

简汉敏 倪锦初 刘小峰 编译

水库清淤

SHUIKU QINGYU



黄河水利出版社

水 库 清 淤

简汉敏 倪锦初 刘小峰 编译

黄河水利出版社

内 容 提 要

泥沙淤积影响水库发挥防洪、发电、供水等工程效益的能力。本书在分析研究世界众多水库处理淤积问题的经验的基础上,从影响冲沙的因素、适于冲沙的地理区域等方面,阐述了采用水力方法,即使已沉积的泥沙重新掺进水流,并通过大坝的泄水底孔排泄的方法,减少水库淤积,维持水库长期使用所需库容。介绍了世界各地冲沙的实例,为成功冲沙提供了所需的水文、水力、泥沙的地形特征等方面的指导。

图书在版编目(CIP)数据

水库清淤/简汉敏,倪锦初,刘小峰编译.—郑州:
黄河水利出版社,2004.3
ISBN 7-80621-761-4

I.水… II.①简…②倪…③刘… III.水库
淤积—清淤 IV.TV145

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 002064 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371-6022620

E-mail:yrp@public.zz.ha.cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:850 毫米×1168 毫米 1/32

印张:7

字数:175 千字 印数:1—1 500

版次:2004 年 3 月第 1 版 印次:2004 年 3 月第 1 次印刷

书号:ISBN 7-80621-761-4/TV·347 定价:15.00 元

前 言

在世界许多地区,水库的使用年限取决于使库容逐年下降的淤积速率。淤积过程最终会破坏工程发挥效益的能力(工程正是为此效益而修建的)。许多大型水库正趋近其使用年限。有各种各样的方案可有效地处理水库淤积。

1. 尽可能减少入库泥沙

要达到这一目的有 3 种常用方法:

(1)实施流域水土保持计划,尽量减少产沙量。调整土地利用方式、农业方法和工程措施以控制侵蚀,均属于这一类。

(2)上游拦沙。可用拦沙坝和植被筛截留向下游水库输移的泥沙。

(3)旁路排泄高含沙量的径流。其原理是在低~中等流量、含沙量低时水库蓄水,而绕过水库旁路排泄含沙量高的大流量。这一方法可利用旁通渠或隧洞或采取使水库“暂停运行”等措施来实现。

2. 尽可能减少水库淤积

有以下两种方法可以使泥沙通过水库而无淤积:

(1)冲沙。将挟沙洪水排出水库。这一方法需要在汛期降低库水位,主要适用于极细泥沙(黏粒和粉沙)。

(2)异重流排沙。该方法的吸引力在于无须降低水位,但只有在非常特殊的情况,水沙运动引起的异重流能将极细泥沙输移至坝前的场合可采用。异重流排沙的成功实例极少。

3. 水库清淤

要清除水库已淤积泥沙可采用水力和机械方法:

(1)冲沙。使已沉积的泥沙重新掺进水流中,并通过坝内泄水

底孔排泄挟沙水流。这一方法需要降低库水位,要消耗大量的水,但在特定情况下可输送较粗泥沙(主要为沙粒)。

(2)采用疏浚或机械方式排沙清淤。方法是可行的,但通常要求在较长时期将库水位维持在低水位,除了水库在疏浚期间有很大的利益损失外,疏浚本身的成本也很高。清除大量的泥沙总会有一些困难。

上述方法均可用于延长水库的有效使用年限。不过,这些方法在技术、经济和环境方面的可行性取决于以下特定因素:

(1)大坝处控制水位和出流的适用工程设施的可用性。

(2)“富余”水的可用量和如果用于其他用途的价值。

(3)河道流量,包括其季节性变化的可预测性。

(4)入库泥沙和库内泥沙的特性。

(5)疏浚排泥区(挖出泥沙的弃土区)的可用程度。

(6)通过大坝排泄泥沙对下游河段的影响。

(7)泥沙处理对工程正常运行的影响,以及所采取措施的财政后果和社会后果。

(8)泥沙处理对区域内其他水库的影响。

(9)受到影响的利益相关各方之间的体制和政治问题。

采用泥沙处理的各种技术使水库能够长期使用的目标无疑是值得称赞的。不过,这些技术并不适用于所有水库,部分大坝不可避免地要加高才能维持库容,有些则要停止运行和可能在别处重建。但是,可利用的优良坝址越来越少,而建新坝可能造成严重的环境后果和社会后果。

本书主要是阐述清除水库沉积泥沙的一种方法,即通过在坝内专门修建的泄水设施冲沙。不过,该技术只有在一定的有利条件下才有效,不能被广泛应用。

近10年设计的坝,往往考虑了在条件适当时允许进行冲沙的设计措施。不过,这些设计都基于特定坝址的考虑。本书的目的

是为成功冲沙提供所需的水文、水力、泥沙和地形特征等方面的指导。本书是在回顾世界范围内近期研究和现场经验的基础上,将现有知识集中起来形成的一本供工程技术人员使用的简明手册。

本书根据国际大坝委员会各成员国提供的资料,从评估水库淤积问题的范围入手,估计因淤积而可能损失的库容,并将淤积库容与满足持续需求可能需要的净库容作了对比。回顾了水库冲沙认识的现状,接着研究了全世界迄今为止的冲沙经验,之后确定了世界上冲沙可能最有效的地区。最后一章阐述了在某个特定坝址考虑冲沙时必须进行的更为详细的调查研究。

编译者

2003 年 12 月

目 录

前 言

第 1 章 总 论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 结论概要	(2)
1.3 对冲沙影响因素的研究	(5)
1.4 世界冲沙经验	(7)
1.5 适于冲沙的地理区域	(9)
1.6 特定坝址的勘探研究和设计考虑	(11)
第 2 章 水库泥沙淤积概述	(14)
2.1 全世界的总库容	(14)
2.2 现有库容的全球分布情况	(15)
2.3 全球对库容增长的需求	(16)
2.4 库容增长需求的分布情况	(20)
2.5 新建水库的蓄水率与分布	(24)
2.6 库容损失率	(26)
2.7 库容损失率的发展趋势	(29)
2.8 水库规模和库容损失率	(30)
2.9 对新增库容的要求	(31)
第 3 章 影响冲沙的因素的研究	(32)
3.1 引言	(32)
3.2 冲沙机理	(33)
3.3 成功冲沙标准的制定	(35)
3.4 有效冲沙要求概述	(52)
3.5 数学模型	(54)

第 4 章 世界冲沙经验	(56)
4.1 引言	(56)
4.2 冲沙	(56)
4.3 世界冲沙经验	(57)
4.4 水库冲沙实例研究	(65)
第 5 章 适于冲沙的地理区域	(83)
5.1 世界各地侵蚀率的差异	(83)
5.2 世界气候带	(89)
5.3 适于冲沙的地理区域	(97)
第 6 章 特定坝址的勘探研究和设计考虑	(103)
6.1 坝址勘探	(103)
6.2 水文调整	(104)
6.3 泥沙研究	(104)
6.4 水力模拟	(105)
6.5 系统模拟	(105)
6.6 经济和财务分析	(105)
附录 1 水库数据	(107)
附录 2 数值模型实例研究	(139)
附录 3 水库冲淤实例研究	(146)
附录 4 侵蚀	(181)
参考文献	(214)

第 1 章 总 论

1.1 引言

全世界约有 40 000 座大型水库,用于供水、发电、防洪等目的。由于水库淤积,每年损失 0.5%~1% 的总库容,要想维持现有的总库容,每年需要建 300~400 座坝。按每座坝 500 万英镑左右的成本计,每年要耗费 15 万~20 万英镑。在一些合适的老坝和在新坝设计中引进冲沙系统,可节约上述费用的 10%。本书提供了冲沙系统的设计准则,并说明了在哪些地方应用该系统是有利的。

大多数大坝和水库是 1950 年后修建的。大坝和水库的效益是相当大的,提高了世界各地人们的生活质量。这些效益主要可分为 3 类。

1.1.1 灌溉

全世界 20% 左右的耕地,约 3 亿 hm^2 是灌溉耕地,其产量约占世界粮食产量的 33%。灌溉用水约占世界用水量的 75%,远远超过生活用水和工业用水。

1.1.2 发电

全世界 20% 左右的发电量来自水电,这相当于世界能源消耗的 7% 左右。

1.1.3 防洪和蓄水

许多大坝修建的主要目的就是防洪和蓄水,例如胡佛坝、田纳西流域的一些坝和中国最近修建的部分坝。

在世界许多地区,水库的使用年限取决于淤积速率,淤积使库容逐年下降,一旦泥沙堵塞了泄水底孔,最终会破坏水库的供水和供电能力。许多大型水库正趋近其使用年限。

维持库容的方法之一是通过在坝内专门修建的泄水设施冲沙。这项技术能用于已建大坝(修改工程结构)和新坝。不过,该技术仅在某些有利条件下才有效,不能普遍应用。替代方案是再建一些坝,取代现有水库减少的库容。不过,可利用的优良坝址越来越少,而且建新坝还可能造成严重的环境后果和社会后果。

1.2 结论概要

1.2.1 世界库容

世界水库库容(不包括用作发电、灌溉的天然湖泊)的最新统计是6 815 km³。

1.2.2 库容分布

按照国际大坝委员会的统计,表2.1示出了全世界现有库容和在建库容的分布情况。美洲、北欧和中国大陆共占世界现有水库库容的70%。

1.2.3 库容需求

1990年估计世界人口为52.86亿,以每年1.5%的速率增长。预计在未来的几十年间增长率将有所下降,表2.2对未来世界人口作了预测。

预计需水量将以较快的速率持续增长,这一速率将超过仅仅根据人口增长而作出的预计。通过增大地表水和地下水的使用量可以满足大部分需求;假设水可以再利用,且总需求和库容之间不存在直接关系。

在Gleich(1993)的研究中提供了希克拉马诺夫对总需水量增长情况所作的估计,估计显示,需水量的增长率持续高于人口增长率,而且库容占总供水量的比例更高,如表2.3所示。

根据人口、用水量、灌溉面积和水电的增长率,推测出如表1.1所示的库容需求增长率。

表1.2示出了新库容需求预测。

表 1.1 库容需求

时期	年增长率(%)	净库容增长(km ³)
2000~2010 年	1.56	998
2010~2020 年	1.39	1 032
2020~2030 年	1.12	939

表 1.2 新库容需求的地理分布

地区	新库容需求(km ³)		
	2000~2010 年	2010~2020 年	2020~2030 年
欧洲	49	51	51
南美洲和中美洲	467	495	424
非洲	167	203	248
亚洲和大洋洲	315	281	213
总计	998	1 030	936

1.2.4 库容需求分布

欧洲:虽然西欧大部分地区对新库容的需求实际为 0,不过对整个欧洲而言,总体上仍有少量的需求,约为每年 1% 的增长率,新增库容用于水力发电,主要集中在东欧。

北美洲:虽然数据显示,直到 20 世纪 90 年代,水电发电量以及灌溉面积保持持续增长,但是在这一时期并未新建水库的事实可以认为数据受到了运行因素的影响。因此,虽然加拿大仍然有大量未开发的潜在资源,但是环境压力可能阻碍进一步的开发。

南美洲和中美洲:数据显示,在整个 80 年代和进入 90 年代时,水电发电量以及灌溉面积增长强劲。此外,估计迄今为止,只有 21% 的经济上可行的水电潜能得到了开发。因此,中短期的增长率可能不会受坝址匮乏所限。根据人口、用水量、灌溉面积和水电增长率,推测了表 1.3 所示的库容需求增长率。

表 1.3 新库容需求(南美洲和中美洲)

时期	年增长率(%)
2000~2010 年	3.0
2010~2020 年	2.0
2020~2030 年	1.0

非洲:数据显示,在整个 80 年代和进入 90 年代时,水电发电量以及灌溉面积有微弱的增长,增长率明显低于人口增长率,这一趋势仍可能继续下去,尽管需求旺盛、潜力巨大。因此,推测年增长率为 2%,如表 1.4 所示。

表 1.4 新库容需求(非洲)

时期	年增长率(%)
2000~2010 年	2.0
2010~2020 年	1.5
2020~2030 年	1.0

亚洲和大洋洲:按照人口、灌溉面积和水电的增长率,推测了表 2.14 所示的库容需求增长率。

1.2.5 在建新水库

全世界:表 2.16 和图 2.2 给出了全世界库容建设的具有历史意义的增长率。总的来说,20 世纪的总增长率为 6.5%。值得注意的是,世界大战和经济萧条都没有对增长率造成严重影响。从这个意义上讲,建设速度在 90 年代明显下滑是引人注目的,可能部分归结于资料不足。

表 2.17 列出了新增库容的分布情况。

1.2.6 库容损失率和分布情况

为了评估世界范围内库容损失率的变化情况,收集和分析了来自 31 个国家约 2 300 座坝的数据。分析结果摘要见表 2.18。

因淤积造成的年损失库容的估计值,连同 ICOLD 世界大坝登记中现有的总库容数据,被用来估计淤积问题的严重程度。分析结果见图 2.2。简言之,分析显示,到 2000 年约有 567 km^3 (占世界当前总有效库容的 10%) 因淤积而损失掉了。根据 1 325 座已登记的在建大坝的可用资料,可以看出,新水库的平均总库容约为 3.7 亿 m^3 。

1.2.7 库容损失率

某座指定水库的库容损失率取决于流域侵蚀率。在那些流域保持稳定的地区,例如北欧和北美洲,库容损失率是常数。而在那些森林遭到砍伐的地区,流域侵蚀率及库容损失率都在上升。

1.2.8 水库规模和库容损失率

最高的库容损失率发生在最小的水库,而最低的库容损失率则出现在最大的水库。在 1 105 座被研究的水库中,库容小于 12.33 亿 m^3 的有 730 座,平均库容损失率超过每年 1%。而另一个极端则是,23 座库容超过 12.33 亿 m^3 的水库,平均库容损失率是每年 0.16%。

1.2.9 新库容需求

未来需要新增库容一方面是为了满足世界人口增长所产生的增长需求,另一方面则是替换因淤积而损失的库容。表 1.5 示出了下一个 10 年所需总库容的估计值。

1.3 对冲沙影响因素的研究

有效冲沙需要考虑和满足下列因素。

1.3.1 有效冲沙所需的水力条件

在一段时期内,必须在水库内形成河流状态。在冲沙期间库水位必须保持在低水位,可能的话,水位要有轻微波动以有利于泥沙运动。要达到这一点,需满足以下条件:

(1) 旁通设施的过流能力要足以使库水位在冲沙期间维持在

表 1.5 到 2010 年所需的总库容

地区	库容(km ³)		
	2000~2010 年新库容需求	到 2000 年淤积损失的库容	所需总库容
欧洲	49	54	103
北美洲	0	112	112
南美洲	467	17	484
非洲	167	35	202
亚洲和大洋洲	315	349	664
总计	998	567	1 565

一个稳定的水位。

(2)要求冲沙流量至少是多年平均流量的 2 倍。

(3)预计冲沙的水量至少应是多年平均径流量的 10%。

1.3.2 冲沙可用水量

必须要有足够的水可用来冲走要求输移的泥沙量。涉及的条件如下：

(1)坝址处年径流量大于库容的水库适于冲沙。

(2)流量呈规律性的年周期变化和汛期确切的水库适于冲沙。比较有利的是位于季风地区的坝址,以及洪水流量来自每年春季和夏季融雪的坝址。

(3)泄放大量的水冲沙而不会显著影响一年其他时间满足需水量功能的水库适于冲沙。

1.3.3 水库泥沙输移

河流泥沙的特性和数量是确定冲沙可用水量是否足以从水库清除预期数量泥沙的重要因素。

(1)级配底沙最有助于冲沙。这种情况以底沙组成呈变化状态的砾石河流为代表。大河中这种情况多发生于河床纵坡比降为 0.001~0.002 的河段。小河对应的比降则为 0.002~0.005。

(2)仅从泥沙粒度的观点来看,细沙和粗淤泥的三角洲沉积是最容易冲动的。更粗的泥沙难以移动,容易沉积在水库上游末段。更细的泥沙则沉积在深切冲沙河槽以外的水库内(边滩),不能在冲沙过程中进行重新启动。

1.3.4 坝址特定参数

最适于冲沙的条件是水库的形状与冲沙过程中形成的深切冲沙河槽近似。狭长水库比短、宽、浅的水库更适于冲沙。

1.3.5 总结

位于上游和中游河段的水库可能最适于冲沙,原因如下:

(1)在下游河段,水库的淹没区可能是从前的洪泛平原,深切冲沙河槽的宽度通常很有限,难以延伸这些地区。

(2)冲沙河槽适用的纵坡降较小,因此输沙量有限。

(3)下游河段水库的库容可能大于多年平均径流量,因此可用水量成为冲沙的一项制约条件。

1.4 世界冲沙经验

研究全世界冲沙经验得出的结论可归结如下。

1.4.1 流域水文学和泥沙学

在规划新水库或已建水库的冲沙设施,并为分析以往的冲淤情势提供背景资料时,有必要全面了解流域的水文和泥沙情况。

1.4.2 水库库容

水文观点上的小水库,库容不足年平均入库径流 30% 的水库,进行水力冲沙更为可行。水库越小,冲沙成功的可能性越大,可能保留的库容越大。

1.4.3 泥沙可能沉积量

对于泥沙年沉积量可能超过原始库容 1%~2% 的水库,冲沙对维持长期使用的库容来说是必不可少的。即使对于使用年限可能较长的大型水库,在决定是否冲沙时也应考虑最终可能停止运

行的问题。

1.4.4 水库集水区形态

水库集水区形态对冲沙效果和保留库容影响较大。位于纵坡比降大的河谷内的狭窄、岸坡陡峭的水库最易于冲沙。蓄水淹没以前的洪泛平原的宽河谷水库,由于沉积物有固结趋势,距离冲沙河槽很远,进行冲沙可能就不那么有效。

1.4.5 设置泄水底孔

为了在水库完全消落时有效地泄水冲沙,泄水底孔的高程要足够低,还要有足够的泄流能力,能在每年实施冲沙期间控制水位消落。汛期冲沙比非汛期冲沙需要更大尺寸的泄水底孔。

1.4.6 运行限制条件

运行方面的考虑,例如需水量和电力需求量,可能使冲沙的作用不能充分发挥。不过,运行方面的考虑不应有损于重要资源的长期保护。

1.4.7 采取完全或部分消落

已经发现,水库完全消落和放空冲沙比水库部分消落要有效得多。

1.4.8 提高冲沙效果

冲沙期间水位和流量的波动有助于加速河岸坍塌和增大输沙率。此外,布置横向和纵向的引水槽对于某些水库(水文观点上的大水库,或相当大部分的沉积物集中在远离主冲沙槽的地方)也可提高冲沙效果。

1.4.9 下游影响

下游影响可能对冲沙规划和操作起限制作用。在某些情况下可能淘汰冲沙方案,而开闸泄水大致上维持了泥沙的季节性分布,则可能是一个切实可行的替代方案。

1.4.10 冲沙评估

冲沙的成功度应根据冲沙对提高水库的效益是否值得来加以

评判,而不是简单地根据冲沙是否满足计算目标(如入流量和出流量之间的长期平衡,或保留一定比例的原始库容等)来进行评估。

1.5 适于冲沙的地理区域

1.5.1 侵蚀率

侵蚀率取决于下列因素之间复杂的相互作用。

- (1)气候。包括降水和径流、温度、风速和风向。
- (2)岩土工程学。包括地质、火山活动和构造活动、土壤。
- (3)地形。包括坡度、流域方位、流域面积、排水密度。
- (4)植被。
- (5)土地利用和人类影响。

附录A4.1对这些因素进行了讨论。根据各地区地理位置,要归纳哪些地区是高侵蚀率地区,哪些地区是低侵蚀率地区并不容易。

全球平均剥蚀率的估计值为 $0.06 \sim 0.16 \text{ mm/a}$ (莫里斯和范,1997),相当于总产沙量的估计值为 $15 \times 10^9 \sim 20 \times 10^9 \text{ t/a}$ (沃林和韦布,1996)。产沙量超过1 000的地区占总土地面积的8.8%,产沙量占泥沙总量的69%。产沙量低于 $50 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 的地区约占总土地面积的一半,产沙量占泥沙总量的2.1%。附录A4.2给出了侵蚀率的实例研究。

1.5.2 泥沙输移

进行水库冲沙的前提是流域内冲刷下来的泥沙顺着河系输移并在水库沉积下来。输移过程的效率用输沙率,即从土地冲刷下来的泥沙与排入河中的比例表示(莫根和戴维森,1986)。

源于冲沟型冲刷(沟蚀)(更快和更直接地将泥沙输送到输移系统的主冲沟内)的输沙率通常高于表面侵蚀(片蚀)。

产沙量和侵蚀率之间相关性不良,难以根据流域侵蚀率来估计入库泥沙(莫里斯和范,1997)。大多数试图找出输沙率与流域