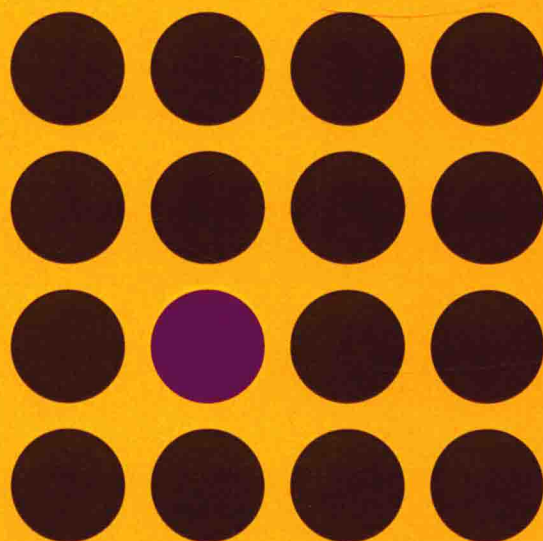


中国体育博士文丛

国家自然科学基金资助

单帆帆翼空气动力性能数值模拟

马 勇 著



北京体育大学出版社

国家自然科学基金资助
中国体育博士文丛

单帆帆翼空气动力性 数值模拟

DAN FAN FAN YI KONG QI DONG LI XING
NENG SHU ZHI MO NI

马 勇 著

北京体育大学出版社

策划编辑: 木 凡
责任编辑: 毅 力
审稿编辑: 梁 林
责任校对: 李志诚
版式设计: 司 维
责任印制: 陈 莎

图书在版编目 (CIP) 数据

单帆帆翼空气动力性能数值模拟 / 马勇著.
— 北京: 北京体育大学出版社, 2013.4
ISBN 978-7-5644-1313-2

I. ①单… II. ①马… III. ①帆船—水翼—空气动力学—数值模拟 IV. ①U674.926

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第075510号

单帆帆翼空气动力性能数值模拟

马勇 著

出 版: 北京体育大学出版社
地 址: 北京市海淀区信息路48号
邮 编: 100084
邮购部: 北京体育大学出版社读者服务部 010-62989432
发行部: 010-62989320
网 址: www.bsup.cn
印 刷: 北京昌联印刷有限公司
开 本: 787 × 1092毫米 1/16
印 张: 12.25

2013年4月第1版第1次印刷

定 价: 33.00元

(本书因装订质量不合格本社发行部负责调换)

前 言

运动帆船是依靠自然风作用于船帆上、由人驾驶船只前进的一项集竞技、娱乐、观赏、探险于一体的体育运动项目。帆船比赛是水、风、船、人四者的完美结合，比赛中包含了迎风、横风和顺风等多个赛段，不同赛段对帆船的操作都有不同的要求，它是智慧和机敏的较量。运动员的智慧和机敏不仅建立在他们丰富的经验和敏锐的判断上，还有赖于他们对帆船运动动力学机理的理解和运用。

帆船是靠帆翼产生的空气动力推动帆船前进的，因此帆翼空气动力性能的好坏直接影响到帆船前行的速度。帆翼的空气动力特性主要包括升力特性、阻力特性、推力特性、侧向力特性以及横倾力矩特性等等，它们与风速和风帆外形密切相关。帆翼的空气动力性能的研究主要有三个方法：试验研究、理论分析及数值模拟。利用风洞试验进行帆船帆翼的空气动力性能的研究是研究风帆性能的重要手段，通过试验可得到风帆一系列性能的数据及曲线，对帆翼设计、操作指导都有十分重要意义。近年来，随着计算机技术的飞速发展，计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)在帆翼空气动力性能研究中得到了广泛的应用。目前CFD精度虽比不上风洞试验，但

是CFD是以经典力学、数值计算方法和计算机技术为基础建立起来的。因其费用少、周期短的优点，加之数值模拟在某种意义上比理论和实验对流体的运动过程认识得更为深刻、更为细致，不仅可以了解运动的结果，而且可以了解整体的与局部的细小扰动。目前，这一方法正日益受到重视，并在帆翼空气动力预报中发挥出它的优势，成为有效的、先进的方法之一。

本书以单帆帆船帆翼为研究对象，利用CFD方法进行帆翼空气动力数值模拟和试验研究，分析了帆翼在各种攻角下引起的粘性流动的空气动力特性，进而提出可用于指导我国健儿帆船训练、比赛的操帆方法。全书共分8章。第1章介绍了帆船发展历史、国内外组织、帆船分类、我国帆船开展情况以及国际上重大帆船赛事；第2章介绍了帆船帆翼空气动力性能数值模拟的研究目的，分析了帆船帆翼受力情况，介绍了帆船帆翼空气动力性能的研究进展以及帆船帆翼空气动力性能的研究内容；第3章概述了帆船帆翼空气动力性能数值模拟方法，说明了数值模拟的模型，重点介绍了数值模拟控制方程、湍流模式、边界条件和数值离散方法；第4章讨论了计算区域大小以及网格类型、来流处理方式、湍流模型对于计算结果的影响，讨论了均匀风和梯度风情况下帆翼周围流场的差异；第5章讨论有无桅杆和不同桅杆外形、不同扣角和倾角对于帆翼空气动力特性影响，讨论了两种不同帆型的空气动力特性差异；第6

章介绍了帆翼空气动力性能试验研究过程和结果；第7章讨论了两种不同帆型帆翼推力系数和侧向力系数在不同航向角下随攻角变化情况，分析了不同航向角下最大推力系数以及对应的侧向力系数，得到了帆翼在所有航向角下最大的推力系数以及对应的操帆角。同时讨论了两种帆型不同航向角下第二大推力系数及对应的侧向力系数；第8章基于数值模拟和试验方法得到的帆翼空气动力性能特点，详细系统介绍了在起航航段、迎风航段、横风和侧顺风航段、尾风航段、终点线前航段和各标旁附近帆翼调整方法。

本书的主要特点是结合奥运会比赛竞赛帆船调帆的实际，重点阐述了利用数值模拟和试验方法研究帆翼空气动力性能，分析帆翼在各种工况下周围流场分布规律。本书是流体力学、运动生物力学、运动训练学等多学科交叉渗透的研究结果，为运动员根据不同外界条件调帆提供科学依据。

本书部分内容得到国家体育总局体育工程重点实验室和武汉理工大学同行专家的鼎力支持，在此一并致谢。

本书可以作为体育装备工程专业、船舶与海洋工程专业博、硕士研究生的参考资料，也可以作为体育装备工程专业、船舶与海洋工程专业的研究人员和工程技术人员参考。

本书及所在课题组在帆船帆翼空气动力性能方面做了初步的探索，取得了一些成果，但距深刻理解帆船流体动力性能研

究和成熟应用还有很长的路要走，因此书中肯定有不少的错误，望各位读者不吝赐教。

本书得到了国家自然科学基金“多帆运动帆船操纵运动船体流场数值模拟研究及应用”（批准号：51279154）、“基于数值模拟的多帆运动帆船帆翼空气动力性能研究及应用”（批准号：51009113）的资助。

作者

2013年3月

目 录

1 帆船运动介绍	1
1.1 发展历史	1
1.2 帆船组织	4
1.3 帆船分类	5
1.4 我国帆船运动	6
1.5 国际重大赛事	7
1.6 2008年奥运帆船	13
1.7 比赛规则	17
2 单帆帆翼空气动力性能数值模拟概述	19
2.1 单帆帆翼空气动力性能数值模拟研究目的	19
2.2 帆翼受力分析	22
2.3 帆翼空气动力性能数值模拟的发展历程	28
2.4 帆翼空气动力性能数值模拟研究内容	41

3 帆翼空气动力性能数值模拟方法	57
3.1 计算模型	57
3.2 控制方程	58
3.3 湍流模式	62
3.4 边界条件	70
3.5 数值离散	71
3.6 求解算法	75
4 帆翼空气动力性数值模拟中的特殊问题	80
4.1 计算区域的处理方式对数值模拟结果的影响	80
4.2 来流方式的处理对数值模拟结果的影响 ...	84
4.3 湍流模型对数值模拟结果的影响	97
4.4 梯度风对数值模拟结果的影响	104
5 帆船帆翼流场模拟及空气动力计算	116
5.1 桅杆对帆翼周围流场影响	116
5.2 不同扣角下帆翼数值计算	124

5.3	不同倾角下帆翼数值计算	129
5.4	Sail2帆型帆翼数值计算	131
5.5	帆型对帆翼空气动力特性影响	134
6	帆翼空气动力性能试验研究	151
6.1	试验模型	152
6.2	试验设备和试验方法	152
6.3	试验结果	154
6.4	试验结果分析	156
7	帆船帆翼空气动力性能分析	162
7.1	Sail1帆型帆翼的推力系数与侧向力系数	162
7.2	Sail2帆型帆翼的推力系数与侧向力系数	167
8	单帆翼帆船调帆策略分析	174
8.1	帆船起航阶段调帆分析	174
8.2	帆船迎风航段调帆分析	177

8.3 帆船横风和侧顺风航段调帆分析 181

8.4 帆船尾风航段调帆分析 182

8.5 帆船终点线前航段调帆分析 183

8.6 帆船标旁调帆分析 183

1 帆船运动介绍

帆船运动是依靠自然风作用于船帆上、由人驾驶船只前进的一项集竞技、娱乐、观赏、探险于一体的体育运动项目。它具有较高的观赏性，备受人民喜爱。现代帆船运动已经成为世界沿海国家和地区最为普及而喜闻乐见的体育活动之一，也是各国人民进行海洋文化交流的重要渠道。经常从事帆船运动，能增强体质，锻炼意志。特别是在风云莫测的海浪中迎风斗浪，能培养战胜自我的拚搏精神。早期英国沿袭荷兰人的称谓，称帆船运动为Yachting。至今人们仍用两种发音——英语与荷兰语的发音。近年改称Sailing，而Yachting改为表达游艇运动^[1]。

1.1 发展历史

帆船运动起源于欧洲，它的历史可以追溯到远古的石器时代，帆船的存在是人类向大自然作斗争的一个有力见证，帆船的历史同人类文明史一样悠久^{[1][4]}。

帆船作为一种比赛项目，文字记载最早的是在1900多年以前古罗马诗人味吉尔的作品中。到了13世纪，威尼斯已经开始定期举行帆船比赛。不过当时的比赛船只并没有统一的规

格和级别。

现代最早作为娱乐活动的帆船起源于16-17世纪的荷兰。古代的荷兰，地势很低，所以开凿了很多运河，人们普遍地使用小帆船运输或进行捕鱼。这种小船是由一个独木舟或用木排竹排编制而成，可以说这是世界上最早的帆船。当时荷兰有一种被称为“Jaght”的船——荷兰语的意思是狩猎船，通常被用作征税和传令的交通船。也有很多贵族建造了这种帆船用来进行娱乐和体育活动。

1662年，英王举办了一次英国与荷兰之间的帆船比赛，比赛路线是从格林威治到格来乌散德再到格林威治，英国派三前帆艇“金吉尔”号参赛，荷兰派后主桅艇“什护拉”号参赛。

18世纪，帆船俱乐部和帆船协会相继诞生。1720年前后，英、美、瑞典、德、法、俄等国家先后成立了帆船俱乐部或帆船竞赛协会。如1812年英国创建了皇家帆船中队，1844年美国成立了纽约帆船俱乐部。此后，各国之间开始进行经常性大规模的帆船比赛活动。如1870年美国 and 英国举行了第1届著名的横渡大西洋“美洲杯”帆船比赛。

1896年，现代奥运会一开始，就把帆船列为正式竞赛项目。但由于当时的天气情况不佳，第1届奥运会帆船比赛未能举行。到1900年第2届奥运会，明确规定了帆船的4个比赛级别，进行了第1次世界性的大型帆船比赛。当时的比赛帆船都比较大而笨重，但适于远航。直到20世纪40年代以后，

随着工业的发展，造船及制帆材料得到了不断的改进，小型帆船在世界上得到了不断的改进，并得以迅速普及。随之而来，在奥运会规定的比赛级别里，小型帆船也就逐步取代了大型帆船。1976年，在21届奥运会上，比赛的6个级别全部都改成了船体较轻较小的帆船。但是大型帆船在一些国家仍很普遍，主要是用来远航，有时横穿大洋，因为在船上可以食宿，一次比赛可以长达很多天。

1906年，英国的B·史密斯和西斯克·史坦尔专程去欧美各国与帆船主要领导人商谈国际帆船的比赛等级和规则，并提议创立国际帆船竞赛联合会。1907年，世界第一个国际帆船组织——国际帆船联合会（原IYRU，现ISAF，简称国际帆联）正式成立，总部设在英国伦敦，迄今已有120多个成员国和地区。

帆板运动出现于20世纪60年代末期。当时，世界各地的冲浪爱好者纷纷在冲浪板上进行加帆的尝试。1967年，一种加长的冲浪板上面装有能够自由转动的桅帆在美国出现，标志了帆板的初步形成。据报道，美国加利福尼亚的电算机技师修万斯想出了一个绝妙的办法，他把帆船的桅机部分进行了改装，并在桅杆根部装上一个万向调节装置然后移植到小小的冲浪板上，于是“风力冲浪板”诞生了。经过多次反复的试验终于获得成功。1970年6月修万斯正式申请了专利，命名这种器材为“温特·塞费尔”（帆板的一种）。冲浪板是冲浪运动的器材，样子很象墨鱼盖，一人多长，几十厘米宽。人

可站在上面,凭借涌浪的推力在水上滑行。这项运动的开展在欧美国家已有较长的历史,但由于冲浪板前进的动力来自涌浪,因此它只能在有较大涌浪的水面上才能开展运动。并且由于受场地条件所限,影响了这项运动的普及。帆板诞生后,很快弥补了冲浪运动的不足。运动员站在板上,用双手抓住帆杆操纵,便能在无际的大洋中航行上百海里,并能达到每小时50多公里的惊人速度,因此颇受人们青睐。

帆板运动的迅速发展引起了国际快艇赛技联(1YRV)组织的高度重视。1980年春,该组织在伦敦举行会议,正式提出了帆板运动加入奥运会事宜的申请。随后,奥委会在同年7月间就批准并宣布帆板运动正式列为奥运会项目,并将帆板确定为帆船运动的一个新的级别。1984年在洛杉矶举行的第23届奥运会成功地进行了第1次奥运会帆板比赛和帆板表演赛。

1.2 帆船组织

国际帆联全称International Sailing Federation,简称“ISAF”。国际帆联成立于1906年,总部设在英国。目前ISAF是世界上最大的单项体育联合会之一,现有120多个会员国(或地区)管辖了80多个帆船级别。ISAF下设国际残疾人帆船运动基金会(IFDS),从事残疾人帆船运动。2008年奥运会的项目有9个级别,11个项目。

中国帆船帆板运动协会,简称“中国帆协”。英文全名为

CHINESE YACHTING ASSOCIATION, 缩写为“CYA”。中国帆协是中国奥林匹克委员会承认的全国性运动协会,同时也是具有独立法人资格的全国性群众体育组织。中国帆协是全国帆船帆板运动的领导机构,是代表中国参加国际帆船组织的唯一合法组织。

1.3 帆船分类

帆船主要由船体、桅杆、稳向板或龙骨、舵、帆和索具组成,船体的主要制作材料为木材或玻璃钢^{[1][2][5]-[9]}。从器材上,运动帆船可分为五大类:

1) 龙骨艇 (Keel Boat): 船底有一块固定的稳向板和压铅,特点是排水量大、构造复杂、价格昂贵,多人操纵,适于长距离竞赛和远海探险。

2) 稳向板艇 (Centerboard Boat or Dinghy): 船底有一块可收放的稳向板。特点是小巧、灵活、造价低、便于操纵、易于普及。奥运会项目中多数是这种船。

3) 多体艇 (Multi-Hull): 由二个至三个船体组成,特点是速度快、操作起来惊险刺激。

4) 古帆船 (Tower Boat): 型体大,仿古设计,多桅布局,装饰华丽,适于外展活动、娱乐性比赛和水手的海上操作训练。

5) 帆板 (Sailboard): 操帆者站在一块滑行板上航行,没有舵,只有尾鳍。

1.4 我国帆船运动

我国在50年代曾开展航海多项运动，其中就有舢板驶帆运动。1978年我国才开始奥运会项目的帆船运动。当时只有六个省级代表队的二十几个运动员参加。1980年我国第一次举行了全国帆船锦标赛，只设了“芬兰人”和“飞行荷兰人”两个级别。1983年第一次把帆船项目列入第五届全国运动会的正式比赛^{[1][4]}。

我国在1979年由国家体育总局青岛航海运动学校试制成功第一条帆板，在第四届全运会摩托艇比赛开幕式上作了成功的表演，获得了各方面的认可。

1981年8月，在青岛举行了我国首次帆板竞赛。

1982年我国帆板运动员首次在第9届亚洲运动会上亮相，当时排名第四。我国在历届奥运会比赛成绩如表1-1所示。

表1-1 我国在历届奥运会取得的成绩

时间	地点	姓名	项目	成绩
1992年	西班牙巴塞罗那	张小冬	女子帆板	亚军
1996年	美国亚特兰大	李丽珊（香港）	女子帆板	冠军
2000年	澳大利亚悉尼	周元国	女子帆板	第五名
2004年	希腊雅典	殷剑	女子帆板	亚军
2008年	北京	殷剑	女子帆板	冠军
2008年	北京	徐莉佳	女子雷迪尔	季军
2012年	伦敦	徐莉佳	女子雷迪尔	冠军