

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.22.014

# 市政工程中不同出流方式下的多种井尺寸计算

熊婉丽, 黄凡源, 曹进, 蔚成亮, 张玉雪, 王孝, 林振兴  
(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

**摘要:** 市政工程中配水井、跌水井等构筑物应尽量避免水流撞击井壁,并以此作为确定井最小尺寸的依据之一。井内水流射程与水流的出流方式、运动状态等有关。通过分析自由溢流、有压出流对井体尺寸的要求,得出:自由溢流可根据实用堰堰面曲线设计公式计算水流跌落水平距离;有压出流可根据能量方程计算水流出口流速,以平抛运动公式计算水流水平距离;对于折板竖井,根据相关试验的建议取值,推导出仅与设计流量相关的经验公式,可从满足通气要求及避免水流撞击井壁两方面确定竖井尺寸。

**关键词:** 配水井; 自由溢流; 有压流; 折板竖井

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2021)22-0079-05

## Calculation of Various Well Sizes under Different Outflow Modes in Municipal Engineering

XIONG Wan-li, HUANG Fan-yuan, CAO Jin, YU Cheng-liang, ZHANG Yu-xue,  
WANG Xiao, LIN Zhen-xing

(Central and Southern China Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd.,  
Wuhan 430010, China)

**Abstract:** In municipal engineering, water distribution well, falling well and other structures should try to avoid water hitting the well wall, and it is one of the criteria to determine the minimum size of the well. The range of the water flow in the well is related to the outflow mode and motion of the water flow. The requirements for the size of the well under free overflow and pressurized outflow were analyzed. For free overflow, the horizontal distance of the water drop was calculated according to the practical weir surface design formula. For pressurized outflow, the water outlet velocity was calculated according to the energy equation, and the horizontal distance of the water flow was calculated by the horizontal throwing motion formula. For a baffle-drop shaft, the empirical formula related only to the design flow rate that was derived according to the recommended value of the relevant tests, and the shaft size was determined from the two aspects of meeting the ventilation requirements and avoiding the impact of water flow on the shaft wall.

**Key words:** water distribution well; free overflow; pressure flow; baffle-drop shaft

市政工程中出于检修、启闭、维护系统安全稳定运行等目的需要设置多种井,例如检查井、配水井、跌水井等。检查井一般可根据设备安装需要的空间确定井尺寸,对于配水井、跌水井等井内水流有可能

撞击井壁的情形,还应从保证结构的安全稳定方面计算井的最小尺寸,避免水流直接冲击井壁。井内水流射程与其流速等运动状态有关,笔者分析了配水井自由溢流、跌水井有压流及折板消能跌水井对

井尺寸的要求,为井尺寸的确定提供一定依据。

### 1 配水井自由溢流

城镇污水处理常采用典型的三级处理机制。一级为预处理,主要包括格栅和初次沉淀;二级处理为主体,多以氧化沟工艺为主;三级为深度处理。受地形、用地红线等多种因素限制,污水处理厂实际设计过程中,二级处理的生物池与二沉池数量往往不一致,若配水不均,部分构筑物可能出现超负荷运行状态,而另一些构筑物则未充分发挥作用。

为了保证生物池出水可均匀地配给二沉池,一般在生物池与二沉池之间设置二沉池配水井。污水在配水井中达到一定容量后,向下一级构筑物溢流。从结构安全方面考虑,避免水流直接撞击井壁是确定配水井尺寸的重要条件之一,因此有必要计算溢流的最大水平距离。

根据水流条件判断,配水井内溢流属于堰后自由出流。根据堰坎厚度  $\delta$  和堰上水头  $H$  的比值将堰分为薄壁堰、实用堰和宽顶堰。具体为:当  $\delta/H \leq 0.67$  时,为薄壁堰;当  $0.67 < \delta/H \leq 10$  时,为实用堰;当  $\delta/H > 10$  时,则为宽顶堰。配水井溢流一般为薄壁堰溢流。

矩形薄壁堰流具有稳定的流量和水头关系。巴赞(H. E. Bazin)于1888年—1898年期间做了大量关于无侧收缩自由出流的薄壁堰试验,根据试验资料,薄壁堰溢流水舌形状具有较为精准的观测结果,表面轮廓见图1。当水流质点越过堰顶时,由于惯性,水舌下缘在距离堰壁  $0.27H$  处到达最高点,高出堰顶  $0.112H$ ;在距堰壁  $0.67H$  时,水舌下缘与堰顶同高。由此可见,薄壁堰厚度变化时不改变水舌形状。

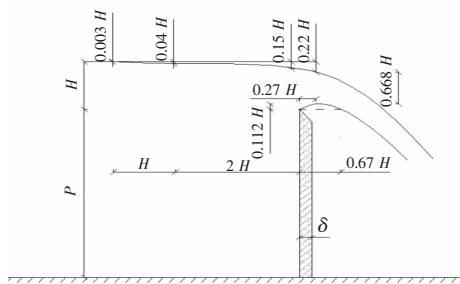


图1 Bazin薄壁堰示意

Fig. 1 Schematic diagram of the Bazin thin-walled weir

工程上应用广泛的曲线型实用堰,其外形正是根据矩形薄壁堰自由溢流水舌缘曲线设计。为避免

产生负压,同时又具有较大的过水能力,实用堰的堰面曲线与薄壁堰水舌下缘刚好吻合,因此可根据此堰面曲线形状计算薄壁堰自由出流的最大水平距离。

根据WES剖面堰设计公式,以矩形薄壁堰水舌最高点作为原点,下游曲线有如下经验方程:

$$\left(\frac{x}{H_w}\right)^{1.85} = \frac{1.809y}{H_w} \quad (1)$$

式中: $x$ 、 $y$ 分别为水流从最高点跌落的水平和竖直距离,m; $H_w$ 为薄壁堰堰顶水头,m。

应用式(1)计算配水井内自由溢流的最大水平距离,进而确定配水井尺寸。

应用实例:恩施市某供水厂一、二期总供水规模为  $22 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,自用水系数为0.05。则设计流量  $Q = 220\,000 \times 1.05 / (24 \times 3\,600) = 2.67 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

设计最大溢流水位为461.05 m(黄海高程,下同),堰顶高程为460.65 m,薄壁堰厚度为0.4 m。则该配水井堰流堰上水头  $H = 7.05 - 6.65 = 0.4 \text{ m}$ ,堰上水流流速较小,不考虑行近流速水头,最大溢流水位  $H_w = 0.4 \text{ m}$ ,下跌深度  $y = 461.05 - 451.30 = 9.75 \text{ m}$ 。代入式(1),计算得此时水流跌落水平距离  $x = 3.1 \text{ m}$ 。考虑到水舌具有一定厚度,且经验公式原点距离堰壁  $0.27H$ ,因此水舌上缘跌落距离取3.5 m。综上,为避免水流冲刷侧壁,设计溢流渠宽为4 m。

### 2 跌水井有压流

竖井式跌水工程是实现竖向输水的重要工程之一,因其良好的抗冻和消能性能,在严寒地区以及城镇输水管网应用广泛。在市政排水工程中,为了保证流态稳定和运行安全,当管道跌水水头大于2.0 m时,应设跌水井。

竖井式跌水工程一般包括进水口段、竖井和出水口段,进水口段可能为管道进水或是环形堰流等形式。水流从竖井进口跌落,经井底水垫消能后经出水口流出。从结构安全和稳定的角度考虑,一般应尽量避免水流直接撞击井壁,以此作为确定跌水井尺寸的必要条件之一。

对于水流以薄壁堰流形式落入跌水井中的情形,水流射程计算方式可参考WES剖面堰设计公式,此外,水流可能以有压流的方式跌入井中。雨、污水管道一般为重力流管道,与雨、污水管道相连的跌水井多以无压流的形式承接水流,然而,当雨水管



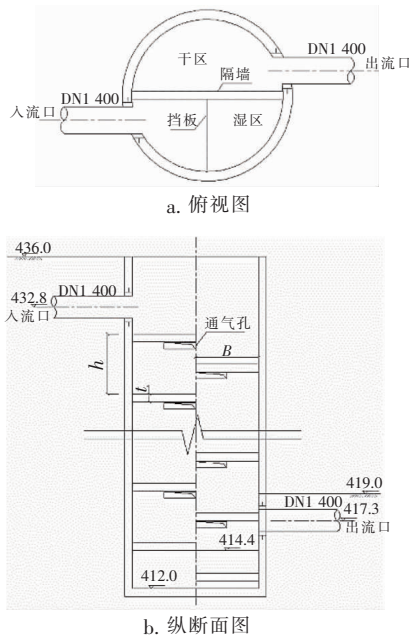


图3 折板竖井示意

Fig. 3 Schematic diagram of a baffle-drop shaft

竖井中间由一隔墙将其一分为二,划分为干区和湿区。干区可使检修人员通过,水流则流经湿区各级挡板通过竖井<sup>[3]</sup>。为了平衡湿区气压,在干湿区之间的分隔墙上设置通气孔。每一级挡板为1/4圆交替布置于竖井中<sup>[4]</sup>。

若通过竖井的流量过大,折板竖井结构将充当液节节流阀,流量无法顺畅跌落。当流量达到竖井过流能力时,挡板上水流恰好达到临界深度 $y_c$ 。根据水力学中对临界深度的定义,临界水深为给定流量下,同一断面上对应于断面比能最小值的水深。 $y_c$ 满足:

$$1 - \frac{\alpha Q^2 B_k}{g A_k^3} = 0 \quad (6)$$

式中: $Q$ 为临界水深对应的流量; $A_k$ 、 $B_k$ 分别为此时过水断面面积和宽度。

由式(6),得临界深度:

$$y_c = \left[ \frac{Q^2}{(\alpha_1 B)^2 g} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

式中: $\alpha_1 B$ 为有效过水宽度, $\alpha_1 < 1$ 。

折板竖井设计中,为保障水流顺利通过,水流上边缘和上级挡板底部之间需要保证一定空间,称为通气高度 $h_v$ 。为满足通气要求,对挡板上水流深度有如下要求:

$$\alpha_2 y_c \leq h - t - h_v \quad (8)$$

式中: $h$ 为上下两级挡板间距; $t$ 为挡板厚度; $\alpha_2$ 为水流的膨胀系数。

将 $y_c$ 表达式代入式(8),得到:

$$\left( \frac{Q^2}{B^5 g} \right)^{\frac{1}{3}} \leq \frac{\alpha_1^{\frac{2}{3}}}{\alpha_2} \cdot \frac{h - t}{B} - \frac{\alpha_1^{\frac{2}{3}}}{\alpha_2} \cdot \frac{h_v}{B} \quad (9)$$

与式(5)类似,水流由上一级挡板射出,落到下级挡板上的水平距离表述如下:

$$L = v_c \sqrt{\frac{2(h + \frac{1}{2}\alpha_2 y_c)}{g}} \quad (10)$$

$$v_c = \frac{Q}{\alpha_1 B y_c} \quad (11)$$

选择折板长度 $B = D/2$ , $D$ 为折板竖井井径,为了使水流仅撞击挡板的有效宽度,设置 $L$ 不超过挡板长度的3/4,则有 $L \leq 3/4 B$ 。

将式(7)代入式(11),得: $v_c = (\frac{Qg}{\alpha_1 B})^{\frac{1}{3}}$ ,式(10)

左右同时平方,得:

$$L^2 = v_c^2 \cdot \frac{2(h + \frac{1}{2}\alpha_2 y_c)}{g} = v_c^2 \cdot \frac{2h + \alpha_2 y_c}{g} \quad (12)$$

将 $v_c = (\frac{Qg}{\alpha_1 B})^{\frac{1}{3}}$ 、式(7)代入式(12)中,得:

$$L^2 = \left( \frac{Qg}{\alpha_1 B} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{2h + \alpha_2 y_c}{g} = \left( \frac{Qg}{\alpha_1 B} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{2h}{g} + \left( \frac{Qg}{\alpha_1 B} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot \frac{\alpha_2}{g} \left[ \frac{Q^2}{(\alpha_1 B)^2 g} \right]^{\frac{1}{3}} = \textcircled{1} + \textcircled{2} \quad (13)$$

其中:

$$\begin{aligned} \textcircled{1} &= \left( \frac{Qg}{\alpha_1 B} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{2h}{g} = \frac{Q^{\frac{2}{3}}}{\alpha_1^{\frac{2}{3}} B^{\frac{2}{3}} g^{\frac{1}{3}}} 2h = 2 \frac{Q^{\frac{2}{3}}}{B^{\frac{2}{3}} g^{\frac{1}{3}}} h B \frac{1}{\alpha_1^{\frac{2}{3}}} \\ &= 2 \left( \frac{Q^2}{B^5 g} \right)^{\frac{1}{3}} h B \frac{1}{\alpha_1^{\frac{2}{3}}} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \textcircled{2} &= \left( \frac{Qg}{\alpha_1 B} \right)^{\frac{2}{3}} \frac{\alpha_2}{g} \cdot \left[ \frac{Q^2}{(\alpha_1 B)^2 g} \right]^{\frac{1}{3}} = \frac{Q^{\frac{2}{3}} g^{\frac{2}{3}}}{\alpha_1^{\frac{2}{3}} B^{\frac{2}{3}} g} \frac{\alpha_2}{g} \\ &= \frac{Q^{\frac{2}{3}}}{\alpha_1^{\frac{2}{3}} B^{\frac{2}{3}} g^{\frac{1}{3}}} = \frac{Q^{\frac{4}{3}}}{B^{\frac{4}{3}} g^{\frac{2}{3}}} \frac{\alpha_2}{\alpha_1^{\frac{2}{3}} \alpha_1^{\frac{2}{3}}} = \left( \frac{Q^2}{B^5 g} \right)^{\frac{2}{3}} B^2 \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_1^{\frac{2}{3}} \alpha_1^{\frac{2}{3}}} \end{aligned} \quad (15)$$

将式(14)、(15)代回式(13)中,得:

$$L^2 = 2 \left( \frac{Q^2}{B^5 g} \right)^{\frac{1}{3}} h B \frac{1}{\alpha_1^{\frac{2}{3}}} + \left( \frac{Q^2}{B^5 g} \right)^{\frac{2}{3}} B^2 \frac{\alpha_2}{\alpha_1^{\frac{2}{3}} \alpha_1^{\frac{2}{3}}} \leq \frac{9}{16} B^2 \quad (16)$$



Odgaard 等<sup>[5]</sup>通过一系列模型试验,给出建议工况下各参数取值为: $\frac{\alpha_1^{\frac{2}{3}}}{\alpha_2} = 0.55$ ,  $\frac{h_v}{B} = 0.1$ ,  $\frac{h-t}{B} = 0.39$ ,以使得井内通气良好,并留有合理的安全余量,防止折板底面出现负压。

将以上参数建议取值代入式(9),得到:

$$B \geq 1.906Q^{0.4} \quad (17)$$

可据此确定折板竖井尺寸。同时,在折板竖井设计流量、尺寸(包括折板间距 $h$ 、宽度 $B$ 等)均已知的情况下,可由式(16)判断水流是否会撞击井壁( $\alpha_1 < 1$ )。

应用实例:恩施某项目拟于跌水深度超过5 m处设置消能装置,跌水消能井设计流量为 $5.1 \text{ m}^3/\text{s}$ ,跌水高度分别为15.0 m和9.0 m,由于用地红线限制,无法满足传统消能井建设,拟采用折板竖井进行消能。

将 $Q = 5.1 \text{ m}^3/\text{s}$ 代入式(17),计算得 $B \geq 3.66 \text{ m}$ ,取 $B = 4 \text{ m}$ ,设计通风口高度 $h_v = 0.4 \text{ m}$ 。假设折板厚度 $t = 0.5 \text{ m}$ ,则折板间距 $h = 2 \text{ m}$ 。

将以上设计尺寸重新代入式(9)进行检验,左边 $= 0.137$ ,右边 $= 0.15125$ ,因此式(9)成立,该竖井满足通气要求。

将折板竖井设计尺寸代入式(16), $(\frac{Q^2}{B^5 g})^{\frac{1}{3}} = (\frac{5.1^2}{4^5 \times 9.8})^{\frac{1}{3}} = 0.1374$ ,  $\frac{\alpha_1^{\frac{2}{3}}}{\alpha_2} = 0.55$ ,则有: $L^2 = 2 \times 0.1374 \times 2 \times 4 \times \frac{1}{\alpha_1^{\frac{2}{3}}} + 0.1374^2 \times 4^2 \times \frac{1}{0.55} \times \frac{1}{\alpha_1^{\frac{2}{3}}} = 2.748 \frac{1}{\alpha_1^{\frac{2}{3}}}$ ,实际工程中, $\alpha_1 < 1$ 且接近1,由文献[5], $\alpha_1 > 0.6$ ,则 $L^2 = 2.748 \frac{1}{\alpha_1^{\frac{2}{3}}} < 3.863 < \frac{9}{16}B = 9$ ,因此水流不会冲击井壁。

对于通气口的设置,试验表明通气口应尽可能靠近折板下表面,并远离井壁,当通气口距离井壁不小于 $B/2$ 时,其形状和位置不会影响 $h_v$ 的取值。

#### 4 结论

从水流运动状态的角度分析了配水井自由溢流、跌水井有压流及折板消能跌水井对井尺寸的要求,为市政工程中各种井的尺寸确定提供了依据,主

要结论如下:①配水井自由溢流一般可按薄壁堰流考虑,根据矩形薄壁堰自由溢流水舌形状确定水流水平射程;②跌水井有压流可参考有压管流,由进出口能量方程确定管道出口流速,水流自出水口射出后按平抛运动计算其跌落的水平距离;③折板竖井内,水流在折板间往复运送至井底,通过折板间的跌落、掺气和冲撞达到消能目的。按折板边缘临界流态确定折板上水深、流速,从通气要求和水流不碰撞井壁两方面确定折板竖井尺寸。

#### 参考文献:

- [1] MARGEVICIUS A, SCHREIBER A, SWITALSKI R, et al. A baffling solution to a complex problem involving sewage drop structures [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2010(6): 1-9.
- [2] 王志刚,张东,张宏伟. 折板消能竖井水力转换特征研究[J]. 水利水电技术, 2015, 46(12): 44-47, 52. WANG Zhigang, ZHANG Dong, ZHANG Hongwei. Study on hydraulic transition characteristics of baffle-drop shaft [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2015, 46(12): 44-47, 52 (in Chinese).
- [3] 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, 13(5): 363-367, 374. WANG Bin, DENG Jiaquan, HE Zhenjun, et al. A study on design constraints for baffle-drop shaft structure [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2015, 13(5): 363-367, 374 (in Chinese).
- [4] STIRRUP M, MARGEVICIUS T, HRKAC T, et al. A baffling solution to sewage conveyance in York Region, Ontario [J]. Proceedings of the Water Environment Federation, 2012(4): 74-90.
- [5] ODGAARD A J, LYONS T C, CRAIG A J. Baffle drop structure design relationships [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(9): 995-1002.

作者简介:熊婉丽(1994-),女,湖北武汉人,硕士,助理工程师,主要从事城市防洪及河道综合治理设计与研究工作。

E-mail: xiongwani09@163.com

收稿日期:2020-09-24

修回日期:2021-01-07

(编辑:孔红春)