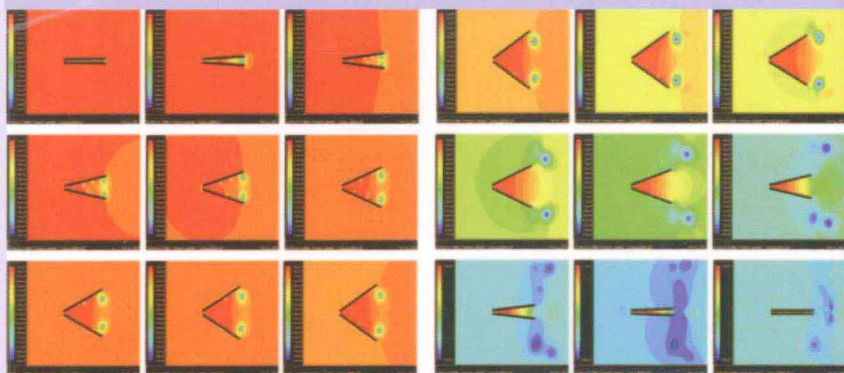




● 王宇 著

系泊状态船舶横摇 减摇装置与系统

Roll Stabilization Devices and Systems
of Mooring Ship



 辽宁科学技术出版社
LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

辽宁省优秀自然科学著作

系泊状态船舶横摇 减摇装置与系统

王宇 著

辽宁科学技术出版社

沈 阳

© 2013 王宇

图书在版编目(CIP)数据

系泊状态船舶横摇减摇装置与系统 / 王宇著. —沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2013.11
(辽宁省优秀自然科学著作)
ISBN 978-7-5381-8335-1

I. ①系… II. ①王… III. ①船舶减摇装置
IV. ①U664.7

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第256685号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路29号 邮编: 110003)

印刷者: 沈阳新华印刷厂

经销者: 各地新华书店

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 17

字 数: 368千字

印 数: 1~2000

出版时间: 2013年11月第1版

印刷时间: 2013年11月第1次印刷

责任编辑: 郑 红 李伟民

特邀编辑: 王奉安

封面设计: 嵘 嵘

责任校对: 刘 庶

书 号: ISBN 978-7-5381-8335-1

定 价: 50.00元

联系电话: 024-23284360

邮购热线: 024-23284502

<http://www.lnkj.com.cn>

《辽宁省优秀自然科学著作》评审委员会

主 任：

康 捷 辽宁省科学技术协会党组书记 副主席

执行副主任：

黄其励 东北电网有限公司名誉总工程师

中国工程院院士

辽宁省科学技术协会副主席

副主任：

金太元 辽宁省科学技术协会副主席

宋纯智 辽宁科学技术出版社社长兼总编辑 编审

委 员：

郭永新 辽宁大学副校长

陈宝智 东北大学安全工程研究所所长

刘文民 大连船舶重工集团有限公司副总工程师

李天来 沈阳农业大学副校长

刘明国 沈阳农业大学林学院院长

邢兆凯 辽宁省林业科学研究院院长

辽宁省科学技术协会委员

吴春福 沈阳药科大学校长

辽宁省科学技术协会常委

张 兰 辽宁中医药大学附属医院副院长

王恩华 中国医科大学基础医学院副院长

李伟民 辽宁科学技术出版社总编室主任 编审

前 言

船舶在风浪中不可避免地会产生各种摇荡,其中以横摇最为显著,影响也最大。船舶在系泊或低航速状态下,当涌浪周期接近船舶自然横摇周期时,船舶摇摆比航行时更为剧烈。然而,只有船舶的航速较高时,常规减摇鳍才可以有效地减摇;船舶在低航速或零航速情况下,由于流过鳍表面的水流速度为零,鳍上升力也将消失,因而此时减摇鳍几乎不能进行减摇。对于在低航速或系泊状态下仍需要减摇的船舶来说,传统的减摇鳍就不再适用了。随着船舶减摇技术的发展,人们对系泊状态时船舶的减摇能力提出了新的期望。减摇水舱一直是系泊状态船舶减摇的唯一选择,而减摇水舱减摇能力有限,有时甚至出现增摇现象。在减摇领域,零航速减摇鳍技术开发成为人们关注的问题,于是人们提出了零航速减摇鳍的概念。

本书研究基础来源于国家自然科学基金项目“零速下船舶仿生减摇鳍升力机理的研究(50575048)”以及哈尔滨工程大学“211”工程重点建设项目“减摇水舱试验装置研究”和“升力控制减摇鳍”等项目。主要研究内容是减摇水舱在系泊状态下的减摇原理,基于仿生流体力学研究在零来流流场中,依靠减摇鳍主动摆动产生升力的机理,建立船舶零航速仿生减摇鳍的升力模型。

本书首先在分析减摇水舱控制机理的基础上,根据最优控制原理,提出了可控被动式减摇水舱的最佳控制,给出了最佳控制的实现方法;研究了主动式减摇水舱控制器的设计及确定水舱主动力的方法;对被动式、可控被动式和主动式减摇水舱系统进行了仿真分析。

本书在广泛调研国内外仿生流体研究包括昆虫、鸟类飞行和鱼类巡游推进机理的理论研究、实验研究、数值模拟和模型研制的基础上,把零航速减摇鳍升力产生模式与昆虫悬停、鸟类飞行及鱼类摆动鳍、尾推进模式作为研究对象,采用理论分析、仿真计算和数值模拟相结合的研究方法,建立了可变弦长 Weis-Fogh 减摇鳍升力模型和单鳍仿生翼纵摇耦合升沉零航速减摇鳍升力模型;论证了两鳍片间的间隙对 Weis-Fogh 减摇鳍升力特性的影响;定义了升力对间隙的敏感因子的概念;得出了间隙对减摇鳍弦长的无量纲因子不大于 10 时间隙对升力影响不大的结论,该结论可以作为实际设计中的参考。本书深入分析了所提出的两种零航速减摇鳍的运动特征和力学机理,结合船舶减摇控制技术,将升力控制引入船舶零航速减摇鳍控制系统中,进一步引入能量限制建立了船舶零航速减摇鳍控制系统。

单鳍仿生翼零航速减摇鳍升力模型是基于在非定常流场中对经典叶素理论进行修正,根据库塔—儒科夫斯基假设和船舶操纵性研究中广泛应用的“缓慢移动”假说而建

立的。从仿真研究结果可看出,随着各种运动参数如减摇鳍纵摇和升沉幅值、频率、相位角等的不同,升力特性也不同,但纵摇对升力的影响占主要地位,纵摇和升沉两种运动的相位角为 45° 时升力较大。

近年来,升力控制一直是船舶减摇技术的热点,将其引入船舶零航速减摇系统无疑是对船舶零航速减摇的又一发展。通过升力反馈和升力限位,对原有减摇鳍随动系统进行改进,建立了升力控制的船舶零航速减摇鳍控制系统。在不同海情 90° 浪向下的仿真研究结果表明,零航速减摇效果达到了60%以上,较减摇水舱不足的减摇效果有了很大提升。这说明建立的仿生减摇鳍升力模型和控制系统能够满足船舶零航速减摇的需要。

零航速减摇鳍要以特定规律运动,必须依靠伺服系统的驱动才能实现。升力产生的效果取决于伺服系统的性能。因此,需要确定哪些控制参数会对升力产生不可忽略的影响。最后分析了角度脉动和角速度脉动对升力的影响。由于海浪的随机扰动等因素的影响,对转鳍力矩的控制成为伺服控制的关键,最终确定伺服系统的控制方式采用空间矢量直接转矩控制,并建立了系统各部分的数学模型。针对空间矢量直接转矩控制存在的抖动问题,通过引入滑模变结构控制对其进行改进,提高了系统的稳定性。

本书的编写,结合了10多年的船舶特辅装置、船舶控制系统的研究,也参阅了大量的中外文献。感谢哈尔滨工程大学金鸿章教授以及404教研室的帮助,感谢綦志刚博士、罗延明博士、吉明博士、赖志昌博士、周挺硕士等在本书研究中作出的贡献。

真诚希望广大读者对本书中的错误与不妥之处提出批评指正。

王 宇

2013年4月

目 录

1 绪 论	001
1.1 研究目的和意义	001
1.2 船舶零航速减摇相关技术发展综述	002
1.2.1 舢龙骨	002
1.2.2 减摇水舱	003
1.2.3 减摇鳍	006
1.2.4 升力减摇鳍	008
1.2.5 零航速减摇鳍	010
1.3 仿生流体力学研究概况	013
1.3.1 Weis-Fogh 机构研究概况	013
1.3.2 扑翼理论研究概况	014
1.3.3 鱼类摆动尾鳍和胸鳍推进研究概况	016
1.4 主要研究工作	017
2 系泊状态船舶减摇理论研究	018
2.1 船舶横摇运动的数学模型	018
2.2 海浪的数学模型	019
2.2.1 海浪的基本特性与数学描述	019
2.2.2 海浪的波能谱	020
2.3 海浪作用下零航速时船舶的横摇响应	021
2.4 减摇水舱的减摇原理	022
2.4.1 减摇水舱工作原理	022
2.4.2 船舶—可控被动式水舱系统数学模型	025
2.4.3 系统方程求解	032
2.5 减摇鳍的减摇原理	038
2.5.1 传统减摇鳍的减摇原理	038
2.5.2 升力减摇鳍的减摇原理	039
2.5.3 零航速减摇鳍的减摇原理	043
2.6 零航速减摇鳍结构及减摇过程研究	046

2.6.1	Weis-Fogh 零航速减摇鳍	046
2.6.2	单鳍仿生翼零航速减摇鳍	048
3	减摇水舱控制方法研究	051
3.1	减摇水舱控制机理	051
3.2	可控被动式水舱水流控制阀的配置	052
3.2.1	水道中的水流控制阀	052
3.2.2	气道中的水流控制阀	052
3.3	气阀控制时舱内水的运动	053
3.4	可控被动式减摇水舱的控制输入	054
3.4.1	以边舱水位作为控制输入	055
3.4.2	以船舶横摇角作为控制输入	057
3.4.3	以船舶横摇角速度作为控制输入	057
3.4.4	以水舱连通道水的流动方向作为控制输入	057
3.5	可控控制式减摇水舱最佳控制方法	058
3.5.1	水舱最佳控制原理	058
3.5.2	最佳控制的实现方法	059
3.6	主动控制式减摇水舱	060
3.6.1	水舱主动力的确定	060
3.6.2	主动式水舱控制器设计	061
3.7	减摇水舱系统仿真	064
3.7.1	水舱固有频率对横摇运动的影响	064
3.7.2	可控被动式减摇水舱系统仿真	065
3.7.3	主动式减摇水舱系统仿真	068
4	减摇水舱系统设计	070
4.1	减摇水舱类型选取	070
4.1.1	被动式、主动式和可控被动式减摇水舱的选取	070
4.1.2	U形减摇水舱和自由液面减摇水舱的选取	071
4.1.3	闭式水舱和开式水舱的选取	072
4.2	减摇水舱垂直位置布置问题研究	072
4.2.1	垂向布置对船舶—水舱系统横摇质量惯性矩的影响	073
4.2.2	垂向布置对船舶—水舱系统横摇复原系数的影响	074
4.2.3	垂向布置对船舶横摇固有频率的影响	074
4.2.4	垂向布置对船舶和水舱耦合惯性矩的影响	075
4.2.5	垂向布置对船舶横摇和舱内液体运动的影响	075

4.3	减摇水舱固有频率的选取	077
4.3.1	被动式减摇水舱	077
4.3.2	主动式减摇水舱	078
4.3.3	可控被动式减摇水舱	078
4.4	U形减摇水舱尺度设计	081
4.4.1	减摇水舱尺度参数的确定	081
4.4.2	减摇水舱尺度设计程序	084
4.5	U形减摇水舱阻尼研究	085
4.5.1	水舱阻尼对减摇性能和相位的影响	085
4.5.2	阻尼产生原因及舱内流体运动状态分析	086
4.5.3	水舱阻尼的估算	087
4.5.4	减摇水舱阻尼结构设计	089
4.5.5	减摇水舱边舱液体晃动问题	091
5	减摇水舱半实物测量系统	093
5.1	减摇水舱测量系统	093
5.2	减摇水舱模型	094
5.3	测量信号和传感器	095
5.3.1	摆动油缸输出转矩信号	096
5.3.2	摇摆台转动角度信号	096
5.3.3	摇摆台转动角速度信号	096
5.3.4	边舱液位高度信号	096
5.4	液位变送器	097
5.4.1	边舱液位测量原理	097
5.4.2	液位变送器的安装	097
5.4.3	液位信号变换电路	098
5.5	气源	099
5.5.1	空气压缩机的选用	099
5.5.2	气源处理设备	100
5.6	气动电磁阀配置	101
5.6.1	闭式水舱气阀的配置	101
5.6.2	开式水舱气阀的配置	102
5.6.3	控制信号的隔离放大	103
5.7	减摇水舱模型性能试验应用软件结构	104
5.8	减摇水舱监控系统	104

6 改进的 Weis-Fogh 零航速减摇鳍研究	106
6.1 引言	106
6.2 两叶片间无缝隙 Weis-Fogh 零航速减摇鳍	106
6.2.1 固定弦长 Weis-Fogh 零航速减摇鳍流场分析	107
6.2.2 流体作用于固定弦长 Weis-Fogh 零航速减摇鳍翼上的力	111
6.3 叶片间缝隙对 Weis-Fogh 零航速减摇鳍升力的影响	114
6.3.1 有间隙 Weis-Fogh 机构减摇鳍环量计算	115
6.3.2 间隙对 Weis-Fogh 机构减摇鳍环量影响的分析	116
6.4 可变弦长 Weis-Fogh 零航速减摇鳍研究	117
6.4.1 可变弦长 Weis-Fogh 零航速减摇鳍升力特性研究	118
6.4.2 可变弦长 Weis-Fogh 零航速减摇鳍升力特性仿真研究	120
6.5 改进的 Weis-Fogh 减摇鳍数值模拟研究	126
6.5.1 Weis-Fogh 减摇鳍的数值模拟前处理	127
6.5.2 Weis-Fogh 减摇鳍的数值模拟结果	129
6.6 相关的流体力学基础理论及若干数学公式	130
6.6.1 流体力学基础理论	130
6.6.2 相关的数学公式	135
7 单鳍仿生翼零航速减摇鳍的研究	138
7.1 引言	138
7.2 无来流流场中鳍的运动规律及相关物理量的定义	138
7.3 升沉耦合纵摇减摇鳍升力模型研究	140
7.3.1 流场无旋运动作用力 F_n 的计算	141
7.3.2 流体惯性力 F_m 的计算	144
7.3.3 涡旋引起的附加作用力 F_v 的计算	146
7.3.4 升沉耦合纵摇减摇鳍升力仿真研究	147
7.4 单鳍仿生翼减摇鳍的数值模拟	156
7.4.1 数值计算前处理	156
7.4.2 数值计算结果分析	157
8 零航速减摇鳍伺服控制系统研究	167
8.1 控制参数对升力的影响	167
8.1.1 角度脉动对升力的影响	167
8.1.2 转速脉动对升力的影响	168
8.1.3 脉动产生的主要因素	169

8.2	伺服电动机控制方式的选择	170
8.3	电压空间矢量及其选择方式	171
8.3.1	电压空间矢量及其对定子磁链的影响	171
8.3.2	电压空间矢量对电动机转矩的影响	173
8.3.3	电压空间矢量的选择	174
8.4	直接转矩控制的基本结构和工作原理	176
8.4.1	直接转矩控制的基本结构	176
8.4.2	转矩调节	176
8.4.3	磁链调节	177
8.4.4	磁链运行区间判断	179
8.4.5	电压开关状态选择	179
8.5	转矩和磁链的观测模型	180
8.5.1	转矩观测模型	180
8.5.2	磁链观测模型	180
8.6	传统直接转矩控制的脉动分析	181
8.6.1	磁链幅值控制的脉动分析	181
8.6.2	转矩控制的脉动分析	182
8.7	改进的直接转矩控制	184
8.7.1	SVM-DTC 控制设计	184
8.7.2	定子磁链幅值控制的收敛性分析	186
8.7.3	转矩控制的收敛性分析	187
8.7.4	SVM-DTC 控制仿真研究	189
8.8	零航速减摇鳍伺服控制系统仿真	190
9	船舶零航速减摇鳍控制系统研究	194
9.1	随机海浪仿真	194
9.1.1	海浪波高数字仿真	194
9.1.2	海浪波倾角数字仿真	195
9.2	船舶零航速减摇鳍系统研究	197
9.2.1	升力控制的船舶零航速减摇鳍系统	197
9.2.2	考虑限制作用的控制系统仿真研究	204
9.2.3	水舱与零航速减摇鳍在系泊状态下减摇效果的对比	208
9.3	两对减摇鳍系统	211
9.3.1	两对鳍减摇原理	211
9.3.2	引入两对鳍系统的原因	212
9.3.3	两对鳍系统在零航速减摇中的应用	213

10 零航速减摇鳍升力测量装置研究	217
10.1 常见的升力测量原理	217
10.1.1 基于涡格法的升力测量法	217
10.1.2 基于鳍轴的升力测量方法	220
10.2 升力测量传感器	221
10.2.1 升力传感器的安装原理	221
10.2.2 升力传感器的安装	223
10.2.3 升力传感器的设计	224
10.3 升力测量机构的设计计算	225
10.4 影响基于鳍轴的升力检测方法的因素	226
10.5 测量升力的修正	227
10.5.1 鳍、鳍轴重力、浮力修正	227
10.5.2 船体边界层影响的修正	228
11 零航速升力控制减摇鳍半实物仿真试验研究	230
11.1 鳍升力模拟加载装置	230
11.1.1 升力加载系统	230
11.1.2 加载系统元部件的选取	230
11.1.3 升力加载系统的分析及校正	232
11.1.4 升力加载系统的调试	235
11.2 船舶海洋条件模拟装置	238
11.2.1 船舶横摇模拟转台	238
11.2.2 海浪仿真器	241
11.2.3 角速度传感器	242
11.3 升力控制伺服装置	242
11.3.1 升力测量传感器	242
11.3.2 升力信号的放大与合成	243
11.3.3 不同闭环方式的切换	245
11.3.4 升力传感器的测试	245
11.4 试验及数据分析	247
参考文献	251

1 绪 论

1.1 研究目的和意义

船舶在海上航行, 由于受到海浪、海风及海流等因素的影响, 不可避免地会产生各种摇荡, 其中以横摇最为显著, 影响也最大。剧烈的摇荡对船舶的适航性、安全性以及设备的正常工作、货物的固定和乘员的舒适性都会有很大的影响。对于军船来说, 剧烈的摇荡会影响舰载飞机的正常起降; 还会使火炮无法精确地命中目标。因此有效地减小船舶横摇十分必要。目前最常用且应用最成功的船舶主动式减摇装置是常规减摇鳍, 减摇效果可达90%以上。许多国家的中、高速船舶和海军舰船都装有减摇鳍。然而, 只有船舶的航速较高时, 常规减摇鳍才可以有效地减摇, 对于工作在零航速或系泊状态下仍需要减摇的船舶来说, 普通的减摇鳍就不再适用了。主要原因是常规减摇鳍升力的产生依赖于水流流过鳍的速度。只有当流过减摇鳍表面的水流速度较高时, 才能产生足够的升力; 当水流速度很小时, 鳍上的升力也变得很小, 在零来流速度时升力也同时消失了, 这是传统减摇鳍的主要缺陷。

零航速下船舶的减摇能力对于系泊状态或漂流状态下工作的船舶如高级游艇、科学考察船、港口作业船和扫雷舰等更为重要。据中国南极科考船白濤号1985年3月6日1—24时逐时船载资料记载, 考察船停泊在南纬 $47^{\circ}30.9'$, 东经 $40^{\circ}5.3'$ 进行海洋观测, 此间无论从浪高、浪向以及风速和风向来看, 变化均不大, 尤其是浪高和浪向几无变化。然而, 在船停泊期间(9—12时), 船左右摇摆幅度却比航行时大1倍, 由 $5^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 增加到 $11^{\circ}\sim 12^{\circ}$ 。这表明, 当船停泊时间, 主发动机停止工作, 船舶失去自控方向能力, 随波逐流, 船体左右摇摆加大。法国、荷兰、比利时三国联合研制的“三伙伴”级扫雷舰为减缓航行及停泊时的摇摆, 使用了当时最新式的主动式减摇水舱, 以增加扫雷工作中的船舶稳性。对于大的船舶在港口作业时, 如遇大的风浪, 普遍存在船舶抗风能力差, 摇晃厉害使船员无法开展正常工作的情况。这时多是配置相应的大马力多功能拖轮, 以适应工作的需要, 保证船舶平稳, 满足单浮作业规范的要求。

从上面例子可看出, 零航速时当有大浪涌过, 船舶就会产生摇摆, 当大浪的周期接近船舶停泊时的自然横摇周期, 船舶就开始强烈地横摇, 而且横摇的幅度较正常航行时要大。大型机动快艇的横摇周期一般在 $6\sim 11\text{ s}$, 大浪的周期通常在 $7\sim 14\text{ s}$, 因此必然会引起船舶的谐摇。随着对舰船减摇的要求越来越高, 要求船舶在低速航行时及系泊状态下即零航速时仍能够有效减小横摇, 此时, 传统减摇鳍就无能为力了。于是, 人们便提

出了零航速减摇鳍的概念。

研究全工况减摇装置,使船舶在高航速下、低航速下甚至系泊状态均能够实现减摇便成为近年来关注的研究热点。

一直以来,减摇水舱是船舶低航速和零航速时船舶减摇的唯一选择,但其减摇效果有限,最高不过50%,不能满足人们对减摇效果越来越高的要求。对于综合减摇装置,同时装有减摇鳍和减摇水舱,通过优化减摇鳍的容量及鳍、水舱二者的控制策略,虽能在一定程度上改善船舶的减摇效果,优点明显,但一条船同时安装鳍和水舱两种设备,会占用船舶大量的内部空间和排水量,成本也是很高的,对于吨位不是很高的船舶来说,这是不可能的。

现今减摇鳍的研究都是基于鳍在有来流速度时产生升力的理论和应用,而零航速下鳍是在没有来流速度的情况下产生升力的,可见目前使用的相关理论不适用于分析零航速下减摇鳍的升力产生和减摇的原理。如果减摇鳍既可以在正常航行时减摇,也可以在低航速和零航速下进行减摇,就可以只设计和维护一套系统,而且不会占用更多的内部空间。它的优点是很明显的,因此,寻找一种新的理论依据研究零航速下减摇鳍升力产生的机理,对船舶在零航速下使用减摇鳍的减摇方法进行研究是很重要的。

1998年,随着一艘名为博阿迪西亚女王号游艇上安装了一种新型的零航速减摇鳍装置,零航速减摇的概念现实地进入了人们的视线,引起了船舶减摇领域的瞩目。这种装置可以让船舶在航行和漂流或是系泊状态下均能减摇。零航速时让减摇鳍工作在不同的方式,工作的时候有点儿像划桨。从生物的角度来看,升力产生的过程有点儿像昆虫或鸟的扑翼运动。因此,将仿生学应用于船舶零航速减摇鳍的研究是一条重要途径。

1.2 船舶零航速减摇相关技术发展综述

舰船横摇运动的阻尼很小,所以在风浪中会产生剧烈的横摇。为了减小横摇,船舶工程设计人员作了很大的努力,成功设计了各种减横摇装置。人们主要通过3种不同的途径来实现:①增大横摇阻尼系数。这种方法称为“阻尼稳定”,“阻尼”的物理含义是指能量的耗散,所以这种减摇方式在任何情况下都有效,尤其是在谐摇区效果最显著。②减小船舶的固有频率。这种减摇方式称为“谐摇稳定”,即减小船舶的固有频率,使船舶的固有频率避开海浪扰动能量集中的区域,从而减小船舶横摇的强度。③直接抵消扰动力或力矩。这种方法称为“平衡稳定”,原则上这种方法可以适合所有的摇荡运动。在这种情况下,施加一个与扰动力矩相位相反的稳定力矩,减小扰动力矩,进而减小船舶的横摇。目前,比较成功的减摇装置有舳龙骨、减摇鳍和减摇水舱。

1.2.1 舳龙骨

舳龙骨是沿船长安装于船舶的两舳部,通过增加船舶的横摇阻尼达到减少船舶横摇的一种被动式减摇装置。我国宋代就开始安装该装置来减小船舶摇摆。因为它简单,又

有一定的减摇效果（一般可减小横摇30%左右），早在19世纪初的帆船时代就已开始使用舳龙骨。当前，该装置的效果得到了世界各国的一致认可，现代几乎每条海船均安装了舳龙骨。舳龙骨基本属于成熟技术，目前关于舳龙骨的研究，国内外学者主要集中在研究舳龙骨在新型船型上的应用，包括它的安装位置、大小尺寸以及舳龙骨与减摇鳍、尾舵等之间的影响等。

1.2.2 减摇水舱

早在唐宋时期，我国造船师为了提高船舶耐波性，在海船中设置了“敞开式减摇水舱”，只不过当时的船舶是木帆船，横摇问题没有现代舰船那么严重。现代意义上的减摇水舱的研究可以追溯到1860年，但是首次把水舱作为固定的减摇设备是1880年装于英国皇家海军潜艇“Inflexible”号上。这些早期采用的被动式平面减摇水舱，从采用的阻尼隔壁看，对水舱的作用原理已有相当的见解。但是，这种水舱由于占用空间大、噪声高等原因，而被废弃不用。此后，И.Г.布勃诺夫、霍特、C.O.马卡洛夫等人先后对利用水舱减摇问题进行了研究。但是真正使减摇水舱发展成为一种实用的减摇装置的是德国人佛拉姆，他于1911年成功地提出了被动式U形减摇水舱。后来在英、美等海洋大国得到迅速发展，目前英、美、德、日等国均有成熟的水舱技术，现在它已成为船舶的基本减摇装置之一，其结构如图1-1所示。部分充水的两舷边舱，相互间由连通水道相沟通，而在上面部分由空气连通道相连接，大量的水在横摇作用下自一舷边舱流到另一舷边舱，由于它的质量和部分惯性的作用而产生稳定力矩，以减小船舶的横摇运动。这种被动式U形水舱又称为佛拉姆水舱。

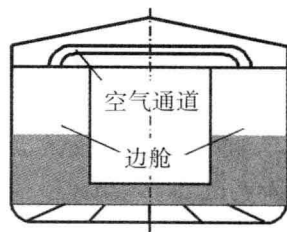


图1-1 U形减摇水舱

多年来，研究人员提出的减摇水舱有多种类型，概括起来，从原理上大体分为3类：被动式水舱、可控被动式水舱、主动式水舱。而从结构上分，可以分为U形水舱、平面槽形水舱等。被动式水舱由于不额外消耗能量而得到广泛应用，目前大量商船采用的主要是被动式减摇水舱。主动式水舱由于需要消耗大量的能量，性能价格比不高，因此，基本上很少应用于船舶减摇。当前，也有些船舶安装了主动式水舱，如我国“雪龙号”极地考察船、琼海火车摆渡船等，不过它们主要是为了增摇破冰或抵抗横倾。可控被动式是在被动式水舱的基础上提出的，主要是在充分发挥被动式水舱优点的同时，通过施加较小的控制策略，促进或延缓舱内水的流动，使水舱在多种环境下均能有满意的效果，目前关于可控被动式水舱的控制作用一般是通过调节舱内的阀门或气压，间接调整水舱的阻尼系数，使舱内水的流动与船舶的横摇运动产生谐振，达到减少船舶横摇的目的。

（1）被动式减摇水舱。被动式减摇水舱的作用是当船舶横摇时，水舱的水道内运动的水产生往复流动，使两舷水舱内的水上下波动，产生抵抗横摇的稳定力矩。被动式减摇水舱只有在船舶谐摇周期附近才有较好的效果，而在较低的横摇周期下，甚至

增摇。

(2) 可控被动式减摇水舱。可控被动式减摇水舱是对被动式减摇水舱的一个重要改进。它通过人为地控制水舱中水的流动,使其在各种横摇周期下都能产生满意的效果。可控被动式减摇水舱两舷液体的流动是根据船舶的横摇情况而受控的,控制作用一般是由两水舱之间的节流阀来实现。

(3) 主动式水舱。主动式减摇水舱是在两舷之间加入了一个水泵,它可以根据船舶的横摇情况把一个水舱内的水转移到另一个水舱。由于主动式减摇水舱需要很大的功率来驱动水泵工作,实现起来很困难,故一般很少采用。

被动式U形减摇水舱调谐于单一频率,在有限的波浪频率范围内能有效地减摇,离开这些波浪频率时,不但不能起减摇作用,有时还可能引起增摇现象。因此,1934年,德国的西门子公司在佛拉姆设计的水舱基础上,创造出主动式U形水舱。它通过鼓风机驱动使舱中水的流动产生的稳定力矩与同周期的扰动力矩成 180° 相位差,从而使水舱能在更宽的波浪频率范围内有效减摇。但是要“快速改变”大流量在技术上存在一定的困难,特别是能量消耗很大,在经济上很不划算。当时美国海军部门全面地研究了这种方法的可行性,结果由于经济性原因而否定了主动式U形减摇水舱。

由于被动式U形水舱有效减摇的波浪频率范围非常窄,主动式U形水舱经济性很差,这些缺点限制了减摇水舱的推广使用,使得减摇水舱技术在相当长的时间内没有明显进展。

第二次世界大战以后,美国又对被动式减摇水舱发生了兴趣,并成功地设计了槽形水舱,其中最具代表性的是1958年美国船舶局曾在海洋调查船、导弹跟踪船上装备的槽形平面减摇水舱,如图1-2所示。它是一种改良的平面水舱,利用带有较大自由液面的水槽把船左右两舷边舱连接起来,水槽中水的振荡表现为水舱的阻尼,用适当水槽尺度和水舱水深得到稳定力矩,以减小船舶的横摇运动,其减摇效果相当显著。自1960年大型客轮“Matsenia”号上安装这种水舱后,常称这种水舱为槽形水舱。

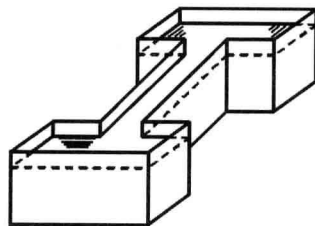


图1-2 槽形水舱

随后英国也恢复了对被动式减摇水舱的研究,英国国家物理实验室(NPL)进行了矩形平面水舱的研究,并且成功地应用于实船。有时常将这种矩形平面水舱称为布朗-NPL减摇水舱。槽形水舱和矩形平面水舱可通过调节水深以适应不同的波浪频率,从而能在较宽的波浪频率范围内有效减摇,这一特点使减摇水舱得到广泛应用。

随着对减摇要求的不断提高及对减摇技术的深入研究,人们综合考虑被动式减摇水舱和主动式减摇水舱的优缺点,提出了利用少量能量控制水舱,使减摇水舱能在较宽的波浪频率范围内有效减摇的方法,这就是后来发展起来的可控被动式减摇水舱。1965年,英国的缪海德—布朗公司研制成功了水道控制的可控被动式减摇水舱,其结构如图1-3所示。在舱底水道中部有一低压头大容量泵,它是连续运转的,使水能在舱内流

动且用阀控制水的流向，阀的开启根据船舶的横摇运动加以控制。由于这种减摇水舱其驱动泵所需功率约为减摇鳍的50%，控制系统的功率也不大，特别是它在船为零航速或低航速时能减摇，且减摇效果比被动式水舱好。因此，这种减摇水舱由于具有相当大的优点，是很值得推广和发展的一种减摇装置。如在20世纪70年代设计建成的，装备有直升机的加拿大DDH280级驱逐舰就安装了这种可控被动式减摇水舱。

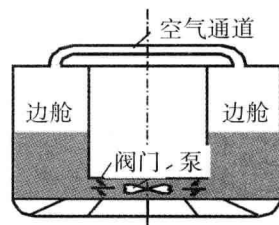


图 1-3 缪海德—布朗可控被动式减摇水舱

除了上述水道控制外，还提出了通过控制两边舱内气体的流动间接控制舱内水的振荡的可控被动式减摇水舱，其结构见图1-4。只要船舶的横摇周期大于舱内流体振荡的固有周期，可控被动式减摇水舱的自动控制系统立即通过气阀的启闭来调节水流的振荡周期以适应变化的横摇周期。水舱的控制作用相当于自动地延长了舱中水流的振荡周期，从而使水舱能在更宽的波浪范围内有效减摇，而且所需能量相当小。

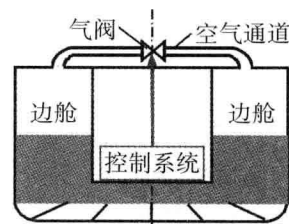


图 1-4 可控被动式减摇水舱（气道控制）

在对减摇水舱的研究中，人们又发明了另外一种形式的水舱——开式减摇水舱。它的特点是不用中部的连通水道，而是通过壳板上的开孔和舷外海水相通，其结构形式如图1-5所示。由于每个边舱内水的运动是可以独立发生的，因此，这种减摇水舱和船舶横摇一起构成三自由度振荡系统。

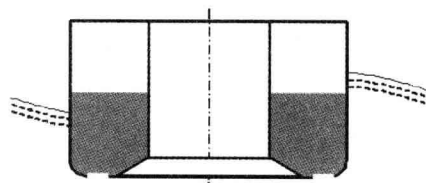


图 1-5 开式减摇水舱

从过去一二十年对减摇水舱的研究和发展看，以部分充满液体的减摇水舱的试验和应用相当广泛，国外多家著名的减摇装置公司都有成型产品，如美国佛拉姆减摇公司、德国英特灵公司、英国布朗兄弟公司和日本IHI公司等。

从减摇水舱的发展可以看出，减摇水舱从结构上可以分为两大类型：U形减摇水舱和槽形水舱，通常也称为Frahm水舱和Flume水舱。U形水舱在控制上可以是完全被动的，也可以是由气阀和压缩机进行部分控制的可控被动式水舱，还可以是由水舱液压泵或者涡轮送风机完全控制的主动控制式水舱。槽形水舱通过改变水舱的形状或通过内部障碍物或两者兼用把阻尼结合到液体中去。常用减摇水舱的结构形式如下：

- (1) 水舱左右两舷边舱顶部之间安装有空气连通道的U形减摇水舱。
- (2) 边舱顶部通过排气管直接将空气排放到大气中的U形减摇水舱。
- (3) 边舱底部与海水相通，每个边舱顶部的通气孔直接与大气相连或者通过空气连通道相连接的U形减摇水舱。