

船舶运动智能控制与 H_{∞} 鲁棒控制

贾欣乐 张显库 著

大连海事大学出版社

本书由

大连市人民政府资助出版

The published book is sponsored
by the Dalian Municipal Government

内 容 提 要

船舶运动控制研究面临的主要困难在于船舶动态的不确定性、随机的环境干扰以及量测信息的不精确性,传统控制策略的效果不能令人满意。神经网络控制(NNC)、模糊控制(FLC)、混合智能控制(HIC)及H_∞鲁棒控制(HIRS)为克服上述障碍、设计高水平的船舶运动控制器提供了新的契机。

本书系统地总结了近15年来国内外学者将NNC,FLC,HIC,HIRS应用于船舶运动控制所取得的主要成果,其严谨的论述利于有兴趣的读者尽快地触及学科的前沿问题;书中融入了笔者对船舶运动科学的一系列思考所得和研究设计范例,从而使本书有可能避免泛泛空谈的弊端,其个性化的笔触赋予读者以平等交谈的亲切感。

本书共分六章:绪论;船舶运动数学模型;神经网络控制;模糊控制;混合智能控制;H_∞鲁棒控制。全书共318页,图280幅,参考文献404种。

本书可供航海科学、轮机工程、船舶自动化、船舶设计与制造、控制工程等专业的博士生、硕士生、高年级本科生作为船舶运动控制课程的教材和参考书,对船舶运动控制器研究和设计人员有重要参考价值。

前 言

船舶运动控制是一个重要的研究领域,其最终目的是提高船舶自动化、智能化水平,保证航行的安全性、经济性、舒适性。

近 15 年来控制论的全面繁荣为船舶运动控制系统设计提供了诸多的控制算法,特别是神经网络控制、模糊控制、混合智能控制(统称为智能控制)和 H_∞ 鲁棒控制等理论都被不同程度地引入到该领域,为船舶运动控制科学的发展注入了活力。本书系统地总结了这一期间智能控制和 H_∞ 鲁棒控制在船舶运动与操作中的应用成果,为发展我国新一代船舶导航及控制系统提供理论依据及算法和设计范例。这两种控制算法从机理上和方法论上看可以说南辕北辙,而从控制目标和效果上看,它们却殊途同归:都能保证在船舶动态具有不确定性、环境存在干扰、量测信息呈现不精确性(噪声)情况下,使闭环控制系统具有稳定性和良好的运行性能(即具有鲁棒性能),这是本书选题的客观依据。

笔者长期在船舶自动化领域中工作,通过多轮博士和硕士研究生“船舶运动控制”学位课程的教学和有关研究项目的实践,积累了一些经验、体会,取得了某些成果,这些知识一方面已经融入了本书的内容;另一方面又使得笔者在落笔全书时不致泛泛空谈。在写作风格上我们希望做到理论联系实际、严谨与个性化笔触的统一。当前在本学科领域还没有一本与本书内容类似的著作可供参考,我们的知识来源不外乎所列的 404 篇参考文献、笔者本人的 50 余篇论文以及笔者指导过的 5 位博士研究生的学位论文。从本书的编排、理论的论述、公式的演绎到图、表的绘制等方面笔者都是在尽力思考之后行事的,有些是经过反复修改后成文的。我们力求以比较形象的思维、简洁的语言论述许多复杂的事物,以便使本书具有可读性。如果存在着理解上的错误,应由笔者负责。

重点内容:(1)船舶运动数学模型:以笔者及其同事们的研究结果(见《船舶运动数学模型》,大连海事大学出版社,1999)为基础,精炼地处理了船舶动态的数学描述问题,为控制器设计和闭环系统性能仿真提供了一个基础平台。(2)评述混合智能控制(神经网络控制、模糊逻辑系统、遗传算法及模拟退火优化算法)的各个分支的理论和应用以及其集成构成的 HIS 系统的结构特点、学习方法和应用的最新发展。(3)深入浅出地讨论了 H_∞ 鲁棒控制的理论框架和基于 MATLAB 的控制器设计方法,详述了笔者发展的独具特色的许多新算法及其应用。本书可供航海科学、轮机工程和控制理论与控制工程专业的人员、高校研究生与高年级本科生作为船舶运动控制课程的教材或参考书,还可供船舶运动控制器研究和设计人员参考。

本书的出版得到教育部高等学校博士学科点专项科研基金和大连市学术专著资助出版基金的资助,笔者在此表示深切的谢意。

由于笔者水平有限,书中的缺点错误在所难免,欢迎读者批评指教。

(E-mail:ZhangXK@dlnu.edu.cn)

贾欣乐 张显库

2001 年 10 月于大连海事大学

本书所用的缩写词简表

AI	Artificial Intelligence	人工智能
ANFIS	Adaptive Neural Fuzzy Inference System	自适应神经模糊推理系统
ANN	Artificial Neural Network	人工神经网络
BI	Biological Intelligence	生物智能
BP	Back Propagation	误差反传
CBR	Case-Based Reasoning	基于事件推理
CCT	Conventional Control Theory	常规控制理论
CI	Computational Intelligence	计算智能
CT	Chamotaxis	趋化算法
FALCON	Fuzzy Adaptive Learning Control Network	模糊自适应学习控制网络
FLC	Fuzzy Logic Control / Fuzzy Logic Controller	模糊控制/模糊控制器
FLS	Fuzzy Logic System	模糊逻辑系统
GA	Genetic Algorithm	遗传算法
HIS	Hybrid Intelligent System	混合智能系统
IMC	Internal Model Control	内部模型控制
MRLCS	Model Reference Learning Control System	模型参考学习控制系统
NFS	Neural Fuzzy System	神经模糊系统
PR	Pattern Recognition	模式识别
SA	Simulated Annealing	模拟退火算法
SC	Soft Computing	软计算
SONCS	Self-Organizing Network Control System	自组织网络控制系统

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 船舶运动控制纵横谈.....	(1)
1.2 船舶运动控制研究的基本问题.....	(7)
1.3 船舶运动控制策略.....	(9)
1.4 本书的动机和宗旨.....	(14)
第 2 章 船舶运动数学模型	(15)
2.1 引言.....	(15)
2.2 船舶平面运动的运动学.....	(16)
2.3 船舶平面运动的动力学.....	(17)
2.4 船舶平面运动的线性化数学模型.....	(19)
2.5 船舶平面运动的一种简洁非线性数学模型.....	(25)
2.6 操舵伺服系统的数学模型.....	(29)
2.7 Abkowitz 的非线性船舶运动数学模型.....	(31)
2.8 船舶运动仿真研究平台.....	(33)
第 3 章 神经网络控制	(37)
3.1 神经网络控制引论.....	(37)
3.2 MLP 的 BP 训练方法.....	(44)
3.3 神经网络控制方案概述.....	(52)
3.4 监督控制在船舶自动舵中的应用.....	(57)
3.5 直接控制应用于船舶自动舵.....	(70)
3.6 内部模型控制应用于船舶自动舵.....	(84)
3.7 自动生成的神经网络控制器及其在水下机器人中的应用.....	(113)
3.8 自学习神经网络控制器.....	(128)
第 4 章 模糊控制	(136)
4.1 FLS 概论.....	(136)
4.2 FLC 基本原理.....	(140)
4.3 模糊规则的提取方法.....	(150)
4.4 FLC 在船舶运动控制中的应用.....	(155)
第 5 章 混合智能控制	(170)
5.1 混合智能控制系统引论.....	(170)
5.2 适应式混合智能系统 ANFIS 及其在船舶控制领域的应用.....	(174)
5.3 模糊自适应学习控制网络 FALCON 及其在船舶运动控制领域的应用.....	(203)
5.4 遗传算法(GA)及其在船舶运动控制器优化中的应用.....	(223)
5.5 模拟退火算法及其在船舶运动控制器优化中的应用.....	(239)

第6章 H_∞ 鲁棒控制	(247)
6.1 准备知识	(247)
6.2 H_∞ 鲁棒控制理论概述	(256)
6.3 混合灵敏度算法	(259)
6.4 回路成形算法	(267)
6.5 闭环增益成形控制算法	(273)
6.6 μ 分析	(289)
6.7 H_∞ 鲁棒控制在船舶运动控制中的应用	(293)
参考文献	(305)

第1章 绪论

1.1 船舶运动控制纵横谈

人类文明的进步与海洋运输密切相关。水运是完成地区间、国与国间大宗货物贸易最有效最经济的运输方式。水能载舟,亦能覆舟。海上行船充满了风浪雾礁的危险,如何科学地操纵和控制船舶,使之安全、准时到达目的港,是一个生命攸关影响重大的问题。为了掌握船舶运动规律和船舶驾控技术,人类已经奋斗了多个世纪,到今天已经取得斐然的成就:船舶运动控制已从手动发展到自动,从单个系统的自动化提高到综合自动化,从简单的控制装置发展成计算机化、网络化的体系结构;船舶运动控制已经形成一门独立的科学,在国内和国际都有一个相当规模的学者群从事有关的理论探讨、系统设计和工程实现工作等方面的学术研究。船舶运动控制科学正在为我国的社会发展和国际经济文化交流发挥其特有的作用。

1)历史的回顾 7 000年前的远古时代,我们祖先已经用独木舟进行渔猎。他们用短木片划水让“船”前进或回转。他们随后建造稍大一些的木质船,用一排或几排双桨进行操纵。在此基础上发明了橹,这可以说是桨与舵的综合体,操船更为有效。风帆约于3 000年前发明,使船的载重量和航程明显增加。置于船尾的舵约出现于1 000年前,把掌管航向的装置单独分开,在操船史上是一大进步。距今600年前人们已能建造多桅帆船,1405年郑和下西洋船队中最大的船可达九桅十二帆^[342]。西欧此后100年方能建造两桅或三桅帆船,称为 Schooner 船,1492年 Columbus 做环球探险航行即乘此类船。

18世纪产业革命带来了今天意义上的轮船:钢质船壳可承载成千上万吨货物;螺旋推进器约于140年前投入使用,由发动机以几千甚至上万千瓦使之转动,产生数十吨推力使船以十几节到二十几节的速度行驶;由动力驱动的操舵装置约于120年前建成,能以数十吨米的转船力矩,使船头以每秒 $0^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 角速率回旋,达到转向或航向保持目的。110年前发明的柴油机,以更大的功率、更高的热效率和更小的单机重量取代了蒸汽机,至今仍然占船舶推进主机的大多数。1920年陀螺罗经被用于船舶导航,使航向测量精度达到 1° 的量级,为自动操舵仪的诞生准备了条件;1940年流体力学和机翼理论的发展,统一解释了船体、桨、舵产生流体动力的机理,为建立船舶运动数学模型奠定了理论基础。

2)船舶运动的复杂性 船舶在海洋中的运动具有六个自由度,分解为前进、横漂、起伏三种平移及转首、横摇、纵摇三种转动。在这种耦合运动中船和周围流体相互依存产生了关联惯性力,又相互作用产生了黏性力。外界环境的干扰包括风力、浪力及流力,其机理很复杂:从效果上看,风引起类似随机游走过程的附加动力,浪造成船首向及其他自由度上的附加高频振荡,流产生船位的运动学偏移。从运动控制角度看,桨、舵、锚是船舶在海洋中赖以工作和生存的三大主动操纵设备,它们提供船舶前进推动力、转船的回转力矩和锚泊所需的锚力。近年来为增加船舶操纵机动性而发展的侧推器,原理同螺旋桨,横向置于船首和船尾,从而增加了转船力矩。为减弱船在波浪中的横摇,20世纪60年代制成了防摇鳍,作用原理类似于鱼类用鳍

保持其身体的左右平衡。这表明船舶实际上是一个运行于不确定环境下的多输入多输出复杂动力学系统,在各种气象、水文、航道等外部环境和不同装载、航速等内部条件下统一协调所有的控制设备,完成特定的航行和操作计划,是一个艰巨的任务,需要驾驶员有丰富的经验和娴熟的技巧,要求自动控制系统具有优良的性能。

在理论上研究船舶的操纵运动,是以牛顿运动定律为基础,考虑惯性力(刚体惯性力和因流体加速运动造成的流体惯性力)、船体黏性力、桨力、舵力、锚力、风力、浪力、流力、侧推力、防摇鳍力乃至拖船力、缆绳力等诸力之间的动力学平衡,最终组成完整的船舶运动数学模型,后者表现为一个多自由度的一阶微分方程组。为了进行实际的研究,必须确定模型方程中诸多参数的量值,这主要靠船模试验结果或采用系统辨识技术对实船操纵数据进行回归从而得到最佳参数估计。通过计算机仿真可以对各种环境条件及操作方式下的船舶动力学行为进行深入的研讨^[310,321]。在此基础上再配以视景系统,通过计算机生成动态图像(Computer Generated Images, CGI)方法把环境场景和本船立体图像投影到大屏幕上就能制成船舶操纵模拟器^[109,310]。目前国际上有十余座性能先进的船舶操纵模拟器在运行,包括荷兰海事研究所(Maritime Research Institute Netherlands, MARIN)主要用于研究的船舶操纵模拟器(Ship Manoeuvring Simulator)、挪威 Trondheim 的主要用于船员培训的船舶操纵模拟器、美国 Kings Point 的计算机辅助操作者研究设备(Computer Aided Operator Research Facility, CAORF)^[310]以及德国 Maritime Simulator Center for Warnemunde Navigation Department of the Wismar Technical College for Engineering, Economics and Design 的模拟器,后者兼有操船模拟器(Shiphandling simulator)、轮机模拟器(Ship's machinery simulator)及船舶交通管理模拟器(VTS simulator)。最近在“211 工程”推动下大连海事大学制成了具有三维动态图像的船舶操纵模拟器^[375],并已实现产品化。船舶操纵模拟器不但可进行船员培训,而且还可完成船舶操纵特性研究、港湾建筑及河道疏浚咨询研究、大型船舶进出港导航研究以及海上事故分析研究等任务。船舶操纵数学模型是建立船舶运动控制策略的基础,同时为检验这种控制策略的性能提供一个闭环仿真环境。

3) 船舶运动的手动控制和自动控制 船舶航行中典型的手动控制为驾驶人员通过车钟手柄设定螺旋桨转速或主机功率从而改变船舶前进或后退的速度;舵工转动舵轮设定舵角经液压操舵伺服系统驱动舵叶转动从而保持或改变航向、航迹。手动控制初看起来是一种开环控制,如果把操作者也理解为控制系统的一个组成部分,那么这种控制系统实际上是闭环的。人的智能是任何自动化装置甚至“智能机器”(Intelligent Machine)所无法比拟的。在当前科学技术发展水平下,船舶运营中一些最困难、最复杂的控制任务如避碰、离靠泊等还得依赖手动操作完成;而为了研制完成同样任务的自动控制装置如自动避碰系统、自动离靠泊控制器等,人的操作经验及由此获得的船舶运行数据是最宝贵的信息来源。即使目前已经实现了自动化的一些环节如航向、航迹控制系统、航速控制系统,为了改进控制质量,提高经济效益,实现控制器的智能化并不断提高智能水平,把操作者作为教师来学习仍然是最有效的手段。有经验的专家是智能控制器设计者主要的咨询对象。

船舶运动自动控制可概分为三类情况:一是大洋航行自动导航问题^[48],包括航向控制、转向控制、航迹控制、航速控制(到港时间控制)等;二是港区航行及自动离靠泊问题,涉及船舶在浅水中的低速运动,风、浪、流干扰相对增大,系统信息量增多,操纵和控制更趋困难^[174];三是拥挤水道航行或大洋航行的自动避碰问题,主要涉及多船会遇,碰撞危险度评估,多目标决策,

避碰最佳时机及最佳幅度等^[402]。本书将主要面向第一类问题。除上述三类典型船舶运动控制问题外,还可举出多种专门化的船舶运动控制问题:船舶动力定位(Dynamic positioning)^[14]、快速船(High speed crafts)等特种船控制、水下机器人自主运动(AUV, Autonomous Underwater Vehicles)控制^[100]、防摇鳍阻摇(Fin roll stabilization)^[117]及舵阻摇(Rudder roll damping)^[360]控制等,参见 Fossen^[48]。

从智能控制的角度看,现代船舶运动控制可以认为是一个分层递阶式的人-机控制系统(Hierarchical control system),其逻辑结构如图 1.1.1 所示^[328],系统从上到下可分为任务规划(Task planning)、协调调度(Coordinate scheduling)、控制策略(Control strategies)、控制执行(Actuation)四层结构,通过信息反馈(Information feedback)形成多个闭环,操作者通过人-机界面可监视或参与各层的行为。

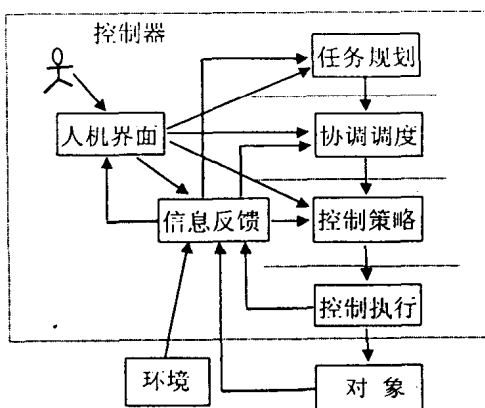


图 1.1.1 船舶运动控制系统

(1) 任务规划层 该层属 Saridis 分层递阶智能控制论^[207]中的组织层。实现航路规划(Route planning)、气象导航(Meteorological navigation)、航行日程安排(到达时间计划 Planning of arriving time)、综合导航(Integrated navigation)、各子系统目标分配等总体决策任务。

(2) 协调调度层 接受任务规划层下达的目标,根据全船系统状态合理调度各子系统的控制策略,使各子系统互相协调有条不紊地工作,最终高效地完成总体控制任务,如航迹控制与到达时间控制之间的协调、推进控制系统与侧推控制系统之间的协调等。

(3) 控制策略层 给出每种子系统的控制算法,用以直接操纵各种执行机构去控制各自的对象。该层与前面两层相比,任务更显艰巨,因为它要完成多个闭环控制任务,而每一个闭环系统都涉及到控制质量特别是稳定性的保证问题,这对控制算法的研究、设计、选择和运用提出了挑战。可以说船舶运动控制领域的核心问题就是如何不断地改进控制策略——控制算法,以保证在具有干扰的环境下和船舶本身存在动态特性改变(因航速或装载等变化引起)的条件下仍能满足航运界不断提高的性能指标要求。对各种控制算法的深入讨论是本书的宗旨。

(4) 控制执行层 该层由硬件实现。各式各样的执行机构本身都是一些动态环节,它们会在相当的程度上影响到整个控制系统的性能,例如舵叶转动速率限制、最大转角限制和操舵响应时间延迟等因素都会使航向控制性能恶化;主机最大扭矩限制也降低了调速性能等。各种新执行机构、新驱动方式的出现有可能进一步改善船舶自动化系统的性能;而如何从控制策略的角度重视执行器动态的存在,设计出能同时照顾到被控过程和执行器的动态特性的控制算法以改进整体控制质量是一个应予强调的方面,至少到目前为止,人们总是把过多的精力去注意被控过程本身,有意或无意地忽视了执行机构对控制带来的不利影响。

(5) 信息反馈 它是系统认知渠道,通过传感器与信号传递(通信)手段使得被控过程的状态信息得以反馈到控制策略层的各种控制器,从而具体形成控制闭环。目前常用的船用信号传感器可举出:(a)陀螺罗经(Gyro compass)或电子式磁罗经(Electronic compass),提供本船航

向(Heading)信息;(b)计程仪(Speed log),可以分别示出本船对地或对水的航速,如系双轴计程仪还可同时指示前进速度(Surge velocity)和横漂速度(Sway velocity);(c)角速度陀螺(Rate gyro),用于测量本船回转角速率(Turning rate);(d)GPS(Global Positioning System,全球定位系统)接收机,给出本船经度、纬度以及国际标准时间(Greenwich mean time)等信息;(e)LO-RAN-C(一种无线电定位系统)接收机,用于接收本船经纬度信息;(f)ARPA(Automatic Radar Plotting Aids),实质是一种数字雷达,能够提供多达 30 艘目标船的运动状态信息,包括各目标船与本船之距离(Range)、目标船对本船之方位(Target Bearing)、目标船航向(Target Course)、目标船航速(Target Speed),后两者可以是目标船的绝对航向(True Course)和绝对航速(True Speed),也可以是对本船的相对航向(Relative Course)和相对航速(Relative Speed),还包括各目标船距本船的最近会遇距离(DCPA, Distance of Closest Point of Approach)以及目标船与本船的最近会遇时间(TCPA, Time to Closest Point of Approach);ARPA 还可提供海岸线、防波堤外形、岛屿与轮廓线等水陆分界图形曲线的数据(Navlines)。有关主机运动状态的信息有:转速,由转速传感器量测;扭矩,由扭矩仪量测;功率,由以上两种量测值之乘积获得;主机排烟温度(Exhaust temperature of main engine),由温度传感器测出。以上各种传感器的量测信息都是按照美国电子航海仪器接口信号标准 NMEA 0183(NMEA 0183 Standard for interfacing marine electronic navigational devices, National Marine Electronics Association)的格式设计的,它们可以很方便地经串行接口被引入控制计算机^[215,314,317]。

(6)人-机界面 人-机界面是人与机器(Computers)进行信息和命令交换的场所。依赖于控制系统的复杂和先进程度之不同,人-机界面设置的简易也大有区别。传统的人-机界面以图形学与人-机工程学(Ergonomics)为基础设计信息显示画面和设置传达指令的方式如采用按键、旋钮、手柄、触摸屏等,并辅以声光报警等功能。当前基于一人驾驶台(One man bridge)操作体制的综合驾驶台系统(Integrated Bridge System)的人-机界面主要特点是以电子海图显示信息系统(ECDIS, Electronic Chart Display Information System)为核心。ECDIS 不但将纸海图上的全部信息(码头外形、海岸线、航标、等深线、潮流分布等)数字化,采用向量的方式分层存储和显示以上各类信息,并且通过计算机接口接收各传感器送来的本船运动状态信息及 ARPA 雷达送来的跟踪目标船的运动状态信息,然后以适当的方式将这些信息一一显示在同一个电子海图上。某些电子海图还可以叠加在雷达画面上,使监视功能更强。当前已经成熟的多媒体技术及虚拟现实(Virtual reality)技术,将有可能在不久的将来被用来把船舶人-机交互功能提高到智能化水平。

4)船舶自动操舵仪(Autopilot) 又称自动舵,它是船舶运动控制问题中具有特殊重要性的一个系统,用于航向保持/航向改变/航迹保持控制。早在 20 世纪 20 年代已出现商品化的机械式 PID 自动舵用于商船的航向保持^[216]。在此后的历史进程中,随着科学的发展和工艺、工艺的进步,自动舵的构造变化巨大,电气式、电子式、微型计算机化的产品相继问世。20 世纪 80 年代 GPS 系统开始提供商业化定位服务,使航迹控制真正在自动舵中实现成为可能。

对比航迹控制(Track keeping)而言航向控制(Course keeping)较为简单,后者只要求舵角(Rudder angle) δ 克服环境的干扰将航向(Heading) ψ 维持在设定航向(Set course, Reference course) ψ_r 上,见图 1.1.2。航向自动舵作为一种控制器其输出的控制舵角 δ 应该是航向误差 $\Delta\psi = \psi_r - \psi$ 和转首角速度 r 的函数

$$\delta = f_1(\Delta\psi, r) \quad (1.1.1)$$

如果取 δ 与 $\Delta\psi$ 和 r 成线性关系,就得到比例—微分(PD)舵,这是迄今为止广泛应用的一种控制律,可初步满足通常情况下的航向保持要求。为提高控制性能必须引用各种先进的控制策略。

航迹控制要求用舵角 δ 克服环境干扰把船舶的运动轨迹维持在设定航迹(Set track)上,这时不但要消除航迹误差 η ,而且要消除航向误差 $\Delta\psi = \psi_r - \psi$,其中 ψ_r 是设定航迹上与船位距离最近点的切线方位,见图 1.1.3,航迹自动舵的输出舵角应该是 $\Delta\psi, r$ 及 η 的函数

$$\delta = f_2(\Delta\psi, r, \eta) \tag{1.1.2}$$

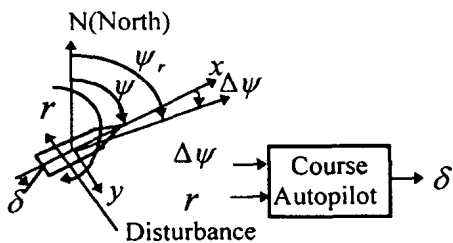


图 1.1.2 航向控制问题

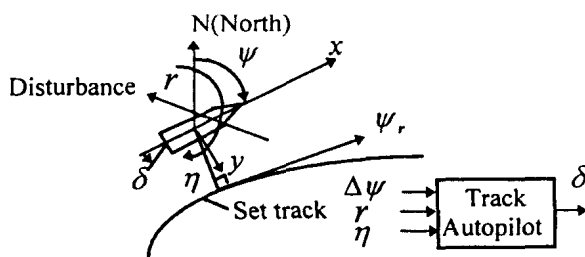


图 1.1.3 航迹向控制问题

自动舵各种控制策略研究中最核心的问题在于寻求确定函数 f_1, f_2 的方法并得到这两个函数的最终结果。

船舶航迹控制可分为分离控制和综合控制两种方案。分离控制(间接式控制)方案把控制分成互相嵌套的三个环(图 1.1.4(a)):外环(航迹环)的功能为将 GPS 接收的船位数据与计划航线比较,获取航迹偏差信息 $\eta(k)$,通过航迹控制算法得到一个命令航向 $\psi_r(k)$ 给航向控制

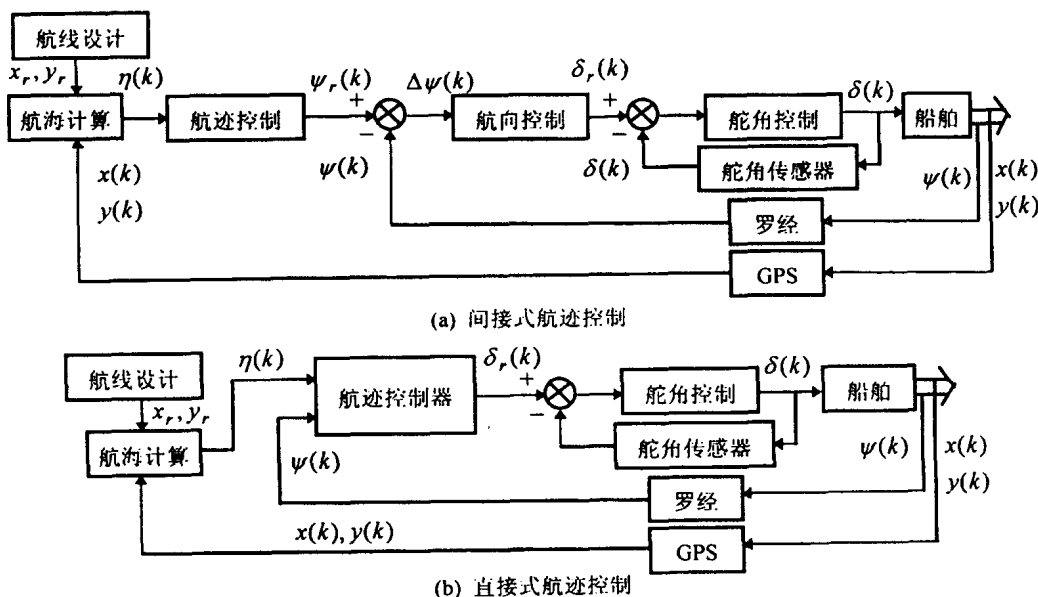


图 1.1.4 船舶航迹控制的两种方案

环,引导船舶向着消除航迹偏差的方向驶进;中环(航向控制环)将罗经采集的实际航向 $\psi(k)$ 与 $\psi_r(k)$ 比较形成航向误差信息 $\Delta\psi(k) = \psi_r(k) - \psi(k)$,经过航向控制算法得出一个命令舵角 $\delta_r(k)$ 给舵角控制环,使船首向减少航向偏差的方向转动;内环(舵角控制环)则用于驱动舵

机使舵角检测值 $\delta(k)$ 与舵令一致, 最终实现航迹控制。这种方案的传递关系是: 从控制的起因上看, 有 $\eta(k) \Rightarrow \Delta\psi(k) \Rightarrow \delta(k)$, 从控制效果上看, 则有 $\delta(k) \Rightarrow \Delta\psi(k) \rightarrow 0 \Rightarrow \eta(k) \rightarrow 0$, 由舵角去顺序地控制航向误差 $\Delta\psi(k)$ 和航迹误差 $\eta(k)$ 。航迹分离控制方案的优点在于航迹和航向控制功能的相对分离, 不但便于这两种控制模式的相互转换, 而且便于在自动舵系统设计中充分利用航向操舵仪成熟的技术与丰富的研究经验^[118, 235, 320], 利于在软硬件开发中采用模块化结构。总之, 这种方案比较接近现阶段的航海实践, 较易于为海员理解和接受; 其缺点是控制精度略低。

综合控制(直接式控制)方案航迹舵用于对航迹进行高精度控制的场合, 如海底电缆敷设、探矿和扫雷等, 此时航迹控制器实际上是综合了分离控制方案中“航迹控制”与“航向控制”两部分的功能(图 1.1.4(b)), 它同时接收航线计划指令和由传感器送来的船位及航向反馈信号, 输出舵角控制命令信号, 同时达到 $\delta(k) \Rightarrow \eta(k) \rightarrow 0$ 和 $\Delta\psi(k) \rightarrow 0$ 的效果, 故控制过程是 SIMO(单入双出)的^[79, 80]。其缺点是系统调试的难度增大, 运行灵活性不足。

当前国际市场上, 间接控制型航迹自动舵产品有东京计器公司(Tokyo Keiki Co.)的 PR-700 和 PR-800, Sperry 公司的 ADG 3000 VT 和 ADG 6000 等, 它们直接借用自适应航向自动舵的经验, 配以航迹规划和导航计算功能, 算法成熟, 技术简单可靠, 成为主流产品。直接控制型航迹自动舵产品可举出 Anschutz 公司的 NPA-W1, 利用多变量最优控制和 Kalman 滤波技术, 控制精度较高。我国目前尚无航迹自动舵定型产品, 有赖于今后理论研究和产品开发两方面的努力。

5) 航行综合监视与控制 在船舶自动化领域, 先进的控制手段历来是为实现节能、减少船员定额和保证安全航行服务的。20 世纪 80 年代, 节能和减少定员一度成为考虑的主要方面, 目的是为了获取更高的营运利润。90 年代初, 观念有了明显的更新和变化, 航行安全受到突出的重视, 原因有如下几个方面: 其一, 1992 年一年时间世界范围内接连出现一艘大型油船触礁和一艘 VLCC(Very Large Crude Carrier)碰撞的恶性事故, 造成严重的海洋环境污染, 事故起因主要是操作人员判断失误与操作不当^[211]; 其二, 一人驾驶台体制已成为现实, 船员编制已可减到六人, 在一位驾驶人员监视与操纵下船舶能随意航行于各海区和港口, 经济性大幅度提高^[21], 保证此类船舶的航行安全, 无疑至关重要。这些因素促进了先进的航行监视与控制系统的发展, 不妨将这类系统统称之为综合驾驶台控制系统(Integrated bridge control systems)。

综合驾驶台控制系统的关键技术是通过微机局域网(LAN, Local Area Network)把航海自动化子系统、轮机自动化子系统、货物装卸自动化子系统甚至船舶营运管理子系统全部纳入一个统一的层次更高的框架之内, 由 LAN 存储、管理所有的重要信息和数据, 并以适宜、鲜明、简捷的形式(文字、曲线、图形)把那些最关键的航海、轮机系统自动运行的信息提供给值班驾驶员, 使他一目了然地把握全船动态, 并把主要精力放在注视航行海域环境的变化并执行某些必要的操纵, 以达到真正的安全。可见, 这种综合驾驶台控制系统实质上是面向操作人员的监视和操纵行为的, 是在他们进行决策时提供有效支持的系统, 故有些日本厂家称之为超级先进的船舶运行支持系统(Super Advanced Ship Operation Support System, ASOS)^[211, 212]。

综合驾驶台控制系统可举出如下一些实例:

(1) 丹麦 Lyngso-VAMLET Marine 公司的综合船舶控制系统^[21], 该系统涉及航海和轮机自动化系统的全面管理, 尤其以机舱各种自动化系统的管理为重点, 包括主机遥控、可调螺距

螺旋桨控制、舵机系统控制以及燃油、淡水、空气、滑油等子系统的监控。其计算机局域网是自行设计的,称为 Stella-Net,属于总线型网,细微地考虑了海上环境的特点,其分布式的监控管理处理器分为两类:面向过程监视和控制的处理器称为 α 单元,而作为高层管理的处理器则称为 β 单元。

(2)英国 RACAL-DECCA 公司的 MIRANS (Modular Integrated Radar And Navigation System)是一个综合性的航海和航行管理系统(Navigation and voyage management),其特点为:一人驾驶台功能,所谓的 One man, one system;一眼看出危险所在(At a glance threat assessment);电子海图上叠加雷达跟踪目标;精美的现场动态画面(Live situation report);燃油消耗最优控制以及机舱报警功能等。

(3)美国 Sperry 公司的 VMS 航行管理系统是一个以综合管理航海方面的导航与避碰操作为主的计算机局域网系统^[215],称之为 Sea-Net,为提高通用性,网络服务器和 workstation 全部采用 IBM 个人计算机,网络结构早期采用环形网,通信协议为 IEEE 802.5 令牌环标准;后来改成星形网,操作系统也从 DOS 改成 Windows NT,这使得系统的性能有显著提高,技术开发也更为方便。该 VMS 系统的构成与主要功能示于图 1.1.5。(a)高层规划与任务协调由一个

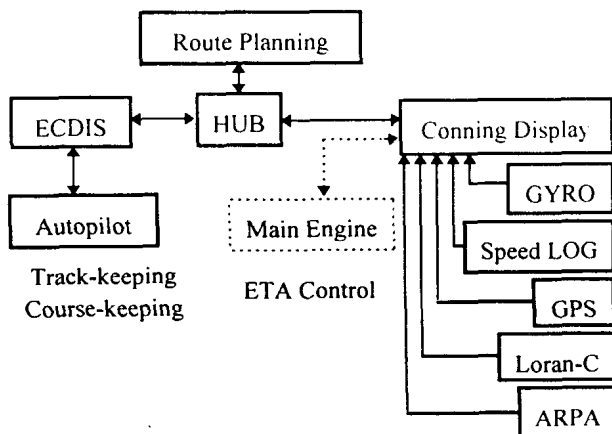


图 1.1.5 一种典型的综合航海控制系统

工作站(Route planning)完成:驾驶人员在此用键盘输入转向点(Way points)经纬度进行航线设计和修改;规划自动操舵仪的控制模式(航向/航迹控制)和主机控制系统的工作模式(是否采用预计到达时间(ETA, Estimated Time of Arrival)控制);在附属的海图生成仪上扫描纸海图以生成简易的电子海图;监控航海数据的记录与重放等。(b)电子海图显示信息系统由第二台工作站(ECDIS)实现,该子系统一方面通过网络中继站(HUB)与其他工作站交换信息,以获得设定航线数据、本船和目标船的运动状态数据;另一方面要对这些数据进行加工,计算出自动操舵仪所需要的设定航向 ψ ,并通过串行通信手段将此信息传送给自动舵。(c)第三台工作站(Conning display)负有多项任务:将各种航海传感器送来的 NMEA 0183 量测信息经多串口板输入本机,并经网络传送到另外两个工作站;在其屏幕上给出多种画面,分门别类地示出本船的运动状态(航向、航迹、船位、目前的航迹段数、距下一个转向点距离、已航行里程数、装载吨位数……)及环境条件(相对风向、风速;绝对风向、风速……);在预计到达时间控制模式下对主机进行监控。

(4)笔者曾对综合航海控制系统做过一些实验室研究,参见文献[314],[317],[338],[386],进一步的工作仍在继续中。

1.2 船舶运动控制研究的基本问题

船舶动态具有大惯性特点,万吨级油船的时间常数可达 100 s 以上,对动舵的响应缓慢,

某些开环不稳定船舶甚至存在着对操舵的反常响应(在一定舵角界限内打右舵船头反而向左转),其控制更为困难;在操舵伺服子系统中存在着时滞和继电器特性等非线性因素,这是采用某些线性控制理论所设计的自动舵控制算法之效果与研究者的期望相差甚远的根本原因;航速变化和装载增减造成船舶质量、惯性矩、重心坐标发生变化,引起各种流体动力导数相应改变,最终导致船舶运动数学模型的参数甚至结构产生摄动(Perturbation),这就是研究者甚感棘手的不确定性,上述在自动舵设计中被忽略的舵机伺服子系统的那部分非线性因素是不确定性的一个典型例子;风、浪、流的存在不仅如前所述会造成对船舶运动的附加干扰动力(风的低频干扰动力和浪的高频干扰动力),从实质上讲,这些干扰最终也转换成船舶模型的参数和结构的摄动,即干扰同样引起不确定性,Källström 和 Åström 对此曾做过深入的分析^[115,116]。在对船舶运动进行闭环控制时,获得反馈信息的量测手段也不可能是完善的,一些重要的量测数据例如航向、船位等都有一定的误差,后者呈现为一种随机噪声,因而我们不得不面对量测信息的不精确性。

一个控制器如果在被控过程处于标称条件(Nominal condition)下(即过程模型不存在不确定性、环境无干扰、量测无误差)使闭环控制系统稳定,则称该系统具有标称稳定性;如果此时闭环系统的动态性能也满足规定的要求(例如满足关于动态误差、静态误差、最大超调量、上升时间和调节时间的要求,或满足关于综合反映这些指标的某种范数——例如 H_∞ 范数的要求),则称该系统具有标称性能。满足标称性能自然较满足标称稳定性要前进一步,但并不能真正解决实际问题,因为客观世界是复杂、多变的,不存在没有不确定性、干扰、不精确性的被控过程及量测手段。

一个控制器如果能够在被控过程存在不确定性、干扰及量测不精确性条件下使闭环控制系统稳定,称该系统具有鲁棒稳定性(Robust Stability);若在此基础上系统同时满足规定的性能指标,则称之为具有鲁棒性能(Robust Performance),显然,这是研究者追求的最后目标和闭环系统的最终境界。以上定义较 Skogestad 的著作^[214]略有扩展。

一个控制器如能保证闭环控制系统同时具有标称稳定性、标称性能、鲁棒稳定性、鲁棒性能,则它是鲁棒控制器或者说该控制器具有鲁棒性(Robustness),控制器的鲁棒性离不开具体的被控过程和具体的不确定性界限。图 1.2.1 以框图形式表示以上的定义,图中 P_0 为标称模型, K_0 为标称控制器, $P = P_0 + \Delta$ 为摄动后的模型, Δ 为加性不确定性(Additive uncertainty), K 为鲁棒控制器。

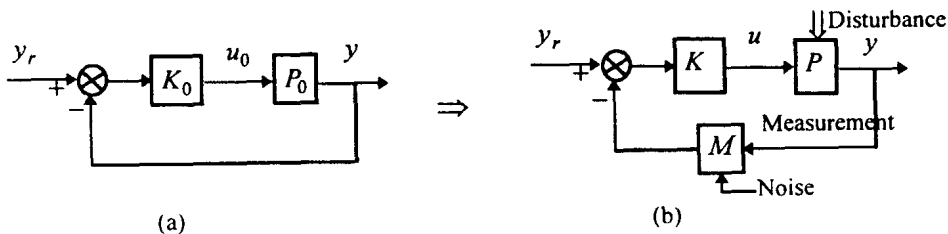


图 1.2.1 鲁棒控制器的定义

船舶运动控制器所依据的理论可以不同(见 1.3 节),但是它必须使闭环控制系统获得鲁棒性能,这是船舶运动控制研究应予考虑的基本问题,也是本书取材的主要依据。

1.3 船舶运动控制策略

控制策略是船舶运动控制科学的主要研究对象,曾吸引并正在吸引众多学者的注意力。从20世纪20年代到70年代,自动舵的PID算法延续了50年;70~80年代出现自适应控制并在自动舵商品化方面获得了成功,产生了明显的经济效益;90年代始,控制论的全面繁荣为船舶运动控制系统设计提供了诸多的新控制算法,如神经网络控制、模糊控制、多模态仿人智能控制、混合智能控制、 H_{∞} 鲁棒控制等都被不同程度地引入到自动舵研制之中,为船舶运动科学的进一步发展注入了活力。

本书作者及其同事们在过去十余年中曾尝试将多种现代控制策略应用于船舶自动操舵仪,包括最小方差控制和LQG控制等自适应控制策略^[107,108,110,111,319,320],广义预测控制^[302~309], H_{∞} 鲁棒控制^[274,275,318,378~385,387,388,390~393,396],不确定系统的鲁棒控制——变结构鲁棒控制和自适应变结构鲁棒控制^[368~373],多模态仿人智能控制^[107,336],神经网络控制^[106,112,312,315,322~328]以及模糊控制^[295]等。

尽管这些成果和经验表面上相当丰富,但是市场上出售的自动舵却是另一番景象:只限于PID自动舵及少量的自适应自动舵。这种反差一方面源于理论发现到工程实用不可避免地存在着一段时间滞后;另一方面也是因为海上环境的严酷促使人们优先采用成熟可靠的技术和产品,新的东西包括自动舵的新结果除了理论优秀之外,必须面对一系列实际问题,能经受住实践的检验,而这正是到目前为止大部分的“新成果”所欠缺的,它们一般只做到仿真阶段,而再好的仿真环境也难于完全真实地描述被控过程和海上环境的动态特性,所以从仿真结果令人满意到海上试航结果令人满意尚有相当的距离。要实现满足海上实航性能指标要求的产品化,所需的工作恐怕比初期的理论研究还要大数倍,这里面包括关于算法鲁棒稳定性和鲁棒性能的深入探讨、系统软件和硬件的安全监督、系统实现中的工艺可靠性保证等方面的问题;要真正制造出我国先进的自动操舵仪产品,实现研究单位、院校与生产厂家之间的密切合作和联合攻关,达到优势互补,将是必不可少的措施。

以下仅就笔者知识所及,对已有的重要工作给出一个简要的回顾和评价;最后对本书的基本内容做一个概述。

1)PID控制 PID控制简单、可靠,物理意义明显,目前仍被广泛地应用在实际工程控制中。自从20世纪20年代PID控制律应用于船舶航向保持控制以来,经典的PID控制逐渐发展成自整定PID控制、自适应PID控制、增益规划式PID控制、鲁棒PID控制等改进型算法,克服了经典PID控制参数整定困难、适应性差、鲁棒性差和控制精度较低等不足。

目前PID控制器设计方法大致可分为四类^[341]:第一类是PID参数根据经验整定或试凑获得,有些方法根据自学习原理或大量的实践经验发展成为PID自整定算法或专家系统整定方法;第二类是依据某种与误差有关的最优性能指标,通过优化指标值来完成设计,常见的指标有ISE、ITAE等;第三类是依据闭环系统极点位置来调节PID控制器的参数;第四类是基于特定的理论进行PID控制器优化设计,如基于 H_{∞} 控制算法的PID控制器设计^[273]和基于 μ 分析的鲁棒PID控制器设计^[341]。一般来说,第一类方法注意经验的学习,理论指导差一些;第二类方法注重系统的响应品质;第三类方法更多地考虑了闭环系统的内部特性;第四类方法强调了设计的PID控制器具有鲁棒性,但该类方法的特点是算法复杂,需要艰深的数学基础。

本章将重点介绍笔者发展的一种属于第二类方法的多重增益规划式 PID 航向保持算法^[328]。

实际航向保持的控制性能目标可大略描述为：

- (1) 静态性能：一般海况下航向控制精度在 $0.5^\circ \sim 1.0^\circ$ 范围内，恶劣海况下在 $1.0^\circ \sim 3.0^\circ$ 范围内；具备消除恒值干扰的能力。
- (2) 对装载、航速变化有鲁棒性；对天气变化有适应能力。
- (3) 能抑制海浪的高频干扰 ($0.3 \sim 1.25 \text{ rad/s}$)，并保证在 8 级风以下工作稳定。
- (4) 在转向时，一般海况下系统航向基本无超调 (小于 5%)，调节时间小于航迹引导的周期 ($30 \sim 60 \text{ s}$)。
- (5) 动舵次数少，幅度尽量小，以节约能耗，并减少舵机系统的磨损。

经典的 PID 控制器 $K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$ 利用比例系数 (K_p)、积分时间 (T_i)、微分时间 (T_d) 三个参数进行控制器整定。但是，这三个参数和过程的运行状态及环境变化之间的依存关系是不明朗的，操作人员需进行过程的某种动态试验 (例如飞升特性试验) 方能在所获数据 (例如对象增益、时间常数、纯迟延) 基础上进行参数整定，而对于像船舶这样的被控过程实时进行所述的试验是不现实的，因而驾驶员通常是按经验确定这些参数，很难达到满意程度，并且运行条件变动之后还须重新整定才能达到最优 (较好) 效果，故大多数情况下是根本不进行参数整定的。多重增益规划式 PID 控制是用与船舶航行状况及气候条件直接相关的“装载”、“天气”、“航速”三个参数取代经典的 K_p, T_i, T_d 参数，而把一系列计算过程让系统自行完成 (参见图 3.6.24 中的三个整定旋钮)；当航速由全球定位系统 (GPS) 自动计算时，实际上只需调整装载与天气两个参数，一方面整定参数减少，另一方面更主要是参数的含义清楚，这就大大简化了驾驶人员的操作，并可使航向保持效果达到最优，从实践上说，这无疑是前进了一步。在算法上，把最优控制理论、模型参数估计及适应式海浪滤波器结合起来就构成了增益规划式 PID 控制器。

(1) 最优控制 定义航向控制的二次型性能指标为

$$J = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0} \{ [\psi_r - \psi]^2 + \lambda \delta^2 \} dt \quad (1.3.1)$$

其中 λ 为加权系数； T_0 为大于调节周期的一段计算时间，利用 Nomoto 方程 (见第 2 章) 可组成状态空间型的船舶运动模型

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -\frac{1}{T} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K}{T} \\ 0 \end{bmatrix} \delta \\ \psi &= [0 \quad 1] \begin{bmatrix} r \\ \psi \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (1.3.2)$$

满足式 (1.3.1)，式 (1.3.2) 的最优控制器是 PD 型的，我们人为附加一个积分 (I) 控制，可得^[48]

$$\delta_r = k_p (\psi_r - \hat{\psi}) + k_d (r_r - \hat{r}) + \delta_i \quad (1.3.3)$$

且