

分类号: _____

密级: _____

UDC: _____

编号: _____

工学博士学位论文

振荡浮子式波浪能装置水动力特性

CFD 数值模拟

博士研究生: 国 威

指导教师: 张 亮 教授

学科、专业: 流体力学

哈尔滨工程大学

2016 年 10 月

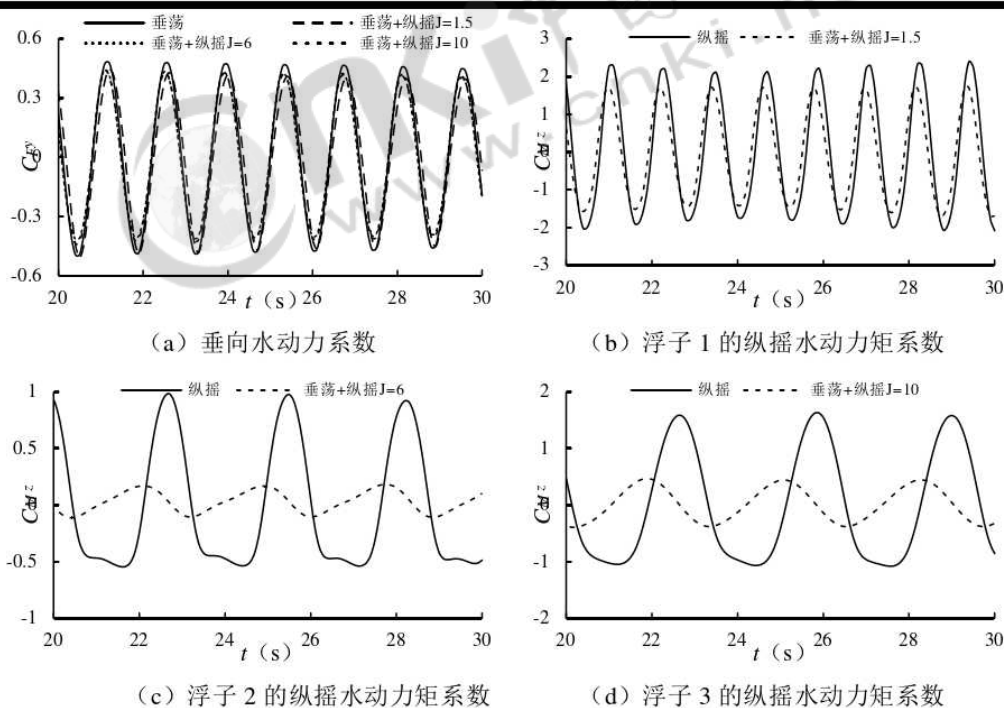


图 6.15 不同浮子的载荷曲线

Fig.6.15 The load curves of different buoys

从图 6.15 可以看出, 垂向水动力和纵摇水动力矩曲线的趋势基本与上图 6.14 中的运动趋势一致, 单自由度纵摇时的水动力矩较大, 浮子 2 和 3 的曲线在波谷处变化平缓, 这是由于单自由度运动时, 纵摇角幅值较大, 使浮子出现埋首现象, 即浮子纵摇时部分区域入水, 使水线面形状发生突变, 表现为曲线的波谷处变得平缓。

6.4.2 阻尼振荡

浮子的自由振荡规律说明了浮子在无 PTO 阻尼下运动的一些基本特性, 实际情况下为了进行能量的吸收, 浮子需要带动 PTO 对外做功, 即在有 PTO 阻尼的条件下的振荡, C_1 和 C_2 不为零, 取浮子的垂荡和纵摇固有周期作为给定波况, 并对固有周期下的最佳 PTO 阻尼系数, 如表 6.6 所示。

表 6.6 浮子的固有周期及最佳 PTO 阻尼系数

Table.6.6 The natural period and the optimal PTO damping coefficient of buoy				
浮子	垂荡固有周期 (s)	垂荡 PTO 最佳阻尼系数 (Ns/m)	纵摇固有周期 (s)	纵摇 PTO 最佳阻尼系数 (Nms)
1	1.4	500	1.2	2
2			2.8	7
3			3.2	8

6.4.2.1 浮子运动

图 6.16 (a) 为在垂荡共振周期 1.4s 下, 垂荡 PTO 阻尼系数为 500Ns/m 时单自由度垂荡与双自由度运动时的垂荡位移曲线, 图 b 为浮子 1 在波浪周期 1.2s, 最佳 PTO 阻尼系数 2Nms 下的单自由度纵摇和双自由度纵摇角时历曲线, 图 c 和 d 依次与表 6.6 对应。

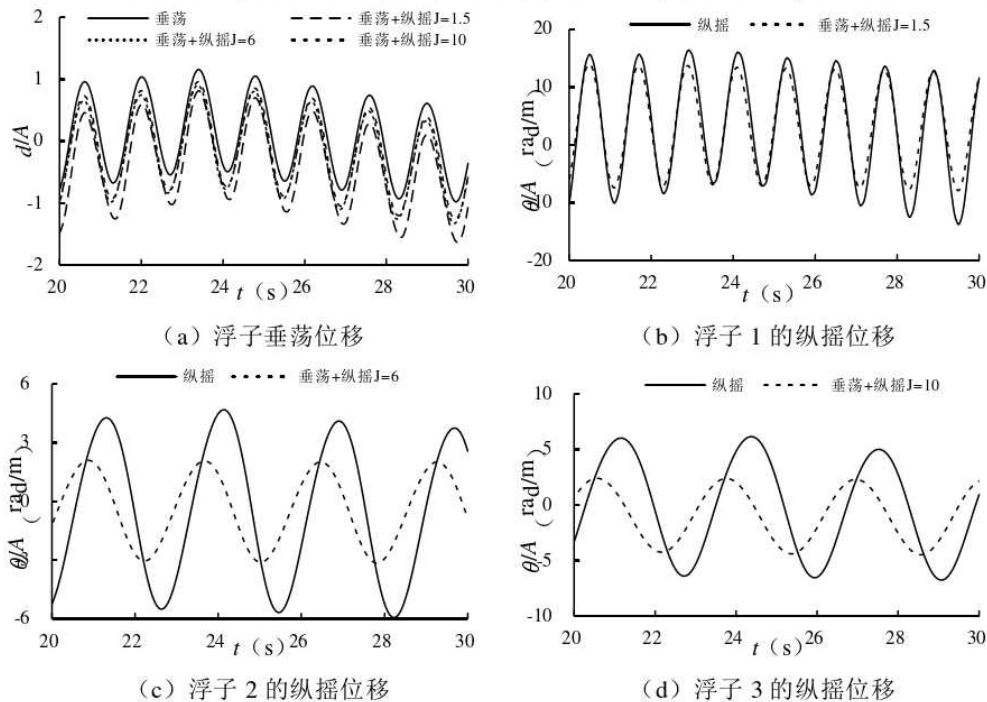


图 6.16 浮子的垂荡和纵摇位移曲线

Fig.6.16 The heave and pitch displacement curves of buoys

从图 6.16 中可以看出, 在有 PTO 阻尼后, 单自由度垂荡和双自由度时的垂荡幅值接近, 而单自由度纵摇角仍比双自由度时的纵摇角要大。

6.4.2.2 浮子水动力

在共振周期下,浮子在不同自由度下的水动力和水动力矩的变化规律如图 6.17 所示。

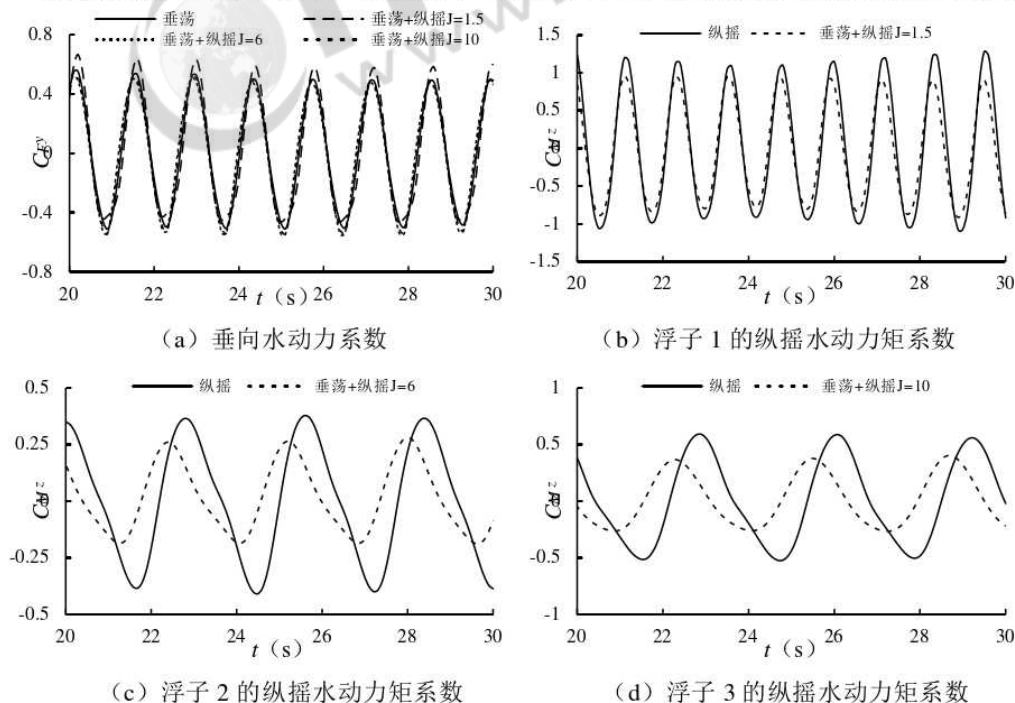


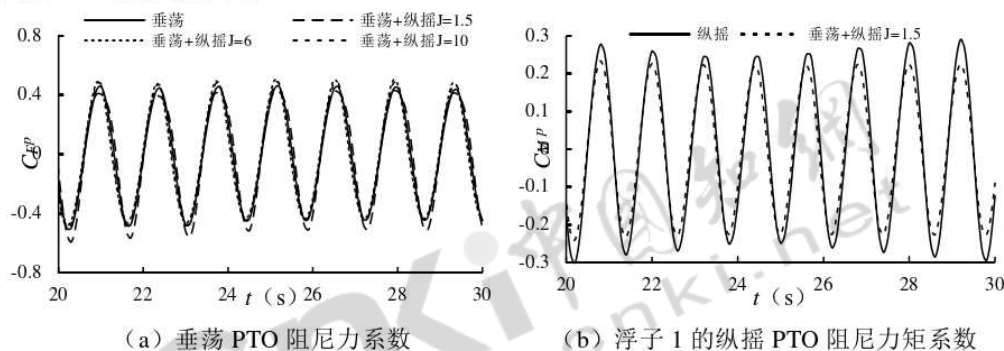
图 6.17 不同浮子的载荷曲线

Fig.6.17 The load curves of different buoys

图 a 中显示浮子的垂荡水动力曲线基本一致;图 b、c 和 d 显示单自由度纵摇时的水动力矩仍大于双自由度时的力矩。

6.4.2.3 PTO 阻尼力

浮子在有 PTO 阻尼力下运动时,阻尼力的大小对浮子的运动影响较大,图 6.18 为浮子的 PTO 阻尼力曲线。



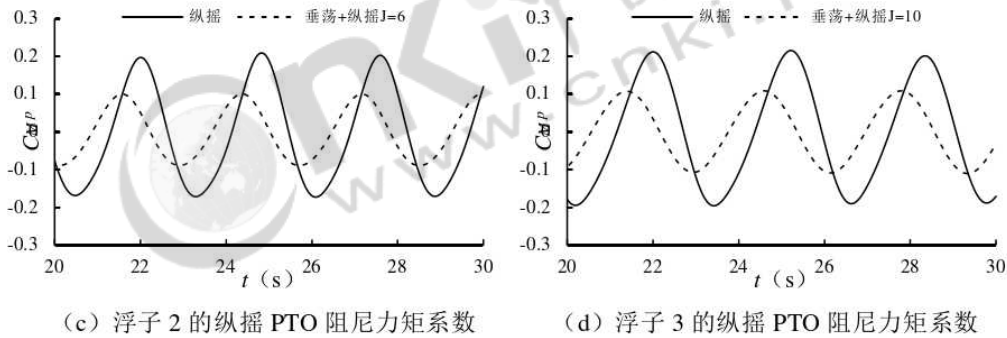


图 6.18 浮子的 PTO 阻尼力

Fig.6.18 The PTO damping forces of buoy

从图 6.18 中可以看出，在最佳阻尼系数下，单自由度和双自由度的垂荡 PTO 阻尼力相差不大；单自由度时的 PTO 阻尼力矩比双自由度时大。

6.4.2.4 俘获宽度比

前两节研究了共振时浮子的能量吸收性能，本节在前文基础上研究了共振和非共振时浮子的能量吸收性能。

(1) 共振条件

将三种浮子在不同自由度下的俘获宽度比进行对比分析，研究浮子单自由度和两自由度时的俘获宽度比，例如浮子 1 的垂荡固有周期为 1.4s，垂荡 PTO 最佳阻尼系数为 500Ns/m，纵摇固有周期为 1.2s，纵摇 PTO 最佳阻尼系数为 2Nms/rad。此时方案 1 为波浪周期 1.2s，浮子具有双自由度运动，其中垂荡方向的 PTO 阻尼系数为 500Ns/m，纵摇方向上的 PTO 阻尼系数为 2Nms/rad。方案 2 只需把方案 1 的波浪周期变为 1.4s。据此对六种方案下的浮子进行 CFD 模拟，如表 6.7 所示。

表 6.7 共振时的浮子垂荡和纵摇时的俘获宽度比

Table.6.7 The heave and pitch capture width ratios of buoy in resonant

方案	研究对象	波浪周期 (s)	垂荡加纵摇			仅有垂荡	仅有纵摇
			垂荡 η	纵摇 η	总 η	η	η
1	浮子 1	1.2	0.455	0.511	0.966		0.747
2		1.4	0.580	0.159	0.739	0.503	
3	浮子 2	1.4	0.533	0.061	0.594	0.503	
4		2.8	0.088	0.010	0.098		0.032
5	浮子 3	1.4	0.534	0.016	0.549	0.503	
6		3.2	0.065	0.011	0.075		0.039

通过方案 1 可以得出, 浮子 1 处于纵摇共振周期 1.2s 时, 浮子具有两个自由度时的俘获宽度比为 0.966, 较只有纵摇时的俘获宽度比 0.747 高。通过方案 2 可以得出, 浮子 1 处于垂荡共振周期 1.4s 时, 浮子具有两个自由度时的俘获宽度比为 0.739, 较只有垂荡时的俘获宽度比 0.503 时高。这说明浮子具有两个自由度时的总俘获宽度比要比单自由度时高。该规律在浮子 2 和 3 上也得到了验证。

将方案 2、3 和 5 对比可知, 浮子具有两个自由度时垂荡俘获宽度比比单自由度时高; 将方案 1、4 和 6 对比可知, 浮子具有两个自由度时纵摇俘获宽度比比单自由度时低。这说明两个自由度在能量吸收上可以相互影响。原因在于浮子处于不同自由度运动时, 浮子的运动姿态发生变化, 使其浸深和角度都会受到影响。例如, 浮子仅有垂荡时, 自身只有平动而无转动, 当有垂荡和纵摇两个自由度时, 浮子在垂荡的同时要有一定的转动, 直观上浮子的姿态更适应波面的变化, 会使周围流场产生变化, 使垂荡和纵摇相对应的附加质量(惯量)和粘性阻尼系数都发生改变, 进而影响能量吸收。

将三个浮子的垂荡固有周期和纵摇固有周期对比得出, 浮子 1 的垂荡固有周期与纵摇固有周期最接近, 俘获宽度比最高。表明对于具有两个自由度的浮子, 两个自由度的固有周期接近有利于能量的吸收。

(2) 非共振条件

前一小节研究了共振条件下三个浮子在不同自由度下的能量吸收性能, 本节将上述结论进行扩展, 将结论推广到一般情况。以浮子 1 为例, 选取非共振时的波浪周期, 垂荡和纵摇 PTO 阻尼系数与前文一致, 由于波浪周期的改变, 此时 PTO 阻尼系数不再是该波浪周期下的最佳阻尼系数, 即波浪周期和 PTO 阻尼系数都具有普遍性。为便于讨论, 将俘获宽度比分别记为 η_1 - η_6 , 如表 6.8 所示。

表 6.8 非共振时浮子垂荡和纵摇时的俘获宽度比

Table.6.8 The heave and pitch capture width ratios of buoy in non-resonant						
波浪周期 (s)	垂荡加纵摇			仅有垂荡	仅有纵摇	
	垂荡 η_1	纵摇 η_2	总 η_5	η_3	η_4	η_6
1.3	0.760	0.686	1.446	0.716	0.892	1.608
1.6	0.340	0.029	0.369	0.335	0.041	0.377
1.8	0.215	0.014	0.229	0.215	0.012	0.227
2.0	0.180	0.009	0.190	0.174	0.009	0.183

从表 6.8 中可以看出, $\eta_6 = \eta_3 + \eta_4$, η_6 可认为是垂荡和纵摇互不影响时的俘获宽度比; $\eta_5 < \eta_6$, 这说明浮子双自由度和单自由度时能量吸收并不是简单相加, 而是相互影响; $\eta_5 > \eta_3$, $\eta_5 > \eta_4$, 这说明浮子具有垂荡和纵摇两个自由度时的俘获宽度比比

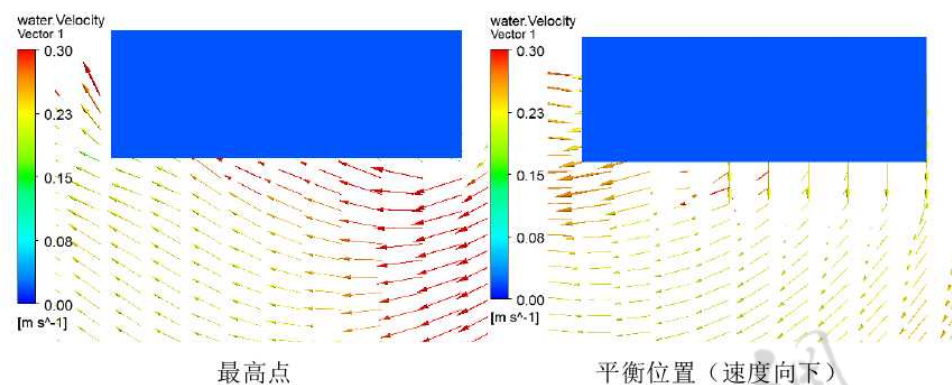
单自由度时大； $\eta_1 > \eta_3$ ，说明纵摇运动对垂荡俘获宽度比具有促进作用； $\eta_2 < \eta_4$ ，说明垂荡对纵摇俘获宽度比产生抑制。从表 6.7 中可以看出，浮子 1 在纵摇和垂荡共振周期下的总俘获宽度比分别为 0.966 和 0.739，小于表 6.8 中非共振周期 1.3s 时的俘获宽度比 1.446，通过观察可以发现，非共振周期 1.3s 位于浮子 1 纵摇共振周期 1.2s 和垂荡共振周期 1.4s 之间，这说明双自由度运动时处于共振周期点上的俘获宽度比不一定是最大值，理想的波浪周期应在两者之间。此外，当波浪周期逐渐远离共振周期时，即表 6.8 中的 1.8 和 2.0s，可以发现 $\eta_1 \approx \eta_3$ ， $\eta_2 \approx \eta_4$ ， $\eta_5 \approx \eta_6$ ，这说明波浪周期远离浮子共振周期时，垂荡和纵摇自由度的俘获宽度比相互影响减小，可看作独立的能量吸收。

6.4.2.5 浮子周围的流场

前文给出了浮子单自由度和双自由度时运动、受力和能量吸收上的差异，并从理论上阐述了产生差异的原因，为了更加直观全面地阐述不同自由度对浮子的影响机理，本节从速度场和涡量场的角度出发，对浮子处于典型位置处的流场进行分析，阐释影响浮子运动的本质原因。

(1) 浮子周围的速度场

速度场能够直观地反映浮子周围流体速度的大小和方向，以浮子 1 为例，取浮子处于最高点（位移最大，速度为零）和平衡位置处（位移为零，速度最大，方向向下）两个典型位置。浮子处于垂荡共振周期 1.4s 时，单自由度垂荡与双自由度运动时的速度场如图 6.19 所示。



(a) 浮子垂荡时的速度场

~ 笔记内容 ~