

DOI:10.11918/202108028

细管径虹吸流速计算参数分析与修正计算方法

戴啸扬,张莹秋,郑俊,尚岳全

(浙江大学 建筑工程学院,杭州 310058)

摘要:高扬程边坡虹吸排水会释放大气泡,为防止虹吸过程产生空气积累破坏虹吸排水的长效性,需要采用 $d \leq 5$ mm管径形成段塞流。由于管径小且有气液二相流,已有虹吸流速计算可能出现较大误差,影响虹吸排水系统设计的合理性。针对细管径虹吸流速计算误差大的问题,通过分析虹吸流动过程特征来确定流速计算参数,将巴尔公式引入沿程水头损失计算中,并开展足尺物理模型试验。确定适用于虹吸流速迭代运算的沿程水头损失系数计算公式,提出利用断面平均水头损失反映边界层作用影响的圆管层流流速计算方法,在巴尔公式中引入折减系数降低临界雷诺数区的流速计算误差。物理模型试验的测试结果表明,提出的修正计算方法提高了虹吸流速的计算精度,可为工程应用提供参考。

关键词:滑坡;虹吸排水;虹吸流速计算;边界层;误差修正

中图分类号: TU42

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2023)02-0062-08

Parameter analysis and modified calculation method of siphon velocity calculation for pipe with small diameter

DAI Xiaoyang, ZHANG Yingqiu, ZHENG Jun, SHANG Yuequan

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: High-lift siphon drainage can release a large number of bubbles. The pipe diameter $d \leq 5$ mm should be adopted to form slug flow, so as to prevent the accumulation of air in the siphon process from damaging the long-term performance of siphon drainage. Due to the small pipe diameter and gas-liquid two-phase flow, the existing siphon velocity calculation may have large errors, which affect the rationality of siphon drainage system design. In view of the problem of large error in velocity calculation of small-diameter siphon, the velocity calculation parameters were determined by analyzing the characteristics of siphon flow process. The Barr formula was introduced into the calculation of friction head loss, and full-scale physical model test was carried out. The formula of head loss coefficient suitable for the iterative calculation of siphon velocity was determined, and the calculation method of laminar flow velocity in circular pipe was proposed by using the average head loss of cross-section to reflect the influence of boundary layer. The reduction coefficient was introduced into the Barr formula to reduce the calculation error of velocity in the critical Reynolds number region. Test results of the physical model show that the modified calculation method improved the calculation accuracy of siphon velocity, which can provide reference for engineering application.

Keywords: landslide; siphon drainage; siphon velocity calculation; boundary layer; error correction

控制坡体地下水位上升,对于滑坡防治具有重要作用^[1-4]。目前,最常用的地下水钻孔排水方法为水平排水孔,但由于水平排水孔为开放体系,且倾角小排水流速低,使用过程中易产生淤堵^[5-6],长期排水的可靠性差。虹吸排水是一种利用液面高差推动液体流动的排水技术,采用俯倾钻孔更有利于汇集地下水,且抗淤堵能力明显高于水平排水孔,能更好地满足坡体地下水位控制的需要^[7-9]。但虹吸排水过程中,溶解于水中的空气会在虹吸管内的低压

环境下释放形成气泡,必须采用细管径形成段塞流,保证水流能够把释放的气泡排出虹吸管^[10-11],从而确保免维护虹吸排水的长期有效性。大量研究^[12-13]表明,选择虹吸管不超过5 mm的管径才能形成稳定的段塞流。不同于粗管径的排水能力具有自然满足边坡排水需要的特性,小于5 mm虹吸管的排水能力低,其排水能力能否有效应对暴雨时地表水入渗导致地下水激增的情况,成为边坡虹吸排水方案设计的基础。

收稿日期: 2021-08-05; 录用日期: 2021-11-18; 网络首发日期: 2022-04-25

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1235.T.20220424.1808.006.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1504704); 国家自然科学基金(41772276)

作者简介: 戴啸扬(1996—),男,硕士研究生; 郑俊(1987—),男,副教授,博士生导师

通信作者: 郑俊, zhengjun12@zju.edu.cn

滑坡虹吸排水工程是利用向下倾斜钻孔进入坡体深部,保持地下水位控制点与孔口高差小于10 m,达到滑坡深层地下水的降排要求^[7],已在多处滑坡中应用且降排效果良好^[14-15]。其中,所用虹吸排水管多为长直管段^[16-17],流体大部分能量损失为沿程水头损失,所以,沿程水头损失系数 λ 的精度决定了流速计算准确性。但是,现有虹吸流速计算的相关研究中,大部分集中在流速计算或低扬程工况等情况^[18-21],关于沿程水头损失系数计算研究较少^[22-23],且针对特定工况下通过气泡孔隙率的分析方法计算虹吸流速^[24],计算值和实测值之间仍存在较大的误差。本文从确定虹吸流速相关参数和沿程水头损失系数 λ 计算方法出发,旨在提高5 mm及其以下管径虹吸管单管流速的计算精度,为虹吸排水的工程应用提供理论支持。

1 计算参数分析确定

1.1 虹吸管流计算参数分析

虹吸是有压管流,常采用水力学中有压管流公式进行求解^[25]

$$v = \sqrt{\frac{2gH_1}{1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}} \quad (1)$$

式中: v 为流速, g 为重力加速度, H_1 为水头差, l 为虹吸管的长度, d 为虹吸管的直径, ζ 为局部损失系数, λ 为沿程水头损失系数。

有压管流计算公式是基于伯努利方程条件下化简得到的,所以,适用范围和伯努利方程一致。伯努利方程的前提条件是不可压缩连续流,高扬程虹吸存在空气释放与积累的问题,所以,管顶及下水管往往是气液两相流,传统有压管流公式并不适用于虹吸管流计算。如图1所示虹吸由上水管和下水管两部分组成。虹吸未启动前,假设下水管末端是堵住的,上下水管内充满了水。虹吸启动后,下水管的液体由于重力作用下落,带动虹吸管内液体流动,由于水的抗拉强度为0,在一瞬间 dt 内上下水管之间拉出了一个微元 dr 长的真空带,即瞬间液体“断裂”。于是上水管与真空带之间产生压差,推动上水管内液体运动。当上水管内液体以 v_{up} 流入下水管时,会出现3种情况:1) $v_{up} > v_{down}$,上水管及时向下水管“供水”,上下管内为连续流,可用常规伯努利方程求解;2) $v_{up} = v_{down}$,上下管流速相同,由于真空带几乎可忽略不计,上下管内近似看作连续流处理,此时仍可用常规伯努利方程进行求解;3) $v_{up} < v_{down}$,上水管不能及时向下水管补水,导致真空带被“拉长”,即出现了非连续流,此时常规有压管流计算公式不再适用。

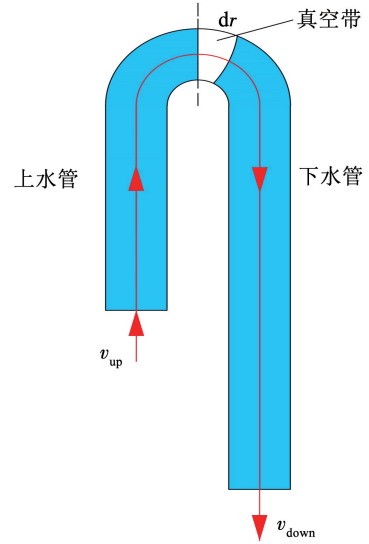


图1 虹吸管内流动示意

Fig. 1 Flow diagram in siphon

对于第3种情况,由于上水管和下水管之间形成真空带,即上下水管中液体为非连续流,伯努利方程不再适用,但上水管仍可看作连续流,可将上水管单独进行分析。理想化计算条件,将管顶处简化为完全真空环境,进水口和管顶处伯努利方程如下:

$$H_0 + \frac{v^2}{2g} - H_{\max} + \left(\lambda \frac{l_{up}}{d} + \sum \zeta_{up} \right) \frac{v^2}{2g} = 0 \quad (2)$$

式中: $H_{\max}$ 为当地最大提水高度, l_{up} 为上水管长, ζ_{up} 为上水管局部水头损失系数, H_0 为虹吸扬程。

局部水头损失系数取值如下^[26]:虹吸管进口处 $\zeta=0.5$,出口处 $\zeta=1.0$,每个弯折处 $\zeta=0.8$ 。

将上水管最大提水高度 $\Delta H = H_{\max} - H_0$ 代入式(2),此时虹吸流速可表示为

$$v_{up} = \sqrt{\frac{2g\Delta H}{1 + \lambda \frac{l_{up}}{d} + \sum \zeta_{up}}} \quad (3)$$

综合上述3种情况,虹吸流速可表达为^[18]

$$v = \min \left(\sqrt{\frac{2g\Delta H}{1 + \lambda \frac{l_{up}}{d} + \sum \zeta_{up}}}, \sqrt{\frac{2gH_1}{1 + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}} \right) \quad (4)$$

式(4)是通过分析虹吸流动过程得到,是目前考虑最全面、运算最简便的虹吸流速计算方法。相比传统有压管流公式计算误差大的问题,其采用取两者之间较小值的方法更适合评估不同工况下的虹吸流速。本文采用式(4)进行理论计算。

1.2 沿程水头损失系数 λ 的确定

用式(4)计算沿程水头损失必须先确定 λ 的大小,而 λ 与流态和管壁粗糙度等因素有关。流体的流态可根据下临界雷诺数 Re_c 分为层流、过渡流和

湍流,雷诺通过大量实验发现下临界雷诺数 $Re_c \approx 2\ 100$ 时流态发生动荡^[27],选取 $Re_c = 2\ 100$ 作为分段计算 λ 的标准。下临界雷诺数可由下式计算:

$$Re = \frac{vd}{\nu}$$

(5)

$$\nu = \frac{0.017\ 75 \times 10^{-4}}{1 + 0.033\ 7t + 0.000\ 221t^2}$$

(6)

式中: ν 为运动黏度, t 为水温, Re 为雷诺数, v 为断面平均流速。

对于层流, λ 和雷诺数 Re 成反比^[28],即

$$\lambda = \frac{64}{Re}$$

(7)

对于过渡流和湍流,选择巴尔公式计算沿程水头损失系数 λ ^[29]。巴尔公式有以下优点:考虑了管材、管径、雷诺数等影响因素;显式;计算简便且适用于编程;适用于各阻力区。具体公式如下

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left(\frac{\Delta}{3.7d} + \frac{5.128\ 6}{Re^{0.89}}\right)$$

(8)

式中 Δ 为绝对粗糙度,与管材有关。

综上,下列公式将用于 λ 的计算

$$\lambda = \begin{cases} \frac{64}{Re}, Re \leq 2\ 100 \\ \left[\frac{1}{-2\lg\left(\frac{\Delta}{3.7d} + \frac{5.128\ 6}{Re^{0.89}}\right)} \right]^2, Re > 2\ 100 \end{cases}$$

(9)

虹吸流速的计算结果需将式(9)代入式(4)进行迭代运算后产生。

2 物理试验测试与理论计算结果对比

2.1 物理试验测试

虹吸物理模型试验为 1:1 的足尺物理模型试验。图 2 为物理试验模型,由上水管、下水管、水桶 A、水桶 B 和补水管组成。虹吸管为聚氨酯(PU)材质,管顶曲率为 0.1 m。上水管放置在水桶 A 中,补水管使水箱 A 中的水位保持恒定。 H_0 为管顶与进水液面的高差(即扬程), H_1 为液面进口与出口的高差(即水头差)。待虹吸稳定后,在量杯中收集一定时间的流量计算虹吸的平均流速。为减少收集流量中产生的误差,本次试验收集流量的时间统一为 30 min。

试验选用 3、4、5 mm 3 种管径,各管径分别在表 1 所示方案中进行一轮试验,共开展了 75 组试验。由于温度和气压会对虹吸流速产生影响,同一管径、同一扬程 H_0 试验在相同工况下进行。表 1 为各管径具体试验方案。 L_{up} 为上水管长, L_{down} 为下水管长。

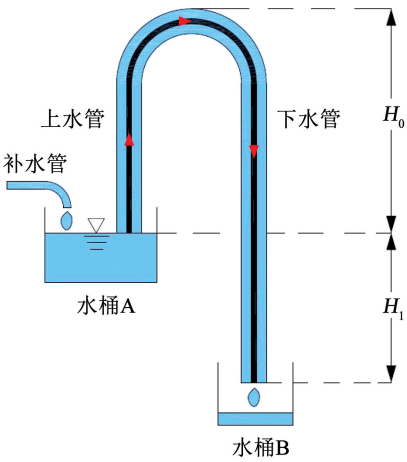


图 2 虹吸物理模型试验装置

Fig. 2 Experimental device of siphon physical model

表 1 试验工况

Tab. 1 Experimental conditions					m
方案	H_0	L_{up}	H_1	L_{down}	
1	9.15	9.4	0.6	9.97	
2	9.15	9.4	1.2	11.12	
3	9.15	9.4	1.5	11.73	
4	9.15	9.4	2.1	12.60	
5	9.15	9.4	3.3	12.60	
6	9.15	9.4	4.2	13.50	
7	9.15	9.4	8.4	17.70	
8	9.15	9.4	16.8	26.10	
9	8.25	8.5	0.6	10.50	
10	8.25	8.5	1.05	10.50	
11	8.25	8.5	1.5	10.50	
12	8.25	8.5	2.1	10.50	
13	8.25	8.5	4.2	12.60	
14	8.25	8.5	8.4	16.80	
15	7.35	7.6	0.9	8.40	
16	7.35	7.6	1.5	10.10	
17	7.35	7.6	2.1	10.10	
18	7.35	7.6	3.0	11.70	
19	7.35	7.6	4.2	11.70	
20	7.35	7.6	8.4	15.90	
21	7.35	7.6	16.8	24.30	
22	4.05	4.3	2.1	21.00	
23	4.05	4.2	4.2	12.60	
24	4.05	4.3	8.4	8.40	
25	4.05	4.3	16.8	6.30	

2.2 试验结果与理论计算结果对比讨论

采用不同扬程分组,各组均包含 3、4、5 mm 3 种管径,试验结果以及依据式(4)的计算结果如图 3 ~

6所示。由于各组试验不能同时进行,计算结果已考虑气压和温度等因素产生的影响。此次试验采用聚氨酯(PU)材料,绝对粗糙度 Δ 取 $0.0015\text{ mm}^{[30]}$ 。误差率均以绝对误差率 E_r 表示,即

$$E_r = \left| \frac{v_c - v_t}{v_t} \times 100 \right| \quad (10)$$

式中: v_t 代表实测值, v_c 为修正伯努利方程计算值。
图3为 $H_0=4.05\text{ m}$ 时各管径试验值与计算值。对于3种不同的管径,计算值和试验值契合度较高。除了方案 $d=4\text{ mm}$ 、 $H_1=2.1\text{ m}$ 的绝对误差率 E_r 为 14.07% ,其余方案的绝对误差率 E_r 均在 6% 以下。而方案 $d=4\text{ mm}$ 、 $H_1=2.1\text{ m}$ 的雷诺数为 $2\,544$,表明流体的流态位于层流和湍流的过渡段,此时流态混乱, λ 不易精确计算。

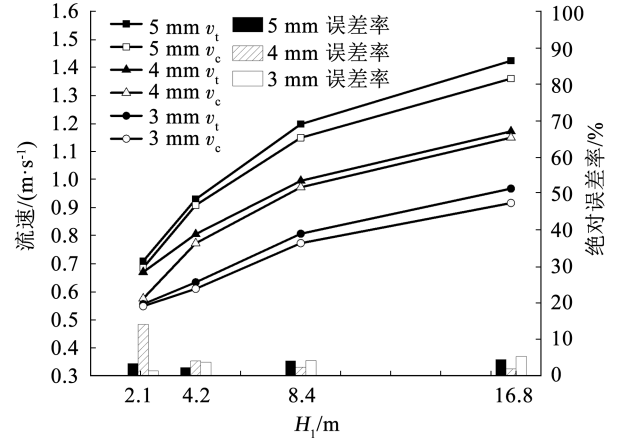


图3 $H_0=4.05\text{ m}$ 时虹吸流速计算值与试验值
Fig. 3 Comparison of calculated and experimental values of siphon velocity when $H_0=4.05\text{ m}$

图4为 $H_0=7.35\text{ m}$ 时各管径试验值与计算值,计算值和试验值的增长趋势基本一致。当高差超过 8.4 m 时,实测值仍有增长,而计算值已达到稳定。对于 $d=4\text{ mm}$ 、 $H_1=4.2\text{ m}$ 和 $d=5\text{ mm}$ 、 $H_1=2.1\text{ m}$ 这两组方案,绝对误差率 E_r 分别达到了 17.90% 和 18.96% 。值得注意的是,此时管内流体雷诺数为 $2\,481$ 和 $2\,503$,意味流体处于过渡流,管内流态不稳定,通过巴尔公式计算的沿程阻力比实际环境下的更大。除了上述提及的,其余方案的绝对误差率 E_r 均低于 10% 。

图5为 $H_0=8.25\text{ m}$ 时各管径试验值与计算值,两者的整体吻合度较高。可以看出,实测流速随着高差的增大而增加,当 $H_1\geq 4.2\text{ m}$ 时,实测值增长幅度缓慢,而计算值已经达到稳定;当处于过渡流时,例如,方案 $d=5\text{ mm}$ 、 $H_1=2.1\text{ m}$ 的绝对误差率 E_r 达到了 16.81% 。

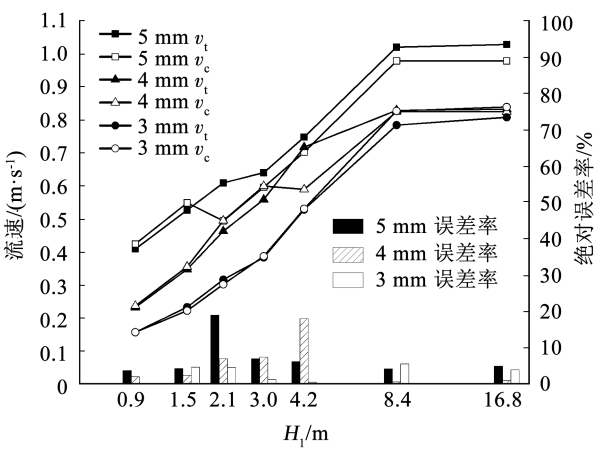


图4 $H_0=7.35\text{ m}$ 时虹吸流速计算值与试验值
Fig. 4 Comparison of calculated and experimental values of siphon velocity when $H_0=7.35\text{ m}$

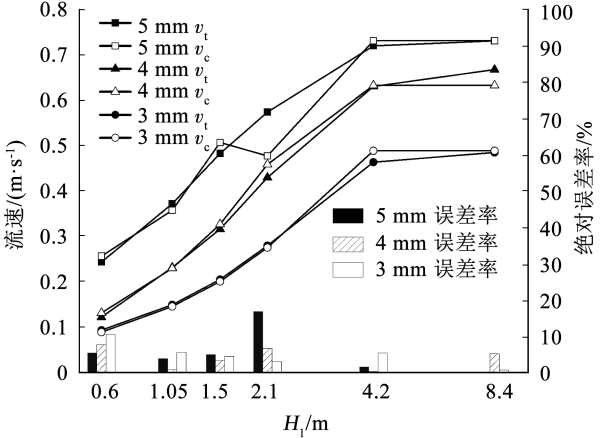


图5 $H_0=8.25\text{ m}$ 时虹吸流速计算值与试验值
Fig. 5 Comparison of calculated and experimental values of siphon velocity when $H_0=8.25\text{ m}$

图6为 $H_0=9.15\text{ m}$ 时各管径试验值与计算值结果和误差率,曲线的变化趋势基本一致。存在的问题如下:1)方案 $d=5\text{ mm}$ 时, $H_1=3.3$ 、 4.2 、 8.4 、 16.8 m ,绝对误差率 E_r 分别为 13.31% 、 12.91% 、 12.89% 、 13.07% 。这4个方案雷诺数为 $2\,479\sim 2\,491$,此时管内为过渡流,计算值小于实测值,意味着基于巴尔公式计算下的阻力比流体在实际环境中受到的更大;2)对于 $d=3\text{ mm}$ 时 $H_1=0.6$ 、 1.2 、 1.5 m 和 $d=4\text{ mm}$ 时 $H_1=0.6$ 、 1.2 m 这5个方案,误差率 E_r 分别为 40% 、 38% 、 40% 、 29% 、 33% 。实测流速值较小,均小于 0.2 m/s ,引入无量纲雷诺数 Re 进行分析,这种情况下 Re 较小($Re<350$),虹吸管内液体的流态为层流。

通过试验对比,巴尔公式结合修正伯努利计算方法将绝大部分方案的计算误差率 E_r 控制在 10% 以内,说明该方法是合理的;但是,针对部分方案也出现了较高的误差,主要源自两方面:1) $H_0=9.15\text{ m}$ 条件下,当水头差 H_1 较小时,3、4 mm虹吸管流速较

小,计算值明显大于实测值,且最大误差率 E_r 为 40.38%。所以,在小管径高扬程低高差情况下,式(4)仍存在不足,需对流速的计算方式进行修正;

2)当虹吸管内液流处于层流与湍流之间的过渡流时,计算值的最大绝对误差率 E_r 达 19%,且均为负误差率,这表明通过巴尔公式计算的沿程阻力比实际流体环境中的大。

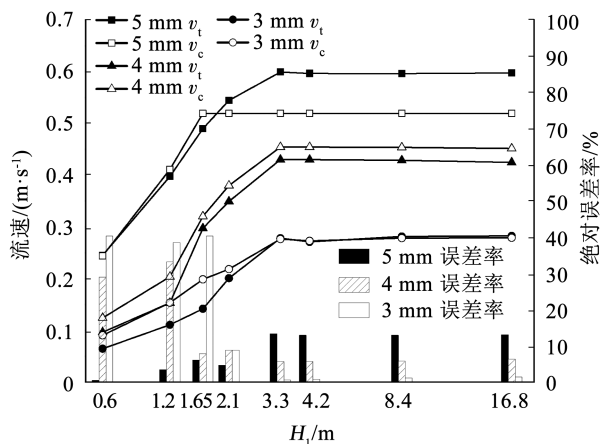


图 6 $H_0 = 9.15$ m 时虹吸流速计算值与试验值

Fig. 6 Comparison of calculated and experimental values of siphon velocity when $H_0 = 9.15$ m

3 流速计算误差修正方法

3.1 高扬程低水头差流速计算误差原因与修正

管壁附近存在一黏性不能忽略的边界层,导致圆管层流断面流速分布不均匀。对于 3、4 mm 的小管径虹吸管,本身管径较小,其边界层的作用在流速较小时更加明显,导致理论计算值与实测值之间存在一定的误差,需要对式(4)进行修正。

通过分析可知,高误差率方案均为高扬程 ($H_0 \geq 9.15$ m) 低水头差,实测值均小于计算值,且绝对误差率 E_r 最高达 40%,这表明流体流动过程中受到的黏滞作用更明显。圆管层流的流速分布并不均匀,呈以管轴为中心的旋转抛物面分布^[26]。简化计算过程,截取二维过流断面,如图 7 所示,对整个过流断面进行平均水头损失的计算,推导新的理论计算公式。

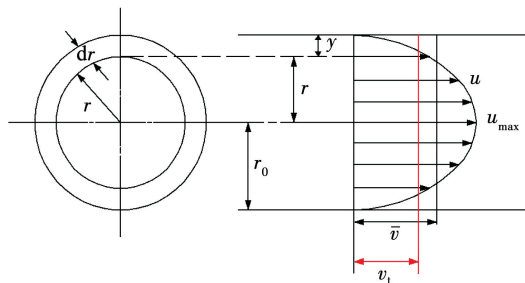


图 7 层流断面示意

Fig. 7 Schematic diagram of laminar flow section

圆管层流理论由哈根和泊肃叶提出,二维断面流速分布如下^[26]

$$u = u_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{r_0^2} \right) \quad (11)$$

式中: r 为到管轴中心的距离, r_0 为虹吸管半径, $u_{\max}$ 为断面最大流速。

$$u_{\max} = \frac{gJ}{4\nu} r^2 \quad (12)$$

式中: ν 为运动黏度, g 为重力加速度, J 为水力坡降,且最大流速 $u_{\max}$ 位于管轴处。

水力坡降是沿水流方向单位渗透途径上的水头损失,与沿程水头损失和沿程长度有关。在圆管层流中沿程水头损失与平均流速的一次方成正比,即

$$h_f = \frac{32\mu l}{\rho g d^2} v \quad (13)$$

式中: μ 为水的黏滞系数, v 为平均流速, l 为管长。

将水力坡降 $J = \frac{h_f}{l}$ 和式(12)代入式(11),可得

二维断面不同位置流速 u 用平均流速 v 的形式表示,即

$$u(r) = \frac{8}{d^2} (r_0^2 - r^2) v \quad (14)$$

通过式(14),层流圆管断面不同位置的水头损失 h_f 可表示为

$$h_{f(r)} = \frac{32\nu l}{gd^2} u(r) \quad (15)$$

对不同位置的水头损失进行积分,可得整个断面的平均沿程水头损失,即

$$\bar{h}_f = \frac{\int_{-r_0}^{r_0} h_{f(r)} dr}{2r} \quad (16)$$

将式(14)、(15)代入式(16),可得修正后的流速计算公式,即

$$v_c = \frac{gd^5 \bar{h}_f}{256\nu l \int_{-r_0}^{r_0} (r_0^2 - r^2) dr} = \frac{3gd^2 \bar{h}_f}{128\nu l} \quad (17)$$

针对细管径高扬程低水头差条件下边界层作用导致计算方法不适用的问题,提出的式(17)将在后续章节中用于修正计算流速来降低与实测值之间的误差。

3.2 过渡流计算误差修正

过渡流的研究一直是流体力学领域的重大难题。当处于过渡流时,管内流态混乱,无法精确计算沿程水头损失系数 λ 。通过巴尔公式对流速进行迭代运算的计算值小于实测值,表明计算过程中的沿程阻力比管内实际环境中的更大。表 2 为 8 组处于

过渡流时的方案,列出各方案计算和实测的流速、雷诺数和沿程水头损失系数。由表 2 可知,高误差率方案计算值的雷诺数 Re_c 均处于 2 000 ~ 2 200,当下临界雷诺数 $Re \approx 2\ 100$ 时,流态由层流逐渐向湍流

开始过渡。此时,基于巴尔公式的计算存在一定的误差,考虑在巴尔公式中引入折减系数 a 对临界雷诺区 ($2\ 000 \leq Re_c \leq 2\ 200$) 的方案进行重新迭代计算。

表 2 高误差率方案物理参数统计
Tab. 2 Statistics of physical parameters of schemes with high error rates

组别	d/mm	H_0/m	H_1/m	$v_c/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_t/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	λ_c	λ_t	λ_t/λ_c	Re_c	Re_t
1	5	9.15	16.8	0.519 6	0.597 7	0.049 33	0.036 49	0.739 7	2 159	2 484
2	5	9.15	8.4	0.519 6	0.596 5	0.049 33	0.036 64	0.742 7	2 159	2 479
3	5	9.15	4.2	0.519 6	0.596 6	0.049 33	0.036 62	0.742 3	2 159	2 479
4	5	9.15	3.3	0.519 6	0.594 4	0.049 33	0.036 27	0.735 2	2 159	2 491
5	5	8.25	2.1	0.477 5	0.574 0	0.050 17	0.034 47	0.687 1	2 054	2 469
6	5	7.35	2.1	0.493 4	0.608 8	0.050 39	0.032 80	0.650 9	2 029	2 503
7	4	7.35	4.2	0.588 9	0.717 3	0.050 38	0.033 76	0.670 1	2 037	2 481
8	4	4.05	2.1	0.575 4	0.669 6	0.049 19	0.036 02	0.732 2	2 186	2 544

注: λ_c 为计算得出的沿程水头损失系数, λ_t 为实测值的沿程水头损失系数, Re_c 为计算值雷诺数, Re_t 为实测值雷诺数。

由表 2 可知,处于临界雷诺区时,计算值的沿程水头损失系数明显大于实测值的沿程水头损失系数,这是由巴尔公式计算的局限性导致的。对两者进行相关性分析,发现 λ_t 与 λ_c 的比均在 0.7 左右,可用下式表示:

$$\lambda_t \approx 0.71 \lambda_c \tag{18}$$

将折减系数 $a = 0.71$ 引入式(8)中,新的经验巴尔公式如下:

$$\lambda = 0.71 \left[\frac{1}{-2\lg\left(\frac{\Delta}{3.7d} + \frac{5.128\ 6}{Re^{0.89}}\right)} \right]^2, 2\ 000 \leq Re_c \leq 2\ 200 \tag{19}$$

重新审视计算过程,需对计算值的雷诺数进行判断验证。当 $2\ 000 \leq Re_c \leq 2\ 200$ 时,在巴尔公式中引入折减系数 a 进行重新运算。最后,新的计算流程如图 8 所示。

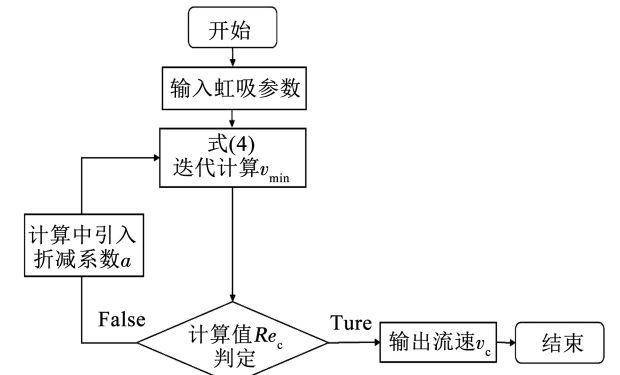


图 8 过渡流计算流程

Fig. 8 Transition flow calculation process

3.3 流速修正计算结果分析

采用提出的修正计算方法,获得各管径在不同扬程下的计算值和实测值,如图 9(a) ~ (d) 所示。表 3 为修正前后的绝对误差率对比,高扬程低水头差情况下,整体的绝对误差率 E_r 从 29% ~ 40% 降低至 0 ~ 6%,对于过渡流方案的绝对误差率 E_r 均控制在 5% 以下。结果表明,计算值和实测值之间的吻合程度较高,具有较好的一致性,有效提高了计算精度。

表 3 计算值修正前后误差对比
Tab. 3 Comparison of errors before and after correction of calculated values

组别	d/mm	H_0/m	H_1/m	绝对误差率 $E_r/\%$	
				初始	修正
1	4	4.05	4.2	14.07	4.78
2	4	7.35	4.2	17.90	0.47
3	5	7.35	2.1	18.96	0.94
4	5	8.25	2.1	16.81	1.69
5	5	9.15	16.8	13.07	4.27
6	5	9.15	8.4	12.89	4.48
7	5	9.15	4.2	12.91	4.46
8	5	9.15	3.3	13.31	3.97
9	3	9.15	1.8	40.31	5.23
10	3	9.15	1.2	38.51	3.88
11	3	9.15	0.6	40.38	5.29
12	4	9.15	1.2	33.16	0.13
13	4	9.15	0.6	28.99	3.25

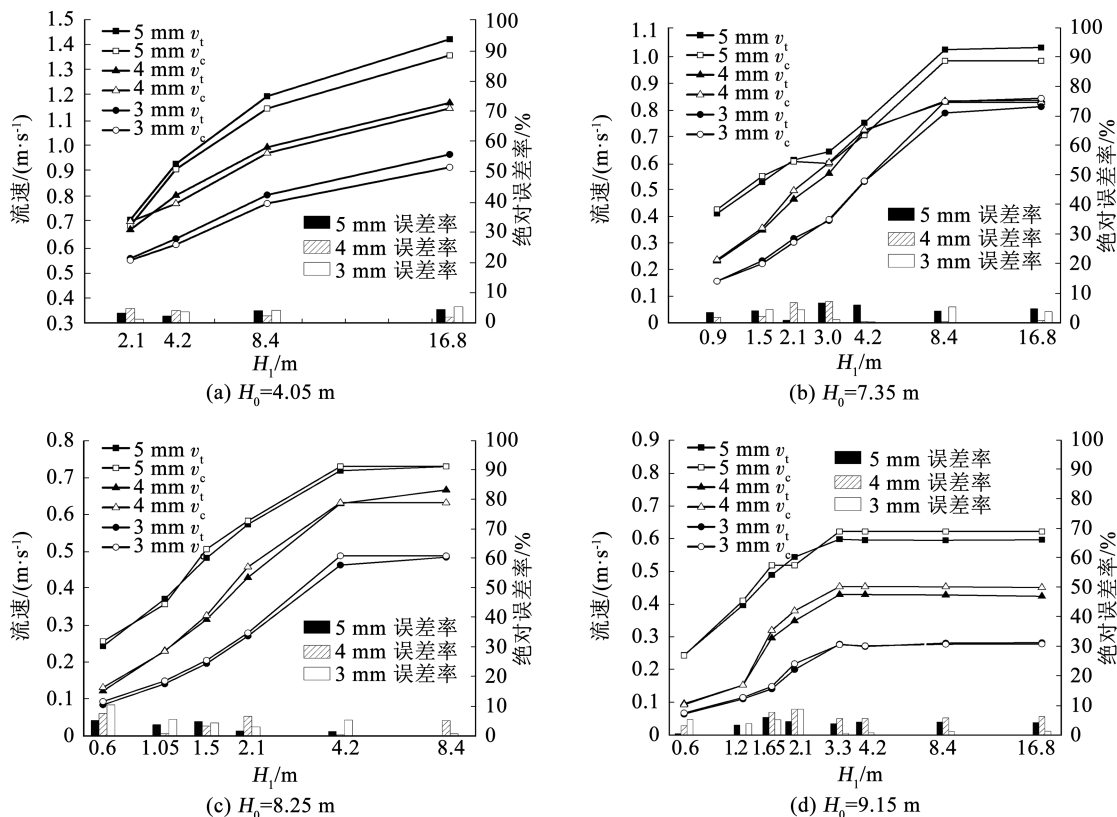


图9 虹吸流速修正计算值与实测值

Fig.9 Comparison between measured values of siphon velocity and calculated values by correction method

4 结 论

对不同工况下的虹吸流速展开研究,提出流速的修正计算公式,有效提高了细管径($d \leq 5$ mm)虹吸流速的计算精度,主要结论如下:

1) 基于虹吸流动过程的分析,确定了流速计算的参数和适用于虹吸迭代运算的沿程水头损失系数计算公式,并通过物理试验验证了其合理性。

2) 发现高扬程低水头差虹吸流速计算误差较大是由于忽略了管壁边界层作用,进而提出了利用断面平均水头损失反映边界层作用影响的虹吸圆管层流流速计算公式,物理试验表明,公式修正后绝对误差率 E_r 从最大的40%降低到10%以内。

3) 针对过渡流($2\,000 \leq Re_c \leq 2\,200$),引入折减系数 a 修正巴尔公式,物理试验表明,该修正公式的绝对误差率 E_r 在6%以内,修正效果良好。

参考文献

- [1] 王塞, 邓建辉, 陈菲, 等. “10·10”西藏白格滑坡运动特征反演分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2022, 54(2): 162
WANG Sai, DENG Jianhui, CHEN Fei, et al. Inverse analysis of motion characteristics of “10·10” Baige landslide in Tibet[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2022, 54(2): 162. DOI: 10.11918/202009039
- [2] 宋享桦, 谭勇, 张生杰. 暴雨气候下砂土边坡植被护坡模型试

- 验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(5): 123
SONG Henghua, TAN Yong, ZHANG Shengjie. Experimental study on vegetation slope protection model of sandy slope under rainstorm climate[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(5): 123. DOI: 10.11918/201908166
- [3] WEI Z, WANG D, XU H, et al. Clarifying the effectiveness of drainage tunnels in landslide controls based on high-frequency in-site monitoring[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2020, 79(7): 3289. DOI:10.1007/s10064-020-01769-z
- [4] TOHARI A, WIBAWA S, KOIZUMI K, et al. Effectiveness of siphon drainage method for landslide stabilization in a tropical volcanic hillslope: a case study of Cibitung Landslide, West Java, Indonesia[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2021, 80(3): 2101. DOI:10.1007/s10064-020-02093-2
- [5] ALOI F, PIRONE M, URCIUOLI G. Numerical investigation of small-and medium-diameter drain wells to stabilise deep landslides[J]. Acta Geotechnica, 2019, 14(4): 1065. DOI:10.1007/s11440-018-0688-8
- [6] 许欢, 尚岳全, 徐浩迪, 等. 水平排水孔地下水位线附近淤堵机理分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2019, 39(6): 961
XU Huan, SHANG Yuequan, XU Haodi, et al. Analysis of siltation mechanism near the groundwater level of horizontal drainage holes[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction Engineering, 2019, 39(6): 961. DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.2019.06.011
- [7] 尚岳全, 蔡岳良, 魏振磊, 等. 滑坡虹吸排水方法[J]. 工程地质学报, 2015, 23(4): 706
SHANG Yuequan, CAI Yueqiang, WEI Zhenlei, et al. Siphon drainage method of landslide[J]. Journal of Engineering Geology, 2015, 23(4): 706. DOI:10.13544/j.cnki.jeg.2015.04.018

[8]汪磊, 尚岳全, 吕俊俊, 等. 虹吸排水抗淤堵能力模型试验与理论分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(2): 384
WANG Lei, SHANG Yuequan, LÜ Junjun, et al. Model test and theoretical analysis of anti silting capacity of siphon drainage[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2019, 50(2): 384. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2019.02.018

[9]吴纲, 谢威, 严鑫, 等. 虹吸水流作用下的土柱运动特性及虹吸管道防淤堵措施[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2019, 49(5): 1398
WU Gang, XIE Wei, YAN Xin, et al. Movement characteristics of soil column under siphon flow and anti silting measures of siphon pipeline[J]. Journal of Jilin University (Geoscience Edition), 2019, 49(5): 1398. DOI:10.13278/j.cnki.jjuese.20180138

[10]CAI Y, SUN H, SHANG Y, et al. Air accumulation in high-lift siphon hoses under the influence of air dissolution and diffusion[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2015, 16(9): 760. DOI:10.1631/jzus.A1400358

[11]CAI Y, SUN H, SHANG Y, et al. An investigation of flow characteristics in slope siphon drains[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2014, 15(1): 22. DOI:10.1631/jzus.A1300178

[12]孙红月, 熊晓亮, 尚岳全, 等. 边坡虹吸排水管内空气积累原因及应对措施[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(1): 278
SUN Hongyue, XIONG Xiaoliang, SHANG Yuequan, et al. Causes of air accumulation in slope siphon drainage pipe and countermeasures[J]. Journal of Jilin University (Geoscience Edition), 2014, 44(1): 278. DOI:10.13278/j.cnki.jjuese.201401205

[13]熊晓亮, 孙红月, 张世华, 等. 高扬程虹吸保障条件分析与合理管径选择数值模拟[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(5): 1595
XIONG Xiaoliang, SUN Hongyue, ZHANG Shihua, et al. Analysis of high lift siphon support conditions and numerical simulation of reasonable pipe diameter selection[J]. Journal of Jilin University (Geoscience Edition), 2014, 44(5): 1595. DOI:10.13278/j.cnki.jjuese.201405202

[14]潘攀. 黑方台滑坡机理及防治对策研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017
PAN Pan. Study on mechanism and control counter measures of Heifangtai landslide[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017

[15]吴显. 虹吸排水方法在横山路滑坡治理中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2019
WU Xian. Application of siphon drainage method in Hengshan Road landslide treatment[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019

[16]YU Y, SHEN M, SUN H, et al. Robust design of siphon drainage method for stabilizing rainfall-induced landslides[J]. Engineering Geology, 2019, 249: 186. DOI:10.1016/j.enggeo.2019.01.001

[17]张永防, 张朝林. 湘黔线 K93 路堑滑坡虹吸排水工点的试验研究[J]. 路基工程, 1999(4): 26
ZHANG Yongfang, ZHANG Chaolin. Experimental study on siphon drainage construction site of K93 cutting landslide on Hunan Guizhou line[J]. Subgrade Engineering, 1999(4): 26

[18]ZHENG J, GUO J, WANG J, et al. Calculation of the flow velocity of a siphon[J]. Physics of Fluids, 2021, 33(1): 17105. DOI: 10.1063/5.0036443

[19]MEI C, LIANG X, SUN H, et al. High-lift siphon flow velocity in a 4-mm siphon hose[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2017, 18(6): 487. DOI:10.1631/jzus.A1600428

[20]JUMPER W D, STANCHEV B. Towards explaining the water siphon[J]. The Physics Teacher, 2014, 52(8): 474. DOI:10.1119/1.4897583

[21]ZHENG J, WANG J, GUO J, et al. A siphon drainage system with variable diameters for landslides: concept, calculation, and validation[J]. Journal of Hydrology, 2021, 597: 126305. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.126305

[22]LI P, SEEM J E, LI Y. A new explicit equation for accurate friction factor calculation of smooth pipes[J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34(6): 1535. DOI:10.1016/j.ijrefrig.2011.03.018

[23]方玉建, 袁寿其, 赵丽伟, 等. 负压输水光滑管道水力摩擦系数的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(1): 58
FANG Yujian, YUAN Shouqi, ZHAO Liwei, et al. Experimental study on hydraulic friction coefficient of negative pressure water delivery smooth pipeline[J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering, 2020, 38(1): 58. DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.18.0037

[24]SHI S, WANG Y, QI Z, et al. Experimental investigation and new void-fraction calculation method for gas-liquid two-phase flows in vertical downward pipe[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2021, 121: 110252. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2020.110252

[25]POTTER A, BARNES F H. The siphon[J]. Physics Education, 1971(6): 362. DOI:10.1088/0031-9120/6/5/005

[26]赵振兴, 何建京. 水力学[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2010
ZHAO Zhenxing, HE Jianjing. Hydraulics[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2010

[27]MULLIN T. Experimental studies of transition to turbulence in a pipe[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2011, 43(1): 1. DOI:10.1146/annurev-fluid-122109-160652

[28]张俊, 张晓婷. 流体传输中流体阻力和水头损失的计算[J]. 流体传动与控制, 2011(4): 28
ZHANG Jun, ZHANG Xiaoting. Calculation of fluid resistance and head loss in fluid transmission[J]. Fluid Transmission and Control, 2011(4): 28

[29]BARR D I H. Discussion of "Accurate explicit equation for friction factor"[J]. Journal of Hydraulics Division, 1977, 103(3): 334. DOI:10.1061/JYCEAJ.0004722

[30]COLEBROOK F C. Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition region between smooth and rough pipe laws[J]. Journal of the ICE, 1939, 11(4): 133. DOI:10.1680/ijoti.1939.13150

(编辑 刘 彤)