

# 排水系统中跌流竖井进水口结构优化的方案比选

芦三强

新疆维吾尔自治区水利水电科学研究院 新疆 乌鲁木齐 830049

**【摘要】**：跌流竖井广泛应用于市政及水利工程排水系统中，其进水口型式对井内的水气两相分布有较大的影响，文中梳理了目前关于跌流竖井进水口的几种结构优化型式，分析了各自的优缺点，并选取了进气量和气压两个关键指标对六种进水口型式进行了定性分析，结果表明：优化结构6在减少进气量和降低井内负压方面效果最为明显，且施工简单，不影响内部过流，可推广使用。研究结果可为跌流竖井进水口结构优化选型提供参考。

**【关键词】**：跌流竖井；进水口；方案比选；进气量；气压分布

## Scheme comparison and selection of structural optimization of the plunging flow dropshaft inlet in drainage system

LU San-qiang

**Abstract:** The plunging flow dropshaft is widely used in the drainage system of municipal and water conservancy projects. The type of water inlet has a great influence on the flow pattern and the distribution law of water and air in the well. In this paper, the structural optimization type of the water inlet of the dropshaft is sorted out, and their advantages and disadvantages are analyzed. Two typical indexes of air intake and air pressure are selected to compare and analyze the six types of water inlet dropshafts. The results show that the optimized structure 6 has the most obvious effect in reducing the air intake and reducing the negative pressure in the well, and the construction is simple and does not affect the internal flow, which can be widely used. The research results can provide a reference for the optimal selection of the intake structure of the drop-flow shaft.

**Keywords:** plunging flow dropshaft; water inlet; structural optimization selection ; intake air volume ; air pressure distribution.

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.088

### 0 引言

跌流竖井主要用于将高处的水流输送到低处的排水系统中，其结构简单，抗冻和消能效果较好，是城市排水系统中应用最广泛的竖井结构之一<sup>[1-3]</sup>。相较于旋流竖井和折板竖井，跌流竖井进水管与井体呈“T”形（夹角为90°）连接<sup>[1]</sup>，水流从进水管末端以水舌状自由跌落，在小流量下，水流主要从竖井中央下落，此时水流对井内气体有向下的拖曳力，井内呈现负压，在压差作用下井外空气会进入井内，但此时井内气体流通相对较为顺畅<sup>[4-7]</sup>；在大流量下，水舌会在较大流速下撞击到井壁，进水口上方气体流向井体下方的空间自然会被水舌束窄，并且入流量越大，气体过流空间会越小，于是进水管下方区域会由于补气不足而导致负压越来越大，另一方面水舌撞击井壁后水流变得破碎并向四周扩散，在下落过程中其与空气的接触面积会显著增加，导致更多的气体被拖曳到井底<sup>[4-7]</sup>，随后这些气体会聚集在竖井底部，并且随水流输送到下游的排水（排污）系统中，过程中会引发相关安全和环境问题，例如井喷、管爆和排污系统中臭气逸散等<sup>[8-10]</sup>。

显然，跌流竖井进水口的结构优化是十分必要的，其在改

善竖井内部水流条件、减少井内吸气量和降低负压等方面都发挥着重要作用，同时也在保障排水管网安全稳定运行方面具有重要的意义。目前已有部分研究人员对跌流竖井进水口做了大量的结构优化，但其效果缺乏统一分析，于是文中梳理了跌流竖井进水口的6种结构优化型式，然后分析了各自的优缺点，并依据气压、气量2个关键指标选取相对最优结构，以便为后续实际工程应用和选型提供参考。

### 1 进水口结构优化型式

跌流竖井进水口结构优化的核心目的是改善流态、保证井内气体顺畅流通，及时为竖井下方的负压区域通气，防止井内负压不断增大和“吸入”外界更多气体。优化方法可总结为两类，一类是竖井内部的优化，另一类是竖井外部的优化，文中所述的结构优化均是在同一结构的基础上改进的。

#### 1.1 内部结构优化

内部结构优化的主要思路一方面是在水舌流动的路径上设置阻隔物，从而为水舌上方气体向井下流通创造流通空间，另一方面是将竖井底部的气体引导回流至进水口处，以便

平衡负压，具体结构如图1所示。图1(a)中在竖井中央放置了一个矩形隔板，将井体分为过水侧和过气侧，形成了干湿分离的环境，靠近进水管的一侧用于过水，另一侧用于气体交换，在气压梯度作用下，竖井底部的气体会进入过气侧，然后通过矩形隔板顶部回流至进水管处，从而达到了平衡该区域负压的目的，这样的确可以减少进入进气管和下游排水系统中的气量<sup>[1]</sup>，但过水侧空间变小后，在相同入流量下，由于水舌的影响反而会引起更大的负压。图1(b)是图1(a)的改进结构，其工作原理与图1(a)中结构一致，不同之处是矩形隔板顶部在进水管下方以及隔板更靠近进水管，该结构规避了图1(a)中的部分结构缺陷<sup>[2]</sup>，缺点是气体回流位置受流量影响较大，建议在进水管下方的隔板上开孔，以便让更多的气体回流到过水侧。图1(c)是在进水口位置处放置两个圆弧曲面隔板，进水口处的水流沿着隔板外侧流动，内部则是一不过水的空腔，用于气体流通，在改善进水口处流态和降低负压方面效果较好，同时由于螺旋流的存在还可以起到较好地消能作用，缺点是还未详细分析空腔大小和位置对优化效果的影响<sup>[7,12]</sup>。图1(d)是在进水口末端放置了一个圆弧形槽，进水管末端中的水流可以顺着该槽流入竖井内，该结构主要改变了水舌的落点，在大流量下水流在下落一段距离后仍可以撞击到井壁上，效果会受限<sup>[2,13]</sup>。

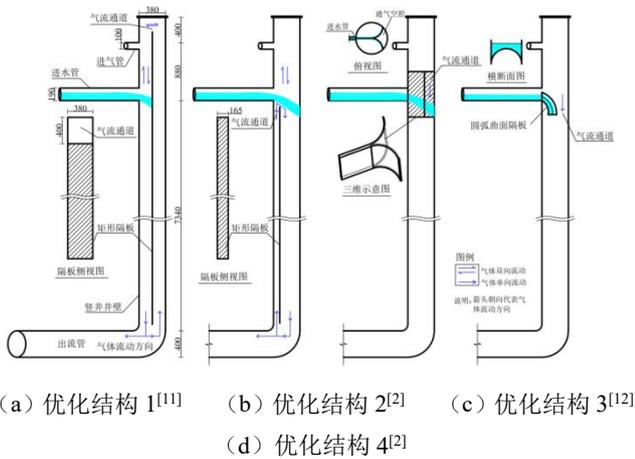


图1 竖井内部结构优化的示意图

### 1.2 外部结构优化

外部结构优化主要是通过外部连通结构为水舌阻隔区域补气，具化优化结构如图2所示。图2(a)中的竖井结构增加了一个与竖井平行的通风井，竖井与通风井之间用若干水平管道连接，在气压梯度作用下，竖井底部聚集的气体会进入通风井转而通过水平管回流到竖井内，进而为竖井内的负压区域补气，优点是可以减少进入下游排水系统中的气体和进入井内的气量<sup>[4]</sup>，但难点在于连接通风井和竖井的水平管的位置主要取决于竖井与通风井两侧的气压大小，目前难以准确确定，这会严重影响工程实际应用，因此其效果也会受限<sup>[8]</sup>。图2(b)中的结构是将一个导流管安装在进水管的上方和下方位置，导流管由一个水平管、一个竖直管和一个倾斜管组成，水舌上方被阻拦回

流的气体通过该外部连接管道被导流到水舌下方的井体，从而为水舌下方处于负压状态的井体补气，并且当进水管与导流管水平管的夹角为30°时效果相对最优<sup>[1,5]</sup>。

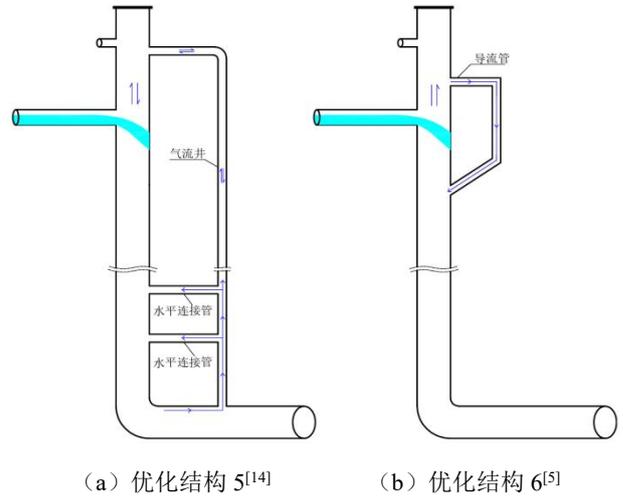


图2 外部结构优化示意图

## 2 优化结果效果对比分析

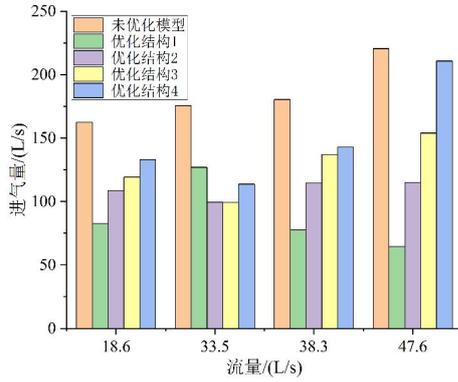
### 2.1 数据来源

文中选取进气管进气量和竖井内垂向压强分布两个关键指标来分析对比6种优化结构的效果，需要说明的是上述6中优化结构是在同一竖井结构（见文献[6]）的基础上改进的，从而保证结果具有可对比性；文献[6]中的原始竖井结构其主要几何尺寸如下：井体高约9m，水流跌落高度为7.72m，井体直径为0.38m，进气管直径为0.1m，进水管直径为0.19m。其中WEI等<sup>[1]</sup>和MA等<sup>[4]</sup>通过模型试验测量了结构1和结构5进气管中的流速和井内的压强分布；芦三强等<sup>[1,5,7]</sup>和张源等<sup>[2,13]</sup>采用了数值模拟的方法研究了其他4种优化结构并获取了相关研究指标，同时对原始竖井结构也进行了数值模拟并与测量结果进行了对比，结果表明数值模拟的结果与测量结果的误差在6%以内<sup>[1,5]</sup>，因此文中结构2、3、4和6的相关数值模拟结果是可靠的。

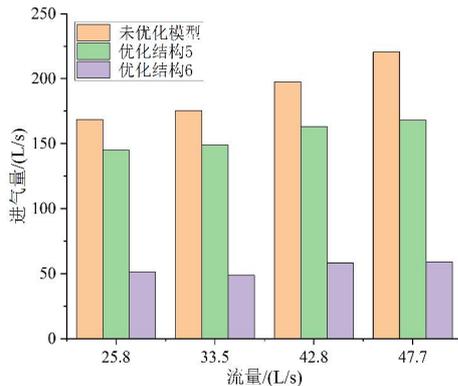
### 2.2 进气量对比

相比旋流和折板竖井等<sup>[1]</sup>，跌流竖井存在的主要问题是井内“吸气”量过多，进而对排水系统的安全稳定运行带来影响，因此进气量是衡量跌流竖井结构优化效果的主要指标之一<sup>[6]</sup>。图3是不同优化结构其进气管中的进气量，其中图3(a)是内部优化结构的进气量对比，图3(b)是外部结构优化的进气量对比。由图3(a)可知，相较于原竖井结构，优化后的4种竖井结构其进气管中进气量均有所减少，但结构4中减少的幅度最小，并且随着流量的增大效果越来越不明显；在小流量下，结构2和结构3中进气量相差不大，但随着流量的增大，结构2在减少井内进气量方面效果更为明显；结构1中的进气量是4种内部优化结构中最少的（除了流量为33.5L/s）。由图3(b)可知，结

构5和结构6中的进气量也均有所减少,但结构6的效果最为明显。通过对优化竖井结构中进气量的对比分析,结果表明:内部结构优化中结构1效果相对较好,外部结构优化中结构6相对较好,而结构1和结构6相比,显然结构6效果较好。尽管内外结构优化中结构1和结构6在减少吸气量方面效果较为显著,但是单从进气量这一指标还无法判断哪一种结构的性能最佳,还需结合井内气压分布这一指标进一步分析。



(a) 内部结构优化进气量对比



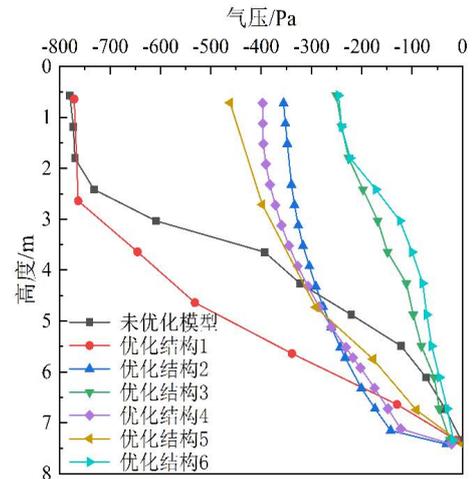
(b) 外部结构优化进气量对比

图3 各结构进气管进气量对比

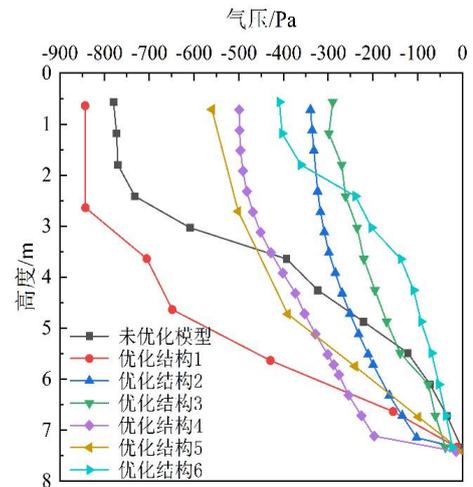
### 2.3 气压分布对比

文中选取了2组典型流量( $Q=42.8$ 和 $47.6\text{L/s}$ )来分析6种优化结构其井内的气压分布情况,结果如图4所示。由图可知,相比原竖井结构,结构1中的负压不降反增,尽管其进气量是4种内部结构优化中最少的,正如前面所分析的,其井内进气量减少的主要原因是竖井内部形成了内循环气流<sup>[9]</sup>,竖井底部的一部分气体回流到了进气管位置,平衡了一部分进气管处的负压,由此导致进气管内外压差减小,所以外界气体进入井内的较少,进气量和井内负压理应是同步变化的,显然过水侧过大的负压不利于竖井的安全稳定运行,因此结构1中的优化方式不宜推荐。结构4、5虽然同时降低了井内的负压和进气量,但同结构2、3、和6相比效果并不明显,结构4主要是降低了水舌的落点,但并没有解决水舌所带来的根本影响,结

构5中主要是水平管道安装位置可能不恰当,回流到进水管下方的气量过少,无法有效平衡井内的负压,因此这两种结构在没有进一步改进的前提下也不宜推荐使用。结构2与结构3和6相比,其降低负压的效果不如结构3和6,主要原因是水舌与矩形隔板顶部的位置难以准确确定,水舌影响到了气体的回流。剩下的结构3和结构6尽管能同时降低井内的负压和进气量,并且随流量的增减稳步变化,但进一步分析来看,结构6最为适宜,其降低负压的效果较为明显,同时进气量也是最少的,并且结构优化位置是在竖井外部,不影响竖井内部水流态及过流能力,同时文献<sup>[9]</sup>中对导流管的安装位置也给出了较为准确的计算方法,可推广使用。



(a)  $Q=42.8\text{L/s}$



(b)  $Q=47.6\text{L/s}$

图4 各结构气压分布对比

### 3 结论

通过综合对比分析6种优化结构中的进气量和气压分布两个指标,得出以下结论:

- (1) 除结构1外,其他几种优化结构均能同时降低竖井内的进气量和负压,结构1在降低进气量方面效果明显,但在

降低井内负压方面效果不理想;

(2) 从内外结构优化来看, 内部结构优化推荐结构 3, 外

部结构优化推荐结构 6; 整体对比来看, 结构 6 在减少井内进气量和降低负压方面效果最为明显, 同时该结构施工简单, 对水流流态无影响, 建议推广使用。

### 参考文献:

- [1] 芦三强. 跌流竖井内水气两相流动特性及结构优化的数值模拟研究[D]. 兰州理工大学, 2023.
- [2] 张源. 跌流竖井入流水舌气相扰动规律及结构改进模拟[D]. 兰州理工大学, 2024.
- [3] 何贞俊, 王斌, 杨聿, 等. 市政排水系统中竖井研究及应用进展[J]. 中国给水排水, 2017, 33(10): 49-53.
- [4] Camino G A, Zhu D Z, Rajaratnam N. Flow Observations in Tall Plunging Flow Dropshafts[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 06014020.
- [5] 芦三强, 乔时雨. 跌流竖井结构优化及其气压特性数值模拟[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(06): 24-29+43.
- [6] MA Yiyi, ZHU D Z, RAJARATNAM N. Air entrainment in a tall plunging flow dropshaft[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 142(10): 04016038.
- [7] 芦三强, 魏佳芳. 跌流竖井进水管附近负压突增现象的机理解析及结构优化[J]. 环境工程, 2024, 42(02): 97-103.
- [8] 魏佳芳, 芦三强, 张源, 等. 跌流竖井循环气流系统中水平管道临界位置及影响因素研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(10): 127-130+114.
- [9] 魏佳芳, 芦三强, 赵文举, 等. 跌流竖井内循环气流流通的临界位置理论建模和计算[J]. 兰州理工大学学报, 2023, 49(01): 55-60+173.
- [10] 卢金锁, 周亚鹏, 丁艳萍, 等. 污水集输管道系统中有害气体释放与解决对策[J]. 环境工程学报, 2019, 13(04): 757-764.
- [11] Wei J F, Ma Y Y, Zhu D Z et al. Experimental Study of Plunging-Flow Dropshafts with an Internal Divider for Air Circulation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(9): 06018011.
- [12] 芦三强, 李学武, 安建刚, 等. 具有旋流式分流进水结构的跌流竖井[P]. 甘肃省: CN217601621U, 2022-10-18.
- [13] 魏佳芳, 张源, 芦三强, 等. 跌流竖井入流水舌处内嵌圆弧板的结构优化数值研究[J]. 水电能源科学, 2024, 42(04): 80-84.
- [14] Ma Y Y, Zhu D Z, Yu T et al. Assessing the effectiveness of an airshaft for dropshaft air re-circulation and depressurization[J]. Journal of Hydro-environment Research, 2018, 18: 49-62.