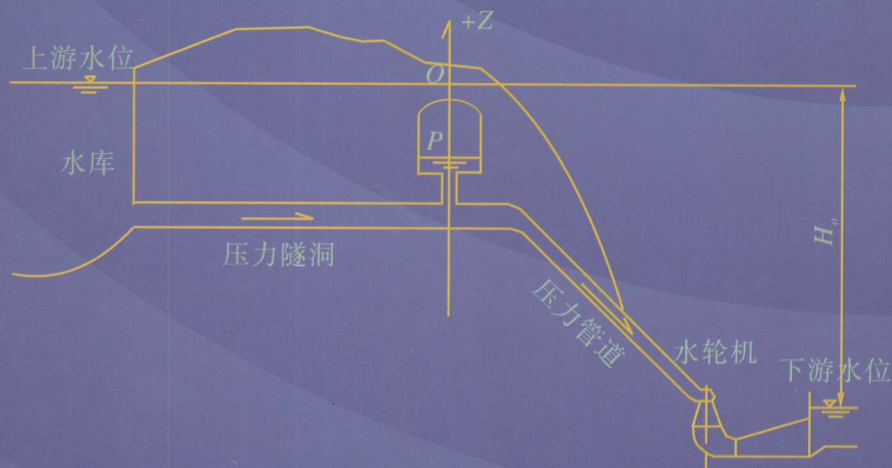


气垫式 调压室

张晓宏 吴文平 编著



陕西人民出版社

气垫式调压室

张晓宏 吴文平 编著

陕西人民出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

气垫式调压室/张晓宏 吴文平 编著. —西安: 陕西人民出版社, 2007

ISBN 978-7-224-08031-5

I. 气… II. ①张… ②吴 III. 气垫式调压室-研究
IV. TV732

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 042895 号

气垫式调压室

编 著 者: 张晓宏 吴文平

出版发行: 陕西人民出版社 (西安北大街 147 号 邮编: 710003)

印 刷: 西安建筑科技大学印刷厂

开 本: 880mm×1230mm 32 开 5.25 印张

字 数: 130 千字

版 次: 2007 年 4 月第 1 版 2007 年 4 月第 1 次印刷

印 数: 1-1000

书 号: ISBN 978-7-224-08031-5

定 价: 10.00 元

摘 要

气垫式调压室作为一种性能优越的水锤和涌波控制设施,通过气室内高压空气形成的“气垫”来控制调压室内水位波动幅值,因省掉了常规调压室下部很长的斜井或竖井;隧洞纵向接近直线,洞线缩短;调压室全部在地下,省掉了山坡明挖和上井公路;调压室位置选择更为自由,特别适用于地形险峻地区高水头、小流量的中小型水电站,具有对植被环境破坏影响小、工期短、投资省、引水发电系统布置灵活等优点,特别是和高压隧洞不衬砌技术、地下厂房喷锚支护技术配套使用,其经济上的优越性更加明显。

气垫调压室在工业管道与泵站中的利用,其作为性能优越的涌浪控制设备及防止水力共振的手段,已较为成熟,而对于在水电站中的气垫调压室需研究的问题还有很多。挪威在这些方面做了大量的研究工作,并积累了很多宝贵的工程经验可供借鉴,虽然我国大部分河流的状况及地质、地貌与挪威有很大差别,但我国地域辽阔,且大部分水力资源分布在西南地区 and 长江流域,其河流湍急、地势陡峻,满足于采用气垫调压室条件的地方很多,即使在中南、华东、西北等地区,有些水电站其地质、地形也适宜于布置气垫调压室。尽管气垫调压室在我国还属一项新技术,还存在一些新技术难题,但它具有减轻对环境的破坏及节约工程投资等优点,随着该技术在我国的不断发展;随着国家环保力度的不断加大;随着人们环保意识的增强,相信不久,气垫调压室在我国许多水电站会被得到广泛推广和应用。

此书可供从事水电站规划、设计、建设、运行等方面的技术人员和水电科研人员参考,也可供水利水电类专业的本科生和研究生阅读。

前 言

气垫式调压室又称气压式调压室,世界上第一座气垫式调压室是在挪威的 Driva 水电站建成于 1973 年,在我国,真正意义上的气垫式调压室应用和研究工作起始于上世纪末,本世纪初。鉴于气垫式调压室在我国的应用才刚刚开始,所需研究的问题较多,一些专家及学者在该领域做了大量的开创性研究,取得了很大进展,本书仅就气垫式调压室所涉及的一些问题进行归纳、总结和研究。

常规调压室的水力计算要计算室内最大、最小压力,即最高涌浪和最低涌浪,并在计算结果上加一安全余度来确定调压室的尺寸。气垫式调压室也是按同样的原则确定其尺寸的,在恒定流时,气体体积和压力之间的变化规律符合波义耳气体定律,当调压室内发生大波动时,气体的压力和体积变化规律符合恒温条件或绝热条件,在这一理论支持下,进行气垫式调压室的水位最高涌浪和最低涌浪计算研究。

水锤计算采用特征线法。除了应用连续方程和动力方程外,要充分考虑到气垫式调压室的工作特点,水轮机边界要考虑转速变化对水锤压力升高的影响。

稳定断面的研究历来是调压室研究中最主要的内容之一。由于满足气垫式调压室水位波动稳定所需的控制断面很大,往往为常规调压室的数倍甚至数十倍,不仅不经济,而且不利于结构稳定。寻找减少稳定断面而且合理的理论方法尤为重要。

上述三方面的研究成果,较好地解决了设有气垫式调压室的引

水系统非恒定流计算过程中一直处于讨论、研究阶段的热点问题,为准确计算、合理设计气垫式调压室提供了理论依据,对加速我国推广气垫式调压室应用有很大帮助。

对一个真实电站先进行设置常规调压室的过渡过程计算,再设计选用气垫式调压室,进行其过渡过程的计算分析,通过比较进一步说明气垫式调压室存在的优缺点,提出研究气垫式调压室过渡过程进一步应深入的工作。

在本书的编著过程中,得到了多位专家、教授的指点和帮助,书中引用到的其中一些专家的观点及结论,对更深入的进行气垫式调压室研究具有很大的指导作用。在此对他们表示真诚的感谢。

特邀陕西人民出版社为本书做编辑出版工作。

书中疏忽和不妥之处在所难免,敬请批评指正。

作 者

2006年11月于西安

目 录

1 绪论	(1)
1.1 气垫式调压室的发展状况及应用现状	(1)
1.2 气垫式调压室的特点及运行中存在的问题	(4)
1.3 气垫式调压室的模型试验	(9)
1.4 本书的主要研究内容	(9)
气垫式调压室的水位涌浪计算	(10)
气垫式调压室引水系统的水锤计算	(11)
气垫式调压室波动稳定断面的确定	(11)
气垫式调压室算例	(12)
2 气垫式调压室水位涌浪的解析计算	(13)
2.1 常规阻抗式调压室涌浪计算	(13)
基本方程	(13)
常用计算方法	(14)
2.2 气垫式调压室涌浪计算	(21)
基本方程	(21)
计算方法	(23)
2.3 小结	(24)
3 气垫式调压室引水系统的水锤计算	(25)
3.1 水锤的基本方程	(25)
基本方程	(25)
特征线方程	(31)
等时间间隔有限差分方程	(33)
3.2 边界条件	(36)

进口水库边界	(36)
下游出口为水库	(36)
封闭端	(36)
异性管串联连接	(36)
分岔连接点瞬变计算模型	(37)
常规式调压室边界	(38)
气垫式调压室边界	(39)
下游端为阀门、孔口出流或冲击式水轮机	(41)
“二洞合一”的边界处理	(41)
反击式水轮机边界处理	(42)
3.3 小结	(50)
4 气垫式调压室波动稳定断面的确定	(51)
4.1 稳定断面的研究	(51)
常规调压室波动稳定断面的确定	(51)
气垫式调压室波动稳定断面的确定	(52)
4.2 小结	(57)
5 算例与成果分析	(59)
5.1 设置常规调压室的过渡过程计算	(59)
基本资料	(60)
计算条件及工况	(60)
计算基本资料	(61)
计算框图与程序	(65)
计算结果	(67)
5.2 设置气垫式调压室的过渡过程计算	(84)
气垫式调压室的参数选择	(84)
气垫式调压室涌浪计算结果	(87)
水锤穿井计算	(100)

5.3 小结	(103)
6 结论与设想	(104)
6.1 结论	(104)
6.2 设想	(105)
7 挪威气垫式调压室工程介绍	(110)
7.1 气垫式调压室的典型布置图	(110)
7.2 主要工程参数	(113)
7.3 运行经验	(113)
7.4 存在问题及补救措施	(116)
7.5 水幕设计经验	(120)
附录	(121)
参考文献	(151)

1 绪 论

1.1 气垫式调压室的发展状况及应用现状

气垫式调压室又称气压式调压室、封闭式调压室或具有空气缓冲器调压室等。世界上第一座气垫式调压室在挪威的 Driva 水电站, 建成于 1973 年, 挪威的最后一座已建成的气垫式调压室 Torpa 水电站于 1989 年投入运行。1989 年以后, 挪威没有再新建气垫式调压室, 其原因不是由于该设计存在任何问题, 而是因为受挪威政府对水电开发政策的限制, 几乎没有新的水电工程开发, 因此也就没有了修建气垫式调压室的机会, 据查询, 截至 20 世纪 90 年代末, 其他国家还没有采用过气垫式调压室。

在我国, 真正意义上的气垫式调压室应用和研究工作起始于 20 世纪末, 本世纪初。位于青海省格尔木市境内的大干沟水电站气垫式调压室是我国第一座应用于水电站的小型气垫式调压室, 电站共安装 2 台 10MW 水轮发电机组, 单机设计流量 $16\text{m}^3/\text{s}$, 设计水头 69m, 机组安装高程 3262m。电站引水系统管线全长约 5km, 由进水闸、低压引水管道、溢流式调压井、压力钢管及气垫式调压室组成。其中, 进水闸位于水库大坝左岸, 进口底板高程 3330m; 低压引水管道(隧洞) 总长 4493m, 内径 4.2m, 其中现浇钢筋混凝土管道 4381m, 钢筋混凝土衬砌隧洞 112m; 溢流式调压井的井筒内径 6.6m, 净高 10.54m, 阻抗孔内径 3m, 另在井筒内下部两侧设有长 40m、宽 4m、高 5m 的下室; 压力钢管主管内径 3.2m, 全长 692m, 后接不对称 Y 型分岔管和支管, 两条支管内径 2.5m, 长度分别为 15.5m 和 32m; 气垫式调压室设置在溢流式调压井下游 590m 处的压力钢管

上方的地面上,是一个内径 10m,总高 14m(其中顶拱高 2.36m),外包 0.5m 钢筋混凝土的压力钢罐,其底板高程 3302m,底部阻抗孔内径 2.5m。大干沟水电站于 2000 年 7 月 5 日试运行,于 2000 年 8 月 12 日正式投入生产。2001 年 1 月,华能集团涪江水电有限责任公司投资控股的位于四川涪江上游最大的支流火溪河上的自一里水电站开始研究采用气垫式调压室方案,并列入了 2001 年国家电力公司科技项目计划。成都勘测设计研究院提出的自一里水电站气垫式调压室设计方案。于 2003 年 6 月通过了水电水利规划设计总院组织的专题审查,2004 年 12 月 26 日 1 号发电机组并网发电运行。

自一里水电站为径流式电站,利用火溪河 2034 m 和 1545 m 之间的落差,为规划中四个梯级中的第二级,主要用于枯水期调峰。当上游调节水库形成后,梯级可获得较好效益。该工程设计水头 445m,最大引用流量 $34\text{m}^3/\text{s}$,装机容量 130MW,采用 2 台混流机组,年均发电量 $400\text{GW}\cdot\text{h}$,该电站包括低坝/长引水系统、地下厂房、较短尾水洞,进水口正常水位 2034m。从进水口到厂房的引水隧洞总长 10.0km。引水系统包括:(1) 8537m 长的非衬砌低压引水洞,断面面积 17.5m^2 ,包括 27m 长的集石坑段;(2) 一条 432m 长的圆形断面非衬砌隧洞和断面面积 16.6m^2 的竖井,从低压隧洞 1978.00~1714.00m 高程;(3) 一条 575m 长的非衬砌高压隧洞,断面面积 17.5m^2 ,包括另一长度为 27m 的集石坑段;(4) 一条 190m 长的圆形钢衬段,直径 2.9m,包括一个竖井,高程 1696.00~1543.00m;(5) 一条 220m 长的钢衬隧洞段,直径 2.9m;(6) 连接水轮机的 30m 长的岔管,直径为 1.8m,水轮机到连接竖井到调压室的距离为 585m。尾水洞长度约为 200 m。自一里水电站工程区地形呈“V”形,两岸一般为 $40^\circ \sim 50^\circ$ 的峡谷,山峰高程从 2450.00~2650.00m。在拟布置气垫式调压室的区域,地

面高程 2115.00 m,调压室顶拱高程 1720.00 m,上覆岩体厚度为 395m,侧向最小水平埋深 323m。自一里岩石为花岗岩夹杂变质捕虏体,围岩稳定性好,在气垫式调压室设计区域未揭示断层和软弱带,岩体坚固适合调压室的施工,岩体支护仅需适量的锚杆和喷射混凝土。对于气垫式调压室一个重要的要求就是岩石应力应大于气室内(和隧洞内)压力约 20%,自一里水电站的静压为 3.25MPa,最大冲击压力达到 3.8MPa。上覆岩体最小埋深 401m,侧向距离 321m,地面平缓,自一里水电站地处九寨沟旅游风景线上,施工公路高差很大,公路沿线地形陡峻,施工难度大,采用气垫式调压室方案,有效地解决了厂内交通和风景线上的环境保护问题。

华能集团投资的另外一座位于四川省甘孜藏族自治州康定县境内的小天都水电站,系瓦斯河干流梯级开发的第二级,电站为径流式引水电站,装机 $3 \times 80\text{MW}$,引用流量 $77.7\text{m}^3/\text{s}$,毛水头 392.5m,因 318 国道沿线地形险峻,常规调压室方案存在较为突出的厂内交通问题和风景区环境保护问题,设常规调压室和隧洞施工支洞的施工公路总长达 8.9km,施工 318 国道干扰较大,投资亦较高,另外,常规调压室竖井上部和上室处于 IV、V 类碎裂、散体结构的围岩中,施工难度较大。为解决这些问题,自 2002 年 4 月开始了气垫式调压室方案的设计研究工作,并提出了设计方案,2003 年 1 月通过了水电水利规划设计总院组织的专题审查。2004 年初,和自一里电站同一业主的几座水电站也准备采用气垫式调压室方案,目前正在研究中。国内外几座地下气垫式调压室主要工程特性见表 1—1。

表 1—1 国内外气垫式调压室主要工程特性

工程名称	装机容量 (MW)	流量 (m ³ /s)	调压室总体积 (m ³)	洞室横断面积 (m ²)	洞室长 (m)	气室容积 (m ³)	岩石类型	气室气压 (MPa)
Driva	140	38.9	6700	110	66	3000	条带片麻岩	4.0-1.2
Jukal	35	23.5	6200	130	48	4000	花岗片麻岩	0.6-2.4
Oksal	206	55.6	17000	235	77	13000	花岗片麻岩	3.6-4.4
Sima	500	125	12000	190	55	10000	花岗片麻岩	3.3-4.8
Osa	90	67.5	12500	150-180	71	10000	片麻花岗岩	1.8-1.9
Kvilldal	1240	322.6	136000	260-370	320	88500	混合片麻岩	3.3-4.1
Tafjord	82	13.1	2000	130	15	1000	条带片麻岩	6.5-7.8
Brattset	80	43.5	10000	90	100	6000	千枚岩	2.3-2.5
Ulset	37	16.8	4800	90	53	3600	云母片麻岩	2.3-2.8
Torpa	150	48.5	12000	90	133	1000	粉沙岩	3.8-4.4
小天都	240	77.7	22540	138	160		花岗岩	4.35-
自一里	130	34	11927	90	130	9172	云母花岗岩	3.78-2.85

1.2 气垫式调压室的特点及运行中存在的问题

气垫式调压室作为一种性能优越的水锤和涌波控制设施,通过气室内高压空气形成的“气垫”来控制调压室内水位波动幅值,省掉了常规调压室下部很长的斜井或竖井;隧洞纵向接近直线,洞线

缩短(图 1—1);调压室全部在地下,省掉了山坡明挖和上井公路;调压室位置选择更为自由,特别适用于地形险峻地区高水头、小流量的中小型水电站,具有对植被环境破坏小、工期短、投资省、引水发电系统布置灵活等优点,特别是和高压隧洞不衬砌技术、地下厂房喷锚支护技术配套使用,其经济上的优越性更加明显。

总结挪威气垫式调压室的运行经验,气垫式调压室的主要缺陷是运行过程中的气室漏气问题,这也是使挪威个别调压室无法正常工作的主要原因。这一问题的解决要从几方面去做工作,首先,气垫式调压室的主要设计原则与不衬砌高压隧洞和竖井的设计原则基本相同,但由于岩体的透气能力远远高于透水能力,因此对岩体透气性的控制更加严格。气垫式调压室位置的选择应满足以下准则^[1]:

(1) 围岩质量准则。挪威对气垫式调压室的岩体质量要求没有明确的规定。关键在于岩体进行必要的支护后必须保持长期稳定,另外,岩石自身应能抵抗非常高的水压力作用。因此,应选择岩石强度高(坚硬岩)、岩体相对完整、洞室稳定性好的位置进行气垫式调压室布置,避开较大的不利地质构造和岩溶发育地区。I、II类围岩具有布置气垫式调压室的基本地质条件。

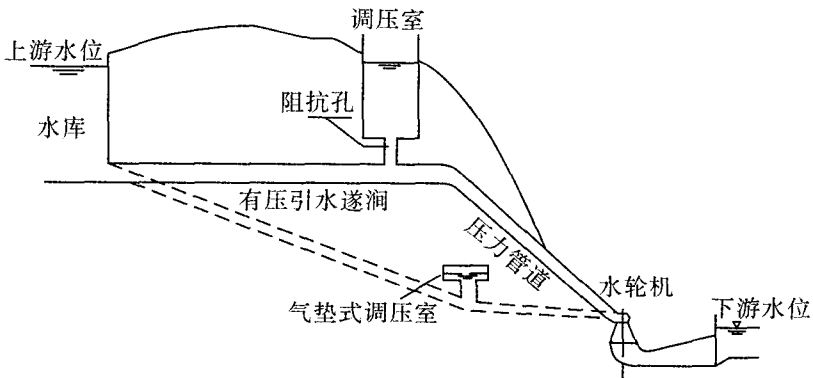


图 1—1 气垫式调压室与常规调压室的比较

(2) 最小覆盖厚度经验准则。气垫式调压室应首先满足上抬理论经验准则要求。通过控制垂直和水平覆盖厚度,从宏观上避免山体发生整体上抬和失稳现象。最小覆盖厚度准则对气垫式调压室设计来说是必须满足的,特别是在初步评判气垫式调压室方案的成立与否及初拟位置时更具有重要意义。

(3) 最小地应力准则。最小覆盖厚度经验准则属于简单极限平衡法,该方法仅考虑岩石的重力。然而地形对谷坡内的实际地应力影响很大,许多情况下还存在相当大的构造应力和残余应力。因此,为确保围岩不遭受水力劈裂和气压劈裂破坏,最小地应力准则就显得更为必要。它要求岩体地应力中的最小主应力应大于调压室内的最大内水压力和气体压力;更确切地说,应是岩石中节理内的法向压力大于调压室内最大气压和水压力。对于坚硬完整的花岗岩而言,一般具有 $5\sim 10\text{MPa}$ 左右的抗拉能力,水压力要劈开没有裂隙的完好岩石是很难的,因此,应根据地应力的量值和方向,核算最不利节理面上的法向应力是否满足最小地应力要求。当然,不考虑主地应力和节理的方向,而直接按实测的最小主地应力来控制,设计上是偏于安全的。

(4) 岩体抗渗准则。岩体渗透性是确定洞壁岩体漏水、漏气量的重要指标,应选择透水性相对微弱的岩体进行气垫式调压室布置,洞壁岩体透水率要求小于 $1.0L_u$,如大于 $1.0L_u$,应进行固壁灌浆处理。

(5) 地下水压力梯度准则。如果岩体的渗透性不是很低,为了将空气损失控制在允许范围内,使围岩内的水压力大于气垫压力是至关重要的。气垫式调压室位置的天然地下水压力若高于气垫压力,在运行过程中,朝向气垫的地下水压力梯度是正的,就可以避免漏气,这是避免气流向外泄漏的准则。

若拟建气垫式调压室位置的天然地下水位较低,低于最高气体

压力水头, 或者天然地下水位不确定, 则需要设置水幕, 人为地产生必要的孔隙水压力, 以解决漏气问题。

水幕的工作原理就是人为地增加气垫周围的地下水压力, 即在气垫室上布设一排排钻孔, 有时也可沿着气室侧壁布置(如 Tafjord 水电站), 这些钻孔与维持所有钻孔中永久水压力的水泵相连。如果水幕压力很高, 足以使所有可能的漏气途径中水压力均高于气垫式调压室的气体压力, 则决不会出现漏气现象。水幕压力通常不超过气垫压力 0.5MPa。孔隙水压力与气垫压力比如果小于 1, 且上覆岩体厚度薄, 岩石渗透性较大, 则需要设置水幕。相关经验表明, 如果地下水压力和调压室内气体压力之比小于 0.9, 则漏气量将迅速增大; 如果该值大于 1.1, 与消散在水道中的损失相比, 通过岩体的漏气并不是很重要。设置水幕后, 岩体的渗透性不再成为主要控制条件。水幕的布置以封住气垫室使气体在水幕压力下不外泄为原则, 水幕可以设置在气垫室上部的专门廊道中, 以倾斜向下的伞形进行布置, 像 Torpa、Kvilldal、小天都、自一里等水电站; 也可以像 Tafjord 水电站那样, 不设置专门的水幕廊道, 而在洞室顶部和边墙上部进行钻孔。

挪威 Kvilldal 水电站气垫式调压室气体压力 4MPa, 围岩孔隙水压力与气体压力比为 0.6, 1981 年开始运行后, 气体渗漏量达 $240\text{m}^3/\text{h}$ (为 0°C 、1 个大气压下的渗漏值, 下同), 产生了不允许的空气漏失。1983 年设置了水幕后, 漏气现象完全消除。该工程共有水幕孔 47 个, 孔径为 51cm, 最大孔距 20m。

Tafjord 水电站调压室气垫压力在 6.5~7.77MPa 之间, 围岩孔隙水压力与气体压力比仅为 0.48~0.56 Mpa 之间, 1982 年开始运行, 漏气量达 $150\text{m}^3/\text{h}$ 。由于电站的空压设备能力有限, 难以让调压室有效地工作, 所以在 1982~1990 年间, 该电站调压室完全充水, 形同虚设。开始曾进行了灌浆修补工作, 但未能奏效, 后来