

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.05.011

圆管型与廊道型气垫式调压室水力性能比较

刘德有¹, 张罗彬², 陈五一², 王 丰¹

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 针对廊道型气垫式调压室的罩式闭气结构比较复杂而且施工难度较大的特点, 提出采用水平圆钢管型洞室代替常用的长廊道型洞室的新型气垫式调压室方案。以四川某水电站气垫式调压室为例, 经大波动过渡过程计算和小波动稳定性分析, 比较 2 种不同体型气垫式调压室的水力性能和运行稳定性。结果表明: 在洞室横断面面积相等的情况下, 圆管型气垫式调压室的小波动稳定性较好, 调压室内水位波动幅值较小、最大气体压力和机组蜗壳进口最大压力较小, 其大波动水力性能也相对较好。

关键词: 气垫式调压室; 水力性能; 气体渗漏; 圆管型调压室; 廊道型调压室

中图分类号: TV732.5+6 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2012)05-0534-05

Comparison of hydraulic performance of round pipe-shaped and corridor-shaped air-cushioned surge tank

LIU Deyou¹, ZHANG Luobin², CHEN Wuyi², WANG Feng¹

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. HydroChina Chengdu Engineering Corporation, Chengdu 610072, China)

Abstract: Considering the complexity and construction difficulty of the anti-leakage structure of a corridor-shaped air-cushioned surge tank, a new type of air-cushioned surge tank, here called the round pipe-shaped surge tank, is introduced as an alternative in this paper. Taking an air-cushioned surge tank at a hydropower station in Sichuan Province as an example, the differences in the hydraulic performance and operating stability between the two design schemes based on the transient process simulation and stability analysis were explored. The results show that as the cross-sectional area of the tanks was the same, the round pipe-shaped surge tank had better stability with small fluctuation. Meanwhile, the amplitude value of the water level in the tank was smaller, the maximum gas pressure and maximum water pressure in the spiral case inlet were relatively smaller, and, thus, the round pipe-shaped surge tank had a relatively better hydraulic performance.

Key words: air-cushioned surge tank; hydraulic performance; gas leakage; round pipe-shaped surge tank; corridor-shaped surge tank

对于高水头水电站的地下气垫式调压室, 其室内高压气体的防渗漏问题是决定工程成败的关键性问题。目前, 国内外关于气垫式调压室的高压气体防渗漏处理常采用以下工程措施: 围岩灌浆处理, 高分子材料喷涂处理, 钢纤维混凝土喷锚处理, 钢板衬砌, 水幕阻气等^[1-3]。根据挪威工程经验, 水幕阻气措施可以取得良好的防渗效果。但水幕的设计和施工要求均较高, 其防渗效果与气室周围的高压水幕闭合效果密切相关。此外, 据资料显示^[3-6], 我国大部分地区的天然岩体渗透性均较大, 使得我国气垫式调压室的高压气体渗漏问题更加严重、更加难以控制。如我国已建的自一里水电站气垫式调压室采用了水幕阻气措施, 却未能达到设计预期的理想效果。为此, 在后续的气垫式调压室设计中, 提出一种被称为“罩式闭气结构”的防渗方案, 并

在金康水电站得到了成功应用,现已推广应用于阴坪、木座等水电站。

目前,国内外已建的大型地下气垫式调压室均采用横断面为城门洞形的“水平长廊道型”洞室,罩式闭气结构是针对这种体型的气垫式调压室而提出的专用防渗结构,即:在气垫式调压室内壁的钢筋混凝土衬砌层内夹设 1 层钢板或高密度防渗材料,以达到闭气的目的,同时依靠平压管道系统平衡钢筋混凝土层的外侧水压力 and 内侧气体压力。该结构的应用不但基本避免了气垫式调压室内高压气体的渗漏,还大幅度降低了气垫式调压室工程对围岩渗透性的要求。但是,罩式结构的设计较复杂,钢板夹层的施工也较麻烦,为此目前已将防渗结构罩的钢板夹层方案改为挂衬方案,但还是存在类似的问题。考虑到我国水电工程中对于采用钢板衬砌高压隧洞(其横断面为圆形)已积累了大量的设计、施工和运行维护经验,并有大量的成功工程实例,即其在体型结构上是可行的,而且其全封闭钢衬可确保对高压气体的防渗漏效果。因此,笔者提出采用“带钢板衬砌的水平高压隧洞”(即圆管型洞室)替代“带钢罩式闭气结构的水平长廊道型洞室”(简称为廊道型洞室)的新型气垫式调压室方案。由于将圆管型洞室用作气垫式调压室在实际工程中尚无先例,因此其在各种运行工况下的水力性能与已有廊道型气垫式调压室的差异值得深入比较及分析研究。

以四川某水电站为例,通过对圆管型、廊道型 2 种不同体型气垫式调压室方案的引水发电系统大波动过渡过程计算和小波动稳定性分析,比较 2 种体型气垫式调压室的水力性能差异,论证圆管型气垫式调压室方案的可行性和优越性。

1 圆管型气垫式调压室的水力计算数学模型

在水电站引水发电系统大波动过渡过程计算和小波动稳定性分析的数学模型^[1-3,6-8]中,对于圆管型、廊道型气垫式调压室,其基本方程在形式上完全相同,本文不再重复列出,但在其水流连续性方程和室内气体状态方程中,2 种体型气垫式调压室的室内水面面积和气体体积是完全不同的。

对于廊道型气垫式调压室,其廊道洞室的横断面可折算为矩形断面(图 1),即将其圆拱顶折算成平顶后,其室内水面面积始终为已知的不变值、室内气体体积与气体折算高度成正比。

对于圆管型气垫式调压室,其洞室横断面为圆形断面,则其室内水面面积和气体体积是随水深呈非线性变化的变量。下面列出圆管型气垫式调压室水面面积 A_s 和气体体积 V_g 的计算关系式:

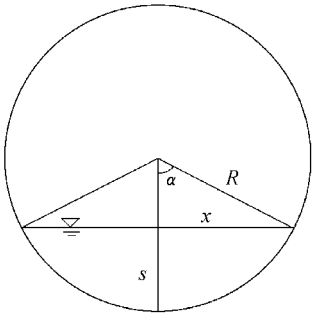


图 1 圆管型气垫式调压室横断面参数示意图
Fig. 1 Cross-section of round pipe-shaped air-cushioned surge tank

$$A_s = 2xL_s \tag{1}$$

$$V_g = (\pi - \alpha)R^2L_s + (R - s)xL_s \tag{2}$$

$$R^2 = (R - s)^2 + x^2 \tag{3}$$

$$\alpha = \begin{cases} \arctan\left(\frac{x}{R - s}\right) & s < R \\ \frac{\pi}{2} & s = R \\ \pi - \arctan\left(\frac{x}{s - R}\right) & s > R \end{cases} \tag{4}$$

式中: A_s ——调压室内水面面积 m^2 ; x ——调压室圆形横断面内对应于 s 的水面宽度的 $1/2$ m ; s ——调压室内的动态水深 m ; L_s ——调压室的水平总长度 m ; V_g ——调压室内气体体积 m^3 ; α ——对应于 x 的圆心角, rad ; R ——调压室圆形横断面的半径 m 。

2 大波动过渡过程分析

以四川某水电站为算例,其基本资料如下:总装机容量为 2×50 MW,引水道总长约 10.3 km,机组额定水头为 214.0 m,额定发电流量为 2×26.85 m^3/s ,引水系统采用一管两机一室的布置方式,上游调压室为廊道型气垫式调压室,廊道长度为 98.6 m,城门洞型横断面宽度为 10.6 m,拱顶高程为 $1\,026.30$ m,拱顶折算成平顶

的高程为 1025.16 m ,底板高程为 1010.00 m。

按照总长度不变、横断面面积相等原则 ,将该电站气垫式调压室由原廊道型换算成圆管型 ,并保持其底板高程不变、室内气体压力相同(即初始水位相同) ,其他参数如图 2 所示。

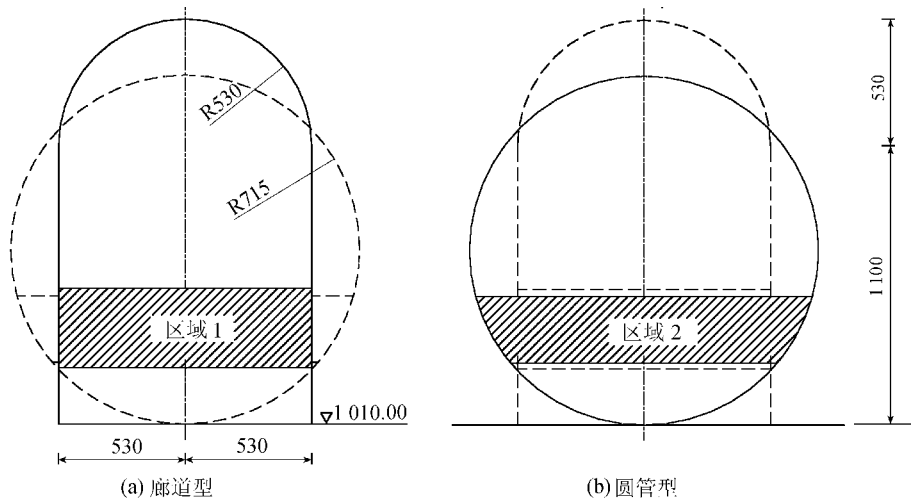


图 2 算例电站廊道型与圆管型气垫式调压室横断面对比示意图(高程单位 m ,尺寸单位 cm)

Fig. 2 Cross-section comparison between corridor-shaped and round pipe-shaped air-cushioned surge tanks at a hydropower station(elevation : m ; size : cm)

为了对图 2 所示的 2 种体型气垫式调压室的大波动过渡过程进行比较 ,选取 2 种计算控制工况 ,对应的计算结果见表 1 和图 3 ~ 6。另外 ,对应于表 1 的计算结果 ,在图 2 中的区域 1、区域 2 分别标出了圆管型、廊道型 2 种体型气垫式调压室的水位波动变化区域。

表 1 气垫式调压室大波动过渡过程计算结果

Table 1 Calculated results of transient process for air-cushioned surge tank

调压室类型	蜗壳进口参数		蜗壳进口最大压力 上升率/%	调压室参数					
	最大内压水头/m	最大内压发生时间/s		最高水位		最低水位		室内最大气体压力水头	
				水位值/m	发生时间/s	水位值/m	发生时间/s	水头值/m	发生时间/s
廊道型	306.435	57.78	24.32	1015.319	57.36	1012.135	172.50	293.571	57.36
圆管型	304.748	60.17	23.53	1015.073	58.47	1012.287	177.47	292.171	58.47

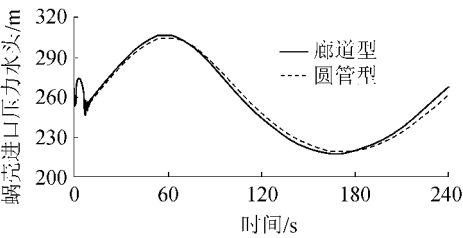


图 3 工况 1 蜗壳进口压力变化过程线

Fig. 3 Variation of pressure at spiral case inlet under Condition 1

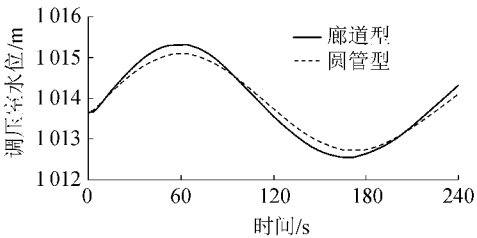


图 4 工况 1 调压室水位变化过程线

Fig. 4 Variation of water level in surge tank under Condition 1

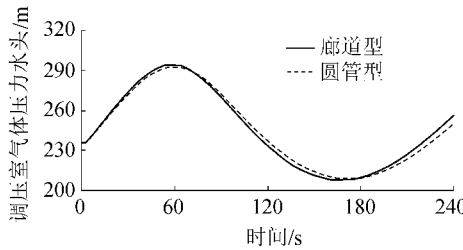


图 5 工况 1 调压室气体压力变化过程线

Fig. 5 Variation of gas pressure in surge tank under Condition 1

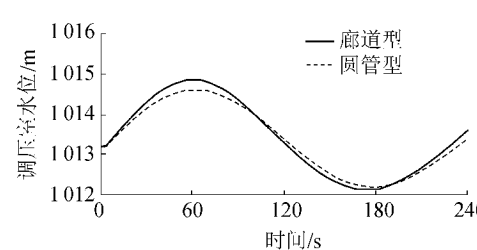


图 6 工况 2 调压室水位变化过程线

Fig. 6 Variation of water level in surge tank under Condition 2

计算工况 1(即机组蜗壳进口最大压力、调压室内最高水位和最大气压的控制工况):水库水位 $H_u=1248\text{ m}$,下游水位 $H_d=1001.36\text{ m}$ 2 台机最大水头、最大出力正常稳定发电运行同时全弃负荷,导叶按一段直线规律 8 s 正常关闭。

计算工况 2(即调压室内最低水位的控制工况)水库水位 $H_u=1238\text{ m}$,下游水位 $H_d=1001.36\text{ m}$ 2 台机最小水头、额定出力稳定发电运行同时全弃负荷,导叶按一段直线规律 8 s 正常关闭。

从表 1 和图 2~6 可见,与廊道型气垫式调压室相比,圆管型气垫式调压室在整个大波动过渡过程的水位变化区域内的室内水面面积始终较大,并且室内水位波动幅值较小、最高涌波水位较低以及最低涌波水位较高。机组蜗壳进口最大压力、室内最大气体压力较小。因此,其大波动工况的水力性能也相对较好。

值得说明的是,对于圆管型气垫式调压室来说,随着室内水深的降低,其室内剩余水体体积减少较快,因此,在同等条件下圆管型气垫式调压室的最小安全水深^[8-9]应适当取略大值。但从本算例计算结果看,与廊道型气垫式调压室相比,圆管型气垫式调压室的室内最低涌波水位增高了 0.15 m ,即其最小水深增大了 0.15 m 基本补偿了适当增大安全水深的要求,说明 2 种体型气垫式调压室在相同初始水位情况下,最小安全水深的满足程度是相近的。

3 小波动稳定性分析

对于高程相同的气垫式调压室,其小波动稳定性主要与室内气体体积的大小有关,同时与室内水面面积也略为相关,即:在其他参数相同的情况下,调压室内的气体体积越大以及水面面积越大,则其小波动稳定性越好^[3-8]。根据式(1)、式(2),在图 2 所示的水位波动范围内,2 种形式调压室的气体体积、水面面积与水位的关系如图 7、图 8 所示。

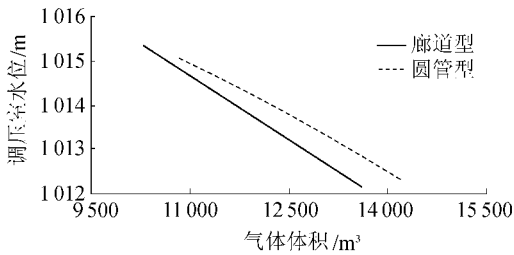


图 7 水位与气体体积关系曲线

Fig. 7 Relationship between gas volume and water level in surge tank

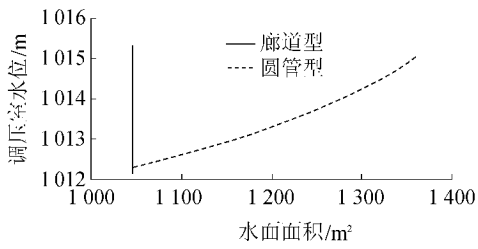


图 8 水位与水面面积关系曲线

Fig. 8 Relationship between cross-sectional area and water level in surge tank

由图 7、图 8 可见,对于洞室横断面面积相等的 2 种形式的气垫式调压室,在相同水位(即气体压力相等)的情况下,圆管型的气体体积略大于廊道型(差值为 $3\% \sim 5\%$),且圆管型的水面面积远远地大于廊道型,因此,圆管型气垫式调压室的小波动稳定性明显地优于廊道型气垫式调压室。但由于气垫式调压室小波动稳定性的主要影响因素是气体体积,而与水面面积的相关性很小,因此,2 种形式气垫式调压室的小波动稳定性不会像其水面面积差异那样出现太大的差异。

对于本算例,在 2 种体型气垫式调压室采用相同初始水深的条件下,当机组在额定出力稳定发电运行工况突甩 10% 负荷时,相应于最大、最小水头的 2 种气垫式调压室的水位小波动变化过程的计算结果如图 9、图 10 所示。由图 9、图 10 可见,2 种气垫式调压室的小波动过程均是稳定收敛的,且衰减速度也相近,其中,圆管型较优于廊道型。另经系统状态方程分析证实,2 种系统的动态过程都是稳定的,两者的小波动稳定性相近,其中圆管型系统略优。

4 结 语

以四川某水电站为算例,比较分析圆管型和廊道型 2 种不同体型气垫式调压室在水力和结构上的异同点,论证了圆管型气垫式调压室在实际工程应用中的可行性和优越性。经大波动过渡过程计算和小波动稳定性分析,结果表明:(a)对于洞室横断面面积相等、底板高程相同的 2 种不同体型气垫式调压室,圆管型的小波动稳定性优于廊道型;此外,圆管型气垫式调压室的室内水位波动幅值较小、室内最大气体压力和机组蜗壳进口最大压力较小,其大波动水力性能也相对较好。(b)由于“钢板衬砌高压隧洞”的设计、施工和运行

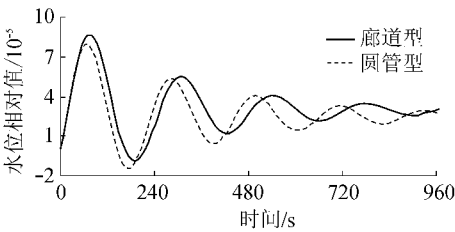


图9 最大水头工况调压室水位变化过程线
Fig. 9 Water-level fluctuation in surge tank under condition of maximum water head

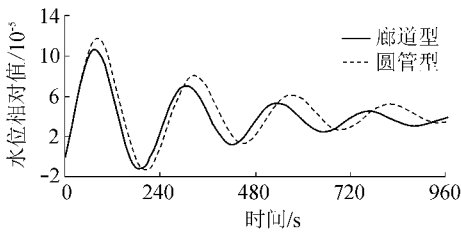


图10 最小水头工况调压室水位变化过程线
Fig. 10 Water-level fluctuation in surge tank under condition of minimum water head

维护技术已较成熟,其工程投资可相对降低、施工工期可相对缩短。(c)对于高水头明钢管引水的中小型水电站,可在电站厂房附近山体内设置圆管型地下气垫式调压室,从而大幅度降低工程造价,并可避免廊道型气垫式调压室可能发生的漏水问题。因此,圆管型气垫式调压室方案在我国今后的水电工程中将具有良好的推广应用前景。

参考文献:

[1] GU Zhaoqi, LI Xingxing, GUO Jun. Experiences in norwegian hydropower[M]. Norway: Tapir Publishers, 1985.

[2] 刘德有, 张健, 索丽生. 气垫式调压室研究进展[J]. 水电能源科学, 2000, 18(4): 1-5. (LIU Deyou, ZHANG Jian, SUO Lisheng. Advances in air-cushioned surge tank research[J]. Journal of Water Resources and Power, 2000, 18(4): 1-5. (in Chinese))

[3] 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院. 水电站气垫式调压室关键技术及应用研究项目总报告[R]. 成都: 中国水电顾问集团成都勘测设计研究院, 2007.

[4] 华东水利学院. 水工设计手册(第七卷)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.

[5] 潘家铮, 傅华. 水工隧洞和调压室(调压室部分)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1981.

[6] 刘启钊, 彭守拙. 水电站调压室[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.

[7] 周建旭, 刘德有. 设置连通孔对差动式调压室压差和涌浪的影响[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2007, 35(5): 587-591. (ZHOU Jianxu, LIU Deyou. Differential pressure and surge analysis of differential surge tank with interconnecting holes[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2007, 35(5): 587-591. (in Chinese))

[8] 刘德有, 陈五一, 张健, 等. 气垫式调压室安全水深合理取值研究[J]. 水电能源科学, 2004, 22(3): 57-60. (LIU Deyou, CHEN Wuyi, Zhang Jian, et al. A study on reasonable value of safe-depth of air-cushioned surge tank[J]. Journal of Water Resources and Power, 2004, 22(3): 57-60. (in Chinese))

[9] 方光达. 水电站气垫式调压室应用现状和主要设计问题[J]. 水力发电, 2005, 31(2): 44-47. (FANG Guangda. Application of air-cushioned surge shaft for hydropower station and its main design problems[J]. Journal of Water Power, 2005, 31(2): 44-47. (in Chinese))