

## 摘 要

当今高速船的种类繁多,新的船型不断出现,对于各种形式的高速船来说,为达到其高速高效运行的目的,它们都具有如下一些特点:其一是对重量非常敏感;其二是结构承受的稳态力和非稳态力较常规船大一些。显然,高速船的这些特性,使得它对航行状态的变化非常敏感。船舶的实际航行状态与设计工况不相符合时,船-机-桨之间的配合远离最佳匹配,必然出现“桨轻”或“桨重”的现象。由此可见,螺旋桨和主机的合理匹配既要充分利用主机的功率,又要在运转工况范围内使主机功率不超过允许的范围,实现船、机、桨的最佳匹配,获得高效的动力性能、经济性能、可靠性能和较长的使用寿命。对于上述问题,采用定距桨是无能为力的,而只有可调桨才能从根本上解决高速船在变工况后的机、桨不匹配问题。

本文主要探讨了高速船可调桨推进系统的建模、控制算法和优化方法。首先,根据高速船的特点,建立了船桨子系统、柴油机子系统和负荷控制子系统、螺距控制子系统、优化控制目标函数等的数学模型。并且,基于 MATLAB/SIMULINK 模块,搭建出整个推进系统的图形仿真模型和高速船可调桨推进系统的优化控制目标模型。然后,在 MATLAB/SIMULINK 平台上编制基于模糊算法的高速船可调桨推进系统的转速控制算法和螺距控制算法,以及在 MATLAB6.5 平台上编制了基于遗传算法的高速船可调桨推进系统优化控制目标的优化程序。最后,使用模糊 PID 控制和传统的 PID 控制对某型舰进行仿真研究,并将仿真结果进行了分析比较。

仿真结果表明,模糊 PID 控制比传统 PID 控制的控制效果要好。模糊 PID 控制器可以很方便地通过调节螺距来改变桨叶的角度,实现主机负荷的增大或减小,从而改善高速船舶在不同工况下的主机推进效率和船舶操纵性能,实现船-机-桨的最佳匹配,延长了主机寿命,降低了营运成本。

**关键词:** 高速船, 可调桨, 推进系统, 优化设计, 模糊算法

## Abstract

Nowadays, there are various sorts of high-speed ship and newly different ship shapes appear endlessly. In order to achieve the goal of high-speedy and high-efficient, many different shapes of high-speed ship obtain characteristics listed below: The first one is that they are sensitive to weight, another one is that steady and non-steady force supported by their structure are stronger than other ordinary ships. Obviously, these characteristics of high-speedy ship result in that they are sensitive to changes of navigation state. When actual navigation state is not matching with the design state, result in that the matching of among ship, engine and propeller keeps away from optimal one, and phenomenona of “light propeller” or “heavy propeller” appear consequentially. Thus it can be seen, to match propeller with main engine reasonably, we not only need to take full advantage of engine’s power, but also make engine’s power can’t go beyond the allowable range in the working state, then achieving a goal of optimal match among ship, engine and propeller and attaining high- efficient power capability, economy capability, reliability and longer useful time. To these above-mentioned problems, there are nothing we use fixed pitch propeller, but can use CPP(Controllable Pitch Propeller) to resolve fundamentally these problems of non-matching for engine and propeller.

This article mainly confers the issues on modeling, control algorithm and optimization method of high-speed ship CPP propeller system. Firstly, based on the characteristics of high-speed ship, math models of ship - propeller subsystem, diesel engine subsystem, load control subsystem, pitch control subsystem, optimization control target function, etc. have been established. While, based on MATLAB/SIMULINK, the whole propeller system’s figure simulation models and high-speed ship CPP propeller system’s optimization control target models have been established. After that, rotate speed control model and pitch control model of high-speed ship CPP propeller system based on fuzzy algorithm have been written down on MATLAB/SIMULINK. As well as the optimization control target program codes of high-speed ship CPP propeller system based on GA (Genetic Algorithm) have been

written down on MATLAB6.5. Finally, CPP propeller system of the frigate has been simulated and researched, using fuzzy-PID control algorithm and traditional PID control algorithm. And the simulation results have been analyzed and compared each other.

The result of simulation indicates, the effect of fuzzy-PID control algorithm is better than one of traditional PID control algorithm. Fuzzy-PID controller can adjust main engine's load, and conveniently changed pitch angle by adjusting CPP's pitch. Accordingly, to improve the efficiency of main engine's propeller and the ship's operation capability in different navigating states, and to achieve the optimal match among ship, engine and propeller, to prolong main engine's age, and to reduce the cost of working.

**Key words:** High-speed Ship, CPP(Controlable Pitch Propeller),  
Propulsion System, Optimization Design, Fuzzy Algorithm

## 独创性声明

本人声明，所呈交的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。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得武汉理工大学或其它教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

研究生（签名）：王海刚 日期：2008.5.8

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解武汉理工大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以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应遵守此规定)

研究生（签名）：王海刚 导师（签名）：李辉 日期：2008.5.8

# 第1章 绪论

## 1.1 高速船的性能及特点

高速船（傅汝德数  $Fr=0.3\sim 0.7$ ）是指设计静水时速在沿海水域为 25kn 及以上、在内河通航水域为 35kn 及以上的动力支撑船舶和排水船舶,但不包括常规客船、货船、滚装船和集装箱船<sup>[1][2]</sup>。当今高速船的种类繁多,新的船型不断出现,但从其结构和原理来看,主要可以分为气垫船、水翼船、单体船、多体船、穿浪船和地效翼船等<sup>[3]</sup>。对于各种形式的高速船来说,为达到其高速高效运行的目的,它们都具有如下一些特点<sup>[1]</sup>: 其一是对重量非常敏感。船舶在航行时的阻力大致与船舶的排水量成正比,在满足船舶安全性与适用性的条件下,应尽量减轻自重,以达到提高经济性的目的。鉴于主机、螺旋桨等设备重量难以大幅度减轻,故大幅减轻船体结构自重就成为高速船设计者追寻的目标,所以高速船大多采用铝合金、纤维增强塑料(玻璃钢)建造,即使采用钢质,也大都采用计算方法设计,在满足强度的条件下尽可能减小板材和骨材尺寸。其二是结构承受的稳态力和非稳态力较常规船大一些。前者主要是由于高速船的主机功率大且皆为高速机,并且伴随着航速的提高,将会导致螺旋桨空泡现象的加剧,从而造成螺旋桨脉动压力的显著增加;后者主要是由于高速船的  $Fr$  比较大,船舶在高速航行时受到强烈的波浪拍击所致<sup>[4]</sup>。

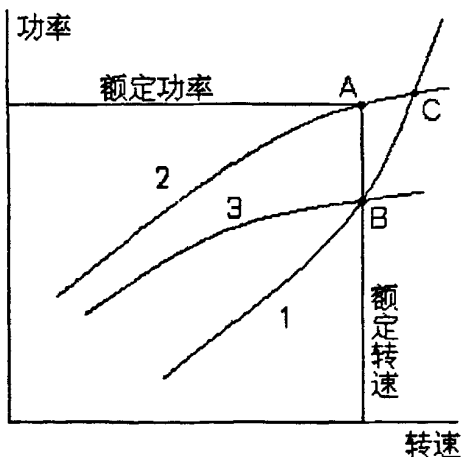


图1-1 机桨匹配特性图（桨轻）

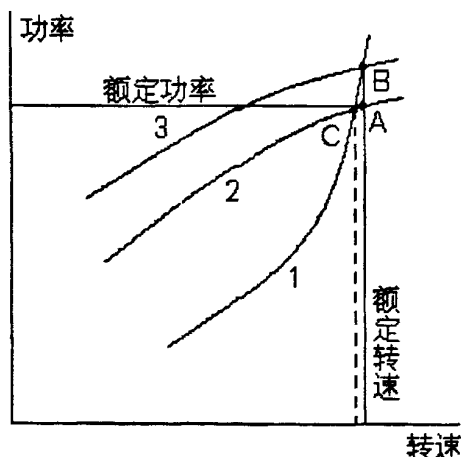


图1-2 机桨匹配特性图（桨重）

1 为螺旋桨推进特性线; 2 为主机额定负荷特性曲线; 3 为主机使用工况曲线

显然，高速船的这些特性，使得它对航行状态的变化非常敏感，船舶的阻力特性偏离设计状态，船舶的实际航行状态与设计工况不相符合时，船-机-桨之间的配合远离最佳匹配，必然出现“桨轻”或“桨重”的现象<sup>[5][6]</sup>（见图 1-1、图 1-2）。这种变化影响到主机的工作和性能，使主机的耗油率增加，发不出额定功率，导致航行安全可靠降低，严重时还有可能出现全船事故、危及船员的生命安全等严重后果。

由此可见，螺旋桨和主机的合理匹配既要充分利用主机的功率，又要在运转工况内主机功率不超过允许范围，实现船舶机桨的最佳匹配，获得高效的动力性能、经济性能、可靠性能和较长的使用寿命。对于上述问题，采用定距桨是无能为力的，而只有可调桨才能从根本上解决高速船在变工况后的机、桨不匹配问题，如图1-3所示。

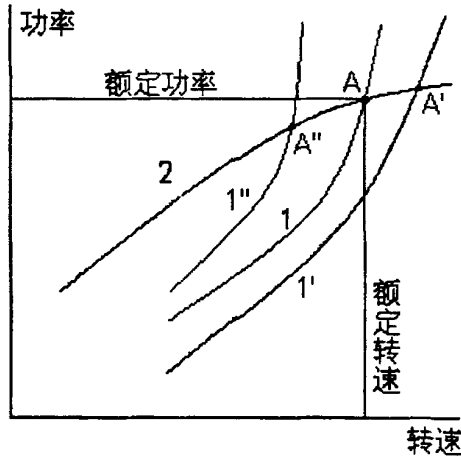


图1-3 可调桨的机桨匹配特性图

- 1 为螺旋桨的设计推进特性线；2 为主机额定负荷特性曲线；
- 1'' 为“桨轻”时螺旋桨的推进特性线；1' 为“桨重”时螺旋桨的推进特性线

## 1.2 可调桨推进系统的特点

可调螺距螺旋桨(简称可调桨或调距桨，英文缩写 CPP—Controllable Pitch Propeller)是舰船主推进装置的一种，在主机转速和转向一定的情况下，可调桨可以很方便地通过改变桨叶的角度（即螺距角）实现主机负荷的增大或减小，以改善舰船在不同航行工况下的主推进效率和舰船操纵性能<sup>[6]</sup>。

螺旋桨作为船舶推进装置的重要组成部分，其性能对推进装置的整体效率有很大的影响。普通的定距桨螺距不变，因此只有一组工作特性曲线；而可调

桨的桨叶螺旋面与桨毂可作相对转动,通过转动桨叶可以改变螺距,进而改变其工作特性曲线,因此一只可调桨相当于无穷多只相同外径不同螺距的定距桨。可调桨在运行时既能调节螺距,又能调节主机转速,它能够更大幅度地优化机-桨的匹配性能<sup>[6] [7] [8]</sup>。因此,相对于定距桨而言,可调桨具有三个基本特性:

- ① 船舶在各种航行工况下运行时,螺旋桨的推进效率均可达到最高;
- ② 通过螺旋桨转速 $n_p$ 和螺距比 $H/D$ 的配合可以得到所需的各种航速 $V_s$ ,如给定 $V_s$ ,则 $n_p$ 和 $H/D$ 有多种组合形式可以达到目的;
- ③ 通过 $H/D$ 的调节可以在 $n_p = c$ 的情况下实现倒航。

因此,可调桨具有了较强的适应性、较高的经济性和较好的机动性等优点,由此产生了一个问题,即船舶的航行和作业工况偏离了设计工况以后,有多组 $(H/D, n_p)$ 可以为其服务,那么选用怎样的组合才能使船、机、桨达到最佳匹配呢?该最佳匹配是通过控制器同时控制螺距和主机转速(即螺距控制和转速控制),并配合负荷反馈适当修正螺距(即负荷控制)来实现的。

### 1.3 课题研究的意义

针对高速船对外界负荷的变化非常敏感而采用可调桨推进系统的主要意义在于,可以获得良好的操纵性能,实现船、机、桨的最佳匹配。随着造船工业的发展以及遥控技术的日益完善,可调桨推进装置的应用越来越广泛。船舶可调桨推进系统由于其螺距角连续可调,使得主机负荷、推力大小和方向在一定范围内任意调节,因此可以大大改善船舶在各种航行工况下的推进效率,提高船舶的可靠性能和机动性能,延长主机的寿命。当船舶主机在部分负荷下运行时,可通过主机转速和螺距比 $H/D$ 的优化匹配,既能使动力装置具有较高的效率,又可提高船舶的续航力和经济性。对于采用可调桨推进系统的船舶,通过调节螺距,不但可以控制航速,还可以实现船舶的倒航,使之具有更好的机动性和操纵性,提高船舶的自动化程度。对于大部分中小型船舶而言,由于可调桨与定距桨相比具有许多明显的优点,因而有着比较广泛的应用<sup>[6] [8] [9]</sup>。自20世纪30年代以来,德、英、美以及瑞典等国家的研究机构都对可调桨及其控制方法进行了研究。二次世界大战以后,可调桨推进方式受到了各国的高度重视,大量的舰船装配了可调桨控制系统,仅瑞典KAMEWA公司就为美国、欧洲等上千条船舶装备了可调桨控制系统。可调桨在运输船舶、工程船舶(例如科考船、消

防艇、挖泥船、扫雷艇、拖网渔轮等)、军用舰船和中小型船舶上的应用越来越广泛。

由于可调桨船舶的船-机-桨系统匹比较常规的定距桨推进系统更为复杂,调节控制的要求以及对自动化程度的要求更高。推进系统的各个环节均具有非线性、时变性,因此对动态仿真模型及控制方法有更高要求。

近年来,针对可调桨智能推进系统优化设计方法的研究很多,但针对高速船可调桨推进系统优化的研究却并不多见。鉴于以上诸多因素,对国内外所采用的几种主要可调桨推进装置及其控制系统的结构特点、工作原理、控制方式进行分析比较,并在把握其最新发展动态的基础上,结合实地调查获取的资料,提出课题:高速可调桨推进系统优化方法研究。本文将主要针对高速船可调桨推进系统利用模糊 PID 控制来进行初步探讨。

## 1.4 国内外研究现状

可调桨作为一种特殊的螺旋桨在国外出现已经有几十年的历史了,随着船舶制造技术以及其它相关技术的发展,其生产技术随之不断发展进步。但可调桨和轴系由于要安装螺距调节机构及遥控系统,因此其构造和桨毂结构比较复杂,相应的设计制造工艺也受到液压等相关行业发展情况的制约和影响,因而在各国的发展情况不太均衡<sup>[10][11]</sup>。

自 20 世纪 30 年代以来,德、英、美及瑞典等国的有关研究机构都对可调桨及其控制系统进行了研究。二次大战以后,可调桨受到各国的高度重视,大量的舰艇、船舶均装备了可调桨控制系统,仅瑞典 KAMEWA 公司已为美国、欧洲上千只军、民船装备了可调桨系统。目前,可调桨已广泛应用于舰艇、拖船、挖泥船及其它船舶上。对于安装可调桨的船舶动力推进系统来说,由于其内部各组成部分是一个相互关联的整体,因而一个部件的运行状态的变化必然要引起其它各关联部件的状态的相应变化。

欧洲不少大公司都有较为成熟的可调桨遥控系统及其配套产品,如 KAMEWA, SCHOTELL, WARTSIA, MAN B&W 等都有多年生产可调桨及其遥控系统的开发历史,其产品在航运市场上占有较大的份额。可调桨在机械、液压机构的结构方面的特点基本相同,但具体的遥控系统却各具特点。现今比较有名的生产厂家有:丹麦 MAN B&W 公司研制可调桨推进控制系统;瑞典 Berg 公司的可调桨控制系统,



基于 PLC 微处理器技术, 适用于各种船型的可调桨; 丹麦 Lyngso 公司推进控制系统; 荷兰 John Crane-Lips 公司的遥控系统; 挪威 Kongsberg 公司遥控系统等。

我国于二十世纪八十年代中期开始引进国外的可调桨生产技术, 苏州船用机械厂引进了 KAMEWA 公司的可调桨技术, 生产的系列产品如 KI40/3-ST 可调桨电液遥控系统取得了船级社的认可, 并经过了实船运行的考验。SCHOTTEL 公司也在我国成立了肖特尔推进器有限公司, 专门从事可调桨的研制和生产。但国内从事可调桨研究的科研机构 and 人员仍比较少。八十年代中期, 大连海事大学曾经作过基于单片机的可调桨遥控系统的仿真研究; 九十年代中期, 上海交通大学曾在建立的三轴燃气轮机及可调桨推进装置的实时仿真模型的基础上, 采用 MIRAGE 并行数字仿真工作站进行了全数字实时仿真; 九十年代末期, 华东船舶工业学院的科研人员采用 MC68705R3 单片机开发出了可调桨螺距控制系统, 并进行了实时仿真, 但与实船的推广应用还有一定的距离。总体上来讲, 由于起步较晚, 加上我国在此方面的工作开展得较少, 可调桨生产技术基本上是引进国外的专利, 配套的控制系統则基本上是从国外引进技术生产或干脆直接采用国外产品, 因此相对于国外特别是北欧等先进国家而言, 显得较为落后。现有的可调桨控制系统大多采用非 CPU 的芯片甚至分立元器件, 仅相当于国外六七十年代的水平; 个别工程船采用计算机及 PLC 控制技术, 在控制结构、功能、性能等方面接近或达到国外 90 年代先进水平, 采用计算机控制技术实现可调桨螺距闭环控制也已取得一定进展。随着现代船舶向高速化、大型化、高度自动化方向不断发展, 可调桨的优势显得更为突出, 在其使用范围日益广泛的今天, 我国船用可调桨及其控制系统的发展现状与国外尚有一定差距<sup>[11] [12]</sup>。

## 1.5 本文主要研究内容

本文主要探讨了高速船可调桨推进系统的建模及仿真、控制算法和优化方法。随着计算机仿真技术的发展, 计算机仿真软件层出不穷, 例如 Visual C++、MATLAB 等, 而人们对软件的易写易读、数值计算和视图交互功能的要求也越来越高。可调桨的智能推进系统仿真研究要求所使用的软件界面友好、模块化建模、仿真过程直观、参数修改方便、图形显示结果等特点。MATLAB 就能满足此要求, 而且使用简单、方便, 已被 IEEE 评为国际公认的最优秀的科技应用软件。

本文对可调桨智能推进系统采用模块化建模的思想，将整个系统划分为主机子系统、船桨子系统、优化控制目标子系统、主控制器子系统等几部分。然后根据实际对象，建立各个子系统的数学模型，分别根据每个子系统各个部件之间的关系画出结构图，再根据结构图写出相应的传递模块，将各系统的传递方块图串联起来，成为整个可调桨智能推进系统仿真模型。

其中，对高速船可调桨控制系统的负荷控制、螺距控制、转速控制等子系统进行综合分析，建立高速船可调桨推进系统智能控制数学模型，并在分析和总结高速船机桨匹配的基础上，考虑如何提高船舶性能，使操纵智能化和简化，提高燃料的经济性以及变负载情况下对主机进行保护，得到可行的高速船可调桨推进系统的控制算法和优化方法。

综上所述，本论文的研究工作是在深入探索模糊控制技术和各种优化方法的基础上，借助功能强大的 MATLAB 软件平台及其 SIMULINK 仿真工具箱对高速船可调桨推进系统进行建模和仿真研究，主要工作如下：

1. 根据高速船的特点，建立船桨子系统型、柴油机子系统和负荷控制子系统、螺距控制子系统和海情干扰子系统等数学模型；
2. 基于 MATLAB/SIMULINK 模块，搭建出整个推进系统的图形仿真模型；
3. 建立了高速船可调桨推进系统的优化控制目标模型；
4. 在 MATLAB/SIMULINK 平台上编制了高速船可调桨推进系统的模糊控制算法；
5. 在 MATLAB6.5 平台上编制了高速船可调桨推进系统的控制目标的遗传算法；
6. 使用模糊 PID 控制和传统的 PID 控制对某型舰进行仿真研究，并将仿真结果进行了分析比较。

## 第 2 章 高速船可调桨推进系统建模

数学建模是仿真的基础，要对一个系统进行计算机仿真，必须先建立正确的数学模型。长期以来，仿真领域的研究重点就是放在计算机仿真模型的建立这一环节上，即在系统的数学模型建立以后，要设计出一种算法，以使系统的数学模型能够为计算机所接受，然后再将其编写成计算机程序，并在计算机上运行，因此就产生了各种仿真算法和仿真软件。

本文主要探讨高速船可调桨推进系统仿真模型的性能特点、研究方法及所采用的仿真软件和计算方法。高速船可调桨推进系统的仿真系统要求具有界面友好、模块化建模、仿真过程直观、参数修改方便、结果以图形显示等特点，MATLAB/Simulink 就能满足以上这些要求，因此我们选用 MATLAB/Simulink 来对高速船可调桨推进系统进行建模及仿真分析。

### 2.1 MATLAB 语言介绍<sup>[13][14]</sup>

MATLAB 是由美国的 MathWorks 公司推出的一个科技应用软件。它是由 Matrix（矩阵）和 Laboratory（实验室）的前三个字母组合而成的。一开始它是一种专门用于矩阵数值计算的软件。随着 MATLAB 逐渐市场化，MATLAB 不仅具有了数值计算功能，而且具有了数据可视化功能。自 MATLAB4.1 版本开始，MATLAB 拥有了它自己的符号运算功能，MATLAB 的应用范围进一步拓宽。在 MATLAB6.X 中，MATLAB 不仅在数值计算、符号运算和图形处理等功能上进一步加强，而且又增加了许多工具箱。目前，MATLAB 已拥有了数十个工具箱，以供不同专业的科技人员使用。

Simulink 是 MATLAB 的一个附加组件，是一个用来对动态系统进行建模、仿真和分析的软件包，它为用户提供了一个建模与仿真的工作平台。Simulink 模型可以用来模拟线性或非线性、连续或离散或者两者的混合系统，也就是说，它可以用来模拟几乎所有可遇到的动态系统。对于建模，Simulink 还提供了一个图形化的用户界面（GUI），可以用鼠标点击和拖拉模块的图标建模，通过图形界面，可以像用铅笔在纸上画图一样画模型。这是以前需要用编程语言明确地用公式表达微分方程的仿真软件包所远远不能相比的。Simulink 包括由接收

器、信号源、线性和非线性等组成的模块库，当然也可以定制或创建用户自己的模块。所有模型是分级的，Simulink 允许用户通过自上而下或自下而上的方法建模，即 Simulink 中的子系统技术。可以在最高层面上查看一个系统，然后通过双击系统中的各个模块进入到系统的低一级层面以查看到模型的更多的细节。

定义完一个模型后，就可通过 Simulink 的菜单或在 MATLAB 的命令窗口输入命令对它进行仿真。菜单对于交互式工作非常方便，而命令行方式对于成批的仿真比较有用。使用 Scope 或其他的显示模块，可以在运行仿真时观察到仿真的结果。另外，还可在仿真时改变参数并且立即就可看到有什么变化。仿真结果 MATLAB 的工作空间以待进一步的处理或可视化。模型分析可使用的工具包括可直接通过命令行方式调用的线性化和整理工具，MATLAB 的其它各种工具，以及所有应用程序工具箱。因为 MATLAB 和 Simulink 是集成在一起的，所以用户可以在任何环境的任意点对用户的模型进行仿真、分析或修改。

正是由于 MATLAB 的这些特点，使得它对应用学科（特别是边缘学科和交叉学科）具有极强的适应能力，并很快成为应用学科计算机辅助分析设计、仿真、教学乃至科学文字处理不可缺少的基础软件。

## 2.2 推进系统仿真模型的分析与实现

根据实际情况，船舶推进系统仿真的对象包括推进系统本身及其航行环境。前者包括柴油机子系统、传动子系统、船桨子系统、推进控制子系统，后者包括船桨干扰及海情等外界环境影响。对于同样一个推进系统，由于研究目的和研究手段不同，最后建立起来的数学模型型式也会有所不同。船舶推进系统所包含的设备多且复杂，要建立非常精确的系统模型是不可能的，也是不必要的。在实际建模过程中，将对我们不需了解的中间过程或子系统的其它响应则进行“屏蔽”。

本章研究的重点在于对高速船可调桨推进系统物理模型进行分析，掌握高速船可调桨推进系统的操作特点。首先分析推进系统的物理模型，然后进行系统模型的理论分析，在此基础上，联系课题，主要研究高速船可调桨推进系统动态性能的实际要求，建立数学模型，对动态性能影响不大的因素予以简化，以利于模型的建立<sup>[10]</sup>。

## 2.2.1 推进系统的物理模型

主机通过传动设备带动螺旋桨转动，螺旋桨在水中旋转产生推力，推力通过推力轴承作用在船体上，推动船舶运动。本文的仿真对象为高速船可调桨推进系统，经过划分和过程分解，整个系统可看成是由几个子系统组成，用集中参数化对系统进行简化，再经过合理的综合处理，可建立如下可行的物理模型，如图 2-1 所示：

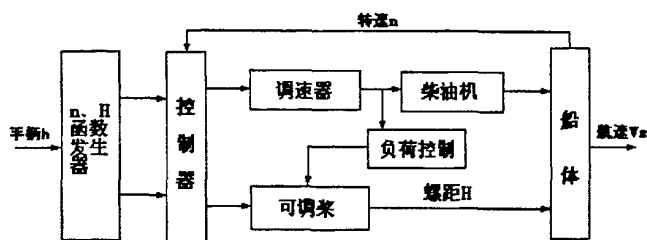


图 2-1 可调桨推进系统物理模型

针对柴油动力可调桨推进系统，按照物理模型，可分成船桨子系统、柴油机子系统、优化控制目标子系统、推进控制子系统等<sup>[15][16][17]</sup>。对于高速船而言，外界负荷变化时，它所受的阻力迅速变化，稳性不好，为了便于分析，我们提出了海情干扰系统，以了解推进控制系统对外界负荷变化的响应。下面将对上述系统进行逐一分析。整个推进系统的 Simulink 模型如图 2-2 所示。

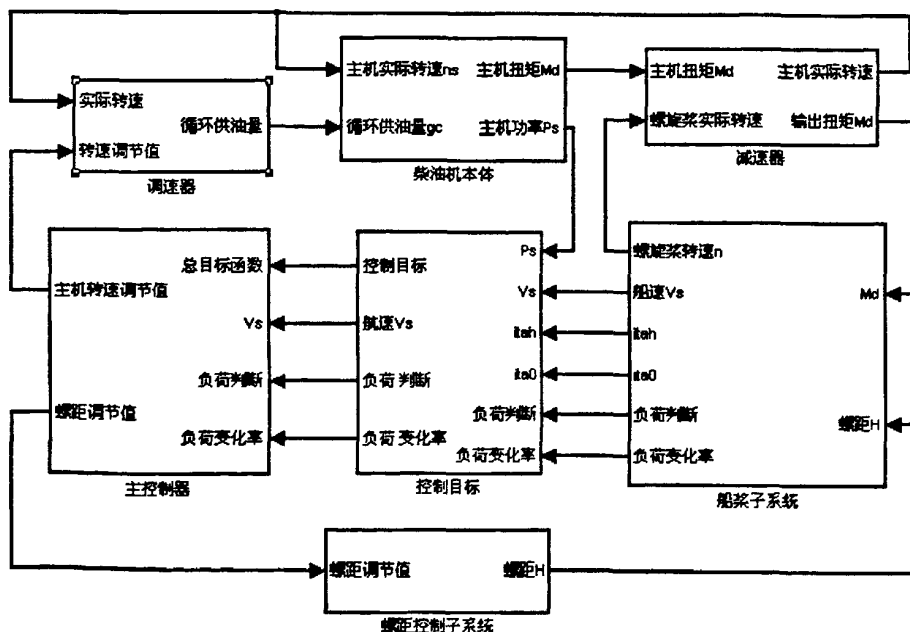


图 2-2 整个推进系统的 Simulink 模型

### 2.2.2 船桨子系统模型

根据螺旋桨工作机理可以知道，螺旋桨在敞水中的推力  $T$  为<sup>[19][20]</sup>：

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

螺旋桨上的水力矩  $M_p$  为：

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

式中：

$K_T$  —— 螺旋桨的推力系数

$K_Q$  —— 螺旋桨的扭矩系数

$\rho$  —— 水的质量密度，本文讨论的高速船航行环境是在近海区域，故使用海水的质量密度， $\rho = 1.025 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。

$n$  —— 螺旋桨的转速， $r/\text{min}$

$D$  —— 螺旋桨的直径，本文选取的 MAU5-50 型螺旋桨的直径为 1.823m。

其中， $K_T$  和  $K_Q$  为无因次量，它们是螺旋桨的进程比  $J$ 、螺距比  $H/D$ 、盘面比  $A_E/A_O$  和螺旋桨的桨叶数  $Z$  的函数。给定了参数， $K_T$ 、 $K_Q$  的值可以通过查螺旋桨的敞水曲线图谱得到<sup>[19][20][21][22]</sup>。

AU 型桨、荷兰楚思德 B 型桨和高恩螺旋桨，它们的设计图谱各不相同，如图 2-3 为 MAU5-50 型桨在  $H/D=0.8$ 、 $A_E/A_O=0.65$ 、 $Z=5$  的条件下的敞水曲线系列图谱中的一组。

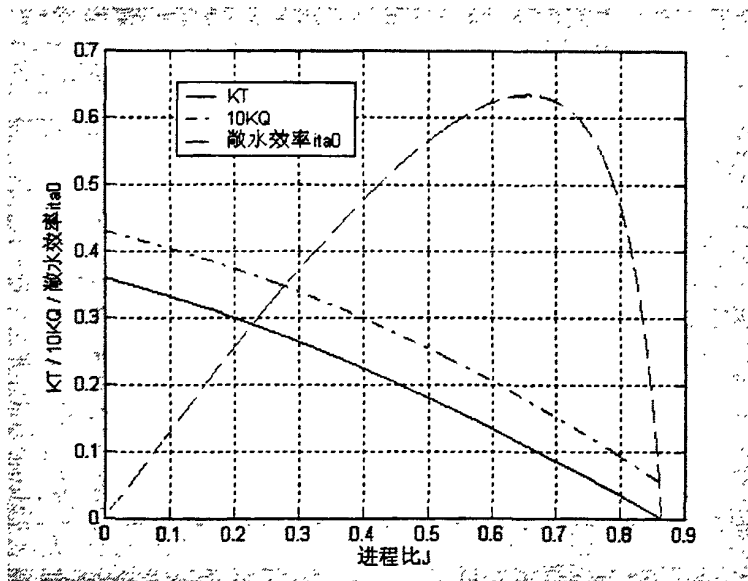


图 2-3 MAU5-50 型桨某组敞水曲线图谱

从上图中我们可以看出，当螺距比  $H/D$ 、盘面比  $A_E/A_O$  和螺旋桨的桨叶数  $Z$  确定了的话，每一个进程比  $J$  对应一个  $K_T$ 、 $K_Q$  和螺旋桨的敞水效率  $\eta_0$ 。

对于普通的 AU 型桨来说，在雷诺数  $Re \leq 2 \times 10^6$  时， $K_T$ 、 $K_Q$  可由回归多项式表示为：

$$K_T = \sum_{n=1}^{39} C_{s,t,u,v} J^s \left(\frac{H}{D}\right)^t \left(\frac{A_E}{A_O}\right)^u Z^v \quad (2-3)$$

$$K_Q = \sum_{n=1}^{47} C_{s,t,u,v} J^s \left(\frac{H}{D}\right)^t \left(\frac{A_E}{A_O}\right)^u Z^v \quad (2-4)$$

表 2-1 中列出了  $Re \leq 2 \times 10^6$  时  $K_T$ 、 $K_Q$  的回归多项式的系数和指数。

表 2-1  $Re \leq 2 \times 10^6$  时  $K_T$ 、 $K_Q$  的回归多项式的系数和指数

KT						KQ					
n	Cs.t.u.v	s (J)	t (H/D)	u (A <sub>E</sub> /A <sub>O</sub> )	v (Z)	n	Cs.t.u.v	s (J)	t (H/D)	u (A <sub>E</sub> /A <sub>O</sub> )	v (Z)
1	0.008805	0	0	0	0	1	0.003794	0	0	0	0
2	-0.20455	1	0	0	0	2	0.008865	2	0	0	0
3	0.166351	0	1	0	0	3	-0.03224	1	1	0	0
4	0.158114	0	2	0	0	4	0.003448	0	2	0	0
5	-0.14758	2	0	1	0	5	-0.04088	0	1	1	0
6	-0.4815	1	1	1	0	6	-0.10801	1	1	1	0
7	0.415437	0	2	1	0	7	-0.08854	2	1	1	0
8	0.014404	0	0	0	1	8	0.188561	0	2	1	0
9	-0.05301	2	0	0	1	9	-0.00371	1	0	0	1
10	0.014348	0	1	0	1	10	0.005137	0	1	0	1
11	0.060683	1	1	0	1	11	0.020945	1	1	0	1
12	-0.01259	0	0	1	1	12	0.004743	2	1	0	1
13	0.010969	1	0	1	1	13	-0.00723	2	0	1	1
14	-0.1337	0	3	0	0	14	0.004384	1	1	1	1
15	0.006384	0	6	0	0	15	-0.02694	0	2	1	1
16	-0.00133	2	6	0	0	16	0.055808	3	0	1	0
17	0.168496	3	0	1	0	17	0.016189	0	3	1	0
18	-0.05072	0	0	2	0	18	0.003181	1	3	1	0
19	0.085456	2	0	2	0	19	0.015896	0	0	2	0
20	-0.05045	3	0	2	0	20	0.047173	1	0	2	0
21	0.010465	1	6	2	0	21	0.019628	3	0	2	0

续表 2-1  $Re \leq 2 \times 10^6$  时  $K_T$ 、 $K_Q$  的回归多项式的系数和指数

KT						KQ					
n	Cs.t.u.v	s (J)	t (H/D)	u ( $A_E/A_0$ )	v (Z)	n	Cs.t.u.v	s (J)	t (H/D)	u ( $A_E/A_0$ )	v (Z)
22	0.006483	2	6	2	0	22	-0.05028	0	1	2	0
23	-0.00842	0	3	0	1	23	-0.03006	3	1	2	0
24	0.016842	1	3	0	1	24	0.041712	2	2	2	0
25	-0.00102	3	3	0	1	25	-0.03977	0	3	2	0
26	-0.03178	0	3	1	1	26	-0.0035	0	6	2	0
27	0.018604	1	0	2	1	27	-0.01069	3	0	0	1
28	-0.00411	0	2	2	1	28	0.001109	3	3	0	1
29	-0.00061	0	0	0	2	29	-0.00031	0	6	0	1
30	-0.00498	1	0	0	2	30	0.003599	3	0	1	1
31	0.002598	2	0	0	2	31	-0.00142	0	6	1	1
32	-0.00056	3	0	0	2	32	-0.00384	1	0	2	1
33	-0.00164	1	2	0	2	33	0.01268	0	2	2	1
34	-0.00033	1	6	0	2	34	-0.00318	2	3	2	1
35	0.000117	2	6	0	2	35	0.003343	0	6	2	1
36	0.000691	0	0	1	2	36	-0.00183	1	1	0	2
37	0.004217	0	3	1	2	37	0.000112	3	2	0	2
38	5.65E-05	3	6	1	2	38	-3E-05	3	6	0	2
39	-0.00147	0	3	2	2	39	0.00027	1	0	1	2
						40	0.000833	2	0	1	2
						41	0.001553	0	2	1	2
						42	0.000303	0	6	1	2
						43	-0.00018	0	0	2	2
						44	-0.00043	0	3	2	2
						45	8.69E-05	3	3	2	2
						46	-0.00047	0	6	2	2
						47	5.54E-05	1	6	2	2

当雷诺数  $Re > 2 \times 10^6$  时, 可按公式(2-5)和公式(2-6)对  $Re \leq 2 \times 10^6$  时的  $K_T$ 、 $K_Q$  进行修正:



$$\begin{aligned}
 \Delta K_T = & 0.000353485 - \\
 & 0.00333758(A_E/A_O)J^2 - \\
 & 0.00478125(A_E/A_O)(H/D)J + \\
 & 0.000257792(\lg Re - 0.301)^2(A_E/A_O)J^2 + \\
 & 0.0000643192(\lg Re - 0.301)(H/D)^6 J^2 - \\
 & 0.0000110636(\lg Re - 0.301)^2(H/D)^6 J^2 - \\
 & 0.0000276305(\lg Re - 0.301)^2 Z(A_E/A_O)J^2 + \\
 & 0.0000954(\lg Re - 0.301)Z(A_E/A_O)(H/D)J + \\
 & 0.0000032049(\lg Re - 0.301)Z^2(A_E/A_O)(H/D)^3 J
 \end{aligned} \tag{2-5}$$

$$\begin{aligned}
 \Delta K_Q = & -0.000591412 + \\
 & 0.00696898(H/D) - \\
 & 0.0000666654Z(H/D)^6 + \\
 & 0.0160818(A_E/A_O)^2 - \\
 & 0.000938091(\lg Re - 0.301)(H/D) \\
 & 0.00059593(\lg Re - 0.301)(H/D)^2 + \\
 & 0.0000782099(\lg Re - 0.301)^2(H/D)^2 + \\
 & 0.0000052199(\lg Re - 0.301)Z(A_E/A_O)J^2 - \\
 & 0.00000088528(\lg Re - 0.301)^2 Z(A_E/A_O)(H/D)J + \\
 & 0.0000230171(\lg Re - 0.301)Z(H/D)^6 - \\
 & 0.00000184341(\lg Re - 0.301)^2 Z(H/D)^6 - \\
 & 0.00400252(\lg Re - 0.301)(A_E/A_O)^2 + \\
 & 0.000220915(\lg Re - 0.301)^2(A_E/A_O)^2
 \end{aligned} \tag{2-6}$$

但是，在实际使用过程中， $K_T$ 与 $K_Q$ 是无法用解析式表达它们与 $J$ 和 $\theta$ 的关系的，而需要利用螺旋桨的图谱获得，可以先将螺旋桨的图谱变为表格函数，再把断点数据存入，使用时用插值法求值。如图 2-4 就是 MAU5-50 型桨的敞水曲线系列图谱，我们可以通过插值法查到进程比 $J$ 相对应的 $K_T$ 、 $K_Q$ 。

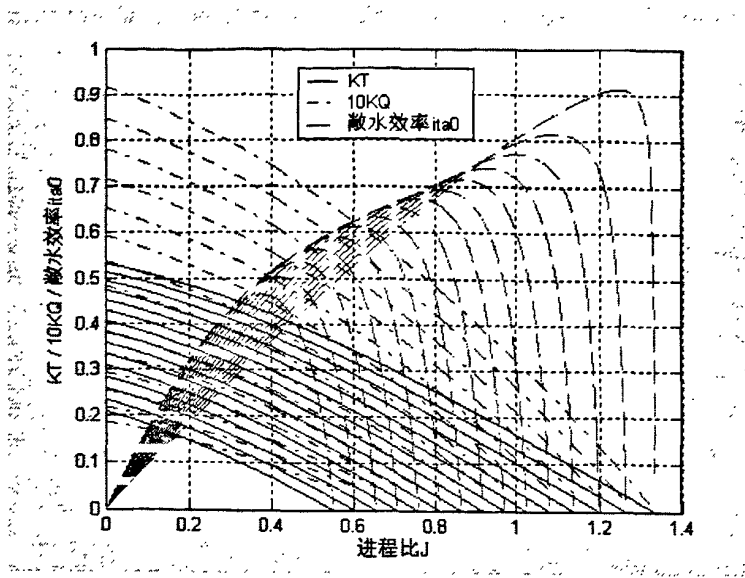


图 2-4 MAU-5 型桨的敞水曲线系列图谱

上面讨论的是螺旋桨在敞水中的水动力特性，实际上，螺旋桨是在船尾工作，它必然要受船体尾流的影响。同时，螺旋桨在船后运动，也对船体尾部的流场产生影响，这种船体和螺旋桨之间的相互影响，产生了推力减额和伴流现象<sup>[19][20]</sup>。

这样，一方面相应地削弱了它应有的推力  $T$ 。设削弱的推力为  $\Delta T$ ，则有效推力  $T_e = T - \Delta T$ ， $\Delta T$  称为推力减额，而  $t = \Delta T / T$  为推力减额系数，因此

$$T_e = T(1 - t) \tag{2-7}$$

对于可调桨船舶推进系统，还应当考虑螺距比  $H/D$  改变时对推力减额系数的影响，所以有文献引进螺距系数  $t_p$ ，因此可调桨的有效推力

$$T_e = T(1 - t \cdot t_p) \tag{2-8}$$

利用  $t_p$  对  $t$  作螺距的修正。 $J.W.Donnely$  在论文中采用如下估算公式<sup>[21]</sup>：

$$t_p = \begin{cases} 3 & H/D \leq -1.0 \\ -3 \times H/D & -1.0 < H/D \leq 0.0 \\ H/D & 0.0 < H/D < 1.0 \\ 1 & H/D \geq 1.0 \end{cases} \tag{2-9}$$

同样，船体附近的水受到船体运动影响而产生伴流，使桨相对周围的流速  $V_p$  要比船速  $V_s$  小。若伴流水速为  $u$ ，则  $V_p = V_s - u$ 。那么

$$V_p = V_s - u = (1 - \frac{u}{V_s})V_s = (1 - w)V_s \quad (2-10)$$

式中:

$w$ ——伴流系数。

伴流和推力减额两者的合并作用,对螺旋桨推进效率的影响可以用船身效率 $\eta_H$ 来表示:

$$\eta_H = \frac{1-t}{1-w} \quad (2-11)$$

伴流和推力减额有着密切的联系,许多科学家如富来申纽、狄克皮等发现 $w$ 和 $t$ 之间近似成比例关系。由于本文讨论的某型舰的推力减额系数 $t$ 和伴流系数 $w$ 与随航速 $V_s$ 的变化不大,故可认为其为常量, $t=0.2$ 、 $w=0.22$ 。

根据牛顿定理,船舶推进系统在无偏转作用时的动力学方程和运动学方程可以用以下方程来描述<sup>[16][17][18][20][21]</sup>。

动力学关系:

$$M \frac{dV_s}{dt} = T_e - R \quad (2-12)$$

$$2\pi I \frac{dn}{dt} = M_d \cdot i - M_p - M_f \quad (2-13)$$

运动学关系:

$$n_s = n \cdot i \quad (2-14)$$

$$V_p = (1-w)V_s \quad (2-15)$$

式中:

$T_e$ ——可调桨的有效推力,  $N$

$R$ ——船体的运动阻力,可表示为 $R = rV_s^z$ ,  $r$ 为阻力系数,与船舶的载重、污底、风浪和洋流等因素有关<sup>[23][24][25]</sup>,对于本文选取的某型高速船来说,选取 $z=3$ 。

$M$ ——船体总质量,并且还考虑到随船一起运动的附着水的质量,根据经验,可取附着水的质量为船体总质量的10%,单位 $kg$ 。

$V_p$ ——螺旋桨的进速,  $m/s$

$V_s$ ——船舶的航速,  $m/s$

$I$ ——螺旋桨、轴系的转动惯量,除螺旋桨和轴系本身外,尚包括随它们一起转动的附着水的转动惯量,因此要把转动惯量 $I$ 增加15%。

$n_s$ ——主机转速,  $r/min$

$n$ -----螺旋桨的转速,  $r/min$

$M_d$ -----主机输出扭矩,  $M_d = \frac{9550P_s}{n_s}$ ,  $P_s$  为主机输出功率

$M_f$ -----轴系的摩擦力矩  $M(f) = f(n)$ , 一般为螺旋桨转速  $n$  的函数, 考虑到其影响较小, 且计算比较困难, 所以结合经验, 将其估算为螺旋桨负载力矩的10%。

$M_p$ -----螺旋桨的阻力矩,  $N \cdot m$

$i$ -----后传动装置的减速比,  $i = \frac{n_s}{n}$ , 本文中的减速器的传动比  $i=5.5$ 。

船桨子系统的 Simulink 模型如图 2-5 所示。

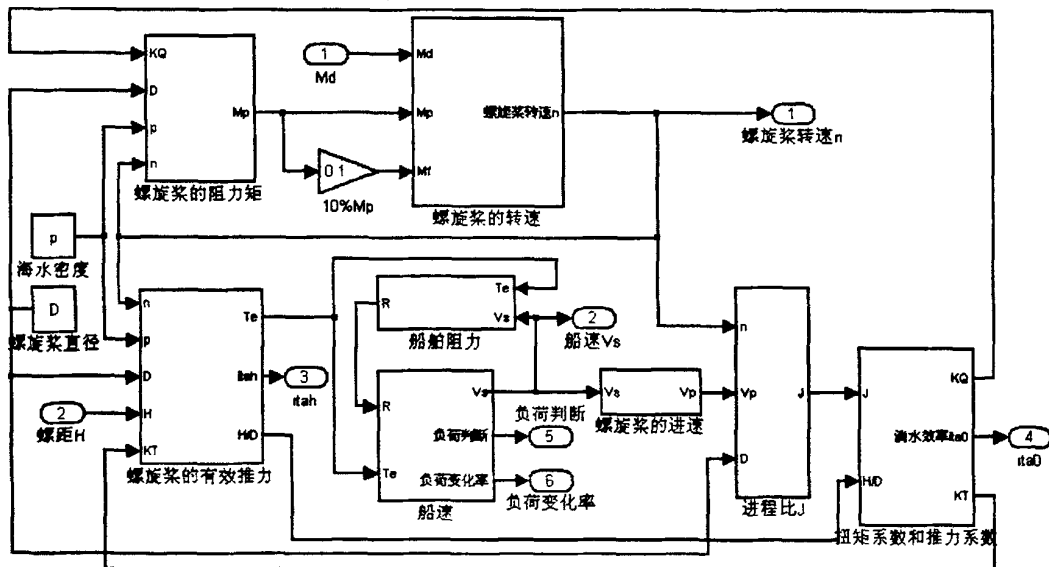


图 2-5 船桨子系统的 Simulink 模型

### 2.2.3 柴油机子系统模型

通常情况下, 可以根据稳态特性推导出柴油机的动态模型。但是, 柴油机的动态特性与稳态特性是不完全相同的, 因此, 利用稳态特性的某一平衡工况, 得出的动态模型会带来一些误差, 但能够满足对于一般推进系统进行动态分析的要求。如果要使精度更高的话, 可以利用动态过程中一系列瞬态平衡工况上得到动态模型。因此, 可以利用稳态特性来模拟动态模型<sup>[26] [27]</sup>。实际上, 对高速船而言, 对整个推进系统影响比较大的是柴油机的外特性。因此往往对增压

柴油机作更多的简化而使模型更简洁化<sup>[21]</sup>。经简化后，柴油机子系统的物理模型主要由调速器、柴油机本体、传动装置组成，如图 2-6 所示。

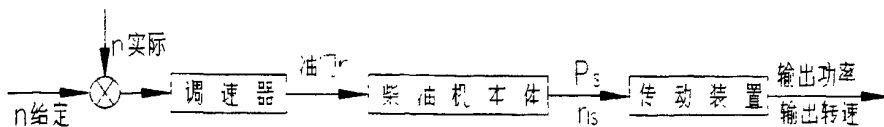


图 2-6 柴油机子系统物理模型

### 2.2.3.1 调速器模型

调速器的作用是根据柴油机负载的变化自动调节燃油泵的供油量，以适应外界情况的不断变化。调速器与主机一起构成主机转速自动控制系统，简称调速系统。调速器按照传递方式，分为机械式调速器和液压调速器<sup>[26]</sup>。以混合反馈间接作用式的调速器为例，其 Simulink 模型如图 2-7 所示。

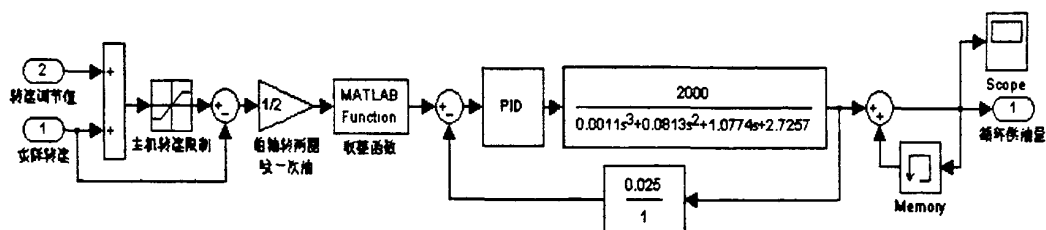


图 2-7 调速器的 Simulink 模型

对于本文中的高速船，主机额定功率为 3000KW，额定转速为 3000 r/min。为了保护主机，选取最高限制转速为 3150 r/min，最低限制转速为 600 r/min。其中，优化的 PID 基本参数分别为：比例系数  $K_p=1.1$ ，积分系数  $K_i=3.5$ ，微分系数  $K_d=0.05$ ，参数设置如图 2-8 所示。

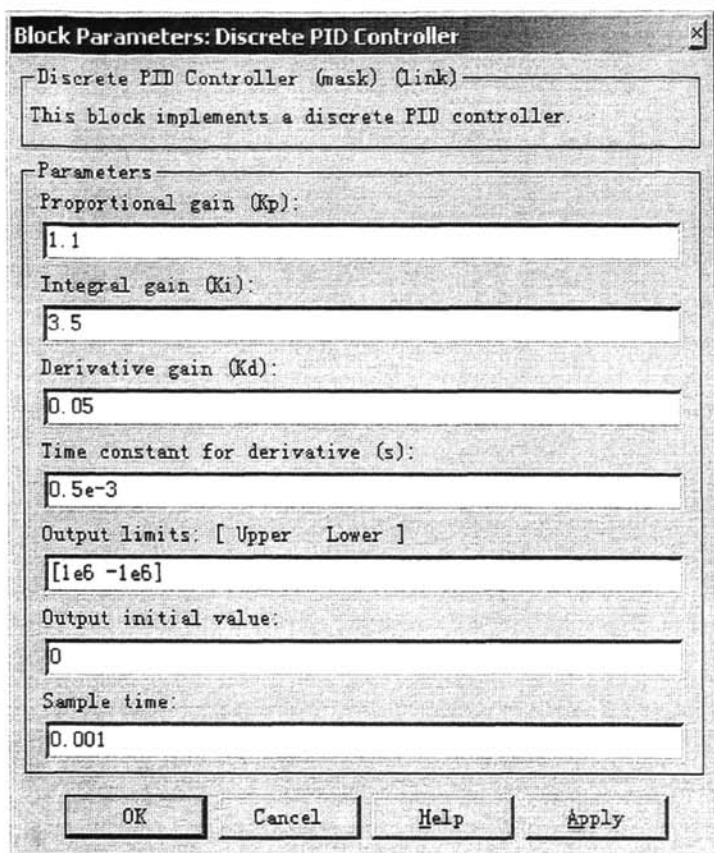


图 2-8 PID 控制参数设置对话框

对于高速船来说，调速器的调节响应必须很迅速，调节时间要短，反应敏捷，本文中的调速器的传递函数为：

$$G(s) = \frac{2000}{0.0011s^3 + 0.0813s^2 + 1.0774s + 2.7257} \quad (2-16)$$

### 2.2.3.2 柴油机本体模型

根据柴油机原理，我们知道，柴油机的有效燃油消耗率  $b_e$  是指 kW/h 的燃油消耗量，它可以通过对柴油机的有效功率  $P_S$ ，柴油机每小时的燃油消耗量  $B$  的测量而求得<sup>[28][29][30]</sup>。

$$b_e = \frac{B}{P_S} \quad (2-17)$$

式中：

$b_e$ -----柴油机的有效燃油消耗率，kg/(kW·h)

$P_S$ -----柴油机的有效功率，kW

$B$ -----柴油机每小时的燃油消耗量，kg/h

我们选用的高速船是螺旋桨推进，所以主机必须是四冲程的高速柴油机，对于四冲程柴油机而言，冲程数  $\tau = 4$ ，每转 2 圈为一个循环，喷一次燃油，所以每小时的燃油消耗量  $B$  为：

$$B = 60 \cdot \frac{n}{2} \cdot m \cdot g_c \quad (2-18)$$

式中：

$n$  —— 柴油机的转速， $r/\min$

$m$  —— 气缸数目

$g_c$  —— 柴油机的循环供油量， $kg/r$

由上面两式可以得到：

$$P_s = \frac{30 \cdot n \cdot m \cdot g_c}{b_e} \quad (2-19)$$

柴油机的有效效率表示柴油机曲轴输出端的有效功的热当量与喷入柴油机气缸内的燃料完全燃烧时所发出的热量的比值。

$$\eta_e = \frac{3600 \cdot P_s}{H_u \cdot B} = \frac{3600}{H_u \cdot b_e} \quad (2-20)$$

由上式可以得到：

$$b_e = \frac{3600}{H_u \cdot \eta_e} \quad (2-21)$$

式中：

$H_u$  —— 燃油的低热值， $KJ/kg$ ，柴油一般为  $42700 KJ/kg$

$\eta_e$  —— 有效效率

由上面各式可以得到：

$$P_s = \frac{H_u \cdot \eta_e \cdot m}{120} \cdot n \cdot g_c \quad (2-22)$$

柴油机的有效效率  $\eta_e$  为：

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m \quad (2-23)$$

式中：

$\eta_i$  —— 柴油机的指示效率

$\eta_m$  —— 柴油机的机械效率

对于四冲程船用柴油机而言，在额定工况下的指示效率一般为  $0.43 \sim 0.50$ ，而机械效率主要取决于柴油机的转速，一般近似取值  $0.85 \sim 0.90$ 。

柴油机本体的 Simulink 模型如图 2-9 所示<sup>[31]</sup>。

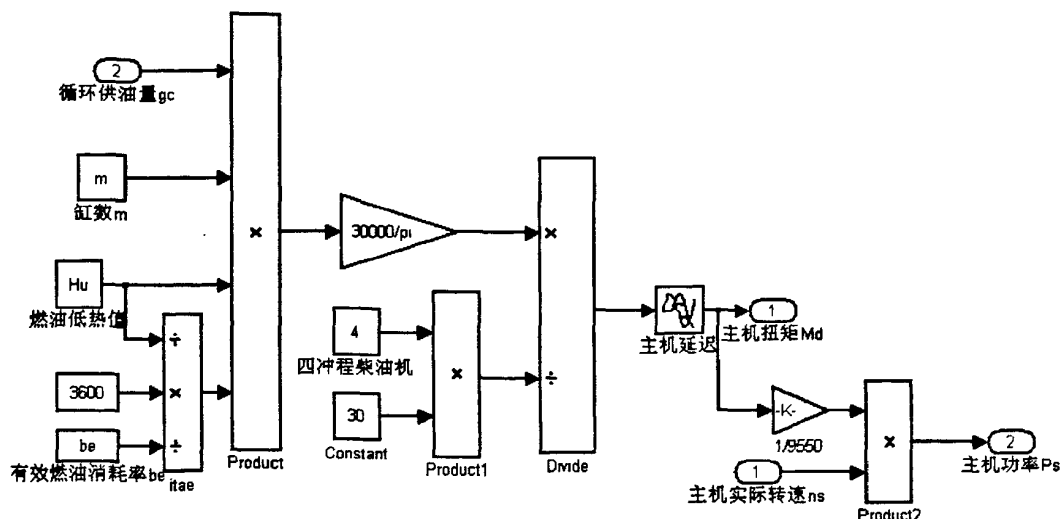


图 2-9 柴油机本体的 Simulink 模型

### 2.2.3.3 减速器模型

减速器的数学模型比较简单，减速齿轮箱的减速比  $i$  为：

$$i = \frac{n_s}{n} \quad (2-24)$$

经过减速齿轮箱后，其输出力矩  $M_G$  为：

$$M_G = M_d \cdot i \quad (2-25)$$

减速器的 Simulink 模型如图 2-10 所示。

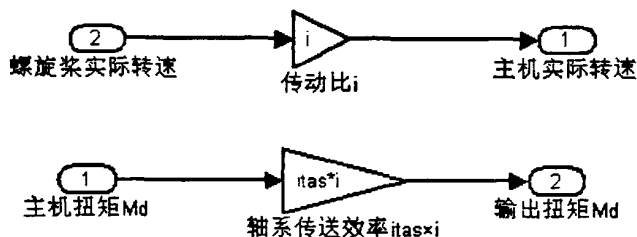


图 2-10 减速器的 Simulink 模型

## 2.3 控制子系统模型

### 2.3.1 负荷控制子系统物理模型

主机转速与舰船航行工况即负荷大小有着密切的联系。当主机油门一定，且负荷一定时，主机转速即保持某一恒定值。当油门设定值不变，而负荷发生变化时，将导致主机转速发生变化，严重时将影响推进系统性能，甚至降低主机使用



寿命。负荷控制作用就是根据船—机—桨最佳负荷匹配曲线,并实时监测主机实际转速和当前油门大小。当负荷增加时,通过减小螺距角的方法降低主机负荷,避免主机过载<sup>[32][33][34][35][36][37]</sup>。负荷控制子系统的物理模型主要由负荷曲线、外界干扰、控制器、螺距控制器组成,如图 2-11 所示。

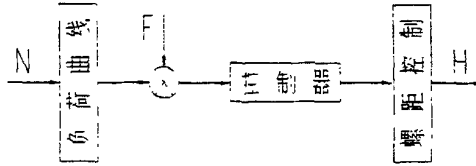


图 2-11 负荷控制子系统物理模型

### 2.3.2 螺距控制子系统物理模型

对于可调桨螺距控制系统,主要由液压伺服机构及螺距控制系统两大部分组成。由螺距控制系统发出正车螺距控制信号或者倒车螺距信号给液压伺服机构,驱动正车或倒车电液控制阀动作,推动螺旋桨桨叶的转动,改变螺距角,达到改变螺距的目的。

当手柄按最佳匹配线发出螺距指令,即螺距设定值,根据主机负荷和要求的航速由螺距控制子系统控制螺距,使主机与螺旋桨处于最佳配合。工作程序为:当主机检测出的实际负荷大于由负荷曲线设定的负荷时,由螺距矫正器输出一个逐渐增加的信号,对螺距设定信号进行矫正,通过螺距控制系统使螺距减小。当螺距减小到使主机实际负荷等于设定负荷时,则停止矫正,其矫正后的实际螺距等于设定螺距。相反,当主机实际负荷小于设定负荷时,则螺距逐渐增大<sup>[34][35][36][37]</sup>。螺距控制子系统的物理模型主要由操作手柄、螺距矫正器、控制器、螺距箱组成,如图 2-12。

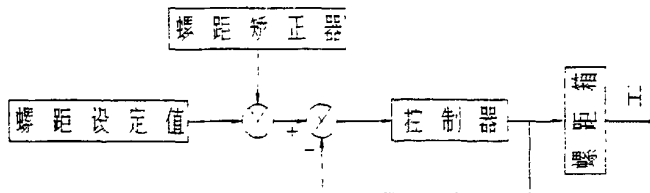


图 2-12 螺距控制子系统物理模型

对于本文中的高速船而言,其螺距调节机构的传递函数为:

$$G(s) = \frac{73300}{0.1704s^5 + 10.52s^4 + 313.6s^3 + 4691s^2 + 35860s + 39880} \quad (2-26)$$

螺距控制系统的 Simulink 模型如图 2-13 所示。

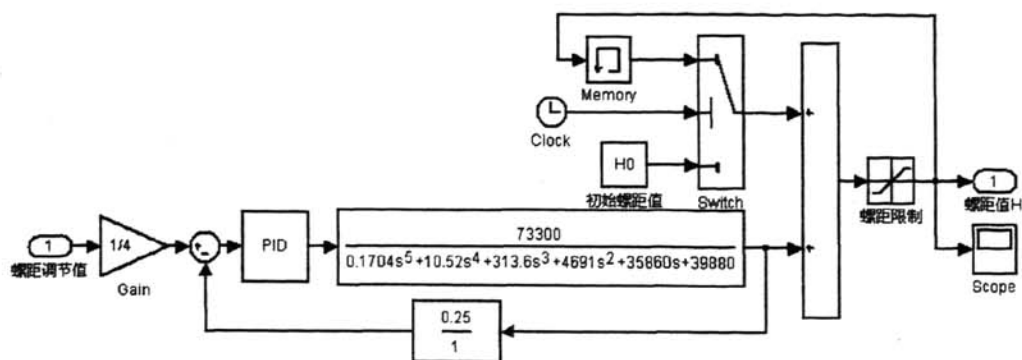


图 2-13 螺距控制系统的 Simulink 模型

其中，优化的 PID 基本参数（如图 2-14 所示）分别为：比例系数  $K_p=3.0$ ，积分系数  $K_i=8.5$ ，微分系数  $K_d=0.05$ 。

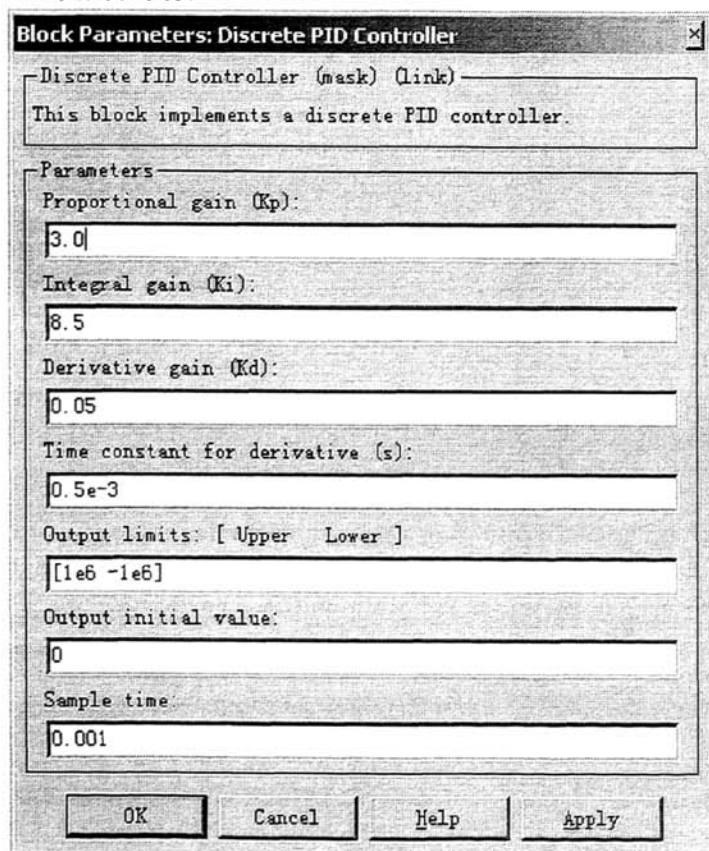


图 2-14 PID 控制参数设置对话框

### 2.3.3 推进控制子系统模型

推进控制子系统的 Simulink 模型如图 2-15 所示<sup>[32] [34] [35][36][37]</sup>：

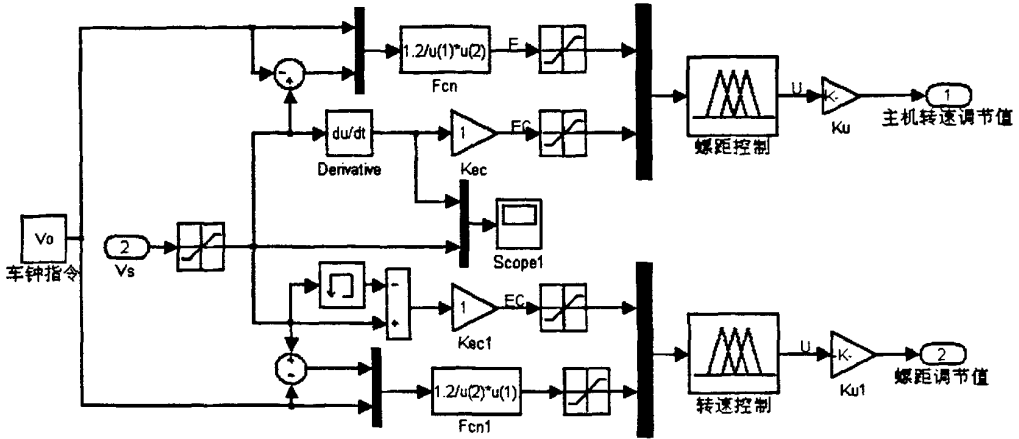


图 2-15 推进控制子系统的 Simulink 模型

### 2.4 海况干扰分析

船舶在航行过程中，时常受到风、浪、潮流等的作用，使得航速发生变化，为了便于分析，我们把船体受到的干扰作为一个单独的附加阻力来考虑<sup>[32] [35]</sup>。这里，我们就简化为一个周期性波浪干扰与一个随机波浪干扰的叠加信号：

$$\Delta R = \begin{cases} C \cdot T_e \cdot H & t \geq t_1 \\ C \cdot T_e \cdot \sin \omega t & t_0 \leq t < t_1 \\ 0 & 0 < t < t_0 \end{cases} \quad (2-27)$$

式中：C 是修正系数， $T_e$  是螺旋桨的推力，H 是随机白噪声。

干扰系统的 Simulink 模型如图 2-16 所示：

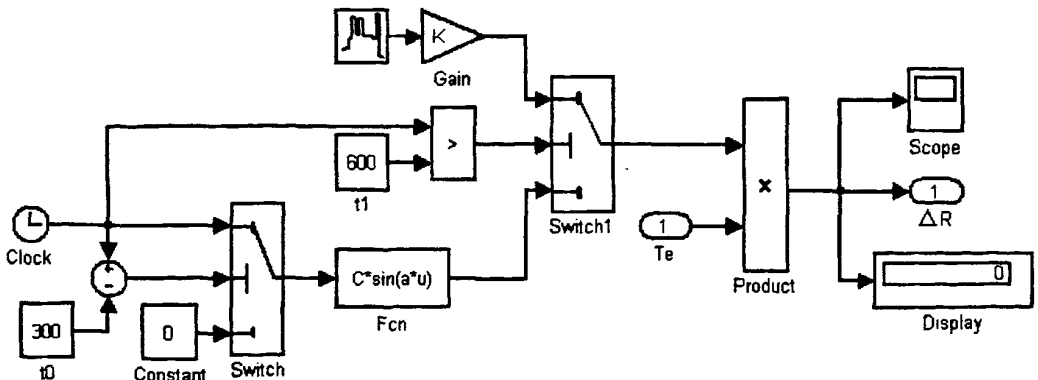


图 2-16 干扰系统的 Simulink 模型

## 2.5 本章小结

本章主要探讨了高速船可调桨推进系统的性能特点、研究方法及所采用的仿真软件和建模方法。对高速船可调桨推进系统采用模块化建模的思想,首先,建立起整个推进系统的物理模型;然后将整个推进系统划分为主机子系统、船桨子系统、优化控制目标子系统、主控制器子系统等几部分,并根据实际对象建立各个系统的数学模型;最后,基于 MATLAB/SIMULINK 模块,搭建出各个系统的图形仿真模型,分别根据每个子系统各个部件之间的关系将各个子系统的 SIMULINK 方快图串联起来,成为整个高速船可调桨推进系统的仿真模型。

## 第3章 高速船可调桨推进系统控制器设计

通过调节可调桨的螺距,能在所有航行工况范围内有效地利用主机的全部功率,提高螺旋桨的效率,在部分负荷时可实现螺旋桨与主机的最佳匹配,使船舶具有良好的动力性能、经济性能和操作性能。对于高速船而言,船舶快速性是很重要的指标,设计的要点是使船舶能在最小的耗油量的情况下,航行在预定的航行状态下。也就是说,船舶以预定航速航行时,要求主机的耗油量最小,经济性最好<sup>[32][35][38]</sup>。当工况变化时,也就是船舶所受到的负荷变化时,高速船的船速变化很敏感,鲁棒性很差,需要及时通过船-机-桨的动态匹配,重新计算螺距比,并将信息反馈给主控制系统进行调节。

### 3.1 模糊数学的一些基本概念

长期以来,人们对客观事物的认识习惯于追求其精确性。一个命题要么是真,要么是假。应用到集合论中便是:元素与集合的关系不是属于就是不属于,界限分明,两者必居其一,而且仅居其一,决不允许模棱两可。

然而,人脑对自然现象的反映往往都是模糊的。就以天气现象为例,人们对于“下雨”这一现象,通常用“绵绵细雨”,“小雨”,“中雨”,“大雨”等概念来描述雨量的大小。那么到底什么样的雨是“大雨”,什么样的雨又是“绵绵细雨”,这些是很难说清楚的,它们之间没有严格的界限,也就是说这种描述具有模糊性。所谓模糊性,就是指客观事物差异的中间过渡中的“不分明性”。所谓模糊现象就是没有严格的界限划分而很难用精确的尺度来描述的现象,而反映模糊现象的概念就称为模糊概念。

那么,怎么来精确描述模糊现象呢?这就必须应用到模糊数学。模糊数学就是用数学方法研究和处理模糊现象的数学。模糊数学中是用“隶属度”来描述模糊现象的,它是 $[0, 1]$ 之间的一个实数,它反映的是某个现象属于某种概念的程度。比如说考虑“性格稳重”这个模糊概念,假若按某种原则确定“张三性格稳重的程度为0.8”,那么也就是说张三(记为 $x_0$ )属于“性格稳重的程度为0.8,即可记为 $\mu(x_0) = 0.8$ ,而如果隶属度是随变量 $x$ 的不同而改变的,那么描述隶属度随 $x$ 变化的函数便是隶属函数,记为 $\mu(x)$ 。它满足 $0 \leq \mu(x) \leq 1$ <sup>[39][40][41]</sup>。

## 3.2 模糊 PID 复合控制

螺距控制采用常规 PID 控制方案时,控制品质指标比较差。而且螺距控制中存在的一系列的问题(非线性、时滞),所以本文基于可调桨螺距控制策略多年的理论研究和现场操作经验,运用一种新的模糊控制策略控制复杂的螺距调节,以期获得良好的控制效果。

模糊控制不依赖于对象模型,它利用被控制过程的动态信息,依据规则知识进行推理获得合适的控制量,因而具有较强的鲁棒性,但控制精度往往不尽人意。

分析表明,模糊控制和 PID 的结合是提高控制性能的有效手段。为了提高 PID 的控制精度及鲁棒性,人们提出了基于辨识的 PID 参数自适应整定方法,收到了较好的控制效果,模糊控制的特点在于<sup>[41]</sup>:

(1) 控制系统的设计不需要知道被控对象的精确数学模型,只需要提供现场操作人员的经验知识及操作数据。

(2) 控制系统鲁棒性强,适用于解决常规控制难以解决的非线性、时变及滞后系统的控制问题。

(3) 以语言变量代替常规的数学变量,易于构造形成专家的“知识”。

(4) 控制推理采用“不精确推理”,推理过程模仿人的思维过程,因为介入了人的经验,因而能够处理复杂甚至“病态”系统。

从上述特点可以看到,模糊控制主要是依据经验或知识进行控制的。因此,只要将他们的操作经验和知识正确地进行归纳总结,找出相应的模糊控制规则,在此基础上构建螺距调节模糊控制系统,应能取得较常规 PID 控制更好的控制效果。

## 3.3 模糊控制器的设计内容

模糊控制器是一种利用人的直觉和经验设计的语言规则控制器,设计时不是采用数学解析模型来描述被控过程和模糊控制器的特性。因此,模糊控制器的设计在严格意义上没有统一和固定的设计方法<sup>[40] [42] [44]</sup>。但是,在模糊控制器长期应用过程中,人们总结了以下几项主要设计内容:

(1) 确定模糊控制器的输入和输出变量。

(2) 设计模糊控制器的控制规则。模糊控制器的控制规则是总结人们在手

动控制中学习、实验及长期积累而得到的控制经验。利用模糊集合论和语言变量的概念，可以把利用语言归纳的手动控制规则上升为数值运算，从而实现智能控制的目的。手动过程可以用条件语句加以描述，如“若螺距偏差为负大，且螺距偏差变化率为负大时，控制量为正大。”对应规则语言：if E=PB and EC=PB then U=PB，建立模糊控制规则的基本思想是根据误差 E 和误差变化 EC 的状态，选取控制量的变化状态，以使误差尽快缩小。

(3) 建立模糊推理和反模糊化方法。对建立的模糊控制规则要经过模糊推理才能决策出控制变量的一个模糊子集。这个模糊子集也不能直接控制被控对象，还需要采取合理的方法将这个模糊子集转换为一个数值，这一过程又称为反模糊化。模糊推理及其模糊量的反模糊化有多种方法：MIN-MAX-重心法，代数积-加权-重心法，模糊加权型推理法，函数型推理法，最大隶属度法和取中位数法等等。

在实际应用中，模糊推理和反模糊化这两步经常是在离线状态下完成的，经推理和反模糊化得到一个模糊控制表，在控制过程中只要根据误差和误差的变化在该表中查出控制量即可。

### 3.4 模糊逻辑工具箱 (Fuzzy Logic Toolbox)

模糊逻辑工具箱提供了模糊逻辑控制器及系统设计的各种途径。工具箱提供了生成和编辑模糊推理系统 (FIS) 常用的工具函数，如 newfis、addvar、addmf、addrule、setfis、writefis 等，它包括产生新的 FIS、给 FIS 加入变量、隶属函数、规则、设置解模糊方法及存储 FIS 等功能。用户可以用命令调用这些函数的方式生成和编辑模糊推理系统。工具箱还提供了 GUI (图形用户界面) 编辑函数，利用它用户可以更直观迅速地生成系统。在用户图形界面方式下，模糊逻辑工具箱提供了五个基本的交互式图形界面来设计和完成模糊逻辑控制系统，它们分别为<sup>[42]</sup>：

(1) 模糊推理系统编辑器：该编辑器用于设计和显示模糊推理系统的一些基本信息与参数，如推理系统的名称，输入、输出变量的个数与名称，模糊推理系统的类型，解模糊方法等。其中，模糊推理系统可以采用 Mamdani 或 Sugeno 两种类型，解模糊方法也有最大隶属度法、中位数法、加权平均法等几种。本文采用双输入单输出的模糊控制器，如图 3-1 所示。

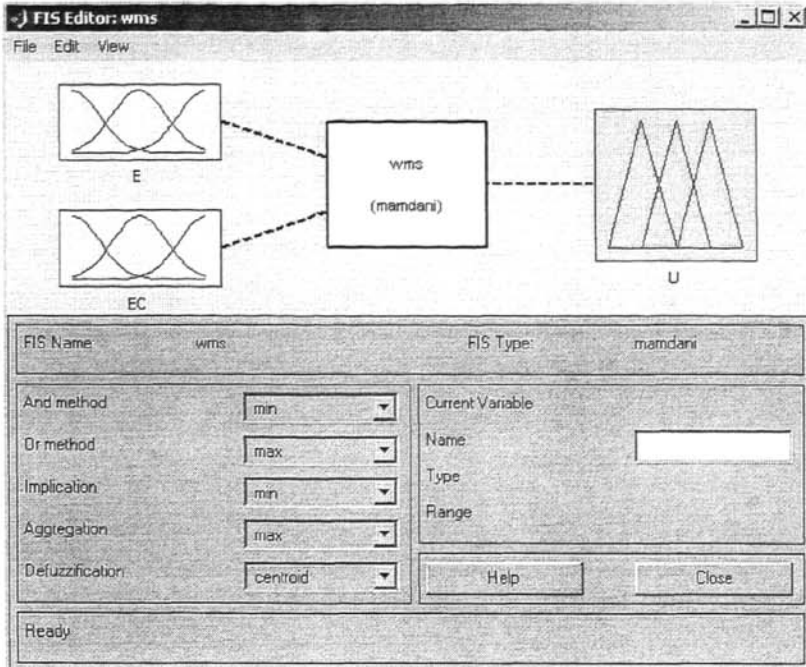


图 3-1 模糊推理系统编辑器

(2) 隶属函数编辑器：该编辑器提供了一个友好的人机图形交互环境，用来设计和修改模糊推理系统中各语言变量对应的隶属函数的相应关系，如隶属函数的形状、范围，以及论域大小等。系统提供的隶属函数有三角形、梯形、高斯形等多种，也可由用户自己定义。本文采用高斯形隶属函数，如图 3-2 所示。

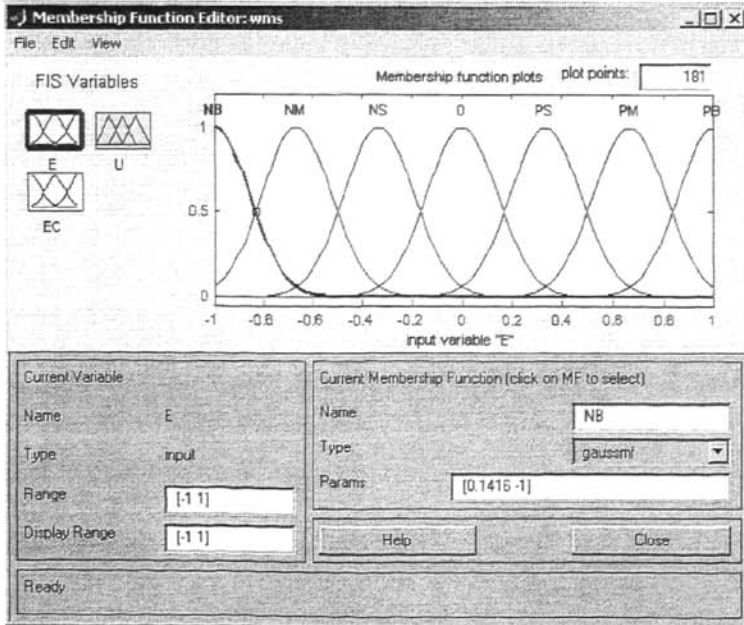


图 3-2 隶属函数编辑器



(3) 规则编辑器：通过该编辑器来设计和修改“IF... Then...”形式的模糊控制规则，如图 3-3 所示。利用该编辑器进行模糊控制规则的设计非常方便，它将输入量的各语言变量自动匹配，而设计者只需通过交互式的图形环境选择相应的输出语言变量，这就大大简化了规则的设计和修改。另外，还可为每条规则选择权重，以便进行规则的优化。本文所设计的控制规则由 49 条语句组成。

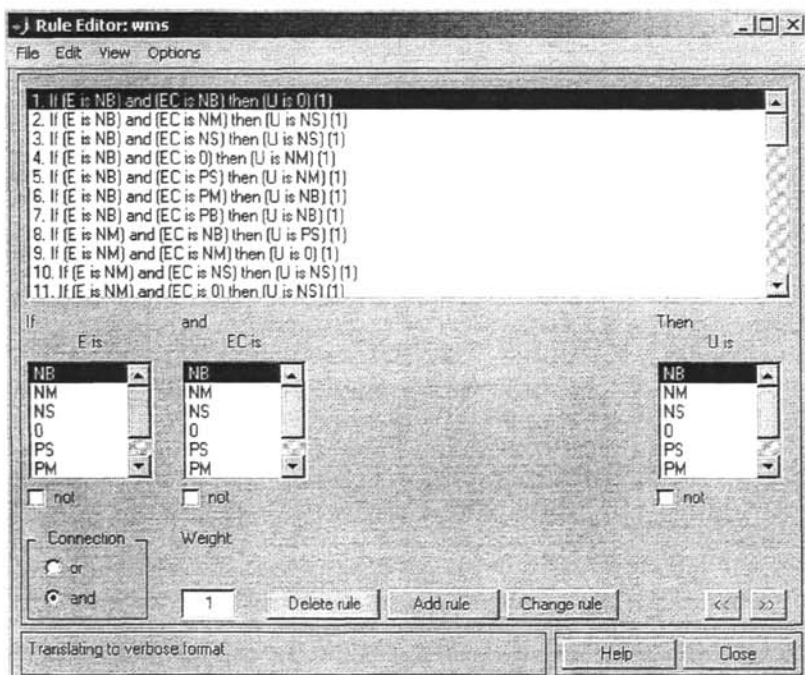


图 3-3 规则编辑器

(4) 规则观察器：该观察器用于显示各条模糊控制规则对应的输入量和输出量的隶属函数，如图 3-4 所示。通过指定输入量，可以直观地显示所采用的控制规则，以及通过模糊推理得到相应输出量的过程，以便对模糊规则进行修改和优化。

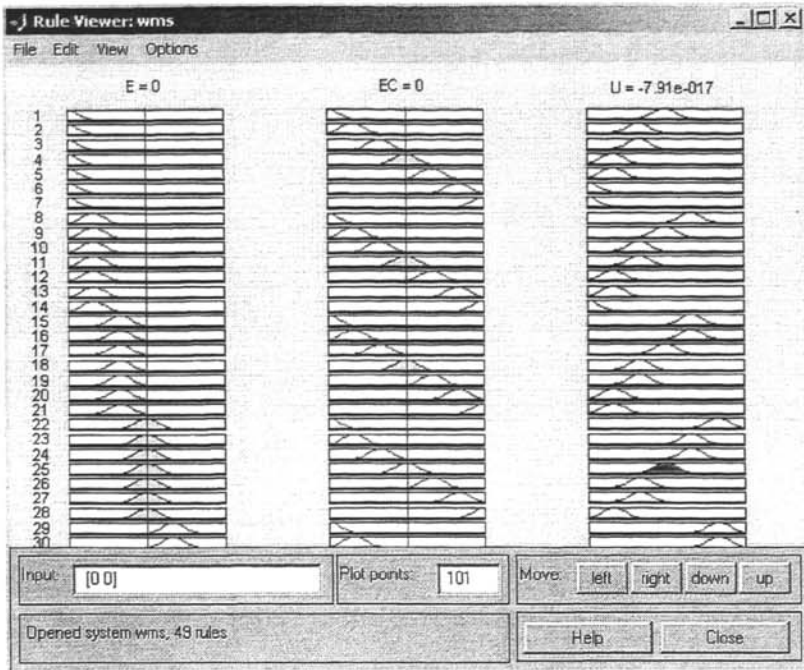


图 3-4 规则观察器

(5) 表面观察器：该观察器用于显示输入、输出量对应的表面空间，并可改变各轴对应的变量及观察的视角，便于用户对设计的模糊推理系统进行修改和优化，如图 3-5 所示。

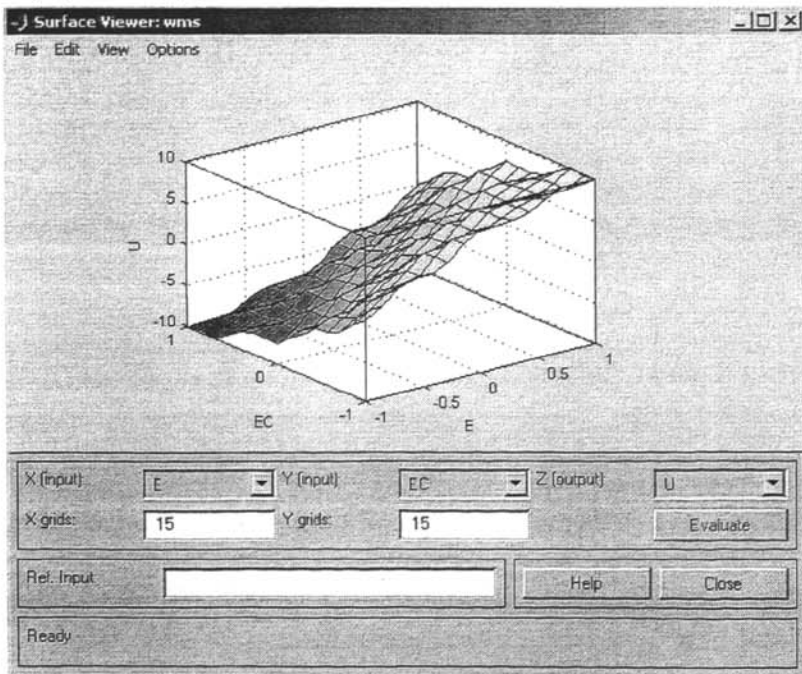


图 3-5 表面观察器

### 3.5 模糊控制器的设计

船舶在航行过程中，通过传感器测量实时航速，并反馈回来与车钟航速进行比较，将得到的偏差和偏差变化率发送给模糊控制器，由模糊控制器计算出转速或螺距的调节量，送给船桨系统以实现船舶的转速控制和螺距控制<sup>[43][44]</sup>。

本文选用常规的二维模糊控制器，其输入变量分别为航速偏差 E 和偏差变化率 EC，输出控制量 U 为转速或螺距的设定值<sup>[45][46][47][48][49][50][51]</sup>。E 的基本论域为 [-1, 1]，单位为 kn，分为七档，词集为 {NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB}（分别代表负很大，负较大，负小，不变，正小，正较大，正很大）；EC 的基本论域为 [-1, 1]，单位为 kn/s，也分为七档，词集为 {NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB}；U 的基本论域为 [-12, 12]，分为七档，词集为 {NB, NM, NS, 0, PS, PM, PB}。语言值的隶属度均选用 Gaussmf 隶属度函数，控制规则选用 Mamdani 控制规则。基于专家实际经验，得到一序列模糊控制规则，优化、整理后可以得到转速或螺距控制的模糊控制规则表（表 3-1）。解模糊选用重心法。

表 3-1 船舶推进系统的模糊控制规则表

$\begin{matrix} U \\ EC \end{matrix} \backslash E$	NB	NM	NS	0	PS	PM	PB
NB	0	PS	PS	PM	PM	PB	PB
NM	NS	0	PS	PS	PM	PM	PB
NS	NS	NS	0	PS	PS	PM	PM
0	NM	NS	NS	0	PS	PS	PM
PS	NM	NM	NS	NS	0	PS	PS
PM	NB	NM	NM	NS	NS	0	PS
PB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	0

- if E is NB and EC is NB then U is 0;
- if E is NB and EC is NM then U is NS;
- if E is NB and EC is NS then U is NS;
- if E is NB and EC is 0 then U is NM;
- if E is NB and EC is PS then U is NM;
- if E is NB and EC is PM then U is NB;
- if E is NB and EC is PB then U is NB;
- .....

### 3.6 PID 控制器设计

PID 控制是连续系统控制理论中十分成熟的一种控制方式，它被广泛地应用在实际生产中。PID 三个参数的选取对控制的性能有很大的影响，PID 控制经过八十多年的发展，已经有了众多的参数整定方法，基于遗传算法的 PID 参数整定是对 PID 参数整定方法的一种重要补充和发展。本文将这三个参数作为需要优化的设计变量，然后将其应用到船舶推进装置中。

PID 控制系统在 SIMULINK 平台上表示如图 3-6 所示。控制对象为某型舰的推进部分，通过控制主机转速（或可调桨的螺距）来改变船舶速度。

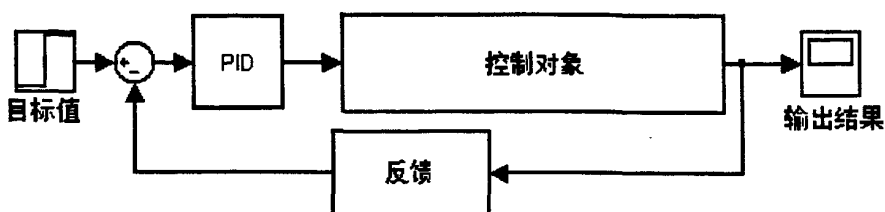


图 3-6 传统的 PID 控制系统

由于 PID 控制规律可用表达式表示如下：

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{1}{k_i} \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3-1)$$

由此可以构建 PID 控制器模型，如图 3-7 所示。

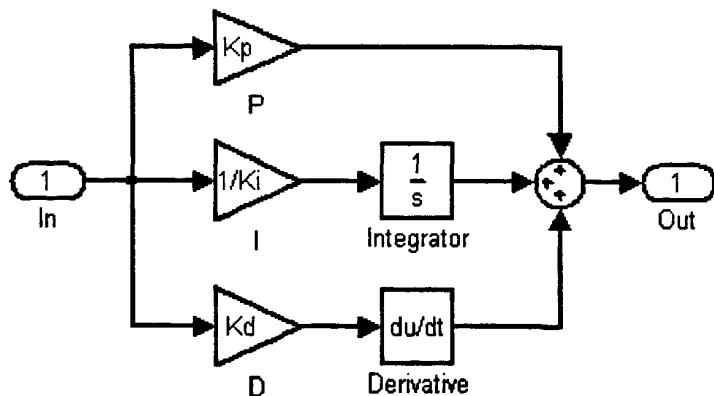


图 3-7 PID 控制器数学模型

双击其中的 PID 控制器，即可得到图 3-8 所示的对话框：

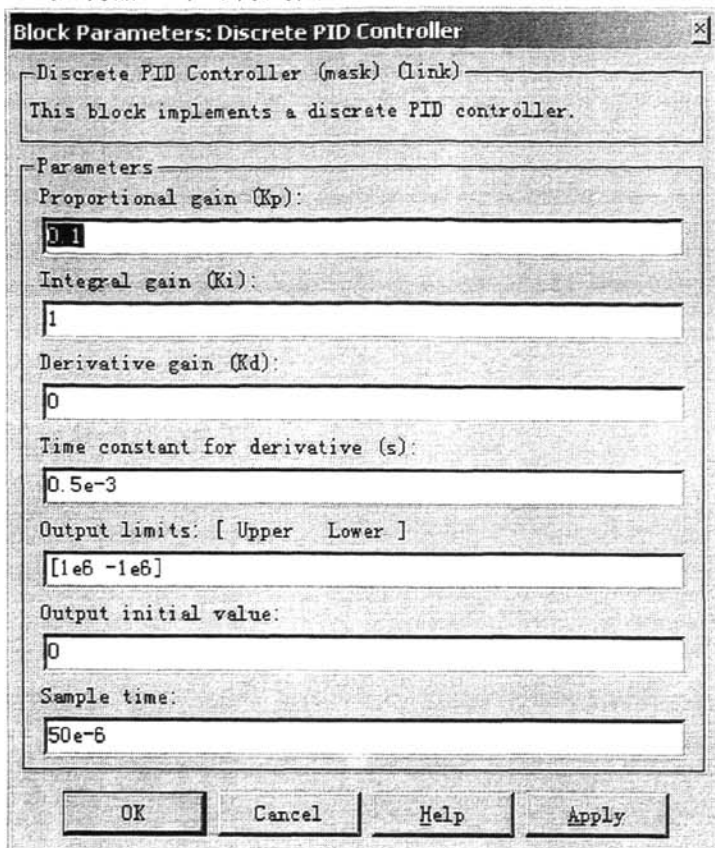


图 3-8 PID 控制器参数设置对话框

其中 Proportional、Integral、Derivative 即为我们所要优化的  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$ ，分别为比例、积分和微分系数，它们是图中 PID 控制器的三个基本控制参数。从系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等各方面来考虑， $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  的作用如下：(1) 比例系数  $k_p$  的作用是加快系统的响应速度，提高系统的调节精度。 $k_p$  越大，系统的响应速度越快，系统的调节精度越高，但容易产生超调，甚至会导致系统不稳定。 $k_p$  取值过小，则会降低调节精度，使响应速度缓慢，延长调节时间，使系统静态、动态特性变坏。(2) 积分系数  $k_i$  的作用是消除系统的稳态误差。如果积分时间  $k_i$  大，则积分作用弱，反之则积分作用强。增大  $k_i$  将减慢消除稳态误差的过程，但可减小超调，提高稳定性。(3) 微分系数  $k_d$  的作用是改善系统的动态特性，其作用主要是在响应过程中抑制偏差向任何方向的变化，对偏差变化进行提前预报。但  $k_d$  过大，会使响应过程提前制动，从而延长调节时间，而且会降低系统的抗干扰性能。PID 参数的整定必须考虑到在不同时刻三个参数的作用。

### 3.7 本章小结

本章介绍了模糊数学的一些基本概念、模糊控制的基本特点和模糊控制器设计的主要内容，着重介绍了模糊逻辑工具箱的主要功能和使用，以及结合专家经验设计了模糊控制器。最后，介绍了传统 PID 控制的特点和控制器的设计。由于传统的 PID 控制可以在短时间内实现目标值，抗干扰能力强，但其控制量的变化大，有时甚至超出了实际中所能达到的范围；而模糊控制虽然进入稳定的时间较长，抗干扰能力稍弱，但过渡稳定，超调量小，控制量的变化比较合理。因此，把两种控制方式结合起来使用，可以达到比较理想的控制效果。模糊控制不依赖于对象模型，它利用被控制过程的动态信息，依据规则知识进行推理获得合适的控制量，因而具有较强的鲁棒性，但控制精度往往不尽人意。分析表明，模糊控制和 PID 的结合是提高控制性能的有效手段，提高 PID 的控制精度及鲁棒性，收到了较好的控制效果。

## 第 4 章 高速船可调桨推进系统综合优化

高速船可调桨推进系统主要包括主机、传动设备、轴系和螺旋桨，其中以主机和螺旋桨最为重要。对推进系统控制方法采用智能控制技术，而对其进行优化一般是指在给定约束条件下选取合适的推进系统控制参数，使得所设计的船舶推进系统具有最佳的快速性能和控制性能<sup>[9] [21] [32] [34] [36] [37] [52]</sup>。

### 4.1 设计变量

高速船的种类繁多，本文选取某型舰可调桨推进模糊控制系统来设计变量。本设计的仿真模型中有两个模糊控制器：一个是控制螺旋桨的转速  $n$  的模糊控制器，通过调速器调节主机转速来实现；另一个是控制螺旋桨的螺距  $H$  的模糊控制器，通过螺距调节机构来实现。并由此选取目标航速  $V$ ，盘面比  $A_E/A_O$ 、螺距比  $H/D$  以及转速 PID 控制器的三个控制系数  $K1$ 、 $K2$ 、 $K3$  和螺距 PID 控制器的三个控制系数  $K4$ 、 $K5$ 、 $K6$  等九个参数为设计变量，它的向量表达式为：

$$\begin{aligned} X &= \{x1, x2, x3, x4, x5, x6, x7, x8, x9\}^T \\ &= \{V, A_E/A_O, H/D, K1, K2, K3, K4, K5, K6\}^T \end{aligned} \quad (4-1)$$

### 4.2 控制目标函数

#### 4.2.1 快速性综合分析

对于军舰而言，快速性是一项非常重要的性能指标，航速的高低直接影响军舰战斗力的发挥。通常情况下，我们用海军系数  $C_E = \frac{\Delta^{\frac{2}{3}} \cdot V^3}{P_E}$  来衡量船舶的线型阻力性能，用推进系数  $P.C = \eta_H \cdot \eta_0 \cdot \eta_R \cdot \eta_S$  来衡量推进效率<sup>[32] [34] [36] [37]</sup>。综合两者，就可以得到某型舰的海军系数：

$$C_{SP} = \frac{1}{C_E} \cdot \frac{1}{P.C} = \frac{P_E}{\Delta^{\frac{2}{3}} \cdot V^3} \quad (4-2)$$

可以看出,  $C_{SP}$  是一个综合衡准因子, 包括了船舶线型优劣及螺旋桨的敞水效率的优劣, 因此, 可以用来衡准快速性, 则目标函数为:

$$f(X) = C_{SP} = \frac{P_E}{\frac{\eta_H \cdot \eta_0 \cdot \eta_R \cdot \eta_S}{\Delta^{\frac{2}{3}} \cdot V^3}} = \frac{P_S}{\Delta^{\frac{2}{3}} \cdot V^3} \quad (4-3)$$

式中:

$\Delta$  ----- 为排水量, 即  $\Delta = M \cdot g$

$M$  ----- 船舶总质量

$g$  ----- 重力加速度, 选取  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$

$V$  ----- 船舶的目标航速

$P_E$  ----- 船舶有效功率

$P_S$  ----- 主机输出功率

$\eta_H$  ----- 船身效率

$\eta_0$  ----- 螺旋桨敞水效率,  $\eta_0 = \frac{K_T \cdot J}{K_Q \cdot 2\pi}$

$\eta_R$  ----- 相对旋转效率, 本文选取  $\eta_R = 0.982$ 。

$\eta_S$  ----- 轴系传送效率, 尾机型船  $\eta_S = 0.98$ , 中机型船  $\eta_S = 0.97$ 。本文中的讨论的高速船为尾型船, 选取  $\eta_S = 0.98$ 。

优化设计所追求的目标是力求使快速性目标函数  $f(X)$  达到最小, 使  $P_S$  最小, 而  $V$  最大,  $\Delta$  变化不大, 可以认为是一个定值。

#### 4.2.2 经济性综合分析

动力装置方面的经济性主要是指燃油经济性, 希望动力装置的燃油消耗量最小。这里, 我们采用动力装置每千米航程消耗的燃油量作为衡准因子<sup>[37]</sup>, 即:

$$b_M = \frac{B}{V} \quad (4-4)$$

式中:  $B$  为整个动力装置每小时燃料消耗量 (kg/h),  $B = b_e \cdot P_E$ ,  $b_e$  为柴油机的有效燃油消耗率,  $P_E = P_S \cdot \eta_H \cdot \eta_0 \cdot \eta_R \cdot \eta_S$ ,  $V$  为船舶航速。

目标函数为:

$$h(X) = b_M = \frac{B}{V} = \frac{b_e \cdot P_S \cdot \eta_H \cdot \eta_0 \cdot \eta_R \cdot \eta_S}{V} \quad (4-5)$$



### 4.2.3 总目标函数

一般情况下，当有多个目标函数时，采取加权求和的方法得到总目标函数，但是权数的选取往往较为随意，而且存在很大误差。故本设计采取将快速性和经济性控制目标函数的乘积作为优化设计的总目标函数，即表达式为：

$$F(X) = f(X) \cdot h(X) \quad (4-6)$$

### 4.3 约束条件<sup>[6]</sup>

#### ①力平衡条件

为了使船舶达到设计的航速  $V_S$ ，螺旋桨所发出的有效推力  $T_e$  应该等于航速  $V_S$  时的船体阻力  $R$ ，即：

$$T_e - R = (1 - t \cdot t_p) K_T \rho n^2 D^4 - r \cdot V_S^2 = 0 \quad (4-7)$$

#### ②运动条件

螺旋桨的进程比  $J$  与它的直径  $D$ 、螺旋桨转速  $n$ 、船舶航速  $V_S$  和伴流系数  $w$  保持如下关系：

$$J - \frac{(1-w)}{n \cdot D} \cdot V_S = 0 \quad (4-8)$$

#### ③不发生螺旋桨空泡的条件

螺旋桨的盘面比  $A_E / A_O$  必须大于或等于不发生空泡要求的最小盘面比  $(A_E / A_O)_{\min}$ ，即：

$$A_E / A_O \geq (A_E / A_O)_{\min} \quad (4-9)$$

#### ④其它各参数的取值在限定的范围内。

对于等式约束条件，由于仿真模型是在其等式的基础上建立起来的，所以等式约束条件是实时满足的，而对于不等式约束条件，需要将其转化为惩罚函数吸收在总的目标函数当中。

### 4.4 优化方法

随着电子计算机技术的迅速发展和数学规划理论的不完善，优化技术在各个工程领域中的应用日益广泛，优化方法也多种多样，常用的优化算法有遗传算法、自适应算法、混沌算法等以及这些算法的改进型优化算法<sup>[53] [54] [55] [56] [57]</sup>

<sup>[58] [59] [60] [61]</sup>。本论文主要采用遗传算法来进行优化。

#### 4.4.1 自适应算法

较常见的自适应算法有自适应对称启动算法,它的主体思想为:将所有节点机分为三类,即发送者、接收者和中立者,每个节点机用三张表分别记录各类节点机的名称。当某节点机就绪队列长度超过上限时成为发送者,启动发送者启动算法;当节点机成为接收者时启动接收者启动算法。它与对称启动算法的不同是后者的接收者发送者的启动由系统负载变化决定,而前者由节点机决定。在每次查询时,发送者和被查询节点均能更新自己的三张表,真实地记录系统中各节点机的状态信息,直到发送者的接收表为空。当系统重载时,由于各节点机的接收者表多为空,从而抑制发送者启动,算法部分由接收者启动算法进行负载分配。

从整体看,该算法结构简单,但考虑的因素较少,容易造成系统不稳定,甚至系统崩溃。(1)不考虑节点机中各任务之间的通信量,一个节点机中的任务与另一个节点机中的任务进行通信可能距离较远而浪费系统资源;(2)当系统整个处于重载时,若发送者启动后,可能在接收者表中重复寻找接收者,而此算法中没有寻找次数的上下限,在重复寻找过程中,可能加重系统的负担;(3)系统中每个节点机的三张表只有在该节点激活后,通过轮巡节点机并得到反馈时才改变相应表中状态,而在整体中没有改变,在别的节点机激活后,仍需根据轮巡节点机得到反馈才改变相应的表中的状态,这样重复了一些操作,浪费了系统时间和资源;(4)当系统中某个节点机出现故障时,没有及时清除掉该节点机或解决故障,可能引起系统不稳定。鉴于上述情况,人们提出了一种改进的自适应动态负载平衡算法。

#### 4.4.2 混沌算法

混沌是非线性动力学系统特有的一种形式,是确定性系统中出现类似随机过程的内随机现象,其特性为:对初值高度敏感、具有内随机性、有分数维、不可预测性等。由于混沌系统的奇异性和复杂性至今尚未被人们彻底了解,因此至今没有一个统一的混沌定义,目前已有的定义仅仅从不同的侧面来反映混沌的性质。

## 1 混沌的特点

(1) 初值的极其敏感性 牛顿力学认为在确定性系统中可以列出确定性方程, 在任何时候其解是确定的, 人们力图从大量的偶然事件中去把握统计学规律。但混沌理论认为动力学性态对初始条件具有极其的敏感性, 如果初值具有一极微小的变化, 在短时间内的结果还可以预测, 但通过长时间的演化后, 它的状态根本无法确定, 即差之毫厘、失之千里, 这就是著名的“蝴蝶效应”。人们利用这一特性, 可以通过精心选择的小控制量产生显著的效果。

(2) 有规律性的成分 混沌行为具有稠密的周期轨道, 其运动最终要落在奇怪吸引子之中, 使其呈现出多种看似混乱无序却又颇具规则的自相似图像。这种混沌吸引子可用作潜在的信息源, 通过控制可使系统处在不同的状态、用作不同的目的。

(3) 运动具有遍历性 混沌吸引子中的运动能在一定的范围内按其自身的规律遍历每一条轨道, 既不自我重复又不自我交叉。可利用混沌变量进行全局搜索, 用于系统辨识、最优参数设计等众多方面。

## 2 混沌的主要性质

(1) 随机性 体系处于混沌状态是由体系内部动力学随机性产生的不规则行为。混沌现象形成的根源在体系内部, 与外部因素无关。产生混沌的体系。一般来说具有整体稳定性, 而局部是非稳定的。体系内的局部不稳定正是内随机性的特点, 也是对初值敏感性的原因所在。

(2) 分维性 分维性是指系统运动轨迹在相空间的几何形态可用分维来描述。系统的混沌运动在相空间无穷缠绕、折迭和扭结, 构成具有无穷层次的称为奇怪吸引子的自相似结构。

(3) 普适性 当系统趋于混沌时, 所表现出的特征具有普适意义。其特征不因具体系统的不同和系统运动方程的差异而变化, 这类系统都与 Feigenbaum 常数相联系。

(4) 标度律 混沌现象是一种无周期性的有序态, 具有无限层次的自相似结构, 存在无标度区域。只要数值计算的精度足够高, 则可以从中发现小尺度混沌的有序运动花样, 所以具有标度律性质。另外, 混沌运动还具有通常确定性运动所没有的几何和统计特征, 如连续功率谱、正的 Lyapunov 特性指数等。

### 3 混沌优化算法

混沌优化算法是一种新的直接搜索优化算法。它直接采用混沌变量在允许解空间内进行搜索，搜索过程按混沌运动的自身规律进行，与遗传算法等按概率接受“劣解”以跳出局部最优解的算法相比，它更易于摆脱局部最优解，搜索效率高。但混沌优化算法存在一个缺陷，即局部搜索效果较差，计算精度不高。针对这个缺点，变尺度混沌优化算法以混沌优化算法为基础，通过缩小优化变量的搜索区间来实现局部细化搜索，同时通过改变“二次搜索”的调节系数来提高搜索精度。

#### 4.4.3 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithm, 英文缩写 GA) 是基于进化论的原理发展起来的一种广为应用的、高效的随机搜索与优化的方法。到上世纪 80 年代中期以来，由于计算机容量和计算速度的不断提高，以及 GA 本身的不但成熟而得到了迅速的发展，已广泛应用许多工程领域。与传统的优化方法相比较，它具有使用简单、不依赖于问题的数学特征、全局寻优能力强等特点。和传统的搜索算法不同，遗传算法从一组随机产生的初始解，称为“种群(Population)”，开始搜索过程。种群中的每个个体是问题的一个解，称为“染色体(Chromosome)”。染色体是一串符号，比如一个二进制字符串。这些染色体在后续迭代中不断进化，称为遗传。

在每一代中“适值(Fitness)”来测量染色体的好坏。生成的下一代染色体称为后代(Offspring)。后代是由前一代染色体通过选择(Selection)、交叉(Crossover)或者变异(Mutation)运算形成的。新一代形成中，根据适值的大小选择部分后代，淘汰部分后代，从而保持种群大小是常数。适值高的染色体被选中的概率较高。这样，经过若干代之后，算法收敛于最好的染色体，它很可能就是问题的最优解或次优解。

可以说，遗传算法是一种模拟生物界和人类社会进化的思想，有时也称为演化算法，它的实现方法不是唯一的，只要算法实现过程中诸如染色体编码、选择、交叉、变异策略或停机准则中有一项不同，则算法就不一样。而本文所说的遗传算法在满足前述标准的遗传算法程序结构前提下具体实现细节如下<sup>[58]</sup>

[59] [60] [65] :

## (1) 编码

众所周知，遗传算法中进化过程是建立在编码机制基础上的，编码对于算法的性能如搜索能力和种群多样性等影响很大。编码方式主要分为浮点数编码和二进制编码两种，就二进制编码和浮点数编码比较而言，一般二进制编码比浮点数编码能力强，编码、解码操作简单，交叉、变异等遗传操作便于实现，但浮点数编码比二进制编码在变异操作上能够保持更好的种群多样性。基于以上考虑，本论文采用二进制编码。

## (2) 选择

选择是实现进化的重要一环，许多学者提出了种种不同的选择方法，本文采用比较通用的轮盘赌法。具体步骤如下：

(1) 计算每个染色体  $v_i (i=1, 2, \dots, \text{pop\_size})$  的适应值  $\text{eval}(v_i)$ ；

(2) 计算群体的总适应值  $F = \sum_{i=1}^{\text{pop\_size}} \text{eval}(v_i)$ ；

(3) 计算每个染色体  $v_i (i=1, 2, \dots, \text{pop\_size})$  的选择概率  $p_i$ ：  $p_i = \text{eval}(v_i) / F$ ；

(4) 计算每个染色体  $v_i (i=1, 2, \dots, \text{pop\_size})$  的累积概率  $q_i$ ：  $q_i = \sum_{j=1}^i p_j$ ；

对轮盘转动  $\text{pop\_size}$  次，每次按照下面的方法为新群体选择一个单个的染色体：

(I) 产生一个在区间  $[0, 1]$  里的随机浮点数  $r$ ；

(II) 如果  $r < q_1$ ，选择第一个染色体 ( $v_1$ )；否则选择使  $q_{i-1} \leq r \leq q_i$  成立的第  $i$  个染色体  $v_i (2 \leq i \leq \text{pop\_size})$ 。

## (3) 交叉

交叉 (rossover) 是把两个父个体的部分结构加以替换重组而生成新个体的操作，也称基因重组。重组的目的是为了能够在下一代产生新的个体，就像人类社会的婚姻过程，通过重组交叉操作，遗传算法的搜索能力得以飞跃地提高。基因重组和交叉是遗传算法获得新优良个体的重要手段。遗传系统的一个重要的参数就是交叉概率  $p_c$ ，本算法取为 0.8，此概率给出预计要进行杂交的染色体个数是  $p_c * \text{pop\_size}$ 。

基于二进制编码的遗传算法，它的交叉主要分为单点交叉、多点交叉和均匀交叉。

a. 单点交叉

单点交叉中，交叉点  $k$  的范围为  $[1, Nvar-1]$ ， $Nvar$  为个体变量数目，在该点为分界相互交换变量。

考虑如下两个 11 位变量的父个体：

父个体 1     01110011010

父个体 2     10101100101

交叉点位置为 5，交叉后生成两个子个体：

子个体 1     01110 100101

子个体 2     10101 011010

b. 多点交叉

对于多点交叉， $m$  个交叉位置  $K_i$  可无重复随机地选择，在交叉点之间的变量间断地相互交换，产生两个新的后代，但在第一位变量与第一个交叉点之间的一段不做交换。

考虑如下两个 11 位变量的个体：

父个体 1     01110011010

父个体 2     10101100101

交叉点的位置为： 2 6 10。

交叉后两个新个体为：

子个体 1     01 1011 1101 1

子个体 2     101100 0010 0

多点交叉的思想源于控制个体特定行为的染色体表示信息的部分无须包含于邻近的子串中，多点交叉的破坏性可以促进解空间的搜索，而不是促进过早地收敛。因此搜索更加健壮。

c. 均匀交叉

单点和多点交叉的定义使得个体在交叉点处分成片段。均匀交叉更加广义化，将每个点都作为潜在的交叉点。随机地产生与个体等长的 0-1 掩码，掩码中的片段表明了哪个父个体向子个体提供变量值。

考虑如下两个 11 位变量的个体：

父个体 1     01110011010

父个体 2     10101100101

掩码样本 (1 表示父个体 1 提供变量值，0 表示父个体 2 提供变量值)：

样本 1      01100011010

样本 2      10011100101

交叉后两个新个体为:

子个体 1    1 11 011 11 1 1

子个体 2    0 01 100 00 0 0

均匀交叉类似于多点交叉,可以减少二进制编码长度与给定参数特殊编码之间的偏差。它的算法与离散重组是等价的。

#### (4) 变异

遗传系统的另一个重要系统参数是变异率  $p_m$ ,它给出预计的变异位数。整个群体中所有染色体中的每一位都有均等的机会经历变异,即从 0 到 1 或者相反,所以进行如下的步骤:

- (1) 在区间  $[0, 1]$  内产生一随机浮点数  $r$ ;
- (2) 对杂交后的当前群体中的每个染色体和染色体中的每个位,如果  $r < p_m$ , 变异次位。本算法设定  $p_m$  为 0.15。

#### (5) 初始种群的确定

运用遗传算法进行优化计算时,如何确定初始种群是个很重要的问题,它和编码方案息息相关。在本论文给出的算法中,假定一代种群的确定包括每个个体的适值(fitness)、相对适值(rfitness)、累积适值(cfitness)、对应每维变量下限(lower[i])、对应每维变量上限(upper[i])、基因组(gene[ ])共六项。

#### (6) 适值

在遗传算法中,适值(Fitness)是一个至关重要的概念。对于无约束优化问题,适值可取为该问题的优化目标值。但对于有约束的优化问题,适值就不一定是该问题的优化目标值。但其对应关系应是明显的。实际上,正是通过适值的合适选择,可将约束优化问题转化成无约束优化问题。约束优化问题是一个可行解应满足约束条件,而最优解不但要满足约束条件,还必需使得目标函数最大或最小。这样,“染色体(Chromosome)”的“适值(Fitness)”应包括两方面信息,一是该“染色体(Chromosome)”满足约束程度,二是该“染色体(Chromosome)”优化目标函数值。

## (7) 进化停机准则

如果对遗传算法的搜索过程进行跟踪观察,会发现它将很快收敛于一稳定的最优解。20世纪70年代后期,De Jong对遗传算法进行了大量的数值实验,得出了一个结论,对于规模在50到100的群体,经过10到20代的演化,遗传算法都以很高的效率找到最优或近似最优解。这个结论即使对于一个变化非常大的问题空间也成立。De Jong还指出,串中每位的变异概率只要在0.001的数量级,就足以能防止搜索陷入局部最优。这样,可以设定一个最大迭代次数,例如300,并认为进化到300代即可停止演化,亦即第300代中最好的染色体即是问题的最优解。在实际优化过程中,为提高计算速度,可每隔10代判断一下迭代是否收敛,方法是计算出该代个体适值的方差,当它小于给定值 $\varepsilon_s$ (可取为 $1.0e-5$ )时,即认为找到最优解,可提前停止搜索。

## (8) 惩罚策略

惩罚技术是用遗传算法解约束优化问题中最常用的技术。本质上它是通过惩罚不可行解将约束问题转化为无约束问题。在遗传算法中,惩罚技术用来在每代的种群中保持部分不可行解,使遗传算法可以从可行域和不可行域两边来达到最优解。惩罚策略的主要问题是设计一个惩罚函数 $p(x)$ ,从而能有效的引导遗传搜索达到解空间的最好区域。不可行染色体和解空间可行部分的关系在惩罚不可行染色体中起了关键作用:不可行染色体的惩罚值相应于某种程度下的不可行性的“测量”。

遗传算法以适应度函数(或目标函数)为依据,通过对群体中的个体进行遗传操作,实现群体内个体结构重组的迭代处理,基本的遗传算法流程框图如图4-1所示。具体的实现过程如下<sup>[62] [63] [64]</sup>:

- Step1: 初始化。设置进化代数计数器,设置最大进化代数,随机生成个体作为初始群体。
- Step2: 个体评价。计算群体中各个个体的适应度。
- Step3: 选择运算。将选择算子作用于群体。
- Step4: 交叉运算。将交叉算子作用于群体。
- Step5: 变异运算。将变异算子作用于群体。
- Step6: 群体经过选择、交叉、变异运算之后得到下一代群体。
- Step7: 终止条件判断。若N,则转到Step2;若Y则以进化过程中所得到的具有最大适应度的个体作为最优解输出,并终止计算。



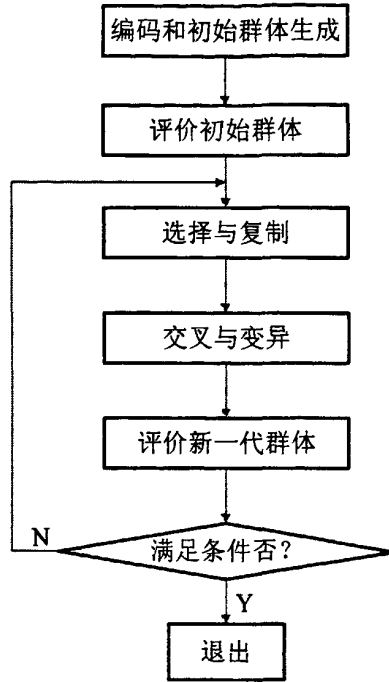


图 4-1 标准遗传算法流程图

标准的遗传算法程序结构如下<sup>[66] [67] [68][69][70]</sup>，其中  $P(t)$ 为当前种群， $P(t-1)$ 为前一种群：

```

procedure evolution program
begin
     $t \leftarrow 0$ 
    initialize  $P(t)$ 
    evaluate  $P(t)$ 
    while(not termination-condition) do
        begin
             $t \leftarrow t+1$ 
            select  $P(t)$  from  $P(t-1)$ 
            alter  $P(t)$ 
            evaluate  $P(t)$ 
        end
    end

```

## 4.5 本章小结

本章主要介绍了高速船可调桨推进系统的优化控制目标的设计，列出了三种常用的优化方法遗传算法、自适应算法、混沌算法，并选取了遗传算法作为本设计的优化算法。首先，设计了优化控制目标变量，选取目标航速 $V$ ，盘面比 $A_E/A_O$ 、螺距比 $H/D$ 以及转速 PID 控制器的三个控制系数 $K1$ 、 $K2$ 、 $K3$ 和螺距 PID 控制器的三个控制系数 $K4$ 、 $K5$ 、 $K6$ 等九个参数为设计变量。其次，提出了将航行快速性和经济性综合起来作为优化控制目标函数，快速性采用 $C_{SP}$ 来衡量，它是一个综合衡准因子，包括了船舶线型优劣及螺旋桨的敞水效率的优劣；动力装置方面的经济性主要是指燃油经济性，希望动力装置的燃油消耗量最小，我们采用动力装置每千米航程消耗的燃油量作为衡准因子。然后，针对本文中的实例某型舰，将力平衡条件、运动平衡条件和不发生螺旋桨空泡的条件三者作为优化控制目标函数的约束条件。最后，着重介绍了遗传算法的具体实现过程。

## 第 5 章 仿真结果及分析

本文选取某型高速船为例，采用遗传算法求解最小控制目标值，并对转速控制和螺距控制的 PID 调节参数进行优化，然后通过模糊控制器对变工况下的主机的转速和可调桨的螺距进行控制。最后，对比了传统的 PID 控制与模糊 PID 控制两者之间的差别，并对结果进行了分析。

### 5.1 算例基本参数

本文选取排水量为 1000t 的某型舰为例，其主尺度参数如表 5-1 所示：

表 5-1 某型舰的主尺度

排水量 t	水线长 m	船宽 m	吃水 m	方型系数
1000	71.92	11.214	2.697	0.448

### 5.2 仿真结果分析

#### 5.2.1 优化结果

对于上述某型舰为例，各个变量的优化范围如表 5-2 所示。

表 5-2 某型舰的设计变量范围

设计变量	$V_0$ (kn)	$A_e/A_o$	H/D	K1	K2	K3	K4	K5	K6
上限	40	0.8	1.1	2.0	5.0	0.1	4.0	15.0	0.1
下限	39	0.6	0.8	0.8	2.0	0.05	2.5	5.0	0.05

对于上述某型舰的优化过程，我们选用遗传算法来进行。其中，种群数的大小会影响程序陷入局部优化的概率。如果它选取的过小，程序陷入局部优化的概率将增加；如果它选取的过大，则会占用大量的计算机内存，造成资源浪费。另外，遗传代数从理论上讲越大越好，但只要发现评价函数的值没有变化，取相对应的代数就可以了，从而节省计算机资源和计算时间。对于本论文的优化程序，通过多组程序的运算表明，初始种群取为 100 个，遗传代数为 30 代，就可以达到快速性和经济性的良好统一。每次仿真 1000 秒，所得一组优化结果如表 5-3 所示。

表 5-3 某型舰设计变量的一组优化结果

Vo(kn)	Ae/Ao	H/D	K1	K2	K3	K4	K5	K6
39.931	1.0852	0.7935	1.1	3.5	0.05	3.0	8.5	0.05

此时的目标函数值为 0.59812，将以上优化结果带入仿真模块，其仿真结果如图 5-1 所示。

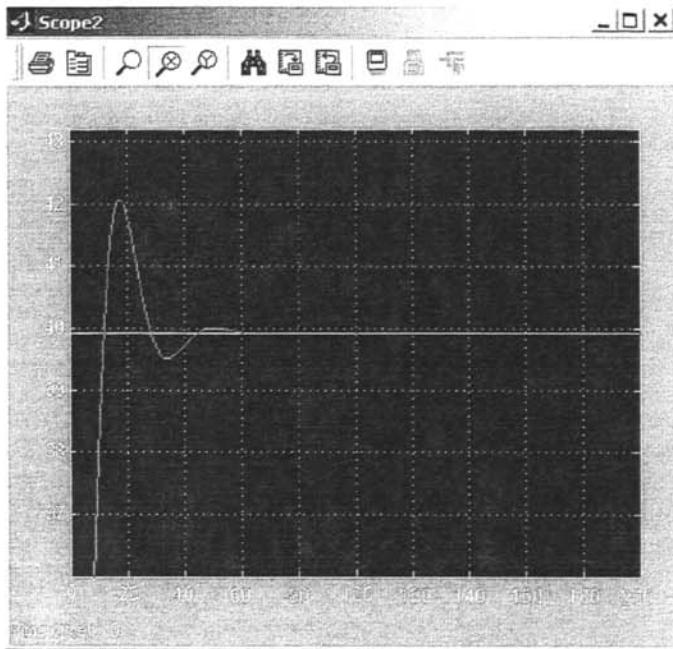


图 5-1 某型舰优化航速下的仿真结果

由上图 5-1 可以看出，此时的目标航速为 39.931kn，实时航速的最大值为 42.57kn，航速超调量为 2.639kn，控制器调到目标航速所需的时间为 60 秒左右。

为了检测优化结果的适应性好坏，将目标航速  $V_0$  在优化结果的基础上分别加减 1kn 或 2kn，其它设计变量值保持不变进行仿真，然后将四种仿真结果进行比较。并且为了得到目标函数的值，需要在原仿真模型中加上适当的模块，将两个分目标函数通过一个函数器来求得总目标函数值。仿真结果为：

(1) 目标航速  $V_0=41.931\text{kn}$  时，总目标函数值为 0.3901， $V_s$  和  $V_0-t$  曲线为图 5-2；

(2) 目标航速  $V_0=40.931\text{kn}$  时，总目标函数值为 0.2625， $V_s$  和  $V_0-t$  曲线为图 5-3；

(3) 目标航速  $V_0=38.931\text{kn}$  时，总目标函数值为 0.0945， $V_s$  和  $V_0-t$  曲线为图 5-4；

(4) 目标航速  $V_0=37.931\text{kn}$  时, 总目标函数值为 0.0371,  $V_s$  和  $V_0-t$  曲线为图 5-5。

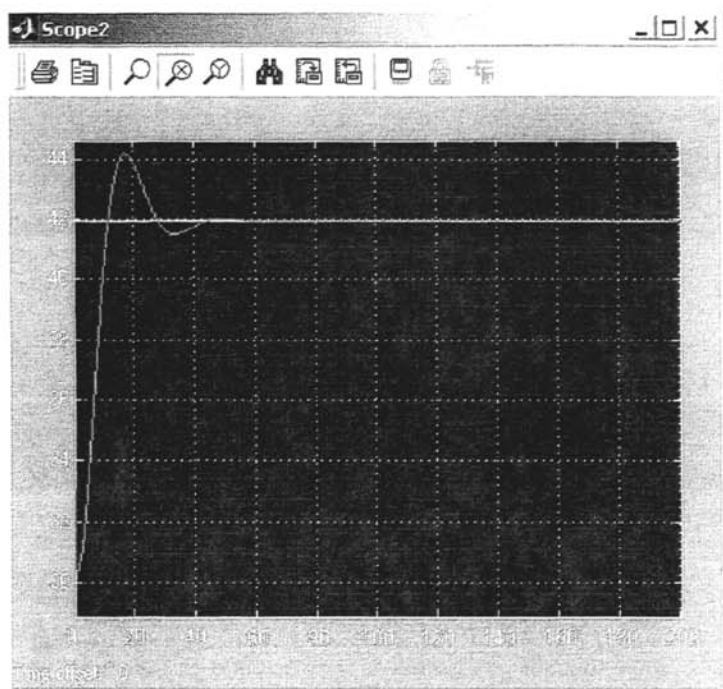


图 5-2  $V_0=41.931\text{kn}$  时的仿真结果

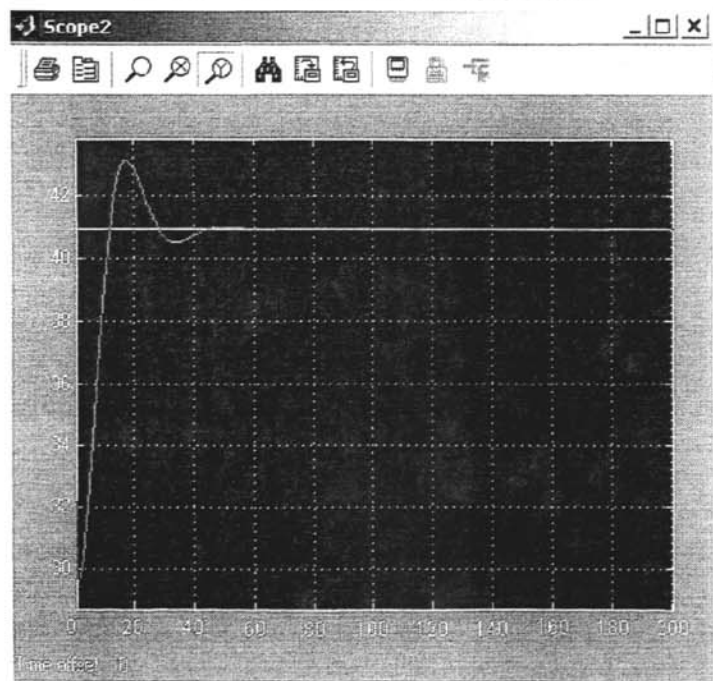


图 5-3  $V_0=40.931\text{kn}$  时的仿真结果

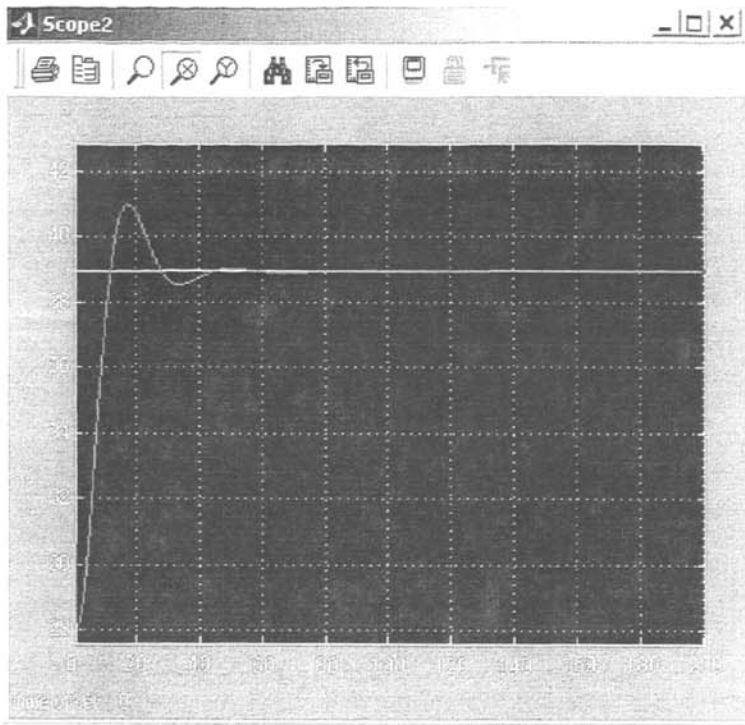


图 5-4  $V_o=38.931\text{kn}$  时的仿真结果

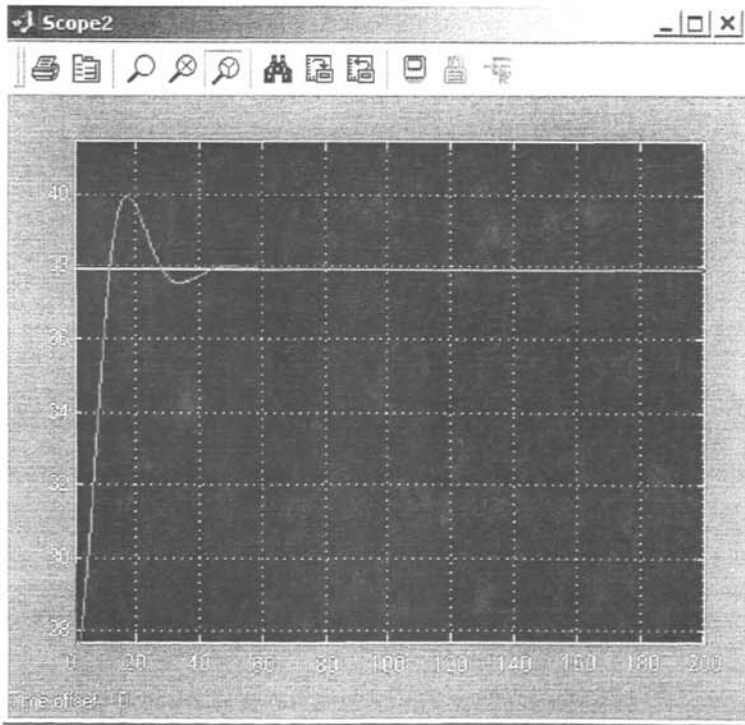


图 5-5  $V_o=37.931\text{kn}$  时的仿真结果

由图 5-1、5-2、5-3、5-4、5-5 中可以看出,随着目标航速  $V_0$  与仿真起始速度  $V_0$  的靠近,目标函数值越来越小。速度的超调量也依次减小,控制的效果也越来越好。这说明该某型舰的优化结果适应性较好,所进行的优化是合理的。

## 5.2.2 动态仿真结果

本文采用一个正弦波信号和一个白噪声信号叠加的方式来模拟外界风浪的干扰,某型舰在仿真的过程中根据不同的干扰信号实时地改变航速,仿真结果如图 5-6、5-7 所示。两图中,干扰信号相同,某型舰的初始航速为 38 节,仿真时间为 1000s;在前 300s 时,海况良好,推进器垂向运动为零,给出一个加速到 40 节的指令,某型舰按照给出的目标航速进行调节,然后稳定航行;当航行到 300s 时,遇到一个小风浪的干扰,给出一个减速到 39 节的指令,某型舰按照给出的目标航速进行调节,然后基本稳定在目标航速的状态下航行;当达到 600s 时,海况进一步恶化,风浪加剧,这时船舶必须继续减速航行,给出一个减速到 38 节的指令,船舶此时基本稳定在给定的目标航速下航行。

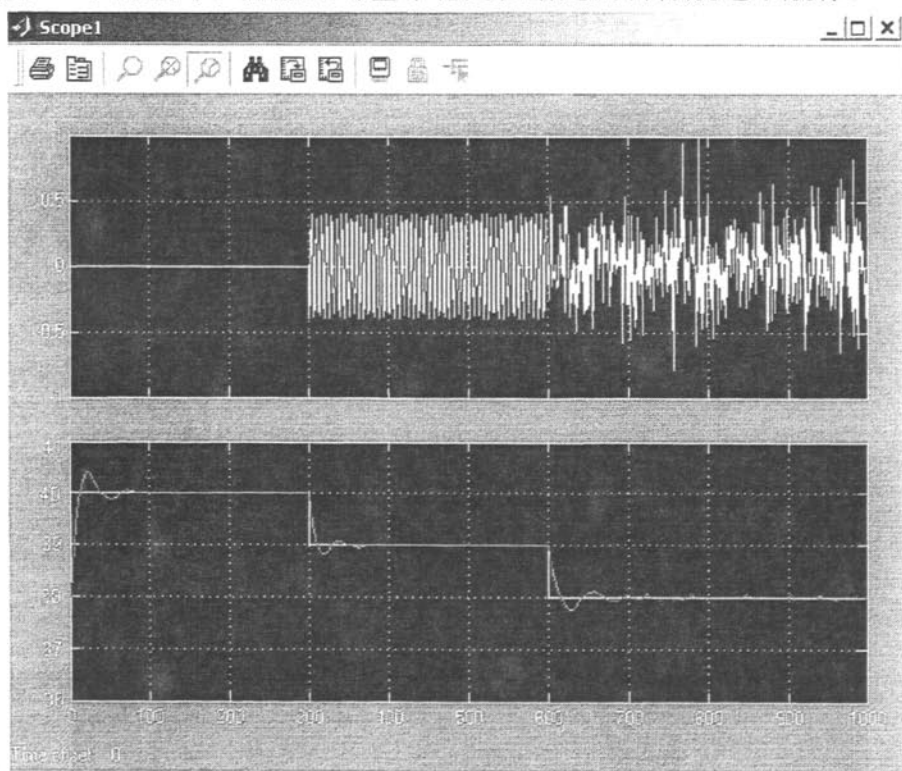


图 5-6 传统 PID 控制的仿真结果

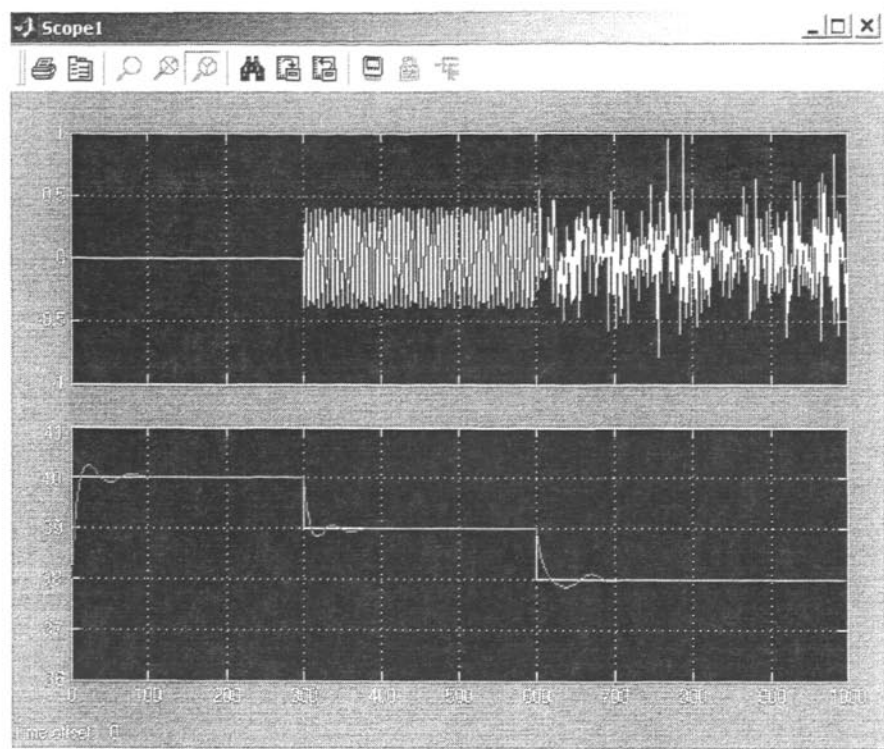


图 5-7 模糊 PID 控制的仿真结果

比较图 5-6、图 5-7 中的航行曲线，可以发现：无论是在超调量方面，还是整个航行状态的稳定性方面，模糊 PID 控制效果要优于传统 PID 控制的效果，在前 300s 无风浪干扰的情况下，模糊 PID 控制的超调量比传统 PID 控制的超调量要小一些，但稳定时间要长一些；而在 300s 后有风浪干扰的情况下时，船舶减速航行，模糊 PID 控制的超调量比传统 PID 控制的超调量更小，稳定时间差不多，而且，在稳定后的控制曲线要较传统 PID 控制的控制曲线要平滑得多。因此，在整个航行期间，模糊 PID 控制的效果要远远优于传统 PID 控制的效果，稳定性更好。

### 5.3 两种控制方式的分析比较

系统控制过程中，螺距角的调节范围为 $-30^{\circ} \rightarrow +30^{\circ}$ （角度为正表示正车控制，角度为负表示倒车控制），对应的螺距调节值为 $-15\% \rightarrow +15\%$ 。传统 PID 控制的螺距调节超调量为 30%，调节时间为 88s，而模糊 PID 控制的螺距调节超调量为 7.6%，调节时间为 125s。



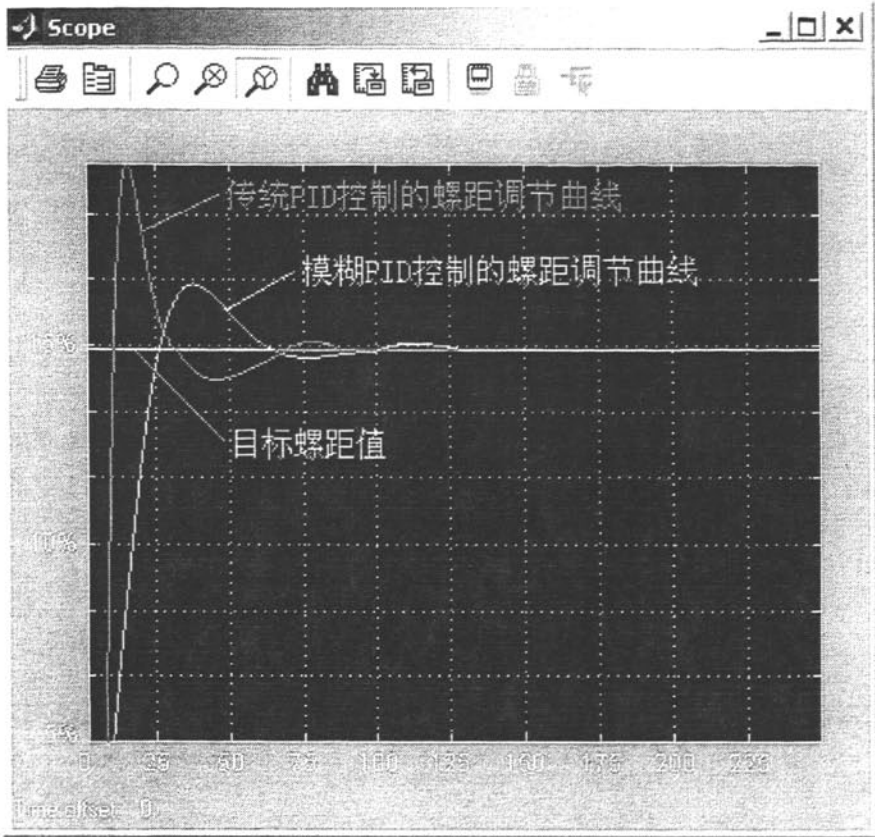


图 5-6 螺距调节轨迹

从以上仿真结果和仿真图形可知，传统 PID 控制的螺距调节曲线的响应速度快，达到稳定的时间短，但超调量大；模糊 PID 控制的螺距调节曲线的超调量要小一些，误差小，过渡稳定，但调节时间长。这是由于传统的 PID 控制可以在短时间内实现目标值，抗干扰能力强，但其控制量的变化大，有时甚至超出了实际中所能达到的范围；而模糊控制虽然进入稳定的时间较长，抗干扰能力稍弱，但过渡稳定，超调量小，控制量的变化比较合理。因此，把两种控制方式结合起来使用，达到比较理想的控制效果，这种控制方式是可行的。

仿真结果表明，模糊 PID 控制器可以很方便地通过调节螺距来改变桨叶的角度，实现主机负荷的增大或减小，从而改善高速船舶在不同工况下的主机推进效率和船舶操纵性能，实现船-机-桨的最佳匹配，延长了主机寿命，降低了营运成本。

## 5.4 本章小结

本章以 1000t 某型舰为例，采用遗传算法对控制目标进行优化，得到优化的转速 PID 和螺距 PID 控制参数，并使用模糊控制器对船舶推进系统进行航速调节，而且模拟了有风浪干扰情况下航速的调节曲线。仿真结果表明，模糊 PID 控制的螺距调节超调量比传统 PID 控制的螺距调节超调量要小一些，虽然达到稳定的时间要长一些，但过度稳定，整个航行期间的稳定性更好，控制效果更佳。模糊 PID 控制器可以很方便地通过调节螺距来改变桨叶的角度，实现主机负荷的增大或减小，从而改善高速船舶在不同工况下的主机推进效率和船舶操纵性能，实现船-机-桨的最佳匹配，延长了主机寿命，降低了营运成本。

## 第 6 章 结论与展望

本文在对多种智能方法以及高速船推进系统做了深入研究和分析的基础上，在船舶智能化、自动化程度还不高的现实条件下，将智能控制优化方法应用到高速船智能推进系统的优化中，并进行了一些有益的尝试，比如将模糊控制器或 PID 控制器的控制参数作为优化设计当中的优化变量，并将优化的结果进行实时的配置等等。编制了一套完整的高速船智能推进系统的仿真、控制和优化程序，算例表明各优化结果的可靠性和稳定性都较好。

本文的主要工作如下：

1. 建立了高速船（某型舰）可调桨推进系统的图形仿真模型；
2. 建立了高速船可调桨推进系统的优化控制目标模型；
3. 在 MATLAB/SIMULINK 平台上编制了高速船可调桨推进系统的模糊控制算法；
4. 在 MATLAB6.5 平台上编制了高速船可调桨推进系统的控制目标的遗传算法；
5. 使用模糊 PID 控制和传统的 PID 控制对某型舰进行仿真研究，并将仿真结果进行了分析比较。

通过本课题的研究，作者得出了以下结论：

1. SIMULINK 仿真中采用 S 函数可以大大加快仿真速度，采用 MEMORY 模块可以解决代数环问题；
2. 以各分目标函数乘积作为总目标函数的形式要比加权求和的形式简便，而且省去了确定各加权系数的麻烦；
3. PID 控制可以在短时间内实现目标值，抗干扰能力强，但控制量变化太大，有时甚至超出了实际中所能达到的范围；模糊控制虽然进入稳定的时间较长，抗干扰能力稍弱，但过渡稳定，超调量小，控制量的变化比较合理。把两种控制方式结合起来使用，可以达到比较理想的效果。

总之，各种智能控制和优化方法都有利有弊，将各种智能方法结合起来，取长补短，往往可以收到较好的效果。将优化结果调用到仿真模块的过程中，通过简单的点击相应的 SCOPE 模块就可以查看船舶推进系统各参数的变化情况。通过分析这些仿真数据，船舶推进系统设计工作者可以对所设计的系统将表现出的各项性能事先有一个透彻的了解，从而采取相应措施来减少或消除不必要的返工，为实际的设计打下一定的基础。

虽然本文在这些方面做了一定的工作，同时也取得了一定的成绩，但是智能控制技术和优化技术的发展日新月异，而如何将各种智能控制及优化技术有效应用于复杂的推进系统之中，为我们提出了新的课题，这些课题为今后的工作指明了方向：

1. 各种智能控制技术之间的结合（比如遗传算法、神经网络算法和模糊控制相结合）有望达到更好的控制效果；
2. 各种优化方法的结合（比如遗传算法、混沌算法、模拟退火算法、自适应算法、模糊算法之间的结合）有望达到更好的优化效果；
3. 进一步探讨多目标函数优化时总目标函数为乘积形式与加权求和形式的优缺点及适用范围；
4. 由于优化程序调用了仿真模块，所以运行优化程序的时间过长。进一步探讨仿真模块中的代数环问题，减小代数环加快仿真速度，从而提高整体的优化速度，缩短优化时间。

## 参考文献

- [1] 郑曦. 高性能船舶的特点及其发展现状. 引进与咨询,2001 (4)
- [2] 张亚萍(译). 澳大利亚的军用高速艇. 国外舰船工程,2002 (3)
- [3] 汤海南. 高速船种类特性及有关问题. 广州航海高等专科学校学报,2000 (6)
- [4] 邵世明,王云才. 高速艇动力学. 上海:上海交通大学出版社,1985
- [5] 包丛喜,裘泳铭,钟杨洪. 复合型高速船阻力性能的改善措施研究. 船舶工程,2001 (6)
- [6] 朱树文,陆志强. 船机桨工况与配合. 上海:上海交通大学出版社,1990
- [7] 建祥. 提高调距桨及其控制系统的性能. 航海科技动态,1999(10)
- [8] 陆志强. 机桨设计工况的最优选择. 船舶工程,1991.4
- [9] 詹志刚,喻英. 船舶主推进系统机桨匹配设计工况的优化选择. 江苏船舶,2000(5)
- [10] 朱树文. 船舶动力装置原理与设计. 上海:上海交通大学出版社, 1985
- [11] 高鄂,任文江. 船舶动力装置设计. 上海:上海交通大学出版社,1991
- [12] 翁史烈. 船舶动力装置仿真技术. 上海:上海交通大学出版社,1990
- [13] 张志涌. 精通 MATLAB6.5 版 北京:北京航空航天大学出版社,2003.3
- [14] 姚俊,马松辉. SIMULINK 建模与仿真. 西安:西安电子科技大学出版社,2002
- [15] 张振海,张仁兴,曾喜. 推进装置面向对象实时仿真研究. 计算机仿真,2004 (6)
- [16] 任俊生,杨盐生. 静水中高速水翼双体船运动建模和仿真. 大连海事大学学报,2002 (5)
- [17] 陆金铭. 船舶动力装置设计. 北京:国防工业出版社, 2006
- [18] 陆金铭. 船舶推进装置的 MATLAB 仿真. 船舶工程,2002 (5)
- [19] 盛振邦,刘应中. 船舶原理(下). 上海:上海交通大学出版社,2004
- [20] 王国强,盛振邦. 船舶推进. 上海:上海交通大学出版社,1993
- [21] 吴爽. 船舶可调桨推进装置及其控制系统的建模与仿真研究. 大连海事大学硕士论文,2006.3
- [22] 张丽敏. 常规螺旋桨计算机辅助设计. [硕士学位论文]. 武汉:华中科技大学, 2004
- [23] 邵世明,赵连恩,朱念昌. 船舶阻力. 北京:国防工业出版社,1995
- [24] 戴捷,王建国,张洪雨,李积德. 组合附体对穿浪船阻力性能影响. 哈尔滨工程大学学报, 2001 (8)
- [25] SV. AA.哈瓦尔特著,黄鼎良,张忠业,王言英译. 船舶阻力与推进. 大连:大连理工大学出版社,1989

- [26] 许维达. 柴油机动力装置匹配. 北京:机械工业出版社,2005
- [27] 杜荣铭. 船舶柴油机. 大连:大连海事大学出版社,2001
- [28] 刘永长. 内燃机工作过程数值计算. 武汉:华中理工大学出版社,1996
- [29] 王长林,刘永文等. 四冲程船用柴油机的建模和实时仿真. 中国造船,1997(4)
- [30] 朱建元,顾卓明,顾正熙. 轮机模拟器柴油主机动态过程实时仿真. 船舶工程,1998(3)
- [31] 朱辉,王丽清等. 用 MATLAB/SIMULINK 实现柴油机及其控制系统的动态仿真. 内燃机学报,1998(3)
- [32] 董亮,杨松林. 水翼艇可调桨推进智能控制仿真研究. 船舶机电设备,2006.4
- [33] 郭晨,邓振强,牛宝来. 微型计算机可调桨控制系统及其实时混合仿真. 大连海运学院学报,1986.2
- [34] 高键,姜长生. 可调桨的舰船航速智能控制技术研究. 南京航空航天大学学报,2003.4
- [35] 尚婕,陈红卫. 可调桨机-桨联合控制系统建模与仿真. 江苏船舶,2002(3)
- [36] 闫仁武,虞平良. 可变螺距螺旋桨的一种机桨联合优化控制方法. 华东船舶工业学院学报,1997(6)
- [37] 杨松林,周玉龙,季加文. 翼滑艇可调桨智能推进系统最佳控制参数组合综合优化计算方法研究. 船舶力学,2005.4
- [38] 郭庆祝,姜德金,尹忠厚. 基于模糊智能控制的船用可调螺距桨系统仿真研究. 造船技术,2006(2)
- [39] 易继锴,侯媛彬. 智能控制技术. 北京:北京工业大学出版社,1999
- [40] 章卫国,杨向忠. 模糊控制理论与应用. 西北工业大学出版社,1999
- [41] 杨松林. 工程模糊论方法及其应用 北京:国防工业出版社,1996
- [42] 闻新,周磊,李东江,贝超. MATLAB 模糊逻辑工具箱的分析与应用, 北京科技出版社, 2001
- [43] 胡国亮,陈永康. 用 MATLAB 进行模糊控制器的设计和仿真. 基础自动化,2000(2)
- [44] 侯北平,卢佩. MATLAB 下模糊控制器的设计与应用. 测控技术,2001(10)
- [45] 刘清等. 船舶航向模糊控制及其仿真研究. 武汉造船,2000(1)
- [46] 谢成祥,曾庆军,周耀庭. 舰船航速模糊控制器设计与仿真. 华东船舶工业学院学报, 1999(6)
- [47] 吴东兴,李众,李彦. 可调螺距螺旋桨船舶航速模糊控制系统. 华东船舶工业学院学报, 2000.6
- [48] Ming-Chung Fang, Shan-Chin Chiou. A Hydrodynamic model for simulating SWATH ship motions with fuzzy control. Int.Shipbuild.Prog2001(4)

- [49] H Ying A nonlinear fuzzy controller with linear control rules. *Automatica*, 29(2)1993
- [50] Athans M. The Stochastic Control of the F-8C Aircraft Using a Multiple Adaptive Control (MMAC) Method-Part1:Equi-Librium Flight[J].*IEEE Trans. Automatic control*,1977,22(5)
- [51] Roberts. G. N. A Fuzzy Controller for Integrated Ship Motion Control [R]. *Proceeding of the 14th World Congress of IFAC*,1999
- [52] 覃峰等. 基于遗传算法的船舶推进系统船机桨匹配优化设计. *武汉理工大学学报*, 2003.2
- [53] 杨湘龙,王飞,冯允成. 仿真优化理论与方法综述. *计算机仿真*,2000 (9)
- [54] 李敏强,纪淞,林丹,李书全. 遗传算法的基本理论与应用. 北京:科学出版社,2002
- [55] 王小平,曹立明.遗传算法—理论、应用与软件实现. 西安:西安交通大学出版社.2002
- [56] 张彤,张华,王子才. 浮点数编码的遗传算法及其应用. *哈尔滨工业大学学报*,2000 (8)
- [57] 郭强,赵晓华,孙亮. MATLAB 遗传算法工具箱的设计. *北京工业大学学报*,2001(9)
- [58] 柳存根等. 遗传算法在船舶初步设计中的应用. *上海交通大学学报*,2000 (1)
- [59] 车晓轮,徐岩. 遗传算法在控制器参数自整定中的应用研究. *吉林工业学院学报*,1997(14).
- [60] 蒋中. 遗传算法在PID参数优化中的应用. *安徽建筑工业学院学报*,2002 (8)
- [61] 高尚. 基于 MATLAB 遗传算法优化工具箱的优化计算. *微型电脑应用*,2002(8)
- [62] G. J. Koehler. New directions in genetic algorithm theory [J], *Annals of Operations Research* 75,1997.4
- [63] C. R. Houck, J. Joines, M. Kay. A genetic algorithm for function optimization: A Matalab implementation. *ACM Transactions on Mathematical Software*,1996
- [64] K. Krishnakumar,D. E. Goldberg, Control System Optimization Using Genetic Algorithms. *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 15, No. 3, 1992
- [65] Trebi A, White B A. Multiobjective fuzzy genetical gorithm optimization approach to nonlinear control system design [J]. *IEEP roc. Control Theory. Appl*,1997,144(2)
- [66] A. J. Chipperfield,P. J. Fleming,C. M. Fonseca. Genetic Algorithm Tools for Control Systems Engineering. *Proc. Adaptive Computing in Engineering Design and Control*, Plymouth Engineering Design Centre, 21-22September, 1994
- [67] GOLDBERG D E.Genetic algorithms in search, ptimization and machine learning [M]. Addison-Wesley. Reading. MA. 1989
- [68] L Davis. Handbook of Genetic Algorithms [M]. Nostrand Reinhold, 1991

- [69] Neocleous, Constantinos C, Schizas Christos N. Artificial neural networks in marine propeller design. IEEE International Conference on Neural Networks-Conference Proceedings2, Western Australia, 1995
- [70] HACHMANN D. Calculation of pressures on a ship's hull in waves[J]. Ship Technology Research 1991,38



## 致 谢

本论文自始至终都是在导师陈辉教授的精心指导下完成的。近三年来，导师在学习和生活上给予了我悉心的关怀和照顾，从课题开题、调研、论证到论文修改、定稿、完工，都得到了导师细心而富有启发性的指点。导师精深的学术造诣、严谨的治学态度、灵活开放的思路、平易近人的作风都深深教育和感染了我，让我受益匪浅，终生难忘！陈老师不但是我知识的播种者，更是我人生的引路人，在此谨向我无比尊敬的导师致以深深的谢意！

值得一提的是，孙俊副教授、李德智工程师在我的课题和论文阶段给予了我许多实质性的帮助，而且教会了我许多人生的道理，在此一并表示作者深切的感谢！

感谢我的女友、同学、朋友和师弟师妹们，他们在学习和生活中给予了我无私的帮助。

读研期间有幸遇上了这些良师和益友，我的每一点成绩和进步都离不开他们的指导和帮助。

感谢我的家人在我研究生阶段给予我物质和精神上的帮助！他们的支持和鼓励为我指明了方向，是我前进的动力，深深谢谢他们！

感谢参加本论文审稿和答辩的专家教授们！衷心谢谢你们在百忙之中审阅本论文和参加本论文的答辩，并恳请你们多提宝贵意见，我将悉心采纳。

最后，谨以此文献给所有关心、爱护和帮助我的人！

## 攻读硕士学位期间发表的学术论文

- 王海刚, 陈辉. 船用可调桨推进系统优化控制研究. 《船海工程》2008 年第 2 期.
- 王海刚, 孙俊, 郭卫勇. 基于 Multigen Creator 和 Vega 的道路交通仿真. 《交通与计算机》2007 年第 3 期.
- 郭卫勇, 孙俊, 王海刚. 船舶冷却水系统建模及可视化的实现. 《中国水运》2007. 11.