

基于改进遗传算法的波浪最大输出功率设计

李源清 李先军 谭敏

湖南科技大学

DOI: 10.12238/jpm.v4i8.6173

[摘要] 仅考虑浮子与振子的垂荡运动。通过对浮子和振子在初始平衡状态下进行分析, 解得平衡状态下浮子的浸水体积, 随后分析任意时刻浮子与振子的受力情况, 根据牛顿第二定律建立了浮子和振子的二阶微分方程组的运动模型, 并使用四阶龙格库塔方法, 计算出了浮子与振子在各个时刻的位移与速度的数值解, 最后形象的给出了浮子与振子的位移与速度曲线。

[关键词] 改进的遗传算法; 模型建立; 模型的求解

Design of wave maximum output power based on an improved genetic algorithm

Li Yuanqing, Li Xianjun, and Tan Min

Hunan University of Science and Technology 411100

[Abstract] Only consider the vertical swing movement of float and oscillator. By analyzing the float and oscillator in the initial equilibrium state, the solution to the balance of the water volume, then analyze the force of the float and oscillator at any moment, according to the Newton's second law of the float and the second order differential equation motion model, and the fourth order dragon library method, calculate the float and oscillator at each moment and the displacement of the numerical solution, gives the displacement and velocity curve of the float and the final image.

[Key words] improved genetic algorithm model building model solution

1. 前言

波浪能装置的能源转化效率是波浪能规模化利用的关键, 波浪能装置的能量输出装置是由弹簧和阻尼器构成。在波浪的作用下, 浮子与振子的相对运动驱动阻尼器做功从而转化为能量。我们希望建立数学模型, 分析波浪能装置的运动过程, 从而找出如何设置阻尼器系数来得到最大的能量输出。

2. 问题重述

仅考虑浮子与振子的垂荡运动。为寻求 PTO 系统的平均输出功率的最大, 建立了非线性的规划模型: 使得平均输出功率最大的垂荡优化模型, 在问题 1 的基础上, 以给定时间后 50% 的时间作为稳定的平均输出功率, 并以稳定的平均输出功率最大为目标函数, 约束条件为直线阻尼器的阻尼系数在给定的范围, 采用改进的遗传算法对该非线性规划问题在两种情形下进行求解。(1) 在阻尼系数为线性型的情况下, 其最大平均输出功率为 229.747W, 对应的线性阻尼系数为: $38249.5N \cdot s/m$; (2) 在阻尼系数为指数型的情况下, 其最大平均输出功率为: 230.627W, 对应的指数型阻尼系数的比例系数为: 97811.6, 幂指数为: 0.405859;

3. 模型假设

1. 假设中轴、底座、隔层及 PTO 的质量和各种摩擦可以忽略;
2. 假设初始时态浮子和振子在静水中处于静态平衡;
3. 假设海水为理想流体, 海水是不可压缩的;
4. 假设气象条件 (风速、风向、大气温度、降雨等) 的影响可以忽略;
5. 假设纵摇运动的浸没体积按照垂荡运动时的体积计算方式相同。

本文涉及符号对应的含义如下:

t : 时刻; m : 振子质量; M : 浮子质量; M_{plus} : 附加质量; g : 重力常数; L_s : 弹簧原长; H_1 : 圆锥高度; H_2 : 圆柱高度; ρ_{water} : 海水密度; $y_M(t)$: 浮子位移; $y_m(t)$: 振子位移; $\theta_M(t)$: 浮子角位移; $\theta_m(t)$: 振子角位移; J_M : 浮子转动惯量; J_{plus} : 附加转动惯量; λ_{ud} : 弹簧的弹力系数; λ_{rotate} : 弹簧的扭转系数; ω : 波浪激励力的频率; R : 圆锥与圆柱的半径; β_{ud} : 垂直直波阻尼系数; β_{rotate} : 纵摇兴波阻尼系数; H_0 : 隔板与水面的初始距离; α_{ud} : 直线阻尼器的阻尼系数; α_{rotate} : 旋

转阻尼器的阻尼系数; μ_{ud} : 直线阻尼器的阻尼系数; μ_{rotate} : 旋转阻尼器的阻尼系数; f_{ud} : 垂荡波浪激励力的振幅; f_{rotate} : 纵摇波浪激励力矩的振幅; $J_m(h)$: 振子在里转轴 h 处转动惯量; $V(h)$: 浮子高度为 h 时浸没水的体积; a : 直线阻尼器的阻尼系数的底数变量; b : 直线阻尼器的阻尼系数的指数变量。

4. 模型建立与模型求解

4.1 模型建立

在初始平衡状态下进行受力分析, 将浮子与振子看作一个整体, 此时浮子受到的浮力应等于浮子与振子的重力:

$$(M + m)g = F_{float}^M = \rho_{water} g V_0 \quad (1)$$

根据式 (1) 得到此时的排水体积为: $V_0 = \frac{M + m}{\rho_{water}}$,

排开水的体积等于圆锥的体积加上部分圆柱的体积, 设此时隔板距离水平面距离为 H_0 , 此时排开水的体积为:

$$V_0 = \frac{1}{3} \pi R^2 H_1 + \pi R^2 H_0 \quad (2)$$

由式 (1), (2) 得到初始状态下隔板距离水平面距离为:

$$H_0 = \frac{\frac{(M + m)}{\rho_{water}} - \frac{1}{3} \pi R^2 H_1}{\pi R^2} \quad (3)$$

对平衡状态下的振子进行受力分析, 振子受到的重力等于弹簧的弹力, 由胡克定律得:

$$mg = -\lambda_{ud}(L_0 - L_s) \quad (4)$$

由式 (4) 得平衡状态下弹簧的长度为:

$$L_0 = L_s - \frac{mg}{\lambda_{ud}} \quad (5)$$

以平衡状态下隔板的正中心为坐标原点, 垂直向上为正方向建立坐标轴, 在 t 时刻对振子进行受力分析, 设 t 时刻浮子与振子的位置分别为 $y_M(t)$, $y_m(t)$, 浮子与振子的速度分别为 $y'_m(t)$, $y'_M(t)$ 。假设此时弹簧被拉伸且浮子与振子的相对速度为正。此时振子受到重

力, 弹簧的弹力, 直线阻尼器的阻尼力

振子受到的重力大小为 mg , 方向垂直向下:

$$F_G^m = -mg \quad (6)$$

此时弹簧的长度为: $L_1 = y_m(t) - y_M(t)$

所以此时振子受到的弹力为:

$$F_{elastic}^m = -\lambda_{ud}(L_1 - L_s) \quad (7)$$

振子受到的直线阻尼器的阻尼力与浮子与振子的相对速度成正比, 方向与浮子相对于振子的速度方向一致, 所以此时振子受到阻尼器的阻尼力为:

$$F_{damp}^m = \alpha_{ud}(y'_M(t) - y'_m(t)) \quad (8)$$

其中阻尼系数计算如下:

$$\alpha_{ud} = \begin{cases} 10000 & \text{线性型} \\ 10000|y'_M(t) - y'_m(t)|^{0.5} & \text{指数型} \end{cases} \quad (9)$$

由式 (6)、(7)、(8) 得到振子受到的合力为:

$$F^m = F_G^m + F_{elastic}^m + F_{damp}^m \quad (10)$$

在 t 时刻对浮子进行受力分析。浮子受到自身重力, 弹簧弹力, 直线阻尼器的阻尼力, 波浪激励力, 兴波阻尼力, 浮力。

首先浮子受到自身的重力方向与正方向相反, 所以浮子受

到的重力为:

$$F_G^M = -Mg \quad (11)$$

浮子与振子受到弹簧的弹力和直线阻尼器的阻尼力大小相等, 方向相反, 所以由式 (7)、(8) 得到浮子受到弹簧的弹力与直线阻尼器的阻尼力为:

$$F_{elastic}^M = -F_{elastic}^m \quad (12)$$

$$F_{damp}^M = -F_{damp}^m \quad (13)$$

浮子受到波浪的激励力为:

$$F_{stimulate}^M = f_{ud} \cos(\omega t) \quad (14)$$

浮子受到的兴波阻尼力与浮子的速度方向相反, 所以浮子受到的兴波阻尼力为:

$$F_{wave}^M = -\beta_{ud} y'_M(t) \quad (15)$$

浮子受到来自海水的浮力为:

$$F_{float}^M = \rho_{water} g V(y_M(t)) \quad (16)$$

而排开水的体积与浮子的位置有关, 具体情形如图 1 所示:

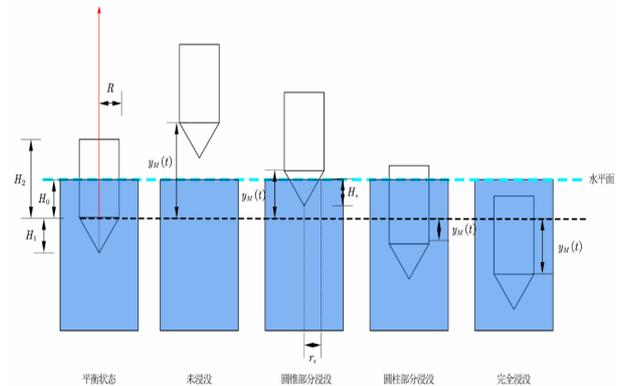


图 1 不同位置的浮子排水示意图

圆锥部分浸没的情况下, 设圆锥浸没深度为 H_s , 对应的圆锥底面半径为 r_s , 则: $H_s = y_M(t) - H_0$, 由相似三角形得: $\frac{r_s}{R} = \frac{H_s}{H_1}$, 所以 $r_s = \frac{R}{H_1} H_s$, 根据上图的集合关系可得到浮子的排水体积与浮子位置的关系式为:

$$V(y_M(t)) = \begin{cases} 0 & y_M(t) \geq (H_1 + H_0) \\ \frac{1}{3} \pi r_s^2 H_s & H_0 \leq y_M(t) \leq (H_1 + H_0) \\ \frac{1}{3} \pi R^2 H_1 + \pi R^2 (H_0 - y_M(t)) - (H_2 - H_0) \leq y_M(t) \leq H_0 & \\ \frac{1}{3} \pi R^2 H_1 + \pi R^2 H_2 & y_M(t) \leq -(H_2 - H_0) \end{cases} \quad (17)$$

由上式 (11)、(12)、(13)、(14)、(15)、(16)、(17) 得到浮子的合力为:

$$F^M = F_G^M + F_{elastic}^M + F_{damp}^M + F_{stimulate}^M + F_{wave}^M + F_{float}^M \quad (18)$$

由于浮子处于流体中, 当外力使浮子运动时, 浮子会带动周围海水一起运动, 使得周围海水也会产生一个与浮子相同的加速度, 这部分海水的质量称为虚拟质量 M_{plus} 。

由式 (10)、(18) 可以得到浮子与振子在垂直方向的合力, 在垂直方向上对浮子与振子分别使用牛顿第二定律:

$$\begin{cases} F_M = (M + M_{plus}) y''_M(t) \\ F_m = m y''_m(t) \end{cases} \quad (19)$$

在初始状态下, 浮子的位置为 0, 速度为 0, 振子的位置

为 L_0 , 速度为 0, 根据式 (19) 和初始状态可以建立的浮子与振子运动方程如式 (20) 所示:

$$\begin{cases} y_M''(t) = \frac{F_M}{(M + M_{plus})} \\ y_m''(t) = \frac{F_m}{m} \\ y_M(0) = 0, y_M'(0) = 0 \\ y_m(0) = L_0, y_m'(0) = 0 \end{cases}$$

4.2 模型求解

龙格库塔方法是求常微分方程数值解的常用算法, 分别计算两种阻尼系数下 150 秒内浮子与振子的位移与速度, 以及受到的作用力。

线性型阻尼系数对应的浮子与振子的垂荡位移与速度如表 1 所示:

表 1 线性型阻尼系数下浮子、振子的垂荡位移与速度

时间 (s)	浮子位移 (m)	振子位移 (m)	浮子速度 (m/s)	振子速度 (m/s)
10	-0.17775	-0.63472	0.0045026	-0.6865
20	-0.57551	-0.23514	-0.41554	-0.26552
40	0.29523	0.32258	0.50937	0.34415
60	-0.30635	-0.47465	-0.12061	-0.50999
100	-0.080209	-0.60187	0.12157	-0.64046

指数型阻尼系数对应的浮子与振子的垂荡位移与速度如表 2 所示:

表 2 阻尼系数为指数型的浮子、振子的垂荡位移与速度

时间 (s)	浮子位移 (m)	振子位移 (m)	浮子速度 (m/s)	振子速度 (m/s)
10	-0.19184	-0.6498	-0.017051	-0.6953
20	-0.59404	-0.25258	-0.43962	-0.27256

40	0.28217	0.30418	0.49729	0.32369
60	-0.31621	-0.48652	-0.13502	-0.5178
100	-0.083513	-0.60627	0.11339	-0.64598

5. 结语

通过对建模过程进行分析, 发现模型还有改进之处, 主要分为以下两个部分进行改进。

改进一: 考虑纵摇运动时对浮子的排水体积和只考虑垂荡的排水体积一致, 也就是计算排水体积没有考虑到浮子旋转的角度, 将浮子的位置与旋转的角度综合起来计算排水体积会更加准确。

改进二: 在计算浮子的力臂的时候我们采用的是用质心到旋转轴的距离与外力的外积, 这是一种近似计算, 实际上外力作用在浮子上的时候并不是作用在质心上, 而是作用于浮子的不同的位置。

[参考文献]

[1]杨彪, 柴明钢, 等. 振荡浮子式压电波浪换能节能装置[J]. 科教导刊: 2016(15):1.

[2]许逸. 波浪能发电系统输出功率优化研究[D]. 上海海洋大学.

[3]温彦生. 应有类比法讲授"刚体的转动"[J]. 包头医学院学报, 2000, 16(1):2.

[4]王永超, 朱力. 均质椭圆柱面刚体转动惯量的计算[J]. 大学物理, 2011, 30(6):3.

[5]郭吉坦. 复杂形体转动惯量计算方法的研究[J]. 大连交通大学学报, 2002, 23(1):1-3.

作者简介: 李源清, 2001.06.12, 男, 湖南娄底, 汉族, 在读本科, 湖南科技大学。