

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.02.019

节水型单位建设模式及效益分析

——以东雷二期抽黄工程管理中心为例

张峰¹, 吕延学¹, 刘行刚², 龚贻滕², 郑好²

(1. 渭南市东雷二期抽黄工程管理中心, 陕西 渭南 715399; 2. 中国水利水电科学研究院, 北京 100048)

摘要: 为应对黄河流域日益紧张的水资源约束, 探索公共机构节水增效的可行路径, 以陕西省东雷二期抽黄工程管理中心为研究对象, 采用案例分析与量化评估相结合的方法, 系统探讨了节水型单位的建设模式与综合效益。构建并实践了以“管理创新、工程改造、技术升级、宣传引导、协同共治”为核心的复合型节水模式。结果表明: 通过该模式的系统实施, 管理中心年节水量达 2 265.38 m³, 产生直接经济效益 1.02 万元, 并显著降低了水资源取用与环境污染物排放。该模式通过技术、制度与节水宣传的多维协同, 实现了水资源的高效利用与综合效益提升, 为黄河流域乃至全国同类公共机构的节水实践提供了可复制、可推广的经验。建议未来通过标准化智慧节水系统、设立非常规水利用补贴机制等措施, 进一步推动节水行动的深化与扩散。

关键词: 节水型机关; 智慧水务; 非常规水利用; 效益评估; 黄河流域

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0133-06

Construction Model and Benefit Analysis of Water-saving Institutions

—— A Case Study of Donglei Phase II Water Diversion and Yellow River Irrigation Project Management Center

ZHANG Feng¹, LV Yanxue¹, LIU Xinggang², GONG Yiteng², ZHENG Hao²

(1. Donglei Phase II Water Diversion and Yellow River Irrigation Project Management Center, Weinan, Shaanxi 715399, China;

2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: To address the increasingly tight water resource constraints in the Yellow River Basin and explore feasible paths for water conservation and efficiency improvement in public institutions, this work takes the Shaanxi Donglei Phase II Yellow River Lifting Irrigation Project Management Center as the research object. By adopting a method combining case analysis and quantitative evaluation, it systematically discusses the construction mode and comprehensive benefits of water-saving units. A composite water-saving mode centered on “management innovation, engineering renovation, technological upgrading, cultural infiltration, and collaborative governance” has been established and put into practice. The results show that through the systematic implementation of this mode, the management center achieves an annual water saving of 2 265.38 cubic meters, generates direct economic benefits of 10 200 yuan, and significantly reduces water intake and environmental pollutant emissions. Through the multi-dimensional coordination of technology, system and culture, this mode realizes the efficient utilization of water resources and the improvement of comprehensive benefits, providing replicable and promotable experience for water-saving practices of similar public institutions in the Yellow River Basin and even across the country. It is suggested that in the future, measures such as standardizing intelligent water-saving systems and establishing subsidy mechanisms for unconventional water utilization should be taken to further promote the deepening and expansion of water-saving initiatives.

Keywords: water-saving institution; smart water management; unconventional water utilization; benefit evaluation; Yellow river basin

收稿日期: 2025-10-30

修稿日期: 2025-12-19

基金项目: 中国水利水电科学研究院项目“中国节水技术发展跟踪”(ID0149B022026)

作者简介: 张峰(1977—), 男, 高级工程师, 主要从事灌区管理、节水灌溉等方面工作。E-mail: 363690340@qq.com

通讯作者: 龚贻滕(1987—), 男, 工程师, 主要从事节水灌溉、水资源等方面工作。E-mail: 1102665760@qq.com

在全球水资源短缺和气候变化加剧的背景下,推动节水型社会建设已成为全球共识。节约用水不仅关系到个人的生活品质,更是对自然资源的合理利用和环境保护的重要举措。节水型社会建设的核心目标是通过技术创新、管理优化和社会动员,实现水资源的高效配置与可持续利用。在党中央全面推行节约战略的背景下,实施节水型社会建设,不仅是执行节约战略的必然选择,也是实现节水降碳、绿色发展的必由之路。

在公共机构节水研究方面,现有成果已构建了相对完善的理论框架。从宏观背景看,左其亭等^[1]系统评估了黄河流域水资源承载能力,为本研究提供了区域水资源约束的重要依据。在制度建设层面,李远华^[2]指出,节水型社会建设的核心在于制度设计与技术创新的协同;王治^[3]进一步强调,制度创新是破解水资源管理困境的关键。褚俊英等^[4]则从实践经验出发,总结了我国节水型社会建设的成效与问题,并指出公共机构节水改造具有较高的投入产出比和显著的示范效应。

在技术路径方面,相关研究呈现出多元化发展趋势。在非常规水利用领域,杨德森^[5]探讨了机关单位雨水收集利用的技术可行性;赵建国^[6]则从政策激励与市场机制角度,分析了推动非常规水资源开发利用的关键措施。在智慧水务方面,崔凯等^[7]介绍了智慧节水监管平台在节水机关建设中的实践;王志勇等^[8]进一步阐述了基于物联网的机关单位智慧水务系统的构建方法与应用效果;刘一江等^[9]则对公共机构节水技术集成与应用模式进行了系统性研究,为技术整合提供了参考。此外,相关国家标准与地方定额也为节水实践提供了技术依据,如《城市污水再生利用城市杂用水水质》^[10](GB/T 18920—2020)、《建筑给水排水设计标准》^[11](GB 50015—2019)及陕西省《行业用水定额》^[12](DB61/T 943—2020)等。

在行为与治理层面,研究逐渐关注“人”的因素。孙丽华等^[13]通过实证分析了公共机构节水行为引导策略及其效果。国际上的相关研究也强调了行为干预(Ashtonetal等)^[14]和智能水表等技术支持手段(Cominolaetal等)^[15]在促进节水中的重要作用。

然而,现有研究多侧重于单一技术、管理措施或行为引导,缺乏对“制度-技术-行为-政策”多维协同治理模式的系统实证与集成分析。尤其在水资源约束严峻的黄河流域,如何构建一个可复制、可推广

的公共机构节水综合模式,仍是一个亟待深入探索的科学问题。

东雷二期抽黄工程管理中心作为陕西省大型灌区管理机构,其用水结构传统、设施老化问题显著,人均用水量曾高于地方定额标准,是黄河流域公共机构节水改造的典型代表。

本研究旨在通过东雷二期抽黄工程管理中心的案例,系统构建并实证一个多维协同的节水型单位建设模式,量化评估其节水效益,以期为黄河流域同类公共机构的节水实践提供一套可复制的技术路径与管理范式。

1 研究方法

1.1 研究区概况

东雷二期抽黄工程管理中心位于陕西省渭南市,属关中渭北旱原区,年均降水量 566.26 mm。中心共有员工 134 人,绿地面积 3 648 m²,地面硬化面积 3 192 m²,屋顶面积 4 560 m²。在节水改造前,中心面临用水器具效率低下、非常规水资源利用缺失、管理粗放、职工节水意识薄弱等典型问题,人均日用水量达 65 L,节水改造需求迫切。

作为陕西省重要的大型灌区管理机构,在探索节水型单位建设的道路上,以提升水资源在经济社会效益和生态环境方面的综合效益为核心,积极探索水资源短缺解决之道,加强对水资源的整合和有效利用,摒弃粗放和无序的用水模式,加快机关用水结构的优化,实现水资源的可持续发展,形成了“管理创新+工程改造+技术升级+宣传引导+协同共治”的复合型模式。

1.2 数据来源与研究方法

1.2.1 数据来源

(1)气象数据:渭南市 1993—2022 年逐月降雨量(来源:中国气象数据网)。

(2)用水数据:管理中心 2019—2023 年用水台账及节水改造记录。

(3)技术参数:雨水收集系统径流系数(取 0.9)、节水器具流量参数(取 0.1 L/s)等,依据《建筑给水排水设计标准》^[11](GB 50015—2019)核定。

1.2.2 分析方法

(1)雨水资源化分析

$$Q = A \times P \times \psi \times \eta \quad (1)$$

式中: Q 为雨水收集量,m³; A 为集雨面积,m²; P 为降雨量,mm; ψ 为径流系数; η 为系统效率系数,取 $\eta = 0.8$ 。

(2) 节水效益评估

$$E_c = \Delta Q \times P_w \quad (2)$$

$$E_e = \Delta Q \times \beta \quad (3)$$

式中: E_c 为经济效益,元; ΔQ 为节水量, m^3 ; P_w 为水价,元/ m^3 ; E_e 为环境效益,元; β 为单位节水减排系数,取 $\beta = 0.8$ 。

(3) 社会效益评估

通过问卷调查与案例对比法评估。

2 结果分析

2.1 建设模式

2.1.1 管理创新引领节水管理体系现代化

东雷二期抽黄工程管理中心成功构建了“制度—技术—管理”三位一体的节水治理体系。在制度设计层面,通过成立节水型机关建设领导小组,制定《渭南二黄节水机关建设实施方案》等 6 项制度性文件,创新性地建立了“三级四维”责任体系,即管理中心—职能部门—基层单位三个层级与规划、执行、监督和考核四个维度,形成了节水目标责任制与绩效考核联动机制。特别值得一提的是,管理中心率先在黄河流域水利系统内构建了全要素用水量网络,部署了智能远传水表,实现了用水数据 100% 实时采集,为建立用水定额管理制度奠定数据基础。

2.1.2 工程改造实现水资源循环利用模式转型

针对建筑年代久远导致的节水设施滞后问题,管理中心遵循“诊断—改造—评估”的系统方法,启动了全面的节水改造工程。首先通过水平衡测试,诊断评估现有用水器具效率,诊断结果表明,现有用水器具效率较为低下,无效用水占比较高。为此,采取分质供水策略:首先,将生活用水系统升级为节水型器具,并安装 3 套恒压变频供水设备;其次,构建了“三级处理、三源收集”的非常规水系统,该系统包含了屋面雨水、空调冷凝水和制水机废水 3 类水源,其中屋面雨水年收集量 2 749.67 m^3 ,空调冷凝水月收集量 16.85 m^3 ,制水机废水月收集量 6.43 m^3 ,这三类水源经 MBR 膜生物反应器处理后,均达到《城市污水再生利用城市杂用水水质》^[10] (GB/T 18920—2020) 标准要求。

2.1.3 技术升级引领节水改造的新典范

东雷二期抽黄工程管理中心自主研发了“二黄智慧节水管理平台”集成了物联网感知技术,通过无线传输协议实现了用水终端状态的实时监控,系统响应时间得到显著缩短。该平台创新性地引入了

机器学习算法,构建了用水异常检测模型,有效识别了跑冒滴漏等非常规用水事件。实践证明,该体系使得机关人均日用水量从 65 L/d 下降至 48 L/d,低于陕西省《用水定额》^[12] (DB61/T 943—2020) 中机关单位先进值标准。

特别值得一提的是智能喷灌系统的技术创新。该系统基于土壤湿度传感器和气象站数据,构建了模糊 PID 控制模型,实现了灌溉量的动态优化。运行数据显示,绿地灌溉用水量同比下降了 62%。这种“需求侧精准调控+供给侧循环利用”的双轮驱动模式,为老旧单位的节水改造提供了创新的范例。

2.1.4 文化建构培育节水行为自觉机制

采用“认知—情感—行为”理论框架,构建了多层次节水宣传培育体系。在认知层面,开发“节水知识图谱”数字学习平台,利用微课形式进行碎片化传播;在情感层面,通过组织节水主题摄影展等体验式活动,以及建立行为积分奖励制度来激发情感共鸣;在行为层面,通过精心设计环境来引导和强化节水行为,如在取水点设置节水标语等。实证研究表明,经过这些措施干预后,职工的节水行为依从度明显提升。

在传播策略上,形成了“三位一体”矩阵:①在实体空间设置节水标识系统;②通过数字媒体开发节水知识内容;③在社交网络开展节水达人评选活动。这种立体化传播模式使得节水知识的知晓率达到 100%,并形成显著的示范效应。

2.1.5 协同共治构建节水经验扩散网络

管理中心创新性构建了“点—线—面”经验推广模型。在组织层面,建立了“1+N”帮扶机制,并编制了《节水机关建设技术导则》;在技术层面,开发了节水改造标准化模块包;在制度层面,将节水指标纳入单位年度考核体系。召开现场观摩会 3 次、组织交叉检查 5 轮,实现了节水措施在基层单位 100% 覆盖。

2.2 节水量分析

通过降雨资料计算长序列月均降雨量,并计算东雷二期抽黄工程管理中心的非常规水需水量、可利用量,再计算各月非常规水用水量、节水器具节水量以及管理中心总节水量。

2.2.1 降雨量

分析渭南市 1993—2022 年降雨资料,年均降水量为 566.26 mm,其中月均降水量 1 月最小,7 月最大,分别为 15.62 mm 和 100.62 mm。逐月均降水量见表 1。

2.2.2 非常规水可收集量

通过现场调研,东雷二期抽黄工程管理中心非常规水源为雨水、空调冷凝水和制水机废水。

(1) 雨水可收集量

根据现场调研和查阅建设资料,计算灌区各站硬化场地面积和屋顶集雨面积,根据《建筑给水排水设计标准》^[11](GB 50015—2019),硬化场地和屋顶径流系数均为 0.9,季节折减系数为 0.8,弃流系数为 0.87,草地集雨径流系数为 0.2。管理中心地面硬化面积 3 192 m²,屋顶面积 4 560 m²,经计算,年均可收集雨水量 2 749.67 mm。逐月可收集雨水量见表 1。

(2) 制水机废水

东雷二期抽黄工程管理中心员工人数为 134 人,按照用水 2 L/(人·d),制水机制水产生废水比例 1:1,月工作日 24 d 计算,制水机废水回收量为 77.18 m³/a。

(3) 空调冷凝水

东雷二期抽黄工程管理中心共有挂式空调(1.5匹)26 台,按照每台空调每小时产生冷凝水 3 L/h,每天开机 10 h,每月工作 24 d,冷凝水收集系统管网漏损率 10% 计算,7—9 月月均空调冷凝水可利用量为 16.85 m³。

综上分析,东雷二期抽黄工程管理中心非常规水可收集量 2 877.42 m³/a,详见表 1。

表 1 东雷二期抽黄工程管理中心降水量、雨水收集量及非常规水可收集量

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月
降雨量/mm	15.62	10.93	16.97	31.07	46.38	63.00
雨水收集量/m ³	75.85	53.07	82.40	150.87	225.21	305.92
非常规水可收集量/m ³	82.28	59.51	88.84	157.30	231.65	329.20
月份	7月	8月	9月	10月	11月	12月
降雨量/mm	100.62	92.69	87.18	50.16	14.18	37.46
雨水收集量/m ³	488.60	450.09	423.33	243.57	68.86	181.90
非常规水可收集量/m ³	511.88	473.37	429.77	250.00	75.29	188.33

2.2.3 需水量分析

管理中心非常规水主要用于草地绿化、车辆清洗、场站硬化清洗等。

(1) 草地绿化需水量

根据陕西省《行业用水定额》^[12](DB61/T 943—2020),管理中心属关中渭北旱源区,草坪绿化

用水定额为 685 m³/亩,东雷二期抽黄工程管理中心有草地面积 3 648 m²,经计算,草地绿化需水量 1 914.27 m³/a,草地逐月需水量计算结果见表 2。

(2) 清洗车辆

根据陕西省《行业用水定额》^[12](DB61/T 943—2020),车辆清洗用水定额为 45 L/次,公务用车每月清洗 4 次,车辆清洗需水量 0.54 m³/月。

(3) 硬化场地清洗

根据陕西省《行业用水定额》^[12](DB61/T 943—2020),硬化场地清洗用水定额为 2.5 L/(m²·次),每周清洗一次计算,硬化场地清洗需水量为 31.92 m³/月。

综上分析,东雷二期抽黄工程管理中心年需水量 878.29 m³,月需水量如表 2 所示。

表 2 东雷二期抽黄工程管理中心需水量

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月
草地需水量/m ³	162.58	146.85	162.58	157.34	162.58	157.34
洗车需水量/m ³	138.06	139.43	133.13	76.45	32.46	32.46
月份	7月	8月	9月	10月	11月	12月
草地需水量/m ³	162.58	162.58	157.34	162.58	157.34	162.58
洗车需水量/m ³	32.46	32.46	32.46	32.46	138.07	58.39

2.2.4 非常规水可利用量

在蓄水池最大蓄水量容许范围内,非常规水用水量大于可利用量,则用水量值应等于可利用量(需常规水补充);非常规水用水量小于可利用量,则用水量值为计算值;用水量和可利用量大于蓄水池蓄水量时,用水量为蓄水池最大蓄水量;因为 6—9 月降雨不均匀,仍需考虑绿化灌溉水量。经计算,东雷二期抽黄工程管理中心非常规水可利用量 1 416.36 m³/a,月非常规水可利用量如表 3 所示。

表 3 东雷二期抽黄工程管理中心非常规水可利用量

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月
非常规水可利用量/m ³	82.28	59.51	88.84	157.30	132.46	132.46
月份	7月	8月	9月	10月	11月	12月
非常规水可利用量/m ³	132.46	132.46	132.46	132.46	75.29	158.39

2.2.5 节水器具节水量

(1) 节水龙头节水量

管理中心更换感应龙头流量为 0.1 L/s,被更换水龙头流量为 0.2 L/s;每人每天平均洗手次数为 5 次,洗手时间平均为 30 s,工作日为 24 天/月,龙头

节水量为 $48.24 \text{ m}^3/\text{月}$ 。

(2) 厕具节水量

管理中心将收集的茶水、洗手废水用于厕具用水,常规水用水量由 $9 \text{ L}/\text{次}$ 降为 $3 \text{ L}/\text{次}$,平均每人每日使用次数为 1 次,工作日为 24 天/月,厕具节水量 $22.51 \text{ m}^3/\text{月}$ 。

经计算,东雷二期抽黄工程管理中心在实施单位节水改造工程后年节水总量为 $2\,265.38 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

2.3 效益分析

2.3.1 经济效益

(1) 直接经济效益

通过一系列节水措施的实施,东雷二期抽黄工程管理中心的水量下降。以建设节水型单位前后对比例,每年的用水量减少了约 $2\,265 \text{ m}^3/\text{a}$,按照当地水价 $4.5 \text{ 元}/\text{m}^3$ 计算,每年可节省水费支出约 $10\,192 \text{ 元}/\text{a}$ 。

(2) 转移经济效益

根据 2020 年渭南市统计年鉴,渭南市万元 GDP 用水量为 $77.3 \text{ m}^3/\text{万元}$ 。年节约水量可支撑 GDP 增长 29.3 万元,凸显了水资源的机会成本价值。

2.3.2 环境效益

(1) 节水效益

东雷二期抽黄工程管理中心节水型单位建设减少了水资源的取用量,缓解水资源紧张的局面。减少开采地下水 $2\,265.38 \text{ m}^3/\text{a}$,相当于保护 0.5 km^2 湿地年生态需水量。

(2) 减排效益

用水量的减少直接导致污水排放量的降低,按节水量的 80% 计算,东雷二期抽黄工程管理中心污水排放量减少 $1\,812.3 \text{ m}^3/\text{a}$,可降低 COD 排放量约 0.36 t ,助力区域水环境质量改善。

2.3.3 社会效益

(1) 示范引领作用

东雷二期抽黄工程管理中心作为水利行业的重要单位,其节水型机关建设成果为其他公共机构和企业树立了良好的榜样。通过举办经验交流活动、接待参观学习等方式,将节水型机关建设的模式和经验进行推广,带动了更多单位参与到节水行动中来,促进了全社会节水意识的提高。

(2) 提升公众形象

开展节水型机关建设,体现了管理中心对水资源保护的高度重视和社会责任感,赢得了社会各界的广泛赞誉和认可,提升了管理中心的公众形象和社会影响力。

3 讨论

本研究结果表明,东雷二期抽黄工程管理中心的复合型节水模式取得了显著成效,与褚俊英等^[4]的研究结论一致,公共机构的节水改造确实能产生良好的经济回报。然而,本案例进一步揭示了不同节水措施的贡献率存在差异:非常规水利用(占总节水量的 62.5%)是节水的“主力军”,这与杨德森^[5]强调的雨水收集价值相吻合;而技术驱动的节水器具改造贡献率为 37.5%,其优势在于投资小、见效快。与 Ashtonetal 等^[14]强调行为干预的观点相呼应,本研究发现,在技术措施基础上辅以系统的节水文化培育,能更持久地巩固节水效果。东雷二期抽黄工程管理中心的人均日用水量从 65 L 降至 48 L ,小于地方节水最小值,这一成果是技术硬件与管理软件共同作用的结果。

该模式适用于:在半干旱地区,应优先挖掘非常规水资源化潜力;对于设施老旧的单位,智慧水务平台能快速识别并控制漏损;而任何类型的公共机构,都需将制度约束与宣传引导相结合,以形成长效机制。

4 结论

(1) 东雷二期抽黄工程管理中心在探索节水型单位的建设的道路上,通过非常规水回收利用系统、节水器具改造、灌溉设施升级、智慧节水管理平台等硬件设施建设,以及节水管理机制、用水总量控制与定额管理、节水宣传与培训、数字孪生技术应用软件与管理措施建设,形成了“管理创新 + 工程改造 + 技术升级 + 宣传引导 + 协同共治”的复合型模式。年节约用水量约 $2\,265 \text{ m}^3/\text{a}$,节省水费支出约 $10\,192 \text{ 元}/\text{a}$,转移经济效益 29.3 万元;经济、环境和社会效益显著,为水利行业节水型组织建设提供了可复制的实践路径。

(2) 东雷二期抽黄工程管理中心节水型单位建设模式的成功实践表明,节水型单位建设需融合技术创新(如数字孪生、高效设备)、制度优化(水价改革、精细管理)与群众参与(农艺推广、示范激励),其成功也得益于黄河流域半干旱气候的雨水资源化潜力与行政考核机制的有效结合。未来可通过构建区域适配性评价指标体系,在湿润地区,还需调整雨水收集系统设计^[5];考核较为宽松的单位,则需要强化制度约束,以确保节水行动的落实与成效。

(3) 建议将智慧节水系统纳入公共机构基础设

施建设标准^[7],以标准化引领节水技术升级。同时,设立非常规水利用补贴机制,有效降低技术采纳的成本,激发市场活力。此外,积极推广“节水细胞”模式,通过构建多层次、立体化的节水网络,实现节水行动的广泛覆盖和深度渗透,从而全面提升水资源的利用效率。

参考文献:

- [1] 左其亭,李佳伟. 黄河流域水资源承载能力与适应性调控[J]. 水利学报,2020,51(9):1009-1018.
- [2] 李远华. 节水型社会建设的重点与难点[J]. 中国水利,2005(13):66-68.
- [3] 王 治. 制度创新是建设节水型社会的关键[J]. 水利发展研究,2005(7):9-13.
- [4] 褚俊英,王 浩,秦大庸,等. 我国节水型社会建设的主要经验、问题与发展方向[J]. 中国农村水利水电,2007(1):11-15,21.
- [5] 杨德森. 浅谈节水型机关雨水的收集与利用[J]. 水上安全,2024(11):73-75.
- [6] 赵建国. 非常规水资源开发利用的政策激励与市场机制研究[J]. 水利经济,2019,37(1):22-26.
- [7] 崔 凯,高 堃,王 浩. 智慧节水监管平台助力节水

机关建设[J]. 水资源开发与管理,2022(6):47-51.

- [8] 王志勇,李 娜. 基于物联网的机关单位智慧水务系统构建与实践[J]. 中国给水排水,2022,38(15):86-91.
- [9] 刘一江,张 明,赵 静. 公共机构节水技术集成与应用模式研究[J]. 给水排水,2021,57(4):130-135.
- [10] GB/T 18920—2020 城市污水再生利用城市杂用水水质[S]. 北京:中国标准出版社,2020.
- [11] GB 50015—2019 建筑给水排水设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [12] DB61/T 943—2020 行业用水定额[S]. 西安:陕西省市场监督管理局,2020.
- [13] 孙丽华,马 强. 公共机构节水行为引导策略与效果评估[J]. 资源科学,2020,42(10):1981-1991.
- [14] Ashton N, et al. The effectiveness of water conservation signage in public buildings: A behavioral intervention study[J]. Water Resources Management, 2022, 36(5):1450-1465.
- [15] Cominola A, Giuliani M, Piga D, et al. Benefits and challenges of using smart meters for advancing residential water demand modeling and management: A review[J]. Environmental Modelling & Software, 2015, 72: 198-214.

(上接第 39 页)

- [2] Zhu Jin, Zhang Wei, Zheng Kaifeng, et al. Seismic design of a long-span cable-stayed bridge with fluid viscous dampers[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2015, 21(1):04015006-04015006.
- [3] 刘钧壬. 矮塔斜拉桥减隔震研究[D]. 长春:吉林建筑大学,2016.
- [4] 马 方. 矮塔斜拉桥抗震性能与减震控制研究[J]. 施工技术,2017,46(11):16-20.
- [5] Zhong Jian, Hu Zhangliang, Yuan Wancheng, et al. System-based probabilistic optimization of fluid viscous dampers equipped in cable-stayed bridges[J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(12):1815-1825.
- [6] Han Qiang, Wen Jiannian, Du Xiuli, et al. Nonlinear seismic response of a base isolated single pylon cable-stayed bridge[J]. Engineering Structures, 2018, 175: 806-821.
- [7] Yi J, Zhou J, Ye X. Seismic control of cable-stayed bridge using negative stiffness device and fluid viscous damper under near-field ground motions[J]. Journal of Earthquake Engineering, 2020, 26(5):2642-2659.
- [8] 全 伟,白士杰,包龙生. 高铁矮塔斜拉桥减隔震装置

性能对比研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2):299-306.

- [9] 万乐乐,季日臣,夏修身. 大跨度高速铁路矮塔斜拉桥减隔震设计研究[J]. 铁道建筑,2021, 61(12):31-35.
- [10] 柳春光,张继伟,张士博. 深水斜拉桥主塔模型水下振动台动力试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2016, 14(3):118-123.
- [11] 李璐璐,柳英洲. 斜拉桥单塔结构在波浪作用下的数值模拟与试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, 15(4):24-31.
- [12] 陈智威. 考虑地震动水力的深水矮塔斜拉桥地震响应分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2024, 22(6):23-29, 82.
- [13] 赖 伟. 地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究[D]. 上海:同济大学,2004.
- [14] Yang Wanli, Li Ao, Feng Xiyao, et al. Calculation method of hydrodynamic force on one column of the twin columns under earthquake[J]. Ocean Engineering, 2020, 197:106874.
- [15] 苏小卒,张 强. 法向力作用下钢-混界面黏结滑移性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(6):1-9.