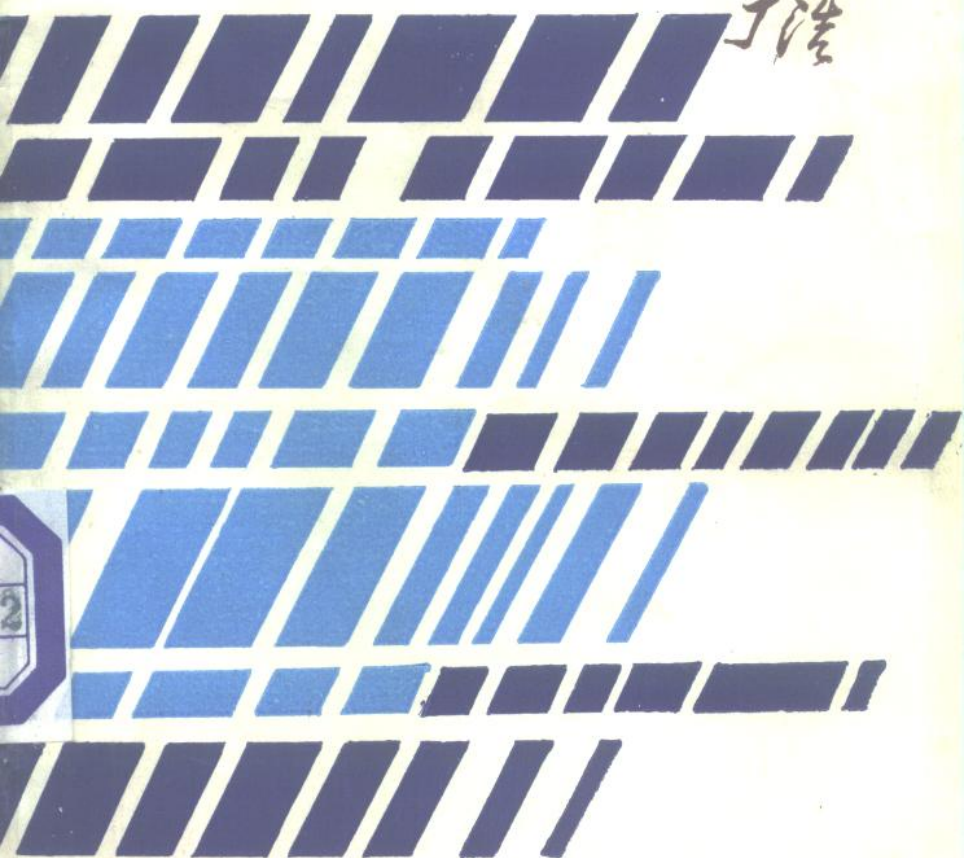


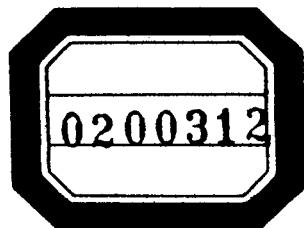
水电站有压引水系统 平顺水流

丁浩



水利电力出版社

水电部科技情报所	
图书总号	T4550
分类号	TV134

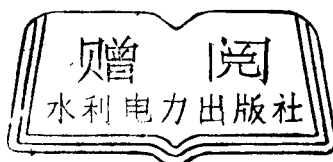


水电站有压引水系统 非 恒 定 流

丁 浩 编



005873 水利部信息所



水利电力出版社

水电站有压引水系统非恒定流

丁浩 编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

建华印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 14.75印张 326千字

1986年4月第一版 1986年4月北京第一次印刷

印数0001—1530册 定价3.50元

书号 15143·5756

内 容 提 要

本书对水电站有压引水系统的水击、调压井水体质量波动、机组调节保证、有压非恒定流等的理论与计算进行较全面的阐述。

全书共十九章。第1~5章为总论，阐述水电站有压非恒定流的基本理论与工作特点，对生产实践中的经验和问题进行探讨。第6~9章阐述水击和机组调节保证的理论与计算方法。第10~15章阐述调压井水体质量波动的理论与计算，对波动稳定问题进行探讨。第16~19章阐述有压引水系统非恒定流基本参数测定、水击模型试验、调压井水体质量波动模型试验及原型观测等的理论与应用。

本书可供从事水电站规划、设计、建筑、运行等方面的技术人员和水电科研人员参考，也可供大专院校、水利水电工程建筑专业和水电站动力设备专业师生参考。

前 言

有压引水系统是有压引水式水电站的重要组成部分。有压非恒定流是有压引水系统中的暂态过程。水电站的负荷改变是出现暂态过程的主要原因，暂态过程能否迅速转为新的稳定工作状态，关键在于有压引水系统的非恒定流态能否及时转为恒定流态。为保证水电站与电网的静态和动态的稳定，必须研究有压引水系统非恒定流的问题

六十年代后期，在芝加哥召开的国际会议，曾提出“抽水蓄能电站的水击总结”和“有关水击的实践与经验的暂态流体力学”。与此同时，我国也进行了以空放阀代替调压井（简称“以阀代井”）的模型试验和试点的原型观测，根据国内外资料，研究有压引水系统非恒定流，是开发水电能源必不可少的。

有压引水系统非恒定流属于水力学领域，从七十年代起被称为暂态水力学或暂态流体力学。

本书旨在以国内外现代水电科学技术，阐明水电站有压引水系统非恒定流的性质和理论，总结国内外的实践经验和科研成果，结合水电能源开发的需要提出有关建议，评述本学科的重要研究课题，供有关人员参考。

第六章、第八章、第十一章和第十四章是本书的重点。第六章介绍水击分析计算的方法，利用计算机进行计算的基本理论。第八章介绍七十年代水击计算的新方法、电算法的论述及研究课题。第十一章介绍调压井水体质量波动计算，

用计算机计算复杂调压井系统的波动。第十四章介绍调压井质量波动的稳定问题和稳定断面的确定。

本书在编著期间，曾得到吴甄铎同志的支持和多次帮助，在此深表敬意。初稿写成后经程良骏、吴荣樵、吴培豪和李卓林等同志审阅，提出了宝贵意见；初稿修改后又得到王永年、陈鉴治和张师华三位同志的审核，在此一并表示深切感谢。

由于编者的水平有限，书中缺点、错误之处在所难免，欢迎批评指正。

编 者

一九八四年十二月

符 号 说 明

每个符号通常表示一种意义。如代表几种意义时，则在符号的右上角或右下角加注，以表示其管段、时段或特定标号，并在文中再加以说明。

符号所代表的意义一一列出于下：

L 管道长度，如隧洞长度 为 L_T ，水管长度为 L_p ；	v 流速比值， $v = \frac{V}{V_0}$ ， V_0 为水管稳定流速；
l 间距；	Q 管道流量；
x 沿水管坐标的变量；	q 流量比值， $q = \frac{Q}{Q_0}$ ， Q_0 为管道稳定流量；
x_0 电力系统的等值电抗；	Q_1 单元流量；
X 无因次比值；	ΔQ 流量的变量；
H 水轮机的水头或水泵的 扬程；	a 水击弹性波速，简称水 击波速；
H_0 静水头；	g 重力加速度；
H_l 损失水头；	T, t 时间；
H_{f0} 阻抗损失水头；	T_1 引水系统加速时间常数， $T_1 = \frac{\Sigma LV_0}{gH_0}$
H_{fL} 隧洞损失水头；	T_0 机组加速时间常数， $T_0 = 2.74 \frac{[GD^2]n_0^2}{N_0}$
H_{fp} 压力水管损失水头；	$\times 10^{-2}$
ΔH 水击压力；	
ξ 水击压力相对值， $\xi = \frac{\Delta H}{H_0}$	
V 水管流速；	

T_s 关机时间;

T_n 开机时间或称起动时间,

$$T_0 = \frac{J\omega_0^2}{75N^{1/2}};$$

T' 加速时间或称水击压力计算时间,

$$t, \text{ 水击相时, } t_r = \frac{2L}{a};$$

$T_{r,k}$ 波动的理论周期;

N 功率;

N_0 额定功率;

ΔN 功率变量;

F 管道、调压井的断面
积, 阀门面积;

F_r 水管断面积;

F_t 隧洞断面积;

F_s 调压井设计面积;

F_0 阻抗孔口断面积;

F_{cr} 稳定临界值断面积;

$F_{r,r}$ 升管断面积;

$F_{r,s}$ 外井断面积;

f 损失水头摩阻系数;

f_0 孔口摩阻系数;

f_t 隧洞摩阻系数;

f_s 效率修正系数;

f_a 水击压力修正系数;

f_r 管道弹性系数的修正系
数; 当 ϕ 与 f 为函数时,

另在文中说明;

D 管道与圆形阀门直径;

D_R 空放阀直径;

a 钢箍直径;

S 接力器行程; 水击弹性
波的透射系数;

S_1 调压井波动的衰减系

$$\text{数, } S_1 = \frac{L_r F_r V_r}{2g F_s H_{r,L}};$$

S^* 有阻抗的衰减系数, S^*

$$= \frac{L_r F_r}{2g F_s [f + f_r (F_r / F_s)^2]}$$

Z 高程;

ΔZ 高程变量;

$Z(x)$ 任意点 x 的水力阻抗;

τ 阀门或导叶的开度;

$\beta(\tau)$ 阀门关闭函数, $\beta(\tau)$

$$= \sqrt{a} \frac{F_0}{F};$$

n 水轮机或水泵的转速;

n_0 水轮机或水泵的额定转
速;

n_0 比转速;

n_1 单元转速;

n_0 飞逸转速;

Δn 暂态转速的变量;

$$\beta \text{ 暂态转速率 } \beta = \frac{\Delta n}{n_0};$$

n_{s0} 最优比转速;

M 力矩;

M_s 动力矩;

M_r 阻力矩;

M_e 水泵电动机力矩;

M_p 水泵消耗力矩;

M_0 水泵初始力矩;

E 发电机电动势;

E_s 水体弹性模量;

E_r 钢管弹性模量;

E_p 水管弹性模量;

ΔE 转动能的变量;

K_s 静态稳定的储备系数;

u 接受端电压或低压侧的
母线电压;

δ 相角或厚度;

δ_n 调速器暂态不均匀率;

$$\delta_n = \frac{n'' - n'}{n_0}$$

δ 管厚;

δ_s 漏水孔间隙的有效
宽度;

J 转动惯量;

ω 角速度或摆动频率;

γ 水击波反射系数;

σ 管道惯性系数, σ

$$= \frac{\Sigma LV}{gT_s H_0};$$

ρ 管道弹性系数;

$$\rho = \frac{aV_0}{2gH_0};$$

k 流量系数; 绝热的空气
比容积变迁的指数;

k_s 溢流堰流量系数;

k_r 阀门特性值;

C 流速系数;

C_k 空放阀的流速系数;

C_v 空气进入速度;

C_{tB} 阀门特性, 即为 t_B 时刻
的流量系数与开度的乘
积;

C_f 飞轮常数, C

$$= \frac{[GD^2]n_0^2}{N};$$

C 为水击特性值时, 文中
另有说明, 即 C

$$= H + \frac{aQ}{gF_p};$$

$[GD^2]$ 飞轮转矩;

P 压力;

ΔP 水击压力;

μ 波桑系数或称波桑比;

r 水管半径;

r_e 水管外半径;

r_i 水管内半径;

φ_0 管道的结构系数;

η 水轮机效率;

η , 水泵效率;

π, Ω 波函数, $\pi = \frac{\xi}{2\rho} - Q_{11}$

$$\Omega = \frac{\xi}{2\rho} + Q;$$

V 体积;

V_0 尾水管的出流体积;

V_r 尾水管的流进体积;

V_a 空气体积;

A 振幅;

A_0 最大振幅;

θ 球阀、蝶阀的转动角

$$\text{度}, \theta = \frac{\alpha T_1}{2L};$$

$$\theta = \frac{\omega}{\omega_{ti}} = \frac{T_1}{t_r};$$

λ 水管常数, $\lambda = \frac{\alpha}{gF_p};$

α 特征线斜率, α

$$= \frac{\Delta H_0}{aV_0};$$

α' 调压井波动衰减系数,

$$\alpha = \frac{V_0}{2}$$

$$\times \left(\frac{2fg}{L_r} - \frac{F_r}{F_1 H_0} \right)$$

QCM、QCP、CH水
击分析常数。

目 录

前 言

符号说明

第一章	有压引水系统概论	1
第一节	有压引水系统的工作特点	1
第二节	有压引水系统非恒定流的理论与实践	3
第三节	有压非恒定流研究的实际意义	12
第二章	机组及引水系统的暂态工作过程	15
第一节	水电站的常态工作和暂态过程	15
第二节	暂态过程的工况	16
第三节	水轮机与空放阀的协联动作	23
第四节	暂态至常态工作的稳定保证	26
第三章	水击及调节保证的计算条件与要求	28
第一节	水轮机正常运行的要求	28
第二节	水击计算之目的与要求	28
第三节	机组调节保证计算之目的与计算条件	31
第四节	“机阀协联动作”的水击计算	33
第五节	有压引水系统事故汇集和分析	35
第四章	水击计算的基本原理	40
第一节	刚性水击的理论及应用	40
第二节	弹性水击的理论	42
第三节	弹性水击的基本方程	44
第四节	水击弹性波速	49
第五节	弹性水击的基本类型	56
第五章	水击计算的初始条件与边界条件	90

第一节	条件的选用	60
第二节	自由水面的边界条件	62
第三节	阀门的边界条件	64
第四节	复杂管的边界条件	68
第五节	水泵水击的初始条件与边界条件	70
第六章	水击计算解析法	78
第一节	解析法的理论基础	78
第二节	简单管的水击解析法	79
第三节	串联管的水击解析法	90
第四节	岔管水击解析法之一——公式计算法	93
第五节	岔管水击解析法之二——能量等值管法	96
第六节	岔管水击解析法之三——逐波叠加法	99
第七节	复杂管路系统水击压力的电算法	103
第八节	抽水蓄能机组的水击计算特点	108
第九节	考虑损失水头的水击计算方法	109
第七章	水击计算的图解法与曲线图法	120
第一节	图解法与曲线图法的原理	120
第二节	简单管的水击图解法	123
第三节	抽水蓄能机组的水击图解计算特点	127
第四节	水击压力的曲线图法	131
第八章	水击计算新课题的研究	138
第一节	用特征线法进行水击分析	138
第二节	“以阀代井”的水击计算	147
第三节	水轮机尾水系统的反水击	152
第四节	“水击穿井”的计算	163
第五节	水击共振	167
第六节	调压井水位波动与水击压力的联合分析	189
第九章	水电站机组调节保证计算	194
第一节	计算的任务与意义	194

第二节	水轮机暂态转速率计算	196
第三节	以闸代井的调节保证计算	205
第四节	暂态转速的近似计算公式	210
第五节	水轮机导叶或阀门分段关闭的暂态转速率计算	215
第六节	调节保证参数对调速系统的影响	219
第七节	调节保证计算标准	228
第十章	调压井的工作原理及基本方程	231
第一节	调压井的作用与工作原理	231
第二节	调压井的型式及布置方式	233
第三节	调压井水力计算的基本方程	238
第十一章	调压井质量波动计算解析法	244
第一节	解析法的原理与应用	244
第二节	无阻抗调压井质量波动计算解析法	251
第三节	各种不同型式调压井的质量波动计算解析法	257
第四节	用计算机进行调压井质量波动计算	278
第十二章	调压井质量波动计算的图解法与简捷法	284
第一节	图解法的原理与特点	284
第二节	质量波动计算图解法	285
第三节	其他型式调压井的质量波动图解法的特征	292
第四节	简捷法的计算理论与计算式	297
第五节	用电子计算器计算调压井涌浪	302
第十三章	气压式调压井质量波动计算方法	307
第一节	气压式调压井特殊功能与类型	307
第二节	半封闭式调压井的水力计算	309
第三节	封闭式(气压式)调压井的质量波动计算	310
第四节	空气制动式调压井质量波动计算	312
第十四章	调压井质量波动的稳定	328
第一节	调压井质量波动稳定的探讨	328
第二节	简单式调压井质量波动稳定断面的确定	330

第三节	其他型式调压井的波动稳定临界断面的计算	337
第四节	应用相平面法分析调压井的波动稳定	341
第五节	动力系统稳定的准则	357
第十五章	调压井的设计经验与发展展望	362
第一节	调压井设置现状的调查分析	362
第二节	国内外调压井设计经验简介	366
第三节	国外部分调压井示例	368
第四节	空气制动式调压井发展展望	372
第五节	简单式、阻抗式与差动式调压井的分析	373
第六节	调压井大系统的自动化控制	375
第十六章	有压非恒定流试验的模型律及基本参数的测定	378
第一节	试验的目的与内容	378
第二节	试验的模型律	379
第三节	管道非恒定流摩阻损失的测定	382
第四节	气液两相非恒定流的试验研究理论与课题	385
第十七章	水击模型试验	388
第一节	水电站引水系统的水击模型试验	394
第二节	“机阀联动”的水击模型试验	399
第三节	水气混合体无定形流的水击试验	403
第十八章	调压井质量波动模型与电模拟试验	409
第一节	模型试验之目的、任务与要求	409
第二节	模型试验计划	410
第三节	简单式调压井质量波动的电模拟试验	415
第四节	调压井质量波动模型试验实例	425
第十九章	水电站有压引水系统的原型观测	430
第一节	原型观测的目的与内容	430
第二节	原型观测的计划与工作方法	432
第三节	原型观测的仪器设备	435
第四节	原型观测实例——龙源水电站	437
参考文献		446

第一章 有压引水系统概论

有压引水式水电站，为水电站布置型式的主要方式之一，其在枢纽布置中的特征为具备有压的隧洞与水管。本书以此类水电站有压引水道的暂态水力学问题，作为研究的主要内容。

本书所论述的有压引水道，有长短不同之别。在较长的有压引水道的隧洞与水管之间，经常须设置调压井，因而将包含有隧洞、调压井和压力水管的综合，称为水电站有压引水系统。

如水电站为首部开发的布置，则可能须用尾水调压井与有压尾水隧洞，因而将尾水管、尾水调压井与有压尾水隧洞综合，称为水电站的有压尾水系统。水电站的有压引水系统和有压尾水系统，统称为水电站的过流系统。

本书论述的主要内容，为长管有压引水系统的非恒定流问题。

第一节 有压引水系统的工作特点

在山谷河流或平原河流的上游所建筑的水电站，常须采用有压引水系统的水力枢纽布置。从水流的观点来说，是在隧洞、调压井与水管三者之间，组成一个有压引水系统水流的有机体。如从水电站工作情况的观点来说，除上述有机体外，还应包括水轮机和调速器。在综合考虑建筑物与设备的

情况下，引水系统具有以下的工作特点：

(1) 在负荷不变的常态工作时，因供电系统或有压引水系统的微小扰动，而使有压引水系统的恒定流态变为非恒定流态，从而产生以下的工作特点：

1) 在调速器与压力水管之间，因微小扰动而使其流态产生微小的弹性波动。然而这种惯性与弹性的能量转换较少，因而其流态仍趋于稳定，一般对本电站和电力系统的工作，不会产生显著的影响。

2) 在调压井与隧洞之间，亦因微小扰动使其流态在调压井内产生微小的质量波动。然而因调压井的摩阻与其大小的影响，这种质量波动，可能使水电站仍保持恒定流态的工作情况，亦可能产生非恒定流态的工作情况。

(2) 在负荷改变的暂态过程时，因负荷改变的大扰动，而使有压引水系统的恒定流态转变为非恒定流态，从而亦产生如下的工作特点：

1) 在调速器与压力水管之间，因负荷改变的大扰动，使有压引水系统的流态产生较大的惯性，其弹性能量也显著改变，出现弹性波动。这种波动首先表现于导叶关闭后流量改变，而发生水击现象。在这种工作的情况下，导致机组转速与水管水压的改变。在严重影响的程度下，可能阻碍水电站的运行和引水系统的工作，例如机组达到飞逸转速与水管的事故。

2) 在调压井与隧洞之间，亦因负荷改变的大扰动，使流态产生较大的变化，其能量显著地改变，从而在调压井产生振幅较大的质量波动。然而亦因调压井断面的大小和摩阻的影响，可能使本电站或电力系统的工作，趋于稳定或趋向不稳定。

3) 有压引水系统的质量和弹性的波动，由于彼此的周

期相差很大,一般不会出现波动振幅重叠的不利情况,然而在
某些参数相互配合的特殊情况下,亦不排除波动重叠现象。

4) 因弹性波动的冲击,有可能促使压力水管、蜗壳、
水轮机转轮及其尾水管等产生相应的振动,从而使这些建筑
物与设备,遭受不同程度的损坏,如转轮被打坏与水管出现
裂缝,导致以后的爆破。

第二节 有压引水系统非恒定流的理论与实践

水电站的有压引水系统非恒定流,或简称有压非恒定
流,所研究的对象为分析探讨水电站引水系统在负荷改变时
的暂态过程,其中包括水击的弹性波动、调压井的质量波
动,以及机组转速变化(以下均称机组暂态转速率)的影
响。其目的在于论述各种运行条件下,其暂态过程的有压非
恒定流的理论计算以及其处理方法等,进而寻求最有利的措
施,以保证水电站的正常运行。

有压非恒定流为比较新兴的学科,然而前人在此领域中
做了不少研究工作,特别到七十年代,累积了丰富的理论
知识和实践经验。现就以下三个部分进行一些论述。

一、水击的理论和实践

最早研究水击的理论问题,在近年一般的文献
中^{[1][2][3]},都引证麦桥(Michaud)在1878年发表的论
文^[4],文中提出水击波动的性质和管壁弹性对水击的影响。
然而,更早提出弹性水击理论的作者为曼拉华(Menabre'a)
^[5],他在1858年发表的有关水击的笔记,曾提出三个论
点:

1) 水击计算必须考虑管道的弹性与水体的压缩性;