

进水口前漩涡研究现状和发展趋势

田甜¹, 郭悦², 徐国宾¹

(1. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072; 2. 水利部发展研究中心, 北京 100038)

摘 要: 漩涡是水利工程进水口前一种常见的水力现象,其生成和发展会对工程安全运行产生不利影响。认识漩涡的生成机理及其水力特性,对消除和利用漩涡具有重要意义。基于现有的研究成果,从漩涡的形成机制、水力特性和影响因素等方面出发,论述了进水口前漩涡问题的研究进展,明确了将临界淹没水深作为评判漩涡出现的依据,并分析归纳了现有的消涡措施。最后总结了现有研究中未能解决的问题,为进水口前漩涡的进一步研究提供了方向。

关键词: 进水口前漩涡; 水力特性; 影响因素; 临界淹没水深; 消涡措施

中图分类号:TV135; TV65

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)05-0151-07

Research status and future directions of intake vortexes

TIAN Tian¹, GUO Yue², XU Guobin¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Development Research Center of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Vortexes, which commonly arise at hydraulic intakes, have an adverse effect on the safety operation of the afflicted project. Understanding the generation mechanism and characteristics of vortexes is the key issue associating with the elimination and the utilization of vortexes. Thus, based on the existing research results, we discussed the research status of vortexes from the following aspects, including the generation mechanism, the hydraulic characteristics and the influencing factors. It is clarified that the critical submergence is the discrimination marker of the occurrence of vortexes. Meanwhile, the elimination methods of vortexes were analyzed and summarized. Furthermore, some imminent problems that have not been solved were put forward, which pointed out the direction for the further research of intake vortexes of practical projects.

Key words: intake vortex; hydraulic characteristics; influencing factor; critical submergence; vortex elimination method

1 研究背景

漩涡是一种常见的水力现象,经常出现在水利工程中的电站引水口、泄洪洞、泄洪闸门等引水、泄水建筑物前,对水利工程的正常运行造成不利影响。以漩涡的形态和强度为依据,一般可定性地将漩涡分为3类:不吸气漩涡,间歇性吸气漩涡以及贯通式漩涡^[1-2]。从工程角度出发,可将漩涡分为自由表面漩涡、流体内部漩涡、管道螺旋流^[3]。美国 Alden 实验室依据试验现象,将漩涡分为6种类型:1和2

类型近于无漩涡,自由水面无凹陷,没有或仅有少量环流;3和4类型为弱漩涡,自由水面出现轻微凹陷,表层形成环流,初步形成气核;5和6类型属于强漩涡,自由水面下陷明显并形成或趋于形成稳定气核,裹挟空气进入进水口^[4]。

随着水电能源的开发,水工建筑物进水口前的漩涡问题逐步引起关注和重视。我国的溪洛渡、漫湾、龙羊峡、宝珠寺、紫坪铺等水利工程均出现过不同程度的漩涡问题,在国外众多国家也有类似的工程问题发生。不同类型的漩涡对工程的影响程度是

收稿日期:2020-12-09; 修回日期:2021-07-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51779166)

作者简介:田甜(1997-),女,湖北黄冈人,硕士研究生,研究方向为水流结构。

通讯作者:徐国宾(1956-),男,河北石家庄人,博士,教授,博士生导师,研究方向为工程水力学。

不同的,当进水口前出现危害较大的吸气漩涡时,将导致引水、泄水建筑物流态恶化、过流能力降低、水流脉动加剧、卷吸漂浮物等问题,对工程安全造成威胁。因此对于进水口前漩涡的研究主要集中于危害较大的吸气漩涡,包括间歇性吸气漩涡和贯通式漩涡,即 Alden 实验室分类中的强漩涡。基于工程需要,现有关于进水口前漩涡问题的研究大多依托具体工程,以解决实际问题为主要目的。许多研究者通过理论分析、模型试验、数值模拟等方法对漩涡的流动机制进行了研究,但由于漩涡属于强紊流现象,具有瞬态演变、不易观测等特点,因而至今尚未彻底阐明漩涡流动问题,只能通过半经验化的理论标准指导工程实践。与此同时,建设单位需要投入大量人力物力对进水口体型进行优化或增设消涡措施以消除漩涡带来的不利影响,但由于漩涡流动机理尚不明确,漩涡的流动机制又直接影响进水口体型选择和消涡措施的设计,所以消涡措施往往收效甚微^[5-6]。进水口漩涡问题关乎水利工程的运行安全和生产效益,因此,开展漩涡的深入研究具有重要的工程意义。

2 漩涡的形成机理

对于漩涡的形成过程,一般可根据孔口位置的不同,分别就底部孔口与侧部孔口两种出流情况对漩涡的形成过程进行观测和研究,其中侧部孔口还可细分为有压底孔和无压表孔两种。对于一般侧部孔口,受进水口边界条件约束,来流会发生纵向或横向收缩,导致其流向和流速发生剧烈变化,表面水流受胸墙阻滞在进水口上方形成滞流区,滞流区水体在边界和水流的共同影响下,形成一定的初始环量。同时,滞流区水体受到进水口主流的拖曳作用(下曳力)进入失稳状态,最终在初始环量和下曳力的共同作用下诱发漩涡。

与一般侧部进水口不同,溢流坝闸孔前水力条件更为复杂。在启门过程中,随着闸门开度的变化,闸室中水位、流量等水力条件随之产生变化,使漩涡处于瞬态发展的过程。同时,由于闸室范围的限制,闸前漩涡一般在靠近检修闸门槽处成对形成,多股水流互相影响,闸室内流态复杂,给闸前漩涡形成的观测和研究带来了困难。孙洪亮等^[7]针对泄洪闸弧形闸门前的漩涡进行了研究,试验结果表明,闸门局部开启时,行进水流在边界条件影响下发生横向和纵向的收缩,形成一定的来流环量,而来流环量与水流轴向流速则是漩涡形成的主要因素。陆遥^[8]

运用动网格技术模拟了闸门边界的开启过程,认为在启门泄流的早期阶段,闸室内墩头涡与逆压梯度共同作用下的流动分离是形成漩涡的主要原因。随着闸门开度的增大,由下泄主流势能和压能转化而来的动能逐渐无法克服其黏性损耗,漩涡逐渐消失。

相比之下,底部孔口进水边界条件和水力条件相对简单。吸气漩涡的发展过程大致可分为表面漩涡、表面凹陷涡、染料核漩涡、挟物漩涡、间歇吸气漩涡和贯通吸气漩涡 6 个阶段。底部孔口来流基本呈径向流态,沿进口切向水流流速发生剧烈变化,不同方向水流互相冲撞,水位壅高,阻碍下泄水流,构成力偶进而形成漩涡^[9]。与前人研究结果不同,Zi 等^[10]采用数值模拟方法模拟了吸气漩涡形成过程中的流速演变,并将漩涡形成过程划分为 4 个阶段:初生阶段、V 型发展阶段、涡管延伸阶段和贯通吸气阶段,通过分析漩涡流速演变过程发现,在吸气漩涡的形成过程中,涡管变形对漩涡强度的增大起主导作用。

通过对漩涡形成过程的观测,许多研究者从不同方向对漩涡的生成机理进行了探讨和研究。一个漩涡可以看作是涡量的局部集中,数学上将涡量定义为速度场旋度的矢量^[11]。涡量场是一种分布涡,而漩涡则是集中涡,分析涡运动原理应从涡量场入手,进而分析从涡量产生到漩涡形成这一过程中的涡量输运过程^[12]。在黏性流体中,集中在涡核的涡量受外界作用向外扩散,产生漏斗形径向剖面,同时由于进水口主流的拖曳作用,涡核产生轴向拉伸,最终在涡量扩散和涡轴拉伸的共同作用下产生吸气漩涡^[13]。陆遥^[8]从涡量输运方程出发,通过分析胀缩量、剪切量和涡量的变化,对漩涡的发展机制进行了研究,其中胀缩量和剪切量分别与涡管及涡核在三维空间中的体积膨胀与弯曲方向有关,两者的分布总体上从自由水面到闸门底缘呈递增趋势,并伴有偶发性极大值,这种分布规律使吸气漩涡涡核表现为非对称的空间曲线;涡量与漩涡强度的大小相关,维持着漩涡的高速旋转,并随着漩涡发展向外部环流处蔓延。从物理角度分析,Kocabas 等^[14]引入了球面流面(stream surface of a sphere, SSS)概念,当进水口具有点沉特性时,将流场中产生的以球形流面为边界的球形流体定义为 SSS,称球形流体即将坍塌时的状态为临界球形流面(critical spherical sink surface, CSSS),当 SSS 坍塌时就会产生吸气漩涡。通过分析漩涡形成过程中自由水面的变化和漩涡结构的形态,可将吸气漩涡的形成过程划分为表

面漩涡、表面凹陷和完全发展的吸气涡3个阶段,表面漩涡的聚集和进水口对上方水流的牵引力是吸气漩涡形成的主要原因^[15]。

综上所述,研究漩涡的流动机制,主要从漩涡发展过程中的结构特点及外部流场变化展开。通过分析可以得出,初始环量的聚集和进水口主流的拖曳作用是吸气漩涡形成的主要原因,但如何定量描述出两者在漩涡形成过程中的作用仍处于研究阶段。漩涡形成机制的研究对于后续消涡措施的设置具有指导性作用,但漩涡影响因素的量化仍是目前研究中的最大障碍,如何准确测量水流环量、下曳力等水力参数,将边界条件等影响因素转化为物理量具体分析,将是现阶段研究的主要任务。

3 漩涡的水力特性和影响因素

自20世纪30年代起,为了解决进水口漩涡问题,国内外研究者通过漩涡模型简化、流场数据测量、湍流数值仿真等技术手段和方法对漩涡的水力特性及影响因素进行了分析,并取得了一定成果。漩涡的研究方法可分为理论分析、模型试验和数值模拟3类,其中理论分析主要以流体N-S方程(Navier-Stokes equations)为基础,反映漩涡的运动特性;模型试验作为主要的研究方法,可通过测量漩涡及流场特性反映漩涡运动的基本规律,并借助试验总结消涡措施;数值模拟是求解流体N-S方程的有效手段,同时得益于紊流模型的发展,可通过计算机模拟漩涡形成的物理过程,为进一步研究漩涡流动问题提供了新方法。通过理论分析和试验,研究者对漩涡的水力特性及影响因素进行了大量研究,研究成果对后续消涡措施的设置起到了一定的指导作用。

3.1 漩涡的水力特性研究

关于漩涡水力特性的研究,早期主要围绕漩涡的流体力学控制方程展开,但由于漩涡的控制方程中含有二阶非线性项,对漩涡问题尚不能得出解析解。许多研究者根据相关假设简化漩涡模型后,可得出特定条件下的近似解。

总结前人研究结果,漩涡模型一般采取两个基本假设:

(1) 假设漩涡处于稳态。

$$\frac{\partial V_r}{\partial t} = \frac{\partial V_\theta}{\partial t} = \frac{\partial V_z}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

(2) 柱坐标系下漩涡关于 z 轴对称。

$$\frac{\partial V_r}{\partial \theta} = \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} = \frac{\partial V_z}{\partial \theta} = 0 \quad (2)$$

式中: V_r 、 V_θ 、 V_z 分别为漩涡的径向、切向、轴向速度, m/s; t 、 θ 分别为时间分量和切向分量。

基于上述两个基本假设,Rankine^[16]假定 $\partial/\partial z = 0$,在不考虑水流黏性条件下提出二维无黏性组合涡模型,定义平面内涡核半径为 r_m , r 为柱坐标系下的径向分量,以运动时角速度矢量是否为零为评判依据,称 $0 \leq r < r_m$ 区域为强迫涡, $r > r_m$ 时则为自由涡,当 $r = r_m$ 时涡核内外切向速度相等并达到最大值,此时切向速度分布连续但不可导。孙洪亮等^[17]结合试验数据,对Rankine涡模型进行了改进,解决了切向流速在涡核半径处不光滑过渡的问题。

Rankine涡是一种理想涡,不需要外界能量补充也没有能量损耗,但在现实中由于水流黏性的存在,漩涡在运动过程中将发生涡量扩散现象,并产生能量损耗,必须从外部环流中吸收能量以抵抗能量损耗。由此,Oseen^[18]从漩涡涡量入手,首次考虑漩涡瞬态运动状态,提出了非定常轴对称涡模型,利用涡量方程引入环量 Γ ,由此得到了任意时刻切向速度 V_θ 和涡核半径 r_m 的解析解,其中 V_θ 的表达式为:

$$V_\theta = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{r_m^2}\right) \right] \quad (3)$$

式中: Γ 为水流环量, m^2/s ; r_m 为涡核半径, m; r 为柱坐标系下的径向分量, m。

在此基础上,Odgaard^[19]进一步发展了Oseen涡模型,假设径向速度 V_r 、轴向速度 V_z 分别与径向分量 r 、轴向分量 z 呈线性关系,通过求解N-S方程得出切向速度的表达式为:

$$V_\theta = \frac{\Gamma}{2\pi r} \left[1 - \exp\left(-\frac{ar^2}{2\nu}\right) \right] \quad (4)$$

式中: ν 为水流运动黏滞系数, m^2/s ; a 为速度梯度, m/s^2 。

可以看出,Oseen与Odgaard得出的公式类似,切向速度均随径向先增大后减小。但实际径向流速在漩涡中心区较大,并沿径向迅速减小^[20]。Einstein^[21]对理想流体和黏性流体分别进行推导,假设径向流速在涡核半径内沿径向呈线性分布,在外部沿径向成反比例分布,得出了径向流速沿径向先增大后减小的分布规律。Odgaard对于径向速度、轴向速度的假设存在一定局限性,不能完全反映漩涡的真实水力特性。公式(3)和(4)虽然对解释漩涡流动中的能量转换过程做出了有效尝试,但假设条件与实际存在较大出入,不利于后续研究的进行。

随着高新测量技术的发展,研究者可通过接触式或非接触式测量仪器对漩涡流场水力特性直接进行测量,研究重点也逐渐从理论研究转变为理论结合数据、建立拟合公式的模式。Rosenhead^[22]结合实测数据与理论分析,通过数据拟合建立了切向速度的经验公式,经验公式与试验数据相吻合,具有较好的实用性,为后续研究提供了新思路。Hite 等^[23]又对经验公式进行了修正,并以此为基础推导出径向速度和轴向速度的表达式。Wang 等^[24]对 Odgaard 和 Hite 公式进行了改进,改进后的速度公式和漩涡水面线与测量数据吻合良好。

漩涡结构是一种复杂的三维结构,通过观测发现,受水流作用影响,其涡核一般呈现为非对称的空间曲线^[25-26]。陈云良等^[27-29]观察到漩涡具有多圈螺旋流运动特性,在漩涡运动过程中涡核下部向进水口方向扭转,漩涡的切向速度、轴向速度和径向速度不仅与径向分量 r 相关,也与轴向分量 z 呈相关关系,此外,还通过分离变量法确定了能够反映轴向变化的经验公式。

基于漩涡流体力学控制方程开展的理论研究依据基本假设简化模型,从二维无黏性涡出发,发展到三维黏性涡,并在一定条件下求出了漩涡切向速度的解,同时结合实测数据及数值模拟结果得到了漩涡轴向速度和径向速度的经验公式,所得公式能反映出漩涡速度分量在轴向和径向上的不同变化。然而,由于数学求解上的困难,关于漩涡水力特性的理论分析仍受限于稳态、轴对称假设,对于漩涡瞬态水力特性的分析尚处于探索阶段。借助高精度测量技术及数值模拟手段虽然能对漩涡流场进行分析,但由于缺乏理论基础且进水口类型差异较大,只能借助试验数据拟合经验公式,但所得结论均受到一定条件的限制,无法扩大其适用范围。

3.2 漩涡的影响因素研究

根据已有研究,可将漩涡的影响因素分为边界条件与水流条件两类,包括进水口淹没水深 h , 进水口直径 D , 进水口前行进宽度 b , 流体密度 ρ , 运动黏滞系数 ν , 表面张力系数 σ , 重力加速度 g 等。对上述基本物理量进行量纲分析,可以得到无量纲数相对淹没水深 S/D 、弗劳德数 Fr 、雷诺数 Re 、韦伯数 We 以及环量数 N_r 。当雷诺数和韦伯数超过临界值时,水流黏性和表面张力对漩涡的影响较小,可忽略不计,因此影响漩涡的主要因素是边界条件、相对淹没水深、弗劳德数和环量数。

边界条件和水流环量是进水口前漩涡的主要影

响因素。邓淑媛^[9]结合多年工程实践经验,分析总结了漩涡形成的边界条件,认为在大型孔口、胸墙后倾、流向与孔口夹角过大、横向收缩、存在相邻边界水流等条件下更容易形成漩涡。孙洪亮等^[17]通过模型试验研究发现,闸前水位较高时,来流环量对闸前漩涡起主要作用。在漩涡的形成过程中,环量随时间递增,当漩涡处于稳态时,环量也趋于定值^[30]。

对实际工程而言,边界条件的影响一般保持不变,而水流环量难以准确测量,因此对漩涡影响因素的分析大多借助于临界淹没水深展开。建立临界淹没水深公式并分析其影响因素,为后续合理设计进水口体型提供一定依据,也成为了漩涡研究的主要方向。

Gordon^[31]总结了 29 个水电站的实测资料,提出了进水口前漩涡临界淹没水深的经验公式:

$$S_c = cVD^{0.5} \quad (5)$$

式中: c 为系数,正向引水时取 0.55,侧向引水时取 0.73; V 为进水口前流速, m/s ; D 为进水口直径, m 。

对公式(5)进行无量纲化后可得:

$$\frac{S_c}{D} = c'Fr \quad (6)$$

Gordon 公式形式简单但考虑的因素较为全面,对于大多数中小型工程具有很好的适用性,也是我国《水电站进水口设计规范》(DL/T 5398—2007)中采用的公式。马吉明等^[32-33]将试验成果与现有公式进行比较,发现 Gordon 公式在有拦污栅、流速较高的条件下不适用,并针对高流速、大流量进水口,给出了有无拦污栅两种情况下的临界淹没水深公式。在此基础上,通过三峡工程进水口大比尺模型试验研究,认为大型工程在引用 Gordon 公式时应适当扩大系数,得到了适用于有拦污栅的大流量双孔进水口的临界淹没水深经验公式。

除弗劳德数 Fr 外,许多研究者将雷诺数 Re 、韦伯数 We 、环量数 N_r 以及边界条件影响等因素也考虑其中,通过不同研究方法得出了各种形式的经验公式,并对临界淹没水深的影响因素进行了进一步分析。Gogus 等^[34]在排除进水口前水流环量影响的条件下,通过试验分析了 Fr 、 Re 、 We 等参数对进水口前漩涡形成的影响,并结合试验数据得出了临界淹没水深公式,在固定边界条件下, S 与 Fr 、 Re 、 We 几乎呈线性正相关。Khansarmuei 等^[35]针对于双层引水口展开研究,认为来流方向与进水口间夹角是漩涡形成的重要因素,给出了不同来流夹角条件下环量与弗劳德数 Fr 之间的经验公式,并在此基础上得出了单、双层进

水口临界淹没水深公式。Taştan^[36-37]研究了比尺效应和流动边界对管道式进水口临界淹没水深的影响,提出了一个考虑边界层摩擦影响的修正因数,并基于势流假设和临界球形流面(CSSS)理论提出了临界淹没水深的计算方法。

Yang 等^[38]设置了多种不同边界的进水口进行试验,结果表明进水口剖面对于临界淹没水深大小具有重要影响。Taştan 等^[39]通过试验发现,进水口剖面主要影响水流速度分布以及涡量大小,对于不同的流动条件及几何边界,环量的大小、漩涡的形态以及淹没水深值都是不同的。Hashid 等^[40]对水平

侧向圆形进水口在明渠流中有无喇叭口两种边界条件下进行分析和试验,结合势流理论利用兰金临界球面(Rankine's critical spherical surface, RCSS)理论分析漩涡,并结合 Ahmad 等^[41]提出的含参数公式建立了有、无喇叭口两种条件下的临界淹没水深公式,经对比后发现,设置喇叭口过渡段可有效提高进水效率、减小临界淹没水深。对于泄洪闸门,孙洪亮等^[42-43]结合试验数据,得出了固定开度下弧形闸门前临界淹没水深的经验公式。表 1 中列出了上述相关文献中提出的淹没水深计算公式并对其在适用性方面的优缺点进行了简述。

表 1 本文引用的相关文献中提出的淹没水深计算公式及其优缺点

文献	淹没水深公式	优点	缺点
Gordon ^[31]	$S_c = cVD^{0.5}$	形式简单且适用性好	大型工程适用性差
Jain ^[44]	$K \frac{S_c}{D} = 5.6 N_r^{0.42} Fr^{0.5}$	因素全面且便于计算	环量无法直接测量
Odgaard ^[19]	$\left(\frac{S_c}{D}\right)^2 = 1.0 \frac{Fr^2 Re^{0.5} \left(\frac{S_c}{D}\right)^{0.5}}{We \left(1 + \frac{k\Gamma}{\nu}\right)^{0.5}} + 0.00337 \frac{Fr^2 Re N_r^2}{1 + \frac{k\Gamma}{\nu}}$	考虑因素全面	应用不便
Gulliver ^[45]	$\frac{S_c}{D} = 0.5 + 0.4Fr$	适用于侧式进水口	仅适用于 $Fr < 0.5$
马吉明 ^[32]	$\frac{S_c}{D} = 2.388Fr - 0.01$	适用于大型工程与双层进水口	对于多数工程不适用
孙洪亮 ^[43]	$\frac{S_c}{D} = m \left(\frac{b}{2e}\right)^{0.25} Fr^{0.5} N_r^{0.5}$	可适用于弧形闸门工况	仅考虑固定开度工况

由表 1 可以看出,以不同进水口类型为研究背景所得出的临界淹没水深公式形式差异很大,适用范围也有所不同。在实际工程中,只能以公式计算结果当作初步参考,还应进一步采取模型试验或数值模拟方法对计算结果进行验证。

借助模型试验和数值模拟方法,研究者给出了反映漩涡形成过程中各因素对进水口漩涡影响的临界淹没水深公式,针对漩涡特性的研究也从二维无黏性涡逐渐扩展至三维黏性涡流,对于漩涡的形成过程与流动特性有了更准确的认识,理论分析、模型试验、数值模拟三者也形成了相互验证的完整分析体系,但该 3 种研究手段仍有继续发展的空间。由于比尺效应的影响,模型试验不能同时满足重力、表面张力及黏性力的相似条件,遵从重力相似准则设计的模型试验只能从其他方面弱化表面张力及黏性力对试验准确性的影响。同时由于进水口边界条件

的差异化,针对某类型进水口展开的研究可能具有一定的适用范围,所得结论也容易受试验环境影响。因此,确定合适的模型比尺、明确试验条件是至关重要的。数值模拟方法虽然在计算能力及等比例建模等方面弥补了理论解精度不高、模型试验存在比尺效应的不足,但在模拟漩涡这一强紊流现象时,对网格与边界层精度要求较高,需要耗费大量计算资源,同时紊流模型、多相流模型的发展也制约着数值模拟的进一步发展。在后续研究中,确定最优网格划分方案、选定与漩涡流动最适配的计算模型,是提高数值模拟计算精度的关键。

4 漩涡的危害及消涡措施

根据 Alden 提出的漩涡分类,对进水口前危害性较大的为 5、6 类型强漩涡,即吸气漩涡,也是通常所说的有害涡。进水口前出现吸气漩涡后,水流紊

动加强,水头损失增大,进水流量减少,对闸门泄洪能力、机组运行效率均产生负面影响,不利于水利工程的正常运行^[46]。Posey 等^[47]指出,吸气漩涡存在时,进水口的过流能力将大幅降至无漩时的 20%;若漩涡进一步发展形成贯通性漩涡,还会挟带空气进入水流,恶化流态,严重时甚至会引起建筑物的振动和空化。严根华等^[48]通过溢流坝弧形闸门的原型观测研究发现,在闸门开启过程中,由于闸前漩涡对闸面板的动力作用,诱发闸门振动,将对闸门安全运行产生不利影响。为了应对漩涡引发的工程问题,合理的消涡控涡措施成为研究人员重点研究的内容。

从漩涡的生成机制和影响因素等方面进行分析,现有的消涡措施主要从抑制水流初始环量、破坏漩涡结构和增强漩涡能量损耗入手,将其归纳如下:

(1)抑制水流初始环量。来流初始环量是诱发漩涡的主要因素,通过改变边界条件和水力条件平顺水流,抑制环量的产生,可以达到阻止漩涡发生的目的^[49]。采取优化进水口体型、增大淹没水深或减小进口流速、合理控制运行工况等措施可有效减小水流初始环量;在进水口平面布置上,应尽量使来流平顺,减小进水角,若条件允许可加长引水渠长度,使行进水流恢复平稳,以降低进水口附近的水流初始环量。

(2)破坏漩涡结构。漩涡通常发生在进水口上方 30°范围内,因此可通过设置消涡梁、消涡墩等专门的消涡措施破坏漩涡结构,切断其切向及径向流动路径,使其无法维持稳定形态。叶茂等^[30]通过数值模拟对进水口有、无防涡墩两种情况进行了分析,计算结果显示设置防涡墩能阻碍水流旋转,减小环量,从而破坏漩涡稳定性,达到消涡目的。严根华等^[50]研究了消涡隔栅结构对漩涡形成的影响,并利用模型试验对消涡效果进行了验证。Kabiri - Samani 等^[51]在不同水流条件下对不同形状消涡板的消涡效果进行了试验,结果表明设置消涡板能有效增大进水口流量,为了反映消涡板提高进水口进水效率的效果,引入了新变量“空气指数”,并根据分析结果为进水口前消涡板的设计提出了建议。

(3)增强漩涡能量损耗。从发展机制来看,在漩涡的发展过程中将发生涡量扩散和能量损耗现象,通过破坏漩涡能量输运途径、增强黏性损耗,可以增加漩涡的能量损耗,加速漩涡消散,达到消除漩涡的目的。刘洁洁等^[52]经试验发现,在弧形闸门上设置消涡格栅可以缩小漩涡发展范围、破坏漩涡结

构,起到切断漩涡回转路线、破坏漩涡能量输运的作用,消涡效果明显。

段文刚等^[1]通过对消涡措施的系统研究,总结了合理设计进水口、安装专门的结构物、调整运行方式等几种典型的消涡措施,在实际工程应用中也达到了一定的消涡效果。由于闸门启门泄流过程中出现的漩涡流动复杂,且闸室内空间狭窄、水流湍急,消涡排、防涡梁等传统的消涡措施不能很好地适应泄流闸门的需要,甚至可能造成消涡结构自身损坏,影响闸门正常运行,因此闸前的消涡措施尚处于试验阶段,在实际工程应用中的成功案例较少。

现有的消涡措施大多是通过模型试验和工程经验总结而来,对消涡措施工作机理的理论研究较少。通过模型试验总结出的消涡措施虽然对于实际工程中的漩涡防控具有重要的参考意义,但由于漩涡的流动机制和消涡措施的工作机理尚未彻底阐明,致使消涡措施在实际工程的应用中极易受到外部条件的影响和制约,如何有效地防涡控涡仍是未来研究的重点。

5 结论与展望

关于漩涡流动问题及消涡措施的研究已经取得了一些成果,但进水口前漩涡问题还未完全解决,对于现有研究中存在的不足和未来的研究方向,可以参考以下几个方面:

(1)对于漩涡形成机制的研究着重于理论分析,尚未阐明环量及涡量的生成及输运过程,特别是边界条件、 Fr 、 Re 等因素如何影响漩涡的能量输运从而影响其生成和发展。

(2)针对漩涡的研究多集中于危害较大的稳定吸气漩涡,忽视了对漩涡早期发展和后期耗散过程的观测与分析,缺乏对漩涡流动全过程的研究。

(3)关于漩涡的研究大部分围绕尺寸固定的进水口形式进行,对其他形式进水口前漩涡的研究较少,如泄洪闸门启门过程中产生的闸前漩涡,需要加强这方面的研究。

(4)研究重点在探究漩涡自身特性上,对漩涡危害性的讨论较少,在后续研究中应重点关注漩涡危害的生成机理以及漩涡生成对外部环境的影响。

参考文献:

- [1] 段文刚,黄国兵,张 晖,等. 几种典型水工建筑物进水口消涡措施试验研究[J]. 长江科学院院报, 2011, 28(2): 21 - 27.

- [2] 杜敏. 进水口漩涡形成机理及缩尺效应[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [3] 索丽生. 抽水蓄能电站的水力学专门问题——'94 抽水蓄能工程国际学术讨论会论文综述(二)[J]. 水利水电科技进展, 1995, 15(2): 8-14.
- [4] KNAUSS J. Swirling flow problems at intakes[M]. Los Angeles: CRC Press, 2017.
- [5] 叶茂, 伍超, 杨朝晖, 等. 立轴漩涡的环量分析[J]. 水力发电学报, 2008, 27(6): 111-115.
- [6] 何军龄, 吴宝琴, 蒋俏芬, 等. 超高水头大泄量竖井旋流泄洪洞消能机理数值模拟研究[J]. 水电能源科学, 2017, 35(4): 135-138+62.
- [7] 孙洪亮, 刘亚坤, 张鸿煜, 等. 弧形闸门前漩涡特性研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(2): 10-15.
- [8] 陆遥. 溢流坝启门泄流过程瞬态水力特性研究[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2019.
- [9] 邓淑媛. 泄水建筑物进口水面漩涡的形成及其克服方法的探讨[J]. 水利水运科学研究, 1986(4): 51-63.
- [10] ZI Dan, WANG Fujun, WANG Chaoyue, et al. Investigation on the air-core vortex in a vertical hydraulic intake system[J]. Renewable Energy, 2021, 177: 1333-1345.
- [11] 童秉纲, 尹协远, 朱克勤. 涡运动理论[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
- [12] SAFFMAN P G. Vortex dynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
- [13] SUERICH-GULICK F, J GASKIN S, VILLENEUVE M, et al. Characteristics of free surface vortices at low-head hydropower intakes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 140(3): 291-299.
- [14] KOCABAS F, YILDIRIM N. Effect of circulation on critical submergence of an intake pipe[J]. Journal of Hydraulic Research, 2002, 40(6): 741-752.
- [15] ZI Dan, XUAN Anqing, WANG Fujun, et al. Numerical study of mechanisms of air-core vortex evolution in an intake flow[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2020, 81: 108517.
- [16] RANKINE W J M. A manual applied mechanics[M]. London: Richard Griffin and Company, 1858.
- [17] 孙洪亮, 刘亚坤. 进水口自由表面漩涡特性研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(4): 67-71.
- [18] OSEEN C W. Sur les formules de Green généralisées qui se présentent dans l'hydrodynamique et sur quelquesunes de leurs applications[J]. Acta Mathematica, 1912, 35(1): 97-192.
- [19] ODGAARD A J. Free-surface air core vortex[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112(7): 610-620.
- [20] 唐毅, 吴持恭, 周著. 排沙漏斗三维涡流水流结构[J]. 水利学报, 1999, 30(4): 55-59.
- [21] EINSTEIN H A, LI H. Le vortex permanent dans un fluide réel[J]. La Houille Blanche, 1955(4): 483-496.
- [22] ROSENHEAD L. The spread of vorticity in the wake behind a cylinder[J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 1930, 127(806): 590-612.
- [23] HITE J E, MIH W C. Velocity of air-core vortices at hydraulic intakes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1994, 120(3): 284-297.
- [24] WANG Yingkui, JIANG Chunbo, LIANG Dongfang. Comparison between empirical formulae of intake vortices[J]. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49(1): 113-116.
- [25] 叶茂, 伍超, 林威, 等. 侧向水平进水孔口立轴旋涡的试验研究[J]. 水科学进展, 2007, 18(6): 842-845.
- [26] NADERI V, FARSAZADEH D, LIN C, et al. A 3D study of an air-core vortex using HSPIV and flow visualization[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019, 44(10): 8573-8584.
- [27] 陈云良, 伍超, 叶茂, 等. 立轴漩涡多圈螺旋流场特性研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(1): 13-17.
- [28] 陈云良. 进水口前立轴旋涡水力特性的研究[D]. 成都: 四川大学, 2006.
- [29] 陈云良, 伍超, 叶茂, 等. 立轴漩涡多圈螺旋流速度分布的研究[J]. 水利学报, 2005, 36(10): 1269-1272.
- [30] 叶茂, 伍超, 杨朝晖, 等. 进水口前立轴漩涡的数值模拟及消涡措施分析[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(2): 36-40.
- [31] GORDON J L. Vortices at intakes[J]. Water Power, 1970, 22(4): 137-138.
- [32] 马吉明, 梁元博. 电站双孔进水口临界淹没水深的试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(5): 122-124.
- [33] 马吉明, 郑双凌, 陈浩波, 等. 双层引水进口前临界淹没水深的试验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(2): 215-219.
- [34] GOGUS M, KOKEN M, BAYKARA A. Formation of air-entraining vortices at horizontal intakes without approach flow induced circulation[J]. Journal of Hydrodynamics, 2016, 28(1): 102-113.
- [35] KHANSMUEI M, RAHIMZADEH H, SARKARDEH H. Effect of dual intake direction on critical submergence and vortex strength[J]. Journal of Hydraulic Research, 2019, 57(2): 272-279.
- [36] TAŞTAN K. Scale and flow-boundary effects for air-entraining vortices[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management, 2017, 170(4): 198-206.

- [13] 张 硕,张世东,胡夫祥,等. 六边形开口方形人工鱼礁阻力系数数值模拟与模型试验比较研究[J]. 中国水产科学,2020,27(11):1350-1359.
- [14] 叶功照,王 莹,陈 舜,等. 南麂列岛海域两种框型人工鱼礁水动力性能试验[J]. 渔业现代化,2021,48(1):25-32.
- [15] 关长涛,李梦杰,郑延璇,等. 三圆管型人工鱼礁布设间距的数值模拟及物理稳定性研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2016,46(9):9-17.
- [16] JIANG Zhaoyang, LIANG Zhenlin, HUANG Liuyi, et al. Characteristics from a hydrodynamic model of a trapezoidal artificial reef[J]. Chinese Journal of Oceanology & Limnology, 2014, 32(6): 1329-1338.
- [17] 公丕海,郑延璇,李 娇,等. 塔型桁架人工鱼礁流场效应及稳定性[J]. 中国水产科学,2019,26(5):1021-1028.
- [18] 庞运禧,李芳成,李 尧. 同透空率下多孔人工鱼礁流场效应的三维数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):133-141.
- [19] 黄远东,付登枫,何文荣. 人工鱼礁开口比对流场效应影响的三维数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2014,25(4):39-43.
- [20] 黄远东,龙 催,邓济通. 三棱柱型人工鱼礁绕流流场的CFD分析[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(1):1-4.
- [21] 黄远东,赵树夫,姜剑伟,等. 多孔方型人工鱼礁绕流的数值模拟研究[J]. 水资源与水工程学报,2012,23(5):15-18.
- [22] 邓济通,黄远东,姜剑伟,等. 布设间距对三棱柱形人工鱼礁绕流影响的数值模拟[J]. 水资源与水工程学报,2013,24(2):98-102+108.
- [23] 林承刚,汝少国,杨红生,等. 刺参对人工礁体设计关键指标的选择性[J]. 海洋科学,2012,36(3):13-21.
- [24] 郑延璇,关长涛,宋协伟,等. 星体型人工鱼礁流场效应的数值模拟[J]. 农业工程学报,2012,28(19):185-193.

(上接第157页)

- [37] TAŞTAN K. Critical submergence for a horizontal pipe intake[J]. Ain Shams Engineering Journal, 2020, 11(4): 933-938.
- [38] YANG J, LIU T, BOTTACIN-BUSOLIN A, et al. Effects of intake-entrance profiles on free-surface vortices[J]. Journal of Hydraulic Research, 2014, 52(4): 523-531.
- [39] TAŞTAN K, YILDIRIM N. Effects of intake geometry on the occurrence of a free-surface vortex[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 144(4): 04018009.
- [40] HASHID M, HUSSIAN A, AHMED Z. Critical submergence for side circular intake in an open channel flow[J]. Journal of Hydraulic Research, 2021, 59(1): 136-147.
- [41] AHMAD Z, RAO K V, MITTAL M K. Critical submergence for horizontal intakes in open channel flows[J]. Dam Engineering, 2008, 19(2): 71-90.
- [42] SUN Hongliang, LIU Yakun. Theoretical and experimental study on the vortex at hydraulic intakes[J]. Journal of Hydraulic Research, 2015, 53(6): 787-796.
- [43] 孙洪亮,刘亚坤,刘洁洁,等. 弧形闸门前旋涡临界淹没水深研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2017,32(3):374-379.
- [44] JAIN A K, RANGA RAJU K G, J GARDE R. Vortex formation at vertical pipe intakes[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1978, 104(10): 1429-1445.
- [45] GULLIVER J S, RINDELS A J, LINDBLOM K C. Designing intakes to avoid free-surface vortices[J]. Water Power and Dam Construction, 1986, 38(9): 24-28.
- [46] CHANG YC, HU CN, TU JC, et al. Experimental investigation and numerical prediction of cavitation incurred on propeller surfaces[J]. Journal of Hydrodynamics, Series B, 2010, 22(5): 764-769.
- [47] POSEY C J, HSU H. How the vortex affects orifice discharge[J]. Engineering News Record, 1950, 114(9): 30-32.
- [48] 严根华,陈发展. 溢流坝表孔弧形闸门流激振动原型观测研究[J]. 水力发电学报,2012,31(2):140-145.
- [49] 王英奎. 立轴漩涡的力学特性与防控措施研究[D]. 北京:清华大学,2011.
- [50] 严根华,陈发展,胡去劣. 进水口漩涡及消涡栅试验研究[C] //第三届全国水力学与水利信息学大会论文集. 中国水利学会会议论文集. 南京:水利水电科技进步编辑部,2007.
- [51] KABIRI-SAMANI A R, BORGHEI S M. Effects of anti-vortex plates on air entrainment by free vortex[J]. Scientia Iranica, 2013, 20(2): 251-258.
- [52] 刘洁洁,孙洪亮,刘亚坤. 弧形闸门前消涡隔栅试验研究[J]. 水力发电学报,2017,36(1):26-33.