



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.01.031

张国鹏, 付辉, 杨开林, 等. 虹吸井工程中多孔排水管沿程压力分布特性[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 186-192. ZHANG Guo Peng, FU Hui, YANG Kai Lin, et al. Characteristics of pressure distribution along perforated drain pipe in siphon well[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 186-192. (in Chinese)

虹吸井工程中多孔排水管沿程压力分布特性

张国鹏¹, 付辉², 杨开林², 赵林明¹, 王孟文³

(1. 河北工程大学, 河北 邯郸 056021; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 山东农业大学, 山东 泰安 271000)

摘要: 高纬度沿海地区的核电厂冬季运行时常会遇到取水口结冰问题, 影响正常运行, 一种解决方案是通过多孔排水管将电厂循环水引至泵站前池, 提高水温, 防止取水水域冰塞的发生。建立了虹吸井多孔排水管物理模型, 研究了多孔排水管的水力特性, 包括沿程压力分布特点, 压差变化规律等, 提出了多孔短管内部压力变化的无量纲公式, 各试验工况计算值和实测值的最大平均误差为 0.88%。研究表明: (1) 多孔排水管压力恢复现象是流速水头向压力水头转化的结果, 且流速水头越大, 压力恢复现象越明显。 (2) 出水管压力水头在下游出现突升现象, 是多孔管中流线在出水管处发生偏移, 部分水流对下游冲击造成的。试验结果为类似多孔排水管的设计及应用提供参考依据。

关键词: 多孔排水管; 多孔出流; 模型试验; 压力分布; 压差; 短管; 虹吸井

中图分类号: TV933 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)01-0186-07

Characteristics of pressure distribution along perforated drain pipe in siphon well

ZHANG Guo peng¹, FU Hui², YANG Kai lin², ZHAO Lin ming¹, WANG Meng wen³

(1. Hebei University of Engineering, Handan 056021, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China)

Abstract: Intakes of nuclear power plant in high latitude coastal regions generally have ice problems that will affect their normal operation. One solution is to transport warm water to the forebay of pump stations through perforated drain pipes. This method can raise water temperature and prevent ice jam. A physical model of perforated drain pipe was used to study its hydraulic characteristics, including pressure distribution and velocity distribution. A non-dimensional formula of pressure distribution within the perforated drain pipe was proposed and the maximum average error was 0.88%. The study shows that the pressure recovery within the perforated drain pipe is caused by transformation from velocity to pressure. The larger the velocity, the more obvious the pressure recovery. The pressure of the downstream drain pipe is larger than that of the upstream because the streamline is skewed near the outlet. The study results can provide references for the design and application of perforated drain pipes.

Key words: perforated drain pipe; multiple outlet; model test; pressure distribution; pressure difference; nozzle stub; siphon well

多孔管在化工、电力、通风供热、水利喷灌、污水排放等工程中多有应用。当多孔管作为一种均匀分

布装置使用时, 其配水的均匀度就成了主要关注要素, 伍钦^[1]等通过能量和质量衡算关系导出了等直

收稿日期: 2016-01-10 修回日期: 2016-09-24 网络出版时间: 2017-01-04

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170104.1016.020.html>

作者简介: 张国鹏(1989-), 男, 河北唐山人, 主要从事水利水电工程研究。E-mail: 1052102139@qq.com

通讯作者: 付辉(1981-), 男, 安徽淮南人, 高级工程师, 主要从事水力学方面研究。E-mail: fuhui_iw@126.com

径流量分配管的计算式,配液均匀度的表达式,为均匀分流提供了一种理论计算方法。王峻晔^[2]等提出了多孔管摩擦系数和动量交换系数的解析表达式,方便了对多孔管结构的优化。刘文华^[3]等研究了坡度、压力水头、孔距、管长4个参数对沿程压力分布的影响,总结了多孔管沿程压力随压力水头和孔距的增大而增大,随管长的减小而增大的规律。贺元启^[4]等建立了在已定工作水头和输水管管径的条件下,不同出水口开启状况下各给水栓出流量的数学计算模型,探索了多孔管在自动给水栓灌溉系统中的设计方法。多孔短管的一个重要特征表现在压头恢复现象上,即末端压头大于始端压头,唐朝春^[5-6]等多孔管作用水头和出口流量系数进行了研究,认为多孔管作用水头是总水头,孔口流量系数在流体力学中虽是定值,但在多孔配水问题中是个沿程增大的变量,因此造成多孔短管孔口出流量沿程增大。刘焕芳^[7-9]等建立了软管沿程水头损失的一般方程,得出了软管压力水头的计算公式,同时在单孔出流特性,偏差率上分别进行了研究,为多孔管在水利灌溉和施工管理方面的应用提供了技术支持。

本文通过开展某电厂排水虹吸井工程^[10-15]物理模型试验,对虹吸井工程中的多孔排水管内的水流特性进行了分析研究,总结了多孔排水管沿程的压力分布特性和压力水头计算方法,为类似水利工程提供参考。

1 工程简介

我国北方某电厂一期工程1号、2号机组装机容量 $2 \times 1\,250\text{ MW}$,以辽东湾海水作为冷却水源,采用直流冷却方式。排水系统主要由循环水管渠、虹吸井、排水明渠等组成,图1给出了本虹吸井工程在电厂中的示意图。该电厂虹吸井的主要特点是通过设置的多孔排水管将部分电厂废热回流至泵房取水口,防止电厂冬期运行时泵房取水口发生冰塞事故。多孔排水管末端封闭,在虹吸井堰前正向取水,由于溢流堰的阻挡作用,电厂运行时虹吸井堰前水位高于外海潮位,因此多孔排水管以自流方式向泵房取水口输水,为了均匀出流,使冷、热水充分掺混,提高融冰效果,多孔排水管径向设置了8个与水平方向成 10° 的等截面出水管,针对虹吸井工程中多孔排水管的水力性能开展了试验研究^[16]。

2 模型试验

2.1 模型设计

虹吸井工程中多孔排水管试验按原模型 15: 1

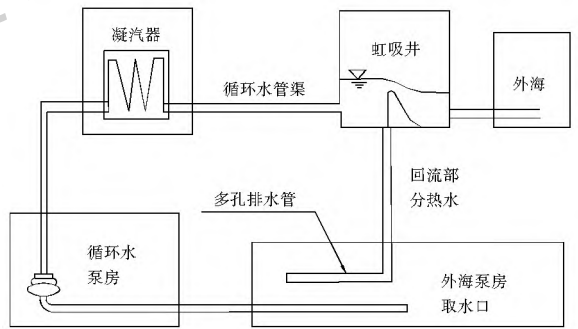


图1 电厂虹吸井示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the siphon well

的正态比尺和重力相似准则设计,以求满足原型与模型水体流动的相似,即满足:

$$(F)_r = \left[\frac{v}{\sqrt{gh}} \right]_r = 1 \quad (1)$$

各物理量的相似关系见表1。

表1 各物理量的相似关系

参数	符号	与几何比尺关系	比尺
长度	L_r	L_r	15
流速	V_r	$L_r^{1/2}$	3.87
流量	Q_r	$L_r^{3/2}$	871.4
糙率	n_r	$L_r^{1/6}$	1.57

模型采用有机玻璃制作,整体布置见图2。图中CEFH表示虹吸井,上游有4根进水管,进水量由阀门和电磁流量计控制。下游设置尾门,当外海潮位发生变化时,通过调节尾门控制虹吸井中水位。虹吸井CEFH被中隔墙对称分成CDGH和DEFG两个小虹吸井,每个小虹吸井配备一台循环水泵(图中水泵1和水泵2),水流进入虹吸井后,大部分水流跃过溢流堰排往外海,少部分水流通过1号和2号取水管汇流至U型管道,最终通过多孔排水管(U形管后接的长直管道)输往外海泵房取水口。夏季运行条件下1号和2号取水管封堵,多孔排水管不工作,冬季运行条件下多孔排水管正常工作,模型中通过水泵3调节泵房取水口处的水位至外海潮位,以模拟真实的泵房进水条件。图3为虹吸井剖面图,图4和图5分别给出了多孔排水管测点布置图和多孔排水管剖面图。模型中多孔排水管全长10m(原型为150m),直径0.247m(原型为3.705m),出水管8距多孔排水管末端0.223m(原型为3.345m),按照间距为0.853m(原型为12.795m)依次布置其余7个出水管。模型中每个出水管中心线上下游各0.1m处布置个压力测点,共计16个测点,编号依次为 d_1, d_2, \dots, d_{16} 。试验中

多孔排水管沿程压力水头用测压排测量, 精度 1 mm, 流量用电磁流量计测量, 精度 0.5%。

表 2 试验工况统计

Tab. 2 Statistics of operating modes

试验工况	外海潮位/m	虹吸井控制流量/(m ³ ·s ⁻¹)
N̄-1 单井校核低潮位	-2.88	45
N̄-2 单井设计低潮位	-2.65	45
N̄-3 单井平均低潮位	-0.06	45
N̄-4 单井校核高潮位	2.26	45
ò-5 双井校核低潮位	-2.88	45
ò-6 双井设计低潮位	-2.65	45
ò-7 双井平均低潮位	-0.06	45
ò-8 双井校核高潮位	2.26	45

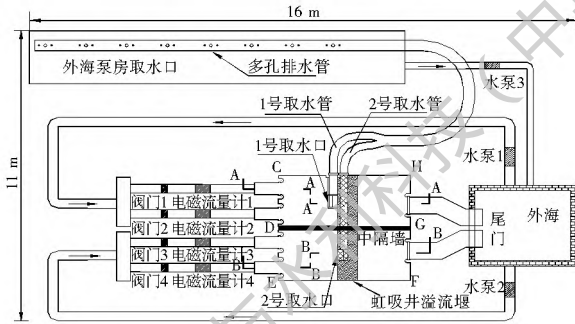


图 2 模型整体布置图

Fig. 2 Arrangement diagram of the model

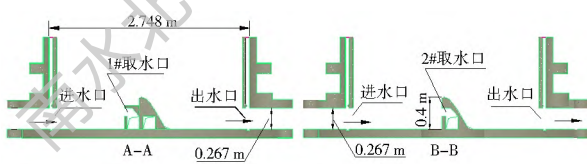


图 3 虹吸井剖面

Fig. 3 Profile map of the siphon well

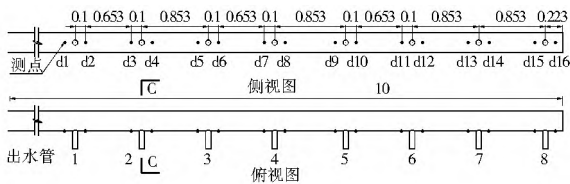


图 4 多孔排水管测点布置(单位:m)

Fig. 4 Measuring points diagram of perforated drain pipe

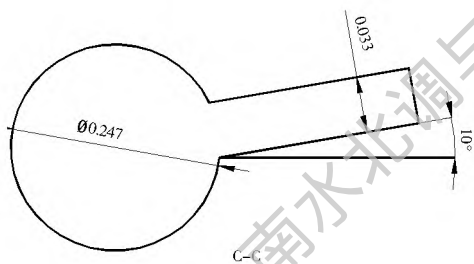


图 5 多孔排水管剖面(单位:m)

Fig. 5 Cross section diagram of perforated drain pipe

2.2 试验工况

正常情况下两个小虹吸井同时工作, 当虹吸井有检修需求时, 仅有单个小虹吸井工作, 因此试验方案分两种: 方案 N̄ 为一机两泵单虹吸井方案, 方案 ò 为一机两泵双虹吸井方案。试验中方案 N̄ 是在方案 ò 的基础上封堵 CDGH 小虹吸井实现的。方案 N̄ 和方案 ò 各包含 4 组试验潮位, 共计 8 组试验依次进行, 列于表 2 中。

3 试验结果分析

3.1 多孔排水管沿程压力分布规律

压力分布特性是研究水工建筑物水力特性的

一个重要参数, 图 6 是 8 组换算到原型的多孔排水管压力水头沿程变化过程, 其中横坐标为测点编号, 纵坐标为压力水头, 单位为 m。图中测点具体位置坐标详见图 4。表 3 为换算到原型的多孔排水管流量和压差结果。

表 3 多孔排水管流量和压差结果

Tab. 3 Flow and pressure difference in perforated drain pipe

试验工况	多孔排水管流量(m ³ ·s ⁻¹)	出水管最大压差/m
N̄-1 单井校核低潮位	10.370	0.047
N̄-2 单井设计低潮位	10.718	0.051
N̄-3 单井平均低潮位	11.677	0.060
N̄-4 单井校核高潮位	11.067	0.054
ò-5 双井校核低潮位	15.076	0.100
ò-6 双井设计低潮位	15.424	0.105
ò-7 双井平均低潮位	17.516	0.135
ò-8 双井校核高潮位	16.993	0.127

从图 6 中曲线走势可以看出, 同一工况下多孔排水管末端的压力水头大于首端, 压力回升现象明显, 这是由于在入口流量不变的情况下, 管道末端封闭, 流速水头不断向压力水头转化所致。从表 3 中可以看出, 工况 N̄-1 到工况 ò-8, 多孔排水管入口流量从 10.37 m³/s 增大到 16.993 m³/s, 测点 d₁ 与 d₁₆ 的压差由 0.047 m 增大到 0.127 m, 在入口流量增大 60% 的情况下, 测点 d₁ 与 d₁₆ 的压差增大近 3 倍。可见随着多孔排水管中入口流量的增大, 其首末端的压差增大明显。

3.2 多孔排水管上下游压力分布规律

多孔排水管内的压力水头总体是沿程升高的, 但是具体到单个出水管, 还有各自的特点: 压力在各出水管下游测点处出现突升现象。如上图 6(f) 中所示, 在出水管下游测点处可见明显的压力突升, 每个出水管下游处的压力大于上游, 同时大于相邻的下一出水管上游的压力。

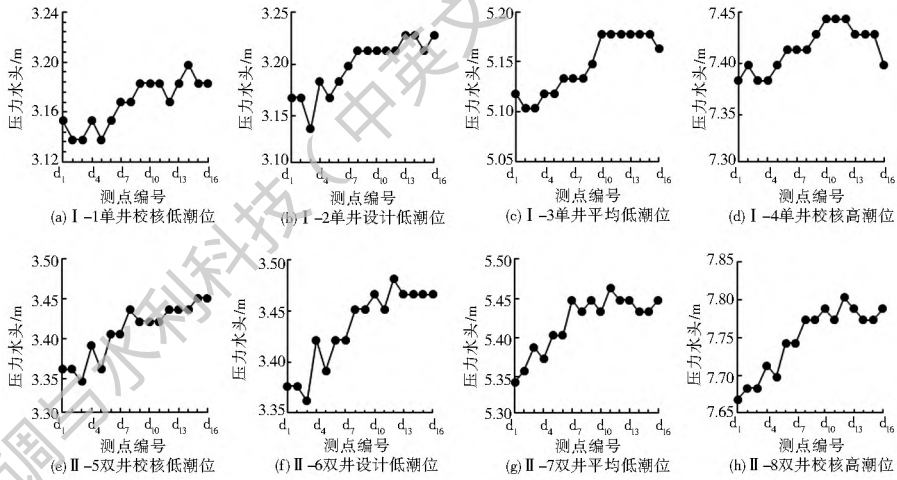


图 6 多孔排水管压力水头分布

Fig. 6 Distribution diagram of pressure heads

为了解释出现上述现象的原因,结合数值模拟手段,应用 fluent 软件详细研究了多孔排水管内的流场分布特性。对于存在转弯及分离等具有较强的各向异性的流动, RNG $k-\epsilon$ 紊流模型具有更好的适应性^[17-21],因此本文选用了 RNG $k-\epsilon$

紊流模型模拟计算。边界条件为速度进口压力出口。表 4 以工况 0-5 为例,给出了压力测点的实测值与模拟值对比结果。入口流量实测值 $15.076 \text{ m}^3/\text{s}$, 计算值 $15.023 \text{ m}^3/\text{s}$, 误差 0.35% 。

表 4 压力测点实测值和模拟值比较

Tab. 4 Comparison between measured and simulated values

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
实测值/m	3.36	3.45	3.36	3.35	3.39	3.36	3.41	3.41	3.44	3.42	3.42	3.42	3.44	3.44	3.44	3.45
计算值/m	3.49	3.56	3.40	3.48	3.43	3.49	3.44	3.51	3.46	3.52	3.48	3.53	3.51	3.53	3.54	3.52
误差(%)	3.76	3.17	1.16	3.74	1.09	3.75	0.88	2.85	0.62	2.78	1.68	3.03	1.98	2.70	2.89	2.02

如上述所示,数值模拟结果与模型试验实测结果吻合较好,压力变化规律一致,最大误差为 3.76% 。说明本文所建立的数学模型是合理的。

计算得到了多孔排水管的三维流场流线分布,图 7 截取了出水管 1 至出水管 3 部分。发现:出水管出流造成的流线改变是出水管下游压力突升的主要原因。当水流沿流动方向靠近出水管时,流线向出水管倾斜改变,一部分水流从出水管流出,另一部分水流越过出水管后向下游壁面附近冲击,流速水头转化成了压强水头,造成出水管下游出现压力突升现象。

0.021 m ,其随流量的增大而增大。将同一出水管,不同工况下的压差进行比较可以发现:多孔排水管中前半段平均压差大于后半段平均压差,说明多孔排水管在压力回升的过程中,前段比后段回升效果更明显。

表 5 出水管上下游压差

Tab. 5 Pressure difference between upstream and downstream outflow pipe sections

试验工况	出水管编号						
	m						
	N-1	N-2	N-3	N-4	0-5	0-6	0-8
1	-0.015	0	-0.015	0.015	0	0	0.015
2	0.015	0.045	0.015	0	0.045	0.060	0.03
3	0.015	0.015	0.015	0.015	0.045	0.030	0.045
4	0	0.015	0	0	0.030	0.030	0.03
5	0	0	0.030	0.015	0	0.015	0.015
6	-0.015	0	0	0	0.015	0.030	0.030
7	0.015	0	0	0	0	0	-0.015
8	0	0.015	-0.015	-0.03	0	0	0.015
平均值	0.002	0.011	0.004	0.002	0.017	0.021	0.021

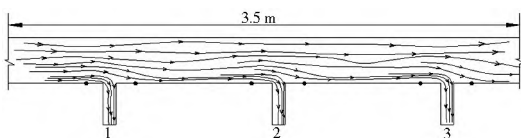


图 7 多孔排水管线

Fig. 7 Streamline diagram of perforated drain pipe

表 5 为各工况下出水管上下游的压差表,可见,随着入口流量由 $10.37 \text{ m}^3/\text{s}$ 增大到 $16.993 \text{ m}^3/\text{s}$,出水管上下游压差的平均值由 0.002 m 增加到

3.3 多孔排水管压力分布的计算公式

本项研究中只关心多孔排水管内的压力变化规律,在推导管内无量纲压力公式时无须考虑多孔管孔口流出方式,用上下游压力测点的平均值表示出水管处的压力水头。以多孔排水管中出水管 1 的压力水头为基准值,位置为起始位置,分别计算各出水管的 h_i/h_1 值和 X_i/X_0 值,其中 h_i 为出水管处的压力水头, $i=1, 2, \dots, 8$ 表示出水管编号,结果反映了多孔排水管中各出水管处压力水头与出水管 1 处的比值关系; $X_0=12.795\text{ m}$ 为原型中出水管间距; X_i 为每个出水管到起始位置的距离,单位 m,结果反映了多孔排水管中各出水管到起始位置的距离与出水

管间距的比值关系。

图 8 给出了不同试验工况下 h_i/h_1 值的统计结果,图中以 X_i/X_0 为横坐标, h_i/h_1 为纵坐标建立坐标系,统计了 8 组试验下 h_i/h_1 随 X_i/X_0 的变化规律。从图中可以看出,在不同方案工况下无论管道进口流量,水头如何变化,多孔排水管中 h_i/h_1 的值均呈现出沿程增大的规律不变。通过对各试验工况的 h_i/h_1 结果进行拟合,可以发现沿程的压力变化可用式(2)表示:

$$y = kx + b \tag{2}$$

式中: k 和 b 分别为系数, $x = X_i/X_0$, $y = h_i/h_1$ 。

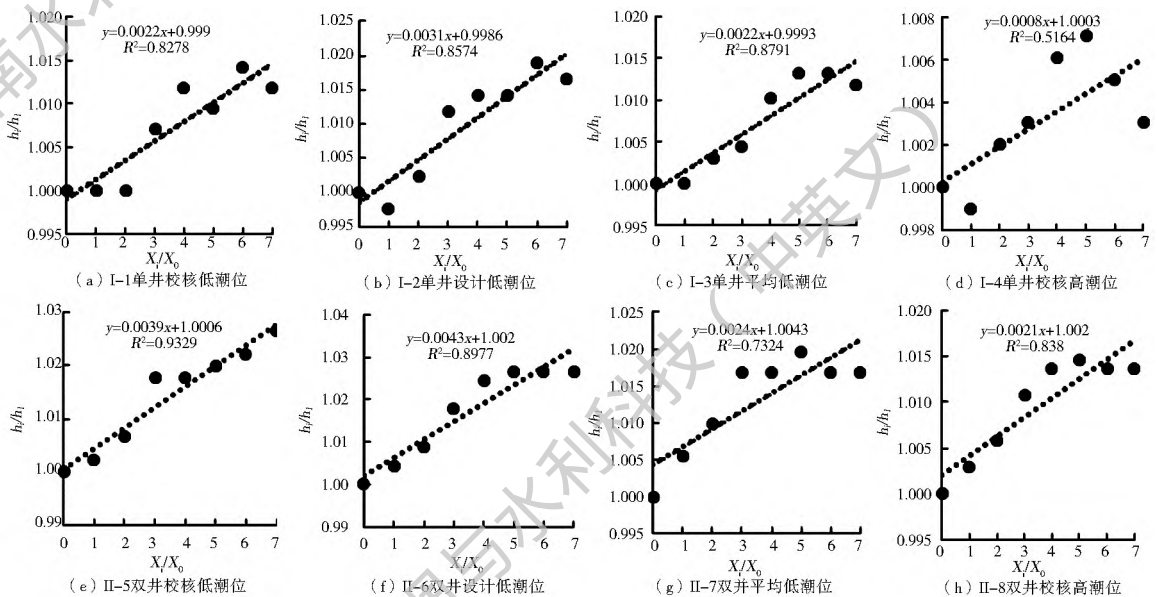


图 8 不同试验工况下 h_i/h_1 随 X_i/X_0 的变化

Fig. 8 Variation of h_i/h_1 with X_i/X_0 in different operating modes

表 6 提取了图 8 中直线方程的系数 k 和 b 值,并统计求出平均值。

表 6 方程中参数取值表

Tab. 6 Parameter values for equation

系数	试验工况							
	$\tilde{N}-1$	$\tilde{N}-2$	$\tilde{N}-3$	$\hat{0}-5$	$\hat{0}-6$	$\hat{0}-7$	$\hat{0}-8$	平均值
K	0.0022	0.0031	0.0022	0.0039	0.0043	0.0024	0.0021	0.0029
b	0.9968	0.9955	0.9971	0.9967	0.9978	1.0019	0.9998	0.9979

利用确定了系数的公式(2)对模型试验结果开展计算值与实测值的误差分析,将误差分析结果列于表 7 中,从中可以发现,对于单个出水管误差最大的一组工况出现在 $\tilde{N}-4$ 单井校核高潮位工况,最大误差为 1.49%,不同工况下最大平均误差出现在 $\hat{0}-6$ 双井设计低潮位工况,为 0.88%。表明当 K 和 b 取平均值时,推导出的公式(2)的计算结果同实测结果吻合良好,公式可用作多孔排水管沿程压力

水头的计算,对类似实际工程的设计计算具有一定的参考意义。

表 7 误差分析结果

Tab. 7 Error analysis results of outflow pipes

试验 工况	出水管编号								(%)
	$\tilde{N}-1$	$\tilde{N}-2$	$\tilde{N}-3$	$\tilde{N}-4$	$\hat{0}-5$	$\hat{0}-6$	$\hat{0}-7$	$\hat{0}-8$	
	1	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	
2	0.08	0.32	0.08	0.18	0.14	0.36	0.48	0.21	
3	0.37	0.13	0.08	0.17	0.30	0.52	0.61	0.22	
4	0.05	0.52	0.22	0.35	1.12	1.11	1.02	0.41	
5	0.24	0.47	0.08	0.34	0.83	1.48	0.73	0.41	
6	0.28	0.18	0.08	0.52	0.76	1.41	0.71	0.22	
7	0.10	0.36	0.21	1.01	0.69	1.12	0.15	0.16	
8	0.62	0.16	0.63	1.49	0.84	0.83	0.14	0.44	
平均误差	0.24	0.29	0.20	0.53	0.61	0.88	0.50	0.29	

4 结论

本文依托我国北方某滨海核电厂虹吸井冬季运行实际开展试验研究,通过对试验结果的分析,研究了多孔排水管沿程压力分布规律,出口上下游压差变化规律,得到以下结论。

(1)建立了多孔排水管沿程任一位置与压力水头的无量纲函数关系,其理论计算值与实测值最大误差为 1.49%,各试验工况平均误差最大为 0.88%。

(2)多孔排水管中的压力水头由于流速水头的转化呈现沿程升高现象,随着流量的增大,升高幅度越大,且多孔排水短管的压力升高效果前段比后段更明显。

(3)多孔排水管的出流运行,流线在出水管处发生偏移,使得水流对出水管下游产生冲击,出水管下游压力水头出现突升现象。

参考文献(References):

- [1] 伍钦,蔡梅琳,曾朝霞,等.等直径流量分配管的计算[J].华南理工大学学报,2000(28):7-13.(WU Qin, CAI Mèrlin, ZENG Zhaoxia, et al. The calculation of equal diameter flow rate distribution pipe[J]. Journal of South China University of Technology, 2000(28):7-13. (in Chinese))
- [2] 王峻晔,章明川,吴东棣.流体在多孔管分支系统中的流动机理研究[J].水动力学研究与进展(A辑),1999(1):36-46.(WANG Junye, ZHANG Mingchuan, WU Dongdi. Flow performance in porous pipe manifolds[J]. Journal of Hydrodynamics(A), 1999(1):36-46. (in Chinese))
- [3] 刘文华,刘焕芳,黄兴国,等.多孔管的压力分布特性试验[J].水利水电科技进展,2009(5):13-15.(LIU Wenhua, LIU Huanfang, HUANG Xingguo, et al. The experiment of pressure distribution features in perforated pipe[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2009(5):13-15. (in Chinese))
- [4] 贺元启,黄正荣.多孔非均匀出流问题数学模型研究[J].武汉大学学报,2001(5):28-31.(HE Yuanqi, HUANG Zhengrong. Research on mathematical model of nonuniform outflow in irrigation pipeline system with multihole[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2001(5):28-31. (in Chinese))
- [5] 唐朝春,王全金,杨卫权.大阻力配水系统的水头变化问题探讨[J].华东交通大学学报,2001(2):49-51.(TANG Chaochun, WANG Quanjin, YANG Weiquan. Discussion on change of hydraulic head in large resistance underdrain system[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2001, (2): 49-51. (in Chinese))
- [6] 唐朝春,孙亮,冯巍,等.多孔配水管孔口出流量变化实验研究[J].南方冶金学院学报,2004(2):54-57.(TANG Chaochun, SUN Liang, FENG Wei, et al. Experimental study on change of orifice discharge for porous pipes[J]. Journal of Southern Industry of Metallurgy, 2004(2):54-57. (in Chinese))
- [7] 刘焕芳,孙海燕,苏萍,等.自压软管沿程压力水头分布研究[J].水利水电科技进展,2006(1):10-12.(LIU Huanfang, SUN Haiyan, SU Ping, et al. Study on pressure head distribution along the gravity flexible hoses[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006(1):10-12. (in Chinese))
- [8] 孙海燕,刘焕芳,苏萍,等.微压超薄多孔软管滴孔平均流量及偏差率研究[J].水利水电科技进展,2005(6):46-48.(SUN Haiyan, LIU Huanfang, SU Ping, et al. Research of average flow rate and its deviation ratio for drip holes of micro-pressured and superthin porous hoses[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005(6):46-48. (in Chinese))
- [9] 杜涛,刘焕芳,金瑾,等.流体分布管出流特性的试验研究[J].节水灌溉,2013(9):5-9.(DU Tao, LIU Huanfang, JIN Jin, et al. Experimental study of fluid distribution pipe discharge characteristics[J]. Water Saving Irrigation, 2013(9):5-9. (in Chinese))
- [10] 李奇,张荣勇,白玮.核电站排水跌落井的设计尺寸探讨[J].给水排水,2015(4):48-51.(LI Qi, ZHANG Rongyong, BAI Wei. Design research of water discharge surge tank of nuclear power plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2015(4):48-51. (in Chinese))
- [11] 王芳,侯树强.核电厂跌落井结构设计分析[J].中国核电,2015(1):10-135.(WANG Fang, HOU Shuqiang. Structure design of water discharge surge tank of nuclear power plant[J]. China Nuclear Power, 2015(1):10-135. (in Chinese))
- [12] 阎丽静,李晓爱.核电站循环水虹吸出水设计[J].广东水利水电,2014(7):19-23.(YAN Lijing, LI Xia'ai. Design of circulating water siphon outlet for nuclear power station[J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2014(7):19-23. (in Chinese))
- [13] 张旭.某核电厂虹吸井设计研究[J].给水排水,2013(10):55-583.(ZHANG Xu. Study on the design of the siphon wells in a nuclear power plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013(10):55-583. (in Chinese))
- [14] 陈付山,孙海燕,陈运怀.发电厂直流冷却水系统虹吸井布置方案设计和优化[J].华电技术,2012(12):18-20,79-80.(CHEN Fushan, SUN Haiyan, CHEN Yunhuai. Design and optimization of siphon well arrangement scheme of once through cooling water system in power plant[J]. Huadian Technology, 2012(12):18-20,79-80. (in Chinese))
- [15] 黄艳君,杜涓.大型发电机组循环水系统虹吸井溢流堰型优化[J].华中电力,2003(1):47-49.(HUANG Yanjun, DU Juan. Overflow weir optimization of circulating cooling water siphon well of large power plant[J]. Central China Electric Power, 2003(1):47-49. (in Chinese))
- [16] 付辉,郭新蕾.辽宁徐大堡核电厂一期工程虹吸井水力性能物理模型试验研究[R].中国水利水电科学研究院,2014.(FU Hui, GUO Xinlei. Experimental study on hydraulic model of siphon well[R]. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014. (in Chinese))
- [17] Charles G, Thomas B. An analysis of RNG base turbulent

- models for homogeneous shear flow [J]. *Phys Fluids*, 1991 (3): 2278-2281.
- [18] 熊莉芳, 林源, 李世武. $k-\epsilon$ 湍流模型及其在 FLUENT 软件中的应用[J]. *工业加热*, 2007(4): 13-15. (XIONG Lì fang, LIN Yuan, LI Shì wu. $k-\epsilon$ turbulent model and its application to the fluent[J]. *Journal of Industrial Heating*, 2007(4): 13-15. (in Chinese))
- [19] 高改玉, 张根广. 虹吸井和排水口泄流三维数值模拟及堰型优化[J]. *人民黄河*, 2012(3): 137-139. (GAO Gǎi yu, ZHANG Gēn guāng. Three dimensional numerical simulation on discharge of siphon well and overflow and optimization for weir shape[J]. *Yellow River*, 2012(3): 137-139. (in Chinese))
- [20] 段文姣, 张根广, 范仲文. 南迪普电站排水口三维数值模拟及体型优化[J]. *水电能源科学*, 2012(8): 90-93. (DUAN Wen jiao, ZHANG Gēn guāng, FAN Zhōng wēn. Three dimensional numerical simulation of outfall of nandipur power plant and shape optimization[J]. *Water Resources and Power*, 2012(8): 90-93. (in Chinese))
- [21] 王新坤, 许文博, 赵坤, 等. 基于 CFD 的多孔管热风数值模拟与设计方法[J]. *排灌机械工程学报*, 2011(1): 82-86. (WANG Xīn kūn, XU Wēn bō, ZHAO Kūn, et al. Numerical simulation and design method of hot air for porous pipe based on CFD[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2011(1): 82-86. (in Chinese))

(上接第 149 页)

- [15] 严绍军, 唐辉明, 项伟. 降雨对滑坡稳定性影响过程分析[J]. *水文地质工程地质*, 2007, (2): 33-36. (YAN Shào jūn, TANG Huī míng, XIANG Wēi. Effect of rainfall on the stability of landslides[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2007, (2): 33-36. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2007.02.008
- [16] 张友谊, 胡卸文, 朱海勇. 滑坡与降雨关系研究展望[J]. *自然灾害学报*, 2007, 16(1): 104-36. (ZHANG Yǒu yì, HÚ Xiè wēn, ZHŪ Hǎi yǒng. Prospect of research on relationship between landslide and rainfall[J]. *Natural Disasters*, 2007, 16(1): 104-36. (in Chinese)) DOI: 10.13577/j.jnd.2007.0120
- [17] 李保雄, 苗天德. 红层软岩顺层滑坡临滑预报的强度控制方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003: 22(增 2) 2703-2706. (LI Bǎo xióng, MIÀO Tiān dé. Strength controlling forecast method of critical landslide along red soft mudstone layer[J]. *Rock Mechanics and Engineering*, 2003: 22(s2) 2703-2706. (in Chinese))
- [18] 苏燕, 邱俊炳. 基于室内试验的降雨型滑坡机理研究[J]. *福州大学学报·自然科学版*, 2015(2): 118-122. (SU Yan, QIU Jūn bǐng. Research on mechanism in rainfall landslides based on laboratory test[J]. *Journal of Fuzhou University: Natural Science Edition*, 2015(2): 118-122. (in Chinese))
- [19] 宋娅芬, 陈从新. 缓倾软硬岩互层边坡变形破坏机制模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2015, 36(2): 487-494. (SONG Yǎ fēn, CHÉN Cōng xīn. Model experimental study of deformation and failure mechanism of low angled slopes with interbedding of soft and hard rocks[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2015, 36(2): 487-494. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2015.02.026
- [20] 谢瑾荣, 周翠英. 降雨条件下软岩边坡渗流软化分析方法及其灾变机制[J]. *岩土力学*, 2014, 35(1): 197-203. (XIE Jīn róng, ZHŌU Cuì yīng. Method of seepage softening analysis and disaster mechanism in soft rock slope under rainfall[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(1): 197-203. (in Chinese)) DOI: 10.16285/j.rsm.2014.01.005