

# ABSTRACT

Marine electric propulsion device is the researching subject in this paper. AC asynchronous motor, controlled by TMS320LF2407 DSP for variable speed drive, is used to simulate screw propeller characteristics through setting up mathematic model. CC-Link field bus and serial communication are applied to achieve the real-time data transmission among the equipments in marine electric propulsion system. Under the surrounding of Windows, the monitoring human-machine interface of marine electric propulsion system is developed by Visual Basic.

This paper is composed of six chapters. Chapter 1 introduces the project background; Chapter 2 discusses the designing of marine electric propulsion equipments simulation, including equipments choosing and installation; Chapter 3 introduces the screw propeller and motor characteristics, and illuminates the method of AC asynchronous motor simulated as screw propeller based on the mathematic model and experiment data of motor and screw propeller used in this project. Chapter 4 discusses the varying speed control of the simulated motor based on DSP, including the hardware and software designing and testing. Chapter 5 introduces the monitoring platform of marine electric propulsion system. CC-Link field bus and serial communication are applied to achieve the real time data transmission, and the human-machine interface is also developed. Chapter 6 summarizes the dissertation and present prospects.

It's proved that screw propeller simulated motor can achieved the expected characteristics under the given propeller condition and the monitoring platform works well which can achieve the function of real-time detecting of marine electric propulsion system through a great deal of experiment.

**KEYWORDS:** Electric propulsion, Propeller, DSP, Real-time monitoring

## 论文独创性声明

本论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。论文中除了特别加以标注和致谢的地方外，不包含其他人或其他机构已经发表或撰写过的研究成果。其他同志对本研究的启发和所做的贡献均已在论文中作了明确的声明并表示了谢意。

作者签名： 高国娟 日期： 2006.6.13.

## 论文使用授权声明

本人同意上海海事大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以上网公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。保密的论文在解密后遵守此规定。

作者签名： 高国娟 导师签名： 邵 日期： 2006.6.13.

## 第一章 引言

### 1. 1 课题背景及来源

20 世纪 80 年代中期以来,随着电力电子技术、电机、交流调速技术和数字控制技术的发展,船舶电力推进系统在调节性能、机动性、运行效率、推进功率等方面都有突破性进展,应用范围不断扩大,引起了国际造船和航运界的重视。我国很多高校、船舶研究机构以及船舶制造厂纷纷进行船舶电力推进系统的研究。其中对研究结果进行反复测试与验证是对该系统研究的重要环节之一。此类试验过程往往需要在真实复现船舶各种不同工作状态下进行,即令船舶螺旋桨运行在不同的工况,这对试验条件提出了很高的要求,大大增加了研究成本。针对此矛盾,本课题设计了船舶电力推进装置仿真系统,采用异步电机代替真实螺旋桨,应用 DSP 实现螺旋桨仿真异步电机的控制,使其真实复现螺旋桨工作特性。同时本课题还对船舶电力推进装置实时监控进行了研究和设计。

本课题得到了上海市教委科研项目——“船舶电力推进混合仿真系统”相关研究资金的支持。

### 1. 2 课题研究领域的国内外现状

#### 1. 2. 1 船舶电力推进系统的发展

随着电力电子技术的日益成熟,船舶电力推进系统发展突飞猛进。上个世纪 90 年代国际上几个主要的设计公司如: ABB、西门子、阿尔斯通、STN-ATLAS 公司,在船舶电力推进的开发方面展开了激烈的竞争,90 年代中期相继在推进机械装置上取得重大突破,各自推出了不同形式的吊舱结构。1990 年由芬兰 ABB 公司和 KvaernerMasa 船厂联合研制的 Azipod 系统开创了吊舱推进系统的先河。进入 21 世纪以来,Azipod 系统又有了新的发展<sup>[1]</sup>。然而目前我国的电力推进技术还处于起步阶段,电力推进技术的应用并不广泛,使用的新产品和船型不多,推进系统的全套设备一般都要由国外引进组装,核心技术仍掌握在外国公司手中。2000 年,上海爱德华造船有限公司为瑞典公司建造了一艘 19500 吨化学品船,名为“柏劳斯佩拉”,这是我国制造的首艘吊舱式电力推进船舶。2002 年广船国际为 COSCO 建造的 18000 吨级半潜船“泰安口”,是中国建造的第二艘电力推进船舶,采用两套 SSP 吊舱电力推进系统,由德国 SIMENS 公司和 Schottel 公

司联合研制，采用双螺旋桨形式，分别装在一加长轴的两端，转向相同，吊舱尺寸不超过螺旋桨直径的 30%~40%，设有船艏侧推器两套，每套功率 800KW。“泰安口”号的姐妹船“康盛口”号也采用了电力推进方式<sup>[2]</sup>。

本课题的展开，有利于国内船舶电力推进系统的研究，可大大降低研究成本，为系统的测试过程提供更多的便利。

### 1. 2. 2 电力电子技术的发展

电力电子技术是使用电力电子器件对电能进行变换和控制的技术。进入 90 年代电力电子器件的研究和开发已进入高频化，标准模块化，集成化和智能时代。理论和试验证明电气产品的体积与质量反比于供电频率的平方根，频率提高对其设备的制造省材，运行节能和系统性能改善意义十分深远。电力电子器件高频化是其创新的主导方向，硬件结构的标准模块是器件发展的必然趋势。目前先进的模块已经包括开关元件和与其反向并联的续流二极管在内及驱动保护电路多个单元，并都以标准化和生产出系列产品，在一致性与可靠性上达到极高的水平。现日本三菱、东芝及美国的国际整流器公司已有成熟的 IPM 智能化功率模块产品推出<sup>[3]</sup>。

电力电子技术随着新元器件的研发及现代计算机、控制技术的迅速发展而应用领域更加广泛，应用性能更加完善可靠，并引起了电力系统的重大变革，新的大功率电力电子器件的研发和应用将成为 21 世纪电力研究的前沿。

### 1. 2. 3 变频调速技术的发展

20 世纪 60~70 年代，随着电力电子技术的发展，使得采用电力电子变换器的交流拖动系统得以实现，特别是大规模集成电路和计算机控制的出现，使高性能变频调速系统应运而生。为了改善交流电动机变压变频调速系统的性能，20 世纪 80 年代，交流调速已处于与直流调速相抗衡的地位，交—交变频调速、交—直—交变频调速、正弦波脉宽调制（SPWM）变频调速、空间电压矢量变频调速、直接转矩控制变频调速等系统飞速发展。我国从 20 世纪 90 年代开始，交流变频调速装置的研发有了迅速发展。由于变频调速具有良好的动态响应，调速精度高，通信功能强，工作效率较以往的交流调速方式更高，可以预见，在电气传动领域，变频调速将会取代直流调速<sup>[4]</sup>。

随着各种控制策略的不断提出，对电力电子器件及可高速处理复杂控制规律

的处理器要求越来越高,因此具有高频开关特性的电力电子器件以及高速数字处理器成为高性能变频调速系统的重要物质基础。

#### 1. 2. 4 数字控制器的发展

数字控制技术是自动控制理论和计算机技术相结合的产物。交流电机的数字控制系统包括信号的测量、滤波、整形,核心算法的实时完成及驱动信号的产生,系统的监控、保护等功能。

早期用于电机控制的数字控制器是各种类型的单片机,如 Intel 公司的 51 系列和 196 系列单片机,特别是 80C196MC 具有片内波形发生器(WFG),可产生 3 对独立的 PWM 信号,适合于交流电机控制。但是当需要大量数据计算处理或浮点运算,对快速性要求较高时,单片机则无法满足需求,为了进一步提高运算速度,80 年代初出现了数字信号处理器(DSP),使很多功能和算法可以采用软件技术来完成,为交流电机的控制提供了更大的灵活性,并使系统能够达到更高的性能。目前最常用的是德州仪器公司(TI)的 TMS320 系列 DSP。90 年代 TI 公司推出了一种专门用于数字电机控制(DMC)的 DSP 产品:TMS320F/C24X 系列,大大提高了运算速度,可用于对快速性和实时性要求很高的控制<sup>[5]</sup>。

#### 1. 2. 5 通讯技术的发展

现场总线是应用在生产现场、微机化测量控制设备之间实现双向串行多节点数字通信的系统,也被称为开放式、数字化、多点通信的底层控制网络。它在制造业、流程工业、交通等方面的自动化系统中具有广泛的应用前景。现场总线是 20 世纪 80 年代中期在国际上发展起来的,它实现了现场智能设备之间的互连通信网络,沟通了生产过程现场控制设备之间及其与更高控制管理层网络之间的联系。CC-Link 是三菱公司在 FA 领域中开发的现场网络,其最大通讯速度可达 10M,扫描时间不超过 4ms<sup>[6]</sup>,可靠性高、实时性强。

串口通信技术也是现代系统通讯中常用的通讯方式之一,可方便地实现 PC 机与下行设备间的数据传输。

### 1. 3 课题主要研究内容

本课题主要完成了以下一些工作：

- 船舶电力推进装置仿真的构建

依据船舶电力推进系统的结构组成，根据本课题的研究目的及要求，构建船舶电力推进装置仿真系统，以交流异步电机代替船舶螺旋桨负载。根据设计要求，完成设备的选型与采购，绘制设备接线图，完成设备安装。

- 螺旋桨仿真电机控制策略

根据船舶螺旋桨及异步电动机的工作特性，实验测得本课题异步电机机械特性，参考某艇螺旋桨参数，推导并确定本课题螺旋桨仿真电机的数学模型。依据此数学模型，应用 DSP 对仿真电机进行交流变频调速控制，实现模拟螺旋桨特性的目标。

- 船舶电力推进装置仿真实时监控设计

本课题利用现场总线及串口通信技术实现船舶电力推进装置间的实时数据传输，在上位 PC 机的 Windows 操作系统中，使用 Visual Basic 软件开发船舶电力推进装置仿真实时监控人机友好界面，并对此实时监控系统进行实验测试。

## 第二章 船舶电力推进装置仿真总体设计

### 2.1 船舶电力推进装置仿真结构

船舶电力推进，通常是由原动机带动发电机发电，然后直接或经变流器给推进电动机供电，由推进电机带动推进器旋转，使船舶运动。

目前的船舶电力推进系统主要由驱动用电动机，螺旋桨和变速控制系统三部分组成。驱动用电动机主要有两种：同步电动机和鼠笼式感应电动机。同步电动机用于低速传动，它可以和螺旋桨直接相连；鼠笼式感应电动机则用于中高速传动（额定转速范围在 900~1800r/min）它和螺旋桨之间通常需经减速装置连接。针对这两种不同的电动机开发出两种相应的变速控制系统<sup>[7]</sup>。

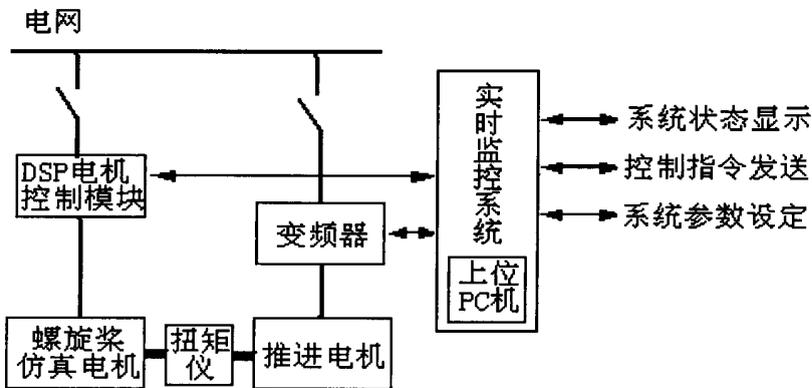


图 2-1 船舶电力推进装置原理结构图

依据船舶电力推进系统的结构组成，根据本课题的研究目的及要求，设计了船舶电力推进装置仿真。仿真系统中以交流异步电机代替真实螺旋桨负载，原理结构图如图 2-1。仿真装置由 DSP 电机控制模块（控制螺旋桨仿真电机）、变频器（控制推进电机）、螺旋桨仿真电机、推进电机、上位 PC 机、实时监控系统等部分组成。其中螺旋桨仿真电机控制部分采用目前使用较为广泛，数据处理能力强的 DSP 数字控制器，以实现螺旋桨仿真电机的交流变频调速控制。实时监控系统部分采用了具有更高实时性、可靠性的 CC-Link 开放式现场总线技术，以实现设备间数据实时传输，使用 RS-232 串口通讯完成上位计算机与 DSP、主站 PLC 间的数据交互。除此之外，本系统还包括上位 PC 机，PLC，扭矩测量仪，触摸屏，实船操纵台等设备。

上位 PC 机通过 RS-232 串行接口与主站 PLC、DSP 电机控制板进行数据交互，应用 Visual Basic 软件开发船舶电力推进人机友好监控平台，通过该监控平

台对系统参数进行初始设置,对螺旋桨工况进行设定,通过此平台对船舶运行状态进行监视及指令控制等。DSP 电机控制板通过上位 PC 机获得螺旋桨转速、螺旋桨设定工况等相关参数后,根据螺旋桨仿真电机数学模型进行数据处理,对仿真电机进行交流调速,模拟该工况螺旋桨工作特性,同时将螺旋桨相关参数反馈给上位 PC 机。主站 PLC 通过 CC-Link 现场总线将操纵台和上位计算机发送的控制指令传输到变频器与分站 PLC,完成对推进电机的控制及触摸屏的远程监控功能,同时变频器与分站 PLC 通过现场总线将推进电机及触摸屏的工作状态传送回上位计算机和操纵台。

## 2. 2 硬件设计及选型

### 1) DSP 电机控制板

针对控制对象——交流异步电机,本课题选用 TI 公司的 TMS320LF2407DSP 芯片,此芯片是电机控制专用芯片,具有高效可编程的电机控制功能。可实现:三相反相器控制;PWM 的对称和非对称波形;可编程的 PWM 死区控制等<sup>[5]</sup>。与此相配置了电机驱动专用预驱动芯片和高达 60A 的 MOSFET 管,驱动异步电机。根据课题设计要求,控制板还包括已采用光电隔离高达 10Mbps 的 RS-232 接口,可与上位计算机进行串口通信。考虑到软件的编译和调试,本电机控制板带有 IEEE1149.1JTAG 插座,供程序编译下载及系统调试。

### 2) PLC

本系统有丰富的状态显示及控制功能,其中包括推进电机、螺旋桨仿真电机电压、电流的显示,系统主电源、冷却系统电源、通讯状态,设备运行状态显示,车钟对推进电机的速度控制、手动加减负载控制等等,根据系统输入输出信号的类型及点数,本课题选择型号为三菱 FX2N-32MR 的可编程控制器<sup>[8]</sup>作为主站及分站 PLC。

### 3) 推进电机、螺旋桨仿真电机

本课题是在实验室环境下设计船舶电力推进装置仿真,选择了容量较小的电机作为推进电机和螺旋桨仿真电机。推进电机与仿真电机均采用同一型号带编码

器的交流异步电机，额定功率为 0.75KW，星形连接额定电压 380V，额定电流 2.94A，型号为 IAG112M-450-0.75<sup>[9]</sup>。

#### 4) 变频器

本课题采用变频器对推进电机进行调速控制。根据控制对象推进电机的额定功率及实验室电网情况，选择型号为三菱的 FR-A500 多功能通用型变频器。FR-A500 的功能范围是 0.4~800KW，400V 级，采用先进磁通矢量控制方式，调速比可达 1:120(0.5-60Hz)，完全满足推进电机控制要求，并且具有可拆卸式风扇和接线端子，维护方便，柔性 PWM 可实现更低噪音运行，同时此型号变频器的 PID 等多种功能适合各种应用场合<sup>[10]</sup>。

#### 5) 上位 PC 机

考虑到船舶工作环境比较恶劣，如油污大，湿气重，震动厉害等等，本课题选择工控机作为上位 PC 机，型号是 NORCO 品牌的 PC-500。工控机机箱采用钢结构，有较高的防磁、防尘、防冲击的能力，机箱内有专用底板，底板上有 PCI 和 ISA 插槽，机箱内有专门电源，电源有较强的抗干扰能力，可连续长时间工作。

#### 6) 扭矩仪

本课题采用型号为 NJ0 型转矩转速传感器，安装在推进电机与螺旋桨仿真电机的传动轴上，采集螺旋桨仿真电机扭矩。同时在上位计算机中配置相应的转矩转速测量卡，型号为 TC-1ISA<sup>[11]</sup>，进行扭矩、转速的数据采集。扭矩测量精度为  $\pm 0.1\%$ ，转速测量精度  $\pm 0.1\%$ 。

#### 7) 实船操纵台

本课题根据船舶操纵环境，设计了实船操纵台，包括车钟、仪表、系统状态指示灯、系统控制按钮、上位机显示器、鼠标、键盘等。实船操纵台真实模拟了船舶运行操纵的情况，通过车钟对推进电机进行速度及方向（前进或后退）的控制，船速从停止到全速共分 5 档有级调速。操纵台上的仪表清楚显示推进电机与

螺旋桨仿真电机的当前的工作电流及转速。系统状态指示灯显示系统主电源开关、冷却系统开关状态，CC-Link 现场总线、RS-232 串口通讯的通讯状态（通讯正常/不正常），系统 PLC 运行状态等。系统控制按钮可控制主电源通断、冷却系统开关、本地控制及远程控制的选择等。上位机显示器主要显示船舶电力推进仿真系统人机友好监控平台，可通过此平台对整个系统进行监视与控制，同时通过此平台进行系统参数设置、螺旋桨工况设定等。鼠标和键盘是上位 PC 机的输入接口。实船操纵台实物图可参见附录。

### 8) 通讯设备

由于船舶电力推进系统要求其监控系统具有更高的实时性、可靠性，本课题采用 CC-Link 现场总线及串口通信进行系统数据通信。CC-Link 是三菱公司在 FA 领域中开发的现场网络，其最大通讯速度可达 10M，扫描时间不超过 4ms，可实现系统设备间的实时数据传输。要实现 CC-Link 通讯，需对每个设备配置通讯模块，主站 PLC 选择型号为 FX2N-16CCL-M 的 CC-Link 主站模块，变频器配备型号为 FR-A5NC 通讯模块，分站 PLC 配备 FX2N-32CCL 通讯模块<sup>[12]</sup>。

RS-232 接口是目前最常用的串口通信接口，使不同设备可以方便的与计算机连接起来。上位计算机与 DSP、上位计算机与主站 PLC 之间均采用 RS-232 串口通信进行数据传输。主站 PLC 配置 RS-232 串口通信模块，型号为 FX2N-232-BD<sup>[13]</sup>。DSP 使用自带的 SCI 模块实现与 PC 机的串口通信。

### 9) 触摸屏

本系统触摸屏选择高性能、长寿命的三菱触摸屏，可适应船舶较为恶劣的运行环境，型号为 A9GT-RS4。

### 第三章 螺旋桨仿真电机数学建模

本课题采用交流异步电机代替真实船用螺旋桨，模拟螺旋桨工作特性，因此对螺旋桨的工作特性及异步电机的机械特性进行研究是非常有必要的。本章就螺旋桨数学模型和异步电机数学模型进行了详细的描述，并根据螺旋桨及异步电机的工作特性及相关实验数据，对螺旋桨仿真电机进行数学建模，使仿真电机可真实复现螺旋桨工作特性。

#### 3.1 螺旋桨数学模型<sup>[14]</sup>

##### 1) 螺旋桨负载模型

船舶航行中，螺旋桨的推力是主控力，用来克服水的阻力，维持船舶的操纵运动。螺旋桨被安装在船后工作时将与船体之间产生相互干涉，所以船桨系统中包括推进装置的旋转部分和船的直线运动两个惯性体系即转动和平动系统。

螺旋桨在水中回转时产生的推力 $T$ ，当其方向与船舶前进方向相同时，就推动船舶前进；反之即为负推力，拖动船舶倒退。螺旋桨在水中回转时受到的阻力矩 $Q$ 的作用方向与螺旋桨的回转方向相反。因此，为使螺旋桨能以给定的转速 $n$ 旋转，必须由推进电机供给螺旋桨以克服阻力矩的有效力矩，才能发出所需的推力 $T$ ，其所作的有用功率 $T \cdot V_p$ ，而吸收的推进电机功率 $P_p$ 为 $2\pi n \cdot Q$ 。

螺旋桨的推力可表示为：

$$T = K_T \rho n^2 D^4 \quad (3-1)$$

螺旋桨的扭矩可表示为：

$$Q = K_Q \rho n^2 D^5 \quad (3-2)$$

式中： $\rho$  是海水密度，单位为  $Kg \cdot s^2 / m^4$ ；

$n$  是螺旋桨转速，单位为  $r/s$ ；

$D$  是螺旋桨直径，单位为  $m$ ；

$K_T$ ， $K_Q$  分别是螺旋桨的推力系数和扭矩系数，它们均是进速比 $J$ 的函数。

螺旋桨的进速比是描述船舶运动状态的一个重要参数，它代表螺旋桨回转一

周的轴向进程  $h_p$  与桨径  $D$  的比值, 以  $J$  表示。若螺旋桨以单位时间回转  $n$  周的话, 则  $V_p = h_p n$ , 故

$$J = \frac{h_p}{D} = \frac{V_p}{nD} \quad (3-3)$$

由上式可知, 对桨径  $D$  已定的螺旋桨, 进速比  $J$  将随螺旋桨的进速  $V_p$  和它的转速  $n$  而变化。对于几何参数一定的螺旋桨, 推力系数  $K_T$ , 扭矩系数  $K_Q$  都是进速比  $J$  的函数, 在敞水条件下  $K_T$ 、 $K_Q$  与  $J$  的关系被称为螺旋桨的敞水特性。航行中的船舶受到海面情况的变化引起船体阻力的变化以及机动操作的需要, 螺旋桨的进速  $V_p$  或转速  $n$  将变化, 则进速比  $J$  发生变化, 由于  $K_T$  和  $K_Q$  随  $J$  而变, 因此螺旋桨的推力  $T$  和转矩  $Q$  也在变化。

考虑到在螺旋桨工作时, 船对桨及桨对船都会有影响, 任何一个因素都会影响到船桨的工作, 因此引入两个系数。根据船对桨的影响, 引入了伴流系数  $\omega$ ; 根据桨对船的影响, 引入了推力减额系数  $t$ 。

$$\text{伴流系数: } \omega = 1 - \frac{V_p}{V_s} \quad (3-4)$$

$$\text{推力减额系数: } t = \frac{\Delta T}{T} \quad (3-5)$$

其中:  $V_s$  是船舶航速, 螺旋桨设计完成, 船的航态一定时, 船舶航速与螺旋桨转速成比例对应关系;

$\Delta T$  是为了克服桨的吸水作用产生的阻力而增加的推力。

船舶稳定航行时,  $J$  在一个较小范围内变动, 大约在 0.6 至 0.8 之间波动。在动态时,  $V_p$  与  $n$  都会有大幅度的变化,  $J$  也会随之有大幅度变化。当  $n \rightarrow 0$  时,  $J \rightarrow \infty$ 。因此定义  $J'$ :

$$J' = \frac{V_s(1-\omega)}{\sqrt{V_s^2(1-\omega)^2 + n^2 D^2}} \quad (3-6)$$

$$K_T' = K_T(1-J'^2) \quad (3-7)$$

$$K_Q' = K_Q(1-J'^2) \quad (3-8)$$

则改进后的推力和扭矩表达式变为：

$$T = K_T' \rho D^2 V_s^2 (1-\omega)^2 / J'^2 \quad (3-9)$$

$$Q = K_Q' \rho D^3 V_s^2 (1-\omega)^2 / J'^2 \quad (3-10)$$

$J'$  与进速比  $J$  的函数关系如下：

$$J' = \begin{cases} 1 & n = 0 \text{ 且 } V_p > 0 \\ \frac{J}{\sqrt{1+J^2}} & n > 0 \\ \frac{-J}{\sqrt{1+J^2}} & n < 0 \\ -1 & n = 0 \text{ 且 } V_p < 0 \end{cases} \quad (3-11)$$

建立船桨系统的运动方程如下：

$$KMV_s = T(1-t)R_f \quad (3-12)$$

$$T = K_T' \rho D^2 V_s^2 (1-\omega)^2 / J'^2 \quad (3-9)$$

$$Q = K_Q' \rho D^3 V_s^2 (1-\omega)^2 / J'^2 \quad (3-10)$$

$$R_f = \zeta V_s^2 \quad (3-13)$$

式中： $M$  是船体质量；

$K$  是附水系数；

$t$  是推力减额系数；

$R_f$  是船舶所受阻力；

$\zeta$  是阻力系数，将在后文船舶阻力特性一节进行研究；

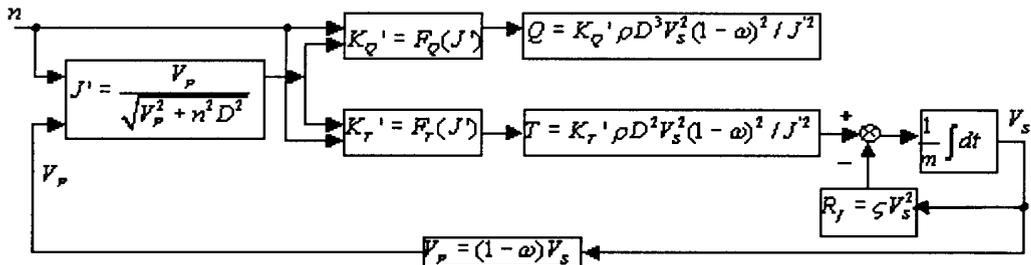


图 3-1 船桨数学模型

在给定初始船速情况下,  $J'$ ,  $K_T'$ ,  $K_Q'$ 可由式(3-6)、(3-7)、(3-8)求得<sup>[15]</sup>。船舶参数如船体质量, 海水密度等可根据实船实验数据设定。船桨数学模型见图3-1。

## 2) 螺旋桨扭矩特性

螺旋桨特性指的是螺旋桨转矩、功率与转速之间的关系曲线, 即  $M = f(n)$ 、 $P = f(n)$  曲线。最常用到的是下面三条典型特性曲线:

①自由航行特性  $M_y = f(n)$ ,  $P_y = f(n)$ ;

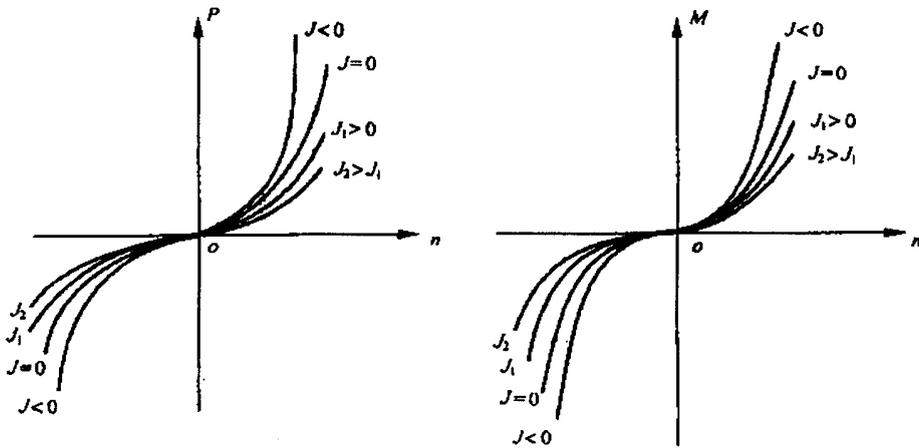


图 3-2 J 给定时的螺旋桨工作特性曲线

满载船舶在静水中航行时所得出的螺旋桨阻转矩(或功率)与其转速的关系曲线称为自由航行特性。

转矩—转速特性为一条近似的二次方曲线, 其表达式可以写为:

$$M_y = K_y n^2 \quad (3-14)$$

而功率—转速特性为一条近似的三次方曲线, 其表达式可以写为:

$$P_y = K_y' n^3 \quad (3-15)$$

式中:  $M_y$  是转矩,  $N \cdot m$ ;

$P_y$  是功率,  $KW$ ;

$n$  是转速,  $r/min$ ;

$K_y$ 、 $K_y'$  是常数。

这样, 对应于进速比  $J$  的不同取值, 将得到一组具有平方关系的特性曲线, 如图 3-2 所示。在任意一条  $J = C$  的特性曲线上, 螺旋桨的每一个转速对应一个确定的船舶航速。整个一条特性对应很多不同航速。 $J = 0$  对应桨的系缆状态。由图还可见, 在相同的转速下, 反转时的螺旋桨扭矩较正转时要小。

② 系缆特性或抛锚特性  $M_x = f(n)$ ,  $P_x = f(n)$ ;

满载船舶在航速等于零时所得的螺旋桨阻转矩  $M_x$  (或功率  $P_x$ ) 与其转速的关系曲线  $M_x = f(n)$  或  $P_x = f(n)$  称作系缆特性或抛锚特性。系缆特性表达式为:

$$M_x = K_x n^2 \quad (3-16)$$

$$P_x = K_x' n^3 \quad (3-17)$$

其中,  $K_x$ 、 $K_x'$  为常数, 但  $K_x > K_y$ ,  $K_x' > K_y'$ 。在自由航行特性上螺旋桨每个转速  $n$  对应有不同的航速, 而在系缆特性上, 航速总为零, 即  $V_s = 0$ 。在大风浪中逆风航行时阻力很大, 可能接近这种情形。当船舶静止时起动螺旋桨, 螺旋桨阻转矩与转速的关系曲线就是一条系缆特性。

③ 反转特性  $M_f' = f(n)$ 。

当航速不变时, 螺旋桨反转过程中其转矩与转速的关系曲线  $M_f' = f(n)$  称为螺旋桨反转特性曲线。螺旋桨的反转特性曲线如图 3-3 所示, 图上表示的正值转速是螺旋桨正转转速, 负值则为螺旋桨反转转速。

值得注意的是, 螺旋桨本身的反转与船舶倒车是有很大区别的。为使船舶倒车, 必先使螺旋桨反转; 螺旋桨反转时间甚短, 以  $s$  计。但船舶倒车所需时间甚长, 是以  $min$  来计算的, 二者在过渡过程中的时间, 后者是前者的  $100 \sim 150$  倍。因此可以认为, 在船舶倒车的一定阶段上, 船舶还是几乎以全速继续航行, 尽管

螺旋桨这时已经在后退方向旋转了。假如螺旋桨在船舶航速为零的情况下进行反转，则其反转特性曲线为一根相互对称的曲线，此时反转特性与系缆特性将重合为一，如图 3-3 中曲线 1 所示。如果螺旋桨在其他船舶航速的情况下进行反转，则其反转特性曲线是一根相互不对称的曲线，在这些相互不对称的曲线上都将具有这样的一些特性，即当螺旋桨的转速维持为正值时，在它们的个别线段上将出现负的转矩，如曲线 3 的 BCD 段所示，并且在一定转速时出现最大值，如 C 点。负的制动转矩，也即螺旋桨负值转矩的出现说明了由于船舶继续向前推进而螺旋桨在水压的作用下将力图维持原先的旋转方向，这时螺旋桨不再作推进器的工作，而是开始作水力电动机的工作。

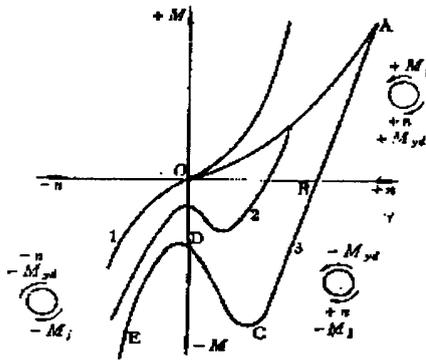


图 3-3 螺旋桨反转特性

倒车时，螺旋桨制动转矩大小与船舶前进速度有关，若船舶前进速度原来很高，则螺旋桨的负制动转矩也很高。比较曲线 2 和 3 可证明这一点。曲线 2 对应于船速  $V_s = 0.6V_e$ ，曲线 3 则对应于全船速，即  $V_s = V_e$ 。  $V_e$  为额定船速。在螺旋桨的反转过程中，船速当然不会始终保持不变，而是逐渐降低。因此螺旋桨的扭矩不是按照一条确定的特性曲线变化，而是由下方特性逐渐向上方特性过渡。

### 3) 螺旋桨敞水特性

螺旋桨的敞水特性是指未安装到船上的处于开放环境中的螺旋桨的特性。螺旋桨的敞水特性通常都是用图谱来表示，图谱中包括  $K_T \sim J$ 、 $K_Q \sim J$  两种特性曲线。

图 3-4 中只给出了  $K_T \sim J$  特性曲线，它与  $K_Q \sim J$  特性的性质相类似，故不再画  $K_Q \sim J$  曲线。在稳态运行时，一般船舶的  $V_p$  与  $n$  的比值在一个较小的范围

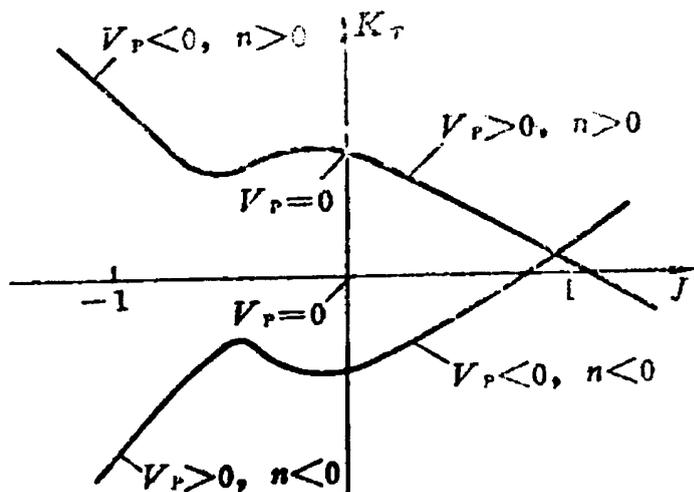


图 3-4 螺旋桨敞水特性曲线

内变动，因此  $K_T \sim J$ 、 $K_Q \sim J$  特性曲线只画在第一象限，其中  $J$  的下限为零，上限大约在 1 的上下。可是在动态时， $V_p$  与  $n$  都会有大幅度的变化。正倒航时  $V_p$  的符号相反，正倒车时  $n$  的符号相反。动态过程中， $V_p$  与  $n$  的变化并不同步；因此  $J$  有较大的变化范围。当螺旋桨已倒转但船尚未倒航时， $J$  又为负值，所以此时螺旋桨特性曲线应该画在四个象限内。图中走向由左上至右下的曲线族对应  $n$  为正转的特性，其在第一象限部分对应螺旋桨推船前进状态；其在第二象限部分对应船舶转变为倒退运行状态；其在第四象限部分对应螺旋桨成为水轮机工作运行状态。在图中另外一族走向由右上至左下的曲线族对应  $n$  为反转的特性。其在第四象限部分对应螺旋桨推船倒退状态；其在第三象限部分对应船舶由倒航转变为正向航行状态；其在第一象限部分对应螺旋桨成为水轮机工作状态。由图可见， $K_T$ 、 $K_Q$  曲线都不是直线，随  $J$  增大向下弯曲。一般可认为  $K_T$ 、 $K_Q$  曲线都近似于抛物线，从而表示为：

$$K_T = K_0 + K_1 J + K_2 J^2 \quad (3-18)$$

$$K_Q = \bar{K}_0 + \bar{K}_1 J + \bar{K}_2 J^2 \quad (3-19)$$

式中系数  $K_0$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $\bar{K}_0$ 、 $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2$  可通过曲线拟合确定。对给定的螺旋桨，它们都是常系数。对于图中向下弯曲的  $K_T$ 、 $K_Q$  特性来说， $K_0$ 、 $\bar{K}_0 > 0$ ， $K_1$ 、 $K_2$ 、 $\bar{K}_1$ 、 $\bar{K}_2 < 0$ 。在定常航行状态下进速比为常值，即螺旋桨运行在图 3-4 中的  $J = J_C$

的某一工作点上。然而实际船舶在航行中，受到海面情况的变化，船体阻力的变化等方面的影响，螺旋桨的进速 $V_p$ 或转速 $n$ 将发生变化，于是进速比 $J$ 也发生变化，进而引起螺旋桨推力和扭矩的变化。由此可见螺旋桨的敞水特性描述了桨在各种工况下的运转特性。根据此特性能仿真出船舶工作在任何运行状态下的螺旋桨的工作特性。

#### 4) 船舶阻力特性

实际上，桨装船后，要考虑船的阻力特性。船舶在航行时，受到空气和水这两种介质的阻力。在正常的气候及海况下，航速不高的船舶的空气阻力，仅占总阻力的2%~3%，船舶航行时的阻力特性主要是以分析船速及载量变化时水对船舶的阻力的影响为依据。桨的工作点要满足船的阻力和桨的推力达到平衡的要求，船稳定航行的工作点是船的阻力特性曲线与桨的有效推力特性曲线的交点，即 $T(1-t) = R_f$ 。船舶航行时的阻力按其产生的原因及阻力的性质可分为摩擦阻力、漩涡阻力和兴波阻力。这三种阻力均随航速 $V_s$ 的增加而增加，所以船舶的总阻力（三种阻力合成）也随船速的增加而增加。实船或船模的实验表明，水对船体的总阻力与航速的 $m$ 次方成正比，即

$$R_f = A_R \cdot V_s^m \quad (3-20)$$

式中：

$R_f$ ——水对船体的阻力，N

$V_s$ ——船速，kn

$A_R$ ——阻力系数，与船体线型、排水量、污底程度、拖带、航道及海情等因素有关

$m$ ——指数，对于航速不高的民用船舶来说，可取 $m = 2$ ；对水翼船及滑行艇可参考有关资料

若航速为 $V_s$ 时其船体总阻力为 $R_f$ ，则直接用于克服船体阻力所需的功率 $P_c$ 为：

$$P_c = \frac{R_f V_s}{1943} \quad (3-21)$$

就船的稳定航行状态而言，船的总阻力  $R_f$  也是基本与航速  $V_s$  的平方成比例的，可写成：

$$R_f = A_R \cdot V_s^2 \quad (3-22)$$

由此可见，要达到有效推力与阻力平衡，船速与桨转速必成比例，螺旋桨必工作在某一  $J = \text{常数}$  的特性上。

对同一条船来说，其倒退航行阻力比前进航行阻力大得多，要达到稳定倒航，桨的进速比将要明显小于前进稳定航行时的进速比。与此相应，螺旋桨反转时的阻转矩自然也要增大。

### 5) 螺旋桨推进器效率

由以前的分析可知，螺旋桨的敞水效率为：

$$\eta_p = \frac{TV_p}{2\pi n M_P} = \frac{TV_s(1-\omega)}{2\pi n M_P} \quad (3-23)$$

当桨装船后，设船的总阻力为  $R_f$ ，船尾螺旋桨的效率为：

$$\eta = \frac{RV_s}{2\pi n M_P} = \frac{P(1-t)}{2\pi n M_P} \times \frac{V_p}{1-\omega} = \frac{PV_p}{2\pi n M_P} \times \frac{1-t}{1-\omega} = \eta_p \eta_s \quad (3-24)$$

式中： $\eta_s = \frac{1-t}{1-\omega}$  为船身效率。

螺旋桨收到功率  $P_p$ ，通过自身在流体场中的作用，发出克服船体阻力所需的有效功率  $P_R$ ，即：

$$P_p \cdot \eta_p \eta_r \eta_s = P_R \quad \eta_r = P_R \quad (3-25)$$

式中： $\eta_r$  为相对旋转效率； $\eta_s$  为船身效率； $\eta_p$  为螺旋桨敞水效率； $\eta_r$  为螺旋桨在船后实际所产生的推进效率。由于伴流在螺旋桨盘面上的分布不均匀，对螺旋桨的效率也有影响，其数值体现在相对旋转效率  $\eta_r$  上，其值约为 0.97~1.05。

### 3. 2 异步电机机械特性<sup>[16]</sup>

根据异步电机的稳态等效电路可知，当异步电机带负载  $T_L$  稳定运行时，有

$$T_L = T_{em} = 3P_n \left( \frac{U_s}{\omega_s} \right)^2 \frac{s\omega_s R'_r}{(sR_s + R'_r)^2 + s^2\omega_s^2(L_s + L'_r)^2} \quad (3-26)$$

式中,  $P_n$  为异步电机极对数;  $s$  为转差率。

当  $s$  很小时, 式 (3-26) 可以简化为

$$T_{em} = 3P_n \left( \frac{U_s}{\omega_s} \right)^2 \frac{s\omega_s}{R'_r} \propto s \quad (3-27)$$

当  $s$  接近于 1 时, 忽略式 (3-27) 中的分母  $R'_r$  时, 则该式可以简化为

$$T_{em} = 3P_n \left( \frac{U_s}{\omega_s} \right)^2 \frac{\omega_s R'_r}{s[R_s^2 + \omega_s^2(L_s + L'_r)^2]} \propto \frac{1}{s} \quad (3-28)$$

所以, 在  $s$  很小时, 转矩近似与  $s$  成正比; 在  $s$  接近于 1 时转矩近似与  $s$  成反比, 可以得出机械特性如图 3-5 所示。

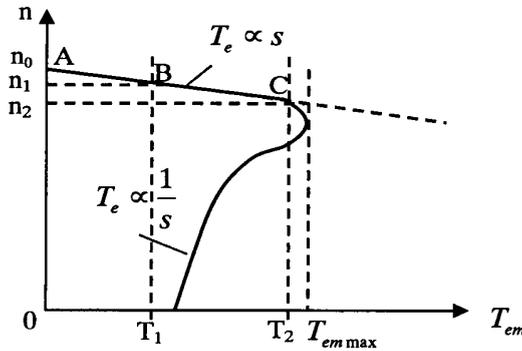


图 3-5 异步电机的机械特性

为了近似保持气隙磁通  $\phi_m$  不变, 在基频以下需采用恒压频比控制, 此时同步转速也随之变化。同步转速为

$$n_0 = \frac{60\omega_s}{2\pi P_n} \quad (3-29)$$

因此, 带负载时的转速降为

$$\Delta n = sn_0 = \frac{60s\omega_s}{2\pi P_n} \quad (3-30)$$

在式 (3-27) 所表示的机械特性的直线段上, 可以导出

$$s\omega_s \approx \frac{R'_r T_{em}}{3P_n \left( \frac{U_s}{\omega_s} \right)^2} \quad (3-31)$$

由此可见, 当  $U_s/\omega_s$  为恒值时, 对于同一转矩  $T_{em}$ ,  $s\omega_s$  是基本不变的, 因而  $\Delta n$  也

是基本不变的。这就是说，在恒压频比条件下改变频率时，机械特性基本上是平行下移的，如图 3-6 所示。

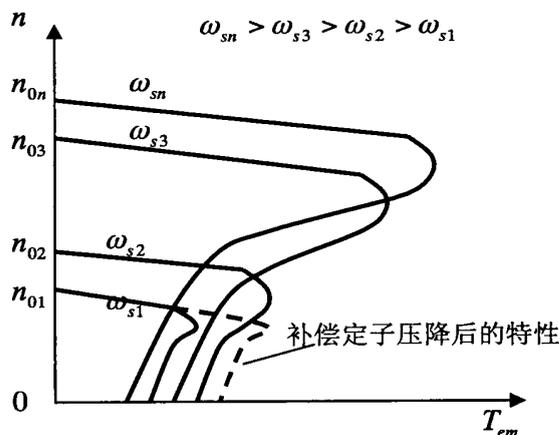


图 3-6 恒压频比控制时变频调速的机械特性

但当  $U_s/\omega_s$  为恒值时，最大转矩  $T_{em\max}$  随角频率  $\omega_s$  的降低而减小，频率很低时， $T_{em\max}$  太小，将限制调速系统的负载能力，这时需要采用定子压降补偿，适当提高  $U_s$ ，可以提高负载能力。

### 3.3 螺旋桨仿真电机数学建模

#### 1) 单轴拖动系统的特性

根据 2.2.1 节船舶电力推进装置仿真结构图可知，模拟螺旋桨特性的仿真电机即是负载电机，产生和螺旋桨相同的负载扭矩，与推进电机共同构成单轴拖动系统，运动方程式<sup>[17]</sup>为：

$$T - T_L = \frac{GD^2}{375} \frac{dn}{dt} \quad (3-32)$$

式中： $T$  为推进电机的电磁转矩；

$T_L$  为仿真电机产生的负载转矩；

$GD^2$  为轴上的总飞轮矩，它包括电动机转子本身的飞轮矩  $GD_d^2$  和轴上负载飞轮矩  $GD_L^2$ 。

本课题对螺旋桨的运行情况做了适当简化，根据式 (3-32) 可知，当转速  $n$  恒定不变时，即匀速状态下，运动方程式可化减为：

$$T - T_L = 0 \quad (3-33)$$

即推进电机转矩等于仿真电机转矩。

## 2) 仿真电机机械特性的测定

本课题研究的船舶电力推进装置仿真中，模拟螺旋桨特性的仿真电机与推进电机采用同型号交流异步电机，因此对推进电机进行试验，测定的机械特性即为仿真电机的机械特性。

根据 3.2 节异步电机机械特性可知，当  $s$  很小时，转矩近似与  $s$  成正比，如图 3-5 所示，AC 段可视为直线。设 AC 段斜率为  $k$ ，取 A ( $0, n_0$ ) 为空载转速点，B ( $T_1, n_1$ ) 为转速  $n_1$ ，转矩  $T_1$ ，C ( $T_2, n_2$ ) 为转速  $n_2$ ，转矩  $T_2$ ，可列出以下等式：

$$T_1 = k(n_1 - n_0) \quad (3-34)$$

$$T_2 = k(n_2 - n_0) \quad (3-35)$$

为减小误差，将式 (3-34)、式 (3-35) 相减，可得：

$$k = \frac{T_2 - T_1}{n_2 - n_1} \quad (3-36)$$

算出斜率  $k$ ，即可得出空载转速为  $n_0$  时，异步电机的机械特性近似线性段部分。

本课题采用扭矩仪测量电机转速和扭矩，得出如表 3-1 所示实验数据，为某给定空载转速下，改变负载转矩的一组转速、扭矩实验数据。

表 3-1 推进电机转速及扭矩实验数据

| 序号 | 转速 $n$ (r/min) | 扭矩 $T$ (N.m) |
|----|----------------|--------------|
| 1  | 174.3          | 0.675        |
| 2  | 165.4          | 1.163        |

根据式 (3-36) 计算得出斜率  $k = -0.055$ 。

### 3) 螺旋桨参数设定

根据 3.1 节螺旋桨的数学模型，设定好预模拟的螺旋桨参数后，根据船桨运动方程，参考实船数据进行计算，得出  $J$ ， $K_T$ ， $K_Q$  等值，从而确定螺旋桨特性曲线<sup>[18]</sup>。本课题参照的某实船数据如表 3-2。

表 3-2 某艇螺旋桨装船后（稳定航行）的数据

|         |        |        |        |        |        |        |        |        |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Vs(m/s) | 0.515  | 0.772  | 1.03   | 1.285  | 1.545  | 1.955  | 2.06   | 2.265  |
| n(r/s)  | 0.361  | 0.536  | 0.716  | 0.891  | 1.07   | 1.345  | 1.42   | 1.56   |
| J       | 0.618  | 0.622  | 0.623  | 0.625  | 0.626  | 0.628  | 0.628  | 0.629  |
| $K_T$   | 0.2567 | 0.2551 | 0.2547 | 0.2539 | 0.2535 | 0.2527 | 0.2527 | 0.2523 |
| $K_Q$   | 0.0443 | 0.0442 | 0.0442 | 0.0441 | 0.0441 | 0.044  | 0.044  | 0.044  |

### 4) 仿真电机数学建模

根据电力拖动理论，推进电机工作在第一象限时，仿真电机工作在第二象限。图 3-7 中曲线 1 是  $J$  给定时螺旋桨工作特性，曲线 2 是推进电机机械特性，曲线 3 是仿真电机机械特性。

假设螺旋桨在某设定工况下匀速运行，转速为  $n_1$ ，根据 3.1 节船桨运动方程计算出螺旋桨转矩，此处记为  $M_L$ ，此时推进电机机械特性与螺旋桨工作特性交

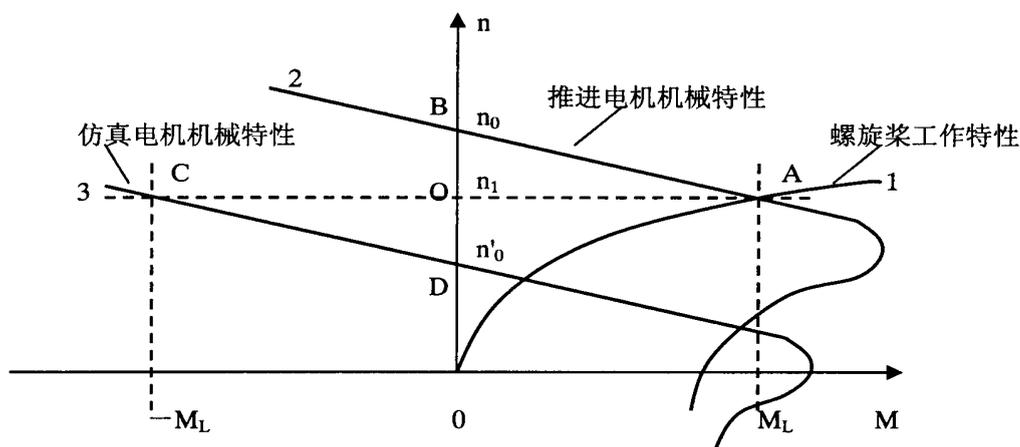


图 3-7 螺旋桨仿真电机机械特性

于 A ( $M_L$ ， $n_1$ )。根据单轴拖动系统运行方程式 (3-32) 可知，仿真电机负载转

矩应与推进电机转矩大小相等，方向相反，即仿真电机负载转矩为 $-M_L$ ，仿真电机转速与推进电机转速相等，方向相同，即仿真电机转速为 $n_1$ ，工作在C（ $-M_L, n_1$ ）。

根据3.2节异步电机机械特性可知，在恒压频比条件下改变频率时，机械特性基本上是平行下移的，如图3-7所示，可以近似认为AB段与CD段为相互平行的直线，列出等式：

$$n_0 - n_1 = n_1 - n_0' \quad (3-37)$$

$$\text{由式(3-34)可知，推进电机空载转速 } n_0 = n_1 + \frac{M_L}{k} \quad (3-38)$$

$$\text{将式(3-38)代入式(3-37)中得，仿真电机空载转速 } n_0' = n_1 - \frac{M_L}{k} \quad (3-39)$$

确定螺旋桨仿真电机的工作特性。

## 5) 螺旋桨仿真电机控制方法

由于船舶螺旋桨转速低，因此对仿真电机调速采用基频以下恒压频比控制。根据仿真电机数学模型可知，当推进电机转速为 $n_1$ ，即螺旋桨仿真电机转速为 $n_1$ 时，可计算出仿真电机此状态下的转矩 $M_L$ 、空载转速 $n_0'$ 。将 $M_L, n_0'$ 代入式(3-29)推出仿真电机定子频率 $\omega_s$ 关于仿真电机转速 $n_1$ 的关系式：

$$\omega_s = \frac{2\pi P_n (n_1 - \frac{M_L}{k})}{60} \quad (3-40)$$

通过改变仿真电机定子频率（恒压频比条件下）即可使螺旋桨仿真电机工作在设定的螺旋桨转速、扭矩。

## 第四章 基于 DSP 的螺旋桨仿真电机控制

第三章已对螺旋桨仿真异步电机数学建模进行了研究,并根据该数学模型提出螺旋桨仿真电机的控制方法。第四章将在此基础上对螺旋桨仿真电机调速控制进行深入研究,包括硬件设备的选择设计以及软件的开发编译,使螺旋桨仿真电机可实现设定螺旋桨工况下工作特性。

### 4.1 螺旋桨仿真电机变压变频调速

在设定船舶参数及船舶螺旋桨工况,即设定船舶航速及螺旋桨转速下,可根据第三章螺旋桨仿真电机数学模型算出相应仿真电机的定子频率及电压值,通过仿真电机的恒压频比控制,实现仿真电机模拟螺旋桨工作特性。

随着电力电子技术的发展,交流调速技术也有了很大的突破。目前使用的交流调速技术有正弦波脉宽调制(SPWM)变频调速、空间电压矢量变频调速、直接转矩控制变频调速等等。PWM变换器具有功率因数高、可同时实现变压变频及抑制谐波的特点,因此在交流传动中得到广泛应用。而SPWM具有诸多优点:(1)在调制波幅值不超过三角波幅值的情况下,逆变器输出线电压与调制系数 $m$ 成线性关系,有利于精确控制,谐波含量较小;(2)若载波比取得越大,电机电流越接近正弦波,转矩脉动越小,因此本课题采用正弦脉宽调制技术(SPWM)<sup>[19]</sup>。

#### 1) SPWM 的实现方法

实现 SPWM 的方法有两种:自然采样法和规则采样法。由于规则采样法的计算量比自然采样法小得多,因此本课题在利用 DSP 芯片对仿真电机进行 SPWM 交流调速程序设计时使用了规则采样法。

图 4-1 为规则采样法说明图。取三角波两个正峰值之间为一个采样周期  $T_c$ 。使每个脉冲的中点都以相应的三角波中心为对称,这样就使计算大为减化。如图所示,在三角波的负峰值  $t_D$  对正弦信号波采样而得到 D 点,过 D 点作一水平直线和三角波分别交于 A 点和 B 点,在 A 点时刻  $t_A$  和 B 点时刻  $t_B$  控制功率开关器件的通断<sup>[20]</sup>。

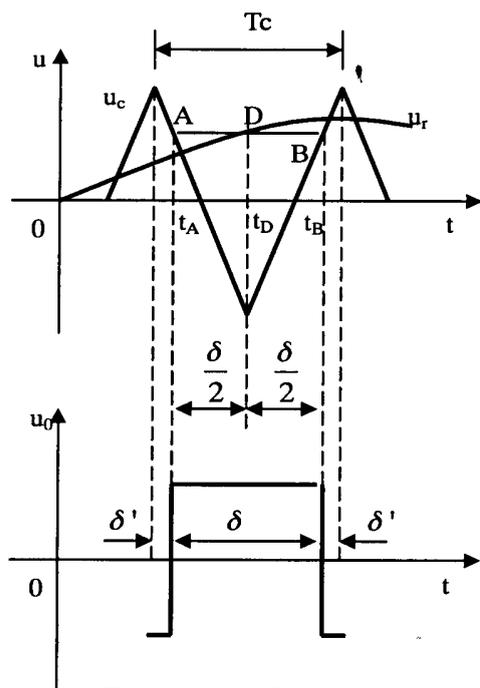


图 4-1 规则采样法

设正弦调制信号波为

$$u_r = a \sin \omega_r t \quad (4-1)$$

式中：\$a\$ 为调制度，\$0 \leq a < 1\$；

\$\omega\_r\$ 为正弦信号波角频率。

从图 4-1 可得下列关系式

$$\frac{1 + a \sin \omega_r t_D}{\delta/2} = \frac{2}{T_c/2} \quad (4-2)$$

由此可得

$$\delta = \frac{T_c}{2} (1 + a \sin \omega_r t_D) \quad (4-3)$$

$$\text{则占空比: } \alpha = \frac{\delta}{T_c} \quad (4-4)$$

## 2) SPWM 的优化

SPWM 的脉冲宽度按正弦规律变化，可以有效地抑制低次谐波，使电机工作在近似正弦的交变电压下，转矩脉动小。但与此同时，SPWM 技术也存在着

一些缺点：(1) 线性控制区域较小，若使  $M > 1$  超调制，虽然可以提高输出基波电压，但不再是线性控制，且在线性至非线性的过渡区，调制波形中间部分的槽往往突然消失，会引起电流浪涌；(2) 功率开关器件在一周期内的开关次数多，开关损耗大，缩减逆变器的实际使用寿命；(3) 电压利用率低（输出电压的有效值只能达到进线电压的 0.864 倍）。

为了解决 SPWM 存在的问题，S.R.Bowes 等人于 1985 年提出了准优化 (suboptimal) PWM 技术和用于高压高频的准优化 PWM 技术 (HVSOPWM)。Bowes 等人通过对优化 PWM 的详细研究，发现了它的基本特征，并以此为依据，确定了一个特殊的调制函数，对优化 PWM 进行近似。在规则采样 PWM 中，调制函数为正弦波，而准优化 PWM 的调制波为基波和三次谐波的叠加，其数学表达式为：

$$F(t_k) = m[\sin t_k + \frac{1}{6} \sin 3t_k] \quad (4-5)$$

式中， $t_k = KT_s / 2$ 。逆变器输出基波电压大小及相位是由调制波决定的，而三相逆变器为三线输出，没有零线，线路中不会出现 3 的整倍数次谐波电压和电流，所以正弦调制波信号加入 3 次或 3 的倍数谐波后，对输出基波电压不会有不利影响，形成波形较为平坦的调制波信号，相对传统的 SPWM 而言，调制系数可大于 1。只要正弦调制波信号最大值不超过载波峰值，就不会进入非线性控制区，因而可拓宽线性控制范围。

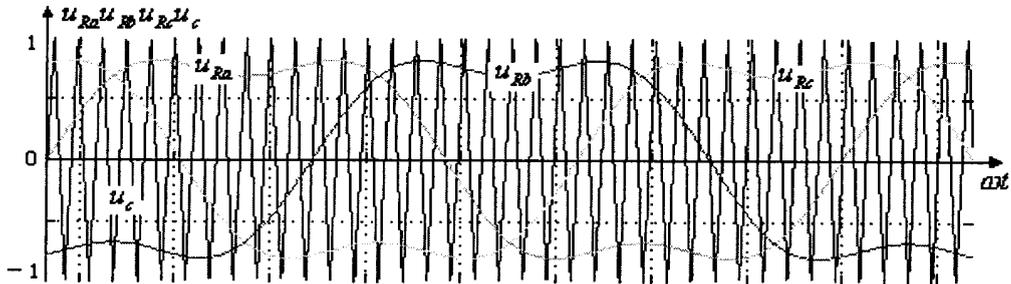


图 4-2 优化的 PWM 调制波

本文使用 Matlab 软件进行仿真实验得到如图 4-2 的准优化 SPWM 调制波形。仿真实验发现只有当  $m$  达到 1.2 时，才可能出现过调制。电压利用率相当于提高了 20%，达到 1 以上<sup>[19]</sup>。本文  $m$  取 1.15。

## 4.2 基于 DSP 的螺旋桨仿真电机 SPWM 控制

在现代交流调速系统中,由模拟电子电路构成的模拟控制已经不能适应复杂的控制策略和大量数据计算的需要,由微处理器为核心的数字控制已经成为交流调速控制器的主要形式。随着控制理论和超大规模集成电路技术的发展,高集成度、快速的微处理器及专用控制芯片相继问世。DSP (Digital Signal Processor) 就是一种将中央处理单元、控制单元和外围设备集成到一块芯片上的微处理器。它采用了多组织总线技术实现并行运行机制,极大地提高了运算速度,提供了非常灵活的指令系统。

在 DSP 领域内,德州仪器(TI)公司的产品及其配套技术与开发工具最有强大的竞争力,其中 TMS320 DSP 是它的代表系列,本课题正是采用 TI 公司推出的电机控制高性能 TMS320LF2407 芯片。

### 4.2.1 DSP 脉宽调制电路产生原理<sup>[5]</sup>

DSP 的每个事件管理模块可同时产生多达 8 路的 PWM 波形输出。由 3 个带可编程死区控制的比较单元独立产生 3 对 PWM 输出,由通用定时器比较产生 2 个独立的 PWM 输出。

PWM 的特性如下:

- 16 位寄存器;
- 有从 0 到 16 $\mu$ s 的可编程死区发生器控制 PWM 输出对;
- 最小的死区宽度为 1 个 CPU 时钟周期;
- 对 PWM 频率的变动可根据需要改变 PWM 的载波频率;
- 在每个 PWM 周期内以及之后可根据需要改变 PWM 脉冲宽度;
- 外部可屏蔽的功率驱动保护中断;
- 脉冲形式发生器电路,用于可编程的对称、非对称以及 4 个空间矢量 PWM 波形产生;
- 自动重装载的比较和周期寄存器使 CPU 的负担最小。

一个 PWM 信号是一串宽度变化的脉冲。这些脉冲平均分布在一段定长的周期中,每个周期中有一个脉冲。该定长周期被称为 PWM (载波) 周期,它的倒数为 (载波) 频率。PWM 脉冲的宽度由另一个具有所需值的调制信号决定或调制。

### 1) 事件管理器 PWM 输出的产生

在事件管理器模块中，每个比较单元和通用定时器 1（EVA 模块）或通用定时器 3（EVB 模块），死区单元及输出逻辑可在两个特定的器件引脚上产生一对具有可编程死区以及输出极性的 PWM 输出。在每个 EV 模块中有 6 个这种与比较单元相关的 PWM 输出引脚，这 6 个特定的 PWM 输出引脚用于控制三相交流感应电机。

### 2) 产生 PWM 的寄存器设置

比较单元和相关电路的所有三种 PWM 波形的产生需对相同的事件管理寄存器进行配置，设置步骤如下：

- 设置和装载 ACTRx 寄存器；
- 设置和装载 DBTCONx 死区寄存器；
- 设置和装载 T1PR 或 T3PR 寄存器，即规定 PWM 波形的周期；
- 初始化 CMPRx 比较寄存器；
- 设置和装载 COMCONx 寄存器；
- 设置和装载 T1CON 或 T3CON 寄存器，来启动比较操作；
- 更新 CMPRx 寄存器的值，使输出的 PWM 波形的占空比发生变化。

### 3) 对称 PWM 波形的产生

对称 PWM 信号的特性由 PWM 周期中心对称的调制脉冲决定。对称 PWM 信号比非对称 PWM 信号的优势在于它在一个周期内有两个无效的区域：每个 PWM 周期的开始和结束处。当使用正弦波调整时，交流电机的相电流中对称的 PWM 信号比非对称的 PWM 信号引起的谐波失真更小。图 4-3 给出了对称 PWM 波形。

比较单元和 PWM 电路产生对称 PWM 波形需将通用定时器的计数模式设置为连续增/减计数模式。

对称 PWM 波形产生的一个周期内通常有两次比较匹配，一次在周期匹配前的增计数期间，另一次是在周期匹配后的减计数期间。新的比较值在匹配后更新比较寄存器中的值，从而可以提前或推迟 PWM 脉冲的第二个边沿的到来。这种修改 PWM 波形的特性可以弥补由交流电机控制中的死区所导致的电流误差。

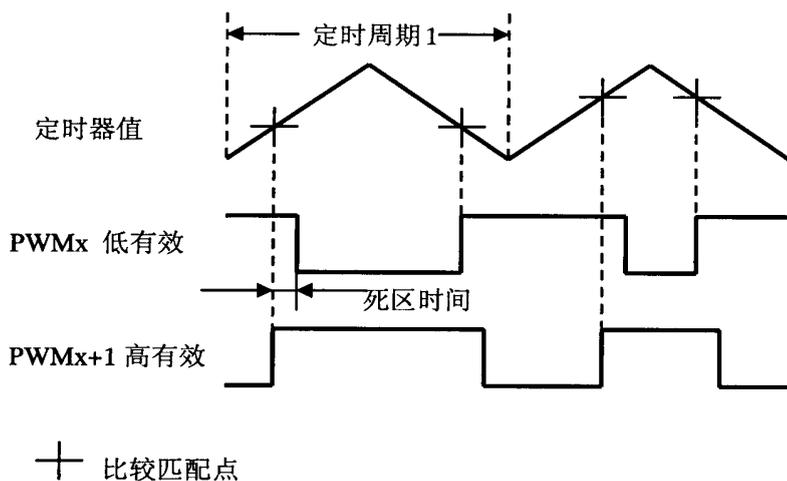


图 4-3 对称 PWM 波形的产生

#### 4.2.2 三相正弦波电路硬件设计

本课题 DSP 硬件控制电路由以下几部分构成：主控制器（TMS320LF2407），PWM 功率驱动，SCI 通信，电源和输入输出等部分组成，功能框图如图 4-4。

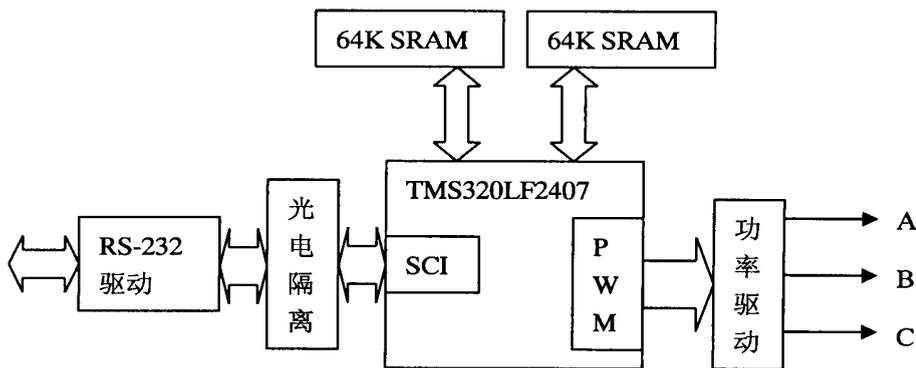


图 4-4 DSP 硬件控制电路功能框图

本课题利用 TMS320LF2407 事件管理模块 EVA，由 3 个带可编程死区控制的比较单元产生独立的 6 路脉宽调制控制信号 PWM1、PWM2、PWM3、PWM4、PWM5、PWM6。

采用型号为 IR2132S 的电机专用预驱动芯片，驱动 TMS320LF2407A 的 PWM1、PWM2、PWM3、PWM4、PWM5、PWM6 产生 AHO1、AHO2、AHO3、ALO1、ALO2、ALO3 六路 MOSFET 控制信号，通过三相桥式逆变器产生 AU、AV、AW 三相正弦波。硬件电路如图 4-5，图 4-6。

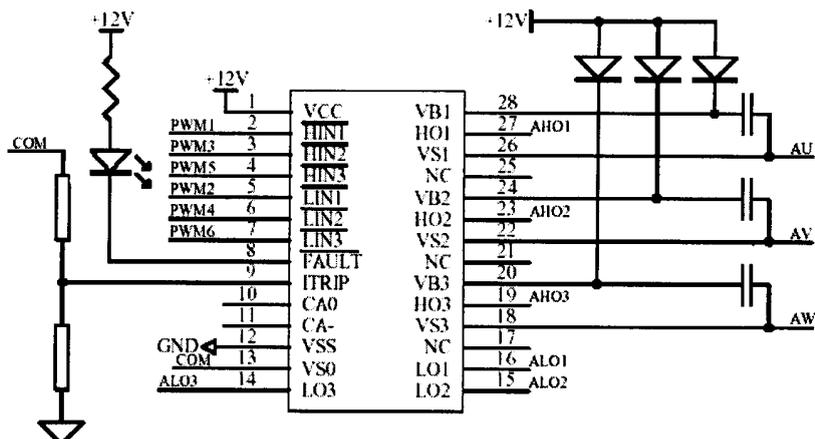


图 4-5 6 路 PWM 驱动电路

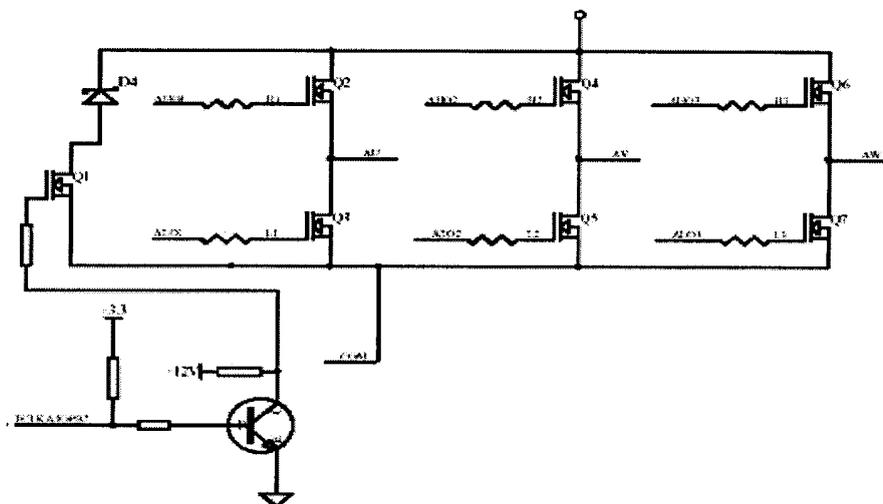


图 4-6 三相桥式 PWM 逆变器主电路

### 4.2.3 螺旋桨仿真电机 SPWM 控制算法的软件设计

在 DSP 电机控制板硬件设计完成的基础上，编译与其相配的 SPWM 电机控制算法也是非常关键的部分。控制算法的软件化为交流调速系统控制策略的选择和复用提供了方便。正确编译控制程序可以有效的提高系统数据处理能力，从而大大提高系统响应速度。本课题根据已经推导的螺旋桨仿真电机数学模型，采用规则采样法，使用优化的 SPWM 波进行仿真电机交流调速控制。

## 1) 软件集成开发环境

TMS320C2x 编译器是一个功能齐全的优化的编译器。它的主要功能是把标准的 ANSI C 语言程序转换成 TMS320C2x 能够识别执行的汇编语言代码。本课题采用版本为 Code Composer Version 4.10 的 CC'C2000 进行 SPWM 软件程序开发, 进行软件和硬件仿真调试。

## 2) 配置仿真器

仿真器是实现硬件仿真调试时与硬件系统的通信, 控制和读取硬件系统的状态和数据。在进行程序设计之前, 首先要安装仿真器, 然后对仿真器的运行环境进行配置。

连接仿真器的仿真电缆接头到 DSP 系统板上的 JTAG 接头, 保证仿真器和电机板之间连线正确后, 给电机板供电, 将仿真器的 USB 接口插入上位计算机 USB 接口, Windows 系统自动搜索到新的 USB 接口设备——仿真器, 按照提示安装仿真器驱动程序。完成驱动程序的安装后, 进入 Setup CC'C2000 软件对仿真器进行配置。如图 4-7。“Import Configuration”选项显示出以下一些系统配置之前的选择项。

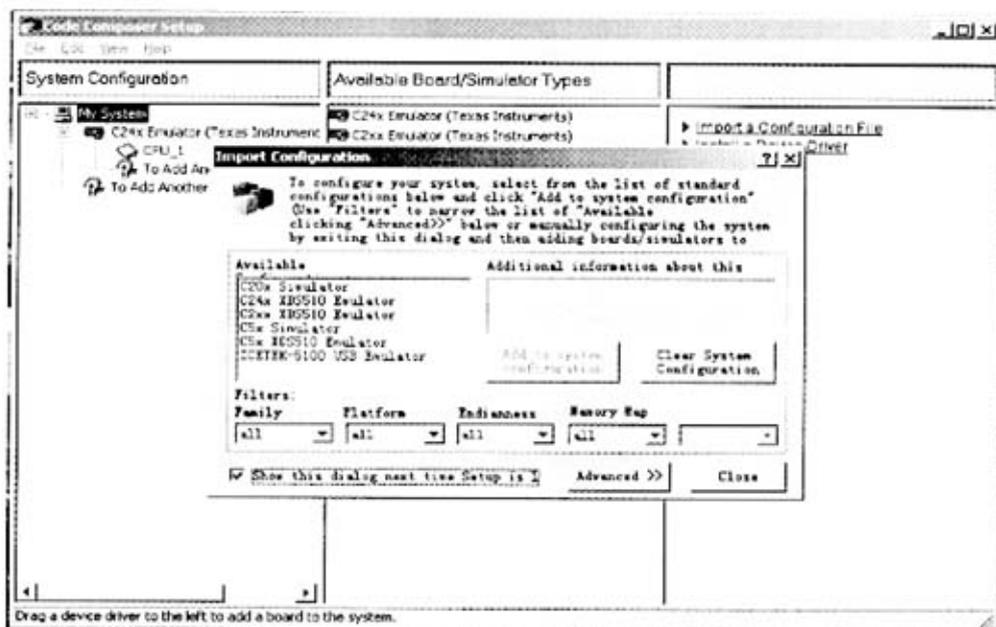


图 4-7 Setup CC'C2000 界面

- “Available Board/Simulator Types” ——列出标准板配置和与 Code Composer 集成的仿真器类型；
- “Additional Information” ——描述先前的配置；
- “Filters” ——几个下拉式菜单，选择适当的选型可以显示配置项；
- “Add to System Configuration” 按钮——按下此按钮，则使用户选择的配置选项成为当前配置；
- “Clear System Configuration” 按钮——按下此按钮，则从系统配置中删除所有的板配置。

配置操作步骤如下：

- 本课题使用 Wintech 公司的 TDS510 JTAG Emulator 硬件仿真器，在配置对话框中选择“ICETEK-5100 USB Emulator”选项，然后点击“Add to System Configuration”按钮，将其添加到系统配置中；
- 如果选择的配置是正确的，它将出现在“System Configuration”窗口中。其他选项为默认配置，然后点击“Close”按钮关闭此对话框；
- 在“File”菜单中点击“Save”选项以保存系统设置，然后退出“Setup CC’C2000”。

### 3) 软件设计

就版本为 Code Composer Version 4.10 的 CC’C2000 软件而言，建立一个工程 (Project) 需要包括以下一些文件：

- \*.C C 源文件。工程管理将对这一类文件进行编译和连接；
- \*.ASM 汇编源文件。工程管理将对这一类文件进行汇编和连接；
- \*.LIB 库文件。工程管理将对这一类文件进行连接；
- \*.CMD 命令文件。工程管理在连接各个文件时根据此文件分配系统程序空间、数据空间和 I/O 空间。

本课题在汇编源文件下设置软件中断向量，命令文件下设置程序空间、数据空间和 I/O 空间，C 源文件下设计准优化 SPWM 产生主程序。

#### ①系统初始化设置

首先，对系统寄存器、中断寄存器等参数进行初始化设置。主要需对 SCSR1 (系统控制和状态寄存器 1)、WDCR (看门狗)、IMR (CPU 中断屏蔽寄存器)、

IFR (CPU 中断标志寄存器)、WSGR (等待状态) 等进行寄存器参数设定。

本课题部分寄存器设置如下:

```
*SCSR1=0x81fe;      // CLKIN=6M, CLKOUT=24M
*SCSR2 = (*SCSR2 | 0x000B) & 0x000F;
*WDCR=0x00E8;      // 不使能看门狗
*IMR=0x0003;      // 使能 INT2 级定时器中断、INT1 级 SCI 中断
*IFR=0xFFFF;      // 清除全部中断标志
*WDKEY=0x5555;
*WDKEY=0xaaaa;
*EVAIFRA = 0xFFFF;      // 清除所有 EVA 中断
*EVAIMRA = 0x0000;      // 使能所有 EVA 中断
```

其中, 通过 SCSR1 寄存器设置 CPU 时钟, 同时使能 SCI、EVA 模块, 通过 IMR 寄存器使能 SCI 中断及定时器中断。正确设置系统寄存器才能成功实现 PWM 波形产生及 DSP 与 PC 机之间的数据通讯。

实现按要求变化的 PWM 控制信号的关键在于产生定时器中断, 因此在对中断寄存器初始化设置的同时, 还需在 .ASM 文件中编写中断向量表, 如下:

```
.ref _c_int0, _timer, _uarttr      // 定义中断程序名 interrupt timer(), uarttr()
.sect    "vectors"
reset:   B        _c_int0          ;00h reset
int1:    B        _uarttr          ;02h INT1
int2:    B        _timer           ;04h INT2
```

## ② PWM 相关寄存器初始化设置

完成系统寄存器的设置后, 需对 PWM 相关寄存器进行初始化设置。主要需对 MCRA (I/O 复用控制寄存器 A)、ACTRA (比较方式控制寄存器 A)、DBTCONA (死区控制寄存器 B)、T1PR (定时器 1 周期寄存器)、T1CON (定时器 1 控制寄存器)、T1CNT (定时器 1 计数寄存器)、COMCONA (比较控制寄存器 A)、GPTCONA (全局通用定时器控制寄存器 A) 等寄存器进行初始化设置。

本课题 PWM 产生的部分寄存器设置如下:

```
*MCRA = 0x0fc3;      // 使能 I/O 口为 PWM 输出接口
*T1CON = 0x0840;      // 设置计数模式为连续增/减计数
*T1CNT = 0x0000;      // 清空定时器 1 计数值
```

```

*T1PR = tc;           // 初始设置定时器 1 周期寄存器值
*DBTCONA = 0x0fe0;   // 死区设置
*ACTRA = 0x0999;     // 设置 PWM 输出低/高有效
*COMCONA = 0x8200;   // 使能比较方式

```

注意，在对定时器进行初始化设置时，需先禁止定时器，初始设置完成后，再使能定时器。同时注意必须选择 I/O 口为 PWM 输出才能产生 PWM 控制信号。由于本课题采用比较单元产生 PWM 控制信号，因此需对比较方式寄存器进行适当的设置。

在 PWM 产生的过程中，定时器的定时周期的计算也是相当关键的部分。因为定时器的定时周期数等于周期寄存器的值加 1，所以周期寄存器的值决定了定时周期数。本课题在对 SPWM 进行控制时，除了采取定时更新比较寄存器的设定值来改变输出电压幅值外，还根据控制需要改变定时器周期寄存器的设定值，以改变输出脉冲的频率。定时周期数的计算公式如下：

$$\text{定时周期数} = T_xPR + 1 = \frac{\text{预延时时间}}{\text{预分频因子}} * \text{DSP 内部锁相环 4 倍频} \quad (4-6)$$

则可计算出定时器周期寄存器的设定值为

$$T_xPR = \frac{\text{预延时时间}}{\text{预分频因子}} * \text{DSP 内部锁相环 4 倍频} - 1 \quad (4-7)$$

### ③ PWM 产生程序

程序流程图如图 4-8。当 PC 机通过串口通信向 DSP 发送系统参数、螺旋桨设定工况及螺旋桨设定转速时，DSP 发生接收中断，进入中断程序，根据螺旋桨仿真电机数学模型计算出该参数及工况下螺旋桨仿真电机定子三相电压、频率大小，从而改变定时器周期寄存器的设定值和比较寄存器的设定值，以改变脉冲频率及宽度，即改变电压频率及幅值。如果没有发生接收中断，则按照原有仿真电机工作状态进行 DSP 的 PWM 控制。

根据第 4.1 节对准优化 SPWM 的研究，可知本程序中调制波信号是如图 4-2 的波形，通过 Matlab 仿真软件对此波形进行仿真实验，并对该调制信号进行采样<sup>[21]</sup>。每个波形周期选取 37 个点，代入式 (4-5) 可得 37 个数值按式 (4-5) 所示函数变化的点。根据第 4.2.1 节脉宽调制电路产生原理可知，要产生一系列占空比变化的脉冲只需定时更新比较寄存器的设定值，因此，利用已采样的得到的 37 个基准幅值按照规则采样法更新比较寄存器 1、2、3 即可产生所需的正弦

波形。部分源代码如下：

```
interrupt void timer1 (void)      // 定时更新比较寄存器
{
    *EVAIFRA = 0xFFFF;          // 清除定时器 1 的中断
    *CMPR1 = 0.5*(1+u*sin_table[index_pwm%num_f_d]);
    *CMPR2 = 0.5*(1+u*sin_table[(index_pwm+((2*num_f_d)/3))%num_f_d]);
    *CMPR3 = 0.5*(1+u*sin_table[(index_pwm+((num_f_d)/3))%num_f_d]);
}
```

其中,  $\sin\_table$  函数为调用已采样的 37 个点, 分别为 ( 0, 0.2830, 0.5377, 0.7417, 0.8835, 0.9643, 0.9959, 0.9973, 0.9882, 0.9833, 0.9882, 0.9973, 0.9959, 0.9643, 0.8835, 0.7417, 0.5377, 0.2830, 0, -0.2830, -0.5377, -0.7417, -0.8835, -0.9643, -0.9959, -0.9973, -0.9882, -0.9833, -0.9882, -0.9973, -0.9959, -0.9643, -0.8835, -0.7417, -0.5377, -0.2830, 0 )。  $u$  为幅值, 最大不超过 1。

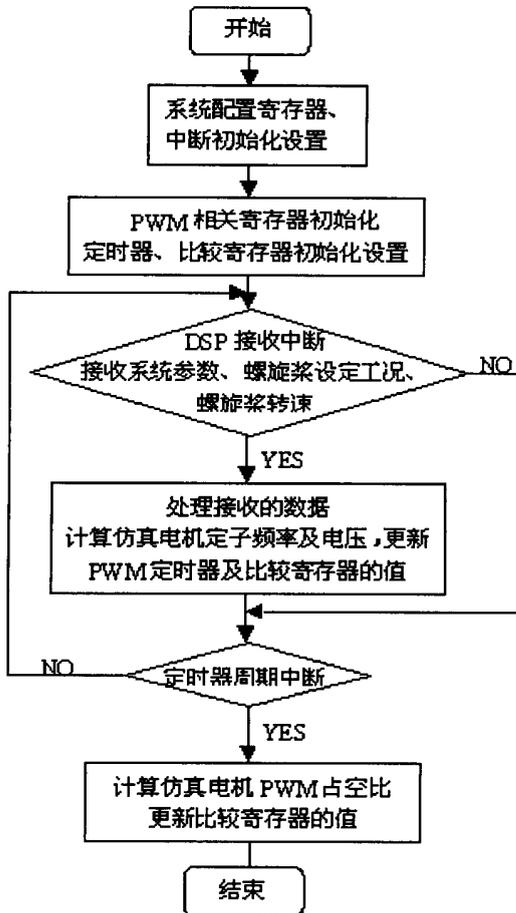


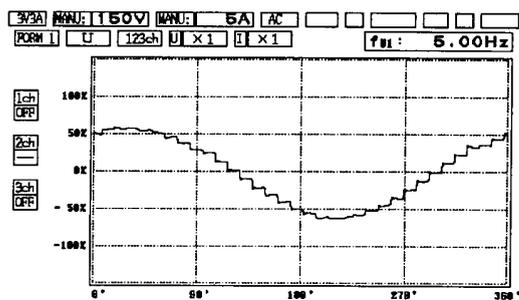
图 4-8 SPWM 程序流程图

4) 实验结果

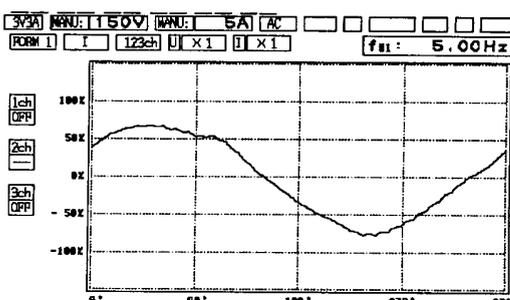
本课题采用 HIOKI 的 3194 电力计对 DSP 的输出脉冲及三相波形进行观测，测得优化的 SPWM 螺旋桨仿真电机实验数据如表 4-1。部分波形如图 4-9。

表 4-1 优化的 SPWM 螺旋桨仿真电机实验数据

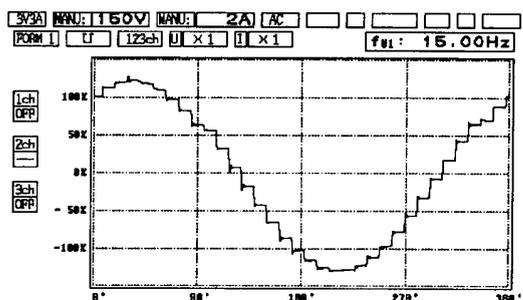
| 转速 n (r/min) | 频率 f (Hz) | 电压 U (V) | 电流 I (A) |
|--------------|-----------|----------|----------|
| 75.5         | 5.00      | 106.97   | 4.0156   |
| 119.9        | 8.00      | 137.76   | 3.1752   |
| 179.6        | 12.00     | 158.41   | 2.3213   |
| 224.4        | 15.00     | 164.84   | 1.8943   |
| 300.1        | 20.00     | 179.22   | 1.4283   |
| 449.4        | 30.00     | 185.32   | 0.9833   |



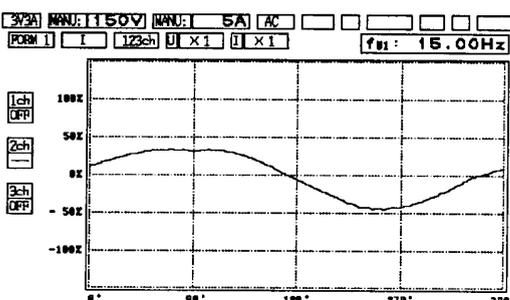
频率为 5.00Hz 时电压波形



频率为 5.00Hz 时电流波形



频率为 15.00Hz 时电压波形



频率为 15.00Hz 时电流波形

图 4-9 优化的 SPWM 螺旋桨仿真电机电压、电流波形图

本课题还对未经优化的 SPWM 控制进行了对比试验，试验结果如表 4-2

表 4-2 未经优化的 SPWM 螺旋桨仿真电机实验数据

|           |       |        |        |        |        |        |
|-----------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 频率 f (Hz) | 5.00  | 8.00   | 12.00  | 15.00  | 20.00  | 30.00  |
| 电压 U (V)  | 75.59 | 104.53 | 122.84 | 129.33 | 143.95 | 149.55 |

通过实验数据对比计算发现，优化后的 SPWM 调制技术与不加入三次谐波的传统 SPWM 相比，电压利用率提高了 23.92% 以上。电压电流波形较为平滑，电机振动较小。

## 第五章 船舶电力推进实时监控设计

电力推进系统中，变频装置和电动机成为核心部分，与它相关的参数多半是快速变化的电参量，这就要求其监控系统具有更高的实时性、可靠性。前几章已对船舶电力推进装置及螺旋桨仿真电机控制进行了探索和研究，对设备间数据的实时传输和处理成为电力推进稳定运行的重要因素之一。本章就船舶电力推进装置数据实时传输及实时监控进行研究。

### 5.1 实时数据采集设计

根据船舶电力推进实时监控的要求，本课题采用 CC-Link 开放式现场总线技术及 RS-232 串口通信技术，实现设备间的数据实时传输与处理，使用 ISA 总线式扭矩测量插卡对扭矩仪进行数据采集，如图 5-1。

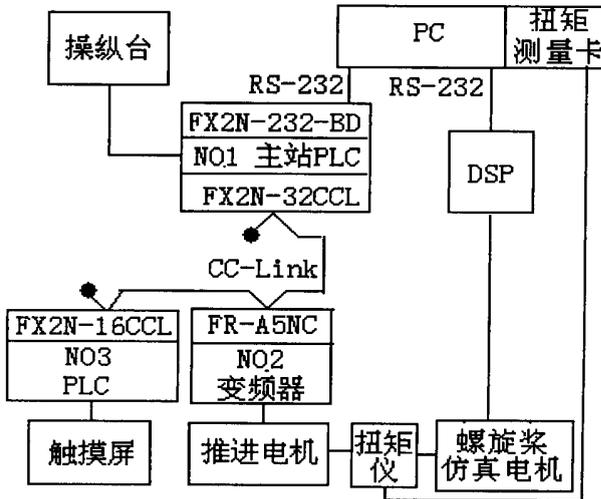


图 5-1 实时监控系统框图

CC-Link 可靠性高、实时性强，可实现主站 PLC 与变频器、分站 PLC 之间的数据实时传输，将变频器数据，如推进电机的电压、电流、转速等，及分站 PLC 的数据信息实时发送至主站 PLC，同时将主站 PLC 的数据、控制指令发送至变频器及分站 PLC。本课题采用 RS-232 串口通讯实现 DSP 与 PC 机、主站 PLC 与 PC 机间的数据传输。ISA 总线式插卡是与计算机及磁电式相位差型转矩转速传感器配套的数据采集卡，可实时监测数据。PC 机的监控平台将 DSP、主站 PLC、数据采集卡采集的数据进行处理与显示，同时通过此平台设置系统参数、发送系统控制指令。

## 5.2 DSP 与 PC 机通讯

由于串口通信具有线路简单、应用灵活、可靠性高等优点，长期以来得到广泛应用。计算机串口通信在数据采集、数据通讯、故障检测、计算机远程监控等方面有广泛的实用价值。特别是在 Windows 操作系统环境下可以充分利用 Windows 的软件资源，实现多任务条件下对外部的数据传输、信息收集和处理。因此本课题采用标准串行接口 RS-232 利用 DSP 电机控制板串行通信接口模块（SCI）与 PC 机间的数据传输。

### 5.2.1 DSP 串口通信接口模块（SCI）

#### 1) SCI 模块概述<sup>[6]</sup>

DSP 的 SCI 模块支持 CPU 与其他使用标准格式的异步外设之间的数字通信。SCI 接收器和发送器是双缓冲的，每一个都有它自己单独的使能和中断标志位。两者都可以独立工作，或者在全双工的方式下同时工作，为了确保数据的完整性，SCI 对接收到的数据进行间断检测、奇偶性校验、超时和帧出错的检查。通过一个 16 位的波特率选择寄存器，数据传输的速度可以被编程为 65535 多种不同的方式。SCI 模块的特征包括：

- 两个外部引脚：

SCITXD：SCI 发送数据引脚；

SCIRXD：SCI 接收数据引脚。

在不使用 SCI 时，这两个引脚可用作通用 I/O 口。

- 通过一个 16 位的波特率选择寄存器，可编程位 64K 种不同速度的波特率；在 40MHz 的 CPU 时钟方式下，波特率范围从 76bps 到 1875Kbps。
- 数据格式：一个起始位；1~8 位的可编程数据字长度；可选择的奇/偶/无校验位；一个或两个停止位。
- 4 种错误检测标志位：奇偶错、超时、帧出错或间断检测。
- 两种唤醒多处理器方式：空闲线或地址位唤醒。
- 半双工或全双工操作。
- 双缓冲的接收和发送功能。
- 发送和接收的操作可以利用状态标志位通过中断驱动或查询算法来完成。

发送器：TXRDY 标志（发送缓冲寄存器准备接收另一个字符）和 TX EMPTY 标志位（发送移位寄存器空）；

接收器：RXRDY 标志（接收缓冲寄存器准备接收另一个字符）、BRKDT 标志（中断条件发生）和 RX EERR 标志（监视 4 个中断条件）。

- 发送器和接收器的中断位可独立使能（除 BRKDT 外）。
- 不返回零（NRZ）格式。
- SCI 模块的 10 个控制寄存器地址位于 7050h~705Fh 之间。

注意，SCI 模块内的所有寄存器为 8 位，但是它又与 16 位的外设总线相连。因此当访问这些寄存器时，寄存器的数据在低字节（0~7 位），高字节（8~15 位）读出为 0，对高字节的写操作无效。

## 2) 通信模块中的接收器信号

在使用接收器时应注意以下几点：

- 设置 RXENA 位为 1 来使能接收器接收数据；
- 数据到达 SCIRXD 引脚后，检测到起始位；
- 数据从 RXSHF 寄存器移到 SCIRXBUF 寄存器中，产生中断请求。标志位 RXRDY 变为 1 表示已收到一个新字符；
- 当读 SCIRXBUF 寄存器时，标志位 RXRDY 自动被清除；
- 数据的下一个字节到达 SCIRXD 引脚，检测到起始位，然后清除；
- 如 RXENA 变低，则接收器被禁止。数据继续保持在 RXSHF 寄存器中，但没有移入到 SCIRXBUF 寄存器中。

## 3) 通信模块中的发送器信号

在使用发送器时应注意以下几点：

- 设置 TXENA 位为 1 来使能发送器发送数据。
- SCITXBUF 寄存器被写入，从而发送器不再为空，TXRDY 变低。
- 串行通信接口将数据传送到 TXSHF 寄存器。发送器准备传送第 2 个字符（TXRDY 变高），并发出发送中断请求（为使能发送中断，必须将 TXINTENA 位置为 1）。
- TXRDY 变高后，程序将第 2 个字符传送到 SCITXBUF 寄存器，写入后 TXRDY 又变低。

- 发送完第 1 个字符后, TX EMPTY 位暂时升高。将第 2 个字符传送到 TXSHF 寄存器的操作开始。
- 如 TXENA 位变低, 则发送器被禁止。串行通信接口结束发送当前字符。
- 发送完第 2 个字符后, 发送器变空并准备发送新字符。

#### 4) 串行通信接口中断

串行通信接口的接收器和发送器可由中断来控制, SCICTL2 有一个标志位 (TXRDY) 用来指示有效的中断条件, SCIRXST 寄存器中有两个中断标志位 (RXRDY 和 RBKDT)。发送器和接收器有各自的中断使能位。当中断屏蔽时, 中断不会发生。但条件标志位仍然有效, 该位反映了发送和接收的状态, 可用于查询方式。

串行通信接口的发送器和接收器有自己独立的外设中断向量。外设中断请求可使用高优先级或低优先级, 中断优先级有 SCIPRI 寄存器中相应位来控制, 当接收和发送中断都设置为相同的优先级时, 接收中断往往具有更高的优先级, 这是为了减少接收超时错误。

#### 5) 串行通信接口波特率计算

内部生成的串行时钟由系统时钟 SYSCLK 频率和波特率选择寄存器决定。串行通信接口使用 16 为波特率选择寄存器, 数据传输的速度可以被编程为 65000 多种不同的方式。

不同通信模式下的串行通信接口异步波特率由下列方法决定:

- BRR=1~65535 时的异步通信接口异步波特率为:

$$\text{SCI 异步波特率} = \text{SYSCLK} / [(\text{BRR} + 1) \times 8] \quad (5-1)$$

其中  $\text{BRR} = \text{SYSCLK} / (\text{SCI 异步波特率} \times 8) - 1$ ;

- BRR=0 时的异步通信接口异步波特率为:

$$\text{SCI 异步波特率} = \text{SYSCLK} / 16 \quad (5-2)$$

#### 5.2.2 串口通信硬件电路设计

本课题使用 DSP 的 SCI 接口完成与 PC 机的串口通讯功能。采用符合 RS-232 标准的驱动芯片 MAX3227E, 如图 5-2。MAX3227E 是由 MAXIM 公司生产的高

速、低功耗、3V RS-232 接口芯片，具有两个接收和发送器。图中 9、11 号引脚接 DSP 芯片的 SCIRXD、SCITXD 引脚，8、13 号引脚接 RS-232 接口的 RXD、TXD 引脚。

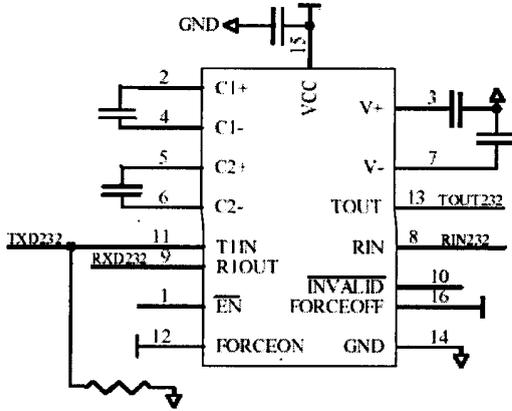


图 5-2 SCI 接口电路图

### 5.2.3 串口通信软件设计

#### 1) SCI 参数初始化设置

由于第 4.2.3 节已对系统寄存器初始化设置及中断设置做了研究，因此这里不再赘述。与 PWM 产生程序设计相似的是 SCI 串口通信设计同样需要对 SCI 相关的寄存器进行初始化设置。其中主要包括 SCICCR（串行通信接口通信控制寄存器）、SCICTL1（串行通信接口控制寄存器 1）、SCICTL2（串行通信接口控制寄存器 2）、SCIHBAUD（串行通信接口波特率选择高字节寄存器）、SCILBAUD（串行通信接口波特率选择低字节寄存器）等寄存器。本课题部分程序源代码如下：

```
*SCICCR=0x0047;           // 一个停止位，禁止校验，8 位字符
*SCICTL1=0x0013;         // 使能接收和发送
*SCICTL2=0x0083;         // 使能接收和发送中断
*SCIHBAUD=0x0002;        // 波特率=9600 b/s
*SCILBAUD=0x0008;
```

注意，此处串行通信参数设置需与 PC 机一致。

## 2) SCI 串行通信程序

TMS320LF2407 串行通信设计可以采用查询和中断两种不同的方式,其中查询方式是在查询到相应标志成立时,才执行相应动作,因此它会使 DSP 陷于等待和反复查询中,降低了 DSP 的利用率。因此本课题采用中断方式进行串行通信。

在中断方式下, DSP 启动串行口后就不再询问它的状态,直到串口产生中断时,先向 DSP 申请中断, DSP 响应中断后就暂时中断自己的程序,执行相应的串口中断服务程序,执行完后再返回主程序,使得信息得到及时处理。

本文以 DSP 接收 PC 机发送的数据为例,程序流程如图 5-3。当 PC 机通过 SCI 串口通信向 DSP 发送系统参数及螺旋桨设定工况时, DSP 发生 SCI 接收中断,进入中断程序,根据螺旋桨仿真电机数学模型计算出该参数及工况下相应的数据,如螺旋桨的转速、需调制的定子三相电电压、频率大小。由于在第 4.2.3 节已进行过描述,这里不再重复。

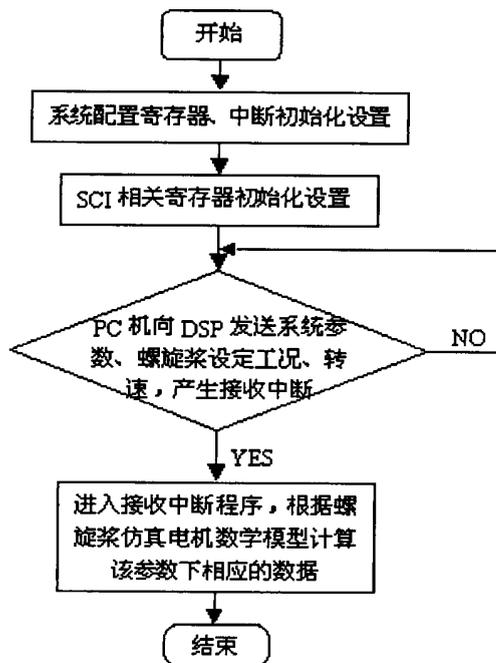


图 5-3 DSP 接收数据程序流程图

由于当发生 SCI 中断时,并没有明确是接收中断还是发送中断,因此需对中断向量寄存器 PIVR 进行判断。部分源代码如下:

```

void interrupt uartrr()
{switch(*PIVR) // 根据中断向量寄存器区别接收发送中断

```

```
{case 0x0006:UartRec();      // PIVR=6, 则发生接收中断, 执行接收服务程序
 case 0x0007:UartSent();}} // PIVR=7, 则发生发送中断, 执行发送服务程序
```

另外, 还需注意, 由于 DSP 的 SCI 串行通信不能自动发送数据, 因此需在主程序中触发发送事件。本课题通过向发送数据寄存器 SCITXBUF 中写入一个空数据触发发送事件。

在接收和发送数据完成后, 需通过向 IFR 寄存器写数值的方式清除相应中断, 然后再使能总中断。使能总中断的源代码如下:

```
asm(" clrc INTM");
```

### 5.3 PLC 与 PC 机通讯

本课题使用 RS-232 串行通信实现主站 PLC 与 PC 机间的数据交换。主站 PLC 配置 RS-232 串口通信模块, 型号为 FX2N-232-BD。

#### 1) 串口通信参数初始化设置

##### ①PC 机中串口初始化设置

PC 机使用 Visual Basic6.5 作为人机友好界面的开发环境, 采用 MSComm 串口通信专用控件实现 PC 机与下行设备间的串口通信<sup>[22]</sup>。在界面中调入 MSComm 控件后, 需对其进行通讯参数设置, 只有 PC 机与主站 PLC 通讯参数设置匹配时两者才能进行数据传输。以下为部分初始化设置代码:

```
MSComm1.CommPort = 2    '使用 COM2 口
MSComm1.Settings = "9600,n,8,1"    '设定串口参数
MSComm1.InputMode = comInputModeText    '设定接收数据格式
MSComm1.PortOpen = True    '开端口
```

##### ②PLC 串口初始化设置

为了实现 PLC 与 PC 机间的串口通信, 还需对 PLC 的特殊数据寄存器 D8120 和 D8121 进行通讯初始化设置。PLC 初始化设置梯形图如图 5-4。其中, 数据寄存器 D8120 为串口参数设置, D8121 为站点设置<sup>[23]</sup>。注意, 在对 D8120 进行参数设置需与 PC 机串口参数设置保持一致。

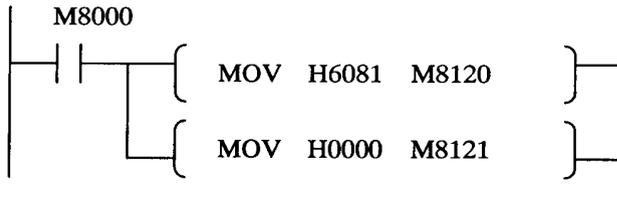


图 5-4 PLC 串口通信初始化设置

## 2) 串口通信数据传输程序设计

本课题采用 PC 机定时读取 PLC 数据，实时向 PLC 发送数据的方法进行程序设计，流程图如图 5-5。运用 Timer 控件定时读取数据，定时值越小实时性越高，但过小则易产生误差。经过反复试验测试，时钟控件中断周期设为 300ms，即 PC 机对主站 PLC 数据扫描周期为 300ms 时监测性能较好。操作按钮触发数据发送命令。考虑到数据传输的速度与精度，读写数据时采用批读写<sup>[8]</sup>。

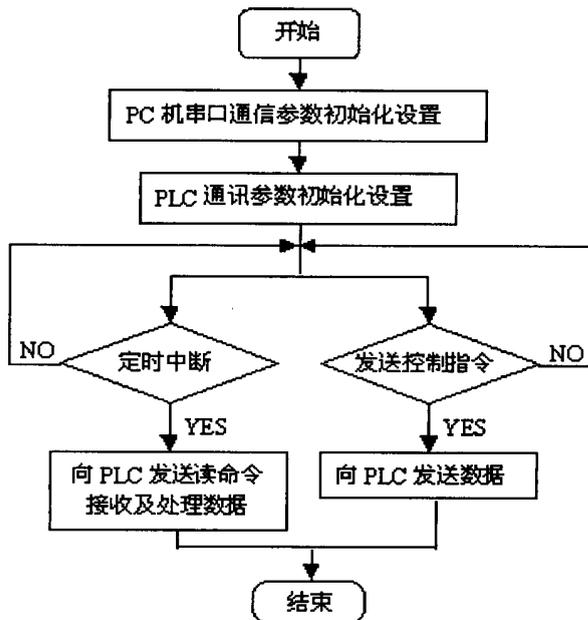


图 5-5 PLC 串口通信程序流程图

## 5.4 CC-Link 现场总线通讯

设备通讯参数的正确设置是实现系统数据实时准确传输的关键。本课题采用的 CC-Link 现场总线通讯设置方便，系统组态容易，只需在主站 PLC 中使用通用的 PLC 编程软件进行简单的 CC-Link 网络参数设置，即可实现 CC-Link 现场总线数据传输。

### 1) 硬件配置

要实现 CC-Link 现场总线通讯，需为设备配置相应的总线模块。

由于主站 PLC 选用了三菱 FX2N 系列的产品，因此相应配备了型号为 FX2N-16CCL-M 的 CC-Link 主站模块。变频器配备型号为 FR-A5NC 模块，分站 PLC 配备 FX2N-32CCL 模块。

硬件安装完成后需对 CC-Link 模块进行硬件设置，包括站号、模式、数据传输速度、条件设置等。对于 FX2N-16CCL-M 主站模块，将站号 10 拨钮拨至 0，站号 1 拨钮拨至 0，确保站号设定为 00；模式设置为 0；数据传输速度设置为 2（2.5Mbps）；条件设置为 OFF。以同样方法设置其他 CC-Link 模块。

### 2) CC-Link 链接初始化设置

通过 CC-Link 现场总线进行主站与分站间数据交换时，除了完成硬件设置与安装外，还需要通过软件对 CC-Link 进行参数设置。因为 E<sup>2</sup>PROM 掉电保持，因此通过寄存参数到 E<sup>2</sup>PROM 中，在主站每次初始化时，即电源由关到开时参数设置将不需要被执行。

### 3) 数据通讯的实现

三菱 CC-Link 现场总线数据通讯主要包括：远程 I/O 站通信，远程装置站通信和本地通信等。本课题主要涉及了远程装置站通信，实现主站 PLC 与分站变频器、分站 PLC 间的数据通信。通讯过程如图 5-6。主站开辟的缓冲寄存器供 CC-Link 总线进行数据交互。通过 PLC 的功能指令 FROM 和 TO 实现数据的读写。

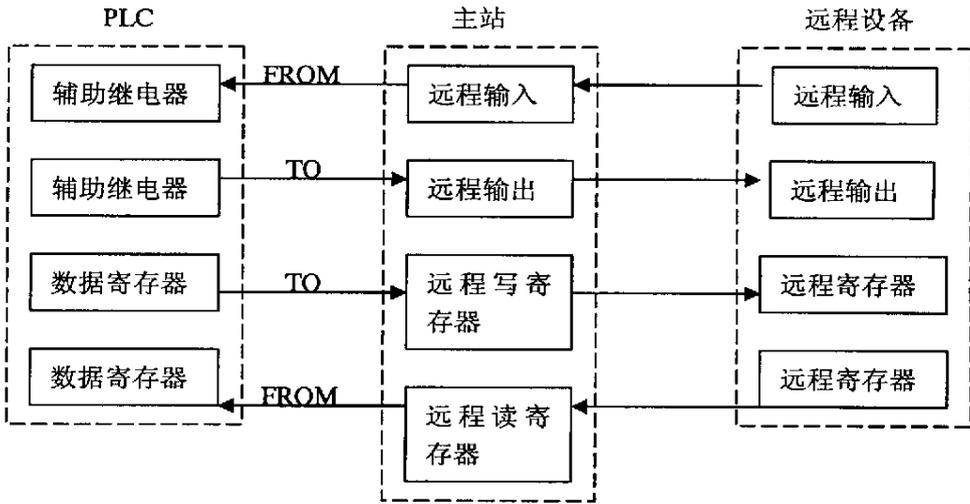


图 5-6 远程装置站数据通讯过程

### 5.5 数据采集卡

本课题采用与扭矩仪及计算机相匹配的扭矩转速测量卡，采集扭矩仪测量的参数，并将数据传送至 PC 机。如图 5-6 所示，型号为 TC-1ISA 扭矩转速测量卡属于计算机 ISA 总线式插卡。



图 5-6 TC-1ISA 扭矩转速测量卡

#### 1) 硬件设置及安装

用跳线将扭矩卡上的 A4、A5、A6、A7、A8、A9 设置 I/O 地址，必须保证设置的地址不被计算机中其它硬件所占用。TC-1 使用 16 个连续 I/O 地址，可以在 0~3FFH 之间任选一组地址；在 IRQ5、IRQ3、IRQ10、IRQ11、IRQ12 或 IRQ15 之间任选一中断，将 X3 的跳线全去掉，则 TC-1 不使用中断。将扭矩卡插入计算机的 ISA 插槽中。安装扭矩卡驱动程序。

表 5-1 TC-1ISA 的 SW(DIP)开关

| A4  | A5  | A6  | A7  | A8  | A9  | 地址       | 编号  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|-----|
| ON  | ON  | ON  | ON  | ON  | ON  | 000~00FH | 0   |
| OFF | ON  | ON  | ON  | ON  | ON  | 010~01FH | 1   |
| ON  | OFF | ON  | ON  | ON  | ON  | 020~02FH | 2   |
| ... |     |     |     |     |     |          | ... |
| ON  | ON  | ON  | ON  | OFF | OFF | 300~30FH | 48  |
| ... |     |     |     |     |     |          | ... |
| OFF | OFF | OFF | OFF | OFF | OFF | 3F0~3FFH | 63  |

## 2) 软件开发

本课题使用 Visual Basic 6.5 集成开发环境在 PC 机上开发了扭矩数据采集平台。本扭矩卡 TC-1 以 DLL 形式，提供四个函数可供 VB 编程时调用，通过调用这些函数，可实现对扭矩的数据采集和处理。接口函数如下：

- 设置参数函数：SetParameter ( )
- 启动测量函数：StartTest ( )
- 判测量结束标志函数：GetTestFlag ( )
- 取测量数据函数：GetTestValue ( )

## 5.6 人机接口 (HMI)

要实现船舶电力推进实时监控系统的实时数据通讯。通过前面对 PC 机与 DSP 的串口通信、PC 机与 PLC 的串口通信、设备间的 CC-Link 现场总线以及 PC 机与扭矩传感器之间的数据采集等通讯的实践，本课题已成功构建了船舶电力推进装置的实时监控网络，完成了设备间的网络连接。在实现硬件连接的同时，还需要在 PC 机上开发适用于此监控网络的人机接口 (HMI)，以完成船舶电力推进实时监控系统的全部工作。

根据本课题的研究内容及主要研究任务，要求人机接口需要实现如下一些基本功能：监测及控制船舶电力推进中各设备的参数及运行状态，如监测推进电机、螺旋桨仿真电机的电压与电流，推进电机的给定转速与实际转速，设备运行状态，网络通讯状态，同时实时绘制推进电机、螺旋桨仿真电机的电流以及实际转速动态曲线图，设置系统参数，主要包括船型，螺旋桨半径等相关参数，设定需模拟

的螺旋桨工况，发送系统操作指令等。

Visual Basic 6.5 集成开发环境功能强大，自带丰富的功能控件可供不同需求调用。本课题应用 Visual Basic 6.5 进行船舶电力推进装置实时监控平台的设计开发。

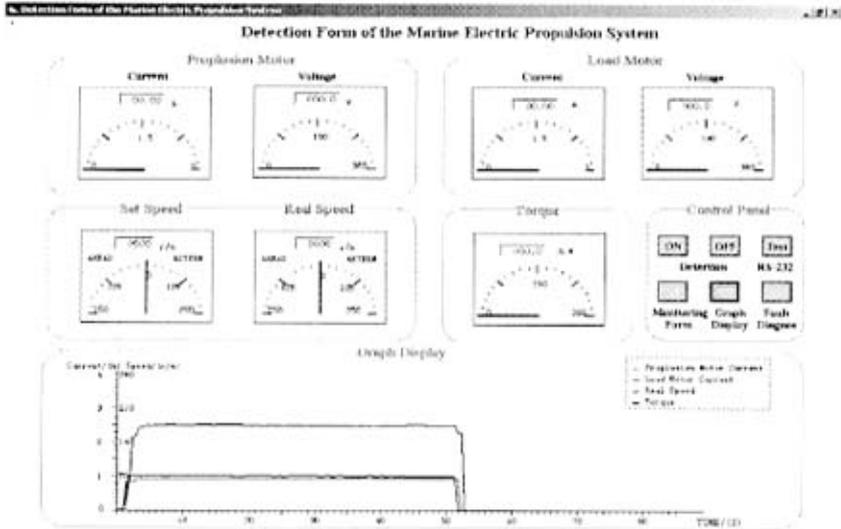


图 5-7 船舶电力推进装置监测界面

船舶电力推进装置实时监控人机接口包括监测界面、控制界面、参数设置界面及故障诊断界面。监测界面如图 5-7，用于实时显示系统仪表情况，绘制装置参数动态曲线图等，图中所示曲线为推进电机与负载电机从启动到制动状态的电流变化及实际转速变化情况。控制界面如图 5-8 所示，用于船舶电力推进速度控制信号的给定、设备运行状态的显示等。参数设置界面如图 5-9 所示，用于设定装置参数及螺旋桨工况。

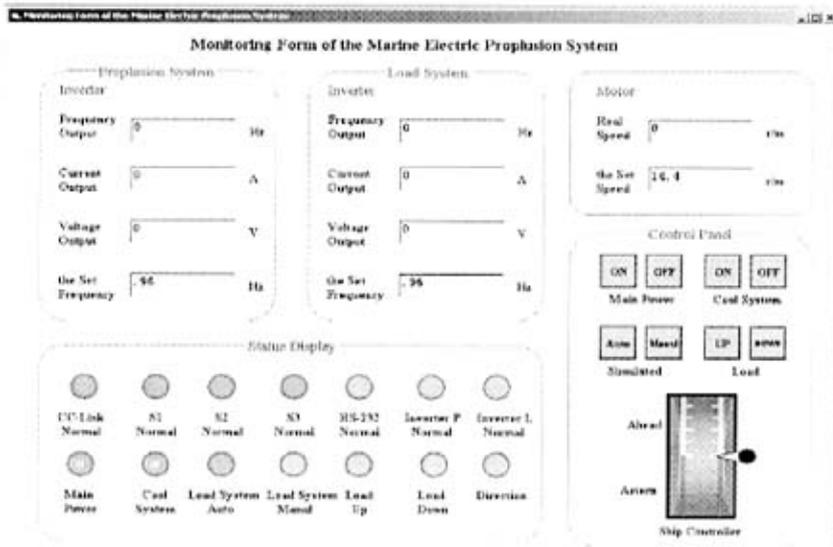


图 5-8 船舶电力推进装置控制界面

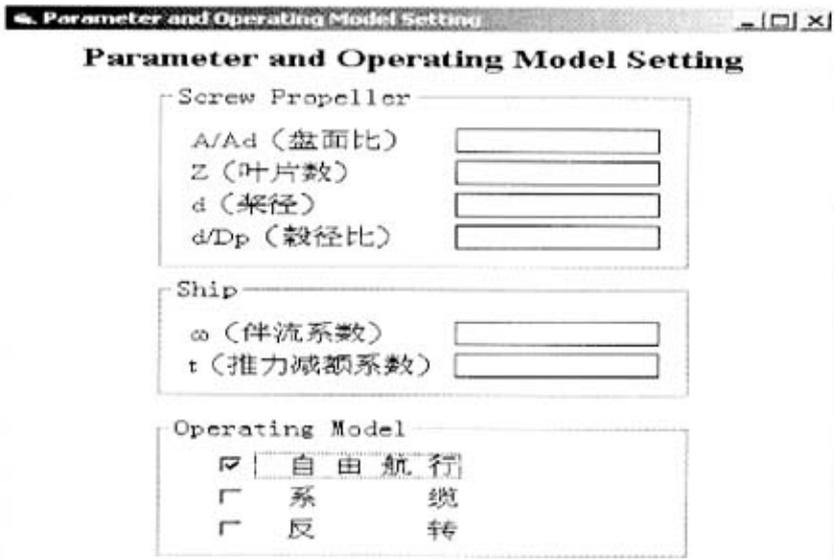


图 5-9 参数设置界面

对该监控平台进行实验，图 5-10 为推进电机从起动到停止过程中，推进电机和螺旋桨仿真电机电流、转速变化曲线。图 5-11 为推进电机五级加速时电流转速变化曲线。

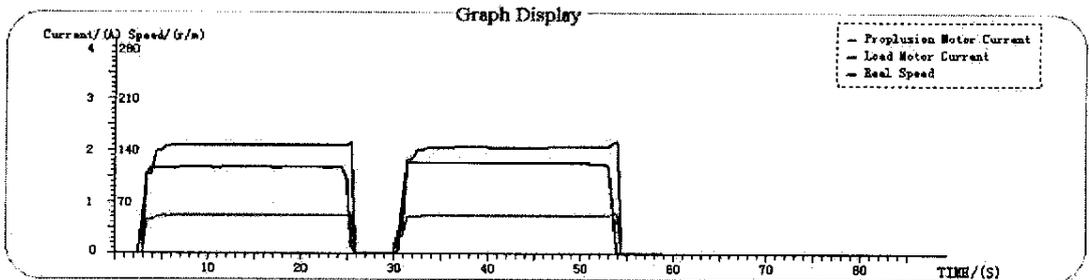


图 5-10 推进电机起停时推进电机及螺旋桨仿真电机电流、转速曲线

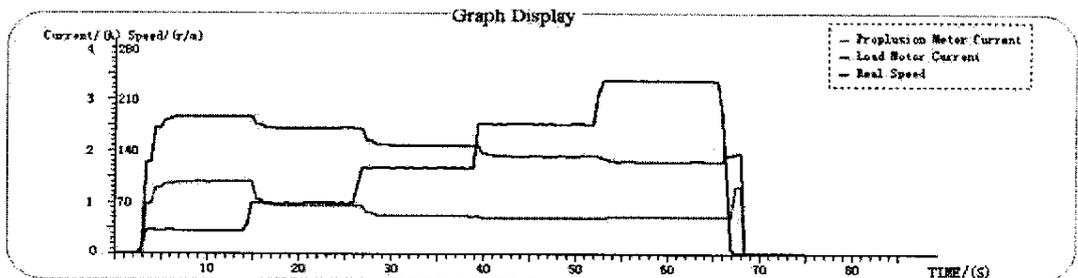


图 5-11 推进电机五级加速时电流、转速曲线

## 第六章 总结和展望

### 6.1 全文总结

本论文得到了上海市教委科研项目——“船舶电力推进混合仿真系统”相关研究资金的支持。经过一年多的努力，本文也已接近尾声。总结这一年多的工作，本课题主要完成了以下一些内容：

- 根据船舶电力推进装置的结构特点及运行方式，设计船舶电力推进装置仿真，采用交流异步电机作为模拟螺旋桨特性的负载电机，完成设备硬件选型及安装；
- 根据螺旋桨推进器的工作特性以及异步电机的机械特性，推导螺旋桨仿真电机的数学模型，并对本课题采用的异步电机进行实验测试，通过实验数据确定异步电机的机械特性。同时参照某艇的螺旋桨参数及工况数据，设定本课题螺旋桨的相关参数及特性。
- 采用 TMS320LF2407 DSP 电机专用控制芯片实现对螺旋桨仿真电机的交流调速控制，对传统 SPWM 技术进行优化，改善电压利用率。
- 采用 CC-Link 现场总线技术及串口通信技术实现船舶电力推进实时监控，在上位 PC 机 Windows 操作环境下应用 Visual Basic 软件开发实时监控人机友好界面。
- 对设备进行调试与实验，整理、分析并总结实验数据，完成论文的撰写。

船舶电力推进系统是一个相当复杂的系统，通过短短一年多的研究还是远远不够的。由于没有掌握丰富的螺旋桨实验数据，本课题在对螺旋桨数学建模时还存在着一些不足。在监控系统的设计上，应对数据传输的实时性及准确性等方面加以改善。

### 6.2 展望

船舶电力推进系统具有许多传统推进系统不可比拟的优势，是国内外船舶制造行业研究的热门，随着电力电子技术、电机、交流调速技术和数字控制技术的发展，船舶电力推进系统在调节性能、机动性、运行效率、推进功率等方面都有突破性进展，应用范围不断扩大。

在对船舶电力推进系统进行研究与完善的过程中，验证系统的可行性、稳定性是非常关键的，测试结果直接反映出系统设计的质量。此类测试过程往往需要

使用螺旋桨推进器实物工作在不同工况下，这对测试条件提出了很高的要求，不仅需要与实船相同的螺旋桨推进器作为测试对象，还需要可产生不同工况的水槽，必将大大增加研究成本。针对这一矛盾，本文提出以交流异步电机代替真实螺旋桨，通过异步电机模拟螺旋桨工作特性以完成系统测试工作是非常具有应用价值的。随着对螺旋桨仿真电机研究的不断深入，必能形成一套机动性强、成本低、维护方便的测试设备，以完成电力推进系统的测试工作。这对船舶电力推进系统的深入研究和完善是非常有意义的。

同时，对船舶电力推进监控系统进行深入研究也是船舶电力推进系统发展的重要方向。船舶电力推进监控系统的实时性与稳定性直接影响了船舶航行的安全。随着电子技术、调速技术、数字控制技术、通信技术等的不断发展，船舶控制必将趋于智能化，网络化，人性化，这就要求其监控系统必须具备更高的性能。

随着对船舶电力推进系统的不懈研究与完善，电力推进系统必将成为未来船舶的主要推进方式，船舶电力推进系统必将拥有更加广阔的前景！

## 致谢

本课题和论文是在我的导师薛士龙副教授的悉心指导和大力帮助下完成的。薛士龙副教授治学严谨、博学多闻、循循善诱、诲人不倦、体贴学生、对工作认真负责的精神令我受益匪浅，并在课题设计和硬件开发上给予了极大的支持和很多指导。在此，谨向薛士龙副教授表示我衷心的感谢，并致以崇高的敬意！

同时，十分感谢桂如裕老师在硬件设计上给予的帮助，十分感谢陈巨涛师兄在 DSP 软件设计方面给予的支持和帮助，感谢父母和朋友们在这段时间里给我的支持与鼓励，在此一并致以谢意！

## 参考文献

- [1] 张敏, 船舶电力推进的新发展 机电设备, 2001 年第 1 期
- [2] 高海波 陈辉 林治国, 民用船舶电力推进系统的发展 中国水运, 2005 年第 1 期
- [3] 李现兵 师宇杰 王广州 王桂荣, 浅谈现代电力电子器件的发展 电力电子, 2005 年第 3 期
- [4] 王树, 变频调速系统设计与应用 机械工业出版社, 2005 年 4 月
- [5] 刘和平, TMS320LF240xDSP C 语言开发应用 北京航空航天大学出版社, 2003 年 1 月
- [6] 白焰, 现场总线控制技术及应用及展望 东方自动化, 2004 年第 5 期
- [7] 樊印海, 电力推进自动控制 大连海事大学出版社, 1998 年 2 月
- [8] MITSUBISHI MELSEC-F User's Manual
- [9] 富田电气 通用变频感应电动机使用手册
- [10] MITSUBISHI Inverter FR-A500 User's Manual
- [11] TC-1 转矩转速测量卡使用说明
- [12] MITSUBISHI FX2N-16CCL-M Control & Communication-Link System Master Block User's Manual
- [13] MITSUBISHI FX2N-232-BD Communication Board User's Guide
- [14] 杨晓丽, 吊舱式电力推进系统的动态仿真的研究 上海海事大学, 2002 年 7 月
- [15] 李殿璞, 船舶运动与建模 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 1999.
- [16] 陈伯时, 电力拖动自动控制系统——运动控制系统 机械工业出版社, 2003 年 7 月
- [17] 邱阿瑞, 电机与电力拖动 电子工业出版社, 2002 年 7 月
- [18] 翁史烈, 船舶动力装置仿真技术 上海交通大学出版社, 1991 年 8 月
- [19] 李永东, 交流电机数字控制系统 机械工业出版社, 2002 年 4 月
- [20] 王兆安, 电力电子技术 机械工业出版社, 2004 年 2 月
- [21] 张志涌, 掌握和精通 MATLAB6.5 北京航空航天大学出版社, 2003 年
- [22] 求是科技, Visual Basic 6.0 程序设计与开发技术大全 人民邮电出版社, 2004 年 9 月
- [23] MITSUBISHI FX 通讯用户手册 (RS-232C, RS485)
- [24] SSP Propulsor. Brochure of Siemens, 2001

- [25] A Jmicham, Motors and Drives for Surface Propulsion at Conference on Electric Propulsion, The Effective Solution, IME, 1995(5-6)
- [26] Bose B K, Modern Power Electronics and AC Drives, [s.l.]: Prentice-Hall, 2002
- [27] 金德昌, 姜孟文, 船舶电力推进原理 国防工业出版社, 1993 年
- [28] 孙增忻, 计算机控制理论及应用 清华大学出版社, 1989 年
- [29] 马明建, 周长城, 数据采集与处理技术 西安交通大学出版社, 1998 年
- [30] 谭浩强, C 程序设计 清华大学出版社, 1991 年
- [31] J.W.Donnely, Propulsion Control Optimization of CRP Propeller Driaen Ships, Proceed on SCSC, 1997
- [32] Risto Pakaste, Kati Laukia etc., Azipod Propulsion Systems for Marine Vesseles, Engineering Technology, 4.2000
- [33] Risto Pakaste etc., Experience with Azipod Propulsion Systems on Board Marine Vesseles, ABB Review, 2.1999
- [34] 熊鹰, 金叶铭, 吊舱电力推进系统性能评估及设计方法研究 海军工程大学学报, 2002 年第 1 期
- [35] 聂延生, 李伟光, 汪涌泉, SSP 推进器系统原理及特点分析 船电技术, 2002 年第 1 期
- [36] 船舶设计实用手册动力分册 国防工业出版社, 1999 年 10 月
- [37] 周松展, 潜艇运动数学模型的分析 潜艇技术研究, 1996 年第 2 期
- [38] 李钢, 新型潜艇运动仿真器的设计与实现 计算机仿真, 1996 年第 2 期
- [39] 刘勇, 丛望, 螺旋桨负载特性动态仿真实验的研究 船电技术, 2002 年第 4 期
- [40] 张晨光, 蒋勇勇, 船舶电力推进中的集散型控制系统 现代船机维修技术, 2005 年
- [41] Fong Yuan, Electric Propulsion Gains More Ship in Future, IMECE' 2003
- [42] Yi Zhu, Xihuai Wang, Minzhong Bao, Data Communication in Remote Engine Control Simulation System, IMECE' 2000
- [43] PC 机与单片机&DSP 数据通信技术选编 北京航空航天大学出版社, 2003 年 5 月
- [44] 刘和平, 严利平, 张学锋, 卓严, TMS320LF2407DSP 结构、原理及应用 北京航空航天大学出版社, 2002 年 5 月

## 攻读硕士期间发表的论文

1. 高闽娟, 薛士龙, 刘世梅 船舶电力推进实时监控系统的研究 仪器仪表学报 2006 增刊

## 附录 船舶电力推进装置仿真实物图

