

阻抗式调压室 稳定性理论

杨玲霞 著



黄河水利出版社

阻抗式调压室稳定性理论

杨玲霞 著

黄河水利出版社

内 容 提 要

本书首先给出了正确的阻抗式调压室波动分析的基本方程式及阻抗表达式,用李亚普诺夫的直接法研究有限小波动时的稳定条件,导出了小于托马断面的调压室稳定断面计算公式,并用电算法进行了验证。运用理论分析法和图解法探讨了大波动的稳定特性。并考虑实际电站情况的各种因素,用现代控制理论研究了阻抗对实际电站调节稳定性的作用。最后作为实例,对南湾2号水电站调压室稳定断面进行了具体分析,认为调压室断面可以比托马断面减小百分之六十。

本书可作为高等院校水利水电工程专业本科生、研究生及教师的参考用书,对水利、水电等专业的设计、科研和运行管理等部门的工作人员也有一定参考和实用价值。

阻抗式调压室稳定性理论

杨玲霞 著

责任编辑:王 琦

责任校对:何新华

责任印制:常红昕

出 版:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼12层

邮编:450003

印 刷:黄河水利委员会印刷厂

发 行:黄河水利出版社

开 本:850mm×1168mm 1/32

版 别:1998年4月 第1版

印 次:1998年4月郑州第1次印刷

印 张:5.25

印 数:1—1000

字 数:130千字

ISBN 7-80621-196-9/TV·124

定价:12.00 元

前 言

调压室是水电站引水系统中常见的水工建筑物,设置调压室的目的是限制水击波的传播,减小水击压力,从而改善机组运行条件。阻抗式调压室以其对进、出水流的阻抗作用达到减小调压室内水位波动幅值的效果,因而得到广泛应用。调压室水位波动稳定性理论属于水电站压力不稳定流问题中的一个分支,也称暂态水力学。水电站的负荷变化是引起水电站引水系统出现暂态过程的主要原因。暂态过程能否迅速过渡为新的稳定状态,关键在于有压引水系统的非恒定流能否迅速地过渡为恒定流。这就要求调压室中的水位波动是稳定的,而不能是发散的。

本书系统地给出了设置阻抗式调压室水电站引水系统的数学模型、基本理论及工程实用的稳定性分析方法,其中包括理论分析法、电算法、图解法及现代控制理论的分析方法。本书理论性强,内容深刻、系统,而且均为作者本人多年来的研究体会和总结,旨在推动调压室水位波动稳定性理论的发展。

全书共分九章。第一章综述了目前调压室水位波动稳定性的研究概况及不足之处;第二章建立了阻抗式调压室水位波动的基本方程组;第三章阐明了阻抗式调压室有限小波动的稳定性理论;第四章通过电算分析验证了第三章理论分析的正确性;第五章属于大波动稳定性理论;第六章阐明了实际水电站调压室水位波动稳定性问题的分析方法;第七章通过实验研究论述了阻抗损失系数的变化规律;第八章为工程实例;第九章为本书概括出的主要结论。

由于作者水平有限,书中谬误之处在所难免,诚恳希望广大读者批评指正。

作 者

1997 年 12 月

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 阻抗式调压室水位波动的基本方程式	(13)
第一节 水库—调压室段的能量方程	(13)
第二节 连续性方程和调速方程	(18)
第三章 阻抗式调压室有限小波动稳定性理论	(20)
第一节 小波动稳定性理论——托马公式简介	(20)
第二节 阻抗式调压室有限小波动稳定性理论	(25)
第三节 小结	(45)
第四章 调压室有限小波动稳定性的电算分析	(47)
第一节 基本方程式	(48)
第二节 计算方法	(49)
第三节 验证性电算	(58)
第四节 探讨性电算	(68)
第五节 小结	(72)
第五章 阻抗式调压室大波动稳定性问题	(76)
第一节 研究成果简介	(76)
第二节 阻抗式调压室大波动稳定性	(78)
第三节 调压室波动稳定性分析的图解法	(81)
第四节 小结	(89)
第六章 实际水电站调压室稳定性问题	(90)
第一节 托马条件下的小波动稳定性	(91)
第二节 实际系统的数学模型	(95)
第三节 系统的稳定性分析	(108)

第四节 小结·····	(124)
第七章 实验研究·····	(125)
第一节 实验设备及实验方法·····	(126)
第二节 引水管中水头损失与流量关系曲线的测定 ·····	(130)
第三节 阻抗损失实验·····	(130)
第四节 涌浪实验及电算比较·····	(144)
第八章 南湾 2 号水电站调压室稳定断面分析·····	(150)
第九章 主要结论·····	(157)
参考文献 ·····	(160)

第一章 绪 论

一、问题的提出及实际意义

当水电站引水管道或尾水管道较长时,由于受到水击压力和甩负荷时机组转速上升的限制,以及电站调节稳定的要求,而需要设置调压室,以限制水击波的传播,减小水击压力,改善机组运行条件。

关于设置调压室的必要条件,50年代的水电站设计规程规定:在引水系统设计中,当 $\Sigma Lv/H > 16 \sim 20$ 时,要求在引水系统中设置调压室。但近年来,随着科学技术的发展,系统设计不断完善,调保及稳定理论不断提高,使调节保证计算的控制值不断放宽,这一规定也已逐渐被打破。《水轮机设计手册》^[1]和《水轮机运行》^[2]中直接提出了以允许压力升值作为判断标准。《水轮机设计与计算》^[3]根据允许水击压力值和导叶关闭时间,计算出了一系列 $\Sigma Lv/H$ 的临界值,最小为2,最大为52。也有的以允许速率上升值作为判断标准。对于并联运行且占系统容量比重较小的电站,当机组甩全负荷时,已脱离电力系统,因而过大的转速升高对电力系统本身已没有什么影响,而主要是由于转速过大,机组离心力增加,从而影响机组自身的结构强度;其次,由于转速过高,引起较大的过电压,容易击穿电机绝缘^[4]。不过,目前电站自动化程度较高,大都装有超速保护和电压调节器等设备。对于单独运行或占系统容量比重较大的电站,机组速率上升值与电力系统规模、机组容量占系统的比重、继电保护的完善程度、调速器的灵敏性、电站与系统联接的强弱以及机组制造安装质量等因素有关^[4]。美国垦务局水轮机设计标准定为 $\beta = 65\%$ 。《水轮机运

行》^[2]指出在设计中机组全甩负荷转速上升的最大值不应超过40%。目前,对于压力上升与速率上升的规范值,还有着不同的看法。例如,只要引水系统与机组均能保证足够的强度,压力上升与转速上升可以超过规范允许值,而无需设置调压室。但问题在于提高压力引水系统及机组强度,势必导致投资增加。此外,转速上升允许值增大,对调节系统稳定性、调节质量、水轮发电机及其所在电力系统的动、静态稳定性,以及辅助设备经受高频高压作用的能力等都会有所影响。因此,是否设置调压室,不仅要从强度因素考虑,还应对电站及系统的稳定特性、供电质量、电站的地位及任务等进行经济比较之后再予以确定。

设置调压室后,水电站有压引水系统中非恒定流动的形态发生了变化。在“引水道—调压室”系统中出现了与水击波的性质不完全相同的波动,同时也出现了“引水道—调压室—电站”系统的波动稳定问题。在水电站运行过程中,一方面,调压室水位因种种原因可能发生扰动变化,影响水轮机的出力,而电力系统则要求出力保持稳定。另一方面,电站的负荷随时可能变化,因而要求机组出力应跟上相应的变化。为了满足这些要求,调速器必须能够相应地调整水轮机的流量大小,而流量的改变将引起调压室水位波动,这使得电站水头发生变化,出力又需调整。这样循环往复,调节过程实际上就成了调压室水位、导水叶开度、机组转速等物理量的波动过程。为了维持电站的正常运行,各物理量应呈衰减的波动变化趋势。研究调压室水位波动的主要目的是:

(1) 求出调压室中可能出现的最高或最低涌浪水位及其变化过程,为决定调压室高度、引水道的设计内水压力和布置高程提供依据。

(2) 根据波动稳定要求,确定系统的稳定条件。

对于一般的调压室,断面越小,涌浪幅度就越高;断面越大,振动周期也随之增加。所以,小断面调压室的特点是产生大幅度的

剧烈振荡,而大断面调压室则产生低而慢的振荡。因此,对于高水头水电站,调压室的稳定断面多由波动振幅允许值来控制;对于中、低水头电站,则多由波动衰减条件来控制。调压室的不稳定现象,首先在德国汉堡水电站出现,从而引起了人们对波动稳定问题的注意。1910年,托马(Thoma)第一个研究了这个问题,并对简单式调压室给出了著名的托马条件。

众所周知,托马理论只是近似地反映客观现象,其理论中有很多假定是在理想、简单的条件下导出的。多年来,不断的实践应用以及许多学者的研究都逐步证明托马临界稳定断面过大。1947年~1951年西美米(E Scimemi)对意大利一些水电站进行了原型试验^[5],有4个孤立运行的电站在调压室断面面积小于托马临界稳定断面的情况下,振荡是衰减。我国孤立运行的江西省“七一”水电站扩大装机后,在原调压室断面等于托马临界稳定断面的60%时,通过调整调速器参数,能够稳定运行^①。因而如何从理论上减小调压室临界稳定断面已成为许多学者的主要研究方向。特别对低水头水电站,调压室的稳定断面是设计调压室尺寸大小的控制条件,根据托马公式计算,调压室所需断面很大,工程投资常达上百万元,造价太高。

有不少学者进行过不采用调压室的研究,用空放阀、水阻器、爆破膜或采用合理的导叶关闭规律来代替调压室的功能。例如:黄壁庄水电站采用脉冲式安全阀爆破膜代替调压室^[6];山东跋山水电站采用水阻器^②。准备扩建两台机组的南湾2号水电站的初步设计中,研究了两种方案:一种是设置调压室,需要多花近百万

① 水电部科研所水利室,江西七一水电站调压塔、管道及调速系统的稳定问题研究,1977年9月

② 山东水利勘测设计院,山东省跋山水电站水阻器试验成果分析报告,1977年3月

元;另一种是不建调压室,为了安全起见,设置了水阻器^①。戴君年等^[7]介绍了一种新型调压阀的应用。潘家铮^[8]对取消调压室问题也作了较为深入的研究,讨论了小波动稳定的判别条件、过渡过程的确定以及各种因素对调节质量的影响,指出在不少工程中,只要适当整定调速器参数,有可能不需设置调压室。这一点很有意义,既然可以不用调压室,那么适当减小调压室断面就应该是可能的。取消调压室后,不仅要解决水击压力和机组飞逸问题,而且要确定机组的过渡过程,保证调节品质和供电质量。目前取代调压室的方法没有一个是完美无缺的,都不能完全起到调压室能起的作用。因此,有必要进一步从理论上减小托马临界稳定断面,只要稳定断面减小了,由于调压室固有的优点,在实际应用和竞争中还是可以得到进一步完善和发展的,这对水电站的调节稳定过程,必将起到经济、有效的促进作用。

以上是对孤立运行水电站而言的。对于投入系统运行的水电站,卡拉姆(J Calame)和加登(D Gaden)等已研究表明:当电站容量小于三分之一系统容量时,稳定条件已不是决定调压室面积的控制条件^[9],这个理论已被实践所证实^[10]。但是,在设计大中型水电站调压室时,不能靠电网来维持其稳定性,因为这会降低供电质量,同时,电站也有脱网运行的可能性。因此在具体设计时,不仅要注意空载运行的稳定问题,还有必要根据电站的规模、脱网运行的概率,按孤立水电站系统分析其稳定性。

对于低水头电站,调压室尺寸取决于电站运行的稳定条件。因此,研究电站—调压室的稳定条件,减小托马临界稳定断面,对低水头电站建设来说,具有较为重要的实际意义。

① 黄河水利委员会水科所.南湾水电站扩建工程调压塔模型试验报告.1972年2月

二、文献综述

1. 关于调压室涌浪计算

C. Jaeger^[9]和王树人^[11]在调压室涌浪计算方面介绍得比较详细,对简单式、阻抗式以及更复杂型式的调压室在什么情况下用什么方法进行了较全面的论述。

涌浪计算的方法大致可分为3类:

(1)直接积分法 在一些特殊情况可对基本方程式直接积分,得到精确的计算调压室水位波动的解析式。

(2)逐步计算法 将基本方程式的微分形式改写成差分形式,然后进行逐步计算。该方法适用于所有型式的调压室由于各种情况引起的水位波动计算。当前,运用计算机这个强有力的工具,逐步计算法更能显示出极大的优越性。

(3)图解法 此法实际上是逐步计算法的图形表示,但由于计算机的广泛应用,此法已应用较少。

此外,《水力公式集》^[12]中指出,在差动式和阻抗式调压室中,会出现部分负荷断开时,水面超过全部负荷断开时的水面升值,并提供了计算其最高水面升高的极限流量公式。

以上是基于水体不可压缩的前提下讨论的。有关考虑水体弹性的课题,国内外学者也进行了大量的研究。基本上都是将水击计算与调压室水位波动联合起来同时计算的,D. S Martin^[13]等进行了详细的论述。

就目前所有的计算来说,存在几个问题。首先在计算过程中,没有考虑各种水头损失系数大小随流速方向的变化,特别对于局部损失系数,流速方向的影响是不容忽略的;其次是断面内流速分布不均匀性的影响未予考虑。《水力发电》^[14]一书中指出,在确定流速变化时,必须相应地考虑引水管道断面内流速的不均匀性,引入一个系数 α 。 α 与稳定流情况下的动能修正系数不同,负荷增

加时, α 大于动能修正系数; 负荷减小时, α 小于动能修正系数。分析认为系数 α 不利于波动衰减, 但 α 的值只能通过实验来确定。此外, 在计算引水洞沿程水头损失时, 采用的损失系数与稳定流情况相同, 都是按阻力平方区的流态来考虑。而实际上, 在调压室水位波动过程中, 流态也在变化, 不全在阻力平方区, 即使全在阻力平方区, 非恒定流与恒定流在相同的流速时所产生的损失也有差别。厉良辅^①曾对此问题进行了定性和试验研究, 结果认为: 在相同流速情况下, 加速流动时, 损失大于恒定流损失; 减速流动时, 情况相反。但非恒定流的损失怎样确定, 目前仍然未能解决。

2. 关于阻抗研究

众所周知, 阻抗式调压室就是通过缩小调压室与引水管路联接管(或联接孔)的断面面积或在联接管处设置隔板, 以形成阻抗, 增加水流进出调压室的水头损失, 减小调压室内水位波动的波幅。但是由于设置了阻抗, 使调压室底部的水流情况变得更为复杂, 特别是在非恒定流时, 阻抗还使水击波在调压室底部的反射条件变差, 即使在稳定流情况下, 水流经过调压室底部的情况也较复杂(例如: 损失多少, 流速水头怎样考虑等)。为了探讨阻抗式调压室底部的水流情况, 国内外许多学者已从理论上并通过试验对阻抗损失进行了大量的研究, 主要有以下几个方面:

(1) 关于不同的阻抗型式对阻抗大小的影响, 前人作了不少试验。《水力计算手册》^[15]提供了一组通过试验得到的有关阻抗系数的曲线。在以往的工程设计中已多次被采用。但是, 这组曲线只反映了阻抗孔口面积与引水管路断面面积之比(即 β 值)的不同及无阻抗隔板时, 联结管面积小于引水管路面积时对阻抗系数的影响。1956 年, 这组曲线的作者——B·A·奥尔洛夫工程师又

① 厉良辅. 水电站压力管道中之不稳定流问题. 莫斯科工程建筑学院研究生论文. 1960 年

做了一组试验,当调压室面积和引水管路面积不变时,改变联接管的面积、阻抗隔板在联接管中的位置,得出隔板孔口的大小对阻抗系数的影响结果。清华大学水电教研组考虑了有无联接管对阻抗系数的影响,进行了补充试验研究^①。但这些都是流量全部通过阻抗孔口的情况下进行的,而并没有反映出三通型式所造成的分流与合流存在的流量比的影响。《水力公式集》^[12]介绍了 Gardel 通过试验得到的关于 T 型分岔管处分流和合流损失计算公式以及计算管内插入开有小孔隔板时的损失系数计算图,考虑的因素较全面,只是没有将分岔管和孔口隔板联系起来。

(2)关于对水击波的反射, E. Mosonyi 等^[16]利用水锤波的基本方程,导出了一个计算水击压力传递系数的通用公式,并给出了供实用的曲线图,可对不同阻抗系数求得其传递系数。

(3)关于阻抗系数的定义问题,以前比较混乱,概念不清。吴培豪^[17]对此进行了评述,并用比较法在考虑了 h_{ζ} 后提出了阻抗系数的定义,即

$$\eta = (h_k - h_{\zeta})/Z_0$$

式中: h_k 为调压室前引水洞断面的总水头与进入调压室后的总水头之差, m; h_{ζ} 为稳定流时,调压室前引水洞断面的总水头与调压室水位之差, m; Z_0 为稳定流时调压室中水位, m。

朱济圣^②还讨论了 h_{ζ_0} 对波动的影响,结论是:当 $\zeta < \zeta_k$ 时,考虑 h_{ζ} 后计算的波幅小于不考虑 h_{ζ} 时所计算的波幅。然而,这种定义是用比较法得出的,没有反映出阻抗的物理意义,只能用于调压室最高涌浪计算, h_k 还需另外求得。因此,不能用于波动过程计算和稳定分析。

① 清华大学水利系水电教研组,不同型式的阻抗孔口对调压室阻抗系数的影响.1981年5月

② 朱济圣, h_{ζ} 对调压塔涌浪计算的误差分析.1978年7月

《水力计算手册》^[15]中采用的阻抗系数的表达式为

$$\zeta = \Delta E / (v_1^2 / 2g) \quad (1-1)$$

式中: v_1 为调压室前引水洞断面平均流速, m/s。

这种表示方法仍有问题, 因为当 ζ 通过试验确定后, 由式 (1-1) 得

$$\Delta E = \zeta v_1^2 / 2g \quad (1-2)$$

即损失 ΔE 成了 v_1 的函数。而实际上阻抗损失是水通过阻抗孔口时所产生的, 当通过的流量为零时, 阻抗损失也应为零。式 (1-2) 并没有反映 v_3 (调压室内断面平均流速) 对 ΔE 的影响。对出流情况也存在类似的问题。

因此, 关于阻抗试验及表示方面的研究, 目前还不完善, 需要作进一步探讨。

3. 关于波动稳定理论

1908 年德国汉堡水电站的调压室水位波动出现了不稳定现象, 托马首先研究了产生不稳定的原因, 于 1910 年提出了波动稳定准则, 通常称为托马准则。托马准则是在理想调节等假定条件下建立的, 自托马之后, 许多学者都在继续设法研究更为复杂、更符合实际的情况。

到目前为止, 在理想水轮机条件下, 对任何情况的稳定分析和计算所采用的基本方程都是同样的三大方程: 管路运动方程、连续性方程和调速方程(或出力方程)。

调速方程是调整器动作所遵循的规律。弗兰克(Frank)和秀勒(Schiiller)已证明^[9]: 如果调速器按等流量或等开度进行调节, 无论调压室断面多小, 波动都是稳定的; 如果调速器按等出力进行调节, 则可能出现不稳定现象。乔德里^[18]用相平面($\Delta V - \Delta Z$ 平面)法分析也得出同样的结论。因此, 所有的研究者都是按等出力调节规律进行稳定分析的。根据三大基本方程导出的波动方程为一非线性微分方程, 要求出精确的解析解是不可能的。

在实践中,人们通过对各种情况的研究,找出了许多分析波动稳定性的方法和途径。对小波动情况,通过忽略高阶微量的简化手段,找出了波动稳定的判别条件,从而确定调压室断面面积。这个方法首先由托马应用于简单情况。卡拉姆(Calame)—加登(Gaden)考虑调压室底部流速水头后得出调压室临界断面的计算公式

$$A_S = \frac{v_0^2}{2g} \frac{LA_T}{(H_0 + 2F_2 v_{20}^2)(F_1 v_0^2 + F_2 v_{20}^2)} \quad (1-3)$$

式中: v_0 为稳定流时调压室上游引水洞中的流速, m/s; H_0 为稳定流时电站的水头, m; v_{20} 为稳定流时调压室底部洞中流速, m/s; F_1 为引水洞的水头损失系数, s^2/m ; F_2 为 $\frac{1}{2g}$, s^2/m ; L 为上游引水洞长度, m; A_T 为引水洞断面面积, m^2 。

耶格尔(C. Jaeger)建议采用公式^[9]

$$A_S = \frac{v_0^2}{2g} \cdot \frac{LA_T}{H_0(F_1 V_0^2 + F_2 V_{20}^2)}$$

比较合适。王树人^[11]认为采用公式

$$A_S = \frac{LA_T}{2g(\alpha + \frac{0.7}{2g})(H_0 - h_{w0} - 3h_{0wm})}$$

比较符合实际。

式中: h_{w0} 为上游引水洞的水头损失, m; h_{0wm} 为压力钢管的水头损失, m; α 为上游引水洞的水头损失系数, s^2/m 。

李文勋^[20]考虑效率变化后所得公式为

$$A_S = \frac{1 + aH_0}{1 + bQ_0} \frac{LA_T}{2gaH_0}$$

式中: a 为 $\frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial H_0}$; b 为 $\frac{1}{\eta} \frac{\partial \eta}{\partial Q_0}$; Q_0 为稳定流时机组稳定流量, m^3/s 。

卡拉姆—加登的公式为

$$A_s = \frac{v_0^2}{2g} \frac{LA_T}{H_0 F v_0^2} \left[1 - \frac{3}{2} \frac{N_0}{\eta_0} \left(\frac{d\eta}{dN} \right)_0 \right]$$

式中: η_0 为稳定流时机组效率; N_0 为稳定流时机组出力, kW。

伊万吉里斯特 (Evangelisti) 考虑了 $\frac{\partial \eta}{\partial H}$ 后, 对上式进行了发展^[9]。加德尔 (Gardel) 同时考虑流速水头、效率变化及压力水管的损失的影响得出了相应的公式。关于系统的影响, 首先由卡拉姆—加登进行研究。Φ. Φ. 古宾^[14]、陈鑑治^[21]也进行了这方面的研究。

从各种小波动研究成果中得到了这样一个结论, 考虑调压室底部流速水头、电站出力小于最大出力时的效率变化以及并网运行等因素后, 对调压室中水位波动的稳定性是有利的, 而压力钢管的水头损失及电站出力大于最大出力时的效率变化等因素, 对稳定性是不利的。

对于大波动情况, H. A. Кармөвпщлчъос^[19]用小参数法对简单式调压室进行了研究。结果认为, 大、小波动的稳定性是一样的, 托马断面不必加大, 并指出秀勒在 1928 年研究认为大波动要求的稳定断面是托马断面的 2 倍, 其原因是用线性理论解非线性问题; 秀勒和卡瑞斯 (Karas) 的研究仅适用于某一水位的情况; 耶格尔将系数取平均值后, 其中略去了高价微量; 弗兰克的经验曲线由于所采用的 Braun 图解法的误差, 可能偏大; 前苏联一些学者在 50 年代曾用李亚普诺夫的直接法研究过这个问题, 所得结果过于复杂; 王树人^[11]认为耶格尔和弗兰克的结论只适用于有限的几种工况, 建议用图解法或电算法对任何情况进行解算, 以校核初选的托马断面是否适用。因此, 到目前为止, 大波动稳定问题还没有得到彻底解决。

以上研究都是基于理想调节的假定, 而忽略了机组特性, 故与