

1-66 ① 98118(5) 1-5 1-66 涡管排沙研究进展

毛野

TV673

(河海大学水利水电工程学院 南京 210098)

摘要 进入涡管槽口的挟沙水流会形成强有力的螺旋流沿涡管流动,能有效地排除底部推移质泥沙。涡管排沙可解决渠道引水的泥沙问题或排除水库泥沙,成本低,效率高。本文介绍了国内外在分析涡管排沙机理、重要影响因素、排沙效率计算及相关设计等方面的进展。

关键词 涡管 排沙 流量系数 综述 3|水|渠道、

人类社会的生存和发展已受到水资源匮乏的严重威胁,泥沙问题困扰着许多水利工程。引水渠道因淤积难以正常运行,水力机械因水流挟沙而磨损严重,水库则因泥沙淤积而缩短使用寿命……人们在不懈地寻求成本低效率高的除沙方法。涡管排沙约始于30年代,因构造简单独特,能高效率排沙而受青睐。美国在模型试验的基础上修建了涡管排沙设施,从50年代起不断有研究成果发表^[1,2]。60年代起涡管排沙在日本、印度、巴基斯坦和尼泊尔等亚洲国家推广^[3]。

我国对涡管排沙的关注始于70年代末。新疆石河子农学院张开泉^[4,5]和西北水利科学研究所王庆祥等^[6,7]较早进行了理论分析和模型试验,太原工业大学陈仰吾等^[8]则研究用涡管排除水库泥沙,并陆续有研究生以涡管排沙为学位论文^[9,10]。工程应用已有良好开端,如陕西省紫阳县青龙洞和权河口两电站及新疆玛纳斯县塔西河红沙湾灌溉工程均成功地采用涡管排沙。山西省岚县瓮子沟水库布设涡管排除水库的泥沙淤积,效果显著。涡管排沙在我国大有用武之地,结合国情研究和应用尚待进一步开展。

1 涡管排沙机理

涡管通常为置于明渠或水库底部的管状结构,沿轴向有槽口。从槽口进入的含沙水流若切向速度合适会形成螺旋流从涡管出口排出。涡管排沙涉及水流、泥沙和涡管三者,包含进入涡管开口的流动和涡管内螺旋水流动两部分。

图1所示为涡管简图。明渠渠宽为 B ,水深为 h ,涡管长 L ,纵轴坐标 x ,夹角为 θ ,等截面圆形涡管直径为 d ,截面面积为 A ,槽口宽度为 t 。E. Atkinson^[3,11]的概化模式如图1b

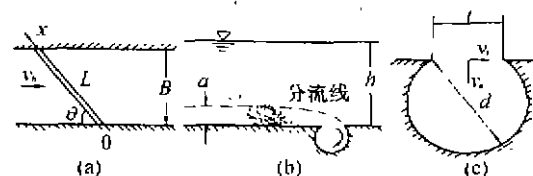


图1 涡管简图

(a) 平面; (b) 纵剖面; (c) 截面

所示,虚线为分流线。厚度为 a ,速度为 v_b 的底层挟沙水流流入槽口,切向流速为 v_t ,径向流速为 v_n 。考虑上游明渠与涡管的能量守恒以及涡管内沿轴向的动量平衡,推导出涡管轴向流速 u_x 公式为

作者简介:毛野,男,博士、教授,从事工程水力学及泥沙运动研究,曾发表《Fuzzy estimation of the free jet scour downstream of flip buckets》等论文。

$$u_r = \frac{\sinh(\beta y) \sqrt{g(H_T - H_0)}}{\cosh\beta} + \frac{v_b \cos\theta}{2} \left[1 - \frac{\cosh(\beta(1-y))}{\cosh\beta} \right] \quad (1)$$

式中 $H_T = h + \frac{(v_b \sin\theta)^2}{2g}$, g 为重力加速度; H_0 为涡管槽口处的压强水头; $\beta = \frac{\sqrt{2} C_d L t}{A \sqrt{1+k^2}}$, 其中 C_d 为槽口总流量系数, $k = \frac{v_t}{v_n}$; 无量纲长度参数 $y = \frac{x}{L}$, x 为截面位置坐标。

为推求 C_d 和 k , 以涡管截面轴心为计算点, 取明渠水流的角动量等于槽口处的水流的角动量, 并利用连续原理 $v_b a \sin\theta = v_n C_d t$, 采用孔口系数 $C_v = 0.98$, 可得

$$k = \frac{C_d t}{0.98} \left[\frac{1}{a} \sqrt{1 - \left(\frac{t}{d}\right)^2} + \frac{1}{d} \right] \quad (2)$$

E. Atkinson 由试验导出水流由明渠流入涡管时槽口总流量系数的表达式^[3]:

$$C_d = 0.47 \sqrt{1 - \exp\left(-\frac{\bar{a}}{0.75t}\right) + 0.0016 \frac{\bar{a}}{t}} \quad (3)$$

其中 $\bar{a}$ 为 a 值沿涡管的平均, 当 $\bar{a}/t$ 的值比较大时有 $C_d \approx 0.60$, 类似于孔口出流时的流量系数。

定义涡管总流量系数为 $C_v^* = Q_T / (A \cdot \sqrt{2g(H_T - H_0)})$, 计算值与实验资料和原型资料比较结果令人满意。唯夹角 θ 较小时计算值偏大, 这与轴线各处进入涡管的水流不平衡有关。

王庆祥等^[7] 采用小探头电磁流速仪测试了涡管内水流的切线流速和轴向流速, 发现涡管内可能出现管轴为空腔的流动。涡管内壁附近流速都比较小; 满管流轴心附近的切线速度接近于零, 其轴向速度亦较小; 有空腔流动时切线速度和轴向速度均由管壁向管轴增大。图 2 为涡管内轴向平均流速沿程增加的曲线, 在出口附近流速剧增。

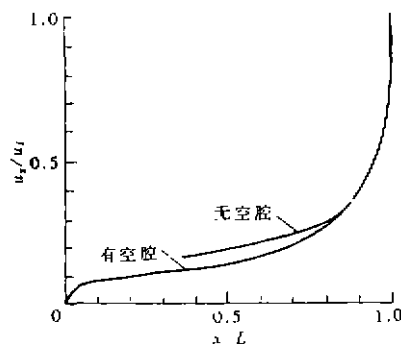


图 2 涡管内轴向平均流速的变化

王庆祥等^[7] 总结的总流量系数为 $C_v^* = (0.57/\sin\theta - 0.15)(h/d)^{0.10}$, 式中未涉及涡管槽口宽度, 其应用条件是 $h/d > 1.5$, $45^\circ < \theta < 90^\circ$ 。当 $30^\circ < \theta < 45^\circ$ 时按 45° 计算, 其槽口中心角 α 似为 90° 。张开泉等^[5] 根据实验及理论推算的总流量系数 C_v^* 为 $0.60 \sim 0.62$ 。

2 排沙效率

排沙效率 TE 为涡管排除的泥沙与涡管上游水流所含泥沙数量之比。对比实验表明, 明渠底部的流速因有水流被排走而加大, 主要是推移质泥沙随着近底水流进入涡管, 故涡管的排沙效率较高。排沙效率与涡管布置、涡管结构、水流特性和泥沙特性有关, TE 值可能高达 80% (见图 3)。

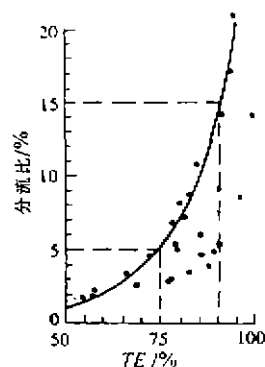


图 3 分沙比与排沙效率

E. Atkinson 的概化模型^[3]认为分流线以下的泥沙都将被涡管排走。把推移质按其粒径分为 10 组份, 假设涡管上游的泥沙颗粒处于平衡状态, 使泥沙颗粒下沉的重力与使泥

沙颗粒悬浮的紊动力相等,由此计算各组份中值粒径泥沙的垂向分布。当分流线位置高度 a 确定,则可计算出各组份的排沙效率值(见图4,图中 u_z, c_z 分别为高度为 z 的流速和浓度, ρ 为密度)。TE 值为各组份排沙效率的总和。

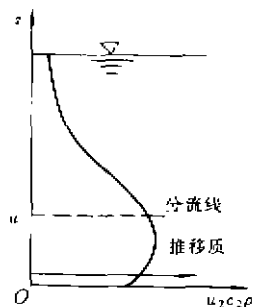


图4 泥沙浓度的垂直分布示意图

图3所示为分流比与排沙效率的试验关系曲线^[7]。分流线高度 a 可由分流比 R 推求, R 为涡管出口流量与涡管上游流量的比值,是水深 h , 流速 v_b , 夹角 θ , 管径 d 和槽口形状及宽度 t 的函数。将涡管分为若干段,记 a_i 为第 i 管段的分流线高度, $\bar{u}$ 为明渠平均流速, u_* 为床面摩阻流速, κ 为卡门常数,采用对数流速分布:

$$R_i = \frac{a_i}{h} + u_* \cdot a_i (\bar{u} \kappa h \ln \frac{a_i}{h}) \quad (4)$$

A. R. Robinson^[2]的试验表明,分流比为5%~15%,而涡管排沙效率可能高达50%以上,且水沙分离后仍可将水返回主渠道。A. R. Robinson 比较了排沙效率的原型资料与模型估算值,这两者比值的平均值为1.0,变动标准差为0.25,仅当泥沙较细悬移质较多时差异稍大,故原型与模型的吻合情况可以接受。

3 设计原则及设计过程

3.1 涡管位置

涡管所在处的明渠床面形态宜为平底,以免沙丘和沙垄堵塞涡管^[11]。在水流紊动较强的水工建筑物或弯道附近,泥沙悬浮不利于涡管排沙。在下游一定距离,水流结构会调整到比较适宜设置涡管,可设最小调整距离

为 L_a (见图5, w_j 为第 i 组份中值粒径泥沙的沉降速度)。另外,考虑涡管的出口位置,应使涡管沿轴向有一定的坡度,方便处理流出的水和沙^[5]。

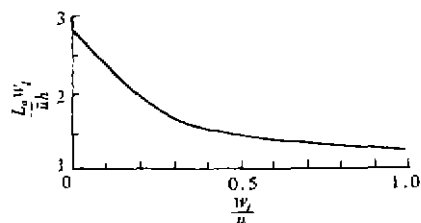


图5 无因次水流结构调整距离的变化

3.2 设计原则

E. Atkinson^[11]总结了涡管设计三原则:

- ①水头损失与涡管分流比的关系(参见式(1));
- ②为避免泥沙堵塞涡管,涡管内水流切向速度应大于泥沙颗粒 D_{90} 的沉降速度;
- ③尽量减小分流比沿涡管轴向的不均匀程度,若在开口端比在封闭端大得多,则涡管排沙效率显著降低。

3.3 管径设计流程

根据文献[2],应要求涡管截面积 $A = 0.06 t L \sin \theta$ 。管径设计流程^[11]如下:①设定排沙效率 TE 、管径 d 和槽口宽度 t 的初值;②以 $t/d = 0.20$, $\theta = 90^\circ$ 和 $L/d = 8.0$ 初步估算;③求分流线平均高度 a 和近底流速 v_b ;④估算涡管总流量系数 C_d^* 及涡管切向流速与纵向流速之比 k ;⑤计算 β ;⑥计算涡管内水头损失 H ;⑦计算涡管封闭端的分流流量 q_0 ;⑧以 q_0, a 值代入计算 v_b, k ;⑨计算涡管封闭端的切向流速 v_{t0} ;⑩计算涡管的不均匀分流系数 R_{oc} ,即开口端与封闭端的分流系数之比。检验:若上述过程计算的 TE 值与预估值有明显差距,则重新估计涡管几何尺寸,特别是管径 d 。

4 影响参数

4.1 夹角 θ

夹角 θ 直接影响管内切向分速度和轴向分速度的比例关系。A. R. Robinson^[2]认为夹角应为 45° ,王庆祥等^[7]在试验中观测到夹

角增大使涡管切向流速与轴向流速之比显著增大, 45° 时为 1.12, 而 90° 时达到 3.18, 出口的流量亦增加。张开泉等^[5] 认为夹角一般为 $30^\circ \sim 60^\circ$, 通常为 45° , 但若渠道流速较小则亦可为 90° 。E. Atkinson^[3] 对典型情况的计算结果如图 6 所示, 图中 ΔH 为明渠至涡管出口的水头损失。 $\theta < 45^\circ$ 时涡管切向流速很小, 而开口端与封闭端的不均匀分流系数因 θ 减小而增大。根据文献[9], $\theta = 55^\circ \sim 65^\circ$ 时排沙最经济, 而刘敏^[10] 认为 θ 为 $50^\circ \sim 60^\circ$ 时排沙效率最高, 涡管不易堵塞。

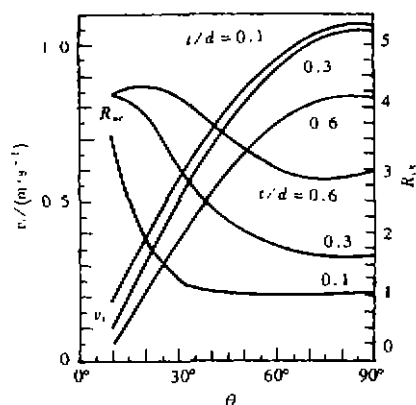


图 6 t/d 与 v_r, R_{OC} 的关系

$B = 8 \text{ m}; u = 1.3 \text{ m/s}; h = 1.4 \text{ m}; \bar{u}/u_* = 15; \Delta H = 0.4 \text{ m}; R = 15\%$

4.2 弗劳德数 Fr

为在涡管内形成螺旋流和使进入涡管的泥沙不会由槽口逃逸, 明渠水流的弗劳德数应大小适中。张开泉等^[5] 认为宜为 $0.70 \sim 1.20$, 最佳范围是 $0.80 \sim 1.00$, 而 A. R. Robinson 等^[2] 建议值为 0.80 。

4.3 涡管长度、槽口的大小和纵比降

由明渠宽度 B 和夹角 θ 可确定涡管长度 L , 截面形状和大小确定的涡管其输沙能力是确定的。A. R. Robinson^[2] 认为管长 L 与槽口宽度 t 的比值 $L/t \leq 20$, 通常 $t = 0.15 \sim 0.30 \text{ m}$, 故涡管长度不宜超过 4.5 m , 必要时可以设置几根涡管以满足排沙。

在图 6 中涡管的槽口的相对宽度 t/d 对涡管的切向流速影响不大, 但对涡管的不均匀分流系数有明显影响, 相对宽度 t/d 值较

小时 R_{OC} 值亦小。王庆祥等^[7] 认为涡管中心角以 90° 为好, 亦有人建议 60° 。

图 7 根据实验资料^[2] 绘制, d_s 为泥沙直径。当上游水深 h 与槽口宽度 t 的比值确定时, 排沙效率 TE 随 Fr 增大明显减小。若 Fr 为常数, h/t 比值愈小, TE 愈大, 特别是当 $h/t = 1.6$ 时 TE 达 70% 且不随 Fr 变化。

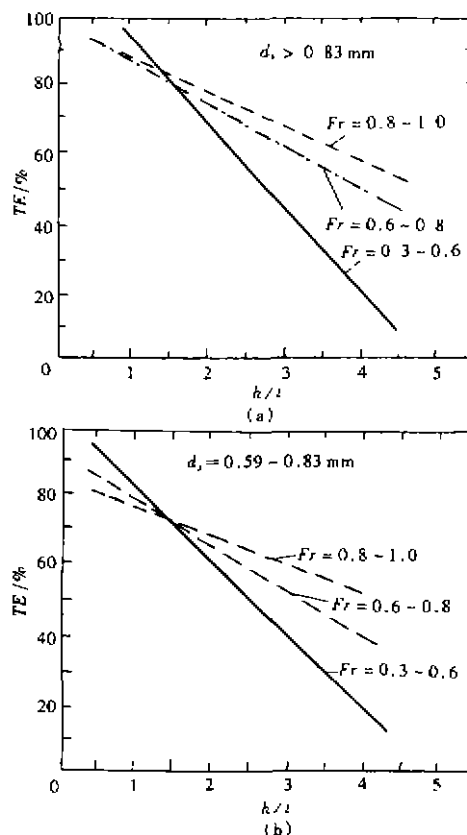


图 7 TE 与 h/t 的关系

刘敏^[10] 的研究表明, 在分流比较小时若将等截面圆形涡管的槽口宽度 t 沿轴线向出口端线性减小, 则排沙效率会有所提高。

涡管的轴向坡度对涡管排沙有一定的影响, 王庆祥等^[7] 的试验表明, 纵向坡度宜等于或大于明渠的自然坡度。

4.4 截面形状和槽口的前后缘高程

很多人就截面形状对排沙效率的影响进行了研究。A. R. Robinson^[2] 的结论是只要泥沙不会逃逸出去, 截面形状不是影响涡管排沙效率的重要因素, 常用等截面圆管作涡管,

具有良好的工作特性。刘敏^[10]研究了截面直径沿轴向向出口端线性增大的圆形涡管的工作特性,其思路是保持涡管中流动均匀,试验表明,可提高涡管的排沙效率,若能结合槽口宽度变化,效果会更明显一些。

涡管槽口的前后缘有等高、前高后低及前低后高之分,一般认为等高槽口为好。张开泉等^[5]在试验中为槽口下缘加了高为0.10h的低坎,认为 Fr 较高时可降低明渠临底流速,提高涡管的排沙效率,但 Fr 较低时则涡管可能因输沙能力降低而堵塞。刘敏^[10]研究了局部降低前槽口的情况,以1/20~1/50的过渡段将降低的前槽口与上游渠底衔接,认为有这种结构的涡管在水深较大时有利。

5 结 语

有槽口的涡管可利用涡管内的螺旋流排除推移质泥沙。涡管排沙效率高,可达80%,与涡管布置和结构、水流特性及泥沙特性有关。根据E. Atkinson的概化模型计算的涡管总流量系数与实测资料相吻合。具体的涡管设计可根据所提出的设计原则和管径设计流程进行,并应考虑夹角、弗劳德数、涡管长度、截面形状、纵坡比降、槽口前后坝高程等影响因素的研究成果。

参考文献

- 1 Parshall R L. Model and prototype studies of sand traps. Trans. ASCE, 1952, 117 (Separate No. 67): 204 ~ 214
- 2 Robinson A R. Vortex tube and trap trans. ASCE, 1962, 127 (Part III): 391 ~ 433
- 3 Atkinson E. Vortex-tube sediment extractor, part I: Trapping efficiency. J Hydr Engng, ASCE, 1994, 120 (10): 1110 ~ 1125
- 4 张开泉. 环流强度的判断和螺旋流排沙. 新疆水利科技, 1982(4): 23 ~ 28
- 5 张开泉, 刘焕芳. 螺旋流涡管排沙工程设计中的几个问题. 新疆水利科技, 1990(5): 25 ~ 31
- 6 王庆祥. 螺旋流的形成和排沙效果试验. 人民黄河, 1987(5): 12 ~ 17
- 7 王庆祥, 李养志, 程永华, 王运生. 螺旋流排沙的试验研究和应用. 泥沙研究, 1990(2): 63 ~ 70
- 8 陈仰吾, 郭天恩, 高恩恩. 涡管流管道排除水库泥沙的机理研究. 水利水电技术, 1993(2): 53 ~ 56
- 9 白晓峰. 涡管水流特性及排沙性能试验研究: [学位论文]. 成都: 成都科技大学, 1988
- 10 刘敏. 变截面涡管排沙性能试验研究: [学位论文]. 南京: 河海大学, 1994
- 11 Atkinson E. Vortex-tube sediment extractor, part II: Design. J Hydr Engng, ASCE, 1994, 120 (10): 1126 ~ 1138 (收稿日期: 1997-08-28 编辑: 熊水斌)

简讯

美国防灾减灾战略

美国是自然灾害频繁发生的国家,面对严重的自然灾害,美国联邦救急总署最近在认真总结过去经验的基础上,提出了新的国家防灾减灾战略及对策,其中主要突出以下十个方面的发展原则:①国家防灾减灾措施是保证国家的整体、长远、可持续发展利益为目标的原则,不是从局部利益出发的;②减少每一种自然灾害的措施必须与减少各类自然灾害措施相结合,例如建筑物的防灾措施就要考虑防洪、防震、防风、防火等;③各种减灾措施必须最大限度地从当地实际情况出发;④减灾措施必须充分考虑与现有的技术措施相结合;⑤检验所有减灾措施归根到底取决于当地减灾取得的效果;⑥减轻自然灾害的损失及破坏影响,应着重灾前的预防和切实可行的减灾措施,防灾减灾无论是灾前、灾中及灾后都至关重要;⑦对自然灾害及时准确的识别评估是减灾的基础;⑧建立新型的联邦、地方政府及公共、私人的合作关系是实施有效减灾的保证;⑨对已确认承担的自然灾害,各有关部门,特别是联邦、地方政府必须承担一切责任;⑩减灾的各项措施必须与保护自然环境、文化及资源相结合。

从国家防灾减灾战略部署上,侧重五个方面:①大力开展灾害识别及灾害评估;②加强对防灾减灾技术研究及普及转让新的科技成果;③通过宣传、培训、教育等多种形式切实增强公众的防灾减灾意识;④鼓励社会各界对防灾减灾的投入;⑤加强团结协作,充分发挥联邦与地区政府、公共及私人组织防灾减灾的作用。围绕着这五方面,制定发展战略,并明确了联邦、地区乃至私人应尽的职责及近年应完成的工作和完成的时间等。

(摘自1998年8月20日《水信息》)