

JINSHUIKOU FANGDAOSHA
GUANJIAN JISHU YU YINGYONG

进水口防导沙 关键技术与应用

黄本胜 邱静 刘达 谭超 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

进水口防导沙 关键技术与应用

黄本胜 邱静 刘达 谭超 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书应用物模试验和三维水流数学模型,研究了无坝取水防导沙底墙螺旋流产生的机理,分析了导沙底墙周围水流、泥沙运动特性及影响导沙效果的主要因素;以荷树园电厂取水口工程和淡澳分洪河道进口为工程案例,通过动床物理模型试验分析研究了不同防导沙底墙的布置型式对螺旋流产生的范围和强度的影响及导沙效果的影响,总结了防导沙底墙组的最优布置型式;以东江下游太园泵站提高取水保证率试验研究为工程案例,提出了平原感潮河段改善取水水质的工程措施和非工程措施体系;以芦苞涌水闸典型案例提出了水位下降对无坝取水影响的分析方法及提高取水保证率的工程措施。

本书可供水利、环保、电力、航道等行业相关科研、设计及管理人員参考,也可作为有关高等院校师生研究、学习的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

进水口防导沙关键技术与应用 / 黄本胜等著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2016.6
ISBN 978-7-5170-4415-4

I. ①进… II. ①黄… III. ①进水口—防沙—研究
IV. ①TV671

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第138243号

书 名	进水口防导沙关键技术与应用
作 者	黄本胜 邱静 刘达 谭超 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京博图彩色印刷有限公司
规 格	140mm×203mm 32开本 4印张 108千字
版 次	2016年6月第1版 2016年6月第1次印刷
印 数	0001—1000册
定 价	28.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

天然河流是人类赖以生存的重要水利资源，随着工业发展以及大规模的城市化进程，在河流上修建的各种引水工程的数量不断增加，无坝引水由于投资小，而且不会破坏河流原有的河势及生态平衡，相对环保，今后将会是供水水源工程的主要方式。与此同时，如何提高进出口取水的保证率和取水质量问题因此也受到了广泛的重视。

影响取水保证率的主要因素有河流的水位变化、引水取水口的位置选择、引水取水的含沙量以及引水取水口前河床高程的变化。现阶段，引水取水口的位置的选择已经有了比较成熟的方法，引水口选址的原则是引水口所在河段应当位于河势稳定的凹岸以及水深最大、流速最大、环流最强的位置。当引水取水口选定了合理的位置后，在同一河流水位的前提下，引水的含沙量以及引水取水口前河床高程的变化，都取决于是否采取了有效的引水防沙措施和设计，如何有效地引水防沙，减小引水取水的含沙量和减轻引水取水口前的泥沙淤积，成为提高进水口取水保证率的核心问题。

因此，各种取水引水工程中泥沙问题处理的好坏，直接关系到工程的运行效益和使用寿命，对于城市供水工程来说，则直接关乎取水保证率的问题，能否高效地引水防沙是各种取水引水工程迫切需要解决的关键技术问题。

本书是课题组集体智慧的结晶，参与本书撰写的其他主要人员还有刘中峰、黄锋华、吉红香、王丽雯等。本书既有

理论研究，也有丰富的工程案例，本书旨在促进和提高工程水力学研究深度和水平，同时可为类似的进水口防导沙工程设计提供参考。

本书获得广东省水利科技创新项目《提高无坝取水保证率及引水防沙技术研究》的资助，在此致以深切的谢意。在本书的撰写过程中，众多专家、学者提出了宝贵的意见，在此也对给予我们无私帮助过的所有人表示衷心的感谢！

限于作者水平，书中难免存在一些不妥之处，敬请专家和读者批评指正。

作 者

2016 年 3 月

目 录

前言

1 概述	1
1.1 问题的提出	1
1.2 研究现状	3
2 防导沙底墙技术的机理及应用研究	11
2.1 防导沙底墙技术中螺旋流机理研究	11
2.2 防导沙底墙技术在典型工程中的应用研究	15
2.3 小结	64
3 平原感潮河段提高取水保证率研究	65
3.1 平原感潮河段取水保证率的影响因素	65
3.2 平原感潮河段取水保证率的措施	66
3.3 典型工程及非典型工程措施工程实例	66
3.4 小结	88
4 河床下切对取水保证率影响	89
4.1 河床下切对取水保证率的影响及防治措施	89
4.2 典型工程案例研究	89
4.3 小结	121

1.1 问题的提出

天然河流是人类赖以生存的重要水利资源，随着工业发展以及大规模的城市化进程，在河流上修建的各种引水工程的数量不断增加，无坝引水由于投资小，而且不会破坏河流原有的河势及生态平衡，相对环保，今后将会是供水水源工程的主要方式，与此同时，如何提高进水口的保证率和取水质量问题，所以也受到了广泛的重视。

影响进水口取水保证率的主要因素有河势、河流水位变化、泥沙淤积及水质等。现阶段引水取水口的位置的选择已经有了比较成熟的方法，无坝引水口选址的原则是引水口所在河段应当位于河势稳定的凹岸以及水深最大、流速最大、环流最强的位置。当引水取水口选定了合理的位置后，山区河流取水工程既提高引水防沙水平，也是提高无坝取水保证率的核心，而平原河流取水工程则以改善水质条件为核心。

对于山区河流，在同一河流水位的前提下，引水的含沙量以及引水取水口前河床高程的变化，都取决于是否采取了有效的引水防沙措施和设计，如何有效的引水防沙，减小引水取水的含沙量和减轻引水取口前的泥沙淤积，成为提高无坝取水保证率的核心问题。引水防沙问题解决的好坏在诸多引水工程中都显得至关重要。河流中都或多或少的携带着泥沙，直接影响引水的质量和数量，从而对灌溉、水电站、火电站以及城市供水设施等引水工程的正常运行构成威胁。如灌溉引水口前的泥沙淤积会降低引水

效率，造成大量泥沙进入渠道，使灌溉渠道淤积加重，清淤工作难度较大。黄河上的人民胜利渠由于泥沙大量淤积，造成口门和引渠淤死，甚至在开闸引水灌溉结束后，也不敢关闭闸门停水。水电站引水口出现的最常见的问题是泥沙对水轮机的磨损问题。磨损现象存在于水轮机设备的不同部位，水流流速较高时，混流式机组的固定导页和活动导页、射流泵均有磨损，磨损加重后甚至使机组顶盖受到的压力增大或空隙增大导致密封失效，甚至破坏机组正常运转。如映秀湾水电站运行 7404h 后，水轮机 2 号机组于 1976 年年初大修，该机组转轮下止漏环上段间隙因磨损增大 0.35mm；面上鱼鳞坑的方向角实测约为 40° ；叶片正面，靠下环侧宽百余毫米的母材上有鱼鳞坑，坑深约 0.2mm；靠下环及泄水边区域，鱼鳞坑深约 0.5mm；在泄水边缘上，坑深达 1 ~ 2mm。水电站引水口前的淤积不仅会降低引水效率，甚至会将口门堵死而取不到水。同时，也会引起流道系统堵塞与磨损的问题。如美国艾奥瓦州德内恩能源中心电厂引水口自 1972 年以来，泥沙问题不断，大量泥沙进入冷却系统，给正常运行和维护带来很大麻烦，与此同时，泥沙在引水口前形成淤积，闸门多次被堵塞，电厂不得不停止运行，带来很大的经济损失。

对于平原三角洲河网区，往往人口稠密，城市化程度高，河道水质恶化，近年来咸潮上溯问题也日益严重，平原感潮河段的水质问题已成为影响取水保证率的主要制约因素。而平原感潮河段属河口区，水流缓慢，河道水位变化较大，潮流界以内河段为往复流。因此，可以根据平原感潮河道的河道水流运动特性，探索性地采取因地制宜的工程和非工程措施，提高无坝引水的保证率。

取水水位对进水口取水保证率的影响也较大，随着近年来大规模人工采砂活动等因素的影响，全国各地，尤其是珠江三角洲地区相当部分的河道河床均出现了不同程度的下切。河床下切直接导致河道水位降低，进而影响河道取用水工程的取水保证率，该问题也需要定量的深入研究。

1.2 研究现状

如何提高进水口取水的保证率是个较为复杂的问题,国内外文献中针对具体工程在取水口布置、防沙措施、水质保障、水位保障等方面均有所述及,但是尚没有系统的研究,几乎是空白,而与其相近的研究也为数不多。现就国内外有关桩群以及与其相近的河道水流研究现状简述如下。

1.2.1 常见的引水防沙导沙技术及工程措施

国内外无坝引水采用的防沙导沙措施一般主要有以下几种:

(1) 拦沙坎^[1]。拦沙坎对防止底沙入渠有显著的效果,不仅可用于无坝取水,也可应用于有坝取水,一般沿取水口河岸边布置。坎的形状有梯形、矩形及向前延伸的悬臂板型,后者采用较多。为探求拦沙坎对防沙的作用,苏联学者 A. C. 在研究拦沙坎在引水角为 90° 的无坝取水口前的作用时,对不同相对坎高(坎高 P /水深 H) 下,引水比与进沙比的关系做了研究,得出在同一引水比时,相对坎高越大,则进沙比越小,防沙效果越明显;在同一相对坎高时,引水比越大,进沙比也越大;任一相对坎高都有一对应的极限引水比。此外, U. R 索克洛夫总结取水工程拦沙坎的经验后提出,对于无坝取水工程,在含沙量较小的稳定河床中,拦沙坎坎高可采用 $0.5 \sim 0.8\text{m}$;在卵石河床中,拦沙坎坎高可采用 $1.0 \sim 1.5\text{m}$;在沙质河床中,拦沙坎高 $2.0 \sim 3.0\text{m}$ 。

(2) 叠梁闸门^[1]。在进水闸修理门槽内安装一定数量的叠梁闸门(每个梁高 $0.3 \sim 0.5\text{m}$),可以防止底沙入渠。根据西北水利科学研究所试验研究,认为叠梁闸门对防止推移质入渠有显著的作用,一般不设叠梁的闸门进沙量相当于设叠梁的 $2.1 \sim 7.3$ 倍,这种防沙措施在黄河下游应用较多,尤其是河床高于闸底板时,采用叠梁闸门可以防止大量泥沙入渠。根据日本的试验,叠梁顶部增设伸出具有一定倾角的挡沙板,可以防止底层水泛起,防沙效果更为明显。板长以 $25 \sim 50\text{cm}$ 为宜,板向下倾角最好为 $8^\circ \sim 10^\circ$,并要求叠梁顶溢流深度大致保持在叠梁高度的一半

以内。

(3) 不倒式拦沙浅堰^[2]。皇甫泽华为适应河道游荡多变和河底逐年抬高的特点，设置了活动的防沙工程设施——不倒式拦沙浅堰（见图 1.1），可随河道的游荡和河底逐年抬高而迁移，无论河道如何变化，都能保证防沙设施经常处于引水口门的合适位置，以减少入渠泥沙的淤积和防止引水口门被淤死。拦沙堰可根据水位涨落变化调节高度，以保证任何情况都能引取表层水流。

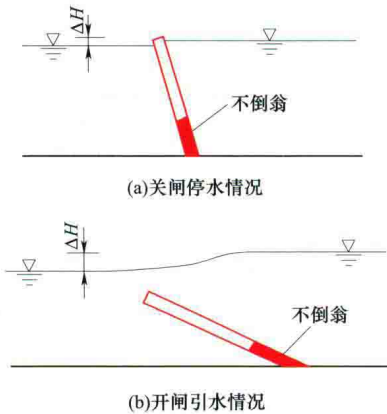


图 1.1 不倒式拦沙浅堰示意图

在工作过程中有过大的不同步倾斜，又能适应较大的变形。

关闸停水时，拦沙潜堰直立于引水口静水之中，隔断大河与引水渠之间的水流交换，防止引水渠及引水口门的淤积。在开闸引水时，由水的流速及上、下游水位差所产生的水平力的作用将拦沙潜堰推向下游倾斜置于水中，又因有浮力的作用使拦沙潜堰顶没入水面以下一定的深度，处于力的平衡状态，表层水流越堰而过，含沙大的中、底层水流被阻于大河之中顺流而下，起到拦沙作用。

这种拦沙堰有效地解决了黄河下游河道游荡多变和河底逐年抬高的问题，对减少这一类河道的入渠泥沙的淤积具有借鉴意义。

(4) 悬板分层式引水防沙工程^[3]。在众多引水工程中,悬板分层式引水枢纽采用“正面分层引水、正面排沙”的布置形式,比较符合泥沙运输规律,较好地解决了引水和防沙的矛盾。其引水防沙的工作原理是:根据河道含沙水流中泥沙在垂线上的分布特性,即含沙量沿水深递增的分布规律,特别是推移质泥沙多集中于床面的特点,挟沙水流经上游整治段到达水平悬板前缘时,被水平悬板分割成上下两层,上层清水被引入进水闸,下层含沙量较大的浑水经板下廊道输送至泄洪冲沙闸后的下游河道,从而达到“引清排浑”的目的(见图 1.2)。

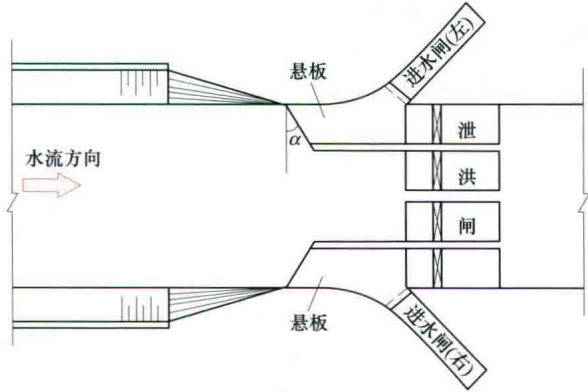


图 1.2 悬板分层式引水防沙工程示意图

悬板分层式引水枢纽较适用于河道来流量悬殊,推移质粒径大、量也大,且引水比较多的山溪性河流。自 1960 年我国在新疆区皮山县建成第一座该形式枢纽,渠首经过近 40 年的运行并改进后,证明其引水防沙效果较好,具有适应性较强、工程结构简单、经济和管理方便等特点,在新疆区的应用范围也逐渐扩大。

(5) 蜗管排沙。蜗管排沙是指在河床上或者临近河床的某一高度上利用螺旋流排除水流底部,推移质泥沙的管道或排沙通道。巴歇儿(R. L. Parshall)在 1933 年首次提出了蜗管排沙的方法。Corl Robwer 利用宽 2.44m 和 4.28m 两种渠道,蜗管内

径分别为 10.16cm 和 15.24cm，在各种不同涡管轴线与渠道水流方向交角的条件下，对涡管的排沙特性进行了研究，研究发现，渠中水深略小于临界水深时排沙效果最佳；涡管截面以带开口的近似圆形的涡管效果较好；涡管开口上下缘齐平时截沙率较高；涡管与水流方向夹角对排沙率影响不大；当弗劳德数从 0.4 变到 1.3 时，排沙率变化很小，耗水率则由 3.84% 变到 13.0%；当弗劳德数大 1.3 时，涡管的泥沙又大量被重新抛回渠道。Mustag Ahmad 针对实际工程进行了研究后建议，渠中水流弗劳德数应取 0.8；涡管内径应等于弗劳德数为 0.8 时相应的渠中水深；开口上下缘高程应相等，开口应为圆周的 1/6；强输沙率时，应采用多根涡管^[4]。Robinson 根据理论分析和实验结果认为，影响耗水率的因素复杂，耗水率通常为 5% 到 10%；涡管长度与开口宽度之比不应超过 20；涡管与水流方向的夹角应为 45°左右^[5]。在我国对涡管也进行了一些研究和应用。张开泉从能量角度初步分析了螺旋流排沙的机理，提出了螺旋流的流速结构模式^[6]。王庆祥对涡管排沙进行了实验，认为涡管不适用于陡坡急流或过缓的水流，近底流速需大于 0.4m/s，且弗劳德数应为 0.7~0.9 才会产生较好的排沙效果；涡管与渠中水流的夹角应在 30°~50°之间，最好为 45°；涡管本身坡度应等于或略小于渠道坡度^[7]。樊崇良、白晓峰等在水槽实验和理论分析的基础上，得到了涡管排沙的计算公式，即耗水率 W 、开口宽度 b 及排沙率 E 的表达式，涡管排沙节约用水，用 10% 以下的耗水量，能排除 80% 的推移质来沙^[9]。王庆祥等^[9-11]进行了水槽试验，测定了当涡管布置于河床床面之下时，涡管内的切向及纵向流速分布，认为绕轴旋转的线速度与入坎处的坎顶流速成正比，与所在位置的半径成反比，其最大值靠近空腔外边界（当存在空腔时）或出现在 0.55 倍管径的地方（当无空腔时）。

（6）排沙漏斗。排沙漏斗的研究起始于沙拉克霍夫发明的“环流室”，它的基本原理是，含沙水流经进水渠道进入环流室^[12]，清水从室周边溢出，再由侧槽汇集进入引水渠道，而泥

沙则由室内产生的旋转水流带向漏斗中心的冲沙底孔,继而由底孔附近空气漏斗形成的冲沙水流带入底孔排走。周著等人在分析与研究了沙拉克霍夫发明的“环流室”基础上,适用流量和结构体型方面均有了突破,并于1991年初步完成了用于排除推移质泥沙的强螺旋流排沙漏斗的研究^[13],在此基础上,借鉴了国外有关涡流排除悬移质泥沙的研究资料^[14],提出了水平调流板与漏斗相结合的结构形式,用于排除来流中的推移质及悬移质泥沙^[15],之后又提出导流墩、水平调流板及漏斗相结合的形式^[16]。唐毅等通过数值模拟和模型试验^[17],研究了排沙漏斗三维涡流的清水流场的水流结构,得出了排沙漏斗内区的流速分布规律。

以上几种防沙排沙措施的应用均有一定的适用性和局限性,这些措施主要适合于河道中水流流速相对较大,水力坡降较大的河段,从河流的泥沙特性方面来讲,主要适用于推移质占较大比重、泥沙粒径较大的山区等河流,在这样的河流能够起到较好的防沙和排沙效果。因此,这些防沙排沙设计应用最多的就是在黄河上的引水取水工程。广东省如东江等河流属于平原河流,具有流速较小,水力坡降较小的特征,同时,推移质的比重比黄河都小很多,泥沙的粒径也相对较小,引水取水工程取水口前的泥沙淤积往往由悬移质等沉降造成,上述几种防沙手段在这样特征的河流上的防沙效果不显著。因此,如何采用有效的防沙导沙措施就显得尤为关键。

1.2.2 防导沙底墙技术及类似相关技术研究现状

(1) 导沙屏。波达波夫^[18]最早通过对影响环流因素的简略假定,推导出了关于人工环流特性的一些理论公式,得出了环流的平均线性流速、环流运动速度的分量关系、环流的动能强度以及环流的衰减特性,在理论分析及试验的基础上,提出了波达波夫导流装置。导流装置由若干导流屏组成,与水流斜交,可导引水流改变流向,与纵向水流配合,在较大范围内产生螺旋流。布置在引水口前的导流装置,可使表面水流导向引水口,而将底流

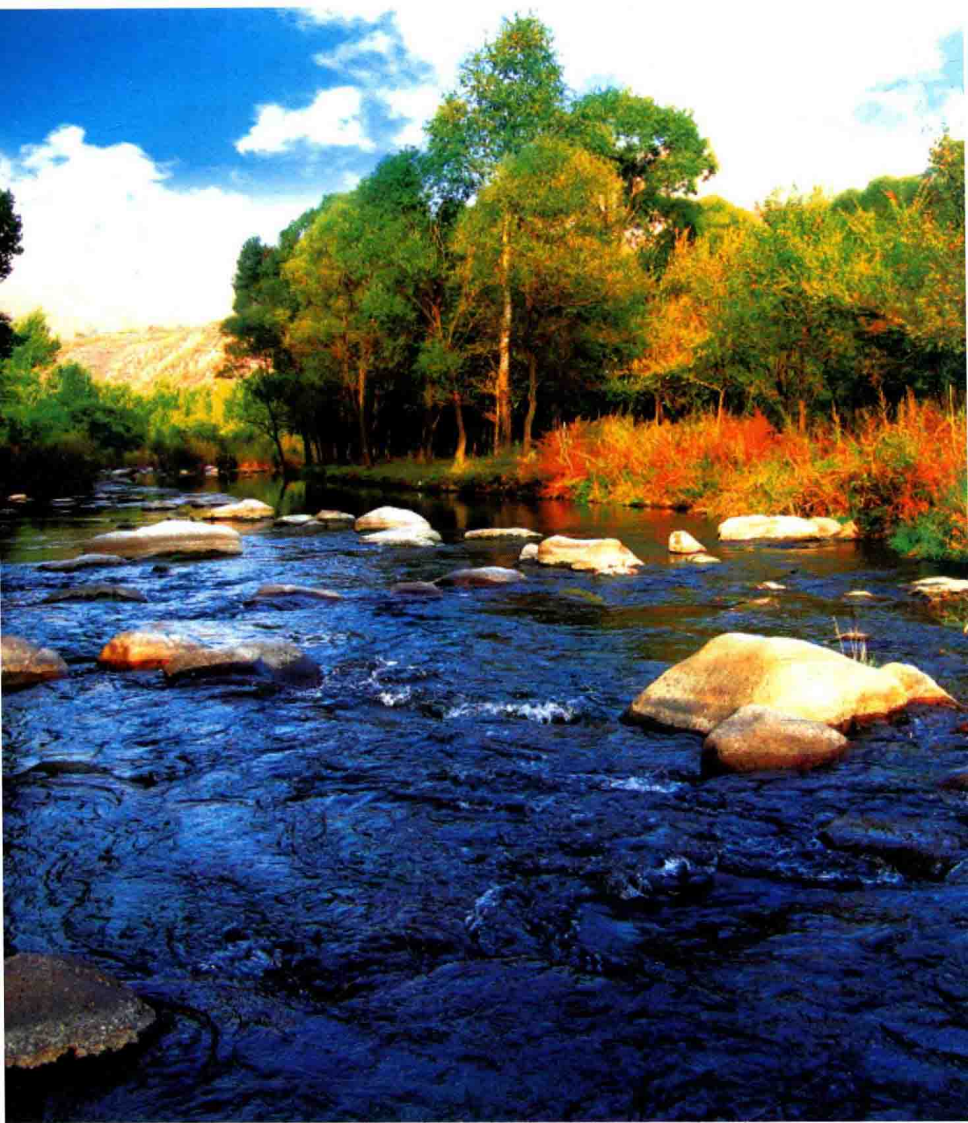
导离引水口，减少入渠泥沙。奥加德（A. J. Odgaard）等^[19-22]提出导流屏迎水流方向的交角应为 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$ ，导流屏的高度应为水深的 $20\% \sim 40\%$ 。美国艾奥瓦州德内恩能源中心电厂引水口自 1972 年以来，泥沙问题不断，大量泥沙进入冷却系统，给正常运行和维护带来很大麻烦，与此同时，泥沙在引水口前形成淤积，闸门多次被堵塞，电厂不得不停止运行，为解决泥沙问题在引水口前设置了 9 个导流屏，安装导流屏后引水口附近的河床高程降低约 0.6m，防沙效果十分明显^[22]。

（2）导沙坎。张德茹、梁志勇^[23]等根据水槽试验的结果，阐述了导沙坎防沙的原理，导沙坎附近水流及泥沙运动规律，分析了影响导沙坎导沙效果的主要影响因素：流速、导沙坎高度以及导沙坎与水流的夹角，从推移质泥沙运动的机理出发，进行理论分析推导，得到导沙坎相对高度与相对水流强度的关系式，并利用实际工程及模型试验的有关资料进行了回归分析，确定出了关系式的系数和指数。

（3）防导沙底墙。防导沙底墙技术广东省水利水电科学研究院在进行引水防沙工程的试验中研究出的一种较为有效无坝引水防沙技术。防导沙底墙的单体实际上是一座潜坝，通过多个坝体的有序排列组合形成底墙，可以较好地改变推移质输沙带的运动方向，其原理是通过将导流墙设置与水流斜交，导引水流改变流向，与纵向水流配合，在较大范围内产生螺旋流，使表面水流导向引水口，而将底流导离引水口，从而改变底沙的运动方向，实现引水防沙的目的。广东省水利水电科学研究院最先于 1994 年在淡澳分洪工程引水防沙研究^[24]，并成功应用防导沙底墙技术，经多年实践检验，效果较好，继而 2004 年又在荷树园电厂等工程^[25]中得到成功运用，取得了良好的引水防沙效果，但目前为止还没有对该项技术进行过基础性质的深入系统研究。

因此，从机理层面入手，考虑各种因素如河势、泥沙特性、引水口前流场特征、引水流量比等不同的情况下，防导沙底墙布

置型式等对无坝引水防沙的影响，采用物理模型与数学模型相结合的方法，深入对防导沙底墙技术做应用基础研究将具有较为重要的理论价值和实际意义，研究的成果将对今后无坝取水引水工程的设计提供可靠的指导，是提高无坝取水保证率的重要技术保障，必将产生较大的经济和社会效益。



2 防导沙底墙技术的机理及应用研究

2.1 防导沙底墙技术中螺旋流机理研究

2.1.1 导沙底墙导沙原理

导沙底墙是一种航道整治中较为常用的导沙工程措施，对单个个体而言，其实际上是一座潜坝，通过多个坝体的有序排列组合形成底墙，可以较好地改变推移质输沙带的运动方向。其原理与波达波夫导流墙类似，都是通过将导流墙设置与水流斜交，导引水流改变流向，与纵向水流配合，在较大范围内产生螺旋流，使表面水流导向引水口，而将底流导离引水口，从而改变底沙的运动方向，实现引水防沙的目的，导沙底墙产生的螺旋流示意图 2.1。

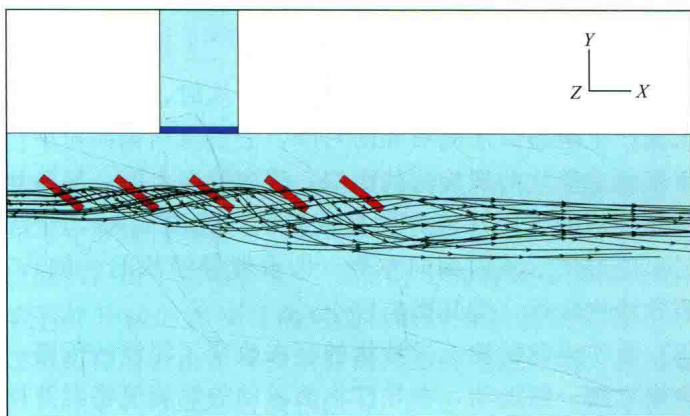


图 2.1 导沙底墙产生的螺旋流示意图