

大连理工大学本科毕业设计

基于动力定位系统的水下机器人位姿控制

**Position and attitude control of ROV based on dynamic
positioning system**

学 院（系）： 海洋科学与技术学院

专 业： 过程装备与控制工程

(海洋石油装备)

学 生 姓 名： 郑 赵 亮

学 号： 201328012

指 导 教 师： 曾 岑

评 阅 教 师： 王 刚

完 成 日 期： 2017 年 6 月 5 日

大连理工大学

Dalian University of Technology

摘 要

ROV（遥控无人潜水器）作为近海资源的开采设备之一，在海洋的开发过程中举足轻重。ROV 在水下运动过程中，往往会受到海底暗流、暗礁等不确定因素的影响，作业过程中，也会受到水阻力、机械臂反作用力等影响。保证 ROV 作业过程中位姿的稳定性和工作的有效性，成为研究的关键，这也对 ROV 提出了动力定位的要求。

本文以 ROV 水下动力定位为工程背景，首先进行了坐标系的选取建立。其次，对作业型 ROV 进行了受力分析，对 ROV 所受力的模型进行了建立。再根据牛顿经典运动学定理建立了运动学和动力学的方程，并且对 ROV 的运动学和动力学模型进行了算法的实现。再次，通过对水下机器人进行运动学和动力学的建模，并且进行解耦合计算，分别对位置和姿态进行 PID 控制，逐步使机器人由初始位姿逼近期望位姿并最终定位于期望位姿，从而实现水下机器人 6 自由度的动力定位。

最后，本文针对三种不同结构的 ROV 进行了建模，通过 MATLAB 的 Simulink 功能进行了的模拟仿真计算，并且人为施加恒定和非恒定的水流的干扰和人为期望位置的扰动，从而验证了不同推进器分布情况的 ROV 动力定位的可行性，并且针对仿真结果进行了稳定性对比以及性能的分析评价。

关键词：动力定位；位姿控制；Simulink 仿真；动力学建模；PID 控制器

Position and attitude control of ROV based on dynamic positioning system

Abstract

ROV (Remote Operated Vehicle) as one of the exploitation equipment in offshore area, plays a very important role in the development of exploitation procedure. In the movement process, the uncertain factors such as sea undercurrent, reefs will greatly influent ROV, and in the operation process, ROV will also be affected by the water resistance, mechanical arm reaction and so on. To ensure the stability and effectiveness of the ROV in operation process, is the key to the research, which also puts forward the requirement of the ROV dynamic positioning.

Based on the engineering research of ROV, the paper firstly chooses a proper coordinate system. Then, the paper makes a force analysis to ROV and builds up a dynamic model for the force that it bears. Next, according to Newton classical kinematic law, the paper builds up a kinematic and dynamic equation for ROV, and realizes this equation with the algorithm. What's more, through the study of the kinematic and dynamic modeling of ROV and the coupling calculation, the paper uses the PID control to control ROV's position and attitude respectively, gradually makes ROV from the original position close to the expected position and finally locates to the expected position. Thus in this way the paper can realize the dynamic positioning of ROV in six degrees of freedom.

Finally, in this paper, three different kinds of structure of the ROV are modeled by Simulink function of MATLAB simulation calculation, and the paper adds artificial interference of steady and unsteady flow as well as man-made desired position disturbance, thus verifies the feasibility of the ROV dynamic positioning with three different distribution of the propeller, and compares the simulation results and performance analysis.

Key Words: dynamic positioning; position and attitude control; Simulink simulation; dynamic modeling; PID controller

目 录

摘 要	I
Abstract	II
1 课题研究背景、目的和意义	1
1.1 水下机器人动力定位发展概述	1
1.1.1 研究现状概述	1
1.1.2 推力系统	2
1.1.3 控制系统	2
1.2 国内外研究现状的问题分析	3
1.2.1 动力定位的控制算法	3
1.2.2 水下机器人的模型框架	3
1.2.3 水下机器人的目标探测与识别	3
1.3 本文研究内容	4
2 水下机器人运动和动力学模型的建立	5
2.1 坐标系的建立和变换	5
2.1.1 坐标系的定义	5
2.1.2 运载器在坐标系中的参数	5
2.1.3 坐标系的变换	6
2.2 水下机器人受力分析	6
2.2.1 流体水动力分析	7
2.2.2 运载体受到的静力分析和建模	8
2.2.3 水下机器人推力分析和建模	9
2.2.4 外部力和波浪流干扰力	14
2.3 水下机器人动力学建模	14
2.4 运动学和动力学方程的算法实现	15
2.5 本章小结	16
3 动力定位的 PID 控制仿真	17
3.1 ROV 六自由度运动控制系统选择策略	17
3.2 轴向和艏向 PID 控制器设计	18
3.2.1 PID 控制器的基本原理	18

3.3	横摇和纵倾方向 PD 控制器的设计	21
3.4	本章小结	22
4	Simulink 仿真与分析	23
4.1	六自由度联合控制器设计	23
4.2	ROV 结构仿真设计	24
4.2.1	雅可比转换矩阵模型	24
4.2.2	ROV 的几何模型	24
4.2.3	恢复力模型	25
4.2.4	洋流参数模型	26
4.2.5	水动力模型	26
4.2.6	ROV 所受力和速度的运动学模型	27
4.3	ROV 的仿真控制对比	27
4.4	ROV 性能评价与分析	32
4.4.1	动力性能评价与分析	33
4.4.2	稳定性能的评价与分析	34
4.5	本章小结	35
5	总结与展望	36
5.1	设计工作的总结	36
5.2	未来展望	36
参 考 文 献	38
致 谢	40

1 课题研究背景、目的和意义

由于地球陆地资源、能源等问题的日益缺乏，因此人类需要不断通过对新兴领域来解决这些问题。海洋占据了全球总面积的 71%，其中有大量的资源和能源没有得到开发和利用。海洋中蕴含着丰富的石油，天然气，可燃冰等能源，也拥有着大量的生物和稀有金属资源，发展的潜力巨大。如今，人类已经意识到海洋开发的重要性，但是对于海洋资源的探索 and 开发能力有限。因此海洋资源的开发将成为未来几十年中各个大国的重要战略目标。

中国是陆地大国，但是海域面积同样辽阔，其中有着 3.2 万千米的海岸线。但是我国的海洋资源的开发还处于初期阶段，对于海洋的探索还无法和发达国家比肩，因此，在日益激烈的竞争环境下，我国需要尽快开发出能够探索海洋和开发海洋资源的装备，这也是我国现阶段海洋开发的重要目标。

由于进行海洋开发人类所受到的限制，因此需要借助专业的海洋开发和探索的设备进行海洋资源和能源的开发，其中，水下机器人在海洋开发过程中所具备的优势，使其在海洋科学实验、海洋油气资源的开采、水下工程的施工、海洋搜救和捕捞、国防军事等各方面有着广泛的应用。

水下机器人又名水下运载器，是一种工作于水下极限条件的作业机器人。水下机器人又名为水下运载器或者是水下航行器，其定义为：一种通过遥控或自主操作方式，可以在水中运动，具有一定的视觉和感知功能的作业工具，集合机械、控制理论、机器人学、电子通讯等多学科为一体，可以代替或辅助人类完成水下作业的设备^[1]。其中水下机器人又分有缆遥控型运载器（ROV）以及无缆自主运载器（AUV）两种。

1.1 水下机器人动力定位发展概述

1.1.1 研究现状概述

动力定位系统最开始的研究是开始于 20 世纪 60 年代，来自于船舶在海洋上的油气开发。在海洋作业过程中，通过动力定位系统，能够有效的减少系泊锚链的造价和安装费用的增加，动力定位系统是一种闭环的控制系统，其功能是不借助锚泊系统的作用，能够不断的检测出船舶的实际位置与目标位置的偏差，再根据外界风、浪、流等外界干扰力的影响计算出使船舶恢复到目标位置所需要的推力大小，并对船舶上各推力进行分配，进而使各推力产生相应的推力，从而使船舶尽可能的保持在海平面上要求的位置上。

随着海洋开发的不断进行，并且受到陆地机器人的启发，人们要求水下机器人也能装载相应的装备和机械手等作业工具，使其能够进行一定的水下作业。对于水下机器人而言，由于不同于陆地环境，水下有暗流、礁石等不确定因素，这些不确定因素会严重干扰水下机器人的作业。为了保证水下作业的稳定性和时效性，这就使得动力定位成为了水下机器人的刚性需求^[2]。

动力定位系统一般由三部分组成（图 1.1 所示）：位置测量系统，一般用来测量运载器的相对于一个参考坐标系的位置；控制系统，根据外部环境干扰，计算出运载器所受的干扰力，然后由此外力和；推力系统，一般由数个推进器组成^[3-4]。

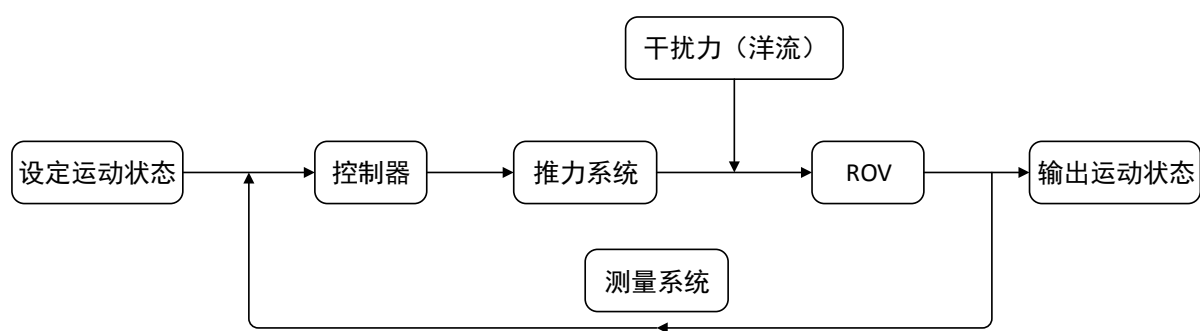


图 1.1 动力定位功能图

1.1.2 推力系统

推力系统是动力系统的组成部分，用于产生力和力矩，用来抵抗海洋干扰力和力矩，本人所做的研究简化模型，暂且不考虑推力和速度之间的关系，只考虑力和力矩的关系。推力器一般来说是指螺旋桨，动力系统定位中应用较多的是敞式螺旋桨、导管螺旋桨和隧道螺旋桨。

1.1.3 控制系统

在动力定位的过程中，控制器读取位置测量系统所得的位置信号，将其数值与预定的目标作比较，经过算法运算，得到抵消位置偏差和外界干扰力所需要的推力，然后对推力器发出质量，以产生推力使船尽可能靠近目标位置。动力定位是一个自动控制的过程，最方便有效的方法是采用经典控制和现代控制理论方法来设计控制器^[5]。

在动力定位发展的同时，模糊控制技术也有很快的发展，模糊控制有不依赖于对象的精确数学模型，抗干扰能力强，响应速度快，鲁棒性好等特点，利用模糊控制技术也变得非常合适。

由于神经网络有学习以及非线性建模能力，被考虑应用到非线性智能控制中，有文章提出应用神经网络的自学习功能将海流和流所产生的力作为前反馈到系统中去，从而可以抵制 ROV 可能发生的漂移。

1.2 国内外研究现状的问题分析

1.2.1 动力定位的控制算法

目前已经应用的水下机器人的动力定位控制算法有：PID 控制、自适应控制、模糊控制、滑膜控制、神经网络控制、鲁棒控制等等，以及采用以上多种控制方法相结合的控制方法。综合多种研究的方法，对于本人的四自由度水下机器人动力定位研究，在实际中应用 PID 控制方法对所研究的水下机器人的四个自由度分别进行闭环控制，在点到点（p-to-p）的 PID 路径规划下，进行动力定位。此方法具有显著的优势并且简单实用。其他的控制方法不仅不易于实施而且都还在进一步的开发和探索中，有诸多的不足，而且多数还停留在仿真的阶段，对于 PID 控制的研究已经进入了实际的操作阶段并且取得了良好的研究成果。但是单纯的使用 PID 控制的方法，缺点也不叫明显，因此还需要采用多种方法结合，比如：增量式 PID 控制，模糊 PID 控制等等^[6-10]。

1.2.2 水下机器人的模型框架

常用的水下 ROV 的几何模型框架有流线型和框架式结构两种。为了减小在水环境中运行的阻力，降低能源的消耗，多数设计成鱼雷的流线型，并且采用封闭式框架设计。大型的作业水下机器人多数采用开架式的框架设计结构，框架式结构的整体浮力和重心设计在底部，使其具有良好的稳定性，并且开架式的水下机器人总体布局较为方便，能够方便、快捷地根据作业的需要加挂和装载设备仪器或者机械手等工具，也能利用开架结构对四周进行保护、支撑等作用，但是水阻力较大，在建模中不可忽视。

1.2.3 水下机器人的目标探测与识别

目前水下机器人用于目标探测和识别的设备仅限于合成孔径声呐、前视声呐和三维成像声呐等水声设备，但是声学传感器探测距离在水环境中会受到严重的噪声影响，分辨率低。而 GPS 定位只能在水面工作，测量精度是相对于地球而言。长短基线定位系统需要布置基阵，而且花费时间长，成本高。现有的研究中，也有利用计算机视觉技术进行目标识别和探测，利用视觉传感器获取相对于某一个观察目标的位姿信息。其最大的特点在于信息量大、适用的范围广，具有灵活性和精度。本研究不具体探究关于传感器

方面的技术，所以在此有选择性的忽略。

1.3 本文研究内容

本文从水下机器人动力定位的要求出发，即在定位传感器的引导下，依靠自身的动力,在控制系统的指挥下抵抗外界的干扰,使其保持某一姿态悬停于空间任一指定位置，主要研究的有两个方向，分别是：水下机器人建模方法、六自由度的控制器设计以及 Simulink 仿真模拟。

（1）水下机器人建模方法

首先进行坐标系的选取，然后开始研究 ROV 的受力情况，根据受力模型和牛顿运动学定理建立 ROV 的运动学和动力学方程，再根据相关方式进行化简以及算法的设计。

（2）水下机器人控制器设计。

ROV 的运动学和动力学模型是一个非常复杂的非线性系统，也是一个多耦合的系统，并且在运动过程中容易受到海洋环境中各种不确定因素的干扰，因此需要根据动力定位的控制要求进行控制器的设计，建立一个能够快速回稳、动态响应和抵抗外部干扰的控制器。

（3）Simulink 仿真模拟

由于水下机器人实验的昂贵性和测试条件的复杂性，因此需要在进行现实实验之前进行仿真模拟实验。MATLAB 软件中的 Simulink 功能能够满足对动力定位要求的相应仿真，因此需要对研究的 ROV 模型进行仿真实验以确定其能够满足基本的动力定位控制要求^[11]。

2 水下机器人运动和动力学模型的建立

水下机器人具有很复杂的非线性特征，各个自由度之间的耦合现象非常严重，并且受到模型参数不确定性和外部环境干扰的影响，为了建立其基于动力定位的位姿控制，需要以水下机器人的运动模型为基础。为后续的六自由度水下机器人控制器的设计，建立一个完整的运动和动力模型至关重要。

本文从动力定位模型的动态控制出发，综合考虑重力、浮力、水动力、推力的影响，建立完整的六自由度运动学和刚体动力学模型。在此基础上利用 PID 和滑膜控制进行控制，从而实现基于动力控制的位姿控制^[12]。

2.1 坐标系的建立和变换

2.1.1 坐标系的定义

本文采用国际水池会议推荐的坐标体系。分为以下两种右手坐标系：一个是固定坐标体系 E-XYZ（也称“大地坐标系”）；另一个是随着运载体运动的动坐标体系 G-xyz（也称“局部坐标系”）。

固定坐标系，固联于地球上的惯性坐标系，用于确定水下机器人在惯性系中的位置、速度以及姿态。E 坐标系原点选自海洋中投放水下机器人的起点，Z 轴指向地心，X 和运载器在投放点的主航向一致，Y 方向依据右手原则，绕 Z 轴旋转 90 度。

动坐标系，G 系原点选自运载器的重心，x 轴方向指向运载器的艏部，y 方向在运载器水平面方向和 x 轴垂直，z 方向依据右手原则确定。

2.1.2 运载器在坐标系中的参数

表 2.1 水下运载器的运动参数物理意义

	X 轴	Y 轴	Z 轴
位置	x	y	z
姿态	ψ	θ	φ
线速度	μ	ν	ω
角速度	p	q	r
沿轴外力	X	Y	Z
绕轴力矩	K	M	N

2.1.3 坐标系的变换

水下运载器动坐标系的速度到定坐标系的转换方程为：

$$\mathbf{v}_E = \mathbf{J}(\mathbf{v}) \mathbf{v}_G \quad (2.1)$$

局部坐标系到大地坐标系的速度变换矩阵：

$$\mathbf{J}(\mathbf{v}) = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\varphi & -\cos\psi\sin\varphi + \sin\psi\sin\theta\cos\varphi & \sin\psi\sin\varphi + \cos\psi\sin\theta\cos\varphi \\ \cos\theta\sin\varphi & \cos\psi\cos\varphi + \sin\psi\sin\theta\sin\varphi & -\sin\psi\cos\varphi + \cos\psi\sin\theta\sin\varphi \\ -\sin\theta & \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

水下运载器随动坐标系的角速度到定坐标系的转换方程为：

$$\mathbf{v}_E = \mathbf{J}(\mathbf{r}) \mathbf{v}_G \quad (2.3)$$

局部坐标系到大地坐标系的角速度变换矩阵：

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}) = \begin{bmatrix} 1 & \sin\psi\tan\theta & \cos\psi\tan\theta \\ 0 & \cos\psi & -\sin\psi \\ 0 & \sin\psi/\cos\theta & \cos\psi/\cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

因此，动坐标系到定坐标系的雅各比转换矩阵为：

$$\mathbf{J}_{GE} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}(\mathbf{v}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{J}(\mathbf{r}) \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

则水下运载器动坐标系到定坐标系的具体表达式为：

$$[\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z} \ \dot{\psi} \ \dot{\theta} \ \dot{\varphi}]^T = \mathbf{J}_{GE} [\mu \ v \ \omega \ p \ q \ r]^T \quad (2.6)$$

2.2 水下机器人受力分析

为了推导出水下机器人的动力学和运动学方程，需要对机器人所受的外力和刚体动力学进行建模。水下机器人的外力和外力矩的一般式可以写成多种力及力矩和的形式，如下式^[13]：

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_{DAMP} + \boldsymbol{\tau}_{ADD} + \boldsymbol{\tau}_{REST} + \boldsymbol{\tau}_{EXT} + \boldsymbol{\tau}_P + \boldsymbol{\tau}_{fk} \quad (2.7)$$

其中，

$\boldsymbol{\tau}_{DAMP}$ ：运载器受到的粘性类水阻力；

$\boldsymbol{\tau}_{ADD}$ ：运载器所受的惯性类水阻力；

$\boldsymbol{\tau}_{REST}$ ：运载器受到的恢复力，包括重力和浮力；

$\boldsymbol{\tau}_{EXT}$ ：运载器受到的外部力，包括缆线、作业手的反作用力等；

$\boldsymbol{\tau}_P$ ：运载器受到的推进器的推力以及推力矩；

$\boldsymbol{\tau}_{fk}$ ：运载器受到的波浪流干扰力和力矩。

2.2.1 流体水动力分析

ROV 受到的水动力 τ_{wf} 是与速度有关的多元函数，表示为：

$$\tau_{wf} = \tau_{wf}(\mu, v, \omega, p, q, r, \dot{\mu}, \dot{v}, \dot{\omega}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}) \quad (2.8)$$

ROV 受到的流体水动力包括粘性水动力 τ_{DAMP} 和惯性水动力 τ_{ADD} ，忽略这两种力之间的相互作用，包含无因次水动力系数的流体水动力一般表示为以下方程组的形式：

$$\tau_{wf} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{qq}q^2 + X_{rr}r^2 + X_{rq}rq + X_{\dot{\mu}}\dot{\mu} + X_{vr}vr + X_{wq}wq + X_{\mu\mu}\mu^2 + X_{vv}vv + X_{ww}w^2 \\ Y_{qq}q^2 + Y_{rr}r^2 + Y_{rq}rq + Y_{\dot{\mu}}\dot{\mu} + Y_{vr}vr + Y_{wq}wq + Y_{vv}v^2 + Y_{vv}vv + Y_{ww}w^2 \\ Z_{qq}q^2 + Z_{rr}r^2 + Z_{rq}rq + Z_{\dot{\omega}}\dot{\omega} + Z_{vr}vr + Z_{wq}wq + Z_{\omega\omega}\omega^2 + Z_{vv}vv + Z_{ww}w^2 \\ K_r r + K_p p + K_{pq}pq + K_{qr}qr + K_{\dot{v}}\dot{v} + K_p up + K_{vw}vw + K_{vp}vp + K_{\dot{p}}\dot{p} + K_{wr}wr \\ M_q q + M_p p^2 + M_{rp}rp + M_{qr}r^2 + M_{\dot{v}}\dot{v} + M_p up + M_{vw}vw + M_{vp}vp + M_{\dot{p}}\dot{p} + M_{wr}w^2 \\ N_r r + N_p p + N_{pq}pq + N_{qr}qr + N_{\dot{v}}\dot{v} + N_p up + N_v uv + N_{vv}v^2 + N_{\dot{p}}\dot{p} + N_{wr}wr \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

τ_{DAMP} 即，在运载器进行空间运动时，会因为流体的粘性而受到粘性水动力的影响，粘性水动力的大小和刚体的形状、运动速度和角速度都有极大的关系。线性类水动力包括线性摩擦、涡流产生的二次阻力以及摩擦力^[14]。

这个参数通常取决于 $v_r = v_G - v_c$ 和 δ ，其中 v_c 是水流在动坐标系下的流速， v_r 是水流相对运载器的相对速度； δ 是相对应方向的运载器表面积。

$$\tau_{DAMP} = -D(v_r, \delta)v_r \quad (2.10)$$

τ_{ADD} 即，惯性类水动力，由于运载器附近的流体的惯性所产生的附加质量力和力矩，运载器在流体中运动所受到的惯性类水动力与其运动的加速度有关，其比例系数我们称之为附加质量。而附加质量又包括附加质量矩阵 M_A 和由附加质量矩阵引起的柯氏力和向心力矩阵 $C_A(v_r)$ 。

$$\tau_{ADD} = -M_A \dot{v}_r - C_A(v_r)v_r \quad (2.11)$$

其中， M_A 和 $C_A(v_r)$ 的具体表达式见公式（2.10）和（2.11）。

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} X_{\dot{\mu}} & X_{\dot{\nu}} & X_{\dot{\omega}} & X_{\dot{p}} & X_{\dot{q}} & X_{\dot{r}} \\ Y_{\dot{\mu}} & Y_{\dot{\nu}} & Y_{\dot{\omega}} & Y_{\dot{p}} & Y_{\dot{q}} & Y_{\dot{r}} \\ Z_{\dot{\mu}} & Z_{\dot{\nu}} & Z_{\dot{\omega}} & Z_{\dot{p}} & Z_{\dot{q}} & Z_{\dot{r}} \\ K_{\dot{\mu}} & K_{\dot{\nu}} & K_{\dot{\omega}} & K_{\dot{p}} & K_{\dot{q}} & K_{\dot{r}} \\ M_{\dot{\mu}} & M_{\dot{\nu}} & M_{\dot{\omega}} & M_{\dot{p}} & M_{\dot{q}} & M_{\dot{r}} \\ N_{\dot{\mu}} & N_{\dot{\nu}} & N_{\dot{\omega}} & N_{\dot{p}} & N_{\dot{q}} & N_{\dot{r}} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$C_A(v_r) = \begin{bmatrix} 0 & [M_{RB11} & M_{RB12}]v_r \\ [M_{RB11} & M_{RB12}]v_r & [M_{RB21} & M_{RB22}]v_r \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.2.2 运载体受到的静力分析和建模

运载体受到的流体静力被又称为恢复力，恢复力和运载体的重力以及浮力有关。

运载体所受重力表示为：

$$G = mg \quad (2.14)$$

运载体所受浮力表示为：

$$B = \rho g V_{veh} \quad (2.15)$$

其中，

m : 运载器的质量；

ρ : 海水密度；

V_{veh} : 运载体的排开的水体积；

重力和浮力是在大地坐标系下的表示，转换到运载器的动坐标系下，关系为：

$$\tau_G = J_{GE}^{-1} [0 \ 0 \ G]^T \quad (2.16)$$

$$\tau_B = J_{GE}^{-1} [0 \ 0 \ B]^T \quad (2.17)$$

由重力和浮力产生的合力和合力矩表示为：

$$g_{rest} = \begin{bmatrix} \tau_G + \tau_B \\ r_G \times \tau_G + r_B \times \tau_B \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

其中，

r_G : 运载器重心在动坐标系的坐标；

r_B : 运载器浮心在动坐标系的坐标；

所以，运载体所受恢复力的表达式为：

$$\tau_{REST} = -g_{rest} = \begin{bmatrix} -(G - B)\sin\theta \\ (G - B)\cos\theta\sin\psi \\ (G - B)\cos\theta\cos\psi \\ (y_G G - y_B B)\cos\theta\cos\psi - (z_G G - z_B B)\cos\theta\sin\psi \\ -(x_G G - x_B B)\cos\theta\cos\psi - (z_G G - z_B B)\sin\theta \\ (x_G G - x_B B)\cos\theta\sin\psi + (y_G G - y_B B)\sin\psi \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

2.2.3 水下机器人推力分析和建模

水下机器人一般靠液压推进器来获得动力，而推进器的分布又会对水下机器人的控制有着直接的影响。

为了方便后期的对比，本文采用三种推进器分布方式，其中两种为过驱动方式，另外一种为欠驱动方式。过驱动也称为冗余驱动，是一种采用数量多于运载器运动自由度的推进器对运载器进行控制^[15]。

(1) 第一种分布方式

为了方便论述，本文把第一种过驱动分布的 ROV 称为 I 型 ROV，采用了 7 个推进器，其中有 4 个平行于 Z 轴的竖直推进器；有 2 个平行于 Y 轴的横向推进器，有 1 个位于 X 轴的直航推进器，具体三维图如图 2.1。

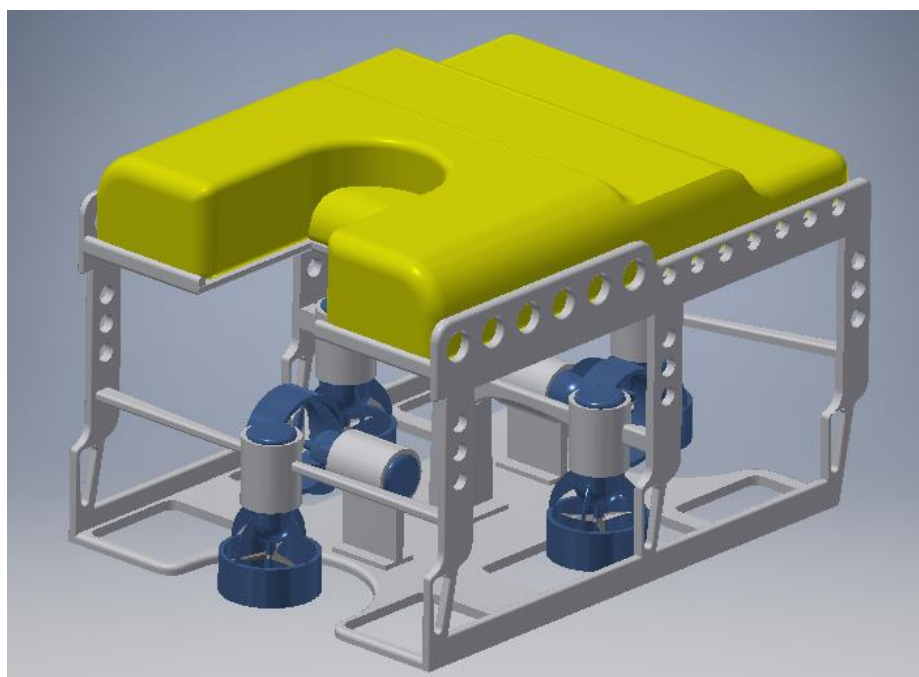


图 2.1 I 型 ROV 三维简图

I 型 ROV 的过驱动分布方式的三视图如图 2.2，可以看到，过驱动也称为冗余驱动，是一种采用数量多于运载器运动自由度的推进器对运载器进行控制。这种驱动分布方式能够在很大程度上保证作业过程中 ROV 的推进动力。

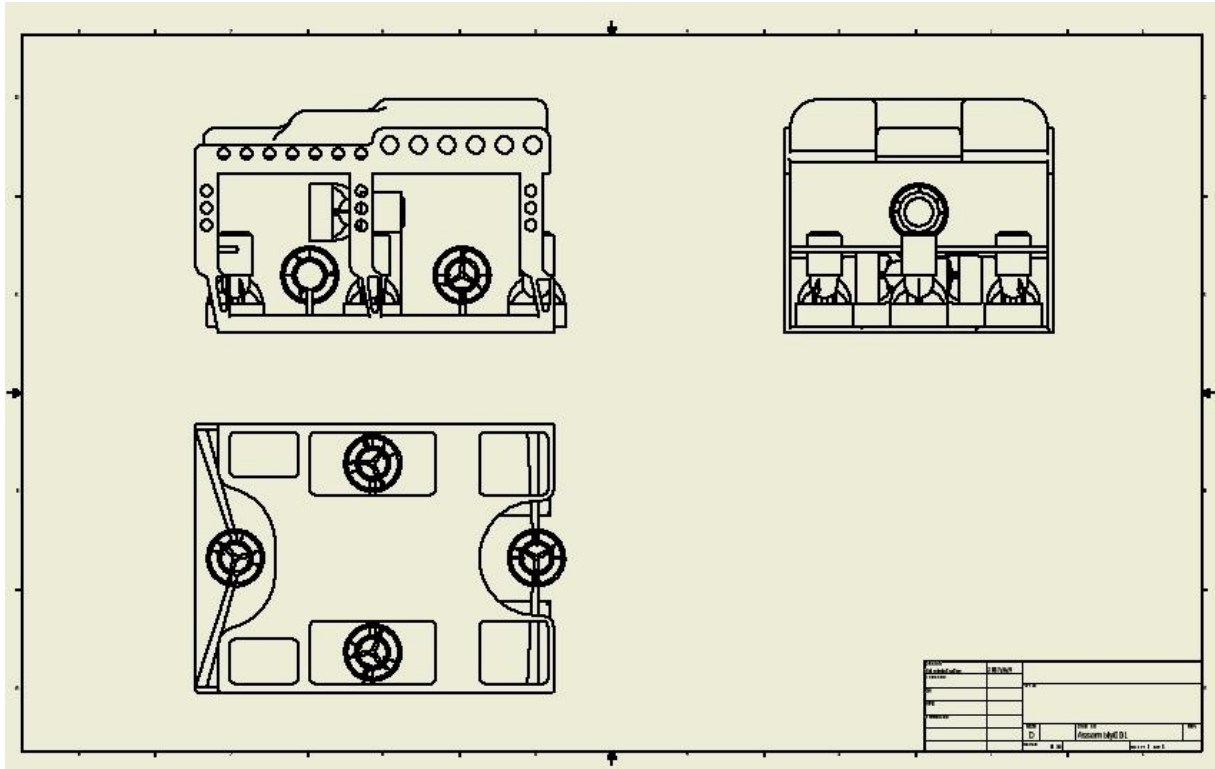


图 2.2 I 型 ROV 的过驱动分布三视图

根据推进器的空间分布情况可以推导出各个推进器投影到各个坐标轴上的推力和产生的力矩。其中，对于 4 个平行于 Z 轴的竖直推进器，本文分别用 T1, T2, T3, T4 来表示这四个推进器所产生的推力，分别用 T5, T6 来表示两个平行于 Y 轴的横向推进器所产生的推力，分别用 T7 来表示一个位于 X 轴的直航推进器所产生的推力。

表示为：

$$\begin{bmatrix} T \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T7 \\ T5 + T6 \\ T1 + T2 + T3 + T4 \\ (T2 + T4 - T1 - T3) \times W/2 \\ (T3 + T4 - T1 - T2) \times L/2 \\ (T5 - T6) \times (\frac{L}{2} - a) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

其中，

W：表示 ROV 的近似宽度；

L：表示 ROV 的近似长度；

a：表示平行于 Y 轴横向推进器的偏移距离。

(2) 第二种分布方式

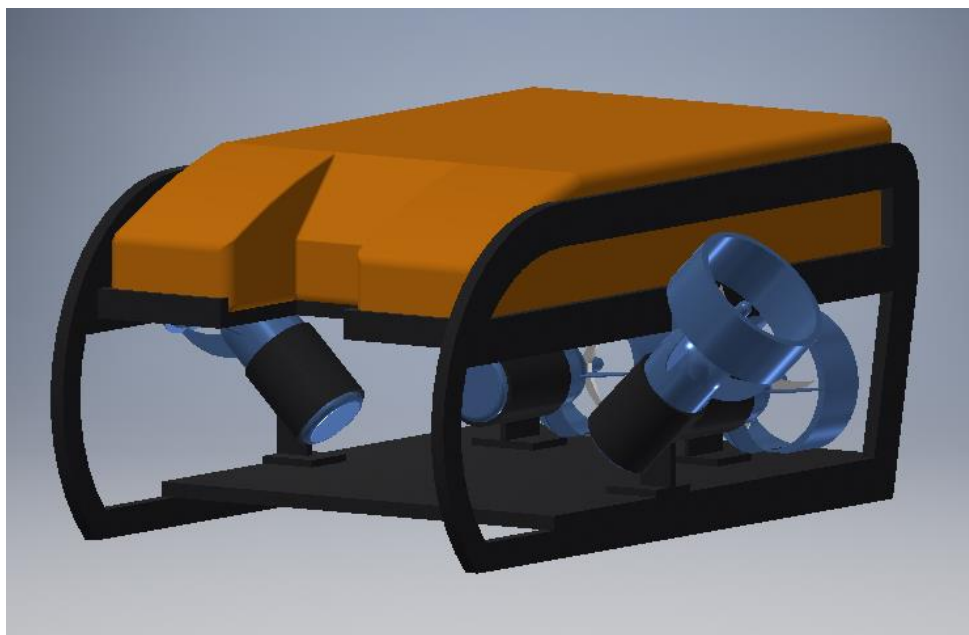


图 2.3 II 型 ROV 的三维简图

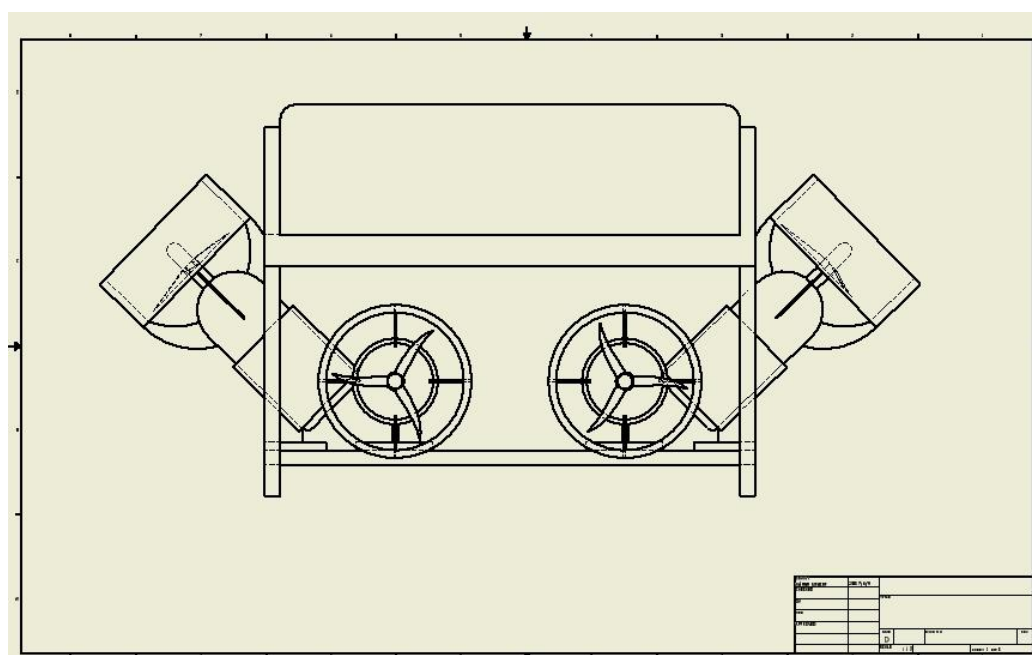


图 2.4 II 型 ROV 的欠驱动后视分布图

II 型 ROV 的推进器的分布方式是采用了欠驱动方式。所谓欠驱动，即推进器数量少于水下机器人运动自由度的一种驱动方式。此驱动方式虽然在一定程度上能够节省重量，增加作业载重，但是比起 I 型 ROV 的过驱动分布，稳定性欠佳。分布的模型的启发来自于 SeaOtter2 型 ROV 水下机器人。具体分布如图 2.4。

根据推进器的空间分布情况可以推导出各个推进器投影到各个坐标轴上的推力和产生的力矩。对于两个平行于 X 轴的直航推进器，分别用 T1, T2 来表示其推力，用 T3, T4 来表示两个位于 YZ 平面并且和 Z 轴成 45°角的推进器所产生的推力，推进器在其中产生的力和力矩的方程为：

$$\begin{bmatrix} T \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T1 + T2 \\ (-T3 + T4)\sin\alpha \\ (T3 + T4)\cos\alpha \\ d(T4 - T3)\sin\alpha \\ e(T1 + T2) \\ g(-T1 + T2) \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

其中，d, e, g 分别为在横滚，纵倾，艏向等三个自由度上所对应的力臂，d, e, g 的取值见表 4.2。

(3) 第三种分布方式

本文把第三种 ROV 称为 III 型 ROV，III 型 ROV 采用 5 个推进器，其中，在水平方向上（XY 平面）有着四个与 X 轴和 Y 轴呈 30°角分布的推进器，在 Z 轴上有一个控制浮潜的推进器，具体的推进器简图如图 2.5。

III 型 ROV 的推进器的分布方式是一种采用过驱动的四自由度分布，主要是基于平面化假设的水下机器人推进器布置。平面化假设，即水下机器人在平面内做平面运动的过程中，不发生横滚和纵倾方向的变化，在做变深运动时，不发生平面运动的变化。根据这一假设，四自由度的 III 型 ROV 分布能够满足其运动的要求。其过驱动分布如图 2.6。

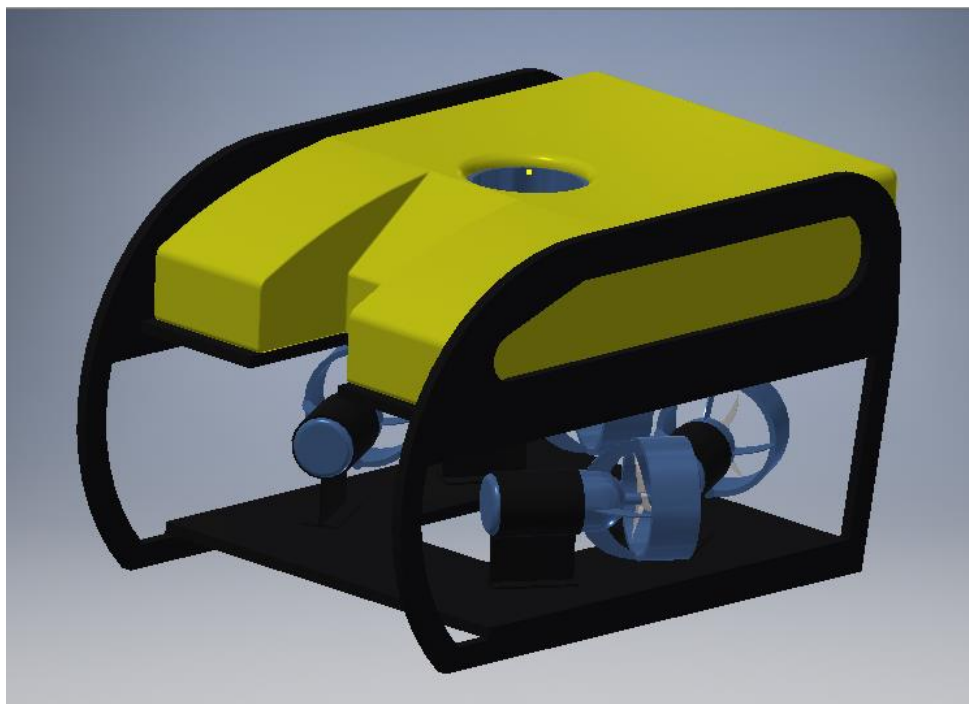


图 2.5 III 型 ROV 三维简图

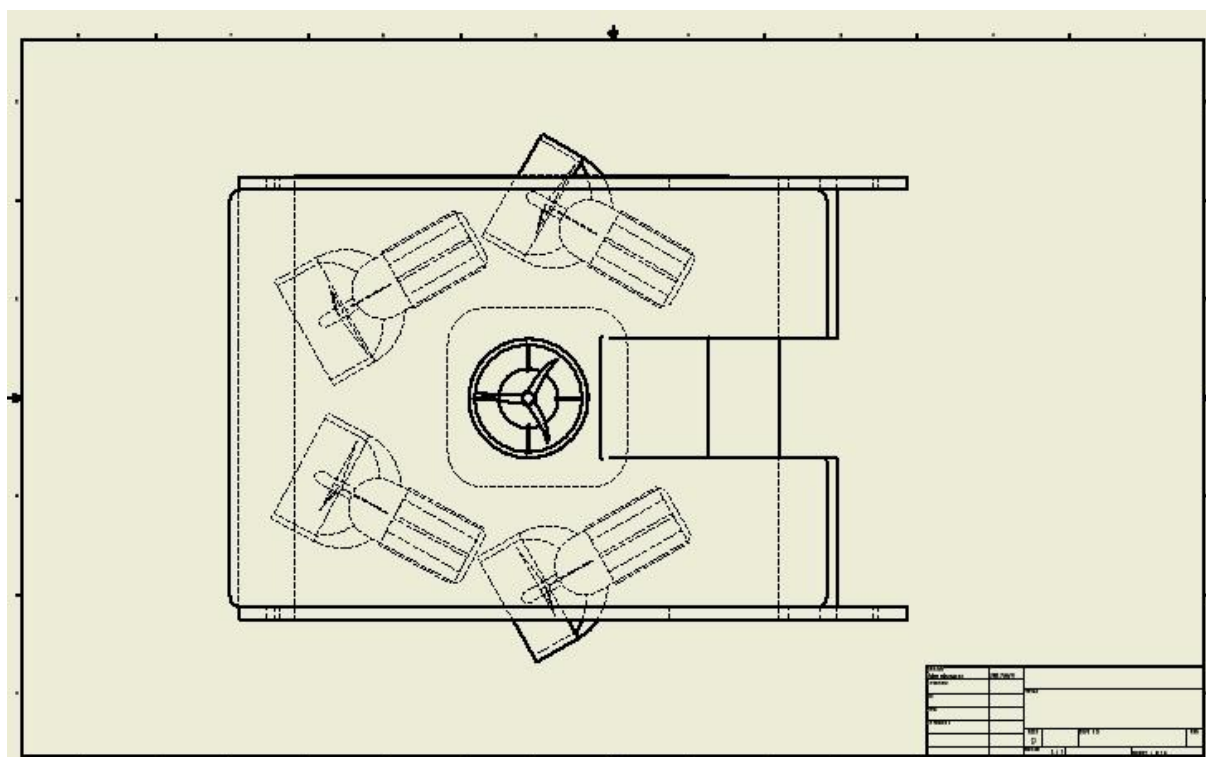


图 2.6 III 型 ROV 的过驱动分布俯视图

根据推进器的空间分布情况可以推导出各个推进器投影到各个坐标轴上的推力和产生的力矩。其中，对于在水平方向上（XY 平面）有着四个与 X 轴和 Y 轴呈 30° 角分布的推进器，分别用 T1, T2, T3, T4 表示其推力大小，对 Z 轴方向变深推进器，用 T5 表示其推力大小，推进器在其中产生的力和力矩的方程为：

$$\begin{bmatrix} T \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (T1 + T2 + T3 + T4)\cos\alpha \\ (T1 - T2 - T3 + T4)\sin\alpha \\ T5 \\ 0 \\ 0 \\ c(T1 - T2 + T3 - T4)\sin\alpha \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

其中，取 $\alpha = 30^\circ$ 。

2.2.4 外部力和波浪流干扰力

定义 τ_{EXT} 为运载器所受到的外部力，包括 ROV 缆绳的牵引力，作业手的反作用力等等，在本文中为了模型的简化，暂时不考虑这一力的作用。

定义 τ_{fk} 为波浪流的干扰力，也称弗劳德-克雷洛夫力（Froude-Kriloff Forces）。是由于波浪的移动造成的惯性力和力矩。表示为：

$$\tau_{fk} = M_{fk} \dot{v}_c \quad (2.23)$$

2.3 水下机器人动力学建模

根据牛顿线性动量和角动量定律，假设运载器为刚体，则运载器的运动学方程可以表示为：

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau \quad (2.24)$$

其中，

M_{RB} : 运载器的惯量矩阵；

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x & 0 & 0 \\ mz_G & 0 & -mx_G & 0 & I_y & 0 \\ -my_G & mx_G & 0 & 0 & 0 & I_z \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$C_{RB}(v)$: 由 ROV 的惯量矩阵引起的柯氏力和向心力矩阵；

$$C_{RB}(v) = \begin{bmatrix} 0 & -[M_{RB11} \ M_{RB12}]v \\ -[M_{RB11} \ M_{RB12}]v & -[M_{RB21} \ M_{RB22}]v \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

其中,

I_x, I_y, I_z : 基于运载器 x 轴, y 轴, z 轴的转动惯量;

x_G, y_G, z_G : 运载器的重心坐标。

把方程 (2.22) 的带 $C_{RB}(v)$ 的项移动到方程右边, 把右边带有 M_{fk} 和 M_A 的项移动到左边, 定义柯式力 τ_{cor} , 表示为:

$$\tau_{cor} = -C_{RB}(v)v - C_A(v_r)v_r \quad (2.27)$$

所以方程 (2.22) 可以写成:

$$M_{RB}\dot{v} + M_A\dot{v}_r - M_{fk}\dot{v}_c = \tau_{cor} + \tau_{DAMP} + \tau_{REST} + \tau_{EXT} + \tau_P \quad (2.28)$$

一般来说我们都假设 $M_{RB} = M_{fk}$, 因为可以假设运载体的浮力和质量的分布是均匀的, 所以上式可以写成:

$$[M_{RB} + M_A]\dot{v} = \tau_{cor} + \tau_{DAMP} + \tau_{REST} + \tau_P \quad (2.29)$$

在接下来的章节中, 将介绍如何在 MATLAB 环境中, 如何对上述的各个变量进行算法的构建, 包括运载器的质量, 转动惯量, 惯量矩阵等, 然后算法会分析和包括各个力对运载器的影响。

因此, 最终的六自由度运动学和动力学方程为:

$$\begin{aligned} v_E &= J(r) v_G \\ \dot{v} &= \dot{v}_c + [M_{RB} + M_A]^{-1}(\tau_{cor}(v, v_G - v_c) + \tau_{DAMP}(v_G - v_c, \delta) + \tau_{REST}(g_{rest}) + \tau_P(T, M)) \end{aligned} \quad (2.30)$$

2.4 运动学和动力学方程的算法实现

由上面公式 (2.28) 可知, 为了进行运动学和动力学方程的算法实现, 需要进行 MATLAB 函数化编程。需要进行编程的函数有: 1. 转换矩阵函数 2. 雅各比矩阵函数 3. 运载器的结构和配置函数 (包括推进器和几何参数) 4. τ_{cor} 柯式力函数 5. τ_{DAMP} 粘性水动力函数 6. τ_{REST} 恢复力函数 7. 运动方程函数

因此, 对于运动学算法的实现流程图如图 2.7。

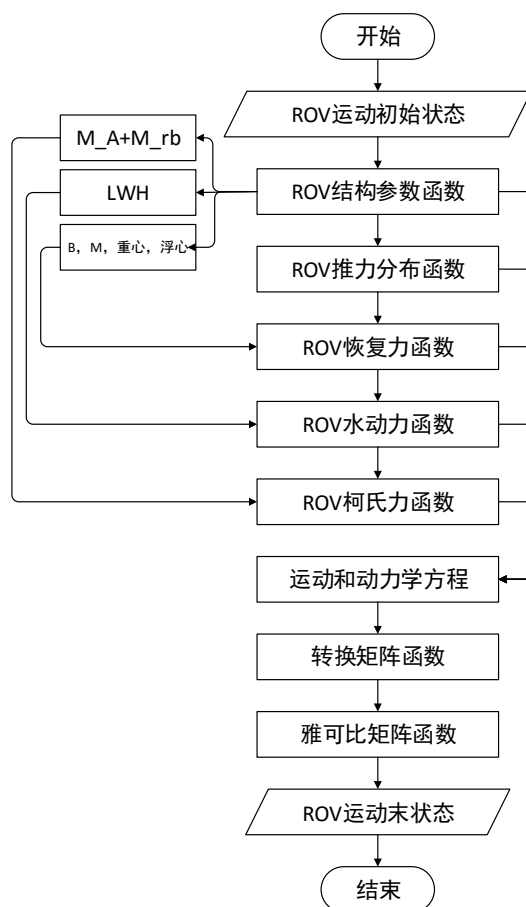


图 2.7 六自由度运动和动力学算法流程图

2.5 本章小结

本章主要介绍了水下运载器数学建模过程中所用到的两种坐标系，分别是大地固定坐标系和局部动坐标系，并且用雅各比转换矩阵表示了他们之间的关系；而且还分析了 ROV 在水下环境中的受力情况，对不同的受力情况分别进行了建模并且建立了 ROV 的运动学和动力学模型，再此基础上利用 MATLAB 进行了运动学和动力学算法的构建。

3 动力定位的 PID 控制仿真

根据前面一章的分析，我们可以看出，ROV 是一个非常复杂的瞬时变化的非线性系统，各个自由度之间的耦合现象非常严重，工作时又会受到海洋中各种不确定因素的影响，也会受到自身的机械臂、缆线等因素的影响。因此为了解决上述问题，需要为作业型 ROV 设计一套合适的、实时调整的、鲁棒性较强的控制器。本章将介绍 ROV 控制中最常用的 PID 和 PD 控制系统，并且解释如何对 ROV 的非线性系统进行补偿和负反馈控制。

3.1 ROV 六自由度运动控制系统选择策略

ROV 控制系统的选择应该考虑到以下各方面的因素：

- (1) 能够快速响应变化，尽快向目标进行收敛，控制误差要小；
- (2) 能够不发生超调现象，控制器的指令能够在 ROV 推进器和整体的可承受范围之内；
- (3) 鲁棒性要强，能够抵御洋流、牵引力、反作用力等干扰；
- (4) 对于不同的自由度，应该选择合适的控制器，而不是一味选择先进的控制器；
- (5) 方便实际应用和实施。

根据各个自由度不同的特性，我们将为不同的自由度选择不同的控制器，选择依据如下：

(1) 对于 x , y , z 方向和艏向方向，这四个自由度是控制的重中之重，ROV 在动力定位过程中，基于平面运动假设，要求在这四个自由度上有较好的控制力度，能够达到足够的控制精度，需要克服洋流、阻尼力、反作用力等的外部干扰力，这就要求在这四个自由度上面，需要有快速响应、控制误差小、鲁棒性强等特点。由于这四个自由度上是非线性系统，而 PID 控制器是线性控制器，所以我们需要设计两个控制回路，分别是：偏差控制回路和补偿控制回路。从而把非线性问题转化为线性问题进行控制。PID 的线性控制具有快速响应、控制误差小、鲁棒性强等特点，因此我们在 x , y , z 方向和艏向方向将采用此控制方法。

(2) 对于横摇和纵倾方向，一般来 ROV 工作过程中需要保持水平面的运动，这就要求在横摇和纵倾两个自由度上面需要保持为：零。一般为了保证 ROV 在工作中不会出现“翻车”“横滚”等意外现象，入海前，都需要人为进行稳心的调整工作，使得横摇角和纵倾角保持为零。由于 ROV 的设计使得在横摇和纵倾方向有较大的稳心距，因此在

重力和浮力的作用下，本身有着一定的自调节能力。在经过稳定性验证后，能够保证这两个自由度上能够抵御外界的大多数干扰，因此一般多数 ROV 在这两个自由度上不进行控制。本文中，为了进一步保证在这两个自由度在工作中的绝对稳定，为这两个自由度上设计了计算快速，简单的 PD 控制器。

3.2 轴向和艏向 PID 控制器设计

当前的大多数 ROV 都是采用 PID 控制的方法或者 PD 控制的方法进行运动控制。思路为分别对不同的自由度采用设计相应的控制器，然后根据多自由度的运动仿真情况不断通过经验试凑法的方法进行 PID 控制器参数的调节。

本文所研究的 ROV 根据不同自由度上的特点在分别四个自由度上进行 PID 控制，并且根据前一章内容的分析，在这四个自由度上面采用如图 3.2 所示的双闭环负反馈控制，其中偏差控制回路根据 ROV 的实际运动位置和期望位置之间的偏差进行负反馈调节，而补偿控制回路根据 ROV 的动态特性进行补偿性的调节。本章还对四个自由度上的控制器进行了仿真验证，证明其有效性。

3.2.1 PID 控制器的基本原理

PID 控制是当前研究最多的，最经典和最基本的线性控制方式。其原理简单、参数易整定、控制精度高、应用范围广、使用灵活等特点。同时由于其具有较强的鲁棒性，所以被广泛应用于工业和机械等控制领域。

PID 控制是利用了系统输出误差作为控制的输入，经过比例、积分、微分环节进行控制的输出，从而达到消除控制对象的误差的作用，由于其原理简单，在某些情况下，单独采用单闭环的 PID 控制，其效果不一定十分理想，如果能够对其控制环节进行动态的补偿，那么就能够很好的满足动态控制的要求。

PID 控制的原理框图如图 3.1 所示，系统由 PID 控制器和被控对象 ROV 组成。

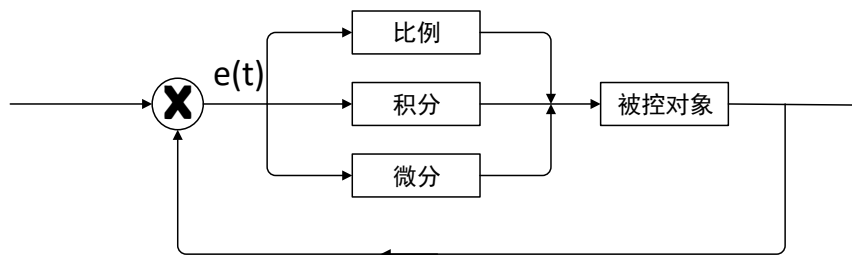


图 3.1 PID 控制原理框图

一般常见的 PID 控制器表达式为：

$$u(t) = K_p e(t) + \int_0^t K_I e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.1)$$

其中，

而 K_p 、 K_I 、 K_D 是 PID 控制其的控制参数，对应其中的比例、积分、微分环节， $u(t)$ 是控制器的输出量， $e(t)$ 作为给定值 $s(t)$ 和实际输出值 $r(t)$ 的偏差作为输入量，即：

$$e(t) = s(t) - r(t) \quad (3.2)$$

由公式 (3.1)，可以得出控制器的传递函数为：

$$G(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (3.3)$$

总的来说，PID 控制器由比例、积分、微分等三个环节组成，三个校正环节的作用如下：

(1) 比例环节 (K_p)：即时成比例的反应控制偏差信号，偏差一旦发生，控制器能够立刻对偏差产生控制作用。当 K_p 变大，系统的偏差信号误差就会减小，稳定性就能得到改善，系统的响应速度也会变快。

(2) 积分环节 (K_I)：积分环节主要用于改善系统的稳定性能，消除静差，积分 K_I 的强弱取决于积分时间常数 T_I ，因为 $K_I = 1/T_I$ ， T_I 越小，积分作用越强，反之越弱。

(3) 微分环节 (K_D)：此环节能够反映偏差信号的变化速率，并且利用变化速率进行预测控制，能够减小系统的超调量。还可以引入早期修正信号到系统做，减少系统的调节时间，从而增加控制响应速度。但当 K_D 过大时，系统抵抗干扰的性能就会降低，稳定性也会因此而下降。

3.2.2 PID 控制器的改进

从 PID 控制器的基本原理可知，PID 控制器属于线性系统，对于 ROV 这样非线性的复杂系统而言，还需要进行双闭环控制的改进，其中一个闭环控制是偏差外控制回路，另一个是补偿控制回路。外回路根据位置偏差进行负反馈修正，内回路根据 ROV 的动力学特性进行修正，使得闭环控制后的 ROV 能够变成一个更易于控制的系统，变成一个解耦的线性系统。控制原理图如图 3.2。

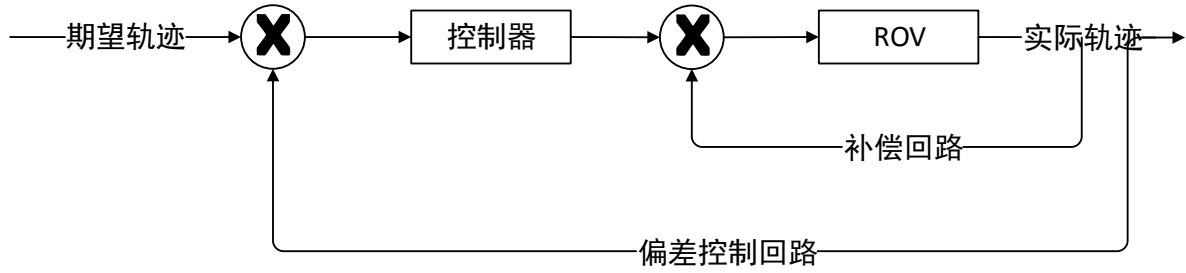


图 3.2 改进的双闭环控制回路

虽然得到了双闭环改进，但是对于 PID 控制系统而言，控制参数 K_P 、 K_I 、 K_D 的整定仍然对于控制器起到了决定性的作用。要确定 PID 控制器的参数，则需要 PID 控制系统的模型有足够精确。结合 PID 控制对于非现象耦合控制系统的控制实际经验，PID 的参数整定方法如下：

- (1) K_P 的数值越大，控制曲线的震荡周期越小，但是出现超调的现象就更容易；
- (2) K_P 的数值越大，控制曲线上升的时间就越短，速度就越快；
- (3) K_I 的数值越大，稳定性就越差，系统越容易出现超调的现象；
- (4) 当系统的输出曲线大于目标值的时候，应当适当减小 K_I ；
- (5) 当系统的控制曲线上升时间超过目标值的时候，应当适当增加 K_I ；
- (6) K_D 的数值越大，系统对外界的干扰就越敏感；
- (7) 当系统在输出曲线稳定后出现波动，应当适当增加 K_D ；

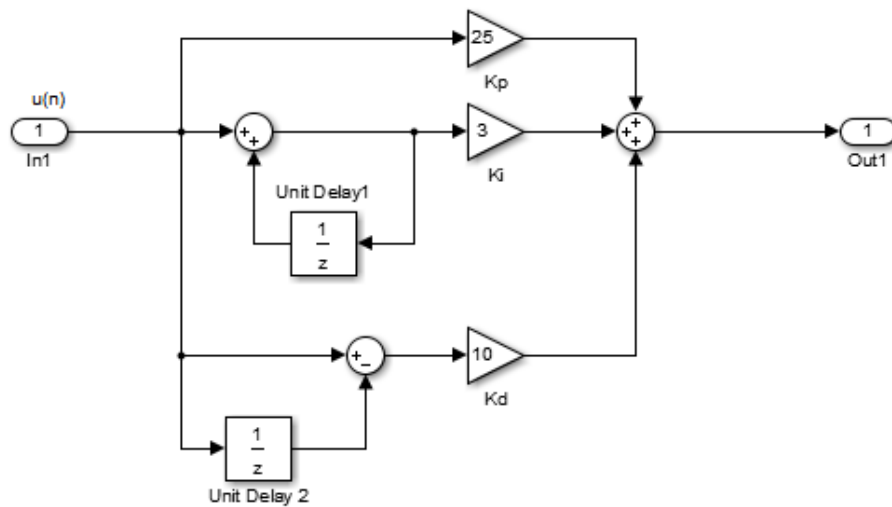


图 3.3 PID 的 Simulink 仿真结构图

经过经验整定,和根据实际输出情况以及我们根据实验需求的整定,我们选取的 PID 控制系统的参数分别为: $K_p = 25$; $K_I = 3$; $K_D = 10$;

Simulink 的 PID 控制仿真结构图如图 3.3。

本文对 PID 控制子系统的设计思路如下:采用最简单的 PID 控制系统设计,利用公式 (3.1) 进行相应的仿真设计。

3.3 横摇和纵倾方向 PD 控制器的设计

由前几章内容可知,对于不同自由度上面,应该采用更加合适的控制方式,对于横摇和纵倾方向,由于本文所研究的 ROV 有着较大的稳心距,在其自身重力和浮力的调节下,有着一定的自调节能力,再加上入海前的调试,使得在横摇和纵倾方向的控制不需要采用 PID 控制,简单的采用 PD 控制便能够达到控制要求。除此之外,PD 控制比起 PID 控制来说在运算上有着天然的优势,能够更快的进行调整和控制。

其控制表达式为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (3.4)$$

PD 控制器的传递函数为:

$$G(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_P + K_D s \quad (3.5)$$

通过经验和实验的整定以及根据实际控制需求的整定,我们选取 PD 控制系统的参数分别为: $K_p = 25$; $K_D = 10$;

Simulink 的 PD 控制仿真结构图如图 3.4。

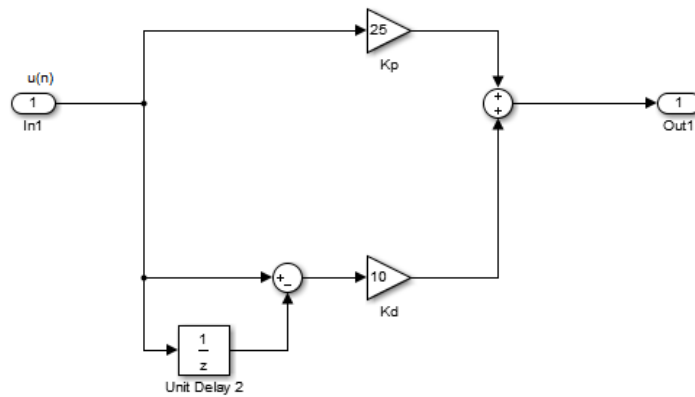


图 3.4 PD 的 Simulink 仿真结构图

3.4 本章小结

随着人类不断向海洋进行探索以及对海洋资源的不断开发,对于水下机器人在作业过程中的动力定位要求也会不断提高,特别是在有着干扰条件下的位姿控制对于我们来说是个严峻的挑战。本章主要介绍了对于 x , y , z 轴向和艏向 **PID** 控制器设计和横摇和纵倾方向 **PD** 控制器的设计,并且进行了仿真实验,通过实验展示了控制器设计的有效性,并且也验证了其控制效果能够达到所需要的控制要求。

4 Simulink 仿真与分析

在通过前面两章建立了运动学和运动学模型以及控制器的设计以后，我们需要利用软件对我们的设计进行验证，这里我们使用的软件是 Matlab2016 版本，利用的是里面的 Simulink 功能。并且我们还需要建立三种不同 ROV 的模型进行仿真比较，从而能够对比得出其中性能和控制上的差异，从而帮助和指导真实实验。

4.1 六自由度联合控制器设计

在第三章里面，我们介绍了单自由度控制器的设计，为了能够进行水下机器人的整体仿真，我们需要建立六自由度的联合控制器。

其中，对于不同的自由度需我们首要的要求就是要遵循互不干扰的设计总原则，这样才能保证每个自由度上控制的独立性。

其次，由于我们采用的双闭环负反馈控制，在设计控制器的过程中也需要考虑到这一点。

最后，考虑到整体性，我们把控制器设计到一个子系统里面方便。

以下是 Simulink 当中控制器的结构图如图 4.1:

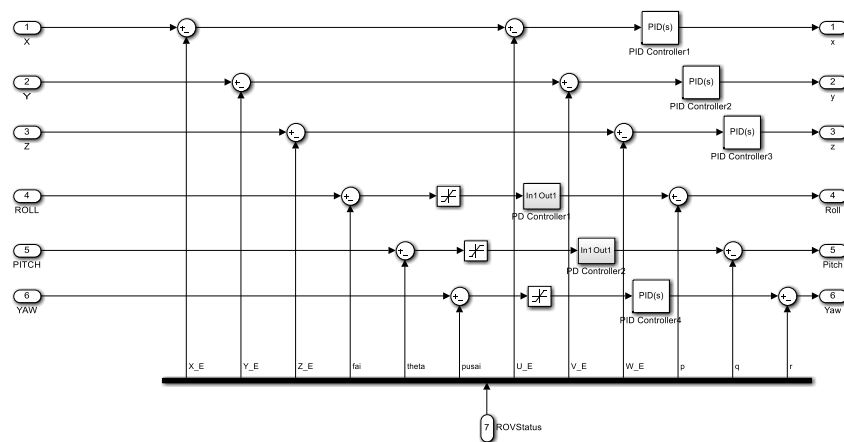


图 4.1 联合控制器的 Simulink 仿真结构图

对于联合控制器的设计，思路是采用双闭环设计，分别把当前 ROV 的位置信息： X_E , Y_E , Z_E , fai , $theta$, $pusai$ 和期望位置进行偏差计算，并且把 ROV 的速度信息进行相应的补偿计算后，利用单自由度 PID 控制以及 PD 控制，进行当前位姿的计算调整。

4.2 ROV 结构仿真设计

第二章主要讲述了水下机器人动力学和运动学的建模，现在需要对 ROV 进行 Simulink 的仿真，根据第二章的内容，我们对 ROV 进行模块化设计，模块之间采用参数进行值的传递，模块之间彼此黑箱，这样做的优点不仅有可读性强，而且方便修改和编辑。

水下机器人仿真结构中所涉及的模块化子系统有：① 雅可比转换矩阵模型；② ROV 的几何模型；③ 包含重力和浮力的恢复力模型；④ 洋流参数模型；⑤ 水动力模型；⑥ 推进系统模型；⑦ ROV 所受力和速度的运动学模型。

下文将分别进行详细描述。

4.2.1 雅可比转换矩阵模型

雅可比转换矩阵模型中，输入的参数有：① 动坐标系下 ROV 的速度；② 动坐标系下 ROV 的加速度；③ 初始位置；④ 初始姿态。

输出的参数有：① 定坐标系下 ROV 的速度；② 定坐标系下 ROV 的加速度；③ 当前 ROV 所处位置；④ 当前 ROV 的姿态。

模型结构图如图 4.2。

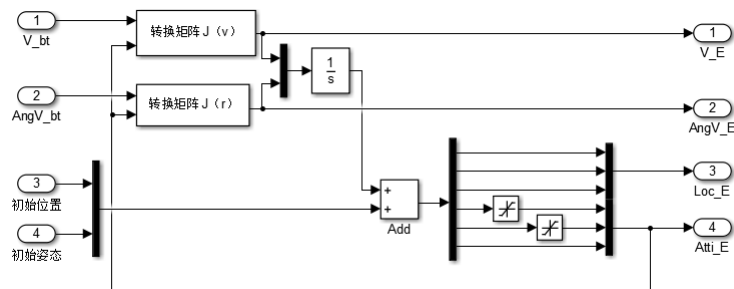


图 4.2 雅可比矩阵的 Simulink 仿真结构图

本文在设计其模块时思路如下：对于 $J(v)$ 和 $J(r)$ 子系统，采用了前文公式 (2.2) 和公式 (2.4)。由于本文主要研究 X, Y, Z 以及艏向四个自由度，因此在输出的时候需要对姿态当中的横滚和纵倾进行限制，利用一个简单的范围函数模块进行了限制输出。

4.2.2 ROV 的几何模型

ROV 的几何参数模块只需要输入和输出进行关联就可以了。

本文涉及到三个不同结构的 ROV，因此三个 ROV 的几何参数分别见表 4.1，4.2，4.3：

表 4.1 I 型 ROV 参数

内容	数据		
ROV 浮体长宽高 LWH（米）	0.6	0.45	0.15
转动惯量 $[I_x; I_y; I_z]$ （千克×平方米）	4.2437	6.098	2.067
浮心 $[x; y; z]$ （动坐标系坐标）	0	0	-0.05
重心 $[x; y; z]$ （动坐标系坐标点）	0	0	0
质量（千克）	126.665		
浮力（牛）	1242.3		

表 4.2 II 型 ROV 参数

内容	数据		
ROV 浮体长宽高 LWH（米）	0.5	0.3	0.1
转动惯量 $[I_x; I_y; I_z]$ （千克×平方米）	2.5687	3.2197	3.0778
浮心 $[x; y; z]$ （动坐标系坐标）	0	0	-0.05
重心 $[x; y; z]$ （动坐标系坐标点）	0	0	0
质量（千克）	38.775		
浮力（牛）	379.995		
力臂 $d; e; g$	0.15	0.25	0.35

表 4.3 III 型 ROV 参数

内容	数据		
ROV 浮体长宽高 LWH（米）	0.5	0.35	0.15
转动惯量 $[I_x; I_y; I_z]$ （千克×平方米）	2.6891	3.2375	3.2918
浮心 $[x; y; z]$ （动坐标系坐标）	0	0	-0.05
重心 $[x; y; z]$ （动坐标系坐标点）	0	0	0
质量（千克）	67.143		
浮力（牛）	658.002		

4.2.3 恢复力模型

恢复力模型的输入参数包括：① 重心；② 浮心；③ 横滚姿态角和纵倾姿态角；④

重力；⑤ 浮力。

输出的参数包括：① 恢复力 F_{rest} ；② 恢复力矩 M_{rest} 。

恢复力模型需要调用 MATLAB 函数模块，具体结构图如图 4.3：

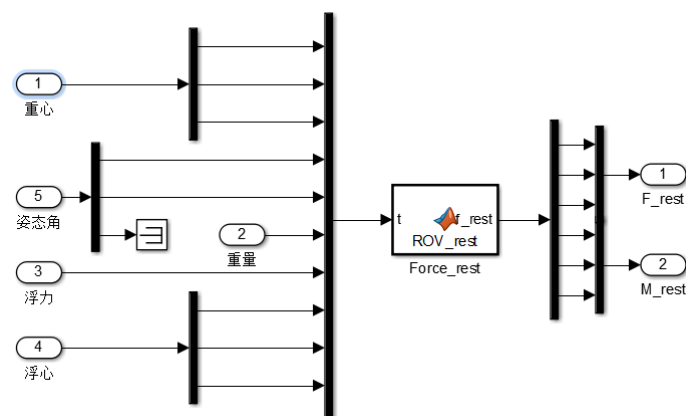


图 4.3 恢复力模型结构图

在模型中，利用 Simulink 的 Mux 模块进行数据的整合，输入 MATLAB 函数文件中进行相应的计算，在 MATLAB 函数文件中，先对数组进行拆分，再根据公式 (2.19) 进行相应的计算。计算完成后，利用 Demux 模块进行相应的力和力矩的输出。

4.2.4 洋流参数模型

在海洋环境中，ROV 所受到的主要力来源于洋流所产生的作用力，对于洋流参数模型，由于洋流模型的不确定性，本文所需要的洋流模型参数在仿真当中将由人为进行设定。其模型与 ROV 的参数模型类似，具体洋流参数见表 4.4。

表 4.4 洋流参数

内容	数据		
速度 $[V_x; V_y; V_z]$ (米/秒)	0.1	0.1	0.1
角速度 $[w_x; w_y; w_z]$ (rad/秒)	0	0	0
速度的加速度	0	0	0
角速度的加速度	0	0	0

4.2.5 水动力模型

水动力模型输入的参数有：① ROV 的速度；② ROV 的角速度；③ ROV 速度的

加速度；④ ROV 角速度的加速度；⑤ ROV 几何参数；⑥ 水密度。

输出参数包括：① 水动力 F_{water} ；② 水动力矩 M_{water} 。

恢复力模型需要调用 MATLAB 函数模块，具体结构图如图 4.4。

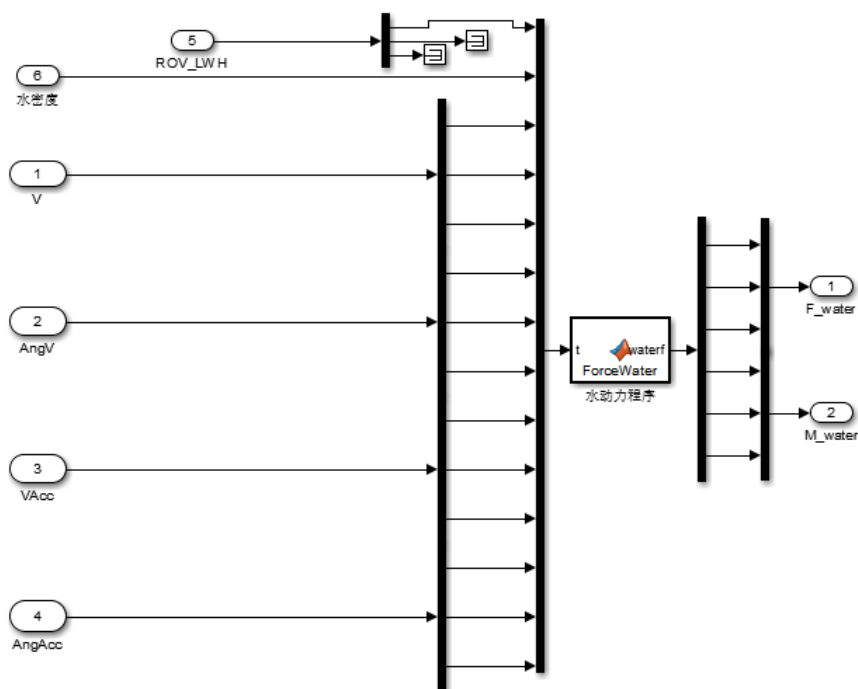


图 4.4 恢复力的 Simulink 仿真结构图

4.2.6 ROV 所受力和速度的运动学模型

ROV 运动学模型输入的参数包括：① ROV 所受力 F ；② ROV 所受力矩 M ；③ ROV 质量；④ 转动惯量。

输出参数包括：① ROV 的速度；② ROV 的角速度；③ ROV 速度的加速度；④ ROV 角速度的加速度。

运动模型的建立参考运动学方程式 (2.30)。

4.3 ROV 的仿真控制对比

不同结构的 ROV 在结构设计中主要的不同在于推力系统的差异和几何体型的差异，因此对于不同的推进系统，在 Simulink 仿真过程中需要对其重新进行设计，并且采用相同的控制器对不同结构的 ROV 进行控制，从而对比其中的差异。控制方面的对比主要

为控制曲线的对比。

控制的目标是从释放位置(大地坐标原点)在抵抗干扰力的作用下趋近于目标位姿,目标位姿设定(大地坐标系下)为: $X=3$ 米; $Y=2$ 米; $Z=1$ 米; 艏向角度 $=30^\circ$; 之所以仅仅进行 X , Y , Z 轴以及艏向四个自由度的对比,是因为在下水前, ROV 都会进行稳心的调整和整定,能够保证在纵倾和横滚两个自由度上保持一定的稳定性,并且不会发生较大的变化。基于这样的工程实际情况,我们在进仿真的过程中也只针对 X , Y , Z 轴以及艏向四个自由度的位移、速度、加速度的控制曲线进行对比。

下文是同参数 PID 控制器下,不同结构 ROV 的位移控制曲线对比如下图 4.5, 4.6, 4.7, 4.8。其中, a 图标示 I 型 ROV 的控制曲线; b 图标示 II 型 ROV 的控制曲线; c 图标示 III 型 ROV 的控制曲线。

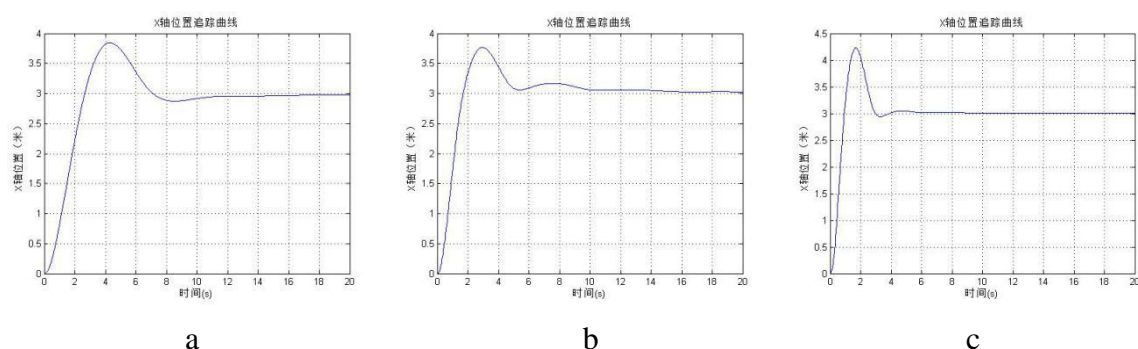


图 4.5 X 轴方向位移控制曲线

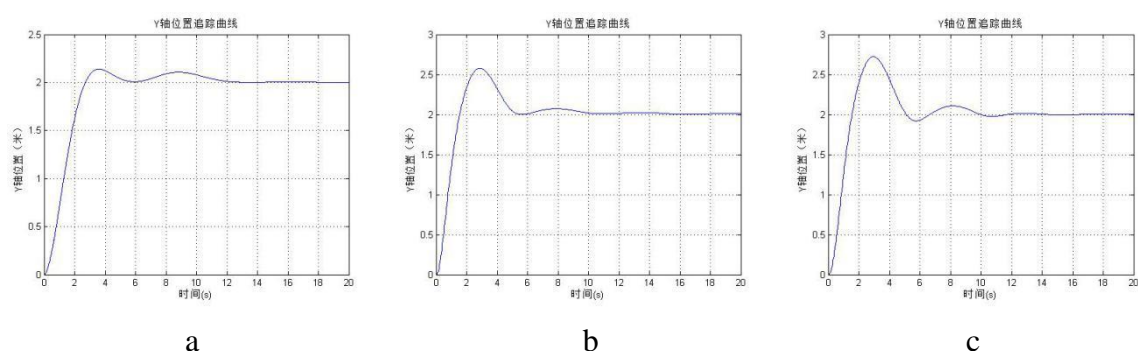


图 4.6 Y 轴方向位移控制曲线

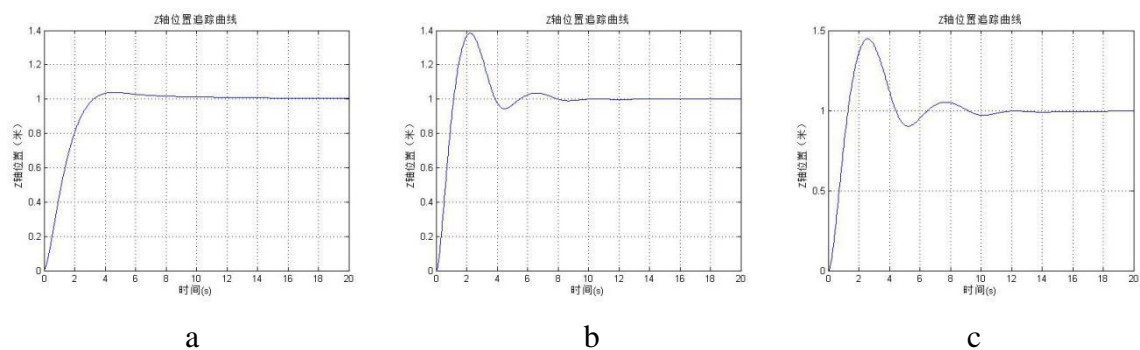


图 4.7 Z 轴方向位移控制曲线

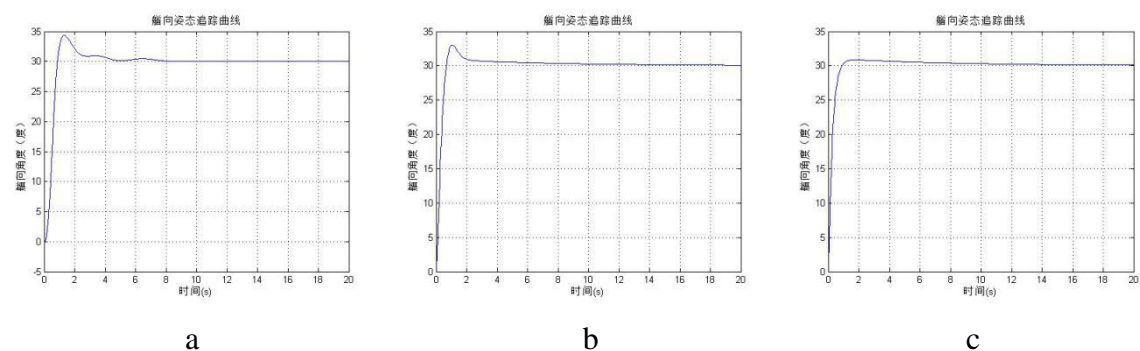


图 4.8 艏向位移控制曲线

根据动力定位的位姿控制曲线可以输出其中的速度控制曲线如图 4.9, 4.10, 4.11, 4.12。其中, a 图标示 I 型 ROV 的控制曲线; b 图标示 II 型 ROV 的控制曲线; c 图标示 III 型 ROV 的控制曲线。

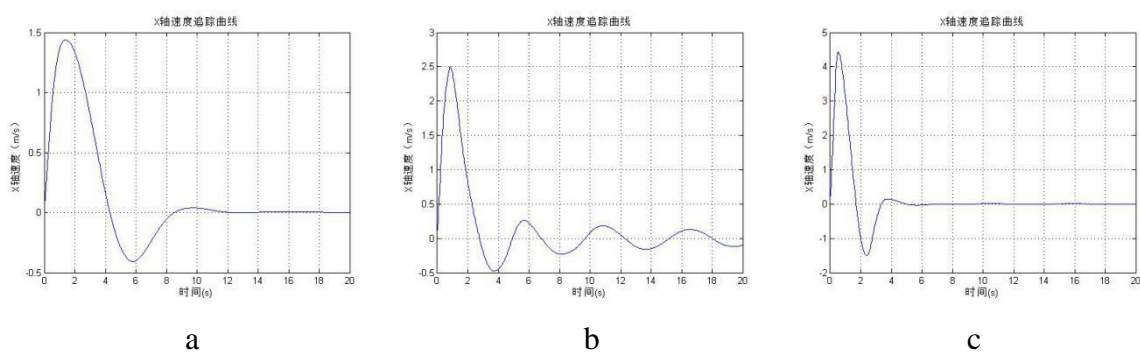


图 4.9 X 轴方向速度控制曲线

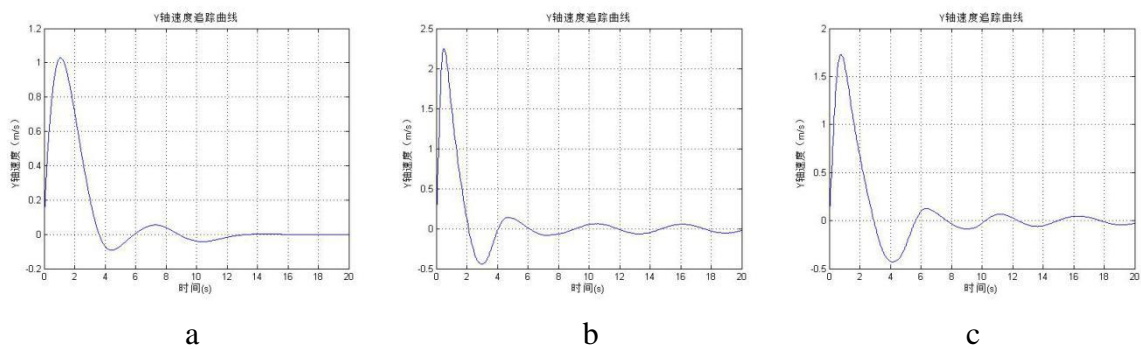


图 4.10 Y 轴方向速度控制曲线

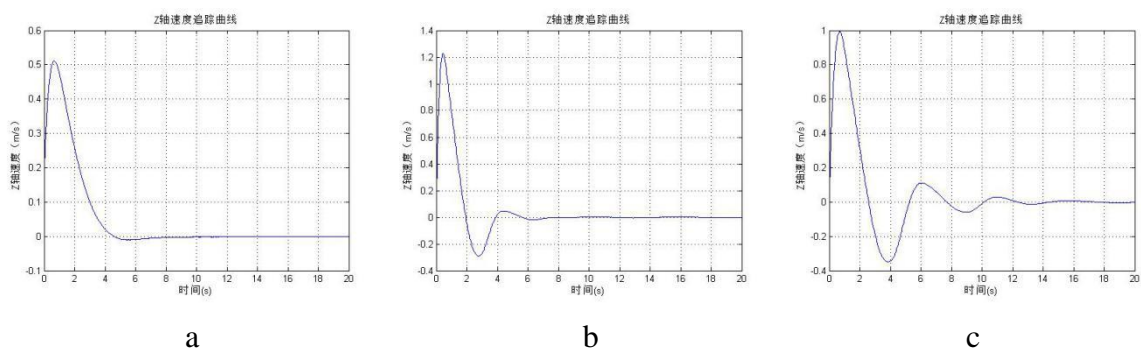


图 4.11 Z 轴方向速度控制曲线

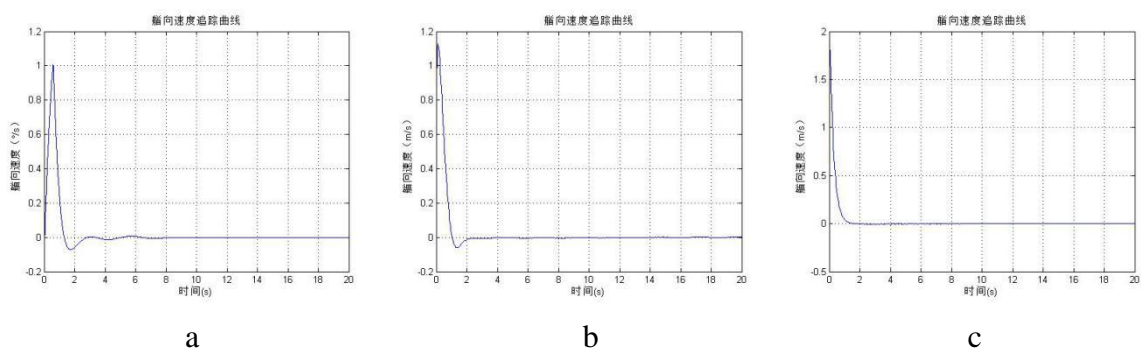


图 4.12 艏向速度控制曲线

根据动力定位的速度控制曲线可以输出其中的加速度控制曲线如图 4.13, 4.14, 4.15, 4.16。其中, a 图标示 I 型 ROV 的控制曲线; b 图标示 II 型 ROV 的控制曲线; c 图标示 III 型 ROV 的控制曲线。

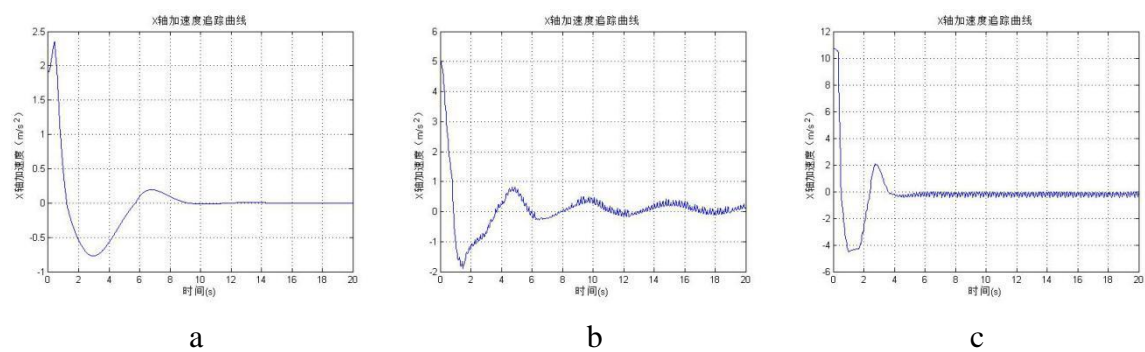


图 4.13 X 方向加速度控制曲线

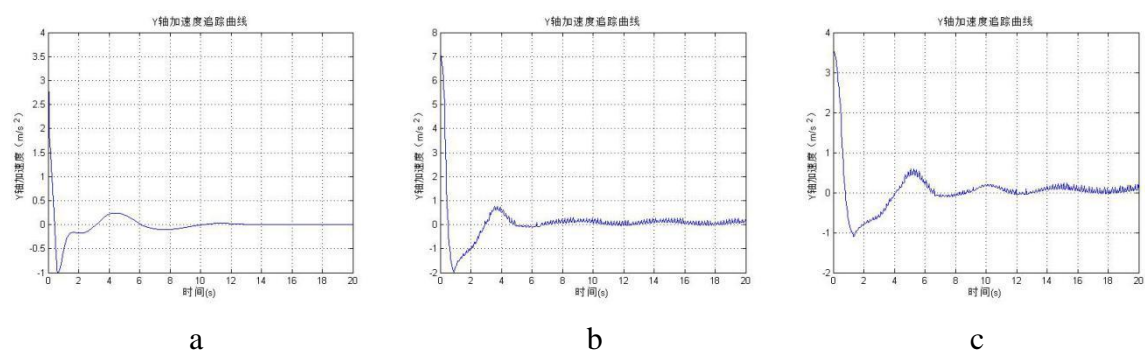


图 4.14 Y 方向加速度控制曲线

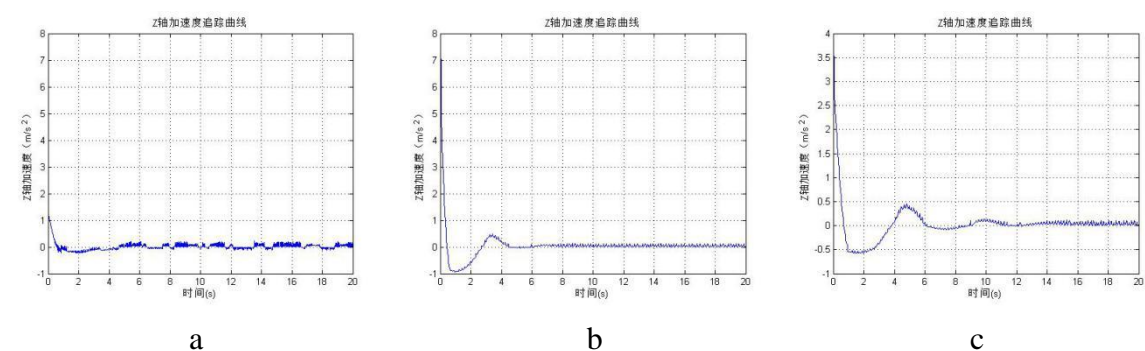


图 4.15 Z 方向加速度控制曲线

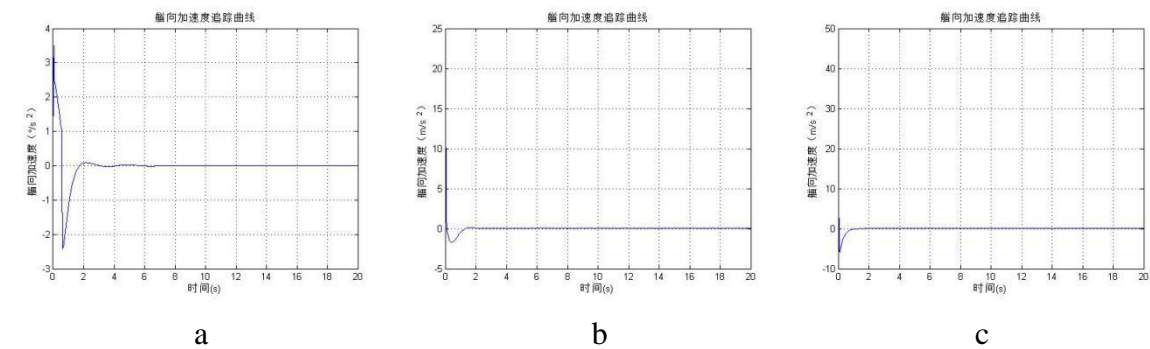


图 4.16 艏向加速度控制曲线

4.4 ROV 性能评价与分析

ROV 的性能评价与分析其实含义非常广泛，ROV 性能评价指标包括：动力性能指标，稳定性能指标，续航性能指标，负载性能指标等等，这些性能指标能够全面的评价一个 ROV 的优劣，在工作过程中的好坏。根据本文仿真的情况而言，本文只针对不同结构的 ROV 的性能包括 ROV 的动力性能和 ROV 的稳定性能进行评价与分析。

由于本文的 ROV 具有一定的工程实践背景，在进行评价分析前，本文再次对所研究的三种不同结构的 ROV 做一个总体情况的介绍。各 ROV 的介绍如表 4.5，4.6，4.7。

表 4.5 I 型 ROV 情况介绍表

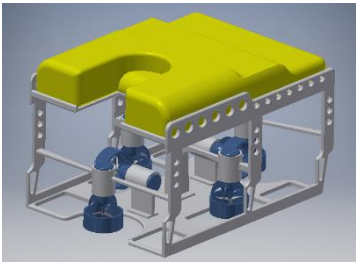
示意图	工作目标与参数	实际工程用途
	智能操作水下机器人 重量 126.665kg 设计工作水深 500 米	海洋科考 救助打捞 水下工程 水下作业 管线调查

表 4.6 II 型 ROV 情况介绍表

示意图	工作目标与参数	实际工程用途
	智能观察级 ROV 重量 38.775kg 设计工作水深 300 米	水下调查 水库大坝监测 简单作业

表 4.7 III 型 ROV 情况介绍表

示意图	工作目标与参数	实际工程用途
	小型工作级 ROV 重量 67.143kg 设计工作水深 400 米	海洋科考 水下工程 简单作业 管线调查

4.4.1 动力性能评价与分析

动力性能主要是对关于运载器的运动和动力方面能力的反应。本文主要评价与分析的是 ROV 的动力定位性能。

动力定位性能可以从前章节的动力定位的位移，速度，加速度控制曲线进行对比分析。根据控制曲线，本文先从 X, Y, Z, 艏向位移收敛时间进行分析，具体收敛参数见表 4.8。

表 4.8 不同结构 ROV 收敛时间表

收敛时间（秒）	I 型 ROV	II 型 ROV	III 型 ROV
X 轴位移	18	15	8
Y 轴位移	14	15	12
Z 轴位移	12	13	16
艏向位移	10	14	14

对于三种不同结构的 ROV 在动力定位性能方面的分析如下：

在 X 轴动力定位方面，由于 I 型 ROV 只具备一个推进器进行 X 轴推力的输出，因此，收敛时间相比于其他两个结构的 ROV 来说收敛时间最长；III 型 ROV 在 X 轴方向具有四个推进器，所以收敛时间最短；由于 II 型 ROV 在 X 方向只有两个推进器，所以收敛时间次之。由此可以得出在 X 轴方向动力性能的排序为：III 型 ROV > II 型 ROV > I 型 ROV。

在 Y 轴动力定位性能方面，III 型 ROV 具有四个推进器，所以收敛时间依旧最短；I 型 ROV 和 II 型 ROV 虽然在 Y 轴上都有两个推进器，但是由于 II 型 ROV 在 Y 轴上的推力只是两个推进器的投影分量，因此，I 型 ROV 的收敛速度略快于 II 型 ROV。由此可以得出在 Y 轴方向动力性能的排序为：III 型 > I 型 ROV > II 型 ROV。

在 Z 轴动力定位上，由于 I 型 ROV 在 Z 轴方向具有四个推进器进行推力输出，所以 I 型 ROV 的收敛速度最快，而且收敛曲线较为平滑；II 型 ROV 在 Z 方向上具有两个推进器，所以 II 型 ROV 的收敛速度次之；III 型 ROV 由于在 Z 轴上只有一个推进器，所以收敛速度最慢。由此可以得出在 Z 轴方向动力定位性能为：I 型 ROV > II 型 ROV > III 型 ROV。

在艏向动力定位上，II 型 ROV 和 III 型 ROV 的收敛速度相仿，I 型 ROV 收敛速度最快但是收敛过程有较大波动。

4.4.2 稳定性能的评价与分析

稳定性能主要反映的是在动力定位运动的过程中，ROV 在收敛过程中所保持平稳的能力，主要在于速度控制曲线的平滑程度，本文为了直观的反应控制曲线平滑程度，用控制曲线的波峰数和平滑程度进行负相关关联，即控制曲线的波峰数越多，平滑程度越低，进而说明 ROV 的稳定性能越低。具体不同结构 ROV 的波峰数见表 4.9。

表 4.9 不同结构 ROV 速度控制曲线波峰数

波峰数（个）	I 型 ROV	II 型 ROV	III 型 ROV
X 轴速度	2	4	2
Y 轴速度	2	4	4
Z 轴速度	1	2	3
艏向速度	3	2	1

对于不同结构的 ROV，稳定性能分析如下：

在 X 轴的稳定性上, I 型 ROV 和 III 型 ROV 的波峰数相同, 运动稳定性较好; II 型 ROV 的波峰数多, 说明稳定性较弱。

在 Y 轴的稳定性上, I 型 ROV 的波峰数最少, 稳定性最高; II 型 ROV 和 III 型 ROV 的波峰数相同, 且多于 I 型 ROV, 说明这两种 ROV 的稳定性较弱;

在 Z 轴的稳定性上, I 型 ROV 波峰数最少, 说明稳定性最高; III 型 ROV 的波峰数最多说明稳定性最弱; II 型 ROV 稳定性居中。

在艏向的稳定性上, III 型 ROV 波峰数最少, 说明稳定性最高; I 型 ROV 的波峰数最多说明稳定性最弱; II 型 ROV 稳定性居中。

4.5 本章小结

本章主要介绍了基于不同结构 ROV 的 Simulink 仿真, 包括联合控制器的设计, 不同结构 ROV 的结构设计, 并且通过仿真, 进行了控制方面和性能方面的对比与评价, 得出更经济有效的符合实际情况的 ROV 结构, 从而对实际实验进行有效的指导作用。

5 总结与展望

本文以 ROV 为实际工程背景，研究了水下机器人的动力定位以及基于动力定位的位姿控制，并且利用 Simulink 进行了仿真模拟。然而在研究的过程中，仍然有许多方面存在不足，因此需要进行总结和未来的展望。

5.1 设计工作的总结

本文主要针对水下航行器动力定位的位姿控制的设计进行了研究，分别从 ROV 的运动学和动力学建模、控制器设计等两个方面阐述了自己的研究，并且利用 MATLAB 进行了 ROV 结构的仿真和控制器仿真试验。主要研究成果如下：

(1) 从整体的角度探讨了 ROV 的动力定位原理，并且对风浪流等环境干扰和 ROV 运动学和动力学方程进行了建模，并且利用编程算法求解六自由度运动学方程，为后文的 ROV 仿真设计提供了思路和理论基础。

(2) 针对不同的自由度进行不同的控制器设计，利用 PID 控制器控制 x 、 y 、 z 轴向和艏向四个自由度，并且利用 PD 控制器控制横滚和纵倾两个 ROV 能够自调节的自由度，这样做的优势不仅能够节省计算时间，而且能够高效的达到控制的要求，并且实现起来比较方便简洁，又能够很方便的根据实际情况进行调整和参数的整定。

(3) 根据之前的成果，进行 Simulink 仿真实验，分别对三种不同结构的 ROV 进行了建模，并且从控制的角度和从性能的角度对仿真结果进行了对比分析。通过仿真模拟实验和 3D 演示实验，能够更加直观的反应控制的成果，总体而言已经达到了基于动力定位的位姿控制的要求。

本次设计工作总体来说圆满完成了既定的目标，并且还超额完成了对于 ROV 的 Simulink 整体设计和 ROV 的 3D 构型以及演示实验等任务。可以说，作为本科生，已经极尽本人的所学。

5.2 未来展望

受到本科生所学知识的限制以及时间的限制，在整个毕业设计过程中，虽然已经超额完成了设计要求和任务，但是仍很多值得反思和改进的地方，在未来可以进一步加以完善。

(1) 对于动力学和运动学建模，由于对模型进行了一定程度的简化，其中简化了海洋中不确定暗流和 ROV 所受的牵引力反作用力等外部力的作用，所以可能和实际海洋

环境中的情况有所偏差。在未来的研究中，对于动力学和运动学方程的求解还需要考虑到海洋当中的各种不确定因素的对模型的影响以及实际实验中所受到的力的影响，这样能更加真实的反应现实的情况。当然这样的误差也可以根据实际实验中所出现的实际情况进行调整。从试验中发现模型中新的问题并且把这些问题带入到模型中从新计算。

（2）对于控制器的设计，本文受到所学知识的限制，只利用了 PID 和 PD 这两种最基本和简单的控制方法对 ROV 的实时非线性系统进行控制，虽然在仿真实验中采用了双闭环负反馈的方式进行偏差校正和补偿校正，但是从控制角度而言，仍然没有达到快速的控制效果和极度的稳定性。因此，综合了前人的研究和自己对 ROV 的理解，在艏向和定深两个自由度上可以采用非线性干扰观测器(NDO)的自适 Terminal 滑模变结构控制器进行控制，该控制器除了有较强的鲁棒性之外，还能够在任意要求的时间之内进行轨迹追踪和收敛。

（3）对于 Simulink 仿真，由于对推进系统知识方面了解的不够，所以采用了较为简单的推力分布子系统进行速度，位移和推力，力矩的对应分布关系，而在实际过程中，多采用直流无电刷推进器，而简化的模型必定造成仿真和实际情况的不相符，这里也是未来可以进行改进的地方。

参 考 文 献

- [1] 周卫详. 深海作业型 ROV 建模方法的研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2015
- [2] 汤士华, 李硕, 吴清潇等. 一种基于视觉的水下机器人动力定位方法[J]. 海洋工程, 2006, (02):112-117+122.
- [3] 王宏健, 王晶, 边信黔等. 基于组合 EKF 的自主水下航行器 SLAM[J]. 机器人, 2012, (01):56-64.
- [4] 赵志高, 杨建民, 王磊等. 动力定位系统发展状况及研究方法[J]. 海洋工程, 2002, (01):91-97.
- [5] 杨睿. 水下机器人建模与鲁棒控制研究[D]. 中国海洋大学, 2015.
- [6] 王婷. 水下航行器动力定位控制[D]. 西北工业大学, 2006.
- [7] Bailey, T., & Durrant-Whyte, H. F. (2006). Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II[D], state of the art. IEEE Robotics and Automation Magazine, 13(3), 108 - 117.
- [8] Burguera, A., Oliver, G., & González, Y. (2010). Scan-based SLAM with trajectory correction in underwater environments. [J] In IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS) (pp. 2546 - 2551).doi:10.1109/IROS.2010.5649492.
- [9] Angelos Mallios, Pere Ridao, David Ribas, Emili Hernández. Scan Matching SLAM in Underwater Environments[J]. Auton Robot (2014) 36:181 - 198
- [10] Estrada, C., Neira, J., & Tardós, J. D. (2005). Hierarchical SLAM: Real-time accurate mapping of large environments. [J] IEEE Transactions on Robotics, 21, 588 - 596.
- [11] 张晓超, 董玉红. 基于 MATLAB/Simulink 的机器人运动学仿真[J]. 现代制造工程, 2005, (S1):61-62.
- [12] Midhin Das Thekkedan, Cheng Siong Chin, Wai Lok Woo. 水下机器人动力定位模糊逻辑控制的虚拟现实仿真 (英文) [J]. Journal of Marine Science and Application, 2015, (01):14-24.
- [13] 边宇枢, 高志慧, 负超. 6 自由度水下机器人动力学分析与运动控制[J]. 机械工程学报, 2007, (07):87-92.
- [14] 王仲民, 蔡霞, 崔世钢. 一种四自由度机器人的运动学建模[J]. 天津职业技术师范学院学报, 2003, (04):1-4.
- [15] 刘慧婷, 张明, 曾庆军等. 水下机器人抗波浪扰动动力定位研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, (01):199-203.
- [16] 李晨曦. 水上航行器动力定位系统的控制算法研究[D]. 江苏科技大学, 2014.
- [17] G. Campa, M. Sharma, A. Calise, M. Innocenti, "Neural Network Augmentation of Linear Controllers with Application to Underwater Vehicles" American Control Conference 2000[J], June 2-4, 2000 San Diego CA, USA.

- [18] 冯常奇, 罗刚. PID 和预测控制两种方法的比较[J]. 武汉船舶职业技术学院学报, 2013, (01):52-55.
- [19] 黄俊峰, 邢志伟, 李一平. 基于超短基线的缆控水下机器人动力定位[J]. 控制工程, 2003, 9(6):75-78
- [20] 卢佳佳. 船舶动力定位系统控制策略研究及应用[D]. 江苏科技大学, 2013.

致 谢

经过半年的毕业设计，终于完成了这篇论文。在此，我要向我的毕业设计导师，大连理工大学海洋科学与技术学院的指导教师曾岑老师表示最真诚的感谢和感激。您对学术研究严谨认真的态度，和对我一直以来的高要求严标准，深深影响着我，也给我未来的学术研究打下了坚实的基础。

从选题开始，您就对我未来的发展和所选的题目给予了很多指导和帮助。在我初期对题目迷茫和走偏的时候，您的提点，及时让我对所设计的题目有了正确而清醒的认识。通过每周一次的组会，您总会给我提供最中肯和有效的整改建议，也让我通过组会对我自己的课题以及课题组里面其他同学相关领域的研究有了进一步深入的了解，可以说，过程虽然辛苦，但是却收获良多。

在做毕业设计的过程中，还要感谢研究生李真学长、刘健学长对我提供的帮助和指导；以及感谢张陶、肖鑫同学和我在这个过程中不断讨论产生的思想的火花，帮助我更好的加深了对于 ROV 六自由度运动方程和 Simulink 的理解。

感谢海洋学院岳前进院长对我毕业设计的关怀和对我严格的要求。

感谢盘锦校区海洋科学与技术学院。

感谢大连理工大学。

最后要感谢我的父母，大学四年，你们对我的不断鞭策让我明白人生就是一个不断奋斗的过程，虽然艰辛，但是开出的花终将美丽！我也会带着这种“一直在奋斗，从未曾停歇”的精神一直、一直的走下去！

再次感谢所有对我提供帮助的老师，同学，家人！