



浮式防波堤结构型式的研究进展

练继建^{1,2}, 骆佳¹, 王孝群^{3,4*}

1. 天津理工大学海洋能源与智能建设研究院, 天津 300384

2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350

3. 河北工程大学水利水电学院, 邯郸 056038

4. 河北省智慧水利重点实验室, 邯郸 056038

* E-mail: 1014205052@tju.edu.cn

收稿日期: 2024-07-22; 接受日期: 2024-10-30; 网络版发表日期: 2025-01-08

国家重点研发计划项目(编号: 2022YFB4200700)、河北省高等学校科学技术研究项目(编号: BJK2024016)和河北省自然科学基金(编号: E2024402142)资助

摘要 浮式防波堤作为一种灵活、经济且环境友好的消浪结构, 可改善海上漂浮式光伏系统的深远海运维环境。本文系统梳理了国内外浮式防波堤的研究现状和进展, 根据防波堤结构型式和消浪原理以箱型、混合型、浮筏型、系绳浮子型、水平板型、波能利用型等浮式防波堤为主线, 综述了其工作原理、结构特点、消浪效果、性能提升等内容。最后, 指出了当前浮式防波堤面临的问题与挑战并展望了未来浮式防波堤在结构优化、材料创新、智能控制、功能集成、性能评估等方面的发展方向, 以期为促进海洋新能源实现质量效益型发展提供重要参考。

关键词 海上漂浮式光伏, 海洋工程, 浮式防波堤, 波浪能量耗散

1 引言

海上漂浮式光伏系统(offshore floating photovoltaic, 简称OFPV)是一种利用浮体结构将光伏组件漂浮在海面上进行发电的装置^[1], 如图1所示。通过使用浮体结构和锚泊系统, OFPV避免了对宝贵的陆地资源占用^[2], 被认为是太阳能发电的优选方案。然而, 目前OFPV仍处于示范工程阶段, 尚缺乏足够的安装和运维经验。这导致其在强风浪流下可能遭遇材料疲劳、浮体倾覆和光伏组件振动等挑战, 从而使得OFPV在安装和维护上的成本较高。

为了实现降本增效的目标, 可以从结构设计的角度对浮体和锚泊系统进行优化升级, 但这需要大量的研究、生产和试验验证, 耗时长且经济成本较高。鉴于OFPV所处的恶劣海洋环境因素可能会对系统的稳定性和效率产生不利影响。为了有效保护OFPV设备, 确保其正常运行, 引入防波堤作为保护措施显得尤为重要。防波堤作为抵御外海波浪入侵的水工建筑物^[3], 可为OFPV提供稳定、安全的工作海域。目前, 防波堤的研究已相对成熟, 结合内陆水域漂浮式光伏技术和经验, 有望推动OFPV的高质量发展。

固定式防波堤的优势是消浪效果好、结构稳定和

引用格式: 练继建, 骆佳, 王孝群. 浮式防波堤结构型式的研究进展. 中国科学: 技术科学, 2025, 55: 51–65

Lian J J, Luo J, Wang X Q. Recent progress on structural types of floating breakwaters (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025, 55: 51–65, doi: 10.1360/SST-2024-0180

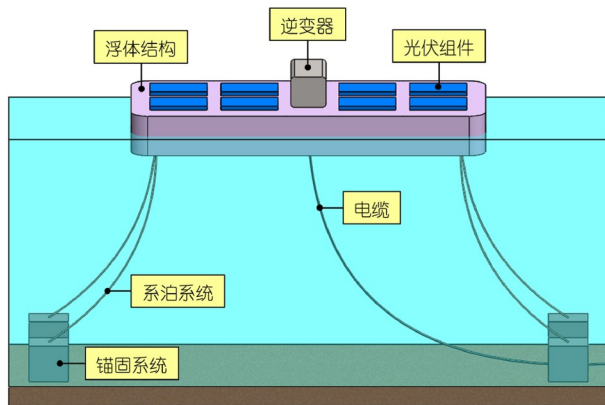


图 1 海上漂浮式光伏系统示意图
Figure 1 Schematic diagram of offshore floating photovoltaic.

使用寿命长. 然而, 在深水海域中, 固定式防波堤因其对地基的要求高、施工难度大以及造价高昂, 往往不适用于OFPV项目. 相比之下, 浮式防波堤由浮体结构与锚泊系统组成^[4], 展现出对地基的强适应性、施工便捷性和相对较低的造价成本等优势. 这些优势使其成为深水海域OFPV防护的理想选择.

本文立足于提高OFPV的可行性, 对国内外浮式防波堤的不同结构型式进行了全面深入的文献回顾, 涵盖了理论分析、数值模拟、试验研究以及工程应用, 详细讨论了不同构型浮式防波堤的工作原理、结构特点和性能表现, 指出了现有研究所面临的主要问题, 并展望了未来的研究和发展方向.

2 浮式防波堤结构型式研究

锚链锚泊、垂直导桩锚泊和墩式锚泊是浮式防波堤常用的锚泊方式^[5]. 相同的浮体结构若采用垂直导桩锚泊或墩式锚泊, 其消浪效果要优于采用锚链锚泊, 但这两种锚泊方式对地基要求较高, 适用于水深较浅的水域. 然而, 采用锚链锚泊的防波堤不仅对水深要

求较低, 且建造成本更加低廉. 因此, 锚链锚泊在众多锚泊方式中应用更多, 它是借助锚链将浮体与海底布设的锚固装置连接. 常见的锚链连接方式有两种: 悬链式和张紧式. 悬链式连接适用于浅水区的浮体, 能够减少长期受力对锚泊系统造成的损害, 但可能降低其消浪效果, 张紧式连接适用于深水区的浮体, 但需要对海底的锚固系统提出较高的要求.

在布置锚链时, 常见的方式包括平行型、交叉型、人字型和八字型, 如表1所示. 相较于交叉型和八字型锚泊方式, 平行型和八字型因其各自的优势及适用性而在工程领域中应用更为广泛. 平行型锚泊方式的优势在于其能够抵御强风浪流的冲击, 且作业相对简便. 然而, 若双锚间距较近, 其回旋空间较大, 难以有效抑制结构物的偏荡运动. 八字型锚泊方式的长处在于其不仅具备较大的锚泊力, 而且对抑制偏荡具有显著作用. 不过, 八字型锚泊的作业流程较为繁杂, 尤其是在风向与流向频繁变化的条件下, 锚链容易出现缠绕现象, 从而增加了作业的难度和维护的成本.

根据消浪原理和结构型式不同, 浮式防波堤进一步细化为箱型(注重结构稳定性)、混合型(结合两种消浪原理)、浮筏型(增强漂浮性与适应性)、系绳浮子型(灵活调节以适应不同波况)、水平板型(有效分散波浪能)、波能利用型(波浪能转化)及其他创新构型浮式防波堤, 如图2所示.

2.1 箱型浮式防波堤

箱型浮式防波堤作为一种有效的消浪结构, 因其几何形状简单、易于实现和应用而成为早期研究和工程实践的重点对象. 如图3所示, 其工作原理主要依赖于结构的惯性和波浪反射来实现消浪. 近年来, 研究重点主要集中于优化箱体形状、改善锚泊系统以及提高结构稳定性等方面. 目前, 该类防波堤已在全球多个港口和水库得到广泛应用, 如希腊Messolonghi港、摩洛哥Hercule港、中国丹江口水库、韩国仁川港和新加

表 1 锚链布置型式表

Table 1 Cable layout type table

布链型式名称	平行型	交叉型	人字型	八字型
布链型式示意图				

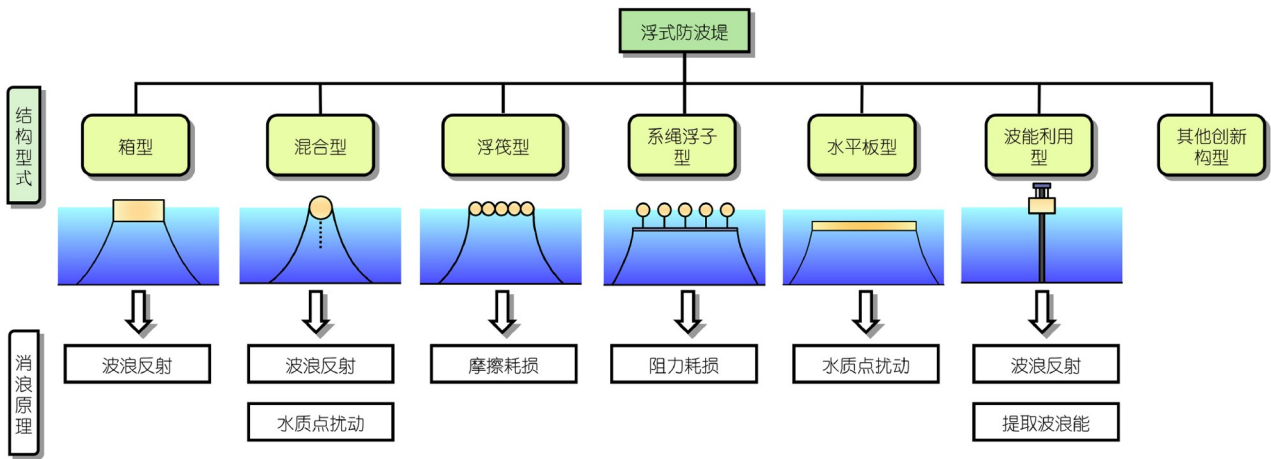
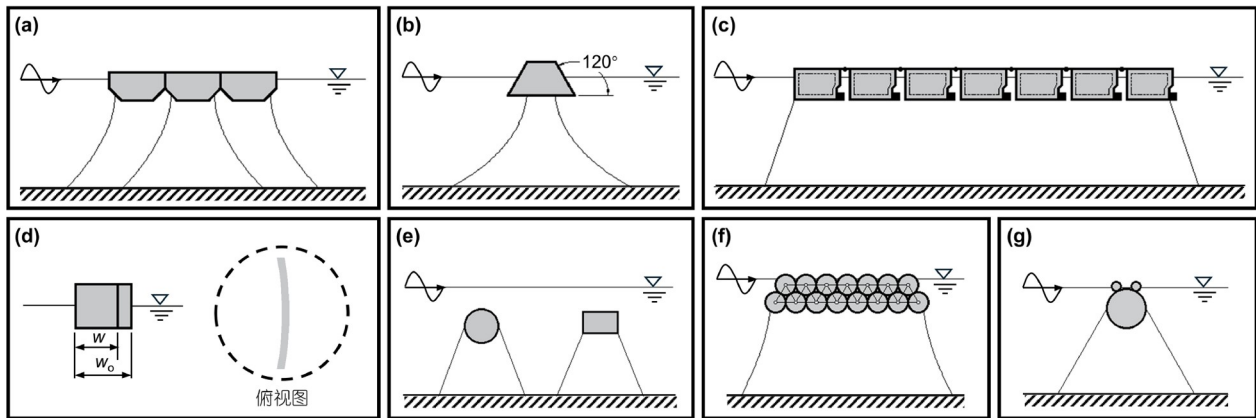


图 2 浮式防波堤的分类

Figure 2 Classification of floating breakwaters.

图 3 箱型浮式防波堤结构示意图: (a) 梯形纵截面模块化设计^[9]; (b) 梯形断面设计^[10]; (c) 多模块铰接设计^[11]; (d) 抛物线弧形浮筒设计^[12]; (e) 圆柱形-矩形断面设计^[13]; (f) 组合浮囊型设计^[17]; (g) 水平多柱设计^[18]Figure 3 Schematic diagram of box-type floating breakwater: (a) trapezoidal longitudinal section modular design^[9]; (b) trapezoidal section design^[10]; (c) multi-module hinged design^[11]; (d) parabolic arc pontoon design^[12]; (e) cylindrical-rectangular section design^[13]; (f) combined floating bladder type design^[17]; (g) horizontal multi-column design^[18].

坡滨海湾等。

研究表明, 提高箱型浮式防波堤性能的关键在于优化其几何参数和系泊方式。Wang等人^[6]揭示了箱型浮式防波堤的宽度与波长比对消浪效果的影响规律, 指出当浮箱宽度超过波长的0.35倍时, 波浪透射系数可降至0.5以下。张昊和邓涛^[7]通过数值计算模型进一步阐明了浮箱宽度和吃水深度对波浪透射系数的影响规律, 发现增加浮箱宽度和吃水深度可以显著降低透射系数。这些发现为实际工程设计提供了重要参考。然而, 过度增加结构尺寸会导致成本上升, 因此在实

际应用中需要权衡消浪效果和经济性。

在系泊方式方面, Liang等人^[8]的试验研究表明, 相较于有拖地长度的平行系泊, 交叉系泊和无拖地长度的平行系泊对长波的衰减性能更优。这一发现对于改善箱型防波堤在长周期波浪中的表现具有重要意义。然而, 不同系泊方式显著影响结构的运动响应, 进而影响系泊力。因此, 如何在消浪效果和结构安全性之间取得平衡, 仍需深入研究。未来的锚泊系统设计应当更加灵活和智能, 例如可考虑采用主动调节的张力系统, 根据实时海况自动调整锚链张力, 以兼顾安全性

和消浪效果。

为进一步提高箱型浮式防波堤的性能, 研究者提出了多种改进设计。例如, Loukogeorgaki等人^[9]提出的梯形纵截面模块化设计、Nikpour等人^[10]研究的斜率为 60° 的梯形断面设计、He等人^[11]设计的多模块铰接结构、Ren等人^[12]提出的抛物线弧形浮筒结构以及Wang等人^[13]设计的圆柱形-矩形断面设计等, 如图3(a)~(e)所示。这些创新设计在提高消浪效果的同时, 也为结构的适应性和稳定性提供了新的解决方案。然而, 这些复杂结构的长期可靠性和维护成本仍需进一步研究和评估。

此外, 双浮箱型防波堤作为一种新兴结构也受到广泛关注。沈雨生等人^[14]的试验研究表明, 前后浮箱刚性连接的双浮箱型防波堤在消浪效果上优于前后浮箱自由的双浮箱型和同等宽度的单浮箱型防波堤。Chen等人^[15]利用OpenFOAM软件深入探讨了波浪周期、相对吃水深度、防波堤数量、防波堤间距和系泊线刚度等因素对双浮箱型防波堤性能的影响, 为优化设计提供了理论依据。Chen等人^[16]通过SPH模型和试验发现, 与两个浮箱的间距相比, 波浪周期对双浮式防波堤水动力特性的影响更为显著。

近年来, 随着计算机技术和数值模拟方法的发展, 研究人员开始利用Flow-3D、AQWA等软件对浮式防波堤的水动力性能进行更为精细和全面的分析。李娇娇等人^[17]利用Flow-3D软件发现, 当组合浮囊型结构的相对宽度超过0.3或相对吃水深超过0.5时, 该结构

的透射系数可达50%, 且表现出良好的整体稳定性(图3(f))。Zang等人^[18]利用ANSYS-AQWA软件研究了水平多柱浮式防波堤的透射系数和最大总系泊力, 发现与单柱和方筒型浮式防波堤相比, 该结构的消浪效果更好, 并推导了其透射系数和最大总系泊力的经验公式(图3(g))。

2.2 混合型浮式防波堤

混合型浮式防波堤的设计理念融合了波浪反射与波能损耗两种消浪原理, 通过在浮箱上添加如水平或垂直板(图4)、桁架(图5(c))、栅栏(图5(a), (b))、气室(图6)和薄膜等特定结构(图7), 不仅增强了波浪的反射性能, 还能有效干扰周围的水体运动, 从而达到更优的消浪效果。这类设计的优势在于可以在不显著增加主体结构尺寸的情况下, 有效提高防波堤性能。

2.2.1 附加板结构

在结构设计方面, Koutandos和Prinos^[19]通过试验和COBRAS模型研究了浮箱型防波堤的底部前端附加垂直透水板和不透水板的水动力特性, 发现附加垂直板可以改善水动力特性, 其中不透水板的消浪效果更佳, 但系泊力更大。杨彪等人^[20]提出了双浮箱-双水平板结构(图4(a)), 通过在双浮箱下方安装双层水平板有效提升了消浪效果并显著降低了结构的运动响应。Zhang等人^[21]利用Fluent软件对比分析了矩形、倒 π 型和L型浮式防波堤的性能(图4(b)), 发现L型结构在相同

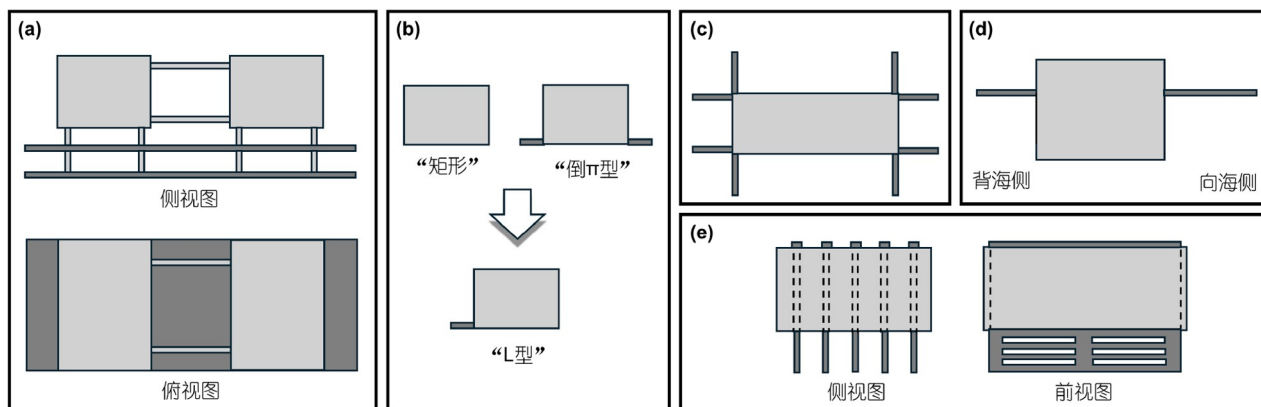


图4 混合型浮式防波堤结构示意图(加装水平或垂直板): (a) 双浮箱-双水平板设计^[20]; (b) 矩形、倒 π 型和L型设计^[21]; (c) 八翼箱型设计^[22]; (d) 浮箱-水平法兰设计^[24]; (e) 浮箱-垂直板设计^[25]

Figure 4 Schematic diagram of hybrid floating breakwater (with horizontal or vertical plates): (a) double pontoon-double horizontal plate design [20]; (b) rectangular, inverted π -shaped and L-shaped designs [21]; (c) octagonal box design [22]; (d) pontoon-horizontal flange design [24]; (e) pontoon-vertical plate design [25].

板长条件下综合性能最优. 这些研究表明, 合理设计和布置附加构件可以显著提高浮式防波堤的性能.

在消浪机理研究方面, Liu等人^[22]对所提出的八翼箱型结构进行了研究(图4(c)), 结果表明凸起板的存在能够显著改善消浪效果, 但顶部背浪侧的垂直板往往不利于消浪. Deng等人^[23]利用匹配特征函数展开法发现垂直板的存在增加了T型浮式防波堤的整体浸深, 即使在长波下, 该结构也能有效减小透射系数. Wei和Yin^[24]关于水平法兰的研究表明, 将法兰安装在较高的位置并加长向海侧的法兰长度, 可以增强结构的消浪效果(图4(d)). He等人^[25]通过试验揭示了垂直板作为能量耗散元件的主要工作机制归因于水体约束引起的虚拟质量效应(图4(e)). 这些研究成果为深入理解混合型浮式防波堤的消浪原理提供了重要依据.

2.2.2 附加桁架或栅栏结构

Mani^[26]提出了一种Y型框架设计(图5(a)), 该结构采用梯形浮箱作为上部结构, 并在浮箱底部固定一排具有特定长度和间隔的管道. 试验结果表明, 当相对宽度约为0.15时, 透射系数降至0.5以下, 表现出很好

的挡浪效果. 在此基础上, Murali和Mani^[27]进一步提出了一种由双梯形浮箱和圆柱框架组成的笼形浮式防波堤结构(图5(b)), 通过试验比较了该结构与Mani在1991年提出的Y型框架浮式防波堤的消浪效果, 得出笼型结构在调节透射系数方面的效率比Y型框架提高了10%~20%. 研究还指出, 将相对宽度控制在0.14~0.18范围内, 可以实现理想的消浪效果. 尽管笼式防波堤的框架结构对波能耗散有一定促进作用, 但其工程成本较Y型框架结构增加了约50%. 除了在浮箱的底部连接栅栏结构外, Uzaki等人^[28]通过试验还研究了在浮箱的堤前和堤后加装桁架结构的消浪效果(图5(c)), 发现堤前桁架可以有效阻挡入射波, 该结构具有很好的消浪效果, 并利用归一化方法提出了浮式防波堤的波浪透射系数表达式.

2.2.3 附加气动室或穿孔结构

为了增强浮式防波堤对长波的衰减效果, Koo^[29]提出了双浮筒-气动室结构(图6(a)), 通过数值计算模型得出当体宽与波长之比小于0.4时, 气动阻尼能够显著降低长波条件下的入射波能量传输. He等人^[30]提出

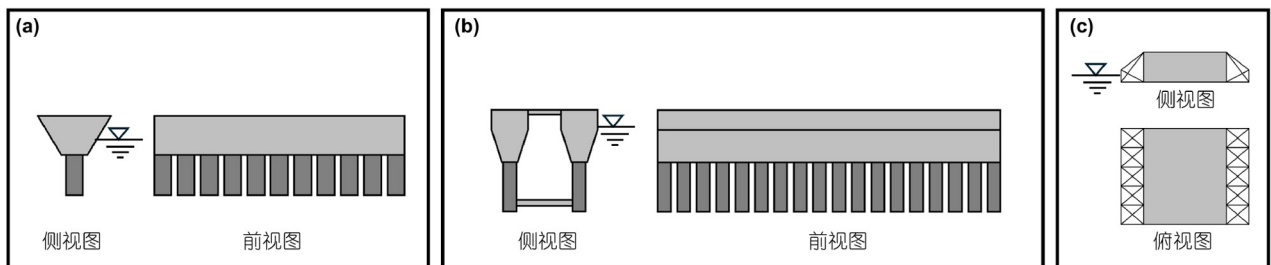


图5 混合型浮式防波堤结构示意图(加装栅栏或桁架): (a) Y型框架设计^[26]; (b) 笼形设计^[27]; (c) 浮箱-桁架设计^[28]

Figure 5 Schematic diagram of hybrid floating breakwater (with fences or trusses): (a) Y-frame design ^[26]; (b) cage design ^[27]; (c) pontoon-truss design ^[28].

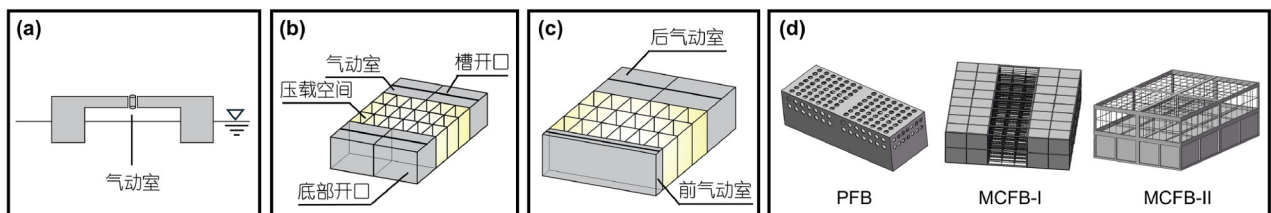


图6 混合型浮式防波堤结构示意图(附带气动室): (a) 双浮筒-气动室设计^[29]; (b) 浮箱-对称腔室设计^[30]; (c) 浮箱-非对称腔室设计^[31]; (d) PFB、MCFB-I和MCFB-II设计^[32]

Figure 6 Schematic diagram of hybrid floating breakwater (with air chamber): (a) design of double pontoon-air chamber ^[29]; (b) pontoon-symmetrical chamber design ^[30]; (c) pontoon-asymmetrical chamber design ^[31]; (d) PFB, MCFB-I and MCFB-II designs ^[32].

了带有对称腔室的浮箱式防波堤结构(图6(b)), 通过试验比较了该结构与不带腔室结构的水动力性能, 发现腔室明显增强了波能耗散, 降低了透射系数, 然而后室内部的气压波动很小. 为了使前室和后室都能起到能量转换器的作用, He等人^[31]又提出了非对称腔室结构(图6(c)), 通过试验发现非对称腔室结构可以增加两个腔室内的气压波动, 一旦相对宽度超过0.5, 透射系数将低于0.35.

Ji等人^[32]通过试验发现多孔浮式防波堤(PFB)的运动响应和系泊力最小, 而网笼浮式防波堤II型(MCFB-II)的消浪效果和系泊力与PFB类似, 网笼浮式防波堤I型(MCFB-I)在波浪衰减方面效果最为显著(图6(d)). Duan等人^[39]利用泰勒展开边界元法比较了浮箱型防波堤和三个不同穿孔浮式防波堤的水动力性能, 得出在适当位置引入穿孔设计能够减小防波堤的运动响应和波浪力, 同时提高其消浪效果. 此外, Xiao等人^[40]提出了环形超大型浮式结构物(very large floating structures, VLFS)双层穿孔壁防波堤设计, 通过试验发现在较温和的海况下, 水质点与多孔板之间的相互作用很强, 且孔隙率较小的穿孔壁往往会增加波浪能量损失. 然而, 面对长入射波时, 该防波堤的消浪效果受到限制, 这主要是因为只有靠近自由表面的部分波浪受到多孔壁的影响.

2.2.4 附加新型复合结构

Ji等人^[33]提出了一种由两个相互连接的水平圆柱体和装有许多橡胶空心球的网笼组成的新型浮式防波堤(图7(a)), 通过试验比较发现该结构在长波和高波下, 较传统单箱、双浮筒和带笼子的双浮筒防波堤表现出更好的波浪衰减性能. Ji等人^[34]还提出了一种双浮筒-网型浮式防波堤结构(图7(b)), 通过高阶边界元

法和试验发现在最佳设计参数下, 该结构特别适合应对长周期和大振幅波浪. Liang等人^[35]提出了一种上部结构布置在自由水面附近的箱型浮式防波堤(图7(c)), 通过试验和SPH模型得出在上部结构宽度较小时, 该设计对长周期波浪的消浪效果更显著. Li等人^[36]和Sun等人^[37]分别研究了在箱型浮式防波堤上附加海带的效果, 通过试验和Fluent软件发现海带的存在提高了防波堤的消浪效果, 如图7(d)和(e)所示. 进一步分析发现, 涡旋脱落和湍流动能变化是该结构波能耗散的主要机制. Zhang等人^[38]提出了一种采用海绵材料的箱型浮式防波堤(SMFB)(图7(f)), 通过试验得出与传统结构相比, SMFB具有更好的消浪效果, 且海绵材料的孔隙率对浮式防波堤的性能有显著影响.

2.3 浮筏型和系绳浮子型防波堤

浮筏型和系绳浮子型防波堤采用了与箱型和混合型浮式防波堤不同的消浪机制. 这两类防波堤具有结构轻便、成本较低的优点. 其中, 浮筏型防波堤通常由废弃物, 如原木、橡胶轮胎、竹筏、PVC圆管等栓接组装而成, 如图8所示. 其主要消浪原理是依靠浮体外表与水体的摩擦来减弱波浪能量的传递.

吴静萍等人^[41]提出了一种由多块圆形木板通过柔性连接组合而成的浮漂式防波堤结构(图8(a)), 通过试验发现该结构的消浪效果较好, 且水下系泊方式优于岸边系泊方式. 吴维登等人^[42]提出了一种采用钢管和轮胎组合而成的设计(图8(b)), 通过物理模型试验发现在较为不利的波况下, 该结构能够将透射系数降低至0.22. 杨成渝和吴宋仁^[45]通过试验研究了不同构型竹筏浮式结构的消浪效果、系泊力、操作性、经济性和可回收性. 研究结果表明, 单层平筏式构型表现较佳, 但为确保有效消浪, 其沿波向的长度需大于波长.

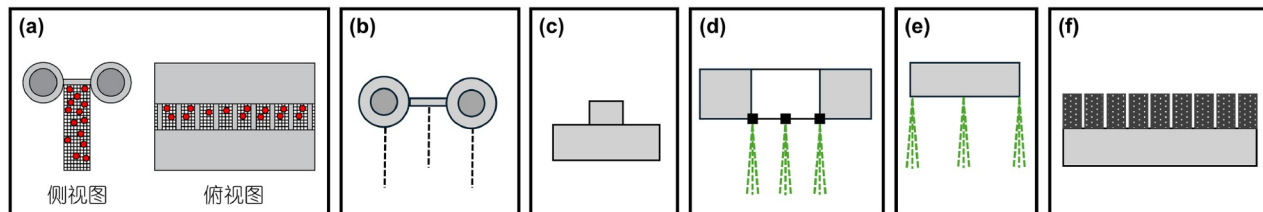


图7 混合型浮式防波堤结构示意图(附带其他特定结构): (a) 双浮筒-装有橡胶空心球的网笼设计^[33]; (b) 双浮筒-网型设计^[34]; (c) 浮箱-上部结构设计^[35]; (d) 双浮筒-海带设计^[36]; (e) 浮箱-海带设计^[37]; (f) 浮箱-海绵设计^[38]

Figure 7 Schematic diagram of hybrid floating breakwater (with other specific structures): (a) double pontoons-mesh cage design with rubber hollow balls^[33]; (b) dual pontoon-mesh design^[34]; (c) pontoon-superstructure design^[35]; (d) double pontoon-kelp design^[36]; (e) pontoon-kelp design^[37]; (f) pontoon-sponge design^[38].

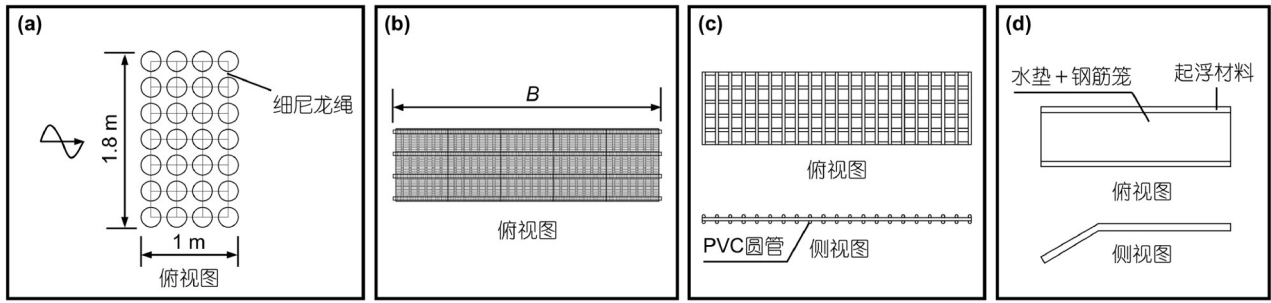


图 8 浮筏型防波堤结构示意图: (a) 浮漂式设计^[41]; (b) 钢管-轮胎设计^[42]; (c) 多层水平交错PVC圆管设计^[43]; (d) 水囊-钢筋笼设计^[44]

Figure 8 Schematic diagram of floating raft breakwater: (a) floating design [41]; (b) steel-tyre design [42]; (c) multi-layer horizontal staggered PVC round pipe design [43]; (d) water sacket-steel cage design [44].

此外, Hegde等人^[43]提出了多层水平交错PVC圆管浮式防波堤(图8(c)), Loukogeorgaki等人^[46]设计了内部柔性连接的柔性垫浮式防波堤。葛聪等人^[44]提出了一种由水囊与钢筋笼组成的浮筏型防波堤结构(图8(d))。研究表明,当防波堤的宽度超过波长时,透射系数可降低至0.6以下,且防波堤迎浪侧的相对倾斜宽度越大,消浪效果越好。

系绳浮子型浮式防波堤由多个浮子组成,这些浮子被系在海床或水下压载模块上,如图9所示。在波浪作用下,浮子呈现类似倒置摆的摆动运动。系绳浮子型防波堤并非依靠其惯性通过波浪的反射和摩擦损耗来消浪,而是利用波浪压力梯度对浮体运动产生的阻力来消浪。

研究这种浮式防波堤的先驱包括Jones教授^[47],他们提出了一种由大量浮球系在钢筋混凝土单元上形成的浮式防波堤结构,得出在7 s峰值周期的Pierson-Moskowitz海浪谱下,这种结构可减少50%的有效波

高。Seymour和Hanes^[48]利用数值模型得出浮子的数量和浮子阵列的尺寸影响系绳浮子型浮式防波堤的消浪效果,而消浪效果对系绳长度的敏感性较低。基于这些发现,他们建议浮子的特征尺寸应与有效波高同一量级。Vethamony等人^[49]通过数值模型推导了单个球形系绳浮子的附加质量和阻尼系数,并研究了波浪激振力幅值与阻尼系数之间的关系。然而,他们的研究中未考虑浮子浸深对附加质量和阻尼系数的影响。后来,Vethamony^[50]通过考虑浮子淹没的影响改进了他的数值模型,研究了波高、波浪周期、水深、浮子淹没深度和浮子尺寸对系绳浮子型浮式防波堤消浪效果的影响,发现浮子在刚刚淹没时消浪效果较好,且透射系数随着浮子尺寸的增大而增大。

2.4 水平板型浮式防波堤

水平板型浮式防波堤主要凭借其特定的轮廓扰乱水质点的运动,使得波浪破碎,以此来降低结构物后的波高,如图10所示。消浪效果主要受其刚度和尺寸的影响。近年来,这类浮式防波堤的研究重点集中在多板结构和柔性板设计上。

Wang和Shen^[55]利用特征函数展开法研究了一组浸没水平板的消浪效果,发现板长、顶板淹没深度和相对水深对透射系数有明显影响。研究表明,当相邻水平板间距较小时,多水平板防波堤的消浪效果较好,且在固定的小距离内,板数与透射系数负相关。Usha和Gayathri^[56]提出了双水平板浮式防波堤结构,利用特征函数展开法得出当相对淹没间距为0.22~0.23时,最佳板宽约为波长的0.37~0.39倍,此时可获得最小透射系数。Liu等人^[51]提出了水下双水平厚板浮式防波堤

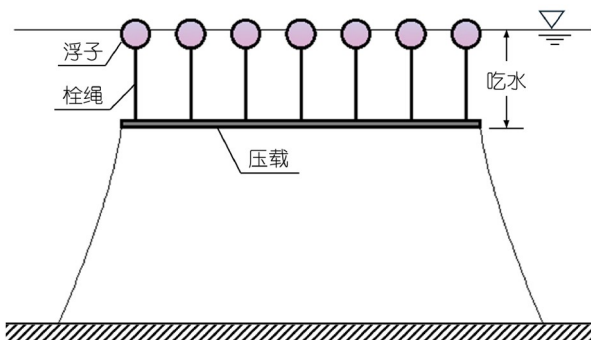


图 9 系绳浮子型防波堤结构示意图

Figure 9 Schematic diagram of tethered float type breakwater.

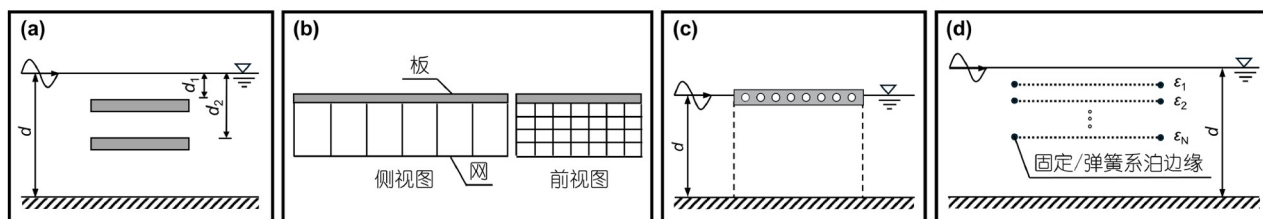


图 10 水平板型浮式防波堤结构示意图: (a) 双水平厚板设计^[51]; (b) 板-网设计^[52]; (c) 水平多孔柔性膜设计^[53]; (d) 多层柔性膜设计^[54]

Figure 10 Schematic diagram of horizontal plate type floating breakwater: (a) double horizontal thick plate design [51]; (b) board-net design [52]; (c) horizontal porous flexible membrane design [53]; (d) multi-layer flexible membrane design [54].

结构(图10(a)), 通过数值计算得出该结构应安置在靠近自由水面处, 且在实际应用中, 适当减小板厚通常可以提高防波堤的水动力特性. Dong等人^[52]提出了由薄平板和下方聚乙烯网组成的板网浮式防波堤结构(图10(b)). 试验结果表明, 除非板宽足够大(如100 m), 否则板本身的波浪衰减性能很差(透射系数大于0.5), 且增加网可以降低透射系数, 其最佳间隔应为20 m. Shugan等人^[57]研究了单块弹性薄板的性能, 发现对于长度远短于入射波长的情况, 柔性板相比刚性板的波浪衰减效果较差. 然而, 当板长与波长相当或超过波长时, 适当调整板的弹性可能使其比刚性板更有效地减少透射波, 这主要是通过板振动引起的波与入射波相位抵消实现的. Koley和Sahoo^[53]通过数值计算研究了水平浮式多孔柔性膜对斜入射波的散射, 发现孔隙率和膜张力是决定透射系数的关键因素(图10(c)). Guo等人^[54]提出了多层柔性膜防波堤结构(图10(d)), 通过试验发现该结构对短波的阻挡效果较好.

2.5 波能利用型浮式防波堤

根据工作原理, 波能转换器(WEC)可以分为振荡水柱式(OWC)、振荡浮子式(OB)和越浪式(OT). 考虑到成本分摊和空间共享策略, 将WEC与浮式防波堤集成不仅可降低平准化度电成本, 还能实现二者间的协同效应, 如图11所示.

Ning等人^[58]提出的垂直桩约束浮式防波堤集成系统通过适当调整取力器(power take-off, PTO)阻尼力, 可在透射系数小于0.5时实现约24%的捕获宽度比(图11(a)). Chen^[59]通过计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)方法将箱体底部向海侧直角改为弯角进行了优化研究, 发现在透射系数基本相同的情况下, 弯曲形状结构的波能捕获能力得到了显著增强.

Ji等人^[60]提出的倒L型浮式防波堤集成系统(图11(b)), 其水动力性能对防波堤吃水和PTO阻尼力较为敏感. Zhao等人^[61]对所提出的多浮筒浮式防波堤集成系统进行了研究(图11(c)), 结果表明布拉格共振在某些频率下主导波浪能提取效率, 但在远离布拉格共振的频率区间内, 多浮筒间的相互作用可提高水动力效率. Cheng等人^[62]通过试验和数值模型比较了OB型单浮筒和OWC型双浮筒浮式防波堤的性能(图11(d)), 发现后者具有更好的消浪效果和能量提取性能.

Cheng等人^[63]提出了具有液压气动互补PTO的WEC型双浮筒浮式防波堤(图11(e)), 通过试验和STAR-CCM+软件发现该系统显著降低了长周期波浪的透射系数. Cheng等人^[64]对所提出的在超长柔性浮式防波堤的迎浪侧集成多个箱型OWC系统进行了研究(图11(f)), 结果表明OWC与防波堤间的共振间隙效应会导致能量高效转换和透射系数突然减小, 但防波堤的弹性变形对波能的衰减和转换不利.

Zhang等人^[65]利用Star-CCM+软件得出非对称底部设计的浮式防波堤集成系统展现出更高的能量转换效率和更好的消浪效果, 特别是伯克利楔形底和三角形挡板底设计. 然而, 周期性波浪运动可能导致挡板处应力集中, 如图11(g)所示. 为解决此问题, Wei等人^[66]提出了升沉铰链式WEC防波堤系统(图11(h)), 利用OpenFOAM软件模拟了该系统与规则波的相互作用, 发现旋转PTO不仅提高了波浪能效率, 还将不必要的波能耗散转化为系统性能的提升.

2.6 其他创新构型浮式防波堤

随着对经济高效型浮式防波堤需求的增长, 众多创新设计应运而生, 如共振型、多孔渗透型、压载水型和柔性阻尼型等新型浮式防波堤, 如图12和图13所

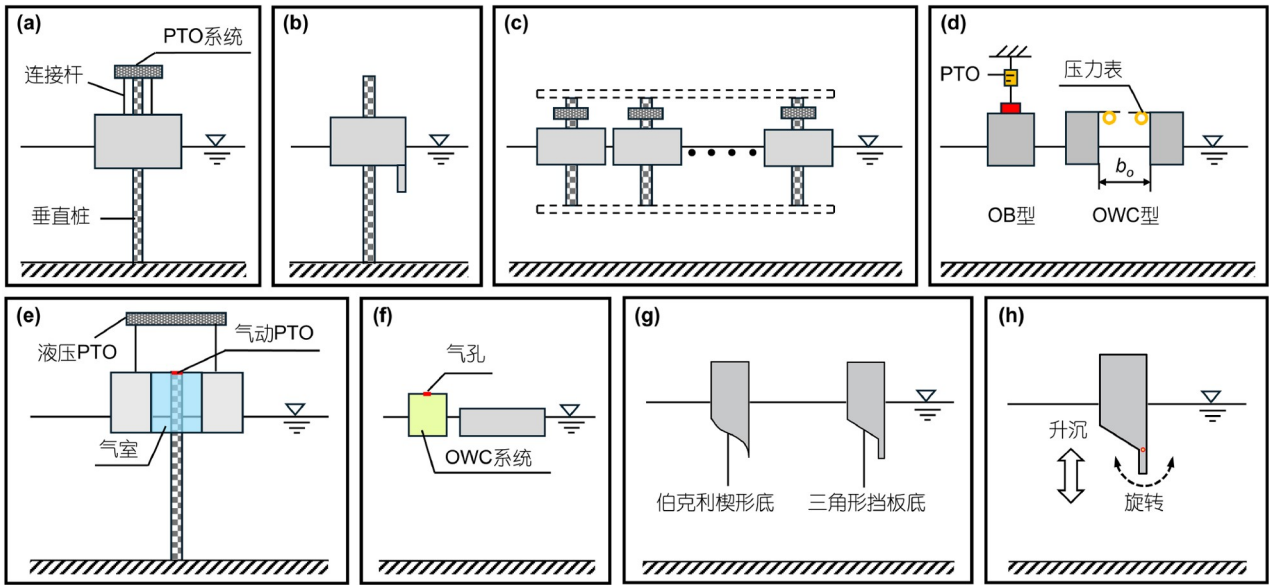


图 11 波能利用型浮式防波堤结构示意图: (a) 垂直桩约束浮式防波堤集成系统^[58]; (b) 倒L型浮式防波堤集成系统^[60]; (c) 多浮筒浮式防波堤集成系统^[61]; (d) OB型单浮筒和OWC型双浮筒设计^[62]; (e) 具有液压气动互补PTO的WEC型双浮筒设计^[63]; (f) 超长柔性浮式防波堤与多个箱型OWC系统集成^[64]; (g) 非对称底部设计的浮式防波堤集成系统^[65]; (h) 升沉铰链式WEC型防波堤系统^[66]

Figure 11 Schematic diagram of wave energy utilization type floating breakwater: (a) vertical pile-bound floating breakwater integrated system^[58]; (b) inverted L-type floating breakwater integrated system^[60]; (c) multi-pontoon floating breakwater integrated system^[61]; (d) OB type single pontoon and OWC type double pontoon design^[62]; (e) WEC type twin pontoon design with a hydropneumatic complementary PTO^[63]; (f) integration of ultra-long flexible floating breakwaters with multiple box-type OWC systems^[64]; (g) floating breakwater integrated system with asymmetrical bottom design^[65]; (h) heave hinged WEC breakwater system^[66].

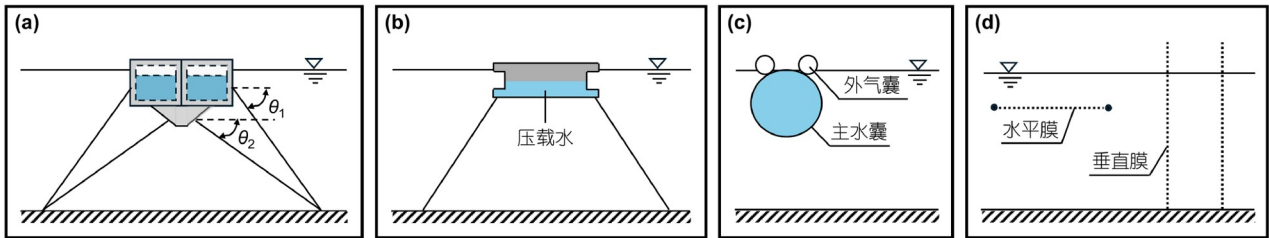


图 12 压载水型、柔性阻尼型浮式防波堤结构示意图: (a) 压载水型设计^[71]; (b) 压载水工字型设计^[72]; (c) 圆柱形柔性设计^[73]; (d) 组合膜设计^[75]

Figure 12 Schematic diagram of ballast water type and flexible damping type floating breakwater: (a) ballast water type design^[71]; (b) ballast water I-shaped design^[72]; (c) cylindrical flexible design^[73]; (d) composite membrane design^[75].

示. 这些设计不属于上述类别, 但它们为浮式防波堤领域提供了新的思路和技术解决方案.

Ikegami等人^[67]提出的共振型浮式防波堤结构允许波浪流入内部, 并利用内部波浪运动降低堤后波高. 内部通道可调整多种水流绕流模式, 提高长波消浪效果. 此结构还能结合喷水装置使用, 通过喷水形成的水流阻碍入射波传播, 以波浪破碎形式消浪. Chiu等

人^[68]在三个倾斜布置且相连的水平气缸上安装液压喷嘴, 发现这种方法对短波能量衰减效果显著. Wavebrake是多孔渗透型浮式防波堤, 由多个波浪衰减模块通过高强度线连接构成. 这种防波堤通过破坏水的层流并将产生的湍流引入模块之间的多孔空腔中来实现消浪, 适用于保护小型码头和海岸免受短波影响^[69]. 类似的设计还有Wang和Sun^[70]提出的由穿孔菱形块制

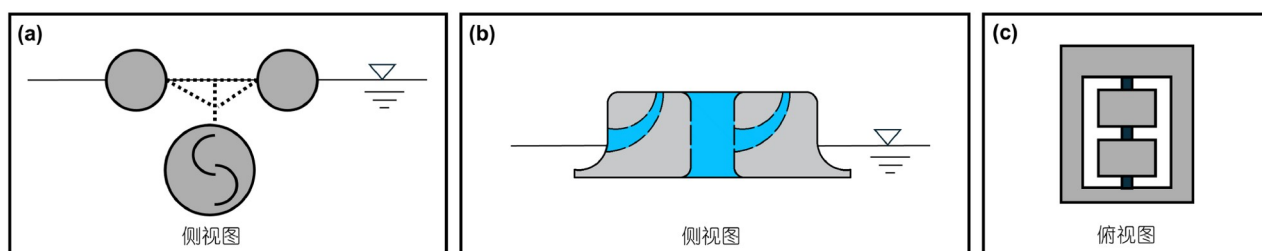


图 13 其他创新构型浮式防波堤结构示意图: (a) 双浮筒S型桨叶设计^[76]; (b) 具有翼形结构和开口通道的复杂构型设计^[77]; (c) 基于多体耦合运动理论的新型设计^[79]

Figure 13 Schematic diagram of other innovative configuration floating breakwater: (a) double pontoon S-type blade design [76]; (b) complex configuration design with airfoil structure and open channels [77]; (c) new design based on multi-body coupled motion theory [79].

成的多孔浮式防波堤, 由于多孔空腔设计, 相较传统浮式防波堤具有更小的透射系数和宽度。

Yang等人^[71]通过试验研究了压载水型浮式防波堤的运动响应、系泊力和水压分布(图12(a)), 发现系泊力和水压随相对宽度和系泊角增大而减小, 但随波陡增大而增大。Zhang等人^[72]提出的压载水工字型浮式防波堤与压载水箱型相比, 消浪效果更好, 系泊力更小。研究表明, 当初始浸深达到结构高度的2/3时, 压载水工字型浮式防波堤具有最佳的水动力性能(图12(b))。仇正中等人^[73]提出的圆柱形柔性浮式防波堤由一个充水主气囊和两个充气外气囊组成, 适用于小周期波况, 如图12(c)所示。Guo等人^[74]通过试验研究了垂直柔性多孔膜型防波堤的消浪效果, 得出合理设置垂直柔性多孔膜的数量、总长度和膜的孔隙率, 可使长入射波下的透射系数低于0.6。随后, Guo等人^[75]又对规则波和不规则波下由1个水平柔性膜和 N 个垂直柔性膜组成的组合膜防波堤进行了研究(图12(d)), 发现该结构的消浪效果良好, 适用于各种海况。

余洁等人^[76]对所提出的双浮筒S型桨叶浮式防波堤进行了研究(图13(a)), 结果表明当浮筒-桨叶间距增大并接近波长时, 防波堤的消浪效果增强, 但迎浪侧系泊力基本保持不变。Ji等人^[77]设计的具有翼形结构和开口通道的复杂构型浮式防波堤(图13(b)), 在提升波浪衰减性能方面主要得益于两种新的波浪衰减机制: 一是通过波浪撞击来减少波能, 二是将波浪的动能转化为势能。研究表明, 该设计在波浪撞击影响下, 透射系数较传统浮式防波堤平均减小9%左右, 在喷水作用下, 进一步减小5%左右。Liang等人^[78]基于深度强化学习(DRL)模拟了不规则波与主动控制板型防波堤的相互作用, 发现训练后的智能体在规则波和不规则波

下均能有效降低透射波高。崔杰等人^[79]提出的基于多体耦合运动理论的新型浮式防波堤(图13(c)), 其消浪效果优于箱型浮式防波堤, 这归因于内部多体耦合运动加剧了入射波能量的耗散。

3 结论

本文对国内外浮式防波堤结构型式的研究进行了全面回顾。箱型浮式防波堤是应用最广泛的构型, 但其性能提升主要依赖于增加结构尺寸, 经济性有待改善。混合型浮式防波堤通过添加特殊构件来改善消浪效果。然而, 如何在提高性能的同时控制系泊力是一个关键挑战。浮筏型防波堤主要依靠表面摩擦耗散波能。系绳浮子型防波堤利用浮体运动产生的阻力来消浪。水平板型浮式防波堤在单板结构和柔性板设计方面取得了重要进展。波能利用型浮式防波堤是将WEC与浮式防波堤集成。此外, 新型浮式防波堤的不断涌现, 如共振型、多孔渗透型、压载水型和柔性阻尼型等, 为解决传统设计的局限性提供了创新思路。这些设计在特定条件下展现出独特优势, 但其长期可靠性和工程适用性尚需验证。

3.1 现有研究存在的问题

尽管针对浮式防波堤的研究已经取得了诸多创新性成果, 然而由于海况的复杂性、结构受力与运动响应的不确定性, 当前研究仍存在一些不足之处。

(1) 缺乏不同构型浮式防波堤消浪效果的系统性对比研究。目前大多数研究集中在单一或少数几种构型的防波堤上, 很少有研究对各种构型进行全面比较。

(2) 长周期波浪衰减效果有限。浮式防波堤允许部

分波浪进入堤后, 因此在长周期波浪的消浪效果方面存在一定限制.

(3) 长期可靠性评估不足. 大多数研究关注短期消浪效果, 忽视了结构在长期海洋环境作用下的耐久性和稳定, 缺乏对材料老化、疲劳损伤和生物附着等因素的综合考虑.

(4) 多学科交叉融合不够. 现有研究多局限于水动力学领域, 缺乏与材料科学、控制工程、海洋生态等学科的深度融合.

(5) 智能化和主动调控研究不足. 大多数浮式防波堤仍采用被动消浪方式, 缺乏对海况变化的实时响应能力.

(6) 极端条件下性能评估不足. 对浮式防波堤在台风、海啸等极端海况下的动力响应和极限承载能力研究不够深入, 缺乏可靠的失效模式分析和安全性评估方法.

3.2 未来研究方向与趋势预测

加快建设海洋强国离不开浮式防波堤结构型式的不断完善与革新. 稳定的海洋环境是包括OFPV在内的各类海上工程项目安全运行的重要保障, 尤其是在进军深远海域的过程中, 对海况稳定性的需求更高. 针对不同结构型式的浮式防波堤, 其未来研究方向需重点关注: 箱型浮式防波堤应致力于箱体形状优化和智能锚泊系统设计; 混合型浮式防波堤可探索基于虚拟质量效应的新型构件设计; 受吴静萍等研究的启发, 浮筏型防波堤可探索可控柔性设计, 通过实时调节结构刚度来适应不同海况; 系绳浮子型防波堤可以从群体动力学的角度出发, 借鉴鱼群运动的研究成果, 设

计具有协同效应的浮子阵列; 水平板型浮式防波堤在非均匀间距布置和板-波动力学匹配方面仍有研究空间; 波能利用型浮式防波堤如何在消浪效果和能量转换效率之间取得平衡仍需深入研究.

浮式防波堤的总体发展趋势可归结为以下七个方面.

(1) 建立统一的评价指标体系. 从消浪效果、经济性、适用性等方面, 对不同构型浮式防波堤进行综合对比, 为工程实践提供科学依据.

(2) 开发应对长周期波浪下的创新设计. 未来研究可以探索利用非线性动力学效应(如内共振)增强对长周期波浪的衰减能力.

(3) 流体-结构耦合研究. 分析锚泊系统在极端波况和常见波况下的承载力和破坏机制, 以研究出结构受力合理、稳定性好、便于施工的浮式防波堤结构型式.

(4) 新材料应用. 例如, 自修复材料可以提高结构的耐久性, 而压电材料的应用则可能实现波能的高效转换.

(5) 智能化和主动控制. 利用先进传感技术和人工智能算法, 开发具有自适应能力的智能浮式防波堤系统, 通过实时监测海况并动态调整结构参数, 实现最佳消浪效果.

(6) 系泊系统设计优化. 系泊方式对浮式防波堤的性能有显著影响, 未来应考虑开发更灵活、智能的系泊系统, 以适应复杂多变的海况.

(7) 多功能集成设计. 未来的浮式防波堤将不仅仅局限于消浪功能, 而是向着集防浪、发电、养殖、休闲等多功能于一体的方向发展.

参考文献

- Geng B L, Tang X, Jin R J. Research prospects for offshore floating photovoltaic structures and their hydrodynamic problems (in Chinese). *Ocean Eng*, 2023, 12: 1–20 [耿宝磊, 唐旭, 金瑞佳. 海上浮式光伏结构及其水动力问题研究展望. *海洋工程*, 2023, 12: 1–20]
- Shi Y, Wei Y, Tay Z Y, et al. Hydroelastic analysis of offshore floating photovoltaic based on frequency-domain model. *Ocean Eng*, 2023, 289: 116213
- He Y, Han B, Han X, et al. Wave blocking performance of the symmetrical double-wing floating breakwater. *Ocean Eng*, 2024, 303: 117852
- Li J K. Research on the hydrodynamic performance of arc-crown wall (in Chinese). Dissertation of Master's Degree. Yantai: Ludong University, 2023 [李金珂. 弧墙-浮式防波堤水动力性能研究. 硕士学位论文. 烟台: 鲁东大学, 2023]
- Ge C. Experimental study on performance of raft floating breakwater under the action of relatively long period waves (in Chinese). Dissertation of Doctoral Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2019 [葛聪. 较长周期波浪条件下新型浮筏式防波堤消浪性能试验研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2019]

- 6 Wang C M, Tay Z Y, Takagi K, et al. Literature review of methods for mitigating hydroelastic response of VLFS under wave action. [Appl Mech Rev](#), 2010, 63: 030802
- 7 Zhang H, Deng T. Study on wave absorbing performance of floating box-type breakwater (in Chinese). *J Waterw and Harb*, 2016, 37: 502–507 [张昊, 邓涛. 箱型浮式防波堤消波性能研究. *水道港口*, 2016, 37: 502–507]
- 8 Liang J, Liu Y, Chen Y, et al. Experimental study on hydrodynamic characteristics of the box-type floating breakwater with different mooring configurations. [Ocean Eng](#), 2022, 254: 111296
- 9 Loukogeorgaki E, Yagci O, Sedat Kabdasli M. 3D experimental investigation of the structural response and the effectiveness of a moored floating breakwater with flexibly connected modules. [Coast Eng](#), 2014, 91: 164–180
- 10 Nikpour A H, Moghim M N, Badri M A. Experimental study of wave attenuation in trapezoidal floating breakwaters. [China Ocean Eng](#), 2019, 33: 103–113
- 11 He M, Liang D, Ren B, et al. Wave interactions with multi-float structures: SPH model, experimental validation, and parametric study. [Coast Eng](#), 2023, 184: 104333
- 12 Ren J, Jin P, Liu Y, et al. Wave attenuation and focusing by a parabolic arc pontoon breakwater. [Energy](#), 2021, 217: 119405
- 13 Wang G, Xie S, Yuan H, et al. Numerical investigation of hydrodynamic characteristics of a dual floating breakwater. [Ocean Eng](#), 2024, 294: 116728
- 14 Shen Y S, Pan J N, Zhou Y R, et al. Experimental study on wave attenuation performance of twin-pontoon floating breakwater (in Chinese). *Ocean Eng*, 2018, 1: 47–54 [沈雨生, 潘军宁, 周益人, 等. 双浮箱式浮式防波堤消浪性能试验研究. *海洋工程*, 2018, 1: 47–54]
- 15 Chen J, Zhang J, Wang G, et al. Numerical simulation of the wave dissipation performance of floating box-type breakwaters under long-period waves. [Ocean Eng](#), 2022, 266: 113091
- 16 Chen Y, Liu Y, Meringolo D D, et al. Study on the hydrodynamics of a twin floating breakwater by using SPH method. [Coast Eng](#), 2023, 179: 104230
- 17 Li J J, Ji K F, Zhang J F, et al. Numerical simulation of the wave dissipation performance of a combined capsule type floating breakwater (in Chinese). *China Harb Eng*, 2021, 7: 6–10 [李娇娇, 冀珂帆, 张金凤, 等. 组合浮囊型浮式防波堤消浪特性的数值模拟研究. *中国港湾建设*, 2021, 7: 6–10]
- 18 Zang Z, Fang Z, Qiao K, et al. Numerical study on wave dissipation and mooring force of a horizontal multi-cylinder floating breakwater. [J Mar Sci Eng](#), 2024, 12: 449
- 19 Koutandos E V, Prinos P E. Hydrodynamic characteristics of semi-immersed breakwater with an attached porous plate. [Ocean Eng](#), 2011, 38: 34–48
- 20 Yang B, Chen Z J, Wang G Y, et al. Experimental investigation of twin pontoon-twin horizontal plate floating breakwater (in Chinese). *Chin J Hydrodyn*, 2014, 1: 40–49 [杨彪, 陈智杰, 王国玉, 等. 双浮箱-双水平板式浮式防波堤试验研究. *水动力学研究与进展*, 2014, 1: 40–49]
- 21 Zhang X, Ma S, Duan W. A new L type floating breakwater derived from vortex dissipation simulation. [Ocean Eng](#), 2018, 164: 455–464
- 22 Liu Z, Wang Y, Wang W, et al. Numerical modeling and optimization of a winged box-type floating breakwater by Smoothed Particle Hydrodynamics. [Ocean Eng](#), 2019, 188: 106246
- 23 Deng Z, Wang L, Zhao X, et al. Hydrodynamic performance of a T-shaped floating breakwater. [Appl Ocean Res](#), 2019, 82: 325–336
- 24 Wei K, Yin X. Numerical study into configuration of horizontal flanges on hydrodynamic performance of moored box-type floating breakwater. [Ocean Eng](#), 2022, 266: 112991
- 25 He F, Li J, Pan J, et al. An experimental study of a rectangular floating breakwater with vertical plates as wave-dissipating components. [Appl Ocean Res](#), 2023, 133: 103497
- 26 Mani J S. Design of Y-frame floating breakwater. [J Waterway Port Coast Ocean Eng](#), 1991, 117: 105–119
- 27 Murali K, Mani J S. Performance of cage floating breakwater. [J Waterway Port Coast Ocean Eng](#), 1997, 123: 172–179
- 28 Uzaki K I, Ikehata Y, Matsunaga N. Performance of the wave energy dissipation of a floating breakwater with truss structures and the quantification of transmission coefficients. *J Coast Res*, 2011, 4: 687–697
- 29 Koo W. Nonlinear time-domain analysis of motion-restrained pneumatic floating breakwater. [Ocean Eng](#), 2009, 36: 723–731
- 30 He F, Huang Z, Wing-Keung Law A. Hydrodynamic performance of a rectangular floating breakwater with and without pneumatic chambers: An experimental study. [Ocean Eng](#), 2012, 51: 16–27
- 31 He F, Huang Z, Law A W K. An experimental study of a floating breakwater with asymmetric pneumatic chambers for wave energy extraction.

- [Appl Energy](#), 2013, 106: 222–231
- 32 Ji C Y, Chen X, Cui J, et al. Experimental study on configuration optimization of floating breakwaters. [Ocean Eng](#), 2016, 117: 302–310
 - 33 Ji C Y, Chen X, Cui J, et al. Experimental study of a new type of floating breakwater. [Ocean Eng](#), 2015, 105: 295–303
 - 34 Ji C, Cheng Y, Yang K, et al. Numerical and experimental investigation of hydrodynamic performance of a cylindrical dual pontoon-net floating breakwater. [Coast Eng](#), 2017, 129: 1–16
 - 35 Liang J, Chen Y, Liu Y, et al. Hydrodynamic performance of a new box-type breakwater with superstructure: Experimental study and SPH simulation. [Ocean Eng](#), 2022, 266: 112819
 - 36 Li C, Zhang H, Zhang H, et al. Wave-attenuation and hydrodynamic properties of twin pontoon floating breakwater with kelp. [Appl Ocean Res](#), 2022, 124: 103213
 - 37 Sun B, Li C, Yang S, et al. Experimental and numerical study on the wave attenuation performance and dynamic response of kelp-box type floating breakwater. [Ocean Eng](#), 2022, 263: 112374
 - 38 Zhang H, Sun B, Li Z, et al. Wave attenuation and motion response of floating breakwater with sponge material. [Ocean Eng](#), 2023, 277: 114325
 - 39 Duan W Y, Liu R Z, Chen J K, et al. Hydrodynamic analysis of floating breakwater with perforated structure based on the Taylor expansion boundary element method. [Ocean Eng](#), 2020, 200: 107044
 - 40 Xiao L, Kou Y, Tao L, et al. Comparative study of hydrodynamic performances of breakwaters with double-layered perforated walls attached to ring-shaped very large floating structures. [Ocean Eng](#), 2016, 111: 279–291
 - 41 Wu J P, Wang R K, Zheng X W, et al. The experimental investigation of the duckweed-type floating breakwater (in Chinese). *J Wuhan Univ Technol (Transp Sci Eng)*, 2001, 1: 91–93 [吴静萍, 王仁康, 郑晓伟, 等. 浮漂式防波堤的试验研究. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2001, 1: 91–93]
 - 42 Wu W D, Zhong H S, Huang J. Factors influencing wave attenuation effectiveness of pipe-type floating breakwaters (in Chinese). *J Hohai Univ (Nat Sci)*, 2002, 5: 79–82 [吴维登, 钟瑚穗, 黄俊. 钢管: 轮胎浮式防波堤消波的几个影响因子. 河海大学学报(自然科学版), 2002, 5: 79–82]
 - 43 Hegde A V, Kamath K, Magadam A S. Performance characteristics of horizontal interlaced multilayer moored floating pipe breakwater. [J Waterway Port Coast Ocean Eng](#), 2007, 133: 275–285
 - 44 Ge C, Wang G Y, Zhang Q, et al. Experimental study on the wave attenuation performance of raft floating breakwater (in Chinese). *J Waterw Harb*, 2019, 2: 150–157 [葛聪, 王国玉, 张琪, 等. 新型浮筏式防波堤消波性能试验研究. 水道港口, 2019, 2: 150–157]
 - 45 Yang C Y, Wu S R. The imitate experiment and research of raft floating breakwater (in Chinese). *J Chongqing Jianzhu Univ*, 2003, 1: 44–48 [杨成渝, 吴宋仁. 竹筏浮式消浪结构的试验研究. 重庆建筑大学学报, 2003, 1: 44–48]
 - 46 Loukogeorgaki E, Michailides C, Angelides D C. Hydroelastic analysis of a flexible mat-shaped floating breakwater under oblique wave action. [J Fluids Struct](#), 2012, 31: 103–124
 - 47 Jones D. An assessment of transportable breakwaters with reference to the container off-loading and transfer system (cots). Civil Engineering Laboratory, Naval Construction Battalion Center, DTIC_ADA062432, 1978
 - 48 Seymour R J, Hanes D M. Performance analysis of tethered float breakwater. [J Wtrwy Port Coast Oc Div](#), 1979, 105: 265–280
 - 49 Vethamony P, Chandramohan P, Sastry J S, et al. Estimation of added-mass and damping coefficients of a tethered spherical float using potential flow theory. [Ocean Eng](#), 1992, 19: 427–436
 - 50 Vethamony P. Wave attenuation characteristics of a tethered float system. [Ocean Eng](#), 1995, 22: 111–129
 - 51 Liu Y, Li Y, Teng B. Wave motion over two submerged layers of horizontal thick plates. [J Hydrodyn](#), 2009, 21: 453–462
 - 52 Dong G H, Zheng Y N, Li Y C, et al. Experiments on wave transmission coefficients of floating breakwaters. [Ocean Eng](#), 2008, 35: 931–938
 - 53 Koley S, Sahoo T. Oblique wave scattering by horizontal floating flexible porous membrane. [Meccanica](#), 2017, 52: 125–138
 - 54 Guo Y C, Mohapatra S C, Guedes Soares C. Experimental performance of multi-layered membrane breakwaters. [Ocean Eng](#), 2023, 281: 114716
 - 55 Wang K H, Shen Q. Wave motion over a group of submerged horizontal plates. [Int J Eng Sci](#), 1999, 37: 703–715
 - 56 Usha R, Gayathri T. Wave motion over a twin-plate breakwater. [Ocean Eng](#), 2005, 32: 1054–1072
 - 57 Shugan I V, Hwung H H, Yang R Y, et al. Elastic plate as floating wave breaker in a beach zone. [Phys Wave Phen](#), 2012, 20: 199–203
 - 58 Ning D, Zhao X, Göteman M, et al. Hydrodynamic performance of a pile-restrained WEC-type floating breakwater: An experimental study. [Renew Energy](#), 2016, 95: 531–541
 - 59 Chen Q, Zang J, Birchall J, et al. On the hydrodynamic performance of a vertical pile-restrained WEC-type floating breakwater. [Renew Energy](#), 2020, 146: 414–425

- 60 Ji Q, Xu C, Jiao C. Numerical investigation on the hydrodynamic performance of a vertical pile-restrained reversed L type floating breakwater integrated with WEC. *Ocean Eng*, 2021, 238: 109635
- 61 Zhao X, Xue R, Geng J, et al. Analytical investigation on the hydrodynamic performance of a multi-pontoon breakwater-WEC system. *Ocean Eng*, 2021, 220: 108394
- 62 Cheng Y, Fu L, Dai S, et al. Experimental and numerical investigation of WEC-type floating breakwaters: A single-pontoon oscillating buoy and a dual-pontoon oscillating water column. *Coast Eng*, 2022, 177: 104188
- 63 Cheng Y, Song F, Fu L, et al. Experimental investigation of a dual-pontoon WEC-type breakwater with a hydraulic-pneumatic complementary power take-off system. *Energy*, 2024, 286: 129427
- 64 Cheng Y, Du W, Dai S, et al. Wave energy conversion by an array of oscillating water columns deployed along a long-flexible floating breakwater. *Renew Sustain Energy Rev*, 2024, 192: 114206
- 65 Zhang H, Zhou B, Vogel C, et al. Hydrodynamic performance of a floating breakwater as an oscillating-buoy type wave energy converter. *Appl Energy*, 2020, 257: 113996
- 66 Wei Y, Yu S, Li X, et al. Hydrodynamic analysis of a heave-hinge wave energy converter combined with a floating breakwater. *Ocean Eng*, 2024, 293: 116618
- 67 Ikegami K, Ozaki M, Isozaki Y. Development of new type floating breakwater for open sea. Mitsubishi Juko Giho, 1994, 1: 45–48
- 68 Sun B, Zhang H, Li C, et al. Research progress and prospect of wave attenuation performance and integration of wave-energy converter of floating breakwater. *J Environ Eng*, 2023, 149: 03123001
- 69 Wavebrake. Wake tests with wavebrake and a high performance boat. <https://wavebrake.com/what.html>
- 70 Wang H Y, Sun Z C. Experimental study of a porous floating breakwater. *Ocean Eng*, 2010, 37: 520–527
- 71 Yang Z, Ji X, Xie M, et al. Experimental study on the dynamic response of a water ballast type floating breakwater. *Ocean Eng*, 2021, 233: 109012
- 72 Zhang H, Liu J, Cui J, et al. Experimental investigation on the hydrodynamic response and sectional improvement of ballast water Box-type floating breakwater. *Ocean Eng*, 2023, 273: 113802
- 73 Chou Z Z, Wu Q H, Liu J B, et al. Study on wave dissipation characteristics of flexible floating breakwater (in Chinese). Yangtze River, 2017, 10: 59–64 [仇正中, 吴启和, 刘建波, 等. 柔性浮式防波堤消浪特性研究. 人民长江, 2017, 10: 59–64]
- 74 Guo Y C, Mohapatra S C, Guedes Soares C. Experimental study on the performance of an array of vertical flexible porous membrane type breakwater under regular waves. *Ocean Eng*, 2022, 264: 112328
- 75 Guo Y C, Mohapatra S C, Guedes Soares C. An experimental study on the performance of combined membrane breakwaters against incident waves. *Ocean Eng*, 2023, 280: 114793
- 76 Yu J, Chen J H, Yao J J, et al. Numerical research on the hydrodynamic performance of a new-type floating breakwater (in Chinese). *Ocean Eng*, 2019, 6: 62–73 [余洁, 陈俊华, 姚建均, 等. 新型浮式防波堤水动力性能数值研究. 海洋工程, 2019, 6: 62–73]
- 77 Ji C, Bian X, Xu S, et al. Numerical study on the hydrodynamic performance of floating breakwaters with complex configurations. *Ocean Eng*, 2023, 273: 114032
- 78 Liang H, Qin H, Mu L, et al. Real-time model for wave attenuation using active plate breakwater based on deep reinforcement learning. *Ocean Eng*, 2023, 277: 114320
- 79 Cui J, Li B Y, Chen X, et al. Numerical simulation analysis of wave elimination of new type floating breakwater with multi-rigid body (in Chinese). *Shipbuild China*, 2023, 5: 235–248 [崔杰, 李柏阳, 陈鑫, 等. 多刚体组合式新型浮式防波堤消波性能数值模拟分析. 中国造船, 2023, 5: 235–248]

Recent progress on structural types of floating breakwaters

LIAN JiJian^{1,2}, LUO Jia¹ & WANG XiaoQun^{3,4}

¹ *Institute of Ocean Energy and Intelligent Construction, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China*

² *School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China*

³ *School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China*

⁴ *Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China*

Floating breakwaters, as flexible, economical, and environmentally friendly wave-dissipating structures, can improve the deep-sea operation and maintenance environment of offshore floating photovoltaic systems. This article systematically reviews the current research status and progress on floating breakwaters domestically and internationally. Based on the configurations and wave-dissipating principles, this review categorizes floating breakwaters into types such as box-type, hybrid-type, floating raft type, tethered float type, horizontal plate type, and wave energy utilization type. It summarizes their working principles, structural characteristics, wave-dissipating effects, and performance improvements. Finally, the article points out the existing problems and challenges in current floating breakwater research and looks ahead to future development directions in areas such as structural optimization, material innovation, intelligent control, functional integration, and performance evaluation. These insights provide valuable references for promoting the quality and efficient development of marine renewable energy.

offshore floating photovoltaic, ocean engineering, floating breakwater, wave energy dissipation

doi: [10.1360/SST-2024-0180](https://doi.org/10.1360/SST-2024-0180)