

分类号: \_\_\_\_\_

密级: \_\_\_\_\_

U D C: \_\_\_\_\_

编号: \_\_\_\_\_

## 工学硕士学位论文

# 基于海洋扰动下船舶系缆的恒张力控制

硕士研究生：安娜

指导教师：吉明 副教授

学科、专业：控制理论与控制工程

论文主审人：梁利华 教授

哈尔滨工程大学

2015年3月



分类号: \_\_\_\_\_ 密级: \_\_\_\_\_  
U D C: \_\_\_\_\_ 编号: \_\_\_\_\_

## 工学硕士学位论文

# 基于海洋扰动下船舶系统的恒张力控制

硕士研究生: 安 娜  
指导教师: 吉 明 副教授  
学位级别: 工学硕士  
学科、专业: 控制理论与控制工程  
所在单位: 自动化学院  
论文提交日期: 2014 年 12 月  
论文答辩日期: 2015 年 03 月  
学位授予单位: 哈尔滨工程大学

Classified Index:

U.D.C:

## A Dissertation for the Degree of M.Eng

# Constant Tension Control of Ship Anchor line Based on Marine Disturbance

**Candidate:** An Na

**Supervisor:** Associate Professor Ji Ming

**Academic Degree Applied for:** Master of Engineering

**Speciality:** Control Theory and Control Engineering

**Date of Submission:** Dec.2014

**Date of Oral Examination:** Mar.2015

**University:** Harbin Engineering University

## 摘要

随着新型船舶的建造以及海洋资源的开发，近年来，国家对锚泊机械的发展越来越重视。处于锚泊状态的船舶，由于受风浪流等海洋扰动的影响会出现摇摆晃动的现象，就必然导致各个锚链上的受力情况发生变化。由于锚泊船的大惯性作用，锚链的张力会随船的摆动有大幅的震荡和波动，导致锚泊船的相对稳定性变差，这就可能会引起锚链系统故障而引发安全事故。为避免该现象的出现，有必要对锚链的恒张力控制进行研究。在集中控制及自动化要求日益高涨的时代，恒张力控制已成为工程作业船舶中的系泊绞车的必备性能。

针对本课题，本文以两个锚链系泊的锚泊船为研究对象，在分离型（MMG）结构模型的基础上，根据芳村康男低速域、大漂角的多项式模型，建立了双锚锚泊船的横荡、纵荡以及艏摇为主的三自由度运动数学模型。运用 MATLAB/SIMULINK 进行仿真研究，得到了在一定海洋扰动下的锚泊船的运动姿态及锚链的张力变化情况。

以电动控制的锚机系统为核心，对三相异步电动机的交流调速系统进行研究。在分析三相异步电机矢量变换控制原理的基础上，推导出异步电机在两相旋转坐标系下的数学模型。建立了大功率锚机电机的按转子磁链定向的矢量控制模型，在 MATLAB/SIMULINK 软件平台下，得到可以实现无级变频调速的锚机电机模型。在此基础上，研究电机输出轴上的恒力矩控制，以达到锚链的恒张力控制的目的。

最后，结合恒张力的控制要求，根据锚链上的受力情况，动态调整锚链的收放来实现锚泊船在一定海洋扰动作用下链缆的恒张力控制。并利用仿真来验证锚机恒张力变频控制策略的有效性。为了避免频繁的收放动作，将恒定张力值设定在一定的上下范围内，使锚泊船舶的锚链张力保持在一定范围内，这样就能有效的避免崩缆事故的发生，对锚泊船的周期性偏荡起一定的抑制作用。达到了减少人员的劳动强度，提高了安全系泊的可靠度的目的。

**关键字：** 双锚泊；偏荡运动；矢量控制；恒张力控制

## ABSTRACT

With the construction of the new ship and the development of marine resources, in recent years, the state increases emphasis on the development of anchoring mechanical. Due to the impact of storms and other marine flow disturbances, the ship of anchoring state occurs swing shaking phenomenon, thus, will inevitably lead to the forces changes on each chain. Because of the large inertia of the ship at anchor, anchor chain tension appears a substantial shock and volatility with swing onboard. The relative stability of chain tension is poor, which may cause the mooring system failure and then lead to accidents. To avoid the above phenomenon, it is necessary to study the control of anchor of constant tension. In the growing age of centralized control and automation requirements, for engineering work ship, the control of constant tension has become an essential performance to most convert platform and large cargo ships mooring winches.

In this paper, using boat of two anchor mooring as the research object, on the basis of separation type (MMG) structural model, according low speeds and large drift angle polynomial model of Fangcun Yasuo, three DOF mathematical model of double anchor mooring boat horizontal swaying, vertical swing and shake bow was established. By using MATLAB / SIMULINK simulation, in the setting ocean disturbance, changes in the chain's tension and athletic stance of anchored boat was acquired.

With electric control windlass system as the core, AC speed regulating System of three-phase asynchronous motor was studied. Based on the analysis of three-phase induction motor vector transformation control principle, the mathematical model of induction motor in the two-phase rotating coordinate system was deduced. Vector control model of high-power motor by rotor flux oriented was established. In the MATLAB / SIMULINK software platform, motor model that can achieve stepless frequency control was obtained. Based on the above, constant torque control of the motor output shaft was studied in order to achieve the purpose of the chain of constant tension control.

Finally, combined with the constant tension control requirements, it's required to dynamically adjust the retractable chain according to the forces on the anchor chain to achieve constant tension control of boat anchored chain cable at a certain disturbance of marine. And use simulation to verify the strategy validity of the constant tension windlass frequency control. In order to avoid chain retractable operation frequently, the constant tension is set at a certain range, so kept the ship's anchor chain tension within a certain range, thus can

effectively prevent the collapse of cable accident and also effectively inhibits the anchored ship Periodic yawing. The purpose of reducing labor intensity and improve the safety mooring reliability was reached.

**Key words:** Dual Anchoring; Yaw movement; Vector control; Constant tension control

# 目 录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 课题研究背景及意义.....	1
1.2 恒张力系泊系统介绍及国内外发展现状.....	2
1.2.1 恒张力系泊系统介绍.....	2
1.2.2 恒张力系泊系统国内外发展现状.....	3
1.2.3 张力系泊系统存在问题及发展趋势.....	4
1.3 课题的主要研究内容和结构安排.....	5
第 2 章 双锚泊船锚泊运动数学模型.....	7
2.1 引言.....	7
2.2 船舶运动数学模型.....	8
2.2.1 船舶平面运动坐标系.....	8
2.2.2 锚泊船平面运动方程.....	9
2.2.3 锚泊船的运动参量的无量纲化.....	10
2.3 作用于船上的水动力和力矩的计算与分析.....	11
2.3.1 流体动力及力矩计算.....	11
2.3.2 粘性流体动力及力矩计算.....	12
2.4 作用于船体上的流作用力及力矩的计算.....	14
2.4.1 定常流中的运动学关系.....	15
2.4.2 流压力和流压力矩.....	15
2.5 平均风压力和力矩的研究.....	16
2.5.1 相对风速和绝对风速.....	16
2.5.2 风压力和风压力矩的计算.....	17
2.6 锚链张力和力矩的计算模型.....	18
2.6.1 锚链平面坐标系的建立.....	18
2.6.2 锚链张力的计算.....	19
2.7 模型仿真验证.....	21
2.8 本章小结.....	21
第 3 章 锚链恒张力控制策略的研究.....	23
3.1 引言.....	23
3.2 张力控制系统原理及分类.....	23
3.2.1 张力控制系统原理.....	23

3.2.2 张力控制系统的分类.....	25
3.2.3 张力检测.....	26
3.3 船用绞车动力系统分析.....	26
3.3.1 锚机系统介绍.....	27
3.3.2 恒张力锚机系统工作状态及控制方式.....	27
3.4 异步电动机交流调速原理及控制方式.....	28
3.4.1 直流电机调速原理.....	28
3.4.2 异步电机调速原理.....	28
3.4.3 交流异步电机控制方式.....	29
3.5 锚机恒张力总体方案.....	30
3.5.1 锚机的负载转矩特性.....	30
3.5.2 锚机电机的转矩特性.....	31
3.5.3 恒张力控制.....	32
3.6 本章小结.....	33
<b>第 4 章 恒张力锚机动力系统的建模与调速控制.....</b>	<b>35</b>
4.1 异步电机的三相动态数学模型.....	35
4.2 三相异步电动机在两相旋转坐标系上的动态数学模型.....	36
4.2.1 3s/2r 变换.....	36
4.2.2 两相静止-两相旋转坐标变换.....	37
4.2.3 d-q 坐标系上的数学模型.....	37
4.3 基于矢量控制的异步电机调速.....	38
4.3.1 转子磁链定向方式下的矢量控制.....	38
4.3.2 交流电流控制模式.....	40
4.4 基于 MATLAB 的交流异步电机矢量控制系统模型的建立.....	40
4.4.1 异步电动机矢量控制数学模型.....	40
4.4.2 基于 MATLAB 的磁链闭环转差型矢量控制.....	42
4.4.3 基于 SIMULINK 的仿真模型的建立.....	43
4.5 基于矢量控制的电机恒力矩控制.....	45
4.6 本章小结.....	46
<b>第 5 章 锚链的恒张力控制系统的仿真分析.....</b>	<b>47</b>
5.1 控制系统的计算机仿真实现.....	47
5.1.1 仿真模型及参数.....	47
5.2 锚泊船运动特性及锚链张力特性仿真分析.....	49
5.2.1 扰动作用下锚泊船运动特性仿真.....	50

5.2.2 改变链长对锚泊船运动特性及锚链张力的影响.....	53
5.3 锚机恒张力控制仿真分析.....	56
5.3.1 大功率电机变频调速仿真.....	56
5.3.2 电机恒转矩调速控制仿真分析.....	57
5.3.3 海洋扰动作用下锚链张力控制仿真分析.....	59
5.3.4 锚链恒张力控制对双锚泊船姿态的影响.....	64
5.4 本章小结.....	67
结    论.....	69
参考文献.....	71
攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果.....	75
致    谢.....	77

# 第1章 绪论

## 1.1 课题研究背景及意义

### (1) 选题目的及背景

锚绞机是重要的船舶辅机和甲板设备之一。当在码头或锚地船舶需要停泊时，用该类设备来固定船位以提高系泊的安全稳定性。在海上作业时，工程船舶经常需要停泊在码头或者锚地，锚绞系统运行质量对于系泊船的安全和锚泊的可靠性。同时，船舶离岸或者靠港时，锚绞机也是重要的辅助设备。在海上实船系泊、靠绑作业或者是在港系泊时，由于自然条件的影响，船舶常常受到海风、海浪及海流等扰动作用的影响，故常需使用一种“缆绳恒张力控制装置”对缆绳上的扰动进行力的补偿，来有效的控制缆绳张力在期望的范围内，以提高系泊的安全性。在港或锚地系泊时，当船舶在载重变化或突然风浪流的作用，船的系泊位置就会随着发生变化，有时可能出现链缆冲击张力过大而崩断的现象，可能导致非常严重甚至难以弥补的事故，这就需要及时地调整原先系泊好的缆索，即适时的收放系泊链缆。如果众多的链缆的调整都需要船上的工作人员来进行手动操作，其任务量和繁忙程度可想而知。



图 1.1 船舶在港系泊实况图

因此，逐渐地就出现了对能够自动调整链缆张力大小的恒张力绞车或恒张力锚机的需求。其原理是：当外力小于限制值时，恒张力绞车或锚机就自动把链缆收紧；当外力大于设置的转矩上限值时，锚绞机就自动放缆。外部扰动力越大，锚机的制动力越大，来控制锚泊系统的链缆的张力。

### (2) 选题意义

由于影响系泊的因素多且复杂，在某些曾码头发生过断缆而导致的海损事件，给锚泊船的安全带来了隐患。为了使处于锚泊或在港系泊的工程作业船舶可靠、安全地工作和停泊，对锚泊安全的研究就变得非常重要。系泊链缆的自动恒张力控制系统的使用可以有效的减少该类事故的发生，有效的减轻船上工作人员的劳动强度、增加系泊的安全

性。因此，链缆的恒张力控制对系泊安全是有重要意义的，也符合自动化发展的趋势。在一般的节能调速系统中，过去使用很多的不变速的交流传动，造成了一定的资源浪费。随着变频技术的发展，采用现代交流调速系统后，就可以有效的提高系统的经济效益，起到了一定的节能作用。目前，结合了电力电子技术、自动控制技术和检测技术的张力自动控制系统逐渐的向着智能化、多功能、网络化、集中遥控化的方向发展<sup>[1]</sup>。

锚绞机系统完成收放锚链的动作是通过锚链轮传动来完成的，并且在锚泊系统工作的过程中，自然环境（如风、浪、流等）的变化会导致锚泊船的运动状态发生难以控制的改变。相应的，也会导致锚泊船的状态和锚链的张力的改变，这对锚泊的安全性和可控性带来了很大的挑战。与此同时，近年来海洋工程船舶和平台越来越大型化，随着其吨位的不断增大，工作水深也逐渐加深，自动化程度也在不断的提高。对于整个系统来说，其锚泊定位系统的控制性能就越来越重要，也就要求其有更高的安全性和机动性。需要锚机系统的功率更高，能抵抗更大的外界扰动作用力。但是目前具有恒张力性能锚机系统一直是由国外的公司所垄断的，我国近几年才有设计生产较大功率的恒张力锚绞机的能力<sup>[1]</sup>。因此，投入更多的时间和精力在系泊船的链缆恒张力控制的研究上，具有非常重要的现实意义。

## 1.2 恒张力系泊系统介绍及国内外发展现状

### 1.2.1 恒张力系泊系统介绍

随着新型船舶的建造和海上资源的不断开发，国家越来越重视对锚泊机械的发展。常用的锚泊设备类型有以下三种：临时锚泊设备，主要在锚地、港内等地临时停泊用；定位用的锚泊设备，主要作用是在一定范围内改变船位；最后一种就是深水锚泊设备。锚泊设备主要包括锚、锚泊链缆、锚机动力驱动系统以及其他传动设备。从上世纪七十年代开始出现了自动锚泊机械，尤其是自动系泊绞车和锚机，能够确保特定状态下，如船舶因装载或卸载而产生吃水深度的改变或者是波浪作用下而产生的移动状态下的船舶的安全。

目前，通常的锚泊机械大多采用蒸汽、电动、电液联合或者是内燃机等驱动方式，其中以交流电机或液压驱动的船用绞车居多<sup>[2]</sup>。电机一般采用转子串电阻调速而液压基本通过阀控流量来实现无级调速控制。二者各有其优缺点，在各种船舶上皆有应用。液压驱动的锚机主要由油泵机组来供主油路和控制油路。通过调小液压马达的排量及背压，从而改变输出扭矩。由流量控制阀进行无级调速来实现恒张力控制的。液压驱动系统与电力驱动的锚绞机系统的优缺点比较见表 1.1 所示：

表 1.1 电力驱动与液压驱动的锚绞机系统性能比较

	电力驱动	液压驱动
优点	1、 小型绞车上的驱动电机一般可采用定速电机，可单速或双速； 2、 直流调速方式下可以实现电机的无级调速； 3、 交流变频调速可实现无级变频调速，调速动态性能好、脉动小、范围宽； 4、 效率高、系统简单；	1、 双向变速，可实现无级变速换向； 2、 易于换向，输出速度范围大，负载低速控制好，可带负载良好启动； 3、 可长时间带负载运行，恒速、恒张力控制较容易实现； 4、 容易实现过载保护；使用寿命长； 5、 体积小、重量轻；空间布置比较灵活；
缺点	效率高；尺寸小；调速性能优；自动化程度高；易于维护、修理；	总效率低；尺寸大；自动化程度低；噪声大；维护、维修难；

随着控制技术的不断发展，在控制器的设计上也应用了许多智能算法，包括 PID、模糊 PID<sup>[3]</sup>、模糊自适应<sup>[4]</sup>、自适应 PID<sup>[5][6]</sup>、滑模控制及无源控制等一些控制方法。就实际应用和自动化层度要求增高的趋势下，电动系统的优点较液压系统的优点更明显，且其应用也越来越多。其中，主要以交流变频调速技术为主的绞车，目前为止已经有近千台在实船上使用。其中世界上最大的旅游船“玛丽女王二世”上采用的 8 台 2×25t 的系泊绞车就是采用的交流调速系统。上海航道局的某艘吸砂船上的 25t 移船绞车上<sup>[7]</sup>应用的具有恒张力控制性能的变频调速系泊绞车控制设备就是我国在该方面设备应用的先例，该系统是我国自行设计制造的。

## 1.2.2 恒张力系泊系统国内外发展现状

众多的科学技术已经成功的应用在船舶与海洋工程实际中，如仿真分析、有限元方法等计算机科学技术，恒张力自动控制等技术也已经用于船舶锚机和绞车的系泊工作过程中。经过不断地学习和研究，我国近年来才逐步具有设计生产较大功率的恒张力锚机的能力，打破了国外船舶辅机设备公司对其的垄断。

早期的自动系泊绞车主要有：变极变速自动系泊绞车；可控硅控制自动系泊绞车；液压阀控恒张力系泊绞车等。德国赫特拉帕公司早期曾生产一种恒张力绞车是通过采用扭力杆件来实现绞车电机的收放缆控制的<sup>[8]</sup>。法国的 BLM 公司研制了一种带有自动的离合器系统的新型系泊绞车系统。该系统安全性较高，因没有电动机和齿轮箱而较大的节省了空间。加拿大国家委员会的 W.Raman – Nair 提出了一套海洋拖缆绞车模型的缆线控制系统。文中发展了非线性系统动力学方程，并实现了海洋拖缆绞车的数学建模。

国外张力控制系统设备的控制相对有着更为精准，人机界面更加友好的优势。比如可以实现手动和自动控制的切换、模式的任意选取、控制参数的自动保存或调用、另外也可以具备多通讯接口等功能，相应的价格比较昂贵。

针对锚机系统的运动特点，驱动方式主要采用机电液联合的形式的锚绞机是国内早期的锚绞机控制系统广泛采用的<sup>[9][10]</sup>。一般为交流双速和三速两种类型的速度控制模式，如江苏科技大学的吴磊、张永林等人<sup>[11]</sup>曾经在分析船舶锚机控制系统所需的功能的基础上，比较了继电器和PLC—变频器两种控制方式，提出了基于可编程逻辑控制器和变频器控制的三速的锚绞机系统，该系统安全可靠、灵活性也较高。

沈阳自动化研究所的张竺英和任福林等人<sup>[12]</sup>在分析了泵控液压马达系统的基础上，利用连续流量方程，针对建立了液压驱动的恒张力收放绞车的数学模型，并对其进行仿真研究，结果表明能够实现减小波浪扰动对潜水器的冲击，该收放绞车实现恒张力控制功能，该研究为类似的收放系统的研究提供了参考思路。中国石油大学的张蓬和闫国帅等人<sup>[13]</sup>以铺管船的大功率锚机系统为模型，通过对交流电机的无级变频调速研究，仿真研究表明其实现了铺管船移位用的钢丝绳的恒张力控制，为同类的工程机械的控制研究提供了另一种新的可供参考的思路。

中船重工的周晓明和裴华刚提出了一种基于伺服电机的海洋绞车控制系统，该系统以 ARM 为控制核心，驱动部分采用交流伺服电机系统。研究表明该系统的稳定性较好、控制精度也较高，能够较好的实现对海洋绞车的控制。使海洋绞车系统能在自然环境条件下可靠安全的运行<sup>[14]</sup>。上海电机学院的楚建新等人<sup>[15]</sup>针对海风扰动下的绞盘的锚链的恒张力控制问题，应用了逆系统方法将绞盘电机模型线性化，进而可以通过设计线性的控制器对电机进行调速控制。仿真结果表明在随机海浪模型的作用下，锚链维持在设定的张力值容差范围内。

### 1.2.3 张力系泊系统存在问题及发展趋势

传统双速和三速锚机的驱动方式主要是由断路器、接触器、凸轮开关等器件构成，这种传统的控制在能够实现基本控制功能的基础上价格比较低廉，但是其可靠性难以达到要求，较容易出现故障。近年来，随着对设备性能要求的增高，这种传统的控制已经满足不了使用需求。我们知道，近年来逻辑控制器件和变频调速技术发展较快，很多领域的继电逻辑控制已经逐渐被PLC取代了。目前我国在锚机自动控制方面，一类是升级的逻辑继电器控制，如PLC等控制器，但是仍然保留传统的双速或三速的调速模式<sup>[16]</sup>；另一类是利用变频调速方法对锚机电机进行无级调速，控制器上仍以PLC为核心<sup>[17]</sup>，这一种控制方式目前应用越来越多，已经逐渐取代前者。

锚绞机作为海洋平台或者锚泊船的一个重要的系统，在功能上讲并不特别复杂，但是想要真正实现较好的运行效果，必须充分的采用较新的智能化的驱动控制方法和部件。全面地提高其设备所包含的自动化技术水平。采用智能化的控制器、变频调速技术、现代智能的终端、高性能的传感检测系统等组成的锚机控制系统实质上又是一套小的智能网络系统，可以以独立的模型接入到大的集中控制系统中去，这种控制性能良好、又

能实时监控的锚机自动控制系统，是目前自动控制领域的主流思想，也是以后的发展方向。

目前，海洋工程和船用的锚绞机等甲板机械正朝着高效率、集成化、智能化、小容量、高安全性的趋势发展<sup>[18][19]</sup>。现阶段，普遍采用高压变频电机为这些机械提供动力。由于这类设备价格昂贵，在设计控制系统之前，就需要先对其进行分析及驱动系统的建模和仿真研究，在对锚绞机的驱动电机进行调速控制仿真后，便可以进一步的来研究锚泊船的恒张力控制。

### 1.3 课题的主要研究内容和结构安排

本文首先建立锚泊船的水平面锚泊运动仿真模型，并验证该数学模型的合理性和正确性。在此基础上，针对风浪流等海洋扰动作用下，对系泊状态下的系泊链缆的恒张力控制进行研究。在前人研究成果的基础上，经过比较与分析，初步确定本文的研究方案。恒张力控制系统可以根据不同扰动作用下的船舶姿态运动情况自动的收放缆绳，以补偿海洋扰动使船舶运动引起的缆绳张力的变化。实现控制系泊船舶的系缆张力，有效避免发生海损事故。本文研究的具体工作包括：

(1) 依据 MMG 分离型建模思想，以芳村的低速大漂角的流体力学模型为基础，建立对锚链的张力影响较大的横荡、纵荡和艏摇为主的锚泊船的三自由度的水平面运动模型。

(2) 建立锚链张力数学模型。分析船舶在浅水域锚泊时受到的海洋扰动力，根据经验公式给出其力和力矩的仿真数学模型。利用工具 MATLAB/SIMULINK 进行仿真研究，来研究锚泊船的运动姿态及锚链张力的变化情况。

(3) 锚链收放控制装置的研究。对三相异步电机的调速特性进行研究。利用交流异步电机调速的矢量控制概念，在物理模型的基础上，推导出异步电动机在 d-q 旋转坐标系上的数学模型。研究按转子磁场定向的矢量控制原理，得出交流异步电机的电流解耦的控制方程。利用 MATLAB/SIMULINK 搭建本系统的仿真模型，来验证本系统锚机电机的调速控制性能。

(4) 在搭建完成的电动机的调速控制模型的基础上，设计了锚链张力闭环控制系统，验证构建的控制模型能否实现异步电动机恒力矩控制即锚机恒张力控制。

(5) 通过对锚链张力控制过程的分析，设计相应的控制器，构成张力闭环控制系统，利用前面建立的模型基础，做仿真研究并分析控制效果。分别实现在海流及海风扰动作用下的系泊过程的链缆恒张力控制。



## 第2章 双锚泊船锚泊运动数学模型

### 2.1 引言

实践表明，在水域宽阔，避风条件较好时适合采用单锚泊停泊，相反则宜采用双锚泊方式。工程船舶在作业时一般采用多点系泊，常见的几种锚泊系统布置形式见图 2.1 所示<sup>[20]</sup>。本章主要研究双锚停泊方式下船舶的运动数学模型。船舶的运动特性一般为六自由度运动，但是由于水平面上的三个自由度的船舶运动对锚链张力的影响较大。所以，本文忽略横摇、纵摇、垂荡，建立双锚锚泊船的横荡、纵荡和艏摇为主的三自由度运动模型。

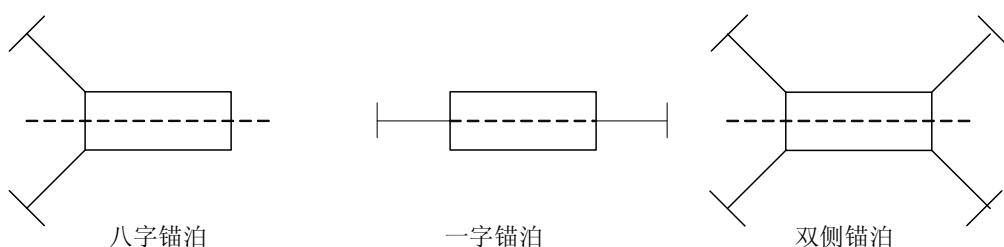


图 2.1 锚泊线常用的布置方式

按照系统建模的一般方法可知，主要有机理建模、辨识建模两种研究船舶建模的方法<sup>[21]</sup>。

#### (1) 机理建模

在对船舶受力分析时，都是以牛顿第二定律为依据的，考虑船和周围流体之间相互作用而产生的流体惯性力和黏性力、船体上的主动力（舵力、螺旋桨力、锚力等）、风、海浪、潮流等外部扰动力等力之间的平衡关系，得到完整的船体模型。

当前基于流体力学的船舶运动数学模型的研究主要以丹麦的 Abkowitz 为代表提出的整体型数学模型和井上欣三、平野等人为代表提出的分离型数学模型（MMG）结构为主。整体性模型方法从数学分析角度来看是比较严密的。其被广泛运用在需要较高精度的船模研究中。该方法的主要缺陷是一些流体动力导数的物理意义不太清晰，这就导致其模型的可移植性差。而分离型模型的思想是将作用于船体上的各个力和力矩进行分解，清晰简单，可理解性高，是目前比较流行的一种建模方法。可以充分的利用现有的实验数据，对于没有条件做实验的研究人员们来说，可以利用该种建模方法而得到可以满足仿真研究要求的模型。

#### (2) 辨识建模

辨识建模的基本原理是：测量被研究过程中的各种重要数据，进行相应的处理和计算，对所研究的过程的数学模型来进行估算，本质上属于测试建模的范畴。流行的辨识

算法有 Kalman 滤波、最小二乘等。目前，一些现代的智能算法逐渐的被应用到船舶运动模型辨识中，如模糊逻辑辨识、粒子群算法等。

鉴于本文研究的锚泊船锚泊在浅水域，因此将在深水域模型的基础上，实用化该分离型模型。采用现有的回归估算公式来计算各项流体动力导数，并对其加以潜水修正，来建立较为完整的双锚锚泊船在海洋扰动作用下的运动数学模型。

另外，在研究船舶的运动的仿真时，需要能够精准的描述海洋条件下的各项自然扰动，即各种海洋扰动作用于船体上的干扰力和力矩的模型。由于自然扰动的随机性，所以建立风、浪、流等干扰力模型有一定的困难，因此本文按照杨盐生教授在船舶运动建模中提出的方法，从比较实用的角度来介绍风浪流干扰的物理本质及干扰力和力矩的计算方法。

## 2.2 船舶运动数学模型

对于研究锚泊船的锚链恒张力控制系统而言，船舶的水平面上的三个自由度的运动对锚链张力的影响较大。本节建立双锚泊船的平面运动模型并分析其运动特性。

### 2.2.1 船舶平面运动坐标系

为了描述锚泊船的平面运动，一般采用两种坐标系统：固定坐标系和附体随动坐标系，如图 2.2 所示：

(1) 相对于地球表面的固定坐标系 O-XYZ。也称作为惯性坐标系，用作为建模的参考基准。定义 X 轴指向正北方向；Y 轴指向为正东方向；Z 指向地球重心；原点 O 取在艏锚的抛锚点处。

(2) 建立在船体上的随动坐标系为 o-xyz。中心 o 取在船舶的重心，x 轴为船纵轴，指向船艏；y 轴垂直于纵剖面，并指向船的右舷；z 轴与水面垂直，指向龙骨方向为正。由于 o-xyz 坐标系统随锚泊船的运动而运动，它具有非惯性的特性。

图 2.2 中符号定义如下：

$\theta$ ：锚链与静坐标轴 X 轴间的夹角；

$u$ ：船舶纵荡速度；

$v$ ：船舶横荡速度；

$\phi$ ：船舶艏向角；

$(x_G, y_G)$ ：船舶重心坐标；

$(X_m, Y_m)$ ：锚链在 O-XYZ 系中的坐标；

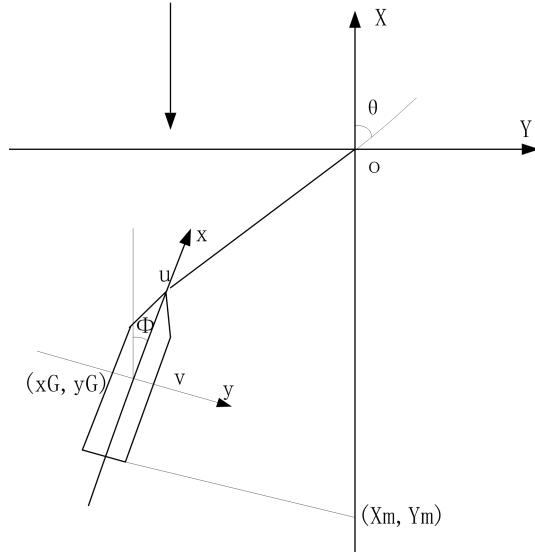


图 2.2 船舶平面运动坐标系

两坐标系的参数关系如下：

$$\begin{aligned}\dot{x} &= u \cos \varphi - v \sin \varphi \\ \dot{y} &= u \sin \varphi + v \cos \varphi \\ \dot{\varphi} &= r\end{aligned}\quad (2-1)$$

## 2.2.2 锚泊船平面运动方程

根据牛顿运动理论和力学关系可得到如下运算式：

$$\begin{aligned}\ddot{mx_G} &= X \\ \ddot{my_G} &= Y \\ \ddot{I_{zz}\varphi} &= N\end{aligned}\quad (2-2)$$

式中， $m$  为船舶质量； $\ddot{x}_G$ 、 $\ddot{y}_G$  是船舶重心在 X、Y 轴方向上的线加速度； $\ddot{\varphi}$  为船舶的转艏角加速度； $I_{zz}$  为船体对 Z 轴的转动惯量。

分离型模型取船舶的重心为随动坐标系的原点，经过整理可以得到船舶的操纵运动方程如下：

$$\begin{aligned}m(\dot{u} - vr) &= X \\ m(\dot{v} + ur) &= Y \\ I_{zz}\dot{r} &= N_G + Y_H x_C\end{aligned}\quad (2-3)$$

由于船舶的重心和中心一般是不一致的，需要进行  $Y_H x_C$  这一附加项来修正。 $x_C$  是船舶的中心在 x 轴的坐标值。

得到锚泊船的三自由度运动方程如下：

$$\begin{aligned}
 (m + m_x)u - (m + m_y)v r &= X_h + X_w + X_c + X_d + \sum_{i=1}^n X_t^i = X \\
 (m + m_y)v + (m + m_x)ur &= Y_h + Y_w + Y_c + Y_d + \sum_{i=1}^n Y_t^i + Y \\
 I_{zz}r &= N_h + N_w + N_c + N_d + \sum_{i=1}^n N_t^i = N
 \end{aligned} \tag{2-4}$$

式中： $m$  为船体质量； $m_x$ 、 $m_y$  为船体附加质量； $J_{zz}$  为其附加质量矩。 $X_h$ 、 $Y_h$  和  $N_h$  分别为船体运动的纵向、横向水动力和转首水动力矩； $X_t^i$ 、 $Y_t^i$  和  $N_t^i$  分别为锚泊船上第  $i$  根锚链的拉力和力矩在 X、Y 各坐标轴上的分量； $n$  为抛锚缆绳的根数； $X_w$ 、 $Y_w$  和  $N_w$  分别为风作用力和力矩； $X_c$ 、 $Y_c$ 、 $N_c$  分别为流作用力和力矩； $X_d$ 、 $Y_d$ 、 $N_d$  分别为海浪作用力和力矩。式 (2-4) 代表了几种力的平衡关系，包括船体本身的惯性力和力矩，系统作用在船体上的力，环境载荷的作用力。为了求解船舶平面运动方程中的参数  $u$ 、 $v$ 、 $r$ ，就需要讨论船体所受各项力和力矩与运动参量之间的关系。

### 2.2.3 锚泊船的运动参量的无量纲化

为了更方便的换算各项数值，将所涉及到的有实际物理意义的数值量进行无量纲化。目前应用较多的主要为以下两类无量纲化标准：

- (1) 美国 SANME 提出的 Prime System;
- (2) 瑞典 SSPA 的诺宾提出的 Bis System.

表 2.1 无量纲化的标准量度单位

标准量度单位	Prime System	Bis System
质量 $m_0$	$0.5\rho L^3$ ； $0.5\rho L^2 d$	$\rho \nabla$
长度 $L_0$	L	L
时间 $T_0$	L/V	$\sqrt{L/g}$
线速度 $V_0$	V	$\sqrt{gL}$
线加速度 $A_0$	$V^2/L$	g
角速度 $\omega_0$	V/L	$\sqrt{g/L}$
角加速度 $\varepsilon_0$	$V^2/L^2$	g/L
力 $F_0$	$0.5\rho v^2 L^2$ ； $0.5\rho v^2 L d$	$\rho g \nabla$
力矩 $M_0$	$0.5\rho v^2 L^3$ ； $0.5\rho v^2 L^2 d$	$\rho g \nabla L$

参考面积 $S_0$	$L^2 ; Ld$	$2\nabla / L$ $N' = N / 0.5\rho L d V^2$ $I_{zz}' = m / 0.5\rho L^4 d$
------------	------------	--

表 2.1 中,  $L$  为船长;  $d$  为吃水深;  $V$  为设计的航速;  $\nabla$  是静水时的排水量;  $\rho$  为流体的密度;  $g$  为重力加速度。本文是采用模型的参考面积为  $Ld$  的标准度量单位来进行各个量的无量纲处理的。

### 2.3 作用于船上的水动力和力矩的计算与分析

在锚地系泊的锚泊船的运动, 会使附连在船体上的流体也随之运动。因此会产生一定的流体作用力, 即为由于惯性作用而产生的流体力和力矩。一些学者研究发现对船体的附加质量求导就是流体的惯性水动力。一般来说, 作用于船体上的水动力和力矩与船体的特征参数是紧密相关的, 也与流体的密度、运动粘性系数、大气压力等特性有关。对于水动力的计算一般的方法是通过计算或者是试验来拟合出水动力和力矩与进流角之间的函数关系, 或者是运用数学方法将流体动力表达式展开为与船体的速度和角速度相关的函数形式, 再通过船模试验获得的各项力和力矩系数来进行相应的理论估算。锚泊船除了受到流体动力外, 还受到各类海洋扰动力的作用。经过上面的分析, 根据牛顿运动定律可以得到锚泊船的三自由度运动方程, 进行无量纲化后得到的具体形式如下:

$$\begin{aligned} (m' + m'_x) \dot{u} - (m' + m'_y) \dot{v} r' &= X_h' + X_w' + X_c' + X_d' + \sum_{i=1}^n X_t^{i'} \\ (m' + m'_y) \dot{v} + (m' + m'_x) \dot{u} r' &= Y_h' + Y_w' + Y_c' + Y_d' + \sum_{i=1}^n Y_t^{i'} \\ I_{zz}' r' &= N_h' + N_w' + N_c' + N_d' + \sum_{i=1}^n N_t^{i'} \end{aligned} \quad (2-5)$$

#### 2.3.1 流体动力及力矩计算

由流体力学的理论, 可以将作用在船体上的流体动力分为黏性力和惯性力。对于惯性水动力的求解, 实际上更多采用试验法加估算法。研究表明, 通过求解船体的附加质量和附加惯性矩就完成了对惯性水动力的求取。由于船体的外形特征比较复杂, 所以, 不适宜用理论方法对惯性类流体力和力矩进行求解。目前较著名的试验法求解方法主要有: 震荡法、冲击试验法及 PMM 试验法等方法。到目前为止比较实用的计算附加质量和附加惯性矩的方法有两种: 一是周昭明等人提出的回归公式; 另一个是 Clarke 等人的回归公式。本文采用周昭明<sup>[22]</sup>等人给出的估算公式:

$$\begin{aligned}
m_{x\infty} &= 0.01m(0.398 + 11.97C_b(1 + 3.73\frac{d}{B}) - 2.89C_b\frac{L}{B}(1 + 1.13\frac{d}{B}) \\
&\quad + 0.175C_b(\frac{L}{B})^2(1 + 0.541\frac{d}{B}) - 1.107\frac{L}{B}\frac{d}{B}) \\
m_{y\infty} &= m(0.882 - 0.54C_b(1 - 1.6\frac{d}{B}) - 0.156\frac{L}{B}(1 - 0.673C_b) + 0.826 \quad (2-6) \\
&\quad \frac{d}{B}\frac{L}{B}(1 - 0.678\frac{d}{B}) - 0.638C_b\frac{d}{B}\frac{L}{B}(1 - 0.669\frac{d}{B})) \\
J_{z\infty} &= m(0.01L(33 - 76.85C_b(1 - 0.784C_b) + 3.43\frac{L}{B}(1 - 0.63C_b)))^2
\end{aligned}$$

式中， $d$  为吃水深； $B$  为船宽； $C_b$  为方形系数； $L$  为船长。

将上式进行浅水修正，便可以得到浅水中的船舶的附加质量和附加惯性矩的估算公式。本文采用李美菁博士经过分析推算得到的估算公式：

$$\begin{aligned}
m_x &= m_{x\infty}[(\frac{h}{d}-1)^{1.3} + 3.77 + 1.14\frac{B}{d} - 0.233\frac{L}{d} - 3.43C_b]/(\frac{h}{d}-1)^{1.3} \\
m_y &= m_{y\infty}[(\frac{h}{d}-1)^{0.82} + 0.413 + 0.032\frac{B}{d} + 0.0129(\frac{L}{d})^2]/(\frac{h}{d}-1)^{0.82} \quad (2-7) \\
J_{zz} &= J_{z\infty}[(\frac{h}{d}-1)^{0.82} + 0.413 + 0.0192\frac{B}{d} + 0.00554(\frac{B}{d})^2]/(\frac{h}{d}-1)^{0.82}
\end{aligned}$$

其中， $h$  为水深； $\infty$  表示无穷水深情况下即可理解为不受水深的影响。

### 2.3.2 粘性流体动力及力矩计算

目前有多种关于粘性类的流体动力的计算模型，但是现有的理论上的模型计算方法还不太完善，而约束船模试验的成本也非常高，因为其需要专门的试验装置。所以目前较为可行的做法是进行相应的约束船模试验，通过对试验取得的结果进行一系列的分析，来通过一种近似的估算方法来表示出各项流体动力导数与船型各个参数之间的定量关系。目前已经有很多学者做过这方面的研究，也给出了很多有效的粘性流体动力的模型来对粘性力进行近似估算，本文采用高品纯志的粘性流体水动力近似估算模型<sup>[23]</sup>：

$$\begin{aligned}
X_H &= X_u u' + (X_{vr} v' r') \times 0.5 \rho L d V^2 \\
Y_H &= (Y_v v' + Y_{vvv} v'^3 + Y_{vvvv} v'^5 + Y_{ur} u' r + Y_{ur|r} u' r' | r' | + Y_{v|r} v' | r' |) \times 0.5 \rho L d V^2 \quad (2-8) \\
N_H &= (N_v v + N_{uv} u' v' + N_{vv} v'^3 + N_{uvv} u' v'^3 \\
&\quad + N_r r' + N_{r|r} r' | r' | + N_{ur|r} u' r' | r' | + N_{v|r} v'^2 r') \times 0.5 \rho L d V^2
\end{aligned}$$

上述模型的关键是如何求解相应的流体动力和力矩导数，为了化简分析求解过程，通常假设海面大气压为常数；水不可压缩并忽略其表面的张力；船型是固定的，即忽略尺寸效应的前提下，给出如下经验数据：

表 2.2 各水动力及力矩的系数

$X_{vr}$	-0.102	$N_{uv}$	-0.0678
$Y_v$	-0.285	$N_{vvv}$	-0.0093
$Y_{vvv}$	-0.894	$N_{vvvv}$	-0.0759
$Y_{vvvv}$	0.650	$N_r$	-0.030
$Y_{ur r }$	0.060	$N_{r r }$	-0.034
$Y_{ur r }$	-0.035	$N_{ur r }$	0.030
$Y_{v r }$	-0.230	$N_{vvr}$	-0.048
$N_v$	0.0028		

以上各系数均为深水情况下的，鉴于本文研究的是浅水域的锚泊运动，所以按照下面的公式对深水系数进行浅水修正， $Y$ 、 $N$  为深水系数<sup>[24]</sup>。

$$\begin{aligned}
 \frac{Y'_{v|r|}}{Y_{v|r|}} &= 1 + 3\left(\frac{d}{h}\right)^{2.5} \\
 \frac{Y'_{vvv}}{Y_{vvv}} &= 1 + 4\left(\frac{d}{h}\right)^{3.5} \\
 \frac{Y'_{ur|r|}}{Y_{ur|r|}} &= 1 + 3\left(\frac{d}{h}\right)^{2.5} \\
 \frac{Y'_{ur|r|}}{Y_{ur|r|}} &= 0.9394592 + 0.1428269\left(\frac{h}{d}-1\right)^{-1}\left(\frac{B}{d}\right) \\
 \frac{Y'_v}{Y_v} &= 1.055196 - 0.1444224\left(\frac{h}{d}-1\right)^{-2} + 0.187235\left(\frac{h}{d}-1\right)^{-2}\frac{B}{d} \quad (2-9) \\
 &\quad - 4.499637 \times 10^{-3}\left(\frac{h}{d}-1\right)^{-3}\left(\frac{B}{d}\right)^2 \\
 \frac{N'_{vvr}}{N_{vvr}} &= 1 + 6\left(\frac{d}{h}\right)^{2.5} \\
 \frac{N'_{vvv}}{N_{vvv}} &= 1 + 6\left(\frac{d}{h}\right)^{2.5} \\
 \frac{N'_r}{N_r} &= 0.9008729 + 0.343497\left(\frac{h}{d}-1\right)^{-1} \\
 \frac{N'_v}{N_v} &= 4.601909 - 1.788076\frac{B}{d} + 0.1963343\left(\frac{B}{d}\right)^2 + 64.6913 - 2\left(\frac{h}{d}-1\right)^{-1}\left(\frac{B}{d}\right)^2
 \end{aligned}$$

式中， $B$  为船宽； $h$  为水深； $d$  为船舶吃水深。

对于纵向粘性流体动力的计算中，准确计算船舶的直航阻力系数对船舶运动进行建模时非常重要的。就目前的研究来看，还不能完全依靠理论方法来计算直航阻力系数，一般是要综合船模实验和理论的分析。本文忽略剩余阻力，仅计算直航阻力中的摩擦阻力。

$$X_u u' = R_f = 0.5 \rho u^2 S (C_f + \Delta C_{AR}) \quad (2-10)$$

式中，S为船舶的湿水面积； $\Delta C_{AR}$ 为粗糙度补贴系数； $C_f$ 为摩擦阻力系数， $\rho$ 为海水密度。

$$S = LppB(1.22 d/B + 0.46)(C_b + 0.765) \quad (2-11)$$

式中， $C_b$ 为船舶的方形系数， $L_{pp}$ 为两柱之间的长度。

对于摩擦阻力系数 $C_f$ 的计算，已经有一系列计算公式。本文拟采用1957年的第八届国际船模试验水池会议（ITTC）中提出的公式<sup>[25]</sup>来进行 $C_f$ 的估算：

$$C_f = 0.075 / (\log_{10}(R_e) - 2.03)^2 \quad (2-12)$$

式中， $R_e$ 为雷诺数。雷诺数由下式计算：

$$R_e = VL / \gamma \quad (2-13)$$

其中， $\gamma$ 为流体运动的粘性系数；L为船长；V为船速。

表 2.3 常用流体密度及粘性系数表( $T=15^{\circ}\text{C}$ ,  $P=101325\text{Pa}$ )

类别	$\rho(\text{kg} / \text{m}^3)$	$\mu(\text{kg} / (\text{m} \cdot \text{s}^2))$	$\gamma(\text{m}^2 / \text{s})$
空气	1.225	$0.01789 \times 10^{-3}$	$14.6 \times 10^{-6}$
海水	1026	$1.221 \times 10^{-3}$	$1.19 \times 10^{-6}$

对于粗糙度补贴系数 $\Delta C_{AR}$ 可根据船长由表2.4进行选取。

表 2.4 粗糙度补贴系数 $\Delta C_{AR}$ 计算表

船长(m)	$\Delta C_{AR}$	船长(m)	$\Delta C_{AR}$
50~150	+0.0004~+0.00035	260~300	0
150~210	+0.0002	300~350	-0.0001
210~260	+0.0001	350~450	-0.00025

## 2.4 作用于船体上的流作用力及力矩的计算

海流是锚泊船舶在锚地经常遇到的一种扰动，是不可忽略的。目前，大多数研究船舶的运动建模时，为了简化分析都将流假定为均匀流和定常流。在均匀流场中，流体的流速的大小和方向都不随时间和空间的改变而改变。均匀流的作用对锚泊船引起的是水平面上的漂移，从而引起船舶的速度和位置的改变。本文也假定为定常流扰动下，研究

锚泊船的运动建模。

### 2.4.1 定常流中的运动学关系

在受到链的约束力作用下，锚泊船的运动速度一般很小。在均匀流场中，可以通过速度矢量合成原理来求解船舶相对于流体的运动速度。采用前面定义的固定坐标系和随动坐标系，进行如下推导：

$$\begin{aligned} u_r &= V_c \cos(\theta_c - \varphi) \\ v_r &= V_c \sin(\theta_c - \varphi) \\ u &= u_r + u_c \\ v &= v_r + v_c \end{aligned} \quad (2-14)$$

式中， $\varphi$  为船舶的艏向角； $\theta_c$ 、 $V_c$  为流向角和流速； $u_c$ 、 $v_c$  分别为流速在船体坐标系上的纵向速度分量和横向速度分量。

设锚泊船相对于水流的运动速度在船体坐标系上的投影分别为  $u_r$ 、 $v_r$ ；船舶运动的绝对速度在随动坐标系上的分量为  $u$ 、 $v$ 。

从 (2-14) 式中可以看出，将船舶相对于水流的速度和加速度带入到船舶运动的数学方程中去，即得到了考虑海流影响下的船舶运动特性模型。

### 2.4.2 流压力和流压力矩

很多文献研究表明，锚地中的锚泊船受海浪的影响较小，锚泊船的运动可近似为平面运动。在建模时，我们可以合起来研究定常流作用在船体上的流压力和力矩和船舶运动所产生的水动力和力矩，采用上面提到的速度矢量合成的方法来研究定常流作用于船体的流压力和力矩。将  $u_r$ 、 $v_r$  带入到船舶的运动方程中，便得到均匀流作用下锚泊船的运动模型：

$$\begin{aligned} (m + m_x)u &= (m + m_y)v_r + (m + m_x)v_c r + X(u_r, v_r, r) \\ (m + m_y)v &= -(m + m_x)u_r - (m + m_y)u_c r + Y(u_r, v_r, r) \\ (I_{zz} + J_{zz})r &= N_w(u_r, v_r, r) + N_h(u_r, v_r, r) + N_t \end{aligned} \quad (2-15)$$

其中，  
 $X(u_r, v_r, r) = X_w(u_r, v_r, r) + X_h(u_r, v_r, r) + X_t$   
 $Y(u_r, v_r, r) = Y_w(u_r, v_r, r) + Y_h(u_r, v_r, r) + N_t$

上式中的速度是船舶相对于水的速度  $u_r$ 、 $v_r$ 。 $X_t$ 、 $Y_t$ 、 $N_t$  为锚链产生的束缚力。在计算时，我们可以先计算船舶的对地速度，再计算相对于水流的速度，从而得到了均匀流下的流体动力。从上式中可以看出，在均匀流干扰下的船舶运动模型只是船舶与流速之间的相对运动速度的变换。

## 2.5 平均风压力和力矩的研究

对于像拖拽船、锚泊船和动力定位船等这样的特定状态下的船而言，风载荷起着至关重要的角色。在锚地锚泊的船舶，由于没有有效的遮挡物，所以风对船舶的影响比较明显，风直接的作用到船体上，引起船舶的摇荡、艏向偏离等现象，严重的话可能引起锚泊安全性问题。风洞试验是一种估算风扰动力作用在船舶等上层建筑上的作用力的最有效的一种方法<sup>[26]</sup>，然而这种方法是耗资巨大的，因此实际中应用很多理论估算结合试验的方法来研究风载荷。风力通常利用经验公式进行估算。这里首先讨论风的特性，并给出计算风干扰力和力矩的方法。由于船舶本身速度的影响，在船舶上感受的风与实际不同，有相对风与绝对风的区别。

### 2.5.1 相对风速和绝对风速

绝对风是指在惯性坐标系下观测到的风，用  $U_w$  表示绝对风速，用  $\alpha_w$  表示风向角。规定北风的风向角  $\alpha_w$  为 0，东风的风向角  $\alpha_w$  为 90 度，即顺时针为正。而实际上船舶上所感受到的风即为相对风速和相对风向角，分别用  $U_r$  和  $\alpha_r$  表示，船体所受的风压力和力矩也是与相对风直接相关的。对于相对风向角  $\alpha_r$ ，风自左舷吹来时规定  $\alpha_r > 0$ ，右舷吹来时规定  $\alpha_r < 0$ 。由于船速与相对风速的矢量和就是绝对风速。因此有下式成立：

$$\overrightarrow{U_w} = \overrightarrow{V} + \overrightarrow{U_r} \quad (2-16)$$

将上式投影到船体坐标系上可以得到：

$$\begin{aligned} u_r &= u + U_w \cos(\alpha_w - \varphi) \\ v_r &= -v + U_w \sin(\alpha_w - \varphi) \end{aligned} \quad (2-17)$$

其中，风舷角按照下式计算

$$\alpha_r = \arctan \frac{v_r}{u_r} - \text{sgn}(v_r)\pi \quad (2-18)$$

绝对风速  $U_w$ 、相对风速  $U_r$  和船速  $V$  三者之间还可以这样表示：

$$\begin{aligned} U_r \cos \alpha_r &= U_w \cos(\alpha_w - \varphi) - V \cos \beta \\ U_r \sin \alpha_r &= U_w \sin(\alpha_w - \varphi) + V \sin \beta \end{aligned} \quad (2-19)$$

由余弦定理推导得到：

$$U_r^2 = U_w^2 + V^2 + 2U_w V \cos(\alpha_w - \beta) \quad (2-20)$$

漂角  $\beta$  为船舶艏向与船速  $V$  之间的夹角，可按下式求取：

$$\beta = \arctan\left(-\frac{v}{u}\right) - \text{sgn}(v)\pi \quad (u \leq 0) \quad (2-21)$$

式中， $u$ 、 $v$  分别为船的纵荡和横荡速度。

### 2.5.2 风压力和风压力矩的计算

本文考虑的是风速和风向角一定的情况下，此时来估算其对船体产生的作用力及力矩的大小。本文主要研究锚泊船的水平面上的运动特性，风作用在船体上会对船体产生一定的流体动力和力矩，用  $\bar{F}_{wind}$  和  $\bar{M}_{wind}$  表示。在对船舶平面运动进行分析时，本文只研究风对船体产生的纵荡力  $X_{wind}$ 、横荡力  $Y_{wind}$ 、艏摇力矩  $N_{wind}$  的计算，其估算的公式给出如下：

$$\begin{aligned} X_{wind} &= 0.5\rho_a A_f U_r^2 C_{wx}(\alpha_r) \\ Y_{wind} &= 0.5\rho_a A_s U_r^2 C_{wy}(\alpha_r) \\ \bar{M}_{wind} &= 0.5\rho_a A_s L U_r^2 C_{wn}(\alpha_r) \end{aligned} \quad (2-22)$$

其中：  $\rho_a$  为空气的密度；  $L$  为船舶总长度；  $A_f$ 、 $A_s$  分别为船舶水上部分的正投影面积和侧投影面积；  $\alpha_r$  为相对风弦角。  $C_{wx}(\alpha_r)$ 、 $C_{wy}(\alpha_r)$ 、 $C_{wn}(\alpha_r)$  分别为 x、y、z 轴方向的力和力矩系数。从实际角度来看，我们不可能对每艘船都进行风动试验。目前已经有很多研究学者们给出了一些关于风压力系数和风压力矩系数计算的近似方法，他们是根据大量的试验数据来进行理论估算的。本文将采用岩井聰<sup>[27]</sup>在操船论中给出的回归估算公式：

$$\begin{aligned} C_{wx} &= C_{wF} \cos(\alpha_F) (A_s \sin^2(\alpha_r) + A_f \cos^2(\alpha_r)) / A_f \\ C_{wy} &= C_{wF} \sin(\alpha_F) (A_s \sin^2(\alpha_r) + A_f \cos^2(\alpha_r)) / A_s \\ C_{wn} &= (0.5 - x_F / L) C_{wF} \sin(\alpha_F) (A_s \sin^2(\alpha_r) + A_f \cos^2(\alpha_r)) / A_s \end{aligned} \quad (2-23)$$

式中：  $C_{wF}$  为风压合力系数；  $\alpha_F$  为风压合力角；  $x_F$  为风压合力作用点位置。

对于  $C_{wF}$ 、 $\alpha_F$  和  $x_F$ ，汤忠谷<sup>[28]</sup>给出了下面的估算公式：

$$\begin{aligned} C_{wF}(\alpha_r) &= 0.3935 + 2.177 \sin^2 \alpha_r - 1.586 \sin^3 \alpha_r - 0.3154 LZ / A_f \\ &\quad + 0.04944 (LZ / A_f)^2 + 0.381 LZ / A_s - 0.36 (LZ / A_f) \\ &\quad \times \sin^2 \alpha_r + 0.3179 (LZ / A_s)^2 \sin^2 \alpha_r + 2.3 (A_s / L^2) \sin^2 \alpha_r \\ &\quad + 0.45 C_k \sin^4 \alpha_r - 0.00038 (LZ / A_f)^6 \sin^2 \alpha_r - 100.5 (A_s / L^2)^3 \sin^2 \alpha_r \end{aligned} \quad (2-24)$$

$$\begin{aligned} a_F &= \text{sgn}(\alpha_r) \{ 12.85 + 75.97 \alpha_r - 19.77 \alpha_r^2 + 4.588 \alpha_r^3 - 20.06 C_k + \\ &\quad 37.89 (LZ / A_f) \alpha_r + 1113 (A_s / L^2) \alpha_r - 56.23 (LZ / A_f) \alpha_r^2 \\ &\quad - 1970 (A_s / L^2) \alpha_r^2 + 32.9 (LZ / A_f) \alpha_r^3 + 1212 (A_s / L^2) \alpha_r^3 \\ &\quad - 8.21 (LZ / A_f) \alpha_r^4 - 283.1 (A_s / L^2) \alpha_r^4 + 0.221 (LZ / A_f) \\ &\quad \times \alpha_r^6 + 6.17 (A_s / L^2) \alpha_r^6 \} \end{aligned} \quad (2-25)$$

$$x_F / L = C_k + 0.003 (\alpha_r - 90) \quad (2-26)$$

其中，  $C_k$ 、 $Z$  分别为船的侧投影面积的形心位置到船艏柱和水线的距离；其他的符

号同前。式 2-24 和 2-25 中的  $\alpha_r$  的单位为 rad，在式 2-26 中的  $\alpha_r$  单位为 deg。

## 2.6 锚链张力和力矩的计算模型

船舶在锚泊状态时，会受到锚链拉力  $T$  的约束作用，其拉力  $T$  可以分解为水平方向和垂直方向上的两个力  $T_h$  和  $T_v$ 。锚链对船的有效拉力为水平拉力，其会使船体产生纵荡、横荡和艏摇运动。而垂直拉力主要对船体的垂荡、横摇和纵摇有较大影响，在这里我们暂不做研究。

锚链对船的水平分力的研究，目前有两种研究模式：一是通过风洞试验来测试锚链作用力的大小，再利用理论分析方法建立合理的锚链张力数学模型；二是在计算机仿真的基础上进行的理论研究，如 B.J.Maga,H.R.<sup>[29]</sup>等人做过相关的研究工作。为了建立完整的锚泊船仿真系统，这里主要介绍比较简单的两种方法，分别是迭代法和优选法。

### 2.6.1 锚链平面坐标系的建立

在研究锚泊船的仿真数学模型时，主要研究的是锚链对船体的作用力。本文将船艏处锚的锚位点取作固定坐标系的原点，来研究在风流作用下带有双锚的锚泊船的运动特性，建立的双锚泊船的锚位坐标如图 2.3 所示。

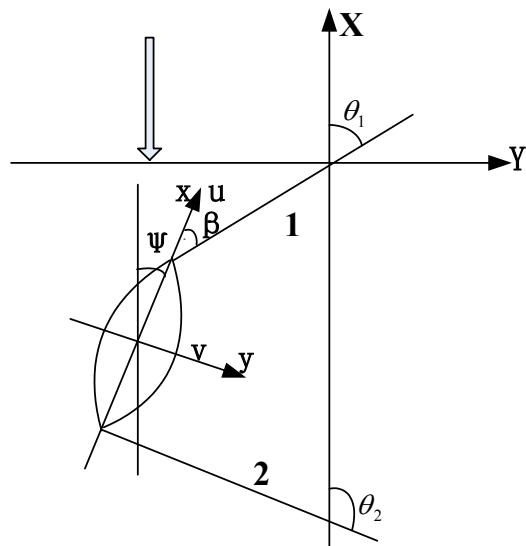


图 2.3 锚位坐标系

其中， $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为船艏锚链和船尾锚链的方位角。设船艏处的锚链孔位于首柱处，将固定坐标系的原点移到船艏部的锚位点处。通过建立的锚位坐标系就可以得到船体上所受的锚链水平作用力和力矩的关系：

$$\begin{aligned} X_{t1} &= T_{h1} \cos(\varphi - \theta_1) \\ Y_{t1} &= T_{h1} \sin(\varphi - \theta_1) \\ N_{t1} &= \frac{1}{2} T_{h1} L_{pp} \sin(\varphi - \theta_1) \end{aligned} \quad (2-27)$$

其中,  $X_n$ 、 $Y_n$ 、 $N_n$  分别表示为锚链 1 作用于船 X、Y 方向上的力及转艏力矩;  $T_{h1}$  为锚链的水平拉力。锚链 2 的作用力及力矩分析同理。

## 2.6.2 锚链张力的计算

如下图 2.4 所示, 在铅垂面 Zod 上, L 为其悬链线长;  $d_m$  为锚链孔至锚位点的水平距离; a 为悬链线参数; h 为水深。

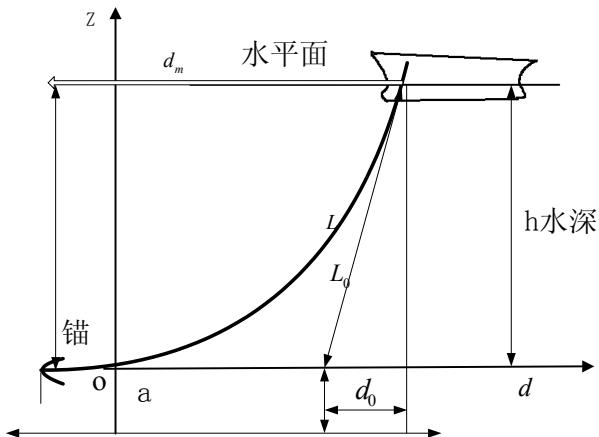


图2.4 锚链与船体间的作用力

在没有铺底链长时, 锚链的水平张力的大小可以利用悬链线方程来求解:

$$T_h = w_l \frac{L^2 - h^2}{2h} \quad (2-28)$$

式中,  $w_l$  为单位锚链的重量; h 为锚链孔至底土的高度; a 为悬链线参数。

在船舶运动缓慢或者相对静止时, 可以近似的把锚链看作为刚体, 直接利用悬链线方程来求解其水平张力  $T_h$ 。目前, 求解锚链张力主要分为动态锚链张力和静态锚链张力。如果存在卧底链长则求解的未知数较多, 对此目前国内还没有达成共识。主要有这样几种求解方法: (1) 针对风力较大或流速较高的情况下, 利用井上欣三等人在风洞试验的基础上提出的估算公式来计算动态锚链张力。(2) 庄司邦昭<sup>[30]</sup>的考虑锚链弹性形变的弹性模型迭代公式法来计算动态锚链张力 (3) 刚性模型求解方法; 如侯建军<sup>[31]</sup>等人提出的基于静态悬链线方程的迭代法和优选法来求解锚链张力。本文主要用悬链线公式, 采用迭代方法计算悬链线参数, 再求解得到锚链的水平张力值。

### (1) 刚性模型迭代法

对于锚链张力的计算大多采用静态的求解方法, 这种基于悬链线理论的刚性模型求解锚链张力的方法具有计算简便、快捷的优点, 适合在设计初期使用。在进行计算时, 忽略锚链本身的弹性形变, 将其近似为刚性模型。求解的基本思路是: 不考虑铺底链长的前提下, 根据静态悬链线方程, 通过迭代方法近似求解出悬链线参数 a 的值。本文是

通过编写 M 文件，用迭代法来求解悬链线参数。

由悬链线方程可得：

$$z = a + h = a \cdot ch \frac{d}{a} \quad (2-29)$$

$$\frac{d}{a} = \ln\left(\frac{a+h}{a} + \frac{\sqrt{2ah+h^2}}{a}\right) \quad (2-30)$$

经过推导后，可得到参数 a 的迭代形式为：

$$a = \sqrt{\frac{d}{\ln\left(\frac{a+h+L}{a}\right)}} \quad (2-31)$$

式中，d 为锚链切地点到船上锚孔的水平距离；L 为悬链线长。

首先，求取迭代初始值：

$$\begin{aligned} L_m - L_0 + d_0 &= d_m \\ L_0^2 &= h^2 + d_0^2 \\ a_0 &= \frac{L_0^2 - h^2}{2h} \end{aligned} \quad (2-32)$$

求得初始值  $d_0$ 、 $L_0$ 、 $a_0$ 。

第二步，令  $a_1 = \frac{d_0}{\ln\left(a_0 + h + L_0\right)} / a_0$ ，若  $|a_1 - a_0| < \varepsilon$  ( $\varepsilon$  为给定的误差容许值)，则转入

第四步执行，否则执行第三步。

第三步，令  $a_0 = a_1$ ， $L_0 = \sqrt{2a_0h+h^2}$ ， $d_0 = d_m - (L_m - L_0)$ ，重新返回到第二步计算得到新的  $a_1$ 。

第四步，令  $a = a_1$ ， $T_h = w_i a$ ，一次迭代停止。

上述步骤为一次迭代计算的具体执行过程。在海洋扰动的作用下锚泊船的位置会发生变化，导致锚链的悬链线长度有所改变，每改变一点就会执行一次迭代程序，计算出此时的悬链线参数 a 值，也就对应着不同的锚链张力值。此种方法计算起来比较简单，其计算得到的张力值的精度也能够满足仿真的要求。本文主要采用此方法来进行锚链张力的计算及仿真，为后续的锚链张力控制打下重要的理论基础。

## (2) 优选法<sup>[32]</sup>

优选法是基于锚链单位长度的重量、出链长度、锚孔到水底之间的高度等参量之间的静平衡条件的一种计算锚链张力的方法。

经过上面的推导可得： 
$$d = a \ln\left(\frac{a+h}{a} + \frac{\sqrt{2ah+h^2}}{a}\right) \quad (2-33)$$

又有：

$$L = \sqrt{2ah + h^2} \quad (2-34)$$

$$d_m = (L_m - L) + d \quad (2-35)$$

所以，可以通过设定一系列的合理的  $a$  的近似值。具体筛选方法可参见文献[29]。再由 (2-33) 和 (2-34) 两式得到  $d$  和  $L$  的近似值  $d'$  和  $L'$ ，将它们带入公式： $\Delta d = |d_m - (L_m - L' + d')|$ 。只要  $\Delta d$  小于所设定的精度，就能够求得所需要的锚链水平张力  $T_h$ 。

## 2.7 模型仿真验证

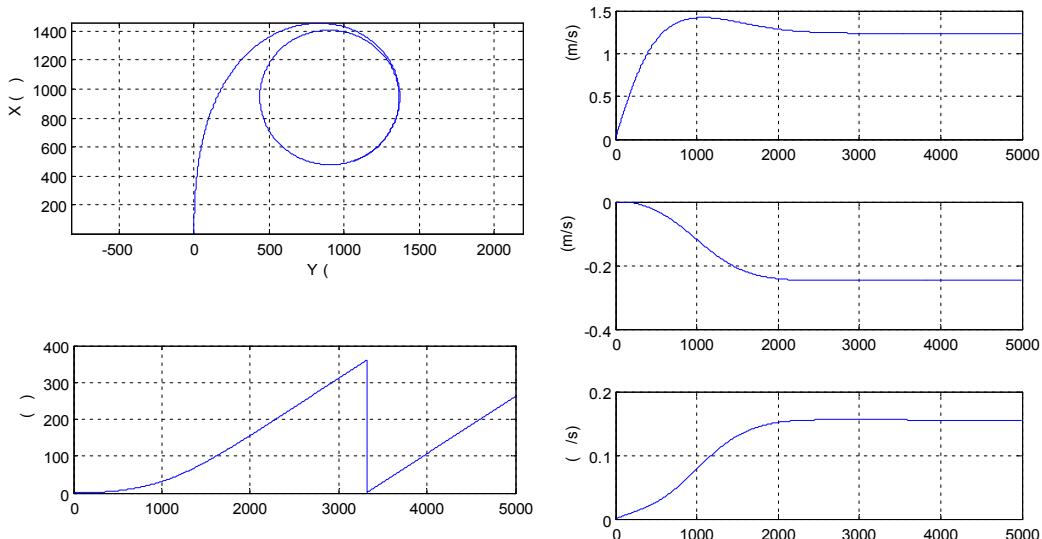


图 2.5 船舶静水回转验证曲线

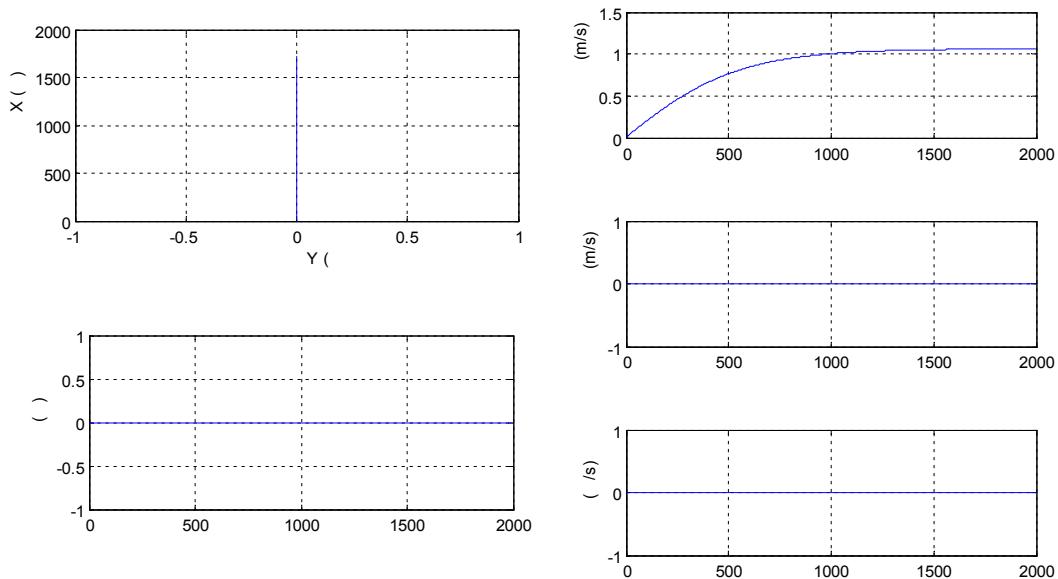


图 2.6 船舶静水直航验证曲线

在 MATLAB 软件平台下，对所建立的锚泊船的三自由度运动模型进行静水直航及回转仿真验证如上图 2.5、2.6 所示。从上面的仿真实验结果可以看出，本章所建立的双锚泊船的三自由度运动模型基本正确。

## 2.8 本章小结

在 MATLAB 软件平台下，对所建立的锚泊船的三自由度运动模型进行静水直航及回转仿真验证。仿真实验结果可以看出，本章所建立的双锚泊船的三自由度运动模型基本正确。锚链力的计算模型是参考侯建军提出的迭代法，模型计算结果也与文献中的数据进行了仿真验证，验证了本模型计算的正确性。

本章的主要工作是介绍了建立锚泊船在水平面上的偏荡运动数学模型的一般方法，根据 MMG 模型的建模思想，分别介绍了作用于船体上的力的数学模型，包括船体与流体之间的作用力、风以及潮流等海洋扰动力、主动力—锚链作用力。

在船舶操纵性研究领域，很多文献中通过对大量的船模试验的数据进行归纳，给出了线性流体动力的回归计算公式或经验值。本文中对建立船体运动数学模型时所需的各项流体动力的计算，主要是利用各种现有的回归估算公式。通过船舶的静水直航和回转运动验证了所建立模型的正确性。从而得到了双锚泊船的水平面的操纵运动模型，为后续的锚链张力控制系统的设计和仿真提供了模型基础。

## 第3章 锚链恒张力控制策略的研究

### 3.1 引言

船舶在系泊期间，因装卸货物而引起船舶吃水量的变化，或是在海洋扰动（海浪、海风和海流等）下都会引起系泊缆绳张力的变化。就有可能造成张力过大而崩缆，或是张力太小而导致船舶移位等现象。这就引发了对锚泊链缆的恒张力控制功能的需求。

传统的采用电动机直接拖动大惯性绞车的恒张力控制系泊绞车，是通过变压器来调整转矩，按照间歇工作的模式来实现自动收放缆绳，而不使用张力检测装置，来达到恒张力控制的目的。此种控制方式不能有效地适应系泊时的外力突变情况，发生意外的概率较大，安全系数不高。而基于电子应力传感器检控式的自动系泊绞车结构简单、技术先进，传感器将应变物理量转换成电量。与电动机整定转矩相结合，可以实现稍好的自动系泊效果。

一般的工程船舶如铺管船大多都需要保持船身的平稳，国内外很多类似的工程船都采用恒张力锚机来实现，一般有8~12台恒张力锚机。通过对每一台锚机的动力系统进行控制来实现对锚缆张力的控制，以达到期望的效果。针对在浅水域锚泊的双锚泊船来说，同样可以采用恒张力锚机来实现锚链的恒张力控制。在不同的海洋扰动作用下，通过实时监测锚链上的张力，通过锚机动力系统自动的进行收放锚链，实现恒张力控制效果。

### 3.2 张力控制系统原理及分类

通过对张力控制系统的研究，才能实现对张力的控制。普遍情况下，张力控制系统是传感器和控制器的一种简单的系统集成。在运行过程中能保持张力基本不变的控制过程，叫做恒张力控制。目前，张力控制系统广泛应用于冶金、造纸、织布等工业制造行业中，是一种实现恒张力的自动控制系统。近年来，国家越来越重视海洋资源，船舶辅机行业的自动化技术也逐渐提高。从上世纪七十年代开始出现了恒张力锚泊机械。

典型的张力控制系统主要由张力及速度检测模块、张力控制器模块和执行机构如传动机构和电机等部分组成。其中张力控制器是系统的核心部分，由它进行信号的处理、计算并发出控制指令给执行机构来完成张力大小的调整。

#### 3.2.1 张力控制系统原理

##### (1) 间接法张力控制

间接张力控制法又称为补偿型张力控制系统，是利用一种可观测的扰动量来产生一种补偿作用，来减小扰动对输出张力的影响。由于调节对张力的稳定有一定影响的参数

的时候，可能会导致张力发生一定的不被期望的改变，针对这种情况来间接地保持张力稳定。这种间接控制实际上是一种开环控制，不将实际的张力信号采集回来，只给张力设定值。但是，实际上影响张力的因素是很多的，系统也不可能对每个扰动量都进行补偿，一般只补偿主要的扰动量，所以这种控制方式也是一种近似控制。

在一些工业带材加工过程中，通过控制驱动系统的电流或电压等间接影响张力的因素，如控制驱动电机的励磁电流来使电动机力矩保持不变，来间接实现对张力恒定控制。即间接张力控制系统实质上是一个开环的控制系统。图 3.1 为典型的卷取传动系统。

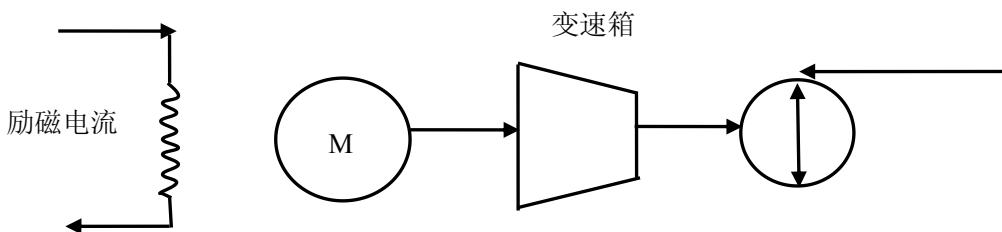


图 3.1 典型的卷曲传动示意图

卷取速度是通过变速箱由电机 M 输出给卷筒的：假设所需的张力需要增大，就需要调节驱动电机的励磁电流，则可使所需的张力增大。因为电机转速会随着励磁电流的增大而增大，随之张力就会增大；相反的，励磁电流降低则电机的转速就会减小，则卷筒上的张力就随之减小。如若系统中驱动电机是交流电机，由电机学原理可知：

$$T_e = K_T \Psi_m I_r \cos \varphi_r \quad (3-1)$$

考虑电机的空载转矩和加减速时的动态转矩时又有：

$$T = T_d + T_F + T_0 \quad (3-2)$$

式中， $T_0$  为电机的空载转矩， $T_d$  为电机加减速时的动态转矩， $T$  为张力转矩。由上式可知：当电机转速稳定时， $T_d$  的数值很小，可近似为零；另外，电机的空载转矩一般很小，可以近似忽略。所以，由式子 (3-2) 可化简得：

$$T_F = K_T \Psi_m I_r \cos \varphi_r \quad (3-3)$$

$T_F$  的大小与系统收放卷时的电机转速和卷筒直径大小有关。所以，即使卷筒直径和旋转速度是变化的，也可以通过改变励磁电流来实现这种情况下的恒定张力的控制要求。

影响间接法张力控制系统的控制效果的因素很多，其中，主要因素有卷筒直径和角速度。由上面的分析可以知道，通过调节激励电流可以对其进行一定的补偿来实现张力的控制要求。但间接张力控制系统不能够补偿电机空载转矩和动态转矩引起的干扰，导致控制精度不是很高。这是间接控制的一个缺陷，在目前的条件下这一问题还没有得到很好的解决，在一定程度上制约了间接张力控制系统的发展。另外，这种开环控制，当

负载变化较大时，电机的转差率就会对应的增大。如果是对同步要求较严格的话，就不太适合，会造成系统的不稳定<sup>[33]</sup>。

## (2) 直接法张力控制

由上面的分析我们知道间接法张力控制是利用对可观测的扰动量进行一定补偿作用来达到调节张力的目的的。针对上面分析的典型卷曲传动系统而言，通过对张力影响较大的电机转速的调节来实现张力控制。在实际的张力控制中，现场的条件比较复杂，震动、噪声等干扰比较严重。而间接法张力控制系统不能补偿某些干扰因素的影响，从而使整个系统的经济效益不高，控制精度也较低。相对而言，直接法张力控制系统具有一定的优势，它能够有效的补偿实际的干扰因素，可以消除控制偏差。所以在这种干扰影响较大的环境下，最好选用直接法来对张力进行控制设计。在实际工业加工生产中，应用较多的也是这种直接张力控制系统，即闭环张力控制系统，其实质是按照系统偏差来进行控制的，也叫反馈控制。按照自动控制原理的知识我们知道，闭环控制系统的优点是能够通过闭环反馈的作用来补偿闭环所包括范围内的扰动<sup>[34]</sup>。此种方式在控制精度要求较高、实时性较强的情况下广泛应用。

通过张力传感器来获得实际张力值，与设定的张力进行比较后，将差值输入到设计的控制器中。经过控制运算后，输出控制信号给传动系统，来实现张力控制。如下图3.2所示为直接张力控制系统总体的原理框图。

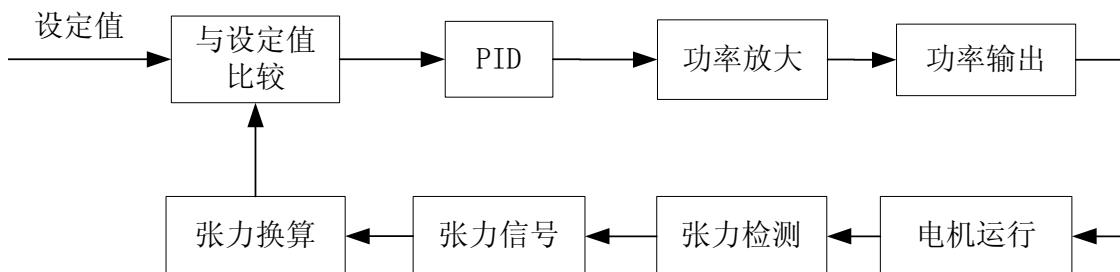


图3.2 直接张力控制系统结构框图

### 3.2.2 张力控制系统的分类

目前在张力控制系统中应用最广泛的几种形式是：磁粉离合器、液压马达以及电动机等形式。与之对应的就有三种张力控制系统。在船舶电气化需求日益强烈的情况下，电动机系统的优势越来越明显。

#### (1) 电动张力控制系统

由于电机控制理论的日趋成熟，也推动了电动机类的张力控制系统的发展和普及。目前，该类控制系统已经成为了当今应用范围最广的张力控制系统。其中电动机包括直流和交流两种形式。近年来随着交流变频技术的快速发展，已在张力控制中也得到了广泛应用。在采用直流电机的张力控制系统中，其优点是具有较好的调速性能，并且能够

带载启动。但是在启动电流较大时，电机的使用寿命就被损害。同时，直流电机系统也容易产生电火花等问题。另外，直流电机系统有换向器，会由于电刷和换向器之间存在摩擦的原因而导致产生一定的死区。这样就限制了其发展和应用。

## (2) 液压驱动张力控制系统

液压技术和控制理论在不断的发展和完善，液压元件可靠性也逐渐增高。近年来，液压驱动的张力控制系统也得到了较大范围的应用。在与电动机和磁粉离合器控制方式相比较之下，针对大惯性负载的张力控制系统来说，液压传动张力控制有着一定的优势<sup>[35]</sup>。在同等体积下，液压传动系统比其他设备能传递出更多的动力，且具有良好的调速性能，能够在大范围内实现无级调速。与其他的动力元器件相比较，液压传动系统具有使用寿命长、频率响应快的优点。但是其总效率低、自动化程度低、噪声大、维护起来一般也比较困难。

### 3.2.3 张力检测

对系统瞬时张力大小的实时精准的检测是实现恒张力控制的关键，如果张力检测装置的精度不高、抗干扰性较差，控制系统就需要较长的时间调节，那么对应的张力控制效果也不会理想。对于张力检测，很多学者也做了大量的研究。

针对张力的检测与控制两方面的研究工作主要分为以下两个方面：一是直接张力控制中对张力的测量或间接的通过位置测量来进行的张力控制；二是无张力检测的张力控制系统。

针对无张力检测控制方面的研究，学者 Valenzuela 在 2003 年提出一种无张力检测的张力控制方案。它是基于张力预估计的控制方法。系统能实时的检测电机的负载力矩，利用预估计器估计当前张力的大小，在与设定值比较后，通过控制器来调整电机转速以改变输出力矩。通过这样一个系统来完成对张力的控制，系统详细的设计方案参见文献<sup>[36][37]</sup>。

本文中通过建立了锚泊船的水平面上的运动模型，实现在海洋扰动下的锚泊船的运动特性仿真。以悬链线理论为基础建立锚链张力求解模型，能够根据锚泊船的运动姿态来实时的得到锚链的张力值，在 MATLAB/SIMULINK 中完成系统的建模和仿真，将锚链张力作为锚机的负载输入，来为后续的张力控制奠定模型基础。

## 3.3 船用绞车动力系统分析

海洋船用锚绞车大多采用交流异步电机或液压驱动方案。早期自动系泊绞车主要有变极变速自动系泊绞车和可控硅控制自动系泊绞车以及液压阀控恒张力系泊绞车等。液压系统的优点是工作平稳，调速性能好，操作时没有电流的波动。但是制造和维护麻烦，效率不高，超负荷能力差。

变频技术在船舶设备中已经得到越来越多的推广和应用。它可以有效的使电机按照预定的或者要求的转速或转矩运行，可以较精确的控制被拖拽对象达到控制要求。在船舶电气设备中也逐渐被重视起来，比如在一些船舶的定位控制中，有利用变频技术来实现锚绞机的调速控制的。变频调速系统响应较快、调速精度也高、调速范围大，还具有节能环保的优点，已经成为以后张力控制系统发展的方向之一<sup>[38]</sup>。

### 3.3.1 锚机系统介绍

锚机是本文中锚泊船系泊的重要设备，恒张力锚机主要使锚泊船在系泊过程中，能够保证系泊船舶或者海洋平台安全的停泊于水域内或码头等位置，自动的维持锚链的张力在安全的范围。根据海洋扰动的变化情况来适时控制锚机的收放链速度来实现安全系泊。大多数的锚机系索均采用锚链，并通过齿轮传动系统来完成收放锚链等动作。

锚机主要由大功率电机、减速器、滚筒、底座、排绳机构、压绳机、机架及刹车系统等部分组成，而锚机的刹车系统由低速和高速以及变速和阻尼制动器等机构组成，电机通过减速箱驱动锚链轮旋转，改变锚链拉力。恒张力锚机系统大体上由动力、传动、刹车和控制系统等部分构成。

对锚机的动力系统和刹车系统进行控制，可以实现对锚缆的恒张力收放控制。通过对这些锚机的收放锚缆的集中控制，可建立船的系泊控制系统，既实现船在工作水域的精确定位，也可使锚泊船在系泊过程中系泊链缆张力稳定在安全的系泊力范围内。以实现锚机恒张力控制为目的的研究，是有效的提高系泊船的安全性系数的关键技术，也对船舶或海洋平台的定位控制有一定的辅助借鉴意义。

### 3.3.2 恒张力锚机系统工作状态及控制方式

目前的锚机电调速大多采用无级调速方法，有三速锚机和转子串电阻调速，如果能够实现锚机电机的无级调速，那么电动机驱动的锚机将是最理想的锚机动力系统。当锚链张力不在设定值范围内时，锚机电机按照控制指令正反转，其转矩通过传动机构传递到滚筒上，从而带动滚筒转动，进行以恒张力控制为目的的收放缆操作。测速编码器能够实时地检测电机轴上的转速信息，不断的反馈给调速控制系统，以使电机在设定张力对应下的转矩值处稳定运行。张力传感器能够实时检测出链缆的张力值并反馈给张力控制器，将运算得到的控制信号输出给电机调速系统，以控制电机轴上的输出力矩。达到锚链张力实时闭环的控制效果，从而实现锚链的恒张力控制。

由图3.3可以看到，锚机在工作过程中，锚缆的张力由两部分组成：一个是来自绞盘；另一个是外部扰动，风或者海流等扰动力作用在锚泊船上，船又通过绞车影响锚链。如果锚机系统能够根据锚链张力变化情况适时的进行收放链操作，那么就能有效的实现锚链的张力控制，补偿外界扰动力对锚链的影响。

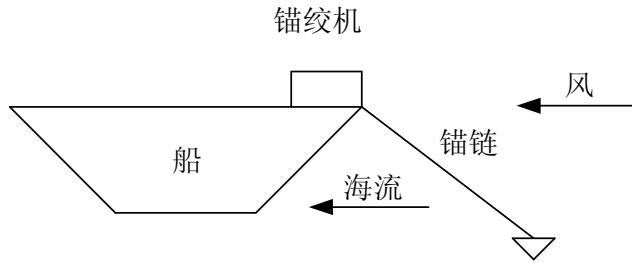


图 3.3 锚泊船锚泊图

因风浪等外界扰动的存在，必然会导致锚泊船的运动转台发生变化，锚链上的力也会随着发生变化，若锚链上的张力超过了允许范围上限时，则交流电机反转放缆，来减小锚链所受张力。所以，在锚泊船受海洋扰动作用而产生运动的过程中，恒张力锚机系统能够通过电机的调速控制来实现恒力矩输出，进而达到调节锚链张力大小的作用，实现锚链的恒张力控制。

### 3.4 异步电动机交流调速原理及控制方式

#### 3.4.1 直流电机调速原理

由电机学知识可知，不管是直流还是交流电机的调速的本质都是通过控制电机的转矩来调节转速。通过分析交流电机和直流电机的调速原理我们就可以知道传统的交流异步电机调速为什么没有直流电机性能好。

由电机学知识可以知道直流电机的转速表达式为：

$$n = \frac{U - I_a R}{C_e \Phi} \quad (3-4)$$

式中， $U$  为电机端电压； $I_a$  为电枢电流； $\Phi$  为主磁通； $R$  为电枢绕组电阻。其中主磁通的大小由励磁电流  $I_m$  决定，可以看出电机转速只与电机端电压和励磁电流这两个输入有关，一般的直流电机中  $U$  和  $I_m$  之间是相互独立的，所以直流电机的调速较易实现。

#### 3.4.2 异步电机调速原理

由电机传动原理可知，异步电机转速公式为：

$$n = \frac{60f_s}{n_p}(1-s) = \frac{60\omega_s}{2\pi n_p}(1-s) \quad (3-5)$$

式中， $\omega_s = 2\pi f_s$  为定子供电角频率，即角速度；

$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s}$  为电机转差率；

$$n_s = \frac{60f_s}{n_p} = \frac{60\omega_s}{2\pi n_p}$$
 为电机同步转速;

由式(3-5)可以看出,在电机的极对数  $n_p$  和转差率  $s$  一定的情况下,则电机的转速  $n$  随着定子供电频率的变化而变化。实质上变频器就是通过改变电机定子供电频率而对电机进行调速控制的<sup>[39]</sup>。

异步电机进行调速时,要求保持磁通  $\Phi$  为额定值,避免因为电机铁芯不能充分利用而造成的浪费或者铁芯饱和导致的电机绕组过热而造成的损坏。与直流电机不同,交流电机的励磁系统不是独立的。根据异步电机定子电动势的公式:

$$U_s \approx E_s = 4.44f_1N_1k_{w1}\Phi_m \quad (3-6)$$

在忽略定子阻抗压降时,端电压  $U_s \approx E_s$ ,若  $U_s$  不变时,  $f_1$  与  $\Phi_m$  成反比。因此,为了保持磁通恒定,应同时的改变定子的电压和供电频率。

### 3.4.3 交流异步电机控制方式

由于感应电机是一个多变量的非线性系统,还具有较强的耦合特性,近年来对于该系统的动静态性能的研究引起了很多学者的关注。通过非线性自适应原理得到的带有不确定变量的解耦的线性模型是一种重要的方法。另外,神经网络、遗传算法、逆系统<sup>[40]</sup>等值能算法也逐渐的应用到电机模型的研究中。

古典的交流调速一般为异电机的变极、变压等有级调速方式。而现代的交流传动技术在矢量空间控制、变频控制、现代控制理论和计算机控制技术的基础上,有较好的发展<sup>[41]</sup>。目前的研究来看,有多种控制电机速度的模式,恒压频比控制即 V/F 控制;矢量控制;直接转矩控制<sup>[42]</sup>三者应用较多。文献<sup>[43]</sup>中对基于永磁异步电机的 V/F 变频变压控制和无传感器的矢量控制分别在低速和中高速的调速性能进行了比较,结果表明在低速域矢量控制方法优于 V/F 控制。

#### (1) 恒压/频比控制

异步电机的调速控制方法中,变频变压调速方案是效率较高、性能较好、成本低也是实现起来比较容易的调速方法,在中高速之间具有一定的优势,而无传感器的空间矢量控制在低速域时的调速效果较好。按照恒频压比进行调速时的变频机械特性基本是平行移动的且转差功率不变,基本能够实现要求的调速目标。但低速时的带载能力不高,需对定子阻抗的压降实行补偿,控制要复杂一些。

在异步电动机调速时由于磁通较弱,电动机的铁心的利用不够充分,这就形成了一定的浪费;磁通太大也会出现绕组过热的情况。所以在调速过程中总是希望磁通  $\psi_m$  能保持在额定值上。由于直流电动机的励磁系统是独立存在的,若对电枢绕组进行实时的补偿,则能够较容易的保持  $\psi_m$  为额定值。因此,为了保持主磁通不变,在变频调速过

程中应同时改变定子电压和供电频率。

### (2) 矢量控制

对电动机的调速控制，实质上就是对其动态过程中的瞬时电磁转矩的控制。在变频调速方法中，矢量变换控制的调速特性要好于常用的恒 U/F 控制，所以近些年矢量变换控制得到了广泛的应用。所谓的矢量控制就是通过坐标变换将交流电机近似转换成直流电机模型，这样就可以采用类似直流电机调速的策略来实现交流电机的无级调速控制<sup>[44]</sup>

矢量控制是在稳态和动态情况下，通过控制与产生转矩无关的矢量来控制转矩。因此其动态性能较好。在这种控制中，需要时刻检测转子位置，在转子位置确定后，定子电流矢量在三相静止坐标轴系内的相位才能最后确定，因此又将这种矢量控制成为自控式控制。

矢量控制是在动态过程中能保证  $\psi_{rm}$  恒定，而这些系统仅用恒压频比控制是不够的。本文采取的控制方法，就是考虑到船舶锚机系统越来越追求高性能，故采用矢量控制的方法实现锚机恒张力控制。

### (3) 直接转矩控制

与矢量控制不同的是，直接转矩控制方法不是采用单纯的解耦思路来实现转速和磁链的控制。由于电机磁链具有一定的自控制，所以直接转矩控制是在此基础上以转矩为核心而进行的具体控制。这种方法不需要一系列的坐标变换，而是通过对电机定子电压和电流的检测，再借助理论计算方法来计算磁链和转矩，对其进行直接跟踪来实现脉宽调制，实现系统的高动态性能。直接转矩控制的特征是控制定子磁链，它不需要将电机模型进行复杂的等效变换后再进行调速控制。直接转矩控制方法只考虑电磁转矩的大小，因此除了定子电阻外，在控制上对所有的电机参数变化具有良好的鲁棒性。但是还有一些问题没有得到解决，比如在低速时的转矩和磁链的脉动问题<sup>[45]</sup>。

## 3.5 锚机恒张力总体方案

### 3.5.1 锚机的负载转矩特性

本文研究的船用锚绞机的传动系统是大功率交流电动机，电机再通过传动机构来拖动储缆筒滚动。为了分析锚机系统的运行特性，就需要了解电机负载的转矩特性。

负载转矩特性是指负载转矩与转速之间的关系。主要的负载转矩特性可以分为常见的两类：一是二者成反比关系的恒功率转矩特性；二是恒转矩负载特性，绞车类机械的负载转矩特性就属于这种特性。

有些负载的转矩是由重力作用而产生的，该类负载转矩属于位能性恒转矩负载。其转矩的大小是恒定值，大小和方向都不改变。当绞车或锚机起锚的过程中，负载转矩起阻碍作用；当下锚时，负载转矩就起带动性的帮助运动的作用，此时其作用方向就与电

机的转动同向。如图3.4中的负载转矩特性曲线。

绞车的负载特性及电机的四象限运行特性如下图所示：

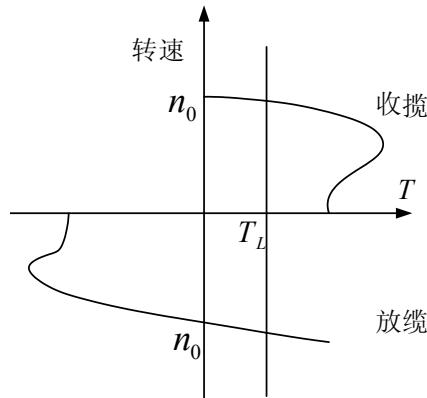


图3.4 电动机四象限运行

在收缆过程中，锚机电机处于电动的状态，在第一象限工作；在放缆过程中，锚链张力小于设定张力，即力矩小于设定力矩，锚机电机处于发电状态，工作在第四象限<sup>[46]</sup>。在矢量控制方式下，通过控制电机的定子电流的频率和大小来设定力矩，当检测到的实际力矩没有达到设定值时，电机转速继续增大，直到锚链张力达到设定值，即达到设定的力矩值。

### 3.5.2 锚机电机的转矩特性

锚机电机是锚绞机的核心部分。绞盘的驱动力由电机产生，锚链恒张力控制即实现锚机电机的输出转矩能自动的调节来控制锚链的张力。

电机的电磁转矩是转速的函数。一般表达为  $T = f(\omega)$ 。转矩值与电机轴的功率的关系如下：

$$T = \frac{P}{\omega} \quad (3-7)$$

式中的  $P$  为电机轴上的功率，单位为  $w$ ；  $\omega$  为电机的旋转角速度，单位  $rad/s$ ；

电机转速常以  $n(r/min)$  来表示。

$$T = \frac{9.55P}{n} \quad (3-8)$$

其中  $T$  为电机轴上的转矩，在此忽略了电机空载损耗。在绞车传动结构中，滚筒为主要对象，电动机通过连轴机构直接带动滚筒负载。单轴拖动系统简图如图3.5所示：

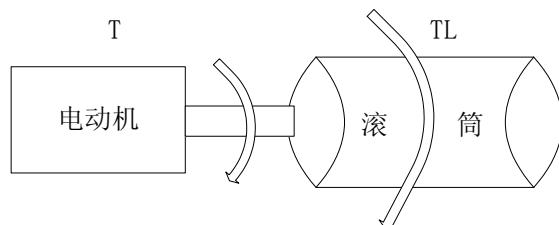


图3.5 单轴电机拖动系统

电动机产生力矩推动滚筒转动，而负载转矩阻碍其运动。得到运动方程为：

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (3-9)$$

式中  $T_e$  为电机电磁转矩；  $T_L$  为负载转矩 ( $N \cdot m$ )；  $J$  为系统的转动惯量 ( $kg \cdot m^2$ )；

$\frac{d\omega}{dt}$  为电机的旋转角加速度 ( $rad / s^2$ )。

### 3.5.3 恒张力控制

完整的张力控制系统应该由张力设定、检测和控制三个主要的部分组成。将期望张力与检测到的实际张力的差值，作为本系统中的恒张力控制模块的输入。控制器产生绞盘电机调速的输入信号，通过不断的调整电机的转速来补偿外界扰动。这种通过张力传感器实时检测张力，再通过张力控制器或者 PLC 进行张力的 PID 运算来输出控制信号实质是通过调整速差来实现张力的动态恒定。

恒张力控制是一种将外界扰动力的影响最小化的一种方法。锚链恒张力控制就是使锚绞机能够根据链缆实际张力的大小按照控制要求自动的进行收放缆，以减少船上工作人员的工作量。本文设计的恒张力闭环控制系统主要是通过控制电机的转矩以补偿外界扰动力矩，原理如图 3.6 所示：

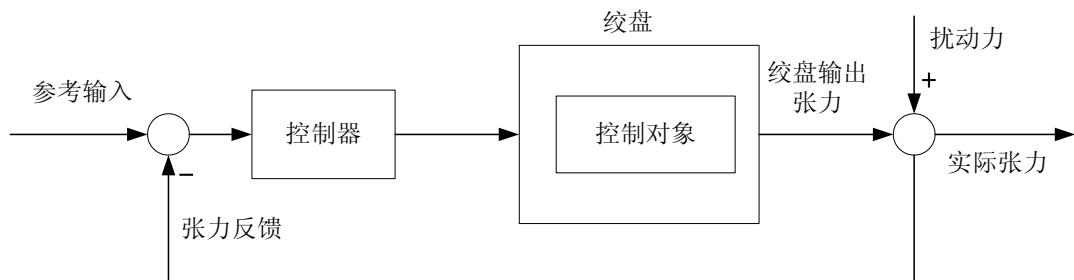


图 3.6 锚机恒张力闭环控制示意图

如图 3.6 所示，输入的参考张力值，锚链上的张力传感器检测出的锚链上实际张力与之比较产生误差  $e$ ， $e$  不等于 0 时，张力控制器将根据这个力的偏差量进行运算以产生一个控制量。当  $\Delta T < -N$  (留有一定的裕量来补偿电机启动时间) 时，电动机反转放缆；当  $\Delta T > N$  时，电机正向运转来收缆。误差  $e$  经过 PI 控制器的控制作用后引入到绞车动力控制系统中，以控制锚机电机的转速和转矩，通过异步电动机转速的调节，使绞车电机自身产生的电磁转矩能补偿外界扰动力产生的力矩。

锚机恒张力控制实质上就是锚机电机的转矩或转速的控制，锚机电机能够根据设定的张力，在控制器的作用下，实时的通过改变电机转速，来实现恒转矩控制。由异步电机的运动方程可知，对系统的力的控制，实质上就是对锚机动力系统的动态转矩的控制。

在负载确定时，只需要有效地控制锚机电机的电磁转矩就可以达到要求的控制效果。

经过上面的分析，设计锚机恒张力控制系统的结构框图如图3.7所示：

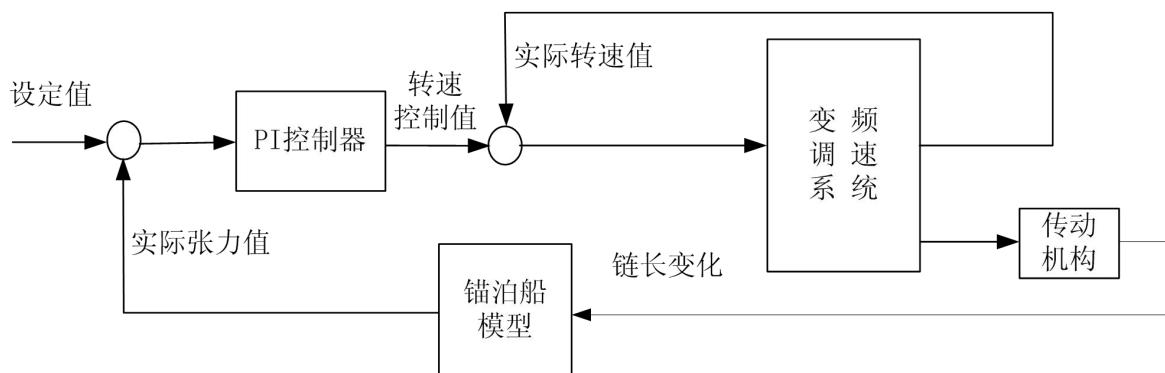


图3.7 控制系统框图

本文通过建立的锚泊船的三自由度运动模型，在风流等海洋扰动力作用下呈周期性偏荡运动，从而导致锚链张力在较大范围内做周期性变化，以建立的锚泊船的锚链张力模型为基础，将锚泊船运动过程中的实时锚链张力作为锚机系统的负载输入，以SIMULINK为平台建立仿真模型，实现锚链张力的实时检测来完成锚机恒张力控制研究。

### 3.6 本章小结

本章首先针对张力控制方法进行论述，在张力直接控制方法和间接控制方法分析中，根据所研究对象的特性和控制要求，设计锚机恒张力控制系统的控制结构。并对锚机系统进行简要的介绍，对锚机的工作状态作了分析，又阐述了当下较流行的锚机交流电机的调速控制方法，确定本文拟采用的变频调速方法，在实现电机无级调速的基础上完成恒张力控制目标。基于上一章的模型基础，加以电机的调速控制系统，设计恒张力控制器，完成系统的设计方案。



## 第4章 恒张力锚机动力系统的建模与调速控制

本文拟将三相交流异步电机的矢量控制方法应用到船用锚机系统中，使锚机系统能够实现平滑的无级调速，能够根据缆绳张力的变化实时的自动收放锚链，以保持锚链的张力在特定范围内。

### 4.1 异步电机的三相动态数学模型

实际上在研究电机复杂的数学模型时，我们常忽略一些因素的影响：如空间谐波和齿槽效应、励磁饱和、铁心损耗、频率和温度的变化对绕组的影响等。

本课题采用转子是笼形的异步电动机，进行等效折算后可得到如下物理模型：

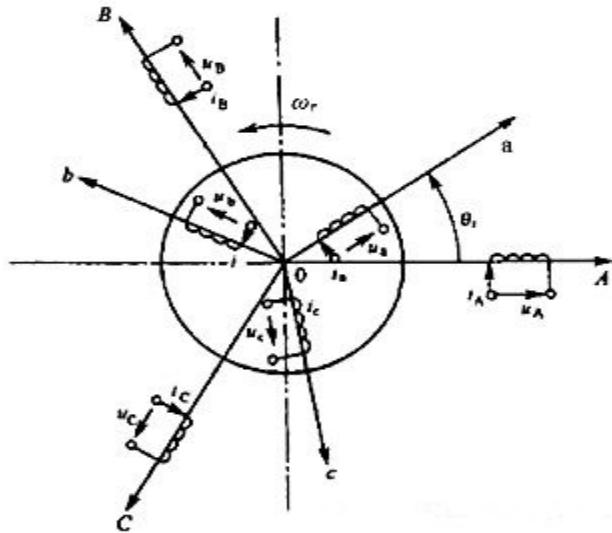


图 4.1 三相异步电动机的等效物理模型

由电机学知识我们可以知道三相定子绕组的电压方程可表示为：

$$\begin{cases} U_A = r_i i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ U_B = r_i i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ U_C = r_i i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \end{cases} \quad (4-1)$$

方程中， $\psi_A$ 、 $\psi_B$ 、 $\psi_C$  为定子三相绕组磁链；

$U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_C$  为定子三相电压；

$i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$  为定子三相电流；

$r_i$  为定子各相绕组电阻。

磁链方程式为：

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \\ L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

在上式电感常量矩阵中，对角线上的  $L_{AA}$ 、 $L_{BB}$ 、 $L_{CC}$ 、 $L_{aa}$ 、 $L_{bb}$ 、 $L_{cc}$  是各个绕组的自感，其余为绕组间的互感值。

电磁转矩方程为：

$$T_e = \frac{1}{2} n_p i^T \frac{\partial L}{\partial \theta} i \quad (4-3)$$

式中， $\theta$  为角位移， $n_p$  为电机磁极对数。

## 4.2 三相异步电动机在两相旋转坐标系上的动态数学模型

交流电机在三相静止坐标系下的模型一般比较复杂，通过坐标变换，可以把变参数的电感矩阵转换成常参数的，也使矩阵方程的维数降低了，简化了电机的数学模型。通过  $3s/2r$  和  $2s/2r$  这两次变换，就可以得到在任意旋转坐标系的交流电机模型。

### 4.2.1 3s/2r 变换

三相静止 A、B、C 和两相正交  $\alpha$ 、 $\beta$  坐标之间的变换称为  $3s/2r$  变换。

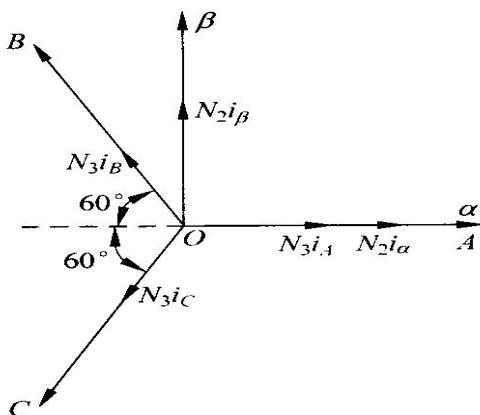


图 4.2 三相坐标系和两相坐标系中的磁动势矢量

图 4.2 中 A、B、C 为三相静止坐标系； $\alpha$ 、 $\beta$  两相静止坐标系；其中，取 A 轴和  $\alpha$  轴重合。

将  $3s/2r$  的矩阵表示形式为：

$$C_{3/2} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{N_3}{N_2} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (4-4)$$

$C_{3/2}$  表示为从三相到两相坐标之间转化的变换矩阵。由于变换前后的总功率不变，所以匝数比为：

$$\frac{N_3}{N_2} = \sqrt{\frac{2}{3}} \quad (4-5)$$

#### 4.2.2 两相静止-两相旋转坐标变换

即从两相正交的静止坐标系到旋转坐标上的变换，简称 2s/2r 变换。

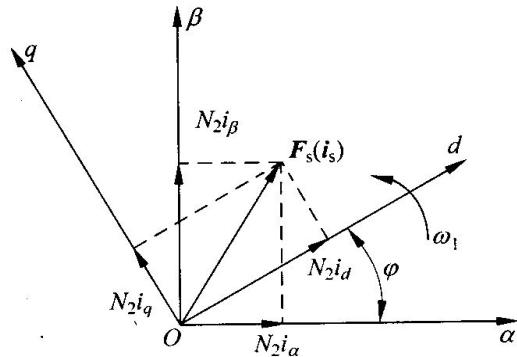


图 4.3 两相静止和两相旋转坐标系中的磁动势矢量关系

由图 4.3 可见  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$  和  $i_d$ 、 $i_q$  之间存在下列关系：

$$\begin{aligned} i_\alpha &= i_d \cos \varphi - i_q \sin \varphi \\ i_\beta &= i_d \sin \varphi + i_q \cos \varphi \end{aligned} \quad (4-6)$$

写成矩阵形式，得：

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = C_{2r/2s} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4-7)$$

$C_{2r/2s}$  即为从两相旋转到两相静止坐标系之间转换的变换矩阵。

#### 4.2.3 d-q 坐标系上的数学模型

矢量控制是通过在 d-q 坐标系下来直接控制定子电流矢量的，主要控制定子电流的幅值和电流与磁通之间的相位。通过 3s/2s 变换和 2s/2r 变换后，实现了 A-B-C 模型与 d-q 模型之间的转换。变换后得到磁链方程式为：

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (4-8)$$

或写成：

$$\begin{aligned} \psi_{sd} &= L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} &= L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} &= L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} &= L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{aligned} \quad (4-9)$$

异步电动机三相动态模型变换到 d-q 坐标系上的电压方程式为：

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -\omega_1 L_s & L_m p & -\omega_1 L_m \\ \omega_1 L_s & L_s p & \omega_1 L_m & L_m p \\ L_m p & -\omega_s L_m & L_r p & -\omega_s L_r \\ \omega_s L_m & L_m p & \omega_s L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (4-10)$$

转矩方程式为：

$$T_e = p_n L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{sq}) \quad (4-11)$$

### 4.3 基于矢量控制的异步电机调速

已经知道，矢量控制的基本思路是通过坐标变换建立交流电机的等效直流电机模型关系，因为进行坐标变换的是电流的空间矢量，所以称该控制系统为矢量控制系统。

按照所参考的磁场的不同，一般有三类矢量控制方法，分别是按转子磁场、定子磁场的和气隙磁场定向的矢量控制<sup>[47]</sup>。转子磁场定向在实际中应用比较广泛，而后两种定向方式下的矢量控制会产生耦合效应。目前用的最普遍的是按转子磁场定向的矢量控制，因此本文也选择该类矢量控制来研究异步电机的调速。

#### 4.3.1 转子磁链定向方式下的矢量控制

异步电动机有定子和转子之分，若对它们的电流都进行坐标变换，分析起来会稍微复杂一些。而且前面的分析也只是坐标系与坐标系的变换关系，并没有规定 d 轴的方向。

由 (4-1) 式可以发现，在忽略绕组的定子压降时，定子电压和磁链相位相差 90°。如若取定子磁链方向为 M 轴，即使 d 轴落在转子磁链矢量  $\psi_r$  的方向上，则定子电压矢量就落在超前 M 轴 90° 的 T 轴上，它垂直于矢量  $\psi_r$ 。这样，d-q 坐标系就具体规定为 M-T 坐标系，即将 d-q 坐标系按转子磁链定向了。

当 d-q 坐标系按  $\psi_r$  方向定向时，d 轴与  $\psi_r$  方向重合，则  $\psi_r$  在 q 轴上的分量为 0。故有：

$$\psi_{rd} = \psi_{rm} = \psi_r \quad \psi_{rq} = \psi_{rt} = 0 \quad (4-12)$$

推导得到：

$$\begin{aligned} i_{rq} &= -\frac{L_m}{L_r} i_{sq} \\ i_{rd} &= \frac{\psi_{rd} - L_m i_{sd}}{L_r} \end{aligned} \quad (4-13)$$

$$\therefore \psi_{rd} = \psi_r = \frac{L_m}{1 + p \frac{L_r}{R_r}} i_{sd} \approx L_m i_{sd}$$

将  $i_{rq} = -\frac{L_m}{L_r} i_{sq}$  带入  $\omega_s = -\frac{R_r i_{rq}}{\psi_{rd}}$  得到

$$\omega_s = -\frac{R_r i_{rq}}{\psi_{rd}} = \frac{i_{sq} L_m}{T_r \psi_r} \quad (4-14)$$

将上面结果带入转矩方程得：

$$T_e = \frac{P_n L_m}{L_r} i_{st} \psi_r \quad (4-15)$$

可以看出若  $\psi_r$  一定，则转矩  $T_e$  和  $i_{st}$  成正比。

经过一系列代换，可得计算转差  $\omega_s$  的公式：

$$\omega_l - \omega = \omega_s = \frac{L_m i_{st}}{T_r \psi_r} \quad (4-16)$$

简化后的状态方程式为：

$$T_r p \psi_r + \psi_r = L_m i_{sm} \quad (4-17)$$

则

$$\psi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sm} \quad (4-18)$$

或

$$i_{sm} = i_{sm} = \frac{T_r p + 1}{L_m} \psi_r \quad (4-19)$$

从式 (4-18) 和 (4-19) 分析来看，转子磁链  $\psi_r$  仅由定子电流励磁分量  $i_{sm}$  产生，与转矩分量  $i_{st}$  无关，实现了  $i_{st}$  与  $i_{sm}$  之间的解耦。式 (4-18) 还表明，当励磁电流分量  $i_{sm}$  发生突变时，会抑制  $\psi_r$  的变化。

由前面的模型分析我们知道定子电流空间矢量的大小取决于  $i_d$  和  $i_q$ ，即控制  $i_d$  和  $i_q$  就可以控制电机的转矩，一定的转速和转矩就对应一定的  $i_d^*$  和  $i_q^*$ ，通过电流控制器使实际的  $i_d$  和  $i_q$  较好的跟踪给定值，便可以有效的控制转矩和转速的大小。

### 4.3.2 交流电流控制模式

电流控制器 ACR 位于三相静止轴系，控制的是实际的三相电流，电流可控 PWM 逆变器对电流的控制可以采用多种控制模式。主要有电压型和电流两种形式的逆变器。本文中的电流控制器采用滞环比较模式，其控制框图如图 4.5 所示：

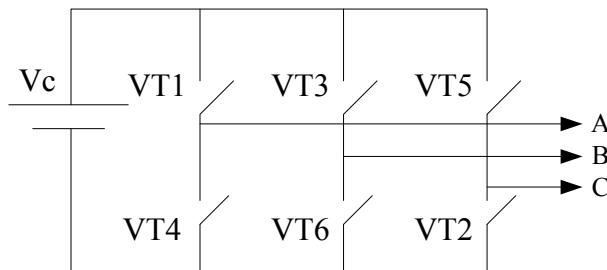


图 4.5 逆变器电子开关图

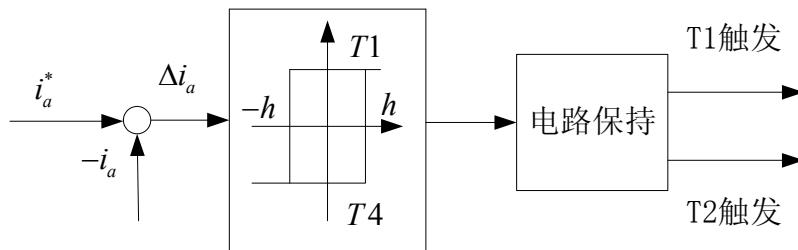


图 4.6 逆变器一条支臂的控制框图

图 4.6 为逆变器一条支臂的控制框图，当实际电流  $i_{abc}$  低于给定电流  $i_{abc}^*$  且偏差  $\Delta i_{abc}$  比滞环的设置宽度大时，模块输出为 1；当实际的三相电流  $i_{abc}$  高于给定值  $i_{abc}^*$  时，且其偏差  $\Delta i_{abc}$  比滞环设置宽度小时，则模块输出变为 0。变频调速就是以这样的机制来控制逆变器件的通、断，从而来调节其输出线电压的频率。构成了闭环控制模式来对电流进行有效的控制。

## 4.4 基于 MATLAB 的交流异步电机矢量控制系统模型的建立

经过前面的矢量控制原理的分析，在 MATLAB 的 SIMULINK 环境下建立交流异步电机的矢量控制仿真模型。系统采用转速和磁链双闭环控制方法的变频调速系统。

### 4.4.1 异步电动机矢量控制数学模型

在上一节中介绍过矢量控制的原理，整理电机在 d-q 坐标系下的数学模型：

电压方程式:

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -\omega_1 L_s & L_m p & -\omega_1 L_m \\ \omega_1 L_s & L_s p & \omega_1 L_m & L_m p \\ L_m p & -\omega_s L_m & L_r p & -\omega_s L_r \\ \omega_s L_m & L_m p & \omega_s L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (4-20)$$

磁链方程式:

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \\ \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (4-21)$$

转矩方程式:

$$T_e = \frac{2}{3} n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{sq}) \quad (4-22)$$

得到:

$$\begin{aligned} u_{sd} &= R_s i_{sd} + p \psi_{sd} - \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} &= R_s i_{sq} + p \psi_{sq} + \omega_1 \psi_{sd} \\ u_{rd} &= R_r i_{rd} + p \psi_{rd} - \omega_s \psi_{rq} \\ u_{rq} &= R_r i_{rq} + p \psi_{rq} + \omega_s \psi_{rd} \end{aligned} \quad (4-23)$$

异步电动机转子是短路的。

即  $\begin{cases} u_{rd} = 0 \\ u_{rq} = 0 \end{cases}$

$$\therefore \omega_s = -\frac{R_r i_{rq}}{\psi_{rd}} = \frac{i_{sq} L_m}{T_r \psi_r} \quad (4-24)$$

三相静止 A-B-C 坐标系与 d-q 坐标系之间的变换关系:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad (4-25)$$

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4-26)$$

通过以上分析, 可以得交流电机矢量控制的解耦方程为:

$$\psi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sd} \quad (4-27)$$

$$i_{sd} = \frac{T_r p + 1}{L_m} \psi_r \quad (4-28)$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{n_p L_m}{L_r} i_{sq} \psi_r \quad (4-29)$$

$$\omega_s = \frac{L_m i_{sq}}{T_r \psi_r} \quad (4-30)$$

$$\frac{d_\theta}{d_t} = n_p \omega_r + \omega_s \quad (4-31)$$

$$T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (4-32)$$

式中：  $R_s$ 、  $R_r$ ： 定子、 转子电阻；

$L_m$ 、  $L_s$ 、  $L_{ls}$ 、  $L_{lr}$ 、  $L_r$ ： 互感、 定子电感、 定子绕组电感、 转子绕组电感、 转子；

$L_r = L_{lr} + L_m$ ，  $L_s = L_{ls} + L_m$ ；

$\omega_1$ 、  $\omega_r$ 、  $\omega_s$ ： 定子同步转速、 转子的转速、 转差转速；

$u$ 、  $i$ 、  $\psi$ ： 电压、 电流和磁链；

$\theta$ ： 转子磁链角；

下标  $s$ 、  $r$ ： 表示定子、 转子；

下标  $d$ 、  $q$ ： 表示  $d$  轴、  $q$  轴；

$n_p$ ： 极对数；

$T_r$ ： 转子时间常数；

$J$ ： 转动惯量；

$T_e$ ： 电磁转矩；

$F$ ： 阻转矩摩擦系数；

$P$ ： 微分算子  $\frac{d}{d_t}$ 。

#### 4.4.2 基于 MATLAB 的磁链闭环转差型矢量控制

根据矢量控制的原理和矢量控制系统的定义，经过前面的分析得到(4-27)和(4-29)这两个异步电机矢量控制的基本方程式，便可以对其进行建模。构建基于矢量控制的调速系统的结构模型如图 4.7。

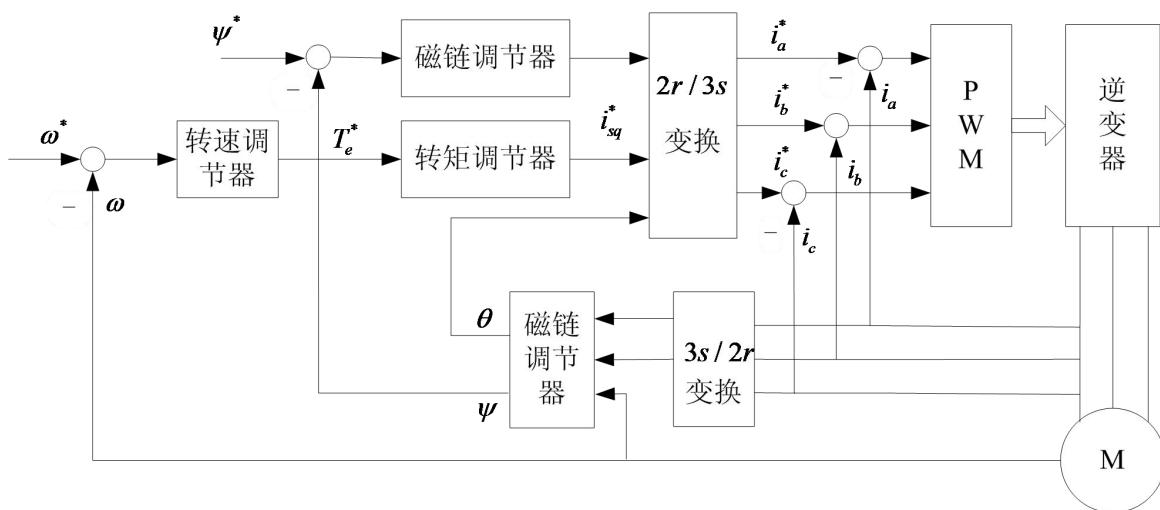


图4.7 矢量控制调速系统结构框图

由于存在电流闭环，则使输出电流基本按照给定的参考值变化，较好的跟踪指令信号。该仿真模型的工作原理是：设定转速 $\omega^*$ 与实际转速 $\omega$ 之差 $\Delta\omega$ 经过转速调节器后，经过PI算法得到转矩指令值 $T_e^*$ ，定子电流的励磁分量 $i_{sd}^*$ 和转矩分量 $i_{sq}^*$ 由磁链调节器和转矩调节器模块计算给出，再经过 $2r/2s$ 和 $2s/3s$ 两次变换后，获得定子电流的相应指令值 $i_a^*$ 、 $i_b^*$ 、 $i_c^*$ 。PWM逆变器产生触发信号，给出电流信号值来控制交流电机的调速运行。其中电流之间坐标变换关系如图4.8所示。如果PWM波频率较高，电动机的电流就可以得到较高品质的动态响应，电机的电磁转矩脉动较小，电流的纹波较少，能使电机更平稳的运行<sup>[48]</sup>。

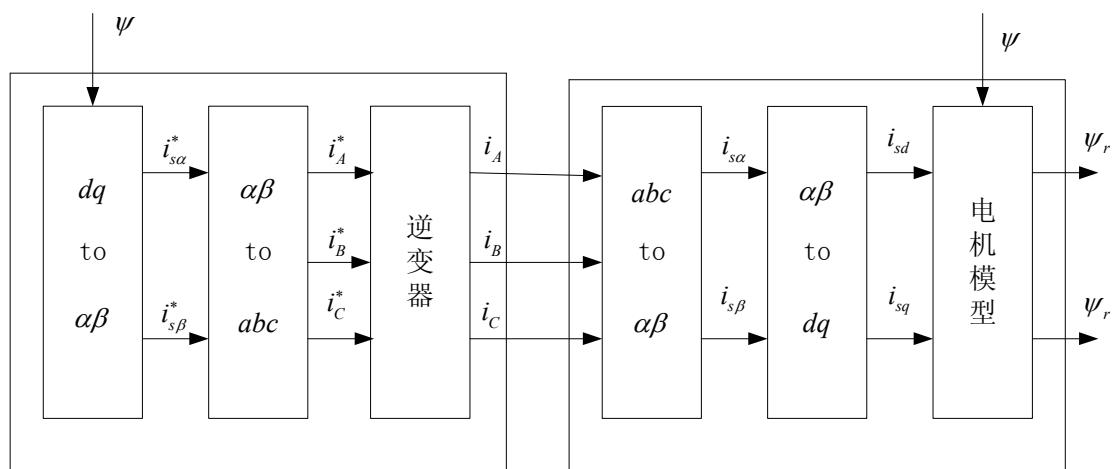


图4.8 电机矢量控制三相电流变换结构框图

#### 4.4.3 基于 SIMULINK 的仿真模型的建立

锚机电磁调速性能的好坏直接决定了锚链张力控制的效果，通过上前面的分析，建立了异步电机的矢量控制模型，在实现电机的变频调速的基础上来研究锚机电机的恒力

矩控制。本文所建立该系统的 SIMULINK 仿真模型如图 4.9 所示。其中，IGBT 逆变器模型和异步电机模型取自 SimPowerSystem 元件库<sup>[49]</sup>：

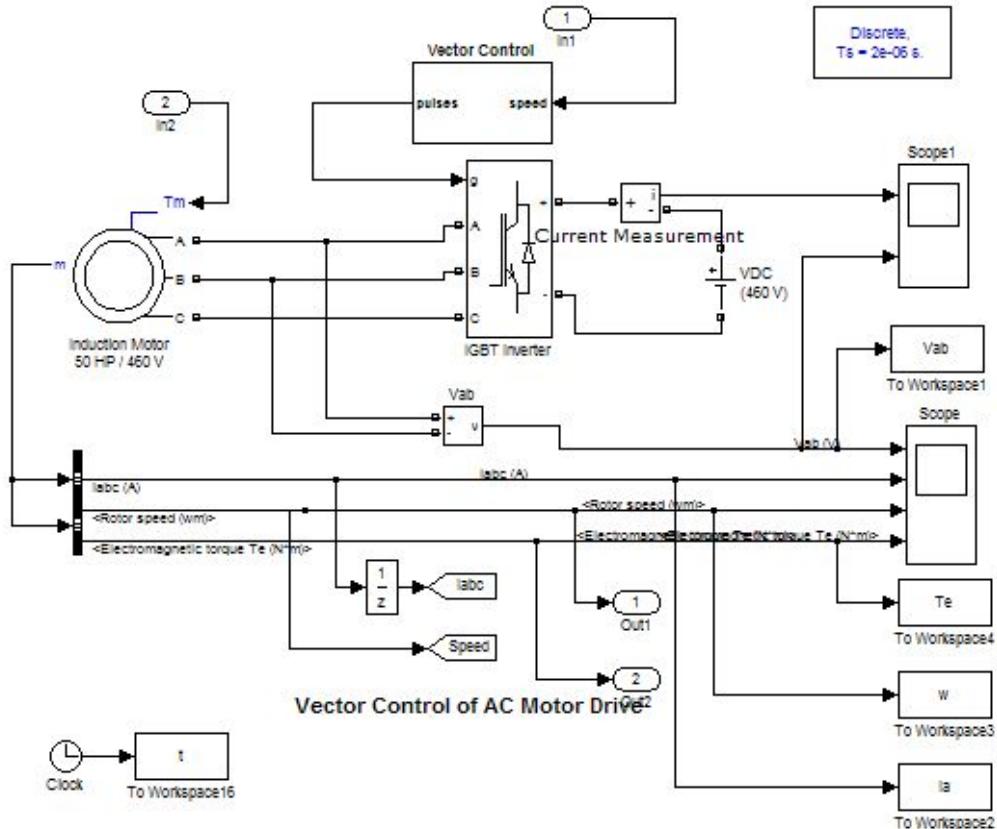


图 4.9 三相异步电动机矢量控制模型的主电路

主电路模型中的 Vector Control 模型中的转速控制模块结果如图 4.10，转矩命令由下式产生：

$$T_e^* = K_p(\omega_r^* - \omega_r) + K_i \int (\omega_r^* - \omega_r) dt \quad (4-33)$$

式中， $K_p$ 、 $K_i$ ——PI 算法的比例系数、积分系数。

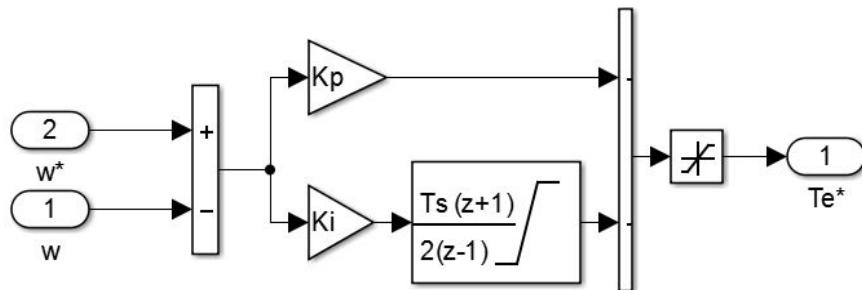


图 4.10 转速调节器模块结构

本模型中， $K_p$ 、 $K_i$ 、 $T_{em}$  分别取为 1500、500、1200，采样周期  $T_s$  取 2s。

根据本节分析得到的数学模型，可以很方便的建立仿真模型，按照 (4-27) 式可搭建出转子磁链  $\psi_r$  计算模块。再结合 (4-31) 式便可计算出转子换向角  $\theta$ 。图 4.12、图 4.13

所示模块分别计算转子磁链 $\psi_r$ 和转子换向角 $\theta$ 。

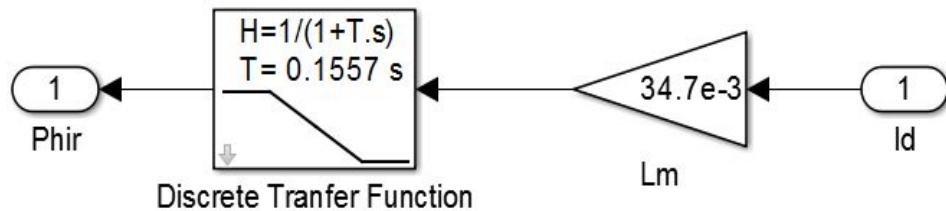


图 4.11 转子磁链 $\psi_r$ 计算模块结构

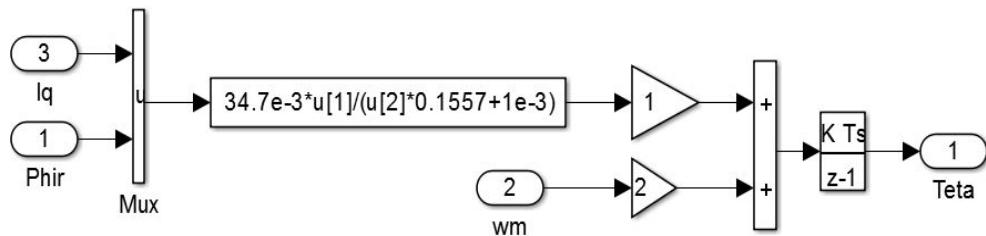


图 4.12 转子换向角 $\theta$ 计算模块结构

经过上面的分析研究与建模方法，可以建立本系统中所需的大功率锚机电机的矢量变频调速系统模型，为后面的恒张力控制系统奠定模型基础。

## 4.5 基于矢量控制的电机恒力矩控制

根据异步电机的双闭环矢量控制模型，结合电机转矩特性和负载转矩特性，设计带有转矩闭环的转矩跟踪系统。

按照上一章对张力控制系统的分析结果及恒张力控制方法的研究内容，再结合本章的大功率电机的变频矢量控制系统，可以实现在扰动作用下的锚机电机的恒力矩控制，通过调节电机的转速来补偿扰动的作用，实现电机轴上输出力矩较好的跟踪给定值。控制框图如图 4.13 所示：

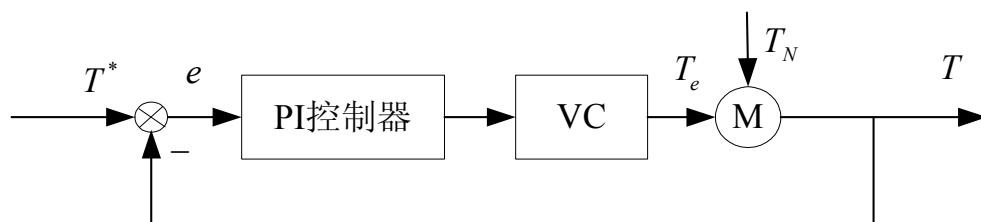


图 4.13 锚机电机恒力矩控制框图

如图 4.13 所示，输入的参考力矩值  $T^*$ ，电机的输出电磁转矩不断的与其比较产生误差信号  $e$ ，误差  $e$  经过 PI 控制器的控制作用后引入到矢量控制系统中以控制异步电动机进行调速，同时由风浪流等外力产生的扰动力作用到锚机转轴上，异步电动机通过转速的调节，使自身产生的电磁转矩能补偿外界扰动力产生的转矩，最终实现电机轴上输

出恒力矩的控制功能，也即实现恒张力的控制。

在 SIMULINK 中搭建基于矢量控制的大功率电机的恒力矩控制仿真模型如图 4.14 所示<sup>[50]</sup>:

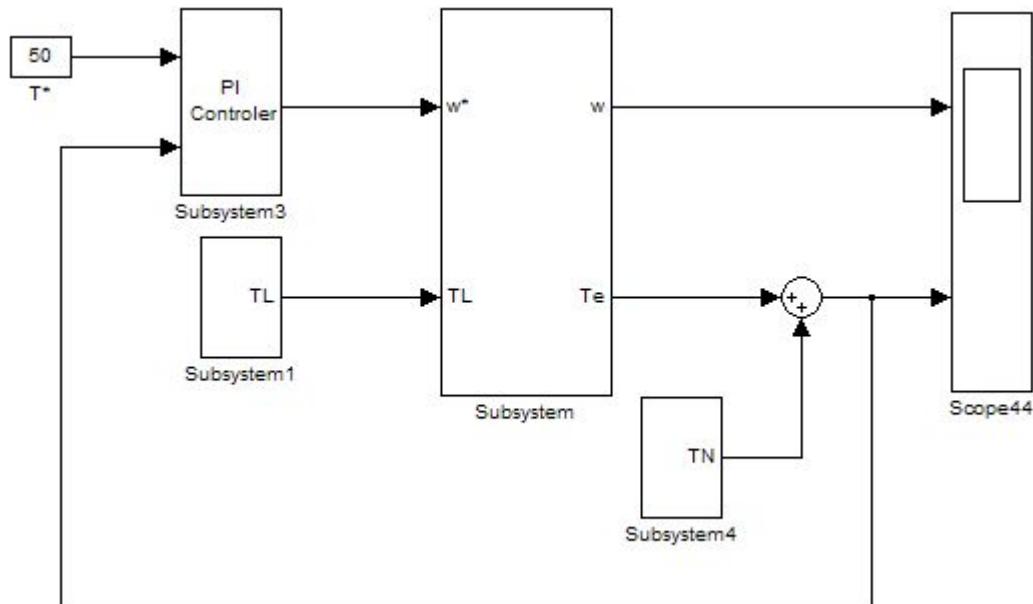


图 4.14 锚机电机恒力矩控制仿真模型图

## 4.6 本章小结

本章在分析异步电机的三相动态模型的基础上，通过旋转坐标变换来建立其在 d-q 坐标系上的模型。并分析了三相交流异步电机的矢量控制原理及方法，采用按转子磁链定向的矢量控制方法来实现异步电机的无级调速控制。建立磁链闭环的转差型异步电机矢量控制模型，在力矩转速双闭环的基础上使系统具有较好的动态性能，能够较好的跟踪系统的设定。在第三章里分析的恒张力闭环控制系统的基础上，设计 PI 控制器，构建了基于矢量控制的电机恒力矩控制结构框架和仿真模型，以实现模型仿真验证

# 第 5 章 锚链的恒张力控制系统的仿真分析

## 5.1 控制系统的计算机仿真实现

为了对一定海洋扰动作用下的处于锚泊状态下的双锚泊船的锚链张力进行有效的控制，本文以实船模型为例进行仿真分析。在第二章中建立的模型基础上，利用 MATLAB 工具对船舶运动微分方程进行数值求解以得到船的运动姿态以及相应的锚链的实时张力值。并在 SIMULINK 里利用其现有模块对锚机电机控制系统进行建模和仿真控制的研究，以实现该锚泊船的锚链的恒张力控制，根据仿真结果来分析控制效果。

锚泊系统是非线性的复杂系统，具有多输入多输出的特点。对锚泊船锚链的恒张力控制的仿真主要是包括：由参量  $u$ 、 $v$ 、 $r$ 、 $\varphi$ 、 $x_G$ 、 $y_G$  以及两个锚链的张力大小  $F_{h1}$ 、 $F_{h2}$  组成的微分方程的求解与仿真<sup>[51]</sup>；锚机电动系统恒力矩控制的仿真。需要设计好仿真计算程序和仿真模型，该 M 文件及模型需要实现以下作用：

(1) 对仿真计算所用的船舶参数、锚链参数、流速等扰动的大小和方向等数值的输入及其初始化，主要包括船长、船宽、吃水深度、船舶方形系数、排水体积、锚地水深、锚重及出链长度以及锚地水深等一些基本数据。

(2) 对锚泊船所受的流体动力及外载荷力和力矩的求解、锚链张力和力矩的求解；对锚泊船运动微分方程的求解以得到锚泊船的各项姿态和锚链的实时张力值；对锚泊船的运动姿态特性及锚链张力变化情况进行数据存储及仿真绘图。

(3) 对大功率锚机电机变频调速系统进行建模，实现转速与磁链的解耦控制，达到异步电机的无级调速的目的<sup>[52]</sup>。还包括张力控制器的算法实现，该控制器能根据锚链张力的实际值，不断给出电机调速系统的控制信号，以实现恒力矩控制。

### 5.1.1 仿真模型及参数

#### (1) 仿真船舶的基本参数

船长 $L=130\text{m}$	船舶方形系数 $C_b=0.6938$
船宽 $B=17\text{m}$	两柱间长 $L_{pp}=120\text{m}$
船舶排水量 $V_p=11581\text{t}$	船舶平均吃水深 $8\text{m}$
首吃水深 $8\text{m}$	尾吃水深 $8\text{m}$
吃水差 $0\text{m}$	排水量 $11586\text{t}$
横向受风面积 $1031.94\text{ m}^2$	纵向受风面积 $369.9\text{ m}^2$
锚地水深 $20\text{m}$	首尾锚链的出链长度均为 $200\text{m}$
单位锚链重量 $w=75\text{kg/m}$	
设海水密度为 $1020\text{ kg / m}^3$	

## (2) 仿真初始状态

初始纵向速度:  $u_0 = -0.00001m/s$

初始横向速度:  $v_0 = -0.00001m/s$

初始艏摇角速度:  $r_0 = 0rad/s$

初始艏向角:  $\varphi_0 = -180/\pi = -57.2985^\circ$

初始 X 方向位移:  $x_{G0} = -250m$

初始 Y 方向位移:  $y_{G0} = 0m$

## (3) 锚机异步电机基本参数

其中, 电机参数如表 5.1 所示; 电源: 50Hz, 2.3~6.6kw

表 5.1 电机仿真数据

$L_r$	0.4475 mH	$n_r$	995 r/min
$R_r$	0.00509 $\Omega$	$U_{ab}$	4160 V
$R_s$	0.004446 $\Omega$	$P_N$	1080 kw
$L_m$	0.20335 mH	$f_N$	50 Hz
$J$	$82.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$M_e$	10365 N·m

## (4) 仿真模型

SIMULINK 提供了交互式的动态系统建模和仿真的图形环境, 可以针对控制系统进行系统的建模及分析等工作。为了进行锚机控制系统的仿真, 在 MATLAB 中利用 M 文件建立船舶运行的 S 函数模型, 在 SIMULINK 中实现船舶姿态及锚链张力的实时仿真。利用现有的仿真模块搭建张力控制及电机矢量控制系统模型, 再结合锚泊船的数学模型来构成整体的锚链恒张力控制仿真模型。仿真模型文件如图 5.2, 5.3, 5.4 所示:

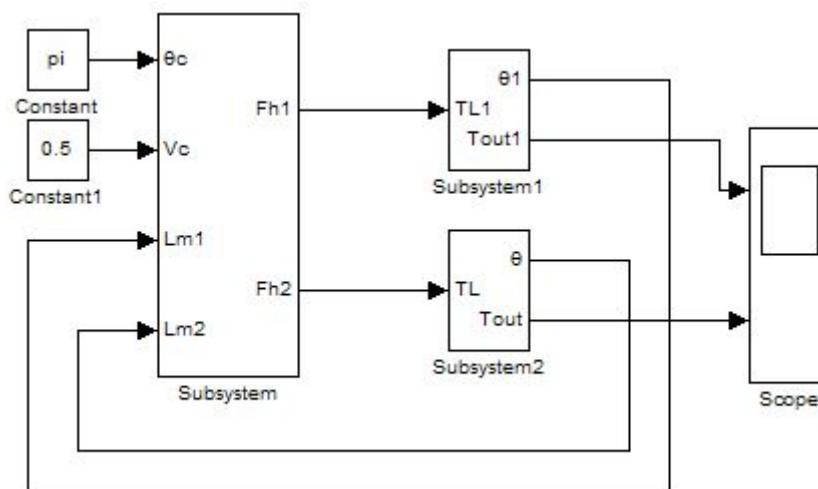


图 5.2 恒张力锚泊系统仿真模型

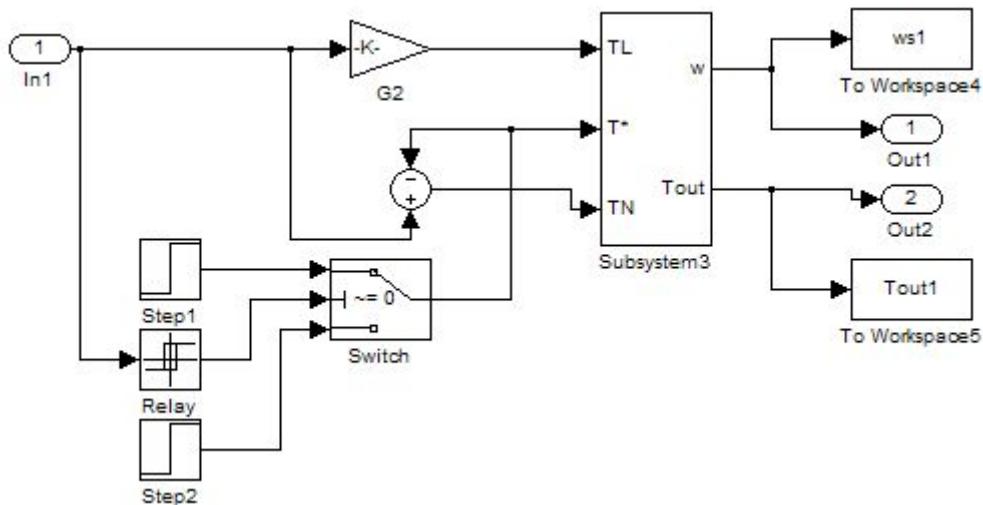


图 5.3 锚机恒力矩控制仿真系统模型

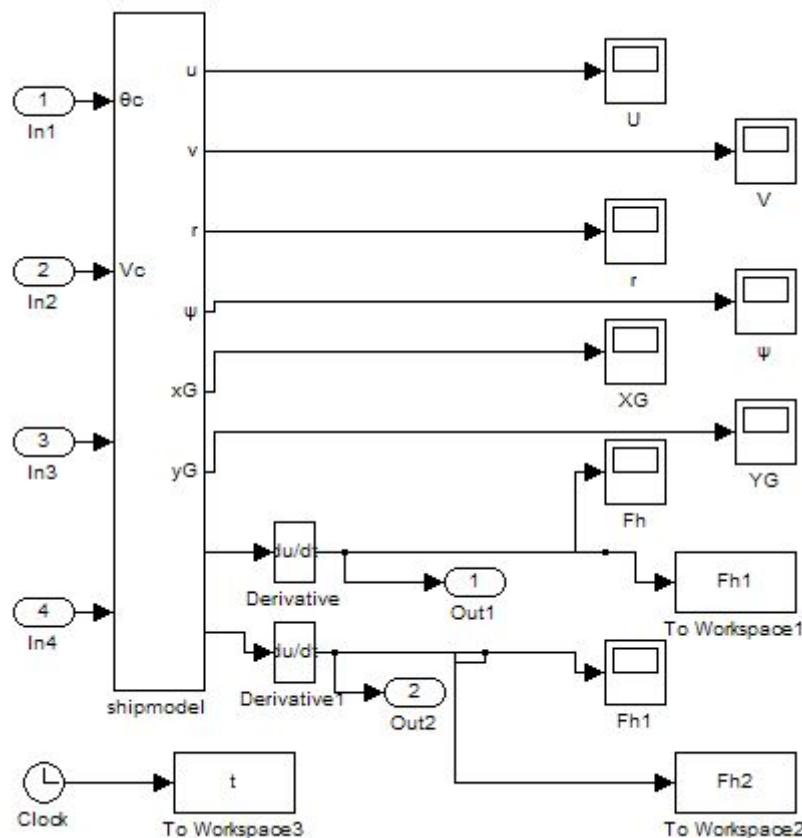


图 5.4 双锚泊船运动仿真模型

## 5.2 锚泊船运动特性及锚链张力特性仿真分析

上一章中已经建立了锚机动力系统三相异步电机的数学模型及仿真模型，通过矢量控制可以实现异步电机的无级调速。设计张力控制器，对绞盘张力构成闭环控制。

本节主要研究双锚泊船舶在锚泊状态下受不同海洋扰动下的运动特性及锚链张力的变化情况。根据仿真结果分析外部环境变化和改变锚链的出链长度对锚泊船及锚链的张力的影响。

### 5.2.1 扰动作用下锚泊船运动特性仿真

#### (1) 锚泊船运动特性仿真研究

在上一节所建立的模型的基础上，设置相应的仿真初始状态和系统里电机和锚泊船及锚链等的基本参数。根据不同工况情况下外载荷变化情况来做锚泊船的和锚链的特性研究。设定海况条件为：流速  $V_c = 0.5 \text{ m/s}$ ，流向角  $\theta_c = \pi$ ；风速  $V_w = 0.3 \text{ m/s}$ ，顶风方向下。得到双锚泊船运动特性仿真曲线如图 5.5：

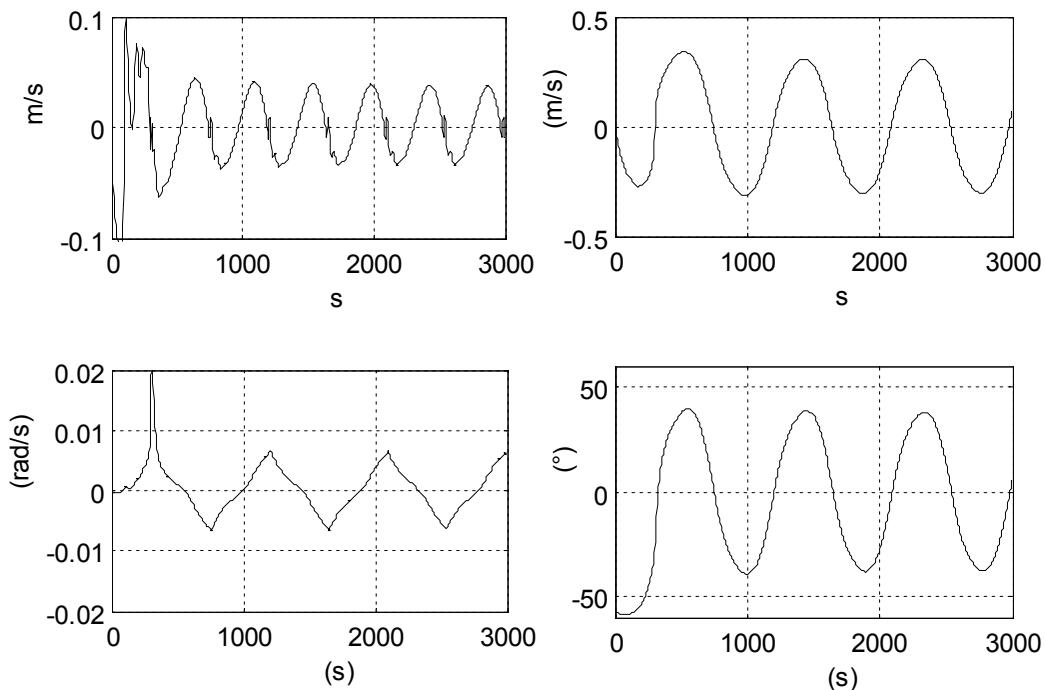


图 5.5 双锚泊船运动特性仿真曲线

双锚泊船重心运动轨迹仿真曲线如图 5.6 所示：

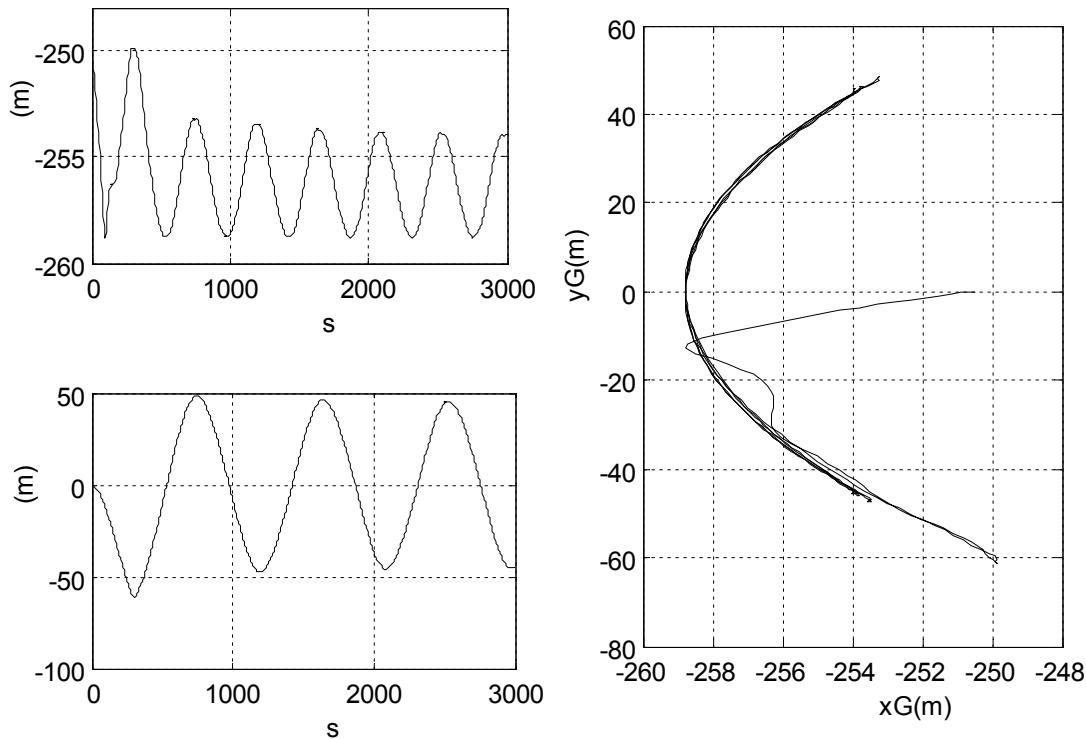


图 5.6 双锚泊船重心运动轨迹仿真曲线

由上述仿真结果表明：在海流作用下，双锚锚泊船的重心运动轨迹呈 $\infty$ 型，即在水平面内做周期性的偏荡运动，在纵向的海风、流扰动力作用下，纵向运动的变化幅度明显大于横向运动幅度。

其他仿真状态和计算条件不变，分别取不同流速条件下，仿真得到双锚锚泊船的运动特性如表 5.2 所示：

表 5.2 不同流速下双锚泊船偏荡运动特性统计表

流向角 $\theta_c$	流速 $V_c(m/s)$	纵荡速度 $u(m/s)$	横荡速度 $v(m/s)$	艏摇角速度 $r(rad/s)$	横荡位移 $x_G(m)$	纵荡位移 $y_G(m)$	周期
$\pi$	0.5	-0.037~ +0.045	-0.31~ +0.34	-0.0065~ +0.0065	-259~ -253	-47~ +48	450
$\pi$	0.8	-0.1~ +0.14	-0.65~ +0.65	-0.07~ +0.07	-259~ -250	-62~ +62	490s
$5\pi/6$	0.8	-0.1~ +0.15	-0.6~ +0.65	-0.08~ +0.02	-259~ -250	-61~ +62	500s

根据表 5.2 仿真得到的结果可以看到：在流向角不变的情况下，如果流速变大，纵荡、横荡、艏摇角速度均增大，偏荡运动周期略有增加；当流速不变，来流角度改变时，这三个自由度的运动速度基本不变，但艏摇角度增大。本文仿真结果基本与文献中的研

究结果一致。

### (2) 锚链张力特性仿真分析

仍然在海况条件为：流速 $V_c=0.5\text{ m/s}$ ，流向角 $\theta_c=\pi$ ；风速 $V_w=0.3\text{ m/s}$ ，顶风方向下。研究锚链张力的变化情况，仿真结果如图 5.7 所示：

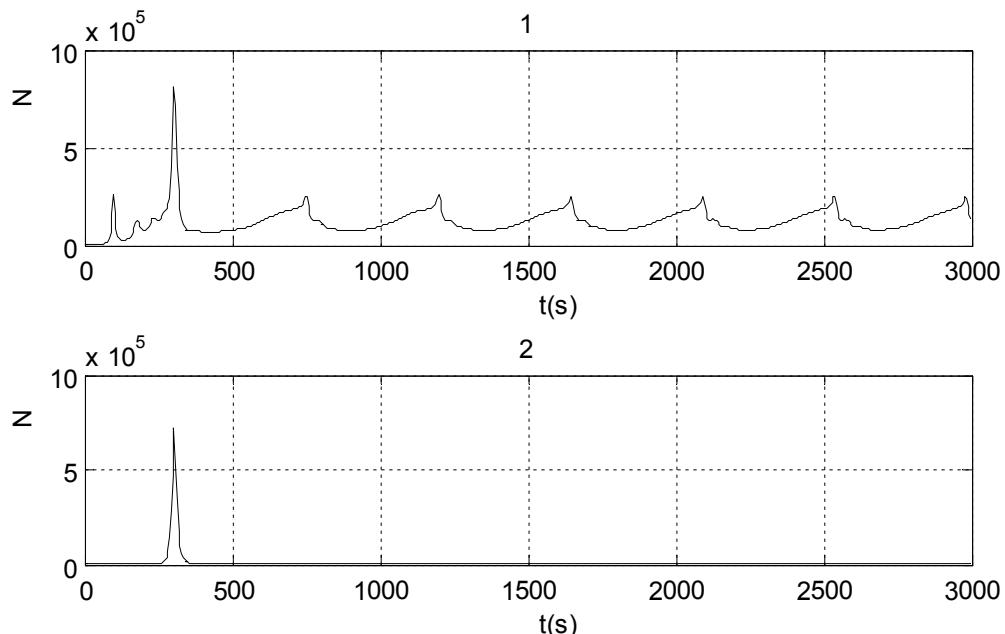


图 5.7 双锚泊船两锚链张力变化时间历程

由仿真结果可以看出，在顶流作用下，船艏处锚链的受力较大，其张力在较大范围内做周期性震荡。船尾处锚链受力相对较小，在小范围内做周期性震荡。张力有较大的脉冲值。

流向角不变，增大流速为 $0.8\text{ m/s}$ ，仿真得到锚链的张力变化情况如图 5.8 所示：

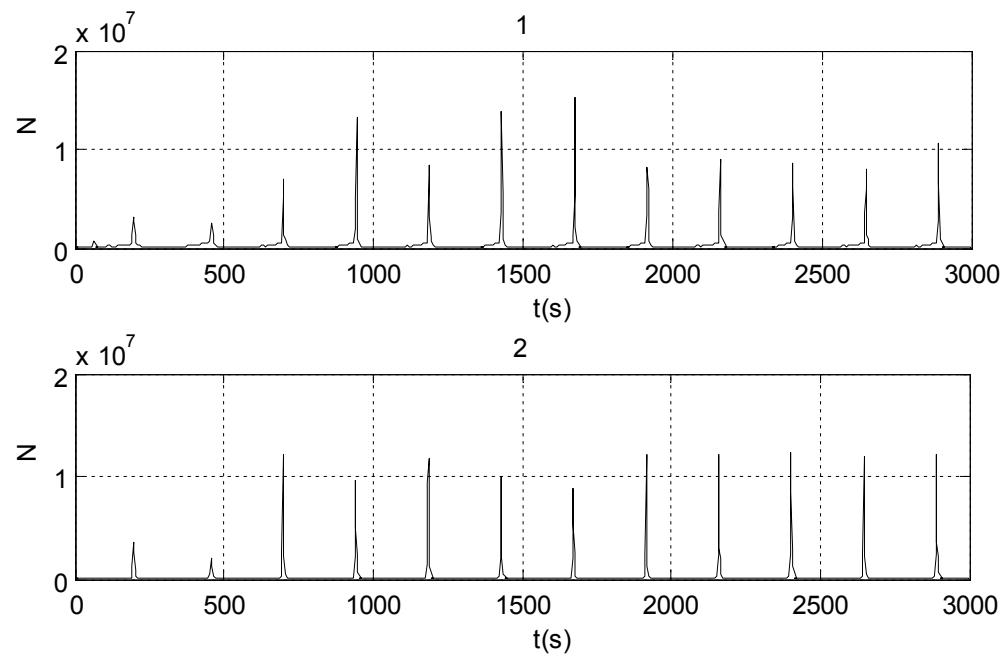


图 5.8 双锚泊船两锚链张力变化时间历程

流向角不变增大流速时，锚泊船的偏荡运动加剧，锚链的张力值也增大，首尾两个锚链的张力均在较大范围内做周期性变化。

流速不变仍为  $0.8 \text{ m/s}$ ，改变流向角为  $5\pi/6$  时得到锚链张力变化情况如图 5.9 所示：

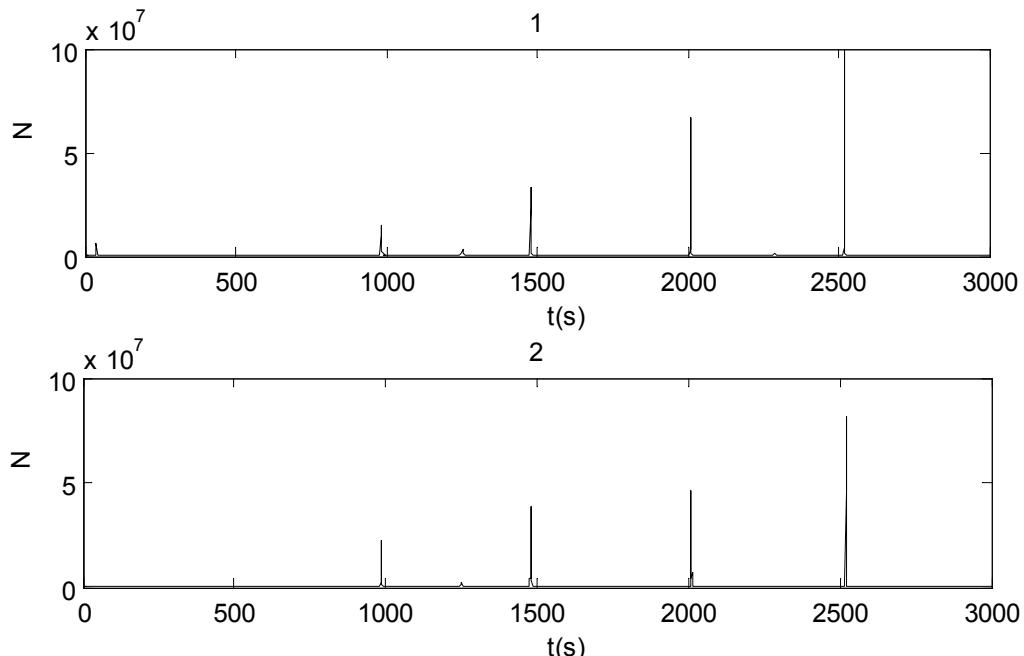


图 5.9 锚链张力的时间历程

由上述仿真结果可以看出，在船的艏向与流向一致时，锚链的张力脉冲值较大，在船的艏向与流向相反对时，锚链的张力较小。此时的锚链张力波动范围更大。

由于大惯性负载的作用，锚链在海流扰动作用下会有大幅的震荡和波动，稳定性较差，容易引发安全事故。由上述仿真结果得到，扰动作用增强时，锚泊船的偏荡运动程度加剧，锚链的张力也随之增大并做周期性变化。

### 5.2.2 改变链长对锚泊船运动特性及锚链张力的影响

锚泊船在外力的作用下做周期性偏荡运动，导致作用在锚链上的力也会呈现周期性变化，上面的仿真结果也证实了这种运动特性的存在。通过调节出链长度，必定会导致锚泊船的运动特性和锚链张力改变。其他仿真条件不变，在系泊过程中只改变两个锚链的出链长度进行仿真，仿真得到下列结果：

其中，设流速为  $0.5 \text{ m/s}$ 。

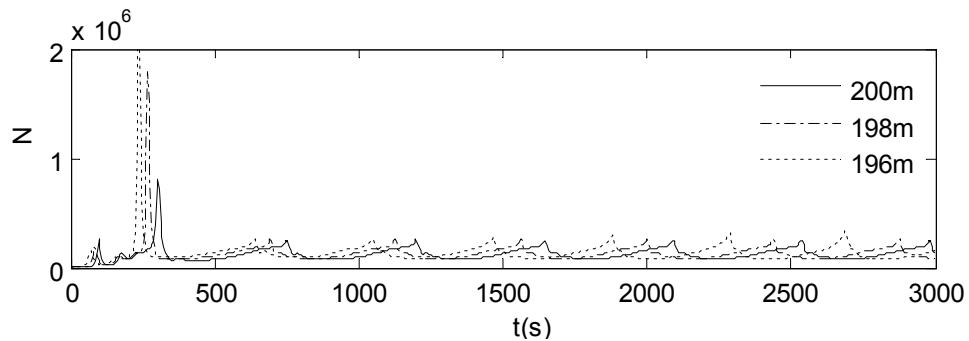


图 5.10a 改变链长后锚链 1 张力变化曲线

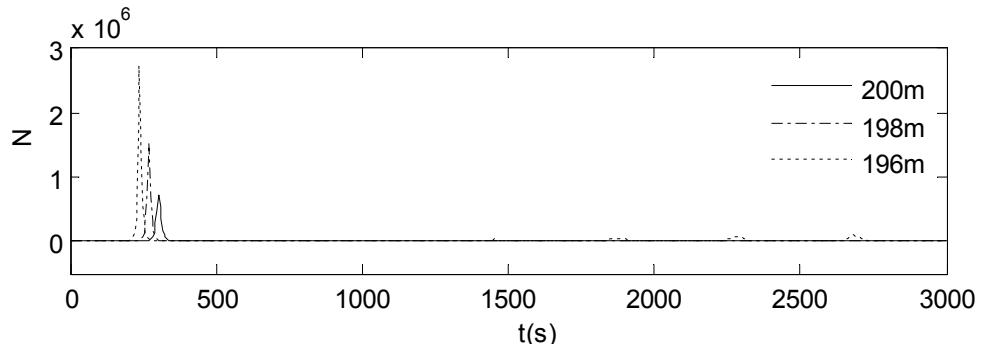


图 5.10b 改变链长后锚链 2 张力变化曲线

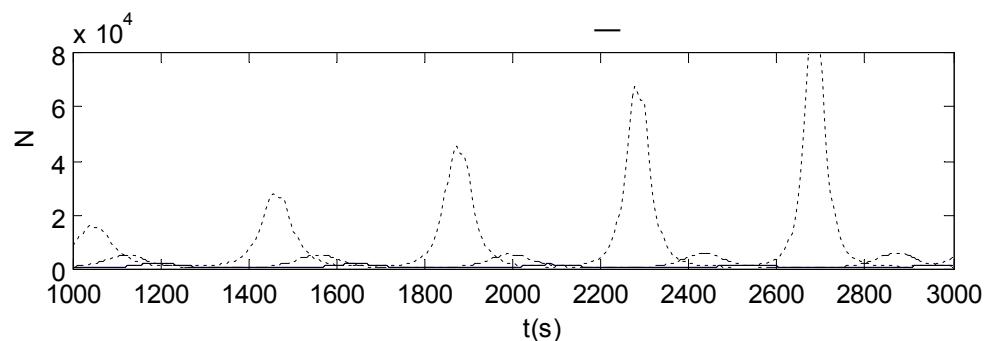


图 5.10c 改变链长后锚链 2 张力变化\_局部放大图

上海船舶设计研究院的徐道申<sup>[53]</sup>表述：根据实际的经验总结，在系泊链缆自动收放为实际长度的 1% 时，便可以达到所要调整的张力目标。绞车大约运行十秒左右的时间便可。由仿真结果也可以发现，在锚链的出链长度改变很小的情况下，对锚链张力的影响是很大的。锚链张力随着锚链出链长度的增大，其最大冲击张力有所减小，但是会在一定程度上增大锚泊船的偏荡周期，即在一定程度上削弱了锚泊船运动的剧烈程度。由仿真结果看来，这种情况在船尾处的锚链影响较明显。同样的，与前面仿真结果一致，在顶流作用下，船艏处的锚链的张力明显大于船尾处的锚链张力。

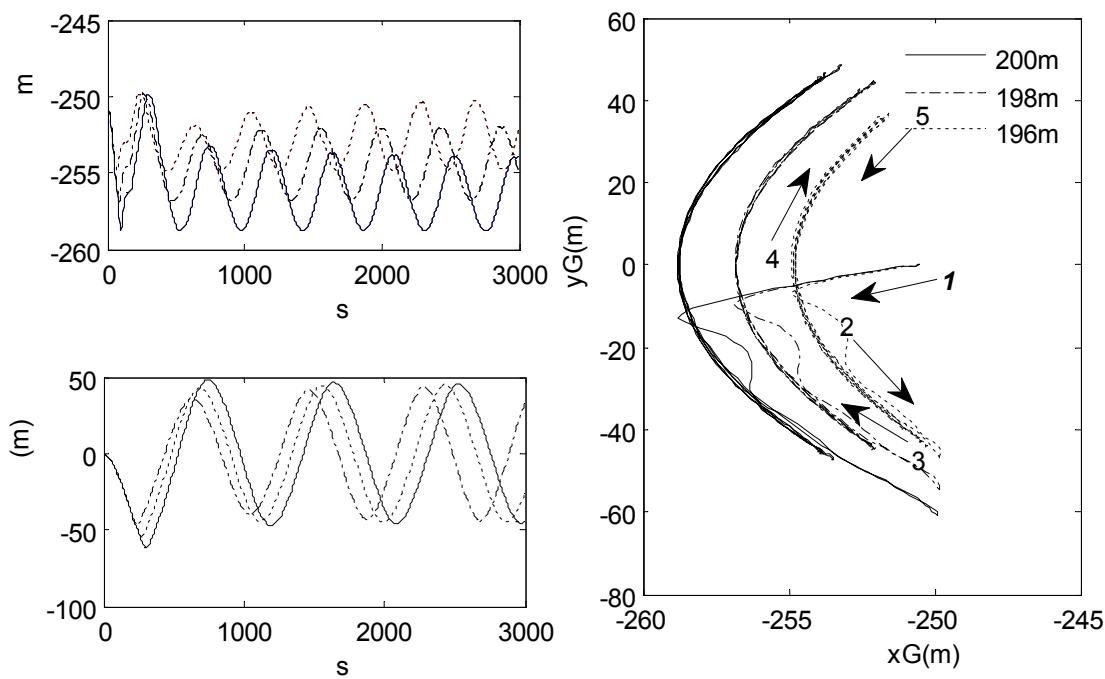


图 5.11 改变链长后船舶重心运动变化曲线

船舶的重心运动轨迹按照图 5.11 中箭头指向所示,从 1 到 5 为其所走路线的先后顺序,按这样的路径做周期的摆动运动。由仿真结果可以看到增加锚链的长度,锚泊船的摆动幅度有所增加,船的摆动周期也变大。不同链长下锚泊船的运动姿态的变化情况如图 5.12 所示:

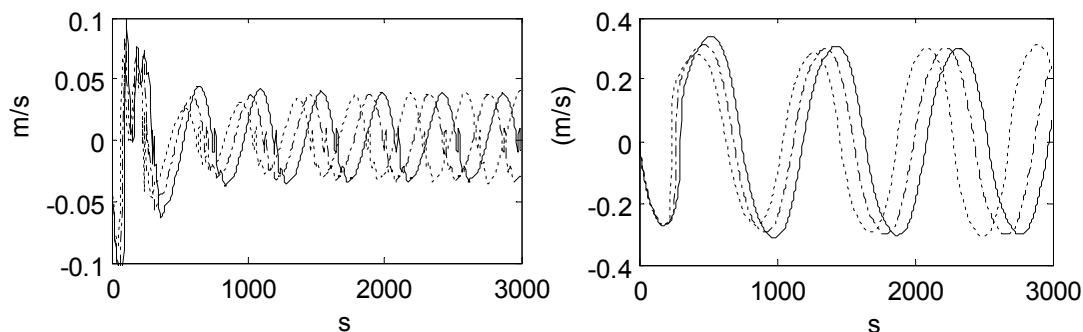


图 5.12a 改变链长后锚泊船运动特性变化曲

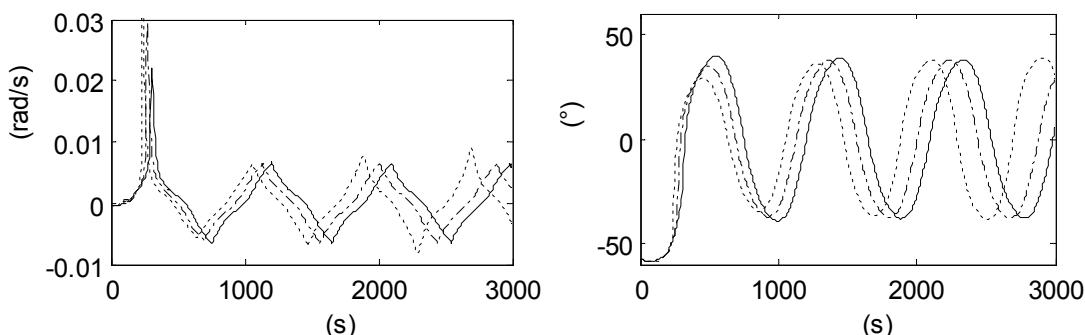


图 5.12b 改变链长后锚泊船运动特性变化曲线

船的最大转艏角也随抛出锚链的长度增加而稍有增大，研究表明最大转艏角度也是影响锚链张力的一个重要因素。综上可以知道：在流速一定时，若锚链长度增大，则最大转艏角增大，偏荡周期增大而锚链张力有所减小；在出链长度一定时，若流速增大，则最大转艏角增大，偏荡周期减小而锚链张力增大；可见锚链张力是受出链长度、船舶运动状态、外界扰动力作用共同影响的，但是改变链长对锚泊船运动的影响要根据实际而具体分析。

### 5.3 锚机恒张力控制仿真分析

#### 5.3.1 大功率电机变频调速仿真

选定电机参数后对电机的调速特性进行仿真分析。仿真结果如图 5.13 所示：

(1) 直接带载调速

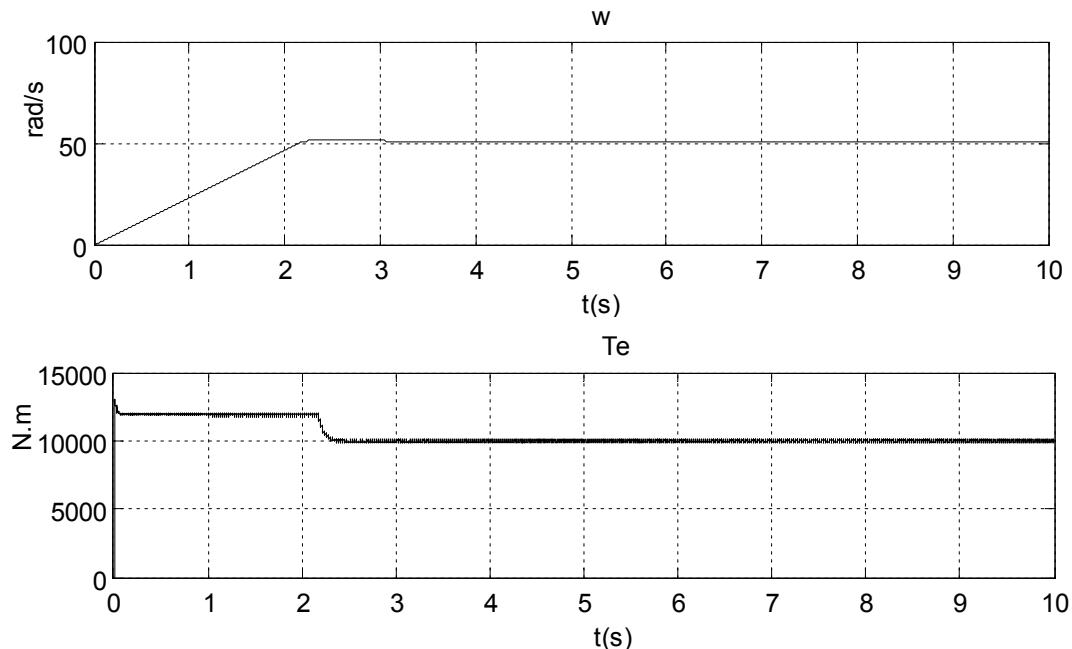


图 5.13 直接带负载启动调速仿真曲线

在图 5.13 所示的电机转速恒定直接带负载启动时的仿真曲线中，转速的给定值为  $\omega_r = 50 \text{ rad/s}$ ，所加负载为  $T_L = 10000 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。由仿真结果可知，定子电流最大值可以达到  $5160 \text{ A}$ ，电磁转矩  $T_e$  最大值大约达到  $12000 \text{ N}\cdot\text{m}$ ，约  $2.3 \text{ s}$  左右时  $\omega_r$  基本能稳定在设定值  $50 \text{ rad/s}$ ，这时的定子电流基本稳定在  $5000 \text{ A}$ ， $T_e$  降为  $10000 \text{ N}\cdot\text{m}$  满足电机运动平衡关系。

(2) 空载启动带载调速

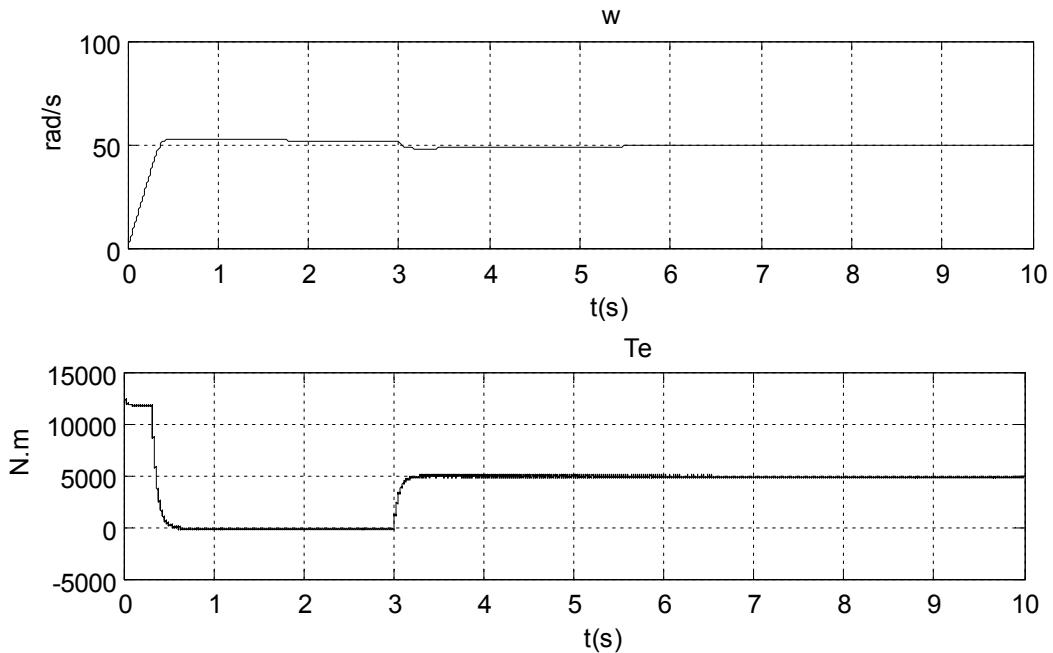


图 5.14 电机空载启动带载调速仿真曲线

电机空载启动，在 $T=3\text{ s}$ 时，加入负载 $T_L=5000\text{ N}\cdot\text{m}$ ，转速给定值为 $\omega_r=50\text{ rad/s}$ 。由图 5.14 可以看出，在刚开始空载启动时，定子电流的最大值可达到 5160 A，电磁转矩约为 12000 N·m。在 0.4s 左右后， $\omega_r$  基本与给定值 50 rad/s 相等，此时定子电流已降为稳定值 5000A， $T_e$  降为 0 N·m。当 3s 时加入负载 $T_L=5000\text{ N}\cdot\text{m}$ 后，转速有微小的下降，在 0.3s 左右时又稳定在设定值 50 rad/s 处。此时电机的电磁转矩 $T_e$  稳定在 5000 N·m，与 $T_L$  相等。

由图 5.13、5.14 仿真结果分析可见，本模型中的基于矢量控制的大功率的锚机电机的双闭环矢量控制系统具有良好的调速特性，在动态过程中可以保持磁通恒定，转速转矩特性也较好，能实现带载或空载情况下的无级调速。

### 5.3.2 电机恒转矩调速控制仿真分析

在基于矢量控制的变频调速模型的基础上搭建大功率电机的恒力矩控制仿真模型，任意设定制矩参考值来研究系统的控制性能，通过调节 PI 调节器的比例、积分系数，来实现大功率电机的恒转矩控制。

(1) 设力矩为 10000 N·m 为控制目标，在外界扰动为 0；负载力矩为 10000 N·m 时，系统的仿真结果如图 5.15 所示。仿真时间为 50 s。

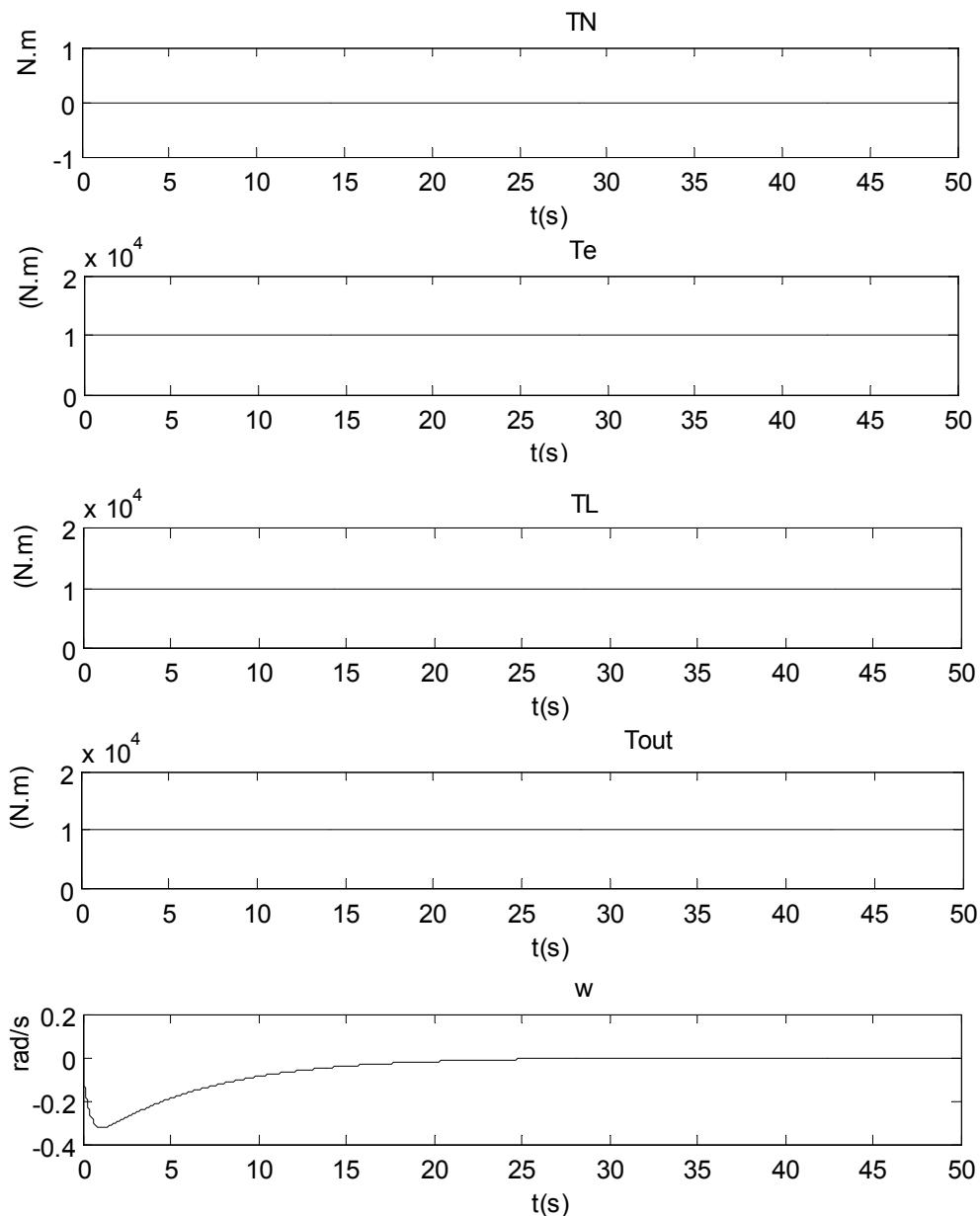


图 5.15 无扰动情况下电机恒力矩控制仿真

由图 5.15 可见，在扰动为 0 时，未加扰动力矩前，最终的电机轴上输出力矩  $T_{out}$  能很好地跟踪设定转矩，误差  $e$  稳定为零。我们期望电机输出的电磁转矩能基本与负载转矩输入相等，而转速能够经过一定的调节过程后最终稳定在 0，仿真结果符合理论分析。

(2) 用幅值为 1000 的正弦信号来模拟外界扰动，其他仿真条件不变，得到控制系统的仿真结果如图 5.16 所示：

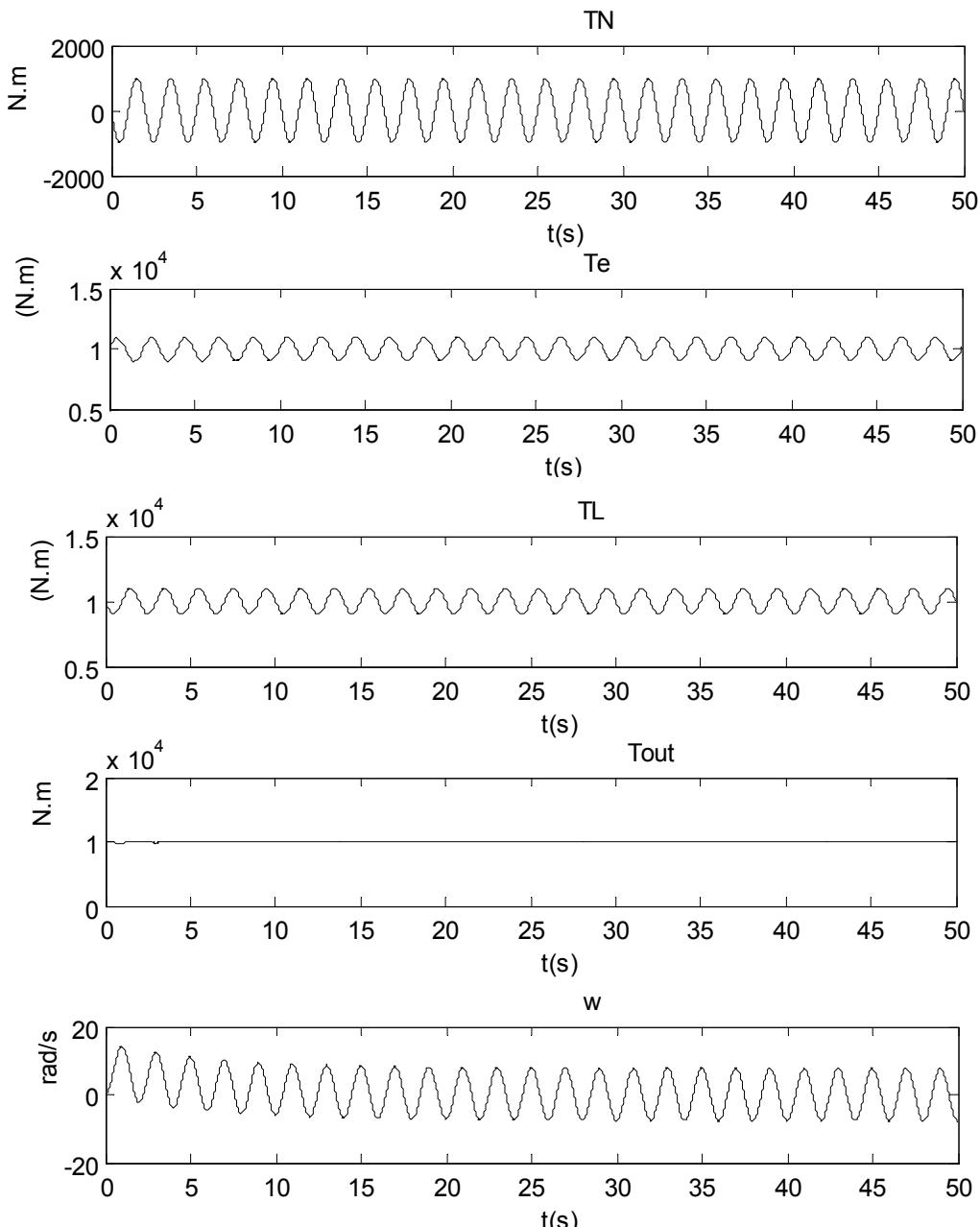


图 5.16 加入正弦扰动后的电机恒力矩控制仿真

图 5.16 中的曲线为正弦波扰动作用下的控制仿真结果，设定正弦波周期为 2 s，幅值变化为-1000~1000 N·m，来模拟锚机电机轴上受到的扰动力矩。异步电动机输出的电磁转矩  $T_e$  为抵消外界扰动对负载的影响，根据控制器的控制作用，不断地进行调速。使其输出的电磁转矩也在 9000-1100 N·m 之间呈上下波动的状态以补偿扰动力矩，达到电机的恒定力矩的控制效果，使  $T_{out}$  能很好地跟踪设定转矩，误差  $e$  基本为零。

### 5.3.3 海洋扰动作用下锚链张力控制仿真分析

本节分别研究在不同海洋扰动作用下锚链恒张力的控制效果。

(1) 定常扰动下锚链恒张力控制仿真：

其他仿真条件不变，在流速 $V_c=0.3\text{ m/s}$ ， $\theta_c=\pi$ ；风速 $V_w=0.3\text{ m/s}$ ，顶风顶流方向下。仿真得到锚链在张力控制作用前后两个锚链张力变化对比情况如图 5.18 所示：

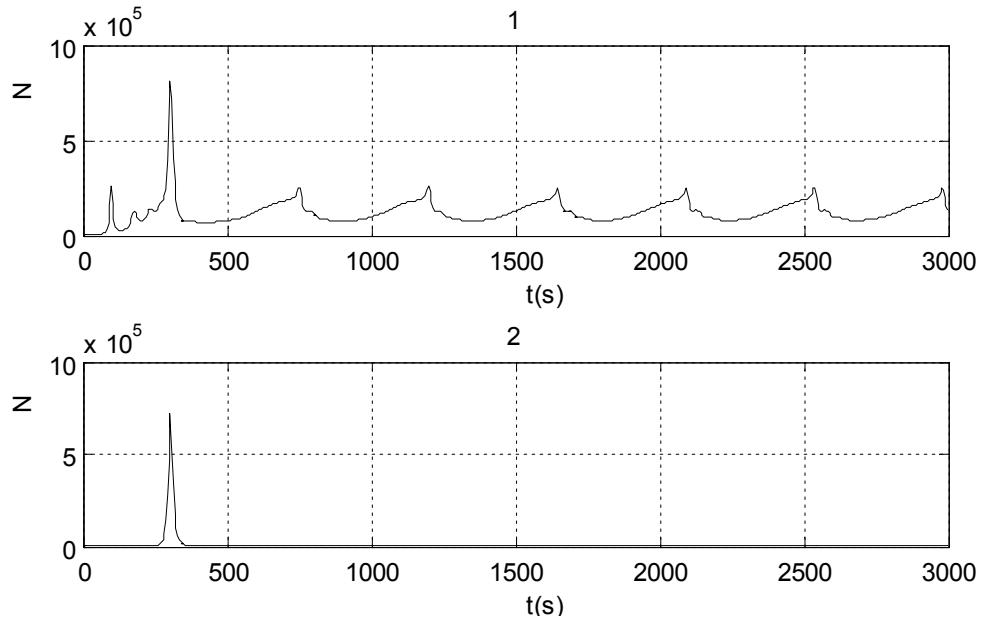


图 5.17 控制前锚链张力变化历时曲线

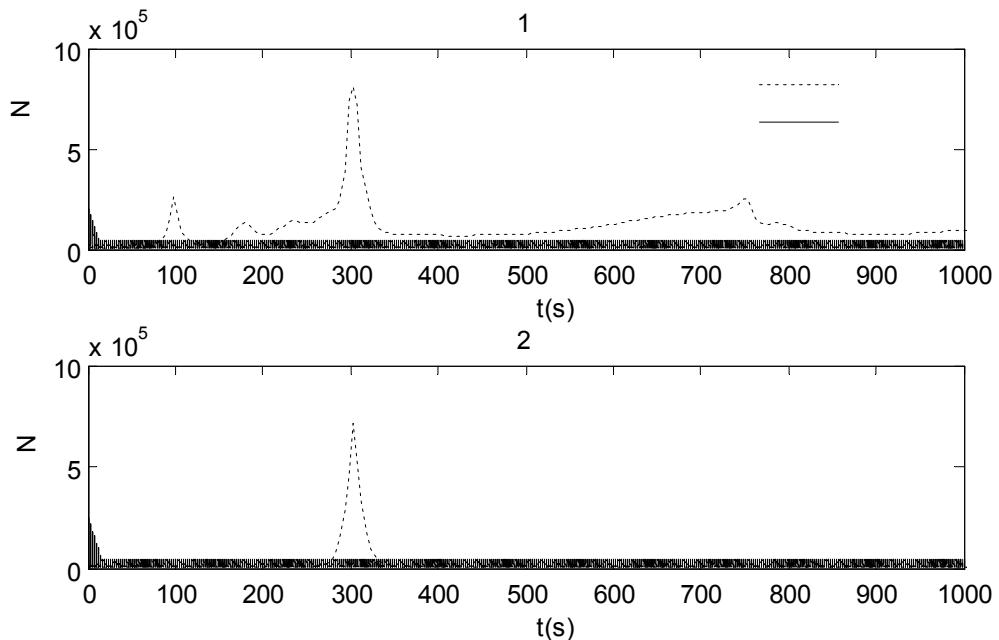
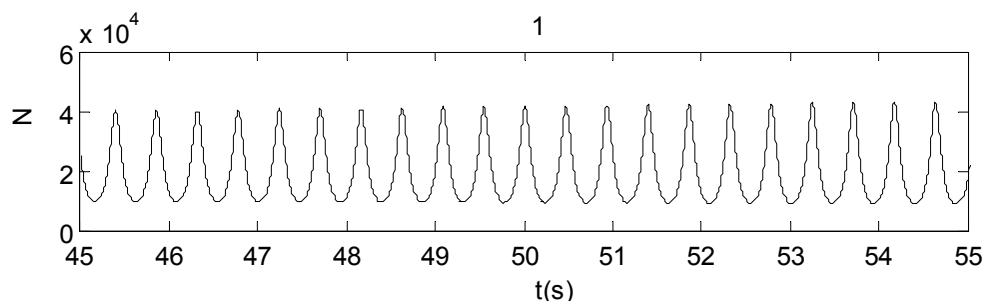


图 5.18 控制前后锚链张力变化对比历时曲线



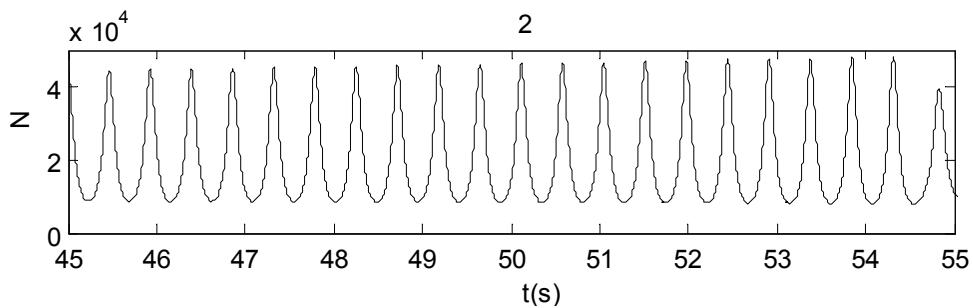


图 5.19 控制后锚链张力变化时间历程局部放大

由图 5.17 分析可知，在恒张力控制之前，由于流向角取为  $\theta_c = \pi$  即锚泊船在顶流作用下，船艏处的锚链 1 的张力在 100000~250000 N 较大范围内呈周期性变化，船尾处的锚链 2 的张力在 1000~3000 N 范围内呈周期性变化，受力较小，符合实际情况。由图 5.18、5.19 可见，在恒张力控制之后，两个锚链的张力均在 10000~40000 N 范围内，有效的减小了锚链的冲击张力值。对于锚机系统来说，由于锚泊船本身的大惯性负载特性，锚链的张力值也就随之在较大值范围变化，锚机电机的正反转又有一定的反应时间，这就导致张力的控制不会那么精准。电机轴上输出力矩如图 5.20 所示：

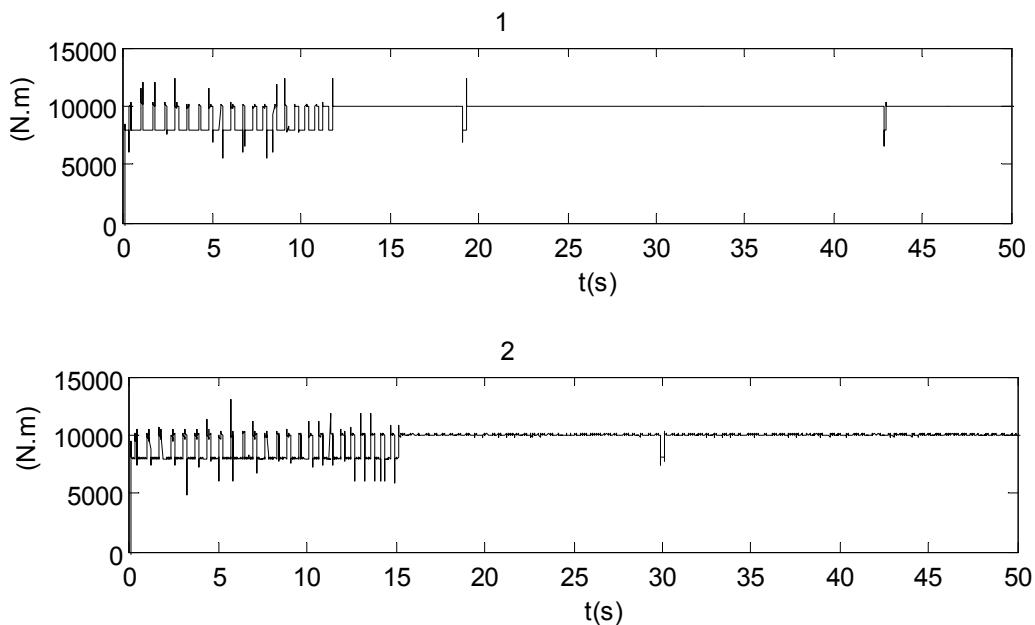


图 5.20 电机 1 和 2 轴上输出力矩变化时间历程

锚机电机根据控制器的控制信号不断的正反转来实现链缆的收放控制，使电机轴上的力矩维持在设定的范围内，完成了电机的恒力矩控制要求。本文在仿真时，力矩设定值为 8000~10000，由仿真结果图 5.20 可以看出，电机 1 和电机 2 的轴上的输出力矩均在设定值范围内。

## (2) 改变设定的力矩参考值时控制效果仿真

其他仿真条件不变，改变锚链恒张力控制的张力设定值，得到仿真结果如图 5.21：

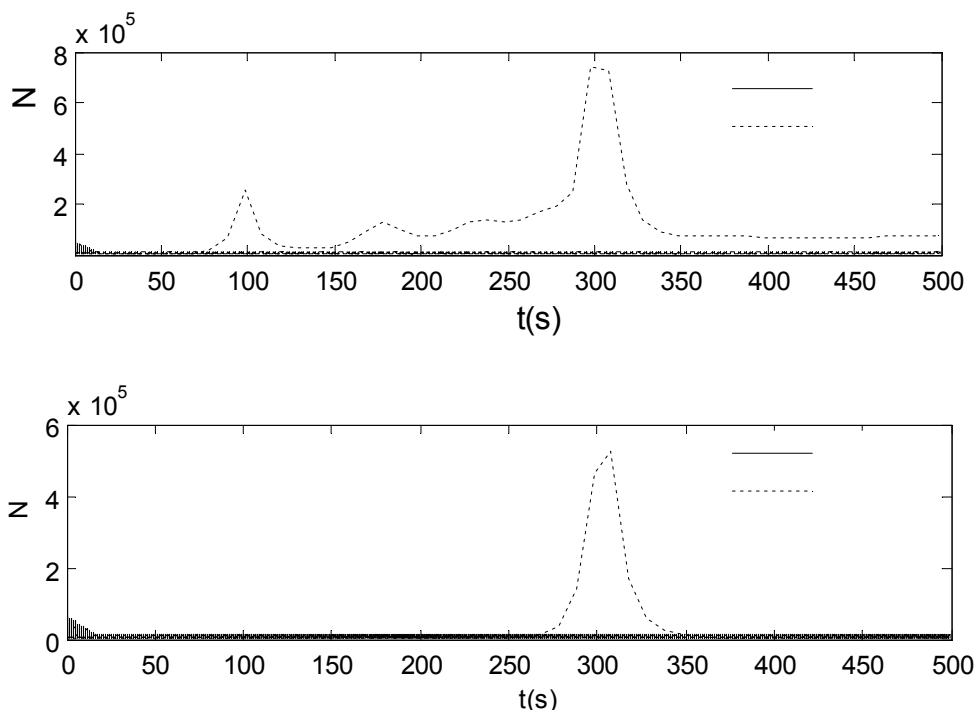


图 5.21 控制前后锚链张力变化对比历时曲线

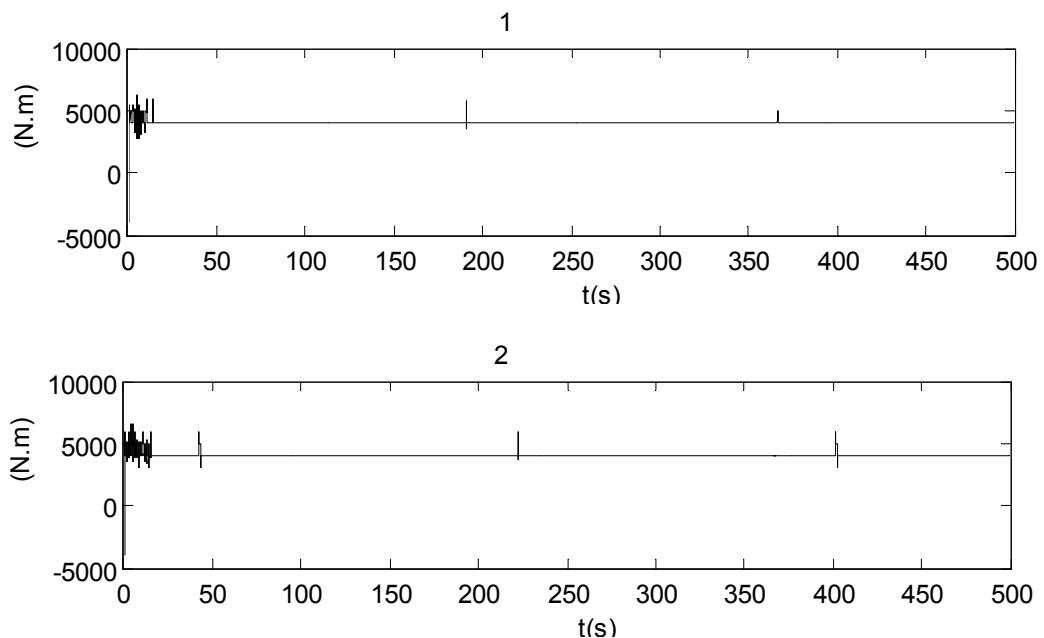


图 5.22 电机 1 和 2 轴上输出力矩变化时间历程

改变电机轴上的设定力矩为 4000~5000 时, 仿真得到电机轴上的输出合力矩能够稳定在设定范围内, 对应的锚链张力也能够稳定在设定范围, 控制效果图如 5.21、5.22 所示。

### (3) 随机扰动作用下恒张力控制仿真

在其他仿真条件不变情况下, 给锚泊船以随机变化的扰动时, 研究其锚链的恒张力

控制效果。所谓随机变化的扰动，本文是在扰动的大小和方向随机变化情况下进行仿真研究，给出控制前后锚链张力仿真结果。取流速 $V_c$ 为 $0.5\text{ m/s}$ ，流向角 $\pi$ 取为大小在 $-\pi \sim \pi$ 之间做周期为 $500\text{ s}$ 变化。仿真得到两锚链的张力变化如图 5.23 所示：

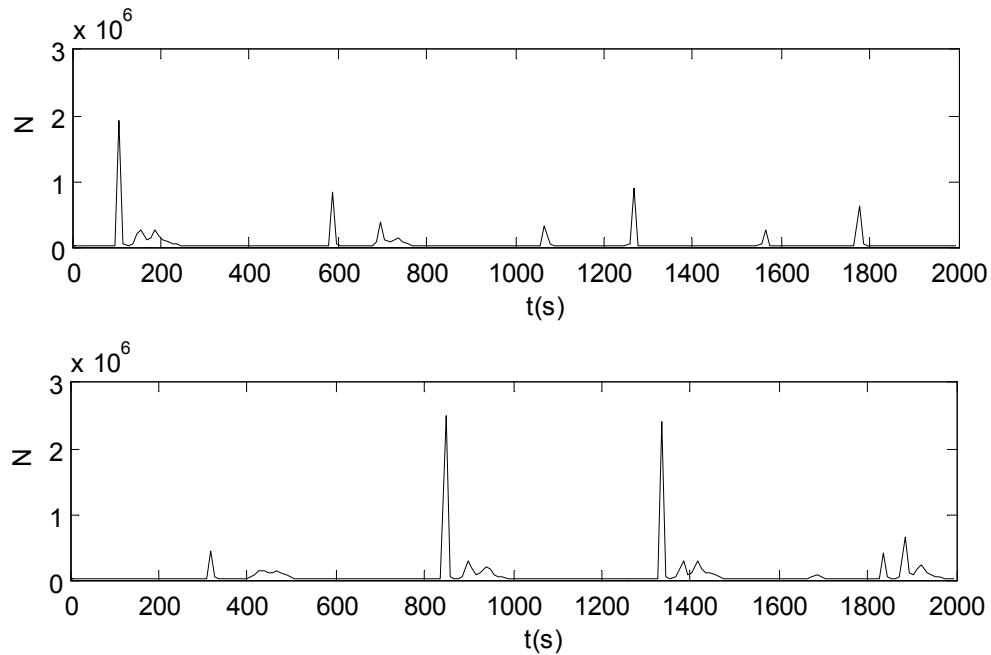


图 5.23 控制前锚链张力变化时间历程

由图 5.23 可见，在流速大小不变的情况下，船尾锚链的张力比在顶流时震荡范围要大，符合实际实际情况。即船艏尾处锚链的张力均在较大范围内做震荡，冲击张力较大。加入恒张力锚机控制后，得到锚链张力变化时间历程如图 5.24 所示：

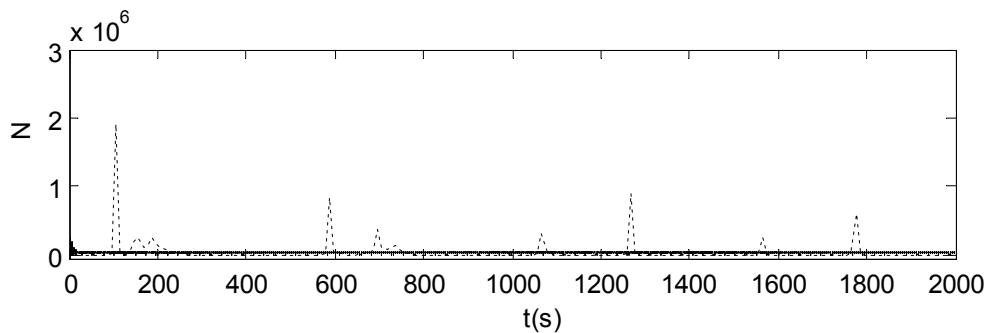


图 5.24a 控制前后船艏锚链张力变化时间历程

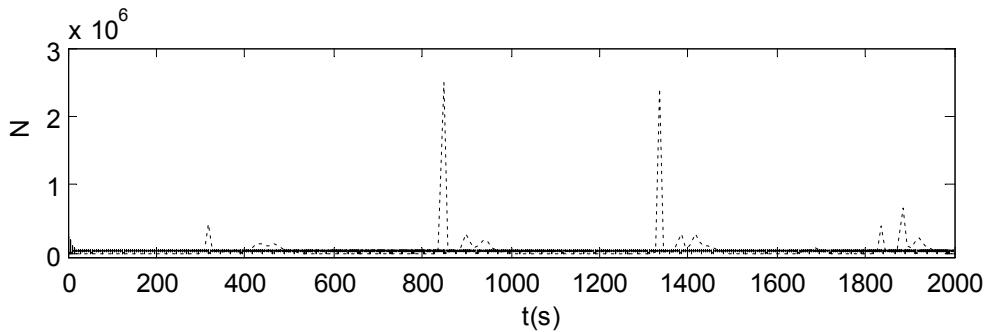


图 5.24b 控制前后船尾锚链张力变化时间历程

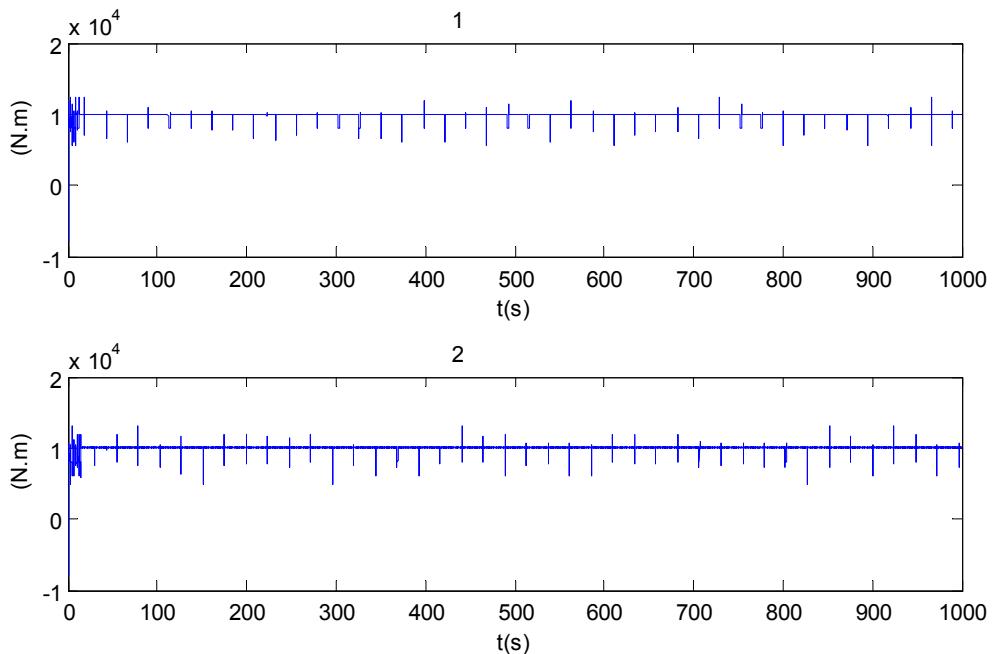


图 5.25 电机轴上力矩变化时间历程

由图 5.24 可见，在这种情况下，加入锚链张力控制系统后，锚链张力基本稳定在设定值范围内。系统能根据扰动的变化实时的做出反应，实现锚链张力的有效控制。

### 5.3.4 锚链恒张力控制对双锚泊船姿态的影响

经过前面的研究我们知道，锚泊船在风流扰动力作用下的运动特性一般呈周期性偏荡。扰动力越大，锚泊船的震荡运动越剧烈，锚链张力就越大。而锚链长度的改变对锚泊船的运动剧烈程度会有一定的削弱作用。

其他仿真条件不变，改变流向角，使其大小在 $-\pi \sim \pi$ 之间做周期性变化。在实现锚链恒张力控制之后，对双锚泊船的姿态的影响的仿真结果如下所示：

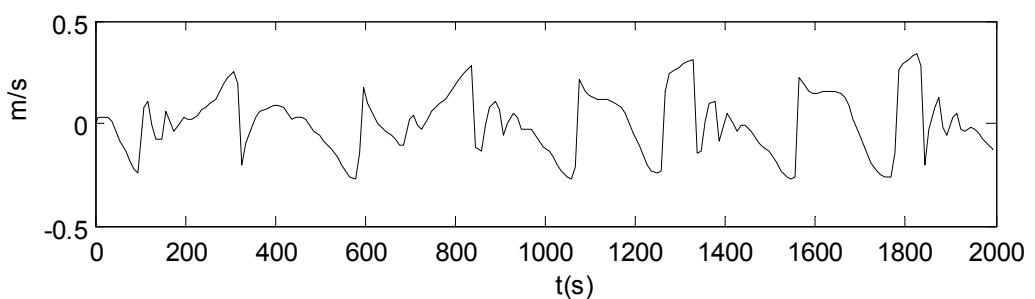


图 5.26a 控制前船舶运动状态变化时间历程

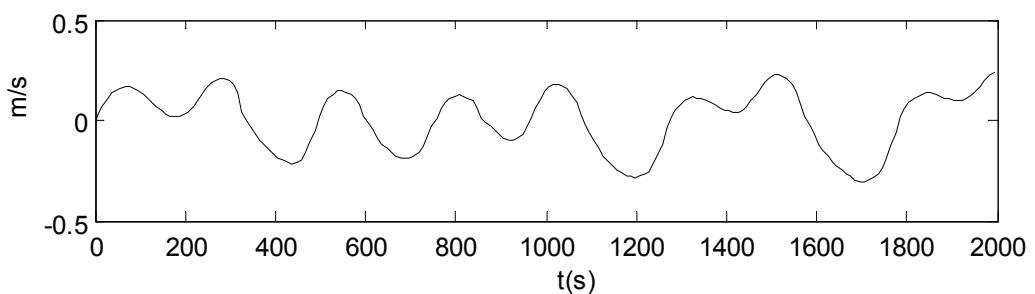


图 5.26b 控制前船舶运动状态变化时间历程

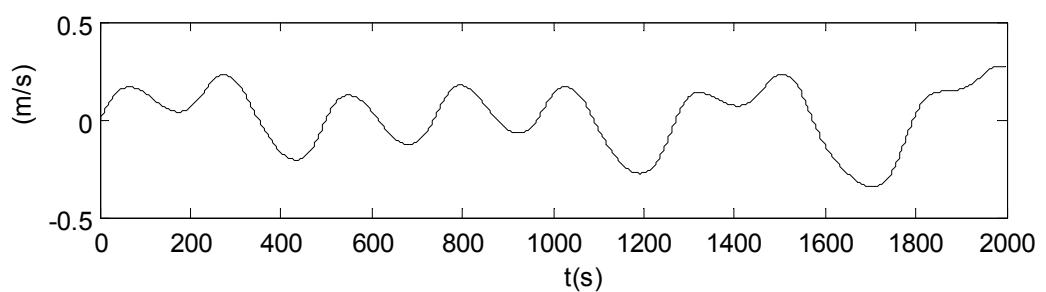
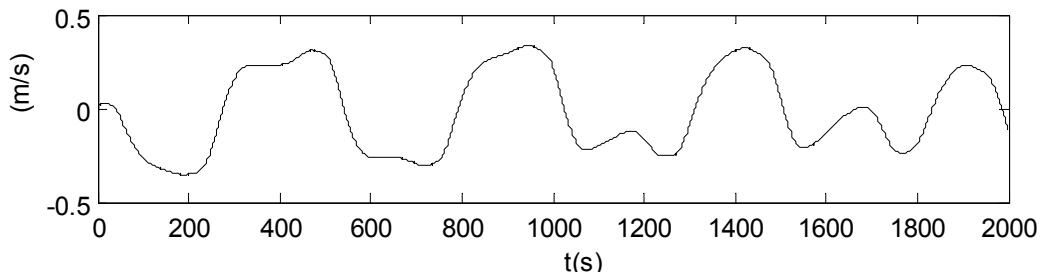


图 5.27 张力控制后船舶运动状态变化时间历程

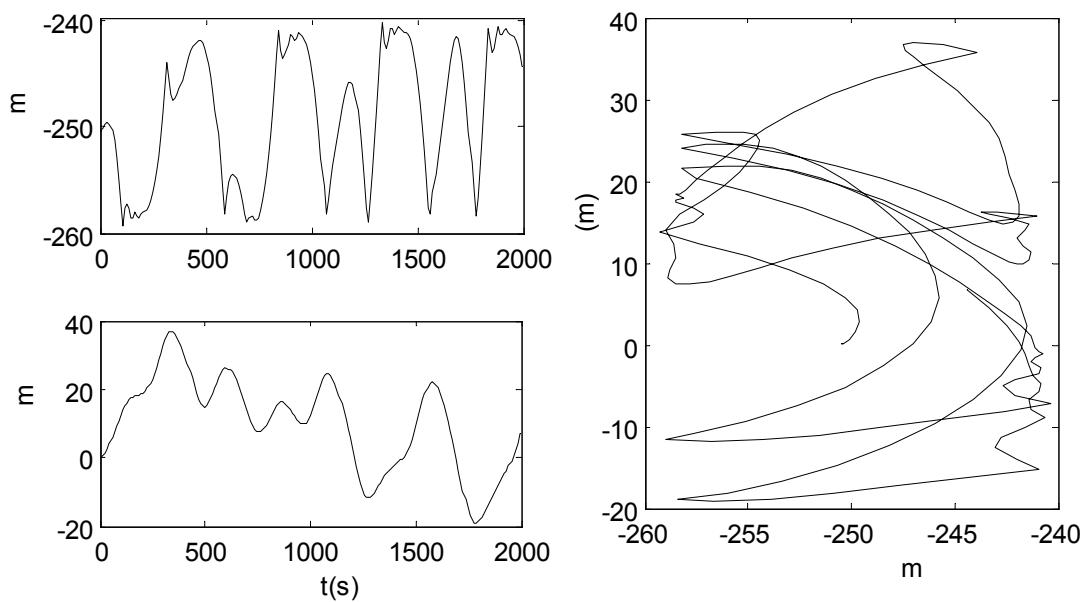


图 5.28 张力控制前船舶运动轨迹变化时间历程

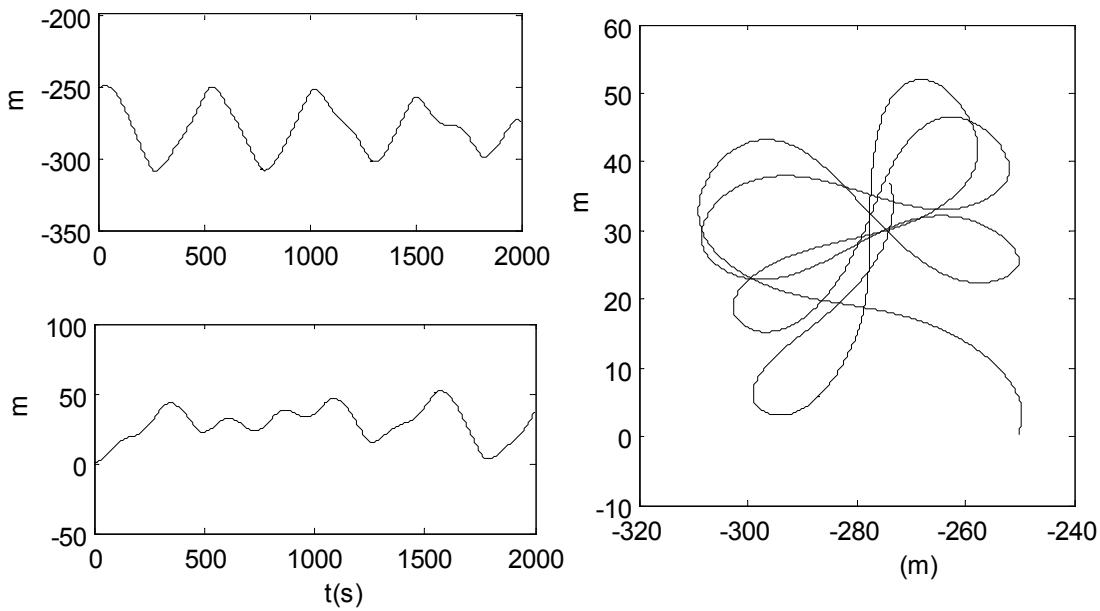


图 5.29 张力控制后船舶运动轨迹变化时间历程

由于仿真所取的流向角是按周期为 500 s，幅值为  $3\pi/4$  的正弦曲线的规律变化，即在一个周期内锚泊船从顶流逐渐变为顺流。由仿真结果来看，锚泊船仍然在一定的规律下做周期性震荡运动。在进行锚链的恒张力控制作用后，纵荡和横荡运动速度大小基本没有太大影响，周期有所增大；而船的横纵荡幅度略有减小。实际上的海洋扰动负载是多变的，在进行锚链张力控制之后对船的姿态的影响，还不能定性的下结论。

## 5.4 本章小结

本章在第二章建立的锚泊船的运动模型的基础上，分析了在不同扰动作用下的双锚锚泊船的运动姿态特性以及锚链张力变化特性，仿真研究改变出链长度后对锚泊船及锚泊过程中锚链张力的影响。在具有较好调速特性的大功率锚机电机的系统下，按照闭环控制原理，仿真研究了锚机电机的恒力矩控制性能，并实现了锚泊过程中锚链的恒张力控制，结果证明本系统能够实现不同海洋扰动作用下的锚链恒张力控制，设定张力值可根据需要任意设定。



## 结 论

海上的扰动作用是复杂多变的，对于海上平台、锚泊船的设备来说维持其稳定性与可靠性是非常重要的。由于风浪流等海洋扰动力的影响，船在锚泊期间锚泊链缆上的张力会发生很大的变化，冲击张力过大的情况下可能会导致海损事故的发生。因此，本文针对锚泊状态下锚泊船由于自然条件的改变而导致的锚链张力出现大幅震荡的情况，进行锚泊船的锚链张力控制的研究。

基于变频技术、计算机技术、控制技术的快速发展，本文选定大功率的三相异步电机驱动的电动锚机来进行变频调速控制的研究。以矢量控制为理论基础实现了锚机的无级调速控制，进而设计恒力矩闭环控制结构，实现电机轴上输出的恒力矩控制。

在分析双锚泊船的运动姿态时，我们发现在定常流作用下，双锚泊船和单点锚泊船运动特性相似，做周期性的偏荡运动，只是偏荡的剧烈程度不一样。由仿真结果可见：

(1) 两个锚链的张力均在较大范围内随船的运动做周期性的震荡；(2) 出链长度不变的情况下，流速越大，锚链张力越大，周期越小；(3) 流速不变时，增加锚链的出链长度，在一定程度上可以减小锚链张力，减弱偏荡运动。

结合锚机变频调速系统，构成了张力闭环-转速闭环的双闭环恒张力控制系统。以张力控制为外环，速度控制在内环，实现不同扰动下的锚链的恒张力控制功能。本文针对该控制系统，以实际船舶参数为例，进行了仿真验证。仿真研究表明，通过变频调速技术在锚机电机系统上的应用可以很好的实现锚链这类大惯性负载的张力控制，使锚泊船舶的锚链张力保持在一定范围内，这样就能有效的避免崩缆事故的发生，对锚泊船的周期性偏荡起一定的抑制作用。达到了减少人员的劳动强度，提高了安全系泊的可靠度。同时，对于海洋平台及锚泊定位系统的稳定性研究具有很大意义上的参考价值。

虽然本文针对该系统进行了仿真验证，但是由于个人思维的局限性，本文会有一些考虑不周全的地方，有待进一步的提高和改进。比如，在海洋扰动模型建立这一部分，没有考虑海浪等复杂扰动的影响。此外，在张力参考值设定这一方面，可以综合船的姿态最优及锚机电机的效率的最大化两个因素来考虑其值的设定来进行研究。对于多锚锚泊装置或平台以及锚泊定位类工程装置有一定的参考价值和意义。由于时间和精力的限制，对整个系统的研究仍不够完善，在以后的学习中，可以做进一步的研究和完善。



## 参考文献

- [1] 张澄宇,赵大利.中国船舶配套业现状及其发展方向[J].船舶工程, 2005.27(1):1-5
- [2] 刘伯强.国外锚泊机械近况[J].机电设备.1989.01.31.
- [3] 李晨浩.变频技术原理及船舶应用初探[J].中国航海学会船舶船检专业委员会论文集.2005.08.01.
- [4] 沈瑜.基于模糊 PID 的恒张力控制设计[J].PLC&FA.2008.10:104-106.
- [5] Jun-feng Zhou,Baochang Xu,Xinle Liu.Research on Constant Tension Control Method of Tensioner Based on Fuzzy Adaptive Algorithm[J].2012 9<sup>th</sup> International Conference on Fuzzy System and Knowledge Discovery.356-360.
- [6] Bao-chang Xu,Xin-le Liu.Research on Constant Tension Control Method of Tensioner Based on Fuzzy Algorithm[J]. 2012.9<sup>th</sup>.International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery.
- [7] Muthuselvan,N.B;Dept.ofElectr.&Electr.Eng.,SSNColl.ofEng.,Chennai;Dash,S.S.;Som asundaram,P. A High Performance Induction Motor Drive System Using Fuzzy Logic Controller[J].TENCON 2006.2006 IEEE Region 10 Conference.2006,Nov.14-17.
- [8] 李晨浩,李伟.系泊绞车变频调速系统的设计与应用[J].中国航海学会船舶船检专业委员会论文集.2005.
- [9] 赵贝尔,施云飞,徐振华.浅析船舶电动锚绞机驱动方法与特性[J].机电设备, 2011,06:54-56.
- [10] 朱熙耕.45 吨静液压绞车的研制[M].天津大学硕士学位论文.2005.06:3-5.
- [11] 吴磊,张永林,李新鹏.三速锚绞机智能控制系统设计研究 [J].中国水运, 2013,1:86-88.
- [12] 张竺英,任福林,陈黎明.潜水器恒张力收放绞车系统的建模与仿真[J].机床与液压, 2006(9):132-136.
- [13] 张蓬,闫国帅,赵宏林等.铺管船锚机大功率变频电机的控制原理及仿真[J].石油矿场机械.2014,43(2):1-7.
- [14] 周晓明,裴华刚.基于伺服电机的海洋绞车控制系统设计[J].中国水运.2008.05.08(5).
- [15] Wangqiang Niu,Jianxin Chu,Wei Guo.Constant Tension Control of the Anchor Chain of the Windlass under Sea Wind[J].2008 International Workshop on Education Technology and Training & 2008 International Workshop on Geoscience and Remote Sensing.622-626.
- [16] 杨庆堂.PLC 在船用三速锚机控制系统中的应用[J].中国科技信息.2008,24:112-114.

- [17] Muhammad Arrofiq,Nordin Saad.PLC-based Fuzzy Logic Controller for Induction-motor Drive with Constant V/Hz Ratio[J].Intrnational Conference on Intelligent and Advanced Systems.2007.93-98.
- [18] 富贵根,余志刚.船舶辅机前沿技术研究[J].上海造船.2009,2:20-23.
- [19] Shuzhi Sam Ge,Zhen Zhao.Localization of Drag Anchor in Mooring Systems Via Magnetic Induction and Acoustic Wireless Communication Network[J].Oceanic Engineering,IEEE.2013,pp:1-11.
- [20] 黄珍.锚泊移位型工程船舶系统建模与控制研究[D].华中科技大学博士论文.2010.5.
- [21] 贾欣乐,杨盐生.船舶运动数学模型—机理建模与辨识建模.大连海事大学出版社,1999.4.
- [22] 周昭明,盛子寅.多用途船的操纵性预报计算[J].船舶工程.1983(06).21-36.
- [23] 邓涛.潮流作用下单锚泊船的偏荡运动的研究[M].大连海事大学硕士论文.2008.05
- [24] 王大治.单点锚泊系统动力学建模仿真与姿态控制[M].哈尔滨工程大学硕士学位论文.2010.06.19-20.
- [25] 杨盐生.低速域船体流体动力的实用估算法.大连海事大学学报,1998,24(2):6-10.
- [26] M.R. Haddara,C.Guedes Soares.Wind loads on marine structures [J].Marine Structures .12(1999)199-209.
- [27] 岩井聰.操船论.人民交通出版社.1984.
- [28] 汤忠谷等.水面船舶的空气动力.武汉水运工程学院论文选.1981-1983.
- [29] H.R.泽尔海姆. 单点系泊系统运动分析[J].船舶力学,1983(7):20-23.
- [30] 庄司邦昭. 系留索动张力解析 [J]. 东京商船人学研究报告 (自然科学). 1986(37):25-26 页.
- [31] 侯建军等.锚泊状态下锚链作用力的计算方法.大连海事大学学报.2005.04.
- [32] 中科院数学所.优选法[M].北京:科学出版社,1978.50-65.
- [33] 武学艺.基于交流电机调速的恒张力控制系统的研究[M].武汉理工大学硕士论文.
- [34] 胡寿松.自动控制原理.国防工业出版社(第3版),1994.5.
- [35] 钟天宇.大惯性负载双向电液比例张力控制系统研究[M].浙江大学博士论文.
- [36] Valenzuela M.,Bentley J. M., Lorenz R.D.Sensorless tension control in Paper machines, Pulp and Paper IndustryTechnical Conferenee,2002.Conferenee Record of the 2002 Annual 17-21 June 2002 Page(s):44-53.
- [37] Seung-Ho Song, Seung-Ki Sul. A new tension controller for continuous strip processing line , Industry Applications,IEEE Transactions on Volume 36,Issue 2, March-April 2000 Page(s):639-633.

- [38] 周志文,薛华.变频调速器在张力控制系统中的应用[J].真空,2003(1):33-35.
- [39] 黄济荣.现代控制理论与交流调速系统.机车电传动,2005.1.1-7.
- [40] Yongxian Song,Juanli Ma,Hanxia.Decoupling Control of Induction Motor Based on Artificial Neural Inverse System Method.Interational Conference on Electrical and Control Engineering,2010,2288-2291.
- [41] 冯垛生,曾岳南.无速度传感器矢量控制原理与实践.机械工业出版社.2006.02.
- [42] L.YOUB,A.CRACIUNESCU.Direct Torque Control of Induction Motors with Fuzzy Minimization Torque Ripple[J].Lecture Notes in Engineering and Computer Science,2009,Vol.2179(1),pp.713.
- [43] J.-I. Itoh, N.Nomura, H. Ohsawa,A comparison between V/f control and position-sensorless vector control for the permanent magnet synchronous motor,Power Conversion Conference, Osaka 2002.
- [44] 陈伯时.电力拖动自动控制系统.北京航天大学出版社.2003.
- [45] L.YOUB,A.CRACIUNESCU.Direct Torque Control of Induction Motors with Fuzzy Minimization Torque Ripple[J].Lecture Notes in Engineering and Computer Science,2009,Vol.2179(1),pp.713.
- [46] 鄢华林,周超,姜飞龙等.收放系统恒张力研究[J].机床与液压,2012,09.44-46.
- [47] V.Petrovic,R.Ortega,A.MStankovic,and G.Tadmor.Design and Implementation of an Adaptive Controller for Torque Ripple Minimization in PM Synchronous Motors, IEEE Trans.On Power Electronics.Vol.15,No.5,Sept.2000:871-880.
- [48] 张康.异步电机矢量控制变频调速系统研究.兰州交通大学硕士论文,2013.06.
- [49] A.Munitic,M.Orsulic,M.Krcum,and J.Dvomik,"System dynamic simulating of driving system"anchor windlass driven by asynchronous motor"(BSVPAM)"in Esm 2003:17th European Simulation Multiconference-Foundations for Successful Modeling&Simulation,D.A1Dabass,Ed.Ghent:Scs Europe,2003,pp.520-525.
- [50] 骆皓,杨志等.异步电机矢量控制实现恒转矩控制仿真[J].电机与控制应用,2008:35(5).
- [51] Wickers J E W.A simulation model for a single point moored tanker[D].Technische Universiteit Delft,1988.
- [52] Xu Jiaying,CAO Guangzhong,LUO Qingwei,Yang Rong.Simulation of Vector Control for High-Speed Permanent Magnet Disk Synchronous Motor[J].Proceeding of the 32<sup>nd</sup> Chinese Control Conference.July 27-27,2013,Xi'an,China.
- [53] 徐道申.船舶电动自动系泊绞车的研制[J]机电设备.1996.第4期.



## 攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果

- [1] 吉明,安娜.基于 S 函数的单锚泊船的偏荡运动建模与仿真研究.哈尔滨工程大学自动化学院 2014 年学术年会.
- [2] Ji Ming,Ye Qingyun,An na,Wang Ruiwang,Tang Yicheng.The dynamic lift formula fitting for low speed fin.11th IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 3-6, 2014, Tianjin, China, 2014: 1751-1761P. (EI:20143818167434).



## 致 谢

当写到这里的时候，我的论文也接近了尾声，我知道这意味着我的学生时代也即将结束。这是我学生时期给自己给老师提交的最后的答卷。回首这三年短暂的时光，有太多的人需要我感谢。

首先要感谢恩师吉明老师对我的悉心教导和指引，课题能够顺利完成离不开老师的细心指导，有了吉老师在大方向上的引导和纠正，才让我能够在正确的方向上前进。在课题研究期间，我受益匪浅，有很多不懂的问题，吉老师都能够积极的给予我帮助和指导。尤其是在出现问题而无从下手的时候，老师能够教我做事的方法和原则，怎样找出问题的切入点，怎样有效的解决问题。其实困难并不可怕，关键是我们怎么找到问题的根源。这期间的收获是受益终身的。

同时也要特别感谢在一个实验室一起奋斗的兄弟姐妹们，实验室融洽和谐、向上进去的良好氛围也是我研究生期间美好而珍贵的回忆。感谢他们对我学习生活上的热情帮助和关心，是你们陪我度过了重要而又快乐的一段时光。还要感谢我可爱的室友们，你们带给我的欢乐，有时带给我极大的安慰和鼓舞，让我的生活多彩了许多。

最后尤其要感谢我的家人多年来对我的支持和关爱。在我有困难、无助的时候鼓励我，让我有勇气面对一切；在我取得成绩的时候肯定我，与我一起分享喜悦。他们的爱是我生活、奋斗的动力，我将用实际行动来回报他们。

真心感谢所有曾经帮助过我的朋友们！