

学校编码: 10384

分类号 _____ 密级 _____

学号: 23220111153234

UDC _____

廈門大學

碩 士 學 位 論 文

船舶航向控制系统规范化交互式
设计平台

Standardized Interactive Design Platform of
Ship Course Motion Control System

廖 炜

指导教师姓名: 曾 建 平 教授

专 业 名 称: 控制理论与控制工程

论文提交日期: 2 0 1 4 年 4 月

论文答辩时间: 2 0 1 4 年 月

学位授予日期: 2 0 1 4 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2014年5月

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

船舶运动控制问题是控制领域的研究热点,从事该项研究的专家学者日趋增多。但是由于船舶运动模型的复杂性,研究人员不得不花费大量时间在船舶建模、仿真等重复性工作上。这严重影响了研究进度和效率。本文结合计算机仿真技术,开发了航向控制系统规范化交互式设计平台。本文设计的平台是基于 Matlab GUI 技术开发的,具有交互性强,操作简单易学的特点,可以帮助研究人员快速设计控制器,提高研发速度。平台主要包括建模、控制器设计、可视化仿真等功能,具体内容如下:

(1)开发了船舶航向控制系统规范化交互平台,集成了建模、算法智能设计及可视化仿真功能,规范了仿真流程,提高了研究人员的设计效率。

(2)建立了船舶航向运动数学模型和环境干扰模型。本文以美国学者阿布科维奇提出的状态空间型船舶运动数学模型为基础,分析了船舶流体力和风、浪、流等环境扰动对模型的影响,并综合考虑了船舶运动学方程和动力学方程,建立了船舶平面运动的非线性数学模型。

(3)实现了航向系统运动仿真和结果的可视化,通过波形图、柱状图、表格等多种形式帮助研究人员直观地了解船舶运动特性。

(4)集成了 PID、LQG、QFT 和模糊算法等经典控制器设计算法,并开放了控制算法接口,研究人员可以自行编写、试验控制算法。

(5)研究了船舶航向运动控制。目前船舶航向运动控制器设计主要采用 PID 算法,其控制效果依赖于 PID 参数的选取,由于船舶运动较为复杂, PID 参数整定需要耗费大量时间和人力成本,控制效果也不能令人满意。本文引入模糊 PID 算法、QFT 算法和 LQG 算法设计控制器。仿真结果表明,模糊 PID 控制器、QFT 控制器和 LQG 控制器能够显著提高船舶运动的控制精度,有较好的自适应能力和鲁棒性。

关键字: 船舶航向控制; 仿真平台; 交互式设计; 可视化显示

ABSTRACT

The ship maneuvering and control has been a hot area of research. And more and more experts and scholars have worked hard on it. The mathematical model for ship motion is usually very complex. As a result, users spend much time on investigate the mathematical model for ship motion and simulation. It has seriously influenced research efficiency. This work develops a computer aided design system for ship course motion by computer simulation technology. This system, which has good interactive ability and simple operation, is designed by Matlab GUI.

The aided design system contains those functions: model building, display, control design and so on. The work in this thesis includes four parts, as follows.

Firstly, this work develops a standardized interactive design platform of ship course motion control system. It integrates model building, control algorithm and visual simulation and standardizes simulation process, which increases the efficiency of research.

Secondly, we construct a mathematical model for ship course motion and environment disturbance based on Abkowitz model. This nonlinear model has integrated the kinematical equation, dynamical equation, hydrodynamic force and environmental perturbations together.

Thirdly, this system realizes the visualization of the ship course motion simulation process and results, which can help researchers learn ship motion intuitively by oscillogram, histogram, table, etc.

Fourthly, this system contains many classical control algorithms. Researchers also can write and test their algorithm by the interface of the control algorithm.

The last part studies ship course motion control. At present, most ship control systems use PID to regulate the motion of the ship. It is well known that the performance of PID control depends heavily on the parameters. However, due to the

complexity of ship motion, PID parameters setting is not only time-consuming and labor-intensive, but also incapable of satisfying control performance. So we introduce fuzzy-PID, QFT and LQG algorithm to design controller. Simulation results show that fuzzy-PID, QFT and LQG controller can improve the control performance with the ability of adaptivity and robustness.

Keywords : ship course motion control; simulation platform; interactive design; visualized display

厦门大学博硕士论文摘要库

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 论文研究的背景与意义.....	1
1.2 国内外发展及现状.....	3
1.2.1 船舶运动数学模型发展及现状.....	3
1.2.2 船舶运动控制算法发展及现状.....	4
1.2.3 计算机辅助设计技术在船舶领域的应用及发展现状.....	5
1.3 本文研究的主要内容.....	6
第二章 船舶航向运动数学模型.....	8
2.1 船舶运动基础理论.....	8
2.2 船舶航向控制系统数学模型.....	9
2.2.1 船舶平面运动线性数学模型 ^[25]	9
2.2.2 船舶平面运动非线性数学模型.....	12
2.3 船舶运动受扰模型.....	13
2.3.1 浪力干扰.....	13
2.3.2 风力干扰.....	14
2.3.3 流干扰.....	14
2.4 本章小节.....	15
第三章 航向控制系统规范化交互式设计平台.....	16
3.1 平台概述.....	16
3.2 平台设计.....	16
3.2.1 需求分析.....	16
3.2.2 概念模型.....	17
3.2.3 设计思路.....	18
3.3 开发工具及关键技术.....	19
3.3.1 基于 MATLAB GUI 技术的交互式界面设计.....	19

3.3.2 业务逻辑与用户界面分离架构.....	19
3.4 软件实现.....	20
3.4.1 软件架构及流程.....	20
3.4.2 模块设计.....	22
3.4.3 数据存储及共享模式.....	25
3.5 界面设计.....	30
3.5.1 主界面.....	31
3.5.2 模型设置界面.....	33
3.5.3 数据管理界面.....	33
3.6 本章小节.....	34
第四章 系统设计仿真.....	35
4.1 船舶航向控制问题.....	35
4.2 船舶航向控制性能指标.....	36
4.3 船舶航向 PID 控制算法设计及仿真.....	36
4.3.1 基于 Z-N 参数整定法的 PID 控制算法.....	36
4.3.2 模糊 PID 控制算法.....	37
4.4 船舶航向 LQG 控制算法设计及仿真.....	42
4.5 船舶航向 QFT 控制算法设计及仿真.....	43
4.6 本章小节.....	47
第五章 结论与展望.....	48
参考文献.....	50
攻读硕士学位期间发表的论文和科研成果.....	53
致谢.....	54
附录.....	55

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Research background and signification of the thesis	1
1.2 Research status at home and abroad	3
1.2.1 Research status for ship motion modeling	3
1.2.2 Research status for ship motion control algorithm	4
1.2.3 Research status for computer aided design of ship	5
1.3 Main research contents	6
Chapter 2 Ship course motion model	8
2.1 Ship motion theory	8
2.2 Ship course control system	9
2.2.1 Ship planar motion linear model	9
2.2.2 Ship planar motion nonlinear model	12
2.3 Interference model of ship motion	13
2.3.1 Wave disturbance model	13
2.3.2 Wind disturbance model	14
2.3.3 Current disturbance model	14
2.4 Summary of this chapter	15
Chapter 3 Ship course motion system interactive design platform	16
3.1 Platform overview	16
3.2 Platform design	16
3.2.1 Requirements analysis	16
3.2.2 Conceptual model	17
3.2.3 Design plan	18
3.3 Developing tool and key technology	19
3.3.1 Interactive graphic interface base on Matlab GUI	19

3.3.2 Separate framework between business logic and user interface	19
3.4 Software implementation	20
3.4.1 Software framework.....	20
3.4.2 Module design.....	22
3.4.3 Data storage and sharing model.....	25
3.5 Interfacial design.....	30
3.5.1 Main interface	31
3.5.2 Model settings interface.....	33
3.5.3 Database management interface	33
3.6 Summary of this chapter	34
Chapter 4 Simulation of design platform.....	35
4.1 Ship course control problem	35
4.2 Design and simulation of ship course PID control	36
4.3 Design and simulation of ship course PID control	36
4.3.1 PID control designed by Z-N.....	36
4.3.2 Fuzzy PID control.....	37
4.4 Design and simulation of ship course LQG control.....	42
4.5 Design and simulation of ship course QFT control	43
4.6 Summary of this chapter	47
Chapter 5 Conclusions and Prospect.....	48
References	50
Published Papers during the Master Degree Period.....	53
Acknowledgements.....	54
Appendix.....	55

第一章 绪论

1.1 论文研究的背景与意义

随着现代海洋资源开发和物流业的发展,航运自动化水平的不断提高,对船舶操纵和控制提出了更高的要求。由于船舶动力驱动结构的非完整约束和欠驱动特性,以及航行条件复杂多变、船舶流体动力学参数不确定性和航行环境干扰等因素的影响,船舶运动呈现出长时滞、大惯性、强耦合和非线性的特点。这给高可靠性和高性能船舶操控系统设计带来了挑战。从原理上来看,有效解决船舶系统操控问题,非线性控制设计技术是根本的。然而,非线性分析与综合理论研究还远不成熟,现有研究成果基本上是在充分简化的基础上得到的,其理论和实现均十分复杂,故实际应用很少。

为避免非线性、时滞和不确定性等因素带来的系统分析与设计困难,目前船舶运动系统设计仍较多采用线性化数学模型,以经典控制论方法设计为主。并辅以数字仿真、模拟实验手段,通过设计、调试、再设计的多次反复,最终确定出满足性能指标要求的船舶操纵系统。因而船舶操纵系统设计是一个反复“迭代”的过程,这就增加了产品的研发周期,造成了人力和物力资源的浪费。此外,对于不同的船舶模型,在船舶系统建模、操纵系统设计和船舶系统性能评估等过程中,设计人员常需采用若干相同的典型方法。该过程存在大量重复性工作,耗费了研究人员大量宝贵时间。因此,借助现代计算机技术发展的成果,研发船舶操纵系统交互式规范设计平台,这对加快船舶操纵系统设计过程,提高船舶系统性能是一件必要且有意义的工作。

自上世纪八十年代以来,计算机技术被广泛的应用于控制系统分析与设计,取得了大量成果。MATLAB、SLICOT等辅助软件目前已经成为相当普及的控制系统辅助分析与综合工具,有效地提高了科学研究和工程应用中控制系统分析、设计和仿真等的效率。在船舶设计领域,计算机辅助设计技术已有许多应用,国内外开发了涉及船舶设计各阶段的辅助设计工具,取得了良好的经济和社会效

益。

然而，以 MATLAB 仿真技术为代表传统计算机仿真技术和辅助设计技术也有不足之处。在仿真过程中，研究人员需要完成三个步骤：船舶运动数学模型、环境干扰模型的建立，算法设计和实验结果解读。研究人员必须保证每一步的准确性，尤其是系统建模。模型一旦错误，实验结果也将变得没有意义。建立模型步骤至关重要，也耗费着研究人员大量精力。而在第三步实验结果的分析解读过程中，研究人员又需要对实验数据、波形曲线和表格数据进行细致比对、分析，人工给出实验结果和结论。每次仿真都要依次重复以上步骤，使得实验仿真过程繁杂而耗时。

而且对于基于计算机仿真技术的船舶航向控制系统，国内还未见相关报道，美国学者研发的 MoSART (Interactive Modeling, Simulation, Animation and Real-Time Control)系统，未见到进一步产品化报道，且其控制设计方法较单一，不适合我国船舶操纵系统设计的需求。

此外，国内外学者在建模、控制器设计等方面存在差异，其算法控制效果无法在同一平台进行比较。

因此，研究基于计算机仿真技术的航向控制系统规范化交互式设计平台是一项很有意义的工作，其意义主要体现在以下几个方面：

(1)集成模型算法，简化仿真步骤，提高研究人员工作效率

该平台集成船舶操纵系统设计过程中的系统建模、性能评价、典型控制设计方法和仿真等功能，大大减少了研究人员的重复性工作，可以让他们更加专注于算法的研究。

(2)模块化和可视化设计，帮助研究人员迅速掌握系统特性

模块化设计和可视化设计理念，确保研究人员能够快速设定、修改船舶运动模型、性能指标和控制器参数等。这种设计机制使得航向运动控制系统的控制器设计过程更加灵活、快捷，并且能够满足各类船舶航向运动的设计要求。

(3)建立统一规范的设计步骤和数据保存机制，有利于研究人员保存、比对结果，交流经验

本文建立了一套集成模型建立、算法设计、系统仿真的统一平台，使得所有

设计流程均可按照规范化的设计标准进行，保证了设计过程的一致性，有利于对比结果。同时，该平台自带的数据库管理功能可以保存诸多历史数据，方便日后实验数据的管理和保存。

1.2 国内外发展及现状

1.2.1 船舶运动数学模型发展及现状

20 世纪 30 年代，国外学者开始研究船舶运动的数学模型。1946 年美国学者戴维森和许夫提出了首个船舶运动方程^[1]，奠定了船舶数学模型的基础。自此以后，船舶运动数学建模迅速发展，主要分为两个方向：响应型模型和状态空间型模型。

响应型模型将船舶看出动态系统，各项参数直接从实船试验获得，然后运用经典控制论进行分析，其研究者以日本学者野本谦作和为代表^[2]。

状态空间型模型目前主要有两个学派：欧美学派和日本学派。

欧美学派采用的是整体型模型结构^[3]。该学派以美国麻省理工学院阿布科维茨教授为代表。欧美学派在处理船舶模型时将船体、螺旋桨、船舵看成一个不可分割的整体，把作用于船体上的流动力展开为各运动变量的泰勒级数，通过船模实验获取流体动力导数。这种整体化的建模方法与线性化数学模型的处理方法相似，因为流体动力导数取得多，因此模型比较完整严密，精度较高。但这种建模方法的缺陷也是明显的：部分高阶流体动力导数物理意义不明显；流体动力导数结果不通用，很难将一艘船的试验数据运用到其他船舶；船模试验耗费巨大，需要建立庞大的试验设备，不适合试验条件和经费不足的研究人员；不能很好的说明船模和实船之间的关系。

日本学派采用的是分离型模型结构(MMG)。该学派以日本学者小川、井上、平野等人为代表^[4-7]。该学派认为船舶运动模型应该按照以下原则建立：(1) 应该以船体、螺旋桨、船舵的单独性能为基础(2)应能简洁地表示船体、螺旋桨、船舵的干涉效应(3)能合理地表达作用于船舶上的各种流体动力。根据 MMG 构建的船舶模型，具有以下特点：(1)各项流体动力导数有明确的物理意义(2)有利于通过实

验求得数学模型中的各项系数(3)有利于处理模型与实船的相关问题(4)既能用于常规船舶运动模拟,也能运用于更大范围更加复杂环境下的船舶运动。

1.2.2 船舶运动控制算法发展及现状

安全性好经济性高的船舶操纵控制研究,一直是船舶运动控制领域的热点问题之一。PID 控制是最早应用于船舶控制领域的算法。随着控制理论的发展,自适应算法、最优控制、神经网络、遗传算法等控制算法在船舶运动控制领域的运用也日渐成熟。在研究人员的不断努力和探索下,船舶控制正在向智能化的方向发展。现有船舶运动控制技术中,应用较多的有 PID 控制、最优控制和定量反馈理论(Quantitative Feedback Theory, QFT)。

(1) PID 控制

在自动控制的发展历程中, PID 控制是历史最悠久的算法,其具有控制简单可靠,使用方便,物理意义明确的特点。目前 PID 控制已经被广泛地应用于各类工程项目。二十世纪二十年代, PID 控制器开始运用于船舶控制领域。德国的 Aushutz 公司^[8]和美国的斯佩里公司^[9]研制出机械式自动舵,也称为第一代自动舵。这种舵采用的是最简单的比例控制规律。由于比例控制震荡过大,只能选择较低的增益,因此第一代自动舵只适用于精度较低的船舶航向控制。二十世纪五十年代,随着控制理论和伺服机构理论的发展,出现了采用比例微分积分控制规律的 PID 舵。PID 舵的输入包括航向偏差,航向偏差的积分项和导数项。引入积分项有利于消除系统稳态误差。引入导数项可以缩短调节时间,改善船舶操纵的动态性能。只要能选取合适的 PID 控制器参数 K_P 、 K_I 、 K_d , 系统就能获得较好的控制效果。虽然第二代的 PID 舵比机械舵有了很大的改进,但其仍然有着不足。常规 PID 控制依赖于数学模型,对环境变化的适应能力较差,因此时常出现操舵频率过高,幅度过大的问题。随着最近几十年智能算法的高速发展, PID 技术开始与自适应算法、神经网络、遗传算法、模糊数学等技术结合,形成了很多基于智能算法的 PID 船舶控制方法^[10-12]。

(2) 最优控制

最优控制是现代控制理论的基本组成部分,其主要研究的是使控制系统的性

能指标实现最优化的条件和综合方法^{[13][14]}。最优控制已被广泛地应用于控制领域，如最省燃料控制系统、线性调节器等。根据海况和性能指标的要求，最优控制可以设计出合适的控制器，实现控制系统对性能指标的调节^[15]。苏联学者萨哈罗夫于“船舶自动化系统最优调节器计算”一书，指出了最优控制在船舶运动控制方面的应用。

(3) 定量反馈理论

定量反馈理论是一种基于频域设计思路的鲁棒控制理论。十九世纪六十年代霍罗威茨在伯德的基础上，系统地引入了基于频域的控制设计算法，并于七十年代将其发展成定量反馈理论。定量反馈理论建立了对象不确定性，控制器参数和闭环回路性能之间的关系，适用于高度不确定性的单变量和多变量的线性/非线性系统控制器设计。定量反馈理论将控制理论中的频域校正器设计方法扩展应用到了不确定系统的鲁棒控制设计，是目前鲁棒控制领域中具有较强工程实用价值的一种设计方法^[16]。

由于海洋环境复杂多变时，船舶航行时其动态特性会随着风、浪、流等海况变化而变化，因而船舶运动模型不确定性明显。以常规 PID 算法为基础的自动舵控制策略难以处理复杂航行环境对船舶控制的不良影响。维奥雷尔·尼古劳等人于 2006 年提出了运用定量反馈理论解决船舶运动控制器设计的方法，将定量反馈理论引入船舶运动控制器的设计中，保证了闭环系统的鲁棒性能要求^[17]。

1.2.3 计算机辅助设计技术在船舶领域的应用及发展现状

计算机辅助设计技术是利用计算机及其它配套设备帮助研究人员完成部分或全部设计、计算工作的技术^[18]。在工业和学术研究上，计算机可以帮助研究人员完成高速计算、信息存储和海量数据分析等工作。在设计阶段，研究人员一般都会用计算机对不同设计方案进行大量的实验仿真、数据分析和详细的控制效果比对，以决定最优控制器设计方案。各种设计数据会以数字、文字或图表的形式存储在计算机里，并能通过特定的算法快速检索。计算机可以帮助研究人员完成大量重复性的或繁重的工作，提高研究人员的工作效率。随着控制理论的发展和计算机技术的日益成熟，计算机辅助设计技术在控制领域的应用越来越广泛，尤其

是交互式设计方面。

在船舶设计方面，基于计算机技术设计的系统具有计算速度快、操作简单易学的特点，能快速完成船舶动力学和船舶静力学的各种复杂的计算。自二十世纪七十年代以来，世界各国，尤其是欧美造船强国投入了大量的人力物力研究、开发船舶计算机辅助设计系统(CAD)和计算机辅助制造系统(CAM)。目前，各国在船舶设计、建造和生产管理的集成系统方面取得阶段性进展，技术已然成熟，初步实现了计算机辅助船舶设计与制造^[19]。

目前，国外较为成熟的交互式设计系统主要有^[20-22]：西班牙 SENER 集团开发的 FORAN 3D 造船软件，美国的 SPADES，瑞典 KCS 公司的 TRIBON 船舶设计制造软件，英国的 BRITSHIPS 设计系统，日本的 HICAS 和 SHIPS 系统等。我国在船舶计算机交互式设计系统的研究和开发起步较晚，目前较为成型的设计系统主要有：油船初步设计集成系统、多用途干货船初步设计集成系统和内河客船辅助设计系统等^[23]。

就国内外船舶计算机设计技术而言，船体建造系统、管系系统、电力系统、生产设计系统、完工交船计算系统等船舶设计系统较为多见，但目前尚未见到面向船舶运动控制器设计的计算机交互式设计系统。

1.3 本文研究的主要内容

本文主要研究船舶航向控制系统规范化交互式设计平台的开发和实现，具体内容如下：

第一章，绪论。介绍了论文的选题背景和意义，并对当前船舶航向控制系统交互式设计平台的发展现状作了总结，同时介绍了本文的主要工作，给出了文章的组织结构。

第二章，船舶航向运动数学模型。阐述了船舶运动的基本原理，介绍了本文选取的船舶航向运动数学模型及环境干扰模型。

第三章，航向控制系统规范化交互式设计平台。阐述了设计平台开发思路及过程，对平台各个功能模块进行了详细介绍，并提出了实现方案。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库