DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20241767

南水北调工程东赵河全断面拦藻装置设计与应用

彭 辉[1],黄金彪[1],常志兵[2],何建刚[2],耿 磊[1],梁建奎[2],胡剑杰[3],张智勇[4],高大伟[1]

(1. 中国南水北调集团生态环保有限公司,北京 100036; 2. 中国南水北调集团中线有限公司,北京 100038; 3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司,湖北 武汉 430014; 4. 黄河机械有限责任公司,河南 郑州 450007)

摘要:近年来,着生藻类异常增殖问题对南水北调中线工程的供水安全、水质安全及工程安全带来威胁,成为亟待解决的关键技术问题之一。针对中线工程悬浮于水体中的着生藻类,基于物理拦截方法,综合考虑水体流动特性、拦藻效果、调水影响、安全性及操作维护便捷性等设计因素,设计开发一款集藻类拦截、打捞、处理、转运等功能于一体的应急处置装备,并布置于东赵河渠道倒虹吸进口检修闸处。装置具有环境友好、操作简便、实施周期短等优点,为南水北调工程中线工程着生藻类异常增殖问题处置提供了技术支撑,对于水资源的有效利用及工程安全具有重要意义。

关键词:南水北调工程;藻类异常增殖;物理拦截方法;全断面拦藻装置

中图分类号:TV68;S972.69^{+}3 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)07-0142-06

1 引言

南水北调中线工程对解决华北地区水资源短缺、推动经济社会发展及维护生态环境至关重要。南水北调中线干线工程通水后,输水总干渠作为全新的渠道生态系统,尚未达到平衡稳定状态。着生藻类大规模异常增殖爆发对中线总干渠的供水安全、水质安全和工程安全等“三个安全”产生不同程度影响,成为亟待解决的关键技术问题之一。目前,针对人工渠道着生藻类的应急防控主要包括生物、生态、化学和物理措施等[1],但尚缺乏可借鉴的较为成熟完备的综合防控方法。与生物调控方法和化学调控方法相比,物理拦截方法具有环境友好、操作简便、实施周期短等优点,适用于中线工程着生藻类大规模异常增殖的应急防控。本文旨在探讨着生藻类大规模异常增殖的物理拦截方法,设计并开发一套全断面拦藻装置。在分析各种设计因素基础上,重点探讨全断面拦藻装置的工作原理、主要部件的设计要点及计算分析,通过东赵河全断面拦藻装置的实际应用案例分析,评价其在南水北调工程着生藻类大规模异常增殖工况应急处置中的应用效果,并探讨进一步优化的可能性。研究结果可为南水北调工程中线工程着生藻类大规模异常增殖应急处置提供技术支持,为水资源有效利用及中线总干渠的供水安全、水质安全和工程安全提供有益保障。

2 全断面拦藻装置设计因素

全断面拦藻装置设计需综合考虑水体流动特性、拦藻效果、调水影响、安全性及操作维护便捷性等因素,以制定出安全、有效的物理拦藻装置设计方案。

2.1 水体流动特性

水体流动特性对全断面拦藻装置设计具有重要影响。其影响因素主要包括水体中藻类的分布情况、水体流速和流态等。

分析水体中藻类的分布情况,确定拦藻装置的布置位置和密度,以最大程度覆盖水体的藻类分布区域。高流速的水体可能会导致藻类难以聚集和固定。对于流速较慢的水体,藻类容易聚集和生长,需设计更密集的拦藻装置以覆盖整个水体的流动区域。不同的流态会对藻类在水体中的分布和扩散产生不同影响。对于湍流较大的水体,藻类往往分布更为分散,需设计具有较大覆盖面积和高效拦藻能力的装置。

收稿日期:2024-09-17,**修回日期**:2024-10-09

作者简介:彭辉(1977-),男,硕士、高级工程师,研究方向为水利工程及生态环境,E-mail:531610@qq.com

通讯作者:黄金彪(1973-),男,博士、正高级工程师,研究方向为水利工程及生态环境,E-mail:nxhuangjinbiao@163.com

中国知网 https://www.cnki.net

2.2　拦藻效果评估

拦藻效果评估是全断面拦藻装置设计中至关重要的一环。其影响因素包括拦藻装置的设计方案、装置布置位置以及布置间距等因素。

不同形状和尺寸的拦藻装置对藻类的拦截效果有差异。需通过试验和模拟分析确定最佳设计方案。合理选择布置位置,能最大程度覆盖水体中的藻类分布区域,提高拦藻效果。对于水流缓慢的区域,需将拦藻装置布置在藻类聚集的区域;对于水流较快的区域,需综合考虑装置布置的稳固性。另外,合适的布置间距能够确保装置覆盖水体中的藻类分布区域,提高拦藻效果。

2.3　调水影响评估

全断面拦藻装置的设置会在水体中形成一定阻碍,使水流通过时产生一定阻力。当水体流速较大时,拦藻装置会增加水流阻力,导致水流速度减缓,从而在装置上游形成水位壅高现象。

另外,拦藻装置的设置会改变水流的流动方式和流速分布,引起水流在装置附近产生涡流和湍流,这些涡流和湍流会导致水位局部变化,使水位在装置附近出现壅高情况。

在设计和设置拦藻装置时,需综合考虑水位调节需求及装置影响范围,通过调整装置的布置方式、优化结构设计及自动调节功能等方式来降低其对水位的影响。

2.4　安全性评估

安全性考虑是机械拦藻装置设计中至关重要的。主要包括稳固性设计、应急提升功能、材料选择和安全标准遵守等方面。

(1)稳固性设计。装置设计时,采用合适的固定方式和结构设计,确保装置能够稳固地固定在水体中,不会因水流冲击力造成装置的移动或破坏。

(2)应急提升功能。当水流条件突变、水位急剧上升或其他紧急情况发生时,通过应急提升装置,将拦藻装置迅速提升至安全高度,避免装置及水工结构受损。

(3)材料选择。材料选择应符合相关的安全标准和规定,选择耐腐蚀、耐磨损、抗风化的材料,确保其在水体环境下使用安全可靠。

(4)安全标准遵守。遵守水工机械相关的安全标准和规定,从防护设计、操作安全和维护安全等方面考虑,确保机械拦藻装置在设计、安装和使用过程中能够保障人员的安全,并最大程度地降低安全风险,确保水域运行的安全性和可靠性[2]。

2.5　操作与维护便捷性

操作与维护便捷性直接影响全断面拦藻装置的使用和维护效率,需在结构设计、材料选择、操作管理和技术创新等方面进行综合考虑。

装置的结构设计应考虑到方便拆卸、清洗和维护,通过合理设计连接方式和固定装置,以简化结构、减少零部件数量和降低维护难度。选择耐腐蚀、耐磨损、易清洁的材料制作装置,减少维护成本和频率。设计远程监控和自动化控制系统,实现装置的远程监控和自动化操作,减少人工干预,提高操作效率,提高装置的稳定性和持续运行能力。

3　全断面拦藻装置总体方案设计

全断面拦藻装置总体方案设计需综合考虑各种重要设计因素,通过科学合理的设计,在减少调水影响的情况下,实现装置的最佳拦藻效果、稳定和安全运行。

3.1　全断面拦藻装置工作原理

全断面拦藻装置工作原理见图 1,成套装置具有藻类拦捞、藻网分离、藻水分离和自动调节及应急提升等功能:①藻类拦捞功能。拦藻旋网入水,使藻类附着在旋网表面,链轮驱动旋网回转,带动附着的藻类运转至机头预处理位置。②藻网分离功能。附着的藻类运转至预处理位置后,机头冲淋装置采用高压水反冲洗将藻类和水冲至输送装置内。③藻水分离功能。藻类和水经输送装置输送至振动分离机内进行藻水分离,水流回到渠道,藻类回收至收集桶内。④自动调节及应急提升功能。根据拦截藻类情况不同,提升机构能够驱动螺杆旋转将旋网提升。当旋网造成的水阻严重时,上下游水头差超过 0.3 m,提升机构能够迅速将旋网及框架结构提出水面,以保证设备及工程安全。

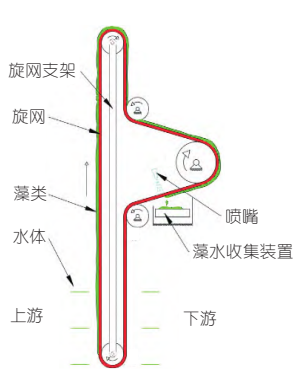


图 1　全断面拦藻装置工作原理示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the working principle of the full-sectional algae interceptor device

中国知网　https://www.cnki.net

全断面拦藻装置主要工艺流程见图 2。

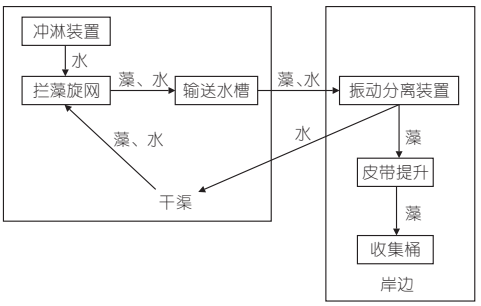


图 2 主要工艺流程图

Fig. 2 Main process flow diagram

全断面拦藻装置工艺流程主要由拦捞、藻网分离、藻水输送、藻水分离和藻渣收集等 5 个步骤组成，各步骤有序连接、连续循环。另外，全断面拦藻装置配备有自动调节及应急提升功能，可通过控制系统设定操作程序实现自动化运行，运行时仅需根据藻渣收集量的大小，按一定时间周期进行收集和处理。装置的运行工艺由以下 5 部分组成：①拦捞工艺。通过机头驱动机构带动旋网循环运转，藻类在水流作用下附着于旋网，实现连续拦藻。②藻网分离工艺。使用喷淋管道冲洗旋网，藻类脱离网面后进入集水槽，形成藻水混合物。③藻水输送工艺。藻水混合物通过不锈钢集水槽流入藻水分离设备。④藻水分离工艺。振动筛板分离藻水混合物，水回流至渠道，分离出的湿藻满足处理要求。⑤藻渣收集工艺。皮带提升机输送湿藻至收集桶内，完成藻类处理。

3.2 总体方案设计

全断面拦藻装置由拦藻旋网、旋网框架、机头装置、藻网分离、藻水分离、自动调节与应急提升系统等系统部件组成，其总体布置方案见图 3。

3.2.1 拦藻旋网

旋网是拦藻设备将藻类打捞上来的关键部件。它采用两侧链条和链节滚子处加装支轴的结构形式，保证了旋网的整体强度。网面由不锈钢丝组成，并与支轴相互勾连。两侧链条用于传动，钢丝网用于拦截藻类。

旋网的结构形式选择影响藻类的脱落和拦捞效率。眼镜网开孔率大，易于清洗、组装和拆卸，网带运行平稳，网面平整，能承受较高的载荷和抗拉强度。因此，最终选择眼镜网的结构形式。

3.2.2 旋网框架

旋网框架安装在支撑框架门槽内，是旋网运行轨迹的主要支撑部件。同时，它也是旋网入水深度调整的运动部分。根据拦藻技术原理，在保证旋网最大限度入水的情况下，旋网框架上部的转向链轮必须高出机头框架，才能维持旋网的运行轨迹。

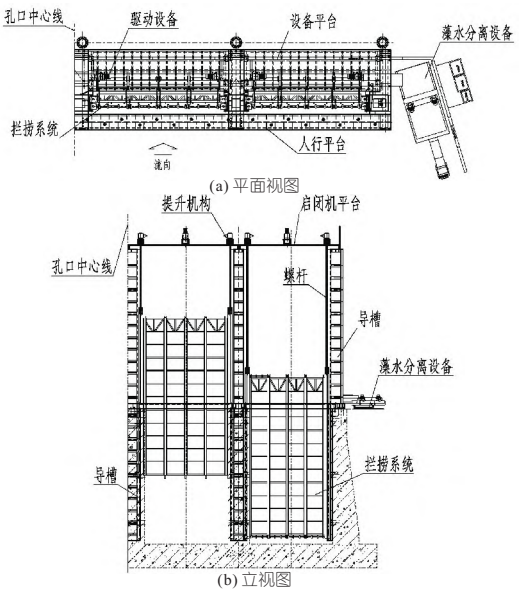


图 3 全断面拦藻装置总体布置方案

Fig. 3 The general arrangement of the full section algae interceptor scheme

旋网框架采用不锈钢材料制造。两侧边梁采用型材 350 mm×350 mm×12 mm 矩管作为边框，中间使用 140 mm×80 mm×6 mm 的矩管作为纵梁和横梁。这样设计可以将两侧边梁连接成一个整体。其结构图见图 4。

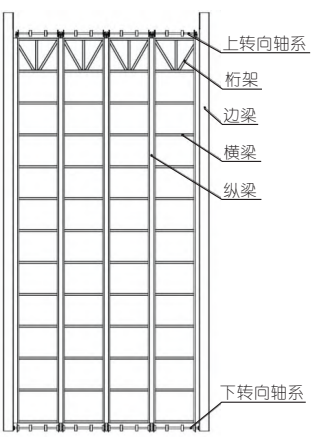


图 4 旋网框架结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the structure of the rotary mesh frame

旋网框架升降调整旋网入水深度，采用双吊点螺杆启闭机实现。吊点位置在两侧边梁顶端。在旋网框架上部设计桁架，作为旋网的主要支撑横梁，以提高框架的支撑力和结构强度。

3.2.3 机头装置

机头坐落在钢平台上，主要包括机头框架、主轴轴系、转向链轮组轴系、电机减速机等主要部件，其结构图见图 5。

机头框架是机头上安装设备和轴系的基础。

中国知网 https://www.cnki.net

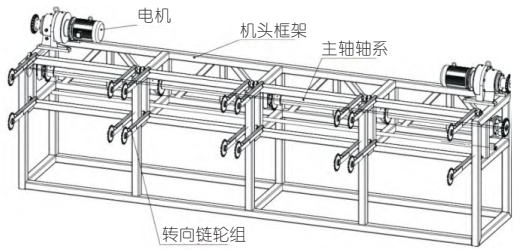


图 5　机头装置示意图

Fig. 5　Schematic diagram of the head unit

它需要具备一定的承载能力,以保证其刚度和稳定性。机头框架主体采用 100 mm×100 mm×6 mm 方管焊接,内部使用 80 mm×80 mm×5 mm 方管做成桁架结构。这种设计既节省材料,又具有较高的强度,机头框架的重量约为 1.3 t。

旋网依次环绕上转向链轮组、主轴轴系、下转向链轮组,在机头框架内部形成一个近似“>”的运行轨迹。电机、减速机对称分布固定在机头上方,可以同时驱动主轴,带动旋网运行。转向链轮组设计成可旋转的悬臂结构,将转向链轮与旋网框架上下转向机构沿竖直切线配合。当旋网运行时,转向链轮处于伸出状态,保持锁定。当支撑框架需应急提升时,先将旋网解开,再将转向链轮组解除锁定,向下旋转,以避开支撑框架上升空间。

3.2.4　藻网分离

藻网分离系统由喷淋装置、水泵组成,主要功能是将藻类从旋网脱离,其布置图见图 6。

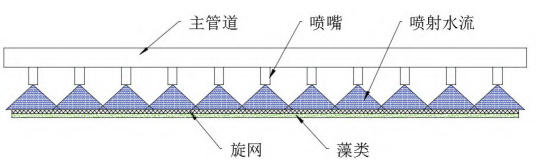


图 6　喷淋冲洗旋网示意图

Fig. 6　Schematic diagram of spray rinsing rotary screen

采用旋网背面喷淋的方式使藻类脱网。一根主管上焊接一排喷嘴,为保证喷淋覆盖区域连续,喷嘴和水泵的选择尤为重要。根据现场使用情况,需全断面冲洗,喷嘴之间有一定距离,单个喷嘴的覆盖区域要足够,以确保旋网整个断面均被冲洗到。水泵的供水能力和供水压力必须保证喷嘴能喷射出充实的水流,才能高效地将旋网冲洗干净。

3.2.5　藻水分离系统

藻水分离系统由集水池、振动分离设备、皮带提升机和收集桶组成,其布置图见图 7。

藻水分离系统以干渠中心线对称布置。在机头喷淋装置下方布设集水槽,与主轴平行,贯穿两套拦藻设备机头。水槽具有一定坡度,靠近岸边为低端,藻水混合物顺着坡度从低端流出,进入振动分离装置。振动分离装置具备分离和输送功能,将藻和水分离后,水排回渠道,藻类从出料口掉落至皮带提升机,然后由皮带提升机输送至收集桶。

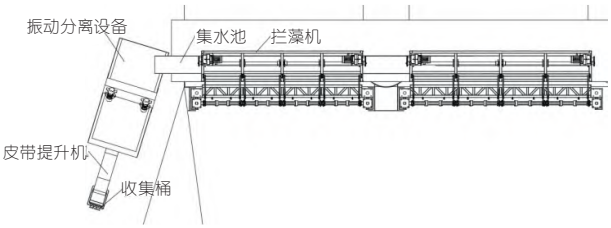


图 7　藻水分离系统布置图

Fig. 7　Arrangement of algae water separation system

3.2.6　自动调节与应急提升系统

全断面拦藻装置在孔口上方布置了两套自动调节与应急提升系统:一套是旋网水深自动调节系统,另一套是旋网支承架提升系统。其布置图见图 8。

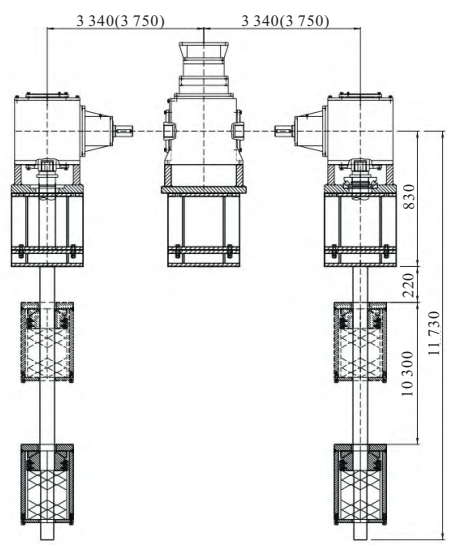


图 8　自动调节与应急提升系统布置图(单位:mm)

Fig. 8　Layout of automatic regulation and emergency lifting system

旋网水深自动调节系统的功能是,当旋网机构的回转系统卡阻或超载导致上游水位升高时,该系统会自动提升旋网出水高度,并利用螺杆的自锁性能锁定在当前位置。旋网支承架提升系统的功能是,在预防水藻时,下放旋网支承架;在水藻预防结束后,将旋网支承架提升至水面以上并锁定在孔口以上位置。水深自动调节系统与旋网支承架提升系统配置相同,均由变频电机、中间行星齿轮减速器、中间伞齿轮直角减速器、中间机架、传动轴、两端伞齿轮直角减速器、调心圆柱滚子轴承及轴承座、梯形螺杆、两端机架、调心梯形螺母、行程控制系统、上极限限位开关、电源柜、控制柜、显示系统及控制系统等组成。

中国知网　https://www.cnki.net

4 全断面拦藻装置布置及应用

根据南水北调工程现状，选定全断面拦藻装置布置于东赵河渠道倒虹吸进口检修闸处。

4.1 总体布置方案

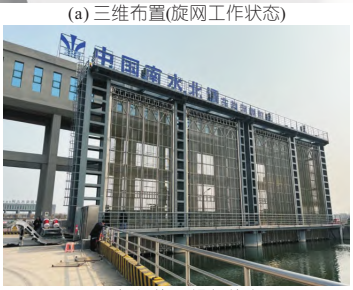
东赵河渠道倒虹吸进口共设有 4 个孔口，每个孔口配备 2 扇平面定轮式事故检修门。这些门采用台车操作，主要用于在渠道倒虹吸和出口节制闸出现紧急状况或正常维护检修时截断水流，以保障工程的安全运行。

经过比选分析，若利用现有事故检修闸门槽进行布置，会导致紧急状况下装置无法快速拆卸，进而影响事故检修门的快速闭合，从而危及工程运行安全。因此，决定采用在闸墩前沿按照简支式布置的方案。

全断面拦藻装置的三维布置图和实物图见图 9(a)、(b)，分别展示了其在工作状态、提起状态下的情况。



(a) 三维布置(旋网工作状态)



(b) 实物(旋网提起状态)

图 9 全断面拦藻装置

Fig. 9 Full-sectional algal interceptor

4.2 藻类拦捞能力评估与分析

东赵河全断面拦藻装置的主要运行工况包括水深不小于 9 m，流速不小于 1.0 m/s，对着生藻类进行拦捞作业。在设备正常运行时，上下游水头差不超过 0.3 m。规划设计拦捞能力为 235 t/d。

以单台拦藻机为例，其旋网入水深度约为 $h=10$ m，有效拦藻宽度为 $b=6$ m，运行速度为 0.12 m/s。水流流速为 1.5 m/s，均布率取 40%。拦藻机每天连续运行 20 h，藻类密度为 $\rho=1\ 004$ kg/m^3，平均拦捞厚度为 $t=3$ mm。计算单台拦藻机一天(20 h)拦捞藻类重量 $M=62\ 456.8$ kg/d。东赵河渠道倒虹吸共有 4 个孔口，总拦捞能力达到 250 t/d，满足规划的每道拦捞能力为 235 t/d 的要求。

关于拦捞能力的说明如下：①拦截深度可调节，局部全断面拦藻能力。但东赵河全断面拦藻装置仅负责最大 235 t/d 的拦捞量。当超过 235 t/d 的拦捞量时，可通过提升全断面拦藻装置，将藻类下放至下游，然后由下游处的全断面拦藻装置进行拦捞。②当水体中藻类含量较高时，全断面拦藻装置会自动提升，以减小入水深度或加快运行速率；而当水体中藻类含量较低时，全断面拦藻装置会自动下降，以增大入水深度或减缓运行速率。这样可以根据藻类爆发量进行自动调节。③当水位壅高超过允许时，即使加快运行速率仍然无法减小壅高水位时，可以使用应急提升功能，快速提升全断面拦藻装置，以降低阻水，避免风险。

4.3 装置实际影响效果分析

通过全断面拦藻装置的连续运行，设备可有效拦截水体中的大量着生藻类，特别是对刚毛藻(刚毛藻类藻种)的高效拦截。通过旋网结构的精密设计及合理布置，拦藻效率得到提升。根据现场数据显示，在藻类增殖高峰期，装置可有效减少 80%以上的藻类进入供水系统，显著降低了着生藻类对供水安全和水质的威胁。试验和现场监测表明，拦藻装置能够在不同水流条件下稳定运行，对藻类的拦截能力未受显著影响。即便在流速较高条件下，旋网框架和拦藻设备的强度和稳定性也得到保障，确保了装置对藻类的连续拦截效果。装置在运行过程中会对渠道水流产生一定阻力，但通过优化设计，调节旋网入水深度和网面形状，有效控制了水流阻力及水位变化对整体调水系统的影响。现场数据显示，装置运行期间渠道上游的水位壅高现象得到有效控制，水位上升值保持在 0.3 m 以内，未对供水能力产生重大影响。此外，装置自动调节功能可根据水流状况动态调整旋网入水深度，当水流阻力过大时，装置能够迅速提起旋网，减少阻力并保证调水的顺畅性，确保供水的连续性和安全性。

5 结论

东赵河全断面拦藻装置是为解决南水北调中线工程中出现的着生藻类大规模异常增殖问题设计。该装置集藻类拦截、打捞、处理和转运等功能于一体，采用物理拦截方法，对水体生态环境无负面影响，也不会产生二次污染。它具有环境友好、操作简便、实施周期短等优点，适用于中线工程中着生藻类大规模异常增殖后，在水体中集中悬浮

中国知网 https://www.cnki.net

或漂浮的着生藻类的拦捞应急防控。为南水北调中线总干渠的供水安全、水质安全和工程安全提供了有益保障。

参考文献:

[1] 田勇, 张爱静, 王树磊, 等. 输水工程中淡水壳菜生物污损影响及防治对策研究[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(1): 110-116.

[2] 中国南水北调集团生态环保有限公司. 南水北调中线总干渠着生藻类物理防控专用装备方案设计报告 [R]. 北京:中国南水北调集团生态环保有限公司,2022.

Design and Application of Full-Section Algae Interception Device in Dongzhao River of South-to-North Water Diversion Project

PENG Hui[1], HUANG Jin-biao[1], CHANG Zhi-bing[2], HE Jian-gang[2], GENG Lei[1], LIANG Jian-kui[2], HU Jian-jie[3], ZHANG Zhi-yong[4], GAO Da-wei[1]

(1. China South-to-North Water Diversion Group Ecological Environmental Protection Co., Ltd., Beijing 100036, China; 2. China South-to-North Water Diversion Group Middle Route Co., Ltd., Beijing 100038, China; 3. Changjiang Survey Planning Design Research Co., Ltd., Wuhan 430014, China; 4. Yellow River Machinery Co., Ltd., Zhengzhou 450007, China)

Abstract: In recent years, the abnormal algae explosion has posed a threat to the water supply security, water quality, and engineering safety of the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project, becoming one of the key technical issues that urgently need to be resolved. Based on physical interception methods and considering factors like water flow, algae interception efficiency, and operational safety, a full-section algae interception device which integrating algae interception, salvage, treatment, and transport, is designed and deployed at the inlet maintenance gate of Dongzhao River channel. The emergency device has advantages such as environmental friendliness, easy operation, and short implementation cycle, which provides crucial technical support for addressing the abnormal algae explosion issues. Thus, it is of great significance for the effective utilization of water resources and engineering safety.

Key words: South-to-North Water Diversion Project; algae explosion; physical interception; full-section algae interception device

(上接第 226 页)

[3] 乐治济, 田会元, 谢文博, 等. 风、冰荷载联合作用下的海上单桩风机结构 TMD 减振控制模拟[J]. 可再生能源, 2024, 42(2): 189-197.

[4] 中华人民共和国建设部. 混凝土结构设计规范: GB 50010-2002[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

[5] 陈齐风, 徐赵东, 郝天之, 等. 体内预应力波形钢腹板组合梁预应力导入效率研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(12): 72-79.

[6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 预应力混凝土结构设计规范: JGJ 369-2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[7] 张栋梁, 李炜, 李天昊, 等. 用于风电钢塔筒的加劲钢管压弯性能试验研究[J]. 工程力学, 2024, 41(1): 17-29.

Impact Analysis of Local Prestress Loss in Reinforced Concrete Tower Tube

LIN Zheng[1a,1b], HUANG Hao[1a,1b], HAO Ju-tao[1a,1b], HU Liang-ming[2], YANG Jia-xiang[1a,1b], LIU Yang[1a,1b]

(1a. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin; 1b. Key Laboratory of Water Engineering Materials of the Ministry of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: To investigate the impact of prestress distribution heterogeneity on structural safety, finite element numerical simulation was implemented to analyze the mechanical behavior of reinforced concrete tower shells subjected to localized prestress loss, with particular emphasis on examining the variation patterns of critical buckling loads. The research revealed that when comparing the mechanical responses of the tower tube under localized and overall prestress loss conditions, an increase in the magnitude of localized prestress loss leads to a significant rise in the degree of damage at the tower's joints and the displacement at the tower top, with a maximum increase of 45%. The eccentric bending moment induced by localized prestress loss has a more pronounced negative impact on the structure compared to the overall prestress loss condition. As the prestress loss increases from 10% to 40%, the critical load under the localized prestress loss condition is lower than that under the overall prestress loss condition, with the difference increasing from 3×10^4 N to 1.342×10^7 N. This indicates that under the same degree of prestress loss, the condition of localized prestress loss is more prone to buckling. The research results can provide theoretical guidance for engineering practices.

Key words: prestressed concrete; wind turbines; finite element method; plastic damage; nonlinear buckling

中国知网　https://www.cnki.net