

单点系泊系统的动力学研究

摘要

单点系泊系统是海洋工程、海洋观测、海洋养殖等领域最常用的定位方式之一。由单点系泊系统具有结构简单、方向性好、成本低等特点，其应用领域十分广泛。本文建立了单点系泊系统的动力学模型，分析了在海洋环境下系泊系统从投放使用到工作过程中的动力学响应和所受载荷，为深入理解系泊系统的动力学机理，预报系泊系统的动态性能，保证系统的完整性和可靠性提供了理论依据。

本文采用基于集中质点的多边形近似法研究了单点系泊系统的静力学问题。基于系泊系统的离散模型，采用迭代的方法求得各节点的稳态位置及各段缆索受到的张力，获取了系统的工作姿态及缆索张力分布情况。

建立了投放过程中的单点系泊系统非线性动力学模型，基于集中质量—弹簧模型，考虑缆索的弹性变形和各部分流体水动力作用，模拟了系泊系统的布放过程，在时域内计算了该过程系统的姿态、运动和受力情况，探讨了不同参数对布放响应的影响。研究了系泊系统在波浪激励下工作的动力学响应，并基于动力学模型对浮标系统静态姿态进行了计算。

本文在静力学及动力学分析和计算的基础上，开发了单点系泊系统动力学分析软件。该软件通过友好的用户界面输入系泊系统参数，通过调用计算程序，直观地显示系泊系统姿态、运动、受力曲线以及实现系统工作过程的动画模拟。

关键词： 单点系泊系统；集中质点法；动力学响应；时域

Study on Dynamics of Single-Point Mooring systems

Abstract

The single-point mooring system (SPMS) is one of the most important types for fixing ocean structure in the field of marine engineering, ocean observations, and aquaculture. Single-point mooring systems have the advantages of simple structure, good directivity, and low cost. However, under the harsh sea condition SPM systems often suffer complex and serious loads in the process of deployment, operation and recovery. In this thesis, dynamic analysis of SPMS is carried out to deeply study the mechanism of dynamics, predict the performance of mooring systems, and provide the theory basis for the security of systems' integrity and reliability.

A polygon approximation method based on lumped mass has been applied to study the statics of the single-point mooring system. By using lumped mass model and iterative approach, the attitude and tension distribution of the system are obtained by a linear interpolation method.

Dynamic model of SPMS is also developed taking into account the nonlinear factors of flexibility of the cable/chain and the effects of fluid inertia forces. Motion of SPMS is simulated during deployment by using numerical technique in time domain. The influences of current, mass and initial positions on dynamic response are also given. Dynamic response of SPMS under regular wave excitation is analyzed, and the static profiles of SPMS are also analyzed based on the dynamic model.

A program package on dynamic response of SPMS is developed on the basis of dynamics analysis. Through it parameters can be inputted conveniently by user-friendly interface, and the motion curves, tables and animation of response can be shown intuitively in the software.

Keywords: single-point mooring system; lumped mass method; dynamic response; time domain

1 绪论

1.1 引言

随着科技的进步，人类对海洋的开发利用进入了快速发展的阶段。任何形式的开发利用都离不开工程设备，如海洋平台、船舶、水下探测器、海底观测站等。然而这些设备无一例外地需要系泊定位，才能长期在一定的区域内稳定可靠地工作。采用单点系泊系统进行定位是海洋工程、海洋观测、海洋养殖等领域最常用的定位方式之一。

在海洋工程领域，图1-1(a)所示的单点系泊储油装置和卸油装置的应用极为广泛。单点系泊油轮不用靠港，在离岸足够深的水域和单点系泊浮筒连接，通过浮筒下端的管道进行输油和储油。这解决了世界上绝大多数港口航道狭窄、水浅，不能匹配大型油轮和超大油轮的问题，为海洋石油开采和海上运输中转的历史翻开了崭新的一页，极大地推动了海洋石油开采业和石油化工业的发展，伴随着近海工程逐步向深海领域发展，各种单点系泊系统的应用也越来越广泛。

现如今在海洋观测领域，实施海洋调查、监测、海洋环境预报等各项活动的因家和地区越来越多。图1-1(b)所示的带有海洋测量仪器的各种浮 / 潜标系统被广泛应用于各大洋的海洋科考调查，浮 / 潜标系统也被公认为测鼠某一海域环境参数的最佳选择。单点浮 / 潜标系统的姿态可随风、浪、流的变化而自由转向，且基本趋向于系统受力最小的方位，因而具有风标的特性，可以360度不受限制的旋转，受气候的影响较小；同时，单点系泊的设计成本较其它系泊系统低，适用水深从几十米到几千米不等，因而应用范围极广。

在海洋网箱养殖领域，通常也应用单点系泊技术。如图1-1(c)所示，单点系泊网箱的组件包括混凝土浇筑的铰，一串系泊链条，一串表面系泊浮子和采用绳索连接到单点系泊连接件上的网箱，系泊绳索分别捆绑千网箱框架的卜、下拐角部件上。这样的网箱通常可以抵御7级左右的大风和3米左右的有效浪高，与其它浮动式网箱相比，单点系泊的网箱具有明显的生存优势。

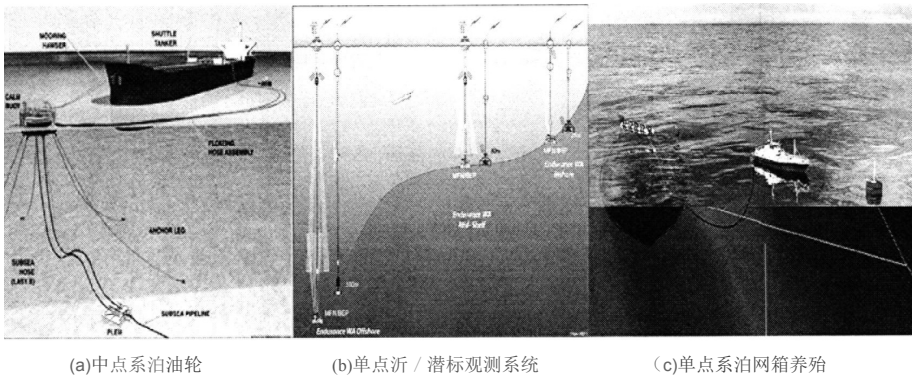


图1-1单点系泊系统的应用

综上所述，由于单点系泊系统具有结构简单、方向性好、成本低等特点，其应用领域十分广泛。但同时也要认识到，单点系泊系统在海上的工作条件十分恶劣，如何设计并分析一个单点系泊系统，确保其具有高度的可靠性和良好的环境适应性，成为一个重要的研究课题。

通常作为研究对象的单点系泊系统由系泊缆索连接各海洋仪器部件、重力铀等组成。系统动力性能好坏取决于海洋环境、仪器部件和缆索所受的环境作用力、缆索的组成和分布形式、水深等多种复杂因素，这些因素在系泊系统的设计中有着非常重要的地位。系泊缆索主要有锚链、纤维缆、钢丝绳、复合缆等几种，系泊系统在设计的过程中，根据不同的水深通常会采用多种系泊缆索或复合缆，系泊缆索在使用过程中经历长期的腐蚀和磨损，缆索的失效会导致系泊物失去定位能力，造成贵重的海洋测量仪器丢失或者海洋平台事故。由于系泊缆索刚度的不连续性、缆索几何形状的非线性、环境载荷的非线性、锚组件与海底接触力的非线性，使得系泊系统的动力学问题呈现高度的非线性，其在工作过程中的载荷以及动态响应是一个复杂的非线性动力学问题 [1]。为了更好地研究系泊系统所处的受力环境以及缆索的工作状况，必须建立和开发合适的数学模型和分析技术，从机理上深入地研究系泊系统的动力学特性，并能真实地预报出它们的系泊性能，从而进一步指导系泊系统设计，对保证单点系泊系统的安全稳定有着重要的意义。

单点系泊系统的下放过程同样是不能忽视的重要环节。以浮 / 潜标系泊系统为例，一般采取两种布放方法：在水域不受限制且定位精度要求不精确的情况下，采用浮标先行投放法；在海冰较多的极区或布放水域有限且海况较好的海区，一

般采用先行投描法。海洋平台在进行系泊定位时,一般采用悬链线式系泊系统,即传统的展开式系泊系统;随着作业水深超过1000米,张紧式系泊系统逐渐发展起来[2]。无论是哪种形式的海洋平台系泊系统,布放的方法通常采用拖轮拖带抓力锚至工作水域,先将锚投放入水,一端固定在海洋平台绞车、另一端固定在锚上的多成份缆索顺势入水,锚着底后通过绞车调节缆索的姿态。系泊系统在布放入水的过程中,其动态载荷的变化情况、对仪器和缆索承载能力的安全性评估值得深入研究。因此如何科学地进行系泊系统的设计和布放方案规划,保证整个系统的成功使用,成为海洋科考工作者和相关工程技术人员最关注的问题。

1.2 国内外研究现状

目前系泊系统的研究主要集中在系统的计算分析和稳定性研究方面。系泊系统在计算分析方面主要研究系泊缆索的张力响应及系泊系统的耦合运动。系泊系统的稳定性研究主要包括系统的分叉和混沌运动等复杂动力学问题。

在对系泊缆索进行计算分析时,通常假定其为挠性结构,不承受剪应力、不传递扭矩。计算分析的内容主要包括缆索轴向张力、环境载荷作用、缆上组件的受力以及整个系统的耦合动态响应。计算方法从方程形式上分为静力法和动力法。

静力法忽略了系统受到的惯性力,一般采用悬链线法、中和浮力缆索法或考虑所有力的多边形近似法等来进行计算分析[3]。悬链线法适用千缆索自重远远大千其所受的流体作用力的情况,在悬链线方程的推导过程中,忽略了流体作用力、缆索惯性力和缆索弹性变形。中和浮力缆索法适用于长度相对较短的轻质纤维缆,计算过程中重力和流体切向阻力这两项可以忽略。当缆索较长因而重力是个重要因素时,所有静力必须考虑,微分方程不再能够显式积分,考虑到数字积分查表的复杂性,此时一般采用多边形近似法。Russell等[4]运用悬链线法对山两段缆索组成的系泊系统进行了静力分析,将计符问题转化成一个多自由度的多项式方程求解,可用计算机快速处理。潘斌等[5]提出了考虑锚泊线伸长变形和流速变化的单点浮标系统二维静力学计算模型,并编制了计算程序,该方法局限于悬链线式、半张紧和张紧式的单点浮标系统。王明午[6]建立了水下潜标系统的二维数学模型,考虑了海流的影响,忽略缆索的弹性伸长,根据静力平衡计算每一个部件的水深、张力、倾角、水平偏移量等参数,并编制了计算软件供系统设计以及布放时使用。唐友刚等[7]采用集中质量法进行建模,提出了深海系泊系统系缆张

力的计算方法,此方法考虑了重力、浮力、张力、海流力、海底支持力等,结果表明海底地形变化较大时对系缆张力有一定的影响。兰志刚等[8]详细介绍了一种潜标系统静力计算和姿态分析的步骤与方法,考虑了缆索的伸长情况,建立了三维静力学模型,并指出潜标的深度需要迭代计算。张火明等[9]基于一维优化思想和悬链线方程方法计算每种锚泊线的张力—跨距曲线,通过拉格朗日插值的方法计算系泊系统的恢复力,该方法的应用局限干悬链线式和半张紧式的系泊系统。

动力法可分为连续法和离散法。摄动法是一种连续模型方法,将缆索的非线性动力学方程应用摄动展开,将其简化成线性方程,推出一阶摄动方程,对其运用频率域的解法求解,但该方法将非线性因素进行了一定的简化处理,得到的结果为近似解。Mavrakos等”“运用频域和时域分析方法研究水下钢缆的动力学响应,计算了缆索的动态张力及运动,并且分析了附着潜杯对系泊缆动力学特性的影响。Sarker等[12]采用频域法分析了海洋平台随机运动对系泊缆动力学特性的影响。在线性化分析处理过程中,研究了水流速度对拖曳力的影响以及海底摩擦阻尼效应。范菊等[13][14]应用摄动理论推导了锚泊线张力响应函数,研究了水动力的非线性对锚泊线的动力的影响。朱新颖、黄祥庵等[15]采用摄动法将锚泊线的运动方程线性化,得出频域一阶响应函数。肖越等[16][17][18]分别采用有限差分法和频域格林函数法求解三维锚链线静力模型和浮体频域运动模型,得到锚泊浮体的运动响应和锚链线上的张力变化。

离散方法分为基干缆索偏微分方程的数值解法和基干物理模型和力学模型的空间离散方法。有限差分法是一种数值离散方法,缆索动力学偏微分方程组的解由时域内数值迭代求解一系列代数方程来近似,迭代方法包括向前、向后、中间差分等方法,方程形式上为一组一阶偏微分方程。Huang[19]采用时域有限差分法计算了系泊系统在二阶慢荡力作用下的动力学响应。Tjavaras[20]建立了一组微分方程来描述弹性缆索的运动,采用有限差分法和隐式数值积分方法求解微分方程组,通过仿真研究了缆索断裂响应的主要影响因素和近水面潜标在波浪激励下的动力学响应及稳态分析。Gobat等[21][22]采用一种新型的有限差分方法建立了缆索静力学和动力学方程,可广泛应用于水上水下单点系泊、多腿系泊、缆索拖曳、漂流等方面的力学分析。

基干物理模型和力学模型的空间离散方法有集中质量法、有限元法、有限段法(多体法)。集中质量法基于缆索的物理模型,将缆索视为由一系列无质量弹

簧连接着离散的集中质量节点。代表仪器部件的集中质量节点单独计算，代表缆索的集中质量节点取上下相邻两段缆索元质量之和的一半。重力、浮力、流体阻力、惯性力、附加质量力集中千各节点处，建立整个系统的动力学非线性微分方程组，形式上为二阶常微分方程，在解法上通常采用龙格—库塔法。**Vaz**等^[23]^[124]建立了缆索的二维、三维数学模型，核心是将缆索划分成 n 段，根据力平衡及几何关系列出非线性常微分方程并运用“龙格—库塔法”求解。**Kamman**等^[25]分析了可变长度拖带缆系统的动力学响应，采用集中质量的方法建模，主要的优点在于便于模拟释放和回收过程，且计算效率高。刘应中等^[26]采用准定常时间域方法分析了在风、浪、流联合作用下海上系泊系统的运动及动力学特性，采用推广的三维集中质最法求得描链的动力学特性。聂梦喜等^[27]采用集中质量法建立了描链和水鼓的二维数学模型，采用了时域分析方法开发了估算风、浪、流联合作用下的防风水鼓系泊系统系泊力的数值模拟计算程序。朱克强等^[28]^[29]^[30]采用了集中质量—弹簧离散模型，提出了海洋缆一休系统的三维动态性能时域分析法。王飞、黄匡樑等^[3]“采用集中参数法建模描述船上拖缆释放或回收时的动力学响应。

有限元法基千弹性力学，将缆索离散成有限个单元，根据能量方程或加权残量方程可建立有限个待定参量的代数方程组，求解此离散方程组就得到有限的数值解。谢楠等^[32]介绍了由表面浮标、缆索及中间物体组成的综合海洋缆系统动力学特性的二维时域有限元分析方法。余龙、谭家华^[33]^[34]通过建立海洋环境载荷作用下的描泊线与海底接触的有限元模型，在时域内求解了系泊系统的动态响应。袁梦等^[35]^[36]采用时域有限元法建立了缆索方程的数值模型，以单点系泊和多点系泊的模拟比较为例，并开发了相应的计算程序。

有限段法（多体法）将连续的缆索离散成一系列的铰接缆段，采用多体理论进行分析，目前最常用的多体方法有以牛顿—欧拉方程为代表的矢撮学方法、以拉格朗日 H 方程为代表的分析力学方法、Roberson-Wittenburg方法、凯恩方法等。**Baddour**等^[37]对垂荡平台上绞车连接的系泊缆索单元的释放和回收进行了研究，运动凯恩方程分析了系统的动力学响应。李晓平等^[38]采用多体系统方法对缆索动力学特性进行理论分析，建立了缆索多体动力学三维有限段模型。王树新、王延辉等^[39]^[40]以水下弹性缆索为研究对象，提出弹性缆段模型，得到了包含附加质量力影响的水下弹性缆索的动力学方程。

在稳定性研究方面，Huang^[4]“对系泊在平台上的缆体张紧—松弛运动进行了

稳定性分析，建立了单自由度模型，通过计算雅克比矩阵的特征值来分析一个周期响应的稳定性。Umar等^[42]研究了在一阶和二阶波浪力作用下多点系泊浮标系统的非线性动力学响应，分析了各种失稳现象，同时指出二阶波浪力对此类系统稳定性的影响更大。常宗瑜等^[43]研究了线性波浪激励下系泊潜标的非线性动力学响应，通过庞加莱映射研究了奇异吸引了和分叉现象。杜度等^{[44][45]}以三阶操纵运动方程为基础，建立了系泊系统的多自由度的计算机仿真模型，通过仿真和试验研究了单点系泊系统的分岔特性。

系泊系统在布放方面的研究工作同样不可忽视，Berteaux等^[3]详细介绍了海洋学浮 / 潜标系统的分类、设计及组成部分，并对投放和回收的方法、步骤进行了阐述。Ostorn等^[46]在技术报告早介绍了浮 / 潜标系统在施工船上的布放操作过程。杨坤汉等^[47]提出了两种潜标系统布放方法，并指出潜标布放通常采用“标铰法”（浮标先行投放法），讲述了该方法的船上操作技术及回收技术。矫玉田等^[48]采用浮标先行投放法在自令海峡和北冰洋楚科奇海布放了一套潜标和两套浮标，介绍了铰链系统的设计、布放、回收步骤等。

1.3 本文的主要研究内容

在各种单点系泊系统中，海洋单点浮 / 潜标系统具有典型的单点系泊系统特性，故以此类系统作为研究对象，采用集中质量的方法建立了单点浮 / 潜标系统的静力学模型和动力学模型，对系泊系统的工作状态、布放过程、波浪激励下的响应等方面进行了研究，开发了单点系泊系统分析软件。

具体工作主要有以下几个方面：

1) 单点浮 / 潜标系统静力学模型的建立。采用考虑所有力的多边形近似法建立浮标系统的静力学模型，各段缆索及仪器部件在处理上采用集中质量的方法，计算各节点所受的缆索张力及工作姿态，制定计算流程，编写计算迭代程序。

2) 浮 / 潜标系统动力学模型的建立。采用媒中质最法建立浮 / 潜标系统的弹簧质量模型，考虑惯性力的作用推导各节点的非线性动力学常微分方程。对系泊系统的布放过程进行数值仿真，分析比较节点划分数量以及参数变化对分析结果的影响；研究波浪激励下系泊系统工作过程的动力学响应。

3) 开发一款单点系泊系统分析软件。该软件可以对系泊系统进行参数设计，既能对系统的工作过程进行静力分析和姿态计算，又能模拟系统的布放过程及规则波浪激励下的响应。

2 单点系泊系统的静力学分析

一般的单点系泊系统的静力分析主要集中在对系泊缆索张力的计算上，而海洋单点浮 / 潜标系统的静力分析更为详细。海洋浮 / 潜标系统附连的测量仪器、浮球、释放器等装置长时间处于水下环境中，为保证系泊系统能长期稳定可靠地工作，必须对系统在水下的受力状况和姿态进行计算，以便确定装置在投放海域极限情况下各个部分的受力大小、姿态；另外通过系统的工作姿态可推算系泊水域环境参数的垂直分们信息。显然对海洋浮 / 潜标系统进行静力学分析更能全面地了解单点系泊系统中的静力学问题。

为了实现对系统工作姿态的控制，系泊系统的缆索种类、长度，浮体的大小以及重力描的质量等参数值的选取值得深入研究。出于力学分析方面的考虑，对系统工作环境以及系泊结构的物理性质进行必要的简化和假设，忽略次要条件，具体如下：

- 1) 由千进行静力分析，忽略波浪对系统载荷的影响；
- 2) 假定海流为平面流，在垂直方向上无分量，将分析简化为二维问题；
- 3) 假定缆索为挠性构件，不承受剪应力，不传递力矩。

2.1 基千集中质量的多边形近似法

在静力学分析方法上，本章提出基千集中质量的多边形近似法。采用集中质量法处理系泊系统时，将每段系泊缆连接的仪器部件单独作为一个节点进行集中参数处理，原则上保证主要仪器部件所受的张力不失真；缆索在分段处理时，将每段缆索的质量等参数信息集中到该段缆索的几何中心。

在上一步的基础上采用多边形近似法，首先计算前一个节点的重力和浮力，然后根据海流速度计算水动力阻力，合成拉力欠晕，顺着拉力矢量的反方向作折线至下一个节点，即近似地求出整个系泊系统的姿态。

为了切实地研究系留索的载荷及伸展情况，有必要考虑系留索各组件的弹性特性。将两个节点间看作由无质量弹簧铰接而成，这样整个系统可视为弹簧—质最系统，如图2-1所示。在考虑缆索的弹性伸长后，将静力分析计算得出的理论姿态与实际情况进行比较，然后对初始值进行修TE,反复迭代计算，直至理论值与实际值近似相等。计算机方法在处理迭代计算时显示了它的优越性，本章第三节将详细介绍迭代过程。

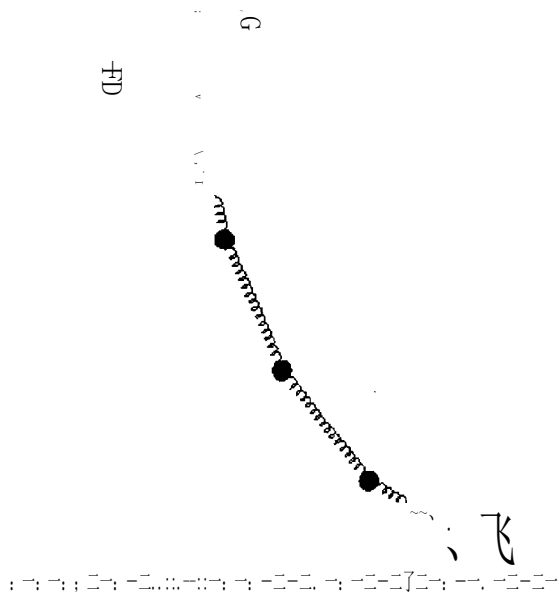


图2-1基千集中质盐的多边形近似法

2.2 静力学模型的受力分析

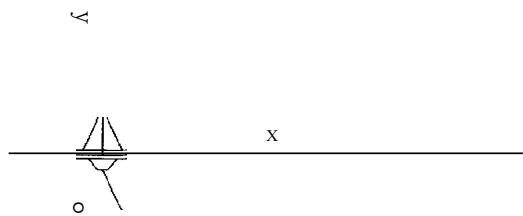


图2-2静力学坐标系

山千静力计算的起始节点在浮 / 潜标处，并参照物理意义上“向上为正、向下为负”的原则，单点系泊系统的静力分析可采用如图2-2所示的坐标系：在水平面作x轴，经过浮 / 潜标几何中心向上作y轴。根据简化和假设条件，采用二

维静力学模型。

2.2.1 浮标受力分析

以图2-3所示浮标为例，设定水流方向沿x轴负方向，为单向平面流。浮标受到的力有重力 G_1 、浮力 B_1 、水动力阻力 F_{D1} 、缆索张力 T_1 。

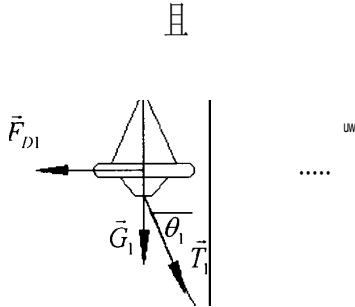


图2-3浮标静力平衡状态示意图

根据浮标质量，得出重力：

$$G_1 = m_1 g \quad (2-1)$$

浮标的浮力由其排开流体的体积决定，对于纵向不同位置处横截面积变化的浮标，其浮力通过积分求得：

$$B_1 = \int_{-y_1}^{y_1} \rho_w g A_{1x} dy \quad (2-2)$$

式中，

ρ_w 流体密度；

A_{1x} 纵向横截面积；对于直径为 d 的圆柱体浮标： $A_{1x} = \frac{\pi d^2}{4}$ ；对于球形

浮标： $A_{1x} = \pi(R^2 - y^2)$ 。

水动力阻力由下式给出：

$$F_{D1} = \frac{1}{2} \rho_w C_{D1} A_{1x1} U_{W1}^2 \quad (2-3)$$

式中，

C_{D1} 流体对浮标的阻力系数；

A_{1x1} ——浮标水平方向浸湿面积；

U_{W1} ——浮标处流体的单向流速。

浮标处于平衡状态，静力平衡方程由下式给出：

$$B - G = F \sin \theta_1 \tag{2-4a}$$

$$F \cos \theta_1 = \tag{2-4b}$$

式中，

θ_1 — F 与水平方向的夹角。

求解上述静力平衡方程，可以得出浮标下端缆索的张力 F 及水平夹角 θ_1 ：

$$F = \sqrt{(B - G)^2 + F_m^2} \tag{2-5a}$$

$$\theta_1 = \arctan \frac{B - G}{F_m} \tag{2-5b}$$

在上述计算中，浮标在工作过程中的浮力是未知的，需要给定一个初始估算值；若系统初始节点为潜标，则上述计算中浮力 B 和浸湿面积 A_{wi} 为已知量，而不需假设估算。估算浮标浮力的目的以及方法将在下一节具体讲解。

2.2.2 缆索受力分析

如图2-4所示，代表缆索段的第 i 个节点受到的力有重力 G_i 、浮力 B_i 、水动力阻力 F_{wi} ，缆索张力 T_{i-1} 和 T_i 。

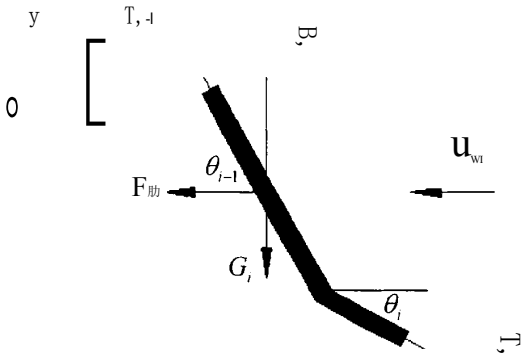


图2-4 缆索段静力平衡状态示意图

根据缆索段的质量，得出重力：

$$G_i = m_i g$$

在已知缆索直径及长度的情况下，计算其体积，进而得该缆索段的水下浮力：

$$B_i = \rho_w V_i = \rho_w g V_i \quad (\text{于}) \tag{2-6}$$

式中,

l_i 节点 i 所代表的缆索段的长度;

d_i 该段缆索直径。

水动力阻力山下式给出:

$$F_{Di} = \frac{1}{2} C_D A_{xi} l_i U_{xi}^2 \quad (2-7)$$

式中,

C_D 流体对缆索段的阻力系数;

A_{xi} 缆索段水平方向浸湿面积, $A_{xi} = d_i U_{xi}$;

U_{xi} 该缆索段处流体的单向流速。

缆索段处于平衡状态时, 静力平衡方程由下式给出:

$$B_i - G_i + T_{i-1} \sin \theta_{i-1} = T_i \sin \theta_i \quad (2-8a)$$

$$F_{Di} + T_{i-1} \cos \theta_{i-1} = T_i \cos \theta_i \quad (2-8b)$$

式中,

θ_{i-1} T_{i-1} 与水平方向的夹角;

θ_i T_i 与水平方向的夹角。

在已知 B_i , G_i , F_{Di} , T_{i-1} 及 θ_{i-1} 的前提下, 求解上述静力平衡方程, 可以得出缆索段下端的张力 T_i , 及水平夹角 θ_i :

$$T_i = \sqrt{(B_i - G_i + T_{i-1} \sin \theta_{i-1})^2 + (F_{Di} + T_{i-1} \cos \theta_{i-1})^2} \quad (2-9a)$$

$$\theta_i = \arctan \frac{B_i - G_i + T_{i-1} \sin \theta_{i-1}}{F_{Di} + T_{i-1} \cos \theta_{i-1}} \quad (2-9b)$$

由上述公式推导可知, 若给出节点前端的张力 T_{i-1} , 即可求出节点下端的张力 T_i , 中间各个节点的张力及姿态倾角依次用上述方法逐步计符。此外, 代表仪器部件的中间节点也按照上述方法进行静力计算。

2.2. 3 锚的受力分析

如图2-5所示, 代表重力锚的第 n 个节点受到的力有重力 G_n 、浮力 B_n 、海底支持力 N_n 、海底摩擦力 F_n 、水动力阻力 F_{Dn} 、缆索张力 T_n 。

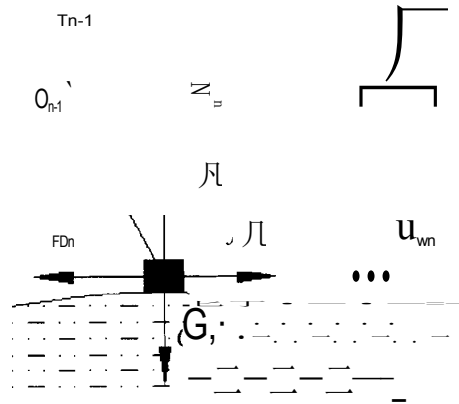


图2-5 重力锚静力平衡状态示意图

根据锚的质量，可知重力：

$$G_n = m_n g$$

已知锚的体积，可知水下浮力：

$$B_n = \rho_w g V_n$$

水动力阻力由下式给出：

$$F_{Dn} = \frac{1}{2} \rho_w C_D A_n \bar{u}_{wn}^2 \quad (2-10)$$

式中，

C_{Dn} 流体对重力锚的阻力系数；

A_{xn} 锚水平方向浸湿面积；

$\bar{u}_{wn}$ 海底处流体的单向流速，一般此处流速为零。

重力锚与海底间的摩擦力为：

$$f_n = \mu N_n \quad (2-11)$$

式中，

μ ——库伦摩擦系数；

N_n ——海底支持力，可根据静力平衡方程求得。

锚上端缆索的张力 T_{n-1} 已经通过浮标下端的缆索张力逐步求出。缆索段处于平衡状态时，静力平衡方程由下式给出：

$$+B_n - G_n + T_{n-1} \sin \theta_{n-1} = 0 \quad (2-12a)$$

$$FD_n + T_{n-1} \cos \theta_{n-1} = N_n \quad (2-12b)$$

若式(2-11)不成立，即存在 $F_{1,n} + T_{n-1} \cos \theta_{n-1} > \mu N_n$ 的情况时，说明系统将会发生走锚现象。

由于重力锚靠自身与海底的摩擦力来阻止走锚现象的发生，若锚组件附带抓力锚，在得知抓力锚的最大抓力的情况下，同样可以对系泊系统是否会发生走锚现象进行分析。因此，在缆索及各部件强度允许的情况下，附带抓力锚的系泊系统可以承受更大的环境载荷。

2.3 静力学模型的姿态计算

在前一节的静力学模型受力分析中，关于力的计算有几个关键的问题需要引起注意：

1) 不同类型的节点，其沿水流方向的浸湿面积表达式不同。浮标节点的浸湿面积根据其浮力大小决定；潜标节点的浸湿面积为定值；中间节点的浸湿面积由其姿态倾角和横截面积决定；重力锚的浸湿面积即其x方向横截面积。

以浮标节点为例，浮标形状分为柱体浮标、球体浮标等。浸湿面积的计算如下：

$$A = d \sqrt{h}$$

$$A = \frac{1}{2} \pi d^2 \sin^2 \theta$$

式中， d ——柱体的直径； θ ——球体的半径。

h ——柱体或球体浮标最下端的纵坐标，该点最先入水；

d ——柱体的直径；

R ——球体的半径。

若浮标为其它不规则形状，不同入水深度的浸湿面积需要通过下水试验测量得出相应的数据表，将其拟合成深度—浸湿面积曲线，计算时直接调用函数值。

2) 两个节点间缆索的倾角存在多种情况，与x干方向的夹角取值范围为0~360度，在进行三角函数运算时，坐标公式涉及到正负符号的处理。具体情况如下：

以中间某一个节点*i*为研究对象，该节点受到重力 G_i 、浮力 B_i 、水动力阻力 F_{Di} 、前一段缆索的张力 T_{i-1} 、下一段缆索的张力 T_i 。根据算法可知， T_i 是由 G_i 、

B_i 、 F_i 、 T_i 通过静力平衡方程计算得出，为了描述 T_i 的倾角 θ_i ，角，将 G_i 、 B_i 、 F_i 、 T_i 分解到 x 、 y 两个方向，得 T_{ix} 和 T_{iy} 两个分力，其方向以及下一段缆索的姿态如图 2-6 所示。

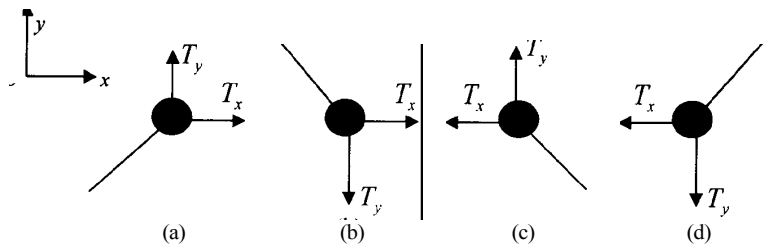


图 2-6' 1b 点 i 受力及姿态分析

为了满足各节点坐标公式： $x_{i+1} = x_i - (L + M_i) \cos \theta_i$ ， $y_{i+1} = y_i - (L + M_i) \sin \theta_i$ 便于编程时参数化处理，将姿态倾角 θ_i ，作如下定义：

图 2-6 (a) 中， $T_x > 0$ ， $T_y > 0$ ， $\theta_i = \arctan \frac{T_y}{T_x}$ (2-13a)

图 2-6 (b) 中， $T_x > 0$ ， $T_y < 0$ ， $\theta_i = \arctan \left[\frac{T_y}{T_x} \right]$ (2-13b)

图 2-6 (c) 中， $T_x < 0$ ， $T_y > 0$ ， $\theta_i = \pi + \arctan \frac{T_y}{T_x}$ (2-13c)

图 2-6 (d) 中， $T_x < 0$ ， $T_y < 0$ ， $\theta_i = \pi + \arctan \left[\frac{T_y}{T_x} \right]$ (2-13d)

特定情况： $T_x = 0$ ， $T_y \neq 0$ ， $\theta_i = \arctan \frac{T_y}{T_x}$ (2-13e)

$T_x = 0$ ， $T_y = 0$ ， $\theta_i = \pi / 2$ (2-13f)

3) 边界条件：除了要满足锚的静力平衡方程，还要使计算得到的锚的位置恰好着底，即不考虑锚入土的深度的情况下，使 $Y_n = -h$ 为水深。若首节点为浮标节点，需要假定浮标的浮力，推导末节点的坐标以满足静力学边界条件。这个过程需要不断修正浮标的浮力，反复迭代运算。若首节点为潜标，则其浮力为已知量，仅需假定潜标的坐标，推导末节点的坐标，将其与边界条件比较得出的差值修正到潜标坐标中去即可。以浮标系统为例，计算流程如下：

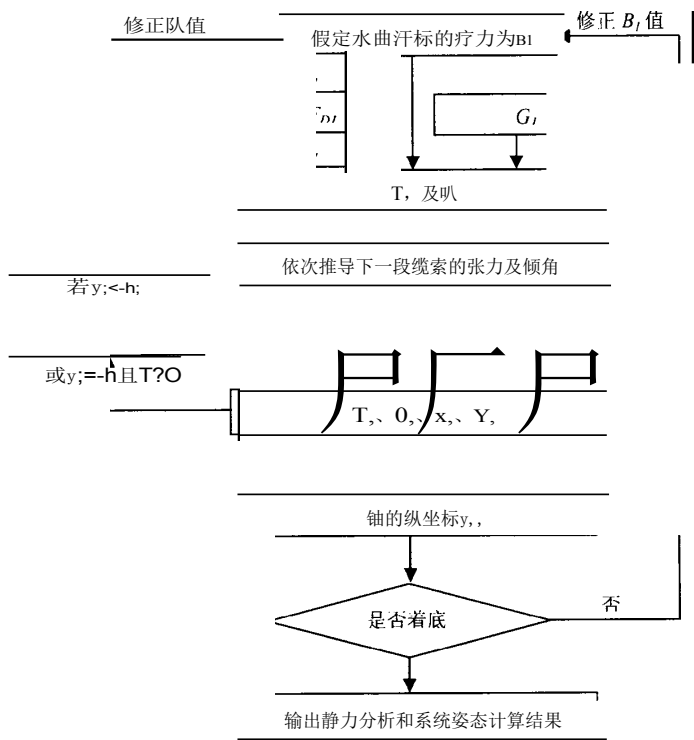


图2-7静力学计算流程图

根据该流程，假定浮标的浮力值BI,确定浮标节点的坐标(x₁,y₁),同时计算得出第一段缆索张力飞及水平夹角0₁，根据该段缆索的弹性模量E₁、横截面积A₁₁、缆索自然伸长时浮标节点与缆索节点的距离L₁，可知两节点间缆索伸长量：

$$\Delta L = \frac{FL}{EA_{11}}$$

然后可以得出与浮标相邻的节点坐标为：

$$x_1 = x_1 - (L_1 + \Delta L) \cos \theta_1 \tag{2-14a}$$

$$Y_2 = Y_1 - (l_1 + M_1) \sin \theta_1 \tag{2-14b}$$

重复上述计算步骤，逐步求出各节点坐标：

$$X_n = x_i - \sum_{i=1}^{n-1} [(L_i + M_i) \cos \theta_i] \tag{2-15a}$$

$$Y_n = y_i - \sum_{i=1}^{n-1} [(L_i + M_i) \sin \theta_i] \tag{2-15b}$$

式中，

L_i 节点*i*与节点*i +1*间缆索的自然长度，注意与*L*₀代表的含义不同；

$\Delta L_i = \frac{T_i}{EA_i}$ 节点*i*与节点*i+1*间缆索因张力*T*而产生的伸长量。

在计算得出的描节点纵坐标不满足要求时，修正*b₀*值；在计算得出的描节点纵坐标符合其所在海底位置的情况下，系统的横向姿态偏移为：

$$x_c = \sum_{i=1}^{n-1} [(L_i + \Delta L_i) \cos \theta_i]$$

(2-16)

2.2 实例分析

以图2-8所示的某浅水环境下工作的浮标系统为例，对单点系泊系统在工作过程中的姿态进行分析。该浮标系统主要组成部分为：1个直径3m、重2700Kg的水面球形浮标；1个质量1000Kg的重力描；3段直径约13/16英寸的描链，每段长27m。根据集中质量的方法，浮球、卸扣、重力描分别集中质屋成一个节点，每段描链等分成两小段，每小段集中质量成一个节点，如图2-9所示。这样处理的优点是多种材质的部件不交互集中质量，单个部件的静力计算较为精确。为了便于程序化计算，现将各节点物理参数及其它参数列于表2-1、2-2,其中*C_f*的选取参照Dewey[4]“的实验数据。

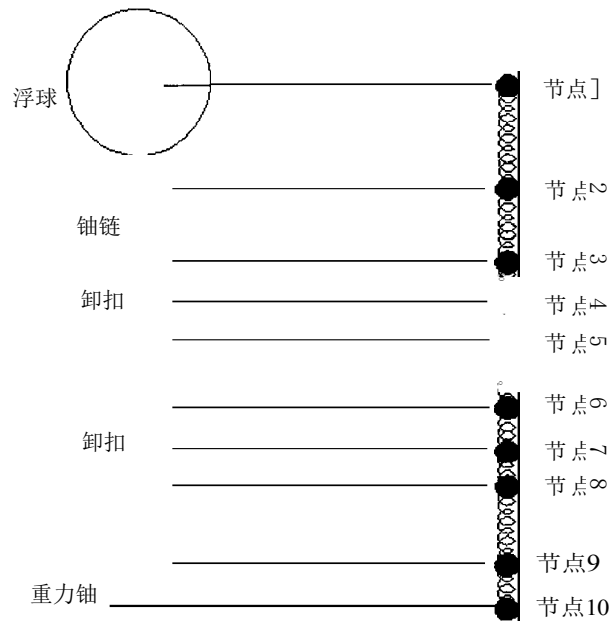


图2-8浅水浮标系统示意图

图2-9 集中质挽模型

表2-]各' h点物理参数

	L,[mJ	E, [MPa]	AL; [m2]	m;[Kg]	B; [A1	A,x [ml]
节点1	6 75	2X 105	IX 10~4	2700	0~142700	计算
节点2	13.5	2X 105	IX 10~4	135	174.6	0.27
节点3	6.75	2X 105	1x10~4	135	174.6	0.27
节点4	6.75	2X 105	1x10~4	1	13	0 01
节点5	13.5	2X 105	IX 10~4	135	174.6	0.27
节点6	6.75	2X 105	IX 10~4	135	174.6	027
节点7	6.75	2X 105	IX 10~4	1	13	0 01
节点8	13 5	2X 105	IX 10~4	135	1746	0.27
节点9	6.75 0	2X 105 0	1x10~4 0	135	1746	0.27
节点10				1000	1300	0 26

表2-2水动力学及其它参数

	1节点	11节点	21节点	31节点	41节点	51节点	61节点	71节点	81节点	91节点	10节点
CD	0.65	1	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
μ	0.5										
p [Kglm勺	1030										
h[m]	40										

为了研究不同流速下系统的工作姿态，该系泊系统工作环境采用两种不同流速的单向平面流，海流剖面如图2-1O(a)、(b)所示。

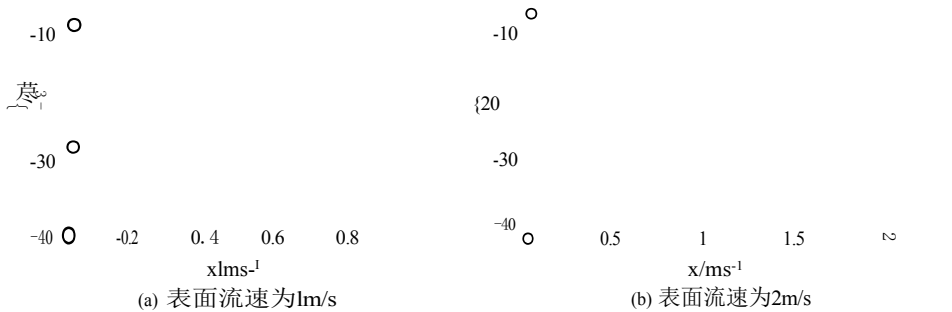


图2-10海流剖面图

根据计算流程，首先假定浮标的浮力 B_f ，根据浮力推导浮球的入水深度，进而得出其浸湿面积 A_{ir} ，求得浮球所受到的水动力阻力，然后逐步求出各段缆索的张力及倾角。通过程序迭代计算最终得出：在图2-10(a)水流环境下， $F_1=30720\text{N}$ ；在图2-10(b)水流环境下， $B_1=32458\text{N}$ 。由于获得的各节点坐标值以及相邻两节点间缆索的张力值是不连续的，在绘制系统姿态曲线以及张力曲线时，需要运用MATLAB曲线拟合图形界面[50]，将有限个点通过插值的方法绘成平滑曲线。

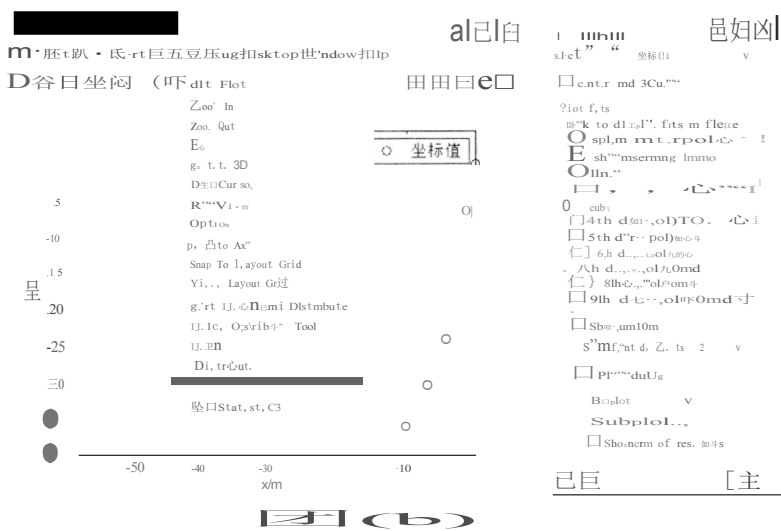


图2-11曲线拟合图形界面

如图2-11(a)所示，在已得出的节点图像窗口中，选择“Tools”——“Basic Fitting”命令，打开关于该数据的拟合图形界面，展开的默认对话框如图2-11(b)所示，在“Check to display fits on figure”选项卡中勾选“shape-preserving interpolant”保形插值选项。选择该插值，是因为其它插值都会产生虚假的波动，不具备保形效果，同时保形插值曲线包含了离散节点的值，其它类型的曲线是“穿而不过”（样条曲线spline插值除外）。

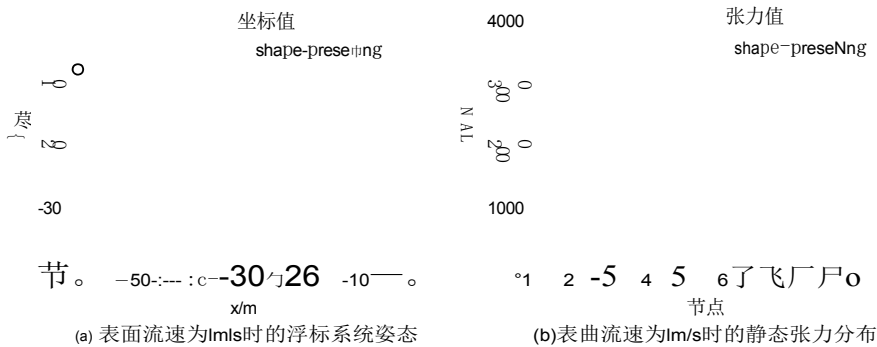


图2-12表面流速为1m/s时的浮标系统L况

通过曲线拟合后的表面流速为1m/s时的浮标系统工况如图2-12所示。图(a)表明：在表面流速为1.0m/s的工况下，系统在水平方向展开约54m;节点6所代表的铀链也处于着地状态；着底的部件所受到的张力均沿水平方向。图(b)表明：靠近浮标处的缆索承受的张力最大，约4300N,节点9代表的缆索与海底的最大静摩擦力 $f_{\max}$ 大于该段缆索的水平张力，使得末端描链不受前段缆索张力作用（这与摩擦系数 μ 的取值大小有关）。静力学计算中认为木端缆索张力为零，实际上末端缆索可能存在预紧张力，张力值介于0和 $f_{\max}$ 之间。

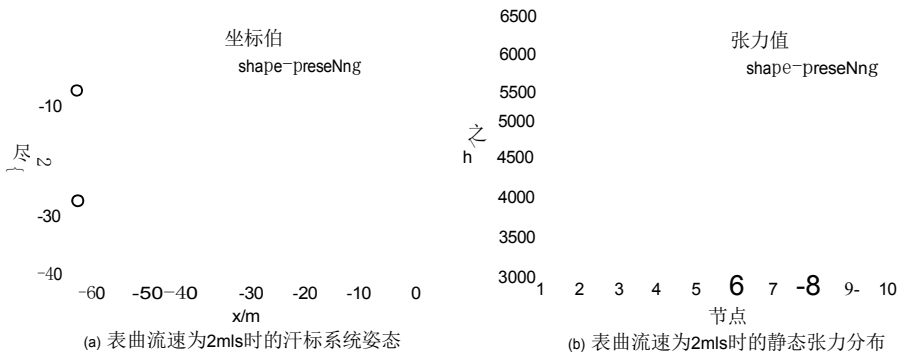


图2-13表面流速为2m/s时的浮标系统I况

表面流速为2m/s时的浮标系统工况如图2-13所示。图(a)表明：在表面流速为2.0m/s的工况下系统在水平方向展开约63m;节点9所代表的铀链也处于着地状态；重力描所受到的张力沿水平方向。图(b)表明：靠近浮标处的缆索承受的张力最大，约6480N,靠近铀端的缆索承受的张力最小，约3297N。

针对表面流速为2m/s时的工况，需要分析系统是否会发生走锚现象，即锚与海底间产生的最大摩擦力是否足以克服锚端缆索的水平张力。按照图2-5进行锚的受力分析，由图2-10(b)可知 $\theta_9=0^\circ$ 根据式(2-12)可得：

$$F_{\text{沁}} = G_{10} - B_{10} = 8506\text{N}$$

$$F_{\text{几}} = F_{\text{兀}} = 3297\text{N}$$

$\mu F_{\text{沁}} = 4253 > F_{\text{几}}$ ，说明该浮标系统在表面流速为2.0m/s的情况下不会发生走锚现象。

计算机在编写上述算例的计算程序时，仅需要编写一个主程序，不需调用其他子函数，可以明显地感受到静力计算过程短，效率高。为了使程序进一步模块化，可以将模型数据存储在excel表格或txt文档中，在主程序中直接读取数据。本文第四章将对此进行简介。

3单点系泊系统的动力学分析

单点系泊系统在投放及使用的过程中，会经受海流、海浪等环境载荷的冲击，从而产生顺应式的运动，导致缆索张力的变化。分析系统的动力学特性甚至准确预估其动力学响应，对指导系统设计、保证系统安全工作具有重要意义。本文采用基于物理模型的集中质量法，考虑缆索的弹性变形，分别对系统投放过程的动力学响应及在表面波浪激励下的运动响应进行分析。

3. 1动力学建模

建立单点系泊系统的动力学模型，需要对实际的系泊系统物理条件做进一步的简化。们放初期将外界的波浪载荷看作是扰动力，不计入本模型；对缆索的扭曲及仪器部件发生的旋转等情况不在本模型中讨论。具体如下：

- 1)认为外力均作用于集中质量的节点上，忽略力矩的转动效应；
- 2)忽略缆索弯曲刚度、局部扭折而产生的缆索永久性变形；
- 3)忽略节点代表的各部件的转动惯量效应。

3. 1. 1坐标系

为了推导系统的动力学模型，采用笛卡尔全局坐标系。这样处理的优点是将整个系统的运动响应在同一坐标系下描述，避开了坐标转换，有利于数值计算参数化。如图3-1所示，该坐标系定义了X、Y、Z二个坐标轴的方向，其中Z方向竖直朝上，使之与物理意义上的重力方向相反。坐标系的原点O既可以定义在水平面与浮标纵轴的交点上，也可以定义在描的重心上，视研究对象而定。

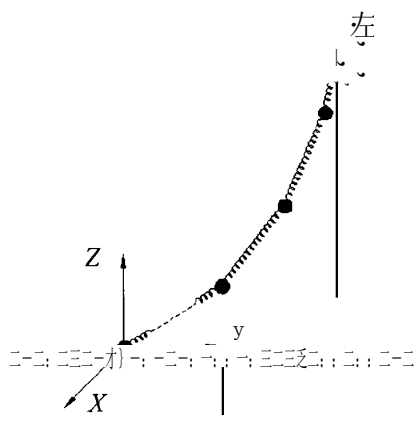


图3-1单点系泊系统动力学坐标系

3.1. 2受力分析

系泊系统在水中工作或实施们放时，浮标、缆索、各测量仪器以及描受到的力有：重力**G**、浮力**B**、水动力阻力凡、惯性力**E**、缆索张力f等，以节如所受到的力为例，如图3-2所示。

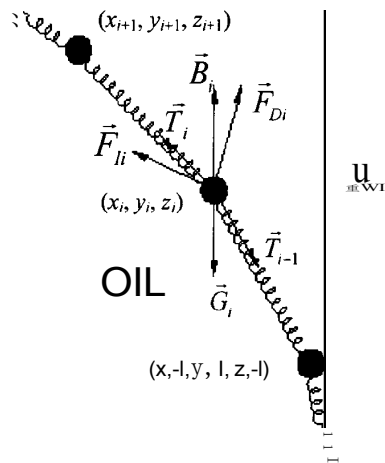


图3-2节点受力分析示意

3.1. 2.1重力及浮力

工作过程中除浮标外各节点的重力及浮力是定值；但在们放的全过程中，各个节点所受到的重力*G_i*为定值；而各节点浮力*B_i*在入水的过程中是不断增大的，在完全入水后，浮力保持不变。浮力计算公式如下：

$$B_i = \rho \cdot g \cdot V_i(z_i) = \rho \cdot g \cdot \frac{\pi d^2}{4} (z_{i+1} - z_i) \quad (3-1)$$

对于直径为*d_i*的圆柱体： $A_{cyl} = \frac{\pi d_i^2}{4}$ 对于球形物体： $A_{sph} = \pi (R_i^2 - z_i^2)$ 。

3.1. 2.2水动力阻力

水动力阻力体现了环境载荷的非线性。在计算节点所受流体阻力时，不再依据法向阻力和切向阻力公式，考虑到已选取的坐标系，根据相对速度，采用固定物体所受到的流体阻力公式进行计算如下：

$$F_{Di} = \frac{1}{2} \rho C_D |u_{wi}|^2 A_{Di} \quad (3-2)$$

式中，
u_{wi}——节点所处水深的水流速度矢量；

节点运动速度矢最。

将该矢量公式分解到x、y、z三个方向，即：

$$F_x = \rho_w C_D A_{ix} |U_x - U_{ix}| U_x \quad (3-2a)$$

$$F_y = \rho_w C_D A_{iy} |U_y - U_{iy}| U_y \quad (3-2b)$$

$$F_z = \frac{1}{2} \rho_w C_D A_{iz} |U_z - U_{iz}| U_z \quad (3-2c)$$

3.1.2.3 惯性力

节点所受到的惯性力是由节点的附连质量和节点所排开的流体的质量两部分产生的惯性力组成，即：

附连质量效应产生的惯性力为： $F' = m_a \frac{dU}{dt}$ ；

排开的流体的质量产生的惯性力为： $F'' = \rho_w J \frac{dU}{dt}$ ；

则节点所受的惯性力：

$$F_I = F' + F'' = m \frac{dU}{dt} \quad (3-3)$$

式中，

m_a 附连质量， $m_a = C_m \rho_w V$ ；

C_m 附连质量系数；

m_w 虚质量， $m_w = \rho_w V$ ， $m = (1 + C_m) \rho_w V$ ；

将该矢量公式分解到x、y、z三个方向，即：

$$F_{Ix} = m_a \frac{dU_x}{dt} + \rho_w J \frac{dU_x}{dt} = m \frac{dU_x}{dt} \quad (3-3a)$$

$$F_{Iy} = m_a \frac{dU_y}{dt} + \rho_w J \frac{dU_y}{dt} = m \frac{dU_y}{dt} \quad (3-3b)$$

$$F_{Iz} = m_a \frac{dU_z}{dt} + \rho_w J \frac{dU_z}{dt} = m \frac{dU_z}{dt} \quad (3-3c)$$

3.1.2.4 缆索张力

缆索张力是系统在布放过程中对其动力学响应影响较大的因素之一。由于缆

索刚度的不连续性，缆索几何形状的非线性，使得缆索张力具有强非线性的特点。在数值计算中，不同材料的缆索采用不同的弹性模量；同一段缆索在计算张力时，弹性系数采用分段函数的形式。

根据已建立的离散节点的弹簧—质量模型，采用三维空间坐标并引入方位角 θ 和仰角 ϕ 中，分析节点 i 所受到的张力，如图3-3所示。

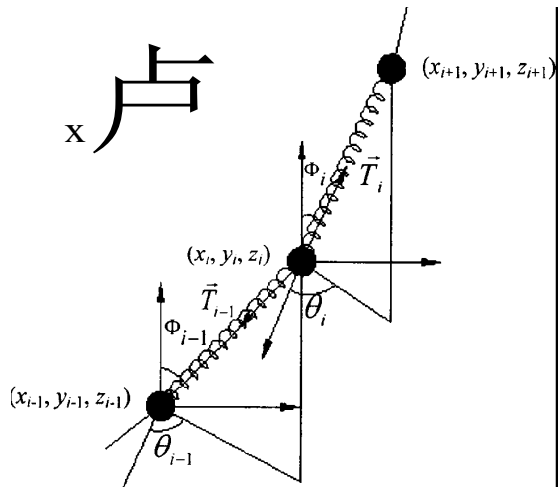


图3-3*i*点坐标示意图

节点 i 的坐标：

$$x_i = x_{i-1} + L_{i-1} \sin \theta_{i-1} \cos \phi_{i-1} \tag{3-4a}$$

$$y_i = y_{i-1} + L_{i-1} \sin \theta_{i-1} \sin \phi_{i-1} \tag{3-4b}$$

$$z_i = z_{i-1} + L_{i-1} \cos \theta_{i-1} \tag{3-4c}$$

式中，

L_{i-1} 节点 $i-1$ 与节点 i 之间的距离；

$$L_{i-1} = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}$$

因此通过节点 $i-1$ 与节点 i 的瞬时坐标值，可以求出瞬时方位角 θ_{i-1} 和仰角 ϕ_{i-1} ；同理可求出瞬时方位角 θ_i 和仰角 ϕ_i 。

缆索在受到张力时会拉伸，不受张力时处于松弛状态，因此缆索的弹性系数采用分段函数的形式，即：

$$\begin{aligned}
 \text{从} &= \frac{E_{i-1} A_{i-1}}{L_{i-1}} \quad L'_{i-1} > L_{i-1} \\
 & \quad L'_{i-1} \leq L_{i-1}
 \end{aligned} \tag{3-5a}$$

$$\begin{aligned}
 k_i &= \frac{E_i A_i}{L_i} \quad L'_i > L_i \\
 & \quad L'_i \leq L_i
 \end{aligned} \tag{3-5b}$$

式中, $\bigcirc$
 k_{i-1} 、 E_{i-1} 、 A_{i-1} 、 L_{i-1} 节点 $i-1$ 与节点 i 之间的缆索的弹性系数、弹性模量、截面积、自由长度;

k_i 、 E_i 、 A_i 、 L_i 节点 i 与节点 $i+1$ 之间的缆索的弹性系数、弹性模量、截面积、自由长度。

根据胡克定律, 节点 i 所受到的张力如下:

$$T_i = k_i (L'_{i-1} - L_{i-1}) \tag{3-6a}$$

$$T_i = k_i (L'_i - L_i) \tag{3-6b}$$

将节点 i 所受的张力分解到 x 、 y 、 z 二个方向, 得:

$$T_{ix} = T_i \sin \theta_i \cos \phi_i, T_{iy} = T_i \sin \theta_i \sin \phi_i, T_{iz} = T_i \cos \theta_i \tag{3-7a}$$

$$T_{ix} = T_i \sin \theta_i \cos \phi_i, T_{iy} = T_i \sin \theta_i \sin \phi_i, T_{iz} = T_i \cos \theta_i \tag{3-7b}$$

$$T_{ix} = T_i \sin \theta_i \cos \phi_i, T_{iy} = T_i \sin \theta_i \sin \phi_i, T_{iz} = T_i \cos \theta_i \tag{3-7c}$$

首节点和末节点由于只有一端受到张力, 因此公式略有不同。代表错的首节点所受张力分力公式为:

$$T_x = T_i \sin \theta_i \cos \phi_i \tag{3-8a}$$

$$T_y = T_i \sin \theta_i \sin \phi_i \tag{3-8b}$$

$$T_z = T_i \cos \theta_i \tag{3-8c}$$

同理, 代表浮 / 潜标的末节点所受张力分力公式为:

$$T_x = -T_{i+1} \sin \theta_{i+1} \cos \phi_{i+1} \tag{3-9a}$$

$$T_y = -T_{i+1} \sin \theta_{i+1} \sin \phi_{i+1} \tag{3-9b}$$

$$T_z = -T_{i+1} \cos \theta_{i+1} \tag{3-9c}$$

3.1.2.5 边界条件

运动学边界条件是指边界端的运动速度或位移是给定的，例如控制一端的速度或者运动轨迹；动力学边界条件是指边界端所受的外力是已知或部分已知的，例如浮 / 潜标受到的浮力，锚受到的海底支持力与摩擦力。

在本模型中，采用的是动力学边界条件。部分动力学边界条件是浮 / 潜标所受的浮力，已作过受力分析；另一边界条件是着底的节点所受到的海底支持力与摩擦力。关于海底支持力的计算，参照Gobat^[122]将海基底看作具有线性弹性系数 k' 及线性阻尼系数 c' 的物理模型，如图3-4所示。上述系数大小的选取会对节点着底时的响应产生一定影响，如锚的入土深度等，但对于整个系统在锚着底后响应并无太大影响。考虑到海底土壤分层模型的非线性及研究重点不在于着底节点的入土深度，本文采用线性模型，具体数值参照闻邦椿等^{[51][52][153]}关于土壤等效刚度、阻尼的描述。

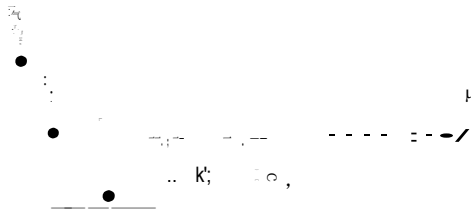


图3-4只有线弹性系数及阻尼的海基底模型

在竖直方向上，着底的节点所受到的支持力为：

$$F_z = \begin{cases} 0 & -h < z_i \leq 0 \\ k'(-h - z_i) + c' \dot{z}_i & z_i \leq -h \end{cases} \quad (3-10a)$$

在 x - y 平面内引入库伦摩擦系数 μ 模拟着底节点受到的平面摩擦力，即：

$$F_{cx} = \begin{cases} 0 & -h < z_i \leq 0 \\ -\mu F_z \text{sign}(\dot{x}_i) & z_i \leq -h \end{cases} \quad (3-10b)$$

$$F_{cy} = \begin{cases} 0 & -h < z_i \leq 0 \\ -\mu F_z \text{sign}(\dot{y}_i) & z_i \leq -h \end{cases} \quad (3-10c)$$

以上内容仅为本文档
的试下载部分，为可
阅读页数的一半内容。
如要下载或阅读全文，
请访问：

[https://d.book118.
com/57811107111400
6100](https://d.book118.com/578111071114006100)