沉沙池长度计算方法综述

宗全利,刘焕芳

(石河子大学水利建筑工程学院,新疆 石河子　832003)

摘要:对沉沙池泥沙危害粒径标准的选定问题进行分析研究,指出泥沙危害粒径标准的选定应该综合考虑微灌产品的性能指标和水轮机磨损等因素.介绍了准静水沉降法、沉降概率法和超饱和输沙法的计算方法,并分析了准静水沉降法与一维流超饱和输沙法之间的相互转化,指出一维流超饱和输沙法在实际中应用最广,但其计算结果精度直接受恢复饱和系数 α 的限制,为此需要对 α 进行更深入的理论研究,使其应用范围更加广泛.

关键词:沉沙池;泥沙粒径;准静水沉降法;沉降概率法;超饱和输沙法

中图分类号:TV14　　文献标识码:A　　文章编号:1006-7647(2004)07-0097-04

沉沙池的设计计算理论主要涉及泥沙危害粒径标准的选定和泥沙沉降的计算方法两个方面.笔者分别对这两方面进行研究探讨,以期能够对相关领域的研究人员有所帮助.

1　沉沙池泥沙危害粒径标准的选定

在设计沉沙池之前,必须给出沉沙池对泥沙处理的设计标准,危害粒径标准的选定就是其中一个非常重要的问题.危害粒径标准选定的合理与否不仅直接关系到沉沙池的工程造价,而且还会影响沉沙池的后期运行效果.我国现行《水电水利工程沉沙池设计规范》(以下简称《规范》)中分别给出了水电站和水利工程沉沙池设计的最小沉降粒径(表1)[1].《规范》规定出池允许粒径不宜大于 0.05 mm.

表 1　水电站沉沙池设计最小沉降粒径

额定水头/m	设计最小沉降粒径/mm
600 ~ 300	0.10
400 ~ 100	0.25
< 100	0.35

注:表中 600 ~ 300 m 水头段只限于水斗式水轮机.

师卓人等[2]对喷微灌工程泥沙净化标准进行了研究,并分别设定了标准.喷灌标准为进入喷嘴以有机物为主的非溶解性沙粒直径小于或等于喷嘴直径的 1/2,微灌标准为进入滴头或水道的沙粒直径小于或等于滴头或水道直径的 1/8.对于水电站沉沙池,其标准粒径的选定,应在泥沙对水轮机磨损程度及磨损危害分析计算的基础上经过综合考虑,并进行技术经济比较后选定.龚振文、陈星等[3~5]对沉沙池拦截标准进行了研究,认为水电站沉沙池以过泵泥沙粒径不超过 0.03 ~ 0.05 mm 为宜,即该粒径泥沙的沉降率应在 80% ~ 85% 以上.

2　沉沙池泥沙沉降计算方法

对沉沙池,评价其运行效果好坏的关键因素是泥沙的沉降效率,而沉降效率的计算又取决于不同的泥沙沉降的计算方法,因此,设计沉沙池首先要解决的问题就是确定泥沙沉降的计算方法.目前常用的沉沙池泥沙沉降计算方法主要有准静水沉降法、沉降概率法和超饱和输沙法 3 种.

2.1　准静水沉降法

准静水沉降法主要是基于泥沙的沉降速度来确定沉沙池长度和池内各断面含沙量及其级配,因其采用的泥沙沉降速度是对静水沉降速度修正得来的,故此称为准静水沉降法.静水沉降法指在不考虑水流紊动作用影响时,假定水流的平均流速不变,泥沙颗粒在水流和自身重力作用下,将沿线下沉,如图 1 中 A 到 A_1 直线所示.

沉沙池的长度尺寸具有下列线性函数关系:

$$L = H\frac{U}{\omega} \tag{1}$$

式中:L 为沉淀池长度;H 为沉淀池工作水深;U 为沉淀池内水流的平均流速;ω 为泥沙沉降速度.

基金项目:教育部优秀青年教师资助计划项目(1862)

作者简介:宗全利(1979—),男,山东临朐人,硕士研究生,从事工程水力学研究.

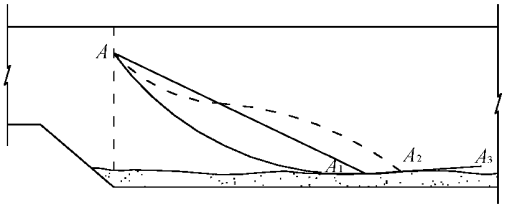

图 1　泥沙在沉淀池中的运动过程

实际上沉沙池内水流的流速并不是常数，所以泥沙下沉的轨迹并不是直线而是曲线（A 到 A_2 曲线），又由于沉沙池内水流有紊动作用，紊流强度越靠近底部越大，因此泥沙运动的轨迹为 A 到 A_3. 为了考虑上述影响，必须对静水沉降法进行修正，将式(1)乘以一个紊动修正系数 ξ，就得到用准静水沉降法计算沉沙池长度的公式：

$$L = \xi H \frac{U}{\omega} \tag{2}$$

紊动修正系数 ξ 的取值范围较大，与水流速度、含沙量、平均水深、泥沙沉降速度等有关，我国有关设计手册中建议 ξ 取常数 1.2 ~ 1.5 之间. 根据黄河下游实测资料，ξ 取值与泥沙沉降速度的关系最密切，经试验得到[6]：

$$\xi = 100\omega^{0.767} \tag{3}$$

由于 ξ 的取值在实际应用中很难做到统一，从而在很大程度上限制了该方法的使用. 现在，普遍观点认为，准静水沉降法一般可以用来估计沉沙池池长.

用准静水沉降法可以确定沉沙池内的含沙量变化. 将沉沙池内的泥沙按其粒径分为几组，考虑第 i 粒径组泥沙，假定含沙量沿垂线均匀分布，计算池段长度 x 处，则有：

$$S_i = S_{0i}\left(1 - \frac{\omega_i x}{\xi H U}\right) \tag{4}$$

式中：ω_i 为第 i 粒径组泥沙的平均沉降速度；S_{0i} 为第 i 粒径组泥沙在某一计算断面进口处的含沙量；S_i 为第 i 粒径组泥沙在某一计算断面处的含沙量.

由于准静水沉降法可用来估算沉沙池池长，而池长又直接影响着池内的含沙量变化，所以只要计算段长度选取适当，用该方法得到的结果其精度就能满足工程需要. 杨晋营等[7]通过对该方法的误差分析对此进行了研究.

2.2　沉降概率法

沉降概率法是前苏联电站部水力发电建设总局 1948 年批准的《水电站沉沙池技术规范设计标准》中所采用的沉沙池泥沙沉降的计算方法，该方法曾在我国和前苏联长期使用. 该方法基本理论认为泥沙颗粒在水流紊动作用下前进一段距离后，其沿水深方向的位置不固定，存在一定偏离，这种偏离服从正态概率分布，从而得出泥沙沉降效率的计算公式. 该方法是用统计学原理，将大量资料分析后，统计得出的一个经验公式，而实际上在公式最初建立时，由于资料范围有限，使其适用范围受到很大限制. 因此，在具体使用时，必须注意资料的范围条件. 由于此局限性，近年来对该方法的研究发展比较缓慢.

2.3　超饱和输沙法

超饱和输沙法表明水流实际含沙量大于水流挟沙能力. 在沉沙池水流中，由于平均流速比较小，水流挟沙能力很低，因而沉沙池内挟沙水流往往处于超饱和状态. 而实际上沉沙池也正是由于内水流处于超饱和状态，挟沙能力很低，从而达到沉沙的目的. 因此，超饱和输沙法所表达的函数关系与沉沙池内泥沙沿程变化的规律最接近，故此方法在现行沉沙池设计中应用最广，我国现行《规范》中就是采用此方法.

近几十年来，国内外许多学者都对超饱和输沙法进行了研究[8~13]. 超饱和输沙法又分为一维流超饱和输沙法和二维流超饱和输沙法，其中一维流超饱和输沙法由于计算公式结构简单，且比较适用于我国多泥沙河流上沉沙池泥沙沉降的计算，因而近年来在国内被广泛应用.

$$S_i = S_{0i} e^{-\alpha \frac{\omega_i x}{HU}} \tag{5}$$

式(5)即为用一维流超饱和输沙法计算的分组含沙量沿程变化公式，其中 α 为恢复饱和系数，定义为河底含沙量与垂线平均含沙量的比值.

一维流超饱和输沙法就是一种考虑了悬移质泥沙超饱和输沙特点的泥沙沉降计算方法. 该方法中起决定性作用的因素为恢复饱和系数 α，对此，国内外许多研究人员都进行了深入研究. 恢复饱和系数反映泥沙本身受重力作用和水流对其向上紊动扩散作用的相互关系，它影响着泥沙颗粒在动水中的沉降特性. 从理论上讲，恢复饱和系数 α 是大于 1 的系数. 但据实测资料计算结果表明，α 是具有综合性质的系数，其取值范围较大，而且不同研究者对其研究的结果也有较大差别[9]. 有些学者认为，在泥沙处于淤积状态时，α 取 0.25，冲刷时取 1.0[14]. 但这样取值实测结果与计算结果相差较大，因而这种取法的可靠性较差. 实际上，α 值应为水流条件和边界条件对泥沙沉浮的综合反映，随着时空条件的变化而变化. 因此，必须结合实测资料，分区域进行计算. 例如，我国长江水利委员会分析长江下游沉沙条渠资料，认为 $\alpha = 0.75$ 韩其为[15]对不同类型水库资料的分析认为：河道型水库 $\alpha = 0.25$，湖泊型 $\alpha = 0.5$；张启舜[16]理论计算 $\alpha = 1.005 \sim 3.5$；美国肯务局在鲍德尔工程沉沙池设计中，采用 $\alpha = 3.28$[17]；戈斯

通[18]提出 $\alpha = 1.0$；卡拉乌舍夫提出纯淤泥 $\alpha = 1.0$；另外，成都勘测设计研究院科学研究所通过试验建立的 α 计算公式为 $\alpha = m(\omega_i/u_*)^n$，其中 m 和 n 分别为反映池内流速分布状况的系数和指数[9]. 同样，对于不同区域，m 和 n 取值不同. 我国《规范》中对 α 计算采用了该公式，并分别给出了 3 个不同区域的 m 和 n 的计算结果. 但《规范》给出的只是比较有代表性的几个区域的实测结果，对于更普遍性的 α 的取值，有待于进一步研究.

实际上，一维流超饱和输沙法和准静水沉降法在一定条件下可以相互转化，山西省水利勘测设计院的杨晋营等[7]就对此进行了研究. 将准静水沉降法分组含沙量沿程变化公式(式(4))写成微分方程形式为

$$\frac{\mathrm{d}S_i}{S_i} = -\frac{\omega_i \mathrm{d}x}{\xi UH} \tag{6}$$

对式(6)两边积分并将边界条件代入，整理后可得：

$$S_i = S_{0i}\mathrm{e}^{-\frac{\omega_i x}{\xi HU}} \tag{7}$$

令 $\xi = \frac{1}{\alpha}$ 则有 $S_i = S_{0i}\mathrm{e}^{-\alpha\frac{\omega_i x}{HU}}$，此即为式(5).

同样将式(5)按照函数 e^t 的麦克劳林级数展开有：

$$S_i = S_{0i}\left[1 - \frac{\alpha\omega_i x}{UH} + \frac{1}{2!}\left(-\frac{\alpha\omega_i x}{UH}\right)^2 + \frac{1}{3!}\left(-\frac{\alpha\omega_i x}{UH}\right)^3 + \cdots + \frac{1}{n!}\left(-\frac{\alpha\omega_i x}{UH}\right)^n\right] \tag{8}$$

当 $\frac{\alpha\omega_i x}{UH}$ 很小时，式(8)可近似写成：

$$S_i = S_{0i}\left(1 - \frac{\alpha\omega_i x}{UH}\right) \tag{9}$$

同样令 $\alpha = \frac{1}{\xi}$ 则可得到与式(4)相同的计算公式. 这表明两种计算方法虽然是从不同理论基础上建立起来的，但在一定的条件下可以相互转化，即在一定条件下$\left(\frac{\alpha\omega_i x}{UH}\text{很小时}\right)$用两种方法计算能够得出比较接近的结果，再一次肯定了准静水沉降法在计算长度选取适当的情况下，其计算精度是能满足工程要求的.

目前，国内常用的一维流超饱和输沙法公式都是在不考虑水流挟沙力的情况下得出的简化公式，而实际上，水流挟沙力是否应该忽略，以及在什么条件下应该忽略也是值得探讨的问题. 杨晋营[19]就一维流超饱和输沙法对此进行了研究，得出无论沉沙池运行的前期、中期还是后期，只要沉沙池水流挟沙力与进口含沙量之比值小于 0.2，用一维流超饱和输沙法计算泥沙沉降率时，就可以忽略水流挟沙力. 但对泥沙沉降计算的其他方法与水流挟沙力的问题，目前还没有明确的研究成果.

对于二维流超饱和输沙法，国内外学者也做了大量的工作，但由于方程结构的复杂性，即使在均匀流条件下，也必须经过较多简化，并做许多假定才能得出解析解，这样，实际应用起来就很不方便，并且精度也很难保证，所以目前该方法在沉沙池设计计算中还很少采用，有待于今后更深入的研究，得出结构较为简单的应用公式.

目前，在沉沙池的计算理论方面，研究得比较多的是采用数值方法模拟沉沙池中的水流泥沙运动规律. 国内的杨红、潘光[20]在采用 k-ε 紊流模型对沉沙池的立面流场进行了数值模拟；清华大学的张庄[21]采用计算流体力学的方法对两个实际的沉沙池进行了数值模拟计算，得到较好的结果；扬州大学的刘超等[22]用 k-ε 紊流模型对取水前池复杂的流动进行了三维紊流数值模拟计算，并应用于实际工程. 国外的 Imam 和 Abdel-Gawad 等[23,24]采用不同的方法对沉沙池的水流流场进行了模拟；Stamou 等[25]对加拿大某矩形沉沙池进行了模拟计算，所得结果与理论计算结果吻合较好. 此外，关于沉沙池的设计计算方面国外也有许多研究成果[26,27].

3 结 语

a. 目前，国内对危害粒径的选定还没有统一的标准，一般是针对不同的工程，具体分析选定，特别是微灌工程，其产品的生产厂家很多，而不同产品的堵塞程度又不相同，这就需要对产品进行抗堵塞试验，以确定使用该产品时泥沙的标准危害粒径. 只有这样，才能对沉沙池的标准危害粒径进行合理的选定. 对于水电站沉沙池，为了能合理地确定危害粒径，必须先进行泥沙对水轮机磨损的研究，先行定义怎样的磨损程度为“危害”，因为不同的标准相应有不同的危害粒径数值. 迄今为止，国内还没有相关的统一标准，因此对于这一问题的讨论前提始终是不明确的，这有待于今后相关领域工作者的共同努力.

b. 对于泥沙沉降的计算方法，以超饱和输沙法与沉沙池内泥沙的变化规律最接近，其中一维流超饱和输沙法在现行中应用最广，但一维流超饱和输沙法计算结果的精确程度又直接受恢复饱和系数 α 的限制. 因此计算时必须保证 α 的准确度，这在实际应用中是很难做到的. 为此，国内急需对恢复饱和系数 α 进行研究，得出关于 α 的更为准确的计算公式，而不是只适用于某种情况或区域的计算结果. 随着计算机技术的发展，可以用数值计算或模拟的方法对 α 进行理论分析与探讨，借助于一些传统的水

流或泥沙模型，并与 α 建立联系，得出关于 α 的一些影响因素，并逐个分析这些因素与 α 之间可建立的理论公式，同时要与实验相结合，运用实测资料进行验证，以期能够得出关于 α 的可靠计算公式.

参考文献：

[1] DL/T5107-1999，水电水利工程沉沙池设计规范[S].

[2] 师卓人，冯远船. 喷微灌工程水源非溶解性砂粒净化标准探讨[J]. 节水灌溉，2001(1)：29.

[3] 龚振文，余建新. 水电站沉沙池设计中的泥沙危害粒径标准选定问题的探讨[J]. 水利水电技术，2000，31(4)：7～8.

[4] 陈星，张荣梅. 提灌工程沉沙池设置标准的研究[J]. 太原理工大学学报，2001，32(5)：507～509.

[5] 陈星，张荣梅. 沉沙池拦截标准初探[J]. 山西水利科技，2000(增刊)：41～42.

[6] 周素真，石自堂，马有国. 取水枢纽工程[M]. 武汉：武汉水利电力大学出版社，2000.

[7] 杨晋营，王秀兰. 水利工程沉沙池泥沙沉降计算方法讨论[J]. 山西水利科技，1995(2)：37～39.

[8] 韩其为，何明民. 恢复饱和系数初步研究[J]. 泥沙研究，1997(3)：32～40.

[9] 谭伟民. 水电站沉沙池泥沙沉降率计算方法分析与检验[J]. 水力发电，2003，29(4)：24～28.

[10] Siping Zhou，Mccorquodale J A. Modeling of rectangular settling tanks [J]. J Hrdr Engrg，ASCE，1992，18(10)：1391～1405.

[11] Garde R J，Ranga Raju K G，Sujudi A W R. Design of setting basins[J]. Journal of Hydraulic Research，1990，28(1)：81～91.

[12] Camp T R. Sedimentation and design of settling tanks[J]. J Hrdr Engrg，ASCE，1964，Ⅲ(2285)：895～958.

[13] Olsen N R B. Design of flushing pipes for sand traps[J]. Modelling Testing & Monitoring for Hydro Powerplants Conference Papers，1994(7)：147～153.

[14] 王普庆，杨文海，张永昌. 沉沙池设计计算方法研究[J]. 人民黄河，1996(4)：42～45.

[15] 韩其为. 悬移质不平衡输沙的研究[A]. 见：中国水利学会. 第一次国际河流泥沙学术讨论会论文集[C]. 北京：1980.

[16] 张启舜. 明渠水流泥沙扩散过程的研究及其应用[J]. 泥沙研究，1980(复刊号)：37～52.

[17] 范诺尼 V K. 工程泥沙[M]. 北京：水利出版社，1981.

[18] 苏联电站部水力发电总局. 水工建筑设计规范水力发电站沉沙池[S]. 北京：电力工业出版社，1957.

[19] 杨晋营. 关于沉沙池计算中的水流挟沙力[J]. 水利水电技术，1998，29(12)：20～23.

[20] 杨红，潘光在. 沉沙池立面流场数值模拟研究[J]. 泥沙研究，2000(2)：55～59.

[21] 张庄. 沉沙池水力特性与悬浮物去除率[J]. 水动力学研究与进展，1997，12(2)：217～225.

[22] 刘超，成立，汤方平. 取水前池复杂流动数值模拟[J]. 华北水利水电学院学报，2001，22(3)：35～39.

[23] Iama E，Mccorquodale J A. Simulation of flow in rectangular clarifiers [J]. J Hrdr Engrg，ASCE，1983，109(3)：713～730.

[24] Abdel-gawad S M，Mccorquodale J A. Strip integral method applied to setting tanks [J]. J Hrdr Engrg，ASCE，1984，110(1)：1～17.

[25] Stamou A I，Adams E，Rodi W. Numerical model of flow and setting in primary rectangular clariffer[J]. Journal of Hydraulic Research，1989，27(5)：665～682.

[26] Olsen Nils R B，Skoglund Morten. Three-dimensional numerical modeling of water and sediment flow in a sand trap[J]. Journal of Hydraulic Research，1994，32(6)：833～844.

[27] Lau Y L，Krishnappan B G. Size distribution and setting velocity of cohesive sediments during setting[J]. Journal of Hydraulic Research，1992，30(5)：673～684.

(收稿日期：2004-06-10　编辑：高建群)

欢迎订阅《水利经济》

全国水利系统优秀期刊　中国期刊网入编期刊

中国数字化期刊群入网期刊　《中国科技期刊数据库》收录期刊

《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊　中国学术期刊综合评价数据库来源期刊

(邮发代号：28－252，双月刊)

《水利经济》是中国水利经济研究会和河海大学主办的以技术性为主、兼顾学术性和管理性的技术性期刊. 本刊1983年创刊，是全国惟一的水利经济研究方面的专业性期刊，国内外公开发行.

本刊主要刊登有关水权、水市场、水利工程社会评价与经济评价、水利规划经济与工程经济、水利财务与经营管理、城乡供水价格、供水安全、水资源可持续发展研究，以及水利旅游和水库移民经济等方面的文章. 适合从事水利经济工作有关的管理人员、科研人员、工程技术人员及大专院校师生阅读.

本刊为双月刊，每逢单月30日出版. 2005年订价6元/期，全年36元. 欲订购者，请向当地邮局订购. 亦可与编辑部联系索取征订单. 编辑部地址：210098 南京市西康路1号 河海大学，联系电话：(025)83786350，电子信箱：jj@hhu.edu.cn.