

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.202100906



本刊网刊

浮体式结构阻力系数试验研究

崔 贞¹, 傅宗甫², 陈月君³

(1.常州工学院 土木建筑工程学院, 江苏 常州 213032; 2.河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098;
3.黄河水利委员会 黄河水利科学研究院 水利部黄河泥沙重点实验室, 河南 郑州 450003)

摘 要: 浮体式结构作为一种适合于沿海地区及内河水利枢纽工程建设新型生态构筑物, 当在平原水利防洪工程中运行时, 由于浮体的阻挡, 导致水流发生分流产生水头损失, 进而影响过流能力。因此, 研究浮体式结构阻力系数的变化规律及因素影响机理具有现实意义。本文采用物理模型试验, 基于水动力学理论分析, 利用量纲分析得到影响浮体式结构阻力系数的影响因素有水位变化系数、浮体结构长度与浮体结构位置比值(长位比)、相对阻水面积及雷诺数。对影响因素与阻力系数进行相关性研究及敏感性分析, 结果表明: 1) 水位变化系数的增加, 导致结构背水面的位置出现回流区, 水流质点的紊动强度增加, 阻力系数增大; 2) 浮体式结构沿水流长度方向及位置的变化, 一定程度上并不会引起水流能量的损失, 对浮体结构的阻力系数的影响较小; 3) 相对阻水面积系数的增大会导致水体过水面积减小, 水体质点相互摩擦和碰撞消耗水流能量, 引起浮体式结构的阻力系数增大; 4) 在试验的雷诺数范围内($3.5 < \lg Re < 5.0$), 雷诺数增大时, 形成紊乱不规则的流场, 惯性力对流场的影响大于黏滞作用力, 阻力系数减小; 5) 各因素对阻力系数敏感性从大到小排列为水位变化系数>相对阻水面积>雷诺数>长位比。通过基于最小二乘法的多元线性拟合, 比较得到描述浮体式结构阻力系数的计算公式, 并采用数理统计对公式进行检验和误差分析, 该公式在可靠性及精确度方面能够满足工程需要且形式简单、通用性强, 可为相关工程提供理论依据。

关键词: 浮体式结构; 阻力系数; 雷诺数; 敏感性; 数理统计

中图分类号: TV652

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2022)06-0222-08

Experimental Study on Resistance Coefficient of Floating Structure

CUI Zhen¹, FU Zongfu², CHEN Yuejun³

(1.School of Civil and Architectural Eng., Changzhou Inst. of Technol., Changzhou 213032, China;

2.College of Water Conservancy and Hydropower Eng., Hohai Univ., Nanjing 210098, China;

3.MWR Key Lab. of Yellow River Sediment, Yellow River Inst. of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: Floating structure is a new type of ecological structure suitable for the coastal and inland water conservancy projects. The application of floating structure in plain water conservancy and flood control projects will lead to the diversion of water flow and cause head loss, which will affect the flow capacity. Therefore, it is of practical significance to study and obtain the changing law of the resistance coefficient of the floating structure and the influence mechanisms. The physical model test and dimensional analysis were used to obtain the influencing factors affecting the resistance coefficient of the floating structure, i.e., the coefficient of water level change, the ratio of the length of the floating structure to the position of the floating structure, the relative water blocking area and the Reynolds number. The sensitivity analysis on influencing factors and resistance coefficient was conducted, and the results show that: 1) The increase in the coefficient of water level change results in a recirculation zone at the back surface of the structure, and both the turbulence intensity of the water flow particles and the resistance coefficient increase; 2) The

收稿日期:2021-09-07

基金项目:江苏省高校高层次人才研究启动项目(YN20068);国家自然科学基金面上项目(51279048);江苏省高校自然科学面上项目(20KJD430002)

作者简介:崔 贞(1989—),女,讲师,博士.研究方向:工程水力学. E-mail: cuiz@czust.edu.cn

网络出版时间:2022-07-29 09:54:36

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.tb.20220728.1437.008.html

change of the floating structures' length and position will not cause the loss of water flow energy and has little effect on the resistance coefficient; 3) The increase in the relative water blocking area coefficient leads to the decrease of the water passing area, and the friction and collision of water particles consume water flow energy, causing the resistance coefficient to increase. 4) Within the range of the tested Reynolds number ($3.5 < \lg Re < 5.0$), when the Reynolds number increases, the turbulent and irregular flow field was formed, and the influence of inertial force on the flow field is greater than that of the viscous force, with the resistance coefficient being decreased. 5) The sensitivity of each factor to the resistance coefficient is arranged in the descending order as follows: the coefficient of water level change>the relative water blocking area>Reynolds number>the ratio of length to position. Through the multivariate linear fitting based on the least square method, the calculation formula describing the resistance coefficient of the floating structure was obtained, and the formula was tested and analyzed by mathematical statistics. The formula can meet the engineering needs in terms of reliability and accuracy, and the form is simple and versatile, which can provide a theoretical basis for related projects.

Key words: floating structure; resistance coefficient; Reynolds number; sensitivity; mathematical statistics

目前,发展绿色小水电,促进河流湖泊休养生息,建立生态型水工结构已成为水利建设的重点并得到广泛关注。浮体式结构作为一种新型的生态水工结构,具有不断航,对生态环境影响小,可在工厂制作和现场安装,兼顾防洪、通航及景观保护等优点,在水利工程中得到广泛应用^[1-3]。浮体式结构通常为—横跨于有限水域(河道)、两侧下游有岸墙约束的大长宽比的结构,其在有限流动水域中沉浮时,水动力条件复杂,水流受浮体式结构的遮挡只能从浮体的上、下部绕流经过。经过浮体的水流流态将出现孔流、孔堰复合流和堰流的过渡,流型不断发生变化,并在浮体的上、下游形成明显的水位差^[4-5]。浮体式结构在动水启闭过程中,水流流经浮体结构发生分流,流态急剧变化,往往发生主流与边壁脱离的现象,在分离点后面形成旋涡区。旋涡区及其下游局部流段内水流紊动剧烈,产生较大的惯性阻力及黏性阻力,形成局部水头损失,从而影响浮体式结构的泄流能力^[6-7]。

关于局部水头损失的研究,对于突扩式水力结构的局部水头损失研究较多且较成熟^[8-9]。菅佳乐等^[10]通过物理模型试验,得到泵出口管段局部阻力损失系数变化曲线,可知,大流量下当雷诺数进入阻力平方区后,泵出口管段局部阻力损失系数将不再发生变化。李蕾^[11]对渐扩段水面线进行分析,得到不同流量下局部水头损失与流场的相关规律,流量越大,水流对两边墙的冲击增大,从而导致水头差变大。唐英敏等^[12]计算天然河道渐扩段的分流漩涡产生的局部水头损失,流量越大,产生的能量损失越大。傅铭焕等^[13]通过能量分析,得到突扩式消力池“S”形水跃局部水头损失系数与跃前断面弗劳德数成正比,且相对局部水头损失系数随弗劳德数既呈线性变化,又呈乘幂变化。

水流流经浮体式结构产生分流,水流从结构的上、下部分进入到下游区域。关于结构分流造成的局部水头损失,由于结构复杂,分流各异,现研究大多

通过试验拟定。Zhang等^[14]分析分叉隧道分流产生的局部损失主要是由速度梯度变化和流动偏转与分离引起的,并通过理论分析提出预测分岔隧道分流位置局部损失系数的理论公式。Gabl等^[15]通过不同模型尺度的比较,得到节流式缓冲槽在不对称孔口下的局部水头损失系数与流速及压强差有关。由于水电站输水系统的分岔管内水流流态比较复杂,水头损失较大,黄静之等^[16]采用数值模拟分析了管道分流/合流流态下局部水头损失系数与分流比的关系,得到水流反向流经隔壁式岔管的水头损失系数均小于正向,但相差不大。李涛等^[17]模拟明渠横向分流产生水头损失,提出不同断面形态下弗劳德数和局部水头损失系数的变化关系;且明渠缓流情况下,局部水头损失系数随着弗劳德数的增大而减小。顾欣欣^[18]对管径相差较大的卜型岔管水头损失进行分析,其中,分流比及分岔角分别在 0.22 及 $45^\circ \sim 60^\circ$ 时,局部水头损失最小。张志昌^[19-20]与宁利中^[21]等分析得到水距区沿程水头损失远小于局部水头损失的变化规律,局部水头损失等于总水头损失。由于影响局部损失产生的边界形状各异,周围旋涡产生和分离的情况并不相同,因此,国内外研究大多基于相应的实际工程或者相关的物理模型试验,难以在理论上全面分析,只能通过试验或数学模型对局部水头损失进行研究,故公式的通用性在使用方面有一定的限制。且涉水结构造成的局部水头损失,大多涉及不同形式的管道水流,对于明渠水流局部水头损失也多为单一河道或河道分、汇流,在河道中由于浮体式结构物造成的水流分流较少涉及。

本文基于大量室内水槽模型试验,将流动水域中浮体式结构进行通用简化。基于水动力学理论及统计学分析,探究浮体式结构在运行过程中阻力系数特性及因素的影响机理。通过量纲分析,得到影响浮体阻力系数的影响因素,即水位变化系数、长位比、相对阻水面积及雷诺数。采用控制变量法,对各影响因素的相关性进行分析;基于最小二乘法的多元线

性拟合,建立阻力系数的计算公式,并比较各参数的敏感性大小。最后,对阻力系数计算公式的正确性进行验证。本文提出了浮体式结构运行过程中由于分流产生的阻力系数,并得到其拟合公式,且公式结构简单,通用性强,可为工程中浮体式涉水建筑物引起的局部损失计算提供理论依据。

1 试验装置及设计

1.1 试验装置

为研究水流流经浮体结构所产生的阻力系数,试验在河海大学工程水力学实验室展开,试验装置

为自循环控制系统的有机玻璃水槽。该装置主要由水泵、供水管、稳流浮板、有机玻璃水槽、控制尾门、回水箱及电磁流量计组成(图1(a))。有机玻璃水槽的长、宽、高分别为10.00、0.30和0.50 m。浮体结构位于水槽中心区域,此处来流已达到平稳(图1(b))。采用精度为0.10 mm的测针读取上、下游水位,其中:上游水位测点设定在距浮体水头5倍以上距离,下游测点设在水位稳定处;待两处水位稳定,多次测量取均值。采用3维超声波多普勒测速仪(ADV)测量流速,采样频率为50 Hz,启动流速为0.25 cm/s;在输水管处安装电磁流量计监测流量,其精度为±0.5%。

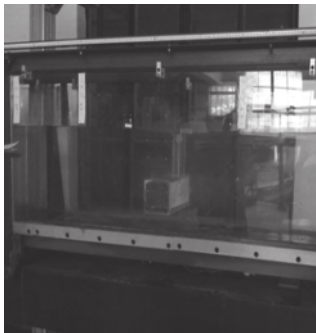
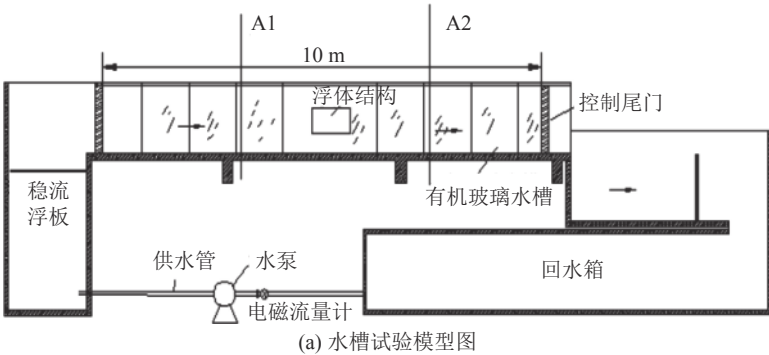


图 1 试验装置图

Fig. 1 Test device diagram

图2为试验装置布置图。浮体结构高度 a 为0.10 m;浮体宽度 B 与水槽相同,为0.30 m。通过改变浮体结构沿水流方向长度 l ,浮体结构位置 e ,来流流量 Q ,上、下游水位 H 及 H' ,探究阻力系数 ζ_f 的变化。

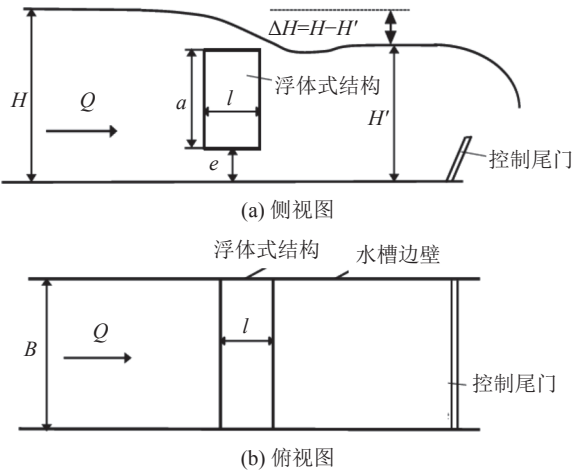


图 2 试验装置布置示意图

Fig. 2 Layout and the sketch of the experimental rig

1.2 试验设计

阻力系数 ζ_f 除了与流速、过水断面形状及尺寸有关外,还与边壁的粗糙度等因素有关。试验中,浮体结构及水槽采用当量粗糙度为0.05 mm的有机玻璃

板制作,其表面近似光滑,表面摩擦阻力可忽略不计。因此,重点研究浮体参数及水力因素对 ζ_f 的影响。试验工况设计见表1。

表 1 试验工况设计

Tab. 1 Experimental design conditions

长度/cm	位置 e /cm	流量/(L·s ⁻¹)	上下游水位差/m
10、20、30、40	2.0	15、18、21、24	0.01、0.02、0.03、0.04
10、20、30、40	5.0	15、18、21、24	0.01、0.02、0.03、0.04
10、20、30、40	10.0	15、18、21、24	0.01、0.02、0.03、0.04

2 试验结果分析

2.1 无因次分析

选取试验水槽过水断面 A_1 、 A_2 (图1), h_{wf} 为水流流经上游断面(A_1)到下游断面(A_2)所引起的总水头损失。总水头损失包括沿程水头损失和局部水头损失,试验过程中,考虑到水槽采用有机玻璃板制成,且断面 A_1 – A_2 之间距离很短,沿程水头损失可以忽略不计。水槽为平坡且水流处于大气压强下,因此试验所测两断面的势能相等。通过断面不同位置流速与断面平均流速对比,误差在1%。因此,过水断面的实际动能采用平均流速计算。浮体结构所产生的总水头损失,也即局部水头损失为:

$$h_{wf} = \zeta_f \frac{v_1^2 - v_2^2}{2g} \quad (1)$$

式中: ζ_f 为浮体结构阻力系数; v_1 、 v_2 分别为断面 A_1 、 A_2 的平均流速, m/s; g 为重力加速度, m/s^2 。

考虑到水流绕流经过浮体结构水力特性复杂, 试验过程中, 对影响阻力系数 ζ_f 的浮体结构及水力学参数进行分析, 主要包括: 水流流速 v (上游断面水流平均流速), LT^{-1} ; 上游水位 H , L; 水位差 ΔH , L; 浮体结构长度 l , L; 浮体位置 e , L; 浮体高度 a , L; 水流密度 ρ , ML^{-3} ; 重力加速度 g , LT^{-2} ; 水的运动黏滞系数 ν , L^2T^{-1} 。采用雷利法(L.Rayleigh)得到:

$$h_{wf} = f(H, \rho, g, \nu, \Delta H, l, e, a, \nu) \quad (2)$$

在常温下, 水体密度 ρ 保持不变, 浮体式结构的阻力系数可表示为:

$$\zeta_f = \frac{h_{wf}}{\left(\frac{v^2}{2g}\right)} = f\left(\frac{\Delta H}{H}, \frac{l}{e}, \frac{a}{H}, Re\right) \quad (3)$$

式中: 定义 $\Delta H/H$ 为水位变化系数 φ ; l/e 为浮体长度与位置比, 简称长位比; a/H 为相对阻水面积 δ ; Re 为雷诺数。则式(3)可简化为:

$$\zeta_f = m\left(\varphi, \frac{l}{e}, \delta, Re\right) \quad (4)$$

2.2 参数相关性分析

2.2.1 水位变化系数 φ

图3为浮体式结构阻力系数 ζ_f 与水位变化系数 φ 关系散点图。

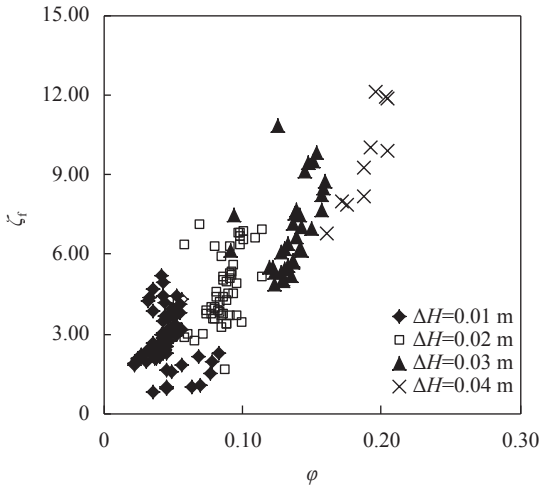


图3 ζ_f 与 φ 的关系散点图

Fig. 3 Correlation diagram of ζ_f and φ

由图3可知, 随着 φ 的增加, ζ_f 呈现增大的趋势, 阻力系数 ζ_f 与 φ 呈现较好的正相关关系。随着下游水位的增大, 上下游水位差减小, 浮体结构的阻水作用下

降。上游来流受到浮体的阻挡作用, 分别从浮体结构的上部和下部绕流经过, 当下游水位出现下降时, 流经浮体结构上部水体发生跌落, 在浮体结构背水面的位置出现回流区。在回流区范围内, 水流质点的紊动强度增加, 回流区与主流之间不断有质量和能量的交换发生, 使得水流流经浮体式结构的阻力系数增大。

2.2.2 长位比 l/e

图4为 l/e 与 ζ_f 的关系图。在相同的水位差条件下, 浮体结构阻力系数 ζ_f 随着 l/e 的变化并不明显。浮体结构沿水流长度方向的增加, 一定程度上并不会引起水流能量的损失。水流经过浮体结构的阻挡, 主流分成两支分流, 水流方向平行于浮体结构上、下表面, 水体之间的质点并不会产生强烈的碰撞和摩擦。因此, 即使浮体结构长度之间有一定的差别, 对浮体结构的阻力系数的影响并不大。同样, 浮体结构位置 e 的变化对 ζ_f 并无明显的影响趋势, 即当浮体结构完全浸入水中时, 浮体结构位置对阻力系数的影响也并不明显。图4中, 当上下游水位差 ΔH 增大时, 不同长位比的浮体结构损失系数增大, 这是因为水位差增加了水流质点之间的摩擦, 水体与浮体结构之间碰撞使得水流的能量减小, 因此阻力系数增大, 这与之前的结论一致。

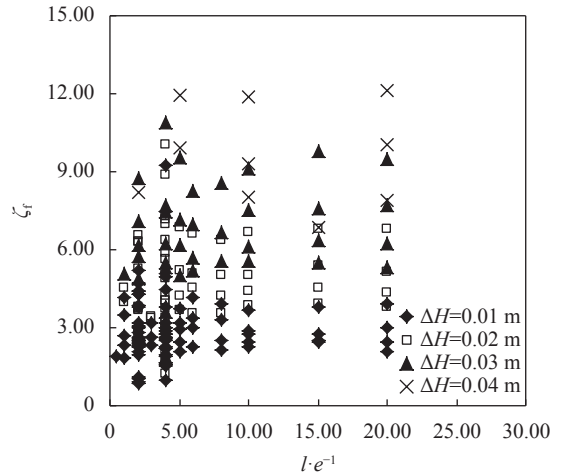


图4 ζ_f 与 l/e 的关系图

Fig. 4 Correlation diagram of ζ_f and l/e

2.2.3 相对阻水面积 δ

图5为相对阻水面积系数 δ 与 ζ_f 的关系图。从图5中可以看出, 浮体结构的阻力系数 ζ_f 随着 δ 的增大呈现增大的趋势。浮体结构的相对阻水面积系数 δ 的增大会导致水体过水面积减小, 流经浮体结构的水体因为受到浮体结构的阻挡作用, 过水断面面积突然减小, 水流受到挤压流速增大, 水体质点的相互摩擦和碰撞消耗了大量的水流能量, 机械能减小, 导致阻

力损失系数增大。

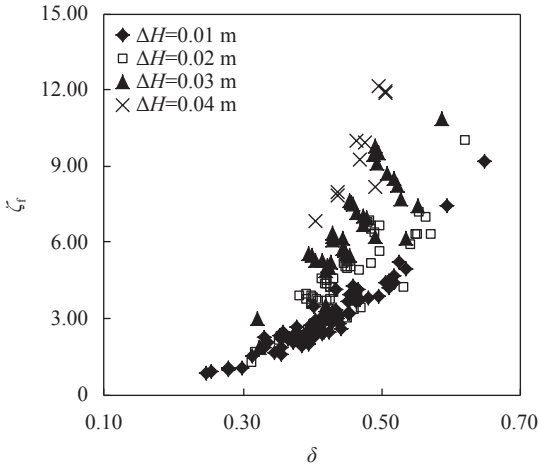


图 5 ζ_f 与 δ 的关系图

Fig. 5 Correlation diagram of ζ_f and δ

2.2.4 雷诺数 Re

图6为雷诺数影响下的阻力系数 ζ_f 变化。从图6中可以看出,在试验的雷诺数范围内($3.5 < \lg Re < 5.0$),浮体式结构的阻力系数 ζ_f 随着雷诺数的增大而减小。当雷诺数增大时,由于液体质点的混掺,使得质点间发生动量交换,流速增大,形成紊乱不规则的流场,惯性力对流场的影响大于黏滞作用力,水流快速流经浮体结构,因此阻力系数减小。

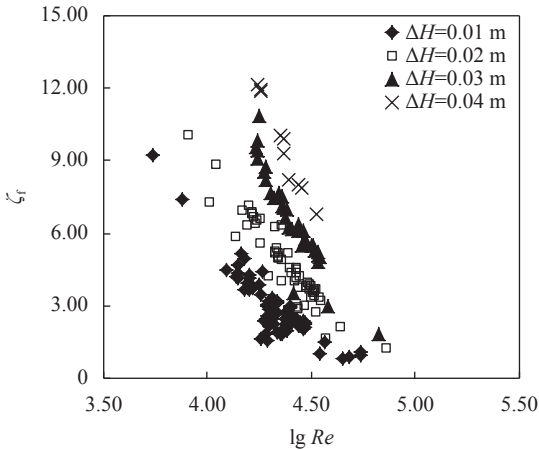


图 6 ζ_f 与 Re 的关系图

Fig. 6 Correlation diagram of ζ_f and Re

由上述分析可以得知,浮体式结构的阻力系数 ζ_f 与水位变化系数、相对阻水面积及雷诺数关系较明显,而与长位比的关系并不明显。阻力系数随着水位变化系数及相对阻水面积的增大呈现增大的趋势;随着雷诺数的增加,阻力系数逐渐减小。

3 敏感性分析及公式推导验证

3.1 公式推导及敏感性分析

对阻力系数 ζ_f 分析可知,其与水位变化系数 φ 、长

位比 l/e 、相对阻水面积 δ 及雷诺数 Re 存在相应关系。采用多元线性拟合,将4种因子对 ζ_f 的影响进行拟合。为得到影响因素的敏感性大小,分别建立5种不同的模型:

MD(a):

$$\zeta_f = m\left(\varphi, \frac{l}{e}, \delta, Re\right) \quad (5)$$

MD(b):

$$\zeta_f = m\left(\frac{l}{e}, \delta, Re\right) \quad (6)$$

MD(c):

$$\zeta_f = m(\varphi, \delta, Re) \quad (7)$$

MD(d):

$$\zeta_f = m\left(\varphi, \frac{l}{e}, Re\right) \quad (8)$$

MD(e):

$$\zeta_f = m\left(\varphi, \frac{l}{e}, \delta\right) \quad (9)$$

基于最小二乘法的多元线性拟合,以及影响因素与 ζ_f 的相关关系,得到4种影响因素对 ζ_f 影响敏感性的5种计算公式,表达式如下:

MD(a):

$$\zeta_f = 16.81 + 40.41\varphi + 0.03\frac{l}{e} + 9.77\delta - 4.59\lg Re \quad (10)$$

MD(b):

$$\zeta_f = -29.44 + 0.12\frac{l}{e} + 33.09\delta + 4.31\lg Re \quad (11)$$

MD(c):

$$\zeta_f = 18.65 + 41.85\varphi + 8.99\delta - 4.92\lg Re \quad (12)$$

MD(d):

$$\zeta_f = 35.24 + 47.40\varphi + 0.01\frac{l}{e} - 7.94\lg Re \quad (13)$$

MD(e):

$$\zeta_f = -6.03 + 34.58\varphi + 0.04\frac{l}{e} + 17.10\delta \quad (14)$$

比较阻力系数5种预测模型的拟合优度 R^2 ,并采用统计学指标(决定修正系数AMCC和准估计误差RMSE)进行分析。其中:AMCC用来衡量模型的拟合优度;RMSE是对数据分析可靠性的估计,RMSE小,说明拟合的可靠性大。各参数的计算公式为:

$$R^2 = \frac{\sum_{k=1}^K (Y_{k-\text{predicted}} - \bar{Y})^2}{\sum_{k=1}^K (Y_{k-\text{experimental}} - \bar{Y})^2} \quad (15)$$

$$AMCC = R^2 - \frac{J \times (1 - R^2)}{k - J - 1} \tag{16}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^K (Y_{k-experimental} - Y_{k-predicted})^2}{K - J - 1}} \tag{17}$$

式中, $Y_{k-experimental}$ 为试验值, $Y_{k-predicted}$ 为预测值, $\bar{Y}$ 为试验值的平均数, K 为试验的次数, J 为无因次自变量因子的数量, R^2 为拟合优度。

表2为5种模型的AMCC和RMSE的比较。从表2中可以看出: MD(a)的拟合效果最好; MD(c)较MD(a)而言, 精确度下降很小; 模型MD(d)与MD(e)的拟合效果弱低于MD(c), 同为0.905; MD(b)的拟合效果最差。这说明对于描述浮体式结构的阻力系数而言, 因素 l/e 对 ζ_f 的影响作用较弱, 敏感性较低; 对

于模型MD(d)与MD(e), 在分别没有参数 δ 和 Re 的条件下, 模型的精确度有所下降, 说明 δ 和 Re 对 ζ_f 的影响作用较显著, 敏感性较大; 对于MD(b)而言, 精确性下降较大, 且误差较大, 说明 φ 是影响 ζ_f 的主要因素。因此对4种参数对 ζ_f 的影响敏感性从大到小排序为: $\varphi > \delta > Re > l/e$ 。

表 2 5种模型的AMCC和RMSE比较

Tab. 2 Values of AMCC and RMSE for five models					
模型	AMCC	RMSE	模型	AMCC	RMSE
MD(a)	0.930	0.645	MD(d)	0.905	0.739
MD(b)	0.612	1.494	MD(e)	0.925	0.741
MD(c)	0.905	0.657			

图7为不同模型阻力系数的拟合值 $\zeta_{f-predicted}$ 与试验值 $\zeta_{f-experimental}$ 的对比散点图。

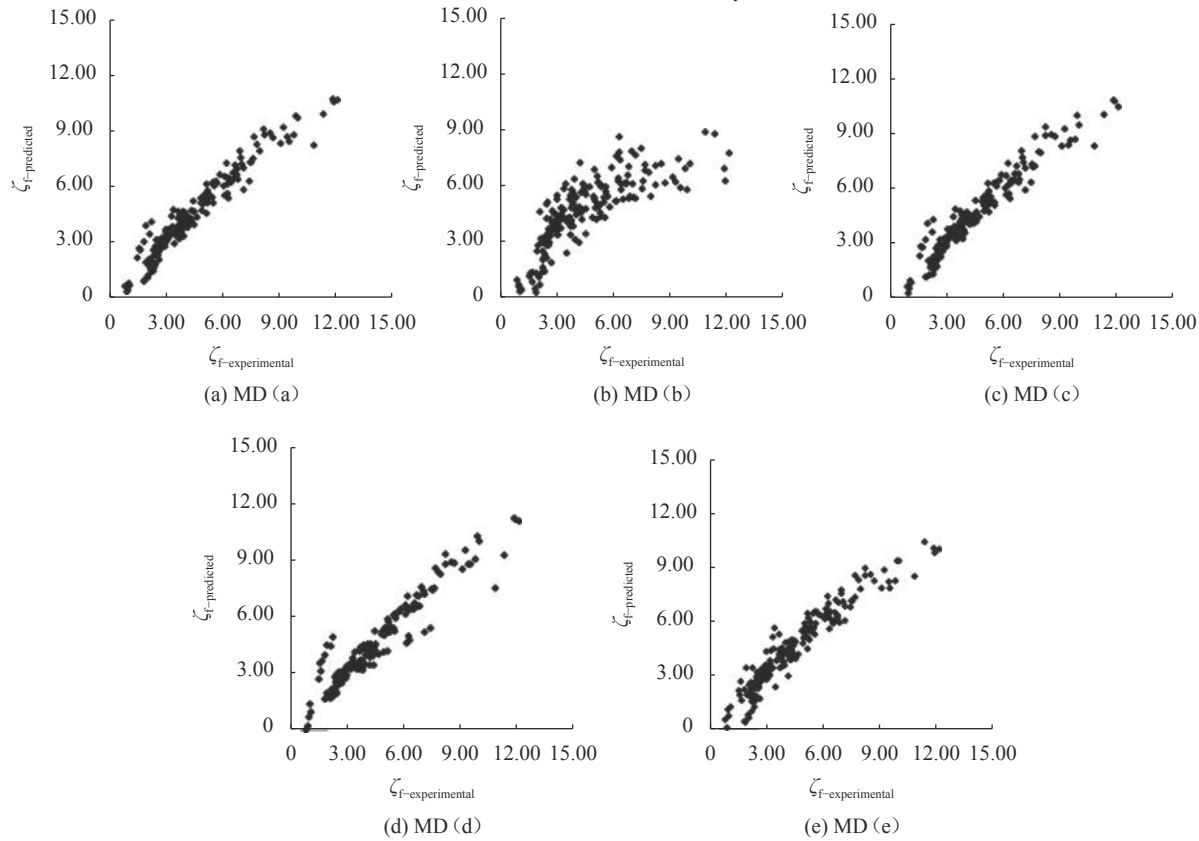


图 7 $\zeta_{f-predicted}$ 与 $\zeta_{f-experimental}$ 对比散点图

Fig. 7 Comparison between $\zeta_{f-predicted}$ and $\zeta_{f-experimental}$

相对于其他4种模型, MD(a)在考虑所有变量的情况下, 具有更高的拟合优度, 因此, 最终选用MD(a)作为描述浮体式结构阻力系数的计算公式, 表达式如下:

$$\zeta_f = 16.81 + 40.41\varphi + 0.03\frac{l}{e} + 9.77\delta - 4.59\lg Re \tag{18}$$

式中, $5.0 > \lg Re > 3.5$ 。

3.2 公式验证及误差分析

通过对比5种模型, 得到MD(a)的拟合优度最高, 但要判断回归方程的适用性和拟合效果, 需对模型进行进一步检验。对回归方程MD(a)进行方程的整体显著性F检验。试验过程中, 选取95%的置信区间, 得到F的值为574.9; 同时, 对模型的自相关进行判断, 采用DW检验, DW得到为1.94, 即模型不存在自相关问题。F检验、DW检验公式如下:

$$F = \frac{\sum_{k=1}^K (Y_{k-\text{predicted}} - \bar{Y})^2 / K}{\sum_{k=1}^K (Y_{k-\text{experimental}} - Y_{k-\text{predicted}})^2 / (K - J - 1)} \quad (19)$$

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^K (e_t - e_{t-1})}{\sum_{t=2}^K e_t^2} \quad (20)$$

式中, e_t 为在 t 时刻的误差项, 其余变量含义与上相同。
图8为MD(a)的残差相应统计量及残差带有正态概率曲线的直方图, 图8中残差的平均值为0, 标准差为0.992, 试验次数为193。由图8可以看出, 残差分布服从期望为0的正态分布, 且95%的残差分布介于-2和+2之间, 证明模型假定是合理的。

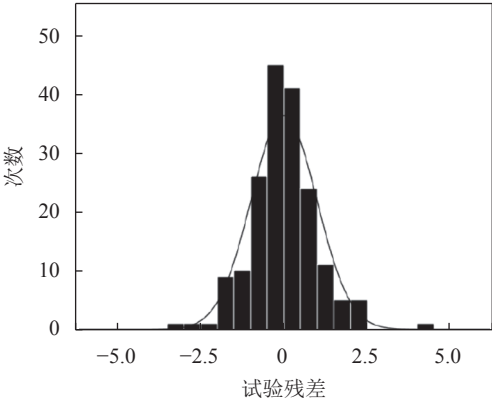


图 8 MD(a)残差分布直方图

Fig. 8 MD(a) residual distribution histogram

4 结 论

浮体式结构应用于平原水利工程中时会产生阻水效应, 对河道上下游泄洪排涝产生影响。本文基于物理模型试验及理论分析, 对浮体式结构在运行过程中的阻水系数进行研究, 得到以下结论: 阻力系数 ζ_f 与水位变化系数 φ 、浮体结构长度与浮体结构位置比值 l/e 、相对阻水面积 δ 及雷诺数 Re 有关; ζ_f 随着 φ 和 δ 的增大呈现明显增大的趋势, 受雷诺数增大呈现减小的趋势, 而受 l/e 的影响较微弱。通过对比5种不同的参数模型, 分别对4种影响因素的影响敏感性进行分析, 得到影响因素的敏感性大小排列为 $\varphi > \delta > Re > l/e$ 。通过对5种模型比较, 最终得到描述浮体式结构阻力系数的计算公式MD(a) (AMCC=0.930和RMSE=0.645), 并通过误差分析进一步验证了公式的正确性及合理性。该公式具有拟合度高、结构简单、通用性强的优点, 可为实际相关工程提供参考依据。

参考文献:

[1] Luo Yitao. Application of pneumatic floating steel gate in Xinfeng river channel regulation[J]. Water Conservancy Science and Technology, 2017(2): 16–18. [罗益涛. 气动浮体式钢闸门在新丰河河道治理中的应用[J]. 水利科技, 2017(2): 16–18.]

[2] Yang Minhui. Application of deep-water floating-type maintenance gate in Liujiaxia hydropower station's discharge channel maintenance[J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2013, 49(6): 27–28. [杨敏慧. 深水浮体式检修闸门在刘家峡水电站泄水道检修中的应用[J]. 甘肃水利水电技术, 2013, 49(6): 27–28.]

[3] Cui Zhen, Fu Zongfu, Dai Wenhong, et al. Submerged fixed floating structure under the action of surface current[J]. Water, 2018, 10(2): 102.

[4] Cui Zhen, Fu Zongfu, Ma Guanggang, et al. Experimental research on the vertical position of the diversion point of the kong weir[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(4): 738–745. [崔贞, 傅宗甫, 马广钢, 等. 孔堰分流点竖向位置实验探究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(4): 738–745.]

[5] Fu Zongfu, Cui Zhen, Dai Wenhong, et al. Discharge coefficient of combined orifice-weir flow[J]. Water, 2018, 10(6): 699.

[6] Cui Zhen, Fu Zongfu, Chen Yuejun. Analysis of flow characteristics of floating structure based on orthogonal design[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(6): 471–477. [崔贞, 傅宗甫, 陈月君. 基于正交设计的浮体结构流动特性分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(6): 471–477.]

[7] Cui Zhen, Fu Zongfu, Wang Jin, et al. Sensitivity analysis of influencing factors on hydraulic characteristics of floating structure in limited flowing waters[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(11): 957–962. [崔贞, 傅宗甫, 王劲, 等. 有限流动水域浮体结构水力特性影响因素敏感性分析[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(11): 957–962.]

[8] Lin Jingsong, Wang Pingyang, Gao Hong, et al. Numerical simulation of local loss and transient flow in liquid propellant pipeline[J]. Hydrodynamic Research and Progress Series A, 2008(1): 112–118. [林景松, 王平阳, 高红, 等. 液体推进剂管路局部损失及瞬变流动数值模拟[J]. 水动力学研究与进展A辑, 2008(1): 112–118.]

[9] Cao Hongzhen, Qi Jinsheng, Yuan Baoqiang, et al. Numerical simulation of the tangent circular-to-rectangular transition duct[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2020, 50(5): 77–82. [曹洪振, 祁金胜, 袁宝强, 等. 偏心方圆节扩散管数值模拟[J]. 山东大学学报(工学版), 2020, 50(5): 77–82.]

[10] Jian Jiale, Wang Fang, Liu Xiaoqing, et al. Simulation study

- on the local resistance loss coefficient of the pump outlet pipe section[J]. *Water Supply and Wastewater*, 2020, 56 (Suppl): 88–90. [菅佳乐, 王芳, 刘晓轻, 等. 泵出口管段局部阻力损失系数模拟研究[J]. *给水排水*, 2020, 56(增刊1): 88–90.]
- [11] Li Lei. Numerical simulation of local head loss in the gradual expansion section under different flow rates[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(4): 84–87. [李蕾. 不同流量下渐扩段局部水头损失数值模拟[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(4): 84–87.]
- [12] Tang Yingmin, Bao Lirong. Research on local head loss characteristics of natural river channels based on MIKE software[J]. *Hydropower*, 2018, 44(6): 87–89. [唐英敏, 鲍立荣. 基于MIKE软件的天然河道局部水头损失特性研究[J]. *水力发电*, 2018, 44(6): 87–89.]
- [13] Fu Minghuan, Qian Jiahuan. Calculation of local head loss coefficient and the sequent depth of S-type hydraulic jump[J]. *Hydropower Energy Science*, 2020, 38(1): 99–103. [傅铭焕, 钱家欢. S型水跃局部水头损失系数与跃后水深计算方法[J]. *水电能源科学*, 2020, 38(1): 99–103.]
- [14] Zhang Xin, Zhang Tianhang, Hou Yunge, et al. Local loss model of dividing flow in a bifurcate tunnel with a small angle[J]. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2019, 20(1): 21–35.
- [15] Gabl R, Achleitner S, Neuner J, et al. Accuracy analysis of a physical scale model using the example of an asymmetric orifice[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2014, 36: 36–46.
- [16] Huang Jingzhi, Zhou Jianxu, Liu Yuefei, et al. 3D numerical analysis of hydraulic characteristics of surge tank with partitioned bifurcated pipe at the bottom[J]. *Journal of Hohai University(Natural Science Edition)*, 2021, 49(2): 176–181. [黄静之, 周建旭, 刘跃飞, 等. 底部设置隔壁式岔管的调压室水力特性三维数值分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(2): 176–181.]
- [17] Li Tao, Zou Jian, Qu Shaojun, et al. Research on local loss at right-angle diversion ports based on different cross-sectional shapes[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(6): 30–37. [李涛, 邹健, 曲少军, 等. 基于不同断面形态的直角分流口处局部损失研究[J]. *水力发电学报*, 2017, 36(6): 30–37.]
- [18] Gu Xinxin. Research on numerical simulation and optimization of water flow in bu-shaped bifurcated pipe of pumped storage power station[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. [顾欣欣. 抽水蓄能电站卜型岔管水流数值模拟与优化研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.]
- [19] Zhang Zhichang, Zhao Ying, Fu Minghuan, et al. Study on head loss and local drag coefficient along the water jump zone[C]//Proceedings of the 35th International Hydraulic Conference, Beijing: Tsinghua University Press, 2013. [张志昌, 赵莹, 傅铭焕, 等. 水跃区沿程水头损失和局部阻力系数的研究[C]//第三十五届国际水利学大会论文集, 北京: 清华大学出版社, 2013.]
- [20] 张志昌. 水力学(下册)[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [21] Ning Lizhong, Qu Yawei, Ning Bibo, et al. Explicit solution of hydraulic jump equation for abruptly expanding channel[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2018(5): 24–29. [宁利中, 渠亚伟, 宁碧波, 等. 突然扩散水跃方程的显式解[J]. *水利水运工程学报*, 2018(5): 24–29.]

(编辑 张 琼)

引用格式: Cui Zhen, Fu Zongfu, Chen Yuejun. Experimental study on resistance coefficient of floating structure[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(6): 222–229. [崔贞, 傅宗甫, 陈月君. 浮体式结构阻力系数试验研究[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(6): 222–229.]