

分层流实验室造波系统的设计与开发

牛 猛

中船重工 702 研究所东方海事, 上海 200011

[摘要] 分层流试验水池主要用于内波、旋涡尾迹机理与表现特征的研究。文中以中船重工 702 所分层流实验室造波设备系统为设计研究对象, 介绍了设备组成与设计特点, 对该套设备的在实际实验中的应用予以充分的考虑, 确保了设计的先进性。该系统配备内波造波装置, 将使该实验室具备水下航行体及海洋结构的环境内波载荷试验能力; 配备水面吹风装置以及微幅波造波系统, 将使该实验室具备风浪下航行体水面尾迹试验能力。

[关键词] 实验室; 内波造波; 微幅波造波; 尾迹试验

DOI: 10.33142/ec.v5i12.7293

中图分类号: TP3

文献标识码: A

Design and Development of Wave Making System in Stratified Flow Laboratory

NIU Meng

China Shipbuilding 702 Research Institute Dongfang Maritime, Shanghai, 200011, China

Abstract: The stratified flow test tank is mainly used to study the mechanism and performance characteristics of internal waves and vortex wakes. Taking the wave making equipment system of 702 Institute of CSIC as the design object, this paper introduces the composition and design characteristics of the equipment, fully considers the application of the equipment in actual experiments, and ensures the advancement of the design. The system is equipped with internal wave making device, which will enable the laboratory to have the environmental internal wave load test capability of underwater vehicles and ocean structures; Equipped with a surface wind blowing device and a micro amplitude wave making system, the laboratory will have the ability to test the wake of a vehicle on the surface under wind and waves.

Keywords: laboratory; internal wave making; micro amplitude wave making; wake test

船舶设备或潜航设备在海洋中航行, 时刻都要面对各种各样的波浪, 波浪是海洋中时刻都存在的自然现象, 海洋工程研究的主要对象就是要明确波浪对船舶的影响, 需要克服的阻力载荷^[1]等。所以对波浪的研究是海洋工程的重要研究领域, 同时也具有重大的现实意义。实验水池作为海洋工程研究的重要工具, 一直都是各大研究机构与海洋相关大学不可或缺的实验装备。但在实验室的环境下, 平静的水体与存在风浪的自然环境还是有很大差别的, 为了尽量模拟自然水体环境, 以期获得接近真实的实验数据, 造波设备又成为了实验水池的重要配置。

分层流试验水池主要用于内波/旋涡尾迹机理与表现特征的研究^[1]。目前, 分层流试验水池实验室功能主要如下: 模拟海洋密度跃变分层与连续分层; 静水中模型运动产生的内波尾迹试验; 分层海洋中航行体水动力试验。

本文章介绍的内容包括内波造波及消波装置、水面微幅波造波及消波装置、水面吹风装置。配备内波造波装置, 将使该实验室具备水下航行体及海洋结构的环境内波载荷试验能力; 配备水面吹风装置以及微幅波造波系统, 将使该实验室具备风浪下航行体水面尾迹试验能力。

1 系统组成和总体技术要求

分层流试验水池造波系统, 包括以下三个方面内容:

- (1) 内波造波及消波装置;
- (2) 水面微幅波造波及消波装置;
- (3) 水面风生波装置。

2 内波造波及消波装置

内波造波系统由两部分组成, 一部分用于兴造连续内波, 另一部分兴造内孤立波^[2]。两部分共用一套内波消波装置。

(1) 连续内波造波系统

连续内波采用摇板方式来造波, 其原理如图 2 所示, 通过改变板的高度、板的摆动幅度以及板的摇动频率来调节所造的内波波幅。

连续内波造波造波板中心位置升降依靠外部的升降机构来实现, 确保可以实现高度的连续可调, 造波板的高度分别准备 300mm, 450mm, 600mm 三种, 以适应不同的试

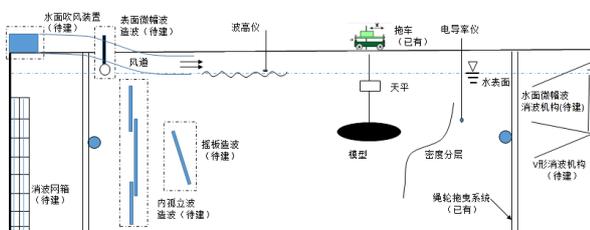


图 1 分层流水池总体示意图

验要求，造波板用不锈钢制作。

通过选用不同的造波频率和造波板可造多种波幅范围的内波。

在使用过程中为使操作安全可靠且尽量简单方便，造波系统和升降支架间采用便于拆装的结构，造波板的更换也使用便于拆装的设计。

考虑到造波速度较慢（0.01Hz-0.1Hz），且造波板转轴处是浸入水中的，因此采用了不锈钢轴承，既能满足使用需求，易于维护，且具有很好的耐腐蚀性。

造波机构的主框架采用80*40*4的316L不锈钢方管，确保足够的强度。

连续内波造波系统主要由升降机构、造波机构框架、偏心轮机构、传动机构、摆动机构及造波板组成。

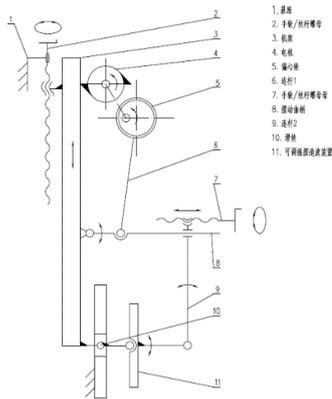


图2 连续内波造波系统原理图

系统性能指标：可造内波波幅范围在0.1cm-5cm。

设备指标：内波造波板摇动频率0.01Hz-0.1Hz，一周期内误差1s。

定义坐标系O-XYZ如下：X为水池长度方向，Y为水池宽度方向，Z为垂直方向向上为正，原点在水池池底。

摇板摇摆中心垂向可调^[3]，范围为：Zc=0.4m-0.8m，精度1mm；

摇板长度为2.80m，摇板高度范围h=0.3-0.6m，精度1mm；

摇板角度在0°到45°可调，试验前确定摇摆角度，调整精度为1°；摇板摆角随时间呈正弦曲线。

摇板中心轴距离水池首端为4.0m；

电机通过连杆机构、滑块与造波板相连，详见图3。

位移机构为手动操作，通过操作手轮带动丝杆螺母机构使机构上下移动，移动的范围为400mm。

转板摇动频率：范围为0.01Hz-0.1Hz，电机带动曲柄转动时，当每转动一圈，曲柄上下摇动一次，可通过控制电机的转速来确保摇板的摇动频率。

在电气控制系统中，由伺服电机、伺服驱动器、减速箱、电器控制箱（由PLC、显示屏及其它电气元器件等组成）、编码器等组成^[4-5]。

在曲柄的输出轴上安装编码器，可以记录实际的转速，在控制箱的显示屏上有设定电机转速的按钮，并在显示屏上显示。当电机运转时，如果PLC从编码器上采集的数据与设定的参数不一致时，伺服系统会自动修整至与设定的参数一致，满足控制机构频率的要求。

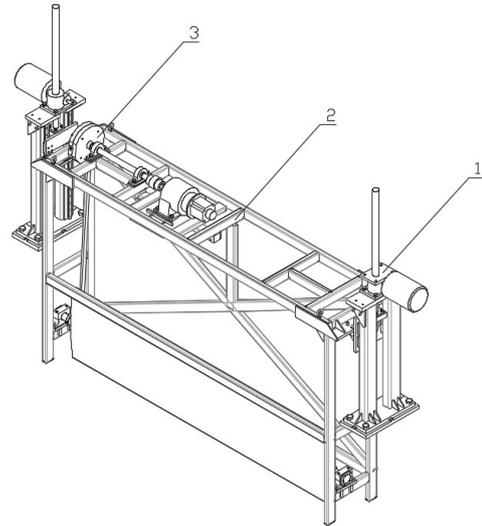


图3 连续内波造波系统示意图

(2) 内孤立波造波系统

内孤立波造波升降支采用直线导轨的方式。该系统造波闸门的移动范围比较大（0.8m），且平均速度较高（0.2m/s），为达到要求，本设计采用了双电动缸推动的方式，且采用一台PLC对两台电动缸驱动器同时发出控制指令，保证其同步性；因为闸门比较大（约2.8m*1.3m），因此重量较大，电动缸的负载大，在充分考虑了这些因素后对电动缸做出了选型，确保稳定可靠的使用。电动缸马达采用伺服电机，速度连续可调。为了能使用方便，当不需要使用时可把造波闸门和横梁拆除，也可以连同升降支架一起拆除，造波闸门还准备了专用的存放架。其主要由电动缸、造波闸门及闸门水封组成。

内孤立波造波采用抽板造波方法实现。闸门距离水池首端为4.5m，原理图如图4所示。

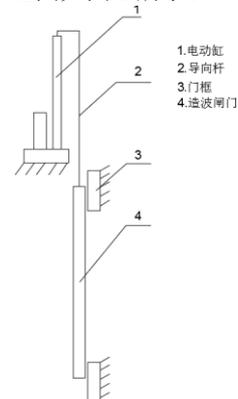


图4 内孤立波造波系统原理图

内孤立波造波系统组成：控制系统、闸门与滑轨等。
系统性能指标：可造内波波幅范围在 0.1cm-5cm。

整个闸门高度约 1.3m，闸门宽度为 2.8m。

密封时，闸门覆盖垂向位置为： $Z_c=0.2-1.0m$ ；

闸门垂向可移动范围最大为：0.8m；

闸门移动平均速度为：0.2m/s；

闸门主要框架采用 316L 不锈钢材料；闸门采用流线型，以减小垂向移动过程中产生流体不必要的扰动。

闸门运动的距离按工作要求设定为 300 至 800mm 多档。

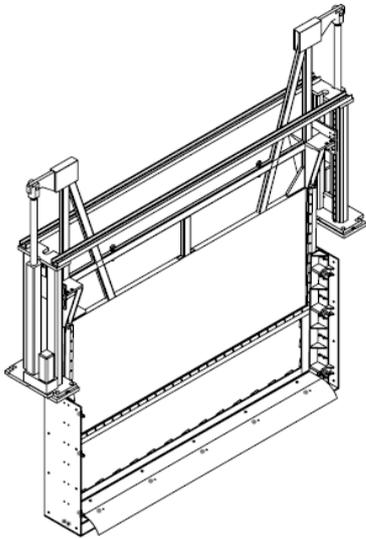


图 5 内孤立波造波系统示意图

(3) 内波消波装置

在水池尾端布置 V 形消波装置。由垂向位移模块和 V 形消波板组成，如图 6 所示。

V 形夹角在 $30^\circ-60^\circ$ 之间可调，精度为 1° ；

安装于水池尾端的垂直安装架上，中心高度可调节，调节范围在 $Z_c=0.4m-0.8m$ ，精度 1mm；

V 形板主体骨架采用 316L 不锈钢材料；

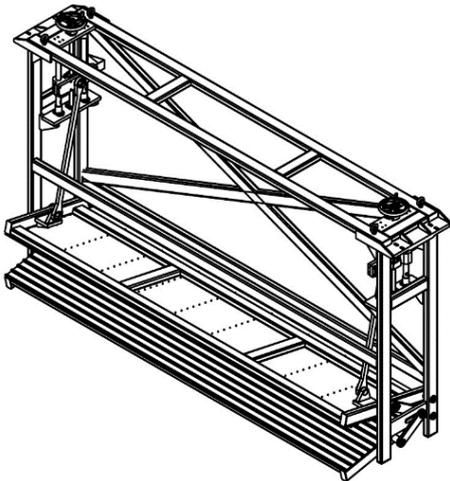


图 6 内波消波装置示意图

3 水面微幅波造波及消波系统

水面微幅波的工作原理如图 7 所示，圆柱的上下振荡由伺服电机通过凸轮带动传动杆实现，通过输入控制信号可精确控制圆柱的运动，通过控制圆柱的振荡频率以及调节圆柱的直径以生成不同幅值和周期的表面微幅波。

水面微幅波造波系统利用造波圆柱的上下运动，兴造水面微幅波，该系统与升降机构分体设计，以便于拆装，造波圆柱的震动幅度用偏心轮的不同偏心距来调节，偏心距可以从 0-10.0cm 连续可调。造波的频率依靠伺服马达控制。

造波圆柱的中心位置依靠外部的升降机构来实现，确保可以实现 0.6-1.2m 的连续可调，造波圆柱分别准备直径为 300mm、150mm、100mm、60mm、40mm 和 20mm 六种，以适应不同的试验要求。

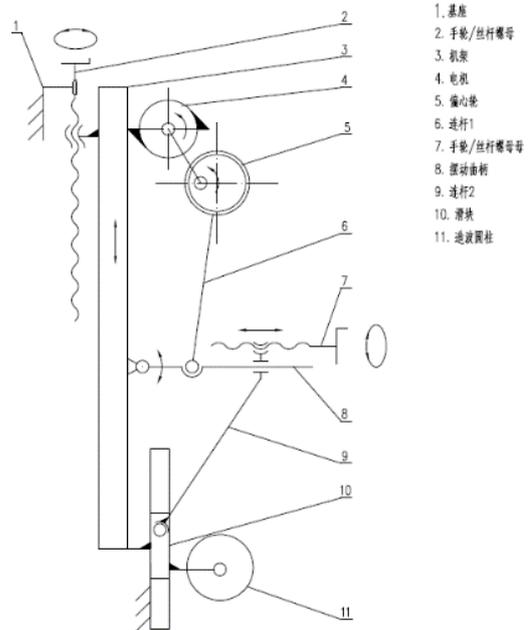


图 7 水面微幅波造波原理图

(1) 水面微幅波造波系统

水面微幅波造波装置由伺服电机、控制系统、可调转板转轴机构、滑块机构、曲柄连杆机构、基座、圆柱振荡机构组成。

圆柱垂荡中心位置范围为： $Z_c=0.6m-1.2m$ ，连续可调，精度 2mm；

振动幅度 $h=1.0-20.0cm$ ，连续可调，精度 1mm；

一组微幅波造波圆柱可置换，直径分别为 30、15、10、6、4、2cm。

垂向振荡机构距离水池首端为 4.5m。

水面微幅波波幅 0.1cm-5cm。

圆柱振荡频率为 1-5Hz。圆柱垂向振荡位移随时间呈正弦曲线。通过电机驱动连杆机构带动圆柱在水面附近上

下振荡，兴造出表面微幅波。

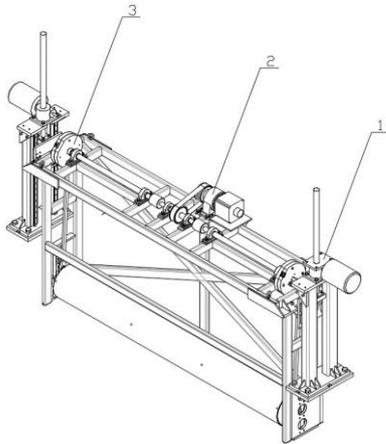


图8 水面微幅波造波示意图

(2) 表面微幅波消波装置

表面微幅波消波系统由基座、位置角度调整装置、消波板组成，如图9所示，图中尺寸均为示意。

消波斜板的角度在 15° – 30° 之间可调，精度 1° ；
消波斜板板面带锯齿条纹；

安装于水池尾端的垂直安装架上，其中心高度可调节，
调节范围在 $Z_c=0.6\text{m}$ – 1.2m ，精度 0.01m ；移动范围为 600mm 。

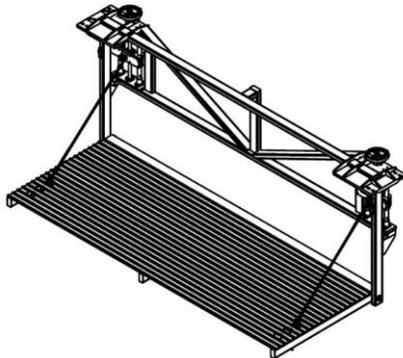


图9 水面微幅波消波系统

4 水面风生波装置

水面吹风装置由风机及控制系统、风道系统以及风速仪构成^[5-6]。

性能指标：出风口风速 $1\text{--}20\text{m/s}$ ，工作段距水池首端约 10m 处风速在 $1\text{--}7\text{m/s}$ 。

该装置对风道的密封性和流线性设计要求较高，需要让风均匀的吹到水面上。

配备3台轴流式风机，风机总风量不低于 $21000\text{m}^3/\text{h}$ ，风压不小于 300Pa 。出风口风速 $1\text{--}20\text{m/s}$ ，工作段风速在 $1\text{--}7\text{m/s}$ 。风机的尺寸能够满足在水池首端的布置，三台总长不超过 3m 。

配备变频调速器对风机进行调制，使得工作段处风速满足要求范围。

风道系统采用玻璃钢，做成可分段组装可拆卸式。

风机坐落在水池首端水池外，也可安装水池首端池壁上。风道从水池上方斜向下，最后转变成截面为矩形的风道，其宽度为 3.0m 。为消除风机出口处风流中周向速度分量，使截面风流场变得均匀，风道之中安装有导流格栅，导流格栅的位置在出口前方，尺寸与风道截面相同。风道在贴近水面时弯曲形成弧度，并与水面相切，同一位置的上风道面水平延伸，以形成水面上的均匀风流。当水位为 1.2m 时，水面距离风道盖板的高度为 0.3m 。

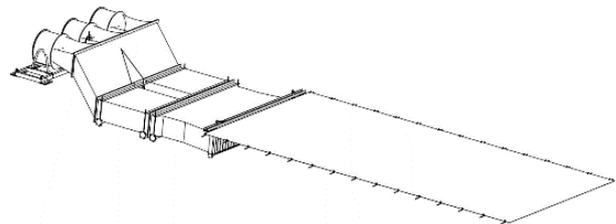


图10 造风系统

通过对造波需求的分析与研究^[6]，结合已有的实践经验，在原有的基础上进行了优化，做到了既能满足需求又可以提升效益，获得试验所得基础数据的重要工具，本文结合702所的分层流试验水池，对造波系统提出了自己的解决方案，也为今后此类设备的设计提供了新的思路，本设计采用了可调偏心轮机构，使设备结构更加紧凑合理，运行更可靠；采用电动缸的设计是一次很好的尝试，为日后此类设备的设计提供了新的思路。

[参考文献]

- [1]童寿龙,陈作钢.循环水槽船模阻力试验不确定度分析[J].中国舰船研究,2020,15(4):144-152.
 - [2]李海涛,唐啸宇,李梦如,等.基于潜堤地形上的波浪传播模拟[J].科技资讯,2017,15(19):197-201.
 - [3]容科专,丘翔,李振辉,等.一种机械式升降安全装置的设计的研究[J].科技创新导报,2020,17(16):98-100.
 - [4]陈俊,邢方亮,王磊,等.基于ethercat总线的推板式造波机控制系统[J].科技资讯,2020,18(23):18-21.
 - [5]蒋望梁,陈作钢.基于cfD的风洞及循环水槽设计系统程序开发[J].中国舰船研究,2020,15(2):42-48.
 - [6]姚顺,马宁,丁俊杰,等.规则波与流相互作用的数值模拟与不确定度分析[J].哈尔滨工程大学学报,2021,42(2):172-178.
- 作者简介：牛猛(1981-)，男，汉族，籍贯河北，工程师。主要从事实验水池造波系统的技术研究。