

气垫式调压室应用分析

钱震伟

(四川省工程咨询研究院,四川 成都 610021)

摘 要:气垫式调压室具有工程占地少、对自然生态环境有利等优点,但存在对地质条件要求较高、高压隧洞设计难度大、施工建设及运行维护要求高等问题。调压室方案选择时,应在工程地质条件较好的基础上,进行技术经济综合比较后审慎确定。

关键词:气垫式调压室;设置条件;优势;劣势

中图分类号:TV732.5+6;O434.19;B025.4 **文献标识码:** B **文章编号:**1001-2184(2021)06-0122-04

Analysis on the Application of Air Cushion Surge Chamber

QIAN Zhenwei

(Sichuan Engineering Consulting and Research Institute, Chengdu, Sichuan, 610021)

Abstract: Air cushion surge chamber has the advantages of less land occupation and favorable to the natural ecological environment, but there are problems such as high requirements on geological conditions, difficult in design of high-pressure tunnels, and high requirements for construction, operation and maintenance. When selecting surge chamber scheme, it should be prudently determined after comprehensive comparison of technology and economy on the basis of better engineering geological conditions.

Key words: air cushion surge chamber; setting conditions; advantages; disadvantages

1 概 述

近二十年来,气垫式调压室在我省水电工程中的应用越来越多,技术更加成熟,但效果良莠不齐,行业内对气垫式调压室应用的认识也褒贬不一。笔者对四川省已投运的且采用气垫式调压室的水电工程进行了建设情况、运行情况的调查,通过实例总结分析气垫式调压室在建设期、运行期的优劣,为以后水电工程气垫式调压室方案选择和设计提供参考。

2 气垫式调压室运行原理^[1]

气垫式调压室的运行原理与常规调压室大致相同,就是在输水系统中形成扩大的自由水面,通过反射对因机组负荷变化导致压力管道中出现的水击现象起抑制和衰减作用,以改善机组运行状况,提高供电质量。区别是气垫式调压室利用调压室上部气室内的高压空气形成“气垫”,抑制室内水位高度和水位波动幅值,控制水锤和涌波性能更优越,对于机组稳定运行更为有利,适用于对环境有较高要求的高水头中小型电站。气垫式调

压室典型布置图见图 1。

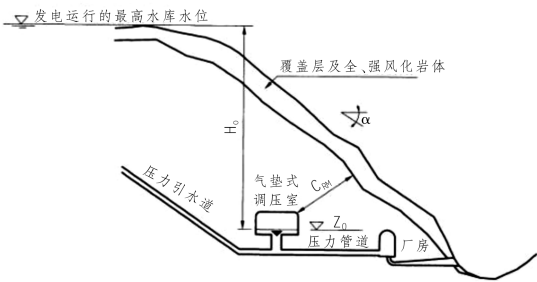


图 1 气垫式调压室典型布置图

3 气垫式调压室主要技术问题的研究历程

(1)调压室设置的水力条件。从理论上,气垫式调压室对于水锤的反射与常规开敞式调压室遵守相同的规则,开敞式调压室设置的水力条件对气垫式调压室同样适用。

(2)气垫式调压室主要技术问题的研究历程^[2]。气垫式调压室的主要技术问题是渗透性及结构受力问题。

①早期研究和应用。气垫式调压室的研究和应用最早出现在挪威,该型电站输水系统一般利用有利的地形地质条件,采用从进水口到厂房一

坡到底的有压管道布置型式。绵阳市平武县火溪河自一里水电站是四川省第一个采用气垫式调压室的电站,上世纪末在进行气垫式调压室研究时,考虑到当时国内气垫式调压室设计经验不足,而且隧洞沿线地质情况又不明朗,如果采用“一坡到底”的布置型式,则隧洞全为高压段,在施工和将来电站运行中的不可预见因素较多。再者,施工出碴、排水、支洞布置需作深入研究,考虑到自一里水电站开工在即,各施工支洞位置不宜作较大调整,因此引水线路未采用“一坡到底”的布置型式,而是将气垫式调压室设置在半坡中。为指导工程设计,根据自一里水电站气垫式调压室埋藏于地下的特点,结合挪威类似工程经验,行业内在当时提出了气垫式调压室布置的三条原则:

a. 埋深。对于高压气垫式调压室,埋深按挪威准则且应满足洞内静水压力小于最小地应力的要求进行选择。

b. 地应力。为避免水力劈裂,岩体中的最小主应力 σ_3 应大于调压室内产生的最大气压。

c. 渗透性。气垫式调压室漏气控制标准为:渗透性指标 $Lu \leq 1$,则气垫式调压室的漏气量可按公式估算;否则,必须进行固结灌浆处理。渗透性指标 $Lu \leq 0.01$ 时考虑不设水幕,否则,必须设置水幕。

考虑到水幕的设计压力较大,供水系统复杂,费用高,到目前为止,国内的气垫式调压室均未设置水幕,仅在自一里、小天都的电站前期设计中有所考虑^[3-4],但均未实施。

②近期研究和应用。随着理论研究的深入和“钢罩+平压孔”技术的出现和应用,气垫式调压室的渗透性条件也相应放宽。2016年6月施行的《水电站气垫式调压室设计》(NB/T35080—2016)对气垫式调压室设置条件作了以下4条要求:

a. 气垫式调压室应利用围岩承担内水或气体压力,围岩宜为中硬岩或坚硬岩,以不低于Ⅲ类的较完整的岩体为主。

b. 埋深条件,同前原则,但有所提高,经验系数提高到1.3~1.5。

c. 地应力条件,同前原则,但有所提高,最小主应力 σ_3 应大于等于1.2~1.5倍室内最大气压。

d. 气垫式调压室区域宜有较高的天然地下水位,或能形成稳定的渗流场。设计压力下高压压

水岩体透水率宜小于5 Lu。

从早期研究到规范出台,可以看出在气垫式调压室的设置条件中,行业内对岩体渗透性的要求降低了,对与结构受力问题紧密相关的地质条件,虽对围岩特性作了要求,但也相对宽松。其原因在于从理论上讲,渗透性和结构受力问题都可通过一定的工程措施予以解决,甚至不受地形条件的限制,如位于青海戈壁滩的大干沟和南山口水电站和位于四川深山金康水电站。

大干沟水电站为我国首个采用气垫式调压室的水电站^[5],为适应戈壁滩独特的地形地质条件,采用地面“钢包”来解决气密性问题。大干沟水电站装机容量 2×10 MW,额定水头 70 m,钢包直径为 10 m,高度为 14 m,钢板厚 18 mm,材质为 16 Mn 钢,外包 50 cm 的混凝土保温层。电站自 2000 年投运至今运行稳定,补气间隔大概为半个月 1 次,每次补气约 1 h。大干沟水电站下游的南山口二级水电站,装机容量 2×7 MW,额定水头 68.5 m,采用地面 3 个“钢包”串联组成调压室,钢包直径为 17 m,高度为 26.5 m,钢板厚度为 32 mm,材质为 16 Mn 钢,钢包外包裹厚 80 cm 的混凝土保温层。电站投运至今运行稳定,补气间隔大概为一个月 1 次,每次补气约 1 h。

自一里水电站于 2004 年顺利投产,由于正值西部水电大开发的初期,自一里水电站的成功经验使气垫式调压室迅速在四川省内得到推广应用。在甘孜州金汤河金康水电站气垫式调压室设计中,首次采用地下“钢罩”解决气密性问题。金康水电站装机容量 2×75 MW,额定水头 458 m,气室断面为 $9.8 \text{ m} \times 15.9 \text{ m}$ (宽×高),长 80 m。气垫式调压室“钢罩”为厚 120 cm 的钢筋混凝土,中间夹钢板闭气,采用衬砌外围岩中设平压孔来解决“钢罩”受力问题,同时考虑平压孔的作用不一定在理想状态,且洞室结构相对较大,钢筋混凝土衬砌厚度设计时留有较大裕度。电站 2006 年投运后运行总体稳定。

大干沟及南山口水电站地面“钢包”气垫式调压室的成功经验,体现了气垫式调压室在平缓戈壁滩上应用的优越性,金康、木座等水电站地下“钢罩”气垫式调压室的成功经验,体现了气垫式调压室在山地应用的适应性。这些成功经验也从理论上延伸了气垫式调压室适用条件,即通过技术手段解决高压段防渗和结构稳定问题后,气垫

式调压室的设置对地形、地质条件的要求进一步放宽,理论上常规调压室几乎都可用气垫式调压室替代。特别是金康水电站采用“钢罩+平压孔”技术成功后,对地质条件要求不再苛求,这在之后四川省一些中小型电站设计理念中得以明显体现。四川省已建成投产的气垫式调压室水电站除较早建成的自一里、小天都采用围岩灌浆闭气方式外,金康、阴坪、木座、民治、二瓦槽、龙洞、金平、达阿果、虎牙等其他十余个水电站均采用了地下“钢罩”闭气方式。其中不乏地质条件欠缺的,如金康水电站的高压引水隧洞为当时国内岩溶、石膏层地区内水压力最大的隧洞,如虎牙水电站引水隧洞千枚岩发育、岩体裂隙发育。

4 气垫式调压室技术的优势

(1)采用气垫式调压室,引水隧洞在纵剖面上可采用直线布置(即所谓的“一坡到底”),而不是常规调压室所要求的折线布置,故隧洞轴线缩短,沿程和局部水头损失减少,增加发电效益。

(2)采用气垫式调压室,施工支洞设置高程较低,有效减少常规调压室施工所需修建的盘山施工道路,能很大程度地减少施工对自然生态环境的不利影响。同时由于占地面积减少,工程建设时征占地难度降低,对推动工程建设能起到积极作用。

(3)气垫式调压室布置比较灵活,可视地质条件沿管线几百米范围内择优布置,而常规调压室受地形地质条件限制,布置可选范围相对较小。

(4)采用气垫式调压室,控制水锤和涌波性能优越,能提高机组调节的稳定性,对电站运行有利。

(5)随着“钢罩”“钢包”等闭气设施和施工技术的进步,理论上气垫式调压室对地质条件的要求降低,其适用范围越来越广。

(6)从工程投资角度看,对四川省已建成的十余座气垫式调压室水电站初步调查表明,气垫式与常规式调压室相比,除去早期建设的自一里电站外,其他项目工程投资均略有降低,并呈现出工程地质条件越好,投资节约越明显的规律。

5 气垫式调压室技术的劣势

(1)气垫式调压室及高压隧洞对地质条件要求很高。我国在研究和应用气垫式调压室初期,结合挪威类似工程经验,曾提出了设置气垫室调压室的三条原则:埋深、地应力和渗透性。尤其渗

透性原则对地质条件要求很高,一般要求调压室和高压隧洞岩体为较完整的坚硬岩,且为非可溶性岩。后虽发展了“钢罩”“钢包”等技术解决了调压室气室渗透性问题,深埋高压隧洞结构安全和内水外渗风险也可通过加强、加厚衬砌或调整位置及埋深来解决,但地下隐蔽工程的特殊性及现有的地质勘察技术手段和勘察要求无法在前期勘察中进行非常准确的地质预测,有时在开挖后或试运行时才暴露出一些地质缺陷。而前期的结构设计只能在地质预测的基础上进行,兼顾安全性和经济合理性。当在实施过程中或投运时才暴露出大的地质缺陷,采用技术方案处理时通常受实施现状制约,处理难度大,工期长、投资高。

较早建成的自一里、小天都水电站调压室均采用围岩灌浆闭气。自一里水电站调压室围岩为印支期二云母花岗岩,岩性坚硬,为Ⅱ类围岩,洞室附近无断层和软弱带发育,但局部裂隙发育。工程实施时对洞室围岩采用高压固结灌浆,对表面裂隙采用环氧砂浆封闭等措施来保证渗透性,但试运行时还是出现了无法充水充气问题。参建单位经过分析研究后认为:由于裂隙发育的随机性及可能存在的灌浆施工工艺问题,导致原先的高压固结灌浆效果不佳,围岩渗透性达不到要求。鉴于工程现状及当时类似经验很少,反复研究后最终通过大范围高压灌浆补强围岩、表面裂隙涂刷聚合物等措施方解决问题,处理的难度较大,周期长,发电工期延长较多,工程投资也相应增加。而小天都水电站调压室围岩也是Ⅱ类花岗岩,但裂隙不甚发育,完整性较好,洞室围岩同样采用高压固结灌浆防渗,投运后并未出现类似自一里水电站的问题。

虎牙水电站装机容量 48 MW,额定水头 401 m,设计引用流量 $13.50 \text{ m}^3/\text{s}$,在前期设计中采用常规水室式调压室,工程实施时考虑到工程区紧邻“雪宝顶自然保护区”,环境保护要求高,为减少工程施工对环境的影响,同时降低移民安置的难度,在投资相当的情况下,将常规调压室变更为“钢罩+平压孔”的气垫式调压室。2018 年初建成准备充水投产时发现高压洞段漏水严重,根本无法加压。多方分析论证后认为:高压洞段和调压室围岩为中厚层状泥质灰岩,以Ⅲ类为主,具备建气垫式调压室的基本条件,但围岩强度不高,且夹少量薄层状千枚岩,裂隙非常发育,初

期对围岩采取的固结灌浆措施,效果远达不到结构设计和防渗要求。基于工程现状,参建各方反复研究论证后不得不采用对约 1 km 长高压洞段加内钢衬、调压室钢罩加厚并由“钢罩+平压孔”型式调整成“钢罩”承受内外水压力和围岩压力的高压力容器型式、“钢罩”外侧围岩进行固结灌浆等非常规措施进行处理,最终问题得以解决。但其施工难度非常大,处理时间近两年,直接投资增加过亿,发电工期延误两年多,经济损失较大。

(2)理论研究表明:气垫式调压室小波动稳定面积较常规调压室大得多,不适用于大流量或上游库水位变幅较大的电站,亦不适用于尾水调压室。在气垫式与常规式均可采用的调压室中,气垫式较常规式体积大,增加了地下大洞室开挖的施工难度和安全风险、支护费用。且因气垫式调压室布置的特点,无论是水幕式,还是“钢罩”式,施工过程中的排风散烟难度大,施工作业环境较常规调压室更差。

(3)气垫式调压室需设置充气空压机和补气空压机,且随着气垫厚度的变化和漏气情况需及时补气,较常规调压室增加了运行工作量和运行成本,运行维护相对复杂,对运行维护人员的要求更高。金平水电站运行情况表明,调压室正常运行维护年成本 20 万左右。民治水电站放空检查时因放空程序出错,致使钢罩损坏,虽经修补,可以维持电站的安全运行,但漏气量仍偏大。

(4)气垫式调压室若采用水幕式,地下岩体裂隙发育的随机性可能导致灌浆施工质量不可控,上述提到的自一里电站即存在此问题。若采用钢罩式,则钢板焊缝施工质量要求很高。2017 年底

(上接第 121 页)

3 结 语

调速器负荷波动对设备及电网安全运行影响较大,应采取有效的预控措施尽量避免该类故障的发生。在设备管理方面,应加强调速器控制系统运行监视和日常巡检,尽早发现隐患并及时消除。同时,结合机组检修,加强对调速器系统控制回路的检查维护,深入排查设备隐患,研究提高设备可靠性保障措施,确保调速器设备安全可靠运行。在应急处置方面,需编制负荷波动类故障的应急处置方案及处置卡,列出故障处置的关键措施,定期进行应急演练,提升人员应急处置水平。

投产的龙洞水电站因钢罩漏气导致运行后补气量很大,每天必须连续补气 12 h,才能保证气垫式调压室的水位不上涨,否则,严重影响空压机的使用寿命,增加运行工作量和运行成本。

(5)从施工技术角度看,气垫式与常规式调压室相比,施工技术要求相对较高。

6 结 语

气垫式调压室在世界范围内应用相对较少,主要在挪威和我国,已积累了一定的经验和教训。作为满足机组调节保证需要的方式之一,其具有工程占地少、对自然生态环境有利等优点,但其存在对地质条件要求较高、高压隧洞设计难度大、施工建设及运行维护要求高等问题。虽然气垫式调压室理论趋于成熟,“钢罩”“钢包”等新技术的运用理论上也突破了地质条件的限制,但建设实例说明,调压室方案选择时,仍应将工程地质条件较好作为基础,针对电站的具体情况,进行技术经济综合比较后审慎确定。

参考文献:

[1] 郝元麟,余挺. 水电站气垫式调压室设计,ISBN 978-7-5170-5225-8[M]. 中国水利水电出版社,2017,2(1).
[2] 华富刚. 气垫式调压室设计中的主要问题研究[J]. 水利科技与经济,2006,12(4):222-226.
[3] 郑道明,王雪红,赵启强. 气垫式调压室施工技术研究[J]. 四川水力发电,2006,25(增刊 1):19-21.
[4] 赵启强,黄芬. 水泥化学复合灌浆技术在气垫式调压室补强中的应用[J]. 四川水力发电,2011,30(5):98-100.
[5] 郇国荣. 气垫式调压室及其在大干沟水电站的应用[J]. 水利水电科技进展,2002,22(3):38-40.

作者简介:

钱震伟(1976-),男,汉族,江苏泰兴人,本科,高级工程师,从事水电工程设计、咨询工作。

(责任编辑:吴永红)

参考文献:

[1] 魏守平. 现代水轮机调节技术[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2002.
[2] 魏守平,王雅军,罗萍. 数字式电液调速器的功率调节[J]. 水电自动化与大坝监测,2003,27(4):20-22.
[3] 谭中美,刘小改. 二滩水电站调速器控制系统改造[J]. 水电站机电技术,2005,28(1):64-65.
[4] 吴建荣,王秀梅. 二滩水电站 5 号机组负荷波动原因分析及处理[J]. 四川电力技术,2012,35(1):22-23.
[5] 徐长明,郝辉,邓友汉. 水电机组调速系统控制异常的分析与应对[J]. 水电与新能源,2021,35(3): 33-35.

作者简介:

王 刚(1986-),男,陕西西安人,高级工程师,从事水电站运行维护工作;

刘金华(1986-),男,重庆人,工程师,从事水电站运行管理工作。

(责任编辑:吴永红)