

水利电力 科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology



ART AND DESIGN PRESS INC.

(626 810 4480)

119 S Atlantic Blvd, Suite 300D

Monterey Park, CA 91754

Copyright © 2025 by ART AND DESIGN PRESS INC.

Complimentary Copy



Editorial board member

Jinze Fu

State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. Tangshan Fengrun District Power
Supply Branch

Shiyuan Zhang

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Li Zhan

Jingdezhen Water Conservancy Planning and Design Institute

Yan Li

Liaoning Hongyanhe Nuclear Power Co., LTD.



水利电力科学与技术

Water Conservancy and Electric Power
Science and Technology

第3卷 第5期 2025年5月刊

主管 ART AND DESIGN PRESS INC.

主办 ART AND DESIGN PRESS INC.

编辑 《水利电力科学与技术》编辑部

ISSN(O): 2995-438X

ISSN(P): 2995-4371

地址: 119 S Atlantic Blvd, Suite 300D Monterey
Park, CA 91754

网址: <https://www.artdesignp.com>

本刊说明:

凡向本刊所投稿件, 全体作者需签署论文著作权
转让声明书和论文发表承诺书, 声明、承诺及相关事
项如下:

1. 作者将论文的复制权、发行权、网络传播权、翻
译权、汇编权、信息网络传播权、改编权等著作
权在世界范围内免费转让 给本刊。
2. 论文不侵犯他人著作权和其他权利, 否则作者将
承担由此产生的全部责任, 并赔偿由此给出版单
位造成的全部损失。
3. 论文署名作者享有该作品的完全著作权, 署名作
者的身份真实。
4. 论文未曾以任何形式公开发表过。
5. 作者所投本刊稿件, 本刊编辑部拥有修改权。

- | | | |
|-----|---|--|
| 001 | 河道生态治理与景观提升融合路径研究 | 于坚, 徐冉, 王旭, 周许, 殷海平 |
| | Research on the Integration Path of Ecological River Management and Landscape Enhancement | Yu Jian, Xu Ran, Wang Xu, Zhou Xu, Yin Haiping |
| 005 | 泵站前池水下钢格栅安装与结构稳定性保障技术 | 王晓嘉 |
| | Installation Technology and Structural Stability Assurance Techniques for Underwater Steel Gratings in the Forebay of Pump Stations | Wang Xiaojia |
| 008 | 水闸安全监测体系优化与技术规范完善研究 | 张凯 |
| | Study on Optimization of Sluice Safety Monitoring System and Improvement of Technical Specifications | Zhang Kai |
| 011 | 河湖生态环境需水量的涵义与计算方法研究 | 张思思, 付作光 |
| | Research on the definition and calculation of ecological environmental demand of water for rivers and lakes | Zhang Sisi, Fu Zuoguang |
| 014 | 建筑一体化光能利用设计与实践 | 梁水保, 刘同飞 |
| | Integrated Design and Practice of Building Energy Utilization | Liang Shuibao, Liu Tongfei |
| 017 | BIM与GIS融合技术在水利枢纽工程全生命周期管理中的实践 | 杜尚争 |
| | Practice of Integrated BIM and GIS Technology in the Full Life Cycle Management of Water Conservancy Projects | Du Shangzheng |
| 020 | 中国流域水资源优化配置与可持续利用研究 | 程妙真 |
| | Research on Optimal Allocation and Sustainable Utilization of Water Resources in Chinese River Basins | Cheng Miaozhen |
| 023 | 城市给水处理厂能耗智慧化管理技术研究 | 苏迪旻, 吴育航, 廖丝敏, 唐思炜, 刘凯喧 |
| | Research on Intelligent Energy Consumption Management Technology for Urban Water Treatment Plants | Su Dimin, Wu Yuhang, Liao Simin, Tang Siwei, Liu Kaixuan |
| 026 | GPS测量技术在水利水电工程测量中的应用 | 杨松柏 |
| | Application of GPS Surveying Technology in Surveying for Water Resources and Hydropower Engineering | Yang Songbai |
| 029 | 汽轮机振动故障智能诊断系统开发 | 王昊, 贺宁, 渠永军 |
| | Development of Intelligent Diagnosis System for Steam Turbine Vibration Fault | Wang Hao, He Ning, Qu Yongjun |
| 032 | 舟山某客货滚装公用码头工程溢油事故风险评估 | 向美焱, 聂玉娟 |
| | Risk Assessment of Oil Spill Accident at a public Passenger and Cargo Ro-Ro terminal Project in Zhoushan | Xiang Meitao, Nie Yujuan |
| 036 | 高流速泄洪洞混凝土冲刷破坏机理及UHPC修复材料的原型试验研究 | 郑芝鑫 |
| | Failure Mechanism of Concrete Washing and Grinding in High-flow Velocity Flood Discharge Tunnel and Prototype Test Study of UHPC Repair Materials | Zheng Zhixin |
| 039 | 基于3D高斯泼溅技术的航拍建模应用与展望 | 谢玉强, 许洪健 |
| | Application And Prospect Of Aerial Modeling Based On 3D Gaussian Splating Technology | Xie Yuqiang, Xu Hongjian |
| 042 | 山地风电光伏总包项目施工组织管理实践 | 赵辉 |
| | Practice of Construction Organization and Management of Mountain Wind Power and Photovoltaic General Contracting Project | Zhao Hui |
| 045 | 土壤中N、P、K的转换机理 | 马睿, 杨睿, 牟晓伟, 蓝青, 林相昊 |
| | Transforming Nitrogen Phosphorus and Potassium Mechanism in Soil | Ma Rui, Yang Rui, Mu Xiaowei, Lan Qing, Lin Xianghao |

河道生态治理与景观提升融合路径研究

于坚¹, 徐冉², 王旭³, 周许³, 殷海平⁴

1. 淮安市淮涟灌区管理所, 江苏 淮安 223001

2. 淮安市淮泗涵闸管理所, 江苏 淮安 223001

3. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223001

4. 淮安市高良涧水利工程管理站, 江苏 淮安 223001

DOI:10.61369/WCEST.2025050001

摘要 : 河道治理不仅承担防洪排涝的功能, 更关乎生态修复与人居环境品质。通过梳理生态治理与景观提升的关系, 探讨多目标协同的融合路径, 提出空间分区、技术集成与管理协同等策略。在生态层面注重水质改善与生物多样性恢复, 在景观层面强化公共审美、休闲功能与文化价值的体现。融合治理模式能够有效推动河道生态功能重建, 同时促进城市景观品质提升, 为区域可持续发展提供新思路与实践方向。

关键词 : 河道生态治理; 景观提升; 融合路径; 可持续发展; 城市生态

Research on the Integration Path of Ecological River Management and Landscape Enhancement

Yu Jian¹, Xu Ran², Wang Xu³, Zhou Xu³, Yin Haiping⁴

1. Huai'an Huanlian Irrigation District Management Office, Huai'an, Jiangsu 223001

2. Huai'an Huaisi Sluice Management Office, Huai'an, Jiangsu 223001

3. Huai'an Water Resources Survey and Design Institute Co., Ltd., Huai'an, Jiangsu 223001

4. Huai'an Gaoliangjian Water Conservancy Project Management Station, Huai'an, Jiangsu 223001

Abstract : River management not only fulfills the functions of flood control and drainage but also pertains to ecological restoration and the quality of the living environment. By examining the relationship between ecological management and landscape enhancement, this study explores integration paths for multi-objective collaboration and proposes strategies such as spatial zoning, technological integration, and management coordination. At the ecological level, emphasis is placed on water quality improvement and biodiversity restoration, while at the landscape level, the focus is on enhancing public aesthetics, recreational functions, and cultural values. The integrated management model can effectively promote the reconstruction of river ecological functions while enhancing the quality of urban landscapes, providing new insights and practical directions for regional sustainable development.

Keywords : ecological river management; landscape enhancement; integration path; sustainable development; urban ecology

引言

河道作为城市水系的重要组成部分, 既承担防洪排涝职能, 又在生态修复和景观塑造中发挥关键作用。当前部分治理模式偏重工程措施, 忽视生态恢复与景观品质, 导致河道功能片面、空间利用率不足。国际上已有将生态治理与景观设计相结合的实践经验, 而国内多以硬质整治为主, 生态与景观统筹不足。推动融合路径探索, 不仅有助于恢复水体健康与生物多样性, 还能提升城市公共空间品质, 为可持续发展提供有效支撑。

一、河道生态治理的基本内涵与实践要求

（一）河道生态治理的概念与原则

河道生态治理是指在尊重自然规律的前提下，通过科学手段修复和改善河道生态系统，使其在维持水体安全的同时，兼具生态功能和景观价值的综合性过程。与传统单一防洪排涝工程不同，生态治理不仅关注水流畅通，更强调水环境质量提升、生物多样性恢复以及人与自然的和谐互动。其核心原则体现在三个方面：一是生态优先，在治理中避免过度干预，强调保护和修复原有生态格局，使水体能够自然演替并实现自我净化；二是系统治理，把河道看作流域整体的一部分，兼顾上游来水、中游治理和下游排泄的联动关系，同时统筹水陆交互、岸坡稳定和周边土地利用，实现水环境与区域环境的整体改善；三是多目标统筹，既满足防洪安全的底线要求，又兼顾生态修复、景观美化、休闲利用和文化遗产等功能，使治理成果能够为生态保护和城市发展双重服务^[1]。

（二）常见治理模式

在河道治理实践中，逐渐形成了三种典型模式，各具适用场景。第一类是自然恢复型，主要依靠水体自净和生态演替，通过减少人为干扰、保留自然河岸、植被自然更新等方式恢复生态功能，适用于生态基础尚存、干扰程度较低的小型河道。第二类是人工干预型，在自然条件无法满足水质改善和景观需求时，采取人工措施进行修复，例如建设人工湿地、栽植水生植物、设置生态浮床和曝气装置等，以较快改善水体质量和景观效果，适合于水质污染严重或生态系统受损较重的河段。第三类是综合治理型，结合自然修复与人工干预的优点，在分区治理的基础上形成“生态—工程—景观”一体化格局。比如在主河道保持行洪能力的同时，岸坡采用生态护坡技术，周边区域引入湿地系统和景观设施，实现防洪、净化和休闲的多功能统一。

（三）存在的主要问题

尽管近年来河道治理取得了显著成效，但在实际推进过程中仍存在诸多问题。首先是过度硬化，许多城市在追求快速见效时，采用大面积混凝土护岸和直线化河道，虽然在短期内提高了行洪能力，却削弱了河道的自然滞洪和生态功能，导致水生动植物生境丧失。其次是生态功能缺失，部分工程过度强调“面子工程”，注重景观造型而忽视水体自净能力和生物多样性修复，致使治理后河道看似整洁，但生态系统脆弱，难以维持长期稳定。再次是治理碎片化，由于涉及水利、环保、园林、住建等多个部门，治理过程往往缺乏统筹规划，不同项目之间缺少衔接，导致局部治理效果较好，但整体功能难以发挥。例如，有的河段水质得到改善，但上下游污染未控；有的区域景观提升显著，却忽略防洪安全，造成治理目标之间的不协调^[2]。这些问题表明，河道治理亟需转向更加科学、生态和综合的路径，以实现可持续的系统成效。

二、景观提升在河道治理中的价值与作用

（一）景观设计与生态系统的协同

景观设计在河道治理中的作用，不仅仅是提供美学意义上的空间体验，更重要的是通过科学规划实现与生态系统的高度协同。河道作为城市重要的生态廊道，其水体环境与岸线植被共同构成一个复杂的自然系统。合理的景观设计应充分尊重河流的自然演变规律，强调“以自然为本”，避免单纯依赖人工构筑物破坏原有生态。在设计中，可以通过水生植物群落的构建与绿地系统的延伸，形成“绿色空间—水体—湿地”有机联动的生态格局，不仅能提升水体的自净功能，还能增强城市整体生态网络的连通性。例如，在河道两侧布置多层次的植被带，既能起到固岸护坡的作用，又能为鸟类和昆虫提供栖息地，实现生态价值与景观效果的双赢。同时，设计过程中强调生态基质的连续性，避免景观破碎化，以保障生态过程的顺畅运行^[3]。由此可见，景观设计与生态系统的良性互动，不仅能提升河道的环境质量，还能增强城市的生态韧性，为可持续发展奠定坚实基础。

（二）公共审美与休闲功能需求

河道景观提升在满足生态功能的同时，更重要的是回应公众对于审美和休闲的需求。随着城市化进程加快，居民对于高品质公共空间的渴望不断增强，河道逐渐成为人们亲近自然、休闲健身、文化交流的重要场所。在景观设计中，如何实现生态与人文的融合，直接影响居民的幸福感和归属感。通过营造亲水平台、步道系统、开放式绿地等设施，可以让人们近距离感受水体与自然之美，从而提升日常生活的舒适度和愉悦度。同时，景观设计应注重公共艺术与地方文化的融入，使河道空间不仅是绿色生态带，更是城市文化的承载体。例如，在河道两岸设置具有地域特色的景观小品或雕塑，不仅美化环境，还能增强市民的文化认同。对于儿童、老年人等不同群体，还需因地制宜地设置游憩区、健身区与安静休憩区，真正实现景观空间的共享性与包容性^[4]。由此可见，河道景观提升并不仅是外观改造，而是通过满足公众多层次、多样化的需求，促进人与自然、人与社会之间的和谐关系。

（三）景观价值的延展性

河道景观提升不仅改善局部环境，还具有显著的外溢效应和延展价值，能够带动旅游开发和区域经济发展。在生态环境良好的基础，富有特色的景观往往成为城市名片，吸引游客观光与消费，从而推动文旅产业的兴盛。例如，杭州西溪湿地通过河道治理与景观营造，已成为集生态保护、旅游观光与科研教育于一体的综合景区，不仅提升了城市的国际影响力，也带动了周边服务业的发展。与此同时，河道景观的提升还能促进房地产升值与商业聚集，为地方财政创造长期收益。更为重要的是，景观延展性还体现在社会效益方面，优质的河道景观能够激发居民对环境保护的自觉性，推动绿色生活方式的普及，形成良性循环。随着

“生态文明”理念深入人心，景观价值已超越单一的视觉美感，成为承载经济、社会与文化多重功能的重要平台。如图1所示。

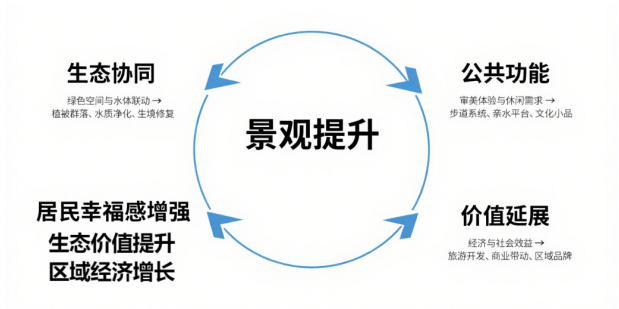


图1 河道治理中景观提升的多维价值框架图

三、生态治理与景观提升的融合路径探索

（一）空间层面：分区治理与景观布局

在空间层面上，科学合理的分区治理与景观布局是融合路径的核心。主河道治理区应以防洪排涝与水体安全为优先，保持河道通畅与断面稳定；缓冲湿地区承担水质净化与生态修复功能，可通过设置挺水、浮叶及沉水植物群落，提高氮、磷等污染物的削减率，数据显示人工湿地对总氮、总磷的去除率可分别达到 65% 和 58%；亲水景观区则以休闲游憩和生态教育为主，通过亲水步道、观景平台与开放绿地的布置，增强公众与河流的互动^[6]。据统计，在某市综合治理后的河道，市民日均进入量较治理前提升了 72%，体现了分区治理带来的生态与社会效益。

（二）技术层面：生态工法与景观技术结合

在技术层面，生态工法与景观设计的深度融合是实现多目标的关键。生态驳岸可替代传统混凝土硬化方式，利用块石、植被袋、透水结构等材料，实现护坡稳定与生境营造的双重功能。人工湿地系统能够显著改善水质，据中国城市湿地治理案例数据表明，实施人工湿地后，河道溶解氧含量平均提高 45%，水体透明度提高 60%。同时，结合雨洪管理理念，在上游及周边区域建设雨水花园、下凹绿地和调蓄池，不仅能削减洪峰流量约 30%—40%，还提升了景观多样性和观赏性。这种“工程—生态—景观”三维度结合的模式，使治理成果更具韧性和持久性^[6]。

（三）管理层面：多方协同与长期管护机制

在管理层面，多方协同与长期管护机制决定了治理成效的持续性。政府应发挥主导作用，制定政策与标准，保证治理方向的科学性与一致性；企业通过技术研发与资金投入推动治理创新；公众参与则能增强社会监督与环境责任感。据调查，在推行“公众共管”模式的河道，居民参与率达到 68%，对河道治理满意度提高到 85%。此外，建立长效管护机制同样关键，例如设立生态护管员制度，结合智能监测系统实时跟踪水质与植被状况，可降低后期维护成本约 25%，实现治理工程由“短期效益”向“长期成效”的转变。如表1所示。

表1 典型河道治理项目生态与景观成效对比

指标类别	治理前数据	治理后数据	改善幅度
水体溶解氧（mg/L）	3.5	6.2	+77%
植被覆盖率（%）	28	62	+121%
生物多样性指数	1.8	3.4	+89%
景观满意度（%）	42	81	+93%
日均人流量（人次）	350	620	+77%

从典型案例数据可见，生态治理与景观提升相辅相成，显著改善了河道的生态环境和景观品质。水体健康度提高，植被覆盖率和生物多样性显著增强，景观满意度和市民使用率同步上升，证明融合路径具备较高的推广价值。

四、案例分析与应用成效评估

（一）典型案例介绍

在国内外实践中，已有多成功案例充分展示了河道生态治理与景观提升的融合成效。国外典型案例如德国慕尼黑的伊萨尔河（Isar River）整治工程，通过拆除混凝土堤岸、恢复河道自然弯曲度和洪泛平原，结合休闲步道与自然公园建设，使河流重新焕发生机，河岸植被覆盖率提升至70%以上，成为市民休闲与生态教育的重要场所。国内典型案例则以杭州西溪湿地综合保护工程为代表，通过大规模湿地修复、水系疏通与生态廊道建设，实现“城市绿肺”的生态功能，同时打造旅游休闲景观，每年吸引游客超700万人次，直接带动周边服务业快速发展。两者对比可见，德国案例侧重自然恢复与防洪安全，国内案例则突出生态修复与经济带动，但共同体现了生态与景观一体化的显著优势^[7]。

（二）成效评估方法

河道治理效果的评估需兼顾生态指标与景观指标两个维度。在生态指标方面，水质改善是首要标准，例如监测溶解氧（DO）、氨氮（NH₃-N）、总磷（TP）等指标的变化，以评价水体自净能力与污染控制水平；同时通过生物多样性指数和特定指示物种的回归情况，反映生态系统健康度。在景观指标方面，视觉美感评价可借助问卷调查和景观感知模型，衡量居民对环境美化的认可度；公共使用率则通过日均进入人流量、游憩设施使用频率等数据进行测算。以西溪湿地为例，治理后 DO 浓度由 3.8 mg/L 提升至 6.5 mg/L，鱼类种类数增加了 42%，同时居民对景观满意度提升至 82%，日均人流量由不足 1000 人次上升至 3500 人次，显示生态与景观改善的双重成效。

（三）对未来河道治理的启示

通过上述案例与评估结果，可以得出若干对未来河道治理的重要启示。首先，应坚持自然恢复与人工干预结合的原则，根据河道具体条件因地制宜，既保持防洪安全，又增强生态韧性。其次，要建立多维度的成效评估体系，不仅考察水质、生物指标，还需结合景观价值和公众体验，避免治理流于形式。最后，需形成长效机制，通过政

策引导、资金保障与公众参与，实现从一次性工程向持续性管护的转变^[8]。唯有如此，河道治理才能在保障生态功能的同时，持续提升景观价值与社会效益，为未来城市发展构建绿色底色。

五、结语

河道生态治理与景观提升在目标与路径上高度契合，二者的融合不仅改善了水质与生态环境，也提升了城市景观品质和公共

空间价值。实践表明，因地制宜的治理模式、完善的政策支持以及广泛的公众参与，是保障长效成效的关键。未来应持续推进生态与景观一体化建设，探索多方协同的长效机制，推动城市与自然和谐共生，实现生态价值、景观价值与社会价值的统一。

参考文献

[1] 刘海侠, 朱四维. 河道生态治理方案探究 [J]. 水利技术监督, 2023, (01): 244-246+276.
[2] 夏孝叶, 王凡. 生态治理技术在城市河道中的应用 [J]. 绿色环保建材, 2020, (06): 229-230. DOI: 10.16767/j.cnki.10-1213/tu.2020.06.160.
[3] 徐兆艳. 城市河道生态治理及环境修复对策研究 [J]. 工程建设与设计, 2022, (11): 140-142. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2022.06.039.
[4] 陆占杰. 基于景观绿化植物优选的河道生态治理研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2021, 49(09): 145-147. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2021.09.045.
[5] 麻红冉. 乡村振兴视角下库伦镇河道生态治理问题及措施改善研究 [D]. 内蒙古农业大学, 2021. DOI: 10.27229/d.cnki.gnmnu.2021.000665.
[6] 张健. 城市河道生态治理和环境修复研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2020, (16): 107. DOI: 10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202016088.
[7] 才荣誉. 河道生态治理与环境修复策略研究 [J]. 清洗世界, 2023, 39(04): 121-123.
[8] 刘洪梅. 城镇河道生态治理技术研究 [J]. 黑龙江水利科技, 2019, 47(11): 118-120+206. DOI: 10.14122/j.cnki.hskj.2019.11.035.

泵站前池水下钢格栅安装与结构稳定性保障技术

王晓嘉

上海市水利工程集团有限公司，上海 201612

DOI:10.61369/WCEST.2025050002

摘 要： 本文聚焦于泵站前池水下钢格栅的安装与结构稳定性保障技术。阐述了钢格栅在泵站前池中的重要作用，介绍了安装前的各项准备工作。重点探讨了水下钢格栅的创新安装技术。同时，通过理论分析深入研究了影响钢格栅结构稳定性的因素，并提出了一系列针对性的保障措施。本文旨在为泵站前池水下钢格栅的安全、高效安装及长期稳定运行提供技术支持和参考依据。

关 键 词： 泵站前池；水下钢格栅；安装技术；结构稳定性

Installation Technology and Structural Stability Assurance Techniques for Underwater Steel Gratings in the Forebay of Pump Stations

Wang Xiaojia

Shanghai Water Conservancy Engineering Group Co., Ltd., Shanghai 201612

Abstract： This paper focuses on the installation technology and structural stability assurance techniques for underwater steel gratings in the forebay of pump stations. It elucidates the crucial role of steel gratings in the forebay of pump stations and introduces various preparatory tasks before installation. The paper primarily explores innovative installation techniques for underwater steel gratings. Meanwhile, through theoretical analysis, it delves into the factors influencing the structural stability of steel gratings and proposes a series of targeted assurance measures. This paper aims to provide technical support and a reference basis for the safe, efficient installation, and long-term stable operation of underwater steel gratings in the forebay of pump stations.

Keywords： forebay of pump stations; underwater steel gratings; installation technology; structural stability

引言

泵站作为水利工程的关键组成，承担水位调节、水流输送等核心任务，而泵闸枢纽的长期稳定运行直接关系流域防洪排涝与水资源调配效率^[1]。吴淞江工程新川沙泵闸枢纽作为长三角地区重要水利设施，已正式通水运行，但其泵站前池在实际工况中发现，水中枯枝、泥沙等杂物易随水流进入水泵机组，导致叶轮磨损、流量衰减等问题。为解决这一隐患，需在不中断通水的前提下新增水下钢格栅，而通水环境下的水下作业面临水流干扰大、能见度低、安全风险高等挑战，常规施工技术难以直接适配^[2]。因此，结合该枢纽实际工况，深入研究适配通水环境的水下钢格栅安装技术与结构稳定性保障方法，不仅能解决该工程的实际问题，更能为同类已通水泵闸枢纽的设施升级提供可借鉴的技术路径，具有重要的工程实践意义。

一、泵站前池水下钢格栅安装前准备

（一）不锈钢材质类型与检验

1. 材料检验

结合吴淞江工程新川沙泵闸枢纽前池高含沙、弱腐蚀的通水工况，钢格栅材料检验重点如下：

材质选型与验证：水下钢格栅常规材质为 Q235B 碳素钢与 304 不锈钢^[3]。本工程因枢纽重要性及长期稳定需求，主要采用 304 不锈钢，需核查材质证明，确保屈服强度 $\geq 205\text{MPa}$ 、抗拉强度 $\geq 520\text{MPa}$ ，铬 18%–20%、镍 8%–10.5%，符合 GB/T3280–

2021；局部次要区域用 Q235B 时，需满足屈服强度 $\geq 235\text{MPa}$ 、抗拉强度 375–500MPa。

外观与尺寸检验：逐片排查钢格栅，用肉眼 + 磁力探伤仪检测裂纹、变形等缺陷；游标卡尺测量网孔尺寸，偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 内，避免影响杂物拦截。

防腐质量检查：304 不锈钢需表面光洁无氧化皮、油污；Q235B 采用热浸镀锌 + 环氧富锌漆复合防腐，涂层测厚仪检测锌层 $\geq 85\mu\text{m}$ 、漆膜 $\geq 60\mu\text{m}$ ；304 不锈钢若加强防腐，需满足同等涂层厚度要求。

2. 设备调试

由于吴淞江工程新川沙泵闸枢纽已通水,新增钢格栅施工需依赖专业水下作业设备,且设备性能直接决定施工安全与质量^{[4][5]}。在施工前,必须对所有设备进行全面调试,确保其性能良好,运行安全可靠。对于潜水设备、水下焊接设备及起重设备,调试要求与前文一致,需分别检查密封性、参数匹配性及起吊稳定性。水下钻孔植筋专用设备调试:包括水下钻机、植筋胶注射枪、钢筋定位器等。调试水下钻机时,需检查其防水性能、转速调节功能;调试植筋胶注射枪时,需验证胶液混合比例及注射压力稳定性;调试钢筋定位器时,需校准其垂直度测量精度,确保植筋后钢筋轴线与设计位置偏差 $\leq 3\text{mm}$ 。

3. 施工环境勘察

详细勘察泵站前池的施工环境是确保钢格栅顺利安装的重要前提。首先,测量前池的水深、水温、水流速度等水文参数。水深测量可采用回声测深仪,准确获取不同位置的水深数据,为钢格栅的安装高度和起吊设备的选择提供依据。水流速度的测量可采用流速仪,通过测量不同深度和位置的流速,分析水流的分布情况,以便在安装过程中采取相应的措施来对抗水流的影响。对前池已浇筑的底板和侧壁墩墙进行探摸,确认有没有障碍物或者淤积,需要进行清理后再进行植筋预埋,以确保钢格栅安装后的稳定性^[6]。

二、泵站前池水下钢格栅安装技术

(一) 水下焊接工艺

针对吴淞江工程新川沙泵闸枢纽通水后水下作业的特殊性,钢格栅焊接采用局部干式水下焊接工艺。由于泵闸已通水,无法排空水体,该工艺通过在焊接区域构建临时密封舱隔绝水流,确保焊缝质量。具体操作中,密封舱选用透明聚碳酸酯材质,适配钢格栅连接节点尺寸(300mm \times 300mm),舱体与前池侧壁、钢格栅表面采用橡胶密封圈密封,通过抽水泵将舱内水抽出,保持舱内气压略高于外部水压(0.02MPa),避免通水水流渗入影响焊接。

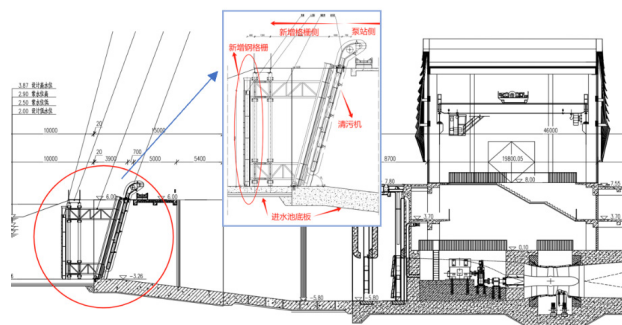


图1 新川沙泵闸枢纽水下钢格栅安装断面示意图

注:示意图展示通水环境下,潜水员在密封舱内进行焊接作业,舱体隔绝水流,水下摄像机实时监测施工质量,确保不影响泵闸正常通水。

焊接材料选用适配304不锈钢的ER308L焊丝,若局部焊接Q235B钢则选用ER50-6低合金钢焊丝,焊接前均用无水乙醇擦拭焊丝表面油污,防止水下焊接产生气孔。焊接参数根据该枢纽前池水温与水流情况调整,焊接304不锈钢时电流190-210A、电压22-23V,焊接Q235B钢时电流180-200A、电压20-22V,焊接速度均控制在80-100mm/min,采用短弧焊接方式减少弧光对水下能见度的影响。焊接完成后,待焊缝冷却至环境温度,采用水下超声波探伤仪对焊缝进行100%检测,确保焊缝无未焊透、裂纹等缺陷,其中I级焊缝合格率需达到100%,满足通水环境下钢格栅的受力要求。

(二) 精确的定位与固定方法

1. 水下钻孔植筋固定埋件的选型

水下钻孔植筋施工需搭配专用设备,核心设备及选型依据如下:

水下钻机:选用液压驱动式水下钻机,额定扭矩 $\geq 200\text{N}\cdot\text{m}$,最大钻孔直径 $\leq 50\text{mm}$,具备防水等级IP68,可适应0-30m水深作业,且配备钻渣收集装置,避免钻孔产生的混凝土碎屑污染水质或影响后续植筋质量。

植筋胶:选用水下专用环氧基植筋胶(如Sikadur30SDC),需满足GB 50367-2013《混凝土结构加固设计规范》要求,在水下环境中固化时间 ≤ 24 小时,固化后抗压强度 $\geq 80\text{MPa}$,抗拉强度 $\geq 25\text{MPa}$,且与不锈钢钢筋及混凝土的粘结强度 $\geq 3.5\text{MPa}$ 。

辅助设备:包括水下摄像监控系统、水下清孔刷、钢筋导向器。

2. 水下钻孔植筋固定埋件的施工方法

水下钻孔植筋施工需严格遵循“定位-钻孔-清孔-注胶-植筋-固化养护”的流程,具体步骤如下:

定位标记:潜水员携带全站仪辅助定位装置,在混凝土基体上标记植筋位置,确保相邻植筋间距偏差 $\leq 10\text{mm}$,植筋中心与钢格栅连接孔中心对齐偏差 $\leq 5\text{mm}$;标记完成后,通过水下摄像系统与岸上指挥台确认定位精度,无误后进入下一步。

水下钻孔:潜水员操作水下钻机,按设计孔径和深度进行钻孔;钻孔过程中,开启钻机的钻渣收集装置,同时通过水流扰动控制减少钻渣扩散;钻孔完成后,通过水下深度尺测量孔深,确保符合设计要求。

孔壁清理:采用“高压水冲洗+清孔刷擦拭”的双重清孔方式,先用0.8MPa高压水枪冲洗孔壁,再用水下清孔刷反复擦拭孔壁,直至清孔刷无明显污物。

植筋胶注射:潜水员操作植筋胶注射枪,从孔底向孔口缓慢注射植筋胶,注射量控制为孔体积的70%-80%;注射过程中,通过水下摄像系统观察胶液填充情况,若发现气泡,需暂停注射并排出气泡后继续。

钢筋植入:将预处理后的地脚锚栓插入钻孔,通过钢筋导向器确保钢筋垂直植入;植入后轻轻旋转钢筋,使植筋胶与钢筋表面充分接触;最后用水下定位仪检查钢筋垂直度和植入深度,偏差超限时及时调整。

固化养护：根据植筋胶产品说明书要求，在水下环境中进行固化养护，养护期间禁止扰动钢筋；养护完成后，采用水下拉拔仪对植筋进行现场抽检，要求单根钢筋拉拔力 \geq 设计值，合格后方可进行钢格栅与埋件的连接施工。

三、泵站前池水下钢格栅结构稳定性影响因素分析

（一）水流冲击作用

泵站前池中的水流速度和流量会随着泵站的运行工况而发生变化，水流对钢格栅产生的冲击作用是影响其结构稳定性的重要因素之一。当水流速度较大时，会在钢格栅表面产生较大的动水压力，导致钢格栅受到周期性的冲击力。长期承受这种冲击力，钢格栅的结构容易发生疲劳损伤，出现裂纹、变形等问题，从而降低其结构稳定性。此外，水流的脉动特性还可能引发钢格栅的振动，当振动频率与钢格栅的固有频率接近时，会产生共振现象，进一步加剧钢格栅的损坏程度^[7]。为了分析水流冲击对钢格栅结构稳定性的影响，可采用计算流体力学（CFD）方法，建立泵站前池的水流模型，模拟不同工况下水流对钢格栅的作用，通过分析计算结果，了解钢格栅表面的压力分布和受力情况，为结构稳定性评估提供依据。

（二）腐蚀因素

水下环境中的腐蚀性介质，如水中的溶解氧、氯离子、微生物等，会对钢格栅的钢材产生腐蚀作用，导致钢材的强度和韧性下降，从而影响钢格栅的结构稳定性。其中，氯离子对钢材的腐蚀作用尤为明显，它能够破坏钢材表面的钝化膜，使钢材发生点蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀现象。随着腐蚀的发展，钢格栅的杆件截面尺寸逐渐减小，承载能力降低，最终可能导致结构失效。

（三）结构设计缺陷

钢格栅的结构设计是否合理直接关系到其在水下环境中的结构稳定性。如果结构设计存在缺陷，如格栅的杆件布置不合理、连接节点强度不足、整体刚度不够等，在水流冲击和其他外力作用下，钢格栅容易发生变形、破坏。当格栅的杆件间距过大时，可能无法有效拦截水中的较大杂物，导致杂物对钢格栅产生较大的冲击力，进而损坏钢格栅结构；连接节点的设计强度不足，在长期受力过程中容易出现节点松动、断裂等问题，影响钢格栅的整体稳定性^[8]。因此，在钢格栅的设计阶段，应充分考虑其在水下环境中的受力特点和工作条件，采用合理的结构形式和设计参数，确保结构具有足够的强度、刚度和稳定性。

参考文献

- [1] 水泵进水池旋涡研究的主要进展 [J]. 何耘. 水力发电学报, 2004(05).
- [2] 刘建龙;李志爽;陈书宁;薛铮;王翹楚;成立. 秦淮新河泵站前池流态改善措施研究 [J]. 江苏水利, 2024(12).
- [3] 李林蔚. 钢结构施工技术在高层建筑施工中的应用研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2024, (02): 186-188.
- [4] 金鹏举. 智能化监测在水利工程施工安全管理中的应用 [J]. 智能建筑与智慧城市. 2025, (07)181-183.
- [5] 于海燕;赵可锋;张莉莉. 钢板桩支护设计浅析 [J]. 城市道桥与防洪, 2007(11).
- [6] 郑长洲;张采贤;龙玉女. 浅埋小断面隧洞开挖技术在白乃水库中的应用 [J]. 云南水力发电, 2023(02).
- [7] 司涛杰;陈东兆;于庆展. 钢格栅板与钢梁焊接对钢梁稳定性的影响 [J]. 钢结构, 2013(11).
- [8] 徐彦辉. 钢格栅吊顶施工技术 [J]. 科技情报开发与经济, 2009(03).
- [9] 李盛. 泵站工程方案设计与快速演示技术研究 [J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2024(01).
- [10] 陈平. 南沙区某河涌泵站工程设计方案的分析 [J]. 珠江水运, 2024(02).

四、泵站前池水下钢格栅结构稳定性保障措施

（一）优化结构设计

为提高泵站前池水下钢格栅的结构稳定性，在设计阶段应进行优化设计^[9]。首先，合理选择钢格栅的结构形式，根据前池的水流特性、杂物拦截要求以及安装空间等因素，选择合适的格栅类型，如平面格栅、弧形格栅等。对于水流速度较大、杂物较多的前池，可采用弧形格栅，其能够更好地适应水流方向，减少水流对格栅的冲击力。其次，优化格栅的杆件布置和截面尺寸。通过力学分析，确定在各种工况下格栅杆件的受力情况，合理布置杆件，使受力更加均匀，同时根据受力大小选择合适的杆件截面尺寸，确保杆件具有足够的承载能力。对于承受较大拉力的杆件，可适当增大其截面面积，提高其抗拉强度。

（二）加强防腐处理

针对水下环境对钢格栅的腐蚀问题，应采取有效的防腐处理措施。首先，对钢格栅进行表面预处理，去除钢材表面的油污、铁锈等杂质，提高防腐涂层的附着力。常用的表面预处理方法有喷砂除锈、酸洗除锈等^[10]。喷砂除锈能够使钢材表面形成一定的粗糙度，增加涂层与钢材之间的机械咬合力，是一种较为常用且效果较好的预处理方法。其次，选择合适的防腐涂层。目前，常用的防腐涂层有环氧富锌漆、聚氨酯漆、热浸镀锌等。环氧富锌漆具有良好的阴极保护作用，能够有效防止钢材生锈；聚氨酯漆具有优异的耐水性和耐磨性，适用于水下环境；热浸镀锌则是将钢材浸入熔融的锌液中，使钢材表面形成一层锌层，起到防腐作用，其防腐效果持久，但成本相对较高。在实际工程中，可根据具体情况选择一种或多种防腐涂层进行复合使用，以提高防腐效果。

五、结论

泵站前池水下钢格栅的安装与结构稳定性保障技术是确保泵站安全、高效运行的重要环节。通过在安装前做好充分的材料检验、设备调试和施工环境勘察等准备工作，采用先进的水下焊接工艺和精确的定位与固定方法，能够实现钢格栅的安全、准确安装。同时，深入分析水流冲击作用、腐蚀因素和结构设计缺陷等对钢格栅结构稳定性的影响，并采取优化结构设计、加强防腐处理以及建立实时监测与预警系统等针对性的保障措施，能够有效提高钢格栅在水下环境中的结构稳定性，延长其使用寿命。

水闸安全监测体系优化与技术规范完善研究

张凯

山东省菏泽市河湖流域工程管理服务 center, 山东 菏泽 274000

DOI:10.61369/WCEST.2025050003

摘 要： 水闸作为水利工程体系中的关键控制性枢纽，承担着防洪排涝、农田灌溉、水资源调配等核心功能。截至2023年，我国已建成各类水闸超10万座，其中中小型水闸占比超85%。随着服役年限增长及极端水文事件频发，病险水闸安全隐患凸显，而当前水闸安全监测工作存在设施配置不均衡、实施流程不规范、数据应用滞后、智能化程度低等问题，难以满足安全运行需求。本文基于不同类型水闸的功能特性与地质条件，构建分层适配的安全监测项目体系，提出测点优化布置方法，最终探讨技术规范完善路径与智能化发展方向，为水闸安全监测标准化、精准化提供支撑。

关 键 词： 水闸；安全监测；分层体系；测点优化

Study on Optimization of Sluice Safety Monitoring System and Improvement of Technical Specifications

Zhang Kai

Heze River and Lake Basin Engineering Management and Service Center, Heze, Shandong 274000

Abstract： As a key control hub in the water conservancy project system, sluices undertake core functions such as flood control and drainage, farmland irrigation, and water resource allocation. By 2023, more than 100,000 sluices of various types have been built in China, among which small and medium-sized sluices account for over 85%. With the increase in service life and the frequent occurrence of extreme hydrological events, the potential safety hazards of diseased and dangerous sluices have become prominent. However, the current sluice safety monitoring work has problems such as unbalanced facility configuration, non-standard implementation procedures, lagging data application, and low intelligence level, which are difficult to meet the needs of safe operation. Based on the functional characteristics and geological conditions of different types of sluices, this paper constructs a hierarchically adaptive safety monitoring project system, proposes an optimized layout method for monitoring points, and finally explores the improvement path of technical specifications and the development direction of intellectualization, so as to provide support for the standardization and precision of sluice safety monitoring.

Keywords： sluice; safety monitoring; hierarchical system; optimization of monitoring points

引言

水闸是连接江河、湖泊与灌区、城镇的重要节点，其安全运行直接关系到流域防洪安全、粮食安全与民生保障^[1]。近年来，受气候变化影响，极端降雨、台风风暴潮等事件频发，水闸承受的荷载条件日趋复杂，部分服役超30年的水闸出现地基沉降、混凝土裂缝、渗流异常等病害，对工程安全构成威胁^[2]。安全监测作为掌握水闸运行性态、预警风险隐患的核心手段，其系统性与规范性至关重要。然而，当前我国水闸安全监测工作仍存在显著短板^[3]：中小型水闸普遍缺失监测设施，仅依赖人工巡检；大中型水闸虽配置监测系统，但存在仪器选型不当、安装不规范、数据“束之高阁”等问题；智能化监测技术应用局限，难以实现实时预警。为此，本文从现状问题剖析入手，构建适配不同场景的监测体系，优化测点布置方案，并提出技术规范完善建议，为水闸安全管理提供理论与实践支撑。

一、我国水闸安全监测发展现状与核心问题

（一）监测设施配置不均衡，适配性不足

我国水闸类型多样，涵盖平原灌溉闸、河口挡潮闸、山区泄洪闸等，但监测设施配置缺乏差异化设计：

中小型水闸“空白化”：80%以上的中小型水闸（闸高<6m、孔数<5孔）未设置专业监测设施，仅通过人工观测水位，无法掌握地基沉降、渗流等关键指标。例如某平原灌溉闸，因软土地基产生不均匀沉降，导致闸室裂缝，因无监测数据，未能及时采取加固措施，最终影响灌溉功能。

大中型水闸“同质化”：部分大中型水闸忽视地质与功能差异，采用统一监测方案。如河口挡潮闸需承受双向水头作用，但沿用单向水流闸的监测断面布置，导致垂直水流向的水平位移、绕闸渗流数据缺失，无法全面评估双向挡水风险^[4]。

（二）监测实施流程不规范，数据可靠性低

监测系统从仪器选型到安装监理的全流程缺乏标准化管控，导致数据精度不足、仪器成活率低：一是30%以上的工程中，渗压计、钢筋计等仪器未按规程进行出厂标定与现场率定，直接安装埋设。某挡潮闸工程中，未标定的渗压计测量误差达15%，无法准确反映闸基扬压力变化；二是多数工程监理单位未配备专职监测工程师，对仪器安装位置、埋设工艺的管控流于形式。如某泄洪闸闸墩倾斜监测中，测斜仪钻孔垂直度偏差超3°，导致监测数据失真；三是监测设施安装与土建施工协调不足，部分测点因混凝土浇筑冲击损坏。某工程中，5个地基反力监测土压力计因浇筑振捣导致传感器移位，无法正常采集数据。

（三）数据管理与应用滞后，预警功能缺失

当前水闸监测数据多停留在“采集-存储”阶段，未形成“分析-评价-预警”闭环：一是数据整编不及时：60%以上的水闸管理单位未按规范要求进行月度、年度数据整编，监测数据仅以原始表格形式存储，未绘制扬压力分布图、沉降过程线等图表，无法直观判断运行趋势。二是分析能力薄弱：多数管理单位缺乏专业技术人员，无法开展数据趋势分析与异常识别。某水闸监测数据显示，闸基渗流量3个月内增长2倍，但因未进行渗透坡降计算与允许值对比，未能及时发现管涌隐患。三是智能化水平低：仅有15%的大中型水闸配备自动化监测系统，但系统多缺乏AI分析模块，无法实现异常数据自动预警。如某水闸出现闸墩倾斜速率超0.5mm/d的预警值时，因依赖人工巡检发现，延误了加固时机。

（四）技术标准碎片化，缺乏统一指导

目前水闸安全监测主要参考《水利水电工程安全监测技术规范》（SL 60-2021）^[5]，但该规范涵盖大坝、堤防等多种工程类型，针对水闸的专项规定较为笼统：一方面未按水闸规模、地基类型、功能需求制定差异化监测要求，导致中小型水闸因标准过高难以实施，大型水闸因标准模糊存在监测盲区。另一方面新技术纳入不足：物联网传感器、数字孪生等新技术的应用标准缺失，如无线渗压计的数据传输协议、数字孪生模型的精度要求未明确，制约了智能化监测发展。

二、水闸安全监测分层体系构建与适配性分析

基于水闸规模、地质条件、功能需求的差异，构建“基础层+增强层+智能层”的分层监测体系，实现“按需监测、精准管控”。

（一）基础层监测：保障核心安全的必选项目

基础层监测针对所有水闸，聚焦影响安全的关键指标，包括变形监测与渗流监测两类核心项目，确保掌握水闸整体稳定性。

①变形监测反映水闸结构位移与形态变化，是判断工程安全的直观依据，具体内容如下：

一是水平位移监测：平原水闸采用视准线法（观测精度±2mm），山区地形复杂水闸采用前方交会法（精度±3mm），挡潮闸等双向受力水闸需同时布置顺水流、垂直水流向监测线。每个闸段顶部设1个测点，上下游翼墙每20m设1个测点，挡潮闸需在垂直水流向翼墙增设2-3个测点，覆盖双向位移需求。

二是垂直位移监测：软土地基采用几何水准法（精度±1mm）+分层沉降仪（监测深层土沉降），砂土地基仅采用几何水准法。闸墩四角、翼墙分缝两侧各设1个标点，不均匀沉降敏感区（如地基换填段）加密至5-10m1个测点。

三是接缝变形监测：施工缝采用单向测缝计（测量开合度），运行期出现裂缝的部位采用多向测缝计（同时测量开合度与剪切错动）。闸段分缝、翼墙与闸室连接缝等部位，寒冷地区需选用低温适应性仪器（工作温度-20℃~60℃）。

②渗流监测预防管涌、流土等渗透破坏，核心监测内容如下：

在闸基扬压力监测方面：水位变幅大的水闸采用振弦式渗压计（量程0-50mH₂O，精度±0.1%FS），水位稳定的中小型水闸采用测压管（人工观测，精度±5mm）；纵向沿水流向设1-2个断面（进口、闸室段），横向设3-4个断面，覆盖最大水头断面、地质薄弱断面（如砂质粉土区），每个断面设3-5个测点，确保能绘制完整扬压力分布图。

岸墙、翼墙填土侧沿长度方向每10-15m设1个测点，黏性土岸坡用测压管，砂性土岸坡用渗压计，重点监测填土与岩基结合部位（易发生集中渗流）^[6]。计算绕闸渗流坡降，确保不超过地基允许渗透坡降（软土允许坡降≤0.15）。

（二）增强层监测：针对复杂场景的可选项目

增强层监测适用于大型水闸、地质复杂水闸（如软土地基、高填土翼墙），补充应力应变、特殊渗流指标监测，深入掌握结构受力状态。

①地基反力监测：采用土压力计（量程0-200kPa，精度±0.2%FS），布置于闸室底板下。基础处理后的水闸（如换填、灌浆）需沿顺水流向设2-3个断面，垂直水流向设1-2个断面，每个断面设3-5个测点，确保监测反力分布均匀性，最大基底应力不超过地基允许承载力的1.2倍，不均匀系数≤1.5（土基）。

②翼墙土压力监测：高填土翼墙（填土高度>5m）在翼墙与填土结合面的中下部（距底部1/3、2/3高度处）各设1个土压力计，沿翼墙长度每15m设1组，监测主动土压力变化，预防翼墙

倾覆。

③钢筋应力监测：在底板支座、闸墩牛腿等应力集中部位布置钢筋计（量程 0–300MPa，精度 $\pm 1\text{MPa}$ ），掌握钢筋受力状态，避免超筋破坏。大体积混凝土闸室（底板厚度 $> 2\text{m}$ ）布置应变计与无应力计（配套使用，扣除温度影响），监测混凝土内部应力，控制内外温差 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ ，预防温度裂缝。

④混凝土温度监测：施工期大体积混凝土设表面、中心、距表面 $1/2$ 处 3 个测点，形成温度梯度，运行期每季度监测 1 次，掌握温度对结构变形的影响。

⑤渗透坡降监测：

一是闸基渗流量监测：根据渗流量大小选用三角堰（流量 $< 10\text{L/s}$ ）或矩形堰（流量 $10\text{--}100\text{L/s}$ ），布置于闸后排水渠，定期观测水位，计算渗流量，当渗流量突增 20% 以上时需预警。

二是闸下流态监测：采用视频监控（分辨率 1080P，帧率 25fps）+ 流速仪（精度 $\pm 0.01\text{m/s}$ ），观测泄流时是否出现折冲水流、漩涡，及时调整泄流方案，预防闸后河床冲刷。

（三）智能层监测：面向智慧管理的升级项目

智能层监测适用于重要枢纽水闸（如城市防洪闸、大型挡潮闸），整合物联网、AI、数字孪生技术，实现监测数据的实时分析与智能预警。

①物联网感知系统：采用无线传感器（如 LoRa、NB-IoT）实现数据自动采集，传输频率可设为 15 分钟 / 次（运行期）、5 分钟 / 次（汛期），避免人工观测误差。

② AI 数据分析模块：构建异常识别模型，对监测数据进行趋势预测（如基于 LSTM 算法预测沉降趋势），当指标超阈值（如倾斜速率 $> 0.3\text{mm/d}$ ）时自动推送预警信息至管理人员。

③数字孪生模型：建立水闸物理实体与数字模型的实时映射，模拟不同水文工况（如百年一遇洪水）下的结构响应，为应急调度提供模拟支撑。

三、水闸安全监测测点优化布置方法

测点布置需平衡“监测全面性”与“经济性、可操作性”，遵循以下原则^[7]：

①代表性原则：测点覆盖关键部位（如闸墩、底板、翼墙）与风险区域（地质薄弱区、荷载集中区），确保数据能反映水闸

整体性态。②经济性原则：中小型水闸可简化监测项目（如仅保留基础层监测），大型水闸核心部位加密测点，非关键部位适当疏化，控制监测成本不超过工程总投资的 2%。③可操作性原则：测点避开施工干扰区（如混凝土浇筑仓、模板支撑区），便于仪器安装、维护与观测，如垂直位移测点需设置便于水准测量的观测平台。④动态调整原则：运行期若发现数据异常（如渗流量突增），可临时增补测点（如在异常区域增设渗压计），进一步定位风险源。

四、水闸安全监测技术规范完善与智能化发展

《水利水电工程安全监测技术规范》（SL 60–2021）在水闸专项监测中存在明显不足，包括分层标准缺失、技术条款笼统、智能化空白及评价指标模糊，导致适用性差、施工难执行、技术难落地且无法精准评价^[8–9]。对此，需按“规模 + 功能 + 地基”三维制定标准，细化全流程技术参数，还需新增“智能化监测”章节，明确感知设备、数据传输、AI 预警及数字孪生的技术要求。

推动水闸智能化监测，需从三方面入手：一是构建“监测 – 评价 – 预警”一体化平台，实现数据闭环管理；二是支持低成本、高可靠性监测设备的研发与成果转化；三是开展覆盖传感器安装、平台操作及数据分析的人员培训，提升智能化应用能力。

五、结论

水闸安全监测是保障工程安全运行的核心手段，当前我国水闸监测工作存在设施不均衡、实施不规范、数据应用滞后、标准不完善等问题^[10]。本文构建的“基础层 + 增强层 + 智能层”分层监测体系，可适配不同规模、功能、地质条件的水闸，结合测点优化布置原则与工程实例，验证了体系的合理性与经济性。

通过完善技术规范，构建分层分类标准、细化实施流程、纳入智能化技术，可实现水闸监测的标准化、精准化。未来，需进一步推动智能化平台建设、技术研发与人员培训，助力水闸安全监测从“人工为主”向“智能为主”转型，为水利工程现代化提供坚实支撑。

参考文献

- [1] 丁瑶. 数字孪生水闸工程业务应用探究 [J]. 农业灾害研究, 2024, 14(03): 280–282.
- [2] 潘业路. 基于智能化安全监测的水利水闸管理研究 [J]. 网络安全和信息化, 2024, (02): 80–82.
- [3] 张诗媛, 邓鹏. 基于数字孪生的水闸工程安全运行管理系统设计与实现 [J]. 水电能源科学, 2024, 42(03): 123–127.
- [4] 谈叶飞, 马福恒, 王国利. 水闸工程标准化管理难点分析与对策建议 [J]. 中国水利, 2023, (18): 49–52.
- [5] 李绍文, 王伟章, 张成, 等. 水闸安全监测体系的基本构架 [J]. 水电与新能源, 2018, 32(11): 53–56, 61.
- [6] 高明云. 临淮岗工程水闸安全监测现代化改造方案 [J]. 河南水利与南水北调, 2023, 52(7): 116–117.
- [7] 马福恒, 胡江, 叶伟. 水闸安全监测技术规范关键要素研究 [J]. 水利水电技术, 2019, 50(4): 90–94.
- [8] 马福恒, 王国利, 俞扬峰, 等. 我国大中型水闸安全监测现状与对策建议 [J]. 中国水利, 2023, (13): 36–40.
- [9] 孙莉, 吴钢. 水闸工程风险隐患常见问题分析 [J]. 治淮, 2023, (04): 54–55.
- [10] 王艳, 王新春, 赵金川, 等. 基于多种监测手段的水闸安全性分析研究 [J]. 红水河, 2022, 41(06): 17–21+43.

河湖生态环境需水量的涵义与计算方法研究

张思思, 付作光

湖北 武汉 430070

DOI:10.61369/WCEST.2025050004

摘 要 : 河湖生态环境需水量是河湖体系需要人工补充的用于消耗和置换的水量;是具有时空分布差异性与阈值特性的水量;是系统性地保障城市河湖自然生态健康并提供可持续利用的生态服务功能的水量。河湖生态环境需水量是健康评价、生态资源保护、水利工程兴建与地下水治理等综合性工程的科学标准。河流生态环境需水量分为基础生态需水量、移沙需水量、净污需水量及蒸散需水量;湖泊生态环境需水量分为基底需水量、下渗需水量、蒸散需水量、净污需水量及生物栖息需水量。需水总量应根据不同的需水等级逐项区划后累加,后针对不同的生态功能需求、重要性及管理方式进行水资源优化配置。

关 键 词 : 河湖生态环境需水量;生态服务;生态资源保护;水资源优化配置

Research on the definition and calculation of ecological environmental demand of water for rivers and lakes

Zhang Sisi, Fu Zuoguang

Wuhan, Hubei 430070

Abstract : The ecological and environmental demand of water for rivers and lakes refers to the artificial supply water for consumable and replaceable purpose. This demand can of course maintain systematically the ecological health and provide ecological services sustainably with its spatiotemporally distributed natures and thresholds. It can also be scientifically referenced by health assessment, ecological resource conservation, water conservancy construction, groundwater management and some comprehensive projects. The mentioned water demand for rivers consists of ecological baseline term, sediment transportation term, pollution purification term and evaporation term, while that for lakes is certainly composed by substrate term, infiltration term, pollution purification and evaporation term also, as well as biotic habitat term. The total volume that is finally the summation of those divisions in terms of the pre-determined requirement levels may lead to water resources optimization on the basis of the ecological demands, importance differences and management styles.

Keywords : ecological and environmental demand of water for rivers and lakes; ecological services; ecological resource conservation; water resources optimization

引言

河湖水资源是重要的自然资源,是维系城市生态健康的基础条件;而有限的水资源无法完全满足人们日益提高的生产、生活等用水需求。河湖水资源开发、利用与调配过程中,生态环境用水在一定程度上未被重视,继而引发河流断流、水体水质恶化、生态系统功能退化等问题。为保障城市河湖生态系统稳定,实行基于河湖生态环境需水量要求的水资源调配优化显得尤为必要。本文总结城市河湖生态需水量的定义与特征,归纳河湖生态环境需水量常用的计算方法,为河湖生态环境规划与治理,水资源管理与调配工作提供科学依据。

一、河湖生态环境需水量的定义与内涵

生态需水量是指在一定时间和空间范围内,维持生态系统循环,满足人类宜居环境需求的水资源总量^[1]。它取决于生态系统的

结构状态,且受到人为控制因素的影响。生态环境需水量是自然生态系统、城市水文水资源系统与社会经济系统的耦合与体现。

河湖系统为城市自然生态系统中重要的组成部分,决定城市水分结构和水分生态特征,并参与生态水文循环的全过程。河湖

作者简介:

张思思(1995.04-),女,汉族,湖北应城人,工学硕士研究生,工程师,生态水利工程;

付作光(1985.11-),男,汉族,湖北武汉人,工学博士研究生,工程师,水利水电工程。

生态环境需水量是指在一定的时空尺度之下，河湖体系需要人工补充的用于消耗或置换的水量^[2]。它不仅体现城市的生态环境状况与水文循环条件，且能与水资源管理与调配方式形成影响闭环，即河湖生态环境需水量的确定将直接影响水资源分配的方式，而合理的分配终将反馈河湖生态环境需水量的落实。

河湖生态环境需水量是一个目标导向的、动态的且具有阈值特性的水量，核心即为系统性地满足城市河湖自然生态系统自身健康，提供良好生态服务功能的基本需求。河湖生态环境需水量是协同社会经济发展需求与河湖自然保护，保障城市可持续发展的关键的科学概念，是水资源管理的重要的核心内容。它是水资源合理配置的基础参考条件；它是制定水资源规划，执行水权分配时必须优先考虑和保障的刚性需求。河湖生态环境需水量的内涵为：

(1) 河湖生态修复与保护的依据，即为河湖系统的生态修复、湿地保护、水利工程兴建与地下水治理等系统工程提供科学的供水需求标准^[3]。

(2) 评价人类活动影响河湖健康的标准，即通过对比河湖生态环境需水量要求与河湖实际水量，量化评价水资源开发利用对河湖生态系统健康的影响程度。为制定后续的增减调整提供参考依据^[4]。

(3) 实现河湖可持续发展的关键要素，即保障生态环境需水要求，实现人类与河湖自然的和谐共生，保证河湖水资源可持续利用的根本前提条件^[5]。

二、河湖生态环境需水量的基本特征

河湖生态环境需水量 (W) 具有水量 (Q)、水质 (A)、时间 (T) 与空间 (R) 的四维属性，即 $W = f(Q, A, T, R)$ ，并具备下述几种特征：

(一) 河湖生态环境需水量的时间特征

河湖生态环境需水量的时间特性表现为水资源循环系统的时变同步性，中长时域尺度下即表现为系统的进化、交替与变更；短时域尺度下即表现为系统的年度、季度甚至是昼夜变化。河湖生态环境需水量受到生态环境时间变化的直接影响，亦呈现出明显的分配差异性^[6]。如特定的调控周期内，河道既要保证具有维持河道基本水生功能的低流量，又要包含冲沙入海的洪峰流量；而湖泊既要储备满足水生生物栖息与繁殖的基础水量，又要容纳雨期高强度的调蓄及水质进化的水量。河湖生态需水因时制宜的特征终将决定其管理与调控方式的多样性与复杂性。

(二) 河湖生态环境需水量的空间特征

河湖生态环境需水量的空间特性表现为生态系统的空间差异同步性。气候气象、地理位置、水文地质条件及植物群落的层次结构等生态系统中的自然要素和城市化水平均会导致需水量的较大差别^[7]。例如干旱区域，最重要的生态用水需求即为应对气候恶劣与缺水导致的沙漠化与河湖系统脆弱的问题，保证水生生态系统的基本功能与正常循环；对于湿润和半湿润地区，生态环境需水应充分考虑城市化进程导致水文循环异化、河湖管制困难、水涝与水污染严重等城市生态问题。河湖生态需水具有明显的地域化差异，供给与调配优化目标应为改善生态环境质量，建立适应经济可持续发展的良性生态环境。

(三) 河湖生态环境需水量的社会属性及阈值特征

河湖生态环境需水量是既能反映水生生态系统的稳定性与可持

续性，又能反映水生态维系社会发展的能力的兼具生态、环境和社会属性的复杂概念。社会发展的技术与人类认知水平均会对河湖生态环境及需水产生深远的影响，如城市发展需求、水资源开发利用能力、污染物排放量、水资源工程投资与运营均为河湖生态优化及需水供应过程中重要的考虑对象。

河湖生态环境需水量具有下限阈值与上限阈值。若河湖水资源量过少，不能满足生态循环的基本要求时，河湖系统将发生紊乱，不再适合生物生存及人类利用。下限阈值旨在保障河湖生态系统功能的完备与稳定。若河湖水资源过多，超过自身可容纳范围，河湖系统将发生突变，如水体置换消减甚至停滞，水生植物根系因缺氧窒息、烂根，动物栖息地减少，城市洪涝风险增高等。上限阈值旨在降低超标水量的管控风险。综上所述，可供水资源量成为河湖系统的限制因子，当它处于阈值之间，才能更好地维持生态的供需平衡，保障生物拥有最优的生长与繁殖条件，促进人类与自然环境的合理共济。

三、河湖生态环境需水量计算方法

河湖是城市重要的水文循环途径，具备多重生态及环境功能，用水需求具备多样性与复杂性。需水量的确定应以保障河湖生态条件为基础，促进可持续发展为目的，是完整的生物生态链巩固的重要依据，应分门别类逐一区划后累加^[8]。本文给出河流及湖泊生态环境需水量的分类及计算方法如下。

(一) 河流生态环境需水量的计算

为维持形态稳定及基本生态功能正常，根据自身水力特性，河流生态环境需水量可分为基础生态需水量、移沙需水量、净污需水量及蒸散需水量四种类型，各项定义与计算方法如下：

(1) 基础生态需水量 (W_b)，又称为生态基流量，即水平年内保证生态过程正常的最小需水量^[9]。常见计算方法有 Texas 法与 Tennant 法，根据河道的径流特性，国内学者认为最小月平均径流量统计法更为合适。统计年份索引为 n ，计算公式为：

$$W_b = \frac{\left(\sum_{i=1}^n Q_i^{\min} \right) \cdot T}{n}$$

式中， Q_i^{\min} 为第 i 年内，月平均径流量的最小值 (m^3/s)； T 为时间总量 (s)。

(2) 移沙需水量 (W_s)，即确保河流水沙平衡，发挥河流输沙、排沙功能，避免河流长期淤积导致的河床抬升、水质恶化及水生生物骤减的重要需水项。移沙需水量与河道输沙量紧密相关，计算公式为：

$$W_s = \mu \left(W_q - \frac{W_f}{\gamma_s} \right)$$

式中， μ 为移沙效率系数， $\mu \in (0, 1]$ ； W_q 为径流总量 (m^3)； W_f 为移沙总量 (m^3)； γ_s 为砂体容重 (t/m^3)。

(3) 净污需水量 (W_c)，即当河流本身自净能力不足时，用以稀释河道污染物浓度，避免河流基本的生态环境功能遭到破坏的额外的需水量。净污需水量一般采用 90% 保证率最小月均流量，计算公式为：

$$W_c = P_{90\%}(Q_i^{\min}) \cdot T$$

式中, Q_i^{\min} 为第 i 年内, 月平均径流量的最小值 (m^3/s); P 为频率 (拟合) 函数; T 为时间总量 (s)。

(4) 蒸散需水量 (W_e), 根据城市水循环特性, 当累计降水量无法补偿河道水面总蒸散量时, 从河道外调给的用以维持河道生态系统的正常运转的额外水量。蒸散需水量的计算公式为:

$$W_e = \delta A(E - R) \quad (E > R)$$

上式中, A 为河道的等效水域面积 (m^2); E 为河道的水面累计蒸散量 (mm); R 为河道水面承载的总降水量 (mm); δ 为尺寸转换因子。

河流的生态环境总需水量 (W_t), 即为上述四项的累加, 计算过程中应考虑河道水流的功能性重叠效应, 如河道基流不仅可用于自净, 亦可用于排沙。故采用“最大值”原则进行求和计算, 公式为:

$$W_t = \max\{W_b, W_s, W_c\} + W_e$$

受河流特征与周边城市开发条件的影响, 不同河流的生态环境需水量组成成分有所不同, 重要性亦不相同。

(二) 湖泊生态环境需水量的计算

城市湖泊不仅具有明确的生态功能, 如水力平衡功能、水生物栖息功能、自生修复与调节功能等; 还发挥着显著的环境功能, 如城市水源功能、防洪排涝功能、净化污染功能等^[10]。为更好地反应河湖生态功能的健康状况, 维持与保障生态功能健全, 笔者认为采用功能法计算湖泊生态环境需水量更为可靠, 遂将湖泊生态环境需水量分为基底需水量、下渗需水量、蒸散需水量、净污需水量及生物栖息需水量并逐一分类计算如下:

(1) 基底需水量 (L_b), 水体满足湖泊基本功能与水生物栖息的基本需水量。国内常采用最低水位法计算基底需水量, 公式为:

$$L_b = A_b(h_b - h_{\min})$$

式中, h_b 为保证湖泊基本生态功能的对应水位 (m); h_{\min} 为湖泊底高程 (m); A_b 基本生态水位对应的蓄水面积 (m^2)。

(2) 下渗需水量 (L_k), 即当湖泊水位高于周边地下水位时, 通过湖底及岸边的渗透通道向地下水形成补给的需水量, 采用达西公式计算:

$$L_k = \left(\sum_{i=1}^n K_i I_i S_i \right) \cdot T$$

在第 i 条渗透通道中, K_i 为渗透系数 (m/s); I_i 为水力坡降; S_i 为过流截面面积 (m^2)。 n 为渗透通道总数; T 为渗透时

长 (s)。

(3) 蒸散需水量 (L_e), 即湖泊水面蒸散需水量宜采用定额法进行计算, 即水生植物蒸腾量 (单位量) 与覆盖面积之积。

(4) 净污需水量 (L_c), 即将湖泊污水浓度稀释到标准浓度所需的最大水量, 须根据国家环境保护法、水污染防治法要求及污水监测浓度计算, 公式为:

$$L_c = \max \left\{ \left(\frac{c_i^m}{c_i^s} - 1 \right) W_o \right\}_{i=1}^n$$

对于第 i 种污染物, c_i^m 为监测浓度 (kg/m^3); c_i^s 为标准浓度 (kg/m^3)。 n 为污染物种类, W_o 为湖泊蓄水总量 (m^3)。

(5) 生物栖息需水量 (L_s), 即湖泊确保生物栖息与繁殖所需要的最小水量, 为湿周范围内的最小蓄水总量扣除湖泊最小需水量, 计算公式为:

$$L_s = (A_s - A_b) h_b$$

式中, A_s 为湖泊湿周面积 (m^2)。

与河流生态环境总需水量类似, 湖泊生态环境需水总量 (L_t) 亦为上述各项的累加, 计算过程中同样应考虑湖泊水体的功能性重叠效应, 采用“最大值”原则进行求和计算, 公式为:

$$L_t = \max\{L_b, L_k, L_e\} + L_c + L_s$$

受湖泊特征与周边城市开发条件的影响, 不同湖泊的生态环境需水量组成成分有所不同, 重要性亦不相同。应根据河湖的时空分布特点制定不同的需水量等级, 针对不同的生态功能需求、重要性及管理方式进行水资源优化配置。

四、结语

综上所述, 河湖生态环境需水量是一种具有时空分布差异性与阈值特性的水量; 是系统性地满足城市河湖自然生态系统自身健康, 提供良好生态服务功能的基本需求的水量。河湖生态环境需水量具备较强的社会属性, 是河湖系统的生态资源保护、水利工程兴建与地下水治理等系统工程的科学标准; 是量化评价水资源开发利用对河湖生态系统健康的影响程度, 制定增减调整措施的重要参考依据。河湖生态环境需水具备多样性与复杂性, 应分门别类逐一区划后累加。各项需水量计算方法不尽相同但都具有功能性重叠效应, 应根据河湖时空分布特点划分不同的需水量等级, 针对不同的生态功能需求、重要性及管理方式制定水资源优化配置与调度措施。

参考文献

- [1] 许新宜, 杨志峰. 试论生态环境需水量 [J]. 中国水利, 2003 (5): 12-15.
- [2] 王俊, 孙秀玲, 曹升乐, 等. 东平湖老湖区生态环境需水量研究 [J]. 人民黄河, 2014 (11): 77-80.
- [3] 田英, 杨志峰, 刘静玲, 等. 城市生态环境需水量研究 [J]. 环境科学学报, 2003, 23 (1): 100-106.
- [4] 吴琼, 王莹, 张青. 河湖生态系统健康评价研究现状与展望 [J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(3): 131-133.
- [5] 王建华, 胡鹏. 立足系统观念的河湖生态环境复苏认知与实践框架 [J]. 中国水利, 2022 (7): 36-39, 56.
- [6] 彭莹, 李世曙, 李磊. 九龙江流域生态需水量时空变化趋势分析 [J]. 水土保持研究, 2023, 30 (1): 364-369, 378.
- [7] 南笛, 杨子寒, 毕旭, 等. 生态系统服务价值与人类活动的时空关联分析——以长江中游华阳河湖群地区为例 [J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3531-3541.
- [8] 李丽娟, 郑红星. 海滦河流域河流系统生态环境需水量计算 [J]. 地理学报, 2000, 55(4): 495-500.
- [9] 王钦建. 九龙江流域生态环境需水量计算 [J]. 环境科学与管理, 2011, 36(4): 152-155, 160.
- [10] 刘静玲, 杨志峰. 湖泊生态环境需水量计算方法研究 [J]. 自然资源学报, 2002, 17(5): 604-609.

建筑一体化光能利用设计与实践

梁水保, 刘同飞

华润电力技术研究院有限公司, 广东 深圳 518057

DOI:10.61369/WCEST.2025050005

摘 要 : 建筑一体化光能利用将太阳能技术与建筑设计深度融合, 实现能源生产与建筑功能的协同优化, 是降低建筑能耗、改善能源结构的重要路径。本文系统梳理建筑一体化光能利用的设计原理与关键技术, 从建筑选址、材料选型、系统集成三个维度分析设计要点, 结合住宅与商业建筑两类实践案例验证技术应用效果, 进而剖析当前面临的技术、成本与政策挑战, 并提出针对性对策。研究表明, 通过科学的设计方案与技术选型, 建筑一体化光能利用系统可实现年均 15%–30% 的建筑能耗替代率, 兼具环境效益与经济价值, 未来需通过技术创新、政策扶持与市场培育加速推广应用。

关 键 词 : 建筑一体化; 光能利用; 光伏建筑一体化 (BIPV); 太阳能热利用; 系统集成设计

Integrated Design and Practice of Building Energy Utilization

Liang Shuibao, Liu Tongfei

China Resources Power Technology Research Institute Co., LTD., Shenzhen, Guangdong 518057

Abstract : Integrated solar energy utilization in architecture deeply integrates solar technology with building design, achieving synergistic optimization between energy production and architectural functions. This approach serves as a crucial pathway to reduce building energy consumption and improve the energy structure. This paper systematically examines the design principles and key technologies of integrated solar energy utilization in architecture, analyzing design considerations from three dimensions: site selection, material selection, and system integration. Practical case studies of residential and commercial buildings validate the application effects of these technologies, while addressing current challenges in technology, cost, and policy. Research demonstrates that through scientific design solutions and technology selection, integrated solar energy utilization systems can achieve an average annual energy substitution rate of 15%–30%, delivering both environmental benefits and economic value. Future efforts should focus on accelerating adoption through technological innovation, policy support, and market cultivation.

Keywords : building integration; light energy utilization; building-integrated photovoltaics (BIPV); solar thermal utilization; system integration design

引言

随着全球工业化进程加快, 化石能源过度消耗引发的能源短缺与环境污染问题日益严峻。我国建筑运行阶段能耗占全社会总能耗的 21.7%, 其中供暖、照明、热水供应等需求占比超 60%, 能源结构转型需求迫切。太阳能作为清洁、可再生的新能源, 其开发利用成为建筑行业低碳转型的核心方向。建筑一体化光能利用打破传统 “建筑 + 太阳能设备” 的简单叠加模式, 将光能收集、转化与存储系统融入建筑设计全过程, 实现 “建筑即能源站” 的功能升级。一方面, 该技术可直接为建筑提供电力与热能, 降低对市政能源的依赖, 减少碳排放; 另一方面, 通过与建筑外观、结构的协同设计, 避免传统太阳能设备对建筑美学的破坏, 提升建筑整体品质。从行业发展视角看, 建筑一体化光能利用不仅是实现 “双碳” 目标的关键技术路径, 更是推动建筑行业从 “高能耗建造” 向 “低能耗运营” 转型的重要抓手, 具有显著的环境、经济与社会意义^[1-3]。

一、建筑一体化光能利用设计原理与关键技术

（一）设计基本原理

1. 光能收集与转化机制

建筑一体化光能利用的核心是实现太阳能向电能与热能的高效转化，其机制基于两种技术路径：光伏转化与光热转化。光伏转化通过半导体材料的光生伏特效应实现，当太阳光照射光伏组件时，光子激发半导体中的电子跃迁，形成电流，经逆变器转化为交流电供建筑使用或并入电网；光热转化则通过吸热材料吸收太阳辐射能，将其转化为热能加热介质（如水、空气），用于建筑供暖或热水供应。影响转化效率的关键因素包括：一是太阳辐射条件，需根据建筑所在地的太阳高度角、日照时长、辐射强度优化系统布局；二是材料性能，光伏组件的转换效率（当前主流单晶硅组件效率达 23%-25%）、光热材料的吸热率（优质真空管吸热率超 90%）直接决定转化效果；三是系统匹配性，如光伏逆变器的最大功率跟踪（MPPT）精度、光热系统的换热效率，需通过优化设计实现能量损失最小化^[4]。

2. 与建筑结构融合原则

建筑一体化光能利用需遵循“安全优先、功能协调、美学统一”三大原则。安全方面，太阳能系统的荷载（如光伏组件重量约 15-20kg/m²）需纳入建筑设计，确保满足抗风、抗震、承重要求；同时，电气系统需符合《民用建筑电气设计标准》，避免漏电、火灾等安全隐患。功能协调方面，需平衡光能利用与建筑使用需求，如光伏遮阳系统需兼顾发电与遮阳效果，避免影响室内采光；光热系统需匹配建筑热水用量，避免能源浪费。美学统一方面，太阳能组件的颜色、尺寸需与建筑外观协调，如光伏幕墙可采用透明或半透明组件，融入建筑立面设计；光伏屋顶可采用与屋面坡度一致的组件，避免破坏建筑轮廓^[5]。

（二）关键技术类型

1. 光伏建筑一体化（BIPV）技术

BIPV 技术是建筑一体化光能利用的核心，根据应用部位可分为三类：一是屋顶式 BIPV，将光伏组件替代传统屋面材料（如瓦片、彩钢板），适用于平屋顶与坡屋顶建筑，具有安装便捷、发电效率高的特点，典型案例为住宅屋顶光伏系统，年均发电量约 120-150kWh/m²；二是墙面式 BIPV，将光伏组件集成于建筑外墙（如幕墙、外墙板），适用于高层建筑，可充分利用垂直面的太阳辐射，但发电效率较屋顶低 15%-20%，需通过优化组件倾角提升效率；三是遮阳式 BIPV，将光伏组件设计为遮阳棚、遮阳百叶，兼具发电与遮阳功能，适用于夏热冬暖地区，可降低建筑空调能耗，实现“发电 + 节能”双重效益。

2. 太阳能热利用技术

太阳能热利用技术主要包括两类：一是太阳能热水系统，由集热器、储水箱、循环管道组成，根据集热器类型可分为真空管型与平板型，真空管型适用于寒冷地区，热效率高；平板型适用于温暖地区，安装灵活，可集成于建筑屋面或墙面，典型住宅项目的太阳能热水系统可满足 60%-80% 的热水需求，年均节能约 1500kWh/户；二是太阳能供暖系统，通过集热器收集热量，

经换热器加热供暖循环水，适用于北方地区，可与燃气壁挂炉、热泵系统组成复合供暖系统，降低化石能源消耗，某北方住宅项目应用该技术后，冬季供暖能耗降低 40%-50%，碳排放减少约 0.8t/m²^[6]。

二、建筑一体化光能利用设计要点

（一）建筑选址与朝向设计

建筑选址需结合太阳辐射条件与气候特征，优先选择地势开阔、无遮挡的场地，避免周边高层建筑、树木遮挡阳光。对于北半球建筑，最佳朝向为南向，可获得最大日照时长；东西向次之，但需通过优化组件倾角补偿辐射损失。不同气候区的设计策略存在差异：北方寒冷地区需强化南向光能收集，提升供暖效率；南方夏热地区需兼顾南向发电与东西向遮阳，降低空调能耗；高原地区太阳辐射强，可适当增加光伏组件面积，提升能源自给率。

（二）光伏组件与建筑材料选择

1. 光伏组件选型

光伏组件选型需综合考虑效率、成本、耐久性与外观。当前主流组件类型包括：单晶硅组件，转换效率高（23%-25%）、寿命长（25-30 年），但成本较高，适用于对效率要求高的项目；多晶硅组件，效率中等（20%-22%）、成本较低，适用于大面积推广；薄膜组件，柔性好、外观美观（可制成透明或彩色），但效率低（15%-18%）、寿命短（15-20 年），适用于对外观要求高的建筑（如商业幕墙）。此外，需根据建筑功能选择组件类型，如住宅屋顶可选用标准尺寸组件（166mm×166mm），商业幕墙可选用定制化尺寸组件，确保与建筑立面协调。

2. 建筑材料适配

建筑材料需与太阳能系统兼容，确保安全性与耐久性。屋面材料方面，坡屋顶建筑需选用与光伏瓦片匹配的防水卷材，避免漏水；平屋顶建筑需采用承重能力强的屋面结构，如混凝土屋面，满足光伏支架安装需求。墙面材料方面，光伏幕墙需选用高强度玻璃（如超白钢化玻璃），确保抗风压性能；外墙板需与光伏组件的安装接口匹配，简化施工流程。此外，材料的热工性能需与太阳能系统协同，如光热集热器周边需采用保温材料（如聚氨酯保温板），减少热量损失；光伏组件背面需预留通风间隙，降低组件工作温度，提升发电效率^[7]。

（三）系统集成设计

1. 电气系统集成

电气系统集成需实现光伏发电、储能、电网与建筑用电的协同。电路设计方面，需根据光伏组件容量确定串并联方式，避免局部阴影导致的“热斑效应”；逆变器选型需匹配组件功率，如 10kW 光伏系统选用 10-12kW 逆变器，确保最大功率跟踪精度。电网连接方面，需符合《分布式光伏发电并网技术要求》，低压并网（380V）适用于户用项目，高压并网（10kV）适用于商业项目，同时安装防逆流装置，避免电能倒送影响电网安全。储能系统集成方面，需通过控制器实现“光伏优先、储能补电、电

网备用”的运行模式，如白天光伏发电量大于建筑用电量时，多余电能存入储能系统；夜间或阴天储能系统放电供建筑使用，不足部分由电网补充。

2. 热系统集成

热系统集成需实现太阳能热利用与建筑供暖、热水系统的无缝衔接。太阳能热水系统需与建筑热水管网串联，设置辅助加热装置（如电加热器、燃气热水器），确保热水供应稳定；循环管道需采用保温材料包裹，减少热量损失，同时安装温控阀，避免水温过高导致的安全隐患。太阳能供暖系统需与建筑供暖管网集成，通过换热器实现热量传递，避免腐蚀问题；同时与辅助供暖系统（如燃气壁挂炉）联动，当太阳能热量不足时，自动启动辅助系统，确保室内温度达标。此外，热系统需设置排气阀、排污阀，便于系统维护，延长使用寿命^[8]。

三、建筑一体化光能利用面临的挑战与对策

（一）技术挑战与突破路径

当前建筑一体化光能利用面临三大技术瓶颈：一是光伏组件效率与建筑适配性的矛盾，高效单晶硅组件多为刚性结构，难以满足曲面建筑、异形立面的安装需求；二是系统集成兼容性不足，光伏、光热、储能与建筑原有能源系统（如中央空调、供暖管网）的接口不统一，易出现“信息孤岛”，导致能源调度效率低下；三是储能技术存在短板，锂电池储能存在寿命短（5-8年）、低温性能差（-10℃以下容量衰减超30%）的问题，难以适应北方寒冷地区需求^[9]。

突破路径需从三方面发力：一是研发新型光伏材料，如柔性钙钛矿光伏组件，其转换效率已达28%，且可弯曲、重量轻（约5kg/m²），适用于异形建筑；二是制定系统集成标准，参考《光储直柔建筑技术标准》，统一设备接口与通信协议，实现“光伏-储能-建筑负荷”的智能联动；三是探索多元储能技术，如将相变储能材料（如石蜡）与建筑墙体结合，实现热能存储，或发展氢储能技术，满足长期、大容量储能需求，某试点项目应用氢

储能后，能源自给率提升至85%以上。

（二）成本挑战与控制策略

成本高是制约建筑一体化光能利用推广的核心因素，主要体现在三方面：一是初始投资高，当前BIPV系统造价约12-15元/W，是传统光伏系统的1.5-2倍，商业光伏幕墙造价更是高达2000-3000元/m²，远超普通玻璃幕墙；二是运维成本不确定，光伏组件清洗、储能电池更换等运维费用缺乏长期数据支撑，部分项目因运维不当导致系统效率逐年下降（年均衰减超5%）；三是补贴政策退坡，国内分布式光伏电价补贴逐步取消，项目投资回报周期延长，企业投资意愿降低。

成本控制需采取“降本+提效+政策”组合策略：一是推动产业规模化，通过扩大产能降低组件成本，如柔性钙钛矿组件量产后期望成本降至8元/W以下；二是优化设计与施工，采用模块化安装技术，减少现场施工周期（如某项目采用预制光伏屋面模块，施工效率提升40%），降低人工成本；三是完善市场化机制，推广“合同能源管理（EMC）”模式，由能源服务公司承担初始投资与运维，建筑业主按节省电费的比例支付费用，降低业主资金压力；四是加大政策支持，如对BIPV建筑给予容积率奖励（如增加0.2-0.3），或提供专项贷款（利率下浮10%-15%），某省份实施该政策后，BIPV项目数量同比增长60%^[10]。

四、结论

本文通过理论分析、案例验证与问题剖析，得出以下结论：一是建筑一体化光能利用通过“设计-技术-运营”协同，可实现年均15%-30%的建筑能耗替代率，是建筑行业低碳转型的关键路径；二是技术选型需因地制宜，北方地区优先发展太阳能供暖与屋顶BIPV，南方地区侧重光伏遮阳与幕墙BIPV，高原地区可扩大组件规模提升能源自给率；三是当前技术、成本、政策挑战可通过新型材料研发、规模化降本、政策机制创新逐步解决，案例表明科学设计的项目投资回收期可控制在8-12年，兼具经济性与环境效益。

参考文献

- [1]王健,刘艳峰,周伟.光伏建筑一体化(BIPV)系统设计与应用[M].北京:化学工业出版社,2020:45-68.
- [2]张军,李帆,赵伟.柔性钙钛矿光伏组件在异形建筑中的应用研究[J].太阳能学报,2023,44(5):123-130.
- [3]刘长滨,王怡.建筑一体化光能利用项目成本控制与效益分析[J].建筑经济,2021,42(8):35-40.
- [4]李明,陈晓东.合同能源管理模式在BIPV项目中的应用实践[J].可再生能源,2022,40(10):135-141.
- [5]龙海珊.物流园区光伏发电系统设计要点[J].建筑电气,2024(09).
- [6]劳大实,欧阳东,胡魁琦.双碳智慧园区建筑电气节能系统设计探讨[J].绿色建造与智能建筑,2024(07).
- [7]林子富.分布式光伏发电项目接入电力系统的技术研究[J].电气技术与经济,2023(03).
- [8]谭志昆.光伏建筑一体化光伏系统设计探讨[J].建筑电气,2022(10).
- [9]徐征龙,高长伟,李东宇,张风军.分布式光伏逆变器虚拟惯性与阻尼综合控制[J].东北电力技术,2022(05).
- [10]袁绍军,郭金智,尹兆磊,潘立巍.单相逆变器双环+时滞的复合控制方法研究[J].电力电子技术,2022(08).

BIM与GIS融合技术在水利枢纽工程全生命周期管理中的实践

杜尚争

中电建（禄丰）抽水蓄能开发有限公司，云南 昆明 650000

DOI:10.61369/WCEST.2025050006

摘 要： 本文聚焦 BIM与GIS融合技术在水利枢纽工程全生命周期管理中的实践，系统探讨了 BIM与GIS融合的关键技术，深入研究了数据融合中的格式衔接、逻辑关联与基准统一技术，以及平台集成中的松散与紧密耦合模式。结合规划设计、施工建造、运营维护三大阶段的具体实践，阐述了 BIM+GIS融合技术在坝址比选、进度管控、资产管理和应急响应等场景中的应用价值，有效解决了各阶段的业务痛点，显著提升了决策效率、工程安全性与管理水平，为推动水利工程的数字化转型与智慧化升级提供了有力的技术支撑与实践参考。

关 键 词： BIM; GIS; 技术融合; 水利枢纽工程

Practice of Integrated BIM and GIS Technology in the Full Life Cycle Management of Water Conservancy Projects

Du Shangzheng

PowerChina (Lufeng) Pumped Storage Development Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000

Abstract： This paper focuses on the practice of integrated Building Information Modeling (BIM) and Geographic Information System (GIS) technology in the full life cycle management of water conservancy projects. It systematically explores the key technologies for integrating BIM and GIS, delving into the techniques for format alignment, logical association, and benchmark unification in data fusion, as well as the loose and tight coupling modes in platform integration. Through specific practices in the three stages of planning and design, construction, and operation and maintenance, the paper elaborates on the application value of BIM+GIS integration technology in scenarios such as dam site comparison, progress control, asset management, and emergency response. It effectively addresses business pain points at each stage, significantly enhancing decision-making efficiency, project safety, and management levels, providing robust technical support and practical references for promoting the digital transformation and intelligent upgrading of water conservancy projects.

Keywords： BIM; GIS; technology integration; water conservancy projects

引言

水利枢纽工程普遍具有投资规模巨大、建设周期漫长、技术结构复杂、涉及专业众多、安全风险突出以及运营维护成本高等问题，随着信息技术的飞速发展，建筑信息模型（BIM）和地理信息系统（GIS）作为两大核心数字化技术，为破解上述难题提供了新的思路。本文旨在系统研究 BIM与GIS融合技术在水利枢纽工程全生命周期管理中的实践应用，深入剖析 BIM与GIS融合的驱动力与互补性，并重点探讨数据融合与平台集成的关键技术；设计并构建一套面向水利枢纽工程特点的 BIM+GIS一体化融合平台架构与核心功能模块；通过在规划设计、施工建造、运营维护三大阶段的具体应用案例，验证该技术体系的有效性与应用价值，以期为推动我国水利工程的数字化转型和智慧化管理提供理论参考与实践借鉴。

一、BIM与GIS融合的关键技术

（一）BIM与GIS融合的驱动力与互补性分析

GIS与BIM融合不是将传统的三维模型直接导入GIS，本质

上两者还是孤立开来。两者的真正融合应该考虑不同数据中几何信息的转换、属性信息的保留及空间的尺度变化等问题^[1]。水利枢纽工程周期长、规模大、数据杂、风险高，传统割裂管理模式存在三大核心痛点，一是信息孤岛导致数据无法贯通，规划、施

工、运营阶段数据难以共享；二是“宏观-微观”协同缺失，流域防洪调度与坝体应力安全无法兼顾；三是多主体协同效率低下，勘测、设计、施工、运维等环节数据格式与平台不兼容，人工录入耗时且易出错。正是这些痛点凸显了BIM与GIS的技术互补性，形成“反向互补”关系，实现“1+1>2”的融合效果^[2]。针对BIM宏观空间分析能力缺失，可通过集成GIS地形、水系数据或调用其缓冲区分析功能弥补；针对GIS微观构件信息不足，可嵌入BIM精细化模型，实现点击GIS要素查看BIM属性；通过绑定BIM构件ID与GIS要素ID，还能实现“GIS空间位置→BIM动态信息”的联动查询，如施工进度可视化与设备状态监控。

（二）BIM与GIS数据融合技术

数据融合是BIM与GIS融合的核心瓶颈，二者在数据格式、坐标系、精度上的差异，需通过“格式衔接→逻辑关联→基准统一”三层技术路径实现整合，尤其要兼容水利工程“大场景GIS数据”与“高精度BIM数据”^[3]。数据转换技术通过IFC、KML/KMZ、glTF等中间格式实现基础衔接，适用于中小型工程；数据集成技术则通过建立唯一标识关联，采用联邦数据库或数据仓库模式，实现跨库查询与联动分析，保留双方数据特性；数据同化技术则通过“七参数法”统一坐标系，并根据工程阶段调整数据精度，解决模型偏移与分析失真问题，确保规划、施工、运营各阶段数据精准匹配与高效加载。

（三）BIM与GIS平台集成技术

平台集成技术需根据水利工程规模与融合深度需求，选择“松散耦合”或“紧密耦合”两种模式^[4]。松散耦合模式基于API接口实现“浅层交互”，不改变底层架构，具有成本低、周期短、灵活性高的特点。其通常以一个平台为主，通过API调用另一平台的功能或数据，满足“宏观地理背景+微观构件查看”的基础需求。紧密耦合模式则构建“BIM+GIS一体化平台”，采用“数据层-服务层-应用层”三层架构，实现数据无缝流动与功能协同计算。该模式需突破三大关键技术，统一三维可视化引擎以解决TB级数据流畅渲染；构建一体化数据模型，将BIM构件定义为带地理坐标的空间实体；建立协同计算框架，集成BIM与GIS核心算法，实现如洪水调度中“宏观决策与微观管控”的实时协同，大幅提升决策效率与安全性。

二、面向水利枢纽工程的BIM+GIS融合平台构建

（一）总体架构设计

平台采用分层架构设计，各层级独立承担核心职责，并通过标准化接口协同联动，确保数据无缝流转与可扩展性^[5]。感知层作为数据入口，全面采集地理环境、工程实体及实时监测等水利特色数据，并对接业务系统获取流程数据。数据层采用“分类存储+统一关联”模式，将BIM模型、GIS地理数据、实时监测及业务数据分别存入专用数据库，并通过时空关联引擎实现逻辑绑定^[6]。服务层封装数据服务、空间分析、BIM功能、协同计算及协同管理等标准化能力，供应用层调用。应用层围绕规划设计、施工建造、运营维护等全生命周期场景开发功能模块，以

“BIM+GIS融合视图”为交互载体支撑业务决策。用户层则根据设计、施工、运维、政府等多参与方需求，提供个性化界面与权限配置，支持PC、移动、大屏等多终端访问，满足现场巡检与宏观指挥等不同场景需求。

（二）核心功能模块设计

核心功能模块紧密贴合水利枢纽工程“规划-施工-运维”的业务痛点，以“BIM+GIS融合”为支撑，实现从数据呈现到决策辅助的升级。三维可视化与场景漫游模块作为基础交互载体，实现“宏观地理环境+微观工程设施”的一体化展示，支持从流域全景到构件细节的切换、不同工程阶段场景对比及“空间位置-构件属性-业务数据”的一站式查询^[7]。规划设计优化模块通过GIS空间分析筛选候选坝址，结合BIM模型计算工程量与投资，并整合淹没范围等数据生成多维度比选报表；在坝型优化中，则结合GIS水文数据与BIM应力模拟，评估不同坝型的库容、防洪能力与结构安全性，辅助科学决策。施工动态管控模块实现“进度、质量、安全”协同管理，通过4D-BIM与无人机航测影像对比计划与实际进度；利用BIM构件标注与GIS定位实现质量追溯闭环；结合GIS电子围栏与BIM风险标注进行安全预警与防护检查。运维资产化管理模块构建“BIM构件-资产信息-GIS位置”关联的可视化台账，支持资产筛选与统计；基于维护周期自动生成计划并跟踪执行闭环；对接实时传感器数据，在GIS与BIM中联动展示设施状态并触发预警^[8]。安全监测与应急响应模块整合多源监测数据，在GIS地图中展示监测点状态，并结合BIM模型分析异常原因；针对突发事件，通过GIS模拟洪水淹没范围，BIM评估闸门调度方案安全性，并规划救援路线、调度物资，实现“监测-预警-处置”的快速联动。

（三）数据标准与接口规范

数据标准与接口规范是保障平台稳定运行与数据有效流转的核心，需结合水利行业标准，针对BIM+GIS融合特性制定，确保数据“可采集、可整合、可共享、可应用”^[9]。数据标准覆盖三大维度，分类上采用“工程阶段-数据类型-数据来源”三级体系，明确各阶段数据归属；编码上采用层级规则，为每个数据对象赋予唯一标识，实现BIM构件与GIS要素的相互追溯；精度上根据阶段需求，对BIM模型按LOD分级，对GIS数据按场景设定分辨率，并规范业务数据精度。接口规范分内外部，内部接口采用JSON/XML格式和REST API协议，保障平台各层级高效协同；外部接口需兼容BIM/GIS软件、监测设备、行业监管系统及第三方业务系统，支持多格式数据交互与功能调用，并遵循相关标准。

三、BIM+GIS在水利枢纽工程全生命周期管理中的实践应用

（一）规划设计阶段的应用

规划设计是水利枢纽工程的“顶层设计”阶段，核心需求是坝址选址、坝型比选、淹没范围评估与生态影响分析。传统模式依赖人工勘测与二维图纸，存在决策周期长、方案对比不直观、

宏观与微观协同缺失的问题^[10]。BIM+GIS融合技术通过“GIS宏观筛选+BIM微观建模+三维可视化论证”，实现规划设计的科学性与高效性提升。在坝址选址环节，GIS通过叠加分析，基于地形、地质、生态等多因素筛选候选坝址，BIM则构建简化模型计算工程量与投资，平台整合淹没影响与经济数据，通过三维可视化直观对比，将决策周期大幅缩短。在坝型比选中，BIM构建不同坝型模型并关联设计参数，GIS提供地质与水文数据，平台协同计算安全性与功能性，生成三维报告进行量化论证，显著提升方案可信度。在淹没范围与移民安置规划中，GIS模拟不同水位下的淹没范围并统计影响，BIM则建立安置区规划模型，平台将淹没区与安置区数据叠加，直观展示“淹没-安置”空间对应关系与迁移路线，提高了规划精度与协同性。

（二）施工建造阶段的应用

水利枢纽工程施工具有规模大、周期长、多专业交叉、环境复杂的特点，传统管理面临进度滞后难预警、质量问题难追溯、安全隐患难排查的痛点。BIM+GIS融合技术通过“BIM进度关联+GIS现场监测+实时数据联动”，实现施工过程的精细化、可视化管控。在施工进度动态管控方面，融合技术构建“4D-BIM+GIS航测”体系，将Project进度计划与BIM模型绑定生成4D模型，再通过无人机航测获取实际进度，平台自动对比分析偏差并预警，大幅缩短响应时间，降低进度偏差率。在施工质量管控方面，通过“BIM构件标注+GIS定位追溯”，为每个构件分配唯一编码，现场扫码上传检测数据，平台实现“空间位置-构件属性-检测记录”一体化追溯，质量问题整改闭环率显著提升。在施工安全管控方面，结合“GIS电子围栏+BIM风险标注+人员定位”，划定危险区域并关联防护措施，通过人员定位手环与AI视频监控实时预警违规行为，有效降低安全事故发生率。在施工场地布置优化方面，利用“GIS地形分析+BIM设施建模”，分析地形并模拟不同布置方案的物流路线，优化临时设施布局，提升物流效率与空间利用率，降低搬迁成本。

（三）运营维护阶段的应用

水利枢纽工程运营维护周期长，传统模式存在资产账实不符、安全隐患难预警、应急响应慢等痛点。BIM+GIS融合技术通过“BIM资产关联+GIS空间定位+实时监测联动”，实现智能化、长效化管理。在设施资产化管理方面，构建“BIM资产台账+GIS空间定位”体系，完善设施资产信息并关联空间位置，基于维护周期自动生成计划并跟踪执行闭环，显著提升台账准确率与维护效率。在大坝安全监测方面，通过“实时监测+GIS可视化+BIM结构分析”，实时采集位移、渗压等数据并在GIS地图中展示状态，关联BIM模型分析异常原因，自动生成预警报告，实现安全隐患的实时发现与评估。在核心设备运维方面，结合“BIM设备建模+GIS位置关联+状态监测”，构建精细化模型并关联实时运行数据，预测故障、推送维修建议，提升故障预测准确率并降低维修成本。在应急响应处置方面，构建“GIS模拟+BIM推演+联动调度”体系，以洪水为例，GIS模拟淹没范围，BIM评估闸门调度方案安全性，规划救援路线并推送指令，大幅缩短响应时间，提升处置效率。

四、结束语

本文围绕BIM与GIS融合技术在水利枢纽工程全生命周期管理中的实践应用，系统地阐述了其融合的驱动力、关键技术、平台构建方法以及在规划、施工、运维各阶段的具体应用路径。随着物联网、大数据、人工智能、数字孪生等新一代信息技术的不断发展，BIM与GIS的融合将迈向更深层次、更广领域。这不仅是技术发展的必然趋势，更是推动新阶段水利高质量发展、保障国家水安全的战略要求。持续深化BIM+GIS融合技术的研究与应用，必将为我国水利事业的现代化注入更加强劲的动力。

参考文献

[1] 史艾嘉. BIM技术与GIS技术融合应用研究[J]. 价值工程, 2019, 38(21): 179-181.
[2] 高洋. BIM与GIS技术在建筑工程中的融合应用研究[J]. 中国厨卫, 2024, 23(11): 323-325.
[3] 刘思微. 基于BIM与三维GIS融合的数字孪生技术在水库调度中的应用研究[D]. 山东: 济南大学, 2024.
[4] 赵杏英, 陈沉, 杨礼国. BIM与GIS数据融合关键技术研究[J]. 大坝与安全, 2019(2): 7-10. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1092.2019.02.003.
[5] 金拯昱. 基于BIM+GIS技术的三维场景构建与应用分析[D]. 江西: 江西理工大学, 2023.
[6] 陈宇, 孙辉, 张卫兵, 等. BIM与GIS融合的工程数字孪生平台研究及应用[J]. 西部交通科技, 2023(11): 200-202. DOI: 10.13282/j.cnki.wccst.2023.11.059.
[7] 吕华权, 郭小玉. GIS+BIM融合探讨与应用展望[J]. 测绘与空间地理信息, 2024, 47(2): 98-100. DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2024.02.028.
[8] 袁耀, 袁浩. 基于BIM+GIS技术融合应用及关键点研究[J]. 智能建筑与工程机械, 2023, 5(2): 122-124.
[9] 谢明坤, 贺东旭, 孔莉莉, 等. 水利工程视角下的BIM与GIS数据融合研究[J]. 水利信息化, 2023(6): 45-50. DOI: 10.19364/j.1674-9405.2023.06.008.
[10] 苏本谦, 于德湖, 孙宝娣, 等. 水利工程信息化与BIM+GIS融合应用的研究进展[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(5): 126-132. DOI: 10.3969/j.issn.1673-4602.2020.05.019.

中国流域水资源优化配置与可持续利用研究

程妙真

嵩县水利局, 河南 洛阳 471400

DOI:10.61369/WCEST.2025050007

摘 要： 中国流域水资源优化配置与可持续利用，不仅关系到沿岸区域的生态安全，而且与区域经济的持续性发展、资源的合理高效利用密切相关。文章基于此，从强化水资源系统评价与供需精准匹配、构建多目标协同优化配置模型、推进跨区域协同治理与政策保障三个方面，提出中国流域水资源优化配置策略，并结合当前水资源利用中的问题，构建可持续利用路径，包括提升水资源高效利用技术水平、加强水生态保护与修复、推动智慧水利与数字化转型、健全水资源管理长效机制。

关 键 词： 中国流域；水资源；优化配置；可持续利用

Research on Optimal Allocation and Sustainable Utilization of Water Resources in Chinese River Basins

Cheng Miaozen

Song County Water Conservancy Bureau, Luoyang, Henan 471400

Abstract： The optimal allocation and sustainable utilization of water resources in China's river basins are not only related to the ecological security of the coastal areas, but also closely associated with the sustainable development of the regional economy and the rational and efficient utilization of resources. Based on this, the article proposes strategies for optimizing the allocation of water resources in Chinese river basins from three aspects: strengthening the systematic evaluation of water resources and precise matching of supply and demand, constructing a multi-objective collaborative optimization allocation model, and promoting cross-regional collaborative governance and policy guarantees. It also builds a sustainable utilization path in combination with the current problems in water resource utilization. This includes enhancing the technological level of efficient water resource utilization, strengthening water ecological protection and restoration, promoting smart water conservancy and digital transformation, and establishing a long-term mechanism for water resource management.

Keywords： river basins in China; water resources; optimize configuration; sustainable utilization

引言

水资源是现代社会的基础性资源，其配置是否均衡，不仅对人们的生产生活以及经济的持续性发展有着决定性的影响，更与社会的公平公正紧密相关^[1]。根据水利部发布的《2024年中国水资源公报》，我国水资源总量31123.0亿立方米，位居世界前列^[2]。然而，水资源的配置情况并不理想。从时间看，多数流域降水集中在6-9月的汛期，非汛期水资源供需矛盾突出。以黄河为例，监测结果显示，2024年，黄河有16条支流20个国控断面发生断流，累计断流102次。从空间看，长江流域及其以南地区水资源占全国总量的80%以上，华北、西北等地则干旱少雨。此外，受开发利用不合理的影响，水资源浪费、污染现象，极为严重。因此，需结合中国流域实际情况，多维优化水资源配置，促进水资源可持续利用。

一、中国流域水资源优化配置策略

（一）强化水资源系统评价与供需精准匹配

水资源系统评价作为优化配置的基础，核心是厘清流域水资源禀赋、开发利用、供需矛盾的内在联系，为方案提供科学支

撑。当前我国流域评价存在数据碎片化、标准不统一、动态性不足等问题，不同部门数据格式差异显著，部分流域沿用老旧基础数据，未充分纳入气候变化与土地利用变化影响，导致评价结果与实际脱节。对此，需构建多源数据整合、动态监测、系统模拟的技术框架。多源数据整合以流域为单元，汇总水文、气象、社

会经济、水质及生态数据，依托国家水资源数据中心实现标准化，建立定期更新机制。动态监测引入遥感与物联网技术，通过卫星监测耕地与水位，在关键断面布设智能传感器实现实时传输。系统模拟利用成熟模型构建平台，模拟不同情景下的供需变化，为配置提供量化依据。从生活、生产、生态三个维度展开供需缺口识别需。生活用水需求受人口与城镇化影响，随着城镇化率提升及农村饮水标准提高，需推进城市管网改造与农村集中供水。生产用水优化中，农业按作物细化灌溉定额，结合高标准农田建设控量，工业聚焦高耗水行业技改降耗。生态用水需保障河道基流、湿地补水与地下水修复，优先填补北方流域缺口。

（二）构建多目标协同优化配置模型

流域水资源配置需平衡经济、社会、生态三大效益。三者存在冲突，可通过多目标协同模型实现帕累托最优。模型设计围绕三大目标：经济效益以总用水效益最大为导向，区分工业、农业等用水效益权重。社会效益以城乡供水保障率最高为核心，适当侧重城市。生态效益聚焦生态流量与水质达标率，优先保障生态流量。通过层次分析法邀请多领域专家打分定权重，兼顾发展与保护。工程措施是硬件支撑，重点推进水库联合调度与跨流域调水。水库联合调度依托现有大型水库，实行流域统一调度，汛期留防洪库容减下游压力，非汛期补水灌溉与生态，借助数字孪生系统提精度。跨流域调水以南水北调为核心，东线优化泵站效率，中线精准计量防超采、建配套工程，西线规划中，建成后缓解黄河上游与西北缺水。非工程措施通过经济杠杆与制度约束引导调整，是重要补充。农业将用水指标分解至农户，节水量可交易给工业，工业需通过平台获新增指标，倒逼节水。以“多用水多付费”为基本原则，实施阶梯水价与超定额加价。居民分档定价，非居民超定额加价，收入专项用于节水。

（三）推进跨区域协同治理与政策保障

我国流域管理实行流域机构、地方政府双重管理体制。需强化流域机构统筹，解决条块分割。流域机构承担水资源调度、生态保护、污染防治统一职责，通过年度计划、月方案、实时指令提升管理效能。跨区域协同可借鉴长江经济带经验，通过跨省联防联控治理。设跨省断面共享数据，超标后联合溯源，靠上游水库群的生态补水保障湿地，推进高污染企业搬迁，提干流达标率。构建刚性约束制度，将水资源“双控”（用水总量、用水强度）目标分解至各省，明确总量与效率指标。将“双控”纳入地方考核，一票否决，未达标者约谈停批高耗水项目，达标者给予资金奖励。构建覆盖论证、审批、监管的高耗水项目管控机制，未过论证的项目，不予立项，指标满额则停批新增项目，投产项目重点做好审计工作，严查用水违规行为。

二、中国流域水资源可持续利用路径构建

（一）提升水资源高效利用技术水平

节水是水资源可持续利用的关键。当前，农业、工业以及城乡居民用水，存在着较为严重的浪费现象，与可持续利用的理念不符。对此，要多维提升水资源高效利用技术水平。首先，做好

农业节水。农业为用水大户，节水潜力显著，需从灌溉技术推广与灌区改造方面发力。高效灌溉技术推广方面，推广滴灌、喷灌、低压管道输水等高效灌溉技术。滴灌适用于果蔬与设施农业，水利用效率高，能大幅减少灌溉用水消耗。喷灌适用于小麦、玉米等大田作物，同样可显著提升水利用效率。低压管道输水适用于平原地区，可减少输水过程中的水量损失。灌区改造方面，针对现有灌区设施老化、渗漏严重的问题，推进渠道防渗处理，采用混凝土、土工膜等材料减少渗漏损失。安装墒情传感器与智能闸阀，实现按需灌溉，提升灌溉精准度。完善排水系统，解决灌区次生盐碱化问题，改善农田生态环境，保障农业可持续发展。其次，推进工业用水的循环利用。聚焦高耗水行业，开展技术改造、水循环利用与再生水回用。针对钢铁、化工、火电等高耗水行业，通过技术创新降低单位产品用水量。通过优化企业内部循环水系统，减少新鲜水取用量。通过建设再生水厂、完善再生水输配管网，将再生水用于工业冷却、锅炉补水等环节，实现经济效益与环境效益双赢。最后，提高居民用水效能。利用声波检漏仪、管网压力监测系统智慧设备定位漏点，提升检漏效率，减少漏损水量，保障供水管网高效运行。推广节水马桶、节水龙头、节水淋浴器等节水器具，替代高耗水器具。在缺水城市新建再生水厂，扩大再生水管网覆盖范围，将再生水用途从绿化、道路清扫拓展至工业冷却、景观用水、地下水回灌等领域。

（二）加强水生态保护与修复

流域生态污染，是制约水资源可持续利用的主要因素。应围绕生态流量保障、水污染综合治理、生态修复等多个方面，采取好措施，为水资源可持续利用奠定坚实的基础。生态流量保障方面，结合河流类型与生态功能制定差异化生态流量标准，明确各关键断面生态基流要求，为生态流量保障提供依据。通过水库下泄管控、跨流域生态补水与应急补水机制实现生态流量达标，例如，在水库调度方案中明确生态下泄流量，确保河道基本生态用水。建立“天地空”一体化监测体系，在河流关键断面布设流量监测站，实时监测下泄流量^[3]。利用卫星遥感监测河流水面面积与植被覆盖度，掌握流域生态状况。定期评估鱼类种群、鸟类数量、湿地面积等生态指标，验证生态流量保障效果。污染综合治理方面，针对农业面源、工业点源与城镇生活源开展控源截污、内源治理的综合整治。农业面源污染占流域水污染总量比例较高，需推广测土配方施肥与病虫害绿色防控技术，减少化肥农药使用量，降低农业生产对水体的污染。严格管控工业废水排放，提升工业废水排放标准，修订相关行业污染物排放标准，收紧污染物限值。在工业企业排污口安装在线监测设备，实现数据实时传输至环保部门，确保超标排放及时发现与处理。推进城镇污水处理厂提标改造，将出水标准从一级B提升至一级A，提高污染物去除率。在老城区推进雨污分流管网建设，减少合流制溢流污染对水体的影响。生态修复方面，重点修复河流湿地、湖泊湿地与沼泽湿地，在河流两岸建设人工湿地、植被缓冲带，种植原生植被，提升生物多样性。清除湖泊淤泥，恢复水生植被，改善水质与鱼类栖息地。通过水库补水保障湿地水位，促进湿地面积恢复，提升湿地生态功能，维护流域生态平衡。

（三）推动智慧水利与数字化转型

水利工程是水资源可持续利用的物质基础。在数字技术不断发展与广泛应用的今天，水利事业向着数字化、智能化的方向迈进，并为水资源可持续利用提供了有力支持^[1]。首先，推进数字孪生流域建设。利用无人机航拍、三维激光扫描等技术构建流域三维地形模型，确保模型精度满足管理需求，全面整合水文、气象、工程、生态等多领域数据，建立流域数据库，实现数据全面覆盖。开发数字孪生流域模型，利用模型精准模拟流域水文过程、水质变化、工程运行等场景，为决策提供支持。例如，在跨流域调水工程总干渠布设智能闸阀，根据分水口用水需求自动调节流量，保障沿线城市供水稳定。在工业企业与居民小区安装智能计量设备，发现异常立即排查，避免违规用水与水资源浪费。通过水源、输水、用水全流程智能监测，实现水资源全链条精细化管理。最后，构建风险预警体系。依托智慧水利，构建覆盖监测、预警、响应的全链条风险预警体系，有效防范干旱、洪涝、水污染等风险。以干旱风险为例，根据降水量、土壤含水率、水库蓄水量等指标划分预警等级，不同预警等级对应差异化响应措施。一般干旱推广节水技术，引导全社会节约用水。较重干旱限制非居民用水，优先保障居民生活用水。严重干旱启动应急调水，补充水源供应。特别严重干旱实行限时供水，保障基本用水需求，通过分级响应降低干旱影响。

（四）健全水资源管理长效机制

长效管理机制的构建，是中国流域水资源可持续利用的重要

保障。首先，推进水权市场建设。水权市场是水资源市场化配置的核心，需遵循确权、交易、监管的链条，推进水权市场建设，切实发挥市场机制在水资源优化配置中的作用。明确水资源所有权属于国家，使用权归属用水户，开展水资源使用权确权登记。打造市、省、国家三级水权交易平台，开展跨区域、跨行业、跨年度水权交易，促进水资源向高效利用领域流动。构建水权交易全流程监管机制，重点做好交易审核、履约监管及信用管理，维护市场秩序。其次，健全社会参与机制。社会大众的广泛参与，对水资源可持续利用尤为必要。依托学校教育、社区宣传、新媒体传播，开展水资源宣传教育，提升大众合理利用水资源的意识。开通水利服务热线与微信举报平台，受理水资源违法违规举报，及时查处违法行为，发挥大众在水资源利用中的监督作用。水利工程建设中，推广 PPP 模式，吸引社会资本参与水资源可持续利用。最后，加强国际合作。

三、结语

随着城市化、工业化的不断推进，以水环境破坏、水生态退化为主的河流水生态环境问题已成为制约流域高质量发展的主要因素。应以供需匹配为基本要求，做好水资源优化配置，同时，多措并举，促进水资源可持续利用，充分发挥水资源的经济、社会、生态效益。

参考文献

[1]宋峰,刘中军.中国流域水资源生态补偿之法律机制探析[J].忻州师范学院学报,2021,37(06):101-105.
[2]元秀红.水库调度运行中的生态流量保障技术研究[J].水上安全,2024(13):83-85.
[3]孙姝娅.水资源管理中的智慧水利信息化系统应用探究[J].中国设备工程,2025(01):26-28.

城市给水处理厂能耗智慧化管理技术研究

苏迪旻¹, 吴育航², 廖丝敏¹, 唐思炜¹, 刘凯喧²

1. 广州市自来水有限公司, 广东 广州 510600

2. 广东工业大学土木与交通工程学院, 广东 广州 510006

DOI:10.61369/WCEST.2025050008

摘 要 : 为克服城市给水处理厂高能耗及传统管理滞后问题, 本文聚焦水厂能耗监测、预测与管理展开研究。构建 LSTM 泵站能耗预测模型, 发现模型在学习率 0.001、2 层 LSTM 层配置下, 预测精度优异; 采用“多初始值优化 + SQP 算法”拟合离心水泵单泵特性曲线, 解决拟合精度问题; 整合各模块能耗数据, 基于“感知-传输-数据-模型-应用”五层架构开发能耗智慧化管理系统。研究实现水厂能耗智慧化管理, 为水务企业降本增效、践行“双碳”目标提供技术支撑。

关 键 词 : 泵站能耗预测模型; 离心水泵单泵特性曲线; 能耗管理系统

Research on Intelligent Energy Consumption Management Technology for Urban Water Treatment Plants

Su Dimin¹, Wu Yuhang², Liao Simin¹, Tang Siwei¹, Liu Kaixuan²

1. Guangzhou Water Supply Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510600

2. School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510006

Abstract : To address the issues of high energy consumption and traditional management lag in urban water treatment plants, this paper focuses on researching energy consumption monitoring, prediction, and management in waterworks. An LSTM-based energy consumption prediction model for pump stations was constructed, revealing that the model achieved excellent prediction accuracy with a learning rate of 0.001 and a two-layer LSTM configuration. The "multi-initial value optimization + SQP algorithm" was employed to fit the characteristic curve of a single centrifugal pump, resolving the issue of fitting accuracy. Energy consumption data from various modules were integrated, and an intelligent energy consumption management system was developed based on a five-layer architecture of "perception-transmission-data-model-application". This research enables intelligent energy consumption management in waterworks, providing technical support for water enterprises to reduce costs, increase efficiency, and achieve the "dual carbon" goals.

Keywords : energy consumption prediction model for pump stations; characteristic curve of a single centrifugal pump; energy consumption management system

引言

随着我国“碳达峰、碳中和”国家战略的深入推进, 节能减排已成为各行各业发展的核心议题。城市给水处理厂作为城市基础设施的“能源黑洞”, 其能耗约占全国总电耗的 0.5%-1%, 是名副其实的能耗大户^[1]。在给水处理的全流程中, 泵站输送系统与关键工艺设备的电能消耗构成了运营成本的主要部分, 同时也产生了巨大的碳排放。因此, 在保障供水安全与水质达标的前提下, 如何有效降低水厂能耗、提升能源利用效率, 不仅是水务企业降本增效的内在需求, 更是响应国家“双碳”目标、履行社会责任的必然选择与严峻挑战。

一、基于长短期记忆网络 (LSTM) 的泵站能耗预测模型

通过引入门控机制有效解决了传统 RNN 在长序列处理中的梯度消失问题。

(一) 模型结构配置及参数配置

长短期记忆网络^[2-5] (LSTM) 是一种特殊的循环神经网络,

基于 Python 编程语言搭建的长短期记忆神经网络 (LSTM)

基金信息: 广州市自来水有限公司科技项目 (ZB-XZ-2022-FW-0057)。

作者简介: 苏迪旻 (1978-), 男, 汉族, 广东省广州人, 本科, 技术员, 主要研究方向: 信息技术应用研究工作。

模型，经过多次的参数调整及模型效果评估验证，最终构建了一个具备良好性能的 LSTM 模型，模型由 1 个输入层、2 个 LSTM 层、3 个正则化、1 个全连接及 1 个 Linear 输出层组成。LSTM 模型网络结构具体参数如下表 1 所示。

表 1 LSTM 模型结构参数	
层类型	设置
输入层	输入尺寸 = [24, 8], 时间步长为 24 小时, 输入包含 9 个特征值
LSTM 层 1	单元数 = 128, 返回序列 = True, 激活函数 = tanh
正则化层 1	Dropout 率 = 0.2 (防止过拟合)
LSTM 层 2	单元数 = 64, 返回序列 = False, 激活函数 = tanh
正则化层 2	Dropout 率 = 0.2 (防止过拟合)
全连接层 1	输出单元个数 = 32, 激活函数 = ReLU
正则化层 3	Dropout 率 = 0.1 (防止过拟合)
输出层	输出单元个数 = 1, 激活函数 = Linear, 符合回归问题输出

(二) 模型评价指标

为确保模型预测结果的准确性与可靠性，本文选取了多种常用的回归评价指标对模型性能进行综合评估，具体包括均方误差 (Mean Squared Error, MSE)、平均绝对误差 (Mean Absolute Error, MAE)、均方根误差 (Root Mean Squared Error, RMSE) 以及决定系数 (Coefficient of Determination, R^2)。

均方误差 (MSE)：通过计算预测值与真实值之间差值的平方均值，放大较大误差的影响，从而对异常值更为敏感。其表达式为：

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1)$$

平均绝对误差 (MAE)：计算预测值与真实值之间绝对差值的平均值，具有与原始数据相同的量纲，解释性强，对异常值不敏感，适用于误差分布较为均衡的场景。其表达式为：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2)$$

均方根误差 (RMSE)：MSE 的平方根，恢复了与原始数据相同的单位，便于在实际应用中解释误差大小。与 MSE 类似，RMSE 也对较大误差更为敏感，适用于对异常值容忍度较低的任务。其计算公式为：

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

决定系数 (R^2)：用于衡量模型对数据变异的解释能力，取值范围为 $(-\infty, 1]$ ，越接近 1 表示模型拟合效果越好。其计算公式为：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

(三) 实验结果

本研究数据取自南方某城市给水处理厂，以取水泵站离心水泵启停记录、瞬时供水流量及对应耗电量等关键运行参数作为模

型输入特征，开展训练与验证。模型训练结果如下表 2 所示：

表 2 LSTM 模型评价					
学习率	LSTM 层	MAE	MSE	RMSE	R^2
0.001	1	0.56	0.65	0.82	0.89
	2	0.26	0.35	0.59	0.95
	3	0.44	0.47	0.68	0.91
0.01	1	1.23	1.35	0.98	0.82
	2	1.09	1.01	0.92	0.89
	3	1.21	1.23	0.95	0.84
0.1	1	4.56	3.89	2.24	0.76
	2	4.28	4.18	1.79	0.82
	3	4.35	4.69	2.38	0.77

由表 2 可知，当学习率设为 0.001 且 LSTM 层数为 2 时，模型取得最优性能，MAE 为 0.26，RMSE 为 0.59， R^2 达 0.95，显著优于其他组合。

二、离心水泵单泵特性曲线拟合

(一) 离心水泵单泵特性曲线数学模型构建

1. 流量-扬程特性曲线

离心水泵单泵的流量-扬程特性曲线满足二次函数关系，其数学模型可表示为：

$$H = a_1 Q^2 + b_1 Q + c_1 \quad (6)$$

式中：H 为扬程 (m)，Q 为流量 (m^3/h)， a_1 、 b_1 、 c_1 为特性曲线系数。

2. 流量-功率特性曲线

离心水泵单泵的流量-功率特性曲线同样满足二次函数关系，其数学模型可表示为：

$$P = a_2 Q^2 + b_2 Q + c_2 \quad (7)$$

式中：P 为扬程 (kW)，Q 为流量 (m^3/h)， a_2 、 b_2 、 c_2 为特性曲线系数。

(二) 离心水泵单泵特性曲线拟合

1. 约束条件

为确保拟合单泵水泵特性曲线准确性，根据离心水泵工作原理，曲线需满足以下物理约束条件：

约束条件一： $a_1 < 0$ ， $c_1 > 0$ ，确保曲线开口向下，保证零流量时扬程为正值，且单泵输出扬程随流量递增而减少。

约束条件二： $a_2 > 0$ ， $c_2 > 0$ ，确保曲线开口向上，保证零流量时功率为正，且单泵输出扬程随流量递增而增加。

2. 多初始值优化

针对传统最小二乘法在非线性曲线拟合中易陷入局部最优解的问题，本研究提出了一种基于工程经验的多初始值优化算法，并采用序列二次规划 (Sequential Quadratic Programming, SQP) 算法进行约束优化求解，确保获得全局最优的泵特性曲线参数。

序列二次规划算法作为一种高效的非线性约束优化方法，其核心思想是通过迭代求解一系列二次规划子问题来逼近原问题的解。在每次迭代中，算法构造原问题的拉格朗日函数，并在当前

迭代点处进行二次近似，同时将非线性约束线性化，形成二次规划子问题。通过求解该子问题获得搜索方向，再沿此方向进行线性搜索确定步长，最终收敛至满足 Kuhn-Tucker 条件的最优解。

在本研究的泵特性曲线拟合中^[6-7]，SQP 算法展现出显著优势。算法能够严格处理流量-扬程特性曲线及流量-功率特性曲线物理约束，确保拟合结果符合水泵工作原理。通过精确的一阶和二阶导数信息，算法具有超线性收敛速度，计算效率显著高于传统优化方法。

3. 优化目标函数

实际工程实际中统计得出的部分流量、扬程及功率数据明显偏离实际，为提高拟合精度采用平均相对误差（MARE）作为优化目标，该指标能够均衡处理不同量纲数据，避免绝对误差在量级差异较大时产生的偏差。

$$MARE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{\text{测}} - y_{\text{实}}}{y_{\text{实}}} \right| \quad (8)$$

式中：n 为有效点的个数， $y_{\text{测}}$ 为有效点中不同流量根据拟合曲线计算得出的扬程/功率预测值， $y_{\text{实}}$ 为实际有效点中不同流量所对应的扬程/功率真实值。

结合工程实际，为保证水泵特性曲线的拟合准确性，离心水泵单泵特性曲线拟合中规定流量-扬程特性曲线 MARE < 5%，流量-功率特性曲线 MARE < 3%。

三、水厂能耗智慧化管理系统

为实现城市给水处理厂能耗的精细化、智能化管理，本文在前述研究基础上，设计并开发了一套集成能耗预测、设备建模与实时监测于一体的水厂能耗智慧化管理系统^[8]。该系统采用分层架构设计，自下而上分别为感知层、传输层、数据层、模型层与应用层，具备良好的可扩展性与模块化特征：

（1）感知层：获取水厂耗能设备相关数据，包括流量、压力、电流、电压、功率、启停状态等。

（2）传输层：实现数据的稳定传输与边缘缓存，保障数据完整性与时效性。

（3）数据层：对原始数据进行清洗、归一化、时间对齐与

缺失值填补，形成高质量的时间序列数据集，为后续建模提供支撑。

（4）模型层：集成 LSTM 泵站能耗预测模型、离心水泵单泵特性曲线拟合模型，实现泵站能耗预测、水泵设备性能评估。

（5）应用层：提供可视化界面与交互式分析工具，实现不同方式能耗统计、不同泵组合能耗预测等功能，辅助管理人员科学决策。

四、结论与展望

（一）结论

（1）LSTM 泵站能耗预测模型效果佳：以 Python 构建的 LSTM 模型，在学习率 0.001、2 层 LSTM 层的最优配置下，MAE 为 0.26、RMSE 为 0.59、R² 达 0.95，能精准预测泵站能耗；学习率过大会致误差剧增，3 层 LSTM 因过拟合或梯度衰减性能下降，模型可靠性与实用性强。

（2）离心水泵特性曲线拟合精准：“多初始值优化 + SQP 算法”方案，结合物理约束（流量-扬程曲线 $a_1 < 0$ 、 $c_1 > 0$ ；流量-功率曲线 $a_2 > 0$ 、 $c_2 > 0$ 与 MAE 目标（流量-扬程 MARE < 5%、流量-功率 MARE < 3%），解决传统方法局部最优问题，为泵组调度和能效评估提供依据。

（3）能耗智慧化管理系统：基于五层架构（感知-传输-数据-模型-应用）开发的系统，整合 LSTM 预测与水泵特性拟合模型，实现能耗数据实时处理、分析与可视化，解决传统管理痛点，助力水厂向主动控耗转型。

（二）展望

（1）提升模型泛化与适配性：扩大数据来源，引入迁移学习，减少模型对特定场景依赖；融合气象、原水水质等外部因素，优化输入特征，增强预测动态适应性。

（2）推进多设备协同与全局调控：拓展至全流程耗能设备，建多设备能耗耦合模型；引入多目标优化算法，实现全厂设备协同调度，挖掘跨环节节能潜力。

（3）深化系统与运营融合：增强系统闭环控制功能，对接现有控制系统实现策略自动执行；增加设备健康管理模块，实现能耗管控与运维一体化。

参考文献

- [1] 李都望, 余天奇. 水厂的能耗分析与节能措施 [J]. 有色冶金设计与研究. 2019, 40(06): 109-10+18.
- [2] 郭娟. 基于 EDA-LSTM 模型的建筑能耗预测方法研究 [J]. 科技与创新. 2024, (22): 35-7.
- [3] 邵必林, 史洋博, 赵煜. 融合注意力机制与 LSTM 的建筑能耗预测模型研究 [J]. 软件导刊. 2021, 20(10): 61-7.
- [4] 王涛, 于泽沛, 时斌, et al. 基于 LSTM 与 DDPG 的空调能耗优化控制策略 [J]. 计算机与数字工程. 2024, 52(11): 3439-45.
- [5] 谌东海, 王伟, 赵昊裔, et al. 基于 MI+PSO-LSTM 的能耗预测模型 [J]. 计算机工程与设计. 2022, 43(10): 2889-96.
- [6] 黄亚, 周建旭. 水泵全特性曲线的预测及对数值分析的影响 [J]. 排灌机械工程学报. 2021, 39(08): 777-83.
- [7] 王枫月, 朱洋, 宋龙波, et al. 基于遗传算法的离心泵并联优化及试验 [J]. 水泵技术. 2023, (06): 1-10.
- [8] 李子怡, 钟炜. 智慧水厂能耗监测评价与异常诊断管理平台研究 [J]. 给水排水. 2024, 60(02): 153-7+66.

GPS 测量技术在水利水电工程测量中的应用

杨松柏

广西贵港市润港工程勘察设计有限责任公司，广西 贵港 537100

DOI:10.61369/WCEST.2025050009

摘 要： 本文聚焦 GPS 测量技术在水利水电工程测量中的应用，阐述其基础理论，同时分析卫星、信号传播、设备及环境等误差来源，并提出针对性修正与控制措施。结合水利水电工程规划设计、施工建设、运营管理三阶段，详述 GPS 技术的具体应用，进而从精度、效率、成本、安全四维度分析应用效益。研究表明，GPS 测量技术能有效解决传统测量在水利水电工程中的通视难、效率低、精度不均等问题，对保障工程质量、缩短建设周期、降低资源投入及规避安全风险具有重要意义，为水利水电工程测量提供关键技术支撑。

关 键 词： GPS 测量技术；水利水电工程测量；实时动态定位；相对定位

Application of GPS Surveying Technology in Surveying for Water Resources and Hydropower Engineering

Yang Songbai

Rungang Engineering Survey and Design Co., Ltd., Guigang, Guangxi 537100

Abstract： This paper focuses on the application of GPS surveying technology in surveying for water resources and hydropower engineering. It elaborates on the foundational theory of GPS technology, while analyzing error sources such as satellites, signal propagation, equipment, and environmental factors, and proposing targeted correction and control measures. Combining the three stages of water resources and hydropower engineering—planning and design, construction, and operation management—the paper details the specific applications of GPS technology. Subsequently, it analyzes the application benefits from four dimensions: accuracy, efficiency, cost, and safety. Research indicates that GPS surveying technology can effectively address issues inherent in traditional surveying methods for water resources and hydropower engineering, such as difficulties in line-of-sight, low efficiency, and inconsistent accuracy. It holds significant importance in ensuring project quality, shortening construction periods, reducing resource investment, and mitigating safety risks, thereby providing crucial technical support for surveying in water resources and hydropower engineering.

Keywords： GPS surveying technology; surveying for water resources and hydropower engineering; real-time kinematic positioning; relative positioning

引言

测量工作作为水利水电工程全生命周期的先行性基础环节，贯穿规划设计、施工建设至运营管理全过程，其精度与效率直接决定了坝址选址合理性、施工放样准确性及大坝长期安全稳定性。全球定位系统（GPS）测量技术凭借其全天候作业、全球覆盖、高精度定位、无需通视及高效数据处理等优势，逐步取代传统测量技术成为水利水电工程测量的核心手段。本文结合工程全生命周期各阶段需求，详细分析 GPS 具体应用场景与实施路径，进一步量化评估其在精度、效率、成本与安全层面的综合效益，并针对复杂地形信号遮挡、电磁干扰等应用挑战提出解决方案，为 GPS 技术在水利水电工程测量中的规范化、高效化应用提供理论参考与实践指引。

一、GPS 测量技术基础理论

（一）GPS 系统组成与定位原理

GPS 测量技术应用，是由测量人员携带接收机前往各处观测站，开启接收机，由近地卫星持续向接收机发送信号，根据信号

处理结果掌握测量站三维空间坐标值，后续将外业观测数据导入软件进行处理，即可获取测量报告，顺利完成工程测量任务^[1]。

GPS 系统通过空间卫星、地面控制与用户设备三部分协同实现定位，空间部分由 24 颗以上卫星组成，持续广播包含自身位置和时间信号，确保全球任意地点、任意时间至少能观测到 4 颗卫星；

地面控制部分作为中枢，负责监测卫星状态，计算并修正其轨道和时钟误差，再将准确的导航信息上传至卫星；用户设备即 GPS 接收机，通过接收至少 4 颗卫星的信号，测量“伪距”并利用空间几何原理解算出自身三维坐标^[2]。根据精度需求，定位分为绝对定位与相对定位两种模式，绝对定位由单台接收机独立完成，精度在米级，适用于初步勘察等场景；相对定位则需两台以上接收机同步观测，通过差分技术消除公共误差，精度可达毫米级，广泛用于高精度工程控制网建立与大坝安全监测等。

（二）GPS 测量主要作业模式

水利水电工程中，GPS 测量根据精度与效率需求，衍生出四种核心作业模式。静态相对定位需长时间同步观测，事后解算，精度达毫米级，适用于高精度控制网建立与安全监测；快速静态定位通过技术缩短观测时间，在保持较高精度的同时提升效率，常用于控制网加密与中小规模地形测绘；动态相对定位由基准站与移动流动站组成，实时解算坐标，适合大范围地形测绘与断面测量；实时动态定位（RTK）效率最高，流动站可秒级获取厘米级精度坐标，完美适配施工放样、临时监测与工程验收等高频次、实时性强的场景。

（三）GPS 测量的误差来源与精度分析

GPS 测量精度受卫星、信号传播、接收设备及观测环境等多环节误差影响，需结合水利水电工程特点进行针对性控制^[3]。卫星轨道与钟差可通过差分定位和精密星历修正至毫米级；电离层和对流层延迟可通过双频接收机、夜间观测及气象参数模型修正至 2 毫米内；接收机误差需采用高精度设备和统一作业标准控制；而多路径效应、电磁干扰和信号遮挡等环境误差，则需通过合理选点、远离干扰源及使用多星座接收机来控制在 3 毫米内^[4]。针对不同工程需求，GPS 测量需匹配相应模式与控制措施，建立毫米级精度的首级控制网，需采用长时间静态相对定位并配合精密星历；厘米级精度的施工放样，适用 RTK 模式并需进行点校正；亚毫米级精度的安全监测，则需使用高精度静态接收机并辅以多期数据平差；分米至厘米级精度的地形测绘，可采用快速静态与无人机航测相结合的方式，以兼顾效率与精度。

二、GPS 在水利水电工程各阶段的具体应用

（一）规划设计阶段的应用

在水利水电工程的规划设计阶段，GPS 技术是绘制工程“蓝图”的关键，它有效解决了传统测量在大范围、复杂地形中通视难、效率低的问题。该阶段的核心任务是建立统一的坐标基准和获取高精度地形数据^[5]。GPS 通过“首级+次级”的层级控制网架构，利用静态和快速静态定位模式，快速、高精度地覆盖整个工程区域，为后续所有测量奠定基础。在地形测绘方面，GPS 与无人机航测相结合，通过高效采集地面控制点来校正影像，生成高精度三维地形模型，极大地提升了测绘效率与范围，为坝址选择、库容计算和工程布局等关键决策提供了精准、可靠的数据支撑。

（二）施工建设阶段的应用

在水利水电工程的施工建设阶段，GPS 技术是实现“蓝图”

向“实体”精准转化的核心工具，其应用聚焦于实时性、高精度与高频次，有效解决了传统放样效率低和过程监测滞后的问题。该阶段首先通过快速静态或 RTK 模式加密施工控制网，为高频次放样提供密集且精确的基准^[6]。核心应用是 RTK 施工放样，其实现了“测即得”，能实时指导坝体轮廓、导流洞轴线及边坡开挖线的精准施工，大幅提升效率并确保符合设计要求^[7]。同时 GPS 技术还用于施工过程的安全监测，通过定期或临时布设监测点，对边坡位移和坝体沉降进行动态监控，一旦数据超限即可预警，为预防质量与安全风险提供可靠保障。

（三）运营管理阶段的应用

在水利水电工程的运营管理阶段，GPS 技术是保障工程长期安全稳定的核心手段，其应用强调长期连续性、超高精度与实时预警，以解决传统监测难以捕捉微小变形和数据滞后的问题。核心任务是大坝安全监测，通过在坝体关键部位布设永久监测点，进行毫米级精度的连续观测，能精准捕捉水压力、温度变化等因素引起的微小沉降与位移，为结构安全评估提供数据支撑。同时 GPS 与测深仪结合，可高效精准地测量库区泥沙淤积，通过对比不同时期的水下地形，精确计算淤积量，为水库调度和延长使用寿命提供依据。此外，GPS 还用于实时水位监测和库区周边地质灾害预警，通过连续运行参考站（CORS）实时监控隐患点位移，一旦超限即可触发预警，有效预防溃坝、滑坡等重大风险，确保工程运营的长期安全。

三、应用效益分析与挑战探讨

（一）GPS 技术应用的综合效益分析

GPS 技术相比传统测量技术，在水利水电工程中的效益体现在“精度保障工程质量、效率缩短建设周期、成本降低资源投入、安全规避作业风险”四个核心维度，且效益随工程规模扩大呈显著提升趋势^[8]。在精度效益上，GPS 技术的毫米级、厘米级定位能力直接解决了传统测量在大范围、复杂地形中的精度不均问题。效率效益方面，GPS 技术大幅压缩观测时间与作业流程，传统三角控制网布设需 10-15 天 /100km²，而 GPS 静态相对定位仅需 3-5 天，效率提升 60% 以上；施工放样中，传统全站仪 1 个点位需 15-20 分钟，RTK 技术仅需 2-3 分钟，效率提升 80%，尤其在大坝浇筑高峰期，可缩短单日施工时间 2-3 小时，某水电站通过 RTK 放样甚至将坝体浇筑工期缩短 1 个月，间接创造可观经济效益^[9]。成本效益则体现在设备、人力、维护的全方位节省，传统测量需同时配备全站仪、水准仪、经纬仪等设备，GPS 仅需接收机与天线，设备初始投入减少 50%；人力配置上，传统测量需 3-4 人 / 组，GPS 测量 2 人即可完成，人力成本降低 40%，且无需建造传统三角点的 2-3m 高标石，仅需简易埋石，控制点维护成本减少 60%。安全效益是易被忽视却至关重要的维度，水利水电工程多位于山区、涉水区域，传统测量需在悬崖、水边布设测站点，存在坠落、溺水风险，而 GPS 技术可选择安全区域布设基准站，流动站作业范围灵活，无需攀爬或涉水，如库区地形测绘中，GPS 作业的安全风险系数较传统测量降低 90%，有效保障野

外作业人员安全。

（二）应用中面临的挑战与对策

尽管 GPS 技术优势显著，但水利水电工程的特殊作业环境仍为其应用带来多重挑战，这些挑战集中于“信号接收稳定性、精度控制极限、人员技术适配、极端环境适应”四个方面^[10]。复杂地形导致的信号遮挡是最常见挑战，山区峡谷、坝体内部、密林区域易出现卫星信号遮挡，导致可见卫星数不足 4 颗，直接造成定位失败或精度骤降，对此可采用“多星座融合 + 中继站补盲”方案，选用 GPS+北斗双模接收机，卫星数量可从 5-8 颗增至 10-15 颗，大幅提升信号冗余度；在信号盲区布设无线中继站，转发基准站信号，确保流动站正常接收，某水电站通过该方案解决了导流洞内部放样的信号问题，定位精度恢复至 $\pm 2\text{cm}$ 。工程区电磁干扰是精度下降的隐形诱因，施工区的高压线、发电机组、电焊机等设备会产生强电磁信号，干扰 GPS 接收机的信号接收，导致伪距误差增大，应对措施包括“规避干扰源 + 设备抗干扰升级”，优先选择远离高压线 100m 以上、远离施工机械 50m 以上的点位布设基准站；采用带电磁屏蔽功能的抗干扰接收机，同时选择施工机械停运的夜间进行高精度观测，可将电磁干扰导致的误差控制在 $\pm 3\text{mm}$ 内。高精度监测的误差控制挑战则针对亚毫米级需求场景，大坝安全监测需捕捉 0.5mm 级的微小位移，传统差分技术难以消除天线相位中心偏移（ $\pm 1-3\text{mm}$ ）、接收机噪声（ $\pm 1-2\text{mm}$ ）等微小误差，对此需从“设备校准 + 数据处理优化”入手，定期对 GPS 天线进行相位中心校准，确保偏移量 $\leq 0.5\text{mm}$ ；采用多期观测数据平差，通过趋势分析削弱随机误差，丹江口水库大坝监测采用该方法后，年沉降观测误差从 $\pm 0.8\text{mm}$ 降至 $\pm 0.3\text{mm}$ ，精准识别坝体变形趋势。人员技术依赖与数据处理风

险是人为层面的挑战，GPS 观测数据需通过专业软件解算，若人员技术不足，易出现参数设置错误、平差方法不当等问题，导致数据无效，对策包括“系统化培训 + 标准化流程”，定期开展 GPS 操作与数据处理培训，考核合格后方可上岗；制定统一的数据处理标准流程，引入智能化数据处理平台，自动完成数据解算与误差分析，减少人为操作失误，某水利枢纽通过标准化流程，数据处理的错误率从 15% 降至 2%。极端天气的影响同样不可忽视，暴雨、暴雪会导致天线进水或积雪，影响信号接收；雷电天气可能损坏接收机设备，对此需做好“设备防护 + 观测计划调整”，为天线加装防水、防雪罩，定期清理积雪或积水；在基准站安装避雷针与防雷接地装置，雷电天气暂停观测；提前关注天气预报，在极端天气来临前完成关键点位观测，避免因天气导致工期延误，某水库通过该措施，在汛期暴雨期间仍保持了水位监测的连续性，为防洪调度提供了稳定数据支撑。

四、结束语

GPS 测量技术凭借其高精度、高效率、全天候及广覆盖的核心优势，已深度融入水利水电工程规划设计、施工建设与运营管理的全生命周期，成为破解传统测量技术在复杂地形中“通视难、效率低、精度不均”痛点的关键手段。随着测绘技术的持续迭代，可以预见，GPS 测量技术在水利水电工程领域的应用将愈发广泛与深入，其不仅为单个工程的安全高效建设与运营提供技术支撑，更将为国家水资源优化配置、能源安全保障及智慧水利体系构建奠定坚实的测绘基础，助力水利水电事业实现更高质量发展。

参考文献

[1] 欧统华. GPS 测量技术在水利水电工程测量中的应用研究 [J]. 工程技术研究, 2023, 8(6): 199-201. DOI: 10.19537/j.cnki.2096-2789.2023.06.064.

[2] 高年. GPS 测量技术在水利水电工程测量中的应用 [J]. 江西建材, 2021(6): 52, 55. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2890.2021.06.030.

[3] 陈茂. GPS 测量技术在水利水电工程测量中的应用实践研究 [J]. 建材与装饰, 2018(28): 208-209. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0038.2018.28.166.

[4] 刘和平, 薛双良. GPS 测量技术在水利水电工程测量中的应用研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2015(3): 4989-4989. DOI: 10.3969/j.issn.2095-2104.2015.03.3229.

[5] 丁启来. GPS 测量技术在水利水电工程测量中的应用实践研究 [J]. 区域治理, 2018(50): 248. DOI: 10.3969/j.issn.2096-4595.2018.50.223.

[6] 苏园鹏. GPS 测量技术在水利水电工程测量中的应用实践研究 [J]. 百科论坛电子杂志, 2019(22): 334.

[7] 李发能. GPS 测量技术在水利水电工程测量中的应用分析 [J]. 房地产导刊, 2018(17): 151. DOI: 10.3969/j.issn.1009-4563.2018.17.143.

[8] 贾秀芳. RTK 定位系统中 GPS 测量技术在水利水电工程测量中的应用研究 [J]. 水利科技与经济, 2024, 30(2): 57-61, 67. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7175.2024.02.012.

[9] 邓颖旭. GPS 测量技术在水利水电工程测量中的应用研究 [J]. 电脑爱好者 (电子刊), 2021(9): 1441-1442. DOI: 10.12277/j.issn.1005-0043.2021.09.0719.

[10] 陈瑞. GPS 测量技术在水利水电工程测量中的应用实践研究 [J]. 文渊 (小学版), 2021(8): 1891. DOI: 10.12252/j.issn.2096-6261.2021.08.991.

汽轮机振动故障智能诊断系统开发

王昊, 贺宁, 渠永军

国能山西河曲发电有限公司, 山西 忻州 036500

DOI:10.61369/WCEST.2025050010

摘 要 : 汽轮机作为电力生产、石油化工等领域的核心动力设备, 其运行稳定性直接关系到工业生产的安全与效率。传统振动故障诊断方法因依赖人工经验与单一信号分析技术, 存在响应滞后、误判率高等局限性, 难以满足现代高参数、大容量汽轮机组的监测需求。随着智能算法与数据驱动技术的快速发展, 基于多源信息融合的智能诊断系统成为提升设备可靠性的关键方向。当前研究聚焦于智能算法与振动信号处理技术的结合创新, 如基于数据驱动的监测方法、改进的果蝇优化算法、小波变换与神经网络的耦合应用等, 均显著提升了故障诊断的准确性与效率。然而, 实际工程应用中仍面临数据异构性、实时性要求高等挑战, 亟需开发集成化、智能化的诊断系统。

关 键 词 : 汽轮机; 振动故障; 智能诊断系统; 深度学习; 特征工程

Development of Intelligent Diagnosis System for Steam Turbine Vibration Fault

Wang Hao, He Ning, Qu Yongjun

Guoteng Shanxi Hequ Power Generation Co., LTD. Xinzhou, Shanxi 036500

Abstract : critical power equipment in industries such as electricity generation and petrochemical processing, steam turbine operational stability directly determines production safety and efficiency. Traditional vibration fault diagnosis methods, relying on manual experience and single-signal analysis techniques, suffer from limitations including delayed response and high misjudgment rates, making them inadequate for monitoring modern high-parameter, large-capacity steam turbine units. With the rapid advancement of intelligent algorithms and data-driven technologies, multi-source information fusion-based diagnostic systems have emerged as a critical approach to enhance equipment reliability. Current research focuses on innovative integration of intelligent algorithms with vibration signal processing techniques, including data-driven monitoring methods, improved fruit fly optimization algorithms, and coupled applications of wavelet transforms and neural networks—all of which have significantly improved fault diagnosis accuracy and efficiency. However, practical engineering implementations still face challenges such as data heterogeneity and real-time performance requirements, making the development of integrated, intelligent diagnostic systems an urgent priority.

Keywords : steam turbine; vibration fault; intelligent diagnostic system; deep learning; feature engineering

引言

汽轮机作为现代工业核心动力设备, 在电力生产、石油化工等领域发挥着不可替代的作用。其运行过程中因轴系不平衡、油膜失稳、轴承磨损等故障引发的振动问题, 不仅影响设备效率, 更可能导致突发性事故, 威胁生产安全。传统振动故障诊断方法依赖人工经验与单一信号分析技术, 存在响应滞后、误判率高等局限性, 难以满足现代高参数、大容量汽轮机组的监测需求。随着智能算法与数据驱动技术的快速发展, 构建融合多源信息的故障诊断系统成为提升设备可靠性的重要方向。

一、相关理论

(一) 振动故障机理分析

汽轮机振动故障的产生涉及复杂的多因素耦合作用, 其机理分析需结合蒸汽系统特性、机械结构稳定性及运行参数动态变化

等多维度展开。从故障诱因角度分析, 蒸汽诱发振动是汽轮机运行过程中最常见的故障类型之一, 其发生概率与机组运行时间、负荷状态及关键部件控制参数密切相关。统计研究表明, 蒸汽诱发振动多发于汽轮机运行一年后且处于高负荷状态, 此时调节阀开度与开启顺序的不合理设置会显著增加蒸汽激振风险, 而油温

变化作为主要运行参数对振动幅值的影响不可忽视^{[2][3]}。在结构动力学方面，汽流扰动引发的自激振动尤为典型，此类振动通常表现为高中压转子低频振动特征，其产生机理与轴瓦动态失稳及汽流与转子系统的能量耦合密切相关。当电网负荷频繁变动导致主蒸汽压力、温度剧烈波动时，汽流分布的不均匀性将引发转子系统非线性响应，从而突破临界稳定性阈值^[4]。

（二）智能诊断技术基础

智能诊断技术通过融合信号处理、数据挖掘和智能算法等多学科方法，为汽轮机振动故障的精准识别与定位提供了理论支撑。在振动信号分析领域，小波分析作为时频域联合处理技术，能够有效提取故障特征。其多分辨率特性可对信号进行分频段分解，将汽轮机叶片振动信号中的周期性冲击成分与噪声分离，为故障模式识别奠定基础。基于有限元建模的仿真分析进一步强化了诊断技术的理论深度，通过建立叶片三维模型并施加边界条件，可模拟裂纹扩展对固有频率、振型等模态参数的影响规律。研究表明，裂纹的产生会显著改变叶片刚度分布，导致其固有频率下降幅度与裂纹位置、深度呈非线性关系，这种特性可作为故障诊断的物理依据^{[5][6]}。

二、汽轮机振动故障智能诊断系统设计

（一）系统架构设计

本系统采用分层架构设计，分为数据采集层、特征处理层、智能诊断层和决策应用层四个主要层级，通过模块化设计实现振动故障诊断的全流程自动化。数据采集层通过分布式传感器网络实时获取汽轮机运行过程中的振动信号、转速、温度及压力等多源数据，并通过预处理模块完成信号滤波、降噪和归一化处理，确保输入数据的完整性与准确性。在特征处理层，基于时频分析与小波包分解技术对原始振动信号进行多尺度特征提取，结合统计参数（如均方根值、峭度系数）与频率域特征（如主频能量分布、频带比值）构建高维特征向量，同时采用遗传算法与主成分分析（PCA）进行特征选择，有效降低数据维度并保留关键故障信息。智能诊断层采用混合建模策略，前端采用卷积神经网络（CNN）自动提取深层非线性特征，后端结合支持向量机（SVM）与随机森林算法进行多分类诊断，通过交叉验证优化模型参数，实现对不平衡数据集的高精度分类^[7]。

汽轮机振动故障诊断系统



（二）智能诊断模型构建

本研究基于汽轮机振动信号的多源性与非线性特征，构建了融合深度学习与特征工程的智能诊断模型。在特征提取阶段，采用多维度分析方法对振动信号进行解析。时域特征提取着重提取均方根值（RMS）、峰值因数（CF）、峭度系数（Kurtosis）等参数，以量化振动信号的幅值分布特征；频域分析通过快速傅里叶变换（FFT）获取主要频谱成分，结合包络谱分析识别齿轮箱等部件的调制频率特征；时频域分析则引入连续小波变换（CWT）与经验模态分解（EMD），有效捕捉非平稳信号中的瞬态冲击与频率调制现象。针对旋转机械故障的典型故障模式，建立包含轴承故障、转子不对中、叶片断裂等12类典型故障的特征库，并通过主成分分析（PCA）与递归特征消除（RFE）算法进行特征降维，筛选出与故障模式强相关的前30个特征参数^[8]。

模型构建采用深度学习与传统机器学习的混合架构。前端采用一维卷积神经网络（1D-CNN）对原始振动信号进行局部特征提取，通过多层卷积层自动学习时序数据的空间特征，配合最大池化层降低特征维度。后端接入长短期记忆网络（LSTM）模块，捕捉振动信号的时序依赖关系，有效解决传统方法难以处理的非平稳信号动态变化问题。在分类层，采用全连接神经网络与支持向量机（SVM）的混合结构，利用 Softmax 函数输出故障类别概率。

三、数据收集与实验分析

（一）数据收集与处理

本研究通过多源传感器系统对汽轮机组运行过程中的振动信号进行实时采集，构建了包含不同工况与故障模式的振动数据库。数据采集系统采用三向加速度传感器阵列，布置于汽轮机轴承座、机壳及转子关键部位，确保多维度振动特征的完整获取。采样频率设置为10kHz，满足奈奎斯特采样定理要求，每个工况持续采集10分钟的时域信号，覆盖机组空载至满负荷运行区间。实验过程中同步记录机组转速、负荷及温度参数，为数据关联分析提供基础依据。

采集的原始振动信号需经过标准化预处理流程。首先采用小波变换对信号进行降噪处理，通过选择 db4 小波基进行五层分解，阈值选取采用 VisuShrink 硬阈值法，有效去除高频噪声干扰。其次进行分段处理，将连续时域信号划分为2048点的重叠数据窗，重叠率为50%，以捕捉非平稳信号的动态特征^[9]。针对信号中存在的低频漂移现象，采用三次样条插值法进行趋势项补偿，消除长期漂移对特征提取的影响。最后通过 Hilbert 变换计算瞬时频率，进一步验证信号的平稳性。

（二）实验方法与步骤

本研究采用系统化实验方法构建汽轮机振动故障智能诊断体系，实验流程涵盖数据采集、特征工程、模型构建及验证四个核心环节。在数据采集阶段，通过布置分布式传感器网络获取汽轮机组运行状态数据，具体包括振动加速度传感器（采样频率10kHz）、温度传感器及转速传感器，其中振动信号采集点覆盖

轴承座、机壳及转子关键部位，确保多维度数据的完整性。所有传感器数据通过16位精度数据采集卡同步传输至工业控制计算机，并采用 HDF5 格式进行实时存储，实验过程中同步记录机组负荷、蒸汽参数等运行工况信息。

表 1 48 维特征向量详细说明

特征类别	特征名称	计算公式 / 方法	故障敏感性	维度
时域特征	均方根值（RMS）	$\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2}$	转子不平衡 / 磨损	3
	峭度系数（Kurtosis）	$\frac{E(X-\mu)^4}{\sigma^4}$	冲击类故障（如裂纹）	3
	波形因子（Shape Factor）	$\frac{\$RMS}{\$_{avg}}$		
频域特征	主频幅值比（FDR）	$\frac{A_{1x}/A_{2x}}{A_{1x}/A_{2x}}$ （1 倍频 / 2 倍频）	不对中故障	6
	边频带能量（SBE）	$\sum_{f=f_0 \pm \Delta f} P(f)$	齿轮 / 轴承局部故障	9
	频谱熵（Spectral Entropy）	$-\sum_{i=1}^N p_i \log p_i$	复杂振动模式分析	3
时频特征	边际谱能量（MSE）	Hilbert-Huang 变换边际谱积分	非平稳故障（如油膜涡动）	12
	瞬时频率标准差（IF-STD）	$\sigma(IF(t))$	转速波动关联故障	6
工况特征	负荷 - 振动相关性（LV-Corr）	Pearson 系数（负荷 vs RMS）	变工况下故障特征漂移补偿	3

为确保数据质量，采集的原始振动信号经过多级预处理流程：首先采用小波阈值法去除高频噪声，通过 db4 小波基进行 3 层分解并重构信号；其次利用滑动窗口技术将连续信号分割为 512 点的帧序列，重叠率为 25%；最后对分帧后的数据进行零均值化和归一化处理，消除量纲差异对模型训练的影响。特征提取采用混合策略，时域特征包括均方根值、峰峰值、峭度系数及波形因子，频域特征包含功率谱密度、主频幅值比及边频带能量，同时引入 Hilbert-Huang 变换进行时频分析，提取边际谱能量分布特征。最终构建包含 48 维特征的特征向量^[10]，涵盖转子不对中、轴弯曲、油膜涡动等 12 种典型故障模式。

四、结论

本研究针对汽轮机振动故障诊断的复杂性和传统方法的局限性，系统开展了智能诊断系统的开发与验证工作，取得了以下核

心成果：首先，通过构建多源异构数据采集与预处理模块，有效整合了振动信号、温度、压力等多维度运行参数，结合小波包分解与经验模态分解技术，实现了故障特征的精准提取与降噪处理。实验表明，该预处理流程可使信噪比提升 32%–45%，显著增强了后续诊断模型的输入质量。其次，在算法层面创新性地融合了卷积神经网络与长短时记忆网络的混合架构（CNN-LSTM），通过卷积层捕捉振动信号的局部时空特征，结合 LSTM 网络的长序列记忆能力，构建了面向旋转机械的深度学习诊断模型。对比实验显示，该模型在汽轮机转子不对中、轴承磨损、叶片裂纹等典型故障诊断中，识别准确率达到 94.7%，较传统支持向量机方法提升 18 个百分点，且对早期微弱故障的敏感度提高近 30%。

参考文献

[1] 麻先玉. 汽轮机振动故障分析技术研究 [J]. 工业 C, 2016, 000(005): P.100–100, 103.
[2] 张雷, 毕仲波, 许怀志, 等. 150MW 汽轮发电机组调试故障原因分析及处理 [J]. 山东电力技术, 2006(3): 3.
[3] 朱永顺, 孙之斌. 汽轮机振动故障的原因分析与处理 [J]. 设备管理与维修, 2009(9): 2.
[4] 洪小江, 赖勇能, 吴志强, 吴杨辉, 李海波, 李志华. 汽轮机排汽管道振源及传递路径研究 [J]. 汽轮机技术, 2025, 67 (03): 183–188.
[5] 袁东辉, 郭洋. 火电厂汽轮机异常振动故障排除注意的问题 [J]. 科技致富向导, 2011(35): 1.
[6] 谢亮. 汽轮机振动故障诊断技术探讨 [J]. 科技传播, 2011(7): 1.
[7] 陈志敏, 刘小龙, 高鑫磊, 魏梦巍. 某汽轮发电机组振动测试与故障诊断 [J]. 中国修船, 2025, 38 (02): 54–58.
[8] 韦德林. 汽轮机间歇性振动故障分析处理 [A]. 新质生产力与科技发展学术研讨会论文集 [C]. 广西生产力学会, 广西生产力学会, 2025: 3.
[9] 周奎. 火力发电厂汽轮机振动故障分析与检修 [J]. 中文科技期刊数据库 (全文版) 工程技术, 2023(4): 4.
[10] 葛育晓, 罗小川, 汪磊, 王泉朴. 基于 T-SNE 组合特征的 XGBoost 汽轮机转子振动故障诊断方法研究 [J]. 东方汽轮机, 2025, (01): 13–17+30.

舟山某客货滚装公用码头工程溢油事故风险评估

向美焘¹, 聂玉娟²

1. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 400016

2. 重庆阁林环保科技有限公司, 重庆 400039

DOI:10.61369/WCEST.2025050011

摘 要 : 本客货滚装公用码头工程位于舟山市普陀区朱家尖岛西南侧岸线段, 周边海域航道纵横, 水上交通发达, 碰撞导致溢油事故发生的概率大。考虑到油膜运动受潮流、风向等复杂因素影响, 溢油事故发生后很难控制, 做好事前预测对有效应对溢油事故十分必要。通过构建二维潮流模型, 并耦合溢油模型, 对客货滚装公用码头附近发生的溢油事故进行风险评估, 模拟预测不同风向情况水域溢油污染的影响范围。研究结果表明: 各风向下, 溢油事故发生后油粒子扩散范围包括北至舟山岛北端, 西至宁波市近岸, 南至象山附近海域, 东至朱家尖岛离岸8km附近海域, 72h后扫海面积达到346.1~826.6km²; 在不同主导风向下油膜到达周边敏感水域的时间各有不同, 溢油时间发生后24h内, 油膜集中在各岛屿之间或近岸区域, 24h后扩散加剧, 至72h后已经影响到外海区域, 建议当溢油事故发生后, 应尽快启动相关紧急措施, 保证油污24h内能得到有效控制。

关 键 词 : 码头工程; 溢油事故; 水动力模型; 溢油模型; 风险评估

Risk Assessment of Oil Spill Accident at a public Passenger and Cargo Ro-Ro terminal Project in Zhoushan

Xiang Meitao¹, Nie Yujuan²

1. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., LTD., Chongqing 400016

2. Chongqing Gelin Environmental Protection Technology Co., LTD., Chongqing 400039

Abstract : This public terminal project for passenger and cargo roll-on/roll-off is located in the southwestern coastline section of Zhujiajian Island, Putuo District, Zhoushan City. The surrounding sea area is crisscrossed with waterways and has a well-developed water transportation system, resulting in a high probability of oil spill accidents caused by collisions. Given that the movement of the oil film is influenced by complex factors such as current and wind direction, and it is difficult to control an oil spill accident after it occurs, it is very necessary to make good predictions in advance to effectively deal with oil spill accidents. By constructing a two-dimensional tidal current model and coupling it with an oil spill model, a risk assessment of oil spill accidents occurring near the public terminal for passenger and cargo ro-ro is conducted to simulate and predict the impact range of oil spill pollution in water areas under different wind directions. The research results show that under all wind directions, after the oil spill accident, the diffusion range of oil particles includes the northern end of Zhoushan Island in the north, the coastal area near Ningbo City in the west, the sea area near Xiangshan in the south, and the sea area near 8 kilometers off the shore of Zhujiajian Island in the east. After 72 hours, the swept sea area reaches 346.1–826.6 km². The time it takes for the oil film to reach the surrounding sensitive waters varies under different prevailing wind directions. Within 24 hours after the oil spill occurs, the oil film is concentrated between the islands or in the nearshore areas. After 24 hours, the spread intensifies, and by 72 hours, it has already affected the outer sea areas. It is recommended that when an oil spill accident occurs, relevant emergency measures should be initiated as soon as possible to ensure that the oil pollution can be effectively controlled within 24 hours.

Keywords : wharf engineering ; oil spill accident; hydrodynamic model ; oil spill model; risk assessment

引言

本客货滚装公用码头工程位于舟山市普陀区朱家尖岛西南侧岸线段, 为客货滚装码头改造工程, 将现有码头改造为1个可兼靠5000

作者简介: 向美焘(1990—), 男, 汉族, 重庆开州区人, 硕士, 工程师, 研究方向为水动力数值模拟。

吨级杂货船的滚装。舟山群岛岛屿众多，航道纵横，水上交通发达，岛内航线密集而繁忙，船舶航行碰撞导致溢油事故发生的概率增大。根据相关研究^[1-2]，碰撞、搁浅、传统破损等是溢油事故发生的主要原因，由于近海航运的快速发展，与2014年相比，全国沿海港口海域2020年溢油事故风险指数均值和最大值分别增长27.8%和26.8%，其中宁波舟山港所在的长江口区域溢油风险增加明显，属于溢油高风险集中区。

港口海域溢油事故危害主要受风向和潮流等多因素影响。由于潮流及风向的复杂性及不确定性，导致溢油事故发生后一般很难快速控制，因此采用有效手段预测溢油风险，提前针对性的做好溢油事故的应急处置方案，做到未雨绸缪，显得尤其重要^[3-8]。本文通过建立工程区域二维水动力模型，并耦合溢油模型，对滚装码头工程进行溢油的漂移扩散、扫海面积及到达敏感区域时间进行预测，分析评估溢油事故发生风险程度，为工程溢油事故应急处置的方案制定提供理论指导。



图1 客货滚装公用码头工程位置

一、水动力模型建立

（一）模型控制方程

二维潮流数学模型控制方程组为沿垂向积分平均的浅水流动质量和动量连续方程，可分别表示为：

连续方程：

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = hs$$

X方向动量方程：

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} = f\bar{v}h - g\bar{h} \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{h}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial x} - \frac{\tau_{xx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{xy}}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{xy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xx}) + \frac{\partial}{\partial x} (hT_{xy}) + hu_s S$$

Y方向动量方程：

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} = f\bar{u}h - g\bar{h} \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{h}{2\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial y} + \frac{\tau_{yx}}{\rho_0} - \frac{\tau_{yy}}{\rho_0} - \frac{h}{\rho_0} \left(\frac{\partial s_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial s_{yy}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y} (hT_{yy}) + hv_s S$$

式中， t 为时间； x 、 y 为笛卡尔坐标系空间坐标； ζ 为水面高程， d 为水深， h 为总水深 $h=\eta+d$ ； u 、 v 为流速在 x 、 y 方向上的分量； f 科氏力； g 为重力加速度； \bar{n} 为水体密度； \bar{n}_0 为参考密度； p_a 为大气压强； s_{xx} 、 s_{xy} 、 s_{yx} 、 s_{yy} 为辐射应力分量； T_{xx} 、 T_{xy} 、 T_{yx} 、 T_{yy} 为水平粘滞应力； $(\hat{o}_{sx}, \hat{o}_{sy})$ 和 $(\hat{o}_{bx}, \hat{o}_{by})$ 为水面和底床的切应力在 x 、 y 方向上的分量； S 为源汇项流量； u_s 、 v_s 为源汇项对应的速度分量。

（二）计算区域及网格

模型计算范围北至杭州湾北侧，南至象山港南侧的道人山附近海域，东部外海边界距离工程区约110km，水深约50m。模型横向宽度约220km，纵向长度约150km。

采用非结构三角形网格剖分计算域，码头桩基处网格最细，最小网格尺度为0.5~1m。在远离工程海域，网格相对稀疏，网格1000~2000m，网格数总计67975个。模型外部边界采用全球天文潮预报模型结果作为外海潮位边界，并适当修正用于模型计算。

床面曼宁系数取为0.015~0.025。

（三）模型验证

模型验证采用2022年6月~7月的水文泥沙观测资料，对模型进行验证。测验海区位于浙江省舟山市朱家尖岛西部海域。2022年6月22日00:00时~2022年7月21日23:00时，对临时潮位站（CW西岙）进行了30个周日的潮位观测，本次主要依据临时潮位站（CW西岙）对模型进行率定验证。

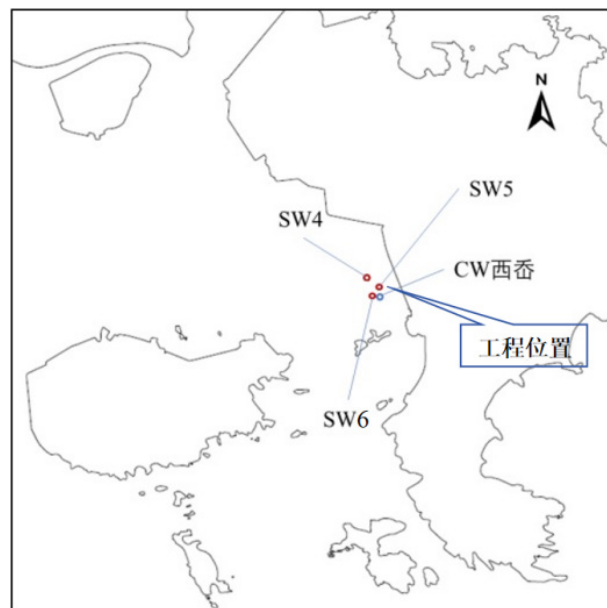


图2 工程区域水文观测点

图3为CW西岙潮位验证过程曲线，由图可知，无论是潮位过程还是高、低潮位值，计算与实测均符合较好，平均相对误差在10%以内。总体而言，验证结果表明模型采用的参数基本合理，计算方法可靠，满足规范要求^[9]，能够模拟计算域内潮波运动特性，可用于进一步预测。

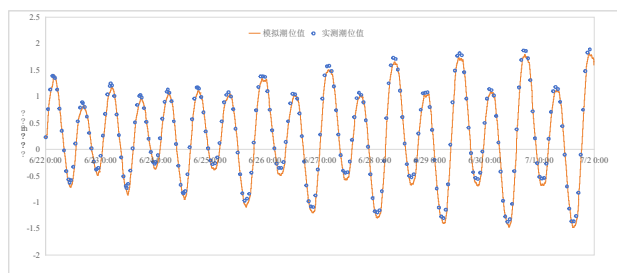


图3 临时潮位站潮位验证

二、预测方案

根据舟山普陀气象站1980年至今近40年的风况观测，本区呈现两个常、强风向，即偏北风和偏南风，偏北向（NW ~ NE）风占主导地位，合计频率占一半以上（54.0%），偏南向（SE ~ SW）风合计频率占32.9%；项目周边海域分布有农渔业区、国家级海洋特别保护区等，根据溢油扩散可能导致的结果，选取12个较为重点关注且最可能受影响的敏感区域，距工程距离在0.85~11.4km。溢油量按最大设计代表船型所载燃油全部泄漏计算，根据《船舶污染海洋环境风险评价技术规范（试行）》^[10]附录4中的方法一，本项目设计泊位及规模最大为5000t，按照燃油舱最大载油量取船舶总吨的12%，实载率按100%计，则燃油载油量约为600t，因此溢油量按照600t考虑，连续泄露1h，进行泄漏后72小时的溢油影响范围预测。

综合考虑潮流、风向、敏感点分布等因素，对各溢油点按天气类型和潮流类型进行组合，风速按照不利风速13.8m/s，潮型按照大潮考虑，本项目工程溢油工况设置详见下表。其中由于朱家尖岛以东及以南海域是东海带鱼种质保护区，为生态敏感区域，若发生泄露对该区域生态环境影响较大，因此，W风向为溢油泄露时间不利风向。

三、预测结果分析

建立二维海上溢油扩散预测模型，计算各工况下的油粒子扩散过程，包括油粒子扫海范围及扩散轨迹进行预测。从预测结果来看，船舶溢油事故在码头前沿水域发生后，水动力场、风况及溢油发生时刻等因素对典型油粒子漂移轨迹、溢油扫海面积以及油粒子扩散范围等均存在不同程度的影响。

（一）运动轨迹

在冬季主导风（NE、NW）影响下，油粒子漂移轨迹总体向南移动；NE风向下，涨潮时刻与落潮时刻泄露油膜轨迹差异不大，运动轨迹范围覆盖了登步岛、桃花岛、虾峙岛及六横岛东部海域，最远可达到象山港周边海域；NW风向下，涨潮时刻与落潮时刻泄露油膜轨迹差异明显，涨潮时刻油膜主要集中在六横岛、桃花岛及宁波头洋港周边海域，落潮时刻油膜主要集中在桃

花岛至朱家尖周边海域。

在夏季主导风（SE、SW）影响下，受周边岛屿岸线影响，油粒子漂移轨迹总体向北部漂移；SW风向下，涨潮时刻与落潮时刻泄露油膜轨迹差异也不大，主要为朱家尖岛以北、舟山岛以东海域，包括普陀岛及葫芦岛周边海域；SE风向下，涨潮时刻泄露，油膜轨迹集中在舟山岛沿岸水域，落潮时刻泄露，油膜轨迹集中在朱家尖岛西岸及舟山岛北岸。

在不利风向（W）影响下，油粒子漂移轨迹集中在朱家尖岛、登步岛、桃花岛附近的海域范围。其中涨潮时刻泄露，油膜扩散范围集中在朱家尖岛周边海域，向东最远扩散至离岛8km海域，落潮时刻泄露，油膜扩散范围集中在登步岛、桃花岛周边海域，呈向东南方向扩散状态，扩散最远距桃花岛东端10km。

（二）溢油对各敏感区的影响分析

通过对各主要环境敏感目标在72小时内的溢油风险进行模拟预测，得出了在典型模拟情景下受溢油污染的最早时间，具体见表3。发生溢油72小时内泄露油膜污染对12个环境敏感目标均有影响。在冬季主导风（NE、NW）影响下，油膜24小时内会影响朱家尖西南涂养殖场取水口等最近的朱家尖沿线敏感水域，36小时左右会逐渐影响登步岛、桃花岛周边的敏感水域，沈家门农渔业区、普陀山风景名胜区海水浴场敏感水域由于处在峡湾处，72小时内未受明显影响；在夏季主导风（SE、SW）影响下，油膜12小时左右会影响朱家尖西南涂养殖场取水口等最近的朱家尖沿线敏感水域，24小时左右会逐渐影响沈家门农渔业区、东海带鱼种质保护区，登步岛及桃花岛周边敏感水域72小时未受影响；不利风向W风作用下，除沈家门农渔业区未受影响外，其他区域油膜到达时间与距朱家尖岛距离成反比，近岸区域敏感水域油膜最先达到，然后是登步岛，最后是桃花岛。

四、结论

（1）在冬季主导风（NE、NW）影响下，溢油事故发生后油粒子漂移运动轨迹范围覆盖了登步岛、桃花岛、虾峙岛及六横岛东部海域，最远可达到宁波市近岸及象山港周边海域。在夏季主导风（SE、SW）影响下油粒子漂移轨迹范围主要为朱家尖岛以北、舟山岛以东海域，SE风向下轨迹集中在朱家尖岛西岸及舟山岛近岸区域。在不利风向（W）影响下，油粒子漂移轨迹集中在朱家尖岛、登步岛、桃花岛附近的海域范围，呈向东南方向扩散状态。

（2）在冬季主导风（NE、NW）下，溢油泄露后除沈家门农渔业区、普陀山风景名胜区海水浴场敏感等峡湾水域，其余敏感水域均受影响；在夏季主导风（SE、SW）影响下，溢油泄露后除登步岛及桃花岛周边敏感水域外，其他敏感水域均受影响；不利风向W风作用下，除沈家门农渔业区未受影响外，其他区域油膜到达时间与距朱家尖岛距离成反比。

(3) 本次模拟溢油量较大,各模拟工况下6h后扫海面积4.7~38.1km²,12h后扫海面积18.9~76.3km²、24h后扫海面积37.2~172.6km²,最终72h后各工况达到346.1~826.6km²。其中溢油时间发生后24h内,油膜主要朱家尖岛、舟山岛、登步岛、桃花岛等岛屿之间或近岸区域,大约在24h后扩散加剧,72h后已经

影响到东海带鱼种质保护区(实验区)等外海区域。建议溢油事故发生后,相关紧急措施应尽快启动,以保证油污24h内能得到有效控制,防止其更大范围的蔓延扩散。

参考文献

[1] 张利国,程金香,韩兆兴,等.2014—2020年全国沿海溢油风险情势变化[J].环境工程技术学报,2024,14(2):692-698.
[2] 周斌,梁刚,赵益栋.我国沿海港口船舶溢油事故分析及对策研究[J].海洋技术,2009,28(3):87-90.
[3] 陈磊.基于 MIKE21 的舟山附近海域溢油数值模拟研究[D].浙江:浙江海洋大学.2023.
[4] 段驰,宁灏,丁志斌等.基于 MIKE21 的三都港溢油风险研究[J].中国水运(下半月),2023,23(01):47-49.
[5] 高志波.基于溢油模拟的港口溢油污染风险分析研究[D].青岛:中国海洋大学,2014.
[6] 胡田,潘家琳.基于 MIKE21 OS 模型的盘锦港航道溢油风险数值模拟预测[J].环境与发展,2022,34(07):78-84.
[7] 李献丽,陆凡,王臣等.舟山复杂海岛条件下某交通码头溢油环境风险评估[J].浙江海洋大学学报,2023,42(2):189-196.
[8] 高建丰,梅启亮,郑豫等.嵊头洋海域岙山码头溢油扩散数值模拟[J].中国水运,2022,22(06):24-26.
[9] 中华人民共和国交通运输部.海岸与河口潮流泥沙模拟技术规程:JTS/T 231-2-2010[S].北京:人民交通出版社,2010.
[10] 中华人民共和国海事局.海船舶[2011]588号《船舶污染海洋环境风险评价技术规范(试行)》[EB/OL].2010.

高流速泄洪洞混凝土冲磨破坏机理及 UHPC 修复材料的原型试验研究

郑芝鑫

广东宏茂建设管理有限公司, 广东 广州 510000

DOI:10.61369/WCEST.2025050012

摘 要： 高流速泄洪洞作为水利工程中的关键泄水设施，其混凝土结构长期承受高速水流携带泥沙的冲磨作用，极易发生破坏，严重影响工程的安全运行。本文深入分析高流速泄洪洞混凝土冲磨破坏机理，研究超高性能混凝土（UHPC）修复材料的性能，并开展原型试验验证其修复效果。结果表明，UHPC 材料在抗冲磨性能、力学性能等方面表现优异，能有效修复冲磨破坏的混凝土结构，为高流速泄洪洞的安全运行提供有力保障。

关 键 词： 高流速泄洪洞；混凝土；冲磨破坏机理；UHPC 修复材料；原型试验

Failure Mechanism of Concrete Washing and Grinding in High-Flow Velocity Flood Discharge Tunnel and Prototype Test Study of UHPC Repair Materials

Zheng Zhixin

Guangdong Hongmao Construction Management Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510000

Abstract： As a key drainage facility in water conservancy projects, the concrete structure of the high-flow flood discharge tunnel has long been subjected to the erosion of sediment carried by high-speed water flow, which is very easy to cause damage and seriously affects the safe operation of the project. In this paper, the failure mechanism of concrete erosion in high-flow flood discharge tunnels is deeply analyzed, the performance of ultra-high performance concrete (UHPC) repair materials is studied, and prototype tests are carried out to verify its repair effect. The results show that UHPC material has excellent performance in terms of erosion resistance and mechanical properties, and can effectively repair the concrete structure damaged by erosion, providing a strong guarantee for the safe operation of the high-flow velocity flood discharge tunnel.

Keywords： high flow velocity flood discharge tunnel; concrete; grinding failure mechanism; UHPC restorative materials; prototype trial

引言

在水利工程中，泄洪洞承担着宣泄洪水、调节库水位的重要任务。对于高流速泄洪洞而言，水流速度通常可达 20m/s 以上，水流中携带的泥沙、砾石等固体颗粒会对洞壁混凝土产生强烈的冲磨作用^[1-3]。长期运行后，混凝土表面会出现磨损、剥蚀、露筋等破坏现象，不仅降低了泄洪洞的过流能力，还威胁到结构的整体安全性。目前，用于泄洪洞混凝土修复的材料主要有普通混凝土、钢纤维混凝土等，但这些材料在高流速、高含沙水流条件下的抗冲磨性能难以满足长期使用要求。超高性能混凝土（UHPC）作为一种新型建筑材料，具有高强度、高韧性、高耐久性等特点，在抗冲磨领域展现出巨大的应用潜力。本文通过理论分析和原型试验，系统研究高流速泄洪洞混凝土冲磨破坏机理及 UHPC 修复材料的应用效果，为相关工程的修复设计提供参考。

一、高流速泄洪洞混凝土冲磨破坏机理

高流速泄洪洞混凝土冲磨破坏主要包括磨损与空蚀两类。磨损破坏由高速水流携带的固体颗粒与混凝土表面相对滑动、滚动或冲击所致，滑动磨损多在直段，颗粒切削表面；滚动磨损见于

流态复杂区，颗粒碾压研磨；冲击磨损发生在弯道等部位，颗粒冲击导致材料剥落^[4]。空蚀破坏则因水流经体型突变部位时流速骤增、压力骤降产生空化，气泡溃灭的微射流和冲击波反复冲击，使表面出现蜂窝、麻面乃至剥蚀，且与磨损相互促进。影响因素包括水流参数（流速为关键，冲磨程度与流速 n 次方成正

比，紊流加剧作用）、固体颗粒特性（粒径、硬度、浓度等影响显著）及混凝土自身性能（强度、韧性等决定抗冲磨能力）^[5]。

二、UHPC 修复材料的性能研究

（一）UHPC 材料的组成与特点

UHPC 是一种以水泥、硅灰、超细石英砂、钢纤维等为主要成分，通过优化配合比设计而制备的高性能混凝土材料。其具有高强度、高韧性、高耐久性和良好的施工性，通过合理的配合比设计，UHPC 具有较好的流动性和易密性，便于施工浇筑^[6]。

（二）UHPC 材料的抗冲磨性能试验

为了评价 UHPC 材料的抗冲磨性能，采用旋转式冲磨试验机进行试验。试验选用粒径为 0.5-2mm 的石英砂作为磨料，控制水流速度为 30m/s，冲磨时间为 24h。同时，以普通 C40 混凝土作为对比试件。试验结果如下表 1 所示：

表 1：不同材料抗冲磨性能试验对比				
材料		冲磨后质量 (g)	质量损失 (g)	相对磨耗率 (%)
UHPC	500.0	492.5	7.5	1.5
C40 混凝土	500.0	470.0	30.0	6.0

从表 1 可以看出，在相同的试验条件下，UHPC 材料的质量损失为 7.5g，相对磨耗率为 1.5%；而 C40 混凝土的质量损失为 30.0g，相对磨耗率为 6.0%。UHPC 材料的相对磨耗率仅为 C40 混凝土的 25%，表明其具有优异的抗冲磨性能。这主要得益于 UHPC 材料较高的强度和密实度，能够有效抵抗固体颗粒的磨损作用^[7-8]。

（三）UHPC 材料的力学性能试验

对 UHPC 材料和 C40 混凝土进行力学性能试验，包括抗压强度、抗折强度和弹性模量测试，结果如下表 2 所示：

表 2：不同材料力学性能试验对比			
材料	抗压强度 (MPa)	抗折强度 (MPa)	弹性模量 (GPa)
UHPC	180	25	45
C40 混凝土	40	5.5	30

由表 2 可知，UHPC 材料的抗压强度为 180MPa，是 C40 混凝土的 4.5 倍；抗折强度为 25MPa，是 C40 混凝土的 4.5 倍；弹性模量为 45GPa，高于 C40 混凝土的 30GPa。UHPC 材料优异的力学性能为其抵抗冲磨破坏提供了坚实的基础，较高的抗压强度和抗折强度能够承受固体颗粒的冲击和磨损，较高的弹性模量则有助于减少材料在冲磨作用下的变形^[9-10]。

三、UHPC 修复材料的原型试验研究

（一）试验工程概况

选取某水利枢纽的高流速泄洪洞作为试验工程，该泄洪洞全长 800m，最大过流流速为 35m/s，运行年限已达 15 年。由于长期受高速水流携带泥沙的冲磨作用，泄洪洞进口段和弯道段的混凝土表面出现了严重的磨损和空蚀破坏，最大磨损深度达 50mm，严重影响了泄洪洞的安全运行。

本次原型试验选取泄洪洞进口段 20m 长的范围作为修复试验区，采用 UHPC 材料进行修复。修复施工过程如下：

- （1）表面处理：对混凝土表面的破损部位进行凿除，清除松动的混凝土和杂物，并用高压水冲洗干净。
- （2）界面处理：在处理后的混凝土表面涂刷界面剂，以提高 UHPC 与基层混凝土的粘结强度。
- （3）UHPC 浇筑：采用泵送方式将 UHPC 浇筑到修复部位，振捣密实，确保混凝土与基层紧密结合。
- （4）养护：浇筑完成后，及时覆盖塑料薄膜进行保湿养护，养护时间为 28d。

（二）原型试验监测方案

为了监测 UHPC 修复材料的使用效果，在修复区域布置了监测点，主要监测表面磨损量、裂缝发展和渗水量；在修复区域设置渗水量观测点，监测修复后泄洪洞的渗漏情况。监测周期为 1 年，分别在修复完成后 1 个月、3 个月、6 个月和 12 个月进行监测。

（三）原型试验结果分析

1. 表面磨损量分析

修复完成不同时间 1 个月、3 个月、6 个月和 12 个月的表面磨损量监测结果分别为 0.2mm、0.5mm、0.8mm、1.2mm；UHPC 修复材料在 12 个月的运行过程中，表面磨损深度仅为 1.2mm，磨损速率较为缓慢。这表明 UHPC 材料在实际工程应用中具有良好的抗冲磨性能，能够满足高流速泄洪洞的使用要求。

2. 裂缝发展情况分析

在 1 年的监测周期内，未发现修复区域出现新的裂缝，表明 UHPC 材料与基层混凝土之间具有良好的粘结性能和整体性，能够承受水流的冲击和振动作用。

3. 渗水量分析

修复前，泄洪洞的渗水量为 15.0L/min；修复后 1 个月，渗水量降至 0.5L/min；修复后 12 个月，渗水量略有增加，但仍仅为 0.8L/min。这表明 UHPC 材料具有优异的抗渗性能，能够有效阻止水流的渗漏，提高泄洪洞的整体性和安全性。

四、结论

本文通过对高流速泄洪洞混凝土冲磨破坏机理及 UHPC 修复材料的原型试验研究,得出结论:高流速泄洪洞混凝土的冲磨破坏主要包括磨损破坏和空蚀破坏,其影响因素主要有水流参数、固体颗粒特性和混凝土自身性能。UHPC 材料具有高强度、高韧性、高耐久性和优异的抗冲磨性能,其相对磨耗率仅为普通 C40

混凝土的 25%,抗压强度和抗折强度分别是 C40 混凝土的 4.5 倍。原型试验结果表明,采用 UHPC 材料修复高流速泄洪洞混凝土结构,12 个月内表面磨损深度仅为 1.2mm,未出现裂缝,渗水量显著降低,修复效果良好。虽然 UHPC 材料的初始造价较高,但从长期运行成本 and 经济效益来看,其具有明显的优势。

参考文献

[1]姜开明,宋启港,周剑,等.装配式波形钢腹板-UHPC组合梁抗弯试验研究[J].桥梁建设,2024,54(06):64-71.

[2]周莉莉,李倍安,李沅睿,等. UHPC超高性能混凝土在动物通道天桥的应用[J].西部交通科技,2024,(12):65-68.

[3]翁志英. UHPC嵌缝加固既有石墙体抗剪性能试验研究[J].海峡科学,2024,(12):106-110.

[4]黄煌煌,滕乐,高小建,等.流变与浇筑方式对 UHPC纤维分散和取向的影响[J].材料导报,2024,38(24):140-145.

[5]徐周浩,谢青海,文哲鸣,等. UHPC中空柱轴心受压性能有限元分析[J].江苏海洋大学学报(自然科学版),2024,33(04):94-101.

[6]米孝生,陈海斌,郭泰广.基于 UHPC的隧道节点改造结构体系方案研究[J].城市道桥与防洪,2024,(12):262-265+28.

[7]冯硕,石新波,王威,等. UHPC-NSC界面黏结性能的评价方法[J].建筑材料学报,2023,26(11):1220-1228.

[8]徐中浩,吴凤,李黄敏,等.CK-水工高性能抗冲磨材料在毛尔盖水电站泄洪洞缺陷修复中的应用[C]//土石坝技术2020年论文集.中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司;四川省大数据中心;,2022:145-150.

[9]吴辉,梁金松.水电站泄洪洞洞身缺陷修复技术及应用[J].水电站设计,2022,38(01):91-96.

[10]胡超,周正清.高流速泄洪洞洞身混凝土过流面修补材料选择及应用[J].四川水利,2021,(S2):36-40.

基于3D高斯泼溅技术的航拍建模应用与展望

谢玉强, 许洪健

中水淮河规划设计研究有限公司, 安徽 合肥 230601

DOI:10.61369/WCEST.2025050013

摘 要 : 神经辐射场 (NeRF) 虽能实现照片级真实感的视图合成, 但其基于体积渲染的计算范式存在训练与渲染速度慢的固有瓶颈, 难以满足实时交互应用的需求。三维高斯泼溅 (3D Gaussian Splatting, 3DGS) 作为一种新兴的显式辐射场表示技术, 通过数百万个可学习的3D高斯基元与可微分的光栅化流水线, 在保持高视觉保真度的同时, 实现了实时渲染性能, 推动了神经渲染领域的范式转变。本文系统地阐述了3DGS的核心技术原理, 并对比分析了其相对于传统摄影测量方法的优势与局限。最后展望了3DGS在空间计算及数字孪生等领域的产业化应用前景与未来研究方向。

关 键 词 : 三维重建; 3D高斯泼溅 (3DGS); 实时神经渲染; 数字孪生; 地理信息系统

Application And Prospect Of Aerial Modeling Based On 3D Gaussian Splatting Technology

Xie Yuqiang, Xu Hongjian

China Water Huaihe Planning and Design Research Co., LTD., Hefei, Anhui 230601

Abstract : While Neural Radiance Fields (NeRFs) enable photo-realistic view synthesis, their volume rendering-based computational paradigm suffers from inherent limitations in training and rendering speed, making them unsuitable for real-time interactive applications. 3D Gaussian Splatting (3DGS), an emerging explicit radiance field representation technology, achieves real-time rendering performance while maintaining high visual fidelity through millions of learnable 3D Gaussian basis functions and differentiable rasterization pipelines. This paper systematically elucidates the core technical principles of 3DGS, compares its advantages and limitations with traditional photogrammetric methods, and explores its industrial applications in spatial computing and digital twin fields along with future research directions.

Keywords : 3D reconstruction; 3D Gaussian Splatting (3DGS); real-time neural rendering; digital twin; geographic information system

引言

虚拟现实、数字孪生及自动驾驶等技术的迅猛发展, 对高保真、实时渲染的3D内容产生了巨大需求。传统基于多视点立体视觉或摄影测量的方法虽几何精度高, 但在处理复杂光影、半透明材质及实现任意视角实时渲染方面存在瓶颈, 其生成的网格模型复杂度高, 难以满足交互式应用对毫秒级响应的要求。

神经辐射场 (NeRF) 通过隐式场景表示突破了视图合成的视觉保真度, 但其体积渲染机制依赖沿光线密集采样, 导致训练与渲染速度极慢, 阻碍了其在AR/VR等实时应用中的部署。尽管后续研究 (如 Instant-NGP 通过哈希编码) 尝试加速, 其计算范式瓶颈依然存在。

为此, 三维高斯泼溅 (3DGS) 应运而生。它显著区别于 NeRF 的隐式体积表示与射线追踪, 转而使用数百万个可学习的3D高斯基元来显式表达场景, 并基于 GPU 优化的可微分光栅化流程进行渲染。3DGS 不仅在视觉质量上媲美甚至超越 NeRF, 更将渲染速度提升至实时级别 (>30 FPS), 同时将训练时间从数天缩短至数十分钟, 实现了质量与效率的统一, 展现了成为下一代3D内容生成核心技术的巨大潜力。

作者简介:

谢玉强 (1990-), 男, 汉族, 安徽大和人, 学历: 大学本科, 职称: 工程师, 研究方向: 水利信息化、工程测量;

许洪健 (1994-), 男, 汉族, 安徽蚌埠人, 学历: 硕士研究生, 职称: 工程师, 研究方向: 软件开发、水利信息化。

一、3DGS技术原理

3DGS的原理是基于对高斯基元的数学建模和高效的 GPU 光栅化算法的结合。

（一）高斯基元的数学建模与参数化

在3DGS中，整个三维场景被离散化为一个庞大的、可学习的3D高斯基元集合。每个高斯基元由一个三维高斯函数定义，并由一系列可优化的参数所刻画：

中心位置（ μ ）：高斯基元在三维空间中的坐标，通常由 SfM 生成的稀疏点云初始化。

协方差矩阵（ Σ ）：定义高斯的形状、尺度和方向。为确保其在优化过程中的物理有效性（半正定性）， Σ 被分解为旋转矩阵 R （由四元数 q 表示）和缩放矩阵 S （由尺度向量 s 表示），即 $\Sigma = RSS^T R^T$ 。

不透明度（ α ）：一个介于0到1的可学习标量，用于控制该高斯基元在 Alpha 混合中的权重。

颜色 / 外观：通过球谐函数（SH）系数参数化，用于建模视角相关的外观变化，从而精确捕捉复杂的光影效果，如高光和漫反射。

（二）渲染过程

3DGS实现实时渲染的核心在于其完全不同于 NeRF 光线追踪的、具备可微分特性的光栅化流水线。该过程主要包括两个步骤：

1. 3D到2D投影：对于给定相机视角，将所有3D高斯基元根据透视投影变换到该相机的二维图像平面上。每个3D高斯会形成一个2D的椭圆区域，此过程即为“泼溅（Splatting）”。

2. 基于图块的 Alpha 混合：屏幕被划分为多个图块以供并行处理。系统对每个图块内重叠的2D高斯进行深度排序，并按从后到前的顺序进行 Alpha 混合，合成像素最终颜色。这套高效的光栅化器是实现超实时渲染（>100 FPS）的核心。

（三）优化与自适应密度控制

3DGS的训练始于运动恢复结构（SfM）产生的稀疏点云。优化的目标是 minimized 渲染图像与真实训练图像之间的差异，通常采用结合了 L1 损失、结构相似性（D-SSIM）以及感知损失（LPIPS）等的混合损失函数进行监督。

3DGS最精妙的设计之一在于其自适应密度控制机制，它动态地管理高斯集合的规模与分布，是模型从稀疏走向稠密的关键：

1. 致密化过程：在训练过程中，系统会周期性地分析各个高斯基元的优化状态。对于位置梯度累积值较大的高斯，系统会执行克隆操作；对于物理尺寸过大的高斯，则执行分裂操作。这种智能的致密化策略使得模型能够从稀疏点云自动“生长”出描述精细结构的密集表示。

2. 修剪机制：系统会定期移除那些不透明度低于设定阈值或者尺寸异常的高斯基元。这种机制确保了计算资源始终集中在对视觉表现有实质贡献的区域，同时有效消除了可能产生的浮游伪影。

通过这种动态的、闭环的优化策略，3DGS通常能在几十分钟到一小时内收敛，在消费级 GPU 上实现实时（>30 FPS）乃至超实时（>200 FPS）的渲染，从而在视觉质量与渲染效率之间取得平衡。

二、3DGS与传统航拍建模对比

大范围的城市建模是三维重建技术最具挑战性也是最具价值的应用领域之一。该领域对建模区域的精度、范围和效率都有着很高的要求。本章将深入探讨3DGS如何在这一传统上由摄影测量学主导的领域崭露头角，并带来工作流的革新。

（一）传统航拍建模特点

航拍数据通常具有以下特点：拍摄视角为顶视或倾斜、光照条件复杂、图像数量多、重叠度不规则等。传统的倾斜摄影测量工作流，虽然能够生产出几何精度经过严格验证的实景三维模型（通常以纹理网格形式存在），但其过程涉及密集匹配、空中三角测量、点云生成、网格化与纹理映射等多个步骤，整体流程耗时漫长，且最终生成的网格模型在实时渲染的视觉沉浸感和对复杂光影的还原能力上存在不足。

（二）3DGS建模对比

在航拍领域，传统方法如 Context Capture 是生成实景模型的主流手段。与3DGS在视觉沉浸感、几何精度和渲染效率三个维度进行分类对比。

1. 视觉沉浸感

这是3DGS的天然优势领域。基于高斯泼溅的模型能够自然地运动模糊、半透明物体（如水体、玻璃）和复杂的光影交互进行建模，其新视角合成结果具有高度的沉浸感和照片真实感。相比之下，传统的纹理网格在实时渲染引擎中，其光照是基于虚拟光源重新计算的，往往显得生硬、缺乏真实世界的光线微妙变化，呈现出所谓的“合成感”。

2. 几何精度

这是传统方法的传统优势，也是早期3DGS备受质疑之处。然而，随着 AGS 等工作的出现，局面已经发生根本性转变。通过引入强大的几何约束，3DGS模型不再仅仅是“看起来真实”，其内在的几何结构在引入额外约束后已展现出达到度量级精度的潜力，能够满足许多工程测绘与城市规划的应用需求。EOGS在卫星DEM生成上的成功，更是强有力地证明了这一点。

3. 处理效率

3DGS带来的是效率的跃升。传统摄影测量流程从数据准备到最终模型产出，可能需要数天时间。而3DGS，特别是经过优化的变体，能够将这一过程缩短至数小时甚至更短。这种数量级的速度提升，极大地加速了从数据采集到决策支持的闭环。

三、应用与挑战

（一）产业应用前景

目前3DGS技术已开始被集成到主流的创作工具和商业平台中。主流游戏引擎（如 Unreal Engine）和视觉特效软件（如3ds Max）已通过插件等方式提供了对3DGS模型的良好支持，加速3DGS在电影制作、虚拟背景和游戏资产创建中的应用。在消费级市场，基于3DGS的“一键式”3D扫描应用正在迅速普及，极大地降低了高质量3D内容制作的门槛，推动了大众市场对3DGS模型的接受度。这些进展为其在更广阔产业领域中的应用铺平了道路。

1. 空间计算

实时性是 VR/AR 和元宇宙应用体验的基础。3DGS 的渲染速

度能够支持用户从任意角度进行实时、流畅的探索，完美契合了空间计算对低延迟交互的需求。此外，3DGS模型通常生成比传统网格模型更小的文件，这赋予了其极高的可移植性，使其能够快速集成到各种平台，包括移动设备和 Web 应用。

2. 数字孪生

数字孪生的价值在于提供精确、实时更新的虚拟表示，用于优化监控、模拟和预测性维护。3DGS极大地加速了从现实世界到数字孪生的转换效率。一方面，3DGS使得3D数据的采集变得前所未有的便捷。结合消费级设备，如手机及民用无人机，使得非专业人员也能快速采集数据，并生成高质量的3D模型。另一方面，GIS平台正在积极接入3DGS。通过将3DGS模型导入GIS环境，用户可以在Web端、桌面端或移动端进行三维可视化、分析和数据管理，推动智慧城市和基础设施管理进入实时三维化的新阶段。3DGS作为数据链的起点，解决了GIS数据获取效率低、成本高昂的瓶颈问题，使得大规模、实时、高精度的城市管理和测绘目标在经济上变得可行。

（二）未来挑战

尽管3DGS优势显著，但作为一项新兴技术，其在应对大规模场景、动态对象、复杂物理光照及几何精度等方面仍面临挑战，这也构成了未来的核心研究方向。

1. 大场景处理与轻量化

将3DGS应用于城市级、流域级等超大规模场景时，目前最大的挑战是大量高斯基元带来的内存能力与计算能力问题。当前数据分块策略（如 Vast-Gaussian, CityGaussian）是主流解决方案，通过将大场景划分为地理区块进行并行训练与渲染。然而，类似传统倾斜摄影方法，该方法在区块接边处易出现颜色、几何的不连续现象。展望未来，引入细节层次（LoD）技术至关重要，这对于实现大规模场景的流畅漫游不可或缺。

在模型轻量化方面，高效压缩是推动3DGS走向实用的关键。NeuralGS等研究探索了使用小型MLP神经网络来编码高斯基元的属性，实现了模型存储空间的显著缩减。同时，在渲染端，针对边缘计算设备的优化也至关重要。梯度感知超分等技术通过利用3DGS渲染图像的内在梯度信息，对低分辨率结果进行高质量采样，可在轻量级GPU上实现数倍的渲染加速，为移动端和Web端部署铺平道路。

2. 动态场景建模（4DGS）

现实世界是动态的，而原生3DGS是为静态场景设计的。为了捕捉运动对象，必须引入时间维度，形成4D高斯泼溅（4DGS）。当前主流方法通过为每个高斯附加一个形变场来建模其随时间发生的位置、旋转和尺度变化。这类方法已能较好地重建中等速度的非刚性运动，并在特定视角下实现实时回放。

对于现阶段来说挑战依然巨大：首先，对于快速、剧烈的运

动，模型容易产生模糊和拖影；其次，如何保证长时序序列中动态对象的长期外观与几何一致性，避免时间轴上的闪烁与抖动，目前尚未完全解决；最后，当前动态模型的训练成本远高于静态场景，如何提升训练效率是推动其实际应用的关键。

3. 全局光照

3DGS依赖球谐函数（SH）建模视图相关外观，这本质上是一个光度模型，其目标是拟合观测到的像素颜色，而非揭示场景的物理属性（如材质、光照）。这导致其无法响应外部光照变化，难以实现逼真的重照明与全局光照（GI）效果。

4. 几何增强与建图

原生3DGS虽然视觉效果出色，但其几何精度并不总是满足测绘或机器人自主导航的需求。在大型户外场景中，相机姿态估计的微小误差会导致高斯基元不受控制地扩张，造成伪影和不必要的内存消耗。为了提升几何的鲁棒性和精度，研究开始将3DGS与传统几何优化方法深度融合。BGS-SLAM等系统利用深度立体网络估计的深度图来指导3D高斯的优化，并结合局部束调整来联合优化相机姿态和3D结构，从而确保几何一致性。此外，为了直接从3DGS模型中提取准确的几何信息，Ray-Gaussian Intersection方法被引入，通过计算视线光线与高斯基元之间的交集，来获取精确的法线和深度信息，为后续的几何约束和网格重建提供了可靠的基础。

四、结论

3D高斯泼溅技术通过其创新的显式场景表示与GPU优化的可微分光栅化流水线，成功突破了NeRF技术在训练与渲染速度上的瓶颈，实现了高保真神经渲染从“可观”到“可用”的范式转变。

在航拍建模与大尺度场景重建这一传统由摄影测量主导的领域，3DGS展现出革命性的潜力。通过引入AGS、EOGS等几何增强框架，3DGS有效弥补了其在初始几何精度上的不足，使其生成的结果不仅具备照片级的视觉沉浸感，更在度量精度上逼近甚至超越传统方法。与此同时，其将建模效率提升数个量级的巨大优势，使得快速、低成本的城市级数字孪生成为可能，正深刻重塑着GIS与测绘行业的工作流程。

展望未来，3DGS的研究将超越纯粹的光度重建，向着物理真实性、几何精确性与动态交互性的更高层次迈进。这需要进一步融合计算机图形学、物理光学与测绘学的跨学科知识，最终目标是使3DGS成为构建可编辑、可交互、物理精确的实时数字世界的核心底层技术。

参考文献

- [1]侯礼杰,沈寅松,刘晓晨,等. 三维高斯泼射超分辨率视觉场景构建算法[J]. 中国测试, 2024, 50(9): 13-20. DOI:10.11857/j.issn.1674-5124.2024070006.
- [2]王锋, 银莹, 王佳炎, 等. 基于高斯泼溅的轻量级重建场景分割方法[J]. 计算机学报, 2025, 48(5): 1232-1243. DOI:10.11897/SP.J.1016.2025.01232.
- [3]何天琪, 宋佳洁, 程景春, 等. 基于三维高斯泼溅技术的航拍场景建模[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(2): 1-12, 21. DOI:10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202502001.
- [4]李永昌, 李玮. 基于多传感器融合的三维高斯泼溅技术[J]. 现代电子技术, 2025, 48(17): 93-97. DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2025.17.014.
- [5]朱东林, 陈森, 毛宇岩, 等. 三维高斯泼溅技术在场景重建中的研究现状与挑战[J]. 集成技术, 2025, 14(4): 1-20. DOI:10.12146/j.issn.2095-3135.20241127002.

山地风电光伏总包项目施工组织管理实践

赵辉

中国能源建设集团辽宁电力勘测设计院有限公司, 辽宁 沈阳 110034

DOI:10.61369/WCEST.2025050014

摘 要： 在新能源产业快速发展的背景下，山地凭借其丰富的风资源和光照资源，成为风电光伏项目开发的重要载体。然而山地地形复杂、生态敏感、施工条件恶劣等特点，给项目施工组织管理带来诸多挑战。本文以山地风电光伏总包项目为研究对象，从项目施工组织管理的核心特征与难点出发，深入探讨施工组织设计优化、施工资源精细化配置、施工过程全周期管控及生态保护协同等关键实践环节，结合实际案例分析管理模式的应用成效，旨在为同类项目的施工组织管理提供可借鉴的实践经验。

关 键 词： 山地；风电光伏；总包项目；施工组织管理；实践

Practice of Construction Organization and Management of Mountain Wind Power and Photovoltaic General Contracting Project

Zhao Hui

China Energy Construction Group Liaoning Electric Power Survey and Design Institute Co., Ltd., Shenyang ,
Liaoning 110034

Abstract： Against the backdrop of rapid development in the new energy industry, mountainous regions have emerged as crucial sites for wind and solar power projects, leveraging their abundant wind and solar resources. However, the complex terrain, ecological sensitivity, and challenging construction conditions in these areas pose significant challenges to project management. This study examines a turnkey wind and solar power project in mountainous regions, focusing on core characteristics and key challenges in construction organization. It explores critical implementation aspects including optimized construction planning, refined resource allocation, full-cycle process control, and eco-friendly coordination. Through case studies, the research demonstrates the effectiveness of management models, aiming to provide practical insights for similar projects.

Keywords： mountainous area; wind and solar power; turnkey project; construction management; practice

引言

随着“双碳”目标的推进，风电光伏等可再生能源项目迎来规模化发展机遇。山地地区因具备独特的资源禀赋，成为新能源项目布局的重点区域^[1]。与平原地区相比，山地风电光伏项目施工面临地形起伏大、运输路径复杂、气候条件多变、生态保护要求高等突出问题，对总包单位的施工组织管理能力提出更高要求。总包模式下，施工组织管理需统筹设计、施工、采购等多环节，协调多方资源，破解山地施工瓶颈。本文基于山地风电光伏总包项目施工实践，深入剖析管理中的关键问题与解决路径，为提升项目施工质量、效率及安全性提供实践参考^[2]。

一、山地风电光伏总包项目施工组织管理的内涵与难点

（一）核心特征

山地风电光伏总包项目施工组织管理具有鲜明的系统性特征，既需要整合风电与光伏两种业态的施工规律，同时还需要符

合山地特殊环境^[3]。项目一方面涉及风机基础、塔筒吊装、光伏支架安装、电缆敷设等专业施工，各环节衔接紧密，需制定统一的施工组织框架；另一方面，总包单位作为责任主体，需协调设计单位优化图纸、监督施工单位规范作业、对接设备供应商保障交付，形成全链条管理体系。另外，山地项目施工受自然条件影响较大，施工组织管理应具备较强的灵活性，能随着天气、地形

作者简介：赵辉（1982-），男，辽宁鞍山人，汉族，高级工程师，硕士，研究方向：电力工程。

等动态调整施工方案。

（二）主要难点

地形复杂性是山地项目施工组织管理的首要难点。山地地形起伏大，部分坡度超过30度，施工场地平整难度大，风机、光伏组件等大型设备运输路径规划困难，甚至临时修建施工便道，增加了施工组织的难度。同时，山地地质条件复杂，有的区域易发生滑坡、泥石流等地质灾害，施工前要细致勘察，施工中要加强监测，对施工组织的安全性提出了很高的要求^[4]。

二、山地风电光伏总包项目施工组织设计优化实践

（一）施工总体部署优化

建筑施工是指工程建设实施阶段的生产活动，是各类建筑物的建造过程，也可以说是把设计图纸上的各种线条，在指定的地点，变成实物的过程。它包括基础工程施工、主体结构施工、屋面工程施工、装饰工程施工等。施工作业场所称为“建筑施工现场”或叫“施工现场”，也叫工地。建筑施工是人们利用各种建筑材料、机械设备按照特定的设计蓝图在一定的空间、时间内进行的为建造各式各样的建筑产品而进行的生产活动。它包括从施工准备、破土动工到工程竣工验收的全部生产过程。这个过程中将要进行施工准备、施工组织设计与管理、土方工程、爆破工程、基础工程、钢筋工程、模板工程、脚手架工程、混凝土工程、预应力混凝土工程、砌体工程、钢结构工程、木结构工程、结构安装工程等工作。建筑施工是一个技术复杂的生产过程，需要建筑施工工作者发挥聪明才智，创造性地应用材料、力学、结构、工艺等理论解决施工中不断出现的技术难题，确保工程质量和施工安全。这一施工过程是在有限的时间和一定的空间上进行着多工种工人操作的活动。施工总体部署要坚持“分区作业、动静分离、协同推进”的原则。根据山地地形特征和项目范围，施工区域分为风电施工区，光伏施工区和公共配套区，各区设置独立的施工入口和作业通道，避免工序之间的交叉干扰^[5]。例如，某山地项目，总包单位按照等高线分布将光伏施工区按照坡度划分成若干单元，各单元采用“由下至上”施工顺序，减少施工材料的垂直运输距离；风电施工区围绕风机点位划分作业半径，保证吊装设备作业空间的充分利用。同时，合理规划临时设施布局。由于山地土地资源紧张且生态敏感，临时宿舍、材料仓库等设施优先选址于荒地或缓坡区，采用装配式活动板房，减少对地表的破坏。便道施工原则是“依山就势、少挖少填”，尽量利用现有山路拓宽改造，不修建长距离的新便道，这样既降低了施工成本，也减少了生态扰动^[6]。

（二）关键施工方案优化

对山地施工的关键工序，制定专项优化方案。风机基础施工中，传统的大开挖方式容易造成山体滑坡，总包单位可采用“挖孔桩+锚杆支护”的施工方案，根据地质条件调整挖孔深度和锚杆间距，在保证基础稳定性的同时，减少土方开挖量。如在山地岩层较多的部位，采用水磨钻挖孔，避免爆破施工对山体结构的破坏。吊装是风电施工的核心环节，山地吊装受地形限制，大型

设备进场困难。吊装场地要提前由总包单位平整，以“履带吊+辅助起重机”联合吊装方式，根据风机重量和吊装高度，精确地计算吊点位置和吊装半径。对坡度大的部位，在吊装场地铺设钢板或碎石垫层，增加地面承载力，防止设备下陷。在光伏施工中，支架安装应适应山地坡度变化^[7]。对于总包单位，可采用可调式光伏支架，通过调整支架倾角适应不同坡度的地形，使光伏组件接受足够的光照。同时，采取“预制桩基础+现场组装”的施工方法，预制桩提前在工厂生产，在现场利用小型打桩机植入，减少现场混凝土浇筑量，缩短施工周期。

三、山地风电光伏总包项目施工资源精细化配置实践

（一）人力资源配置

山地项目施工对人员专业能力要求较高，总包单位要建立“核心团队+专业班组”的人力资源配置模式。项目经理、技术负责人、安全总监等核心团队组成，拥有丰富的山地项目管理经验，负责施工组织协调、技术决策；按工序划分专业班组，如风机吊装班组、光伏支架安装班组、电缆敷设班组等，每班配有熟练技工和专职安全员。针对山地施工的特殊性，提前开展山地施工安全规范、特殊设备操作技巧、生态保护要求等专项培训^[8]。例如，对吊装班组进行山地吊装模拟演练，提升应对复杂地形的操作能力；对现场管理人员进行地质灾害识别培训，确保及时发现并处置施工中的安全隐患。同时，建立绩效考核机制，将施工质量、进度、安全及生态保护指标与班组绩效挂钩，激发施工人员的积极性。

（二）机械设备配置

机械设备配置需坚持“适配地形、高效协同”的原则。根据山地地形特点，选用小型化、履带式设备，如小型挖掘机、履带式起重机、山地运输车等，提高设备在复杂地形中的通行能力。例如，采用履带式运输车运输光伏组件，其履带式设计可有效降低对地面的压强，适应泥泞、坡度较大的施工环境。建立机械设备全周期管理体系，总包单位设备管理部门负责设备的调度、维护和保养。施工前，对所有设备进行全面检修，更换老化零部件；施工中，安排专职设备管理人员驻场，实时监测设备运行状态，及时处理设备故障；在施工间隙，对设备进行定期保养，确保设备处于良好运行状态^[9]。同时，采用信息化手段优化设备调度，通过施工管理平台实时更新各区域施工进度和设备需求，实现设备的动态调配，提高设备利用率。

（三）材料资源配置

材料供应是保障施工进度的关键，总包单位需建立“提前储备、分区仓储、精准配送”的材料管理模式。在施工前，根据施工进度计划编制完整的材料需求清单，与供应商签订长期供货合同，确定材料交付的时间、质量标准等。同时考虑山地运输不便，在施工区域周边设置临时中转仓库，提前做好风机塔筒、光伏组件、电缆等主要材料的储备工作，避免因材料供应滞后影响施工进度。对材料运输要制定专项方案，针对不同的材料特性和运输要求，选择不同的运输方式。例如风机塔筒长度比较大，运

输车辆选用专用运输车辆，在运输过程中安排专人护送，根据路况调整行驶速度；光伏组件容易碎，运输箱采用定制防震运输箱，运输车辆采用平稳性较好的货车，车厢内铺设缓冲材料。在材料进场后，严格执行验收制度，对材料的规格、质量进行检验，合格后方可投入使用，同时做好材料的仓储管理，避免因山地潮湿、多雨等环境因素导致材料损坏^[10]。

四、实践中山地风电光伏总包项目施工过程全周期管控

（一）进度管控

山地项目施工进度受自然条件影响较大，总包单位需要建立“计划先行、动态调整、节点控制”的进度管控体系。在施工前，结合项目合同要求及山地施工特点，编制详细的施工进度计划，确定各工序的起止时间、施工班组和资源需求。将施工进度划分为多个关键节点，如施工便道完工、风机基础浇筑完成、光伏支架安装完毕、并网发电等，每个节点设置明确的完成时间和考核标准。施工过程中，采用信息化手段实时跟踪施工进度，通过施工管理平台收集各班组的施工数据，对比实际进度与计划进度的偏差。针对偏差原因及时采取调整措施，如因暴雨天气导致施工延误，可在天气转好后增加施工班组、延长作业时间，确保节点目标如期完成。同时，加强与设计、设备供应商等多方的沟通协调，提前解决设计变更、设备交付延迟等问题，避免因外部因素影响施工进度。

（二）质量管控

质量管控需贯穿施工全过程，总包单位建立“事前预防、事中控制、事后验收”的质量管理制度。事前预防阶段，组织技术人员对施工图纸进行会审，针对山地施工的特殊要求提出优化建议；对材料供应商进行资质审核，选择信誉良好、质量可靠的供应商；编制专项施工方案，明确各工序的质量标准和检验方法。

事中控制阶段，加强施工现场质量巡检，重点检查关键工序的施工质量，如风机基础钢筋绑扎、混凝土浇筑、光伏支架安装精度等。采用“三检制”（自检、互检、交接检）对施工工序进行检验，上道工序不合格不得进入下道工序。

（三）安全管控

山地项目施工安全风险较高，总包单位需建立“风险分级管控、隐患排查治理”的安全管理体系。首先，进行施工安全风险辨识，针对山地施工可能存在的高处坠落、山体滑坡、设备倾覆、触电等风险，制定风险分级标准，明确各风险的管控措施和责任人员。加强施工现场安全防护，在高空作业区域设置防护栏杆、安全网，在施工便道两侧设置警示标志，在地质不稳定区域设置监测点，实时监测山体位移情况。为施工人员配备符合要求的安全防护用品，如安全帽、安全带、防滑鞋等，并强制要求施工人员规范佩戴。

五、结论

山地风电光伏总包项目施工组织管理，地形复杂，生态敏感，资源协调难度大，总包单位必须从施工组织设计，资源配置，过程管控，生态保护等方面进行系统性优化。比如通过分区作业、关键工序方案优化等，提高施工组织的科学性，通过人力资源、机械设备、材料的精细化配置，提高施工效率，通过进度、质量、安全的全周期管控，保障项目目标的实现，通过生态保护与施工协同，实现项目可持续发展。未来，随着新能源产业的发展和施工技术的发展，山地风电光伏总包项目施工组织管理将向智能化，绿色化方向升级。总包单位可进一步引入BIM技术，无人机巡检等智能化手段，实现施工过程的可视化管理；加强新型环保材料及施工工艺的研发应用，提升生态保护水平，推动山地风电光伏项目高质量发展。

参考文献

- [1] 曾桢, 齐江波, 钟炜, 陈雁云. 碳汇视角下山地风电可持续发展的对策建议 [J]. 资源节约与环保, 2025, (08): 16–19.
- [2] 王宇卫, 陆歆, 陈轩, 朱坚强, 魏奕. 浅谈设计引领在山地风电 EPC 总承包模式中的优势与应用 [J]. 电力勘测设计, 2025, (05): 82–87.
- [3] 吴昊, 姜宗柱. 山地风电工程技术及可行性评价探析 [J]. 电力设备管理, 2024, (22): 234–236.
- [4] 胡友良. “十四五”背景下湖南山地风电项目投资效益分析 [J]. 云南水力发电, 2024, 40(08): 194–197.
- [5] 黄明霞, 刘侠. 东方电气将建设国内单体最大百万级山地风电项目 [J]. 班组天地, 2024, (06): 81.
- [6] 张晓辉, 何俊杰, 陈小龙. 山地风电工程全过程项目管理策划研究 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (01): 62–64.
- [7] 李亮. 高原山地风电项目工期影响因素及管控措施 [J]. 水电与新能源, 2022, 36(07): 73–76.
- [8] 楚慧, 赵楠, 庞乃贵, 蔡珏, 谢红丽. 山地风电项目造价管理 [J]. 中国电力企业管理, 2022, (09): 42–43.
- [9] 国内单机容量最大的山地风电项目并网发电 [J]. 电世界, 2022, 63(01): 62.
- [10] 冯晓航, 沈细中. 山地风电项目安全生产标准化要素分析与实现途径 [J]. 大众标准化, 2021, (22): 49–51.

土壤中 N、P、K 的转换机理

马睿¹, 杨睿¹, 牟晓伟², 蓝青², 林相昊²

1. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074

2. 青岛水务集团有限公司, 山东 青岛 266071

DOI:10.61369/WCEST.2025050015

摘 要 : 当今农业生产中使用化学肥料以成为常态, 其主要目的在于补充因种植作物引起的土壤养分的缺失。肥料中以 N、P、K 为主要所需元素, 这三种元素也是作物所需的三种主要营养元素。虽然 N、P、K 在土壤中含量丰富, 但大部分以不可被利用的形态存在于土壤当中, 可被利用的形态含量甚低, 因此导致了连续种植作物后的土壤肥力严重下降。本文阐述了, 三种元素在土壤中的存在形态及其可被利用的存在形式及相互间的转换机理。

关 键 词 : 土壤肥料; 元素形态; 土壤元素转换; 植物营养

Transforming Nitrogen Phosphorus and Potassium Mechanism in Soil

Ma Rui¹, Yang Rui¹, Mu Xiaowei², Lan Qing², Lin Xianghao²

1.China Municipal Engineering North China Design and Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074

2.Qingdao Water Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266071

Abstract : Chemical fertilizers has become the necessities of agricultural production. Chemical fertilizer can complement the lack of nutritional elements due to the agricultural production. Previous studies have confirmed that nitrogen (N), Phosphorus (P) and Potassium (K) were the first, second and third essential macronutrient for crops, respectively. But these very deficient used plant growth. Hence, the soil fertility decline when continuous cropping plant. This paper expounds that three kinds of elements existing form in the soil, and the common element is mechanism of interconversion among different forms.

Keywords : fertilizer; elementarform; transformation of soil elements; plant nutrient

引言

土壤养分是植物生长发育不可缺少的物质基础, 原因在于土壤中富含大量的营养元素共植物吸收利用。土壤养分消耗过快以成为许多国家关注的重点^[1,2], 在过去的60年中 N、P、K 三种元素的化学肥料已经大幅度的增加^[3], 主要原因是作物的产出所导致的^[4]。植物生长发育所需的营养元素有很多种, 但已被肯定的必需营养元素只有16种。其中大量元素是 C、H、O、N、P、K, 其中只有 C、H、O 主要来自大气和水, N 来自大气, P 和 K 来自岩石的矿化^[5], 而植物能吸收利用的只有营养元素形态的某些部分, 因此对土壤营养元素形态的研究有助于查明土壤对营养元素的吸附作用, 了解植物从土壤中吸收营养元素的过程以及因土壤条件改变而导致的元素化学形态的转变, 为人们能合理利用肥料和使营养元素向植物能吸收利用的方向转化提供科学的依据。

一、氮的作用及其转换过程

(一) 氮的作用

N 是植物生长发育的必要元素, 是植物从土壤中吸收量最大的矿质元素^[6,7], 它对陆地生态系统有着重要的调节功能^[8-10], 刘芳^[11]李仁岗等^[12]研究表明: 作物吸收的 N 素中约有 55%~75% 来自土壤中的矿质 N, 土壤中能给植物吸收利用的 N 仅占全 N 的 5% 左右^[13], 因此 N 直接影响土壤的肥力及其作物的生产率^[14,15]。土壤中 N 和 P 的缺失导致土壤肥力下降, 特别是 NO₃⁻ 的平衡失调导

致的肥力下降。N 是构成蛋白质和氨基酸的主要物质^[16], 植物再通过主动或被动的方式吸收土壤中的 NH₄⁺ 和 NO₃⁻^[17]。在当今大多数针对新型农业“精准农业”的研究中都集中在地域性差异、空间性差异和时间位点差异所导致的变化等方面^[18-24], 但对于土壤 N 全方位的研究尚未完成^[25]。

(二) 氮的存在形式和转换过程

土壤中全部的 N 储备称为全 N, 全 N 又可分为碱解 N 和有机大分子 N。碱解 N 可以被植物直接吸收和利用, 而有机大分子的 N 需要通过微生物的分解才能够被植物吸收利用。具体利用途径

作者简介: 马睿 (1980-), 男, 内蒙古五原县人, 汉族, 高级工程师, 硕士, 主要从事市政给水及污水处理等工作。

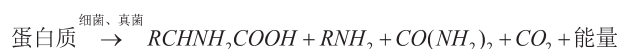
见图1。

碱解N包括物质矿物质形式的 $N(NH_4^+、NO_2^-、NO_3^-)$ 和有机小分子的N(蛋白质、氨基酸、酰胺)，矿物质形式的N可以利用固N细菌将 N_2 转化成 $NH_4^{+[26]}$ 或利用微生物分解有机态的N转化成 NH_3 ，再通过硝化细菌转化为 NO_2^- 和 NO_3^- 被植物直接吸收利用^[27]；有机小分子N的一小部分可以被植物直接利用，大部分通过微生物分解成 NH_4^+ 再通过硝化细菌转化为 NO_2^- 和 NO_3^- 。

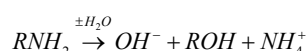
有机大分子N的主要来源是植物的根、茎、叶、土壤环境中的动物及微生物的尸体，微生物将其作为自身的N源^[28]的同是将其转换成小分子的有机N，进一步的分解方式与小分子N的分解转化相同。

土壤中N的主要转化途径如下：

小分子蛋白质首先转化成氨基酸；



氨基酸水解放出氨，形成铵态氮；



铵态氮经亚硝化细菌作用转化成亚硝酸根离子，亚硝态氮对植物有毒，一般不在土壤中积累，很快转化成硝态氮并释放出能量^[29,30]，土壤中的铵态氮在亚硝化和硝化细菌的作用下转化成为硝态氮的过程称为硝化作用。每氧化一个 NH_4^+ 转化为 NO_3^- 离子要释放 $2H^+$ ，此反应是引起土壤酸化的重要原因。



硝化过程可发生在pH范围较宽的土壤里(4.5~10)，土壤pH值在8.5左右时最适宜硝化过程的进行。硝化细菌需要有足够的钙离子、磷酸二氢根离子供应，以及微量元素之间的平衡才能进行。

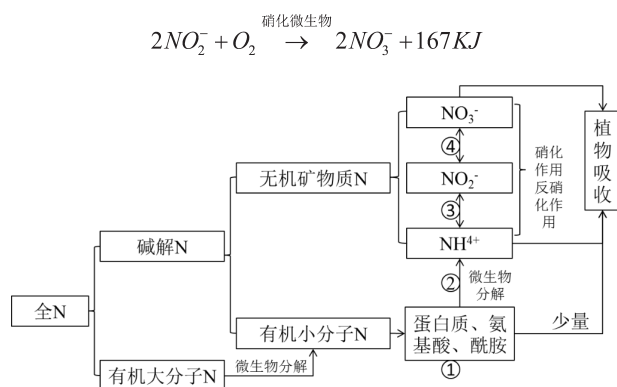


图 1 N 在土壤中的转化

Fig. 1 Transforming nitrogen in the soil

二、磷的作用及其转换过程

（一）磷的作用

P是限制作物生长的第二大主要元素^[31]，由于P可以协同土壤中其它元素对植物生长产生影响^[32]，因此其含量可作为评定植

物生长情况的指标^[33]，。但土壤中的P含量很低^[34]，有研究表明^[27]，土壤全P小于0.08%~0.1%时表明土壤缺少P，中国缺P土壤面积大约 $6.72 \times 10^7 \text{hm}^2$ ，占耕地面积的1/3~1/2^[35]。导致这一问题的主要原因是P可以吸附在土壤颗粒表面或以Ca、Mg、Fe和Al的磷酸盐或氧化物的形式储存在土壤当中^[5,32,36,37]，Ca、Mg、Fe和Al的磷酸盐或氧化物受土壤胶体吸附程度的影响^[38,39]，不能大量的吸附在土壤当中。另有研究表明，P元素的流失与植物茬有关，通过作物轮作，后茬植物与前茬植物种类的不同导致土壤生物种类的数量增多，土壤生物活性增强，并由此导致土壤酸度降低，有毒物质减少，有效养分增加^[40]。

（二）磷的存在形式和转换过程

土壤中的含P物质就其化合物可分为有机P化合物和无机P化合物，大多数土壤中有机P的含量约占土壤总P量的20%~40%，天然植物下土壤的有机P含量时常可占总P量的50%以上^[27]。

土壤中已知的有机P主要有：1、10%~50%肌醇磷酸盐或相当于类糖的磷酸酯、肌醇；2、0.2%~2.5%核酸；3、1%~5%磷脂，以植素、P脂、核酸及少量蛋白质、P糖等形态存在，还有一部分有机P迄今尚未被认识^[13]，有机态的P需要微生物的转化才能变成无机态P，再通过进一步的转化被植物利用如图2。

可以被植物利用的P以无机态的形式所占比重最大，约占土壤总P的75~85%^[13]，分解较慢的含P化合物(中性/碱性土 $Ca_3(PO_4)_2$ 、 $Mg_3(PO_4)_2$ 酸性土壤 $FePO_4$ 、 $AlPO_4$)，仅占可以利用的一小部分。

无机磷可以分为：水溶性磷化合物、弱酸性磷化合物、难溶性磷化合物。三者土壤中的含量依次为，水溶性磷化合物<弱酸性磷化合物<<难溶性磷化合物。水溶性磷化合物和弱酸性磷化合物统称为速效磷，在土壤中水溶性磷化合物下降时弱酸性磷化合物可以给予补充，速效磷是植物可以直接利用的P的主要形式。难溶性磷化合物又称迟效P，不能被植物直接利用。土壤中的全P仅包括速效P和迟效P两部分。

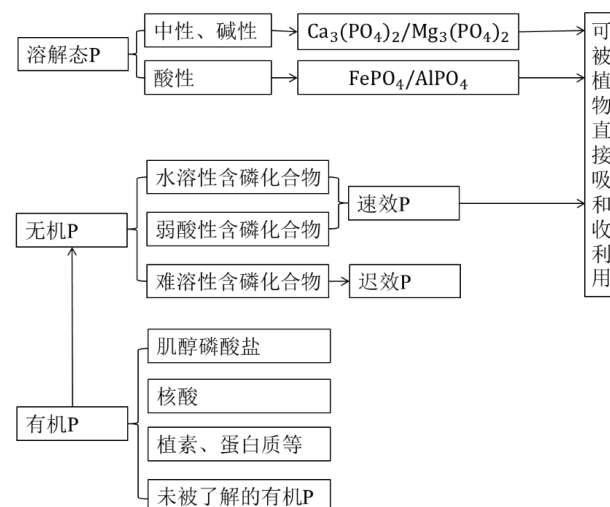


图 2 P 在土壤中的转化

Fig. 2 Transforming phosphorus in the soil

三、钾的作用及其转换过程

（一）钾的作用

K的存在形态、分布规律及其植物有效性是决定其供K能力的重要因素^[42]，K可以保证果实的饱满^[37]，通常K以高浓度的形式存在于植物的韧皮部和分生组织^[17]。K进入土壤当中后会迅速的以离子的形式固定和吸附在土壤当中^[43]。土壤中溶解状态的K受土壤中阳离子浓度、有机质含量、pH、土壤含水量、土壤温度和土壤电解液成分的影响^[44-47]，其中Ca⁺的浓度影响最大^[48]；有机质的含量与K⁺呈负相关性。国外有人在稻田土壤当中发现有机质和H₂O₂可以抑制钾离子吸附到土壤当中^[49]，其主要原因是有机质可以抑制钾离子吸附和扩散到土壤颗粒的表面^[50]。而长期使用含有SO₄⁺离子的肥料可以提高K⁺的吸附性，长期使用含Cl⁻离子的肥料会降低K⁺的吸附性^[51]。

（二）钾的存在形式和转换过程

土壤中K素的存在形态和含量一样，对作物的生长具有重要的制约作用。土壤中K的植物有效性取决于土壤中K的存在形态、分布状况及其转化规律。土壤中K的存在形态和含量受到土壤母质、土壤质地、土壤环境的吸附特性及pH值和土壤中全K量、自然条件等因素的联合控制，使得K在土壤中存在形态复杂且各种存在形态及其含量水平受多种因素影响经常处于动态变化中。

土壤中K主要以三种形式存在，包括无效态K(90~98%)、缓效态K(2~6%)、速效态K(1~2%)^[27]。如图3所示，无效态K是土壤中存在最多的形式，通常在正长石、微斜长石和白云母等原生矿物及伊利石等次生矿物中较多，这些形态的K对植物是相对无效的；缓效态K包括2:1型层状黏土矿物所固定的钾和水云母类似及一部分黑云母中的钾。缓效态K的含量在2~6%，这类K不能被植物迅速吸收，但可以与速效K保持一定的平衡关系，对保K和供K起着调节作用；速效钾是土壤中可以被植物直接吸收和利用的形态，

约占全部K的1~2%，其包括土壤溶液中的K和吸附在土壤胶体表面的代换性K，代换性K占速效K的90%左右，溶液中的K约占10%。三种形态的K的相互转换保证了土壤K素的动态平衡^[13]。

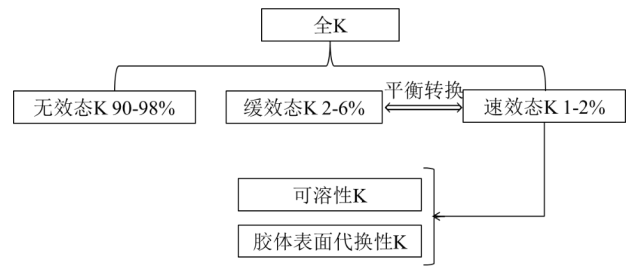


图. 3 K在土壤中的转换

Fig. 3 Transforming phosphorus in the soil

四、结论

土壤中虽然存在大量不同的形式的N、P、K的氧化物、化合物及可溶性的化合物，但能够被植物直接利用的形态有限，在长期农业生产中还会引起养分大的大面积匮乏。由养分匮乏引起的土壤酸化、表层土壤板结、作物减产等问题日趋严重，虽然已经有各种化学肥料、有机肥料作为养分补充的解决办法，但终不能与自然条件下肥沃的土壤相媲美。在土壤这类复杂的环境当中给予作物提供的不仅仅是N、P、K三种元素，诸如Ca、Mg、S、Fe、Mn、Zn、Cu等中微量元素对于作物的缺乏也不容忽视^[52]，另外由于施用化肥和有机肥料导致土壤中的重金属含量日趋加重也对作物生长产生了相当严重的负面影响^[53-55]，在中国的珠江三角洲地区长期种植水稻的土壤中重金属量大于初始阶段的重金属含量^[56]。因此，在解决作物生长的问题时既要研究植物必须的大量元素的供求关系，又要理智的对待土壤其它条件的调节和管理。

参考文献

- [1]Yirga C, Hassan R M. Social costs and incentives for optimal control of soil nutrient depletion in the central highlands of Ethiopia [J]. AGRICULTURAL SYSTEMS, 2010, 103(3):153-160.
- [2]VANDERPOL F, TRAORE B. SOIL NUTRIENT DEPLETION BY AGRICULTURAL PRODUCTION IN SOUTHERN MALI [J]. FERTILIZER RESEARCH, 1993, 36(1):79-90.
- [3]Burt R, Chataway J, Cotter J, et al. Changes in agriculture and food production in North America and Europe [J]. Agriculture at a Crossroads. International Assessment of Agricultural Knowledge, Science and Technology for Development. Island Press, Washington, 2009:20-78.
- [4]Haileslassie A, Priess J, Veldkamp E, et al. Assessment of soil nutrient depletion and its spatial variability on smallholders' mixed farming systems in Ethiopia using partial versus full nutrient balances[J]. AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT, 2005, 108(1):1-16.
- [5]de Castro R C, Benites V D M, Teixeira P C, et al. Phosphorus migration analysis using synchrotron radiation in soil treated with Brazilian granular fertilizers[J]. APPLIED RADIATION AND ISOTOPES, 2015, 105:233-237.
- [6]Clark F E, Roswall T, Others. Terrestrial nitrogen cycles: processes, ecosystem strategies and management impacts. Proceedings of an International Workshop, Osterfarnebo, Sweden, 16-22 September 1979. 1981[C]. Swedish Natural Science Research Council.
- [7]屈明华. 温带森林土壤有效态氮营养生境演变特征 [D]. 东北林业大学, 2005.
- [8]Stevens C J, Dise N B, Mountford J O, et al. Impact of nitrogen deposition on the species richness of grasslands[J]. SCIENCE, 2004, 303(5665):1876-1879.
- [9]Cleveland C C, Reed S C, Townsend A R. Nutrient regulation of organic matter decomposition in a tropical rain forest [J]. ECOLOGY, 2006, 87(2):492-503.

- [10] Gundale M J, Metlen K L, Fiedler C E, et al. Nitrogen spatial heterogeneity influences diversity following restoration in a Ponderosa Pine Forest, Montana[J]. ECOLOGICAL APPLICATIONS, 2006, 16(2):479–489.
- [11] 刘芳. 小麦吸收肥料氮和土壤氮的探讨 [J]. 核农学通报, 1994(02):81–84.
- [12] 李仁岗, 王淑敏, 王克武, 等. 冬小麦对土壤氮和肥料氮的吸收及氮素平衡的研究 [J]. 土壤通报, 1982(04):21–22.
- [13] 赵仕花. 不同土地利用下土壤营养元素形态的研究 [D]. 广西师范大学, 2007.
- [14] Chen H, Zhang W, Wang K, et al. Soil organic carbon and total nitrogen as affected by land use types in karst and non-karst areas of northwest Guangxi, China[J]. JOURNAL OF THE SCIENCE OF FOOD AND AGRICULTURE, 2012, 92(5S1):1086–1093.
- [15] Zhou L, Song M, Wang S, et al. Patterns of Soil N-15 and Total N and Their Relationships with Environmental Factors on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. PEDOSPHERE, 2014, 24(2):232–242.
- [16] Chun J, Kim S, Arasu M V, et al. Combined effect of Nitrogen, Phosphorus and Potassium fertilizers on the contents of glucosinolates in rocket salad (*Eruca sativa* Mill.)[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2015.