

摘要

海洋能源是地球上最大的能源储备，是不需要燃料的理想能源，是不污染环境的清洁能源，是可再生能源。利用海洋能发电既经济，又不占用土地，不受气候影响，也不污染环境，实为利用价值极高、潜力巨大的新能源，它将是未来新能源中相当重要的部分。我国拥有独特的海洋地理优势，是世界上潮流能蕴藏量最丰富的地区之一。因此，如何利用潮流能发电是急需解决的问题。

现已建成并通过验收鉴定的 70kw 潮流实验电站，采用漂浮式载体作为发电水轮机的工作载体。为了保证潮流实验电站在大多数海况下可以正常工作和恶劣海况下的安全，漂浮载体系泊系统的设计就尤为重要。40kW 座海底潮流实验电站也在建设中。本文首先根据船舶静力学的相关知识计算了 40kW 潮流电站的浮性和稳定性，提出了电站的安装和检修方案。然后基于三维频域势流理论，应用 SESAM 软件计算了 70kW 和 40kW 潮流电站在规则波中所受到的波浪力及其在波浪中的运动。两个潮流电站所受到的风力和流力根据 API 推荐公式和中国船级社海上单点系泊装置入级与建造规范中的公式计算，电站受到的波浪漂移力根据谱分析法计算。最后，根据发电船工作海域特点，基于锚泊系统静力分析和动力分析相关原理，对两个潮流电站分别提出了锚泊系统设计方案，并对这几种方案进行了安全校核和比较分析。通过计算可以发现，这几种方案都能满足安全要求。

关键词：潮流电站；稳定性；三维势流理论；谱分析法；锚泊系统

Abstract

Ocean energy is the richest energy on the earth. It is a kind of clean and reproducible energy. It has many advantages using ocean energy to generate electricity, such as economic, not occupying lands, not being influenced by the climate, not polluting environment. Ocean energy is a kind of new energy with high value and potential in use and will become a very important part in the future new energy. Our country has special ocean geographical advantages and is one of the areas that own vast tidal energy. So how to use tidal power to generate electricity is an urgent problem to deal with.

The 70kw tidal power station uses floating body as the carrier of the two turbines. In order to ensure the safety of the tidal power stations it is very important to get out some simple and reliable method to design the mooring system. The 40kw tidal power station which sits on seafloor is being built now. In this paper, the stability of the 40kw station is calculated according to hydrostatic theories and two schemes for installation and examination of the station are presented. Base on the 3-D potential theory, the motions and wave forces in regular waves of the two stations are calculated using the software SESAM. The wind and current forces are calculated according to the formula recommended by American Petroleum Institute and China Classification Society. The wave drift forces are calculated using spectrum analysis method. According to the characteristics of the working zone of the tidal power stations several mooring system design schemes are forwarded respectively for the 70kw and 40kw station. The calculation shows that each of the schemes can meet the demand of safety.

Key Words: tidal power station; stability; 3-D potential theory; spectrum analysis method; mooring system

哈尔滨工程大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：本论文的所有工作，是在导师的指导下，由作者本人独立完成的。有关观点、方法、数据和文献的引用已在文中指出，并与参考文献相对应。除文中已注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经公开发表的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者（签字）： 唐明珠

日期： 2010 年 3 月 7 日

第1章 绪论

1.1 研究背景

20世纪以来，对煤炭、石油、天然气等化石燃料的大规模开发和利用，一方面创造了人类历史上空前繁荣的物质文明，另一方面，也造成了大量的资源浪费和污染物、温室气体的排放。当前，作为常规能源的化石燃料的储量正在一天天减少，而空气污染、全球变暖、臭氧空洞等环境问题也在一天天严重。这种不可持续的发展模式已遭到很多国家的摒弃，开发新能源、研究新的节能技术，走可持续发展道路已成为社会各界的共识^[1]。20世纪70年代以来，世界各国越来越清楚地认识到世界上已知的非再生能源正在日益迅速地减少，而且很可能在可见的将来被用尽。针对这一严峻的情况，技术先进的国家开始注意可再生能源，海洋能作为一种取之不尽的可再生能源，越来越受到人们的重视。

21世纪将是海洋经济时代，浩瀚无垠的海洋是生命起源的摇篮，是资源和能源的宝库，也是人类实现可持续发展的重要基地。自古以来，凡是重视海洋的国家都成了当时的发达国家。当今世界，人类正面临着“全球人口不断膨胀，陆地资源和能源日趋严峻”的危机，于是都把发展的希望寄托于占地球表面积71%的海洋，都在重新估价海洋，坚定不移地向海洋进军。尤其是海洋能源是地球上最大的能源储备，是不需要燃料的理想能源，是不污染环境的清洁能源，是可再生能源。利用海洋能发电既经济，又不占用土地，不受气候影响，也不污染环境，实为利用价值极高、潜力巨大的新能源，它将是未来新能源中相当重要的部分。现在，越来越多的国家都把合理有序地开发利用海洋资源和能源、保护海洋环境作为求生存、求发展的基本国策。世界各国竞相研究如何利用蕴藏在深海中的多种资源和能源，竞相研究如何利用海洋高科技开发技术。一个开发利用和保护海洋资源和能源、攻克现代尖端技术——海洋高科技开发技术的世纪之潮已经兴起，从蓝色的海洋中索取应有尽有的资源和能源，使海洋资源和能源成为世界经济的新的增长点，

正成为时代的特征^[2-5]。

中国是人口众多的发展中国家，改革开放以来，中国的科学、技术以及经济发展取得了令世人瞩目的成绩，但我国东部和西部的发展很不均衡，城乡之间的差距也很大。中国有9亿多人口生活在农村，其中尚有1.2亿人口没用上电。能源短缺，特别是边远地区的能源短缺极为严重，在很大程度上阻碍了这些地方的经济和社会发展。从能源发展战略的高度来审视，中国必须寻求一条可持续发展的能源道路。江泽民主席在世界太阳能高峰会议上指出：一个能够持续发展的社会应该是一个既能满足社会经济发展要求，而又不危及后代人前途的社会。因此，节约能源，提高能源利用率，尽可能多地用洁净能源替代矿物燃料，是中国能源建设的一条很重要的原则^[6]。由此可见，中国开发利用海洋能具有其特殊而深远的意义。

本文的工作是国家“十五”863计划项目“漂浮式潮流能独立发电系统研究”和“40kW座海底式潮流能独立发电系统研究”工作的一部分。

1.2 潮流能利用的技术现状

1.2.1 潮流能简介

一望无际的大海，不仅为人类提供航运、水产和丰富的矿藏，而且还蕴藏着巨大的能量。全世界理论上可再生的海洋能总量为766亿千瓦，技术允许利用功率64亿千瓦，约为目前世界发电机容量的一倍^[7-9]。

海洋能通常是指海洋中蕴藏的可再生能源，主要包括海浪能、潮汐能、海流能、潮流能、温差能、盐差能等。据世界能源委员会统计，全世界仅沿海地带便于开发的波浪能就有20亿千瓦，沿岸和近海区的潮汐能17亿千瓦。潮汐能和波浪能利用技术，已趋于成熟，达到或接近商品化阶段^[10]。

本论文的研究对象是潮流实验电站，在此着重介绍潮流能。潮流能划归新能源范畴，属海洋能一支。潮流能与潮汐能生成一样，渊源均来自月球和太阳的吸潮力。据科学估计：全球的潮流能和潮汐能至少有30-40亿千瓦。潮流能使地球表面海水产生周期性流动，富贮动能。潮流能一般蕴藏在大陆洲的近岸浅海、海峡、海湾和河口一带，其海域特点、盐密度差异显著。岛屿列礁的生成带潮流能资源特别丰富。潮流运动在海面运动，有其一定的长

度、宽度、深度和流速，并沿着固定的路线进行。在深海区域，潮流很难与海流区分，而潮流能的利用比起海流能来更直观、简便、效益高、投资小^[11]。

潮流发电与常规发电相比较有以下特点^[12]：

(1) 能量密度低，但总蕴藏量大，可以再生。潮流的流速最大值在我国约为4.0m/s，相当水力发电的水头仅0.05m，故能量转换装置的尺度要大。

(2) 能量随时间、空间变化，但有规律可循，可以提前预报。潮流能是因地而异的，有的地方流速大，有的地方流速小，同一地点表、中、底层的流速也不相同。由于潮流流速流向变化使潮流发电输出功率存在不稳性和不连续性。但潮流的地理分布变化可以通过海洋调查研究掌握其规律，目前国内外海洋科学的研究已能对潮流流速做出准确的预报。

(3) 开发环境严酷、投资大、单位装机造价高，但不污染环境、不用农田、不需迁移人口。

1.2.2 国外潮流能利用的发展现状

国际上对潮流发电研究较多的是美国和日本，他们分别于70年代初和70年代末开始研究佛罗里达海流和黑潮海流的开发利用。各国海潮流发电的研究提出的开发方式主要有^[12]：

- (1) 与河川水力发电相类似的管道型海底固定式螺旋桨水轮机。
- (2) 与传统水平轴风力机类似的锚系式螺旋桨水轮机。
- (3) 与垂直轴风力机类似的立轴螺旋桨水轮机。
- (4) 与风速计类似的萨涡纽斯转子。
- (5) 漂流伞式。
- (6) 与磁流体发电相类似的海流电磁发电。

此外，英国、韩国等国家也正在计划进行大规模电站的论证和准备。但除了潮汐发电外，国外的波浪能、潮流能也处在试验示范阶段，尚不具备规模开发的条件^[13]。

1.2.3 我国潮流能资源和开发利用情况

我国海域辽阔，一望无垠。北从中朝边境的鸭绿江口直奔朝鲜海峡，南至赤道沿线的南沙群岛直插曾母暗沙。包括渤海、黄海、东海和南海四大海区。其延伸，归并于太平洋水系。独特的海洋地理优势，是世界上潮流能蕴

藏量最丰富的地区之一。据现有技术开发条件,我国潮流能有 3000 万千瓦(包括海深地带洋流复合层中水能资源)。若全部利用可发电 360 亿度,相当于浙江省 100 座新安江水电站和 100 座富春江水电站全年发电量的总和。

我国江河众多,万里浩淼。长江、黄河、珠江、黑龙江四大主流及众多支流每年向大海倾注淡水 2-3 亿立方米,造成潮流水体处于永不停息的运动之中,不断发生自然能。其中闻名海内外的钱塘江大潮,最大潮差 8.9 米,同时也是杭州湾水域潮流能最大峰点,推潮助波,潮流加剧水速加大,周边地带成为亚太地区西海岸最大的潮流能富藏基地和活动场所,这在全球也是得天独厚的。

我国海岛遍布,珠玑碧玉,全国海面有 5000 多座岛屿和不尽其数的石礁,相当一部分散落在盐水系级差分界的交汇处,成为分割盐度差的天然屏障,梯度标志。由于海岛参与,加之潮汐不断拍打,促使稳定盐分大洋在海岛地带分成阶梯形盐度差水带。尤其在我国的舟山地区,岛屿效应格外明显,潮流发育迅猛,在世界七大洲四大洋中实属罕见,属全球第一。

我国专业单位正规的潮流发电试验研究自 1981 年于哈尔滨船舶工程学院开始,他们采用漂浮系泊式立轴自调直叶水轮机方案,经过“六五”至“八五”期间的研究,已经取得较大的进步。

“八五”期间,由哈尔滨工程大学承担的国家科技攻关项目“10kw 潮流实验电站”,于 1997 年 5 月完成技术设计方案,并通过专家审定。该装置具有结果简单,启动流速低、启动力矩大等特点^[14]。“九五”期间,由哈尔滨工程大学承担的国家重点科技攻关项目“70kw 潮流实验电站”于 2002 年初在舟山市岱山县官山附近海域建成,并通过专家的验收和鉴定,这是目前亚洲第一座漂浮式潮流实验电站,总体技术达到世界先进水平^[15]。

1.3 锚泊系统设计计算的研究现状

1.3.1 国外研究现状

首先进行的是船模实验研究。鮫岛^[17]等人于 1960 年在风洞水槽里以三岛型船(船模长 1 米)为对象进行了单锚泊的船模型试验。弄清了强风作用下船舶偏荡运动情况、船体偏荡和锚链所受冲击力的关系等。另外,还明确

了加大吃水、调成平吃水甚至首倾，加重单位长度锚链重量，在锚链上垂吊重物等对抑制偏荡和减轻锚链的冲击力是有效的。

米田^[18]等 1960 年使用同样船模进行了制荡锚及双锚泊的模型实验。得出结论是：在风速不太大的情况下制荡锚具有某种程度的抑制偏荡的效果。另外，还弄清了就双锚而言，在两锚链夹角较小的情况下，两舷锚链上交互作用着与单锚泊情况大小差不多的冲击载荷；然而，两舷夹角为 50°~55°，则几乎不产生偏荡；即使锚链夹角为 50°~55° 以上，当风向偏出锚链线外 90° 时，该偏角的增大就会再次产生偏荡；而且，在此情况下，锚链所受冲击载荷反而比单锚泊的情况更要大。根据米田等 1982 年进行的模型实验，上述结果又进一步地得到了验证。

1976 年 MIT 的 Per. I. Johansson^[19]在其博士论文中建立了有限元模型对锚链的动力响应进行了数值分析。考虑到与阻尼有关的速度，偏离平衡位置的位移以及锚链张力的突变，该模型是非线性模型。在时域中对该模型进行求解，其结果可以用来分析瞬时情况。作为 Newmark 所做工作的拓展，提出了一个新的用于耦合运动方程数值积分的方法。该论文研究的外力激励模式仅限于锚链一端（固定于系泊漂浮物的一端）受到被迫运动。

Jason I. Gobat 和 Mark A. Grosenbaug^[20]提出了计算由于悬链线型锚链上端受到垂向运动而引起的动张力的经验模型。该模型适用于海洋波频作用力，计算了锚链张力的标准方差，其中锚链张力表示为与垂荡运动加速度成比例的惯性项和与垂荡速度成比例的阻尼项之和。应用数值模拟，该模型表明了惯性项和阻尼项之间的耦合效应。模型计算结果与实际海洋锚链在一系列海情下的测量结果相对比，其最大误差在 8% 到 11% 之间，标准方差在 2% 到 3% 之间。其最大误差在水平运动产生显著影响时产生于具有最大平均张力和动张力处。

A. P. Shashikala 等人^[21]应用有限元方法对波浪与单点系泊的驳船干扰的三维问题进行了研究。考虑锚链的弹性、锚泊点在驳船上的位置的影响。对数值结果和在规则波及不规则波情况下所测得的模型试验结果进行了比较，就锚链刚度系数对不同系泊点的驳船响应的影响进行了讨论，对锚泊系统的设计具有指导意义。在规则波和不规则波情况下，分析结果和试验结果都吻合得很好。

Shan Huang^[22]提出了一种预报三维锚链动张力的数值方法。该方法基于

质量集中弹簧模型和有限元方法。在考虑了模型特点和数值稳定性的基础上，给出了数学分析。并给出了算例来验证该方法的合理性。

1.3.2 国内研究现状

刘建成^[23]等人针对渤海海域上油田的开采，提出了一种简易单点系泊系统，并在考虑风、浪、流三种载荷同时作用的情况下，对该系统的可行性从总体上加以论证。利用设计谱理论计算油驳的波浪诱导纵荡力，利用经验公式计算油驳风力和流力，将以上三种力线性叠加得到系泊力。分析校核表明，该简易系泊系统是可行的，且具有经济有效等特点，适用于实际油田开采。

范菊^[24]等人为研究转塔式锚泊储油轮的动力响应，应用二阶频域摄动理论计算了压载状态下的一阶运动响应、二阶运动的响应谱及锚泊线张力谱，并与相应的模型试验结果进行了比较，理论结果和相应的试验结果符合较好，二阶频域摄动理论可用于分析转塔式系泊储油轮的动力响应。

范菊，黄祥鹿^[25]应用频域方法，研究波频运动引起低频慢荡阻尼力问题中锚泊线所引起的力。锚泊线所引起的阻尼在本质上与其和运动间的初相位有关。该相位信息从频域分析得出，应用摄动理论推导了到二阶的锚泊线张力响应函数，将算例与相应的时域结果进行了比较，频域摄动分析的结果在假设适用范围内与时域分析得到的结果基本相符。

刘应中^[26]等人采用准定常时间域方法分析了风、浪、流联合作用下海上系泊系统的运动及动力特性。在每一时间步系泊力由准静态方法得到。得到船舶运动时历后，采用推广的三维集中质量法求得锚链的动力特性。在计算船舶的静水恢复力和 Froude-Krylov 力时，记及了瞬时湿表面变化引起的非线性作用。

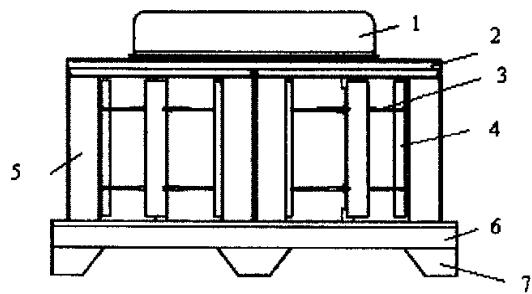
朱克强^[27]等人采用凝集参数法推导了海洋缆体系统三维动态响应的全部公式，采用“四阶龙格—库塔法”对运动方程进行了数值积分，输出结果是缆一体系统的动态构型和各分段内张力—时间历程。由于采用了集中质量—弹簧离散模型，因而能比较好地适应各种非均匀缆一体系统，例如带有不同性质缆分段或中间附体（仪器包、浮标、缓冲器等等）的系统，并对上端约束、下端主动给定圆周运动的缆系作了动态计算。

1.4 问题的提出

40kW 潮流电站建成后需经过拖航到达其预定工作海域，在拖航过程中，它会受到流体阻力产生倾斜，倾斜后会不会出现意外？外力消失后会不会回复到原来的平衡位置？将电站拖航到预定工作海域后对沉箱和导流罩注水使其下降到工作位置，在注水过程中它的稳定性如何？当需要对电站进行维修时须将水排出使其上浮，在排水过程中电站稳定性如何？电站在工作状态的稳定性又如何？为防止电站发生倾覆，对电站以上这些状态的稳定性进行计算和校核都是非常必要的。

为了保证潮流水轮机能正常工作，持续提供稳定的电力，必须有可靠的锚泊系统将载有水轮机的漂浮载体较精确地定位在预定海域。在海洋潮流水道长期工作下的漂浮式载体，要抵御狂风、巨浪、暴潮的袭击，为了保证潮流实验电站在大多数海况下可以正常工作和恶劣海况下的安全，系泊系统的设计就尤为重要。由于潮流电站带有两个尺度比较大的水轮机，故其所受波浪力和其在波浪中的运动都不同于传统意义上的船舶，这就造成了锚泊系统设计和计算的复杂性，加大了理论预报的难度。寻找一种适合潮流实验电站工作海域特点、潮流实验电站自身结构特点锚泊系统的设计计算方法，对于今后电站的锚泊方案设计、可靠性分析及发电系统总体设计以及后续施工方案的设计具有重要的意义，为潮流实验电站转化为实际生产电站打下理论基础。

如图 1.2 所示，原有的 70kw 潮流电站的锚泊系统设计采用了



1.机舱；2.浮箱；3.轮辐；4.叶片；5.导流罩；6.沉箱；7.桩腿

图 1.1 40kW 潮流电站布置图

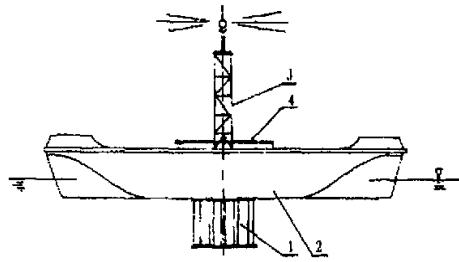


图 1.2 70kW 潮流电站布置图

切片法计算电站受到的波浪力和运动，而 70kW 潮流电站并不是典型的细长体，所以切片法给出的结果可能偏差较大，本文采用三维频域势流理论计算电站在波浪中的受力和运动，并在以前的锚链设计方案基础上，重新校核了锚泊系统的张力和安全性。

1.5 本文工作要点

本文计算了 40kW 潮流电站的静水力性能，在此基础上提出了两种安装、检修方案；计算了 70kW 和 40kW 潮流电站在规则波中的受力和运动，以及在风浪流环境下受到的环境载荷，归纳总结了锚泊系统的静力分析及动力分析的方法，在此基础上，根据 70kW 和 40kW 潮流电站的实际受力情况和其工作海域的特点，初步提出锚链设计方案。对这些方案进行了受力分析和比较。

第2章 40kW 潮流电站的稳定性计算

本章主要计算 40kW 潮流电站的静水力性能。电站在船厂建造，需要拖至现场进行安装；在电站运行过程中，还需要进行定期的检修。电站的拖航、安装和检修过程中的静水力性能直接决定了拖航、安装和检修方案的确定以及对电站结构设计的要求。为防止电站发生倾覆，本章给出了稳性改良方案。

2.1 电站的重量和重心

潮流电站的总重量是电站各项重量的总和。若已知各个项目的重量 W_i ，则电站总重量 W 为：

$$W = W_1 + W_2 + W_3 + \cdots + W_n = \sum_{i=1}^n W_i \quad (2-1)$$

式中 n 为组成电站总重量的各个重量项目的数目。

若已知各项重量 W_i 的重心高度 z_i ，则电站的重心高度为：

$$z_G = \frac{\sum_{i=1}^n W_i z_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (2-2)$$

如图 1.1 所示，潮流电站从上至下由机舱、浮箱、导流罩、水轮机、沉箱和桩腿组成。其中机舱内含有齿轮箱，增速器和电机以及其它机械部件。水轮机主要由叶片，轮辐，轴及轴套组成。沉箱和桩腿中灌入了一定量的水泥，以增加压载。

以电站沉箱下表面的中心为原点建立右手坐标系， x 轴沿电站纵向， y 轴沿电站横向， z 轴竖直向上。电站各部分重量、重心高度和重量对基平面的静矩见表 2.1。由于电站前后对称，左右对称，所以 $x_G = y_G = 0$ 。

表 2.1 40kW 潮流电站的重量和重心

	质量	重心高 z_G	对基线的静矩
	kg	m	kg·m
机舱棚	1141.13	3.768	4299.778
浮箱	6700.144	3.304	22137.28
导流罩	8094.134	1.759	14237.58
沉箱	7765.275	0.25	1941.319
桩腿	1116.781	-0.262	-292.597
水泥	25668.89	0.152	3901.671
舱内机械	2956.184	3.853	11390.18
轴及轴套	1003.41	1.825	1831.223
门	493.658	1.825	900.9259
叶片轮辐	1094	1.825	1996.55
附件	250	2.4	600
Σ (合计)	56283.61	1.118335	62943.9

2.2 电站的排水量和浮心

排水量和浮心位置的计算，实际上就是电站排水体积和排水体积形心坐标的计算。具体计算时，把电站的水下体积沿 z 轴垂向分割成若干薄层微体积来进行。电站正浮，吃水为 T_i ，在离基平面 z 处取 dz 一薄层进行分析，薄层微体积为：

$$dV_i = A_w dz$$

A_w 是离基平面 z 处的水线面面积，将其沿垂向 z 从 0 到 T_i 进行积分，便得电站在吃水 T_i 时的排水体积，即

$$V_i = \int_0^{T_i} A_w dz \quad (2-3)$$

由于电站形状比较规则，水线面面积 A_w 可以很容易求出，采用梯形法沿垂向积分求得排水体积。

$$V_i = \int_0^{T_i} A_w dz \approx \frac{1}{2} \delta T_i [(A_{w0} + A_{w1}) + (A_{w1} + A_{w2}) + \dots + (A_{wn-1} + A_{wn})] \quad (2-4)$$

V_i 对基平面的静矩为

$$M_{xoy} = \int_0^l z A_w dz \quad (2-5)$$

浮心垂向坐标为

$$z_{B_i} = \frac{M_{xoy}}{\nabla_i} \quad (2-6)$$

电站不同吃水时的排水量和浮心坐标的计算结果见表 2.2。

2.3 电站的静稳定性

2.3.1 初稳定性

如图 2.1 所示, 船舶正浮时的水线为 WL , 排水体积 ∇ , 横倾一微小角度 ϕ 后的水线为 W_1L_1 , 浮心自原来的位置 B 沿某一曲线移至 B_1 , 这时的浮力作用线垂直于 W_1L_1 , 并与中线相交于 M 点, M 点称为初稳心, \overline{BM} 称为稳心半径, $\overline{BM} = I/\nabla$ 。对于横稳定性, $I = I_T$, 即水线面面积对于纵向中心轴线的横向惯性矩; 对于纵稳定性, $I = I_L$, 即水线面面积对于横向中心轴线的纵向惯性矩。求得水线面惯性矩后, 即可得到稳心坐标:

$$z = z_B + \overline{BM} = z_B + \frac{I}{\nabla} \quad (2-7)$$

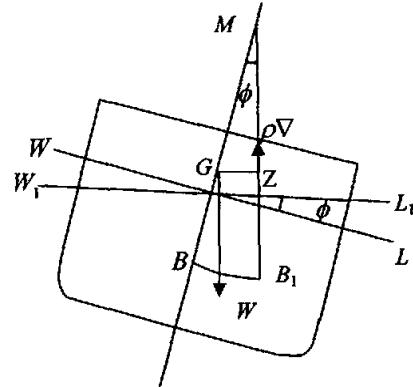


图 2.1 初稳定性示意图

电站横倾某一小角度 ϕ 时, 重心位置 G 保持不变, 而浮心自 B 点移至 B_1 点。此时重力 W 作用点 G 和浮力 $\rho\nabla$ 的作用点 B_1 不在同一铅垂线上, 因而产生了一个复原力矩 M_R , 即

$$M_R = \rho\nabla \cdot \overline{GZ} = \rho\nabla \cdot \overline{GM} \sin \phi \quad (2-8)$$

式中 ρ 为水的密度, \overline{GZ} 为复原力臂, \overline{GM} 为初稳心高^[28]。

从公式(2-8)可见, 当初稳心高 \overline{GM} 为正值时, M_R 也为正值, 外力消失后它能促使电站回复到原来的平衡状态; \overline{GM} 为零时, $M_R = 0$, 外力消失后, 电站不会回复到原来位置, 也不会继续倾斜; \overline{GM} 为负值时, M_R 也为负值,

它会促使电站继续倾斜。后两种情况是不允许出现的，因为电站在倾斜后不可能回复到原来的平衡位置，电站的稳定性没有得到保证。40kW 潮流电站初稳定性计算结果见表 2.2。其中 z_x 为横稳心坐标， z_y 为纵稳心坐标。

表 2.2 40kW 潮流电站的初稳定性计算表

	T	∇	Δ	z_B	I_T	I_L	I_T/∇	I_L/∇	z_x	z_y
	m	m^3	t	m	m^4		m			
桩腿	-0.5	0.000	0.000	—	—	—	—	—	—	—
	-0.4	0.336	0.345	-0.448	34.163	34.163	101.676	101.676	101.228	101.228
	-0.3	0.768	0.790	-0.392	41.648	41.648	54.229	54.229	53.837	53.837
	-0.2	1.296	1.332	-0.333	49.006	49.006	37.813	37.813	37.480	37.480
	-0.1	1.920	1.974	-0.273	56.245	56.245	29.294	29.294	29.021	29.021
	0	2.640	2.714	-0.212	278.02	278.02	105.311	105.311	105.098	105.098
沉箱	0.1	8.416	8.652	-0.032	278.02	278.02	33.035	33.035	33.002	33.002
	0.2	14.192	14.589	0.042	278.02	278.02	19.590	19.590	19.632	19.632
	0.3	19.968	20.527	0.102	278.02	278.02	13.923	13.923	14.025	14.025
	0.4	25.744	26.465	0.158	278.02	278.02	10.799	10.799	10.957	10.957
	0.5	31.277	32.152	0.209	255.98	255.98	8.184	8.184	8.394	8.394
导流罩	0.6	32.329	33.234	0.220	57.058	30.057	1.765	0.930	1.985	1.150
	0.7	33.382	34.317	0.234	57.058	30.057	1.709	0.900	1.943	1.134
	0.8	34.435	35.399	0.250	57.058	30.057	1.657	0.873	1.907	1.123
	0.9	35.488	36.481	0.268	57.058	30.057	1.608	0.847	1.875	1.115
	1	36.540	37.563	0.287	57.058	30.057	1.562	0.823	1.849	1.110
	1.1	37.593	38.646	0.309	57.058	30.057	1.518	0.800	1.826	1.108
	1.2	38.646	39.728	0.331	57.058	30.057	1.476	0.778	1.808	1.109
	1.3	39.699	40.810	0.356	57.058	30.057	1.437	0.757	1.793	1.113
	1.4	40.751	41.892	0.382	57.058	30.057	1.400	0.738	1.782	1.119
	1.5	41.804	42.975	0.408	57.058	30.057	1.365	0.719	1.773	1.127
	1.6	42.857	44.057	0.436	57.058	30.057	1.331	0.701	1.768	1.138
	1.7	43.910	45.139	0.466	57.058	30.057	1.299	0.685	1.765	1.150
	1.8	44.962	46.221	0.496	57.058	30.057	1.269	0.668	1.765	1.164
	1.9	46.015	47.304	0.527	57.058	30.057	1.240	0.653	1.767	1.180
	2	47.068	48.386	0.558	57.058	30.057	1.212	0.639	1.771	1.197
	2.1	48.121	49.468	0.591	57.058	30.057	1.186	0.625	1.777	1.216
	2.2	49.173	50.550	0.624	57.058	30.057	1.160	0.611	1.785	1.236
	2.3	50.226	51.632	0.659	57.058	30.057	1.136	0.598	1.795	1.257
	2.4	51.279	52.715	0.693	57.058	30.057	1.113	0.586	1.806	1.279
	2.5	52.332	53.797	0.729	57.058	30.057	1.090	0.574	1.819	1.303
	2.6	53.384	54.879	0.765	57.058	30.057	1.069	0.563	1.833	1.328

浮箱	2.7	54.437	56.205	0.801	57.058	30.057	1.048	0.552	1.849	1.350
	2.8	55.490	57.044	0.838	57.058	30.057	1.028	0.542	1.866	1.380
	2.9	56.543	58.369	0.875	57.058	30.057	1.009	0.532	1.885	1.407
	3	57.595	59.208	0.913	57.058	30.057	0.991	0.522	1.904	1.435
	3.15	59.175	60.831	0.971	191.51	175.45	3.236	2.965	4.207	3.936
	3.25	63.923	65.713	1.137	197	190.96	3.082	2.987	4.219	4.124
	3.35	68.801	70.727	1.290	200.08	200.08	2.908	2.908	4.198	4.198
	3.45	73.701	75.764	1.430	200.08	200.08	2.715	2.715	4.145	4.145
	3.564	74.324	76.405	1.448	8.063	0.49833	0.108	0.007	1.556	1.455
	3.664	74.814	76.908	1.462	7.9212	0.48148	0.106	0.006	1.568	1.468
机舱	3.764	75.300	77.408	1.477	7.9212	0.48148	0.105	0.006	1.582	1.483
	3.864	75.786	77.908	1.492	7.9212	0.48148	0.105	0.006	1.596	1.498
	3.964	76.279	78.415	1.507	7.9212	0.48148	0.104	0.006	1.611	1.513
	4.064	76.758	78.907	1.523	7.9212	0.48148	0.103	0.006	1.626	1.529
	4.164	77.243	79.406	1.539	7.8029	0.46698	0.101	0.006	1.640	1.545
	4.264	77.701	79.877	1.555	6.5889	0.32816	0.085	0.004	1.640	1.559
	4.364	78.004	80.188	1.566	0	0	0.000	0.000	1.566	1.566
	4.464	78.291	80.561	1.576	0	0	0.000	0.000	1.566	1.566
	4.564	78.578	80.931	1.586	0	0	0.000	0.000	1.566	1.566
	4.664	78.854	81.291	1.596	0	0	0.000	0.000	1.566	1.566

根据以上数据得到稳心坐标随吃水的变化如图 2.2 所示。

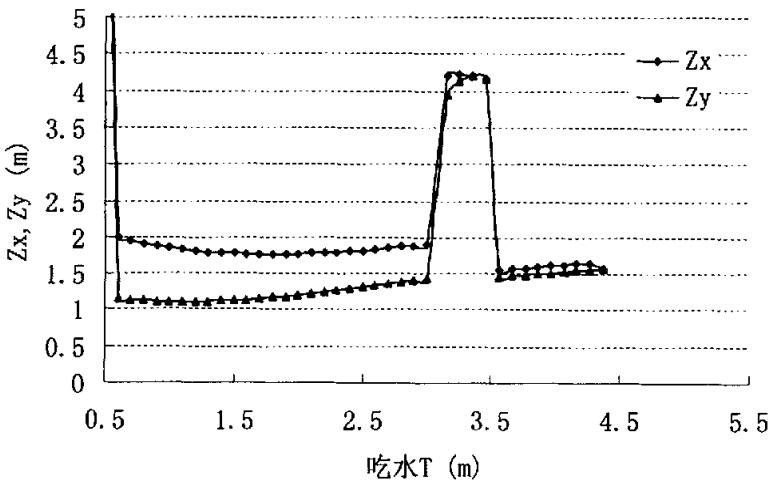


图 2.2 电站的稳心坐标随吃水的变化

从图 2.2 可以看出，电站的横稳定性比电站的纵稳定性好。因此在后续计算中主要校核电站的纵稳定性。

电站总重量为 56.283 吨，因此无压载时（拖航状态）的水线为

$$T_0 = 2.7 + \frac{2.9 - 2.7}{58.369 - 56.205} \times (56.283 - 56.205) = 2.707 \text{ m}$$

该状态时的纵稳心高度为 $z_y = 1.351 \text{ m}$ ，高于重心 $z_G = 1.118 \text{ m}$ ，因此处于稳定状态。

电站的工作环境处于老桥的两个桥墩之间，在低潮位时，电站座底时的吃水为 $3.6 \sim 3.7 \text{ m}$ ，取平均值为 3.65 m ，如图 2.3 所示。电站的最大纵倾角

$$\theta_{\max} = \tan^{-1} \frac{3.65 - 2.707 - 0.5}{3.5} = 7.21^\circ$$

为了安全起见，拖航状态时电站的纵倾角角不得大于 5 度，最大纵倾力矩

$$M_{L\max} = 56.283 \times (1.351 - 1.118) \times \sin 5^\circ = 1.143 \text{ t} \cdot \text{m}$$

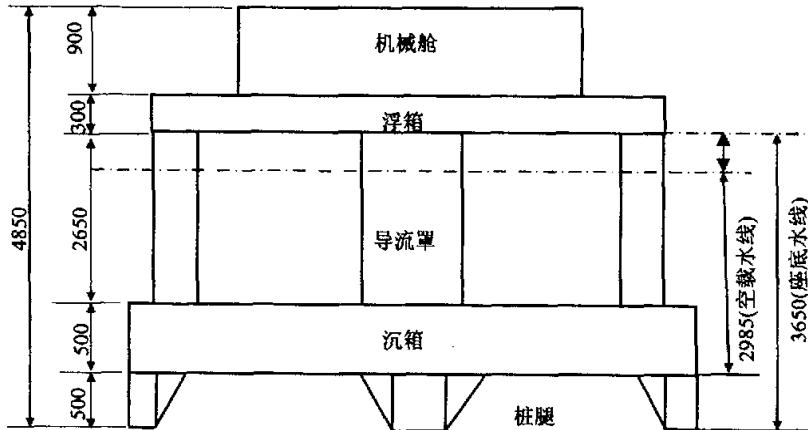


图 2.3 潮流电站结构示意图

2.3.1 大倾角稳定性

初稳定性问题只适用于小倾角情况，即横倾角 ϕ 不超过 $10^\circ \sim 15^\circ$ 。但是电站在拖航过程中横倾角可能会超过以上范围，这时便不能用初稳定性来判断是否具有足够的稳定性。

如图 2.4 所示，电站原浮于

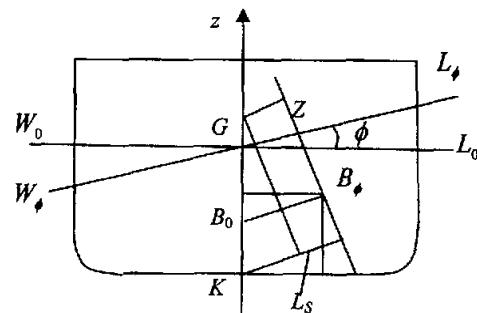


图 2.4 大倾角稳定性示意图

水线 $W_0 L_0$ ，排水量 Δ ，重心为 G ，浮心为 B_0 。设电站在外力矩作用下横倾于某一较大角度 ϕ ，而浮于水线 $W_\phi L_\phi$ 。这时，电站的重心位置保持不变，而由于排水体积的形状发生了变化，浮心位置由 B_0 点沿某一曲线移动到 B_ϕ 点。于是重力 Δ 和浮力 ρV 就形成了一个复原力矩 M_R ：

$$M_R = \Delta \times \overline{GZ} = \Delta \times l \quad (2-9)$$

式中 $l = \overline{GZ}$ 为重力作用线与浮力作用线之间的距离，称为复原力臂或静稳定性臂。

大倾角时，静稳定性臂 l 随倾角 ϕ 的变化比较复杂，不能用简单的公式来表示。通常根据计算结果绘制 $l = f(\phi)$ 曲线图，这种图称为静稳定性曲线图。为了检验电站在各种压载情况下的稳定性是否满足要求，采用等排水量法计算静稳定性曲线，以迅速而方便的算出电站在不同排水量时的静稳定性臂和复原力矩。

如图 2.4 所示，正浮时电站的基点为 K ，设 K 点到倾斜后浮力作用线的距离为 l_s ，则此时的静稳定性臂为：

$$l = l_s - \overline{KG} \sin \phi \quad (2-10)$$

$$l_s = \frac{y_{B_\phi}}{\cos \phi} + \frac{z_{B_\phi} - y_{B_\phi} \tan \phi}{\sin \phi} \quad (2-11)$$

可见如果能求出横倾 ϕ 角后的浮心 B_ϕ 的位置，即可求得 l 。

再来看浮心坐标的情况如图 2.5 所示。电站倾斜了 ϕ 角后，自倾角倾斜一无穷小角度 $d\phi$ ，这时等体积倾斜水线是 $W_{\phi+d\phi} L_{\phi+d\phi}$ 。浮心坐标的变化为

$$dy_{d\phi} = \overline{B_\phi B_{\phi+d\phi}} \cos \phi$$

$$dz_{d\phi} = \overline{B_\phi B_{\phi+d\phi}} \sin \phi$$

由于 $d\phi$ 很小，可认为

$$\overline{B_\phi B_{\phi+d\phi}} = B_\phi B_{\phi+d\phi}$$

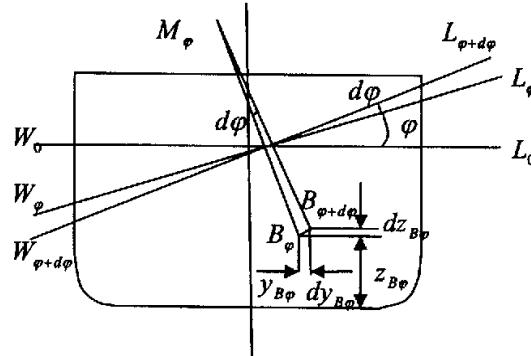


图 2.5 浮心坐标变化示意图

又因 $B_\varphi B_{\varphi+d\varphi} = \overline{B_\varphi M_\varphi} d\varphi$ ，而 $\overline{B_\varphi M_\varphi}$ 可以用初稳定性公式求取， $\overline{B_\varphi M_\varphi} = I_\varphi / \nabla$ ， I_φ 是水线 $W_\varphi L_\varphi$ 的面积对通过其漂心的惯性矩。所以：

$$dy_{B\varphi} = \overline{B_\varphi M_\varphi} d\varphi \cos \varphi \quad (2-12)$$

$$dy_{B\varphi} = \overline{B_\varphi M_\varphi} d\varphi \cos \varphi \quad (2-13)$$

电站在倾斜 φ 角的状态可看作电站由正浮状态逐渐绕不同的倾斜轴作无数的无穷小倾角 $d\varphi$ 的等体积倾斜所得。因此电站在倾角为 φ 时的浮心坐标是

$$\left. \begin{aligned} y_{B\varphi} &= \int_0 \overline{B_\varphi M_\varphi} \cos \varphi d\varphi \\ z_{B\varphi} &= KB_0 + \int_0 \overline{B_\varphi M_\varphi} \sin \varphi d\varphi \end{aligned} \right\} \quad (2-14)$$

求得倾斜后的浮心坐标之后，由公式(2-10)和(2-11)就可以计算出回复力臂，再由公式(2-9)即可求得回复力矩^[28]。

40kW 潮流电站的大倾角稳定的计算结果见图 2.6 和 2.7。

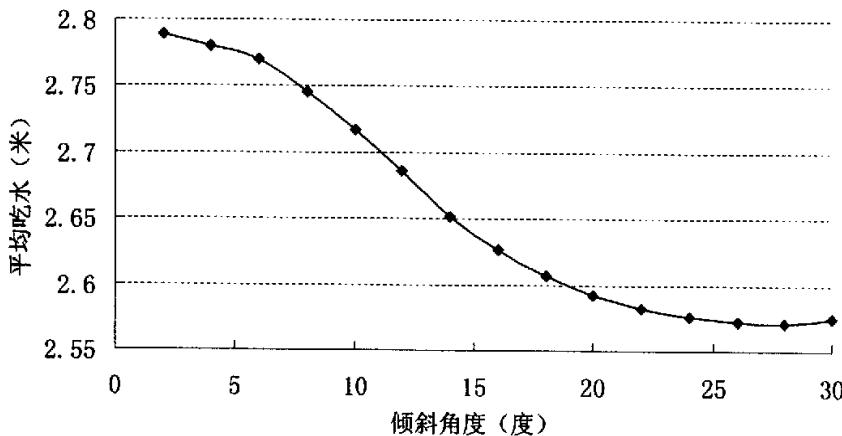


图 2.6 大倾角时电站的平均吃水

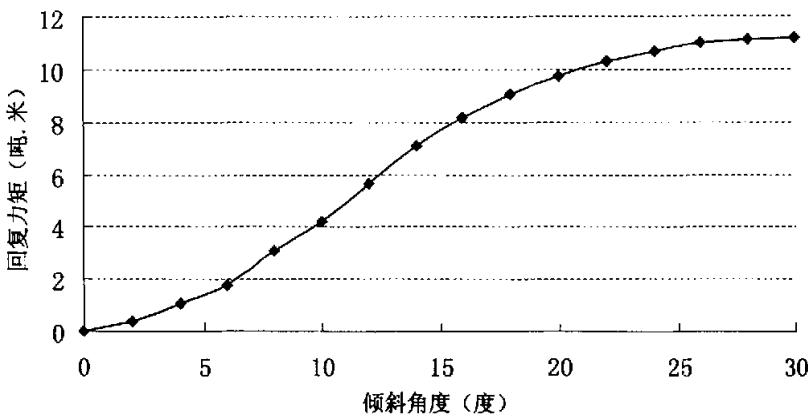


图 2.7 40kW 潮流电站的静稳定性曲线

从图 2.7 可见，在倾斜 30° 角的范围内，电站的静稳定性曲线处在上升阶段，所以当电站受到外界的横倾力矩时，可以稳定在某一平衡位置而不发生倾覆。电站的最大回复力矩为 $11.2t \cdot m$ ，即电站受到的最大外力矩不能大于 $11.2t \cdot m$ ，否则将发生倾覆。

2.4 电站的安装和检修方案设计

电站的工作环境处于老桥的两个桥墩之间，低潮水位为 $3.6 \sim 3.7m$ ，高潮水位为 $6.6 \sim 6.7m$ 。潮流的最大流速为 $2.5m/s$ (50 年一遇)。考虑到海流因素，电站的安装和检修只能在低潮位或高潮位这两个海流速度最小的时刻进行。其中低潮时水位较低，安装比较方便，应为首选时机。在低潮位时，电站座底时的吃水为 $3.6 \sim 3.7m$ ，取平均值为 $3.65m$ ，正好将导流罩完全淹没。此时的排水量为 $\Delta_1 = 61.074$ 吨，和拖航状态相比，排水量之差为

$$d\Delta = 61.074 - 56.283 = 4.791 t$$

即为了使电站下沉，需有 4.791 吨的压载水。

经计算，各舱室的有效容积如表 2.3 所示，表中需注水深度指加载 4.791 吨压载水后舱内水的深度。

表 2.3 潮流电站舱容表

	容积	需注水深度	压载水型心高度
	m^3	m	m
沉箱	23.461	0.104	0.052
左/右导流罩	6.715	-----	-----
中央导流罩	13.43	0.960	0.980

无论在什么舱室注水，都不会增加电站的重心。但是考虑到自由面和分舱的因素，在中央导流罩注水比较方便。其优点有：

- (1) 在中央导流罩和沉箱间不用开孔，有利于施工和工艺；
- (2) 中央导流罩是一个整体，压载水的流动比较容易，因此有利与快速抽水；
- (3) 沉箱不用因为要保证稳性而分舱，从而减轻了对沉箱的工艺要求，同时保证了沉箱中压载水的流通性，有利于快速抽水；
- (4) 对纵、横稳定性的影响最小。

2.4.1 方案一

该方案考虑抽水/灌水过程中的整个中央导流罩作为调节水舱的情况。由于中央导流罩在压载过程中存在自由液面，整个电站相当于损失了一半的水线面惯性矩，因此稳性半径栏内的值为稳性校核表中的一半。稳性校核结果见表 2.4。其中 T 为吃水， Δ 为排水量， δ 为压载水量， δh 为压载水高度， δz 为压载水重心， z_G 为电站重心， z_B 为浮心， \overline{BM} 为纵稳心半径， \overline{GM} 为纵稳心高。

表 2.4 中央导流罩整舱作为调节水舱的稳性校核

T	Δ	δ	δh	δz	z_G	z_B	\overline{BM}	\overline{GM}
m	t					m		
2.7	56.205	-0.078	-0.015	0.493	1.119	0.799	0.276	-0.044
2.75	56.746	0.463	0.089	0.544	1.113	0.818	0.273	-0.023
2.8	57.287	1.004	0.193	0.596	1.109	0.836	0.270	-0.002
2.85	57.828	1.545	0.297	0.648	1.105	0.855	0.268	0.017
2.9	58.369	2.086	0.400	0.700	1.103	0.874	0.265	0.036
2.95	58.910	2.627	0.504	0.752	1.102	0.892	0.263	0.054
3	59.451	3.168	0.608	0.804	1.101	0.911	0.261	0.071

3.05	59.992	3.709	0.712	0.856	1.102	0.930	0.258	0.087
3.1	60.533	4.250	0.816	0.908	1.103	0.950	0.256	0.102
3.15	61.074	4.791	0.920	0.960	1.106	0.969	0.254	0.117

计算结果表明，在吃水 $2.7m \sim 2.8m$ 时电站的稳心高为负值，但是考虑到此时的中央导流罩的压载水量很少，自由液面对稳定性的影响比计算值要小得多，而且安装时还有引导装置，因此并不会对电站的安全产生影响。但是由于负稳定性存在，使得在该吃水时电站存在一个较小的永倾角，对于检修时的抽水不利。

2.4.2 方案二

在上面的计算中发现，中央导流罩整个作为水舱时存在稳定性不足的问题，考虑到中央导流罩的总压载水量可达 13.8 吨，采用方案二将中央导流罩分舱，只有中间舱室进水，这样虽然提高了压载水的重心，但是可以有效的减小自由液面造成的稳定性损失，总体上对于提高电站的稳定性有利。

参照结构设计，假设中央导流罩在离中横剖面 $1.5m$ 处分舱，按容积率 96.3% 计算，中间舱段的舱室截面积为 $2.71m^2$ ，惯性矩为 $2.516m^4$ 。按上述数据重新计算压载过程的静水力性能，结果见表 2.5。其中 δA 为自由液面损失。

表 2.5 中央导流罩中间部分作为调节水舱的稳定性校核

T	Δ	δ	δh	δz	z_G	z_B	\overline{BM}	δA	\overline{GM}
m		t	m		m			m^2	m
2.7	56.205	-0.078	-0.028	0.486	1.119	0.799	0.551	0.046	0.186
2.75	56.746	0.463	0.166	0.583	1.114	0.818	0.546	0.046	0.204
2.8	57.287	1.004	0.361	0.680	1.110	0.836	0.541	0.045	0.221
2.85	57.828	1.545	0.555	0.777	1.109	0.855	0.536	0.045	0.237
2.9	58.369	2.086	0.749	0.874	1.109	0.874	0.531	0.044	0.251
2.95	58.910	2.627	0.943	0.972	1.111	0.892	0.526	0.044	0.263
3	59.451	3.168	1.137	1.069	1.115	0.911	0.521	0.044	0.274
3.05	59.992	3.709	1.331	1.166	1.121	0.930	0.516	0.043	0.283
3.1	60.533	4.250	1.526	1.263	1.128	0.950	0.512	0.043	0.290
3.15	61.074	4.791	1.720	1.360	1.137	0.969	0.507	0.042	0.297

由表 2.5 可见，各吃水下电站的稳心高都为正值，而且压载水高度低于舱室高度，满足下沉要求。所以最终选择第二个方案：中央导流罩在离中横

剖面 1.5m 处的两个舱壁保持水密，中间舱室作为调节水舱单独使用，与其他舱室之间保持水密，而其余所用舱室（沉箱、浮箱、左右导流罩）保持连通，作为一个舱室使用。

通过以上计算最终确定了电站安装时的下沉方案和检修时的浮起方案：

（1）电站下沉方案

第一步：向中央导流罩中间舱室灌水，直至电站沉底；

第二步：向其余舱室注水。

（2）电站浮起方案

第一步：抽干其它各舱的压载水；

第二步：抽干中央导流罩中间舱室的压载水，使电站上浮。

2.5 本章小结

本章计算了 40kW 潮流电站的重量、重心、浮性、初稳性和大倾角稳定性。校核了电站在拖航状态、下沉和上浮状态下的稳定性，提出了电站的安装和检修方案。

第3章 电站在规则波中的运动

潮流电站在工作海域的受力情况直接决定了其锚泊系统的设计方法，故详细地分析其受力情况是非常必要的。实际工作海域的波浪是极不规则的，由于不规则波可视为由一系列规则波叠加而成，所以要研究电站在不规则波中的受力和运动，首先要分析电站在规则波中的响应。由于电站带有两个水轮机转子，要考虑水轮机转子在风浪流环境下对电站平台的耦合影响是非常困难的。故在计算电站的受力和运动时，将电站平台与转子分开，基于势流理论分析电站平台部分在规则波中的受力和运动响应。

3.1 浮体在规则波中运动的三维频域势流理论

3.1.1 速度势及其定解条件

在势流理论中，流体是理想的，流动无旋。假设浮体在微幅规则波作用下作六自由度运动，浮体的运动响应与入射波波幅都是一阶无穷小，运动也已达到稳定。浮体在波浪中的摇荡属于刚体6自由度运动，可由浮体重心G点的3个线位移（纵荡、横荡、垂荡）和绕G点的3个角位移（横摇、纵摇、艏摇）表示。

$$\{\eta(t)\} = \{\eta\} e^{i\omega t} = (\eta_1 \quad \eta_2 \quad \eta_3 \quad \eta_4 \quad \eta_5 \quad \eta_6)^T e^{i\omega t} \quad (3-1)$$

其中 η_j ($j=1,2,\dots,6$) 为复振幅。它们依次指的是纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和艏摇。

应用一阶势流理论进行计算时，入射波视为 Airy 波，波面方程为：

$$\zeta = \operatorname{Re} [A e^{i(\omega t - k(x \cos \beta + y \sin \beta))}] \quad (3-2)$$

其中 A 为波幅， ω 为频率， β 为入射波的传播方向与 x 轴正向的夹角。入射波的传播方向和波形如图 3.1 所示。

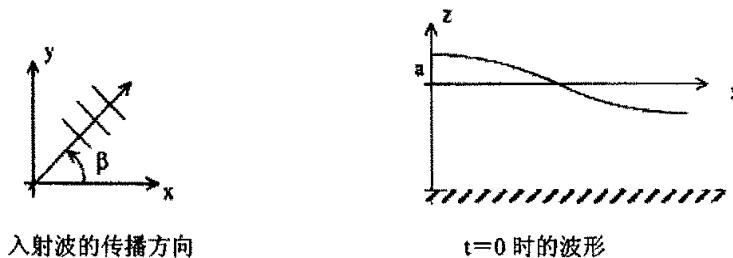


图 3.1 入射波的传播方向和波形示意图

定义 Φ_0 为入射波的速度势, ϕ_0 为对应于 Φ_0 的复速度势, 即

$$\Phi_0 = \operatorname{Re}(\phi_0 e^{i\omega t})$$

其中 ω 为入射波的频率。由线性自由面条件可以解得有限水深 h 下入射波线性速度势的解析表达式:

$$\begin{aligned} \phi_0 &= \frac{igA}{\omega} \frac{\cosh[k(z+h)]}{\cosh kh} e^{-ik(x\cos\beta+y\sin\beta)} \\ (k \cdot th(kh)) &= \frac{\omega^2}{g} \end{aligned} \quad (3-3)$$

其中波数 k 为色散关系的实根。

记总的速度势为 Φ , 整个流体域中它满足 *Laplace* 方程

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (\text{流场内})$$

定义 ϕ 为对应于 Φ 的复速度势, 即

$$\Phi = \operatorname{Re}(\phi e^{i\omega t}) \quad (3-4)$$

线性化的自由面条件为:

$$\phi_z - v\phi = 0 \quad (z=0)$$

其中 $v = \omega^2/g$, g 为重力加速度。

在线性假设下, 可以将速度势分为两部分

$$\phi = \phi_R + \phi_D$$

$$\phi_R = i\omega \sum_{j=1}^6 \eta_j \phi_j = \sum_{j=1}^6 \dot{\eta}_j \phi_j \quad (3-5)$$

$$\phi_D = \phi_0 + \phi_r$$

η_j 为物体振荡运动的复振幅, ϕ_j 为物体以 j 态单位振幅运动的辐射势。

ϕ_r 为入射波的绕射速度势, ϕ_D 为绕射势和入射势之和。 $\phi_j (j=1 \sim 7)$ 的定解条件如下:

$$\begin{aligned}
 \nabla^2 \phi_j &= 0 && (\text{流场内}) (j=1 \sim 7) \\
 \frac{\partial \phi_j}{\partial z} - v \phi_j &= 0 && (z=0 \text{ 上}) (j=1 \sim 7) \\
 \frac{\partial \phi_j}{\partial n} &= n_j && (\text{物面上}) (j=1 \sim 6) \\
 \frac{\partial \phi_7}{\partial n} &= -\frac{\partial \phi_0}{\partial n} && (\text{物面上})
 \end{aligned} \tag{3-6}$$

其中 $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$, $\mathbf{r} \times \mathbf{n} = (n_4, n_5, n_6)$, $\mathbf{r} = (x, y, z)$ 。 \mathbf{n} 为物体表面单位法向量, 指向流体域。此外还有底部条件和远方条件。

3.1.2 分布源积分方程的建立和求解

对于满足上述定解条件的 ϕ_j , 可以用源汇分布法进行求解。将速度势 ϕ_j 表示成物面上的分布源形式^[31]

$$\phi_j(p) = \iint_S \sigma^{(j)}(q) G(p, q) dS_q \tag{3-7}$$

式中 S 表示物面, $\sigma^{(j)}(q)$ 为分布源强度, $G(p, q)$ 为满足前述定解条件中除物面条件以外所有条件的 Green 函数; $p(x, y, z)$ 表示场点, $q(\xi, \eta, \zeta)$ 表示源点。

根据速度势 ϕ_j 的物面条件, 分布源强度 $\sigma^{(j)}(q)$ 满足下面的积分方程:

$$2\pi\sigma^{(j)}(p) + \iint_S \sigma^{(j)}(q) \frac{\partial}{\partial n_p} G(p, q) dS_q = \begin{cases} -\frac{\partial}{\partial n^{(p)}} \phi_0 & (p \text{ 在 } S \text{ 上}) \\ n_j^{(p)} & \end{cases} \tag{3-8}$$

三维无限水深频域 Green 函数(无航速)的表达形式为

$$G(p, q) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1} + v F(X, Y) + i 2\pi v e^{v(z+\zeta)} J_0(vR) \tag{3-9}$$

$$\omega \rightarrow 0 \text{ 时: } G(p, q) = \frac{1}{r} + \frac{1}{r_1}$$

$$\omega \rightarrow \infty \text{ 时: } G(p, q) = \frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}$$

其中

$$F(X, Y) = 2 \int_0^{\infty} \frac{e^{-kY} J_0(kX)}{k-1} dk = -\pi e^{-Y} [H_0(X) + Y_0(X)] - 2 \int_0^Y e^{t-Y} (X^2 + t^2)^{-1/2} dt \quad (3-10)$$

$$r = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2]^{1/2}$$

$$r_1 = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z + \zeta)^2]^{1/2}$$

$$R = [(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2]^{1/2}$$

$$X = \nu R, \quad Y = |\nu(z + \zeta)| = -\nu(z + \zeta)$$

$$\nu = \omega^2 / g$$

H_0 为零阶 Struve 函数。

3.1.3 面元法

面元法即 Hess-Smith 方法^[31]，是求解分布源积分方程(3-8)的一种常用数值方法。它是通过对连续物面 S (船体平均湿表面) 的离散，将上述分布源积分方程转换成线性代数方程组来求解。

将船体湿表面 S 离散成 N 个网格单元：

$$S = \sum_{k=1}^N \Delta S_k \quad (3-11)$$

用平面四边形或三角形 ΔQ_k 来近似代替曲面网格 ΔS_k ：取第 k 个网格的四个顶点坐标之算术平均值得到中心点 p_k 的坐标；然后计算对角线向量的向量积（指向船体内部），用 n_k 表示该方向上的单位向量，从而形成以 n_k 为法线且通过中心点 p_k 的平面；把四个顶点向该平面作投影，形成以四个投影点为顶点的平面四边形（或三角形） ΔQ_k ，称 ΔQ_k 为面元。

上面是几何上的近似和替换，下面讨论物理上的简化。令面元 ΔQ_k 上的分布源强 $\sigma_k^{(j)}(q)$ 为常数，记作 $\sigma_k^{(j)} = \sigma_{kc}^{(j)} + i\sigma_{ks}^{(j)}$ ，从而可以将物面 S 上的积分用 N 个平面四边形上的积分之和来近似。令适合场点 p 的积分方程(3-8)在 N 个面元的中心点 p_k ($k=1, 2, \dots, N$) 处（称之为控制点）成立，于是关于分布源 $\sigma_k^{(j)}(q)$ 的积分方程便转化为关于 N 对离散量 $\sigma_k^{(j)} = \sigma_{kc}^{(j)} + i\sigma_{ks}^{(j)}$ ($k=1, 2, \dots, N$) 的线性代数方程组

$$\sum_{k=1}^N a_{ik} \sigma_k^{(j)} = b_i^{(j)} \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (3-12)$$

其中

$$a_{ik} = \iint_{\Delta Q_k} \frac{\partial}{\partial n_{p_i}} G(p, q) dS_q \quad (i \neq k)$$

$$a_{ik} = 2\pi + \iint_{\Delta Q_k} \frac{\partial}{\partial n_{p_i}} G'(p, q) dS_q \quad (i = k)$$

$$b_i^{(j)} = n_j^{(p_i)} \quad (j = 1, 2, \dots, 6)$$

$$b_i^{(7)} = -\frac{\partial}{\partial n^{(p_i)}} \phi_0$$

式中 $G'(p, q)$ 为不包括基本源的 Green 函数。

求解线性代数方程组(3-12)，得到每个面元 ΔQ_k ($k = 1, 2, \dots, N$) 上的分布源强 $\sigma_k^{(j)}(q)$ ($j = 1, 2, \dots, 7$) 后由式(3-7)可求出速度势 ϕ_j ($j = 1, 2, \dots, 7$)。

3.1.4 运动微分方程

求出诸辐射势和绕射势后，根据伯努利方程就可以得到作用在浮体上的流体动力^[31]。入射势产生的入射波的力（矩）称为 Froude-Kriloff 力，它和绕射势产生的绕射力（矩）之和为物体在规则波中受到的波浪激励力（矩）。辐射势产生的辐射力（矩）由两部分组成，一部分是和浮体加速度成正比，比例系数称为附加质量，用 A_{ij} 表示；另一部分和浮体的速度成正比，比例系数称为阻尼系数，用 B_{ij} 表示。

$$A_{ij} = \rho \iint_{S_H} \operatorname{Re}(\phi_j) n_i ds$$

$$B_{ij} = \omega \rho \iint_{S_H} \operatorname{Im}(\phi_j) n_i ds$$

除去波浪力（矩）和辐射力（矩）之外，浮体还受到恢复力（矩）的作用，即伯努利方程中 $-\rho g z$ 项的贡献。将恢复力矩和重力矩合并，再写出惯性力（矩）的表达式，可以得到船舶运动微分方程组

$$\sum_{j=1}^6 [(M_{ij} + A_{ij}) \ddot{\eta}_j + B_{ij} \dot{\eta}_j + C_{ij} \eta_j] = F_i e^{i\omega t} \quad (i = 1 \sim 6) \quad (3-13)$$

其中 M_{ij} 为浮体的质量矩阵， C_{ij} 为恢复力和重力合并的系数， F_i 为波浪激励力。

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_{11} & I_{12} & I_{13} \\ mz_G & 0 & -mx_G & I_{21} & I_{22} & I_{23} \\ -my_G & mx_G & 0 & I_{31} & I_{32} & I_{33} \end{bmatrix}$$

系数 C_{ij} , $i, j = 1, 2, \dots, 6$ 仅有 5 项不为零, 它们是

$$\begin{cases} C_{33} = \rho g A \\ C_{35} = C_{53} = -\rho g S_y \\ C_{44} = \rho g \nabla h_x + \rho g \iint_{W_p} y^2 dxdy \\ C_{55} = \rho g \nabla h_y + \rho g \iint_{W_p} x^2 dxdy \end{cases}$$

式中, A 和 S_y 为船舶水线面的面积和对 y 轴之静矩, ∇ 为船舶的排水体积, h_x 和 h_y 分别为船舶的横稳心高和纵稳心高。

3.1.5 运动和受力传递函数

在求解完速度势和运动方程之后, 可以得到浮体在规则简谐波中的六个自由度的运动和六个方向上的波浪力(矩), 将这些量统一称为响应变量, 用 $R(\omega, \beta, t)$ 表示, 它们随着入射波的频率、方向和时间的变化而变化。当入射波已知时, 分离出时间因子, 响应变量可以表示为

$$R(\omega, \beta, t) = A \operatorname{Re}[H(\omega, \beta) e^{i(\omega t + \alpha)}] \quad (3-14)$$

其中 α 为响应变量与入射波之间的相位差, $H(\omega, \beta)$ 称为传递函数。已知入射波并求解出各个响应变量之后, 根据上式可以求得传递函数。有了传递函数之后, 就可以很方便地求解出各种规则的入射波下船舶的受力和运动。由于不规则波可视为由一系列规则波叠加而成, 所以根据传递函数可以求解出船舶在不规则波中的受力与运动响应。

3.2 SESAM 软件在频域势流理论计算中的应用

3.2.1 SESAM 软件介绍

SESAM 软件是 DNV 软件公司开发的一种用于海洋工程结构和水动力分析计算的综合性软件系统。它能够成功地设计和分析多种海洋结构物，如导管架平台、半潜式平台、张力腿平台和重力式平台等等，最近 30 多年来得到了广泛的应用。SESAM 包含一系列应用程序模块，这些模块主要分为四大部分：(1) 结构物和环境的建模；(2) 环境载荷分析计算，以决定结构物的运动与受力；(3) 强度计算，即静态或动态有限元分析，以确定结构响应；

(4) 结果处理和评估，以保证满足设计要求和安全需要。本文用到的模块有 Prefem、Wadam、Postresp 和 Mimosa。现将这几个模块的主要功能作一简单介绍。

Prefem 是 SESAM 中用于建立有限元模型的前处理模块之一。它建立的模型可以由桁架、梁、膜板、壳板和实体等类型的单元组成。用于作结构分析的模型称为有限元模型，用于水动力分析的模型称为面元模型。建立面元模型和有限元模型的原理是一样的。建模的基本步骤分为：(1) 建立结构物的几何模型，几何模型由点、线、面和体组成；(2) 确定建立有限元模型的参数(如单元的密度和类型等)；(3) 自动生成由许多单元组成的有限元模型；(4) 对几何模型分配特性，如材料、边界条件、载荷等等，这些数据会自动被传递到有限元模型上；(5) 将整个有限元模型存储在输入接口文件 (T*.FEM) 中，以用于后续分析。

Wadam 是用于计算和分析船舶和海洋结构物的波浪载荷和运动的交互式应用程序，它可以作为一个独立的模块来运行，但由于它和数据处理模块 Postresp 共同包含在软件包 HydroD 中，所以一般的做法是在 HydroD 中建模完成后直接运行 Wadam 进行计算，再利用 Postresp 将计算结果绘制出图表输出。Wadam 能够对漂浮或固定刚体作频域或时域分析。对于细长体结构的计算基于 Morison 方程，非细长体结构的计算基于一阶或二阶三维势流理论。当结构物中既包含细长体部分，又包含非细长体部分时，可以分别将 Morison 理论和势流理论应用在此结构物的不同部分上进行计算。Postresp 是交互式数据后处理器，它可以读入外部计算模块生成的 SESAM 计算结果接口文件，将数据生成图表并进行输出。使用 HydroD 进行水动力计算的大致步骤为：(1) 新建一个水动力模型，导入由 Prefem 生成的输入接口文件 T*.FEM，这时可以在 HydroD 的三维可视窗口中看见模型的三维图；(2) 根据计算的需要进

一步定义模型的其它水动力特征和要素，如质量、重心、惯性矩、入射波频率和方向等等，建立完整的水动力模型；(3) 运行 Wadam 计算结构物的波浪载荷和运动响应，生成输入接口文件 G*.sif；(4) 运行 Postresp 对计算结果进行分析和输出。

Mimosa 是用于锚泊船舶的锚泊系统分析的模块。它可以计算由风、浪、流引起的环境载荷和浮体的波频运动和低频运动，在此基础上对浮体的锚泊系统进行张力计算和强度校核。计算时需要读入两个输入文件：一个是由 Wadam 生成的接口文件 G*.sif，提供船的质量、附加质量、流力和风力系数、一阶波浪诱导运动的传递函数和波浪漂移力系数等数据；另一个是定位系统文件，定义锚泊定位系统的特征参数，需要由用户自己编写成特定的输入格式进行输入。关于 Mimosa 将在在下一章作进一步说明。

3.2.2 模型的建立

Wadam 主要包含三类模型：(1) 用来计算水动力的水动力模型，它可是面元模型、Morison 模型、双重模型或复合模型；(2) 将水动力载荷和水静力载荷表示为有限元载荷的结构模型；(3) 质量模型。如图 3.2 所示。

面元模型用于根据三维势流理论计算水动力，Morison 模型用于根据



图 3.2 模型类型组成示意图

Morison 公式计算水动力载荷。面元模型和 Morison 模型的结合称为复合模型，适用于将势流理论和 Morison 公式分别用于同一个水动力模型的不同部分的情况。面元模型和 Morison 模型的另一种结合称为双重模型，这种模型可以将势流理论和 Morison 公式用于同一个水动力模型的相同部分。当从势流理论得到的压力分布需要被转换成梁结构的受力时就必须使用双重模型。这四种模型的示意图如图 3.3 所示。

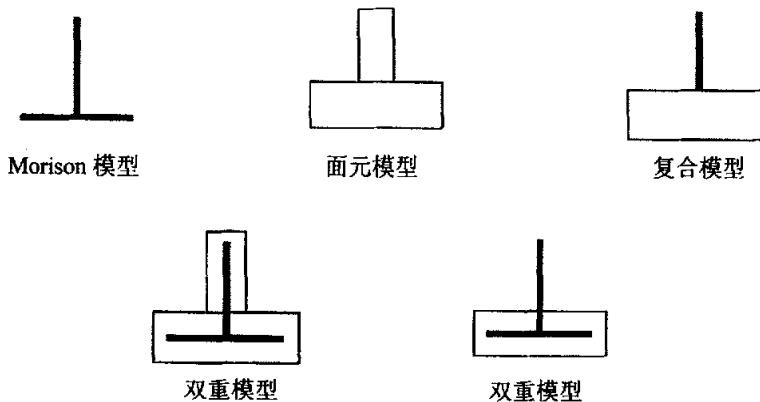
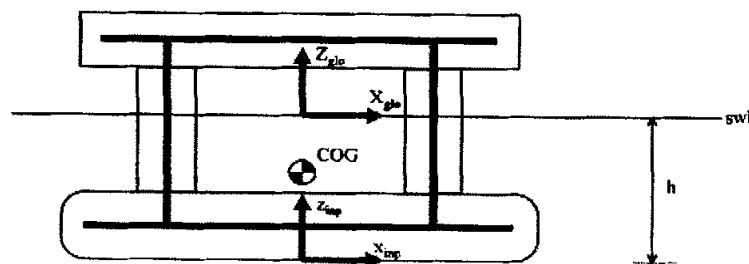


图 3.3 水动力模型组合示意图

对于单体水动力模型，Wadam 使用三种不同的坐标系：(1) 全局坐标系；(2) 输入坐标系；(3) 局部有限单元坐标系。全局坐标系表示为 $(X_{glo}, Y_{glo}, Z_{glo})$ ，坐标原点位于静水面，Z 轴竖直向上，如图 3.4 所示。所有的计算结果都以全局坐标系作为参考坐标系，全局坐标系的原点就是计算结果和运动的参考点。输入坐标系表示为 $(X_{inp}, Y_{inp}, Z_{inp})$ ，是定义水动力模型和结构模型时使用的坐标系，对同一几何模型进行不同类型的建模时必须使用同一个输入坐标系，输入坐标系的原点必须位于全局坐标系的 Z 轴上，也可以与全局坐标系的原点重合，输入坐标系的 X 轴和 Y 轴必须分别平行于全局坐标系的 X 轴和 Y 轴。输入坐标系和全局坐标系的位置关系使用参数 ZLOC 表示，如果输入坐标系的原点位于静水面之下，则 ZLOC 为负值，反之亦然。局部有限单元坐标系用于包含 Morison 模型的水动力模型之中。

图 3.4 半潜体的全局坐标系和输入坐标系示意图， $ZLOC = -h$

根据 70kW 潮流电站和 40kW 潮流电站的特点，本文选择根据三维势流理

论计算潮流电站的水动力载荷和运动响应,从而选择面元模型对电站进行建模。建立面元模型时,可以定义整个湿表面积,也可以利用对称性只定义一半或四分之一湿表面积,如图 3.5 所示。

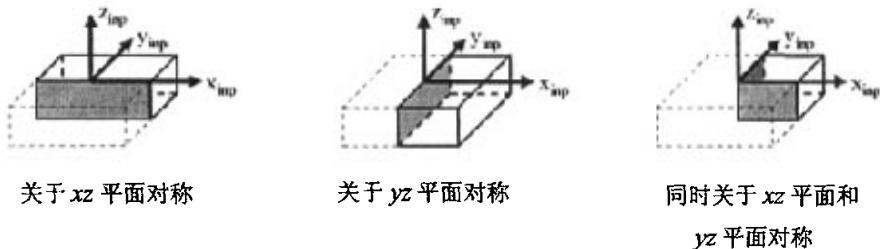


图 3.5 对称平面的定义

面元模型的基本组成部分是四边形或三角形的平面单元,由这些单元组成整个物体的湿表面积。当平面单元的边延伸到了静水面之上时,软件会自动对原先的单元进行调整,形成新的单元,当单元延伸到海底以下时也用同样的方式进行调整,如图 3.6 所示。

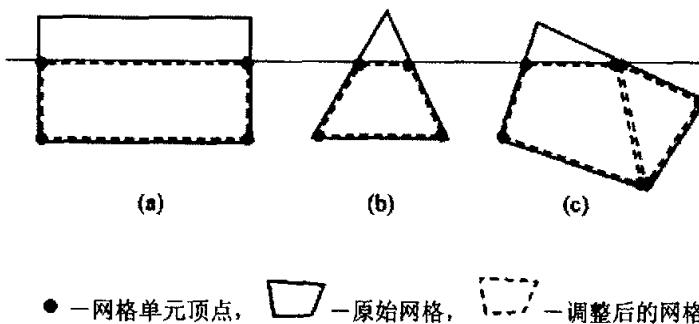


图 3.6 静水面网格单元的调整

潮流电站载体具有对称性,在 Prefem 模块中对潮流电站的四分之一部分建立面元模型,然后将接口文件导入 HydroD,在 HydroD 的三维可视窗口中 70kW 和 40kW 潮流电站的水动力模型分别如图 3.7 和 3.8 所示。

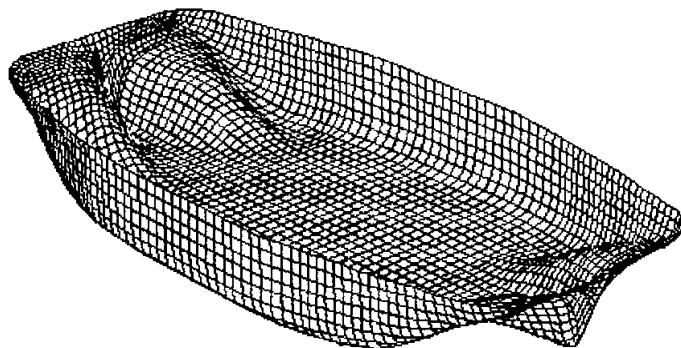


图 3.7 70kW 潮流电站的水动力模型

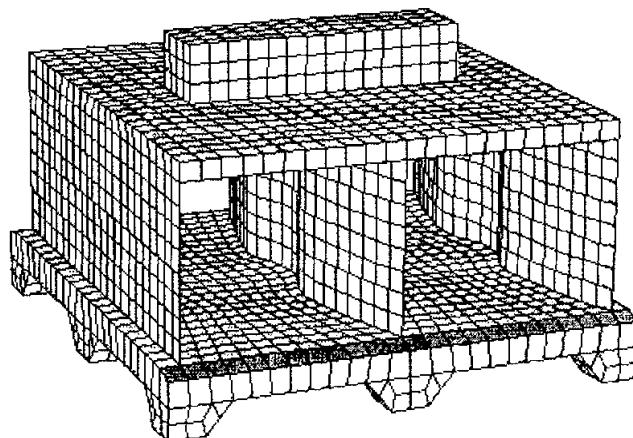


图 3.8 40kW 潮流电站的水动力模型

3.2.3 波浪力和运动计算结果

图 3.9~图 3.32 为潮流电站在规则波中受力和运动的计算结果。横坐标为波浪频率，纵坐标为波浪力或运动响应的幅值，其中力的单位为 N ，力矩单位为 $N \cdot m$ ，运动响应单位为 m 和 rad ，频率单位为 rad/s 。由于两个电站均前后对称、左右对称，所以计算选取的浪向角为 $0^\circ \sim 90^\circ$ ，间距 15° ；选取波浪的频率为 $0.1 \sim 2.0$ ，间距 0.1 。

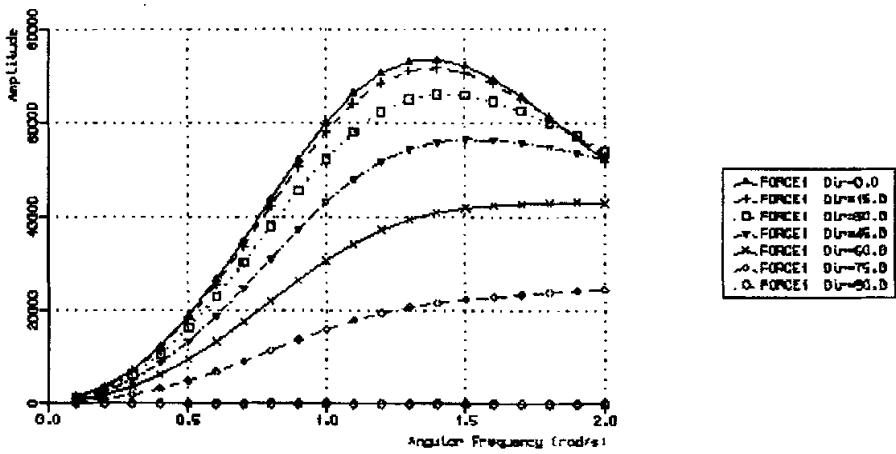


图 3.9 70kW 潮流电站的波浪力 F_1 幅值随频率的变化

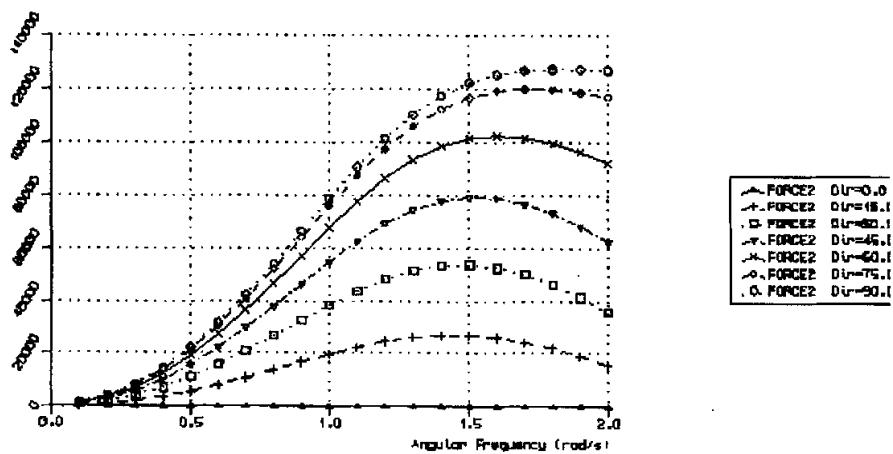


图 3.10 70kW 潮流电站的波浪力 F_2 幅值随频率的变化

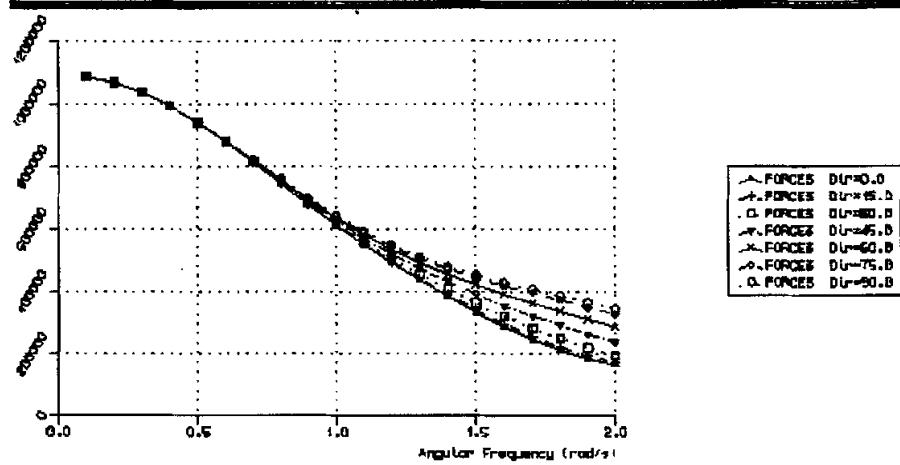


图 3.11 70kW 潮流电站的波浪力 F_3 幅值随频率的变化

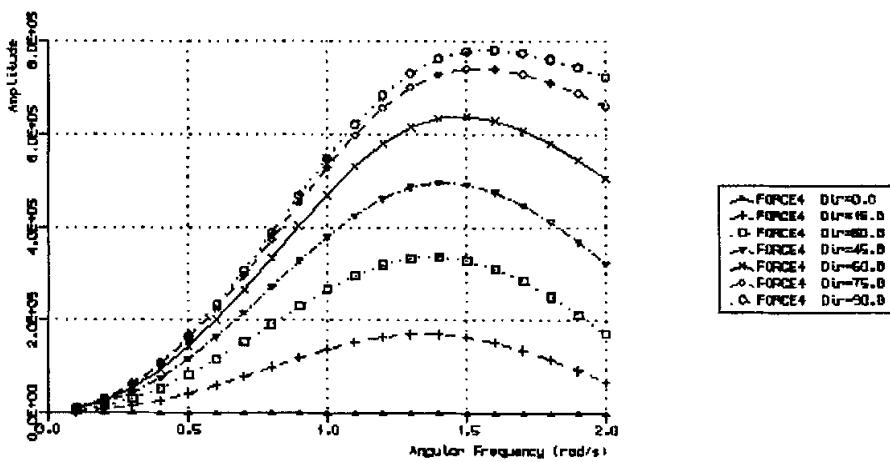


图 3.12 70kW 潮流电站的波浪力 F_4 幅值随频率的变化

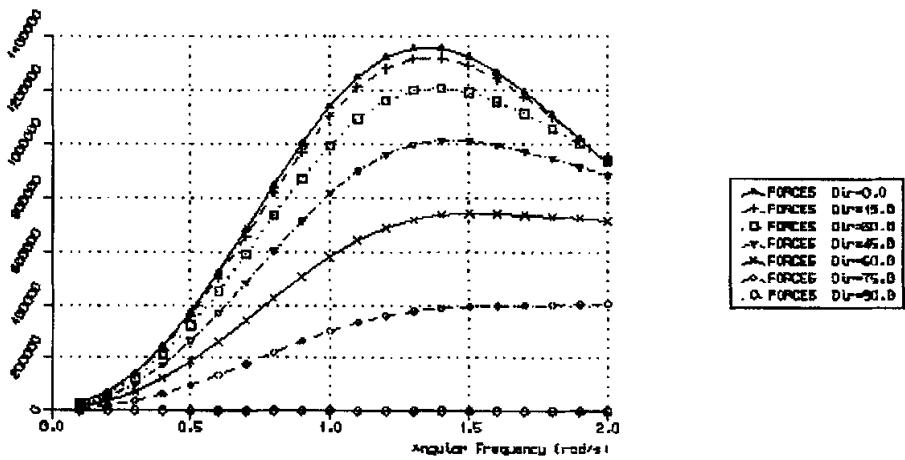


图 3.13 70kW 潮流电站的波浪力 F_5 幅值随频率的变化

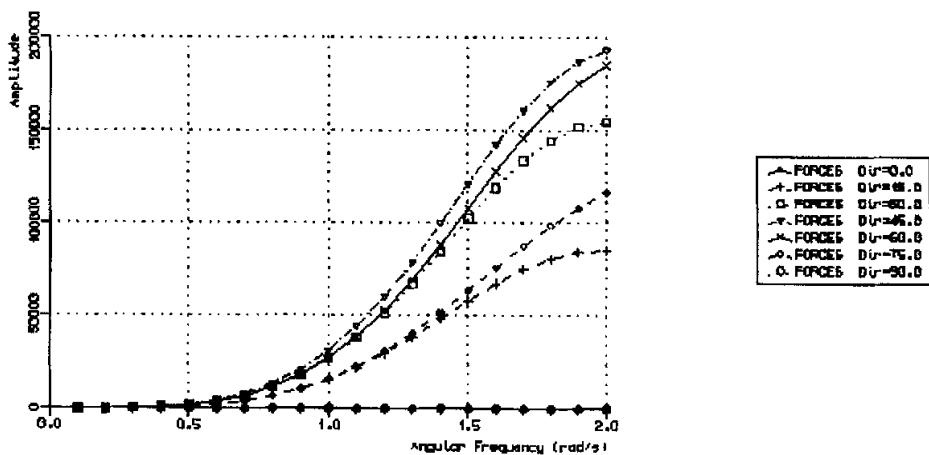


图 3.14 70kW 潮流电站的波浪力 F_6 幅值随频率的变化

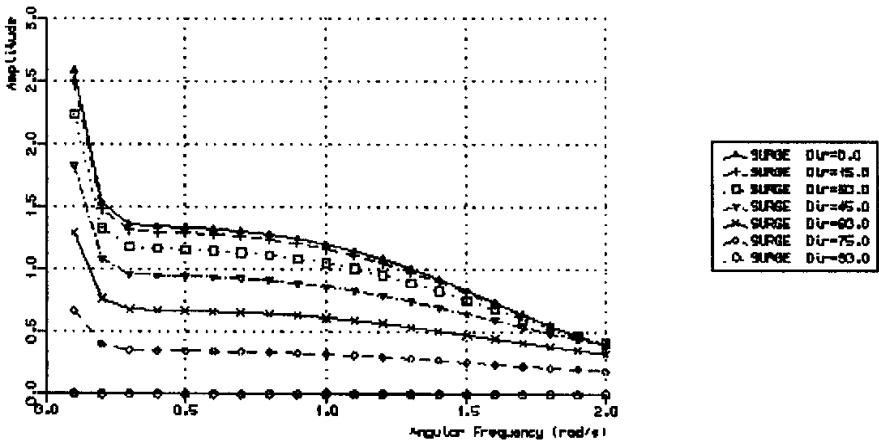


图 3.15 70kW 潮流电站的纵荡幅值随频率的变化

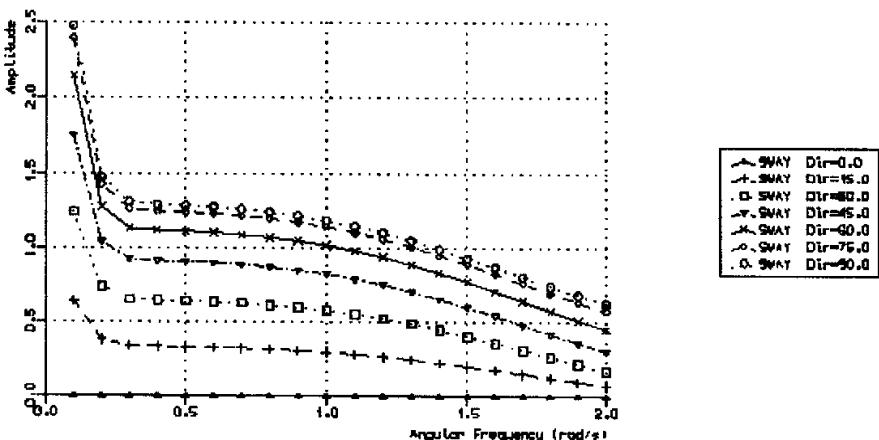


图 3.16 70kW 潮流电站的横荡幅值随频率的变化

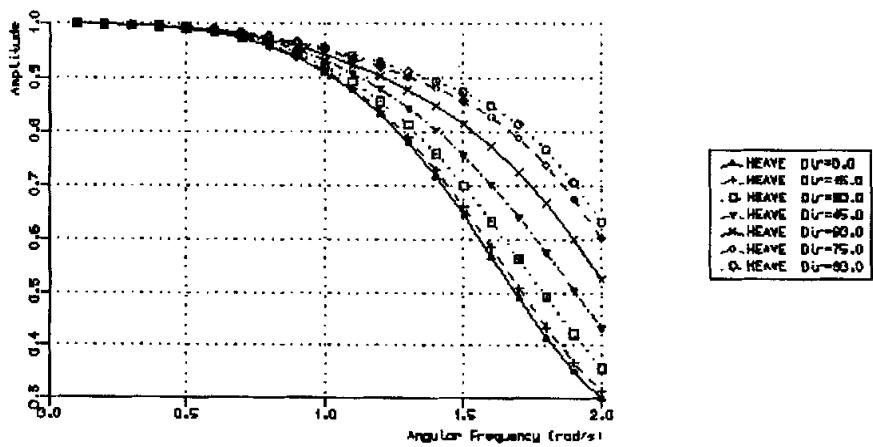


图 3.17 70kW 潮流电站的垂荡幅值随频率的变化

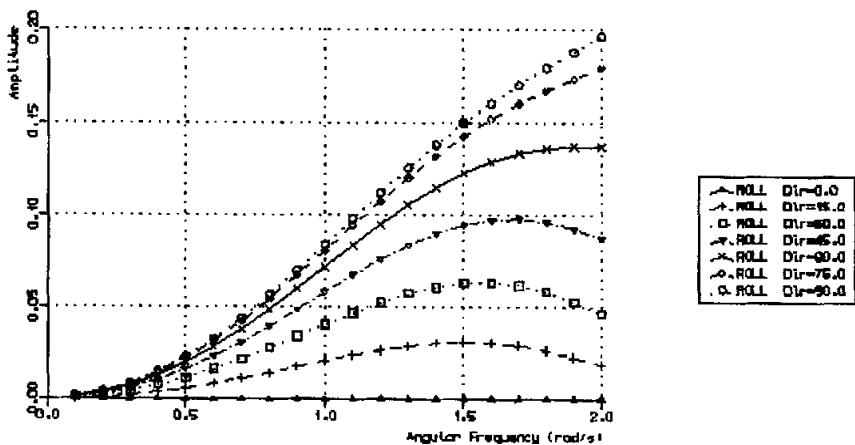


图 3.18 70kW 潮流电站的横摇幅值随频率的变化

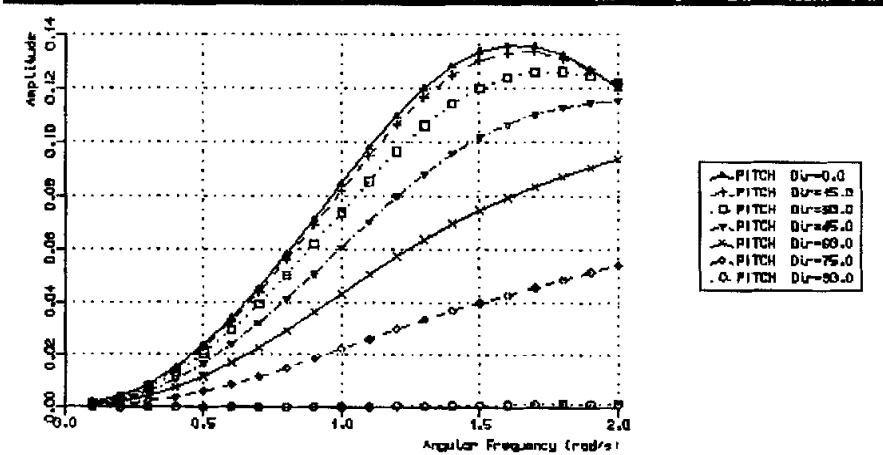


图 3.19 70kW 潮流电站的纵摇幅值随频率的变化

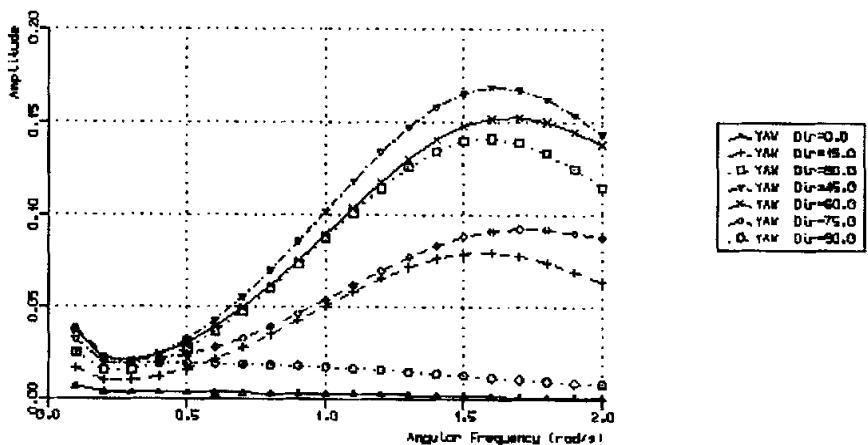


图 3.20 70kW 潮流电站的摇航幅值随频率的变化

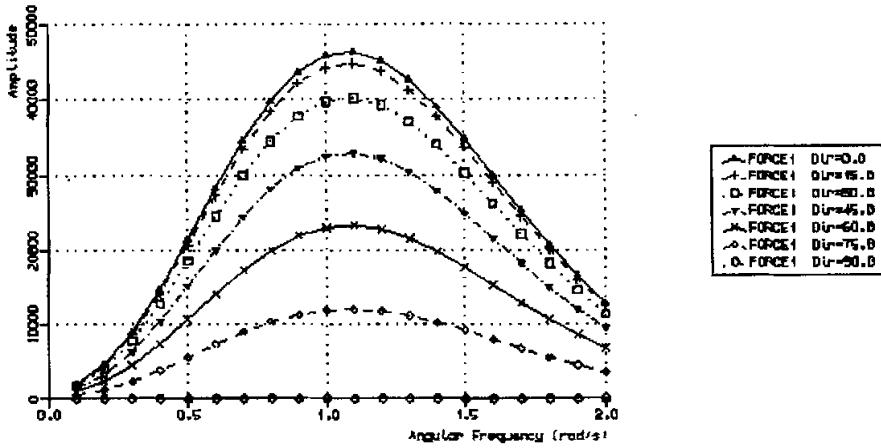


图 3.21 40kW 潮流电站波浪力 F_1 幅值随频率的变化

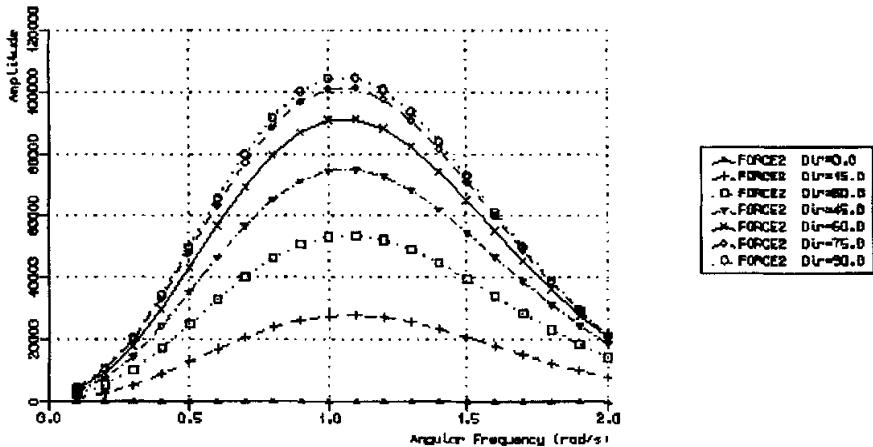


图 3.22 40kW 潮流电站波浪力 F_2 幅值随频率的变化

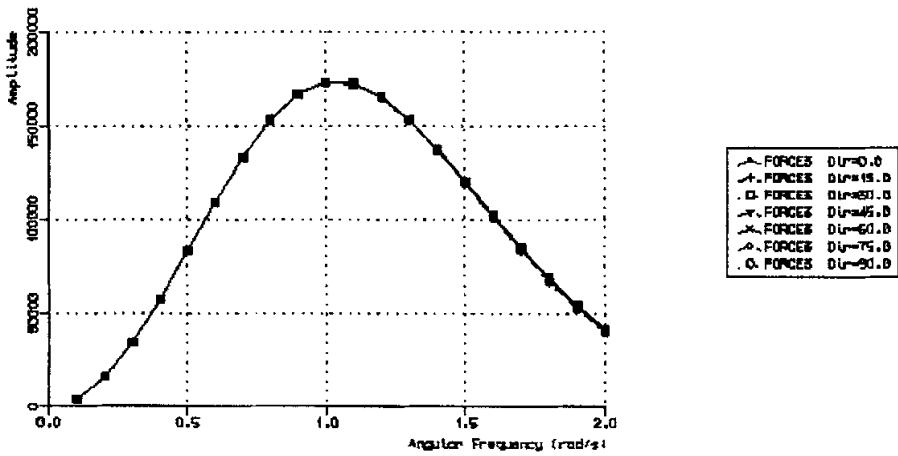


图 3.23 40kW 潮流电站波浪力 F_3 幅值随频率的变化

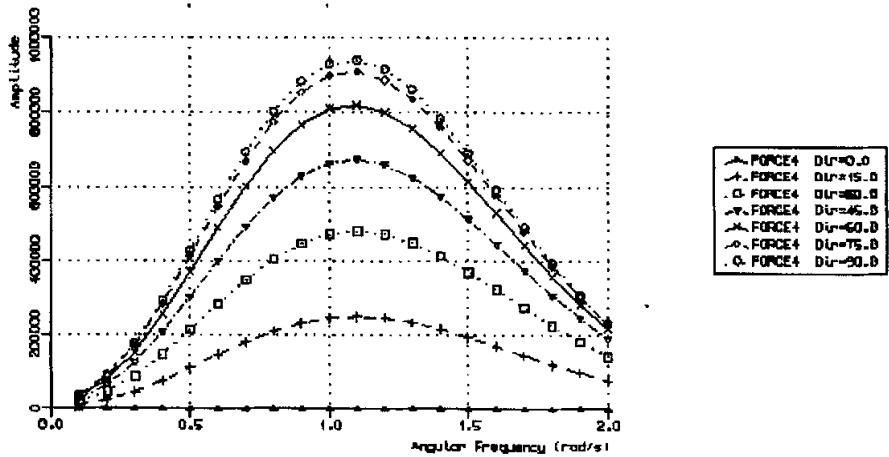


图 3.24 40kW 潮流电站波浪力 F_4 幅值随频率的变化

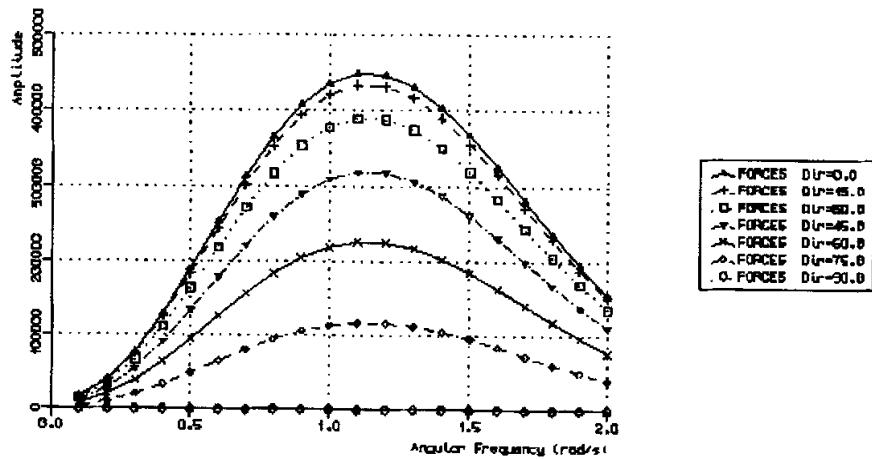


图 3.25 40kW 潮流电站波浪力 F_5 幅值随频率的变化

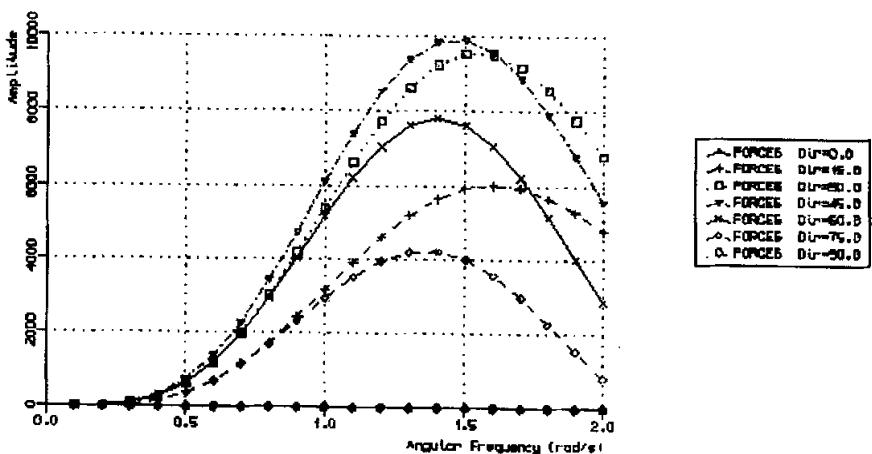


图 3.26 40kW 潮流电站波浪力 F_6 幅值随频率的变化

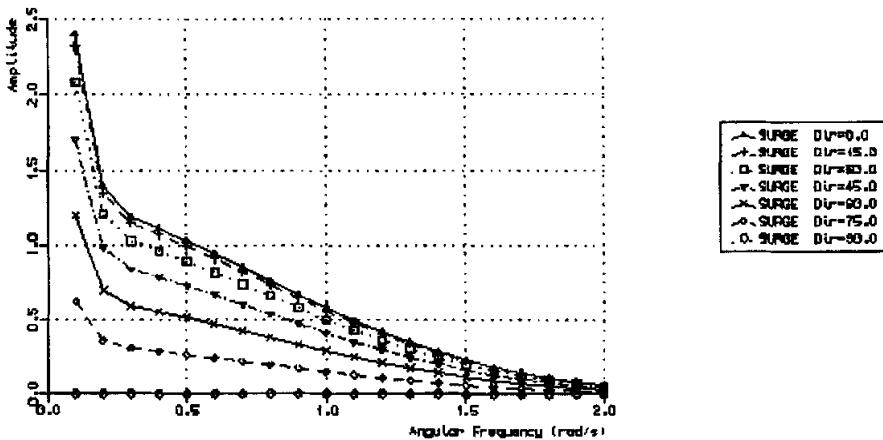


图 3.27 40kW 潮流电站纵荡幅值随频率的变化

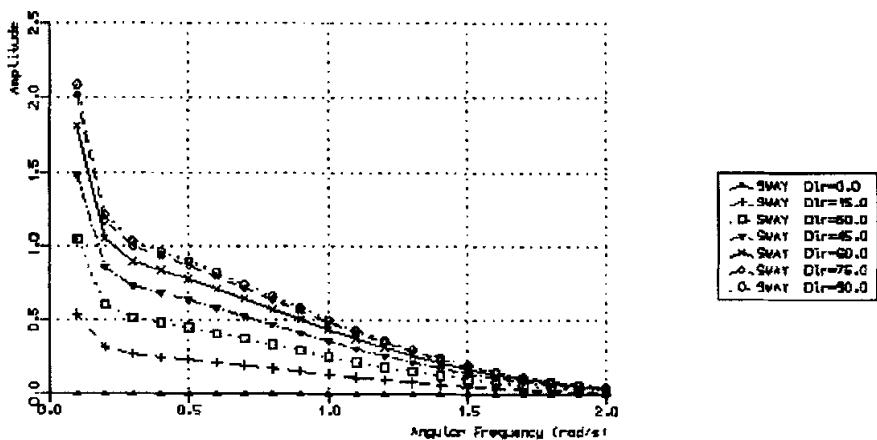


图 3.28 40kW 潮流电站横荡幅值随频率的变化

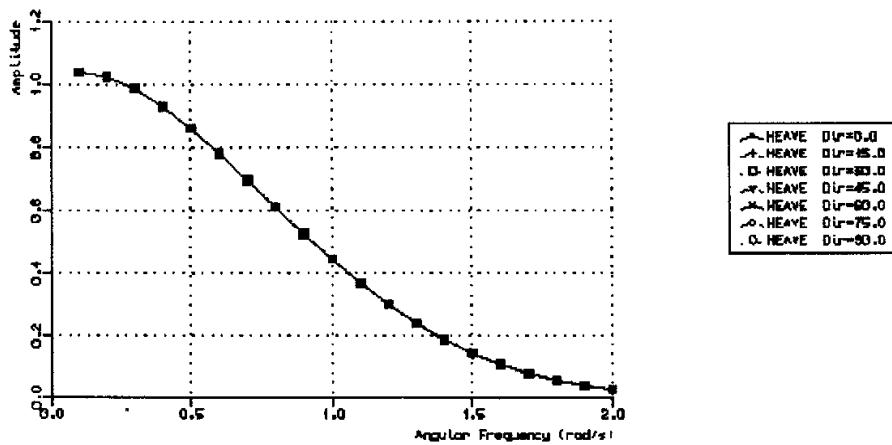


图 3.29 40kW 潮流电站垂荡幅值随频率的变化

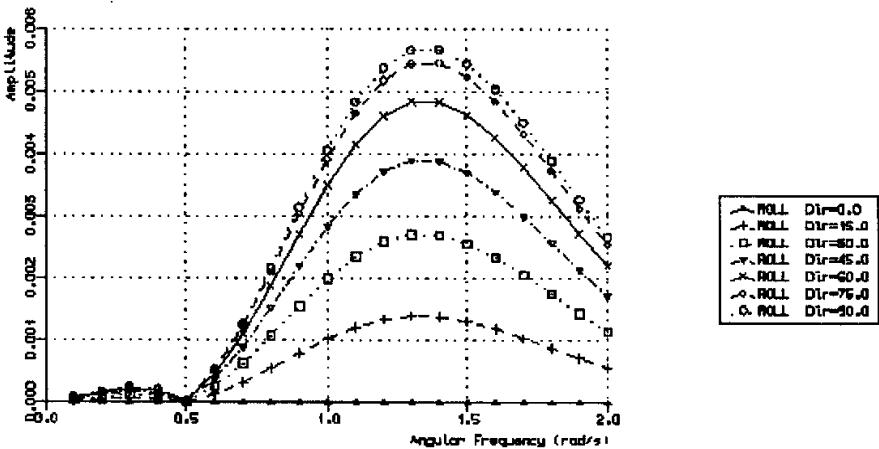


图 3.30 40kW 潮流电站横摇幅值随频率的变化

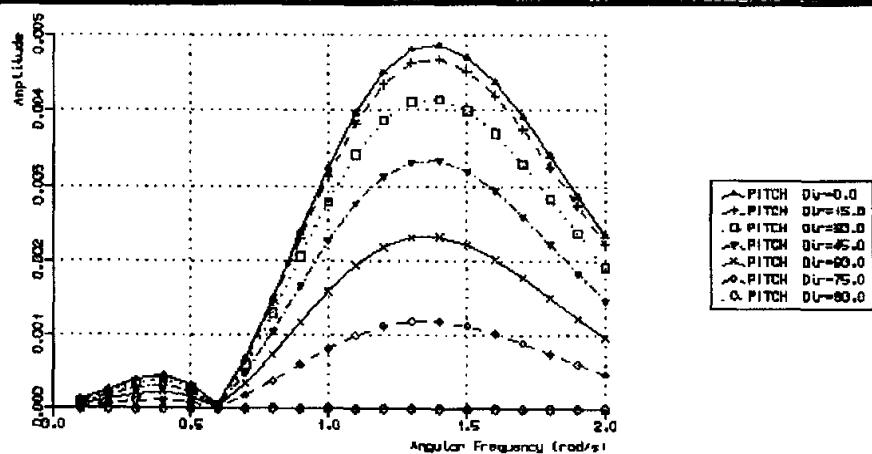


图 3.31 40kW 潮流电站纵摇幅值随频率的变化

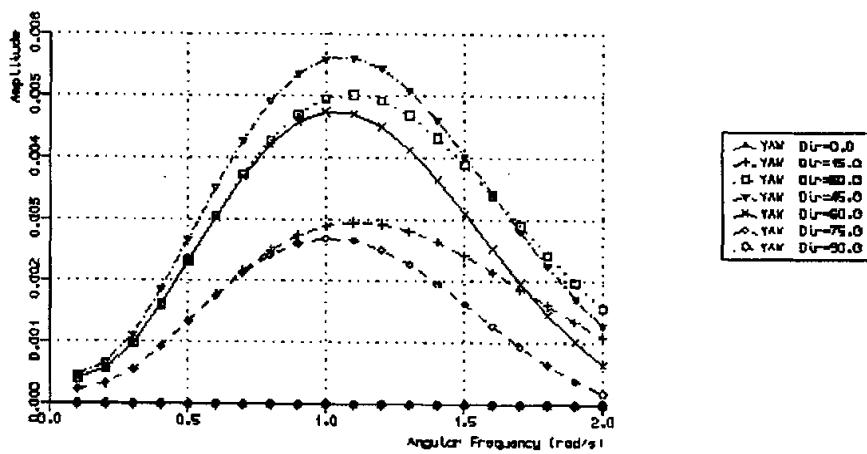


图 3.32 40kW 潮流电站摇船幅值随频率的变化

由图 3.9—3.32 可见，在浪向角为 0° 时（波浪沿潮流电站纵向），潮流电站受到的横向波浪力（矩）很小，对应的运动响应也几乎为零，而纵向力（矩）要大得多，运动响应幅值也较大；在浪向角为 90° 时（波浪沿潮流电

站横向),潮流电站受到的纵向波浪力(矩)很小,对应的运动响应也几乎为零,而横向力(矩)和垂向力要大得多,运动响应幅值也较大。

3.3 本章小结

本章主要介绍了浮体在规则波中运动的三维频域势流理论和 SESAM 软件在频域势流理论计算中的应用,给出了在横浪情况下浮体受到的波浪力和运动响应的计算结果。

第4章 锚泊系统设计分析的基本原理

4.1 环境载荷与运动

设计一个令人满意的浮式离岸结构的锚泊系统是相当复杂的，因为它是非线性动力学的问题。作用在被系泊结构物上的环境载荷有振荡波力，还有比波频低的多的风、流和波浪漂移力。这些近乎定常的风、流和波浪漂移力会引起被系物的自然位置移动，并在平衡位置由于波浪作用而振荡。因而潮流电站在工作海域受到的环境载荷以及在波浪激励力和定常力共同作用下的运动是锚泊系统设计分析的前提。

4.1.1 风载荷

就像其它环境现象一样，风具有随机性，它与时间，位置密切相关。通常认为它在速度和方向上有相当的波动，通常的气象学中，总是将风速用某一时间内的平均值表示。比起波浪周期，平均风速变化很小，围绕平均值的波动将对结构产生动态力，但是在考虑浮体动力学行为时，仅考虑大小为定常的风速对结构产生不变的力和力矩。

风的作用有两方面：(1) 暴露在空气中的结构上的风力，它由周围空气流引起，确定这些力需要局部风速资料；(2) 水面以上的风产生的力，会对静水面产生扰动，从而产生波和流，要确定风的这些效应，必须知道更大海域的风、暴条件。这里暂不考虑风引起的波流的产生机理，而将波和流的影响分开考虑。一般用静水面以上某一高度有关的平均速度来定义局部风速，常取 10 米作为标准高度。已知风速时，浮体受到的风力为

$$\bar{F}^{wi} = C^{wi}(\alpha) \bar{V}^2$$

其中， C^{wi} 是随风向而变的风力系数， α 为风相对于船的方向， \bar{V} 为平均风速。 C^{wi} 一般根据模型试验得到，在初步设计阶段可以根据 API 规范得到风力系数的表达式^[38]

$$C^{cu}(\alpha) = 0.615 \sum_{j=1}^n (C_s C_h A_j(\alpha))$$

式中, $A_j(\alpha)$ 为风向角为 α 时第 j 个受风面积在风速方向的投影, C_s 为形状系数, C_h 为高度系数。将风力沿船的纵向和横向分解可以得到船舶受到的纵向风力、横向风力和摇摆风力矩。

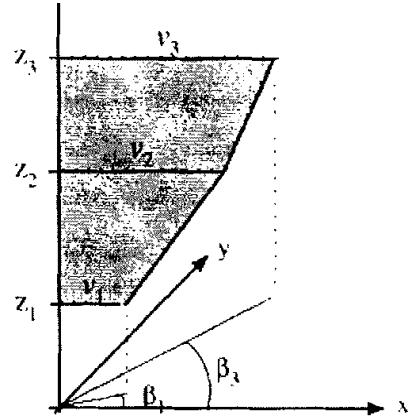
4.1.2 海流载荷

海流一般被假设为只有定常水平速度的向量。通过定义不同水深处的流速, 可以得到流速分布图。这些速度向量的方向可能是各不相同的, 如图 4.1 所示。计算时利用线性插值求解给定水深处的流速。

已知流的速度时, 浮体受到的流力为:

$$\begin{aligned} F_i^{cu} &= C_{Li}^{cu}(\beta) V_{rel} + C_{Qi}^{cu}(\beta) V_{rel}^2 \\ V_{rel} &= \sqrt{(v_1^{cu} - v_1)^2 + (v_2^{cu} - v_2)^2} \\ \tan \beta &= \frac{v_2^{cu} - v_2}{v_1^{cu} - v_1} \end{aligned}$$

其中, $i=1,2,6$, 分别代表纵向流力、横向流力和摇摆流力矩; β 为流向角, C_{Li}^{cu} 为线性流力系数, C_{Qi}^{cu} 为二次流力系数, v_1^{cu}, v_2^{cu} 为流的速度分量, v_1, v_2 为船的纵荡和横荡速度。



4.1 海流速度分布图

流力系数也是从模型试验得到, 但在初步设计阶段, 可以忽略线性流力系数, 根据经验公式计算二次流力系数。对于 70kW 潮流电站, 本文依照中国船级社海上单点系泊装置入级与建造规范计算发电船船体吃水部分的二次流力系数^[40]

$$\begin{aligned} C_{Q1}^{cu}(\beta) &= \frac{1}{2} C_X(\beta) \rho_c T L_{BP} \\ C_{Q2}^{cu}(\beta) &= \frac{1}{2} C_Y(\beta) \rho_c T L_{BP} \\ C_{Q6}^{cu}(\beta) &= \frac{1}{2} C_{XY}(\beta) \rho_c T L_{BP}^2 \end{aligned}$$

其中 C_x 、 C_y 和 C_{xy} 分别为纵向流力系数、横向流力系数和艏摇流力矩系数, ρ_c 为海水密度, T 为吃水, L_{BP} 为两柱间长。 C_x 、 C_y 和 C_{xy} 根据流向角、水深吃水比和船艏形状等从规范提供的图表中查取。

由于 70kW 和 40kW 潮流电站都带有两个水轮机转子, 水轮机受到的流力不考虑叶片形状、旋转的影响, 而简化为两个与水轮机同直径的圆柱体进行计算。因为等直径圆柱体的受力要远大于水轮机的叶片受力面积, 因此该简化计算是可以满足设计需要的。圆柱体流力系数的计算采用以下公式

$$C_Q^a = C_D \frac{1}{2} \rho_c D H \cos(\beta)$$

$$C_Q^{ca} = C_D \frac{1}{2} \rho_c D H \sin(\beta)$$

其中 C_D 为圆柱体的阻力系数, 这里取 1.2; D 为水轮机转子的直径, H 为水轮机高度。

由于 40kW 潮流电站不同于一般船形, 而更像是一个半潜式平台, 由于沉箱、浮箱和机舱都近似于长方体形, 这里采用 API 规范附录 A 中推荐的算法计算这三部分结构上的流力系数^[38], 即

$$C_Q^a = C_{ss} (C_d A_c + C_d A_f)$$

其中, $C_{ss} = 515.62 Nsec^2/m^4$, A_c 为柱形构件水下部分在来流方向上的所有投影面积之和, A_f 为平板形构件水下部分在来流方向上的所有投影面积之和, C_d 分别为两种构件的阻力系数, 对于板形构件 C_d 取 1.5。

由于 40kW 潮流电站还有三个曲面形状的导流罩, 计算导流罩受到的流力时, 将导流罩近似为 NACA 机翼, 然后根据已知的 NACA 机翼升阻力系数和俯仰力矩系数计算导流罩受到的升力和阻力和俯仰力矩, 再将升力和阻力对电站坐标系的 x 轴和 y 轴进行分解得到电站的纵向流力、横向流力和流力矩。

4.1.3 谱分析法与波浪载荷

船在海上的摇荡运动主要是由海浪引起的, 而实际海面上的风浪是极其不规则的, 为了预报船舶在海浪上的受力和运动, 必须首先对海浪进行研究。由于海浪是极不规则的随机过程, 由海浪引起的船舶摇荡运动也是一个不规则的随机过程。本节采用谱分析的方法来研究海浪与船舶运动之间的相互关

系^[33]。

1 海浪谱定义

风浪是属于自然界中的一种随机现象，它的基本特征是不规则，例如，给定一定的风速和一定的海区，波浪的情况也不是完全可以确定的，它的波高和波长仍然会以任意的规律变化着。对于这种情况，要去寻找在某一时刻一定地点的具体风浪的数值（瞬时波高或波长）是不可能也是无意义的。但是，通过大量观测、记录和分析可以发现，海浪的统计值是稳定的，只要掌握了海浪的这种统计值，就能从总体上掌握不规则海浪的特性。

为了便于讨论，一般假定不规则波是由许多不同波长，不同波幅和相位随机的微幅单元规则波叠加而成的。不规则海浪的波面升高的数学表示式可以写成

$$\zeta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \zeta_{an} \cos(K_n \xi - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (4-1)$$

其中， ζ_{an} 是单元规则波的振幅，假定是微幅的； K_n 是单元规则波的波数； ω_n 是单元规则波的频率； ε_n 是单元规则波的相位。

因为不规则波是由单元规则波叠加而成，所以不规则波的能量等于单元规则波的能量之和。在频率区间 ω_n 至 $\omega_n + \Delta\omega$ 之间的单元波在单位波面积中的能量为 $\frac{1}{2} \rho g \sum_{\Delta\omega} \zeta_{an}^2$ ，如果这个能量用 $\rho g S_{\zeta}(\omega_n) \Delta\omega$ 表示，则

$$\frac{1}{2} \rho g \sum_{\Delta\omega} \zeta_{an}^2 = \rho g S_{\zeta}(\omega_n) \Delta\omega \quad (4-2)$$

于是

$$S_{\zeta}(\omega_n) = \frac{\frac{1}{2} \sum_{\Delta\omega} \zeta_{an}^2}{\Delta\omega} \quad (4-3)$$

当频率区间无限缩小，在此区间的单元波趋于确定频率 ω_n 的单元波，有

$$S_{\zeta}(\omega_n) = \frac{\frac{1}{2} \zeta_{an}^2}{\Delta\omega}$$

不失一般性，去掉标号 n ，上式可写成

$$S_\zeta(\omega) = \frac{1}{2} \frac{\zeta_a^2}{\Delta\omega} \quad (4-4)$$

由上式可以看出, $S_\zeta(\omega)$ 正比于单元波的能量与频率区间的比值, 可以想象为能量分布的密度, 表征了不规则波的能量在不同频率单元波上的分布情况, 称为海浪谱密度函数。谱密度随频率变化的曲线称为谱密度曲线, 它表明了组成不规则波的哪些频率的单元波起主要作用, 哪些频率的单元波起次要作用, 清楚地表明了不规则波的内部结构, 因此海浪谱是描述海浪的强有力工具。

为了估计船舶在不规则波中摇荡的统计值, 首先要对航行海区的海浪谱进行估算。海浪谱的理论计算是复杂的, 为此, 海洋和造船工作者根据大量的海上观察和理论分析得到了各种海浪谱的计算公式, 供实践使用, 见附录 B。

2 谱分析法

海浪可以用海浪谱来描述, 由海浪引起的船舶的不规则运动也可以用运动谱来描述, 如果能建立海浪谱和运动谱之间的关系, 那么船舶的不规则运动就可以确定了。处理不规则运动问题中常用的一种方法就是谱分析法, 它通过对随机取样在频域区域内的谱分析, 对船舶的不规则运动进行预报。

航行于海上的船舶, 由于海浪作用使船舶产生不规则的摇荡运动, 这种现象可以用能量转换器的概念加以解释。如果不规则波 $\zeta(t)$ 作为能量转换器的输入, 那么通过作为能量转换器的船体的 S 的作用, 将其能量传递给作为输出的摇荡 $Y(t)$, 如图 4.2 所示。把这种关系用数学关系式表示为

$$Y(t) = L[\zeta(t)] \quad (4-5)$$

其中 L 表示将 $\zeta(t)$ 转换为 $Y(t)$ 的算子。

根据叠加原理, 若风浪被认为是由一系列单元波叠加而成的, 则船舶的摇荡运动也可以看成是由一系列单元波引起的单元摇荡的叠加。某一确定频率的单元波的波面升高可以写成:

$$\zeta_n = \zeta_{an} \cos(K_n \xi - \omega_n t + \varepsilon_n) \quad (4-6)$$

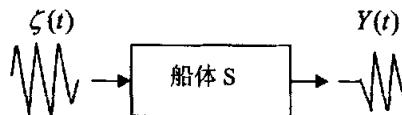


图 4.2 波浪谱与运动谱的关系

在确定单元波的作用下, 船体把作为输入的单元波进行转换, 产生相同频率的单元振荡。而单元摇荡的幅值应乘以一个与船形有关而与时间无关的因子 $Y_{y\zeta}(\omega_n)$, 相位由 ε_n 变为 ε_{n1} , 则单元摇荡可以写成:

$$\begin{aligned} Y_n = L[\zeta_n] &= Y_{y\zeta}(\omega_n) \zeta_{an} \cos(K_n \xi - \omega_n t + \varepsilon_{n1}) \\ &= y_{an}(\omega_n) \cos(K_n \xi - \omega_n t + \varepsilon_{n1}) \end{aligned} \quad (4-7)$$

其中

$$y_{an} = Y_{y\zeta}(\omega_n) \zeta_{an} \quad (4-8)$$

y_{an} 表示单元波引起的单元摇荡的幅值。

船舶任意时刻的摇荡可以认为是个单元摇荡的叠加, 即

$$Y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} y_{an}(\omega_n) \cos(K_n \xi - \omega_n t + \varepsilon_{n1}) \quad (4-9)$$

根据海浪谱的定义, 与此类似地定义船舶摇荡的运动谱 $S_{y\zeta}(\omega)$ 为

$$S_{y\zeta}(\omega) = \frac{1}{2} \frac{y_a^2}{\Delta\omega} \quad (4-10)$$

把式(4-8)代入式(4-10)得

$$S_{y\zeta}(\omega) = Y_{y\zeta}^2(\omega) \frac{\frac{1}{2} \zeta_a^2}{\Delta\omega}$$

定义 $S_{\zeta}(\omega) = \frac{1}{2} \zeta_a^2 / \Delta\omega$, 则

$$S_{y\zeta}(\omega) = Y_{y\zeta}^2(\omega) \cdot S_{\zeta}(\omega) \quad (4-11)$$

式中 $Y_{y\zeta}(\omega)$ 称为频率响应函数或传递函数, $Y_{y\zeta}^2(\omega)$ 为响应幅值算子。

根据式(4-11), 当选取适当的海浪谱之后, 只要求得相应的传递函数, 便可以求得相应的船体运动。传递函数通过在规则波中的理论计算求出。

3 波浪载荷

波浪与系泊船之间相互作用有三种力作用在系泊船上: (1) 以波浪频率振荡的一阶力, 它将引起一阶运动(也称波频运动和高频运动), 这部分载荷的计算在前一章中详述; (2) 以低于波频振荡的二阶力(也称缓变漂移力),

它将引起二阶运动(也称低频运动);(3)二阶力中的定常部分(也称平均波漂力)。

船舶在波浪中的平均波漂力为

$$\bar{F}_i^{WD} = \int_0^{\infty} 2C_i^{WD}(\omega, \alpha)S(\omega)d\omega \quad (4-12)$$

其中, i 取 1、2 和 6, 分别为纵向漂移力, 横向漂移力和摇船漂移力矩; $C_i^{WD}(\omega, \alpha)$ 是波浪相对于船成 α 角时的波浪漂移系数, 由规则波频域计算得到; $S(\omega)$ 为海浪谱。当波浪方向确定时, 根据上式计算每一个浪向下的漂移力并进行叠加, 得到平均波漂力。

缓变漂移力可以用波漂力谱表示, 波漂力谱的表达式为

$$S_{ij}^{LF}(\mu) = 8 \int_0^{\infty} C_i^{WD}(\omega + \frac{\mu}{2}, \alpha) S(\omega) S(\omega + \mu) d\omega \quad (4-13)$$

$$i, j \in \{1, 2, 6\}$$

4.1.4 波频运动

由一阶波浪力引起的波频运动, 也称高频运动, 在频域范围内使用波浪谱和六个自由度上的波浪对船舶运动的线性传递函数求解。设 $S_{\zeta}^{HF}(\omega, \beta)$ 是入射角为 β 的波浪谱密度, 则对应每一自由度有高频运动响应谱

$$S_{x_i}^{HF}(\omega) = \int_0^{2\pi} |H_i^{HF}(\omega, \beta)|^2 S_{\zeta}^{HF}(\omega, \beta) d\beta \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (4-14)$$

其中 $|H_i^{HF}(\omega, \beta)|$, $i = 1, 2, \dots, 6$ 为对应于不同浪向角 β 的传递函数, 通过线性插值规则波的计算结果得到。

4.1.5 低频运动

在低频运动分析中, 一般只考虑系泊船低频纵荡, 横荡和摇船运动, 通过在频域范围内求解线性方程

$$M\ddot{x}^{LF} + C\dot{x}^{LF} + Kx^{LF} = F^{LF} \quad (4-15)$$

得到。其中 x^{LF} 和 F^{LF} 分别为低频位置响应向量和低频载荷向量。 M 是浮体的质量矩阵, C 为 3×3 的阻尼矩阵, K 为 3×3 的刚度矩阵。

定义 S_F^{LF} 为 3×3 的低频波浪力和风力之和的能量谱密度矩阵, 则相应的 3×3 的低频响应位移的能量谱密度矩阵为

$$S_x^{LF}(\omega) = H^{LF}(\omega) S_F^{LF}(\omega) H^{LF}(\omega)^* \quad (4-16)$$

其中 $H^{LF}(\omega) = [-\omega^2 M + i\omega C + K]^{-1}$ 为矩阵转换函数。

4.2 锚泊系统的静力分析

系泊链索是一种将浮动结构物连接于锚定点或系泊点的挠性机械部件, 不能承受剪应力或弯矩。系泊链索系统的力学分析总起来说大致可分成静力分析和动力分析两大部分。静力分析研究在稳态条件下链索的载荷和系统的平衡状态, 预估链索的几何形状及应力分布。动力分析则研究在不定常外界环境诱导载荷作用下链索的动力响应, 以判断设计的系统是否稳定, 链索的应力是否在许用应力范围之内, 系泊系统是否能满足特定的系泊要求等。静力分析方便、快捷, 多在设计初期采用。

4.2.1 全链的悬链线方程

如图 4.3 所示, 设海底是水平的, 水深为 h ; 链索锚固于海底的 o 点, 在该处链索与海底相切。设链索位于一垂直平面内, 不考虑链索的三维变形; 海流没有垂向分量, 水平流速亦位于 (或平行于) 链索所在的平面内, 流速的大小恒定, 且不随水深变化^[39]。

作用于链索某一微元 dl 上的外力如图 4.4 所示。其中 D 和

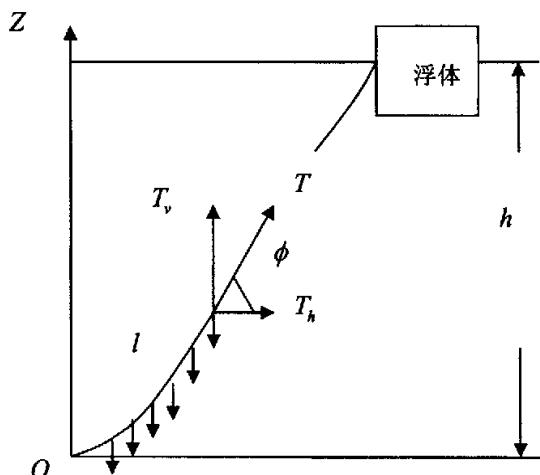


图 4.3 悬链线示意图

F 分别为沿链索元垂向和切向的单位长度流体作用力； T 为链索张力； ϕ 为链索元与水流方向的夹角，称为链索角； dT 和 $d\phi$ 分别为链索元 dl 上张力 T 和链索角 ϕ 的变化量； w 为单位长度链索的水中重量。由于链索元 dl 两端事实上不受流体压力，而在求链索元浮力时按其排水体积计算，两端流体压力也已经计入，故在链索元受力分析时应引进修正项，即在链索元上下两端张力中分别扣除 $-\rho g A(h-z-dz)$ 和 $-\rho g A(h-z)$ ，这里 A 为链索的横截面积。由图 4.4 易见，当这些作用力静平衡时，有下列关系式：

在链索元的法线方向上

$$Td\phi - \rho g A(h-z)d\phi = (w \cos \phi + D)dl$$

在切线方向上

$$dT - \rho g A dz = (w \sin \phi - F)dl$$

上两式中，认为沿链索元张力和链索角的变化 dT 、 $d\phi$ 均是小量的前提，且略去了含有诸如 $dTd\phi$ 、 $dzd\phi$ 等高阶小量的项。

引入表观张力 $T' = T - \rho g A(h-z)$ ，上两式可分别记作

$$Td\phi = (w \cos \phi + D)dl \quad (4-17)$$

$$dT = (w \sin \phi - F)dl \quad (4-18)$$

以上两个链索平衡方程式是非线性的，不可能找到显式解。但在某些特殊情况下，寻求显式解是可能的。

若链索由较重的材质制成或者流速较小（小于 2-6 m/s），作用力将以重力为主，流体作用力可以忽略。在本论文考虑的情况下，因为我们采用的是锚链系泊，锚链的重量较大，且工作环境的流速比较低，可以认为流体作用力影响不大。式(4-17)和(4-18)可以简化为

$$Td\phi = w \cos \phi dl \quad (4-19)$$

$$dT = w \sin \phi dl \quad (4-20)$$

两式相除即有

$$\frac{dT}{T} = \tan \phi d\phi$$

对此式在 $\phi = \phi_0$ 至 $\phi = \phi$ 的区间内积分，得

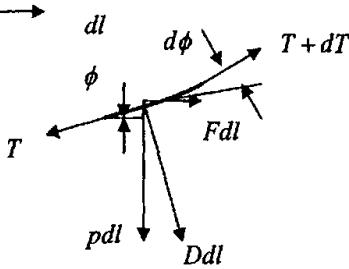


图 4.4 链索微元受力

$$\ln \frac{T}{T_o} = \int_{\phi_o}^{\phi} \operatorname{tg} \phi d\phi = \ln \sec \phi \Big|_{\phi_o}^{\phi} = \ln \frac{\cos \phi_o}{\cos \phi}$$

即

$$T \cos \phi = T_o \cos \phi_o \quad (4-21)$$

或者

$$T = T_o \frac{\cos \phi_o}{\cos \phi} \quad (4-22)$$

其中 T_o 为链索在链索角为 ϕ_o 处的张力。由式(4-21)可知，链索上任意点处张力的水平分量为常数，它等于水面处的链索水平张力 T_h ，该处链索的表观张力与实际张力相等。

将式(4-22)代入(4-19)，并由从原点量起链长为 l_o 的点至链长为 l 的点积分，并设两点处的链索角分别为 ϕ_o 和 ϕ ，则有

$$l - l_o = \frac{1}{w} \int_{\phi_o}^{\phi} \frac{T_o \cos \phi_o}{\cos^2 \phi} d\phi = \frac{T_o \cos \phi_o}{w} (\operatorname{tg} \phi - \operatorname{tg} \phi_o) = \frac{T_h}{w} (\operatorname{tg} \phi - \operatorname{tg} \phi_o) \quad (4-23)$$

沿链索有 $dx = \cos \phi dl$ ，代入式(4-22)并积分，则有

$$x - x_o = \frac{1}{w} \int_{\phi_o}^{\phi} \frac{T_o \cos \phi_o}{\cos \phi} d\phi = \frac{T_h}{w} \left[\ln \left(\frac{1}{\cos \phi} + \operatorname{tg} \phi \right) - \ln \left(\frac{1}{\cos \phi_o} + \operatorname{tg} \phi_o \right) \right] \quad (4-24)$$

同样，因 $dz = \sin \phi dl$ ，代入式(4-22)积分则有

$$z - z_o = \frac{1}{w} \int_{\phi_o}^{\phi} \frac{T_o \cos \phi_o \sin \phi}{\cos^2 \phi} d\phi = \frac{T_h}{w} \left[\frac{1}{\cos \phi} - \frac{1}{\cos \phi_o} \right] \quad (4-25)$$

式(4-23)至(4-25)分别为链索上任意两点间链长、水平距离和垂直距离的表达式。若取积分的下限在原点处，则 $x_o = z_o = l_o = \phi_o = 0$ ，由式(4-24)得

$$\frac{w}{T_h} x = \ln \left(\frac{1 + \sin \phi}{\cos \phi} \right)$$

或记 $a = T_h/w$ ， a 称为悬链线参数，是一个无量纲量，则上式为

$$\frac{x}{a} = \ln \left(\frac{1 + \sin \phi}{\cos \phi} \right)$$

由此关系式不难得到

$$sh \frac{x}{a} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + \sin \phi}{\cos \phi} - \frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi} \right) = \operatorname{tg} \phi$$

$$ch \frac{x}{a} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 + \sin \phi}{\cos \phi} + \frac{\cos \phi}{1 + \sin \phi} \right) = \frac{1}{\cos \phi}$$

于是, 式(4-23)和(4-25)分别可写作

$$l = ash \frac{x}{a} \quad (4-26)$$

$$z = a \left(ch \frac{x}{a} - 1 \right) \quad (4-27)$$

这就是悬链线方程。

按式(4-22), 链索上任意一点的张力可表达为

$$T = T_h / \cos \phi = T_h ch \frac{x}{a} = T_h \left(\frac{z}{a} + 1 \right) = T_h + wz \quad (4-28)$$

张力的垂直分量 T_v 为

$$T_v = T \sin \phi = T_h \operatorname{tg} \phi = T_h sh \frac{x}{a} = wl$$

式(4-28)给出的是表观张力, 链索中的实际张力应为:

$$T = T_h + wz + \rho g A (h - z) \quad (4-29)$$

上述悬链线法的推导, 是建立在与重力相比流体作用力可以忽略基础上的。如果流体作用力的影响重要的话, 链索平衡方程式(4-17)和(4-19)不能再显式积分, 必须采用数值积分法(链索函数法)。很多文献都表示, 在设计初期阶段, 悬链线法可以给出相当不错的结果, 更有其估算简便的优点。

4.2.2 链加重块组合悬垂线的公式

在锚链定位系统中, 链索的组成一般有全链(或全索)、索链组合及索链加重块组合等多种形式。据研究表明, 在所有情况下, 组合系统中链索最大张力都比全链系统小。如果索链加重块组合系统设计适当, 可以比全链系统在预张力较小的情况下取得较大的回复力, 从而在所要求的偏移范围内, 不仅增进了锚泊系统的定位能力, 而且能减小系统中索链的受力和系统的重量, 并能降低成本。链加重块组合有一个重块、多个重块等形式, 由于本文涉及

的潮流电站工作水域吃水较浅, 故在这里只讨论链加一个重块的情况, 如图 4.5 所示。

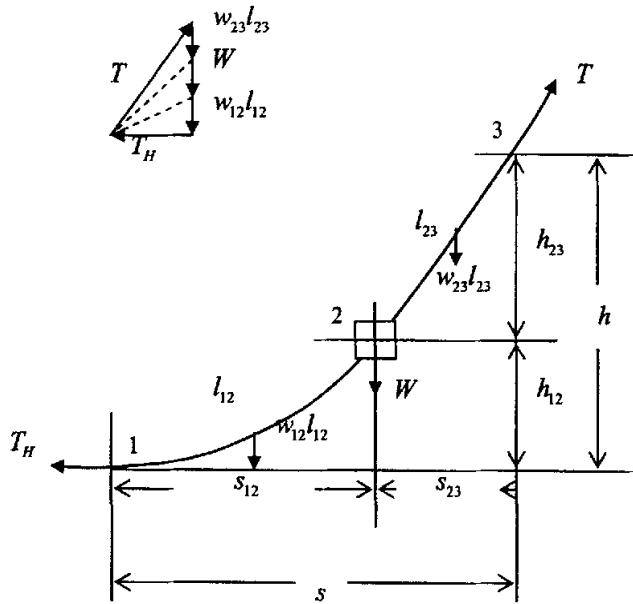


图 4.5 链加重块悬垂线示意图

以等 w (索链单位长度重量) 悬垂线理论为基础^[39], 可导出链加重块组合悬链线的有关公式如下:

$$T^2 = T_H^2 + (w_{23}l_{23} + W + w_{12}l_{12})^2 \quad (4-30)$$

$$l = l_{12} + l_{23} \quad (4-31)$$

$$h = \sqrt{\left(l_{23} + \frac{W}{w_{23}} + \frac{w_{12}l_{12}}{w_{23}}\right)^2 + \left(\frac{T_H}{w_{23}}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{W}{w_{23}} + \frac{w_{12}l_{12}}{w_{23}}\right)^2 + \left(\frac{T_H}{w_{23}}\right)^2} + \sqrt{l_{12}^2 + \left(\frac{T_H}{w_{12}}\right)^2} - \frac{T_H}{w_{12}} \quad (4-32)$$

$$s = \frac{T_H}{w_{23}} \left[sh^{-1} \left(\frac{w_{23}l_{23} + W + w_{12}l_{12}}{T_H} \right) - sh^{-1} \left(\frac{W + w_{12}l_{12}}{T_H} \right) \right] + \frac{T_H}{w_{12}} \times sh^{-1} \left(\frac{w_{12}l_{12}}{T_H} \right) - \frac{T_H}{w_{12}} \times sh^{-1} \left(\frac{w_{12}l_{12}}{T_H} \right) \quad (4-33)$$

$$l - s = l_{12} + l_{23} - \left[\operatorname{sh}^{-1} \left(\frac{w_{23}l_{23} + W + w_{12}l_{12}}{T_H} \right) + \operatorname{sh}^{-1} \left(\frac{W + w_{12}l_{12}}{T_H} \right) \right] \quad (4-34)$$

式中 w_{23} , l_{23} 是上段锚链的单位长度在水中的重量与悬垂长度; w_{12} , l_{12} 是下段锚链的单位长度在水中的重量与悬垂长度; W 为组合锚链中的重块的重量。上述公式也适用于其他情况, 即当 $W \neq 0$, $l_{12} = 0$ 时, 是用于桩锚的公式; 当 $W = 0$, $l_{12} = 0$ 时, 是全链(全索)的公式。 W 一般取为单根锚链总重的 $1/2-1/3$, 在本文的计算中均取为 $1/3$ 。

4.3 锚泊系统的动力分析

传统上, 系泊缆索的动力性能并未被认为是系泊系统实际设计中的重要因素。在大多数系泊系统的力学分析中, 系泊缆索模拟为一静力部件, 即缆索力仅有端点位置、缆索力学特性和外部定常扰动所决定。为描述所系结构物运动的影响, 在大部分情况下, 采用所谓的准静态模型进行分析; 也就是说, 把各瞬时的状态看作是相应的定常状态进行静力分析, 而不计入各种动力效应, 并据此来确定系泊缆索的设计载荷。这一载荷不应超过某处缆索的断裂强度。事实上, 在准定常载荷与缆索许用强度或断裂强度之间应留有一定的裕度, 以承受附加于准定常载荷上的动力载荷, 并补偿实际缆索强度的某种不确定性的影响。

近年来, 系泊缆索动力性能的研究日益受到重视, 其中的原因是多方面的。在实践中, 人们希望降低缆索断裂的频度, 随着对近海石油工程中风险认识的增加, 可靠性评价的要求亦越来越高。同时, 现阶段系泊缆索系统往往用于永久性生产设施, 动力载荷的相对重要性(部分地由于疲劳)随着服务寿命的延长而增加。新型系泊系统的出现和新材料的采用也导致系统动力特性与传统的有较大差别。另外, 计算工具的发展使得非线性、多自由度系统动力分析的成本降低, 在设计中可以更精确地计入缆索的动力载荷。

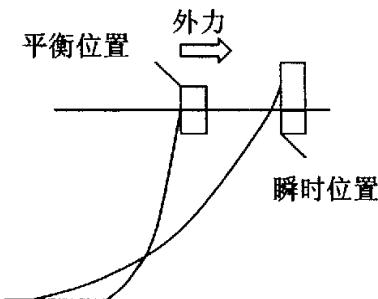


图 4.6 近海结构物系泊

图 4.6 为一近海结构物系泊的典型例子。在某一给定的静平衡位置, 结构与锚固点相对位置、缆索特性和定常外力决定了缆索的静力形态。与此同时, 缆索也将经受由结构物运动和波及流的动力效应引起的张力变化, 故而静力分析是动力分析的基础。

运动中锚链的形状取决于锚链受到的阻力和链索的惯性。准静态方法的基本假设是将锚链的形状近似为锚链链端位置的函数。将准静态的形状近似为锚链的真实形状, 锚链上任意一点的速度和加速度就可以由锚链链端的运动给出来, 这样就可以计算由阻力和惯性力引起的额外张力, 记及锚链材料的弹性效应, 对单个自由度有以下运动方程:

$$m^* \ddot{u} + c^* \dot{u} + (k_G + k_E)u = k_E x_t \quad (4-35)$$

其中, x_t 是链端的切向运动速度, u 为整根锚链的切向运动速度, 如果不计锚链的弹性, 则 x_t 和 u 是相等的, 常数 K_G 和 K_E 分别是几何刚度和弹性刚度, m^* 和 c^* 为对应于 u 的质量和阻尼系数, 这些量都可以由锚链的准静态形状得到。计算出 u 之后, 可以得到动张力

$$T_D = K_E(x_t - u) \quad (4-36)$$

这些计算是在频域范围内进行的。由式(4-35)得切向链端位置和整根锚链位置的转换函数:

$$H_u(\omega) = \frac{u(\omega)}{x_t(\omega)} = \frac{k_E}{-\omega^2 m^* + i\omega c^* + k_G + k_E}, \quad i = \sqrt{-1} \quad (4-37)$$

再根据式(4-36)可得切向链端位置与动张力之间的转换函数:

$$H_{T_D}(\omega) = \frac{T_D(\omega)}{x_t(\omega)} = k_E \frac{-\omega^2 m^* + i\omega c^* + k_G}{-\omega^2 m^* + i\omega c^* + k_G + k_E}, \quad i = \sqrt{-1} \quad (4-38)$$

则 u 和 u 的导数以及 T_D 和 T_D 的导数的方差为

$$\begin{aligned} \sigma_u^2 &= \int_0^\infty |H_u(\omega)|^2 S_{x_t}(\omega) d\omega \\ \sigma_{\dot{u}}^2 &= \int_0^\infty \omega^2 |H_u(\omega)|^2 S_{x_t}(\omega) d\omega \\ \sigma_{T_D}^2 &= \int_0^\infty |H_{T_D}(\omega)|^2 S_{x_t}(\omega) d\omega \\ \sigma_{\dot{T}_D}^2 &= \int_0^\infty \omega^2 |H_{T_D}(\omega)|^2 S_{x_t}(\omega) d\omega \end{aligned} \quad (4-39)$$

这些导数的标准偏差用于估算最大动张力中。整个动张力的计算过程如下:

(1) 由波浪谱和船舶高频运动的转换函数得到链端切向运动 x_t 的能

量谱：

- (2) 由以上公式求解从 x_i 得到 u 和 T_D 的转换函数；
- (3) 由转换函数和 x_i 的能量谱计算锚链运动的能量谱和动张力；
- (4) 对锚链运动的能量谱积分求解方差。

4.4 Mimosa 在锚泊系统受力分析中的应用

Mimosa 是 SESAM 软件中用来计算锚泊系统受力的模块，它可以根据给定的锚泊系统特征参数和边界条件对其进行受力分析。如前所述，系泊缆索是一种将浮动结构物连接于锚定点或系泊点的挠性机械部件，不能承受剪应力或弯矩。当一根自由悬挂的缆索只受到重力作用时，可以将缆索假设成一根悬链线的形状。当一根系泊缆索是由几个不同尺寸和材料的均匀分段组成，可以将每一个分段假设成一根悬链线。每个分段的底端可以连接重块或浮体，也就是说如果一根锚链由两段组成，并且两段锚链之间连有浮体，浮体是被视为与上面那段锚链相连接的，如图 4.7 所示。分段按从锚到船体的顺序依次标号。

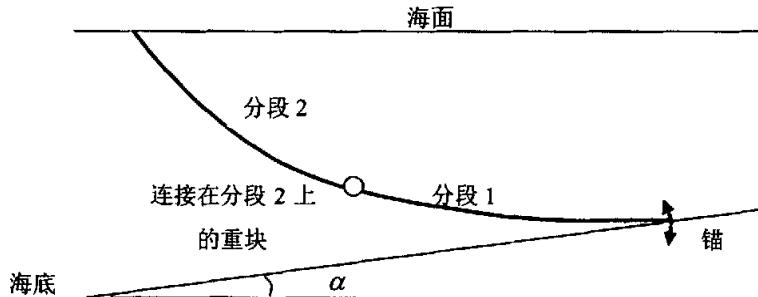


图 4.7 两个分段连接重块的锚链示意图，海底倾角为 α

对于一个给定的锚链分段或者不分段的锚链，锚链的几何形状和锚链上的张力变化取决于链端条件。链端条件可以用三种方式表达：

- (1) 锚链两个链端的位置；
- (2) 锚链一个链端的位置、张力和切向角度；
- (3) 锚链一个链端的位置和另一个链端的张力和切向角度。

除了链端条件，也有一些其它几何约束，如海底和海面条件，对于锚链连有浮体或重块的情况很重要。

在 Mimosa 中，锚链的边界条件分为两种，不论是哪一种都给定锚链的长度，结构以及距海底的垂直距离。这两种边界条件为：

(1) 给定锚链上端点的位置，该点处的张力，以及锚的垂向位置，计算锚的水平位置；

(2) 给定锚链上端点的位置和锚的位置，计算上端点处的张力和角度。这两种问题都不能用解析的方法求解，Mimosa 使用迭代的方法求解。

Mimosa 中的锚链模型是二维的，假设它位于一个竖直平面内，由于这种假设，锚链的水平投影总是一条直线段。由于船舶的运动，锚链的上链端发生一个横向位移，锚链的水平投影也会随之移动并产生一个绕锚泊点的转动，即使锚链有一部分卧底长度时也是，尽管实际情况中锚链的水平投影会因为摩擦力而变弯曲。

4.5 本章小结

本章介绍了潮流电站在风浪流环境下所受环境载荷的计算方法和锚泊系统的受力分析的原理。风力和流力的计算主要依照规范公式，波浪漂移力的计算采用谱分析法。锚链的静力计算主要基于悬链线方程，动力分析采用准静态方法。

第 5 章 潮流电站锚泊系统的方案设计

根据上面两章的计算结果和理论分析, 本章提供 70kW 和 40kW 潮流电站锚泊系统的设计方案, 并对这几种方案进行了验证、分析和比较。70kW 电站的锚泊系统设计主要是在前人工作的基础上应用软件重新对锚链的强度和链态进行计算。40kW 潮流电站的实际工作海域水深很浅, 所以采用了坐底式, 而本章的 40kW 潮流电站的锚泊系统设计是基于电站悬浮于水深 10m 处的状态而进行的, 以便为以后电站在较深水域中工作时的定位方案提供参考。两个电站锚泊系统的设计水深 H 均取为 42m。

潮流电站在工作海域中作业时, 其受力可能来自各个方向, 故本文的锚泊系统设计方案均选用分布式, 因所定潮流电站工作水域水深不大, 故采用锚链而不用钢索。它在强度、延伸率、断裂位能、耐磨损及耐腐蚀等各种性能上都优于钢索。锚链特征值选自大连船厂主编的 GB550-84, 见附录 A 表 A1。本文的计算均选用 M_2 型锚链。

因潮流电站预定工作海域的海底底质为基岩, 采用一般型式的锚很难使锚爪伸入底质而获得足够大的抓力; 而采用桩柱又需进行水下施工, 使建造成本大增。为此, 确定使用重力锚, 即使用钢筋混凝土制成的沉块来代替锚。只要在海中有足够的负浮力, 即可保证锚固的可靠性, 而且便于施工、经济性好。本文所有设计方案的锚均采用重力锚。

5.1 70kW 潮流电站锚泊系统的设计

5.1.1 主要设计数据

1 环境条件

- (1) 波高 13.26m, 周期 7.7952s, 方向沿潮流电站横向 (浪向角 90°), 波谱选取 PM 谱。
- (2) 最大潮流流速 $V_c = 4.5 \text{ m/s}$, 方向沿潮流电站纵向
- (3) 潮流电站工作海域水深 $h = 40 \text{ m}$, 最大潮位差 $\Delta h = 4 \text{ m}$
- (4) 潮流电站工作海域最大风速 $V_w = 28 \text{ m/s}$, 方向沿潮流电站纵向

(5) 海底土质: 基岩

2 发电船

- (1) 总长 $L = 18.00m$
- (2) 总宽 $B = 9.00m$
- (3) 水线长 $L_w = 15.60m$
- (4) 吃水 $T = 0.75m$
- (5) 排水体积 $\Delta = 47.25m^3$

3 环境载荷

根据前面给定的环境条件计算出潮流电站受到的环境载荷, 见表 5.1。

表 5.1 70kW 潮流电站受到的环境载荷 (α 为合力与 x 轴所成角度)

	纵向力	横向力	摇船力矩
	KN		KN·m
风力	-15.9	0	0
流力	-234.1	0	0
波浪漂移力	0	38.2	0.061
合计	-250	38.2	0.061
合力	252	α	171.3°

5.1.2 锚泊系统设计方案一

1 锚链的布置和参数选取

考虑到潮流电站有可能受到来自各个方向上作用力, 方案一选用 6 根锚链, 每根锚链间距 60° 均匀布置, 如图 5.1 所示。表 5.2 为各着链点的坐标位置。

表 5.2 6 链水线面均匀分布着链点坐标 (单位: m)

着链点号		1	2	3	4	5	6
坐标	x	6.067	0	-6.067	-6.067	0	6.067
	y	3.501	4.500	3.501	-3.501	-4.500	-3.501

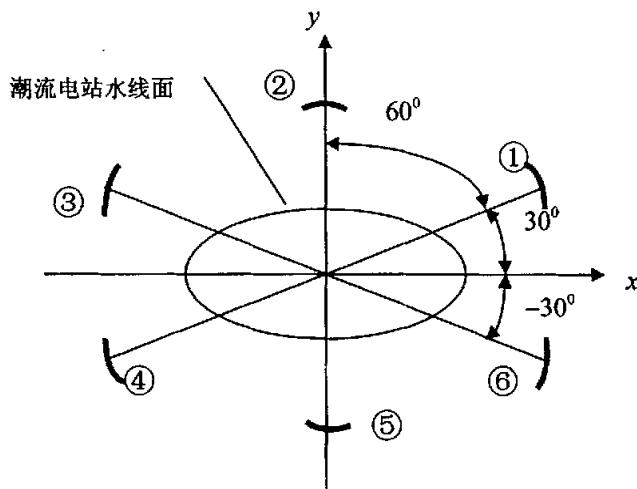


图 5.1 方案一锚链布置示意图

方案一中 6 根锚链的尺寸以及悬链线参数均相同。根据前面所计算出来的载荷及附录 A 中的表 A1, 初步选定系列 E, 即链径 $D = 58mm$, 锚链单位长度在空气中的重量 $w = 73.67kg/m$, 取整选取锚链长度为 275m 进行试算。经过计算可以得到方案一中的各锚链的悬垂线形式, 如图 5.2 所示, 各部分尺寸以及参数由表 5.3 给出。

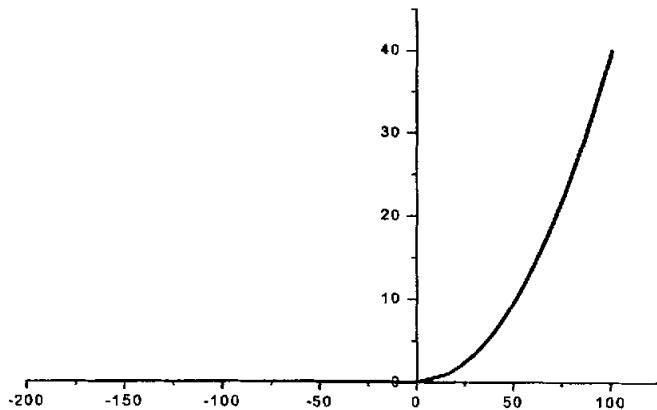


图 5.2 悬链线形状

表 5.3 方案一锚链初始状态参数

<i>Ladd</i>	<i>l</i>	<i>s</i>	<i>T_H</i>	<i>T_V</i>	<i>T</i>	<i>θ</i>
	<i>m</i>			<i>kN</i>		°
169.09	105.95	96.63	80.84	66.53	104.7	50.54

注: *Ladd* 表示锚链卧底长度; *l* 为悬垂链长; *s* 为悬链的水平投影长度; *T_H* 为链的水平分力; *T_V* 为链的垂直分力; *T* 为链的张力; *θ* 为悬链线上端切线方向与水平面的夹角。

2 锚链受力的计算和强度校核

通过迭代求解, 可得潮流电站在风力、流力和定常波浪漂移力作用下的位移值为 $x_0 = 1.877m$, $y_0 = 0.634m$, $φ = 0.085^\circ$ 。由潮流电站的新平衡位置, 着链点上各根锚链链态特性参数也都发生变化, 通过计算可以求出这些数值, 其结果由表 5.4 给出。此时的张力 *T* 是包含了动张力在内的锚链张力, 安全系数 *k* 为锚链断裂强度与张力 *T* 的比值。

表 5.4 方案一锚泊系统最终状态

着连 点号	<i>T</i>	<i>T_H</i>	<i>T_V</i>	<i>k</i>	<i>θ</i>	<i>Ladd</i>	<i>l</i>
	<i>KN</i>				°	<i>m</i>	
1	208.5	184.65	96.84	8.68	62.33	120.90	154.27
2	231.1	207.25	102.25	7.80	63.74	112.29	162.90
3	196.5	172.65	93.84	9.21	61.48	125.66	149.49
4	318.7	294.86	120.95	5.68	67.70	82.52	192.76
5	351.2	327.36	127.19	5.15	68.77	72.58	202.73
6	308.9	285.06	119.0	5.86	67.34	85.62	189.65

从表 5.4 可以看出, 最大链端张力发生在第 5 根锚链, $T_{\max} = 351.2 \text{ KN}$, 对应的安全系数 $k = 5.15$, 可见此种方案是能够满足安全要求的, 但是各根锚链的受力不太均匀, 时间长了可能会发生某根锚链的疲劳断裂。

3 锚的设计

作用在锚上的水平力由两部分组成: 一是作用在锚链和潮流电站连接点处的水平载荷 *T_H*; 二是潮流对锚链的水动力 *R*。水平载荷 *T_H* 已由前面锚链设计中得出。

潮流对锚链的作用力 *R* 可用莫里森公式计算, 即

$$R = C_0 \frac{1}{2} \rho V_c^2 A \sin \beta$$

式中 C_0 为阻力系数, 它是构件形状、粗糙度和雷诺数的函数。对于圆柱体其值为: $0.5 \leq C_0 \leq 1.2$, 这里取 $C_0 = 0.8$; ρ 流体质量密度, 对于海水 $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$; V_c 相对于构件的流体质点合速度, $V_c = 4.5 \text{ m/s}$; A 构件投影面积, 若链径为 d , 水深为 h , 则折合面积 $A = 1.5dh$; β 为流方向与构件表面间的夹角。由锚链的布置方式可知, 1、3、4、6 号锚链的水阻力相同, 2、5 号锚链的水阻力相同。

根据以上数据可算得 1、3、4、6 号锚链上的水阻力 R_1 为

$$R_1 = 0.8 \times \frac{1}{2} \times 1025 \times 4.5^2 \times (0.058 \times 1.5 \times 40) \times \sin(60^\circ) \\ = 25.02 \text{ KN}$$

同理, 2、5 号锚链上的水阻力 R_2 为:

$$R_2 = 0.8 \times \frac{1}{2} \times 1025 \times 4.5^2 \times (0.058 \times 1.5 \times 40) \times \sin(90^\circ) \\ = 28.89 \text{ KN}$$

则锚所需的最大抓力 $Q = 356.25 \text{ KN}$ 。

因海底地形突兀不平, 可假定沉块的抓重比为 1, 即沉块在水中的重量应大于或等于抓力 Q , 对钢筋混凝土构件的比重为 2.5 t/m^3 , 设沉块的体积为 V , 则

$$V \times 2.5 \left(1 - \frac{1.025}{2.5}\right) \geq Q / 9.8 \\ V \geq \frac{Q / 9.8}{1.475} = 24.65 \text{ m}^3$$

如果采用正方形沉块, 则沉块的边长为 2.91 m 。

5.1.3 锚泊系统设计方案二

1 锚链的布置和锚链参数选取

考虑到方案一的设计分析以及潮流电站纵向受力较横向受力要大的特点, 方案二采用了潮流电站首、尾密集分布的设计方式。方案二选用 8 根锚链如图 5.3 所示。表 5.5 为各着链点的坐标位置。

表 5.5 8 链水线面船首与船尾密集分布着链点坐标 (单位: m)

着链点号	1	2	3	4	5	6	7	8
坐 标	x	6.067	2.699	-6.067	-2.699	-6.067	-2.699	2.699
	y	3.501	4.410	4.410	3.501	-3.501	-4.410	-4.410

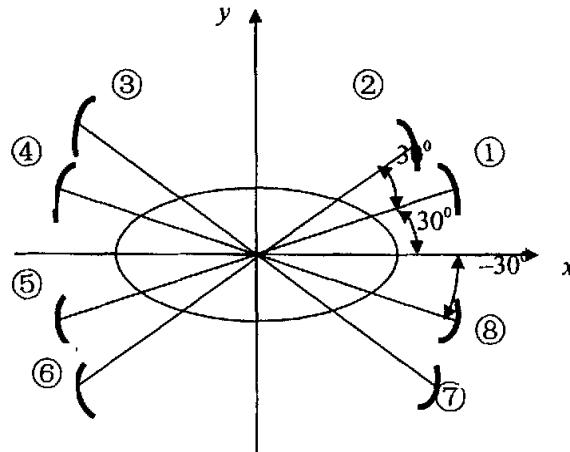


图 5.3 方案二锚链布置示意图

方案二的 8 根锚链的尺寸以及悬链线参数均相同。考虑到方案一中锚链的安全系数与设计安全系数有一定的差距，并且定常力的合力方向不与这 8 跟锚链中的任意一根重合，可以选择断裂强度稍小一些的系列，初步选定系列 D，即链径 $D = 56\text{mm}$ ，锚链单位长度在空气中的重量 $w = 68.68\text{kg/m}$ ，锚链每节长度为 27.5m ，选取锚链长度 302.5m 进行试算。经过计算可以得到方案二中的各锚链的悬垂线形式，如图 5.4 所示，各部分尺寸以及参数由表 5.6 给出。

表 5.6 方案二锚链初始状态参数

L_{add}	l	s	T_H	T_V	T	θ
	m		KN			.
189.27	113.29	104.60	87.76	66.32	110.3	52.92

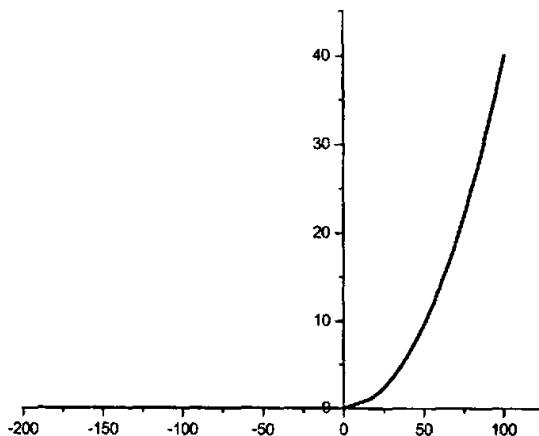


图 5.4 方案二锚链悬链线形状

2 锚链受力的计算和强度校核

通过迭代求解, 可求得潮流电站在风力、流力和定常波浪漂移力作用下的位移值为 $x_0 = 1.752m$, $y_0 = 0.703m$, $\varphi = 0.145^\circ$, 由潮流电站的新平衡位置, 着链点上各根锚链状态特性参数也都发生变化, 通过计算可以求出这些数值, 其结果由表 5.7 给出。

表 5.7 方案二锚泊系统最终状态

着连 点号	T	T_H	T_V	k	θ	$Ladd$	l
	KN				.	m	
1	201.9	179.66	92.11	8.47	62.86	145.26	157.42
2	177.8	155.56	86.10	9.62	61.04	155.54	147.10
3	165.3	143.06	82.81	1034	59.94	161.16	141.48
4	162.1	139.86	81.95	1054	59.63	162.63	140.00
5	262.7	240.47	105.76	10.54	66.26	121.98	180.78
6	304.0	281.78	114.10	5.63	67.96	107.75	195.06
7	321.3	299.08	117.42	5.32	68.57	102.09	200.74
8	272.6	250.37	107.82	6.27	66.70	118.46	184.31

从表 5.7 可以看出, 最大链端张力发生在第 7 根锚链, $T_{\max} = 321.3 \text{ KN}$, 对应的安全系数 $k = 5.32$, 能够满足安全要求。虽然较方案一相比, 某些锚链上的张力较小, 但是锚链的受力仍然不太均匀, 还是不能克服疲劳断裂的问题。

3 锚的设计

计算方法与方案一相同。1、4、5、8号锚链上的水阻力 R_1 相同，计算得

$$R_1 = 0.8 \times \frac{1}{2} \times 1025 \times 4.5^2 \times (0.056 \times 1.5 \times 40) \times \sin(30^\circ) \\ = 13.95 \text{ kN}$$

同理，2、3、6、7号锚链上的水阻力 R_2 相同，计算得

$$R_2 = 0.8 \times \frac{1}{2} \times 1025 \times 4.5^2 \times (0.056 \times 1.5 \times 40) \times \sin(60^\circ) \\ = 36.24 \text{ kN}$$

则锚所需的最大抓力 $Q = 355.32 \text{ kN}$ 。

因海底地形突兀不平，可假定沉块的抓重比为 1，即沉块在水中的重量应大于或等于抓力 Q 。对钢筋混凝土构件的比重为 $2.5 t/m^3$ ，设沉块的体积为 V ，则

$$V \times 2.5 \left(1 - \frac{1.025}{2.5}\right) \geq Q/9.8 \\ V \geq \frac{Q/9.8}{1.475} = 23.20 \text{ m}^3$$

如果采用正方形沉块，则沉块的边长为 2.85 m 。

5.1.4 锚泊系统设计方案三

方案三采用链加重块的组合型锚链，从经济角度考虑以及施工的难易程度上考虑，该方案试算一下 4 根锚链的情况。

1 锚链的布置和参数选取

综合考虑方案一和方案二的计算结果，以及链加重块组合能够提供较大回复力以及动张力相应较小的特点，方案三选用四 4 根锚链，其布置方式如图 5.5 所示。表 5.8 为各着链点的坐标位置。

表 5.8 链加重块 4 链着链点坐标 (单位: m)

着链点号		1	2	3	4
坐标	x	6.067	-2.699	-6.067	6.067
	y	3.501	3.501	-3.501	-3.501

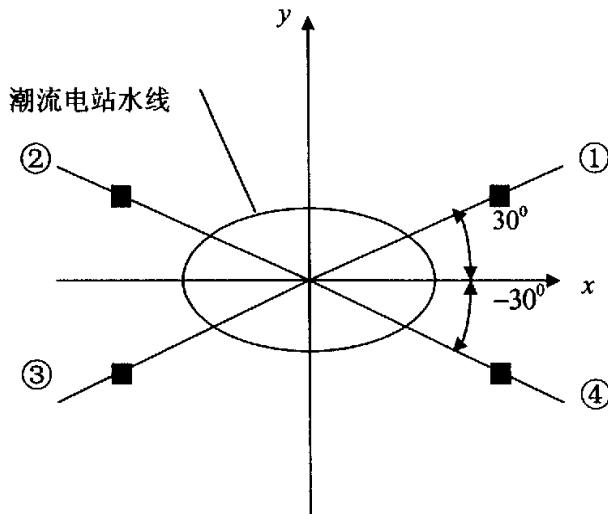


图 5.5 方案三锚链布置示意图

方案三中四根锚链的尺寸以及悬链线参数均相同。考虑到方案一、二中锚链的安全系数与设计安全系数有一定的差距，以及链加重块组合的优点，根据前面计算出来的载荷及附录 A 中的表 A1，初步选定系列 C，即链径 $D = 54mm$ ，锚链单位长度在空气中的重量 $w = 63.86kg/m$ ，锚链每节长度为 $27.5m$ ，整个锚链长度取 $302.5m$ 进行试算，距锚较近的一段锚链长度取 $191.55m$ ，距船较近的一段锚链取 $110.95m$ 。重块连接在两段锚链之间，质量取为整根锚链的 $1/3$ ， $W = 6.4t$ ，重块在水中的重量为 $56.66KN$ 。

经过计算可以得到方案二中各锚链的悬垂线形式，如图 5.6 所示，方案三锚链初始状态各部分尺寸以及参数由表 5.9 给出。

表 5.9 方案三锚链初始状态参数

$Ladd$	l	s	T_H	T_V	T	θ
	m		KN			
203.47	99.05	89.03	59.94	53.92	80.62	53.44

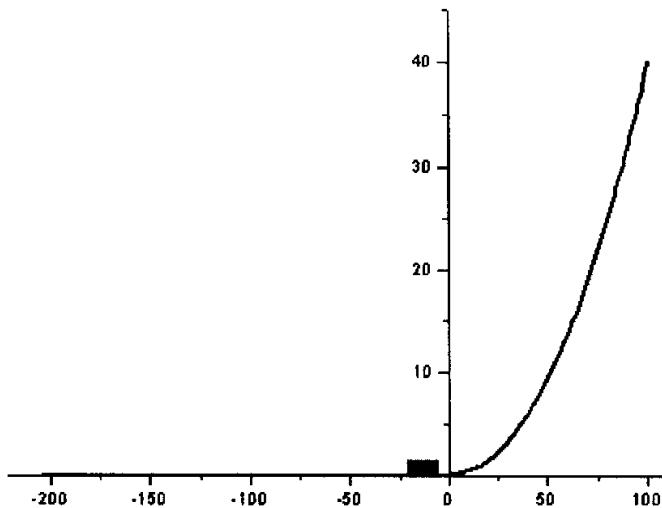


图 5.6 锚链+重块悬链线形式

2 锚链受力的计算和强度校核

通过迭代求解, 可求得潮流电站在风力、流力和定常波浪漂移力作用下的位移值为 $x_0 = 1.513m$, $y_0 = 0.825m$, $\varphi = 0.164^\circ$, 由潮流电站的新平衡位置, 着链点上各根锚链链态特性参数也都发生变化, 通过计算可以求出这些数值, 其结果由表 5.10 给出。

表 5.10 方案三锚泊系统最终状态

着连 点号	T	T_H	T_V	k	θ	$Ladd$	l
	KN					m	
1	289.5	261.05	125.15	5.49	64.39	176.86	125.92
2	274.7	246.83	120.56	5.79	63.97	185.27	117.49
3	306.0	277.04	129.94	5.20	64.87	168.07	134.74
4	317.4	288.16	133.06	5.01	65.21	162.33	140.49

从表 5.10 可以看出, 最大张力 $T_{max} = 317.4 KN$, 对应的安全系数 $k = 5.01$, 能够满足安全要求。而且链加重块的各根锚链受力比较均匀, 克服了前两种方案锚链受力不均匀的缺陷。

3 锚的设计

计算方法与方案一相同。1、2、3、4 号锚链上的水阻力 R 相同, 计算得

$$R = 0.8 \times \frac{1}{2} \times 1025 \times 4.5^2 \times (0.054 \times 1.5 \times 40) \times \sin(30^\circ)$$

$$= 13.45 \text{ kN}$$

则锚所需的最大抓力 $Q = 301.61 \text{ kN}$ 。

因海底地形突兀不平, 可假定沉块的抓重比为 1, 即沉块在水中的重量应大于或等于抓力 Q , 对钢筋混凝土构件的比重为 2.5 t/m^3 , 设沉块的体积为 V , 则

$$V \times 2.5 \left(1 - \frac{1.025}{2.5}\right) \geq Q / 9.8$$

$$V \geq \frac{Q / 9.8}{1.475} = 20.86 \text{ m}^3$$

如果采用正方形沉块, 则沉块的边长为 2.75 m 。

5.1.5 三种方案的比较分析

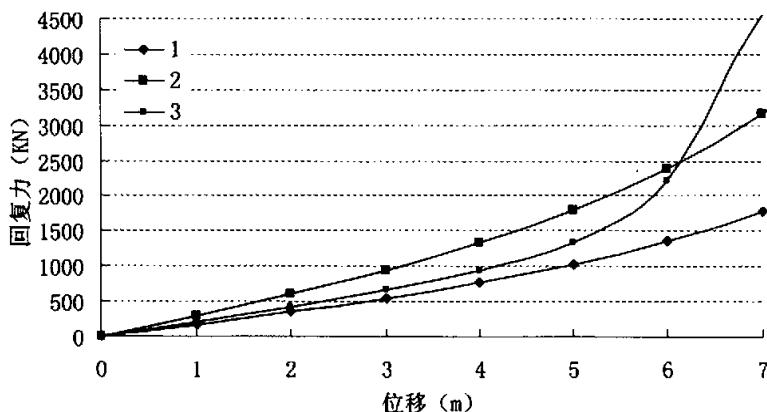


图 5.7 70kW 潮流电站锚泊系统三种设计方案的回复力比较

图 5.7 是上述三种方案回复力与潮流电站位移的关系曲线。从图中可以看出, 在偏移度为 6 m 的范围内, 方案二的回复力要大于方案一、三的回复力, 电站位移大于 6 m 之后, 方案三的回复力最大。回复力大可以使电站尽快达到平衡位置, 如果链加重快系统设计得当, 可以比全链系统在较小的预张力情况下获得较大的系统回复力, 从而在所要求的偏移度范围内, 不仅

增加了锚泊系统的定位能力，而且减小了系统重量，降低成本，其缺点是起锚、抛锚操作不便。

5.2 40kW 潮流电站锚泊系统的设计

5.2.1 主要设计数据

1 环境条件

- (1) 波高 $13.26m$ ，周期 $7.7952s$ ，方向沿潮流电站横向（浪向角为 90 度），波谱选取 PM 谱。
- (2) 最大潮流流速 $V_c = 3m/s$ ，方向沿潮流电站纵向
- (3) 潮流电站工作海域水深 $h = 40m$ ，最大潮位差 $\Delta h = 4m$
- (4) 潮流电站工作海域最大风速 $V_w = 28m/s$ ，方向沿潮流电站纵向
- (5) 海底土质：基岩

2 潮流电站

- (1) 总长 $L = 7.6m$
- (2) 总宽 $B = 7.6m$
- (3) 电站悬浮于水中，电站顶部位于水下 $10m$ 深处。
- (4) 排水体积 $\Delta = 78.004m^3$

3 环境载荷

首先根据前面给出的环境条件首先计算出潮流电站受到的环境载荷。由于对 $40kW$ 潮流电站锚泊系统的设计是基于电站悬浮于水中的假设进行的，所以电站没有露出水面的部分，因而也不受风载荷作用。 $40kW$ 潮流电站受到的环境载荷见表 5.11。

表 5.11 $40kW$ 潮流电站受到的环境载荷（ α 为合力与 x 轴所成角度）

	纵向力	横向力	摇船力矩
	KN		
风力	- 0	0	0
流力	-132.8	0	0
波浪漂移力	0	17.1	0.013
合计	-132.8	17.1	0.013
合力	133.9	α	172.7°

5.2.2 锚泊系统设计方案一

1 锚链的布置和参数选取

考虑到潮流电站有可能受到来自各个方向上作用力, 方案一选用 4 根锚链每根锚链均布式, 如图 5.8 所示, 图 5.9 为锚链的垂直布置方式, 方案一锚链着链点在沉箱上。表 5.12 为各着链点的坐标位置。

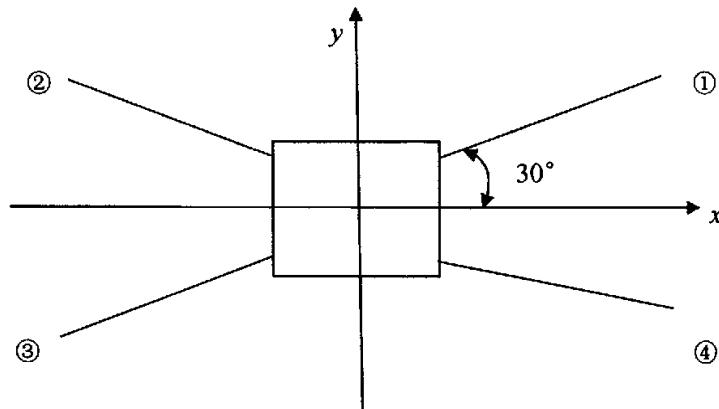


图 5.8 方案一: 40kW 潮流电站锚泊系统水平布置方式示意图

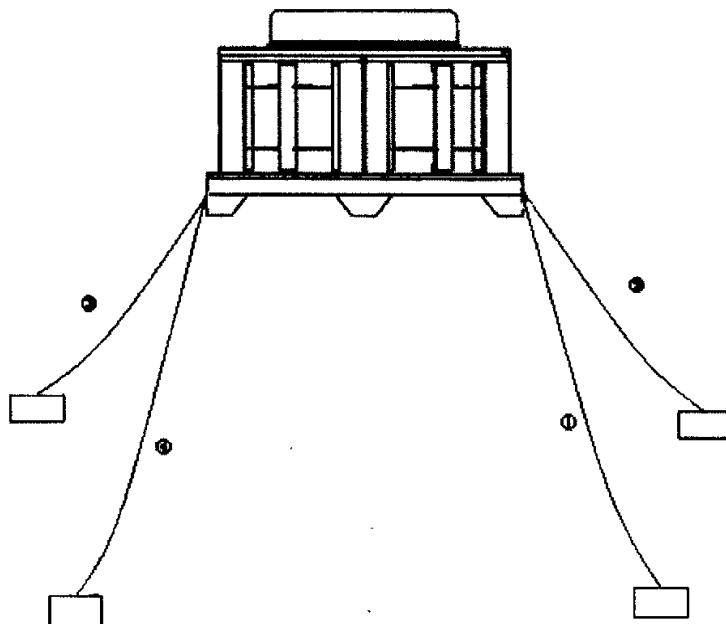


图 5.9 方案一: 40kW 潮流电站锚泊系统垂直布置方式

表 5.12 4 链均匀分布着链点坐标 (单位: m)

着链点号	1	2	3	4	
坐标	x	3.8	-3.8	-3.8	3.8
	y	3.5	3.5	-3.5	-3.5

方案一中 4 根锚链的尺寸以及悬链线参数均相同。根据 40kW 电站受到的环境载荷, 参照 70kW 潮流电站锚泊系统参数的选取, 可以选择断裂强度较小的系列, 根据附录 A 中的表 A1, 初步选定系列 A, 即链径 $D = 50\text{ mm}$, 锚链单位长度在空气中的重量 $w = 54.75\text{ kg}$ 。锚链每节长度为 27.5 m , 选取锚链长度为 87.5 m 进行试算。经过计算可以得到方案一中锚链的各部分尺寸以及参数, 见表 5.13 给出。

表 5.13 方案一锚链初始状态参数

L_{add}	l	s	T_H	T_v	T	θ
	m			kN		$^{\circ}$
0	87.5	84.84	96.12	42.26	105.00	66.27

注: L_{add} 表示锚链卧底长度; l 为链长; s 为链的水平投影长度; T_H 为链的水平分力; T_v 为链的垂直分力; T 为链的张力; θ 为悬链线上端切线方向与水平面的夹角。

2 锚链受力的计算和强度校核

通过迭代求解, 可求得潮流电站在定常力作用下的位移值为 $x_0 = 0.946\text{ m}$, $y_0 = 0.318\text{ m}$, $\varphi = 0.023^{\circ}$ 。由潮流电站的新平衡位置, 着链点上各根锚链链态特性参数也都发生变化, 通过计算可以求出这些数值, 其结果由表 5.14 给出。

表 5.14 方案一锚泊系统最终状态

着链点号	T	T_H	T_v	k	θ	L_{add}	l
		KN			$^{\circ}$		m
1	202.9	194.78	56.82	6.75	73.74	0	87.5
2	188.6	180.65	54.21	7.26	73.30	0	87.5
3	211.4	203.18	58.37	6.48	73.97	0	87.5
4	235.7	227.18	62.80	5.81	74.55	0	87.5

从表 5.14 可以看出, 最大链端张力发生在第 4 根锚链。 $T_{max} = 227.18\text{ KN}$, 对应的安全系数 $k = 5.81$, 可见此种方案是能够满足安全要求的。

3 锚的设计

作用在锚上的水平力由两部分组成: 其一是作用在锚链潮流电站连接点

处的水平载荷 T_H ；其二是潮流对锚链的水动力 R 。水平载荷 T_H 已由前面锚链设计中得出。

潮流对锚链的作用力 R 可用莫里森公式计算，即

$$R = C_0 \frac{1}{2} \rho V_c^2 A \sin \beta$$

式中 C_0 为阻力系数，它是构件形状、粗糙度和雷诺数的函数。对于圆柱体其值为： $0.5 \leq C_0 \leq 1.2$ ，这里取 $C_0 = 0.8$ ； ρ 流体质量密度，对于海水 $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$ ； V_c 相对于构件的流体质点合速度， $V_c = 4.5 \text{ m/s}$ ； A 构件投影面积，若链径为 d ，水深为 h ，则折合面积 $A = 1.5dh$ ； β 为流方向与构件表面间的夹角。由锚链的布置方式可知，1、2、3、4 号锚链的水阻力相同。

根据以上数据可算得 1、2、3、4 号锚链上的水阻力 R 为

$$\begin{aligned} R &= 0.8 \times \frac{1}{2} \times 1025 \times 3^2 \times (0.050 \times 1.5 \times 25.7) \times \sin(60^\circ) \\ &= 6.16 \text{ KN} \end{aligned}$$

则锚所需的最大抓力 $Q = 233.34 \text{ KN}$ 。

因海底地形突兀不平，可假定沉块的抓重比为 1，即沉块在水中的重量应大于或等于抓力 Q ，对钢筋混凝土构件的比重为 2.5 t/m^3 ，设沉块的体积为 V ，则

$$\begin{aligned} V \times 2.5 \left(1 - \frac{1.025}{2.5}\right) &\geq Q / 9.8 \\ V \geq \frac{Q / 9.8}{1.475} &= 16.14 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

如果采用正方形沉块，则沉块的边长为 2.527 m 。

5.2.3 锚泊系统设计方案二

1 锚链的布置和参数选取

40kW 潮流电站锚泊系统的第二种设计方案的锚链布置方式和参数选取基本上与方案一相同，不同的仅仅是锚链垂向着链点位置从沉箱转移到了浮箱上，如图 5.10 所示。锚链的水平布置方式和着链点坐标参见图 5.8 和表 5.12。之所以选择这种布置方式主要是为了研究锚链着链点垂向位置对锚链上的张力及整个锚泊系统回复力的影响，以确定比较合适的着链点位置。

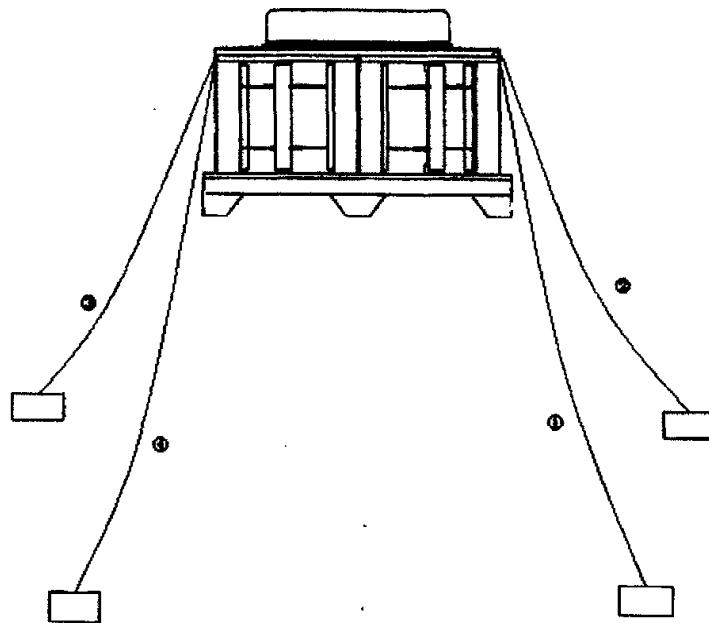


图 5.10 方案二: 40kW 潮流电站锚泊系统垂直布置方式

经过计算可以得到方案二中锚链的各部分尺寸以及参数, 表 5.15 给出。

表 5.15 方案二锚链初始状态参数

<i>Ladd</i>	<i>l</i>	<i>s</i>	<i>T_H</i>	<i>T_V</i>	<i>T</i>	<i>θ</i>
	<i>m</i>			<i>kN</i>		°
0	87.5	84.83	94.93	41.99	103.80	66.14

2 锚链受力的计算和强度校核

通过迭代求解, 可求得潮流电站在风力、流力和定常波浪漂移力作用下的位移值为 $x_0 = 0.824m$, $y_0 = 0.253m$, $\varphi = 0.036^\circ$, 由潮流电站的新平衡位置, 着链点上个根锚链转台特性参数也都发生变化, 通过计算可以求出这些数值, 其结果由表 5.16 给出。

从表 5.16 可以看出, 最大链端张力仍然发生在第 4 根锚链。 $T_{\max} = 273.1\text{ kN}$, 对应的安全系数 $k = 5.01$, 可见方案二是能够满足安全要求的, 但锚链的张力总体上要大于方案一的锚链张力。

表 5.16 方案二锚泊系统最终状态

着连 点号	<i>T</i>	<i>T_H</i>	<i>T_V</i>	<i>k</i>	<i>θ</i>	<i>Ladd</i>	<i>l</i>
	KN				°	m	
1	262.8	251.43	76.47	5.21	73.08	0	87.5
2	241.6	230.66	71.87	5.67	72.69	0	87.5
3	256.7	245.45	75.15	5.34	72.98	0	87.5
4	273.1	261.51	78.70	5.01	73.25	0	87.5

3 锚的设计

根据同样的方法, 1、2、3、4 号锚链上的水阻力 *R* 为

$$R = 0.8 \times \frac{1}{2} \times 1025 \times 3^2 \times (0.050 \times 1.5 \times 28.7) \times \sin(60^\circ)$$

$$= 6.88 \text{ KN}$$

则锚所需的最大抓力 *Q* = 279.98 KN。

因海底地形突兀不平, 可假定沉块的抓重比为 1, 即沉块在水中的重量应大于或等于抓力 *Q*, 对钢筋混凝土构件的比重为 $2.5t/m^3$, 设沉块的体积为 *V*, 则

$$V \times 2.5 \left(1 - \frac{1.025}{2.5}\right) \geq Q / 9.8$$

$$V \geq \frac{Q / 9.8}{1.475} = 19.70 \text{ m}^3$$

如果采用正方形沉块, 则沉块的边长为 2.70 m。

5.2.4 两种方案的比较分析

图 5.11 是上述两种方案回复力与潮流电站位移的关系曲线。从图中可以看出来, 当位移大于 3 m 之后, 方案二的回复力要大于方案一的回复力, 而且此时两种设计方案的回复力增加都非常迅速, 这是由于锚链没有卧底链长, 而是直接连接在重力锚上的原因。总的来说, 方案二回复力要大于方案一, 有助于电站快速达到平衡位置, 但是在同样锚链参数选取情况下, 方案二的锚链张力比方案一稍大一些, 但也是足以满足安全要求的, 相比较而言方案二优于方案一。

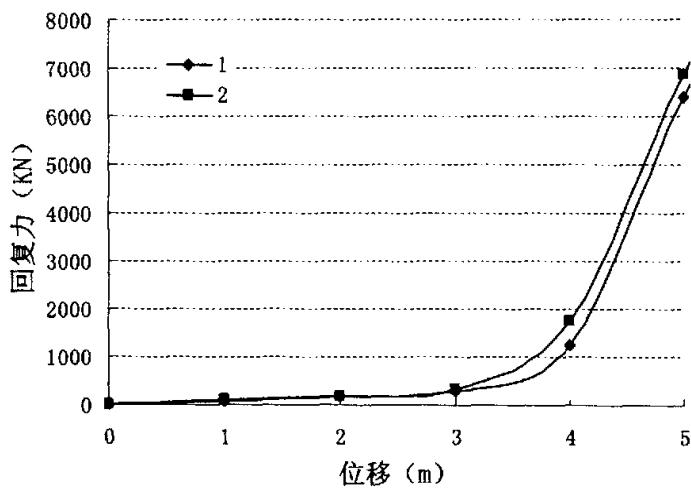


图 5.11 40kW 潮流电站锚泊系统两种设计方案的回复力比较

5.3 本章小结

本章给出了 70kW 潮流电站和 40kW 潮流电站的锚泊系统设计方案，给出了每个设计方案下电站锚泊系统的初始状态参数和达到新平衡位置后的链态及张力，校核了各方案的安全性，并对不同方案进行了比较和分析。

结 论

本论文计算了 40kW 潮流电站的静水力性能，在此基础上提出了电站的安装和检修方案。基于三维频域势流理论，应用 SESAM 软件计算了 70kW 和 40kW 潮流电站在规则波中的受力与运动响应，以及在风浪流环境下受到的环境载荷，根据计算结果以及锚泊系统静力分析和动力分析的相关理论，分别对两个电站提出了锚泊系统设计方案，并对不同方案进行了比较。

通过本论文的研究工作，可以得到如下几方面结论：

1. 40kW 潮流电站拖航时的稳性是可以满足要求的，电站在安装或检修时，可以采取向中间导流罩注水或排水的方法使电站下沉或上浮。
2. 通过对 70kW 电站和 40kW 电站在规则波中的受力和运动响应的计算发现，在横浪情况下，电站的纵向受力和运动都很小，横向受力和运动比较显著。
3. 在 70kW 潮流电站的三种设计方案中，第三种链加重块组合的方案最优，各根锚链的受力比较均匀，提供的回复力也较大。
4. 在 40kW 潮流电站的两种设计方案中，第二种方案比第一种方案要好一点。由于锚链没有卧底长度，当电站位移大于 3m 时，整个锚泊系统的回复力会迅速增大。

对论文工作进一步拓展的建议：

1. 运用时域方法计算受力和运动。此前所进行的计算都是在频域内的。
2. 采用动力模型计算锚链的动张力。本文中的计算均采用准静态模型。

参考文献

- [1] 周奎. 对我国可再生能源发电业的探讨. 能源研究与利用. 2001(5): 3-4
- [2] 张登霞. 双浮子海浪发电装置参数分析以及结构优化设计. 燕山大学硕士学位论文. 2001: 1-2 页
- [3] 孙雅萍. 21 世纪海洋能源开发利用展望及其环境效应分析. 哈尔滨师范大学自然科学学报. 1998, 14(6): 104-107 页
- [4] 王庆一. 中国 21 世纪能源展望. 山西能源与节能. 2000, 16(1): 76-79 页
- [5] 乔权, 王金辉. 我国海洋能资源开发利用设想. 哈尔滨师范大学自然科学学报. 1997, 13(1): 116-120 页
- [6] 江泽民. 江主席代表国务院兼国务院秘书长罗干在世界太阳能高峰会议上的发言. 中国学术期刊电子杂志社. 1997: 3-4 页
- [7] Krock, H. J. Ocean Energy Recovery. The American Society of Civil Engineers. 1989: 18-23 页
- [8] NREL . Renewable Data Overview . Renewable Energy Annual 1997 . 1997, 1 (5): 2-3 页
- [9] 张焕芬. 海洋能——未来的能源. 中国科学院广州能源研究所. 1987: 1-12 页
- [10] 毛秀珍, 徐燕椿. 海洋能是人类未来能源的希望. 今日科技. 1998 年第 2 期
- [11] 朱建国, 朱果扣. 科技新能源潮流能的开发和利用. 资源开发. 1986: 25-35 页
- [12] 王传崑. 潮流发电. 华东水电技术. 1998 年第 2 期 11-15 页
- [13] 张源. 新能源发电的技术现状与发展. 中国电力. 1996 年第 11 期 79~80

页

- [14] 李凤来, 张洪雨, 赵晨. 10Kw 潮流电站方案设计. 新能源. 1996, 18(4)
- [15] 马鉴恩. 潮流电站的锚泊系统设计. 海洋工程. 1996, 14 (2)
- [16] 魏云雨. 锚泊偏荡运动数学模型的研究. 大连海事大学硕士学位论文. 2001: 2-3 页
- [17] 鮫岛直人. 荒天锚泊法に関する実験研究(第一報). 日本航海学会論文集. 第 22 号, 1960. 3
- [18] 米田謹次郎. 荒天锚泊法に関する実験研究. 日本航海学会論文集. 第 22 号, 1960. 12
- [19] Per. I. Johansson. A Finite Element Model for Dynamic Analysis of Mooring Cables. Doctor Thesis of MIT. 1976
- [20] Jason I. Gobat, Mark A. Grosenbaugh. A simple model for heave-induced dynamic tension in catenary moorings. Applied Ocean Research. 23 (2001) 159-174
- [21] A. P. Shashikala, R. Sundaravadivelu and C. Ganapathy. Dynamic of a moored barge under regular and random waves. Ocean Engineering. Vol. 24, No. 5, pp. 401-430, 1997
- [22] Shan Huang. Dynamic analysis of three-dimensional marine cables. Ocean Engineering. Vol.21, No.6, pp.587-605, 1994
- [23] 刘建成, 李润培, 顾永宁, 张剑波. 一种简单单点系泊系统的可行性研究. 上海交通大学学报. 2000 年 1 月, 第 34 卷, 第 1 期
- [24] 范菊, 陈小红, 季春群. 转塔式系泊储油轮的动力分析. 上海交通大学学报. 2000 年 1 月, 第 34 卷, 第 1 期
- [25] 范菊, 黄祥鹿. 锚泊线的动力分析. 中国造船. 第 1 期, 1999 年 2 月
- [26] 刘应中, 廖国平, 李谊乐, 刘滋源, 刘和东. 系泊系统动力分析的时域方法. 上海交通大学学报. 2000 年 1 月, 第 34 卷, 第 1 期
- [27] 朱克强, 李道根, 李维扬. 海洋缆体系统的统一凝集参数时域分析法.

海洋工程. 2002 年 5 月, 第 20 卷, 第 2 期

- [28] 盛振邦, 杨尚荣, 陈雪深. 船舶静力学, 国防工业出版社, 1984 年: 73-80 页
- [29] 张洋. 70kW 潮流电站锚泊系统的设计和计算. 哈尔滨工程大学硕士学位论文. 2004 年 3 月 25-46 页
- [30] 刘亚东. 单体复合船型耐波性能优化设计方法研究. 哈尔滨工程大学博士学位论文. 2003 年 3 月: 11-26 页
- [31] 戴遗山. 船舶在波浪中运动的频域与时域势流理论, 国防工业出版社, 1998 年: 219-233 页
- [32] 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论, 上海交通大学出版社, 1987 年: 151-172 页
- [33] 吴秀恒. 船舶操纵性与耐波性, 人民交通出版社, 1999 年: 166-188 页
- [34] 李积德. 船舶耐波性, 国防工业出版社, 1981 年: 67-72 页
- [35] N. J. Krikeli. Dynamic Performance of Towed Vessels Employing Nonlinear Rudder Control Under Adverse Weather Condition, I.S.P, JULY, 1986
- [36] Halvor Lie, Knut Mo, Karl E. Kaasen. Mimosa User's Documentation. Marine Technology Research Institute (MARINTEK) A/S and SINTEF Division of Structural Engineering. Trondheim, NORWAY 1990
- [37] Larsen, K., Sandvik. Efficient Methods for the Calculation of Dynamic Mooring Line Tension. FPS2000, part 1.4. MARINTEK report no. 511155.02. Trondheim, NORWAY 1989
- [38] API Recommended Practice for Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structure. API RP-2SK, 1997
- [39] 缪国平. 挠性部件力学导论, 上海交通大学出版社, 1996 年: 35-55 页
- [40] 中国船级社海上单点系泊装置入级与建造规范, 人民交通出版社, 1996 年: B1-B15 页

攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果

1. 詹明珠, 张亮. 漂浮式潮流电站锚泊系统的设计计算. (待发表)

致 谢

本论文是在导师张亮教授自始至终的悉心指导下完成的。张亮教授严谨的治学态度、理论与工程实践相结合的丰富经验、缜密又不失创造性的思维方式以及耐心细致循循善诱的指导帮助使作者受益匪浅，并将铭记终生。在此，作者向导师表示深深的感谢和由衷的敬意！

作者在论文工作期间有幸得到了段文洋教授、李凤来副研究员、周广利老师以及盛其虎老师的指导和帮助，在此表示衷心的感谢！同时感谢 101 教研室的所有老师、朋友和同学们！

作者的成长离不开父母数十载的辛勤培育、耐心教导和默默关怀。在论文工作期间，父母更是给予作者无微不至的关怀和支持，作者难以用语言向父母所付出的一切表示感激之情，一切尽在不言中！感谢我的父母和亲人们、感谢我的朋友们！

感谢在作者成长过程中所有关心、帮助、批评过作者的朋友！

附录 A 铸钢锚链 GB 550-84

考虑到发电船的受力大小,发电船锚泊系统设计的锚链参数均选自表A1。

表 A1 锚链参数

系列	链径 (mm)	M_2 试验负荷 (KN)		M_3 试验负荷 (KN)		每米重量 (kg)
		拉力	拉断	拉力	拉断	
A	50	981.0	1370.0	1370.0	1960.0	54.75
B	52	1060.0	1480.0	1480.0	2110.0	59.22
C	54	1140.0	1590.0	1590.0	2270.0	63.86
D	56	1220.0	1710.0	1710.0	2430.0	68.68
E	58	1290.0	1810.0	1810.0	2600.0	73.67
F	60	1380.0	1940.0	1940.0	2770.0	78.84
G	62	1470.0	2060.0	2060.0	2940.0	84.18
H	64	1560.0	2190.0	2190.0	3130.0	89.70
I	66	1660.0	2310.0	2310.0	3300.0	95.40
J	68	1750.0	2450.0	2450.0	3500.0	101.3
K	70	1840.0	2580.0	2580.0	3690.0	107.3

注: 表中 M_2 , M_3 分别为 2 级、3 级锚链钢代号。

附录 B 海浪谱公式

1. Pierson-Moskowitz 谱

$$S_{PM}(\omega) = \frac{5}{16} \frac{H_s^2}{\omega_p} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \quad (B-1)$$

其中 H_s 为有义波高, ω_p 为峰值频率。峰值频率、峰值周期和平均周期 T_z 的关系是

$$T_p = \frac{2\pi}{\omega_p} = 1.048T_z$$

2. JONSWAP 谱

$$S_j(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left[-\beta \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \gamma^{\exp \left(\frac{-1(\omega - \omega_p)^2}{2\sigma^2 \omega_p^2} \right)} \quad (B-2)$$

其中 g 为重力加速度, ω_p 是峰值频率 ($= 2\pi/T_p$)。参数 β 和 σ 一般取

$$\beta = 1.25, \quad \sigma = \begin{cases} 0.07 & (\omega \leq \omega_p) \\ 0.09 & (\omega > \omega_p) \end{cases}$$

参数 γ 为峰顶锐度参数。 $\gamma = 1$ 时 JONSWAP 谱和 PM 谱相同。 γ 再大一点就会使 JONSWAP 谱比 PM 谱更尖。波谱中没有体现出有义波高, 但是参数 α 和有义波高存在如下的关系

$$\alpha = \left(\frac{H_s \omega_p^2}{4g} \right)^2 / (0.065 \gamma^{0.803} + 0.135)$$

3. Ochi-Hubble 谱

$$S_{OH} = S_{OH}^{(1)}(\omega) + S_{OH}^{(2)}(\omega)$$

$$S_{OH}^{(i)}(\omega) = \frac{H_{Si}^2}{4\Gamma(\lambda_i)\omega_{Pi}} \left(\lambda_i + \frac{1}{4} \right)^{4\lambda_i+1} \left(\frac{\omega}{\omega_{Pi}} \right)^{-(4\lambda_i+1)} \exp \left(-(\lambda_i + \frac{1}{4}) \left(\frac{\omega}{\omega_{Pi}} \right)^{-4} \right) \quad (B-3)$$

$i = 1, 2$

其中 H_{s_i} 为第 i 部分的有义波高, T_{p_i} 为第 i 部分的峰值周期, λ_i 为第 i 部分的锐度系数, $\Gamma(\cdot)$ 为 gamma 函数。当 $\lambda = 1$ 时, 上式等同于 Pierson-Moskowitz 谱, 因此 Ochi-Huybregts 谱可以被视为两个 P-M 谱之和。