

急流小流量旋流式竖井涡室流态试验研究

赵建永¹, 刘韩生¹, 徐自立¹, 郭振世², 于菲²

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 金堆城钼业集团有限公司工程管理处, 陕西 华县 714100)

摘要: 旋流式竖井是一种比较好的泄水道, 目前研究工作集中于急流大流量或来流为缓流小流量情况。某尾矿库排洪管为急流小流量, 通过水工模型试验研究这种水流的涡室体型流态。针对急流小流量旋流, 对圆弧、椭圆曲线涡室体型进行比较择优, 选取了比较合适的体型; 并对试验中出现的问题进行了分析研究, 主要解决了涡室流态问题, 经优化, 所推荐椭圆体型涡室流态理想, 满足工程设计要求。

关键词: 旋流式竖井; 急流; 小流量; 涡室; 流态

中图分类号: TV131.61

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)02-0186-04

Experiment on flow pattern of volute chamber with supercritical flow and small discharge in cyclone shaft

ZHAO Jianyong¹, LIU Hansheng¹, XU Zili¹, GUO Zhenshi², YU Fei²

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Project Management Office of Jinduicheng Molybdenum Group Co., Huaxian 714100, China)

Abstract: Cyclone shaft is a good sluiceway. The current works focus on the situation of rapid and large discharge or slow and small discharge. There is rapid and small flow in drainage pipe of a tailing reservoir. The paper studied the flow pattern of volute chamber of this flow by the hydraulic model experiment. In view of cyclone with rapid and small flow, the paper compared arc and elliptic curve volute chamber forms, and chose a more appropriate shape. It discussed the problems found in the process of experiment and resolved the main problems of flow pattern. By optimization, the flow pattern of recommended volute chamber of ellipse form is ideal and can meet the requirement of engineering design.

Key words: cyclone shaft; supercritical flow; small discharge; volute chamber; flow pattern

1 研究背景

竖井是常用的泄水道, 通过环形堰将水库水流导入竖井, 其显著特点是竖井中水流呈跌流, 自上而下跌入下部, 冲击底部设施, 这种方式的不足之处在于水流衔接不平顺。为了克服这个问题, 产生了竖井旋流泄水道, 竖井涡流消能的主要原理是利用贴壁水流大的流速梯度, 在各流速层间形成的紊动、剪切和涡旋使水流中的动能得以消散; 通过不断掺入水流的空气, 形成两相流, 有效的消杀能量^[1]。因此, 通过涡室将水平明渠水流过渡为竖井贴壁螺旋水流, 避免了竖井跌流, 也避免了竖井跌流冲击竖

井底部, 使竖井水流与下游设施平顺衔接。

对于垂直旋流竖井泄水道, 其核心部位是涡室, 目前对其研究主要集中在两个方面: 其一对高水头大流量工况下的研究, 我国沙牌工程总水头 90 m, 最大下泄流量为 242 m³/s^[2], 20 世纪 90 年代初 Hager 等^[3] 对大流量、高流速的旋转水流的水力特性研究取得了极大进展, 国内董兴林等^[4-5] 较系统地研究了高水头、大流量漩涡竖井式泄洪洞的水力特性和计算方法; 其二对缓流小流量工况下的研究, 意大利 Drioli 和法国 Jeanpierre 等在缓流的引水道, 泄量不大的一些小型工程中对竖井旋流洞的应用, 如蒙特阿金托 (Monte Argento)、娜尼 (Narni)、柯邦斯

收稿日期: 2014-04-18; 修回日期: 2014-11-19

作者简介: 赵建永 (1990-), 男, 山东潍坊人, 本科生, 研究方向为水力学与水工建筑物。

通讯作者: 刘韩生 (1962-), 男, 陕西韩城人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事水力学与河流动力学的研究。

(Curbans)等 22 座水利工程^[6],国内的如草坡水电站等都是基于缓流小流量的工况下,现列举部分典型代表工程,如表 1 所示。

表 1 一些旋流涡室的参数表^[7]

工程名称	$Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	Fr
Santa Maria	21.60	0.35
Monte Argento	165.00	0.41
GeottoCompanre	100.00	0.31
Montemaggior	40.00	0.32
Narni	180.00	0.38
Curbans	140.00	0.41
中国四川草坡水电站	9.60	0.32

某工程尾矿库排洪管,其特点是顶部明渠为急流,最大流量仅仅只有 $22 m^3/s$,属于典型急流小流量。而急流与缓流有着本质区别,产生降水曲线,容易导致水跃的发生,旨在研究急流小流量情况,本文通过水工模型试验解决该工程涡室体型问题。

2 圆弧涡室研究

2.1 圆弧涡室体型特点

该体型涡室(涡室结构包括与引水道末端连接的圆柱体及下部的收缩段)结构比较简单,引水道末端收缩,左边墙顺直与涡室相切,右边墙向左收缩形成引水道的收缩段(收缩率为 63.8%),在涡室内形成旋流沿竖井贴壁旋流而下,而这正是形成涡流的基本条件,涡室结构及连接形式见图 1。

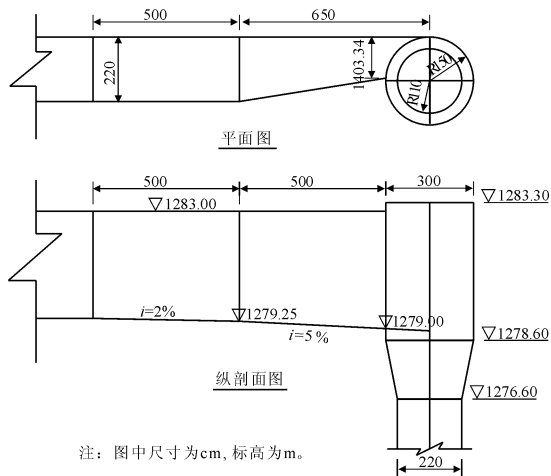


图 1 圆弧涡室简图

圆弧涡室体型结构简单,在实际应用中比较多,尤其是小流量旋流洞的体型对此的选择(圆弧涡室泄流能力较小一些, $Q < 500 m^3/s$),例如我国沙牌

泄洪洞的涡室体型正是圆弧涡室,并且取得了不错的预期效果。由于以前应用皆是缓流小流量的情况,且其流量仍远远大于本试验工况的流量。

2.2 圆弧涡室流态

试验所用模型,按重力和阻力相似准则设计,几何比尺 $\lambda_L = 20$,用有机玻璃制作。试验的最大流量为 $22 m^3/s$,分别选取大、中、小 3 个典型流量进行研究,分别为 $22、15、8 m^3/s$,工况如表 2。

表 2 工况表

流量/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	平均流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	平均水深/ m	Fr
22	7.74	1.41	2.08
15	7.03	1.12	2.12
8	5.93	0.80	2.12

试验结果显示,当流量为 $8 m^3/s$ 时,水深较小,水流比较稳定,涡室起旋效果不好,涡室以下渐变段有水股折冲现象,跌流现象比较明显,竖井内水流分布不均匀;当流量达到 $15 m^3/s$ 时,水深升高,水流也比较稳定,涡室内旋流效果有所好转,初见比较好的旋流形态,竖井内水流依旧分布不均匀,空腔不稳定,存在摇摆;当泄流量达到最大流量 $22 m^3/s$ 时,直槽段水深较大淹没渐变段出口,形成强烈的水跃,水流紊动剧烈,洞内气流冲出,水花飞溅。涡室内水流不稳定,旋流效果不好,所形成贴壁水流的厚度非常不均匀,涡室高度不足,少量水抛洒出去。涡室与竖井接口处发生少量跌流,竖井内水流均匀性差,所形成的贴壁状态不稳定,旋转空腔左右摇摆与竖井形成偏心旋流,如图 2 所示。



图 2 圆弧涡室流态

当流量增加到 $22 m^3/s$ 时,在引水道末端渐变段处急流转变为直槽段接口处的缓流从而发生由明流到满流的过渡,空气被截留在洞顶无法排除,形成迅速变形的空气垫,空气垫在过渡过程中迅速被拉伸、膨胀然后又迅速被压缩,受尾水位及其波动的影响,造

成引水道出口顶部无足够的进气或排气面积,致使进、排气不畅,从而导致水跃的产生,使水流不稳定,出现强烈的紊动,进一步造成竖井旋流不稳及空腔的摇摆。明满流过渡导致的界面水跃使水流在进入涡室时发生强烈地紊动,上部有一个做剧烈回旋运动的表面旋滚,翻腾滚动,掺入大量气泡,旋滚之下是急剧扩散的主流。表面旋滚区和下部主流区的液体质点不断地掺混,水流紊动剧烈变化。由于水位的壅高,使得涡室的边墙高度需要增加,从而增加成本。因此应尽可能地减小壅水的高度。

另外,在流量比较小($5 \text{ m}^3/\text{s}$ 左右)时,在涡室与渐变段相接处发生了跌流现象,部分水流从引水道底板经至涡室时,水流与收缩段边壁脱离,直接从底板跌落到收缩段边壁,水流冲击竖直收缩段(如图3),而这与竖井形成贴壁螺旋水流是相违背的,导致部分水流无法形成贴壁以及贴壁水流的厚度不均。

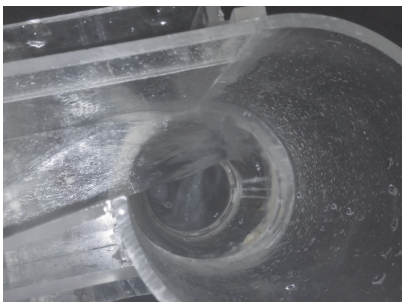


图3 圆弧涡室跌流流态

2.3 改善措施

对出现上述现象常用的改善措施是在引水道末端添加折流坎和涡室边墙添加导流坎。

2.3.1 设置折流坎 通过试验现象可以发现,当泄流量达到最大时,引水道末端形成剧烈紊动的界面水跃,上部壅水不断冲击引水道顶部阻挡水流,而设置折流坎,显而易见会加剧引水道末端处的明满流过渡以及涡室进口处引水道的壅水现象,严重影响进水口泄流量及涡室内水流的流态效果。因此,也就排除了设置折流坎在本试验中的可行性。

2.3.2 设置导流坎 在回转水流与进流的交角上,如果改变回转水流与进流的相交角度,使回转水流不直接冲击进流,壅堵可能会有所减轻^[8]。而导流坎的作用恰恰是,引导涡室的旋转流避开同入流直接相撞,即减小其与入流的交汇角。在现有工程中,设置导流坎的措施比较普遍,且取得了不错效果,例如沙牌泄洪洞。然而,试验结果表明导流坎的作用在本试验中的作用微乎其微,其流态与图2(即未设置导流

坎)几乎一致,并没有对流态的改善起到作用。

2.4 圆弧涡室总结

圆弧涡室应用范围比较广,适用于较多的情况,但对于本工程的急流小流量情况并不适用:①常规加折流坎势必加剧壅水问题,导致更为严重的明满流过渡问题,本工程不宜采纳;②导流坎试验证实不起作用;③当流量小至 $5 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,形成跌流,流态不良。为此放弃圆弧涡室方案。

3 椭圆曲线涡室研究

3.1 椭圆曲线涡室体型特点

该体型涡室结构显著不同,引水道左端通过1/4椭圆曲线与涡室偏心连接,右端通过直线与涡室连接,形成引水道的收缩段,引导水流通过涡室旋流经竖井贴壁旋流而下,引水道末端收缩连接结构见图4。其最大流量可以达到 $3\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ^[7],金沙江溪洛渡大型泄洪洞的研究体型正是该种体型,并且旋流效果良好。相对于本实验的最大流量,无疑差距甚大,因此通过试验验证该体型对本工况的适用性。

3.2 椭圆曲线涡室流态

该体型试验也是按重力和阻力相似准则设计,只是将几何比尺修改,定为 $\lambda_L = 27.778$,依旧采用有机玻璃制作模型。同圆弧涡室一样,选取3个典型流量作为研究对象,对涡室的流态进行研究,其工况表见表2。

当流量为 $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,引水道水流水深较低,水流比较平缓,涡室内旋流效果较好,竖井内水流分布均匀,旋流空腔也比较稳定。当流量增加到 $15 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,引水道水深增加,水流依旧比较平缓,但自左侧曲线边墙起始处水面开始壅高,涡室附近产生小范围的水跃,但并未影响涡室的旋流效果,旋流效果较好,竖井水流也比较均匀。当泄流量达到最大流量 $22 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,水流自洞末渐变段中部开始形成界面水跃,形成明满流过渡。直槽段水深较大,涡室周边水面较高,少量水洒出。

将直槽段和旋流井来流底板的坡度均调整为1:10后,旋流效果明显好转,界面水跃向下游移动,直槽段水深略有下降。进一步在涡室内加导流坎(导流坎自涡室上部浇筑,其下部浇注到涡室进口底板为止,导流坎的圆弧中心,位置如图4所示),壅水处由渐变段移动到直槽段中部,壅水现象大大改善,使得渐变段处的满流消失,直槽段处的水深也大大下降,涡室旋流效果良好,水流均匀,空腔亦比较稳定,见图5。

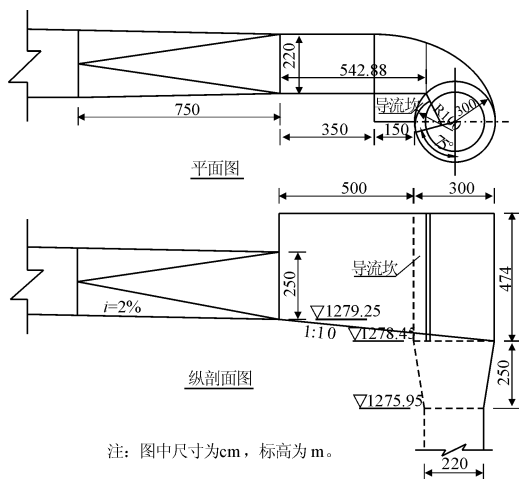


图4 椭圆曲线涡室简图



图5 椭圆曲线涡室流态

3.3 改善措施

涡室进口阻水会引起引水道和涡室中的水面波动或交界面上产生水跃,进而引起涡室中水流出现壅水现象。为了防止此现象的发生,通常采取的措施是加大涡室来流段底坡坡度以及设置导流坎。

3.3.1 加大涡室来流段底坡坡度 产生壅水现象的原因,一方面是由于引水道与涡室接口处的过流面积不够,而加大涡室来流段底坡坡度,可以使涡室过流面积增加,减少壅水发生的可能性。另外,过流面积的大小与引水道水流 Fr 有关, Fr 越大,过流面积相应要增加较多^[8]。而该工况为急流小流量, Fr 为 2.08,远大于缓流小流量情况下的 Fr ,因此,将引水道末端洞底做成陡坡是非常必要的。试验结果也表明,加大底坡坡度之后,流态明显改善,壅水现象得到缓解。

3.3.2 设置导流坎 导流坎的作用在 2.3.2 中已经提到,可以减小入流与旋转回流之间的夹角,从而达到减轻壅水的作用。从试验结果来看,在椭圆涡

室体型中,添加导流坎的确能够减轻壅水,使水流流态变好,壅水现象转好,不再壅至收缩段,仅仅停留在直槽段中部,涡室水流旋流效果较好,水层厚度较均匀,空腔也比较稳定(图 5)。

3.4 椭圆曲线涡室效果分析

虽然椭圆曲线涡室也有进口壅水问题,但试验结果证明,可以通过采取加大涡室来流段底坡坡度以及设置导流坎两种措施以后,有效避免了明满流过度问题,虽有壅水,但不影响工程运行,该体型无论流量多少,特别是流量小至 $8 \text{ m}^3/\text{s}$ 都能形成贴壁螺旋流,流态理想,满足工程需要。

4 结 语

针对急流小流量的工况,研究了圆弧涡室和椭圆曲线涡室两种常用的涡室体型,试验表明圆弧涡室体型不适合本工程的情况,即使加设置导流坎和折流坎也不起作用;椭圆弧涡室体型虽然也有壅水问题,但通过加大涡室来流段底坡坡度及设置导流坎可以有效解决这个问题,各种流量均能形成良好的竖井流态,推荐工程采纳。至于本涡室水面线问题、流速问题、压强问题、掺气减蚀问题有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 阮莉. 涡流式竖井溢洪道研究述评[J]. 云南工业大学学报, 1997, 13(3): 24-29.
- [2] 邵敬东. 漩流式竖井泄洪洞在沙牌工程中的应用[J]. 水电站设计, 2003, 19(4): 61-63+68.
- [3] Hager W H. Vortex drop inlet for super critical approaching flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1990, 116(8): 1048-1054.
- [4] 董兴林, 郭军, 肖白云, 等. 高水头大泄量旋流竖井式泄洪洞的设计研究[J]. 水利学报, 2000, 31(11): 27-33.
- [5] 董兴林, 郭军, 杨开林, 等. 高水头大流量泄洪洞内消能工研究进展[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2003, 1(3): 185-189.
- [6] 程庆迎. 竖井进流水平旋转内消能泄洪洞试验研究与数值模拟[D]. 西安: 西安理工大学, 2004.
- [7] 董兴林. 旋流泄水建筑物[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2011: 14-15+267.
- [8] 王远明. 竖井旋流式泄洪洞体型优化试验研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2010.