



高速水翼船运动控制

任俊生◎著

High-Speed Hydrofoil Ship Motion Control



科学出版社

高速水翼船运动控制

任俊生 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

水翼船是一种性能优良的高速船。然而水翼船在从体航模式转换到翼航模式的过程中,容易受到外界环境的干扰,从而适航性降低,因此水翼船需要专门的控制系统。本书较系统地阐述了水翼船的运动数学模型,以及在不良海况下的姿态控制问题,并特别介绍了基于模糊模型和线性矩阵不等式设计控制器等前沿研究的方法和结果。

本书可作为船舶与海洋工程等相关专业研究生和高年级本科生的学习参考书,对从事非线性控制系统研究和开发的专业人员也有很好的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

高速水翼船运动控制/任俊生著. —北京:科学出版社, 2015.6
ISBN 978-7-03-045132-3

I. ①高… II. ①任… III. ①水翼艇—速度控制器—研究
IV. ①U674.944.03

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第133697号

责任编辑:杨春波 张 震/责任校对:张小霞
责任印制:赵 博/封面设计:无极书装

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年7月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015年7月第一次印刷 印张:14

字数:284 000

定价:86.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书由

大连市人民政府资助出版

**The published book is sponsored
by the Dalian Municipal Government**

前言

随着水上运输的快速发展,高速船越来越受到市场的关注。水翼船属于高速船的重要船型之一。高速水翼船在从体航模式转换到翼航模式的过程中,船体吃水逐渐减少,使其容易受到外界环境如风、浪等的影响,这将使水翼船的适航性降低,因此水翼船需要专门的控制系统以减小波浪带来的船体摇荡。虽然已经有研究者利用经典控制理论设计水翼船控制器,但是如何应用近年来控制理论的新成果进行设计仍然是一个需要研究的课题,并且高速水翼船的控制器设计应满足在其整个工作域上有效的特殊要求。为此本书研究了高速水翼船的数学模型,在此基础上利用近年来的控制理论新成果设计水翼船的控制器,并设计模糊增益规划控制器以满足其特殊要求。

高速水翼船的数学模型不仅是研制其操纵模拟器的核心技术之一,也是设计控制器的重要依据和检验平台,因此本书从流体分析的角度研究高速水翼船垂荡和纵摇运动的数学模型,对模型中各个参数的计算方法,尤其是对水翼升力系数的计算,进行了较为详细的分析。高速水翼船具有在航行过程中船体姿态变化较大的特点,这将引起船体参数发生变化,因此本书研究拟合横剖面曲线的方法,在仿真过程中实时计算船型参数,并以高速水翼船 HC200B-A1 为例,利用 Matlab 软件的 Simulink 工具箱分别进行静水和波浪中的仿真研究。

为了设计水翼船的控制器以提高其适航性,首先利用比例-微分的方法设计水翼船的控制器,然而在同时对前、后襟翼进行控制时,传统的方法需要手工选择 8 个反馈系数。为此利用虚拟控制输入量的思想,把控制输入量分配在前、后襟翼,该方法仅需要手工调整 4 个系数。为了进一步提高水翼船控制器的性能,利用近年来控制理论的研究新成果设计水翼船的控制器。为此对水翼船的非线性运动数学模型在设计速度点处进行线性化,研究了水翼船的线性状态空间模型,并在此基础上设计水翼船状态反馈 H_∞ 控制器和输出反馈 H_∞ 控制器。考虑到水翼船系统的状态不能够全部直接测量以及存在外界波浪干扰,仅利用系统的输出信息设计水翼船输出反馈 H_∞ 算法控制器。除了时域水翼船控制器,还给出了一种水翼船控制器的频域设计方法,即高速水翼船闭环增益成形控制算法。

然而上面的设计仅能在水翼船设计速度点附近有效,为了满足控制器应在水翼

船的整个工作域都有效的特殊要求,发现利用 T-S 模糊模型并结合线性矩阵不等式优化算法设计水翼船的模糊增益规划控制器是一种很好的解决方法,为此对基于 T-S 模糊模型的控制器设计理论进行了如下的研究。①针对一类非线性系统的 H_∞ 控制问题,研究了 H_∞ 模糊控制器设计,该设计能够使闭环系统最终一致有界,并确保指定的 H_∞ 控制性能指标。②针对参数不确定非线性系统,研究了鲁棒模糊控制器设计,该设计能够使得模糊闭环系统在平衡点渐近稳定,与以前的设计方法相比具有更少的保守性,并将该控制器的设计应用到 Chen 混沌系统。③对同时存在参数不确定性和外界干扰影响的非线性系统,研究了鲁棒输出反馈 H_∞ 模糊控制器,避免了以前对此类系统设计鲁棒 H_∞ 模糊控制器需要知道全部状态信息的缺陷。研究了水翼船的 T-S 模糊模型,然后将理论研究成果应用于水翼船的控制器设计。

在第 4 章内容的基础上,第 5 章利用 LMI 方法并通过模糊内插一系列局部线性模型逼近非线性系统的性质研究时滞系统的设计。①研究一类非线性时滞系统的弹性保成本状态反馈模糊控制器问题,系统矩阵、时滞矩阵及控制增益均存在模有界时变不确定性。②针对一类含时变时滞的非线性广义系统研究弹性 H_∞ 模糊控制器设计方法。③研究一类可由 T-S 模糊模型逼近的非线性时滞系统的模糊 H_∞ 滤波器设计问题。模糊 H_∞ 滤波器由一组局部 H_∞ 滤波器内插得到,滤波器存在条件是时滞依赖的,且具有较小的保守性。④针对一类含有未知输入的中立状态时滞系统,研究了该系统的鲁棒故障检测与隔离问题。基本思想是将故障诊断滤波器作为残差发生器,将故障检测问题转化为 H_∞ 滤波问题。

在本书付梓之际,深深缅怀恩师杨盐生教授,高山仰止,景行行止,虽不能至,然心向往之,是杨老师把作者带入了高速水翼船运动控制的研究领域,本书的研究工作是在他亲自指导下开展和完成的。张显库教授在百忙之中撰写了 3.5 节,使得本书内容更为丰富。在本书出版过程中,博士和硕士研究生做了大量的文字整理和校对工作,他们是霍虎伟、田宝伟、张腾、罗为明、白伟伟、杨景和杨岳。大连市学术专著资助出版评审委员会的专家对本书提出了许多宝贵的撰写意见。本书的部分成果是在国家自然科学基金(51109020, 50979009)的资助下完成的。本书由大连市人民政府资助出版,在此对鼓励和资助本书出版的大连市人民政府、大连海事大学科技处表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中的不足和疏漏在所难免,欢迎读者批评指教。

任俊生

2015 年 6 月 30 日

目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 高速水翼船的研究和使用概况	3
1.2.1 国外水翼船的研究和使用	4
1.2.2 国内水翼船的研究和使用	5
1.3 基于 T-S 模糊模型设计控制器研究概况	6
1.3.1 基于专家知识的模糊控制器	7
1.3.2 利用并行分布补偿的思想设计模糊控制器	9
1.3.3 利用传统不确定性理论思想设计模糊控制器	12
1.4 本书结构	13
参考文献	15
第 2 章 高速水翼船运动的非线性建模	22
2.1 概述	22
2.1.1 高速水翼船非线性运动数学模型的研究意义	22
2.1.2 水翼船非线性运动数学模型的研究现状	23
2.2 高速水翼船的运动建模	24
2.2.1 水翼船的结构和运动特点	24
2.2.2 水翼船非线性运动数学模型	26
2.2.3 水翼所产生的作用力	28
2.2.4 船体所产生的作用力	32
2.2.5 襟翼所产生的作用力	33
2.2.6 水翼处次波面的波形方程	34
2.2.7 不规则波浪的数学模型	37
2.3 水翼船的船体计算	38
2.3.1 水翼船 HC200B-A1 介绍	39

2.3.2	襟翼参数的确定	40
2.3.3	静水中水翼船纵向姿态计算	41
2.3.4	水翼船横剖面线的拟合	41
2.3.5	相关船体参数的计算	43
2.4	水翼船运动建模的仿真研究	45
2.4.1	水翼船非线性建模仿真流程	45
2.4.2	水翼船在静水中运动的仿真研究	46
2.4.3	水翼船在波浪中运动的仿真研究	50
2.5	结论	55
	参考文献	55
第 3 章	高速水翼船设计航速处的控制器设计	58
3.1	水翼船 PD 姿态控制器设计	59
3.1.1	PD 控制器设计	59
3.1.2	仿真研究	61
3.2	水翼船变结构姿态控制器设计	62
3.2.1	变结构控制的基本原理	63
3.2.2	水翼船变结构控制器设计方法	64
3.2.3	仿真研究	66
3.3	水翼船的线性状态空间模型	68
3.3.1	雅可比线性化理论	68
3.3.2	雅可比线性化水翼船非线性运动模型	69
3.4	水翼船状态反馈 H_{∞} 姿态控制器设计	75
3.4.1	状态反馈 H_{∞} 控制器设计	75
3.4.2	LQR 设计方法	77
3.4.3	仿真研究	77
3.5	高速水翼船闭环增益成形控制	80
3.5.1	SISO 系统闭环增益成形控制算法	80
3.5.2	MIMO 系统的闭环增益成形控制算法	83
3.5.3	水翼船纵向运动多变量鲁棒控制	84
3.5.4	仿真研究	87
3.6	LMI 控制工具箱	90
3.6.1	LMI 的历史	90
3.6.2	LMI 的定义	91

3.6.3 LMI 及相关术语	91
3.6.4 LMI 的确定	92
3.6.5 信息提取	100
3.6.6 LMI 求解器	100
3.6.7 如何从决策变量到矩阵变量以及从矩阵变量到决策变量	108
3.6.8 结果验证	109
3.7 水翼船输出反馈 H_∞ 姿态控制器设计	109
3.7.1 区域极点配置概念	110
3.7.2 水翼船输出反馈 H_∞ 控制器的设计	110
3.7.3 仿真研究	112
3.8 结论	115
参考文献	115
第 4 章 高速水翼船模糊增益规划控制器设计	118
4.1 模糊控制基础知识	118
4.1.1 模糊推理理论	119
4.1.2 李雅普诺夫稳定性理论	120
4.2 基于模糊模型的模糊控制器设计	122
4.2.1 构建 T-S 模糊模型	122
4.2.2 模糊控制器设计	124
4.2.3 水翼船控制器设计及仿真研究	125
4.3 非线性系统的 H_∞ 模糊控制器设计	130
4.3.1 基于模糊模型设计控制器的保守性分析	131
4.3.2 构建 T-S 模糊模型	132
4.3.3 基于模糊模型的 H_∞ 模糊控制器设计	134
4.3.4 水翼船控制器设计的仿真研究	138
4.4 参数不确定非线性系统鲁棒模糊控制	141
4.4.1 构建 T-S 模糊模型	142
4.4.2 鲁棒模糊控制器的设计	143
4.4.3 Chen 混沌系统控制器设计的仿真研究	147
4.4.4 水翼船控制器设计的仿真研究	150
4.5 不确定非线性系统鲁棒输出反馈 H_∞ 模糊控制器设计	154
4.5.1 构建 T-S 模糊模型	154
4.5.2 鲁棒输出反馈 H_∞ 模糊控制器的设计	158

4.5.3 水翼船控制器设计的仿真研究	161
4.6 结论	163
参考文献	164
第5章 基于LMI方法的时滞系统控制器设计	167
5.1 非线性时滞系统弹性保成本模糊控制器设计	167
5.1.1 T-S 模糊模型	168
5.1.2 弹性保成本模糊控制器设计	170
5.1.3 数值仿真例	175
5.2 非线性时变时滞广义系统弹性鲁棒 H_∞ 模糊控制器设计	176
5.2.1 T-S 模糊模型	176
5.2.2 弹性鲁棒 H_∞ 模糊控制器设计	180
5.2.3 数值仿真例	186
5.3 非线性时滞系统时滞依赖模糊 H_∞ 滤波器设计	187
5.3.1 T-S 模糊模型	188
5.3.2 时滞依赖模糊 H_∞ 滤波器设计	190
5.3.3 数值仿真例	198
5.4 中立状态时滞系统故障诊断滤波器设计	199
5.4.1 系统描述和定义	200
5.4.2 鲁棒故障诊断滤波器设计	201
5.4.3 数值仿真例	206
5.5 结论	208
参考文献	209

第 1 章 绪 论

水翼船是一种性能优良的高速船,国内外已有众多学者就高速水翼船开展了广泛而深入的研究。本章首先讨论高速水翼船控制器研究领域中存在和需要解决的三个问题,然后分别对水翼船在国外和国内的发展和研究概况进行介绍,并对基于高木-菅野(Takagi-Sugeno, T-S)模糊模型的控制器设计,从诞生到现在十年间的理论发展进行综述。最后从框架上对本书的内容进行安排。

1.1 引 言

20 世纪 80 年代中期以来,随着我国经济快速增长和生活水平提高,人们的时间观念发生了变化,传统的水上低速客运萎缩而高速客运发展迅猛。我国交通部 2011 年 4 月《交通运输“十二五”发展规划》^[1]第 4 章“水路交通”中提出:“推动水上客运向高速化、舒适化方向发展。大力发展海峡、岛屿间高速客轮、客滚运输和水上旅游客运。”交通运输部门十分关心水上高速客运事业的发展,已经制定了“长途客运旅游化、短途客运高速化”的水上客运政策,中国交通运输协会在组织专家对中国 1996~2020 年旅客运输发展战略研讨后,提出通过 2000 年、2010 年和 2020 年三个发展阶段,将在海湾、陆岛间、大湖内和水网发达地区形成一个以高速船运输为主体的水上客运系统。

中国高速船艇市场容量很大,服务面很广,有的担负着短途水上高速客运的任务,有的成为公众水上娱乐的工具,以及在海防缉私、水上警备和水上应急作业等方面,使用高速船艇更新旧船的工作正在按计划进行,每年均有一定数量的高速船投入使用。据有关资料不完全统计,在全国各水域已开辟的高速客运航线有 79 条,从事水上高速客运的大陆船公司约有 68 家。现在北至乌苏里江,南到海南岛,东自东部沿海,西至新疆内陆湖泊,到处都有高速船艇、游艇营运,其中条件最好、最成熟的当数渤海湾、长江三角洲、珠江三角洲、台湾海峡、琼州海峡和长江一线^[2]。

高速船种类繁多,目前研制出的新型高速船舶有单体(或双体)滑翔艇、水翼船、地效翼船、小水线面双体船、气垫船、高速双体船、穿浪双体船、多体船、深 V 型船和复合船型等^[3,4]。本书将高速船的一种——水翼船作为研究对象。

图 1-1 是一种典型水翼船的示意图。水翼船通常在船底的下方设置 2~3 个水翼。当水翼船高速前进时,水翼上产生的强大升力将船体抬离水面,大大减少了水的阻力。高速水翼船在从体航模式转换到翼航模式的过程中,船体吃水逐渐减少使其容易受外界环境如风、浪等的干扰,无论试验数据还是仿真研究都显示,由于波浪的影响而引起的横摇、纵摇和垂荡的幅度都是很大的,这将降低乘客和船员的舒适性,甚至损坏所载运的货物。为改善船舶的适航性^[5],需要专门的控制系统,从而减小因波浪而带来的船体摇荡。

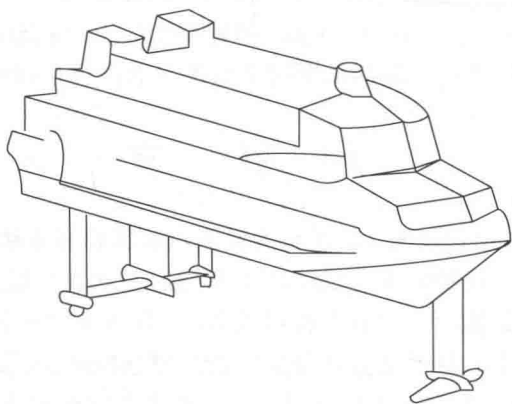


图 1-1 水翼船示意图

目前国内外学者的研究重点已经从自稳型水翼船转移到自控型水翼船,这是因为虽然水翼船的适航性与其他高速船相比有较大的改善,然而若要进一步提高水翼船的航速,如何提高高速水翼船在风浪较大海况下的适航性仍然是需要认真研究的课题。水翼船的稳性控制是设计中至关重要的一环。作为一种具有特殊结构和航行特点的船舶,水翼船的控制系统必须具备三个功能^[6]:①抑制波浪所引起的船体摇荡;②确保高速水翼船在整个工作区域上的稳定性;③即使控制系统中出了故障,也要保证乘客和船舶的安全。本书以研究高速水翼船控制器的设计为目的,力图解决以下三个问题。

(1) 高速水翼船的运动数学模型问题。

高速水翼船的运动数学模型不仅是对其设计控制器的基础,也是研制开发水翼船操纵模拟器的核心技术之一。然而高速水翼船作为一种具有特殊结构和性能特点的船舶,普通商船的建模方法和经验公式已经不能适用。并且由于水翼船在不同的航速时船体姿态不同,将引起船体参数较大的变化。这些都表明高速水翼

船的建模方法和普通商船将会有较大差异。因此必须进一步研究高速水翼船的非线性数学模型。然而由于非线性的数学模型比较复杂,不能够直接用来设计控制器,所以往往还需要建立简化的数学模型。因此建立高速水翼船简化的数学模型也是需要研究的问题。

(2) 高速水翼船在不良海况下的减摇问题。

襟翼控制是改善水翼船适航性的重要途径。对于前、后各置一个襟翼的水翼船,利用传统比例-微分(proportional-derivative, PD)的方法设计控制器,需要调整的参数将多达 8 个,这给控制器的设计带来了困难。另外,近年来新的控制理论设计方法不断涌现,如何利用这些新成果设计水翼船的控制器也是需要解决的问题。例如,如何使水翼船控制器设计考虑外界干扰的影响;由于水翼船系统并非所有的状态都能够直接测量,如何仅利用系统的输出信息设计水翼船的控制器等。

(3) 设计在水翼船整个工作域都有效的控制器问题。

由于水翼船在整个航行过程中,航行姿态发生较大变化将导致船体参数发生变化,所以利用传统控制理论设计的水翼船控制器在设计速度点附近区域之外不再有效。因此水翼船的控制系统具有特殊的要求,即必须能够确保高速水翼船在整个工作区域上的稳定性^[6]。使用传统的增益规划方法设计控制器是解决方案之一,但该方法在不同的工作区间边界处,控制器的输出容易发生突变^[7]。因此既能满足水翼船在全工作域的要求,又能使控制器的输出平稳,也是设计工作中需要解决的问题。

本书对以上三个问题进行较为深入的研究,在对高速水翼船运动建模的基础上,利用控制理论发展的新成果,对水翼船的控制器设计问题进行了研究,并设计水翼船的模糊增益规划控制器。在对水翼船的运动建模和控制器设计进行研究之前,需要对水翼船的历史和现状有所了解,因此首先对水翼船国内外的研究和使用情况介绍,然后对基于模糊模型的控制器的设计特点、研究内容、历史和现状等进行简要的综述。本书根据所使用 IF-THEN 模糊规则的结构特点,将模糊控制器的设计分为三类,然后对其中基于模糊模型的控制器的设计进行重点介绍。

1.2 高速水翼船的研究和使用概况

水翼船是航空机翼理论在船舶上的推广应用,在飞机研究的同时,就已经开展水翼船方面的研究。目前国内外均已经有水翼客船投入运营,各个国家建造的

水翼船型号有数十个。下面分国外和国内两个方面介绍高速水翼船的发展和研究概况。

1.2.1 国外水翼船的研究和使用

水翼船在国外发展已近百年,已经建造了各种试验船和民用、军用水翼船^[8]。利用水翼减小阻力的设想是法国人拉米斯(Charles M. Ramus)提出来的,19世纪90年代在塞纳河上试验他制作的水翼船模型。出生于俄国的法国贵族坎特·德·兰伯特(Count de Lamber)在1897年建造了基于该思想的第一艘实船。水翼船大致上在第二次世界大战末就已经接近实用。1953年由瑞士的Supramar水翼船设计公司开发的PT-10、PT-20投入客运取得成功,并发展为PT系列。意大利Rodfiquiez造船厂在PT型基础上略加改进,自成系列称RHS型,均属深浸割划自稳型水翼船,或加装简单的自控系统。苏联在1957年第一艘内河水翼客船“火箭号”投入营运。美国由Boeing和Grumann航空公司研制出多型军用自控水翼船,如“飞马座号”导弹水翼艇、“剑鱼号”喷水推进自控水翼导弹艇。1968年美国洛克希德公司建成了世界上最大的水翼船,使用两台飞机用喷气发动机,船舶的速度在平静的水面上超过40kn。

水面贯通型水翼船是在水翼船的研究过程中最早出现的一种船型,因其具有自身的稳定性,所以即使不进行特别控制就能高速行驶。但是水面贯通式水翼船由于自身的稳定又导致了在迎浪中航行时运动性能的下降,船体产生的上下加速度较大,使乘客舒适性下降。于是后来出现了全潜式水翼船,利用水翼全部浸在水中免于波浪影响这一特性改善适航性。全潜式水翼船是一种适航性十分优越的船型,得到世界各国的认可和争相开发,最早开发成功的是美国和日本。美国的韦斯特水翼公司制造了“韦斯特水翼25”型船,乘客定员180名,航速达40kn。日本川崎重工业公司建造的“喷水式水翼120”型船较小,乘客定员120名,航速达40kn。日本三菱重工业株式会社建造的双体型全潜式水翼船“Suppershuttle 400”型船于1993年4月投入营运,乘客定员为350名,试航速度达到46kn,服务航速为38kn。

多体水翼船的概念最早是由美国华盛顿大学的Calkins^[9]在1981年提出来的,他提出并设计了一种双体水翼船。日本东京大学的宫田秀明等^[10-13]也设计了一种双体水翼船,原理与Calkins的类似,他们在水池中对其新船型进行了一系列实验,并与其他船型进行了比较,发现双体水翼船具有非常优良的性能。两人的研究工作引起了国际造船界的极大重视。Stellenbosch大学的Hoppe对双体水翼船也进行

了较深入的研究,在其论文中称为 HYSUCAT^[14]。双体水翼船已经进入实船营运阶段,众多造船公司对其表现了浓厚的兴趣。日本日立造船公司开发的“Superjet-30”型船^[15]与水面贯通式水翼船一样具有自身的稳定性,其中1号船的乘客定员为200名,最大航速38kn。挪威 Westamaraan West A/S 公司建造的 Foilcat 2900 全潜式双体水翼船^[16]于1992年初建成并已正式投入营运,船长40m,航速达50kn,可载客450人。德国也试制过一艘双体水翼艇,其排水量为35.6t,最大航速达38kn。波音公司发展了“喷翼”型喷水推进全浸自控水翼客艇,批量生产了28艘,有13艘现为信德集团的远东水翼船务有限公司所有,营运于港澳航线,其中110t的 Jetfoil 全浸自控水翼艇可翼航于3.5m浪高,是世界上公认的耐波性最好的高速客船。

综上所述,曾经研究建造过各种水翼船的国家,有瑞士、意大利、苏联、美国、德国、法国、日本、加拿大、荷兰、挪威、南非、波兰等,水翼艇的理论和实践都已较成熟。

1.2.2 国内水翼船的研究和使用

在1958年当世界上仅有少数几个国家研制出实用水翼艇的时候,我国已开始对水翼艇的建造进行研究^[1]。交通部船舶设计院设计的小型水翼艇(可乘坐6人),1958年秋季在密云水库进行试航,得到了初步的成功。上海船舶科学研究所和上海交通大学亦于1958年秋季设计了水翼艇,1959年试验成功,并由芜湖造船厂建造成铝质水翼客船(可乘坐40人,速度60km/h)。国内王献孚^[18]、李洁雅等^[19-21]对双体水翼船进行了研究,后者从1990年开始对双体水翼船的运动性能进行研究,并设计和建造了一艘50客位的双体水翼船。

中船重工第七〇二研究所是国内水翼船设计和开发领域的主要单位^[22]。1960年建成并试航了“水翼一号”,这是在长江上航行的第一艘水翼客艇。我国第一艘全铝焊接的小型水翼客船“飞鱼号”于1988年6月建成,在太湖中进行了试航,性能良好,标志着我国民用水翼船的开发工作已从科研阶段进入了实用的新阶段。1998年6月自行设计的“远舟1型”首制船“远舟”号试航成功,该船载客108人,船速78km/h,主要性能指标超过了国外同类船舶的水平,是较理想的川江船型,有2艘已投入营运,证明有可能取代进口船型。

此外第七〇二研究所还对自稳加自控水翼艇模型和实艇进行了研究。1970年建造的101试验艇在设计浪级中开启自控系统时,纵摇改善率可达80%,横摇改善率在顶浪时为56%,顺浪时为63%。与此同时开展了水翼艇运动性能理论计算

方法和自控理论研究,在设计海况中运动性能的预测值与实船试航记录比较证明,理论计算结果达到实用精度要求^[17]。1988年由第七〇二研究所设计,无锡水翼船公司建造了一艘铝质水翼船(载客22~27人,航速56km/h),航行于广州至肇庆的航线上。1994年已开发出海用的PS30深浸自控水翼船和多种内河水翼船,获得了中国船舶工业总公司科技进步奖特等奖,其中PS30水翼客船得到了美国船级社的认证,对我国自控水翼船发展有重要意义。其主要技术性能指标为:总长29.1m,总宽9.2m,吃水(浮航)4.5m,适航性为有义波高2.1m时保持翼航,蒲福风9级安全航行,载客量30~110人,航速57~77km/h,续航力250~400km,航区A、B级。

总体来说,我国是少数几个对水翼船有较深入和全面研究、有比较完整的测试设备的国家之一,对自稳型和自稳加自控型水翼船不仅进行了模型的研究工作,而且有实船实践。

水翼船是我国内河主导高速客运船型。这些水翼船在主干河道、沿海、主要湖泊及大型水库的高速客货运输、工程作业、水上巡逻等方面得到了广泛应用^[2]。20世纪90年代,我国长江流域、黑龙江流域和广州沿海等地多条航线相继引进了俄罗斯制造的几十艘各型水翼船。川江流域已普遍使用水翼船作为水上交通工具。1994~1998年期间在重庆、涪陵登记注册的12家航运公司所属57艘川江营运的高速客船中,数量最多的是水翼船(共34艘),其中2艘为国产水翼船(“歌乐山”号和“远舟”号),其余为俄罗斯制造的流星型水翼船。重庆长江水运的“渝飞”号水翼船速度达85km/h,是目前全国内河最快的水翼船。最近我国引进俄罗斯技术开发80~100艘、航速为80~85km/h的水翼船。渤海地区、台湾海峡、北部湾海域和东南沿海航线,该区风浪较大,在近中期100~300t的深浸自控水翼船是一种很好的选择。

1.3 基于T-S模糊模型设计控制器研究概况

美国加州大学扎德(Lotfi A. Zadeh)教授1965年发表了论文“Fuzzy sets”^[23],标志着模糊理论的创立。模糊系统把知识表示成一组规则,其核心就是由IF-THEN规则所组成的知识库。考察具有如下形式的模糊规则:

IF x_1 is G_1^i , x_2 is $G_2^i, \dots, x_m$ is G_m^i ,

THEN y is H^i , $i=1, 2, \dots, n$,

其中 $G_1^i, G_2^i, \dots, G_m^i$ 分别为输入变量 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 的模糊集, H^i 为输出变量的模糊集。

根据不同的 IF-THEN 规则后件形式,可以把基于上述规则的模糊模型分作两类:

①语言模糊模型,这时 H^i 为模糊集,它最早由 Mamdani 用来设计蒸汽机的控制器^[24],因此也可称作 Mamdani 型模糊模型;②T-S 模糊模型,这时 H^i 为清晰的函数,它由高木和菅野在 1985 年提出^[25],后来菅野和 Kang^[26]对其进行了进一步的研究,故也有文献称为 TSK 模糊模型。

T-S 模糊模型中的后件部分可以是任意函数,当 H^i 是一阶多项式时,所产生的模糊推理系统被称为一阶 T-S 模糊模型;当 H^i 是常数时,就得到了零阶 T-S 模糊模型,也可称作单点模型(如果将常数 H^i 看作单点模糊集,也可以看作语言模糊模型的特例)。若 T-S 模糊模型中的后件部分为系统的状态空间模型,则称作动态 T-S 模糊模型^[27]。若 T-S 模糊规则的后件部分除了齐次项,还含有一个常数项,则模糊系统称作仿射型 T-S 模糊模型,否则称作齐次 T-S 模糊模型。

在控制系统的分析和设计中,系统的稳定性研究占有重要的地位。同样,模糊控制器的稳定性分析一直是一个难点课题。由于模糊系统的非线性本质和缺乏系统的统一描述,迄今为止模糊控制系统的稳定性分析和控制系统设计仍缺乏一个强有力的数学工具和统一的方法。本节介绍偏重于模糊控制器设计稳定性理论的探讨。根据设计模糊控制器中 IF-THEN 规则的结构特点,可将模糊控制器分为三类。下面回顾这三种模糊控制器的设计方法。

1.3.1 基于专家知识的模糊控制器

这类模糊控制器的设计基于语言模糊模型,直接利用人类的经验设计模糊控制器,因此也有学者将其称作直接综合法^[28-33]。对于无法或者很难建立对象数学模型的复杂控制问题,传统的建模方法和控制方法^[34,35]往往无能为力,然而人类则能够利用经验知识对其进行控制。模糊 IF-THEN 规则是描述人类不精确语言的有效工具,因此基于语言模糊模型的控制器设计可以提供简单有效的解决方案,并且这种模糊控制的方法已经在控制领域中得到了许多应用^[36,37]。

对于这一类模糊控制系统稳定性的分析方法,若控制对象是常规的数学模型,则可按照一般的非线性系统进行稳定性分析,常用的分析方法有描述相平面法^[38]、线性近似法^[38]、函数分析法^[39]、圆判据法^[40]等。若控制对象亦为模糊模型,则其稳定性分析方法有模糊关系法^[29]、模糊相平面分析法^[41]等。但是该方法设计控制器只能依赖专家的经验进行个案处理,对控制系统的稳定性和性能指标等进行理论研究相当烦琐。