

# 波浪能最大输出功率设计

## 摘要

随着国家的不断发展，传统能源日益减少甚至短缺，新能源成为可持续发展的迫切需要。波浪能作为新能源，具有清洁，可再生等特点，成为发电的优选。波浪能装置可有效的将波浪能转换为其他能量。本文就装置浮子，振子运动特点以及装置的最大输出功率进行研究。

对于问题一，通过对波浪能装置的受力分析，建立了浮子垂荡的微分方程模型

$$(M+m+m_{add}) \frac{d^2x_1}{dt^2} + c_r \frac{dx_1}{dt} + k_1 x_1 + (M+m)g = f \cos(\omega t)$$

与振子垂荡的微分方程模型

$$m \frac{d^2x_2}{dt^2} = c \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k(x_1 - x_2) - mg。$$

利用所提供的参数，得到浮子和振子位移以及速度关于时间的关系。通过频率与周期的关系，得到在频率为  $1.4005 \text{ s}^{-1}$  时，40 个周期用时约 28.6s。分别根据条件（1）和条件（2）不同阻尼系数，得到两个条件下浮子和振子位移与速度在 40 个周期 0.2s 为间隔的值，见附件 result1-1.xlsx 和 result1-2.xlsx，并求出了在 10s, 20s, 40s, 60s, 100s 时的垂荡位移与速度，见表 1 与表 2。

对于问题二，浮子与振子的相对运动驱动阻尼器做功，可得 PT0 装置的平均输出功率为

$$P_m = \frac{\int_{200}^{220} (a|v_1-v_2|^b (v_1-v_2) v_2) dt}{20}。$$

求解该模型得到（1）中的阻尼系数在 [0,100000] 取值，最大输出功率为 6919.37w，相应的最优阻尼系数为 65000。当（2）中的比例系数在 [0,100000] 取值，幂指数在 [0,1] 取值时，最大输出功率为 8979.37w，最优比例系数为 79200，最优幂指数为 0.36。

对于问题三，首先对浮子与振子进行力和力矩分析，建立振子与浮子的纵摇和垂荡的方程模型为  $L \cos(\omega t) - k_2 \delta \theta = (I_1 + I_{add}) \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + c_w \frac{d\theta_1}{dt} + c_s \theta_1$  与  $k_2 \delta \theta = I_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2}$ 。利用所提供的参数，得到浮子和振子位移、速度、角位移、角速度关于时间的关系。通过频率与周期的关系，算出频率为  $1.7152 \text{ s}^{-1}$  时，40 个周期用时约 23.4s。带入不同时间求得两个条件下浮子和振子位移、速度、角位移、角速度在 40 个周期 0.2s 为间隔的值，见附件 result3.xlsx，且浮子与振子分别在 10s, 20s, 40s, 60s, 100s 时的垂荡位移与速度以及纵摇的角位移和角速度，见表 5.3。

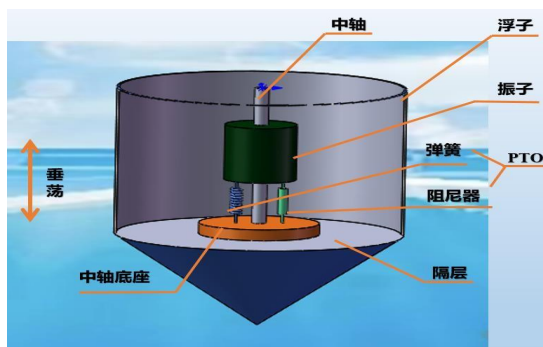
对于问题四，直线阻尼器的平均功率为  $P_m = \frac{\int_{200}^{220} (a(v_1-v_2) v_2) dt}{20}$  与旋转阻尼器的平均功率为  $P_n = \frac{\int_{200}^{220} (a(\frac{d\theta_1}{dt} \frac{d\theta_2}{dt}) \frac{d\theta_2}{dt}) dt}{20}$ 。求解上述模型，得到（1）直线阻尼器的最大输出功率为 8371.1w，相应的最优阻尼系数为 100000；（2）旋转阻尼器的最大输出功率为 5635.3w，相应的最优阻尼系数为 100000。

**关键词：**波浪能；微分方程模型；积分方程模型；最大平均功率

## 一、问题重述

人类不断发展与进步，面临的环境恶化与能源短缺的挑战不断加剧。可再生能源的发展成为世界努力的目标。波浪能作为新能源，具有可再生，分布广，储量大的特点，倍受各国的喜爱。波能装置的能量转换效率是决定波浪能规模利用的必要因素。

下面是波浪能装置示意图（图一），其构成为浮子、振子、中轴以及能量输出系统（PTO，包括弹簧和阻尼器），在波浪的作用下，浮子运动并带动振子运动（参见附 1 和附件 2），通过两者的相对运动驱动阻尼器做功，并将所做的功作为能量输出。

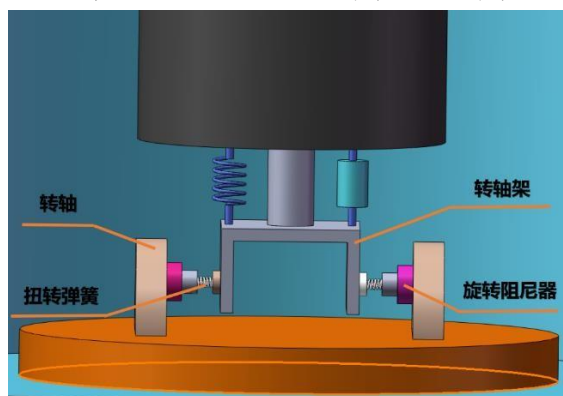


图一 波浪能装置示意图

问题一、考虑浮子在波浪中只做垂荡运动，建立浮子与振子的运动模型。初始时刻浮子和振子平衡于静水中，利用所提供的参数值，分别对以下两种情况计算浮子和振子在波浪激励力作用下前 40 个波浪周期内时间间隔为 0.2 s 的垂荡位移和速度：(1) 直线阻尼器的阻尼系数为 10000 N·s/m；(2) 直线阻尼器的阻尼系数与浮子和振子的相对速度的绝对值的幂成正比，其中比例系数取 10000，幂指数取 0.5。给出 10 s、20 s、40 s、60 s、100 s 时，浮子与振子的垂荡位移和速度。

问题二、仍考虑浮子在波浪中只做垂荡运动，分别对以下两种情况建立确定直线阻尼器的最优阻尼系数的数学模型，使得 PTO 系统的平均输出功率最大：(1) 阻尼系数为常量，阻尼系数在区间  $[0, 100000]$  内取值；(2) 阻尼系数与浮子和振子的相对速度的绝对值的幂成正比，比例系数在区间  $[0, 100000]$  内取值，幂指数在区间  $[0, 1]$  内取值。分别计算两种情况的最大输出功率及相应的最优阻尼系数。

问题三、考虑浮子只做垂荡和纵摇运动，建立浮子与振子的运动模型。初始时刻浮子和振子平衡于静水中，假定直线阻尼器和旋转阻尼器的阻尼系数均为常量，分别为 10000 N·s/m 和 1000 N·m·s，计算浮子与振子在波浪激励力和波浪激励力矩作用下前 40 个波浪周期内时间间隔为 0.2 s 的垂荡位移与速度和纵摇角位移与角速度。给出 10 s、20 s、40 s、60 s、100 s 时，浮子与振子的垂荡位移与速度和纵摇角位移与角速度。



图二 波浪能装置不同侧面的示意图

问题四、考虑浮子在波浪中只做垂荡和纵摇的情形，针对直线阻尼器和旋转阻尼器的阻尼系数均为常量的情况，建立确定直线阻尼器和旋转阻尼器最优阻尼系数的数学模型，直线阻尼器和旋转阻尼器的阻尼系数均在区间  $[0, 100000]$  内取值。计算最大输出功率及相应的最优阻尼系数。

## 二、问题分析

对于问题一，通过对物体的受力分析，海浪激励力使得浮子发生垂荡振动，浮子与振子的相对运动，使得弹簧发生形变，从而振子发生振动，根据牛顿第二定律，分析物体的运动状况，得出物体运动的微分方程，对于（1）中给定的阻尼参数，可得到解析的振子和浮子的波动方程，并画出函数图像，通过分析  $x-t$ ， $v-t$  的图像，可得每一时刻浮子和振子关于位移与速度的关系。（2）由于方程为非线性二阶微分方程组，采用数值解法近似得到波动方程的图像，从而估计出每个时刻所对应浮子与振子关于位移与速度的关系。

对于问题二，通过将振子对阻尼器做的功等效于电机的发电功率，可分析振动多个周期内，振子的平均功率，由于阻尼器的阻尼与弹簧对阻尼器施加的力是一对相互作用力，故可用阻尼与振子速度的乘积作为发电机的瞬时功率，再通过求积分平均值可得平均功率，再通过平均功率与阻尼系数的关系，求出平均功率最大时阻尼系数的取值。

对于问题三，通过对物体的力矩分析，海浪激励力矩使得浮子发生纵摇，浮子与振子的相对转动，使得弹簧发生扭转，从而振子发生纵摇振动，根据牛顿第二定律，分析物体的转动状况，得出物体运动的微分方程，通过带入固定的参数，可得到解析的振子和浮子关于波动方程，并画出函数图像，通过分析角位移-时间，角速度-时间图像，可得每一时刻浮子和振子关于角位移与角速度的关系。由于纵摇会使物体额外受到纵摇兴波阻尼，故垂荡方向浮子会在问题一（1）中额外多受到纵摇兴波阻尼，总而可根据（1）建立新的微分方程，并得到每一时刻关于位移与速度的关系。

对于问题四，由于总功率=直线阻尼器功率+旋转阻尼器功率。对于直线阻尼器，阻尼与弹簧对阻尼器施加的力是一对相互作用力，故可用阻尼与振子速度的乘积作为发电机的瞬时功率，再通过求积分平均值可得平均功率。对于旋转阻尼器，瞬时功率为旋转阻尼系数，角速度差和振子角速度乘积。通过求积分平均值得到直线阻尼器与旋转阻尼器的平均功率的最大值，得到此时对应的阻尼系数。

## 三、模型假设

- 1、装置放置位置海水足够深，装置与岩石无磕碰。
- 2、波浪对于装置的力传递效率无损失。
- 3、忽略中轴、底座、隔层及 PTO 的质量和各种摩擦。
- 4、装置在初始位置的速度为 0。
- 5、不考虑浮子，振子垂荡和纵摇的耦合现象。
- 6、将锥形浮子的转动惯量简化为柱形的转动惯量。

## 四、符号说明

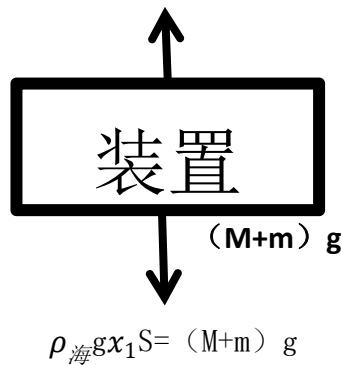
符号	说明	单位
$F_{浮}$	装置所受浮力	N
$F$	波浪激励力	N
$f$	垂荡激励振幅	N
$L$	波浪力力矩振幅	N
$F_b$	惯性附加力	N
$F_{f1}$	垂荡兴波阻尼力	N
$F_{弹}$	弹簧弹力	N
$f_1$	阻尼器的阻尼力	N
$M$	浮子质量	Kg
$m$	振子质量	Kg
$m_{add}$	垂荡附加质量	Kg
$\rho_{海}$	海水的密度	kg/m <sup>3</sup>
$g$	重力加速	m/s <sup>2</sup>
$x_1$	装置吃水深度	m
$x_2$	振子位移	m
$\Delta x$	弹簧压缩量	m
$R$	浮子底半径	m
$h$	浮子高度。	m
$R(t)$	振子与转动中心的距离	m
$S$	有效横截面积	m <sup>2</sup>
$t$	时间	s
$c$	阻尼器的阻尼系数	N • s/m
$c_w$	纵摇兴波阻尼系数	N • s/m
$c_r$	垂荡兴波阻尼系数	N • s/m
$\omega$	入射波浪频率	S <sup>-1</sup>
$k$	弹簧刚度	N/m
$M_k$	振子的作用力矩	N/m
$M_s$	静水恢复力矩	N/m
$M_w$	兴波阻尼力矩	N/m

$M_{海}$	波浪激励力矩	N/m
$c_s$	静水恢复力矩	N/m
$k_2$	扭转弹簧刚度	N/m
$\theta_1$	浮子角位移	Rad
$I_1$	浮子转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$I_{add}$	附加转动惯量	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$I_2$	振子的转动惯量。	$\text{kg} \cdot \text{m}^2$
$P$	功率	w
$P_m$	直线阻尼器功率	w
$P_n$	旋转阻尼器功率	w

## 五、模型的建立与求解

5.1 问题一：分别对以下两种情况计算浮子和振子在波浪激励力作用下前 40 个波浪周期内时间间隔为 0.2 s 的垂荡位移和速度给出 10 s、20 s、40 s、60 s、100 s 时，浮子与振子的垂荡位移和速度。

1、装置在运动的同时，还受到海水波辐射对浮子产生的作用力[1]，对波浪能装置进行受力分析，采用隔离法，分别分析浮子与振子的受力。可知在静水中装置受到的力为重力和浮力并且二力平衡[2]，物理模型如图。



图三

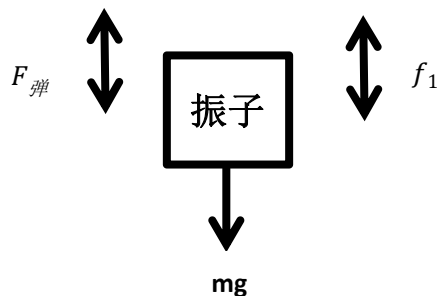
其中， $F_{浮}$  表示装置所受浮力； $M$  表示浮子质量； $m$  表示振子质量； $g$  表示重力加速度；

$\rho_{海}$  表示海水的密度； $x_1$  表示装置吃水深度； $S$  表示有效横截面积

2、在流动海水中，装置除受重力外和浮力外，还受到波浪激励力，附加惯性力，兴波阻尼力的作用。

其中  $F$  表示波浪激励力； $F_b$  表示惯性附加力； $F_{f1}$  表示垂荡兴波阻尼力

3、对振子进行受力分析，振子收到的作用力为：重力，弹簧弹力，阻尼力。受力分析如下：



图四

其中， $F_{弹}$  表示弹簧弹力； $f_1$  表示阻尼器的阻尼力。

4、由上述分析，初始位置时  $v_{20} = 0$ ；所以  $f_1 = cv_{20} = 0$ ，其中  $c$  表示阻尼器的阻尼系数； $v_{20}$  表示振子的初速度。可得弹力与振子重力平衡，即

$$mg = F_{弹}$$

此外，

$$mg = k\Delta x \quad (1)$$

其中  $k$  表示弹簧刚度； $\Delta x$  表示弹簧压缩量。

将附件 4.xlsx 的数据代入 (1-1)， $2433 \times 9.8 = 80000 \times \Delta x$ ，解得  $\Delta x = 0.298$

5、考虑图四中的受力分析，将波浪能装置看作一个系统，除辐射力之外，浮子海受到入射势，散射势产生的作用力，统称为波浪激励力[3]，以海平面与锥顶的接触点作为原点，重力反方向为  $x$  轴正方向，根据牛顿第二定律，可得浮子的运动模型为

$$F - F_b - (M+m)g - c_r \frac{dx_1}{dt} - k_1 x_1 = (M+m) \frac{d^2 x_1}{dt^2} \quad (2)$$

$$(M+m+m_{add}) \frac{d^2 x_1}{dt^2} + c_r \frac{dx_1}{dt} + k_1 x_1 + (M+m)g = f \cos(\omega t) \quad (3)$$

其中，

$$k_1 = \rho_{海} g S \quad (4)$$

与

$$S = \pi R^2 \quad (5)$$

其中  $f$  表示垂荡激励振幅； $\omega$  表示入射波浪频率； $t$  表示时间； $c_r$  表示垂荡兴波阻尼系数； $x_1$  表示浮子位移； $m_{add}$  表示垂荡附加质量； $R$  表示浮子底半径。

5、考虑图四中的受力，以振子底面圆心为原点，重力反方向为  $x$  轴正方向，根据牛顿第二定律可得，

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} = F_{弹} + f_1 - mg, \text{ 即}$$

$$m \frac{d^2 x_2}{dt^2} = c \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k (x_1 - x_2) - mg \quad (6)$$

其中  $c$  表示阻尼器阻尼系数； $x_2$  表示振子位移。

在问题一中 (1) 的条件下，因为直线阻尼器的阻尼系数为  $10000 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ ，波浪频率取  $1.4005 \text{ s}^{-1}$ ，所以  $c = 10000 \text{ N}\cdot\text{s/m}$ ，40 个周期的时间为  $T = (1/1.4005) \times 40 = 28.6 \text{ s}$ 。由 (3) — (6) 以及附件 3.xlsx，附件 4.xlsx 的数据。利用 Matlab 求得前 40 个周期时间

间隔为 0.2s 的浮子和振子的位移与速度（见 result1-1.xlsx）。将  $t=10, 20, 40, 60, 100$  分别带入  $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ ， $v_1(t)$ ， $v_2(t)$  中得到浮子与振子的位移与速度，见下表。

表 1.浮子与振子的位移与速度

	10s	20s	40s	60s	100s
浮子位移 (m)	-0.9685	-1.9232	-1.7113	-2.5473	-2.3816
浮子速度 (m/s)	-1.2392	-1.0366	-0.3408	-0.8108	-0.6241
振子位移 (m)	-1.1012	-2.1445	-1.9573	-2.8539	-2.6835
振子速度 (m/s)	-1.2900	-1.1176	-0.3849	-0.8859	-0.6676

在问题一中（2）的条件下，直线阻尼器的阻尼系数与浮子和振子的相对速度的绝对值的幂成正比，其中比例系数取 10000，幂指数取 0.5。此时  $c=10000 \times \left| \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right|^{0.5}$ ，根据式子（3）-（6）以及附件 3.xlsx，附件 4.xlsx 的数据。利用 Matlab 求得  $x_1(t)$ ， $x_2(t)$ ， $v_1(t)$ ， $v_2(t)$  数值解，见图 5—图 8。

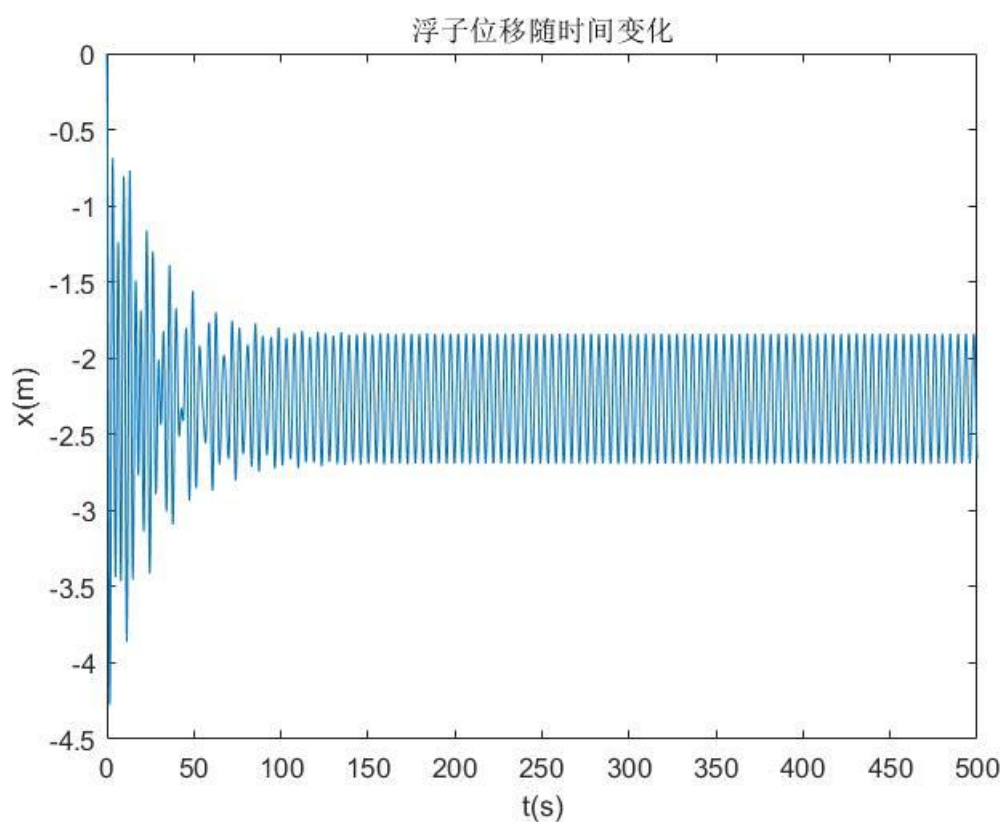


图 5

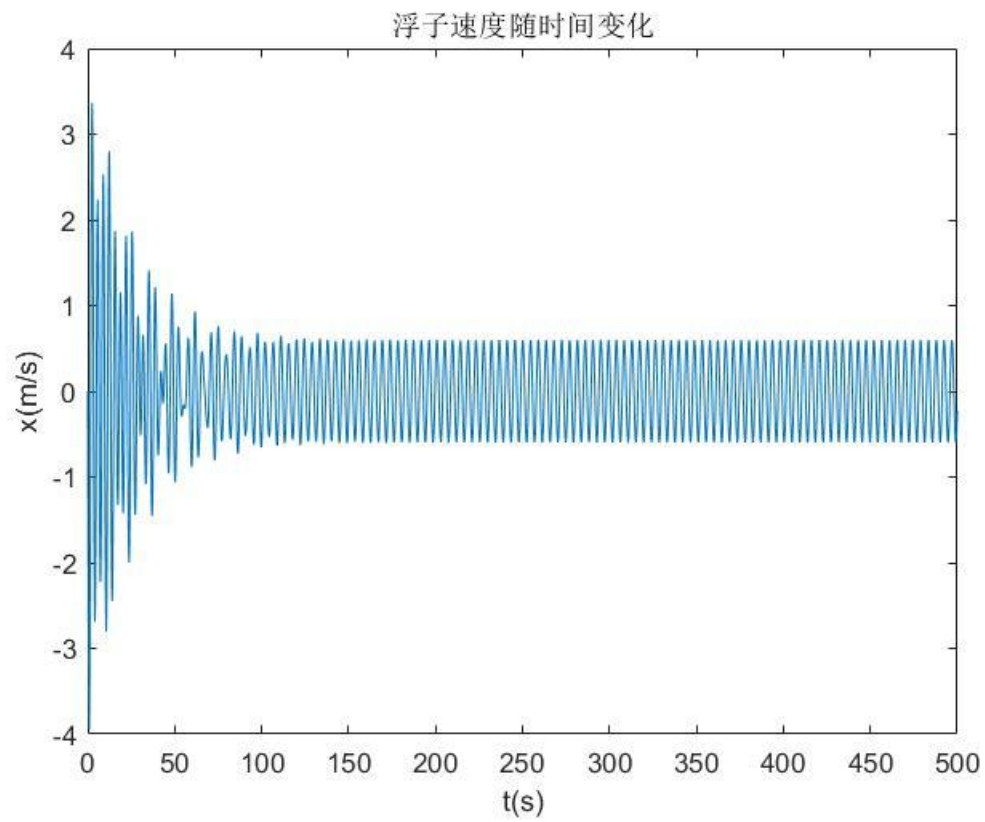


图 6

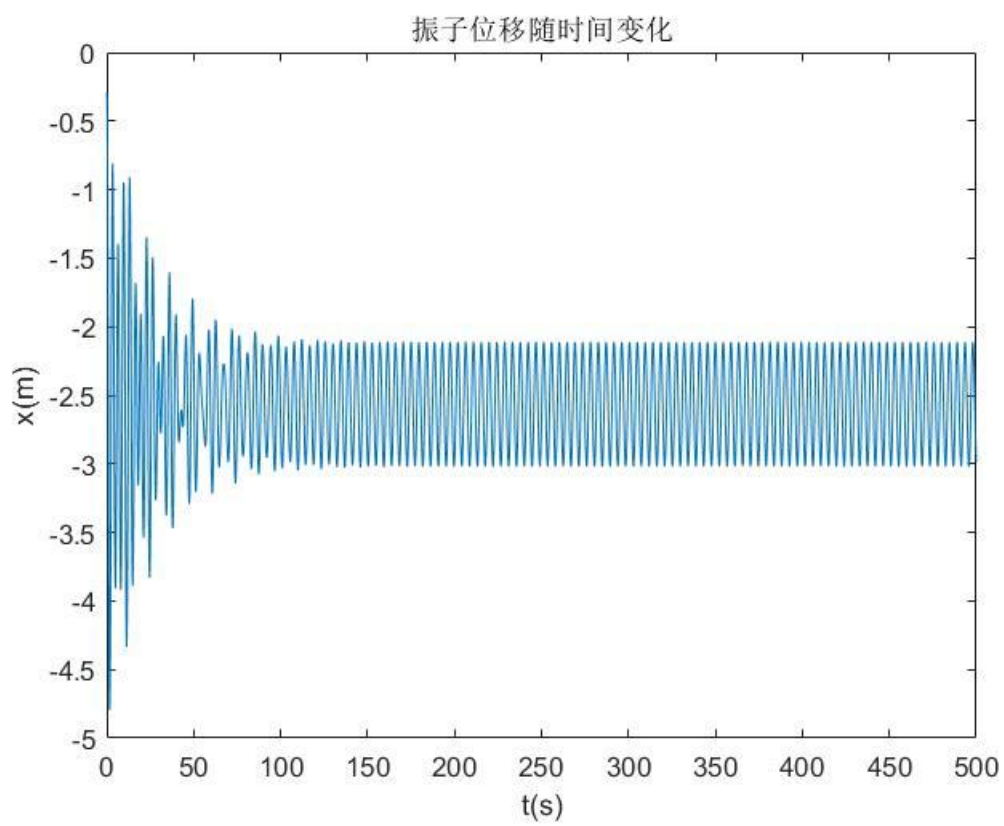


图 7



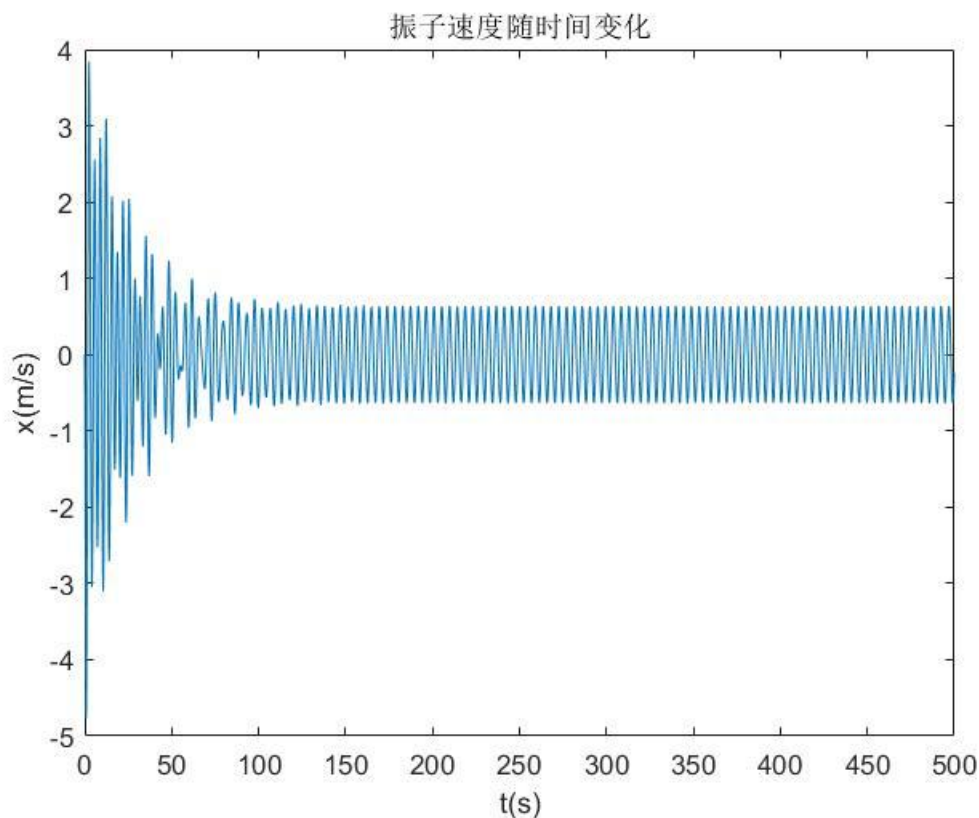


图 8

利用 Matlab 求得前 40 个周期时间间隔为 0.2s 的浮子和振子的位移与速度见附件 result1-2.xlsx。此外  $t=10, 20, 40, 60, 100$  浮子和振子的位移与速度见下表

表 2.浮子与振子的位移与速度

	10s	20s	40s	60s	100s
浮子位移 (m)	-2.707	-4.0126	-1.5858	-1.8305	-2.3754
浮子速度 (m/s)	-3.7836	1.7910	-2.5426	1.9740	-0.6268
振子位移 (m)	-3.0569	-4.5155	-1.7985	-2.0601	-2.6813
振子速度 (m/s)	-4.3849	1.9746	-2.8925	2.1618	-0.6701

5.2 问题二：振子功率为  $P=Fv_2$

其中的力为  $F=c(v_1-v_2)$

此外令  $c=a|v_1-v_2|^b$  (其中  $a \in [0,100000]$ ,  $b \in [0,1]$ )，进而

$$P=a|v_1-v_2|^b(v_1-v_2)v_2$$

由于  $v_1, v_2$  对于时间  $t$  的图像随时间的增加变为周期函数。取时间点 200s 和 220s，函数波形稳定，当这段时间的功率最大时，平均功率取最大值。

因此，PTO 装置的平均功率为

$$P_m = \frac{\int_{200}^{220} (a|v_1 - v_2|^b (v_1 - v_2) v_2) dt}{20}$$

根据等式（3）—（6）以及附件 3.xlsx，附件 4.xlsx 的数据，以  $(a, b, P) = (0, 0, 0)$  为原点建立直角坐标系，取  $a$  从 0 到 100000，步长为 1000，取  $b$  从 0 到 1，步长为 0.1，计算  $P(a, b)$ ，并绘制散点图。

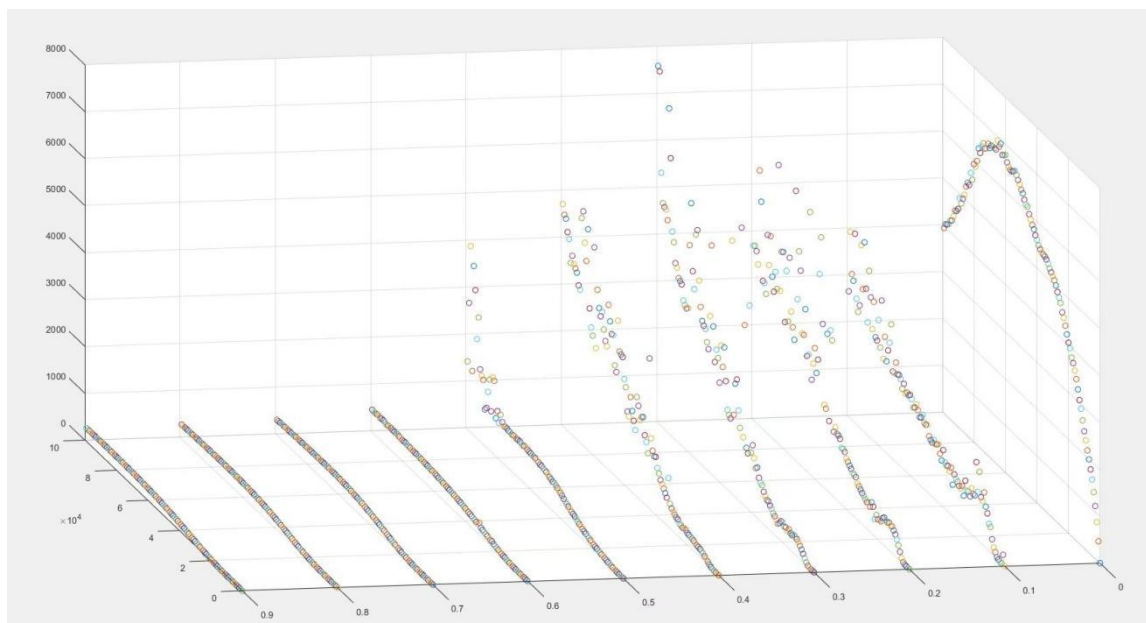


图 9. 功率与比例系数和幂指数的关系

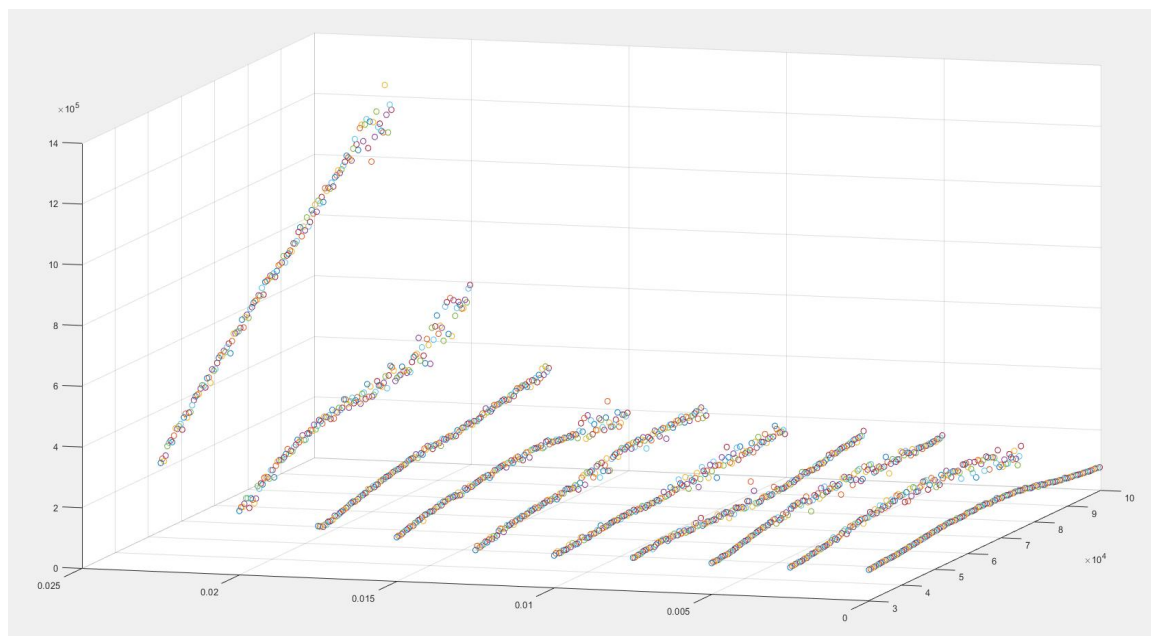


图 10. 功率与比例系数和幂指数的关系

由散点图可知， $b=0.025$  时不稳定，所以舍去。 $b=0.3$  时功率取值偏大，所以再取  $a$  从 0.2 到 0.4，步长为 0.02，得到散点图：

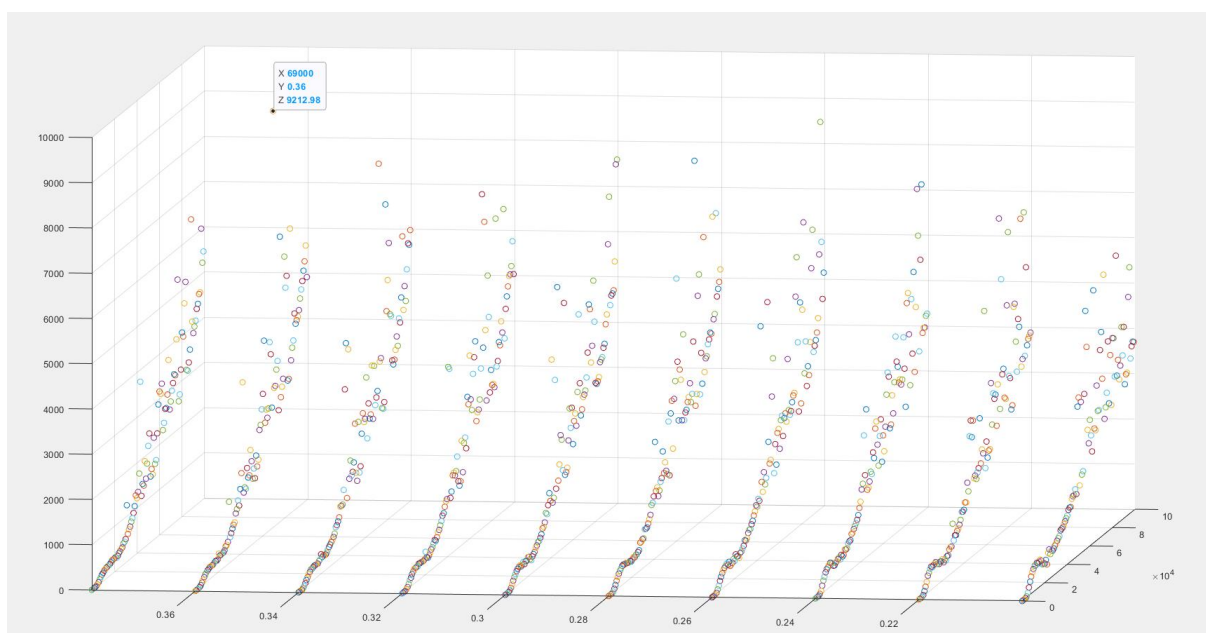
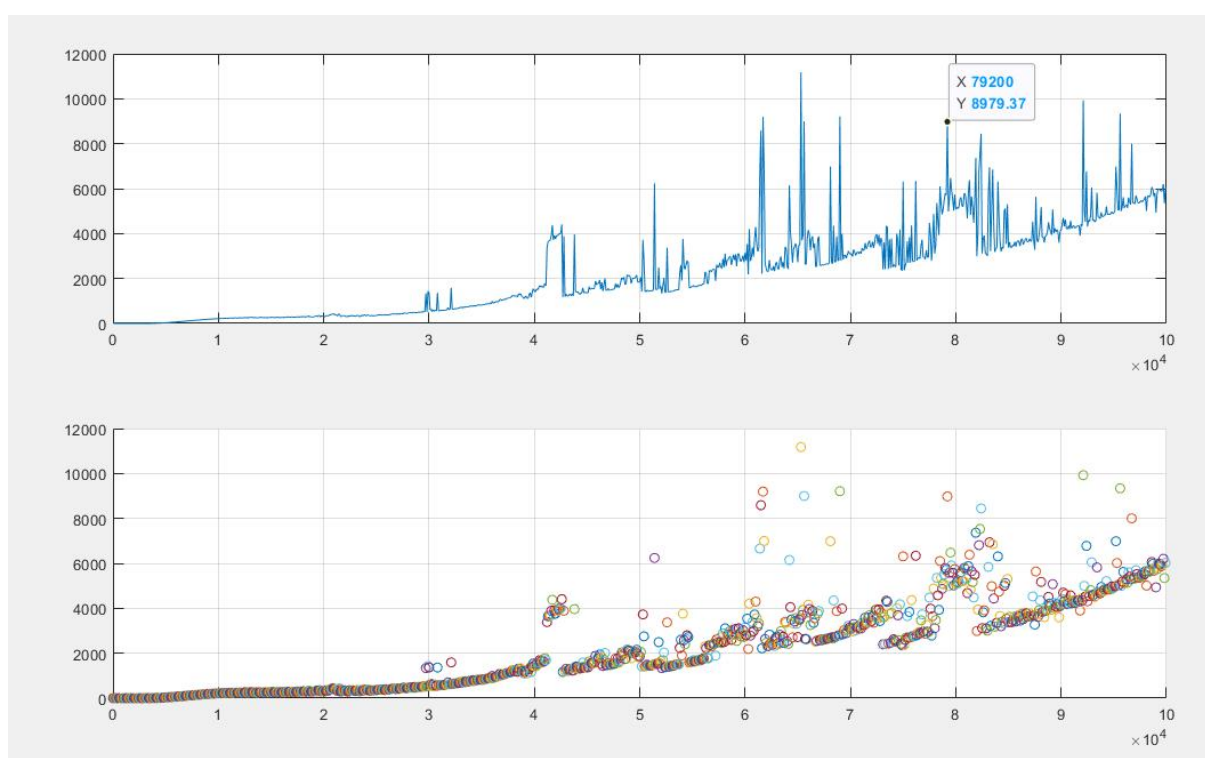


图 11. 功率与比例系数和幂指数的关系



因此利用 Matlab 求解为  $a=79200$ ,  $b=0.36$  时, 平均功率最大为  $8979.37w$ 。

当  $b=0$  时, 满足 (1) 所给条件, 考虑稳定性, Matlab 求得当  $a=65000$  时, 功率达到最大为  $6919.37w$ 。

### 5.3 问题三:

分析浮子的转动情况, 浮子受到的力为: 浮力, 重力, 波浪力, 兴波阻尼力, 静水

恢复力，振子的作用力，力矩分析如下图。

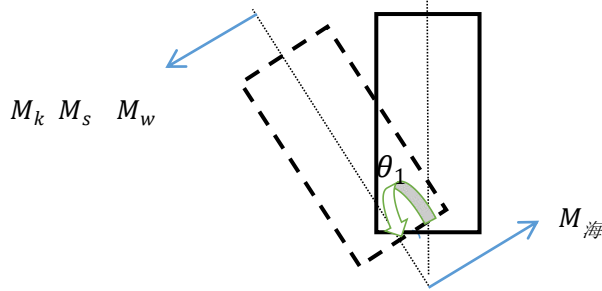


图 12.振子的力矩分析

由受力分析，得  $L \cos(\omega t) - k_2 \delta\theta = (I_1 + I_{add}) \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + c_w \frac{d\theta_1}{dt} + c_s \theta_1$

其中  $I_1 = \frac{1}{3} (M+m) h^2$

$M_k$ 表示振子的作用力矩， $M_s$ 表示静水恢复力矩， $M_w$ 表示兴波阻尼力矩， $M_海$ 表示波浪力矩， $L$ 表示波浪力力矩振幅， $k_2$ 表示扭转弹簧刚度， $\theta_1$ 表示浮子角位移， $I_1$ 表示浮子转动惯量， $I_{add}$ 表示附加转动惯量， $c_w$ 表示纵摇兴波阻尼系数， $c_s$ 表示静水恢复力矩， $h$ 表示浮子高度。

对于振子的转动而言，受到的力矩为浮子作用的力矩。

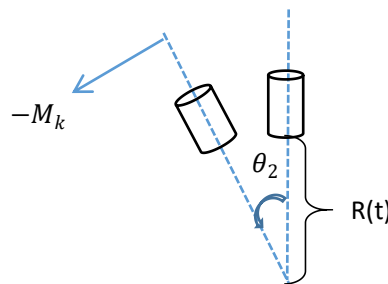


图 13.振子的力矩分析

由力矩分析，

$$k_2 \delta\theta = I_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2}$$

其中  $I_2 = m R^2(t)$

$$\delta\theta = \theta_1 - \theta_2$$

$$R(t) = 0.75 + x_2(t)$$

其中  $R(t)$ 表示振子与转动中心的距离， $I_2$ 表示振子的转动惯量。

因为波浪频率取  $1.7152 \text{ s}^{-1}$ ，所以 40 个周期为时间为  $\frac{1}{1.7152} \times 40 = 23.4 \text{ s}$ 。Matlab 求解浮子与振子在波浪激励力和波浪激励力矩作用下前 40 个波浪周期内时间间隔为 0.2 s 的垂荡位移与速度和纵摇角位移与角速度（结果存放在 result3.xlsx 中）。将  $t=10, 20, 40, 60, 100$  分别带入  $\theta_1(t)$ ， $\theta_2(t)$ ， $\omega_1(t)$ ， $\omega_2(t)$ 中得到浮子与振子的角位移与角速度，见下表

表 3.浮子与振子的角位移和角速度

	10s	20s	40s	60s	100s
浮子角位	0.00036	0.00198	-0.00325	0.00367	0.00192

移 (rad)					
浮子角速度 (rad/s)	$-3.17637 \times 10^{-22}$	$-1.0482 \times 10^{-20}$	$3.07050 \times 10^{-21}$	$3.17637 \times 10^{-22}$	$-2.64698 \times 10^{-22}$
振子角位移 (rad)	0.00115	-0.00087	-0.00331	0.00550	0.00260
振子角速度 (rad/s)	0.06232	0.062324	0.17012	0.25969	-0.37101

由于装置纵摇，装置在水中除问题一所受的力外，还受到因纵摇产生的静水恢复力，所以物理方程为：

$$(M+m+m_{\text{add}}) \frac{d^2 x_1}{dt^2} + (c_r + c_w) \frac{dx_1}{dt} + k_1 x_1 + (M+m)g = f \cos(\omega t)$$

$$\text{与 } m \frac{d^2 x_2}{dt^2} = c \left( \frac{dx_1}{dt} - \frac{dx_2}{dt} \right) + k(x_1 - x_2) - mg$$

因为直线阻尼器的阻尼系数为 10000 N·s/m，利用 Matlab 求得 40 个周期内 0.2 秒为间隔的浮子与振子位移与速度（结果见 result3.xlsx）。将 t=10, 20, 40, 60, 100 分别代入  $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 、 $v_1(t)$ 、 $v_2(t)$  中得到浮子与振子的位移与速度，见下表。

表 4.浮子和振子的位移与速度

	10s	20s	40s	60s	100s
浮子位移 (m)	-1.8275	-2.5605	-1.9876	-2.5129	-2.2606
浮子速度 (m/s)	-0.2198	-1.1252	0.5286	-0.7256	-0.8410
振子位移 (m)	-2.0608	-2.8686	-2.2682	-2.8249	-2.5474
振子速度 (m/s)	-0.2520	-1.2625	0.5851	-0.8020	-0.9191

#### 5.4 问题四：

不考虑振子垂荡和纵摇的耦合效应，此时的垂荡和纵摇运动互相独立，最大输出功率等于直线阻尼器最大输出功率与旋转阻尼器最大输出功率之和。即求解两类阻尼器的阻尼系数多少时可使平均输出功率最大。

##### 1、求解直线阻尼器的最大平均功率及其阻尼系数

由第二题可知，直线阻尼器的平均功率

$$P_m = \frac{\int_{200}^{220} (a(v_1 - v_2)v_2) dt}{20}$$

其中  $a \in [0, 100000]$ ，以  $(a, P_m) = (0, 0)$  为原点建立直角坐标系。取 a 从 0 到 100000 步长为 1000，得到图 12。

## 2、求解旋转阻尼器的最大平均功率及其阻尼系数

对于旋转阻尼器的功率， $P=a(\delta\theta)\theta_2$ ，所以旋转阻尼器的平均功率

$$P_n = \frac{\int_{200}^{220} (a \frac{d\theta_1}{dt} \frac{d\theta_2}{dt} \frac{d\theta_2}{dt}) dt}{20}$$

其中  $a \in [0, 100000]$ ，以  $(a, P_n) = (0, 0)$  为原点建立直角坐标系。取  $a$  从 0 到 100000 步长为 1000，得到图 12。

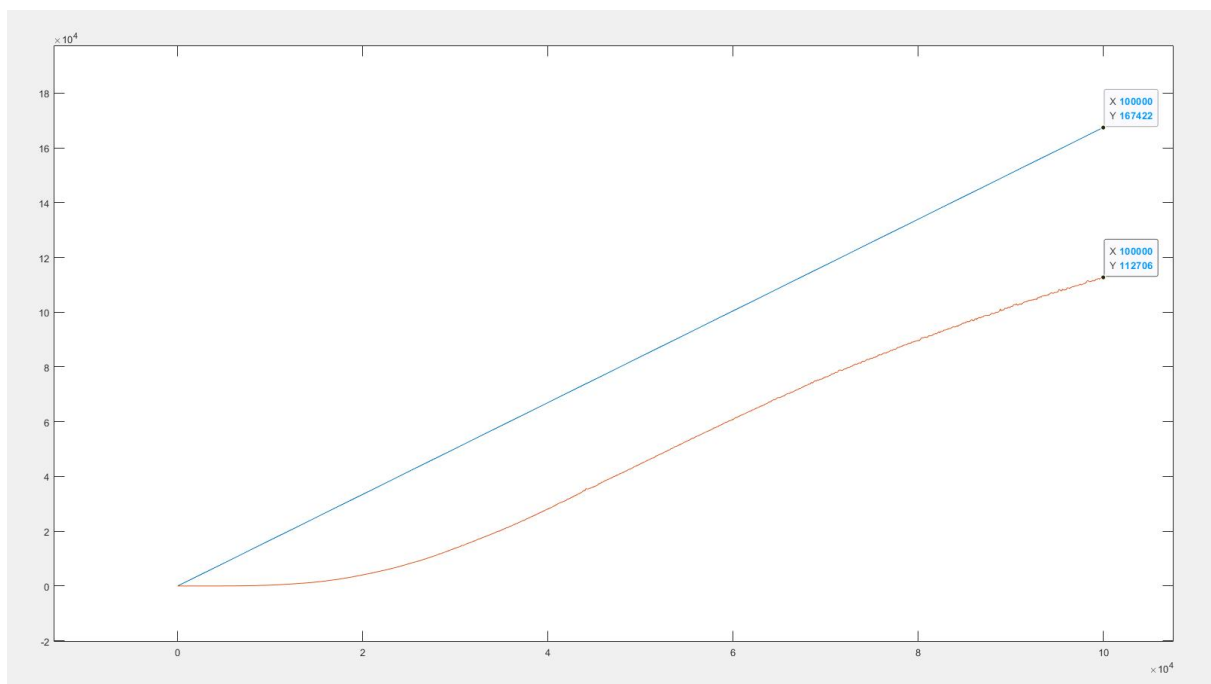


图 12. 平均功率与阻尼的关系

直线阻尼器的功率与旋转阻尼器的功率随阻尼系数的增加而增加，所以当直线阻尼器和旋转阻尼器的阻尼系数为 100000 时，功率最大，直线阻尼器的最大功率为 8371.1w，旋转阻尼器的最大功率为 5635.3。