分析	(96)
第六节 设置变顶高尾水洞的水电站 工程实例分析	(101)

一、说明	(101)
二、算例分析	(101)
第四章 水泵机组水力过渡过程	(109)
第一节 水泵机组过渡过程概述	(109)
第二节 离心泵系统过渡过程数值计算	(110)
一、离心泵的无量纲相似特性	(110)
二、单台离心泵边界条件	(113)
三、串联离心泵边界条件	(120)
四、并联离心泵边界条件	(122)
五、空气进排气边界条件	(124)
六、离心泵启动	(125)
七、停泵水锤计算举例	(125)
第三节 大型轴流泵站的过渡过程计算	(128)
一、轴流泵装置过渡过程计算的数学模型	(128)
二、原始资料处理	(136)
三、计算框图	(139)
四、大型轴流泵站过渡过程计算方案 设计及计算	(144)
五、成果分析	(145)
第四节 水泵机组过渡过程中的水锤防护	(152)
一、空气罐防护	(153)
二、调压塔与调压水箱防护	(154)
三、阀门防护	(157)
四、空气阀防护	(159)
五、水锤消除器	(160)
六、惯性飞轮	(160)
七、泵站规划设计中的水锤防护问题	(161)
第五章 水泵水轮机过渡过程	(165)
第一节 抽水蓄能电站水泵水轮机过渡过程特点	(165)
第二节 水泵水轮机边界条件	(167)
一、全特性曲线处理方法	(167)

二、在全特性曲线上绘网格辅助线	(169)
三、引入相对开度的坐标变换	(169)
四、对全特性曲线作分区处理	(170)
五、Suter 处理方法	(171)
六、对 WH 和 WM 曲线的转换	(173)
七、转轮边界水头平衡方程	(177)
第三节 可逆机组大波动水力过渡过程	(178)
一、流速水头的考虑	(178)
二、机组关闭规律及鲁棒性分析	(180)
三、针对可逆机组过流特性的三段 折线关闭规律	(184)
四、特殊计算工况	(185)
五、压力脉动及尾水管最小压力计算成果 的设计取值	(191)
六、尾水调压室设置条件	(197)
第四节 抽水蓄能电站小波动水力过渡过程	(202)
一、低水头启动	(202)
二、低水头由调相转发电	(204)
三、导叶的不同步操作	(205)
四、利用球阀稳定机组的空载特性	(207)
第五节 抽水蓄能电站的水力干扰	(208)
第六节 天荒坪抽水蓄能电站水力过渡 过程实例分析	(209)
一、工程概述	(209)
二、技术路线	(210)
三、仿真模拟	(211)
四、仿真预测	(216)
五、计算结论	(220)
第七节 总结	(221)
参考文献	(222)

第一章 概 述

第一节 研究水力机组过渡过程的意义和目的

大量的运行实践表明,对于水电站、泵站和抽水蓄能电站,其事故往往发生在水力机组过渡过程中。这一过程中的一些参数,如水压力、转速等可能出现比常规运行工况大得多的值,从而可能引起安全问题,如压力管道破裂、调压室损毁和机组部件破坏等严重事故,对水电站、泵站和抽水蓄能电站的工作产生非常重要的影响。表 1-1 列出了国内外水电站发生过的水轮机组过渡过程的一些实际事故,这些只是已经发生的事故的一部分。

表 1-1 水轮机组过渡过程的一些事故实例

电站名称	国别	时间	水轮机形式	事故原因	事故情况	损失
拉可-奴阿尔	法国	1934	HL	控制规律不良,发生直接水击	钢管末端爆破	厂房全毁,死 9 人
阿格瓦	日本	1950	HL	错误操作蝶阀,造成直接水击	钢管爆破	死伤 4 人
莱昂	希腊	1955	HL	瞬间关闭闸门	闸门室突然出现水击冲击波	厂房与闸门室被毁

续表

电站名称	国别	时间	水轮机形式	事故原因	事故情况	损失
大洪河	中国	1962	HL	甩负荷后导叶关闭规律不良, 水压上升过高	压力水管爆破	
下碛	中国	1964	HL	甩负荷后水压上升过高	铸铁水管爆破	
卡霍夫	前苏联	1956	ZZ	甩负荷后控制规律不良	发生反水锤, 机组转动部分上抬	转轮、导叶、顶盖击毁, 厂房被淹
那洛夫	前苏联	1977	ZZ	甩负荷控制规律不良	发生反水锤, 抬机	叶片击坏
天生桥二级	中国	1994	HL	甩负荷控制规律不良	水锤叠加	差动式调压井升管塌
兹沃尼克	南斯拉夫	1975	ZZ	甩负荷控制规律不良	发生反水锤, 抬机	叶片击坏
恰尔达林	前苏联	1978	ZZ	甩负荷控制规律不良	制动工况时反向水推力大于转动部分自重, 抬机	励磁机零件损坏
江口	中国	1965	ZD	关闭动作不良	制动工况时反向水推力大于转动部分自重, 抬机	励磁机、推力镜板损坏

在常规发电的水电站中,机组由于电力系统事故而突然甩负荷,水轮机导水机构迅速自动关闭,因而引起压力引水管与蜗壳中的水压升高。如果导水机构关闭时间太短或关闭规律不良,则在引水系统中可能引起异常的水击压力升高,乃至使管道破坏,酿成危及整个水电站安全的重大事故。特别在高水头水电站中,这种事故的危害性尤为严重。而当导水机构关闭时间太长时,虽然压力上升可以减小,但机组转速上升将明显增大,这对机组安全运转与辅助设备工作可靠性,均带来很不利的影响。因此,过渡过程的研究将揭示水电站(泵站)中水击压力升高、机组转速上升等同调节元件关闭规律的关系,进而改善关闭规律,以保证压力上升与转速上升均在合理的范围之内。有时,由于电站的基本条件所限,例如具有很长的引水系统,改善关闭规律也无法使水压上升值降到合理的范围内而不得不在引水系统中增设调压井或调压阀。是否需要和需要增设何种调压设备,亦应由过渡过程计算结果来确定。所以,在水电站和水轮机组设计阶段就应当就各种方案的水轮机组甩负荷过渡过程进行详尽的计算,以确定相应的机组转速上升值、压力引水管道与蜗壳中水压上升值以及调节元件动作规律等的若干组计算结果。从技术经济的角度出发,从中选取一组最佳方案,作为确定水轮机组总体方案的重要依据之一。显然,水轮机组甩负荷过渡过程的品质,对整个水电站的总体布局与造价有着重要的影响。

在水泵装置下运转时,起动方式的研究具有十分重要的实际意义。大型电动机——泵机组起动时,将对电力系统产生巨大的电力冲击。研究适于电网容量、设备条件的合理起动方式,大型轴流泵站过渡过程计算分析,水泵机组过渡过程中的水锤防护对于保证安全、节省投资均有重要意义。

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:第一,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二十余种；第二，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1d数次，有些抽水蓄能电站的工况变化达1h数次。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。

因此在水电站、泵站和抽水蓄能电站的设计阶段就应对水力机组过渡过程进行分析和预测，采取适当的措施；在安装、调试和运行中也应对过渡过程的控制装置进行仔细的调整和保养，以保证电站和机组能够正常安全地工作。

研究水力机组过渡过程对水电站、泵站和抽水蓄能电站的经济性也有重大影响，在不能满足要求时，往往需要采取设置调压室、空气罐、空气阀等保护设施，加大有压输水道和压力管道直径，加大机组的飞轮力矩等措施，从而增加投资；相反，如能正确计算出水力机组过渡过程的参数，采取如分段关闭等适当的过渡过程控制措施，以减少调压室面积或取消调压室，减少有压输水道和压力管道直径，减少机组飞轮力矩，就可以减少电站投资。

综上所述，研究水力机组过渡过程对水电站、泵站和抽水蓄能电站的安全性和经济性均有重要意义。

研究水力机械过渡过程的目的，在于揭示各种水力机械及其装置系统在可能经历的各种过渡过程中的动态特性，并寻求改善这些动态特性的合理控制方式和技术措施，以便提高水力机械装置运行的可靠性、速动性、灵活性与总体的经济性，即提高其技术经济水平。

研究水锤现象的目的可归纳为：

(1) 计算水电站、泵站和抽水蓄能电站过水系统的最大内水压强，作为设计或校核压力水管、蜗壳和水轮机、水泵和水泵水轮机强度的依据。

(2) 计算过水系统的最小内水压强，作为布置压力水管的路线（防止压力水管内发生真空）和检验尾水管内真空度的依据。

(3) 研究水锤现象与机组运行的关系，如机组转速变化、运

行的稳定性等。

(4) 研究减小水锤压强的措施。

水锤现象也往往是引起明钢管震动的原因之一，对于明钢管，应研究水锤引起管道振动的可能性。

第二节 水力机组过渡过程研究的 现状和方法

水力机组过渡过程的研究，差不多同这些机械产生的年代一样长，但实际上只是近 50 年来才有很大的进展。

在水力机组过渡过程中，常发生由于水锤引起的水力系统压力的很大变化，直接危及系统的安全。因此，水锤即是过渡过程的主要研究对象，也是最早引起人们重视的现象之一。早在 1898 年，俄国著名科学家茹科夫斯基首次提出了水管中水锤的理论和末端阀水锤计算的基本方程式。

20 世纪初，随着较大型的抽水站和水电站的建设，要求解决引水管道和机组运行安全性与减少土建投资的一系列问题，于是，关于水力机组过渡过程的研究逐渐发展起来。此间最有意义的研究成果是意大利学者阿列维有关水锤理论与计算方法的一系列论著，它奠定了现代水锤分析理论的基础。

随着现代水力机组单机容量和尺寸的不断扩大，水力机组过渡过程的问题愈来愈多，从而吸引了国际上大批科技人员从事范围相当广泛的过渡过程领域的科学研究与实践活动。每一个水动力工程的设计必含有过渡过程的计算，以确定工程所必需的基本结构参数。对于大型工程，它的可行性和总体布局的合理性常必须按其过渡过程品质的好坏考核。因此，在 1940 年到 1960 年间相继出现了一批以创造与改进水锤和系统压力计算方法为主要成就的著作。

20 世纪四五十年代，前苏联建成了一批大型平原河流上的低水头水电站，装设尺寸很大的轴流转桨式水轮机组。这种机组

在运行中出现了许多亟待解决的过渡过程问题,从而促进了该方面的研究。特别是1956年卡霍夫水电站一台转轮直径为8m的大型轴流转桨式水轮机,在甩负荷过渡过程中发生断流反水锤,导致机组摧毁性事故之后,过渡过程的研究引起了国内外学者的普遍注意。在前苏联,以克里夫琴科为代表的一批学者,致力于水电站水轮机装置过渡过程的研究,取得了很多有价值的成果。1975年由他主编的《水电站动力装置中的过渡过程》一书集中反映了前苏联学者在水轮机装置过渡过程领域的研究成果。

与此同时,美国、西欧、日本等高水头、大容量抽水蓄能电站的大量兴建,则促进了水泵工作状态下的起动和发电电动机电力突然切断等过渡过程的研究,取得了显著的成果。

随着计算机的普及应用,大大提高了过渡过程的求解能力,从而使得过渡过程计算成为水力机组设计中广泛进行的工程计算之一。在这方面最有代表性的应首推美国的怀利(Wylie)和斯垂特(Streeter)合著的《瞬变流》一书,它不仅介绍了各种水力装置过渡过程的求解理论与模式,而且还给出了相应的算法。

最近几十年,在各种涉及水力系统的国际学术会议和学术刊物上,仍有大量的以研究水轮机、泵、抽水蓄能装置系统过渡过程为主要内容的论文发表,这说明这一领域仍有许多尚未解决和尚未完全解决的理论与实践问题。有些过渡过程理论与计算问题,看来似乎早已解决,但实际上还没有真正解决。例如,1956年前苏联卡霍夫水电站轴流转桨式水轮机发生摧毁性事故之后,对此曾进行了大量的理论与试验研究工作,发表了许多论著。

水力机组过渡过程的研究在我国开展较晚,大约始于20世纪60年代初期,而且水轮机、水泵、抽水蓄能装置系统的发展很不平衡。初期研究所涉及的范围较窄,主要集中于系统水锤压力与机组转速变化的解析计算方面。还从事了一些现场的原型试验工作,取得了一些宝贵的试验成果,但基础理论的研究相当薄弱。最近二十余年,随着我国许多大中型水电站、泵站和抽水蓄能电站的兴建,我国水力机组过渡过程的研究有了较为迅速的发展。在基础理论、计算方法和原模型过渡过程试验研究方面,取

得了显著的成就。

水力机组过渡过程同其他应用科学一样,采用理论与试验相结合的方法进行研究,而理论研究始终应处在指导地位。

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等动态工况参数的解析理论等,它涉及的理论范围很广。在基础理论部分,已取得了相当丰硕的成果,并已基本形成系统。

过渡过程的计算方法大体上可划分为解析计算法、图解法、数值计算解法与模拟计算解法等。随着计算机的广泛应用,纯解析计算方法和图解法已很少应用,代之以计算机来完成的解析计算和图解计算。而应用最多的是计算机数值解法。

特征线法是将管道系统非恒定流的水锤偏微分方程,沿其特征线,变换为常微分方程,然后再近似地变换为差分方程进行数值计算。在求解水力机组过渡过程问题时,通常是从 $t=0$ 时刻的初始状态(其参数是已知的)去求下一时刻(即 $t=\Delta t$)各计算断面的压力和流量。这样, Δt 时步线上除边界外各网格点处的压力和流量就可求出,在求得边界上的参数以后,就可计算 $t=2\Delta t$ 时步线上各网格点上的参数,依次类推,直至算到所要计算的时间为止。特征线法物理概念清晰、数值方法比较简便,因此,本书重点介绍该方法。

试验是研究水力机械装置过渡过程的重要手段。试验研究分为两大部分:模型试验与原型试验,它们的研究内容各有侧重,并互有联系。

图 1-1 示出河海大学研究可逆式水泵—水轮机过渡过程特性的模型试验装置。在这个装置上不仅可以测得水泵—水轮机的静态全特性,而且还可以进行某些过渡过程的试验。例如,当进行甩负荷试验时,测功电机突然丢弃负荷,导叶能在专门的液压系统控制下,迅速地按预定规律在动水中关闭。装在试验台各部的测定各动态工况参数的传感器,将机组转数、通道中特征点的水压力、轴端力矩等参数的瞬变特性传输给应变仪放大,再由示波

器记录，从而得到水泵—水轮机装置甩负荷过渡过程的动态特性。

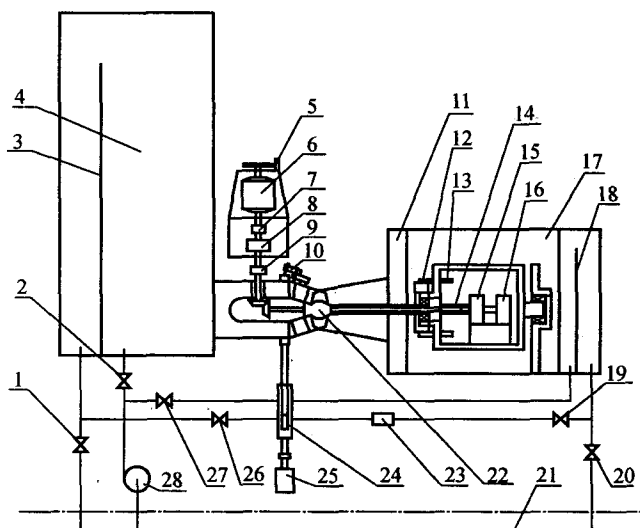


图 1-1 可逆式水泵—水轮机过渡过程特性的模型试验装置

1. 阀门 2. 阀门 3. 溢流板 4. 上水池 5. 光电测速仪 6. 直流发电/电动机 7. 电磁离合器 8. 扭矩仪 9. 联轴结 10. 连杆架构 11. 下水池
12. 顶压弹簧 13. 压力传感器 14. 螺母丝杆 15. 摆线减速轮 16. 直流伺服电机 17. 竖井 18. 溢流板 19. 阀门 20. 阀门 21. 底水库 22. 转轮
23. 测流装置 24. 螺母丝杆 25. 步进电机 26. 阀门 27. 阀门 28. 供水泵

由于在动态的模型试验装置上进行过渡过程试验消耗的功率小，便于观察和测量，初始工况与调节元件运动规律易于改变，一般不易发生事故，而即使发生事故所造成的危害也远比原型机试验小等，所以模型试验研究水力机组过渡过程，从经济、灵活和安全角度考虑是不可缺少的试验研究途径。

但是，过渡过程的模型试验不能完全替代原型试验，其主要原因有：第一，过渡过程的动态模拟理论和考虑模型与原型装置间比尺效应的动态参数的修正方法还不完善，经模型特性换算的与原型实测的动态特性往往有明显的差别；第二，某些过渡过程