

2020年度上海市级虚拟仿真实验教学课程
(原虚拟仿真实验教学项目)申报表

学 校 名 称



上海海洋大学

实验项目名称

风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验

所属课程名称

海浪原理与计算

所属专业代码

070701

实验教学项目负责人姓名

于潭

有效链接网址

<https://vlab.shou.edu.cn/virexp/waveflume>

上海市教育委员会制

二〇二〇年十月

填写说明和要求

1. 以 Word 文档格式，如实填写各项。
2. 表格文本中的中外文名词第一次出现时，要写清全称和缩写，再次出现时可以使用缩写。
3. 所属专业代码，依据《普通高等学校本科专业目录（2012 年）》填写 6 位代码。
4. 不宜大范围公开或部分群体不宜观看的内容，请特别说明。
5. 表格各栏目可根据内容进行调整。

1. 实验教学项目教学服务团队情况

| 1-1 实验教学项目负责人情况 | | | | | |
|---|-------------------|----------|-----------|------|-------------------|
| 姓 名 | 于潭 | 性别 | 女 | 出生年月 | 1987. 07 |
| 学 历 | 博士研究生 | 学位 | 博士 | 电 话 | 021-61900169 |
| 专业技 术职务 | 讲师 | 行政 职务 | 院教务 助理 | 手 机 | 15618062776 |
| 院 系 | 海洋科学学院 | | | 电子邮箱 | tyu@shou. edu. cn |
| 地 址 | 上海市浦东新区沪城环路 999 号 | | | 邮 编 | 201306 |
| <p>教学研究情况：主持的教学研究课题（含课题名称、来源、年限，不超过 5 项）；作为第一署名人在国内外公开发行的刊物上发表的教学研究论文（含题目、刊物名称、时间，不超过 10 项）；获得的教学表彰/奖励（不超过 5 项）。</p> <p>任教以来，承担了《海浪原理与计算》、《海洋数据处理与可视化》、《海洋学概论》、《海洋和大气数据可视化课程设计》等本科课程；做好教学工作的同时，担任上海海洋大学海洋科学学院教务助理等行政职务。任职期间，积极服务学院的学科和专业建设，作为主要参与者完成“海洋科学与技术上海市实验教学示范中心”、“上海海洋大学物理海洋学虚拟仿真实验室”等多项省级和校级实验教学中心的申报与建设工作。同时，个人积极参与教学改革，近年主持教改项目、论文及奖励如下：</p> <p>（1）主持的教学研究课题（含课题名称、来源、年限，不超过 5 项）</p> <p>① 自主设置场景的风浪流水槽虚拟仿真教学,教育部-北京润尼尔网络科技有限公司产学研合作协同育人项目,2020 年 4 月-2021 年 4 月。</p> <p>② 基于流场的风浪流水槽虚拟仿真实验 V2.0,2020 年度校级虚拟仿真实验教学项目,2020 年 1-12 月。</p> <p>③ 风浪流水槽虚拟仿真实验,2018 年度校级虚拟仿真实验教学项目,2018 年 1-12 月。</p> <p>④ 海浪原理与计算,2018 年上海海洋大学课程思政重点建设项目,2018 年 3-12 月。</p> <p>⑤ 海洋数据处理与可视化,2019 年度上海市教委本科重点课程,2019 年 6 月-2021 年 5 月。</p> <p>（2）作为第一署名人在国内外公开发行的刊物上发表的教学研究论文（含题目、刊物名称、时间，不超过 10 项）</p> <p>① 于潭,胡松,魏永亮,《海浪原理与计算》课程设置研究,科教导刊,2019,9,91-92、173。</p> <p>② 于潭,胡松,魏永亮,刘浩,海洋类专业“课程思政”设计思路的探讨,当代教育实践与教学研究,2020(04 上),86-87。</p> <p>③ 于潭,胡松,魏永亮,刘浩,海洋专业人才数据处理与分析能力个性化培养模式的实践研究,教育教学论坛,2020(35),206-207。</p> <p>④ 于潭,胡松,魏永亮,“小组学习”中如何公平的进行“个人评价”,课程教育研究,2018,37,160。</p> | | | | | |

⑤ 于潭,胡松,梁超,基于“问题导向”的物理海洋学教学实践,科技视界,2017,01,121-122。

⑥ 于潭,唐议,胡松,梁超,任务驱动-翻转课堂联合教学法的实践探索——以“海洋数据处理与可视化”课程为例,中国地质教育,2017,26(02),65-69。

⑦ 于潭,梁超,魏永亮,胡松,“海洋数据处理与分析”课程海洋随机过程探讨,中国地质教育,2014,增刊。

⑧ 于潭,胡松,魏永亮,《基于“大作业”+“全过程”的任务驱动—翻转课堂课程考核评价方法探究——以“海洋数据处理与可视化”为例》,教育教学论坛,2019,10,146-149。

(3) 获得的教学表彰/奖励 (不超过 5 项)

① 2019 年,于潭,上海海洋大学,2018-2019 年度上海海洋大学优秀实验项目(风浪流水槽虚拟仿真实验)。

② 2017 年,于潭,上海海洋大学,2017-2018 学年秋季学期“好课堂”(海浪原理与计算)。

③ 2019 年,于潭、胡松、魏永亮、刘浩、刘瑜,上海海洋大学,2019 年校级精品课程(海洋数据处理与可视化)。

④ 2017 年,于潭,上海海洋大学,2017 年校级青年教师讲课比赛二等奖。

⑤ 2019 年,于潭,上海海洋大学,汉宝奖学金优秀青年教师奖。

学术研究情况: 近五年来承担的学术研究课题(含课题名称、来源、年限、本人所起作用,不超过 5 项);在国内外公开发行人物上发表的学术论文(含题目、刊物名称、署名次序与时间,不超过 5 项);获得的学术研究表彰/奖励(含奖项名称、授予单位、署名次序、时间,不超过 5 项)

(1) 近五年来承担的学术研究课题(含课题名称、来源、年限、本人所起作用,不超过 5 项)

① 中高风速下近海 CO_2 交换速率遥感反演及对通量估算的影响,国家自然科学基金[41906152],2020 年 1 月-2022 年 12 月,主持,负责反演算法的建立和影响机制的研究。

② 基于海况条件的海气 CO_2 交换速度和通量研究,上海市青年科技英才扬帆计划[14YF1410300],2014 年 7 月 1 日-2017 年 6 月 30 日,主持,负责不同海况下海气 CO_2 交换速度不确定性原因的研究。

③ 环形-悬浮物浓度气体交换水槽研制,浙江省博士后科研项目择优资助[BSH1502044],2015 年 1 月-2016 年 12 月,主持,负责环形-悬浮物浓度气体交换水槽研制。

④ 基于遥感的热带太平洋海-气 CO_2 交换速度和通量的气候响应研究,中国科学院海洋环流与波动重点实验室开放基金[KLOCW1801],2018 年 01 月 01-2019 年 12 月 31 日,主持,负责热带太平洋海-气 CO_2 交换速度和通量的气候响应研究。

⑤ 基于悬浮物浓度的海气二氧化碳交换速度研究,2015 年度中央级公益性科研院所基本科研业务费专项[JG1503],2015 年 7 月 1 日-2017 年 6 月 30 日,主持,设计了一个用于研究悬浮物浓度对海气二氧化碳交换速度影响的水槽。

(2) 在国内外公开发行人物上发表的学术论文(含题目、刊物名称、署名次序与时间,不超过5项)

项目负责人致力于海浪参数的遥感反演工作,并使用波浪参数建立了CO₂交换速率的计算方法。以下5篇SCI论文均与波浪参数计算有关,为波浪的虚拟仿真参数化提供支撑。

① Yu Tan, Pan Delu, Bai Yan, He Yijun, Li Dawei, Liang Chao, A quantitative evaluation of the factors influencing the air-sea carbon dioxide transfer velocity, Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(11), 68-78, doi: 10.1007/s13131-016-0949-z, SCI.

② Yu Tan, He Yijun, Song Jinbao, Shen Hui, Wang Juanjuan, Gao Guoping, Uncertainty in air-sea CO₂ flux due to transfer velocity, International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(11-12), 4340-4370, DOI: 10.1080/01431161.2014.916046, SCI.

③ Yu Tan, He Yijun, Yan Xiaohai, Global air-sea surface carbon dioxide transfer velocity and flux estimated using 17 a altimeter data and a new algorithm, Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(10), 24-33, doi: 10.1007/s13131-013-0362-9, SCI.

④ Yu Tan, He Yijun, Zha Guozhen, Song Jinbao, Liu Guoqiang, Guo Jie, Global air-sea surface carbon-dioxide transfer velocity and flux estimated using ERS-2 data and a new parametric formula, Acta Oceanologica Sinica, 2013, 32(7), 78-87, doi:10.1007/s13131-013-0334-0, SCI.

⑤ Zha Guozhen, He Yijun, Yu Tan, He Qingyou and Shen Hui, The force exerted on a cylindrical pile by oceanic internal waves derived from nautical X-band radar observations and in-situ buoyancy frequency data, Ocean Engineering, 2012, 41, 13-20, doi:10.1016/j.oceaneng.2011.12.014, SCI.

(3) 授权专利及软件著作权(不超过5项)

① 于潭,胡松,魏永亮,风浪流水槽虚拟仿真实验系统[简称:OWVLab MAMINPPJV1.0,中华人民共和国国家版权局,2019SR0749284,4170041。

② 于潭,梁超,陶邦一,研究海-气气体交换速度实验的气体交换水槽及其使用方法,2017,ZL201510829305.8,发明专利。

③ 于潭,梁超,陶邦一,研究海-气气体交换速度实验的气体交换水槽,2016,ZL 2015 2 0949181.2,实用新型专利。

④ 李子昂,吴卓琳,潘祖钰,陈洁洁,于潭(通讯),胡松,基于视频的实验室小型水槽波浪参数获取软件[简称:波浪参数获取JV1.0,中华人民共和国国家版权局,2019SR0974698,4395455。

⑤ 周昕雨,徐书文,张炳旭,肖佳俊,于潭(通讯),基于岸线类型的阈值分割岸线半自动提取软件[简称:岸线半自动提取软件V1.0],中华人民共和国国家版权局,2019SR1210469,4631226。

(4) 获得的学术研究表彰/奖励(含奖项名称、授予单位、署名次序、时间,不超过5项)

①2017年,于潭,上海市科学技术委员会,上海市青年科技英才扬帆计划。

②2015年,于潭,第三届国际海洋前沿研究暑期学校,口头报告三等奖。

③2016年,于潭,长江口及邻近海域海洋生物与生态野外实习基地,指导张家赢、张贤良获长江口及邻近海域海洋生物与生态野外实习基地第二届优秀大学生报告论坛优秀报告一等奖。

④2017年,于潭,长江口及邻近海域海洋生物与生态野外实习基地,指导黄菊、杨伟获长江口及邻近海域海洋生物与生态野外实习基地第三届优秀大学生报告论坛优秀报告一等奖。

1-2 实验教学项目教学服务团队情况

1-2-1 团队主要成员 (含负责人, 5 人以内)

| 序号 | 姓名 | 所在单位 | 专业技术职务 | 行政职务 | 承担任务 | 备注 |
|----|-----|--------|--------|-------|----------|--------|
| 1 | 于潭 | 上海海洋大学 | 讲师 | 院教务助理 | 负责人及教学实施 | 项目管理 |
| 2 | 胡松 | 上海海洋大学 | 教授 | 副院长 | 框架设计 | 项目规划 |
| 3 | 魏永亮 | 上海海洋大学 | 副教授 | 副系主任 | 脚本设计 | 教学设计 |
| 4 | 赵红波 | 上海海洋大学 | 高级工程师 | 实验室主任 | 网站维护 | 实验设计 |
| 5 | 王家为 | 上海海洋大学 | 助理实验员 | 实验教师 | 数据采集 | 在线教学服务 |

1-2-2 团队其他成员

| 序号 | 姓名 | 所在单位 | 专业技术职务 | 行政职务 | 承担任务 | 备注 |
|----|-----|---------------|--------|------|------|------|
| 1 | 王广 | 北京润尼尔网络科技有限公司 | 网络工程师 | 项目总监 | 网站维护 | 项目设计 |
| 2 | 王家斌 | 北京润尼尔网络科技有限公司 | 网络工程师 | 项目经理 | 网站维护 | 项目设计 |
| 3 | 于自强 | 北京润尼尔网络科技有限公司 | 软件工程师 | 产品经理 | 软件更新 | 技术支持 |

项目团队总人数: 8 (人) 高校人员数量: 5 (人) 企业人员数量: 3 (人)

注: 1.教学服务团队成员所在单位需如实填写, 可与负责人不在同一单位。

2.教学服务团队须有在线教学服务人员和技术支持人员, 请在备注中说明。

2. 实验教学项目描述

2-1 名称

风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验

2-2 实验目的

波浪是海洋中的重要现象,《海浪原理与计算》是海洋科学专业物理海洋方向的必修课。探索波浪的生成机制与运动过程是物理海洋学的重要研究方向,覆盖了波浪成长、传播、破碎,浪流相互作用、海气相互作用、浪与地形相互作用等海洋科学领域。风浪流水槽实验对于《海浪原理与计算》等海浪相关课程的学习和海浪研究是至关重要的手段。

目前,实体的风浪流水槽实验面临以下难题:

(1) 危险系数高

实体风浪流水槽高3米,水深可达2米,学生在水槽上方安装必要的实验设备危险性高,容易引发摔伤、溺水、触电等严重安全事故。

(2) 实验难度大耗时长

实体风浪流水槽实验只能开展简化个例实验,一次完整的精细地形实验或海气相互作用实验需要连续半个月至一个月的时间。学生通过实体风浪流水槽实验难以实现对波浪生成机制与运动过程的全貌认知。

(3) 实验资源匮乏且成本高

实体风浪流水槽占地面积广($40\text{m}\times 10\text{m}=400\text{m}^2$),水电耗费大(2000元/时),不能满足每位学生参与实验的需求,更不能多次重复实验,尤其是学生宝贵的实验设计方案难以得到实现。

(4) 实验设备性能有局限性

受电机功率限制,真实风浪流水槽实验难以进行高风速($>20\text{m/s}$)下波浪的物理现象及变化规律的研究。

为了解决上述问题,开发了风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验(图2-2-1),实验涵盖实验操作、自主搭建实验和创新实验设计三个层次,通过实验应达到以下目的:

(1) 理论联系实际,掌握波浪的制造方法和测量方法。

(2) 掌握波浪的生成机制与运动过程,加强对该科学问题全貌认知。

(3) 掌握不同场景实验搭建的基本步骤和设计方法。

(4) 通过紧急情况的应急反应训练提升学生的心理素质和应急能力。

(5) 培养学生设计创新实验解决复杂科学问题的能力,为毕业后科研和业务工作打下基础,提高海洋科学专业人才的综合素质和创新能力。



图 2-2-1 风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验场景

2-3 实验课时

- (1) 实验所属课程所占课时：**32** 课时
所属课程：海浪原理与计算
- (2) 该实验项目所占课时：**6** 课时
 - ① 风浪制作、测量，风、浪数据分析，波浪生成机制探究 2 学时；
 - ② 调制波制作、测量，波浪参数计算分析，波浪运动过程探究 2 学时；
 - ③ 自主设计 DIY 实验和创新性实验设计 2 学时。

2-4 实验原理（简要阐述实验原理，并说明核心要素的仿真度）

知识点：共 8 个

(1) 风浪流水槽

风浪流水槽（图 2-2-1）通过造风系统、造波系统和造流系统，在封闭的管道中形成人工的风、浪和流，构建模拟海面实际情况的背景环境，能够局部再现海上风、浪、流以及相互作用的基本动力过程和各種小尺度物理海洋现象，可以运用各种技术手段，近距离观测海洋现象和运动规律，还可以进行多种模拟实验。

(2) 波浪生成机制（风洞造波原理）

波浪（海浪）是海-气相互作用的产物。产生和维持海浪的能量主要来自大气动能，当海面有风时，海面水质点就会在风场的作用下，产生一种不规则的起伏，即风浪。在无风天气中，远方传来的浪，叫做涌浪。风浪或涌浪一旦生成后又改变波面附近的空气流场结构，改变后的流场又影响海浪的状态。

风浪生成有两个核心问题，一个是风的能量如何传递到风浪呢？另一个是进入风浪的能量如何进行分配和变化呢？波浪生成源于波面上的应力变化，应力变化可归咎于随平均流输送的湍涡和波浪引起的湍涡。

① Jeffrey (1924,1925)遮拦理论

海浪生成机制的研究起源于 Jeffrey (1924,1925)证明水面上的压力变化可以使风将能量传递给波浪,单位时间跨过单位水面,空气通过压力传递给水的能量通量为:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w g} \overline{p \frac{\partial \zeta}{\partial t}} = \frac{1}{2\rho_w g} S \rho_a (U_\infty - c)^2 (ak)^2 c \quad (1)$$

通过压力传递的能量取决于压力与波面斜率同相位的分量,能量输入依振幅幂指数变化: $E \propto a^2$ 。风速和相速度 c 相差越大,风输入给波浪的能量就越大。

在 Jeffrey (1924,1925)理论中,假定气流流线自波峰附近与波面分离,迎风面的压力大于背风面的压力,这种不对称的压力分布于波面斜率相同,所以能够导致能量的传递和风浪的成长,称为遮拦理论,将 S 称为遮拦系数。

遮拦系数 S 可以通过由于分子粘性失去的能量以及维持该能量损失所需要的最小风速 U_{\min} 来确定。计算得到,遮拦系数 S 正比于 U_{\min}^3 ,因此,最小风速的选择变得非常关键。Jeffrey (1924,1925)选择 $U_{\min}=1.1\text{m/s}$,得到 $S=0.3$ 。而观测表明,风浪常在无流线分离的情况下成长,实测的遮拦系数远小于预期值。

② Miles (1957)切流不稳定机制

Miles (1957)考虑了在海风吹送下生成的波浪对大气产生的扰动,或者说,考虑了风生波浪对平均气流 $U(z)$ 产生的摄动作用,即考虑波-平均流的作用,但不考虑波动对大气湍流的作用。空气流的平均水平速度 U 随高度 z 增大,其下侧受到小振幅水波的扰动:

$$\zeta = a \exp[ik(x-ct)] \quad (2)$$

因为空气对水传输能量,所以气-水界面失去稳定性且振幅 a 随时间 t 增大,这就是切流不稳定概念。

Miles (1957)切流不稳定生成机制考虑到风的湍流特性,假定水面上方的平均风速依对数形式分布。在水-气界面引入小振幅波动,原来的平行气流受到扰动,气流中诱导产生波生速度及相应的波生雷诺应力。理论上可以证明,风的平均运动在临界层高度损失能量和动量,所损失的能量和动量通过波生雷诺应力向下传递,最后由和波面斜率同位相的压力分量将能量传输至界面的波动,使后者随时间指数地成长。这里,临界层高度是指空气平均流动速度与水面上波速相等所对应的高度,与此高度相对应的是临界层。Miles (1957)的理论除了采用风速对数分布外,不再考虑湍流的影响,所以构成了所谓的准层流模型。

该理论忽略了非线性作用,受到水波扰动的气流可用瑞利方程来描述:

$$\psi'' - k^2\psi - \frac{U''\psi}{U-c} = 0 \quad (3)$$

气流的上边界为未受到波动扰动的平行剪切流，气流的下边界为水波波面。

Miles (1957)将波面附近的压力变化写成：

$$p_a = (\alpha + i\lambda)\rho_a U_1^2 k\zeta \quad (4)$$

Miles (1957)理论的能量传输过程是：波生气流场于临界层自平均运动汲取能量，此能量通过波生雷诺应力下传，最后借助量 β 所代表的压力分量传递给波动，使之成长。Miles (1957)切流不稳定生成机制没有考虑空气粘性的作用，粘性次层中风速随高度线性增大， $U''=0$ ，Miles (1957)机制不能向波动提供能量。Miles (1957)机制可以促进某一段范围内的风浪增长，而不利长波和短波的成长。

Miles (1957)剪切流不稳定机制成功地预测了风浪随时间的指数成长，与实际观测相吻合，但是，该理论仍然不能解释风浪的初始生成！

③ Phillips (1957)共振生成机制

当风吹在静止的海面时，海面上的湍流压力变化是随机的，重力和表面张力看作是振动系统的恢复力。海面上湍流压力可看作是一种外力，风浪是在该外强迫力的作用下产生的。气流压力场的移动速度近似于平均风速相等。不考虑产生的波浪场对气流压力场的影响。那么，大气输入源函数可写成(Phillips, 1957)：

$$S_{in}(\omega, \theta) = \frac{2\pi^2\omega}{\rho_w^2 c^3 c_g} \Pi(\vec{k}, \omega) \quad (5)$$

其中 $\Pi(\vec{k}, \omega)$ 为大气压力三维波数频率谱。

只有当大气压力脉动速度（对流速度）与波浪移动速度相等时，该波浪与湍流压力产生共振得到能量而成长。

共振的条件为：

$$\omega = kU \cos \theta \quad (6)$$

假定湍流压力场各向同性，当满足公式(7)的条件时，则公式(6)等号右边的积分取最大值：

$$U \cos \theta = c = \frac{g}{\omega} \quad (7)$$

当波速与波传播方向上风速分量相等时发生共振，符合该条件的风浪得以迅速成长，此时风浪谱随时间线性增大，该机制称为 **Phillips (1957)共振生成机制**。该生成机制不仅试图说明风浪的初期生成，而且试图解释风浪的后期成长机制。

④ Phillips-Miles 联合模型

风浪首先通过 **Phillips** 共振生成机制生成，接着通过 **Miles** 剪切流不稳定机制成长，至一定阶段后，**Miles** 剪切流不稳定机制不再有效，**Phillips** 共振机制可能再度成为成长的主要机制。

可以将海面上的压力场写为：

$$p_a = (\alpha + i\lambda) \rho_a U_1^2 k \zeta \quad (8)$$

其中实部为 **Phillips** 共振机制，虚部为 **Miles** 剪切流不稳定机制。

Phillips-Miles 联合模型基本解决了风向浪输入能力的问题。输入给风浪的能量如何在不同组成波间进行分配呢？主要是通过非线性波波相互作用。此处不多赘述。

本虚拟仿真实验的第九步，风洞造波实验中，风机造风，吹拂水面造波模拟的是海面的风浪生成过程。风机功率与风速大小之间近乎成线性关系，通过改变风机功率，制造出速度大小不同的风。仔细观察速度不同的风在生成波浪时有什么异同点。第十二步，处理分析风、浪数据，探究风浪的生成机制与运动过程中，尝试使用观测到的风、浪数据验证风浪生成机制的 **Phillips-Miles** 联合模型。

(3) 推板造波原理

推板造波机通过电机驱动丝杠并带动置于水中的推波板往复运动以制造满足特定需要的波浪（图 2-4-1）。

本虚拟仿真实验的第十四步，单板造波实验中，推波板造规则波，模拟的是海面的涌浪，推波板造非规则波，模拟的是海浪（风浪+涌浪）。凑谱的过程就是将设置的波浪参数，转化为推波板的电压信号，以控制推波板的移动速度和位移，从而制造出我们预设的波。

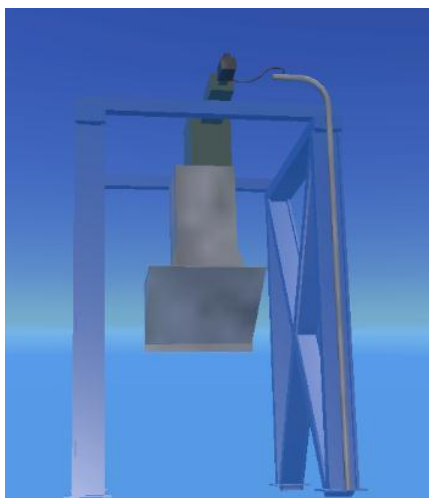


图 2-4-1 推板造波机

(4) 波浪运动过程

波浪的运动过程主要有波浪成长、传播、破碎，浪流相互作用、海气相互作用、浪与地形相互作用等内容。

与涌浪相比，风浪的运动过程多了成长环节，这是因为风不断地给浪提供能量。使用本虚拟仿真实验的第十、十一测得的风、浪数据，计算波高同风速、风区、风时的关系，掌握充分成长状态的概念，涉及到的重要概念有：

风区：状态相同的风持续吹送的海域距离。

风时：状态相同的风持续吹送在海域的时间。

最小风区：在一定风速下，风浪成长至某一风时对应的理论上的最大尺度所需要最短风区。当实际风区大于最小风区时，风浪的成长受制于风时，小于它时，受制于风区。

最小风时：在一定风速下，风浪成长至某一风区长度对应的理论上的最大尺度所需要最短风时。当实际风时大于最小风时时，风浪的成长受制于风区，小于它时，受制于风时。

充分成长状态：风浪成长的最大状态。风输入给风浪的能量与波浪破碎所耗散的能量达到平衡状态，风浪停止成长，达浪的上限。此时与风区和风时无关，只跟风速有关。

(5) 波浪谱

海浪具有明显的随机性，不可能用确定的函数描述，必须采用概率统计或谱方法来描述。海浪波面位移的均值一般取为 0，海浪谱定义为波面位移自相关函数的 Fourier 变换。直接对海浪随机过程作 Fourier 变换，将得到平稳过程的功率谱：

$$S(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \left| \int_{-T}^T X(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2 \quad (9)$$

和交叉谱：

$$S_{\zeta_r}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T \zeta_r(t) e^{-i\omega t} dt \left(\int_{-T}^T \zeta_r(t) e^{-i\omega t} dt \right)^* \quad (10)$$

同时考虑随机过程随时间和空间变化，可以得到波数-频率谱：

$$S(k, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(r, \tau) e^{-i(kr - \omega\tau)} dr d\tau \quad (11)$$

海浪谱表示海浪能量在不同频率、波数和方向上的分布，对海浪谱积分得到海浪的总能量。因此，海浪谱常被称为能量谱。

在风浪流水槽实验中，易于得到海面铅直速度：

$$\frac{d\zeta}{dt} = -\sum_{n=1}^{\infty} \omega_n a_n \sin(\omega_n t + \varepsilon_n), \rightarrow \omega^2 S(\omega) \quad (12)$$

直接分析波浪的波面铅直加速度，可以得到铅直加速度谱：

$$\frac{d^2\zeta}{dt^2} = -\sum_{n=1}^{\infty} \omega_n^2 a_n \cos(\omega_n t + \varepsilon_n) \rightarrow \omega^4 S(\omega) \quad (13)$$

将其除以频率的四次方即得到波面谱，而不必采用两次积分的方法。

除此之外，常用的海浪谱有 JONSWAP 谱：

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{\omega_p}{\omega}\right)^4\right] \gamma \exp\left[-\frac{(\omega-\omega_p)^2}{2\sigma^2\omega_p^2}\right] \quad (14)$$

和 PM 谱：

$$S(\omega) = \frac{\alpha g^2}{\omega^5} \exp\left[-\beta\left(\frac{g}{U_{19.5}\omega}\right)^4\right] \quad (15)$$

其中 JONSWAP 谱对应有限风区的情形，PM 谱是充分成长谱。

本虚拟仿真实验中，第十四步，单板造波实验中需要用到海浪谱的概念。在第十二步和第十六步的数据处理中，也开始使用测得的波高数据计算海浪谱。

(6) 波动要素

波动要素是《海浪原理与计算》最基础的知识点。包括：

波高 H：对于正弦波，是相邻波峰或波谷间的垂直距离（图 2-4-2）；对于不规则波面，是相邻两个上跨零点之间的最大波面位移与最小波面位移之差（图 2-4-3）。

周期 T：对于正弦波，是相邻波峰或波谷间的时间间隔（图 2-4-2）；对于不规则波面，是相邻两个上跨零点之间的时间间隔（图 2-4-3）。

波长 L：对于正弦波，是相邻波峰或波谷间的水平距离（图 2-4-2）；对于不规则波面，是相邻两个上跨零点之间的长度（图 2-4-3）。

振幅：波面偏离平衡水面的距离（图 2-4-2）。

本虚拟仿真实验中，第三步打开水阀，给水槽放水环节中，同学需要知道，波峰处的水位高度为振幅与平衡水面之和。如果平衡水面接近水槽上沿，那么叠加正振幅之后，必然会溢出水槽，溅出水槽，容易引起线路短路，进而引发火灾。

第五步，仪器架设中，测波杆安装时要求同时测得波峰和波谷时的水位，皮托管安装时要求波峰时不能进水，同时又要保证风速剖面的完整性，就需要根据波动要素的知识，进行预估。

第六步，测波杆采零，也就是测得平衡水位的高度，并将其设置为 0。如果不进行采集零点操作，则在数据处理时，需要对水位求平均，计算出平均水位高度，再将所有的水位高度值减去平均水位高度值，才是波高。也是基于波动要素知识进行的。

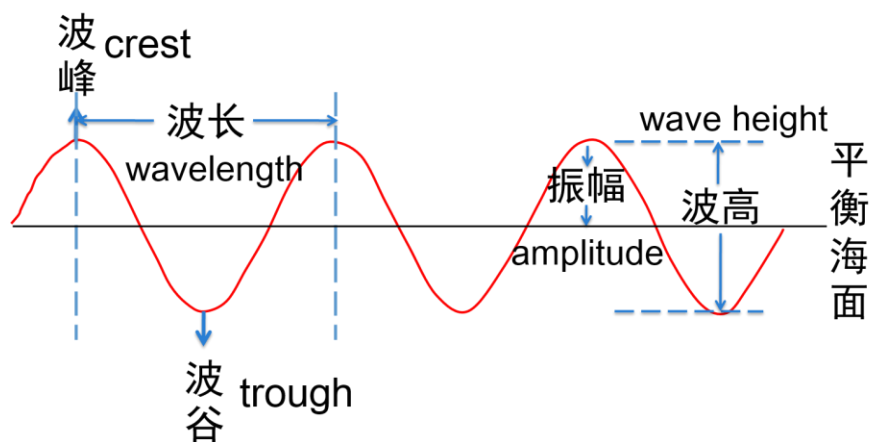


图 2-4-2 正弦波的波动要素

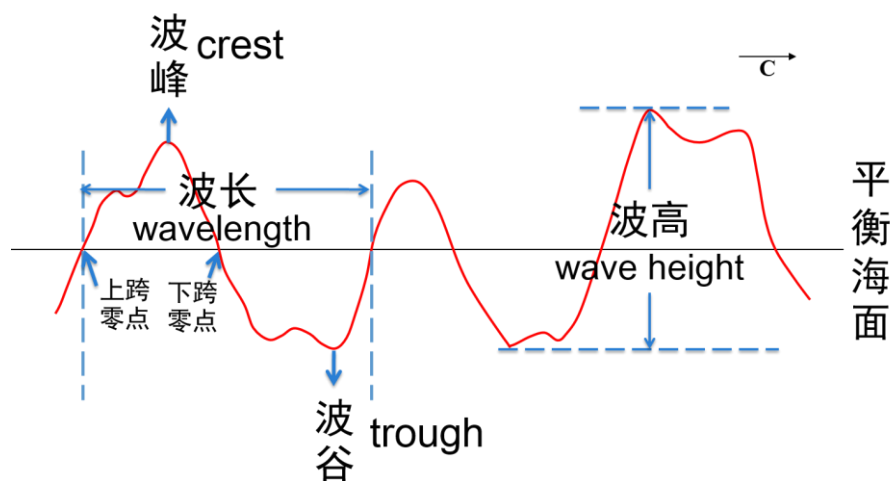


图 2-4-3 不规则波面的波动要素

(7) 测波杆测波原理

测波仪是观测波浪时空分布特性的仪器。按照工作原理可分为视距测波仪、测波杆、压力测波仪、声学测波仪、重力测波仪和遥感测波仪等几种类型。测波杆是借助于桩柱、支架或中性浮标垂直固定于水中的测波标杆。用目测的方法跟踪波面在标尺上的高低变化，称为目测测波杆；利用海水的导电性，通过电测方法测量测波杆浸泡于海水中的高度来测量波高的，称为电测测波杆，又称电接触式测波仪。电测测波杆根据测量元件的不同，又可分为电阻丝式、电容式、分段电阻式等几种。测波杆可长期定点连续观测，获取连续波形资料，做波谱分析。

本虚拟仿真实验使用的是 0.3mm 钽丝测波杆（图 2-4-4）。钽丝具有较高的分辨率和时间响应，涂有绝缘涂层的钽丝，竖直放置在水面附近，由于海水也是导体，钽丝和海水就形成了一个电容器，海水浸没钽丝的深度决定了该电容的大小，就可以利用钽丝表面极薄的绝缘层与海水之间的电容量大小来反映水面高度。

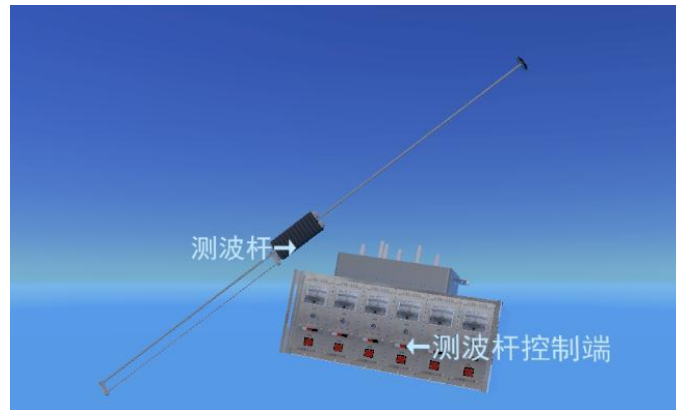


图 2-4-4 测波杆

本虚拟仿真实验的第四步，标定测波杆中，就是利用了上述原理。使用几组电压值与位移数据（工程值）对测波杆进行标定，计算得出工程值与电压值之间的系数和相关率。电压和工程值一般呈线性关系，若出现的拟合线是非线性，则说明仪器出现问题，需要送修。标定好之后，将标定结果存盘，在波高测量时，波高采集分析软件会根据实时测量的电压值对应转化为波高值。

（8）皮托管测风原理

皮托管是一种常用的测量平均风速的传感器（图 2-4-5）。它的柱头部驻点位置开有一个小孔用于测量来流的全压强或滞止压力。侧壁开有一圈小孔或窄缝测量当地的静压强。低风速时，由全压强和静压强之差可以计算局部气流速度：

$$U = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_0 - p)} \quad (16)$$

其中， ρ 为空气密度， p_0 和 p 分别为局地全压强和静压强。皮托管一般与压差传感器配合使用。

本虚拟仿真实验的第八步，皮托管清零就是用于上述原理进行的。当无风时， $p_0=p$ ，压差和风速都应为 0。如果皮托管数据采集器控制箱（压差传感器）的读数不是 0，则应清零，同时打开风速测量软件，确认风速是否为 0。



图 2-4-5 皮托管

核心要素的仿真度

(1) 不同的风速可以生成不同大小的风浪。

同学们通过设置不同的风机频率，获得不同大小的风速。通过不同位置测波杆观测得到的波高数据，可以探讨风速与风浪大小之间的关系，探讨风速与波浪破碎的关系，探讨波浪参数随风区、风时变化等内容，能够很好的模拟出波浪的生成机制和运动过程，仿真度良好。

(2) 不同的推波模式可以生成不同的波浪。

同学们通过设置大小和谱型的调制波，探讨波浪破碎与调制波谱的关系。发现，规则波几乎不破碎。而不同的谱型，波浪破碎的程度和位置不同。这个实验能够加深同学们对各海浪谱的认知和掌握，同时也可以探讨波面下水质点的运动规律，仿真度良好。

2-5 实验仪器设备（装置或软件等）

涉及的虚拟仪器有：

- (1) 造波系统
- (2) 造风系统
- (3) 造流系统
- (4) 风浪流水槽
- (5) 测波杆
- (6) 皮托管

2-6 实验材料（或预设参数等）

实验材料和预设参数具体如下（按照实验步骤出现先后）：

| 参量 | 预设参数 | | 说明 | |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------|--|------|
| 系统选择 | 实验预习、实验演示、学习模式、考核模式、实验报告（图 2-8-1） | | 点击选择 | |
| DIY 设计选择 | 进行 DIY 设计、直接开始实验（图 2-8-2） | | 点击选择 | |
| 自主场景搭建 (DIY 模块) 示例请见图 2-6-1 | 底质 | 沙、砂砾、石、淤泥 | 点击选择 | |
| | 地形 | 谷 | 单谷 谷深：深、中、浅； 位置：水槽的 1/4 处、1/2 处、3/4 处； 双谷（一大一小，紧邻，图 2-6-1） 位置：水槽的 1/4 处、1/2 处、3/4 处； | 点击选择 |
| | | 坡 | 坡角度 15°、30°、45°、60°、75°； | |

| | | | | |
|------------------------|--|--|--|------|
| 自主场景搭建 (DIY 模块) | 地形 | 丘 | 单丘 丘高：高、中、低； 位置：水槽的 1/4 处、1/2 处、3/4 处； | 点击选择 |
| | | | 双丘（一大一小，紧邻）； 位置：水槽的 1/4 处、1/2 处、3/4 处； | |
| | 障碍物 | 圆柱 | 直径：0.2m, 0.4m, 0.6m； | 点击选择 |
| | | 半圆柱 | 直径：0.2m, 0.4m, 0.6m； | |
| 方柱 | | 边长：0.2m, 0.4m, 0.6m； | | |
| 三角柱 | 边长：0.2m, 0.4m, 0.6m； | | | |
| 水槽放水设置 | 0~1.8m（图 2-8-4），1.2 是合适的值 过高造成危险（图 2-8-5），过低不利于造波 | | | 拖动选择 |
| 仪器库仪器选择 | 主要包括测波杆、皮托管、测波杆标定模组、三维风速仪、测距仪、测湍仪（流速仪）ADV、降雨模拟器、声学测速仪等（图 2-6-2）。 | | | 拖动选择 |
| 测波杆数据采集器开关设置 | 打开或关闭 0~5 通道（图 2-8-7） | | | 点击选择 |
| 波高采集分析 软件中的参数 设置 | 打开通道 | 可以勾选通道 0~15（图 2-8-8） | | 点击选择 |
| | 显示通道 | 可以勾选通道 0~15 | | 点击选择 |
| | 采样序列长度 | 任意整数，单位为个 一般小于 2×10^6 （图 2-8-22） | | 键入设定 |
| | 采样时间间隔 | 任意整数，单位为 ms 一般设置为 20ms（图 2-8-22） | | 键入设定 |
| 测波杆标定设置 | 直线模组 | 0~20cm 整数（图 2-8-9） | | 拖动选择 |
| | 工程值 | 0~20cm 整数 正确读取直线模组数据（图 2-8-9） | | 键入设定 |
| 测波杆安装位置选择 | 上、中、下 | | | 拖动选择 |
| 皮托管安装位置选择 | 上、中、下 | | | 拖动选择 |
| 实验模块选择 | 风洞造波、单板造波 | | | 点击选择 |
| 风速测量软件 中的参数设置 | 皮托管通道 | 可以勾选通道 1~11 | | 点击选择 |
| | 自动循环发送 | 勾选、不勾选 | | |
| | 串口 | 打开串口、关闭串口 | | |

| | | | |
|--|---------------|--|-----------|
| 风洞动力柜控制端设置 | 风机频率 | 0~50Hz 不同频率造出不同波高大小的波 | 点击上下设置 |
| 单板造波机控制软件设置 | 调整造波板位置 | 向前、向后、寻零、停止(图 2-8-29) | 点击选择 |
| | 选择凑谱类型 | 规则波、椭圆余弦波、不规则波(PM谱、Jonswap 谱)、破碎波、孤立波、聚焦波 | 点击选择 |
| | 设置波参数 | 波高: 0.1~0.5m | 键入设定 |
| | | 周期: 整数, 单位 s | |
| 水深: 根据实际水深填写, 一般为 1.2m | | | |
| 控制间隔: 整数, 单位 ms 一般填 20ms (图 2-8-30) | | | |
| 消波材料库选择(创新性实验) | 铺设方案(坡度) | 斜坡式、曲面式、直立式 | 学生创新性实验设计 |
| | 消波材料(图 2-6-3) | 碎石、金属卷屑(或网)、板材或条栅、合成纤维材料以及混凝土块体 同学自己设计的消波材料(消波材料的设计和实验可以作为创新性实验设计的一个选题) | |

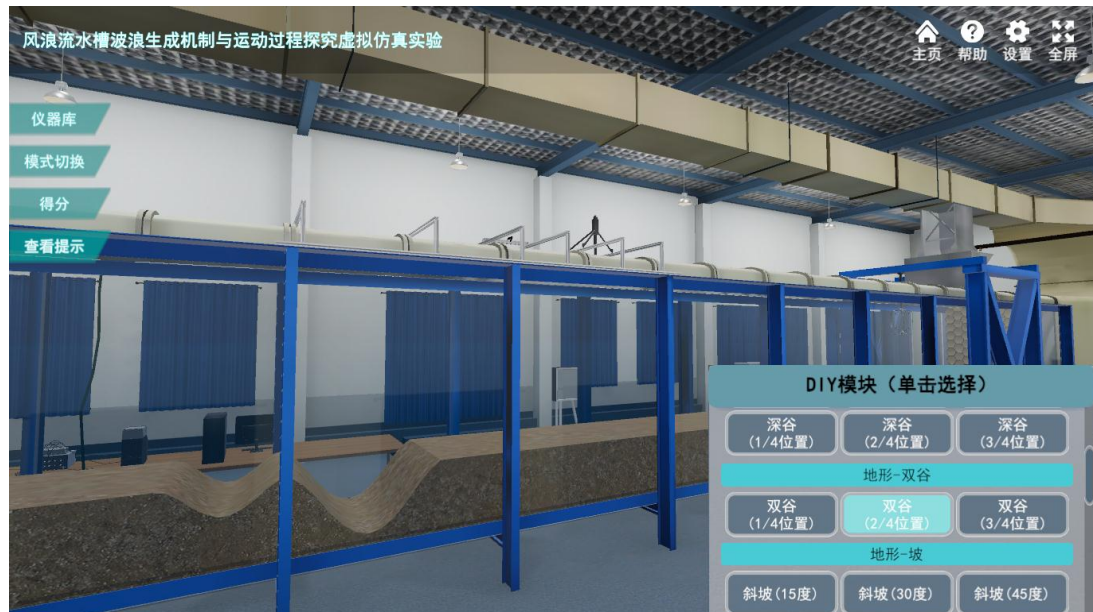


图 2-6-1 DIY 模块预设参数示例图



图 2-6-2 仪器库

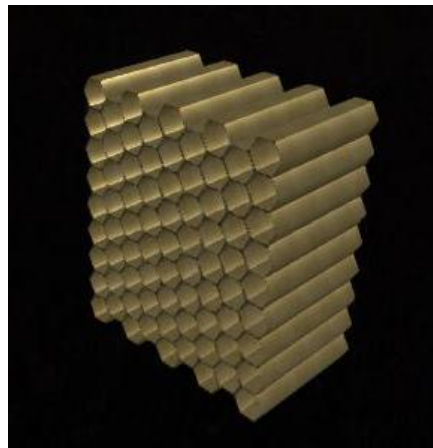


图 2-6-3 消波材料

2-7 实验教学方法（举例说明采用的教学方法的使用目的、实施过程与实施效果）

2-7-1 采用的教学方法

风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验采用“层次渐进，虚实结合、教学相长”的教学方法。

其中“层次渐进”指的是本实验有实验操作、DIY 自主搭建实验和创新性实验设计三个层次。实验操作可以看作是风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验的初阶，DIY 自主搭建实验是中阶，创新性实验设计是高阶。

实验操作环节应当熟练实验步骤，掌握实验原理，探究波浪生成机制和运动过程。**DIY 自主搭建实验环节**是从老师预先搭建的平台中选择合适的地形、底质、坡角，以及仪器，进行地形实验、底质实验、坡角实验、消波实验、海气交换实验、破波实验、湍流实验、降雨实验、内波实验等，这些实验是相对成熟的实验。主要是为了给同学打开一扇窗，水槽实验可以怎么做，可以做什么。在此基础上，启发同学们对水槽实验的兴趣。通过虚拟仿真系统中的 **DIY** 实验设计模块，学习各种水槽实验的设计方法，完成对创新性实验设计的初步培训。**高阶的创新性实验**可以脱离老师搭建的平台。

同学们通过平台的低阶、中阶的学习和训练，掌握了实验的设计方法和实验技能，对风浪流水槽实验有了比较深刻掌握。如果在这个过程中启迪出了一些科学问题和实验方案，就可以结合风浪流水槽虚拟仿真平台和开源虚拟仿真软件自行搭建、设计和模拟实验。教师会针对学生的实验进行评价，**选择有价值、较成熟的项目到实体水槽实验场地进行实验**。对不成熟的实验方案进行特别的指导，最终的考核也会全面地对学生的实验操作及实验设计进行评价。除此之外，也会将同学们设计的较成熟的方案纳入到风浪流水槽虚拟仿真平台，进一步充实风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验，实现“**虚实结合、教学相长**”。

“层次渐进，虚实结合、教学相长”的实验教学方法，开创了线上线下教学相结合的个性化、智能化、泛在化实验教学新模式，将基于网络的远程教学和基于翻转课堂的引导式、开放式教学相结合，强烈激发学生的实验兴趣，极大地提高了学生的实验操作技能及设计创新性实验的能力。

2-7-2 教学方法的使用目的

本虚拟仿真实验旨在充分发挥现代信息技术的作用，将虚拟仿真与实践教学有机融合，解决实体风浪流水槽实验危险系数高、实验难度大耗时长、实验资源匮乏且成本高、实验设备性能有局限性等问题。通过实验操作、自主搭建实验和创新实验设计三个层次，构建多维互动、层次渐进的虚拟仿真实验教学体系，让学生深入探究波浪的生成机制与运动过程，掌握探究实验的设计方法和实验技能，起到了重要的教学辅助功能，不仅开拓了学生的视野，构建更完整的知识体系，也有利于在全国范围内应用共享，扩大受益面。

改变了教师传统的注入式教学方式，强调“**以学生为中心**”的实验教学理念，将学习资源开发，学习空间开放，以学生自己学习为主，教师指导为辅，教师尊重学生的想法，鼓励、引导学生主动学习，自主设计实验，教师与学生融为一体，共同完成实验项目，使学生更好地获取知识和技能，为培养具有探索创新精神、实践能力、自主学习能力的海洋科学人才贡献力量。

2-7-3 教学方法的实施过程

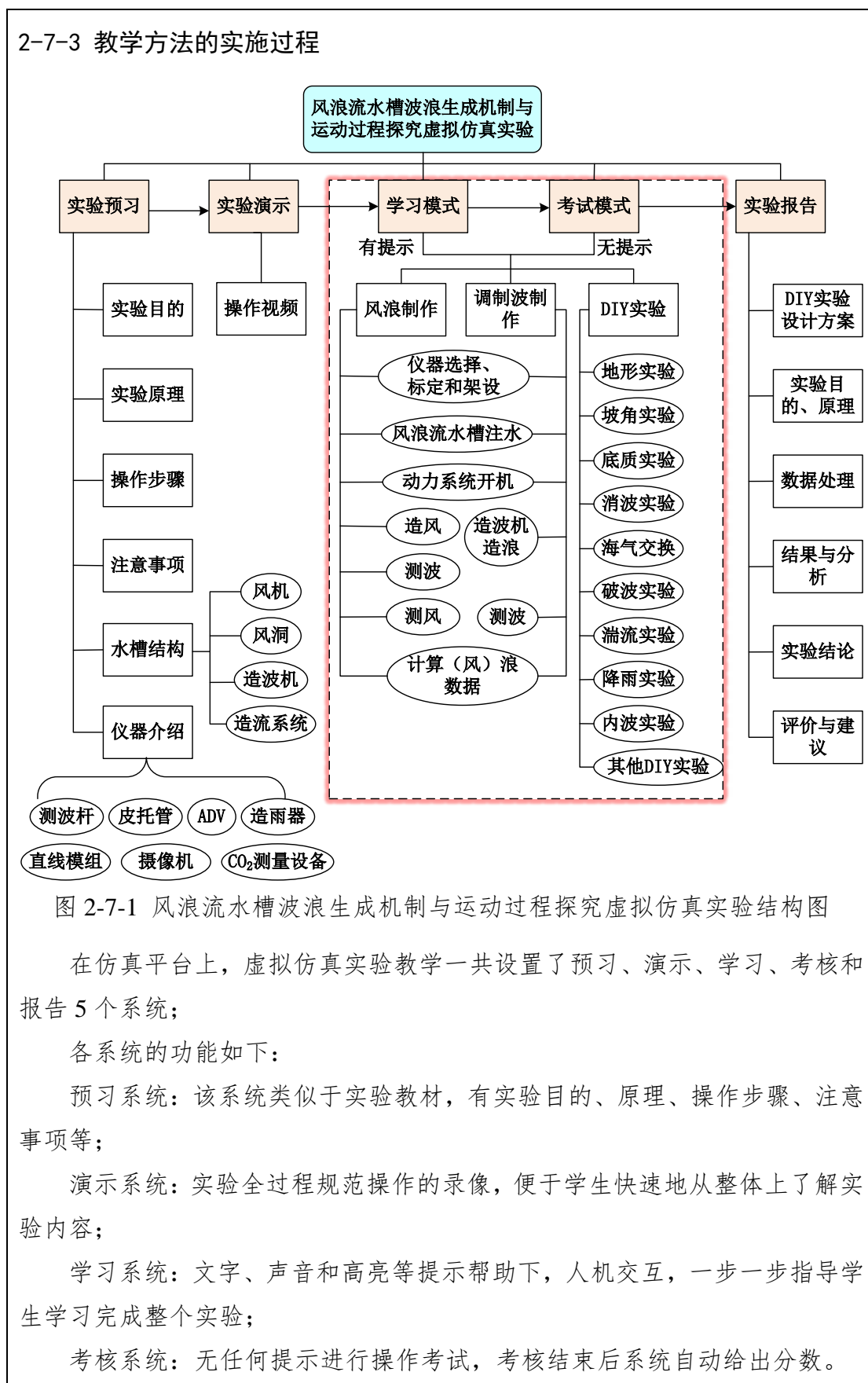


图 2-7-1 风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验结构图

在仿真平台上，虚拟仿真实验教学一共设置了预习、演示、学习、考核和报告 5 个系统；

各系统的功能如下：

预习系统：该系统类似于实验教材，有实验目的、原理、操作步骤、注意事项等；

演示系统：实验全过程规范操作的录像，便于学生快速地从整体上了解实验内容；

学习系统：文字、声音和高亮等提示帮助下，人机交互，一步一步指导学生完成整个实验；

考核系统：无任何提示进行操作考试，考核结束后系统自动给出分数。

报告系统：考核完成后，需撰写实验报告，包括实验目的、原理、实验数据处理和结果、实验结论以及对该实验设计的评价和建议，提交给老师评阅。

该教学方式充分利用了“虚拟仿真实验”的现代信息技术特点，可以实时培训，避免人力财力的大量消耗，学生可以自由地在任何地方随时体验，不受时空限制，在教师的引导下，学生通过网络智能化地学习。学习过程如下：

“学习”系统：该系统学生与虚拟仿真系统互动，每步操作有文字和高亮提示，重点部分还有语音提示，如果有学生在实验时进行不下去了，可以使用“帮助”，里面有常见问题的解决方法，也可以切换至“演示”系统观看正确操作的视频。

“考核”系统：学生做完实验练习，进入考核系统进行实验考核，所有操作都没有任何提示，如果有学生在考核时进行不下去了，可以请求提示，每提示一次，该提示步骤不得分且从总分扣除 2 分。考核完成后，系统自动给出考核总分以及操作正确的得分项和操作错误的扣分项。

“报告”系统：学生考核完成后，要撰写实验报告，包括实验目的、原理实验数据处理和结果、实验结论以及对该实验的评价和建议，并提交给老师。

2-7-4 教学方法的实施效果

(1) 项目建设和应用

2018 年，为满足《海浪原理与计算》课程建设与教学需求，项目组结合教学科研成果，在 2018 年度校级虚拟仿真实验教学项目的资助下，研发了风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验。该虚拟仿真实验于 2018 年 3 月 1 日校内上线使用，随后在 2016-2018 级海洋科学专业的《海浪原理与计算》课程中进行了应用。根据使用效果，对预设参数、实验步骤及考核要求等进行了优化。

2020 年，本虚拟仿真实验又获得教育部-北京润尼尔网络科技有限公司产学合作协同育人项目和 2020 年度校级虚拟仿真实验教学项目的资助，对 DIY 模块和流场实验进行进一步建设。

本虚拟仿真实验的建设过程中，始终秉持“虚实结合，绿色共享”的理念，坚持“以学生为中心”。学生普遍评价虚拟仿真系统给他们带来了前所未有的体验。例如，传统实习必须依赖传统的风浪流水槽进行实验，水槽实验的水电耗费巨大，难以让每位同学都进行实际操作和实验，更别说多次操作实验了。而本虚拟仿真实验基于 PC 端设计，使得实践教学具有开放性、交互性和易操作等优点，不受时空条件的限制，不限制同学们操作和实验的次数。

学生可以在实习的不同阶段进行自主学习，充分学习海浪的相关知识点，学习水槽实验的设计和操作系统。当设计和操作熟练之后，再在实体水槽中进行实验，实验效果更佳。“虚实结合”的新型实习模式鼓励学生自由探索、大胆实践，极其方便有效地延伸课外自主学习，让学生乐在其中。大大降低了指导教师的压力、提高了学习效率，并显著拓展了实习的深度和广度。

本虚拟仿真系统于 2018-2020 年在 2016-2019 级海洋科学专业 168 人次，海洋技术专业 293 人次，海洋渔业科学与技术专业 250 人次，海洋资源与环境专业 167 人次，共 878 人次。加上社会服务，共计 2320 人次。

(2) 推广共享

① 2019 年 9 月，项目负责人于潭在上海海洋大学海洋讲坛中，以“深入学习习近平的网络安全思想，提升学院虚拟仿真教学水平海洋类虚拟仿真项目建设申报经验浅谈”为题目，分享本虚拟仿真实验的建设申报经验(图 2-7-2)。



图 2-7-2 于潭在上海海洋大学海洋讲坛中分享建设申报经验

② 2020 年 2 月，教育部高等学校水产类教学指导委员会发起了关于疫情防控期间充分利用在线教学资源、推动在线授课的倡议，包括华南农业大学在内的海洋类、水产类高校积极响应，本虚拟仿真项目进入了推荐名录(图 2-7-3)。



海洋学院开展网络教学工作通知

发布时间: 2020-02-13 作者: 阅读次数: 377

全国高校水产类在线开放课程资源推荐表（按课程名称排序）（第1批）

| 序号 | 课程名称 | 课程负责人 | 所在单位 | 开课平台 | 课程网址 |
|----|--------------------------|-------|--------|----------------------|---|
| 3 | 淡水经济鱼类人工繁殖虚拟仿真实验 | 曹小娟 | 华中农业大学 | 华中农业大学虚拟教学实验平台 | http://211.69.130.59:8080/virindex/index.html |
| 4 | 动物生理学 | 李大鹏 | 华中农业大学 | 爱课程 | http://www.icourse163.org/course/HZAU-1001546002 |
| 5 | 动物生理学 | 马恒东 | 四川农业大学 | 爱课程 | https://www.icourse163.org/course/SAU-1449585161 |
| 6 | 动物生理学实验 | 汤蓉 | 华中农业大学 | 爱课程 | http://www.icourse163.org/course/HZAU-1205723815 |
| 7 | 动物生物学 | 张耀光 等 | 西南大学 | 爱课堂 | http://www.hyx100.com/show.php?id=4999 |
| 8 | 动物学 | 姬伟 | 华中农业大学 | 爱课程 | http://www.icourse163.org/course/HZAU-1002478006 |
| 9 | 对虾人工育苗虚拟仿真实验 | 刘红 | 上海海洋大学 | 实验空间国家虚拟仿真实验教学项目共享平台 | http://www.ilab-x.com/details/v5?id=5047&isView=true |
| 10 | 饵料生物培养学 | 蒋霞敏 | 宁波大学 | 超星平台 | https://mooc1-1.chaoxing.com/course/94142240.html |
| 11 | 分子细胞生物学 | 王亚军 | 宁波大学 | 超星平台 | http://mooc1.chaoxing.com/course/200727830.html |
| 12 | 风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验 | 于潭 | 上海海洋大学 | 上海海洋大学虚拟教学实验平台 | https://vlab.shou.edu.cn/virexp/waveflume |

图 2-7-3 华南农业大学海洋学院开展网站教学通知

③ 2020年9月，在上海海洋大学与上海电机学院联合举办的“一流本科专业与实践教学平台建设交流会”上，项目负责人于潭代表学校就风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验的建设经验进行了推广汇报（图 2-7-4），此次会议为后续虚拟仿真实验共享拉开序幕。

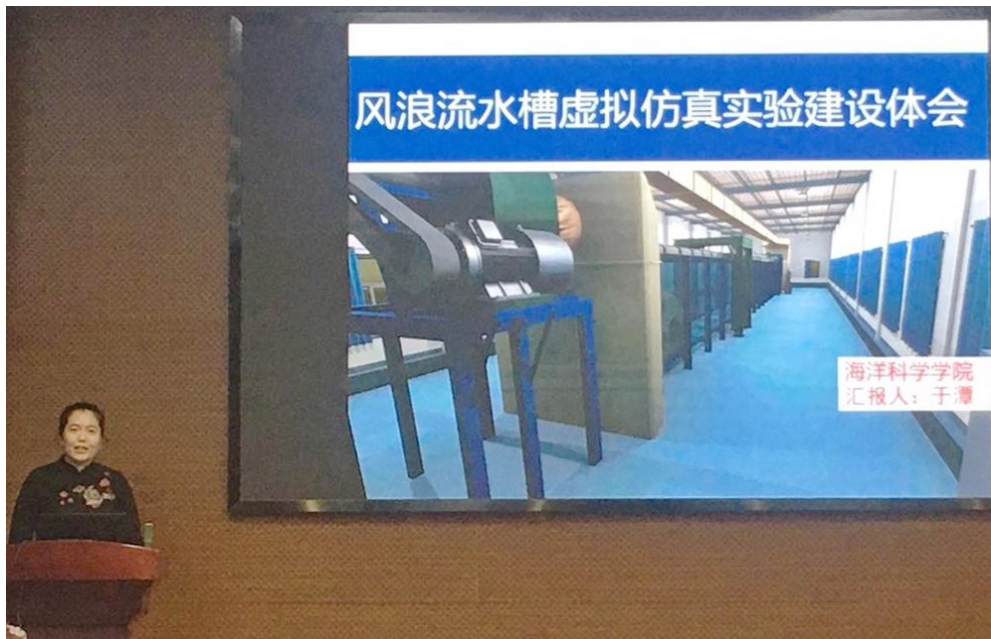


图 2-7-4 于潭分享本虚拟仿真实验建设经验

④ 2020年7月-11月，与江苏海洋大学海洋技术与测绘学院共享了风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验，海洋技术专业学生在《物理海洋学》课程中进行了本虚拟仿真实验，受到了师生的一致好评（详见附件2）。

⑤ 2020年9月，上海海洋大学海洋科学学院副院长胡松带队访问中国海洋大学海洋与大气学院、大连海洋大学海洋技术与环境学院，推广风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验，初步达成共享共识。

(3) 学生成果

在学习的过程中，启发出了很多宝贵的成果，例如：

① 学生设计的基于视频的波浪检测系统（已获得软件著作权）



图 2-7-5 基于视频的波浪检测系统



图 2-7-6 基于视频的波浪检测系统软件著作权

② 学生使用粒子模拟海浪：

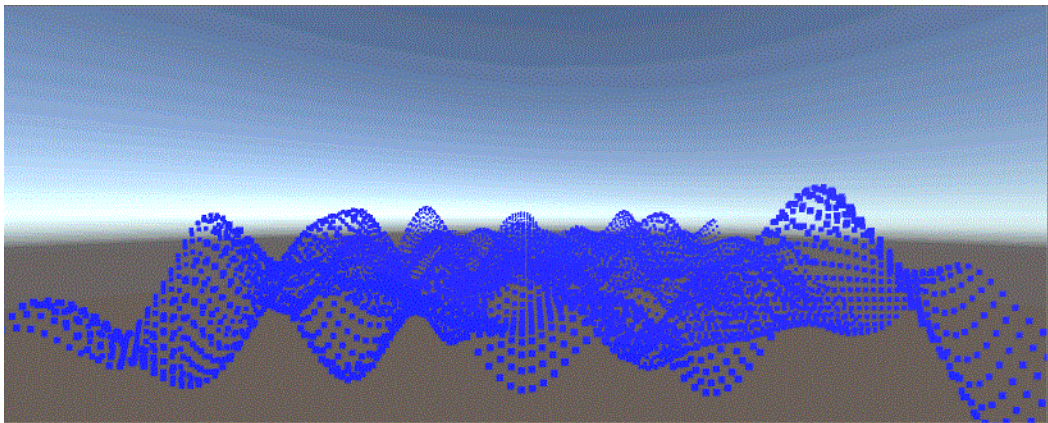


图 2-7-7 用粒子模拟海浪

③ 学生搭建的复杂地形：



图 2-7-8 学生搭建的复杂地形

④ 学生模拟台风：

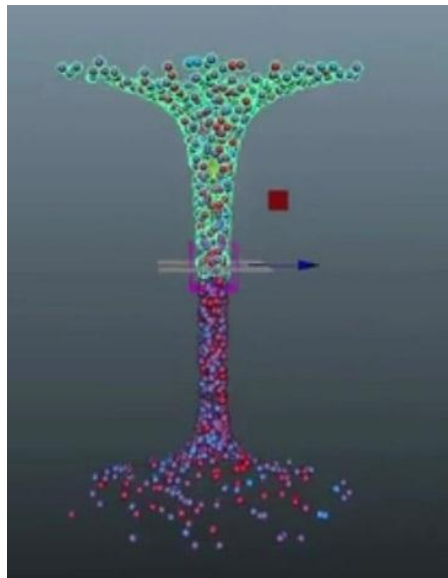


图 2-7-9 学生模拟台风

⑤ 学生模拟降雨对波浪的影响：

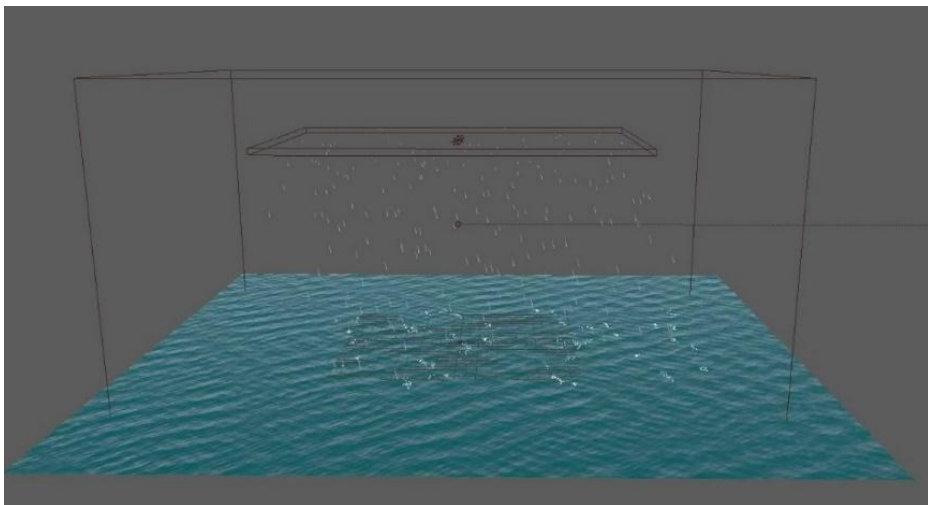


图 2-7-10 学生模拟降雨对波浪的影响

⑥ 学生模拟波浪对航行器的作用：

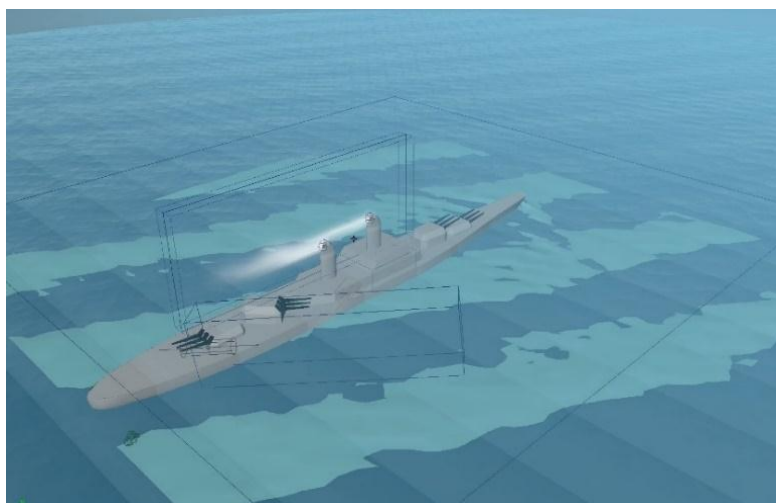


图 2-7-11 学生模拟波浪对航行器的作用

⑦ 学生模拟涡旋：

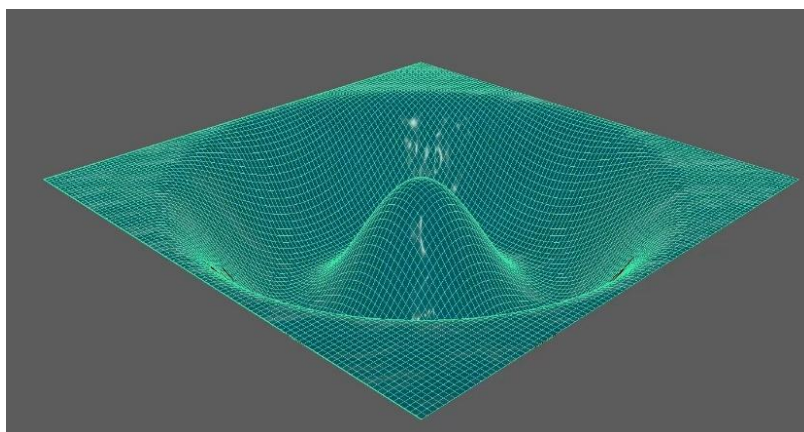


图 2-7-12 学生模拟波浪对航行器的作用

2-8 实验方法与步骤要求（学生交互性操作步骤应不少于 10 步）

(1) 实验方法描述：

① 进入风浪流水槽虚拟仿真系统，通过预习模式学习实验目的、实验原理、操作步骤、注意事项、整个风浪流水槽的结构以及仪器。通过实验演示模式观看操作视频，使学生迅速从整体了解实验。

② 学习系统的使用方法，重点掌握风浪、调制波和内波的制作，并探讨风速与风浪大小之间的关系、探讨风速与波浪破碎的关系，探讨风浪的生成、发展、成熟破碎的规律；探讨波浪破碎与调制波谱的关系；探讨内波生成的机制；探讨风浪流相互作用。

③ 通过选择仪器、地形、底质、消波材料等，自主设计和操作创新性实验，并探讨地形、底质、降水对海浪和海流的影响，也可探讨海浪对 CO_2 交换及其他海气交换的影响。

(2) 学生交互性操作步骤说明：

学生交互性操作步骤数为：21 步。

第一步，选择实验系统。

可选择的系统有：预习系统、演示系统、学习系统、考核系统和报告系统。

此处仅详细说明学习系统和考核系统的交互（学习系统和考核系统的操作步骤相同，只是考核系统无提示）。



图 2-8-1 实验系统选择界面

第二步，自主场景搭建（DIY）

本步骤可以通过选择不同底质、地形和障碍物来实现自主场景的搭建，探究浪与地形（底质）的相互作用。如图 2-8-3 选择沙作为底质，可以研究波浪对沙质地形的影响。

底质、地形和障碍物的可选内容详见 2-6 中的预设参数介绍。其他底质、地形、障碍物和消波材料的设计和实验可以作为创新实验设计的一个选题，优秀的实验设计方案可以不断地补充到本虚拟仿真实验中。

注意：本步骤一定要在打开水阀，给水槽放水之前完成。一旦加水，则不能铺设。

① 选择进行 DIY 设计。



图 2-8-2 DIY 设计选择界面

② 选择底质、地形或障碍物。

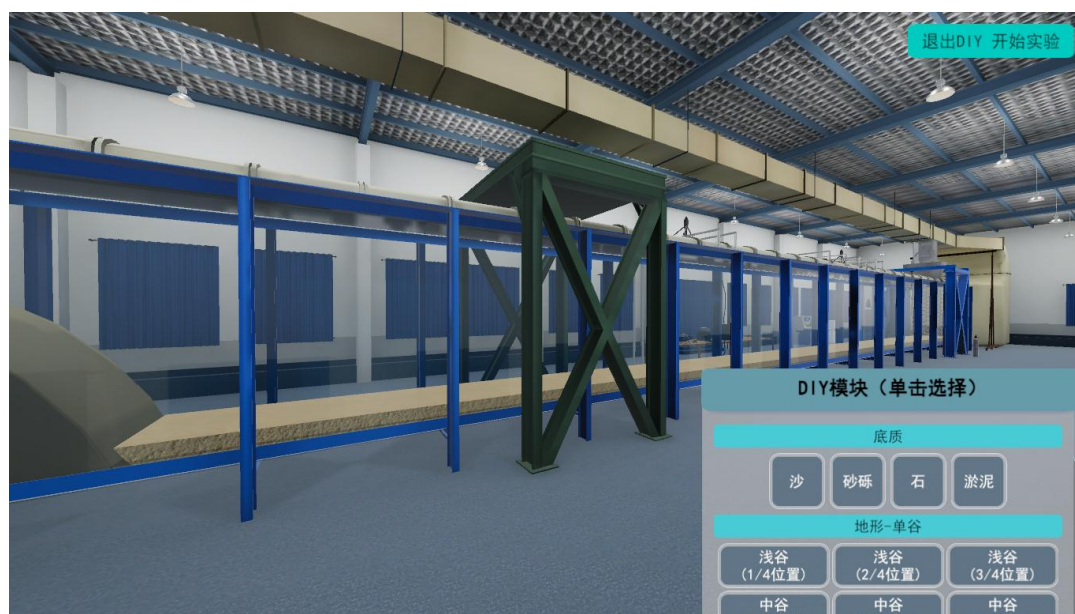


图 2-8-3 选择沙作为底质

第三步，打开水阀，给水槽放水。

水槽的水位一般为 1.2m 左右（图 2-8-4），不可过高，也不可过低。同学们若强行在高水位下实验，则会在波浪生成时，溅出水槽，容易引起线路短路，进而引发火灾（如图 2-8-5）。本环节可以训练学生的应急能力。如果水位过低，则一方面离风洞出口较远，不利于风浪的生成，另一方面，不利于推波板造波。

在实验时，如果同学们调节的水位不合适，过高则会跳出导致的危险画面（图 2-8-5），提醒实验失败，需重新实验。设置过低则会跳出可能造波失败的提醒。为了保证实验安全和实验有效，水位设置不正确则不能正常完成后续操作。



图 2-8-4 水槽用水调节



图 2-8-5 水位过高时造成危险

第四步，标定测波杆。

在安装架设仪器之前，需要对仪器进行标定。按照规范，每次实验之前，均需对每根测波杆进行标定。

① 组装标定模组

从仪器库中分别选择直线模组、水桶和测波杆，把它们架设到钢架上（图 2-8-6）。

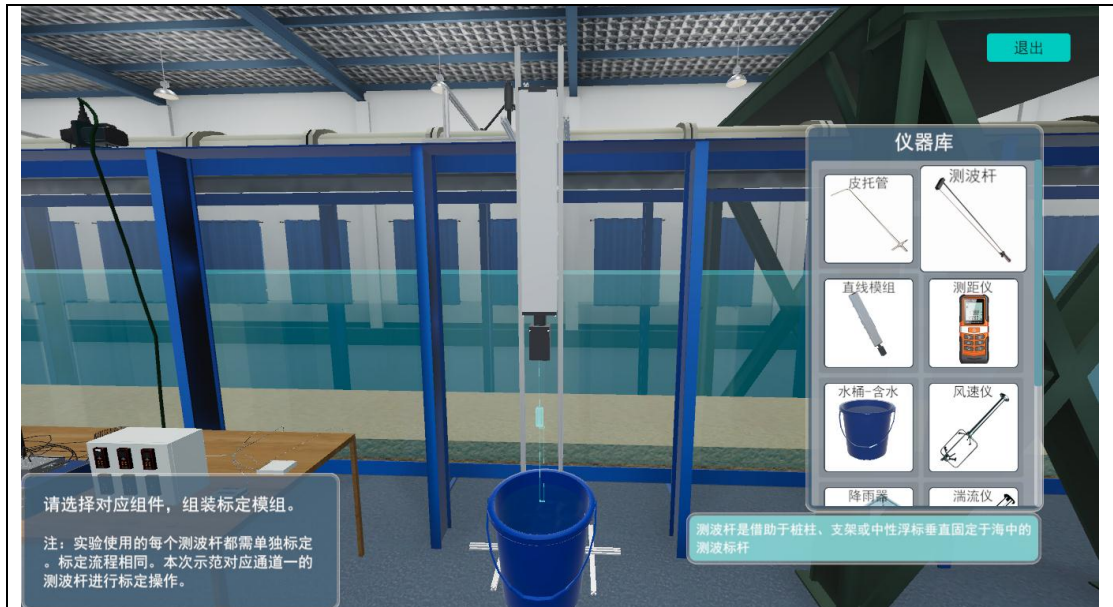


图 2-8-6 组装标定模组

② 打开标定测波杆对应通道开关

在测波杆数据采集器（图 2-8-7）中，点击标定测波杆的按钮，打开开关，开关开启时会亮灯光，电流表会有读数，学习系统中会有高亮提示，考核系统中没有提示。



图 2-8-7 测波杆数据采集器

③ 在波高采集分析软件中选择标定测波杆对应通道

在波高采集分析软件的采样设置菜单下进行采样参数设置（图 2-8-8）。选择打开通道和显示通道。注意，通道从 0 开始编号，位于第几通道取决于测波杆所连的测波杆数据采集器的通道。

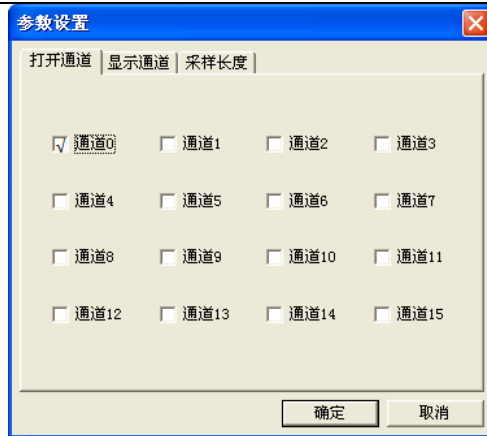


图 2-8-8 选择标定测波杆对应通道

④ 测波杆标定

移动直线模组的滑块，变换测量水位，读取模组位移数据（工程值）。通过波高采集分析软件测量每一个给定水位（工程值）所对应的电压值，计算得出工程值与电压值之间的系数和相关率，以此对测波杆进行标定（图 2-8-9）。电压和工程值一般呈线性关系，若出现的拟合线是非线性，则说明仪器出现问题，需要送修。标定好之后，将标定结果存盘，在波高测量时，波高采集分析软件会根据实时测量的电压值对应转化为波高值。

至少采集 5 组数据（5 个位置），为了减少误差，每个位置采集 3 次电压。如果工程值输入错误，在学习系统会有错误提示，在考核系统会扣分。



图 2-8-9 测波杆标定

第五步，仪器架设。

根据实验目的，选择合适的实验仪器安装到水槽的相应位置。波浪制作模块的标配是测波杆和皮托管。实验仪器的选择和架设步骤只需要在测量步骤之前完成即可。

在真实实验中，实体风浪流水槽高3米，水深可达2米，学生在水槽上方安装必要的实验设备危险性高，容易引发摔伤、溺水、触电等严重安全事故。同学们很难有机会亲自架设仪器，而在本虚拟仿真实验中，就可以进行这一方面的练习。

① 测波杆安装

根据实验要求，一般安装4-6根测波杆。将标定好的测波杆分别安装到水槽的正确位置。测波杆应没入水中，水面应在其中间部位（图2-8-10），以测得波峰和波谷时的水位。如果测波杆位置过低，则波峰时，测波杆可能会完全没入水中，超出其测量量程。如果测波杆位置过高，则波谷时，测波杆可能会从水中脱离，同样不能正常测量。

若同学们测波杆的固定位置不对，则在学习系统中进行警告提示，在考核系统中进行警告提示并扣分，改正后方能进行后续操作。

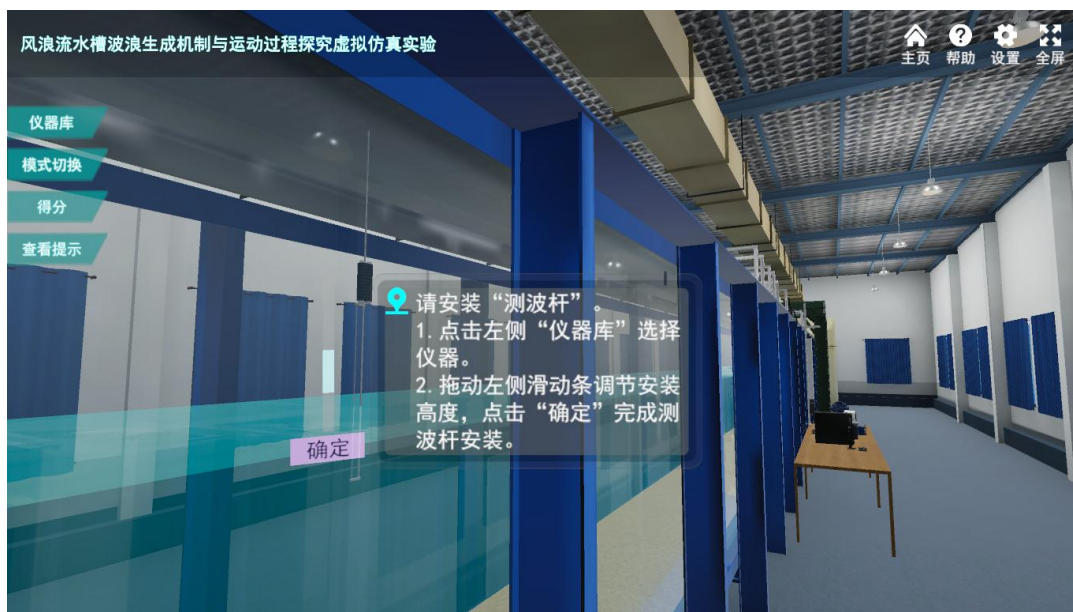


图 2-8-10 安装测波杆

② 皮托管安装

根据实验要求，一般安装5-6根皮托管。为了测量完整的风剖面，一般把5-6个皮托管架设在同一个剖面上，且该剖面一般位于水槽的中间位置。

皮托管应距离水面有段距离（图2-8-11），即使是波峰时都不能碰到，因为皮托管容易进水造成阻塞。位置也不能过高，否则难以测量完整的风速剖面。

若同学们皮托管的固定位置过于靠近水面或远离水面，则在学习系统中进行警告提示，在考核系统中进行警告提示并扣分，改正后方能进行后续操作。



图 2-8-11 安装皮托管

第六步，测波杆采零。

波浪是在平衡水面上下波动的（图 2-8-12），在造波之前，需要对平衡水面进行采零操作，即测得平衡水位的高度，并将其设置为 0。如果不进行采集零点操作，则在数据处理时，需要对水位求平均，计算出平均水位高度，再将所有的水位高度值减去平均水位高度值，才是波高。

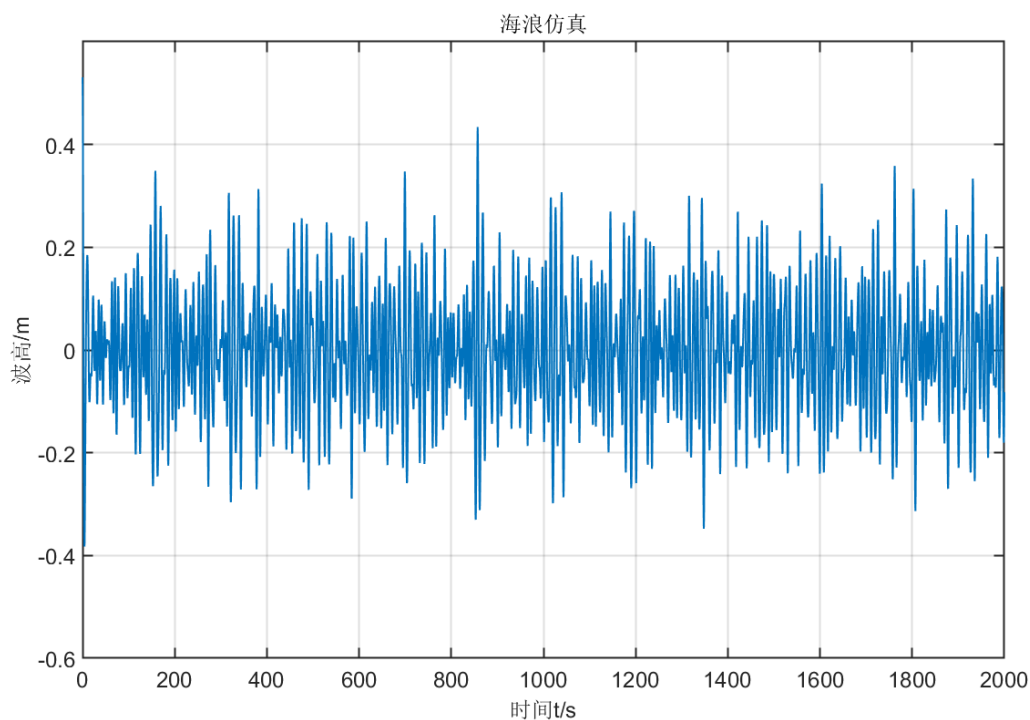


图 2-8-12 波高随时间变化图

① 打开测波杆数据采集器的第 0~3 通道

点击图 2-8-7 左侧四个按钮，依次打开开关，每个开关开启时会亮灯光，电流表会有读数，学习系统中会有高亮提示，考核系统中没有提示。

② 在波高采集分析软件中打开和显示第 0~3 通道

在图 2-8-8 波高采集分析软件的采样设置菜单，打开和显示第 0~3 通道。

③ 读取标定参数

在第四步测波杆标定时，我们存储了标定信息。在进行波高测量之前，需要在波高采集分析软件中通过信息读入读取已标定信息（图 2-8-13）。

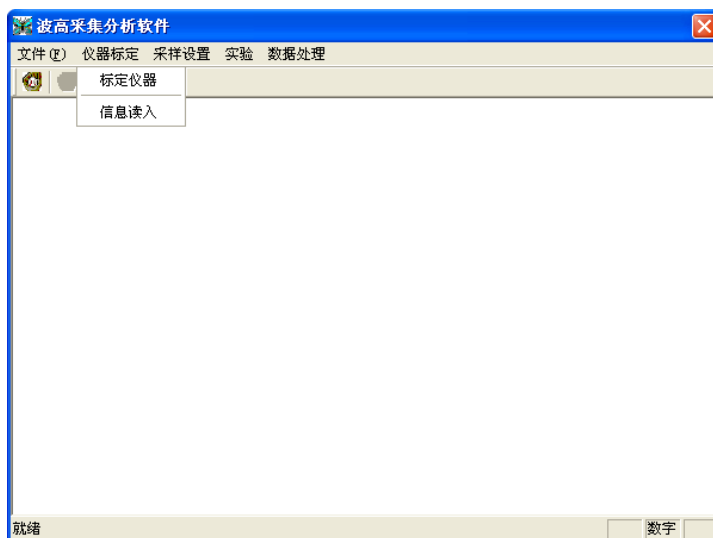


图 2-8-13 标定信息读入

④ 采零

在波高采集分析软件中点击实验菜单采集零点（图 2-8-14）。点击采集，则对应通道的零偏处便有了对应数值。在波高测量时，系统会自动减去零偏处的数值，使得波高数值为偏离平衡水面的位移。

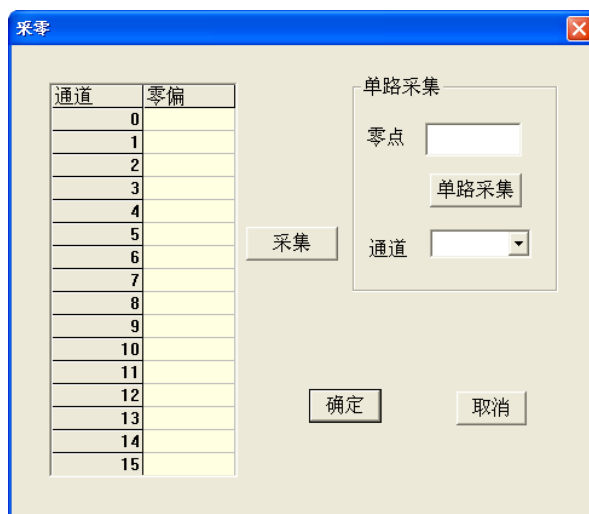


图 2-8-14 采集零点

第七步，实验模块选择。

可选择进入风洞造波实验模块或单板造波实验模块（图 2-8-15）。首先选择风洞造波实验模块，探究风浪的生成机制与运动过程。



图 2-8-15 实验模块选择

第八步，皮托管清零。

在造风之前，需要通过清零标定皮托管。在无风状态下，皮托管读数应为 0，如果不为 0，则需要将数据变为 0，这个过程就是皮托管清零。

① 打开皮托管数据采集器控制箱开关并清零

长按皮托管数据采集器控制箱的红色开关按钮打开通道开关（图 2-8-16）。开机后，屏幕亮，界面读数都为 0，如果读数不是零，则点击清零，直到屏幕都为 0。



图 2-8-16 皮托管数据采集器控制箱

② 核实风速数据是否清零

进入风速测量软件界面（图 2-8-17），并采集数据。查看风速是否为 0，若为 0，说明清零成功，不为 0，说明清零不成功，需进一步核查原因。



图 2-8-17 风速测量软件界面

第九步，风洞造波实验。

设置风洞电力系统（图 2-8-18，动力柜）。

初始状态为：

- A. 右上角红灯亮（表示已通电）且动力柜门为关闭状态；
- B. 显示屏为灰色关闭状态；
- C. 把手收起，柜门关闭；

① 风洞电力系统开机



图 2-8-18 风洞动力柜

A. 点击下排左边第二个绿色按钮（在学习系统中高亮提示，在考核系统中没有高亮提示）

I. 上排左边第三个指示灯变亮；

II. 最下显示屏变亮（图 2-8-16）；

III. 屏幕初始值：右上角为 20Hz，其他三个数据为 0.0（图 2-8-19）；



图 2-8-19 风洞动力柜控制端

② 制造不同风速的风

A. 点击图 2-8-19 中所示下调按键，将数据下调至 13Hz 左右（小于 20Hz），目的是为了防止风洞电机启动时电流过大，损坏电机。

B. 点击 START

I. 数据 4 开始和 3 同步，电流也有了数值。

II. 风洞发动机转动

III. 水面同时起波，风速不同，幅度不同（图 2-8-20）

C. 点击上调按钮，按照风速与频率曲线（图 2-8-21），将频率设置为所需风速对应的频率。此处考试要求可以让同学们造出 5m/s,10m/s,15m/s 的风。此处风洞电力系统虽然理论上可造出 20m/s 的风，但是一般来说，为了保持设备性能，一般频率设置不超过 40Hz。所以如果超过 40Hz 则警告提示。

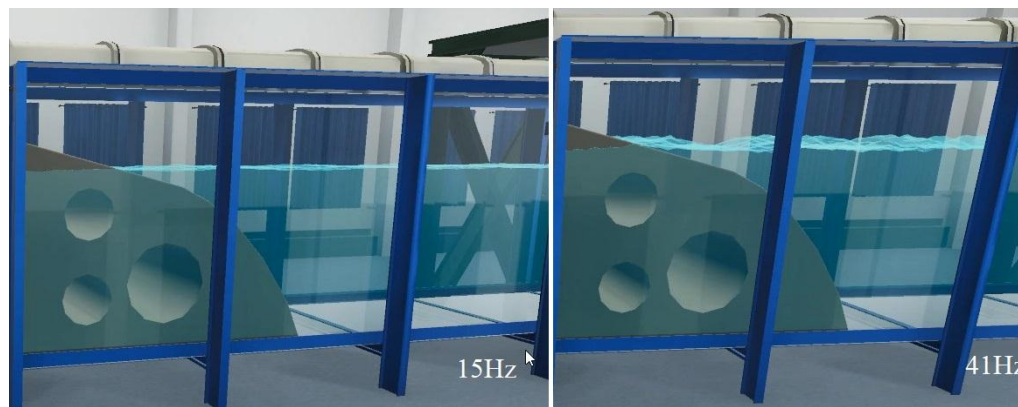


图 2-8-20 15Hz 和 41Hz 时产生的浪

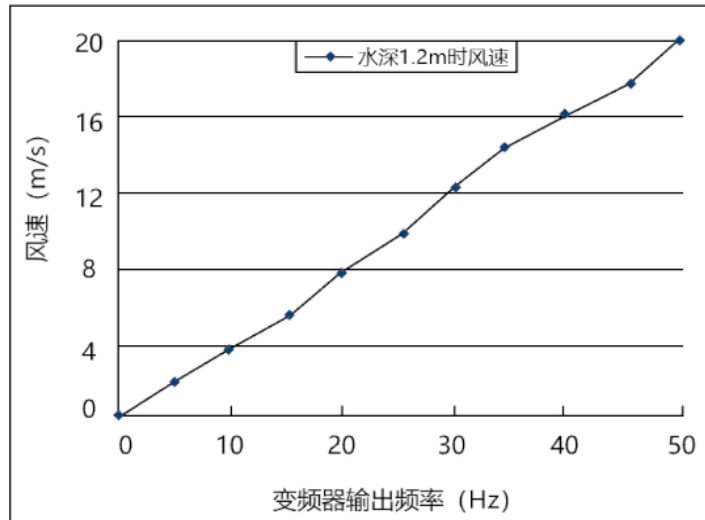


图 2-8-21 风速与频率相关曲线

第十步，波浪观测及数据采集

在此之前需要完成测波杆的标定、架设和采零。

① 设置采样长度

一般采样时长不超过半小时，采样序列长度可以用采样时间/采样时间间隔计算得到（手动输入），采样时间间隔可以设置为 20ms（手动输入）左右，也可根据需要自行设置，点击确定，完成采样参数设置（图 2-8-22）。

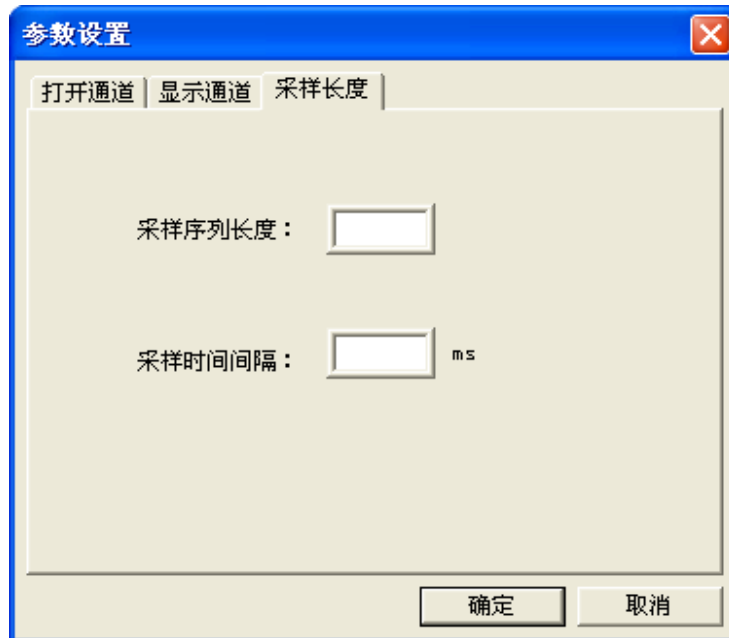


图 2-8-22 波浪采样长度设置

② 波浪数据采集

在波高采集分析软件点击开始采样，界面出现波高实时曲线（图 2-8-23）。采集完预设的采样系列长度之后，采样结束，保存数据。

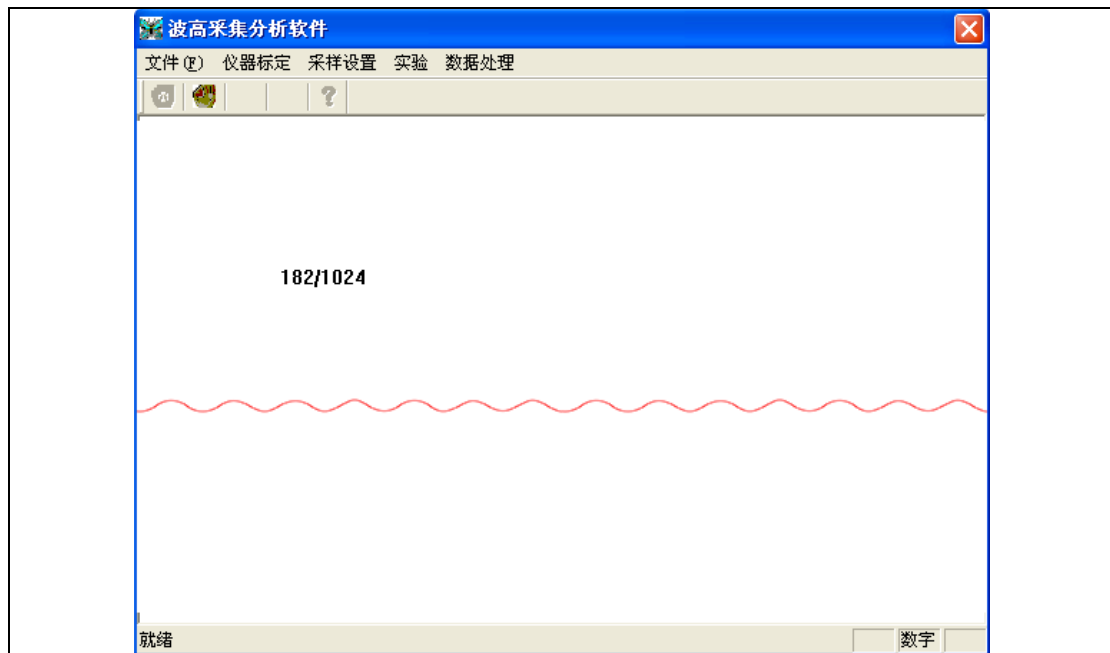


图 2-8-23 波高实时曲线

第十一步，风速观测

在此之前需要完成皮托管的架设和清零。

① 选择皮托管串口

在图 2-8-17 中的风速测量软件，选择皮托管串口。皮托管串口与皮托管数据采集器控制箱的串口一一对应，皮托管数据采集器控制箱的串口直接跟各皮托管相连接。

② 风速测量

因为皮托管的数据并不是一起收集的，而是一个一个串口收集的，所以选择“自动循环发送”，每隔 1s 发送下一个通道数据。打开串口，数据自动发回，出现在图 2-8-17 左上角空白窗口中。采集完毕之后，关闭串口，数据停止发送，保存窗口数据。

至此，风浪的制作和测量完成。

第十二步，处理分析风、浪数据，探究风浪的生成机制与运动过程。

由图 2-8-20 可知，不同风速大小，产生的波浪大小不同。风速越大，产生的波高越大，风速越小，产生的波高越小。小浪在风的作用下成长为大浪的过程，可以用 Jeffrey (1924,1925) 的遮拦理论来解释。而从无浪状态到有浪状态的波浪生成过程，可以由 Phillips 提出的共振生成机制和 Miles 提出的切流不稳定生成机制进行解释。风机造风，吹拂水面造波模拟的就是海面的风浪生成过程。

例如，由图 2-8-24 可知，在风时已知的情况下，波高随风速增大而增大，随风区增大而增大，直到充分成长状态。

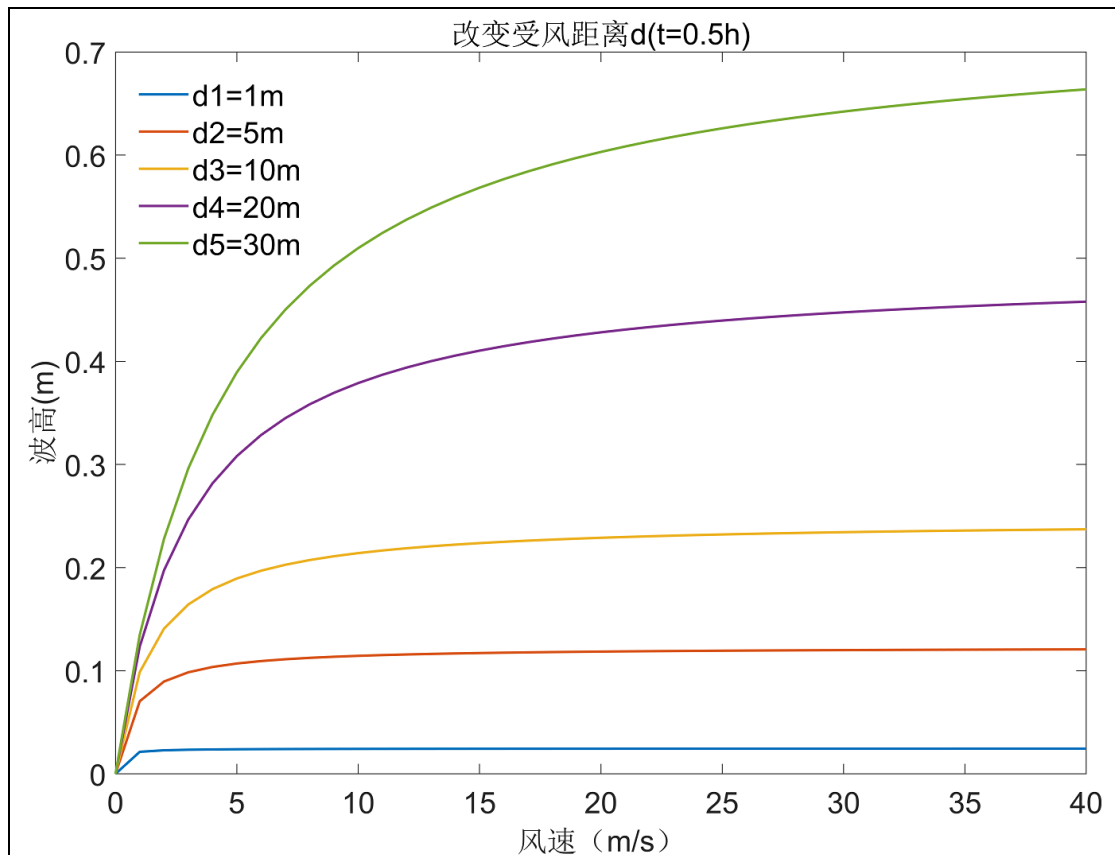


图 2-8-24 波高随风速和风区的变化情况

第十三步，关掉造风系统。

为了保障实验室安全，风洞造波实验结束之后，必须要关闭风机和电源。

① 关闭风洞

点击图 2-8-19 中 “stop”按钮，造风停止，但发动机还在转。

② 关闭风机

点击图 2-8-18 下排红色按钮，上排绿色灯灭，发动机停止。

③ 拔断电源

拔断电源，图 2-8-18 上排红色灯灭。

第十四步，单板造波实验。

推波板造规则波，模拟的是海面的涌浪。推波板造非规则波，模拟的是海浪（风浪+涌浪）。通过单板造波实验可以探究波浪运动、波浪破碎、波浪谱等内容，还可以结合地形研究浪与地形相互作用。

① 打开单板造波动力系统的电源

往下拉图 2-8-25 中的蓝色开关，下面灯亮。等上方的灯全部变绿之后，预热完成，图 2-8-26 单板造波机控制系统电源灯亮。



图 2-8-25 单板造波动力系统



图 2-8-26 单板造波机控制系统

② 启动单板造波机控制系统

在图 2-8-26 中点击启动按钮，启动灯亮。

③给造波机的电机使能

点击图 2-8-27 中单板造波机控制软件的绿色按钮，给造波机的电机使能。所谓给电机使能就是给电机一个“允许”信号，即使能信号有效时电机才能转动，才能单板造波。

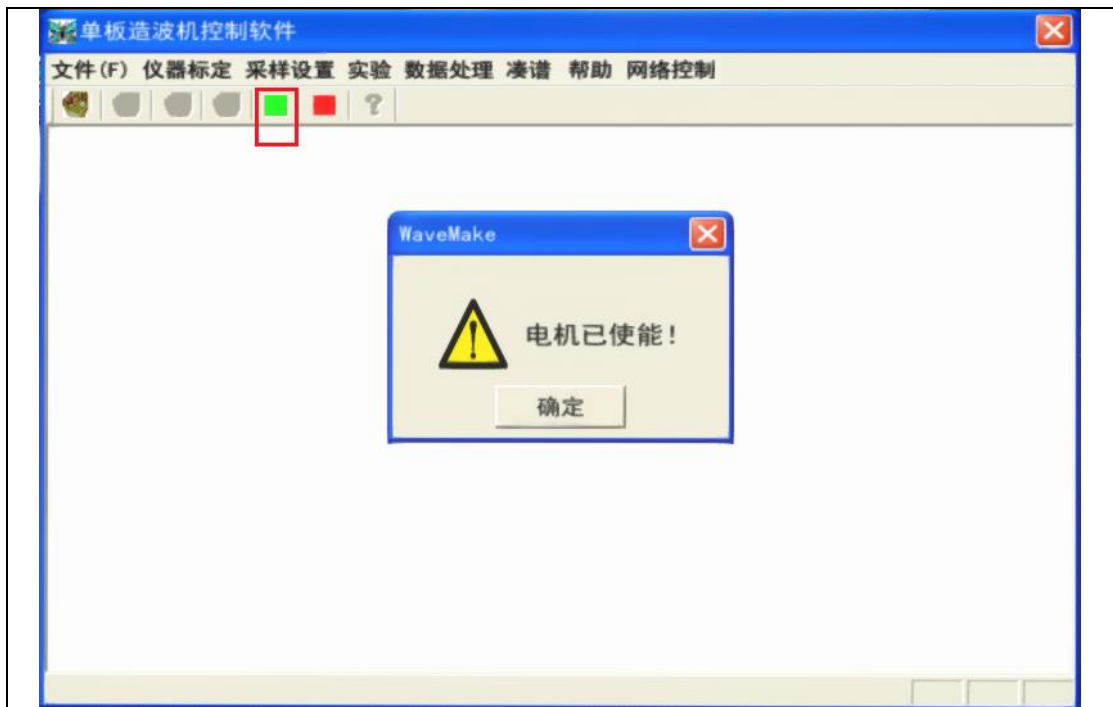


图 2-8-27 单板造波机控制软件

③ 读取电机状态

从图 2-8-27 中单板造波机控制软件的网络控制读取电机状态，确认电机已使能，且电机状态正常（图 2-8-28）。若故障灯亮，则选择网络控制的复位故障信息。

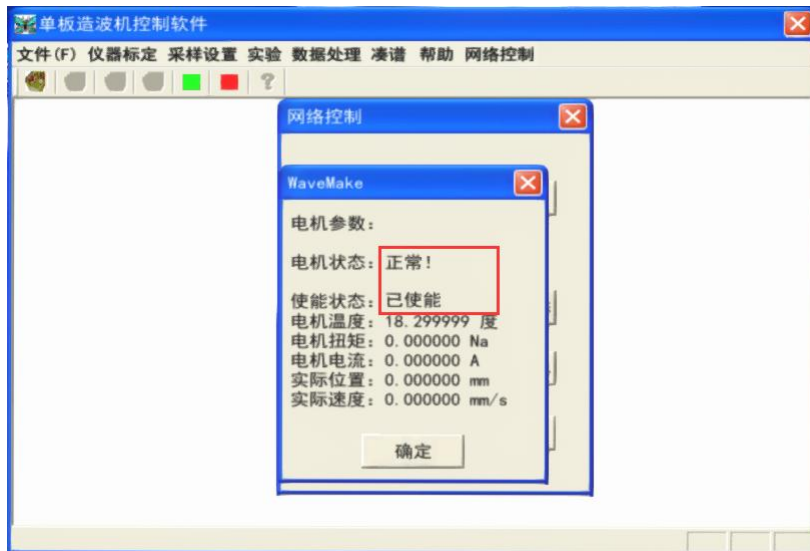


图 2-8-28 读取电机状态

④ 调整造波板位置

在图 2-8-29 网络控制窗口调整造波板位置，以制造出满足要求的波浪。向前：造波板的位置向前平移；向后：造波板的位置向后平移；寻零：造波板回到中间位置；停止：造波板不再平移。



图 2-8-29 网络控制窗口

⑤ 设置波浪参数及凑谱

A. 规则波（凑谱→计算波列→规则波）

在图 2-8-30 设置规则波参数界面，设置想要造的波的波高和周期。水深就是第三步中最初设置的水深。很多参数都是以这个水深设定的，所以尽量不要随便更改水深。保存所凑的谱，谱文件其实是电机的电压数据。



图 2-8-30 设置规则波参数

B. 椭圆余弦波（凑谱→计算波列→椭圆余弦波）

跟规则波的设计类似。

C. 不规则波（凑谱→计算波列→不规则波）

不规则波中最常见的主要是 PM 谱（图 2-8-31）和 Jonswap 谱（图 2-8-32）。

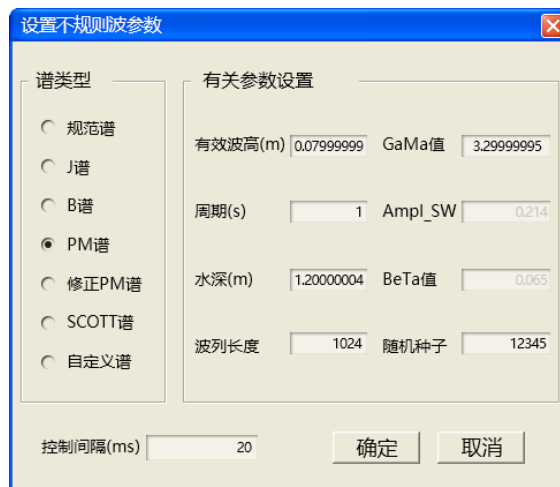


图 2-8-31 PM 谱

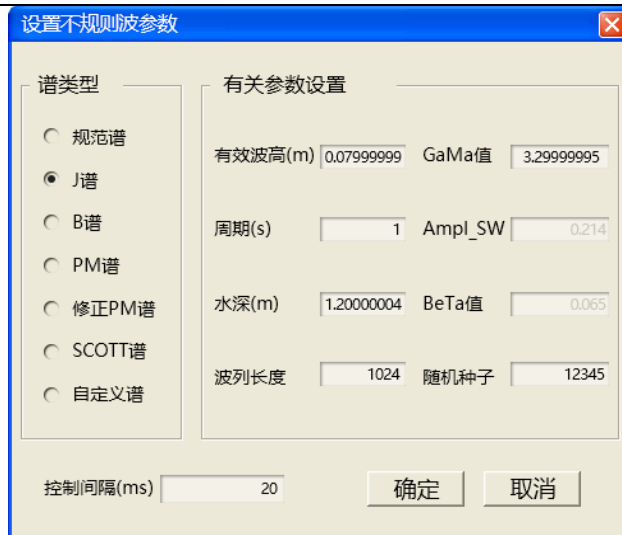


图 2-8-32 Jonswap 谱

D 破碎波（凑谱→计算波列→破碎波）

图 2-8-33 给出了破碎波参数设置。

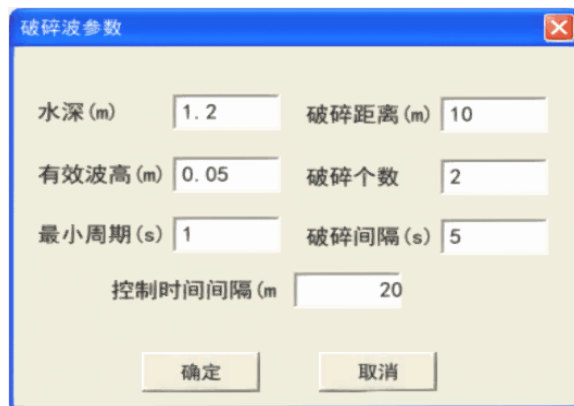


图 2-8-33 破碎波参数设置

E. 孤立波（凑谱→计算波列→孤立波）

图 2-8-34 给出了孤立波参数设置。

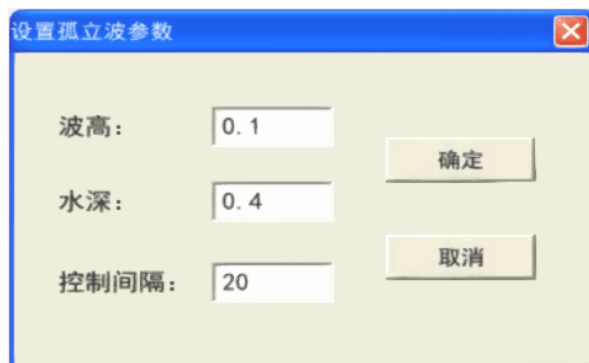


图 2-8-34 孤立波参数设置

F. 聚焦波（凑谱→计算波列→聚焦波）

图 2-8-35 给出了聚焦波参数设置。

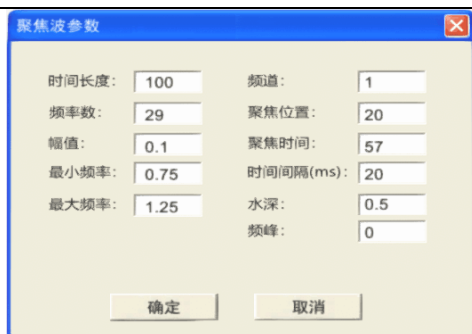


图 2-8-35 聚焦波参数设置

⑥ 单板造波

A. 发送第十四步的步骤⑤中生产的文件到电机控制系统（网络控制→发送文件→确定→确定）

B. 开始造波

点击图 2-8-27 最左侧图标，开始造波

第十五步，波浪观测及数据采集，同第十步。

第十六步，处理分析波浪数据，探究波浪运动、波浪破碎、波浪谱等内容。

例如：将测得的波浪数据做海浪谱，与图 2-8-36 常见的海浪谱做比较，并分析异同原因，加深对海浪谱的认知。

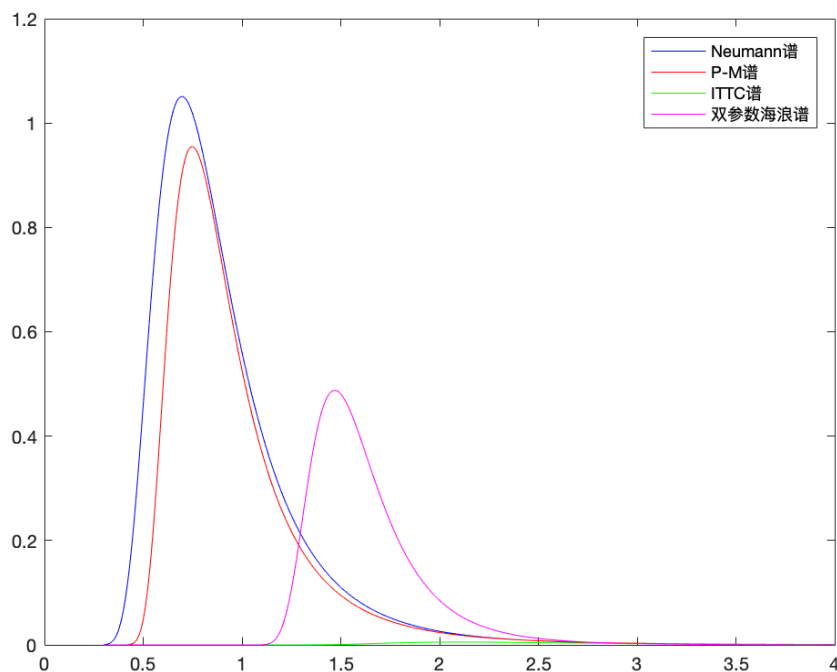


图 2-8-36 海浪谱

至此，单板造波和波浪测量完成。

第十七步，关闭单板造波系统。

为了保障实验室安全，单板造波实验结束之后，必须要关闭造波机和电源。

① 停止造波

点击图 2-8-27 左侧第二个图标，停止造波。

② 电机去使能，断掉与电机的连接

点击图 2-8-27 红色图标，电机去使能，断掉与电机的连接。

③ 网络控制菜单查看电机状态

单板造波机控制软件→网络控制→读取电机状态，确认电机已经去使能。

④ 关闭单板造波机控制软件，关机

⑤ 关闭电源

往上拉图 2-8-25 中的蓝色开关，关闭电源。

第十八步，设计创新性实验

除了自主搭建场景环节之外，同学们可以根据自己的兴趣自主设计创新性实验。可选择实验类型有：地形实验、坡角实验、底质实验、消波实验、海气交换、破波实验、湍流实验、降雨实验、水体内部实验或其他创新性实验。

① 设计创新性实验

② 选择相应实验必须的仪器进行架设。

③ 进行具体的创新性操作。

④ 创新性实验结果分析。

第十九步，造流

① 拆卸造波板。因为造波板会阻碍水槽中流的运动，所以需要先拆卸造波板才能造流。

② 打开开关，开始造流，并设计流参数。

③ 同时打开造风系统，探究波流相互作用。

第二十步，撰写并提交实验报告。

在实验进行过程中，学生可随时打开实验报告模板，将实验设计和实验输出结果等记录在报告中。完成所有实验操作后，按实验报告撰写要求，撰写完整的实验报告，并在网上提交。参见图 2-8-37。

实验报告

| | | | | | |
|--------|--------------------------|----|--------|---------|------------|
| 实验名称 | 风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验 | | | 实验日期 | 2020.11.12 |
| 院系 | 海洋科学学院 | 专业 | 海洋科学专业 | 班级 | 2018级1班 |
| 姓名 | 袁梦 | | 学号 | 1829508 | |
| 一、实验目的 | | | | | |

图 2-8-37 实验报告

第二十一步，在线答疑讨论。

学生在实验过程中遇到的任何问题都可以在答疑室进行在线答疑讨论。

2-9 实验结果与结论要求

- (1) 是否记录每步实验结果：是 否
- (2) 实验结果与结论要求：实验报告 心得体会 实验设计

(3) 其他描述：

具体实验结果、结论与实验报告撰写要求如下：

本实验有实验操作、DIY 自主搭建实验和创新性实验设计三个层次：

① 实验操作环节

在步骤三中，学生应当能够学会如何合理设计实验水位，并且明确不同水位高度可能带来的后果。

在步骤四中，学生能够掌握测波杆的测波原理，正确绘制电压与工程值之间的关系图，分析其相关性，并能计算给定电压值对应的波高。

在步骤五中，学生应当学会正确安装测波杆和皮托管，明确其安装位置与水位的关系和原因。

在步骤六中，学生应当了解测波杆采零原因，并能够对比有无采零的波高数据差异，分析其原因。

步骤八中，学生应当了解皮托管清零的原因，掌握皮托管的测风原理。

步骤九中，学生应当尝试制造不同速度的风，并比较几组风所造的波浪情况，从定性（观察不同风速下的波浪成长状态）到定量（计算波高与风速、风时、风区的关系）来探究风浪生成机制和运动过程。

在步骤十四中，学生应当掌握推波板的造波机制，学会凑谱。计算波谱，与标准谱进行对比，探究波浪的运动规律。

② DIY 自主搭建实验环节

在步骤二中，自主选择底质、地形和障碍物，设计对比实验，观察和计算不同底质、地形和障碍物与波浪运动之间的相互关系。并在此基础上，启发创新性实验设计。

③ 创新性实验设计环节

当对某一个科学问题感兴趣时，鼓励尝试设计探究型的创新性实验。对于比较成熟的创新性实验，可以到实体水槽中进行实验。

同学们的实验报告应包含实验操作环节的所有内容，尝试 DIY 自主搭建实验环节，挑战创新性实验设计环节。

2-10 考核要求

风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验的考核内容包括实验自主学习、实验设计、实验操作、波浪生成机制与运动过程探究、实验报告五个方面，真实反映学生学习全过程的学习成效，优化和改进教学策略。

具体考核要求、评分细则和比例见表 2-10-1。

表 2-10-1 虚拟仿真实验考核要求及评分细则表

| 考核内容 | 考核要求 | 评分细则 |
|------------------------------------|--|------|
| 实验自主学习 (10%) | 学生在线完成实验预习、实验演示和学习模块的学习。 | 10 |
| 实验设计 (10%) | (1) 设计 DIY 自主场景搭建实验和创新性实验的实验步骤，绘制思维导图，网上提交实验设计报告； (2) 实验设计方案应包括实验目的、原理、实验操作步骤、实验数据的记录、预处理、实验结果和结论等。 (3) 实验设计合理，可以实现实验目的。 | 10 |
| 实验操作 (30%) | 在考核模式下自主完成所有实验操作，系统在线给出评价结果。 | 20 |
| 涉及安全的内容扣 3 分，不涉及安全的内容扣 1 分，提示扣 1 分 | 计算各波浪要素，提交数据处理代码。 | 5 |
| | 能够对实验步骤和实验内容提出合理的改进措施 | 5 |
| 波浪生成机制与运动过程探究 (30%) | 计算分析风速、风区、风时与波高之间的关系，探究风浪生成机制、成长过程和运动规律。 | 20 |
| | 计算海浪谱，并与标准谱比较，探究波浪的运动规律。 | 10 |
| 实验报告 (20%) | 实验报告应明确实验目的、原理；实验操作步骤、实验数据记录、分析处理全面；实验结果与结论准确。 | 10 |
| | 对实验结果的分析、讨论充分，对实验操作过程、波浪生成机制与运动过程探究有深刻的思考和心得体会。 | 10 |
| 总分 (100%) | | 100 |

2-11 面向学生要求

(1) 专业与年级要求

本虚拟仿真实验主要面向海洋科学类：海洋科学专业、海洋技术专业、海洋工程专业、海岸工程专业、船舶工程专业本科三、四年级学生。

虚拟仿真系统后续将继续面向各对口高校学生加大开放和服务力度。

(2) 基本知识和能力要求

在使用本虚拟仿真实验系统学习之前，要求学生至少已经学习了《海洋学》或《海洋学概论》课程，最好配合《海浪原理与计算》课程进行学习。

2-12 实验项目应用及共享情况

(1) 本校上线时间：2018年3月1日

(2) 已服务过的本校学生人数：878

(3) 是否纳入到教学计划：是 否

(勾选“是”，请附所属课程教学大纲)

(4) 是否面向社会提供服务：是 否

(5) 社会开放时间：2018年4月1日，已服务人数：2320

3. 实验教学项目相关网络及安全要求描述

3-1 有效链接网址

<https://vlab.shou.edu.cn/virexp/waveflume>

3-2 网络条件要求

(1) 说明客户端到服务器的带宽要求（需提供测试带宽服务）

① 基于公有云服务器部署的系统，5M-10M 带宽

② 基于局域网服务器部署的系统，10M-50M 带宽

(2) 说明能够支持的同时在线人数（需提供在线排队提示服务）

支持 100 个学生同时在线并发访问和请求，如果单个实验被占用，则提示后面进行在线等待，等待前面一个预约实验结束后，进入下一个预约队列。

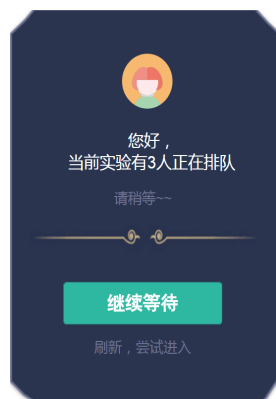


图 3-2-1 排队等待

4. 实验教学项目技术架构及主要研发技术

| 指标 | 内容 |
|-------------------|---|
| <p>系统架构图及简要说明</p> | <p>风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验项目的开放运行依托于开放式虚拟仿真实验教学管理平台的支撑，二者通过数据接口无缝对接，保证用户能够随时随地的通过浏览器访问该项目，并通过平台提供的面向用户的智能指导、自动批改服务功能，尽可能帮助用户实现自主的实验，加强实验项目的开放服务能力，提升开放服务效果。</p> <p>开放式虚拟仿真实验教学管理平台以计算机仿真技术、多媒体技术和网络技术为依托，采用面向服务的软件架构开发，集实物仿真、创新设计、智能指导、虚拟实验结果自动批改和教学管理于一体，是具有良好的自主性、交互性和扩展性的虚拟实验教学平台。</p> <p>总体架构图如下：</p>  <p>The diagram illustrates the system architecture with four main layers and a central data center:</p> <ul style="list-style-type: none"> 应用层 (Application Layer): Includes user roles (校领导, 教务人员, 教师, 校内外学生) and the '风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验项目' with functions like '阅读实验要求', '查看/下载实验资料', '实验台进行实验', and '提交实验结果'. 仿真层 (Simulation Layer): Divided into '可视化' (Virtual Instruments, Graphics), '建模与装配' (Scene Construction, Component Modeling, Component Assembly), and '仿真分析器'. 服务层 (Service Layer): The '开放式虚拟仿真实验教学管理平台' with modules for '实验教学管理', '理论知识学习', '实验资源管理', '实验智能指导', '教学效果评估', '实验自动批改', '实验报告管理', '师生互动交流', and '集成接口工具'. 支持层 (Support Layer): Divided into '安全管理' (Authentication, Access Control, Security), '服务容器' (Deployment, Monitoring, Batch Processing, Notifications), '数据管理' (Access, Storage, Conversion), and '域管理' (Monitoring, Logging, System Management). 数据中心 (Data Center): A vertical stack of databases: '用户信息', '课程库', '典型实验库', '基础元件库', '规则库', '标准答案库', and '实验数据'. |

图 4-1 系统总体架构图

系统架构图及简要说明

如图所示，支撑项目运行的平台及项目运行的架构共分为五层，每一层都为其上层提供服务，直到完成具体虚拟实验教学环境的构建。

下面将按照从下至上的顺序分别阐述各层的具体功能。

(1) 数据层

风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验项目涉及到多种类型虚拟实验组件及数据，这里分别设置虚拟实验的基础元件库、实验课程库、典型实验库、标准答案库、规则库、实验数据、用户信息等来实现对相应数据的存放和管理。

(2) 支撑层

支撑层是虚拟仿真实验教学与开放共享平台的核心框架，是实验项目正常开放运行的基础，负责整个基础系统的运行、维护和管理。支撑平台包括以下几个功能子系统：安全管理、服务容器、数据管理、资源管理与监控、域管理、域间信息服务等。

(3) 通用服务层

通用服务层即开放式虚拟仿真实验教学管理平台，提供虚拟实验教学环境的一些通用支持组件，以使用户能够快速在虚拟实验环境完成虚拟仿真实验。通用服务包括：实验教务管理、实验教学管理、理论知识学习、实验资源管理、互动交流、实验报告管理、教学效果评、项目开放与共等，同时提供相应集成接口工具，以便该平台能够方便集成第三方的虚拟实验软件进入统一管理。

(4) 仿真层

仿真层主要针对该项目进行相应的器材建模、实验场景构建、虚拟仪器开发、提供通用的仿真器，最后为上层提供实验结果数据的格式化输出。

(5) 应用层

基于底层的的服务，最终风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验项目教学与开放共享。该框架的应用层具有良好的扩展性，实验教师可根据教学需要，利用服务层提供的各种工具和仿真层提供的相应的器材模型，设计各种典型实验实例，最后面向学校开展实验教学应用。

| | | |
|------------|---|--|
| 实验教 学项目 | 开发技术 | <input type="checkbox"/> VR <input type="checkbox"/> AR <input type="checkbox"/> MR <input checked="" type="checkbox"/> 3D 仿真 <input type="checkbox"/> 二维动画 <input type="checkbox"/> HTML5 其他 <u>WebGL</u> |
| | 开发工具 | <input checked="" type="checkbox"/> Unity3D <input checked="" type="checkbox"/> 3D Studio Max <input type="checkbox"/> Maya <input type="checkbox"/> ZBrush <input type="checkbox"/> SketchUp <input type="checkbox"/> Adobe Flash <input type="checkbox"/> Unreal Development Kit <input checked="" type="checkbox"/> Animate CC <input type="checkbox"/> Blender <input checked="" type="checkbox"/> Visual Studio <input type="checkbox"/> 其他 _____ |
| 实验教 学项目 | 运行环境 | 服务器 CPU <u>6</u> 核、内存 <u>64</u> GB、磁盘 <u>2048</u> GB、 显存 <u>0</u> GB、GPU 型号 <u>无</u> 操作系统 <input checked="" type="checkbox"/> Windows Server <input type="checkbox"/> Linux <input type="checkbox"/> 其他 具体版本 _____ 数据库 <input checked="" type="checkbox"/> Mysql <input type="checkbox"/> SQL Server <input type="checkbox"/> Oracle 其他 _____ 备注说明 _____ (需要其他硬件设备或服务器数 量多于 1 台时请说明) |
| | 项目品质 (如: 单场景 模型总面数、贴图分辨 率、每帧渲染次数、动 作反馈时间、显示刷新 率、分辨率等) | 单场景模型总面数: 500 万 贴图分辨率: 2048 每帧渲染次数: 60 动作反馈时间: 小于 0.2 秒 (极少部分为 0.5 秒) 显示刷新率: 60Hz 以上 |

5. 实验教学项目特色

(体现虚拟仿真实验教学项目建设的必要性及先进性、教学方式方法、评价体系及对传统教学的延伸与拓展等方面的特色情况介绍。)

(1) 必要性及先进性

目前，实体的风浪流水槽实验面临以下难题：

① 危险系数高，

实体风浪流水槽高3米，水深可达2米，学生在水槽上方安装必要的实验设备危险性高，容易引发摔伤、溺水、触电等**严重安全事故**。

② 实验难度大、耗时长

实体风浪流水槽实验只能开展简化个例实验，一次完整的精细地形实验或海气相互作用实验需要连续半个月至一个月的时间。学生通过**实体风浪流水槽实验难以实现对波浪生成机制与运动过程的全貌认知**。

③ 实验资源匮乏且成本高

实体风浪流水槽占地面积广(40m×10m=400m²)，水电耗费大(2000元/时)，不能满足每位学生参与实验的需求，更不能多次重复实验，尤其是学生**宝贵的实验设计方案难以得到实现**。

④ 设备性能局限

受电机功率限制，**真实风浪流水槽实验难以进行高风速(>20m/s)下波浪的物理现象及变化规律的研究**。

风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验很好地解决了上述问题。本虚拟仿真实验的可重复性操作可以在保障安全、节约实验成本的前提下不断提高学生的实践操作技能。特别是紧急情况应急响应训练可以提升学生的心理素质和应急能力，这也是实际操作中难以实现的。

学习者通过本系统，能够掌握波浪的制造方法和测量方法；掌握波浪的生成机制与运动过程，加强对该科学问题全貌认知；掌握不同场景实验搭建的基本步骤和设计方法；培养学生设计创新实验解决复杂科学问题的能力，为毕业后科研和业务工作打下基础，提高海洋科学专业人才的综合素质和创新能力。

(2) 教学方法创新：

风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验采用“**层次渐进，虚实结合、教学相长**”的教学方法。

其中“**层次渐进**”指的是本实验有**实验操作、DIY 自主搭建实验和创新性实验设计**三个层次。实验操作可以看作是风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验的初阶，**DIY 自主搭建实验**是中阶，创新性实验设计是高阶。

实验操作环节应当熟练实验步骤，掌握实验原理，探究波浪生成机制和运动过程。**DIY 自主搭建实验环节**是从老师预先搭建的平台中选择合适的地形、底质、坡角，以及仪器，进行地形实验、底质实验、坡角实验、消波实验、海气交换实验、破波实验、湍流实验、降雨实验、内波实验等，这些实验是相对成熟的实验。主要是为了给同学打开一扇窗，水槽实验可以怎么做，可以做什么。在此基础上，启发同学们对水槽实验的兴趣。通过虚拟仿真系统中的 **DIY 实验设计模块**，学习各种水槽实验的设计方法，完成对创新性实验设计的初步培训。**高阶的创新性实验**可以脱离老师搭建的平台。

同学们通过平台的低阶、中阶的学习和训练，掌握了实验的设计方法和实验技能，对风浪流水槽实验有了比较深刻掌握。如果在这个过程中启迪出了一些科学问题和实验方案，就可以结合风浪流水槽虚拟仿真平台和开源虚拟仿真软件自行搭建、设计和模拟实验。教师会针对学生的实验进行评价，**选择有价值、较成熟的项目到实体水槽实验场地进行实验**。对不成熟的实验方案进行特别的指导，最终的考核也会全面地对学生的实验操作及实验设计进行评价。除此之外，也会将同学们设计的较成熟的方案纳入到风浪流水槽虚拟仿真平台，进一步充实风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验，实现“**虚实结合、教学相长**”。

“层次渐进，虚实结合、教学相长”的实验教学方法，开创了线上线下教学相结合的个性化、智能化、泛在化实验教学新模式，将基于网络的远程教学和基于翻转课堂的引导式、开放式教学相结合，强烈激发学生的实验兴趣，极大地提高了学生的实验操作技能及设计创新性实验的能力。

(3) 评价体系创新：

针对虚拟仿真实验项目学习的各个阶段，设计了集“**实验自主学习、实验设计、实验操作、波浪生成机制与运动过程探究、实验报告**”于一体的全面考核评价体系。并且针对基础操作类和探究类不同类型的实验过程，建立符合实验特点的评价标准，确保评价的公正性和准确性，真实反映学生全过程的学习成效。其中对于基础操作类的实验内容，系统在线自动给出测评结果，促使学生及时发现问题，思考改进策略。

同时，建立完善的反馈机制，收集包括学生在内的各方的意见、建议、评价和反馈信息，进行全面系统的统计分析，为指导教师改进和完善实验提供参考，提高教学效果。

(4) 对传统教学的延伸与拓展:

风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验系统不仅能够单机稳定可靠运行，并可置于基于 Internet 开放教学管理平台上，可以为不同校区、不同专业的学生同时共享使用，并且系统建于 B/S 架构可以提供授权的网络环境下开展实验。

系统有完善的加密机制，具有看门狗的功能，可以进行日志管理、数据备份、系统监控，保障网络及信息安全保护功能。

本实验教学项目与课堂理论教学深度融合，实现边学边实验，通过实验检验对理论问题的理解程度与探究效果，提高解决实际问题的能力。

综上所述，本虚拟仿真实验解决了实体风浪流水槽实验危险系数高、实验难度大耗时长、实验资源匮乏且成本高、实验设备性能有局限性等问题，涵盖实验操作、自主搭建实验和创新实验设计三个层次，构建了多维互动、层次渐进的虚拟仿真实验教学体系，具备较强的科学性、可观性、交互性、探究性、综合性和挑战性，符合虚拟仿真“一流本科课程”的标准。

6. 实验教学项目持续建设服务计划

(本实验教学项目今后 5 年继续向高校和社会开放服务计划及预计服务人数)

(1) 项目持续建设与服务计划:

① 虚拟仿真系统持续更新和建设:

增强平台对优质资源的共享能力和稳定性，满足更大的用户并发访问。对现有系统进行升级，进一步增加流场实验，将同学们较好的 DIY 实验纳入虚拟仿真系统。同时进一步增加启发式自主实验设计环节，以满足对同学们创新思维的锻炼和培育。

已立项项目：**基于流场的风浪流水槽虚拟仿真实验 V2.0**,2020 年度校级虚拟仿真实验教学项目,2020 年 1-12 月。

② 课程建设:

已在 2020 年海洋科学专业培养方案中增加《海浪实验》课程，主要内容就是风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验。

建立海洋科学、海洋技术、海洋工程、海岸工程、船舶工程等专业及相关专业的实验教学体系，帮助学生理解风浪流水槽实验课程相关理论。

(2) 面向高校和社会的教学推广应用计划：

本项目对所有高校学生开放，学生在网上进行实名注册后登录系统，进行风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验。在规定时间内，对学生进行线上答疑。

具体推广工作安排为：

| 起止时间 | 项目名称 | 建设服务内容 | 资金预算 | 资金来源 | 预计服务人数 |
|-----------------|---------------------|-----------------------|------|-------------|----------------------------|
| 2020.07-2020.11 | 江苏海洋大学-虚拟实验教学项目共享 | 对合作院校师生开放本虚拟仿真实验教学项目， | 0元 | 免费服务与线上线下指导 | 一年内服务人数20人（1个班），逐步增加至40人/年 |
| 2020.09-2020.12 | 大连海洋大学-虚拟实验教学项目共享 | 对合作院校师生开放本虚拟仿真实验教学项目 | 0元 | 免费服务与线上线下指导 | 一年内服务人数20人（1个班），逐步增加至40人/年 |
| 2020.09-2021.10 | 中国海洋大学-虚拟实验教学项目共享 | 对合作院校师生开放本虚拟仿真实验教学项目 | 0元 | 免费服务与线上线下指导 | 一年内服务人数20人（1个班），逐步增加至40人/年 |
| 2020.09-2021.10 | 上海电机学院-虚拟实验教学项目共享 | 对合作院校师生开放本虚拟仿真实验教学项目 | 0元 | 免费服务与线上线下指导 | 一年内服务人数20人（1个班），逐步增加至40人/年 |
| 2020.11-2021.10 | 上海海事大学-虚拟实验教学项目共享 | 对合作院校师生开放本虚拟仿真实验教学项目 | 0元 | 免费服务与线上线下指导 | 一年内服务人数20人（1个班），逐步增加至40人/年 |
| 2020.11-2021.10 | 南京信息工程大学-虚拟实验教学项目共享 | 对合作院校师生开放本虚拟仿真实验教学项目 | 0元 | 免费服务与线上线下指导 | 一年内服务人数20人（1个班），逐步增加至40人/年 |

| | | 项目 | | | 年 |
|---------------------|---------------------------|---|-----------------|---------------------|--|
| 2020.11-20 21.10 | 广东海洋大学- 虚拟实验教学 项目共享 | 对合作院校师 生开放本虚拟 仿真实验教学 项目 | 0 元 | 免费服务 与线上线 下指导 | 一年内服务人数 20 人（1 个班）， 逐步增加至 40 人/ 年 |
| 2020.11-20 21.10 | 浙江海洋大学- 虚拟实验教学 项目共享 | 对合作院校师 生开放本虚拟 仿真实验教学 项目 | 0 元 | 免费服务 与线上线 下指导 | 一年内服务人数 20 人（1 个班）， 逐步增加至 40 人/ 年 |
| 2020.11-20 21.10 | 浙江大学-虚拟 实验教学项目 共享 | 对合作院校师 生开放本虚拟 仿真实验教学 项目 | 0 元 | 免费服务 与线上线 下指导 | 一年内服务人数 20 人（1 个班）， 逐步增加至 40 人/ 年 |
| 2020.11-20 25.10 | 会议、论坛、讲 座、沙龙 | 不定期举办， 使项目能够被 更多高校了解 | 0.5 万元/ 年 | 学校专项 经费 | 50 人/年，共计 250 人以上 |
| 2020.12 | 建立微信公众 号 | 建立与其他高 校师生和社会 学员之间的交 流平台，提供 虚拟仿真实验 教学项目介绍 和其他教学服 务 | 0 元 | | 300 人/年，共计 1500 人以上 |

7. 知识产权

| 软件著作权登记情况 | |
|--------------------|--|
| 软件著作权登记情况 | <input checked="" type="checkbox"/> 已登记 <input type="checkbox"/> 未登记 |
| 完成软件著作权登记的，需填写以下内容 | |
| 软件名称 | 风浪流水槽虚拟仿真实验系统[简称：OWVLab MAMINPP]V1.0 |
| 是否与项目名称一致 | <input checked="" type="checkbox"/> 是（名称简化） <input type="checkbox"/> 否 |
| 著作权人 | 上海海洋大学 北京润尼尔网络科技有限公司 |
| 权利范围 | <p style="text-align: center;">权利范围：全部权利</p> <p>发表权、署名权、修改权、复制权、发行权、出租权、信息网络传输权、翻译权、应当由软件著作人享有的其他权利</p> <p>包括：实验软件、操作系统、教学视频、教学课件、辅助参考资料、实验操作手册等组成本实验项目的一切资源。</p> <div style="text-align: center;">  </div> |
| 登记号 | 2019SR0749284 |

图 7-1 虚拟仿真系统软件著作权

8. 诚信承诺

本人承诺：所申报的实验教学设计具有原创性，项目所属学校对本实验项目内容（包括但不限于实验软件、操作系统、教学视频、教学课件、辅助参考资料、实验操作手册、实验案例、测验试题、实验报告、答疑、网页宣传图片文字等组成本实验项目的一切资源）享有著作权，保证所申报的项目或其任何一部分均不会侵犯任何第三方的合法权益。

本人已认真填写、检查申报材料，保证内容真实、准确、有效。

实验教学项目负责人(签字): 于潭

2020年 11月 07日

9. 附件材料清单

1. 政治审查意见

（本校党委须对项目团队成员情况进行审查，并对项目内容的政治导向进行把关，确保项目正确的政治方向、价值取向。须由学校党委盖章。无统一格式要求。）

2. 校外评价意见

（评价意见作为项目有关学术水平、项目质量、应用效果等某一方面的佐证性材料或补充材料，可由项目应用高校或社会应用机构等出具。评价意见须经相关单位盖章，以1份为宜，不得超过2份。无统一格式要求。）

风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验使用证明

3. 所属课程教学大纲

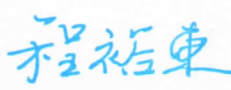

4. 2020年海洋科学专业培养方案

5. 软件著作权证书

10. 申报学校承诺意见

本学校已按照申报要求对申报的虚拟仿真实验教学项目在校内进行公示，并审核实验教学项目的内容符合申报要求和注意事项、符合相关法律法规和教学纪律要求等。经评审评价，现择优申报。

本虚拟仿真实验教学项目如果被认定为“国家虚拟仿真实验教学项目”，学校将严格贯彻《教育部高等教育司关于加强国家虚拟仿真实验教学项目持续服务和管理有关工作的通知》（教高司函〔2018〕56号）的要求，承诺将监督和保障该实验教学项目面向高校和社会开放，并提供教学服务不少于5年，支持和监督教学服务团队对实验教学项目进行持续改进完善和服务。

主管校领导（签字）：

(学校公章)
2020年11月12日

关于对风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验教学 项目及其课程团队成员的审查意见

2020年11月12日，上海海洋大学党委组织了对风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验教学项目及线上视频的价值引领内容审查，及其课程负责人于潭及团队成员胡松、魏永亮、赵红波、王家为的政治审查。经查：于潭老师作为共青团上海海洋大学委员会副书记（挂职）能严格按照党员标准要求自己，认真学习十九大精神和习近平新时代中国特色社会主义思想，以教书育人为己任，兢兢业业、恪尽职守，多次获评“好课堂”等称号。团队成员胡松同志政治坚定，拥护中国共产党的领导，思想觉悟高。魏永亮同志作为海科教工党支部书记，尽职履责，教书育人，品德高尚，是全国首批100个教师党支部书记双带头人工作室负责人。赵红波同志爱党爱国、拥护党的路线、方针、政策，积极向党组织汇报思想，能和党中央在政治上保持一致。王家为同志平时能自觉注重理论学习，立场坚定，思想积极，坚持原则，诚实守信，在政治上、思想上、行动上同党中央保持高度一致。

风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验教学项目在于潭老师的带领下，相应团队积极探索面向社会开放的虚拟仿真实验教学方式，线上内容能紧扣教学大纲知识点讲授，有利于促进学生深入理解相关操作难点，有效解决了现实生活中“做不上”、“做不了”的难题，积极引导学生在理解知识点的基础上树立正确的价值观，内容健康向上，坚持了正确的价值引领方向。

同意风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验教学项目利用经审核的视频内容开展在线虚拟仿真教学，同意推荐该项目参与上海市级、国家级项目评审。

中共上海海洋大学委员会

2020年11月12日



风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验

使用证明

兹证明江苏海洋大学海洋技术与测绘学院海洋技术专业学生在《物理海洋学》课程中学习使用了上海海洋大学的《风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验》。实验网址为：<https://vlab.shou.edu.cn/virexp/waveflume>。

《风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验》解决了实体风浪流水槽实验危险系数高、实验难度大耗时长、实验资源匮乏且成本高、实验设备性能有局限性等问题，涵盖实验操作、自主搭建实验和创新实验设计三个层次，构建了多维互动、层次渐进的虚拟仿真实验教学体系，培养具有探索创新精神、实践能力、自主学习能力的海洋科学人才。

江苏海洋大学海洋技术与测绘学院



2020年11月10日

《海浪原理与计算》教学大纲（理论课）

课程名称（中文/英文）：海浪原理与计算 (The principle and calculation of waves)

课程性质：必修课

课程编号：2406110

学分：2

学时：总学时 32 其中：讲授学时 20 实验学时 12（6 虚拟实验、6 实体实验）

课程负责人：于潭

一、课程简介

1. 课程概况

海浪是我们日常生活中一种常见的现象。居住在海边或在海边度假的人都会很熟悉海浪。《海浪原理与计算》是海洋科学专业物理海洋方向的必修课程，通过课程学习，学生可以掌握海浪研究的发展史、描述海浪的方法、海浪的生成与成长机制、海浪运动过程、海浪模式和海浪的计算方法，讨论目前海浪研究中存在的问题及其对海-气相互作用的影响。该课程为海洋科学专业本科生从事海洋科学领域相关工作和进行深入科学研究打下基础。

The waves are common phenomenon in our daily life. Who live in the sea or go vacationing in the seaside will be very familiar with the waves. In this course, we will learn the history of the development of ocean wave research, the method to describe the waves, the mechanism of formation and growth of the waves, the calculation method of the wave models and discuss problems existing in the current research of ocean wave and its effects to the air-sea interaction. It aims at laying a good foundation for the subsequent specialized courses of students of marine sciences major.

2. 课程目标

课程德育教育目标

2.1 学习海洋行业应该具备的职业道德，使学生理解诚实公正、诚实守信的职业操守和规范，并能在以后的工作岗位中自觉遵守行业标准，形成岗位的责任心。

2.2 通过小组讨论和汇报，培养学生的沟通表达能力，使学生能够通过口头和书面表达方式与同行及社会公众进行有效沟通。

2.3 通过小组共同完成任务，培养学生的团队协作精神，使学生能够与团队成员和谐相处，协作共事，并作为成员或领导者在团队活动中发挥积极作用，做好团队间协调与合作。

课程专业教育目标

2.4 了解海浪研究的发展历史、掌握描述海浪的方法、海浪的生成与成长机制，增加学生对海浪问题的认识和兴趣，为将来的学习和工作打下良好的知识基础。

2.5 掌握海浪的基本理论和计算方法，使学生能够在海岸防护堤、石油平台等海洋工程建设中进行工程可行性论证工作，能够计算海浪与建筑物相互作用的过程中可能对海洋建筑物所造成的损害。

2.6 了解海浪模式，掌握海浪能源的计算和利用，使学生更加具备专业使命感。

2.7 能够合理使用风浪流水槽（包括**风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验**）进行风浪、调制波的制造，并能根据实际的科学问题自主设计实验。

二、教学内容

理论和实践教学安排：

| 教学内容 | 学时 | 备注 | 对课程目标的支撑度 | | | | | |
|--|--|--|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.6 |
| <p>第一章 概述</p> <p>主要知识点：波动的概念、要素、分类、能量</p> <p>学习要求：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 理解什么是波动 2. 掌握波动的要素 3. 理解波浪是怎样产生的 4. 阐述波浪的分类 5. 认识波的能量 6. 了解海浪研究的历史 <p>教学目标：</p> <p>通过本章的讲述，使学生认识什么是波动？波动的要素有哪些？波浪是怎样产生的？波浪如何分类、波的能量、海浪研究的历史。</p> <p>教学难点：</p> <p>波浪产生的原因有很多，学生需要对此加以区分，是学习的难点。</p> | 6 学时 其中 2 学时进行 风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验 学习并练习风浪制作、测量，风、浪数据分析，波浪生成机制探究。 | 分 组 并 进 行 主 题 选 择,准 备 开 展 实 验 工 作。 | √ | | √ | √ | | |
| <p>第二章 线性和非线性波动理论</p> <p>主要知识点：牛顿第二定律、连续方程、运动方程、边界条件、小振幅波动</p> <p>学习要求：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 掌握连续性方程和运动方程的推导过程 2. 掌握运动学边界条件和动力学边界条件 3. 掌握波动方程的近似求解 4. 掌握小振幅波动理论 5. 掌握有限振幅波动理论 <p>教学目标：</p> <p>通过本章的讲述，使学生掌握和了解线性和非线性波动理论的基本假设、小振幅波动理论和有限振幅波动理论，分别包括牛顿第二定律、质量守恒—流体的连续性方程、速度势和积分形式的运动方程、伯努利定常积分定理、非定常情形的运动方程的积分形式、运动学边界条件、动力学边界条件、波动方程的近似求解以及波动相速度、波长的超越方程、波列和群速度、小振幅波动能量和有限振幅波动理论等内容。</p> | 14 学时 其中 2 学时是 风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验 学习并练习调制波制作、测量，波浪参数计算分析，波浪运动过程探究；2 学时用于风浪实体实验和小组讨论。 | 各 小 组 根 据 自 选 的 主 题 进 行 学 习、 讨 论、 汇 报。 | √ | √ | √ | | √ | |

| | | | | | | | | |
|--|--|--------------------------------|----------|----------|----------|--|----------|----------|
| <p>教学难点： 1 小振幅波动里面包含很多假设条件，以及很多简化方法，掌握起来会有些难度。 2 有限振幅波动理论涉及二阶的非线性部分，不管是推导还是理解，都增加了难点。</p> | | | | | | | | |
| <p>第三章 海浪谱及海浪要素计算 主要知识点:海浪的随机性、海朗谱、海浪波高的概率分布、海浪的波长分布、海浪谱宽度 学习要求： 1. 理解海浪的随机性 2. 了解海浪波高的概率分布、波长分 3. 掌握海浪谱与海浪要素的计算 教学目标： 掌握和了解海浪及其海浪谱，包括海浪的充分成长状态、海浪的波级、海浪的随机性、海浪谱及其估计、海浪谱的形式及海浪谱的超射现象。 掌握和了解海浪要素的统计分布，包括海浪波面的统计分布、海浪波高的概率分布、海浪的周期分布、海浪的波长分布、海浪谱与海浪要素的计算、海浪谱宽度等。 教学难点： 海浪谱往往比较复杂，涉及的项较多，难以讲解和理解。</p> | <p>12 学时 其中 2 学时进行风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验自主设计 DIY 实验和创新性实验，4 学时用于推波实体实验和小组讨论</p> | <p>各小组根据自主选择的主题进行学习、讨论、汇报。</p> | <p>√</p> | <p>√</p> | <p>√</p> | | <p>√</p> | <p>√</p> |

三、教学方法

本课程采用参与性教学、研究性教学、实践性教学，三位一体服务于课堂教学。参与性教学体现在学生在课堂中公式的推导，部分环节到讲堂上来；研究性教学，将个人的科研项目的一个子课题放进教学内容中，引导学生学习科研的方法，从综述了解研究内容所处的国内外现状，了解一些基础理论方法，通过已有方法的学习，加深对研究内容的认识，进一步深入思考，寻找解决问题的方法；实践性教学按照实验课程教学环节，提高学生的实践动手能力，以实践来深入理论知识的学习。实践性教学基于**风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验系统**进行，突破时空局限性，为海浪原理与计算课程实习提供重要的辅助功能；突破单一性，提供内容丰富、共享性强的学习资料。

风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验采用“虚实结合、教学相长”的教学方法。风浪流水槽虚拟仿真系统将虚拟仿真与实践教学有机融合，通过不同地形、底质等实验场景的构建，让学生深入探究风、浪、流相互作用，以及对结构物的作用力，掌握实验的设计方法和实验技能。

学生通过电脑移动端设备应用本虚拟仿真系统，在任何地方可以随时体验。在教师的鼓励与引导下，学生通过智能网络化学习，自主设计实验项目。

教师会针对学生的自主实验进行评价，选择有价值、较成熟的项目到真实水槽实验场地进行实验。对不成熟的实验方案进行特别的指导，最终的考核也会全面地对学生的实验操作及实验设计进行评价。除此之外，也会将同学们设计的较成熟的方案纳入到风浪流水槽虚拟仿真平台，进一步充实风浪流水槽虚拟仿真平台，实现“虚实结合、教学相长”。

四、考核与评价方式及标准

本课程包括 32 学时。课程通过讲授、实验、讨论等方式开展教学，泛亚平台将作为本课程网络教学辅助平台发布各类通知、访问资源和学习资料、开展在线测试和讨论。

每项考核详细信息如下所述：

| | | | | | | | | | |
|--------------------|---|----|----------------|-----------------|-----|----|----|----|----|
| 考核性质 | ○考试 ●考查 | | 考核形式 | ○开卷 ○闭卷 ●论文 ○其他 | | | | | |
| 成绩评定 | 总成绩比 % | | 平时成绩比 % | | | | | | |
| | 期末 | 平时 | 出勤 | 作业 | 实验 | 实习 | 讨论 | 测验 | 其它 |
| | 60 | 40 | | | 100 | | | | |
| 成绩评定和学习要求描述 | 通过本课程学习，要求学生了解和掌握海浪的成长机制和计算原理，并能对海浪要素进行计算。成绩评定按期末考查占 60%，平时成绩占 40%（虚拟仿真实验）计算。 | | | | | | | | |

具体考核标准、评分方案以及考试大纲见网络教学辅助平台。

五、课程思政素材

| 序号 | 课程思政素材 | 对应章节 | 教学方法 | 对课程目标的支撑度 | | | | | |
|----|--|----------------|------------------------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | | | 2.1 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.6 |
| 1 | <p>波浪发电：波浪发电的原理主要是将波力转换为压缩空气来驱动空气透平发电机发电。当波浪上升时将空气室中的空气顶上去，被压空气穿过正压水阀室进入正压气缸并驱动发电机轴伸端上的空气透平使发电机发电，当波浪落下时，空气室内形成负压，使大气中的空气被吸入气缸并驱动发电机另一轴伸端上的空气透平使发电机发电，其旋转方向不变。</p> <p>利用海洋能源，是当今世界能源研究的方向。特别是在能源关系到国家安全，地球矿物能源逐渐枯竭及环境状况日益恶化的形势下，如何有效利用资源丰富、可再生的海洋资源，显十分重要，惯性波浪发电技术就是在现有利用海洋波浪能发电研究的基础上，运用成熟的机械制造及发电技术进行有效的组合。将广阔海岸取之不尽，用之不竭的波浪能低成本地转化为电能，为改善中国东部沿海地区能源短缺和环境改善开辟一条新的途径。</p> | 第 1 章 第 5 节 | 讲授、 小组 讨论、 课外 实践 | √ | | √ | √ | | |

| | | | | | | | | | |
|---|--|-----------------|--|---|---|---|--|---|---|
| 2 | <p>海浪对海洋工程的作用：海洋环境复杂多变，海洋工程常要承受台风（飓风）波浪的强烈作用，在浅海水域还要受复杂地形，以及岸滩演变、泥沙运移的影响。</p> <p>中国早在公元前 306～前 200 年就在沿海一带建设港口，长期以来，随着航海事业的发展和生产建设需要的增长，海岸工程得到了很大的发展，其内容主要包括海岸防护工程、围海工程、海港工程、河口治理工程、海上疏浚工程、沿海渔业工程、环境保护工程等。</p> | 第 3 章 第 10 节 | 讲授、 小组 讨论、 观看 视频、 课 外 实践 | √ | √ | √ | | √ | √ |
|---|--|-----------------|--|---|---|---|--|---|---|

六、参考教材和阅读书目

指定教科书

王树青，梁丙臣. 海洋工程波浪力学，中国海洋大学出版社，2013 年第 1 版

参考书

1. 文圣常，余宙文. 海浪理论和计算原理，科学出版社，1984 年 1 月第 1 版.
2. Rick Salmon, Introduction to Ocean Waves, Scripps Institution of Oceanography, University of California, San Diego
3. LEO H. HOLTHUIJSEN. Waves in oceanic and coastal waters, Cambridge University Press, 2007.
4. 徐德伦，王莉萍，海洋随机数据分析：原理方法与应用，高等教育出版社，2011 年。
5. 于潭，风浪流水槽波浪生成机制与运动过程探究虚拟仿真实验指导书，自编。

七、本课程与其它课程的联系与分工

先修课程为海洋科学导论或海洋学概论，海洋科学导论或海洋学概论让同学们了解了什么是海浪，以及海浪与其他波动的区别。本门课程就海浪的生成机制和计算方法进行深入探讨。

撰写人：于潭

审核人：魏永亮

教学院长：胡松

日期：2018 年 1 月 28 日

专业负责人：胡松、魏永亮、李阳东

海洋科学专业（Marine Sciences）

学科门类：理学 专业类：海洋科学类 专业代码：070701

一、培养目标与规格

1. 培养目标

本专业培养具备海洋科学基本理论知识，掌握现代海洋观测手段、调查方法和技能，在物理海洋或海洋地质领域，具备从事相关调查、数据处理与分析、科学研究、技术服务及管理能力的高素质专业人才。

2. 培养规格

本专业学生学习海洋科学、以及与海洋相关的数学、物理基本理论和基本知识，接受海洋水文气象调查的基本方法和技能训练。在此基础上，按物理海洋学、海洋地质与资源两个特色方向培养。

毕业生应获得以下几方面的知识和能力：

- （1）掌握数学、物理和计算机方面的基本理论和基本知识；
- （2）掌握海洋科学基本理论和基本知识；
- （3）掌握海洋调查、数据采集处理、结果解释和综合分析的基本方法和技能；
- （4）物理海洋学方向掌握海洋数据处理和数值模拟方法，具备利用数学手段从物理角度解释各种物理海洋现象、分析海洋环境变化的能力；海洋地质与资源方向掌握海洋环境数据的获取与处理、海洋地质过程的研究方法以及海洋地质样品的采集与分析；
- （5）具备为包括海洋渔业在内的海洋相关资源开发利用、海洋工程建设提供海洋动力环境数据以及相关分析的能力；
- （6）了解海洋科学的理论前沿和应用前景；
- （7）在海洋科学方面具有初步的科学研究和实践工作能力，具有一定的批判性思维能力。

二、学制与学位

1. 基本学制 四年

2. 授予学位 理学学士

三、专业特色与特点

本专业以物理海洋学为基础，学生在一年级主要学习并掌握计算机、数理及海洋科学的基本知识，为学习海洋科学核心课程奠定基础；二年级主要掌握物理海洋学基础性课程。三年级开始分物理海洋学和海洋地质与资源两个专业方向培养。物理海洋学方向研究海水的状态与运动过程，强调数学和物理基础知识学习，注重理论与数值方法，结合新时代海洋大数据和智慧海洋技术，重视生物资源可持续开发利用和地球环境与生态保护的高度诠释能力。海洋地质与资源方向研究与海洋有

关的矿产、生物等资源的形成机理、研究手段和评价技术，注重理论学习与实践结合，强调数学和物理基础知识学习，以及与海洋地球化学、海洋资源交叉结合，为海洋地质过程演化、海洋地质资源调查和评价提供数据支持和分析服务。

四、主干学科与主要课程

1. 主干学科 海洋科学、物理海洋学、海洋地质学

2. 主要课程

核心课程：海洋学、海洋观测、海洋数理基础、流体力学、物理海洋学、卫星海洋学、海洋数据处理与可视化。

物理海洋学方向主要课程：理论力学、海洋要素计算及预报、海洋环流、Fortran 程序设计、海浪原理与计算。

海洋地质与资源方向主要课程：现代地球系统科学、海洋地质学、矿物与岩石学、海洋生物地球化学。

五、主要实验实践教学环节

1. 主要实验教学

大学物理实验、流体力学实验、物理海洋学实验 I、物理海洋学实验 II、海浪实验。

2. 主要实践教学环节

专业认识实习（2 周）、海洋水文气象调查与观测实习（2 周）、海洋数理基础课程设计（1 周）、海洋要素计算及预报课程设计（物理海洋学方向，2 周）、海洋和大气数据可视化课程设计（物理海洋学方向，2 周）、海洋观测见习（物理海洋学方向，2 周）、海洋地质实习（海洋地质与资源方向，4 周）、毕业设计（论文）（12 周）。

六、毕业学分基本要求

| 项目 | 准予毕业总学分 | 综合与通识教育 | | 学科基础教育 | 专业教育 | | | 专业实践实训 |
|--------|---------|---------|----|--------|------|----|----|--------|
| | | 必修 | 选修 | | 必修 | 限选 | 任选 | |
| 最低应修学分 | 152 | 35 | 10 | 33.5 | 24.5 | 10 | 16 | 23 |

七、教学计划

1. 教学计划课程设置表

(1) 综合与通识教育

| 项目 | 必修 | | | | | 选修 | | | | |
|--------|---------|-------|-----|----|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 思想政治理论课 | 公共外语 | 计算机 | 军体 | 素质与基础技能 | 思想与政治类 | 人文与艺术类 | 经济与社会类 | 自然与科技类 | 海洋与生命类 |
| 最低应修学分 | 14 | 8 (x) | 1 | 6 | 6 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 |
| 合计 | 35 | | | | | 10 | | | | |

具体课程设置见综合与通识教育模块课程设置。

中华人民共和国国家版权局

计算机软件著作权登记证书

证书号： 软著登字第4170041号

软件名称： 风浪流水槽虚拟仿真实验系统
[简称： OWVLab MPMINPP]
V1.0

著作权人： 上海海洋大学;北京润尼尔网络科技有限公司

开发完成日期： 2019年04月12日

首次发表日期： 2019年04月15日

权利取得方式： 原始取得

权利范围： 全部权利

登记号： 2019SR0749284

根据《计算机软件保护条例》和《计算机软件著作权登记办法》的规定，经中国版权保护中心审核，对以上事项予以登记。



No. 04258611

2019年07月19日