

市政排水系统中竖井研究及应用进展

何贞俊¹, 王斌¹, 杨聿¹, 潘文慰¹, 瞿泓²

(1. 珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611; 2. 河海大学 研究生院, 江苏 南京 210000)

摘要: 介绍了国内外市政排水系统中常用的四种竖井形式,即跌落式竖井、旋流式竖井、折板竖井和螺旋坡道竖井,总结了这四种竖井形式的研究及应用进展情况,分析了各形式的优缺点及适用范围,并对今后的竖井研究方向进行了展望。

关键词: 合流制溢流污水; 跌落式竖井; 旋流竖井; 折板竖井; 螺旋坡道竖井

中图分类号: TU99 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2017)10-0049-05

Review on Vertical Shaft in Urban Wastewater Drainage System

HE Zhen-jun¹, WANG Bin¹, YANG Yu¹, PAN Wen-wei¹, QU Hong²

(1. Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China; 2. Graduate School, Hohai University, Nanjing 210000, China)

Abstract: This paper introduces four common types of vertical shafts around the world, e. g. plunge shaft, vortex drop shaft, baffle-drop shaft, and spiral-ramp drop shaft. Characteristics and application scopes of the four kinds of vertical shafts are summarized. Then, the future research development of shafts is also described.

Key words: CSO; plunge shaft; vortex-drop shaft; baffle-drop shaft; spiral-ramp drop shaft

在城市深层排水系统中,将合流制污水 CSO 输送至深层排水管道内的结构,称为竖井消能结构。在国内外市政排水系统中,常见的竖井结构有四种,分别是跌落式、旋流式、折板式和螺旋坡道式消能竖井。安全进水、消能、进气排气、防空化空蚀是竖井运行中存在的主要问题,在其选用和设计中,应对各种竖井的优缺点进行横向评估,并结合当地实际条件进行选择。

1 跌落式竖井

在采用跌落式竖井的排水系统中,水流先流经消力格栅,然后跌入竖井水塘内经过水流的掺混、消能,最后以无压流形式流出,其结构如图 1 所示。

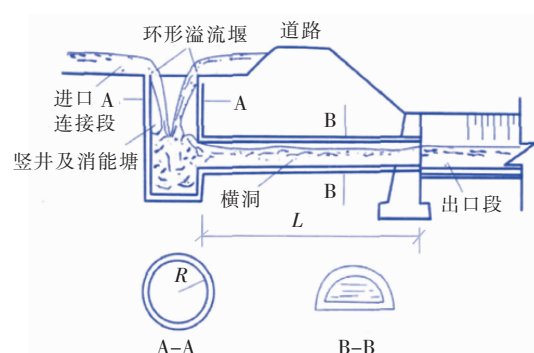


图1 跌落式竖井结构

Fig. 1 Structure of plunge shaft

国内,谭志伟等^[1]结合东北寒区跌水竖井经验,针对该结构在运行中存在的问题,分析原因并提出

出了具体的改进措施。其研究表明,该竖井结构易于设计和施工,适于高差较小且坚实地带的地基,流量多在 $0.5 \sim 160 \text{ m}^3/\text{s}$ 以内,跌差在 $0.5 \sim 9 \text{ m}$ 之间。国外对跌落式竖井的研究主要针对高水头入流竖井,深度高达 $30 \sim 50 \text{ m}$, Ma 等^[2,3] 利用高速摄像机研究了水滴粒径分布和掉落速度,通过照片发现进入竖井的水流大部分碎裂为 2 mm 左右的小水滴,水流平均流速约为 6 m/s ,并基于动量守恒方程建立了数值模型,预测了竖井水流的拖曳气量。进气量是竖井设计中需考虑的主要因素之一,竖井的进气是臭气的主要来源之一, Camino 等^[4] 认为竖井气体堵塞分为两个阶段,初期堵塞和完全堵塞阶段,并对两个阶段水流特征和临界条件进行了研究。

跌落式竖井设计简单、施工方便,且具有抗冻性能好、消能效果好的优点,在我国东北及西北受冰冻破坏严重的地区应用广泛,常用于浅层排水系统或农田水利当中,水头多在 $0.5 \sim 9 \text{ m}$ 之间。国外的深层隧道排水竖井深度可达 $30 \sim 50 \text{ m}$,如芝加哥深层隧道就采用了此种形式的竖井,但曾发生过严重的“气爆”现象^[5],对竖井进水口造成了严重损坏,因此跌落式竖井在设计与运行过程中应重点考虑进气及隧道排气问题。

2 旋流式竖井

旋流式竖井结构(见图2)使进入竖井的水流沿着井壁螺旋下落,利用旋流的离心力作用在井壁上形成正压力,使得结构不易产生空化现象并形成较稳定的空腔,减轻了竖井空蚀现象^[6]。

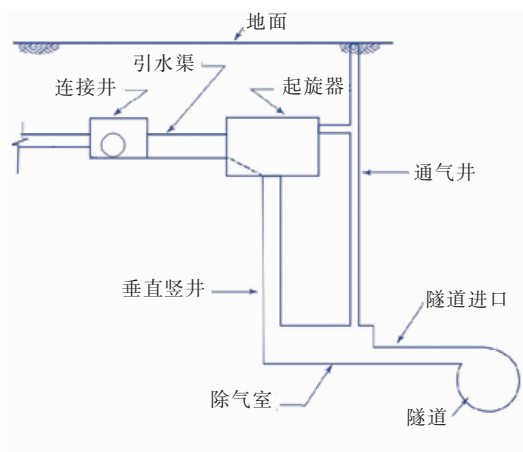


图2 旋流式竖井结构

Fig. 2 Structure of votex-drop shaft

旋流式竖井最早(1947年)由 Driool 在大坝水工结构中提出,1995年 Luahsey 和 Mvasi 将其应用

于城市地下排水系统中并逐步得到推广,排水系统中的竖井流量多在 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 以下。2010年 Hager^[7] 结合以往工程经验,提出了旋流竖井完整的设计方案。Giuseppe 等^[8] 在 Naples 市竖井工程中对其体型进行了优化并解决了超临界流入流问题; Eugene^[9] 在改进竖井体型的研究中提出了可有效减少臭气量的嵌入式螺旋竖井。由于旋流式竖井中水流流速大且夹带气体量多,旋流竖井的防冲蚀、臭气与噪声控制需针对性地进行分析和处理。

国内主要针对高水头、大流量的导流洞改建竖井式溢洪道进行研究,流量最大可达到 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上。夏维洪在20世纪90年代初采用模型试验的方法研究竖井进流水平旋转内消能工的流速和断面能量的沿程变化规律,论证了此种消能工消能率高、空化数较高、空化特性优良的特点。董兴林等^[10,11] 在“九五”攻关课题的研究中,对导流洞改建为旋涡式溢洪道进行了综合研究,系统地研究了其设计方法和水力学特性,提出超临界流的涡室优化体型,给出确定竖井结构尺寸的经验公式。随后,又结合公伯峡水电站改建泄洪洞试验研究,通过收缩墩形成水垫塘的技术,不但缩短了旋流洞的长度,也提高了水平旋流泄洪洞的消能率。牛争鸣等^[12,13] 对竖井进流水平旋转内消能泄洪洞的基本水力特性进行了研究,对壁面压力、泄流特性、流速分布、空化特性等进行了系统分析,并提出了水平旋转泄洪洞设计方法,同时对阻塞内消能工也进行了深入研究。

旋流式竖井过流能力强,适用范围广,最大过流流量可达 $1000 \text{ m}^3/\text{s}$,低水头的排水系统和高水头的水工溢洪道均可使用。旋流竖井占地面积小,适用于坚实地基区域,但同时由于过流流量大,夹带的空气较多,集中消能带来的冲蚀、臭气、噪声与震动问题,须设置除气室、通风井等。

不论是城市排水管网还是水工溢洪道,在设计建设中应重点考虑竖井空蚀现象与隧道排气,尽可能减少进入隧道的气量,进行针对性研究和处理。

3 折板竖井

折板消能竖井最早出现在国外,1914年美国俄亥俄州的克利夫兰市市政污水管道就使用了折板跌落竖井结构的排水系统。这些早期的折板设施由圆形竖井和半圆形折板构成。由于初期设计经验不足,工程运行后发生了水流流态不稳定、检修困难等一系列问题。

近代的折板竖井对其结构进行了改进,由中间隔离板把竖井分隔成“干区”和“湿区”两部分,水流进入竖井“湿区”后,经第一层折板承接跌落至第二层折板上,经过水流的掺气、跌落、碰撞、摔碎后,紊动水流调转方向,继续向下一层折板跌落,最终达到消能的效果。折板竖井结构如图3所示。

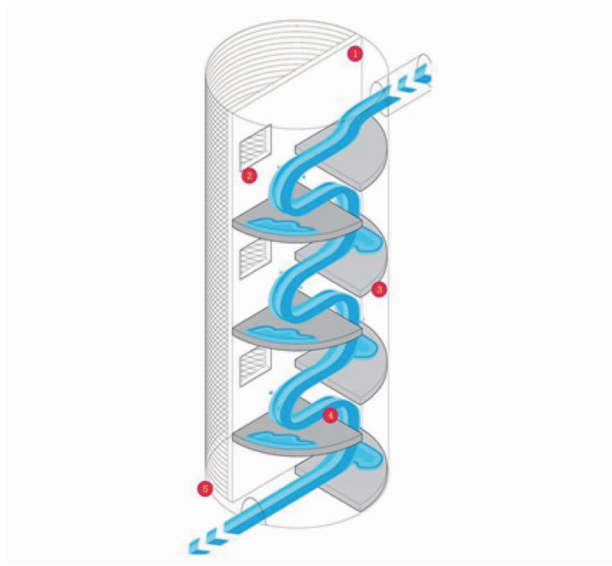


图3 折板竖井结构

Fig. 3 Structure of baffle-drop shaft

Margevicius 等^[14]对 The Euclid Creek Tunnel (ECT)项目4号竖井进行了物理模型实验,验证其过流能力、折板间距、通气孔位置和进出口角度。实验表明,当中隔板位置在 $D/2$ 时,直径为 7.6 m、折板间距为 1.7 m 的竖井的最大过流流量为 $8.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。Odgaard 等^[15]通过物理模型试验,结合自由跌流理论推导出折板上的水流理论跌落距离公式,并结合 Cleveland 市及 York 市的优化方案,给出推导折板竖井理论设计方法,2011 年在 Fall Creek/White River 隧道系统的折板消能竖井设计 18 个流量范围为 $1.7 \sim 12.8 \text{ m}^3/\text{s}$ 的折板消能竖井^[15]中进行了应用。

美国 York 镇及 Ohio 州均有应用折板竖井的实例^[15],但涉及流量均不超过 $13 \text{ m}^3/\text{s}$,我国第一条深层隧道排水系统——广州深层隧道排水系统东濠涌试验段,同样采用了折板竖井^[16,17],最大流量达到 $32 \text{ m}^3/\text{s}$ 。笔者所在课题组还研究了折板竖井的最大过流能力(见图4)及稳定消能的约束条件(见图5),建立了折板竖井的消能效果和输水能力与竖井直径、折板间距、中隔板位置的相关关系^[16],同时分

析了不同进水、出水口角度对水流流态及进气量的影响,提出了如图6所示的折板竖井设计流量曲线,并建立了完善的折板竖井设计方法^[17],其中 $F_D = (\frac{Q^2}{D^5 g})^{1/3}$, $T = \frac{(h-t)}{D}$ (Q 为竖井设计入流量, D 为竖井直径, h 为相邻两层折板间距, t 为折板厚度)。

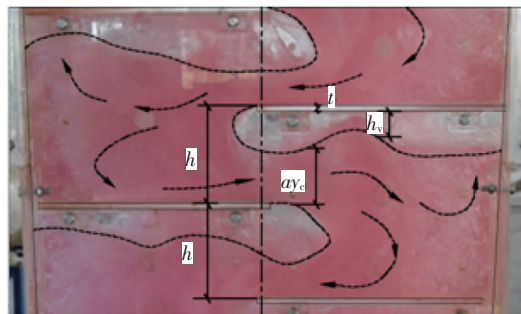


图4 最大过流流量工况

Fig. 4 Maximum overcurrent critical conditions

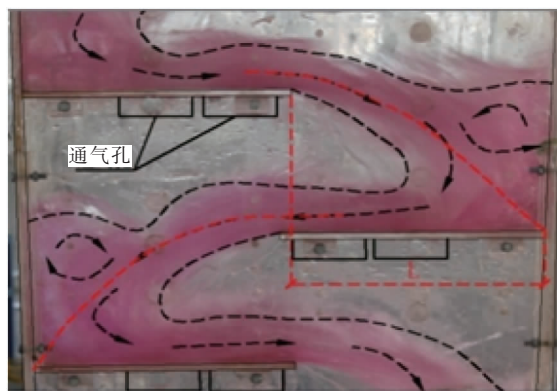


图5 稳定消能临界工况

Fig. 5 Stable energy dissipation flow conditions

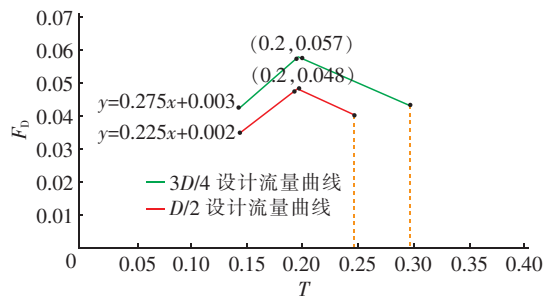


图6 设计流量曲线

Fig. 6 The curve of design flow

现有的折板竖井工程最大的设计流量为 $32 \text{ m}^3/\text{s}$,适用水头范围广,其大尺寸竖井在深层隧道中也可用于储水,由于其消能位置分散,水流流速较低,并不会出现大水头竖井里常见的冲蚀、噪声等问题。但由于竖井采用往返跌落的水流形式,折板竖

井的尺寸较大,相同设计流量下折板竖井的直径约为旋流式竖井的4~5倍。此外,折板竖井对地基要求较低,软地基地区也可使用;所需场地较大,可同时作为进出隧道机械通道。现阶段的折板竖井都是基于物理模型试验做出来的,且正态模型试验无法定量模拟气体流量的变化规律,缺乏气流相关研究,今后可采用水动力学软件进行模拟,研究相关气流变化规律。目前的研究内容亦缺乏对竖井调度方式的研究。

4 螺旋坡道竖井

螺旋坡道竖井是在竖井内布置螺旋下降的坡道,使水流沿坡道旋转下落并增大水流流程,下落过程中通过水体与井壁间的摩擦作用降低水流流速,消耗水头能量。其结构如图7所示。

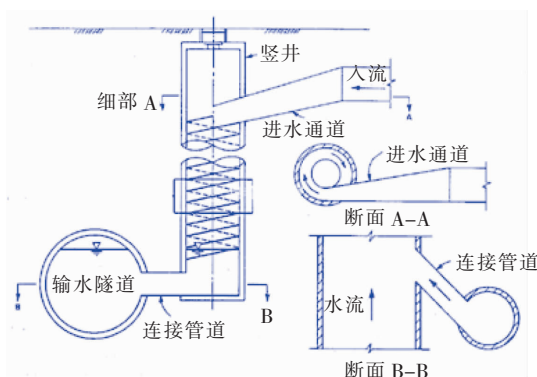


图7 螺旋坡道竖井结构

Fig. 7 Structure of spiral-ramp drop shaft

1988年Kennedy等对螺旋坡道竖井进行了水力学分析,证明了螺旋坡道竖井具有消能率高、通气量较小的优点。第一座Phoenix市竖井的建成也表明螺旋坡道竖井相对于直落式和旋流式竖井造价更低。随着竖井流量和深度的加大,气体对竖井运输效果的影响也逐渐加大,日本Shiro Tamural等^[18]对高水头下的入水角度和控气措施进行了分析,并证实了竖井排气系统的效果;针对回水冲击上游管道,验证了导水墙入流法。还有学者通过物理模型实验,得出入流管测压管水头与流量关系式,并将其应用于切向螺旋入水口的旋流竖井的消能率的经验计算公式。1999年Toda等研究了旋流竖井消能规律和流通空气量,提出了竖井水力设计方法。

目前日本已修建较多的螺旋坡道式竖井,施工及运行经验表明,螺旋坡道式竖井相对于旋流竖井具有进气量小及效能率高的优点,且工程造价也较低。截至目前已建的螺旋坡道式竖井最大深度可达84m,竖井直径达3m,但水流流量均较小,缺乏大流量的相关研究;同时针对大流量下易产生的空蚀、冲蚀现象值得研究。

5 四种竖井形式的比较

上述四种竖井结构的优缺点及其适用范围对比如表1所示。竖井安全进水、消能及防止空化空蚀是竖井的主要问题,市政排水系统中对竖井进行选型时,需根据当地水头、流量、占地面积等综合因素进行对比分析,选取最适用竖井。

表1 各竖井优缺点对比

Tab. 1 Comparison of advantages and disadvantages for different drop shafts

项 目	优点	缺点	适用范围
跌落式竖井	设计施工简单;消能效果好;抗冻性好	进气量大	低水头浅层隧道
旋流式竖井	过流流量大,开挖面积小	对地基要求较高,建设成本较高,通气量、噪声较大	大流量、坚实地基的深层隧道
折板竖井	对地基要求低;施工难度小,费用低;冲蚀、噪声问题较小	占地面积大	小流量、地基较软的隧道
螺旋坡道竖井	造价低;通气量小,效能率高	过流流量较小	小流量、地基较软的隧道

6 结语

结合目前城市排水系统中竖井的发展和研究现状,认为今后对竖井的相关研究可按以下几个方向进行:

① 目前的竖井研究都采用重力相似的物理模型,该模型可以很好地模拟水流的水动力学特性,但无法定量模拟气体流量,现有的气流分析都是通过重力相似模型得出实验数据,再乘以换算系数的方

式匹配原型气流量。今后的研究可通过运用水动力学软件(CFD),模拟分析竖井结构中的气体流通特性。

② 随着城市化的不断加快,现有的排水管网系统已无法满足城市雨洪排除需求,而城市深层排水系统可有效解决城市内涝问题。今后的研究可进一步结合深层排水系统,研究竖井结构在深层排水系统中运行的相关问题。

③ 研发在城市大暴雨条件下,深层排水系统中多个竖井的联合调度方式。

参考文献:

- [1] 谭志伟. 竖井式跌水水力计算的探讨[J]. 中国农村水利水电, 2008, (2): 92-94, 97.
- [2] Ma Y, Zhu D Z, Rajaratnam N. Flow inside a tall plunging dropshaft [A]. Proceedings of the 36th IAHR World Congress [C]. The Hague, the Netherlands: IAHR, 2015.
- [3] Ma Y, Zhu D Z, Rajaratnam N. Air entrainment in a tall plunging flow dropshaft [J]. J Hydraul Eng, 2016, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001181.
- [4] Camino G A, Rajaratnam N, Zhu D Z. Choking conditions inside plunging flow drop shafts [J]. Can J Civil Eng, 2014, 41(7): 624-632.
- [5] Wright S J, Lewis J W, Vasconcelos J G. Geysering in rapidly filling storm-water tunnels [J]. J Hydraul Eng, 2011, 137(1): 112-115.
- [6] 牛争鸣, 洪钢, 谢小平, 等. 导流洞改建为旋流式内消能泄洪洞的研究和实践——以公伯峡水电站为例 [J]. 水利水电科技进展, 2007, 27(1): 36-41.
- [7] Hager W H. Wastewater Hydraulics (2nd ed) [M]. Berlin: Springer, 2010.
- [8] Giuseppe Del G, Corrado G. Vortex dropshaft retrofitting: Case of Naples city (Italy) [J]. J Hydraul Res, 2011, 49(6): 804-808.
- [9] Eugene M N. Aeration performance of vortex flow insert assemblies in sewer drop structures [A]. Proceedings of the Water Environment Federation [C]. US: WEF, 2008.
- [10] 董兴林, 杨开林, 冯宾春, 等. 旋流竖井式泄洪洞关键技术问题研究 [J]. 水利水电技术, 2006, (5): 37-40.
- [11] 董兴林, 杨开林, 王涛, 等. 公伯峡水电站旋流泄洪洞研究总结 [J]. 水力发电, 2008, (1): 75-78.
- [12] 牛争鸣, 杨健, 丁浩铎, 等. 旋流阻塞与旋流扩散复合式内消能泄洪洞的水力设计 [J]. 长江科学院院报, 2010, 27(2): 24-30.
- [13] 安丰勇, 付波, 牛争鸣, 等. 阻塞对水平旋流泄洪洞水力特性的影响 [J]. 西安理工大学学报, 2008, 24(2): 210-214.
- [14] Margevicius A, Schreiber A, Switalski R, et al. A baffling solution to a complex problem involving sewage drop structures [A]. Proceedings of the Water Environment Federation [C]. US: WEF, 2009.
- [15] Odgaard A J, Lyons T C, Craig A J. Baffle-drop structure design relationships [J]. J Hydraul Eng, 2013, doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000761.
- [16] 王斌, 邓家泉, 何贞俊, 等. 折板跌落式竖井设计约束条件研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2015, (5): 363-367, 374.
- [17] 王斌, 邓家泉, 何贞俊, 等. 折板竖井结构优化试验研究 [A]. 第二十七届全国水动力学研讨会文集(上册) [C]. 北京: 海洋出版社, 2015.
- [18] Shiro T, Osamu M, Yoshikawa S. Helicoidal-ramp type drop shaft to deal with high head dropworks in manholes [A]. Proceedings of the Water Environment Federation [C]. US: WEF, 2010.



作者简介: 何贞俊(1979-), 男, 湖北潜江人, 工学硕士, 高级工程师, 主要从事水工建筑物及水力学方面研究。

E-mail: 278273213@qq.com

收稿日期: 2016-09-10