

Current Situation and Development Trend of Active Absorption Wave-Making System for Wavemaker

Yiping Ni^{1,2}, Yugang Li^{1,2}

¹Deepwater Engineering Research Center, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

²State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

Email: liyugang@dlut.edu.cn, niyiping@mail.dlut.edu.cn

Received: Oct. 28th, 2019; accepted: Nov. 13th, 2019; published: Nov. 20th, 2019

Abstract

In the field of marine engineering, people often use the method of physical model test to research in basin or tank. In the experiments, wavemaker is the core of the realization of wave simulation based equipment, but the wave-making system tends to produce secondary reflection that is adverse for experiments. So the reflected wave needs to be absorbed. There are two kinds of wave absorption methods—passive and active wave absorption. At present active wave absorption becomes the mainstream in the wave absorption technique. On the basis of comprehensive analysis of the present situation of domestic and international test basin and wave-making technology, combined with the needs of engineering practice, this paper points out the existing problems of active wave absorption method, and summarizes the wave absorption technique of wavemaker.

Keywords

Wavemaker, Active Wave Absorption, Irregular Wave

造波机主动消波系统现状与发展趋势

倪艺萍^{1,2}, 李玉刚^{1,2}

¹大连理工大学, 深海工程研究中心, 辽宁 大连

²大连理工大学, 海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连

Email: liyugang@dlut.edu.cn, niyiping@mail.dlut.edu.cn

收稿日期: 2019年10月28日; 录用日期: 2019年11月13日; 发布日期: 2019年11月20日

摘要

在海洋工程领域中, 常采用在水池或水槽等设施中进行物理模型试验的方法研究问题。在试验中造波机是实现造波模拟的核心基础装备, 但在造波过程中, 往往会产生二次反射, 这对于试验是非常不利的, 因此我们需要消除反射波, 消波方法有两种——被动消波和主动消波, 目前主动消波成为消波技术中的主流。在综合分析国内外试验水池与造波技术的现状的基础上, 结合工程实际的需要, 指出现有的主动消波方法存在的问题, 总结造波机的消波技术。

关键词

造波机, 主动消波, 不规则波

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在海洋工程试验中, 我们常在水池或水槽中安装造波机, 使其按照一定的方法产生所需的目标波浪, 但实验的精度和可靠性往往会受到二次反射的影响, 消波技术能够在产生波浪的同时吸收反射波浪, 提高实验精度, 消除造波板上产生的二次反射波。消波技术分为两种——被动消波和主动消波, 为了有效提高生成波的质量, 常采用主动消波的方法, 即造波机根据造波信号生成目标波, 由在造波板上或板前安装的波高仪测量从侧壁和对面传来的一次反射波部分, 然后加给造波机一种与原来运动反向的修正信号, 从而获得吸收反射波的效果, 避免二次反射波的产生, 如图 1 所示。

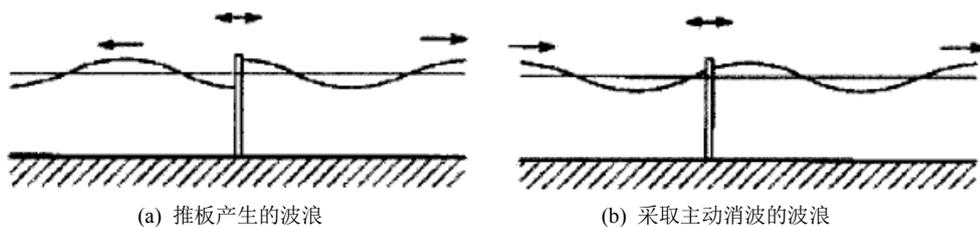


Figure 1. Schematic diagram of active wave absorption

图 1. 主动消波示意图

2. 国内外著名海洋工程深水试验池的发展概况

2.1. 挪威海洋技术研究所 Marintek

MARINTEK 的海洋水池是世界上最大的波浪水池之一。如图 2 所示, 水池宽 50 m, 长 80 m, 水池深 10 m, 是世界上最深的水池之一。它具有 L 形造波机, 可以产生两个垂直方向或组合角度的波浪。横向的造波机是一个液压铰接双摇板操作单元, 用于产生长峰规则和 irregular 波。在规则波的情况下, 最大波高接近 0.9 m, 波浪周期 0.8 s, 不规则波的最大波高可达 0.5 m, 波浪周期为 0.6 s 以上。纵向的电动铰接单摇板造波机, 由 144 个单独控制的波板组成, 这些单元可以在能量分布的广泛范围内产生短峰波。

可产生频率为 1.67 Hz 的不规则波, 根据波峰周期, 其有效波高约 0.20 m。这两个造波机可以同时操作, 以产生多种组合的波。在造波机对岸设有消波滩作为消波系统。在造波机对岸设有消波滩作为消波系统 [1] [2]。

该水池可用于船舶与海洋平台模型试验, 可以模拟风、浪、流各种环境条件, 可以用于任何形式的固定式与浮动式海洋结构物的模型试验。10 m 的水深可以满足海洋工程向深水领域发展的需要。主要研究项目包括船舶耐波性试验和操纵性试验、固定式平台水动力学性能试验、锚泊系统试验、海洋能源利用试验、浮动式人工岛试验、海洋装御系统试验、海洋生产系统试验, 海洋平台营运试验、海洋平台各种系统和管线试验。

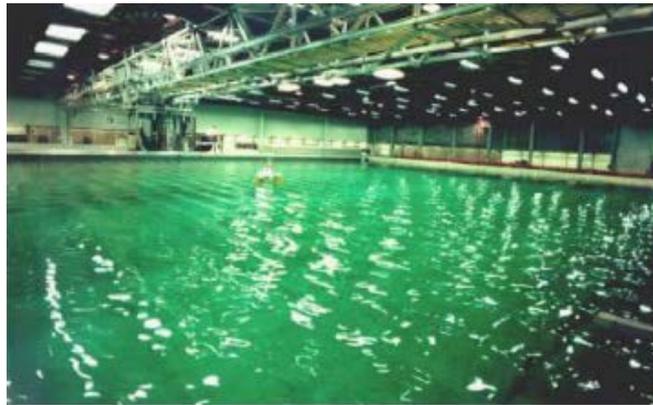


Figure 2. The ocean basin of Marintek
图 2. Marintek 海洋工程水池

2.2. 丹麦水力研究所 DHI

DHI 的近海波浪水池是一个大型的试验设施, 如图 3 所示, 该水池宽 30 m, 长 20 m, 总水深 3 m, 中心深井深 12 m。具有 60 个波板的造波机可以产生真实的三维波、规则的和不规则的长峰波, 也可产生随机或确定的不规则波。除了安装有传统的造波系统, 还有稳定的造流系统和造风系统, 造波机对岸设有消波滩[3]。

该浅水多向波水池配备了具有独特的造波和消波功能的三维造波机, 可用于复杂的海岸工程建模。浅水水池主要用于进行水与结构相互作用(如防波堤和堤防)、水与环境相互作用(如分散过程)和水与沉积物相互作用(沿海结构周围的冲刷过程)的实验研究, 并重点研究系泊浮式结构和深水固定结构。

2.3. 英国爱丁堡大学 FloWave

FloWave 的核心是一个 30 m 的圆形混凝土水槽, 其中包含直径 25 米的水池。如图 4 所示, 这个 5 m 深的水槽包含 240 万升淡水, 分为上下两部分, 中间有 1 m 厚的可移动底板。2 m 深的上部水槽被 168 个力反馈主动消波式造波机环绕, 而下部包含 28 个流动驱动单元, 它们可以同时且独立地以任意方向驱动流过上部测试体的水流, 最大水流速度为 1.6 m/s。

造波系统的初步校准是通过在多个方向上产生长峰规则波来完成的。通过将破碎波聚焦到水槽中心形成一个上冲射流, 可以对水槽的造波质量进行最终的检查。上冲射流的形成是一个高度非线性的现象, 它会导致极高的冲速, 是近岸波的速度的 20 倍以上, 且在测试中的射流高度可达到水面以上 10 m。在试验开始前, 如果水槽的表面静止, 则上冲水柱和入射波峰都表现出几乎完美的弧度, 直到射流开始碎片化为止, 这说明造波过程得到了很好的控制, 并且造波质量极高[4]。

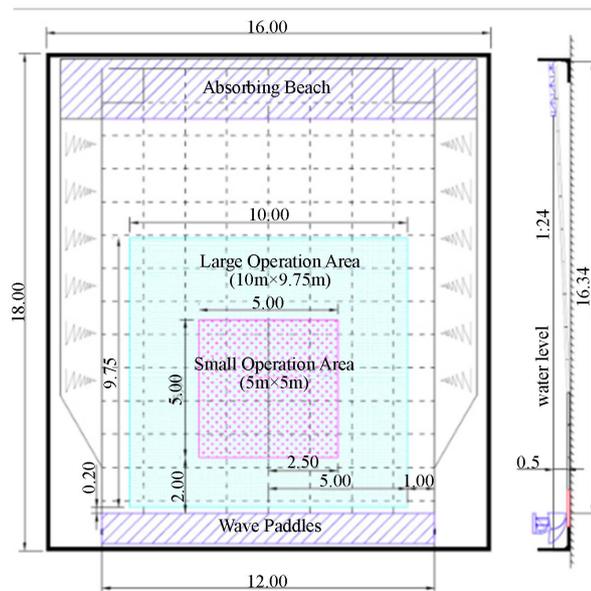
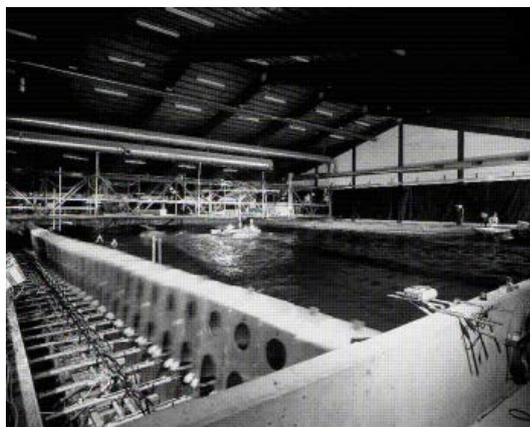


Figure 3. The offshore wave basin of DHI

图 3. DHI 近海水池



Figure 4. The FloWave circular tank

图 4. FloWave 环形水槽

环形水槽的优点是，由于水槽是圆形的，因此无方向性，其内的波和流可以以任意组合方式作用，也可以以任意相对方向作用于直径为 25 m，深度为 2 m 的上部水槽。FloWave 是一个新的世界级大型环

形水槽, 它标志着世界一流的海洋能源设备测试设施的启动。FloWave 可能比其他许多设施都要昂贵, 但是可以实现的测试强度要远远大于大多数其他设施。

2.4. 荷兰水力研究院 Delft

海洋工程水池宽 50 m, 长 50 m, 如图 5 所示, 它是一个多向波水池, 配有 2 台活塞式造波机, 彼此成直角放置(L 形)。波板段数量为 180 (100 + 80)个, 造波的长度是 66.4 m, 可在 -85° 到 $+85^{\circ}$ 之间任意方向传播, 该造波机能够根据两种已知的频率方向分布同时产生不规则(随机)的长峰波和短峰波, 最大规则波高度 $H_{max} = 0.45$ m, 最大有效波高 $H_{m0} = 0.25$ m, 波的频率范围在 0.2 Hz~2.5 Hz 之间。两台造波机均配有三维主动消波系统, 有效地消除了波板对波的二次反射。另外, 随机二阶波的波板控制也可以用来补偿杂散波[5]。

三维波浪对结构的影响是巨大的。由于该水池面积大, 且有 2 个多向造波机, 可以产生波、流的任意组合, 研究与此相关的实验是十分合适的。该水池用于沿海和近海相关项目, 例如: 防波堤(三维稳定性、防波堤圆头码头)、码头桩基和甲板上波浪压力和波浪力、护岸、波浪气候研究、波浪搅动进港、系泊船舶研究等等, 在所有这些研究中, 装备稳定性、水力性能、波浪冲击载荷以及为设计目的确定相关水力条件等方面都是最重要的。



Figure 5. The ocean basin of Delft
图 5. Delft 海洋工程水池

2.5. 荷兰海事研究中心 Marin

1) 海洋工程水池

水池由水池主体和一个深井组成, 水池长 45 m, 宽 36 m, 最大工作水深 10.5 m, 深井工作水深 30 m, 直径 5 m。水池相邻两边安装有分段式摇板式造波机, 板宽 0.4 m, 沿纵向有 112 个波板, 横向有 90 个波板, 每个波板有独立控制的驱动电机, 可制造短峰波等, 有义波高可达 0.3 m。造波机对岸设有消波滩, 并采用全三维主动消波系统。水池装备有光学 6 自由运动测量系统等先进的测量设备。可调节底板可进行浅水或深水测试, 30 m 深的深井可进行超深水测试, 如图 6 所示[1] [2]。

MARIN 海洋工程水池是现代海洋工程水池的典型代表, 该水池装备有各种大型仪器设备, 可以模拟各种复杂的海洋环境, 开展各种深海海洋工程结构物的模型试验研究工作。该水池是于 2000 年为了试验欧洲北海油田的深入开发建设的, 自上世纪末以来, 荷兰海事研究中心(Marin)为欧洲油田的开发和深海域的勘探开采发挥了积极作用, 近几年取得了显著的技术与经济效益。



Figure 6. The offshore basin of Marin
图 6. Marin 海洋工程水池

2) 船舶耐波性和操纵水池

该耐波性和操纵性水池是可以在任意方向的波浪中进行高速操纵船舶,如图 7 所示。该水池长 170 m, 宽 40 m, 深 5 m [1], 沿水池的相邻两侧设置分段式电驱动湿背式造波机, 沿纵向一侧有 269 个波板, 横向有 62 个波板, 波板宽 0.6 m, 铰链深 1.6 m, 在峰值周期为 2 s 时, 波高可达 0.45 m。可以在任意方向产生规则波、不规则长峰和短峰波。在水池两侧的每一波段上设置浪高仪, 用于三维主动消波系统。在造波机的对面, 安装了被动消波系统。

主要做以下研究: 任意方向的风浪中的耐波性试验; 在平静的水面和波浪中进行阻力和自推进试验; 利用约束模型对静水和波浪中的振荡(PMM)和旋臂进行试验, 以确定水动力系数; 在平静的水域或波浪中进行系泊或自由航行操纵试验; 近海工程和海上运输试验; 在系泊或固定物体上进行试验, 以确定风浪引起的运动和载荷。



Figure 7. The seakeeping and manoeuvring basin
图 7. 船舶耐波性和操纵水池

2.6. 中国船舶重工集团公司第 702 研究所 SCCRC

耐波性水池长 69 m, 宽 46 m, 深 4 m, 如图 8 所示, 沿水池的相邻长短边安装 188 段分段式电驱动湿背式造波机, 沿纵向有 116 个波板, 横向有 72 个波板, 波板宽 0.5 m, 铰链深 1.6 m, 按 1:50 缩尺,

可以在任意方向产生规则波、不规则长峰和短峰波, 包括百年一遇、最大波高为 30 m 的恶劣海况, 可产生的规则波的最大波高 0.5 m, 波的周期为 0.55 s; 不规则波的最大有效波高 0.4 m。采用被动消波, 在造波机的两侧安装 7 m 长的抛物弧形水泥格栅。采用 6 自由度光学测量系统[5]。

主要应用于船舶运动响应及耐波性事件测试、船舶波浪增阻测试、波浪载荷试验、波浪砰击载荷测试、甲板上浪及上浪冲击载荷测试、船舶耐波性理论预报与评估、海洋结构物运动性能测试(包括平台运动、上浪、砰击、气隙、爬高等)、波浪载荷测试等。



Figure 8. The seakeeping basin of SCCRC
图 8. SCCRC 耐波性水池实验室

2.7. 中国上海交通大学海洋深水池

深水池长 50 m, 宽 40 m, 深 10 m, 中心深井深 40 m, 直径 5 m, 如图 9 所示, 水池可模拟 4000 m 水深的深海环境, 造波系统采用 L 形多段式摇板式造波机, 共由 222 块单元摇板组成, 其中, 长边有 122 块摇板, 短边有 100 块摇板, 每块摇板宽 0.4 m, 相邻摇板之间有 4 mm 的间隙, 铰链在水线下高度为 1.2 m, 各摇板由各自的伺服电机驱动, 可模拟规则波、长峰不规则波和三维短峰波, 水池中央设有电容式浪高仪采集数据, 波高可通过造波系统的冲程进行调解以达到目标值要求。消波系统包括主动消波系统、造波机对岸的消波滩及侧壁消波系统等[6]。

该深水池具备再现大范围飓风、三维不规则波、各种奇异波浪、典型垂向流速剖面深水流等深海复杂环境的能力; 具备模拟船舶及海洋工程结构物在深海环境中出现的各种力学特性和工程现象的能力; 具备测量分析试验对象在深海环境条件作用下载荷、运动、结构动力响应等能力。

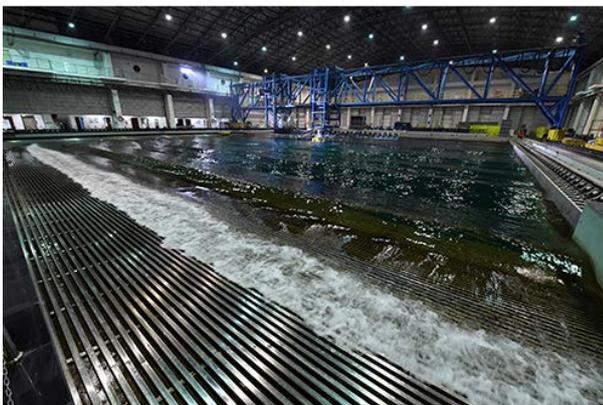


Figure 9. The ocean engineering pool, Shanghai Jiao Tong University
图 9. 上海交通大学海洋水池

3. 主动消波技术的发展

为了在实验过程中使得造波板处的波浪与目标波相同。我们常采用主动消波的方法, 即造波机根据造波信号生成目标波, 由在造波板上或板前安装的波高仪测量从侧壁和对面传来的一次反射波部分, 然后加给造波机一种与原来运动反向的修正信号, 从而获得吸收反射波的效果, 避免二次反射波的产生。

采用主动吸收系统有以下几个原因: 1) 可以吸收反射回造波机的波, 避免二次反射波破坏入射波; 2) 防止水池中的共振振荡, 减少最大测试持续时间; 3) 有效减少实验运行之间剩余波衰减所需的时间; 4) 减少造波机和池壁构成的人工边界对实验结果的影响, 提高实验结果准确性; 5) 达到低反射或零反射, 节约试验水池的占用空间。

1970年, 麻省理工学院的 Milgram 率先发表了关于主动消波方式的文章。传统的斜坡消波滩很难吸收小波高的波浪, 而消波式造波机则更容易吸收。在一个消波系统函数的综合中, 除了要求合成函数与理想消波系统接近外, 还提出四个准则: 1) 整个控制系统是稳定的; 2) 消波系统在频率为零的情况下有零响应, 以防止波板漂移; 3) 实际反馈滤波器的频域传递函数必须小于理论上的频域传递函数, 以防止产生高频噪声; 4) Milgram 从实验中得出结论, 对于所有频率, 反射系数应小于 1, 以防止非线性波中高频放大引起显著的二次谐波效应。在实验结果表明, 有限振幅效应对一阶波的反射系数影响不大, 且主动吸收适用于小波高波浪, 而传统的消波滩吸收更适用于大波高波浪[7]。

1981年, 为了克服 Milgram 的波板后的流体共振问题, 加州大学伯克利分校的 Salter 设计了一种干背式波板, 使测量的力完全取决于作用在板面上的波浪压力。他提出通过单个力传感器测量造波机上的力作为修正信号输入造波机, 消波式造波机除了产生所需的入射波外, 波板运动可以抵消或“吸收”任何到达它的反射波。此方法有三个优势: 1) 力传感器在整个造波机前取一个平均值, 可以在横波存在的情况下获得最好的统计样本; 2) 力传感器可以完全不受水体中的化学和生物变化的影响; 3) 易将来自力传感器的信号与来自速度传感器的信号结合起来, 从而修正给予水的能量速率。该系统是第一个在永久性实验室设施中运行的主动消波系统, 在一个多向波水池中, 它也可作为一个准三维系统[8]。

1989年, G.N. Bullock 和 G.J. Murton 指出 Salter 的测量水动力的方法更适用于低惯量造波板, 对于高惯量造波板来说, 测量板前水面的高度变化是一种更好的解决方案。对于浅水波, 粒子运动均匀地分布在整个水深, 优先选用活塞或楔形造波机。Bullock 和 Murton 开发了楔形造波机的主动消波系统, 在长 20.7 m, 宽 0.9 m, 深 1.2 m 的水槽中进行试验, 波传感器与楔形体一起来回运动, 测量的仰角信号被转换为使用模拟递归滤波器的波板运动, 楔形板有以下优点: 1) 适用于浅水; 2) 波浪只产生于正面, 因此不需要后面的海滩, 水槽的可用长度略小于其总长度; 3) 设计简单便宜, 无需复杂的密封和水下轴承。事实证明, 吸收系统比传统的反射系统有了很大的改进, 提出了一种具有较好的吸收特性的滤波器设计[9]。

1990年, Hiromaru Hirakuchi 等和 Chia Chuen Kao 等针对推板式造波机, 采用“时域控制方程”方法, 从时域的角度进行消波的研究, 在造波板上设置浪高仪来测量位于造波板上的波面高度, 进而修正产生波浪的造波信号来达到消除二次反射的目的, 通过深入的理论研究可以从反射系数的角度对系统性能进行理论评估。但对于不规则波, 由于波浪是由无限个频率的组成波叠加而成, 采用数学近似的方法, 即用近似的常数代替涉及无穷个组成波的未知参数, 这种方法计算量较小且反应迅速, 但是对再反射可能造成时间延迟。目前, 我国及日本水池的吸收式造波广泛采用 Hirakuchi 理论[10]。

1991年, Ikeya 的理论发展是建立在具有全反射池壁的矩形水池的基础上的。波场以特征模的形式显示, 该特征模对应于多向波造波机的傅里叶展开, 其空间周期为水池宽的两倍。概述了将吸收控制信号与水面高度联系起来的方法: 1) 将测量到的表面高度分解为本征模, 并将每个模与吸收控制信号

联系起来。因此, 所有反馈信号都会影响到控制信号, 因此必须经常进行分析; 2) 扩展传递函数 $\cos\theta$ 的变化, 将结果与沿测量高程的造波机的二阶导数联系起来; 3) 忽略方向变化, 对应于准三维系统。Ikeya 的第一种方法中, 滤波器的应用受到横向边界条件的影响, 这意味着空间周期是造波机宽度的两倍, 未尝试将理论与预期消波能力直接联系起来。在第二种方法中, 只会出现三个滤波器系数, 而在第三种方法中, 滤波器将减少到一个系数。在整个研究过程中, 该方法忽略了频率变化, 从而限制了其在实际应用中的适用性[11]。

1994年, Christensen 和 Frigaard 采用“入、反射波分离造波修正”方法, 在造波板前布置两个浪高仪, 从理论上讲, 一个浪高仪可以为消波系统提供足够的信息, 但为了系统的稳定, 需要使用两个浪高仪。实际上, 使用这两个浪高仪进行反射分析: 相移一个信号, 并将它加到另一个信号中, 抵消来自造波机的波。产生的信号只包含要吸收的波, 并且可以使用有限脉冲响应(即非递归)数字滤波器对所需的吸收信号进行线性转换。与传统的反射造波机相比, 该方法获得了更好的入射波谱, 但由于造波系统需要一定的响应时间, 且瞬时利用了前面一定时段的波浪数据, 长时间运行易造成误差的积累, 影响了主动消波的效果[12]。

1994年, 丹麦水动力研究所(DHI) Schäffer 等则采用“频域滤波器”方法[13], 在造波板前设置浪高仪, 通过时域分析分离出水池中的反射波并转化为造波机的修正后的造波信号来达到消波的目的。该系统利用一个适合于广泛频率范围内的目标传递函数的递归数字滤波器, 具有浪高仪的自动校准功能, 适用于推板式和摇板式造波机, 除了不规则波测试中显示入射波的质量外, 系统在吸收系数(1 减去反射系数)方面的性能也是良好。目前, 西欧水池广泛采用 Schäffer 理论[14] [15] [16]。

将水槽系统应用于多向造波机的每一段, 可以得到准三维(二维)主动吸收系统, 但是这忽略了方向性效应。上述均是在准三维系统上的研究, 相对于准三维方法, 全三维系统具有的主动吸收算法考虑了反射波角的影响, 可以区分不同方向的波, 提高了斜波的吸收能力。

1996年, Schäffer 和 Skourup 基于1994年 Schäffer 等的 DHI 消波系统, 在数值波浪水池中, 利用线性边界积分方程的方法, 将分段造波机建模为运动边界, 采用关于空间变化的三阶滤波器, 将水动力反馈看作一个随时空变化的信号, 用于造波机的控制信号, 实现每个造波机段控制之间的耦合, 进一步减少了二次反射, 这很好地实现了主动吸收系统, 且所得实验数据与理论一致。此方法涵盖了很宽的频率范围, 而且随着波浪倾斜度的增加, 全三维系统的性能变得更好。后来这种全三维消波系统被用于荷兰 MARIN 水池的造波系统[17]。

2003年, 柳淑学等采用“时域控制方程”方法, 针对不规则波的未知参数问题提出了代表频率法, 在造波板上和板前布置浪高仪, 并进行了物理验证[18]。在其基础上, 王先涛针对不规则波提出了代表频率加权平均法, 并根据波形稳定和吸收率等概念和方法定量分析吸收式造波的效果[19]。

2009年, Johannes Spinneken 和 Chris Swan 进一步研究水动力反馈系统, 把造波机看做一个耦合的质量—弹簧—阻尼器系统, 综合利用造波机的力、位置、速度和加速度, 吸收系统采用阻抗数字滤波器网络, 并建立了一个完整的频域模型, 包括水动力反馈、波板动力学以及吸收滤波器。试验中, 在板上施加单一频率的正弦力会使它运动, 并产生一个波场, 反过来, 这个波场会由力传感器感知, 在波板上产生一种力。这种力的性质取决于波的完全非线性, 这种非线性力决定了造波机下一步要施加的力。因此, 在一个频率上刺激一台力控的造波机, 就会产生一个非线性或多频率的板运动, 这与位置控制的造波机形成了鲜明的对比。数值试验表明, 与位移反馈模式相比, 力反馈模式减少了水槽中的散射波数量[20]。

2013年, 李宏伟提出了智能控制算法的主动消波方法, 即采用基于 S 面控制器(Sigmoid 曲面函数型

控制器)的主动消波方法, 由控制算法解算目标波所需的造波机的运动参数, 将主动消波问题转化为控制规律的求解问题, 并验证了该控制器的良好性能[21]。

4. 结论

造波机主动消波理论及技术在海洋试验水池或水槽中日益重要, 本文针对实验室内水池和水槽设施在波浪试验中的二次反射波问题, 研究了造波机的主动吸收技术。对于最常见的水动力反馈系统来说, 传感器的动态精度很大程度上影响了主动吸收的效果, 所以保证系统的稳定性是首要问题, 此时需要在离造波机一定距离处设置多个浪高仪, 然而, 在这种情况下, 从浪高仪到造波机之间波浪传播产生的相位滞后会影响到造波机的实际性能, 而且, 为了通过非递归滤波器技术充分实现相关的传递函数, 需要较大的相位滞后(即长距离), 但是长距离的存在也产生了累积性误差。

如今, 大多数主动消波系统都利用了线性理论框架[22], 因此, 我们需要寻求一种非线性理论来提高系统性能。但是对于色散波来说, 即使使用最精确的系统, 在计算一阶波高时也会出现误差, 因此, 只有改进线性理论, 才能够整合非线性理论, 这不是仅仅使用非线性系统, 而是选择一个线性主动吸收系统与次谐波产生的二阶波共存的、且不会形成二阶模态的系统。目前, 将一个可实现的二维时空滤波器直接拟合到目标方向传递函数上, 用 ω 和 k_y 表示, 是改进的最佳途径。这种方法的主要优点是它在优化过程中考虑了多向性, 而不需要考虑波浪方向的限制。另外, 这种方法不需要假设浅水理论等, 忽略了衰减态和特定方向的扩展函数, 这些假设中已经有些被现有的多数理论采用[11]。

参考文献

- [1] 田天. 海洋结构物环境适应性物理模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- [2] 徐剑. 试论海洋工程水池工艺设计的基本原理[J]. 造船技术, 2008(1): 32-35.
- [3] O'Boyle, L. and Whittaker, T. (2017) Methods to Enhance the Performance of a 3D Coastal Wave Basin. *Ocean Engineering*, **135**, 158-169. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.03.006>
- [4] <https://www.flowavett.co.uk/facility>
- [5] 刘毅, 程少科, 郑堤. 大功率造波机中驱动技术的研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2016, 52(24): 155-163.
- [6] 彭涛. 海洋工程水池中强非线性波浪数值与试验研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [7] Milgram, J.H. (1970) Active Water-Wave Absorbers. *Journal of Fluid Mechanics*, **42**, 845-859. <https://doi.org/10.1017/S0022112070001635>
- [8] Salter, S.H. (1981) Absorbing Wave-Makers and Wave Tanks. *Proceedings of Directional Wave Spectra Applications*, Berkeley, 185-202.
- [9] Bullock, G.N. and Murton, G.J. (1989) Performance of a Wedge-Type Absorbing Wave Maker. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **115**, 1-17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(1989\)115:1\(1\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(1989)115:1(1))
- [10] Hirakuchi, H., Kajima, R. and Kawaguchi, T. (1990) Application of a Piston-Type Absorbing Wave-Maker to Irregular Wave Experiments. *Coastal Engineering in Japan*, **33**, 11-24. <https://doi.org/10.1080/05785634.1990.11924520>
- [11] Schäffer, H.A. and Klopman, G. (2000) Review of multidirectional Active Wave Absorption Methods. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, **126**, 88-97. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2000\)126:2\(88\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2000)126:2(88))
- [12] Christensen, M. and Frigaard, P. (1994) Design of Absorbing Wave Maker Based on Digital Filters. *Proceedings of the International Symposium: Waves-Physical and Numerical Modelling*, Vancouver, 100-109.
- [13] Schäffer, H.A., Stolborg, T. and Hyllested, P. (1994) Simultaneous Generation and Active Absorption of Waves In-Flumes. *Proceedings of the International Symposium: Waves-Physical and Numerical Modelling*, Vancouver, 90-99.
- [14] Nallayarasu, S., Fattand, C.H. and Shankar, N.G. (1995) Estimation of Incident and Reflected Waves in Random Wave Experiments. *Ocean Engineering*, **1**, 77-86. [https://doi.org/10.1016/0029-8018\(93\)E0011-G](https://doi.org/10.1016/0029-8018(93)E0011-G)
- [15] Kwon, S.H., Moon, W.M. and Lee, H.S. (2003) Experimental and Numerical Studies on the Development of a New Wave Absorber. *Ocean Engineering*, **30**, 185-203. [https://doi.org/10.1016/S0029-8018\(02\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0029-8018(02)00019-7)
- [16] Salter, S.H. 吸收式造波机和宽式波浪槽[J]. 高恒庆, 译. 海岸工程, 1996, 15(4): 67-75.

-
- [17] Schäffer, H.A., Fuchs, J.U., Hyllested, P., Mathiesen, N. and Wollesen, B. (2000) An Absorbing Multidirectional Wave Maker for Coastal Applications. *Proceedings of 27th International Conference on Coastal Engineering*, Sydney, 981-993.
- [18] 柳淑学, 吴斌, 李木国, 王静. 无反射不规则波造波机系统的研究[J]. *水动力学研究与进展 A*, 2003, 18(5): 532-539.
- [19] 王先涛. 吸收式造波机理论[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2002.
- [20] Spinneken, J. and Swan, C. (2009) Second-Order Wave Maker Theory Using Force-Feedback Control. Part I: A New Theory for Regular Wave Generation. *Ocean Engineering*, **36**, 539-548.
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2009.01.019>
- [21] 李宏伟, 庞永杰, 秦再白, 杨溢. 基于 S 面控制的无反射造波系统[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2013, 43(s1): 197-201.
- [22] Newman, J.N. (2010) Analysis of Wave Generators and Absorbers in Basins. *Applied Ocean Research*, **32**, 71-82.
<https://doi.org/10.1016/j.apor.2010.04.004>