

现代船舶

风帆助航技术

胡以怀 著



**Sail-assisting
Technology**
for Modern Ships



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

现代船舶风帆助航技术

胡以怀 著

内容提要

本书全面介绍了船舶风帆助航技术,汇集了近十年来在风帆助航方面的研究成果,系统介绍了船舶风帆助航技术的各个方面,对开发利用海上风能,降低船舶的有害废气排放,减少船舶的能耗具有很大的实用价值,可供有关船舶设计、建造方面的工程技术人员和科研工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代船舶风帆助航技术/胡以怀著. —上海:上海交通大学出版社,2018

ISBN 978-7-313-20542-1

I. ①现… II. ①胡… III. ①船舶—风帆—研究 IV. ①U664.31

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 276085 号

现代船舶风帆助航技术

著 者: 胡以怀

出版发行: 上海交通大学出版社

邮政编码: 200030

出 版 人: 谈 毅

印 制: 当纳利(上海)信息技术有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

字 数: 395 千字

版 次: 2018 年 12 月第 1 版

书 号: ISBN 978-7-313-20542-1/U

定 价: 48.00 元

地 址: 上海市番禺路 951 号

电 话: 021-64071208

经 销: 全国新华书店

印 张: 16.75

印 次: 2018 年 12 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 021-31011198

前 言

风能是目前最为环保的能源之一。从本质上说,风能是太阳能与地球自转运动结合所形成的能源,因此这种能源取之不尽,用之不竭。另外,风能在使用不会污染环境,对生态的影响也可忽略不计。人类在利用风能的过程中,除初始设备投资外,后续设备维护方面的支出很小,因此风能又是一种非常廉价、经济的能源。

20 世纪之后,世界化石能源的日趋短缺和全球气候变暖,越来越引起全球的关注,从《京都议定书》、巴厘岛路线图,到哥本哈根全球气候大会,反映了全球各阶层对世界能源和环境的关注。2008 年 3 月联合国气候变化谈判最终将海运、空运和其他运输业纳入温室气体的减排目标。2009 年 7 月 IMO 国际海事组织在其召开的 59 次环保会议 (MEPC59) 上,通过了关于新船能效设计指数 (EEDI)、现有船舶能效营运指数 (EEOI)、船舶能效管理 (SEEMP) 和自愿验证 EEDI 的四个通函,旨在减少船舶能耗和二氧化碳排放,未来高 EEDI、EEOI 和 SEEMP 的船舶将失去船舶建造市场和运输市场。在船舶运输中,风能是最容易开发利用的可再生能源。可以想象,要达到船舶节能减排的目标,未来的船舶将越来越多地利用风帆助航的技术,采用风帆作为现代船舶的推进动力再次成为国际航运界关注的热点。

风帆助航技术是一门古老的技术。世界上最早的风帆船舶出现在 3000 多年前的古埃及,他们所使用的是方帆船。其他航海国家也有自己的船帆和高超的驶帆技术,但是中国人制造出了不同于其他国家的硬帆。所谓硬帆,就是每隔一段距离就有一根横梁,使竹子穿插其中。我国古代船帆的材料,有布、绸,特别是有一种用竹篾或芦苇叶编织成的席子,但共同的特点是使用竹条做骨架。这种帆的优点,是能够根据风向调整角度,能

最有效地利用风力,从而使中国的木船能够跨越海洋,领先于全世界。驾驶古代风帆船,需要有高超的驶帆技术,还需要舵的灵便操作,这样就可以接受各个方向的来风,作为船舶行进的动力,而只有中国的硬帆能自如地运用“八面来风”。在航海中,遇到正顺风的情况并不多,如果遇到侧风、横风和前侧风,中国古代的硬帆能够根据风向调整帆的角度,充分利用可能利用的风力,同时利用船舵巧妙控制航向,克服横向漂流,通过船只在水面上走“之”字形,最终使船达到预定目的地。所以要想利用好各方向的来风,帆与舵必须密切配合,这就是所谓的“见风使舵”,这也是古代驶帆技术的精要。古代西方风帆船使用的是软帆,操纵风帆也是一门技术。水手们需要在大风大浪中爬上桅杆绳索,叫喊着升降帆,手动完成风帆的操纵,而这往往是非常危险的。在古代中国,由于使用的是硬帆,其升降和调整角度比较容易,水手们可以在甲板上用卷扬机和升降索就可以完成这些动作。古代中国硬帆的优点是操作简单,它的张挂依靠由滑轮、绞车、绳索组成的系统,很简单地就可以升和降。所以这种硬帆拉上拉下,就像百叶窗帘一样,可以随意增加和减少帆的面积。风大时,可以少张几张帆,或升帆于桅杆之半,偶遇骤风,可迅速解缆降帆;风小时可以把所有的帆都张开。另外,竹条能使硬帆绷紧,从空气动力学的角度来说,效果会更好些。如果风帆鼓胀得太大,引起了过多风的湍流,就会使航行的速度减慢。

现代风帆助航船舶与传统的机帆船概念不同。机帆船通常采用软帆,人工操帆,在“风云莫测”时很难做到最佳利用风力。而现代风帆助航船舶多采用不易变形的刚性硬帆,通过电脑程序操纵,可十分方便地显示风向、风速,并能自动调整风帆的收放和角度^[1]。

另外,现代新型材料已可制造拉力巨大的风帆。装备风帆的船舶不再需要笨重的横桁、斜桁、驶风杆,不再需要传统风帆的复杂网状缆绳结构和动索、静索等笨重而巨大的风帆设备,变得轻巧灵便。当代控制技术已能方便地控制风帆^[2],这就是现代船舶风帆助航技术的特点。

然而,由于其固有的特点,风能也不可避免地存在一些使用上的局限性。即使在季风或信风盛行的区域,风向及风力都在不断发生变化,因此风能是一种非常不稳定的能源,这一特点在很大程度上限制了风能的使用范围。另外,风能还具有非常明显的区域

性特点,全球不同位置的风能分布差异很大,而古代帆船主要航行于季风或信风盛行的海域。可以说,风能的这一特点也是限制其在全球范围内广泛使用的一个重要原因^[3]。

尽管风帆是目前船舶推进最经济、最环保的能源,然而真正将其运用到现代船舶上还存在不少技术方面的问题。风帆动力装置对于现代船舶稳性、操纵性以及船舶布置的影响也是非常明显的。目前风帆助航节能效率约为5%~15%,如何进一步提高风帆节能效率达到节能减排的目的,已成为影响风帆助航技术应用的主要因素。总的来说,风帆助航技术的节能效率主要取决于:

- 海上航线可利用的风能资源;
- 风帆的空气动力学特性;
- 风帆结构及船体局部强度;
- 船舶稳性的限制条件;
- 对船舶操纵性的影响。

船舶风帆的增加将带来船舶设计、建造以及检验理论方面革命性的变化,对于我国造船业而言是一个非常难得的机遇。加快现代船舶风帆动力装置理论及实践的研究,将是我国船舶行业在目前市场低迷的条件下厚积薄发、转型发展的有效途径之一。虽然目前国内对于现代船舶风帆动力装置理论及实践方面的研究与欧洲和日本等发达造船国家尚存在较大的差距,特别是对于风帆动力装置的计算、控制以及制造缺乏实践经验。

“长风破浪会有时,直挂云帆济沧海”。我国船舶业应充分利用目前国际造船行业低迷这一有利时机,尽早研发具有自主知识产权的产品,迎接风动力船舶市场机遇的到来,这也是本书推出的期望所在。

本书的研究成果获得上海市科委地方院校能力建设专项基金“远洋船舶风帆助航技术的应用研究”的资助(编号:08210511800)。如有不妥之处,敬请各位同行批评指正。

符 号 表

符号	名称	符号	名称
a	周速比	M_f	风压对船舶的横倾力矩
BM	横稳心半径	M_{GZ}	船舶复原力矩
B	船舶宽度	Re	雷诺数
C_L	升力系数	Sr	斯特鲁哈数
C_D	阻力系数	A	船体侧向受风面积
C_T	助推力系数	S	风帆、转筒帆和涡轮帆投影面积
C_H	横漂力系数	ϕ_s	船舶静倾角
C_M	扭矩系数	T_ϕ	船舶横摇周期
C_p	转筒帆功率消耗系数	ϕ_0	船舶横倾角
C_{Tmax}	最大推力系数	ν_t	湍流动力黏性系数
c	风帆帆宽(弦长)或转筒帆半径	Z_1	帆的横倾力作用力臂
d	船舶吃水	Z_2	船体风压作用力臂
D_e	转筒帆端板直径	Z_A	船体受风面积中心距基线高度
D	转筒帆转筒直径,船舶型深	Z_g	船舶重心距基线高度
F_L	风帆升力	Δ	船舶排水量
F_D	风帆阻力	ϕ_{dmax}	船舶极限动横倾角
F_T, X_{sail}	风帆助推力	ϕ_d	船舶动横倾角
F_H, Y_{sail}	风帆横漂力或横倾力	α	帆攻角,转筒帆周速比
f	拱度(帆厚)	β_{WT}	绝对风向角
\tilde{f}	拱度比	γ	抽气式涡轮帆吸气强度
GM_0	船舶未计及自由液面修正的初稳性高度	θ_1	船舶在横浪中的最大横摇角
GM	船舶初稳性高	θ_{opt}	最佳转帆角
GZ	船舶复原力臂	θ_s	静倾角
H_M	帆的下端距基线的高度	θ	帆转角或帆位角
H_Z	船舶横倾力臂	λ	展弦比
H	风帆帆高	μ	流体黏性系数
KB	浮心垂向高度	V_b, V_{WA}	表观风速或相对风速
KG	船舶重心至基线的垂直距离	V_s	船速或航速
K	稳性衡准数	V_z, V_{WT}	真风风速或绝对风速
L_{pp}	船舶垂线间长	ξ	抽气式涡轮帆分流板中心线与橢圆筒长轴之间的夹角
M_q^*	船舶的最小倾覆力矩	ρ	空气密度
M, N_{sail}	风帆桅杆扭矩	φ, β_{WA}	相对风向角或转筒帆迎风角
Ma	马赫数	σ	舵角
M_{fb}	风作用在船体上产生的力矩	ψ_{OV}	船舶第一超越角
M_{fs}	风作用在帆上产生的力矩	ψ	航向角

彩色图

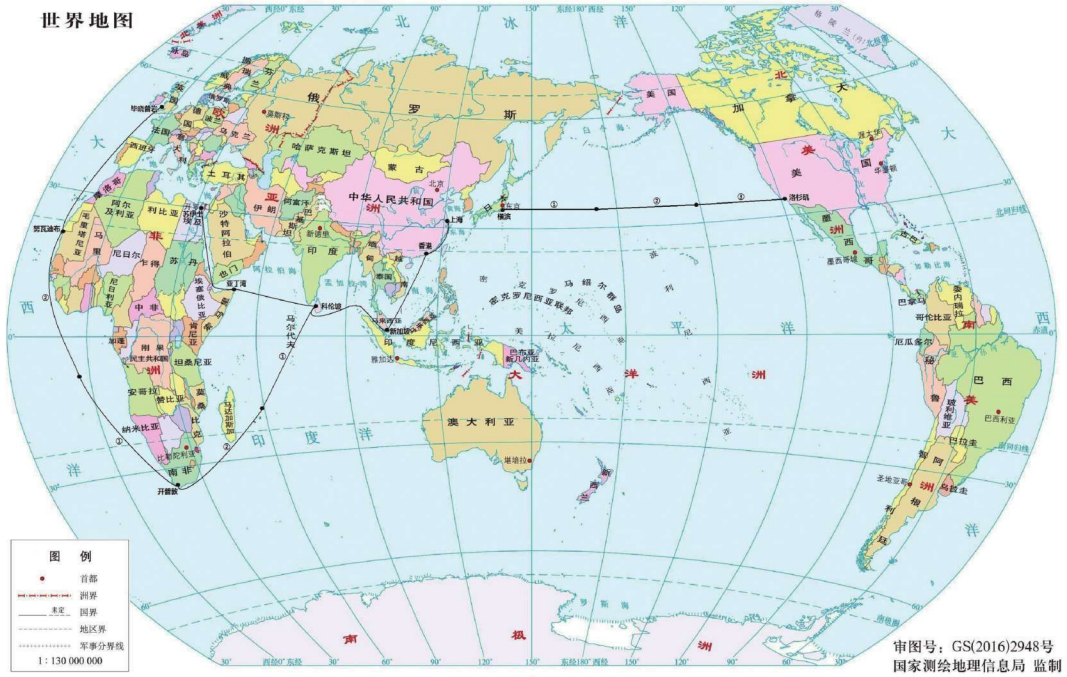


图 1-1 全球 9 条典型航线分布图

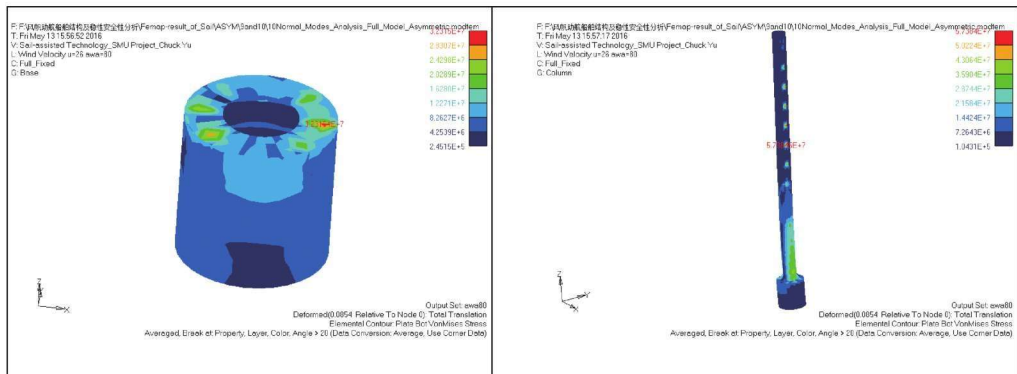
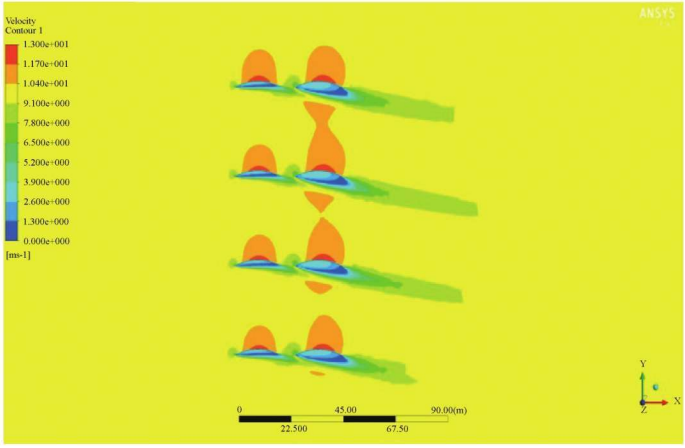
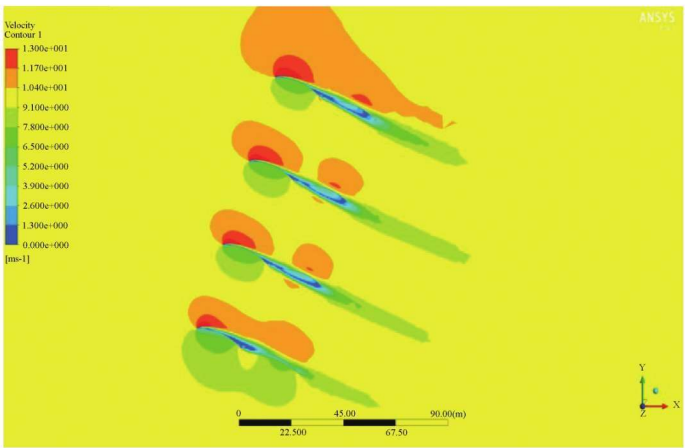
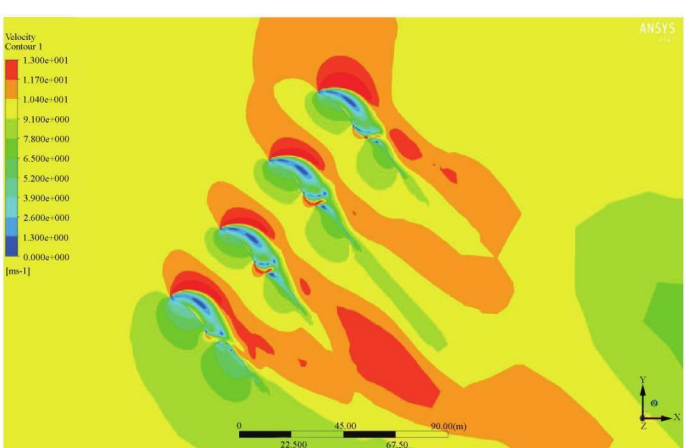


图 4-19 10 级风作用下风帆基座和帆柱应力云图

表 2-5 不同攻角下风帆阵列速度云图

α	C_L	C_D	风帆阵列速度云图
0°	0.154 0	0.066 6	
20°	0.818 6	0.296 4	
40°	1.182 8	0.915 0	

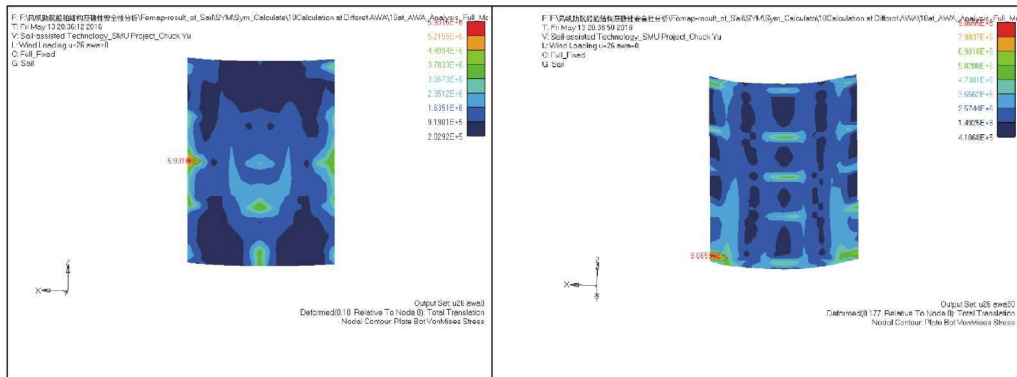


图 4-12 10 级风作用下风帆帆面应力云图

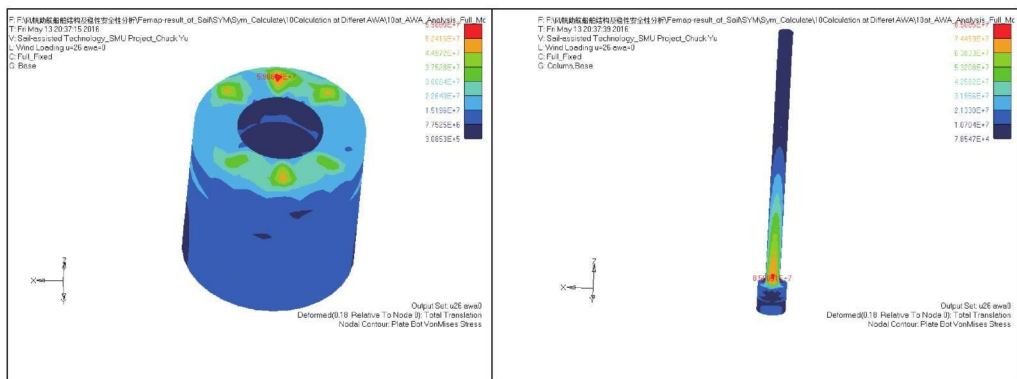


图 4-13 10 级风作用下风帆基座和帆柱应力云图

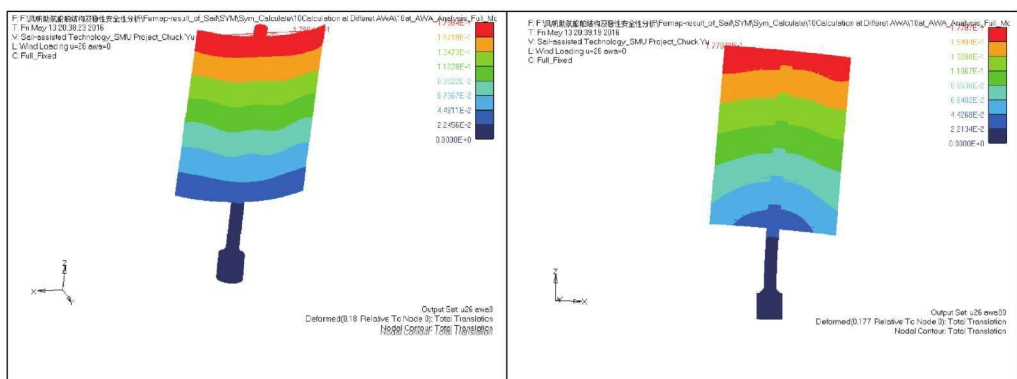


图 4-14 10 级风作用下风帆助航装置应变云图

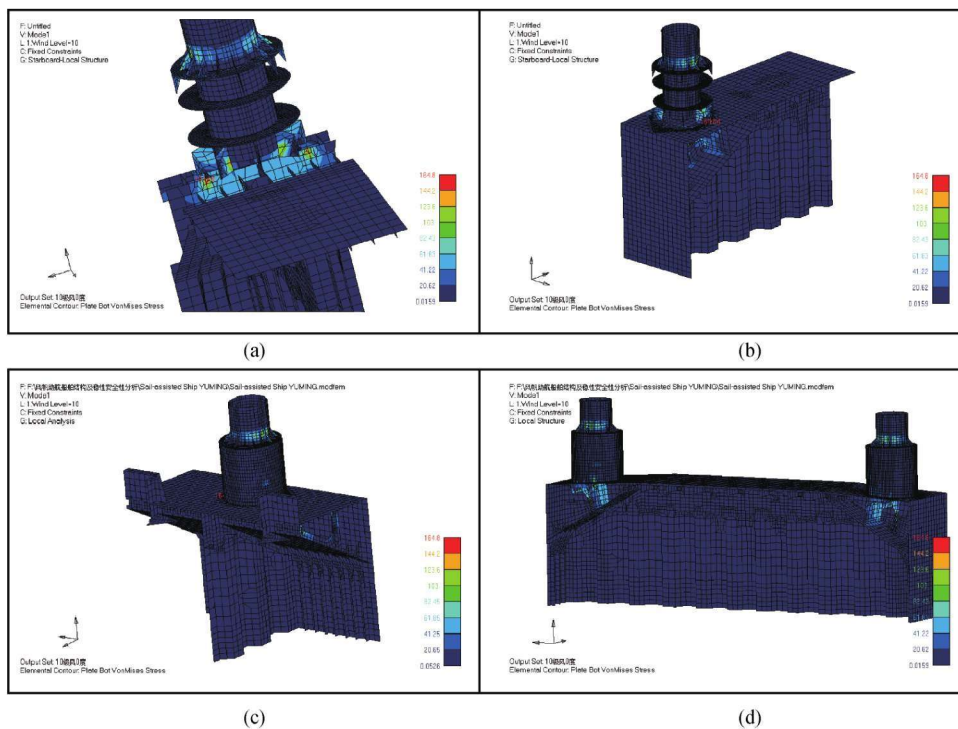


图 4-36 基座相当应力分布云图

(a) 内部结构 (b) 内部结构 (c) 外部结构 (d) 外部结构

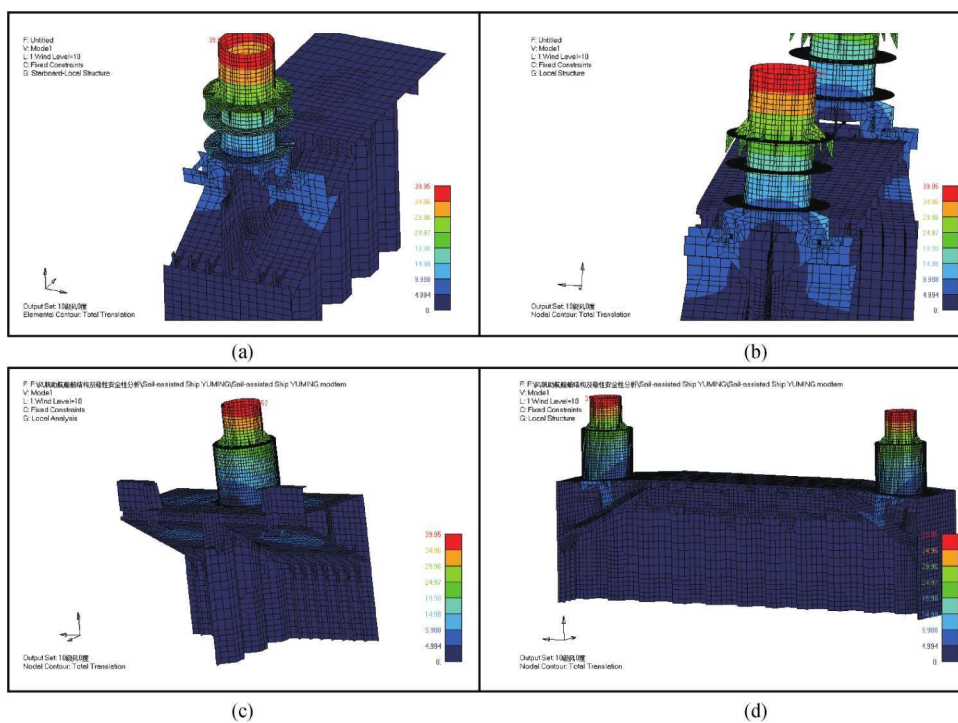


图 4-37 基座应变分布云图

(a) 内部结构 (b) 内部结构 (c) 外部结构 (d) 外部结构

目 录

第 1 章 海上风能资源及效益分析	001
1.1 远洋风资源及分析	001
1.1.1 海上风能资源的分布	001
1.1.2 海上风能资源的强度分析	004
1.1.3 海上风能资源的有效性分析	007
1.2 我国近海风能资源	012
1.3 风帆助航技术节能效益分析	016
第 2 章 翼型风帆	020
2.1 翼型风帆的气动特性试验	021
2.2 不同翼型的对比分析	027
2.3 帆翼三维绕流特性的数值分析	030
2.4 风帆阵列的干扰特性分析	034
第 3 章 特种风帆	039
3.1 风筝帆	039
3.1.1 天帆系统的组成	040
3.1.2 天帆技术的特点	042
3.2 转筒帆	043
3.2.1 转筒帆气动力学原理	043
3.2.2 转筒帆流场特性数值模拟	044
3.2.3 转筒帆气动特性分析	049
3.2.4 转筒帆助航特性分析	052
3.2.5 转筒帆的风洞试验	055
3.2.6 转筒帆的实船应用	058

3.3	抽气式涡轮帆	059
3.3.1	抽气式涡轮帆的工作原理	060
3.3.1	抽气式涡轮帆流场的数值模拟	061
3.3.3	抽气式涡轮帆的风洞试验	065
3.4	Walker 帆	068
3.4.1	Walker 帆的特性参数	069
3.4.2	Walker 帆气动特性的数值模拟	071
3.4.3	导流翼参数的影响分析	075
3.4.4	后翼参数的影响分析	078
3.4.5	Walker 帆的风洞试验	085
第 4 章	风帆的结构与强度	091
4.1	风帆结构的主体设计	091
4.1.1	主体参数的设计原则	093
4.1.2	主体材料的确定	094
4.2	风帆强度计算	099
4.3	船体的局部强度分析	108
第 5 章	风帆的操纵与控制	115
5.1	风帆操纵曲线	115
5.2	风帆控制系统	120
5.2.1	风帆电动控制系统	121
5.2.2	风帆液压控制系统	124
5.3	几种典型的风帆控制装置	128
5.3.1	“新爱德丸”号风帆控制装置	128
5.3.2	渔船风帆控制装置	129
5.3.3	电动手动两用风帆升降装置	130
5.4	风帆液压控制系统的特性试验	132
5.5	风帆控制系统的对比与应用	136
第 6 章	风帆助航船舶的稳性校核	142
6.1	船舶的稳性衡准	142
6.2	风帆助航船舶稳性校核方法	145
6.3	船舶稳性的校核计算	151
6.4	风浪联合作用下的动稳性计算	161
第 7 章	风帆助航船舶的运动特性	169
7.1	船舶运动模型	169
7.2	船舶航向稳定性分析	171

7.3 船舶抗风能力分析	175
7.4 船舶回转性能分析	180
7.5 船舶航向改变性能分析	183
7.6 船舶的非线性横摇运动分析	186
附录 2016 年海上航线风级、风向概率分布表	194
参考文献	247
彩色图	250

第1章 海上风能资源及效益分析



海洋空间广阔,海面上的风能分布广、蕴藏量大,风力比较稳定。由于海面开阔,海风湍流度小,海平面粗糙度低,因此海上风能资源优于陆地。海洋为风能的利用提供了很好的平台,是目前可再生能源利用的重要方向。风帆助航远洋船舶,应根据海上风能的特点优化航线,利用周期性海洋季风,顺风张帆,逆风收帆,以达到最佳利用风能的效果。据统计,离岸 10 km 的海上风能比陆上高 1 倍以上。但受大气环流影响,不同海域和不同季节的风力资源特性差异很大。另外,在岛屿、海岸、海峡等附近海域,如南非的好望角、南美的合恩角、我国山东半岛的成山头、台湾海峡等,风速、风向都会发生较大的变化,容易形成局部环流。如我国的台湾海峡夏季多西南大风,冬季多东北大风,就是受到海峡狭管效应的影响。因此,风帆船舶经过这些海域应及时调整风帆,以适应不同海域的风能特点,达到最佳助航效果。在大片海域内(如大西洋、太平洋等),海风风速和风向基本保持稳定,也有利于风帆助航装置在远洋船舶上的应用。例如中东航线(青岛—吉达)的印度洋阿拉伯海域,1 月份风力风向相对稳定,东北风 227° ,风速 6 m/s 左右,整个航段几乎均为斜顺风航行^[4]。由于各海域风能都具有各自独特的特点,风帆的节能效果也各不相同。因此,在利用风帆助航技术之前,应充分了解船舶所经航线的风能特点。

1.1 远洋风资源及分析

全球海上风能资源的分布并不均匀:赤道附近海域处于赤道无风带,风速最小;南北回归线附近海域属于信风带,风速稍大;南北半球纬度 30° 左右的海域属于副热带无风带,风速相对较小。而纬度更高一点的区域属于盛行西风带,风速普遍很大,如欧洲北海地区风速较大,盛行西风;南半球纬度 $40^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 之间为咆哮西风带,常年刮极强的西风;两极地区属于极地东风带,风速也比较大。从大气环流的角度来看,全球海上风能资源的分布与全球气压带和风带的分布密切相关。一般是越往赤道风越小,越往两极风越大,同时也有区域气候和特殊地形形成的区域性风资源。另外,风向对风帆助航技术的应用也有很大的影响,逆风航行不仅不会产生助航效果,还会产生航行阻力。因此,全球海域不同航线上风能资源的分布是船舶风帆助航技术应用的主要依据,是风帆助航技术的应用基础。

1.1.1 海上风能资源的分布

根据有关海上风力发电文献的介绍,在全球海上风电发展的重点海域中,欧洲的海上风

能资源最为丰富,其大部分区域的平均风速介于 9~12 m/s 之间;其次是美国,平均风速为 8~10 m/s;而中国的大部分近海区域平均风速为 7~9 m/s,局部海域>9 m/s。但从海上运输的角度来看,全球航线分布在各个不同的海域,其风力大小和方向随着海域和季节而变。不同风级所对应的风速大小如表 1-1 所示^[5]。

表 1-1 风级及其风速、风压对应表

风级	名称	风速/(m/s)	风速/(km/h)	风压/Pa	陆地地面物体征象
0	无风	0~0.2	<1	0~0.025	静
1	软风	0.3~1.5	1~5	0.056~0.14	烟能表示方向,但风向标不动
2	轻风	1.6~3.3	6~11	0.16~6.8	人面感觉有风,风向标转动
3	微风	3.4~5.4	12~19	7.2~18.2	树叶及微枝摇动不息,旌旗展开
4	和风	5.5~7.9	20~28	18.9~39	能吹起地面纸张和灰尘
5	清劲风	8.0~10.7	29~38	40~71.6	有叶的小树摇摆
6	强风	10.8~13.8	39~49	72.9~119	小树枝摇动,电线呼呼响
7	疾风	13.9~17.1	50~61	120.8~182.8	全树摇动,迎风步行不便
8	大风	17.2~20.7	62~74	184.9~267.8	微枝折毁,人向前行阻力甚大
9	烈风	20.8~24.4	75~88	270.4~372.1	建筑物有小损
10	狂风	24.5~28.4	89~102	375.2~504.1	可拔起树来,损坏建筑物
11	暴风	28.5~32.6	103~117	507.7~664.2	陆上少见,有则必有广泛破坏
12	飓风	32.7~36.9	118~133	664.2~851	陆上极少见,摧毁力极大

根据英国水文局发布的 2016 年海图资料(The United Kingdom Hydrographic Office, Taunton, Somerset TA1 2DN, UK published by Crown Copyright),2016 年全球 9 条典型航线上不同风力、不同风向的概率数据,包括东海:上海→香港,南海:香港→新加坡,马六甲海峡及孟加拉湾:新加坡→科伦坡,印度洋及阿拉伯海:科伦坡→亚丁湾,红海:亚丁湾→苏伊士运河,印度洋及好望角:科伦坡→开普敦,南大西洋:开普敦→努瓦迪布,北大西洋:努瓦迪布→毕晓普岩,北太平洋:横滨→洛杉矶,航线分布如图 1-1 所示。

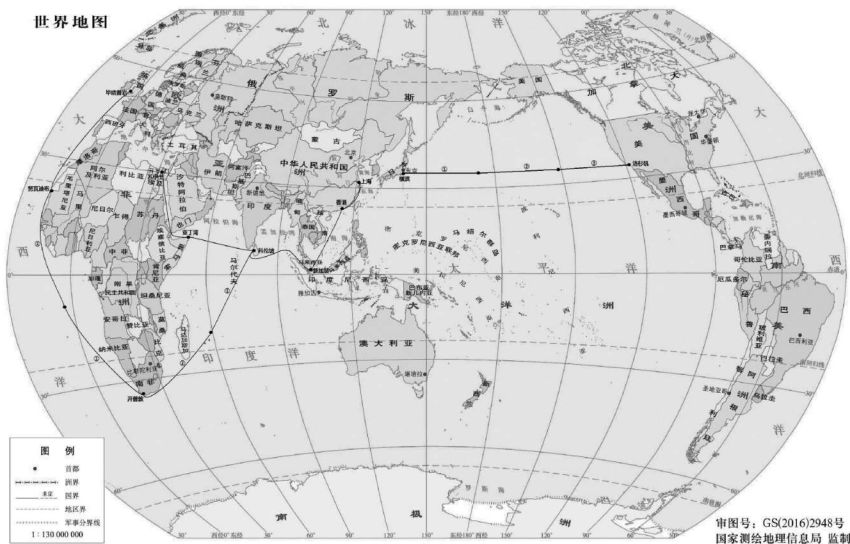


图 1-1 全球 9 条典型航线分布图(见书后彩图)

以东海:上海→香港航线 1~3 月份的风能数据为例,其不同风力大小、不同风向的概率数据如表 1-2 所示,这里的风向角即表示风向 V_b 与船舶航向 V_s 的夹角 θ 。顺时针为正,逆时针为负(见图 1-2,此时 $\theta = -40^\circ$)。对于表 1-2 中的上海→香港航线而言,顺风时的风向角为顺风角,在 $90^\circ \sim 0^\circ \sim -90^\circ$ 之间,当风向与航向一致时,风向角为 0° ;逆风时的风向角为逆风角,在 $-90^\circ \sim 0^\circ \sim 90^\circ$ 之间,当风向与航向完全相反时,逆风角为 0° 。当然,这里的逆风是相对的,对香港→上海的回程就成了顺风。概率越大表示该风级和风向出现的概率越多,每个月不同风力大小、不同风向的概率总和为 1.0。全球典型 9 条航线全年 12 个月的风级、风向该路分布如附录一所示。

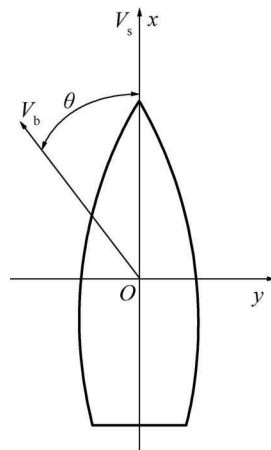


图 1-2 风向角示意图

表 1-2 东海:上海→香港航线 1~3 月份的风能数据

航线	一 月份					二 月份				三 月份			
	顺风		逆风			顺风		逆风		顺风		逆风	
	风级	风向 /($^\circ$)	概率 /%	风向 /($^\circ$)	概率 /%	风向 /($^\circ$)	概率 /%	风向 /($^\circ$)	概率 /%	风向 /($^\circ$)	概率 /%	风向 /($^\circ$)	概率 /%
东海: 上海 → 香港	1~3	-60	1.2	-60	0.3	-60	1.1	-60	0.4	-60	1.6	-60	0.5
		-30	1.6	-30	0.3	-30	2.1	-30	0.4	-30	2.8	-30	0.7
		0	3.6	0	0.4	0	3.6	0	0.6	0	5.4	0	1.0
		30	3.0	30	0.4	30	3.0	30	1.0	30	4.0	30	1.0
		60	1.3	60	0.6	60	1.1	60	1.1	60	1.7	60	1.6
		90	0.7	90	0.6	90	0.6	90	0.8	90	0.8	90	1.4
	4	-60	0.6	-60	0.0	-60	1.0	-60	0.2	-60	1.1	-60	0.1
		-30	2.5	-30	0.0	-30	2.5	-30	0.2	-30	2.9	-30	0.2
		0	6.2	0	0.3	0	6.3	0	0.5	0	7.5	0	0.7
		30	5.3	30	0.4	30	5.2	30	0.7	30	4.8	30	0.9
		60	1.9	60	0.5	60	1.4	60	0.8	60	1.4	60	0.9
		90	0.5	90	0.6	90	0.4	90	0.5	90	0.4	90	0.1
	5~6	-60	1.2	-60	0.4	-60	0.9	-60	0.2	-60	1.0	-60	0.1
		-30	3.6	-30	0.5	-30	4.1	-30	0.3	-30	4.6	-30	0.4
		0	16.3	0	0.3	0	17.0	0	0.4	0	15.3	0	0.7
		30	15.7	30	0.4	30	15.2	30	0.6	30	12.6	30	0.8
		60	4.1	60	0.7	60	3.1	60	0.7	60	2.9	60	0.7
		90	0.6	90	0.7	90	0.6	90	0.7	90	0.4	90	0.0