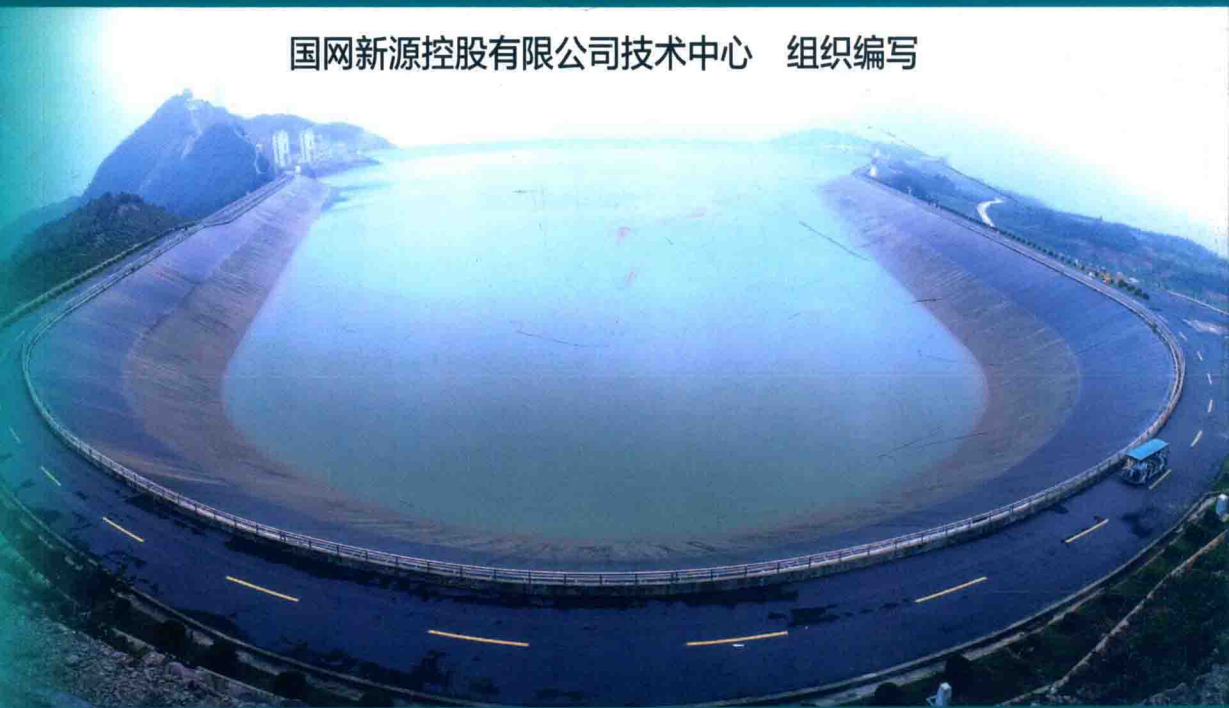


抽水蓄能电站 调压室及系统安全运行控制 关键技术

国网新能源控股有限公司技术中心 组织编写



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

抽水蓄能电站 调压室及系统安全运行控制 关键技术

国网新源控股有限公司技术中心 组织编写



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书主要介绍了抽水蓄能电站调压室研究现状,对抽水蓄能电站典型参数分析、研究,并提出一些新的观点。主要内容包括:抽水蓄能电站实测资料及典型参数辨识、引水系统和尾水系统安全运行条件、抽水蓄能电站调保计算工况、调压室设置技术要求等。

本书可供抽水蓄能领域从事科研、设计和运行管理的技术人员参考,也可作为抽水蓄能行业工程技术人员的培训教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

抽水蓄能电站调压室及系统安全运行控制关键技术 / 国网新源控股有限公司技术中心组织编写. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018.6
ISBN 978-7-5170-6513-5

I. ①抽… II. ①国… III. ①抽水蓄能水电站—调压室—安全控制技术—研究 IV. ①TV743

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第125079号

书 名	抽水蓄能电站调压室及系统安全运行控制关键技术 CHOUSHUI XUNENG DIANZHAN TIAOYASHI JI XITONG ANQUAN YUNXING KONGZHI GUANJIAN JISHU
作 者	国网新源控股有限公司技术中心 组织编写
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京九州迅驰传媒文化有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.5印张 225千字
版 次	2018年6月第1版 2018年6月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	60.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

本书编委会

主 编：许要武

副主编：宫 奎 姜成海 江献玉 衣传宝 茹松楠

编 委：王 珏 丁景焕 李云龙 王 伟 杨 静

韩 标 曹 玺 刘启明 黄 伟 郭永鑫

李甲振 柴建峰 刘君成 王 涛 付 辉

韩凤霞 肖 微 温家华 马传宝 韩文福

杨 柳 杜克楠 柴小龙

电网的安全关系着能源安全、关系着国家安全。抽水蓄能电站具有运行灵活、反应快速等特点，在电网中承担着调峰、填谷、调频、调相、事故备用和黑启动等重要任务，是重要的调峰电源和保安电源，已成为现代电力系统重要的稳压器、调节器和存储器，是目前最经济成熟的大规模储能设施。

抽水蓄能电站的发展已有 100 多年历史，世界首座抽水蓄能电站于 1882 年建成，20 世纪 50 年代以来，西欧各国、日本相继引领世界抽水蓄能电站建设潮流。我国抽水蓄能电站建设起步较晚，第一座抽水蓄能电站——河北省岗南混合式抽水蓄能电站于 1968 年在华北电网建成。20 世纪 90 年代以来，我国抽水蓄能电站建设步伐不断加快。截至 2017 年 5 月底，随着我国经济社会的快速发展，电网规模不断扩大，用电负荷持续增长，我国先后建成潘家口、广州、十三陵、天荒坪、泰山、宜兴、宝泉等一批大型抽水蓄能电站，运行电站装机容量达到 2773 万千瓦，在建机组容量 3095 万千瓦，规模均居世界第一。进入 21 世纪，电力系统规模不断扩大，用电负荷和峰谷差持续加大，电力用户对供电质量要求不断提高，另外，风电、光电等随机性、间歇性新能源大规模开发，加快发展抽水蓄能电站，对于保障电网安全、稳定、经济、清洁运行具有重要意义，也是促进新能源发展的重要技术支撑。国家“十三五”能源、电力及水电规划都要求加快抽水蓄能电站建设，并明确“十三五”期间新开工建设的抽水蓄能电站容量 6000 万千瓦左右，到 2020 年我国抽水蓄能运行容量将达到 4000 万千瓦。

进入“十三五”期间，抽水蓄能电站建设跨越式发展的宏伟蓝图正逐步转为现实，大力研究抽水蓄能电站关键技术，是适应抽水蓄能电站快速发展的客观需要。抽水蓄能电站的可逆式机组兼顾发电、抽水双向水流的运行安全，设置调压室是改善长有压输水管道抽水蓄能电站机组运行条件的一种有效措施，但调压室开挖、衬砌等工程量大、施工难度高，现有的《水电站调压室设计规范》中关于抽水蓄能电站的相关条文较少，因此对调压室设置必要条件进行专项研究十分必要。本书基于国网新源控股有限公司 20 座抽水蓄能电站实测资料及典型参数辨识，开展引水系统和尾水系统安全运行条件、抽水蓄能电站调

保计算工况、调压室设置技术要求等研究，对抽水蓄能电站输水系统调压室的设置必要条件进行一些大胆的尝试，提出了一些新的观点，希望能够为同类工程提供一些参考。

许要武
2017年10月

前言

改革开放以来，随着我国经济社会的持续快速发展，电力需求迅速增长。为了缓解电力供求矛盾，我国制定了大力开发水电、优化发展煤电、积极推进核电建设、适度发展天然气发电、鼓励新能源和可再生能源发电的基本方针。经过多年努力，电力供求问题的缓解取得了突出成效。在全国电力系统总装机快速发展的过程中，调峰能力不足逐渐成为了制约我国电力系统发展的突出问题。

目前，我国水电和煤电调峰已不能满足风电、光电和核电大规模发展的需要，而抽水蓄能电站在解决风电、光电大规模发展的消纳问题、核电大规模并网带来的调峰压力，提高智能电网运行的灵活性和安全性方面具有无可替代的作用，是目前最具经济性的大规模储能设施，因而受到普遍重视。《水电发展“十三五”规划》（2016—2020年）指出，目前我国抽水蓄能电站的总体规模仍偏小，仅占全国电力总装机的1.5%，为此规划中制定了“十三五”期间开工规模6000万千瓦的目标，以适应我国能源结构转型升级的要求。

抽水蓄能电站的可逆式机组需兼顾发电、抽水双向水流的运行安全，设置调压室是改善具有较长有压水道的抽水蓄能电站机组运行条件的一种可靠工程措施。但由于调压室开挖、衬砌等工程量相对较大，且竖井高度大，不仅工程投资大，而且也增加了施工难度。同时，改善机组运行条件，也可以通过增加管道洞径、减小管道流速、减小水体惯性、增加管道结构强度以及增加机组 GD^2 、提高机组调节性能等其他方面达到目的。因此，在什么条件下设置调压室是经济合理的，是很多抽水蓄能电站亟待解决的问题。

本书通过对国网新源控股有限公司系统内机组投产年代较晚的20座抽水蓄能电站实测资料及典型参数辨识，开展引水系统和尾水系统安全运行条件、抽水蓄能电站调保计算工况、调压室设置技术要求等研究，系统地分析、推导了抽水蓄能电站调压室设置条件，并提出了一些新的观点，希望能够为同类工程提供一些参考。

由于编者水平有限，不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2017年10月

目录

序	1
前言	1
第1章 绪论	1
1.1 抽水蓄能电站工作原理	1
1.2 调压室的作用及工作原理	1
1.3 抽水蓄能电站调压室常见类型及应用	6
1.4 现行规范判定条件	8
1.5 国内外研究现状	11
1.6 本书主要研究内容	12
1.7 依托工程概况	13
第2章 电站调研	14
2.1 调研内容	14
2.2 调研成果	14
第3章 典型参数的系统辨识	20
3.1 装机容量	20
3.2 水轮机厂家分布及机组形式	21
3.3 电站额定水头分布	22
3.4 吸出高度	23
3.5 机组转速参数	25
3.6 机组比转速	25
3.7 机组转动惯量	27
3.8 导叶关闭规律	28
3.9 球阀关闭规律	29
3.10 引水调压井设置情况分析	29
3.11 尾水调压井设置	31
3.12 甩负荷试验结果分析	32

3.13	过渡过程计算校核	34
第4章	调压室设置关联参数和技术要求的研究	37
4.1	研究目的	37
4.2	调压室面积对调压室涌浪及调保参数的影响	37
4.3	连接管长度对调压室水位波动和水锤压力的影响	44
4.4	调压室阻抗孔尺寸的选择	45
4.5	调压室布置位置的选择	49
4.6	本章结论及认识	51
第5章	抽水蓄能电站调保计算工况的研究	53
5.1	调节保证工况	53
5.2	调节保证工况相关因素	53
5.3	调节保证工况分类	54
5.4	控制参数	54
5.5	部分电站过渡过程计算控制工况	55
5.6	控制工况分析及工况设置标准	56
5.7	过渡过程计算工况标准	59
5.8	本章结论及认识	59
第6章	尾水管真空度保证值的研究	60
6.1	研究目的	60
6.2	尾水管真空度的概念及形成机理	60
6.3	尾水管真空度理论计算值的影响因素	63
6.4	尾水管压力实测值影响因素分析	66
6.5	尾水管进口实测压力分析方法探讨	75
6.6	本章结论及认识	83
第7章	T_v 和 T_s 参数判别合理性的研究	85
7.1	现行调压室设置判别条件	85
7.2	判别条件推导	87
7.3	已建工程调压室设置情况	93
7.4	现行判别条件的合理性	95
7.5	本章结论及认识	97
第8章	调压室设置条件概述	99
8.1	研究内容	99
8.2	上游调压室设置条件概述	99

8.3	下游调压室设置条件的研究	104
8.4	本章结论及认识	109
第9章	下游调压室设置判据新探讨	110
9.1	数学模型	110
9.2	判据对比分析	115
9.3	本章结论及认识	119
第10章	全特性曲线的理论预测	120
10.1	数学模型	120
10.2	特征工况点分析	123
10.3	实例应用	132
10.4	本章结论及认识	134
第11章	引水系统和尾水系统安全运行条件的研究	136
11.1	抽水蓄能电站输水系统	136
11.2	引水系统安全运行条件	138
11.3	尾水系统安全运行条件	140
11.4	本章结论及认识	140

1.2 调压室的作用及工作原理

1.2.1 调压室概述

在引水调压室下游的第一个具有自由水面断面式或升式竖井筒，称其为尾水调压室。

第 1 章 绪 论

1.1 抽水蓄能电站工作原理

电力系统的用电需求是随时变化的。当电力系统出现用电高峰时，一般情况发电设备除检修、备用、受阻外，基本处于满负荷运行状态，而在电力系统出现负荷低谷时，由于用电负荷减少，为保证电力系统功率平衡，各类电源必须降低出力运行。由于经济和安全的原因，以火电、核电为主的电力系统一般较难适应这样的要求。

抽水蓄能电站利用其兼有水轮机和水泵的功能，以水为载体，在电力负荷低谷时做水泵运行，吸收电力系统多余的电能将下水库的水抽到上水库储存起来；在电力负荷高峰时做水轮机运行，将水放至下水库，将水的重力势能转换成电能送回电网。这样，既避免了电力系统中火电机组反复改变出力运行所带来的弊端，又增加了电力系统高峰时段的供电能力，提高了电力系统运行的安全性和经济性。

一方面，抽水蓄能电站是一个能量转换装置，将电力系统发电能力在时间上重新分配，以协调电力系统发电出力和用电负荷之间的矛盾，从而使电力系统达到安全、经济运行的目的。现代抽水蓄能电站的效率一般可达 75%~80%。虽然转换过程中不可避免地要产生能量损失，但从整个电力系统考虑还是经济的。

另一方面，抽水蓄能机组借助于发电机和电动机两种运行工况，可以十分便利地进行调相运行，补偿系统无功不足或增加无功负荷，根据电网需要提供或吸收无功功率，维持电网电压稳定。其调相运行功能可减少电网无功补偿设备，从而节省电网投资及运行费用。

抽水蓄能电站运行灵活、反应快速，在电力系统中起到调峰、填谷、调频、调相、事故备用和黑启动等多种作用，是目前最具经济性的大规模储能设施。在电力系统中，其千瓦投资也低于同样具有调峰能力的燃煤、燃气电站，还能减少硫化物、氮氧化物、粉尘及一氧化碳等排放，具有显著的环保效益。

抽水蓄能电站在解决风电、光电等可再生能源大规模发展的消纳问题、核电大规模并网带来的调峰压力，提高智能电网运行的灵活性和安全性方面具有无可替代的作用，是目前最具经济性的大规模储能设施，因而受到世界各国的普遍重视。目前，随着新能源技术的迅猛发展，抽水蓄能电站备受关注，在世界范围内尤其在中国掀起了一阵抽水蓄能电站建设高峰。

1.2 调压室的作用及工作原理

1.2.1 调压室概念

所谓调压室实际上是一个具有自由水面的筒式或井式建筑物。设置在地面上的称为调

压塔，地下的称为调压室，如图 1.2.1 所示。

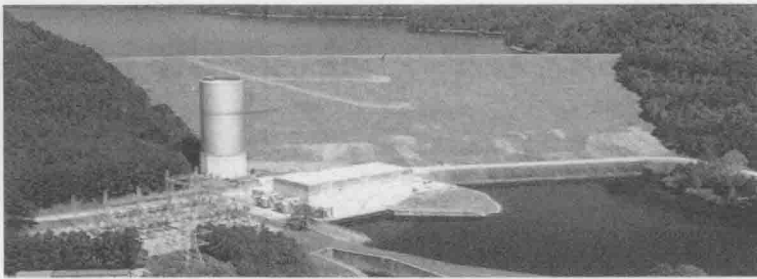


图 1.2.1 调压室示意图

1.2.2 调压室的功用

调压室的功用主要有以下 3 个部分：

(1) 反射水锤波。当电站突然甩负荷时，水轮机迅速关闭，在引水道中运动的水体突然受阻。由于水体的惯性作用，在关闭端将产生一个巨大的压力，称为水锤压力，而且以压力波的形式沿水道向上游传播，一直达到自由水面后高压才消失，并反射为负压力波向下游行进，形成压力振荡现象。设置了调压室之后，在压力水道的顶端就存在自由水面。如果调压室的断面足够大，就能中断水锤波的传递，从而保护其上游的引水隧洞不受影响，大大降低隧洞的造价和保证其安全。即使调压室的断面不够大，不能全部截断水锤波的传递（压力波在调压室处仅作不完全反射），也可显著降低隧洞所承受的压力。

(2) 减小了水锤压力（压力管道及厂房过水部分），缩短了压力管道的长度。因为水轮机阀门的关闭不是瞬时完成的，由于调压室与阀门间的距离较近，所以阀门在尚未关闭前，从调压室处发射回来的负压力波可能已经到达阀门，从而减小了阀门处的最大水锤压力值。实际上这个最大的水锤压力近似地正比于封闭水道的长度，因此设置调压室可以减小压力管道中的水锤压力，缩短压力管道的长度。

(3) 改善机组在负荷变化时的运行条件。水轮机在运行时，负荷经常有少量波动，机组将作出相应的反应和调节。设置调压室缩短了压力管道的长度后，在负荷波动时可使机组的反应迅速、及时，更快地恢复稳定，操作灵活，从而能获得更佳的调节品质。

1.2.3 调压室的工作原理

调压室具有较大的容积和自由水面，它将电站因负荷变化而引起的有压系统非恒定流

分为性质不同而又互相联系的两部分：①压力管道的水锤；②“水库—引水道—调压室”的水流波动（图 1.2.2）。

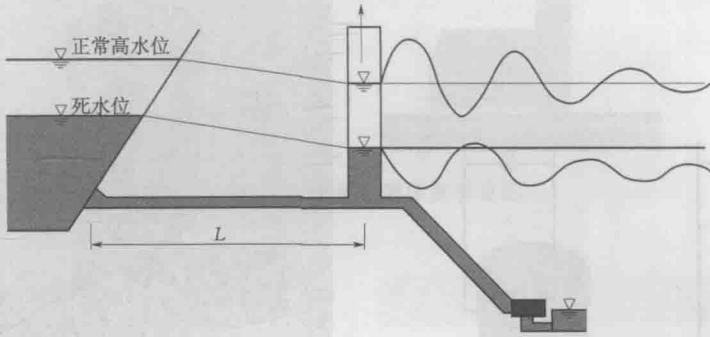


图 1.2.2 调压室水位波动示意图

当水电站丢弃全负荷时，水轮机流量 Q 变为 0，压力管道中发生水锤。水流由于惯性继续流入调压室，引起调压室水位升高，使引水道始末两端的水位差随之减小，其中的流速逐渐降低到为 0，此时调压室水位达到最高。这时调压室的水位高于水库水位，在引水道始末又形成了新的水位差，水流反向流动，调压室中水位下降。当调压室的水位达到水库水位时，引水道始末两端的压力差又等于零。由于惯性作用，水位继续下降，直至引水道流速减到零，此时调压室水位降到最低点。此后，引水道中的水流又开始流向调压室，调压室水位又开始回升，这样，引水道和调压室中的水体往复波动。由于摩擦阻的存在，运动水体的能量被逐渐消耗。因此波动逐渐衰减，最后全部能量被消耗掉，调压室稳定在水库水位。

水电站增加负荷时，水轮机引用流量加大，引水道中的水流由于惯性作用，尚不能立即满足负荷变化的需要，调压室需要先放出一部分水量，从而引起调压室水位下降，这样室库间形成新的水位差，使引水道的水流加速流向调压室。当调压室中的水位达到最低点时，引水道的流量等于水轮机的流量，但因库间的水位差较大，隧洞流量继续增加，并超过水轮机的需要，因而调压室水位又开始回升，达到最高点后又开始下降，这样就形成了调压室水位的上下波动。由于能量的消耗，波动逐渐衰减，最后稳定在一个新的水位，此水位与库水位之差为引水道通过水轮机引用流量的水头损失。

在增加负荷或者丢弃部分负荷后，电站继续运行，调压室水位的变化影响发电水头的大小。调速器为了维持恒定的出力，随调压室水位的升高和降低，将相应的减小和增大水轮机的流量，这进一步激发调压室水位的变化。因此，调压室水位的波动可能有两种情况：①逐步衰减的，波动的振幅随时间而减小；②波动的振幅不衰减甚至随时间而增大，称为不稳定的波动，产生这种现象的调压室其工作是不稳定的，在设计时应避免。

1.2.4 调压室的类型

(1) 简单圆筒式调压室。简单圆筒式调压室断面尺寸形状不变，结构简单，反射水锤波效果好。但水位波动振幅较大，衰减较慢，因而调压室的容积较大。在正常运行时，引

水系统与调压室连接处水力损失较大。为了克服上述缺点,可采用有连接管的圆筒式调压室,适用于低水头小流量电站,如图 1.2.3 所示。

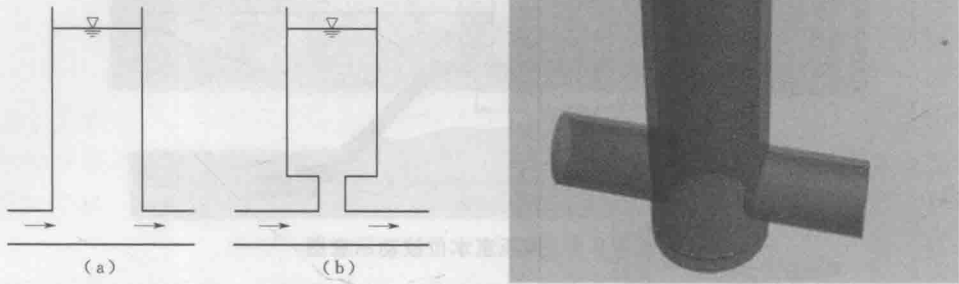


图 1.2.3 简单圆筒式调压室示意图

(2) 阻抗式调压室。阻抗式调压室将圆筒式调压室底部改为阻抗孔口。阻抗孔口面积为 $15\% \sim 50\%$ 压力引水道面积。可有效减小水位波动的振幅,加快衰减速度,水头损失小。但因阻抗存在,水锤波不能完全反射,压力引水道中可能受到水锤的影响。适用于中水头和引水道长度不大的电站,如图 1.2.4 所示。

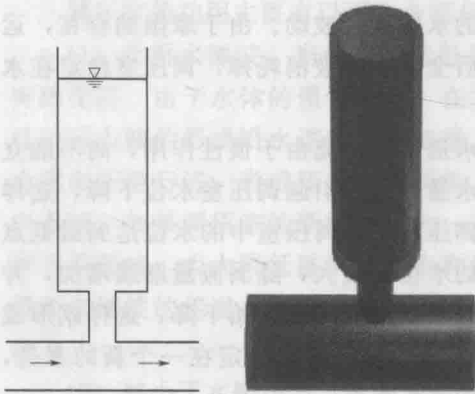


图 1.2.4 阻抗式调压室示意图

(3) 双室式调压室。双室式调压室是由一个竖井和上下两个储水室组成。丢弃负荷时,水位迅速上升,当水位达到上室时,其上升速度放慢,从而减小波动振幅。增加负荷时,水位迅速下降到下室中,并由下室补充不足的水量,因此限制了水位的下降。适用于水头较高,要求的稳定断面较小,水库水位变化比较大的水电站。

上、下室的底部应有不小于 1% 的坡度倾向竖井,以便放空水流。下室顶部做成背向竖井的不小于 1.5% 的斜坡,使空气容易从下室逸出。

工程采用竖井与上室组合的情况较多,故又称为

水室式,如图 1.2.5 所示。

(4) 溢流式调压室。溢流式调压室由双室式调压室发展而成,顶部设有溢流堰。当丢弃负荷时,调压室的水位迅速上升,达到溢流堰顶后开始溢流,限制了水位的进一步升高,有利于机组的稳定运行,溢出的水量,可以设上室加以储存,也可排至下游,如图 1.2.6 所示。

(5) 差动式调压室。差动式调压室由两个直径不同的同心圆筒组成。外面的圆筒称为大井。里面的圆筒顶部设有溢流堰,称为升管,其底部以阻抗孔口与大井相通。外室直径较大,起盛水及保证稳定的作用,其断面由波动稳定条件控制。所需容积较小,水位波动衰减得也较快,但其构造复杂,施工难度大,造价高。适用于地形和地质条件不允许大

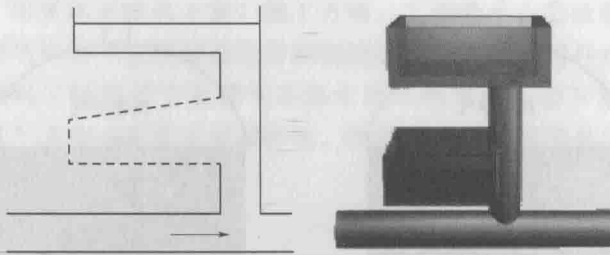


图 1.2.5 双室式调压室示意图

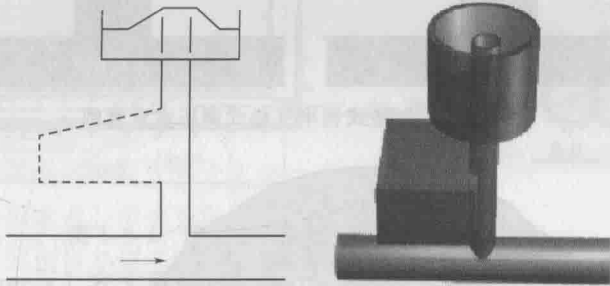


图 1.2.6 溢流式调压室示意图

断面的中高水头水电站。我国采用较多，如图 1.2.7 所示。

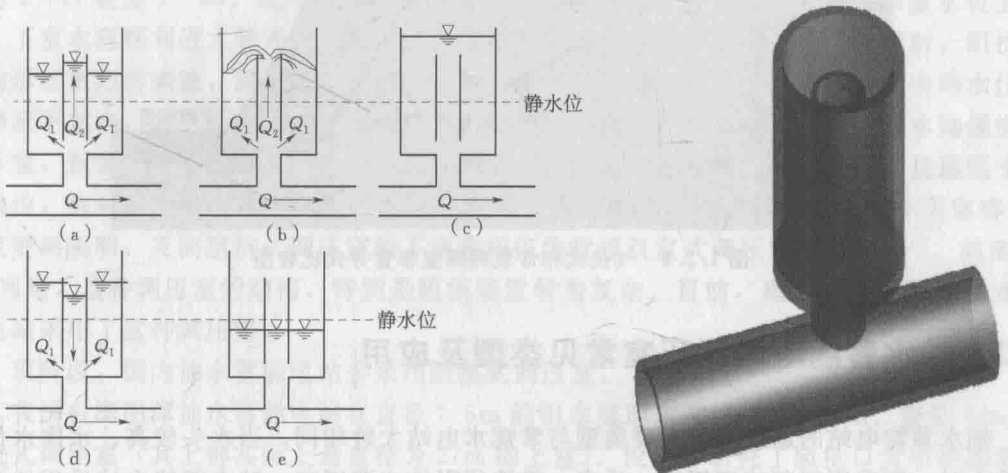


图 1.2.7 差动式调压室示意图

(6) 气垫式调压室。气垫式调压室在压力隧洞靠近厂房的位置建造一个大洞室，一般为圆形，狭而高。在密闭的室中一部分充水，另一部分充满高压空气。在气垫式调压室的基础上，有一小断面的通气孔与大气相通为半气垫式调压室。在水位波动过程中，通过气体压缩或膨胀，促使压力隧洞中的水流减速或加速；这种形式可尽量靠近厂房布置，大大减小水锤压力，如图 1.2.8、图 1.2.9 所示。由于反射水锤波有利，压力变化较缓慢，对水轮机调节较容易。适用于深埋于地下的引水道式地下水电站。水头越高，经济性越好，目前我国尚未采用。

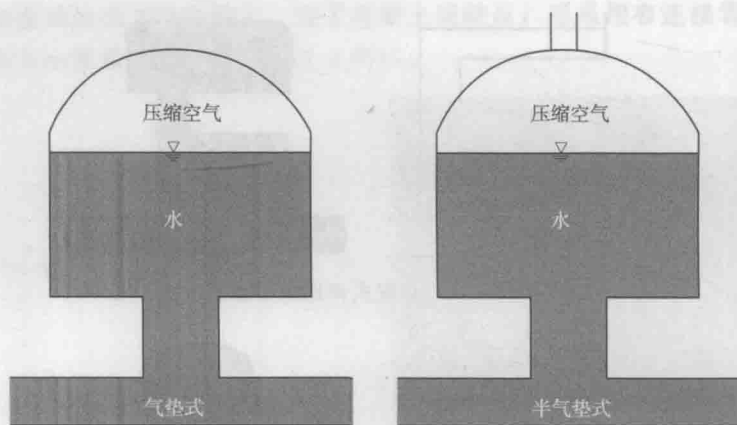


图 1.2.8 气垫式和半气垫式调压室示意图

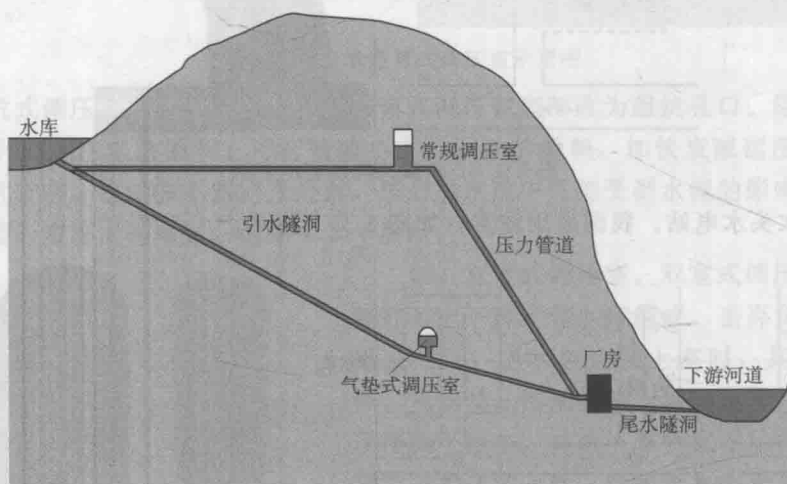


图 1.2.9 气垫式和常规调压室布置方式比较图

1.3 抽水蓄能电站调压室常见类型及应用

抽水蓄能电站的调压室的主要类型与常规水电站大致相同。当水头较高、水库水位变幅较大时，宜采用双室式调压室；反之，常选用阻抗式调压室。抽水蓄能电站采用地下厂房时，输水道常埋置较深，地质条件允许时，可考虑设置气垫式调压室。不过，抽水蓄能电站的调压室要在发电、抽水的各种工况下运行，其容积（尤其是下室容积）通常比常规水电站的调压室大。密切结合工程的具体条件、采用最合理的布置形式和结构尺寸非常重要。

索丽生等在文章《Design of Water Conveying System of Xikou Pumped Storage Plant》中介绍的宁波溪口抽水蓄能电站引水道上设置的双室式调压室形如“烟斗”，布置奇特（图 1.3.1）。等截面隧洞式的下室设 1% 纵坡，低端通过连接管与引水隧洞衔接，高端与竖井及上室相连。这种布置方式带来不少好处：①充分利用了地形，上室位置地面高

程合适, 山坡较缓, 可采用开敞式上室, 施工方便, 工程量小; ②改善了调压室的水力条件, 下室充水时, 空气可沿下室顶坡经竖井顺利排出, 下室向隧洞补水时, 其底坡又有助于水流畅向隧洞, 减轻了隧洞式下室排气不易水流不畅之忧; ③下室结构简单、施工方便, 常见的“盲肠式”下室必须设正底坡补水、倒顶坡排气, 因而是变截面的, 该调压室的下室为等截面隧洞, 简单方便。

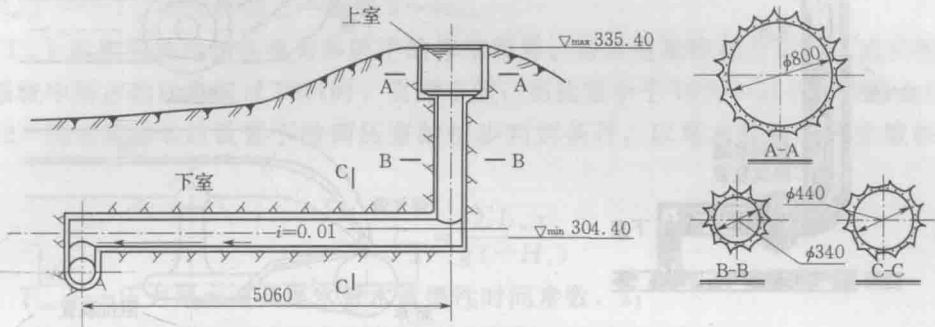


图 1.3.1 溪口抽水蓄能电站双室式调压室

Steyrer P 和 Sametz L 在文章《surge tank with reverse flow throttle》中介绍的反向阻抗式调压室的布置型式更是独具匠心。这种调压室仍由上室、竖井和下室组成 (图 1.3.2), 但在竖井与下室之间设置极不对称的阻抗装置, 使水流进、出竖井时的水头损失比为 1:17 甚至 1:50。此外, 另有一通气管从上室顶部直接引入下室。调压室水位上涌时, 下室水流顺利进入竖井和上室, 防止调压室底部产生过高压力; 水位下降时, 阻抗装置内形成激烈的涡流, 抑制由竖井向下室的水流, 造成很大的水头差, 通气管中的水位迅速降至下室内, 并不断补气, 以保证下室向隧洞补水而不产生负压, 竖井中的水则慢慢补给下室, 保证下室不被排空。由于调压室底部压力由通气管控制, 反应极快, 且远低于竖井水位, 故可有效地使隧洞或压力管道中离去的水流减速, 减少补水量, 缩小下室容积。研究资料表明, 反向阻抗式调压室的下室容积仅为常规双室式调压室下室的 1/2, 甚至 1/3。当然, 这种调压室的结构, 特别是阻抗装置较为复杂。目前, 奥地利已有 6 座抽水蓄能电站采用了这种调压室。

现阶段, 国内抽水蓄能电站多采用阻抗式调压室。

我国台湾明潭抽水蓄能电站在直径 7.5m 的引水隧洞末端设置高 150m、直径 14m 的阻抗式调压室 (其上部实际上是直径为 27m 的上室)。设计中研究了阻抗口大小对涌浪及底部压力的影响, 选择孔口直径为 4.5m, 此时, 孔口面积与隧洞截面积之比为 0.36, 与以往的研究成果基本一致。

泰安抽水蓄能电站额定水头 225m, 下游设带上室式阻抗式调压室。调压室直径 17m, 上室尺寸为 50m×12m×12m, 阻抗孔口直径为 5m, 井底管道直径 8.5m, 孔口面积与隧洞截面积之比约为 0.346。

宜兴抽水蓄能电站额定水头 363m, 上游闸门井兼做调压室, 阻抗孔面积 10.93m², 闸门井面积 59.43m²; 下游设带上室式阻抗式调压室, 调压室直径 10m, 上室尺寸为 64m×10m×10m (长×宽×高), 阻抗孔口直径为 4.6m, 井底管道直径 7.2m, 孔口面积与隧洞截面积之比约为 0.408。