

船舶舵阻横摇及其 鲁棒控制

Chuanbo Duo zu Hengyao Jiqi Lubang Kongzhi

杨承恩 贾欣乐 毕英君 编著



大连海事大学出版社

U661.32

船舶舵阻横摇及其鲁棒控制

Chuanbo Duo zu Hengyao Jiqi Lubang Kongzhi

杨承恩 贾欣乐 毕英君 编著

大连海事大学出版社

内容提要

利用舵来控制船的航向是人所共知的, 而利用舵来阻滞横摇则是一种较新的技术。

本书全面地介绍了舵阻横摇的理论及其在国内外研究发展的概况, 以及各种控制器设计的方法, 并且针对舵阻横摇的模型摄动问题, 着重介绍了 μ -鲁棒控制算法与 μ 综合及其它它们在阻摇控制中的应用。

图书在版编目(CIP)数据

船舶舵阻横摇及其鲁棒控制/杨承恩, 贾欣乐, 毕英君编著. —大连: 大连海事大学出版社, 2001.6

ISBN 7-5632-1466-6

I. 船... II. ①杨...②贾...③毕... III. 鲁棒控制—应用—船舶—横摇—控制 IV. U661.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 07991 号

大连海事大学出版社出版

(大连市凌水桥 邮编: 116026 电话: 0411-4728394 传真: 4727996)

<http://www.dmupress.com> E-mail: cbs@dmupress.com

大连海事大学印刷厂印装

大连海事大学出版社发行

2001 年 11 月第 1 版

2001 年 11 月第 1 次印刷

开本: 850 mm × 1168 mm 1/32 印张: 7.125

字数: 179 千 印数: 001~500 册

责任编辑: 杨子江 封面设计: 王 艳

定价: 20.00 元

本书由

大 连 市 人 民 政 府
大连海事大学学术著作出版基金

资助出版

The published book is sponsored
by
the Dalian Municipal Government
and
the Academic Works Publishing Foundation
of
the Dalian Maritime University

前 言

在保持船舶航向的同时用舵来阻摇的船舶控制问题早已提出。该项技术以它卓越的性能价格比受到了广泛的关注，但众所周知的舵阻摇效果与船舶模型的不确定性高度相关的问题制约了舵阻摇技术的应用与推广。对此本书给出了 1 种应用鲁棒理论来解决该问题的方法。

本书分为两部分，即船舶舵阻摇和鲁棒控制。

第一部分介绍了船舶舵阻摇的基本概况。第一章介绍了船舶阻摇的发展历史和现状。第二章从船舶动力学出发讨论了船舶模型的建模技术，建立了两类船舶数学模型：用于控制器设计的线性模型和用于仿真的非线性模型。此外还讨论了船舶模型的不确定性问题。第三章着重讨论了与船舶横摇密切相关的大海浪模型。第四章介绍了一些用常规算法设计的舵阻摇控制器。

第二部分为鲁棒控制部分，主要介绍鲁棒舵阻摇控制器的设计。作为鲁棒控制器设计的基础，笔者在第五章和第六章概述了空间和范数等必要的数学工具及 H_2 控制理论，并介绍了 μ 综合和 $D-K$ 迭代方法。在第七章中，针对非结构化的模型不确定性问题，利用混合灵敏度方法分别设计了 3 种不同控制模式的控制器，模拟海上条件的仿真结果表明所有这 3 种控制器都具有良好的鲁棒稳定性和品质。对所有的控制器，其减摇率都超过 35%，而对其中的串联控制器，减摇率更是高达 70%。

对于结构化的模型不确定性问题，在第八章里通过 $D-K$ 迭代设计了 1 种 μ 控制器。在仿真的过程中该控制器显示出了优良的鲁棒品质。这突出表明了 μ 控制器对模型不确定性所表现出的优越性，在全面考虑了各种变化的前提下，减摇率仍高达 50%。

在本书的写作过程中得到了许多朋友和同事的大力帮助，

在此谨向他们表示衷心的感谢。首先要感谢 Mogens Blanke 教授所给予的热情支持和指导，其次要感谢那些在大连海事大学轮机工程研究所以及 Aalborg 大学控制工程系的全体同事和朋友们，尤其是对 Palle Andersen 教授、Jakob Stoustrup 教授和王兴成教授在鲁棒控制问题上所给予的大力帮助表示衷心的感谢。同时也要感谢意大利 Pavia 大学的 Antonio Tiano 教授在船舶非线性模型的建立方面所给予的帮助。

本书可供船舶工程类专业和控制类专业的高年级本科生、研究生作为船舶运动控制方面的教材和参考书，也可供船舶运动控制方面的研究和设计人员参考。

由于作者学识有限，书中难免有错漏等不足之处，敬请读者批评指教。

作 者

2001 年 5 月

于大连海事大学

目 录

第一部分 舵阻摇理论.....	1
第一章 船舶阻摇控制的历史及现状.....	1
第一节 问题的提出.....	1
第二节 舳龙骨、减摇鳍、减摇水舱和阻摇舵.....	3
第三节 近年来舵阻摇的研究.....	9
第四节 舵阻摇的发展及对未来的展望.....	11
第二章 船舶模型.....	13
第一节 船舶运动方程分析	13
第二节 船舶稳定性.....	21
第三节 附加质量和附加惯性矩	27
第四节 船舶运动方程.....	29
第五节 模型不确定性.....	32
第六节 舵机模型	35
第三章 海浪.....	40
第一节 海浪的基本描述	40
第二节 标准波浪谱.....	44
第三节 船舶对波浪的响应	50
第四节 作为遭遇角函数的横摇角	55
第五节 线性海浪模型.....	56
第六节 基于观测器的海浪滤波器	59
第四章 舵阻摇控制.....	66
第一节 用极点配置方法设计的舵阻摇控制器.....	66
第二节 最优舵阻摇控制器设计	71
第四节 具有海浪滤波器的 PID 控制器	82
第五节 基于神经网络控制器的舵阻摇控制器.....	85
第六节 ROLL-NIX 舵阻摇控制器简介	92

第二部分 舵阻摇鲁棒控制	95
第五章 向量空间和范数理论	95
第一节 特征值和特征向量	95
第二节 向量范数和矩阵范数	97
第三节 奇异值	104
第四节 函数空间	109
第五节 系统范数	115
第六节 小节	117
第六章 鲁棒稳定性和鲁棒品质	119
第一节 模型不确定性及鲁棒控制概述	119
第二节 标称稳定性	124
第三节 标称品质	125
第四节 鲁棒稳定性	127
第五节 鲁棒品质	131
第六节 一般控制问题	135
第七节 混合灵敏度方法	139
第八节 结构化奇异值	142
第九节 μ 综合	147
第七章 用混合灵敏度方法设计鲁棒控制器	154
第一节 并联控制	156
第二节 具有海浪滤波器的并联控制器	164
第三节 串联控制器	170
第四节 多变量控制器	177
第五节 小结	180
第 8 章 用 μ 综合设计鲁棒控制器	183
第一节 用于 $D-K$ 迭代的船舶模型结构和参数	183
第二节 迭代过程	187
第三节 仿真结果	194

总 结	197
附 录	202
符号表	202
缩 写	204
参考文献	205

第一部分 舵阻摇理论

第一章 船舶阻摇控制的历史及现状

第一节 问题的提出

自从机动船代替帆船成为主流船舶以来,由于船舶横摇阻尼力矩大幅度减小,使船在海面上航行时产生很大的横摇运动,因此人们想出了许多办法,设计了各种横摇阻尼装置来减小横摇。在客船上使用阻滞摇荡(阻摇)系统能使乘客减少晕船,保证愉快地旅行;应用在货船如滚装船或集装箱船上可以防止汽车碰撞、箱体损伤等货损现象发生。如果码放的货物由于横摇而翻倒会引起什么样的后果是可想而知的。另一个重要的因素是提高船员的工作效率。众所周知,从安全的角度出发,大的横摇会使乘员身体不适,引起晕船及过度疲劳,从而出现工作失误。而对于军舰来说,则会影响某些操作(如直升机的起降)和士兵的工作效率。因而减摇是船舶控制的一个重要的研究领域。

如果恶劣的海况使船舶产生了不必要的运动,很自然地我们就设法采取某些措施来抵消或是减少这些运动。这些方法通常称为“镇定”(stabilization),但我们应注意这种称谓是不确切的。Lloyd(1989)指出,在船舶设计中已保证了所有运动的稳定性,即船舶在小的扰动作用后会逐渐趋向它原来的平衡位置。这体现在二阶船舶(横摇)运动模型中具有正的恢复系数。如采用术语“镇定”意味着要增加

该恢复项系数,而实际上抑制船舶横摇却是通过增加系统的阻尼系数来实现的,因而将抑制船舶横摇运动称为阻摇则更为贴切些。

迄今为止,在船舶各向摇荡运动(垂荡、纵摇、横摇)中,仅有横摇运动得到了重视并被成功地阻滞。之所以如此是由于船舶对于横摇通常具有内在的低阻尼特性,在船舶运动中预期会出现剧烈横摇的谐摇区,使船舶的安全受到威胁,因此横摇受到人们的重视。在船舶运动中对横摇的处理方法相对简单,只须施加中等程度的作用力就足以形成充分的阻尼力矩。然而垂荡和纵摇的谐摇条件却不像横摇运动那样明确,而且为阻摇所需的作用力也相当大,因而难以解决。

在阻摇的研究中,真正具有重要意义的是强制摇荡运动。从摇荡运动的方程中可以看出,减少摇荡运动可以通过 3 种不同的途径来实现(Bhattacharyya, 1978)。

一、增加阻尼系数

这种方法称为“阻尼阻摇”。由于阻尼的物理意义是指能量的耗散,这种阻摇方式对于自由振荡,尤其是在谐摇区(此时阻尼的作用最为明显)是有效的。舳龙骨就是这样一种用来阻滞横摇的阻尼装置。

二、减小船舶固有频率(即加大固有周期)

减小船舶固有频率从而使调谐因子(turning factor, 船舶遭遇频率与船舶固有频率之比)远大于 1。这种阻摇方式称为“调谐阻摇”;它只对强制振荡有效。但实际的海面上有着各种频率的波浪,改变船舶固有频率的做法并不切合实际,因为改变后的固有频率可能会碰上具有不同幅值但相同频率的波浪,同样会产生大的谐摇。

三、直接减小扰动力或力矩

这种方式称为“平衡阻摇”。在原则上它可以适用于所有的摇荡运动。在这种情况下,施加一个与扰动力矩相位相反的力矩可以抵消部分(或全部)扰动力矩,但是这种阻摇方式的效率完全取决于

控制设备的有效程度。虽然平衡阻摇这一方式主要用于强制振荡,但它对自由振荡也同样有效,减摇鳍和舵阻摇均属于这种阻摇方式。

综上所述,从阻摇的观点来看,因为横摇所涉及的力和力矩都比较小,所以横摇运动是可以得到成功的控制的。

控制横摇作为一门学科其历史已愈百年,在这期间尽管先后出现过约 350 多种阻摇装置或控制横摇运动的措施,但得以应用到实际中的不到 20 种,以下是其中的一些例子:

- a. 舳龙骨 b. 减摇鳍 c. 减摇水舱
- d. 阻摇舵 e. 陀螺稳定器 f. 移动重物
- g. 喷水襟翼

对于一个具体的阻摇装置来说,不仅要考虑它的阻摇效果(减摇率),而且需要考虑它在船体内所占空间的大小,对航速的影响以及建造、运行和维护的成本,对于军用船舶还应考虑噪声问题。出于经济上的考虑,上面提到的一些装置现在已不再使用,而其他的虽然从技术上看并不一定是最有成效的,但仍在继续使用。下面我们将简短地介绍前 4 种方法并在它们之间作一个比较。

第二节 舳龙骨、减摇鳍、减摇水舱和阻摇舵

一、舳龙骨

舳龙骨是形式最简单的阻摇装置,它首次出现于 1870 年。如图 1.1 所示,它们是一些垂直安装在船体舳部或其附近的鳍板。

由于船舶横摇运动在舳龙骨板的正、背面产生压差,形成了与横摇运动相反的阻尼,阻滞了船舶的横摇。一般来说,舳龙骨的面积越大,其横摇阻尼也就越大,但同时也会产生一些不利影响,如船舶的静水阻力增加、船舶靠离码头发生困难等。所以通常设计舳龙骨的长度是船体长度的 20% ~ 50%,而宽度为船宽的 3% ~ 5%。

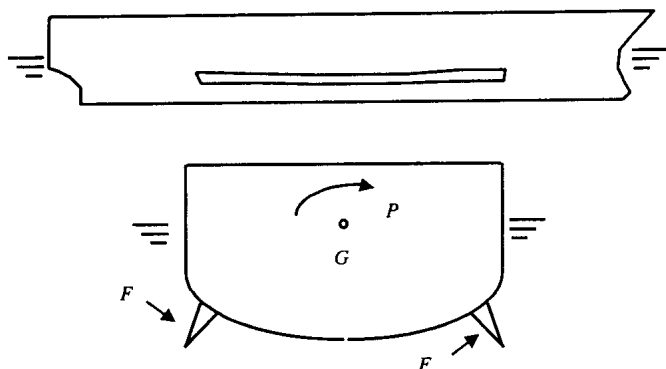


图 1.1 舭龙骨示意图

舭龙骨在各种速度下都是非常有效的阻摇装置，大约能减少 25% ~ 50% 的横摇幅度。特别是当船在波浪中谐摇时能有效地阻摇。横摇越剧烈，它产生的阻尼力矩越大，阻摇效果越明显。与其他的阻摇方式相比较，舭龙骨的显著优点是没有运动部件，且除了通常所做的清除船体表面的维护外无需其他维护。它惟一的缺点是增加了船体的阻力，但是这可以在设计安装时通过仔细地选择舭龙骨相对于舭部流体流线的位置来使这个阻力减到最小。这通常需要在设计阶段，在模型上使用某种流体可视技术来完成。正确地定位仅是相对一个速度而言的(通常选择的是巡航速度)，但阻力损失在其他速度下并不大。其静水航速减小一般不超过基本阻力的 2% ~ 3%，在波浪中影响还要小些。考虑到以上特点，所有的海船几乎都加装了舭龙骨，所以它已成为海船船体的一部分。

二、减摇鳍

减摇鳍是一种非常有吸引力的阻摇装置。如图 1.2 所示，它们通常安装在船体中部舭部的弯曲部位，至少由 1 对可转动的鳍组成，左右舷各 1 个。减摇鳍的攻角可由对船舶横摇运动非常敏感的控制系統连续调节，一侧向上运动则另一侧向下运动。2 个鳍对船舶重心产生 1 个力偶，如刚好与波浪产生的力矩相反则横摇就会减少。在航速为 10 ~ 15 kn 时，减摇鳍可能是最有效的阻摇方法。对于一

个精心设计的阻摇系统，降低 50% 的横摇是不成问题的。

减摇鳍的缺点是，随着船速的降低，减摇鳍的效率也跟着下降，因而通常都不在低速运行的船舶上安装减摇鳍。同样减摇鳍的阻摇能力是有限的，在恶劣的海况下它的阻摇能力也要下降。减摇鳍的结构复杂而且价格不菲，并且需要经常维修保养。不过由于它们可以在相当宽裕的条件范围内有效地阻摇而被普遍认可，因而现在很多船上都安有减摇鳍。

可缩式减摇鳍通常都安装在商船上。当船航行在风平浪静的海面上时，这种鳍可缩进船体内以消除它们产生的阻力。这个特性同样可以用来避免当船航行在狭水域或靠近海岸时造成触礁或擦底。可缩式减摇鳍一般都具有高的展弦比(aspect - ratio)，从水动力学的观点来说非常有效，对于同样的鳍面积来说会产生相对大的升力。在军舰上一般都安装不可缩的减摇鳍。它们应能承受由爆炸引起的强烈振动，因而在安装时要求不超出在以最大船宽和船底限定的矩形内(见图 1.2)。这样就限制了鳍的面积和它的展弦比，因而其效率不如可缩式来得高。减摇鳍另外的缺点是产生额外的拖曳和水下噪声，而后者对军舰来说则是致命的。

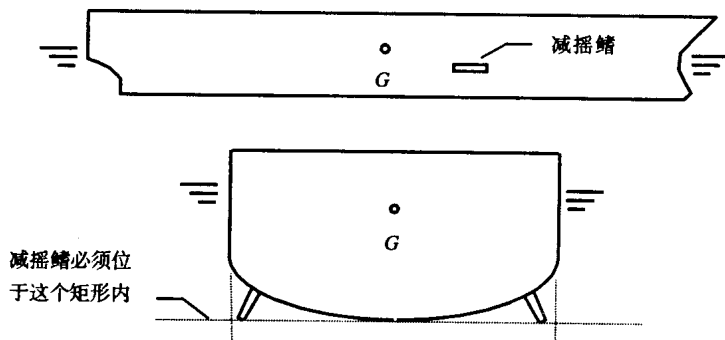


图 1.2 减摇鳍示意图

减摇鳍由 JohnI Thornycroft 于 1889 年首次提出并申请专利。但是作为实用的第 1 套阻摇装置则是由日本的元良信太郎在 1923 年设计的，而英国的 Denny-Brown 公司和德国的 AEG 公司又在此基

础上做了大量的改进，形成了现今流行的减摇鳍。

三、减摇水舱

当船的 1 个水舱里装了部分液体时，随着船的横摇它就会从左舷流到右舷又从右舷流回左舷。这些移动液体的重量对船就会产生 1 个横摇力矩。经过恰到好处的设计就可以利用这个力矩来阻滞船的横摇。图 1.3 给出了一些目前常见的减摇水舱的形式。最简单的就是横跨船身的具有自由液面的矩形水槽。有时也可通过在水槽中部安装 1 个挡板或阀门来对水流稍作控制。

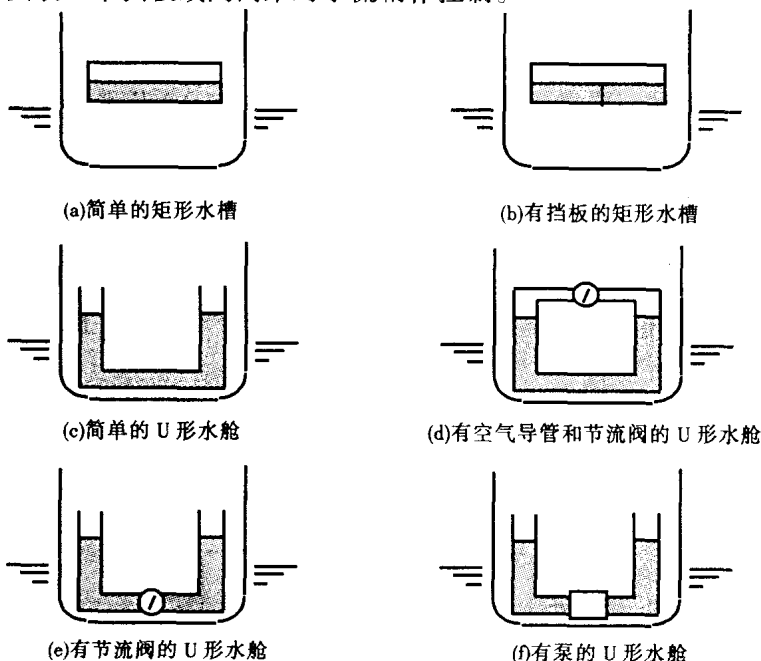


图 1.3 几种常见的减摇水舱

很多船上安装的不是矩形水槽而是 U 形水舱，这种水舱的自由液面被限制在水舱的 2 个臂里面，而这 2 个臂的底部由一水平导管连接。这 2 个垂直臂的顶部可以是暴露在空气中呈开放式的，也可以由一水平的空气导管相连接。在后一种情况下，可安装 1 个节流阀来对液体的流动施加控制。有时人们也在底部的导管上安 1 个节

流阀或泵。

减摇水舱在船舶低速航行时是非常有效的,但在船舶高速航行时则不如减摇鳍。因此减摇水舱一般都安装在测量船或是气象船等大部分时间是在锚泊作业的船上。

减摇水舱的优点是除了泵或节流阀外它没有活动部件,并且几乎不需要维护。显而易见的是它还不会产生像舭龙骨和减摇鳍所引起的阻力损失。其缺点是它们占据了船体中相当大的体积,但这些舱可以用来装淡水或是燃油从而弥补船舱体积减小所造成的损失。水舱在船中的最佳位置 and 高度还经常造成船舶内的通行障碍。

减摇水舱的主要缺点是它的自由液面总是要降低船舶定倾中心高度使得横摇稳定性减少,由此造成船舶在遭遇低频率海浪时的横摇运动增大。在特定的情况下,这种增大可能产生严重问题因而必须将水舱排空或是充满使它失去作用。这需要花费大量的时间。所以减摇水舱并不适用于那些需频繁变更航向的船舶(例如军舰)。

减摇水舱最早在 1874 年就开始出现在船舶上。当时使用的是自由液面水舱,阻摇效率更高的 U 形水舱是由 Frahm 于 1910 年研制的。而主动式 U 形水舱则是德国西门子公司于 1934 年在 Frahm 的设计基础上改进而成的。

四、阻摇舵

船的横摇实际上是由风、浪等外部作用力对船体所施加的变化的力和力矩产生的。但是横摇同样也可以由舵的运动引起。当转舵变更航向时会使船倾斜。这是因为在转舵后,水流在舵叶两侧产生的压力不同而形成了一个力,这个力称为舵力。由于舵叶的面积相对船体来说很小,因而这个力也很小。不过因为舵叶一般都安装在船体尾部的下方,距船体的重心很远,它的力矩却很大。舵叶至重心的水平距离形成的转向力矩使船产生转向运动。舵叶至重心的垂直距离形成的转向力矩则使船产生向转舵方向的横倾(内倾)。船舶转向时的回转运动还将产生一个离心力,这个力使得船向转舵反向横倾(外倾)。在船转向初期,因重心轨迹的曲率半径很大,故离心

力与舵的横倾力相比很小，船向内倾。当船在圆航(转向)时，离心力远大于舵的横倾力，船外倾且倾角较大。若在持续转向时突然操反舵，使舵力变向，离心力与舵力同向，由此产生更大的横倾角。舵阻摇就是要巧妙地利用舵所产生的横倾来抵消或部分抵消由风、浪等外力产生的横倾。

用舵来阻摇和减摇鳍相比，初期投资少，具有几乎相同的效果并且在系统关闭后不会产生拖曳和水下噪声。可是用舵阻摇需要有相对快速的舵才能有阻摇效果，舵速的典型值一般是 $\dot{\delta}_{\max} = 5 \sim 20^\circ/\text{s}$ ，这意味着舵机的功率应足够大。另一个缺点就是舵阻摇在船速较低时就不那么有效了。

表 1.1 几种常用船舶阻摇系统的比较 (Sellars 和 Martin, 1992)

阻摇系统 类型	一般应用 范围	减摇率/ %	价格/ \$ × 1000	安装	备注
减摇鳍 (small fixed)	大型游艇; 海军辅助舰艇	90	100 ~ 200	附着在船体上; 安装动力和控制 电缆	速度损失; 水下噪声; 最大面积约 2 m ²
减摇鳍 (retractable)	客船; 渡船; 海军战斗舰艇	90	400 ~ 1500	附着在船体上; 安装动力和控制 电缆	面积从 2 m ² 到 15 m ²
减摇鳍 (large fixed)	海军战斗舰艇	90	300 ~ 1300	附着在船体上; 安装动力和控制 电缆	速度损失; 水下噪声
水舱 (自由液面)	工作船; 小 型客货船; 渡船	75	30 ~ 50	安装钢制构件; 安装动力和控制 电缆	需要液面监视器
水舱(U形管)	工作船	75	200 ~ 300	安装钢制构件和 管道、阀门; 安装动力和控制 电缆	应具有横倾控制 系统
阻摇舵	小型高速船 舶	50 ~ 75	50 ~ 250	动力和控制电缆	新近发展的; 需 要强有力的操舵 机构
舵龙骨	通用	25 ~ 50		附着在船体上	速度损失