

# 帆船运动的力学原理

缪国平

(上海交通大学, 上海 200030)



缪国平, 1948年2月出生, 祖籍浙江省鄞县。1969年毕业于上海交通大学船舶制造系; 1970年起在启东县造船修造厂从事造船设计; 1979年至1981年赴瑞典Chalmers技术大学船舶流体力学专业进修; 1981年9月起在上海交通大学船舶流体力学研究室任教和从事科研工作, 历任讲师、副教授, 现任教授, 船舶流体力学研究室副主任, 中国力学学会水动力学专业组成员, 上海市力学会理事。1988年2月由瑞典Chalmers技术大学授予博士学位。主要的科研方向为非线性水波与结构物的相互作用, 在非线性和二阶波浪力、非线性浅水波的折射与绕射等方面的研究中开展了一系列的工作, 在国内外刊物和会议上发表论文70余篇。著有《船舶在波浪上的运动理论》、《海洋工程水动力学基础》、《挠性部件力学导论》等著作。1988年起, 被聘为上海市帆船队技术顾问。

**摘要** 从帆和船体的流体动力性能出发, 讨论了帆船运动的力学原理和提高帆船运动水平的若干途径。

**关键词** 帆船, 帆, 帆船运动, 流体动力性能

## 1. 前言

二次大战以后, 帆船运动作为一种竞赛项目逐渐兴起, 并迅速风靡世界。一些级别的帆船比赛已经作为正式项目列入奥运会的赛程。由帆船运动派生而来的帆板运动也得到了长足的发展。

早在五千多年前, 人类就开始使用帆船, 经过漫长的探索和实践, 在帆船设计和驶风技术上有了可观的进步。然而, 这些进展大多基于经验, 缺乏科学性的指导。近代对帆船和驶风技术的研究也只是近几十年的事<sup>[1-3]</sup>。帆和船体设计的优劣无疑对帆船的航行性能有极大的影响。但对赛用帆船而言, 绝大部分级别的比赛均使用规定的船型和帆。这样, 船员对外界环境条件变化的反应和操纵策略就成为影响整个赛程成绩的主要因素。例如帆形的调节, 转帆角的控制、船体横倾和纵倾的调整以及对外界环境条件的正确判断等等, 无一不影响整条船的航行性能。可以说, 帆船运动是智慧和灵敏的较量。运动员(船员)的智慧和机敏不仅应建筑在他丰富的经验和敏锐的判断上, 还应依赖于他对帆船运动力学机理的理解和运用。帆船+环境因素+人的因素这样的动态分析和研究模式应成为未来的发展方向, 它将更加深刻地揭示帆船运动的力学机理并推动帆船运动的发展。

本文综述了有关帆船运动的基本力学原理, 包括帆船的驶风原理、船体和风帆的受力分析和影响性能的因素以及逆风赛程的最佳驶风技术。最后讨论了提高帆船运动水平的若干研究方向。应该说, 这些内容远非详尽, 有许多复杂的因素未能纳入评述, 例如波浪中的驶风问题等等, 有待于进一步的研究发展。本文的宗旨在于唤起力学界和体育界有关人士对帆船运动中的力学问题研究的重视。

## 2. 帆船驶风原理

帆船航行时, 由于航速的影响, 船员感知的风速和风向与实际的真风有很大的差别. 图 1 为真风风速、相对风风速和船速三者的速度三角形, 显示了它们之间的矢量关系. 其中  $v_T$  代表真风风速, 它表示固定目标上感知的风速和风向;  $v_s$  为船速, 方向沿横轴;  $v_A$  为相对风速或表观风速, 方向由速度三角形确定, 它是船员在航行中感觉到的风的特征量. 在估计空气阻力或风的推进效果时, 考虑的应是相对风速和风向. 在船速已知的情况下, 知道了真风和相对风中两者之一, 即可由三角关系式推算出另一个. 在船上估计真风风速及方向有赖于船员对船速、相对风速和风向的正确判断. 图 2 将有助于船员对真风风速及风向的快速估计 [4]

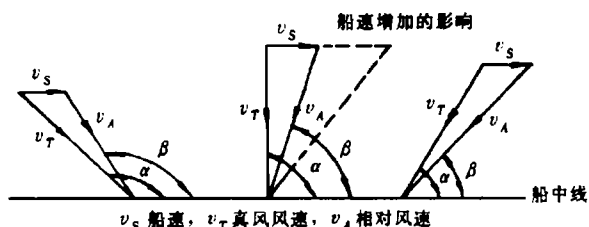


图 1 速度三角形

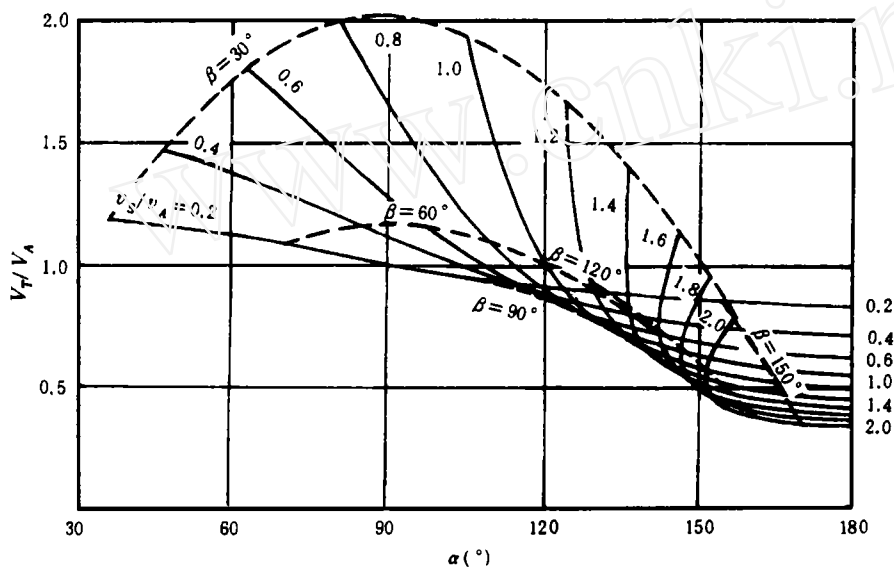


图 2 真风特征曲线图

当风以一定的攻角吹向风帆时, 帆上作用有升力和阻力. 它们在帆船前进方向的分量的合力即构成了帆船的推进力. 帆的升力和阻力在垂直于前进方向上的合力形成了横漂力, 企图将船压向下风. 这一横漂力由船体以一定的漂角运动时所受水动力作用力的横向分量平衡. 帆船的受力可由图 3 表示, 这时帆船以速度  $v_s$  与真风  $v_T$  成  $\alpha$  角航行, 漂角为  $\gamma$ , 相对风  $v_A$  与船速成  $\beta$  角, 与风帆弦线间的夹角为  $\alpha_w$  (即几何攻角),  $\varphi$  为帆的调整角. 风帆所受的升力为  $L$ , 阻力为  $D$ ; 船体所受的水动升力为  $S$ , 阻力为  $R$ . 按几何关系可得风帆的推力为

$$T = L \sin \beta - D \cos \beta \quad (1)$$

横向力(垂直于前进方向)为

$$T_t = L \cos \beta + D \sin \beta \quad (2)$$

风帆的推力  $T$  须克服船体的阻力  $R$ , 推船前进. 若  $T > R$ , 船即加速;  $T < R$  则船速渐减; 在船速稳定时即有  $T = R$ . 风帆的横向力  $T_t$  须与船体的横向力  $S$  平衡. 如果不然, 则船将产生一横漂加速度, 导致漂角的增加或减少, 达到新的平衡状态.

从式 (1) 容易看出, 风帆的推力是帆上升力和阻力联合作用的结果. 阻力并不总是减少推力. 当相对风从船后来时 ( $\beta > 90^\circ, \cos \beta < 0$ ), 阻力构成了推力的一部分. 尤其是在正艮风的情况,  $\beta = 180^\circ, \sin \beta = 0, \cos \beta = -1$ , 推力  $T = D$  将完全由帆的阻力所形成. 当风向改变时, 帆的升力、阻力也会发生变化, 如何在某一航向角下使帆调整到有最大推力是驾船者极为关心的. 这一最佳调整可以简单地从  $C_L - C_D$  极坐标图中得到. 图 4 即为这一方法的图示. 这里  $C_L$  和  $C_D$  分别为帆的无量纲升力系数和阻力系数, 令  $\rho_a$  为空气密度,  $v_A$  为帆上的风速,  $A$  为帆的面积, 则  $C_L$  和  $C_D$  定义为

$$C_L = L / \frac{1}{2} \rho_a v_A^2 A, \quad C_D = D / \frac{1}{2} \rho_a v_A^2 A \quad (3)$$

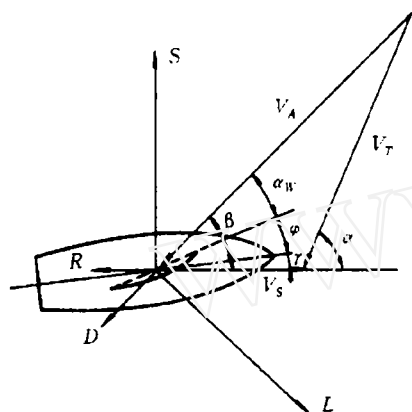


图 3 帆船受力图

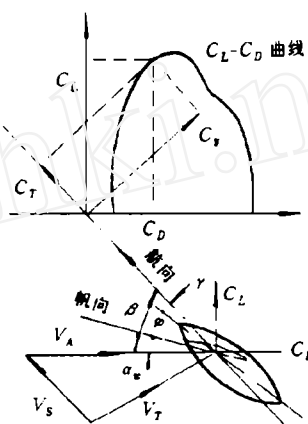


图 4 推力的形成

这些系数随攻角  $\alpha_w$  变化. 以  $\alpha_w$  为参数, 把  $C_L$ 、 $C_D$  表达在一张图上, 即得  $C_L - C_D$  极坐标图, 表征某一特定帆的空气动力性能, 设相对风速  $v_A$  与航向间夹角为  $\beta$ , 使  $C_L - C_D$  曲线的横坐标与相对风速平行且同向, 船的航向线通过坐标原点, 沿此航向线作它的垂线, 并与  $C_L - C_D$  曲线相切 (如切于图中  $A$  点), 切点对应的攻角即为帆的最佳攻角.  $OA$  在航向线上的投影为最大推力系数  $C_T = T / \frac{1}{2} \rho_a v_A^2 A$ ; 在垂直于航向线方向上的投影则为横漂力系数. 根据  $\varphi = \beta - \alpha_w - \gamma$  的关系可得出最佳对首转帆角度.

应该指出, 上述最佳转帆角、最大推力等量只是从帆本身的性能出发考虑的, 并未真正考虑与船体的动力平衡或匹配的问题, 因此, 只能讲与最佳值相距不远. 因为, 如果帆的流体动力与船体的流体动力不平衡, 船速和漂角均可能有变化, 这样, 相对风风向角  $\beta$  也与原来的不一样. 比较严密的考虑将在下文中讨论.

帆船在不同的真风航向角时可达的最大航速画成极线图则如图 5. 一条好的帆船在 4 个罗径点 (1 罗径点 =  $11^\circ 15'$ ) 的真风航向角或更小一些仍能航行. 通过反复的换抢, 帆船可沿

之字形航线驶向上风目标. 由图 5 也可看出, 帆船在横风 ( $\beta = 100^\circ - 140^\circ$ ) 行驶时比顺风还要快些, 原因是横风时帆的有效推力比顺风时更大.

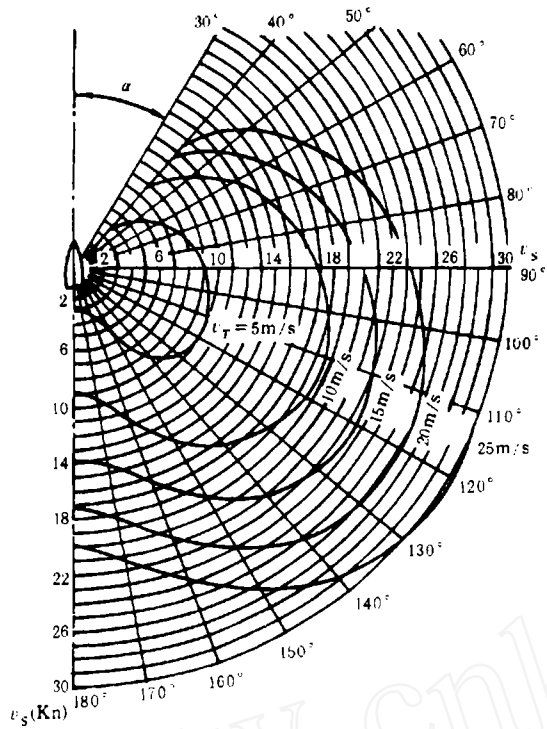


图 5 不同航向时帆船的航速极线图

### 3. 船体和帆的受力分析与影响因素

尽管大多数级别的帆船比赛, 对船体和帆是规定的, 由于帆船体积较小, 在航行中状态的变化可以很大, 包括船体的纵倾、横倾、帆的攻角和拱度的调节等等. 这些因素对整条船的航行性能有很大的影响, 而且在一定程度上可以通过船员的操纵, 包括他在船上的位置, 得到有利的调整. 因此, 本节将简述船体和帆的基本流体动力特性, 并着重讨论影响性能的若干因素.

#### 3.1 船体受力

船体在水面上航行时, 必然遇到空气和水的反作用力. 因此, 船体总阻力应包括空气阻力和水阻力两部分. 一般而言, 船体的空气阻力与水阻力或帆的空气阻力相比是小的, 可以不加细究或归于帆一起考虑. 水阻力则可分成静水中运动时的静水阻力和波浪中运动时的阻力增加.

当船正浮并沿其纵中平面前进时, 船体总阻力  $R_T$  由兴波阻力  $R_w$ 、粘压阻力  $R_{pv}$  和摩擦阻力  $R_f$  所组成, 即

$$R_T = R_w + R_{pv} + R_f \quad (4)$$

前两者均由船体运动时周围流场的变化而产生的首尾压力差引起, 早期的研究中将这两部分合称为剩余阻力; 后者主要是由流体的粘性产生 [5].

在大多数情况下, 帆船的前进速度方向不在其纵中对称平面内, 而是有个小的偏角,

称为漂角或风压角，它主要由风与帆的相互作用产生。船体的这种运动状态相当于一有限翼展的机翼在一定攻角下的运动。于是，船体除了受(4)式所示的阻力外，还受到垂直于前进速度的横漂力和与前进速度方向相反的附加阻力，它们分别被称作升力和诱导阻力，记为  $R_T$ 。一般情况下，帆船所受的静水总阻力  $R$  应为  $R_T$  与  $R_I$  之和。其受力图可参见图 2。

图 6 为某一帆船航速为 7 节时阻力随漂角变化的实验结果<sup>[6]</sup>，图中不同的曲线对应于不同的横倾角。由图可见，漂角对阻力的影响颇大。当然，这一阻力的增加不光是由于诱导阻力的出现，还可能是因漂角而引起粘压阻力和兴波阻力增加的缘故。有些级别的赛用帆船在底部沿纵中线装有可收放的稳向板。当稳向板放下时可增大船的升力，以致在较小的漂角时船体的横向力即可与帆产生的横向推力平衡，以降低由漂角而产生的阻力增加。当然，由于稳向板增大了湿面积，导致摩擦阻力增加。因此，正确地使用稳向板对帆船的航行性能也有重要的影响。

帆船靠风推进，帆上的风压同时也给帆船施加了倾侧力矩。因此帆船往往是在有横倾的状态下航行的。横倾对阻力性能的影响十分复杂，在横倾状态下，船体湿表面积变化

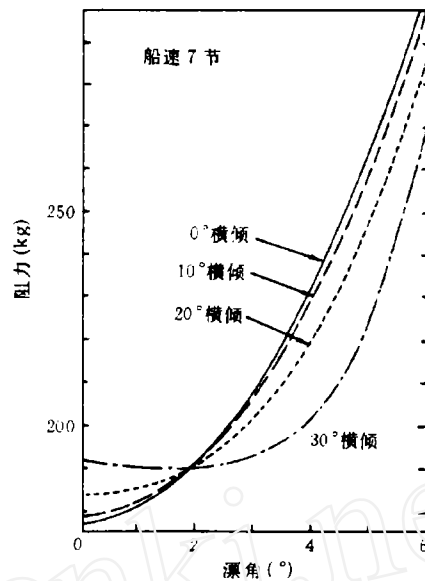


图 6 阻力与漂角的关系

将使得摩擦阻力变化。倾侧后的水线面将是不对称的，下风侧的水线面变得丰满，或能使船航行的兴波阻力增加。另外，由于不对称性，会产生额外的升力和诱导阻力。为了保持航向，必须转舵以保持与该升力增量产生的转首力矩平衡，亦会导致实际航行时阻力的增加。同时，船的漂角也可能因横倾而变化，因此，横倾航行时帆船的阻力不仅与横倾角有关，还与引起的漂角有关。由图 6 可见，阻力随横倾角变化的趋势按漂角不同而异。在漂角小时，阻力随横倾角增加而增加；漂角增加时，这一趋势逐渐逆转；当漂角大于  $2^\circ$  时，横倾角的增加反而导致阻力有所下降。总体上说，这一阻力变化对实际航行的意义并不十分大，横倾时帆的推力减小可能远大于船体因横倾而起的阻力变化。

早期人们用“Gimcrack”帆船的试验结果来判断横倾时的阻力变化<sup>[7]</sup>。这一结果指出，当横倾角在  $5^\circ - 20^\circ$  间时，阻力约增加 20%，横倾角超过  $20^\circ$  后，阻力增加很快；横倾  $35^\circ$  时，阻力增加可达 50% 左右。这一试验是模拟一有经验的船员在一给定航程中实际情况而设计进行的，因此在得出上述结论时，事实上包括了许多其他因素的影响，例如帆的推力、船的漂角及船速的变化。它可看作是横倾对船总体性能而不仅仅是对阻力的影响。

### 3.2 风帆的力学特性

风帆的空气动力性能在许多方面与机翼相仿。当风帆以某一攻角对风时，帆上作用有升力和阻力(图 3)。它们随攻角而变，其关系通常可用攻角为参数的  $C_L-C_D$  图表示(图 4)。升力主要由环量产生，与帆面拱度密切相关；阻力则与帆面质量、帆后流动分离等因素有关。由  $C_L-C_D$  图上可见，小攻角时，升力随攻角增加而增加，在某一攻角时到达最大值；此后，攻角的增加使得升力下降、阻力激增。在机翼理论中，这一现象称为失速，其原因是

大攻角时翼后发生旋涡分离的缘故。因此，对机翼来说，我们要求其在小攻角状态下工作，以得到较大的升力和较小的阻力。但风帆的推力是升力和阻力在船前进方向分力的合力，在某些情况下，如顺风航行，帆的阻力表现为帆的推力。因此，对风帆要素的调节（对某一特定的帆）不仅要使帆在中等攻角下（ $20^\circ - 40^\circ$ ）有较大的升力，还要使帆在大攻角（ $70^\circ$  以上）时有较大的阻力。

对给定的赛用软帆，船员除了可以操纵整个帆保持最佳的对风攻角外，还可以主缭绳的张紧程度调节帆的拱度，并通过帆杆调整帆形及帆的扭曲度（即垂直方向帆攻角的变化）。对帆的试验研究指出，其他要素相同时，帆的拱度比增大（帆某一水平截面上拱度与弦长之比），升力系数将有所增加，因此，较大的拱度比是有利的。然而，拱度比的增加也导致小攻角时阻力系数的增加，使船的迎风航行性能恶化。一般而言，拱度比取  $1/7 - 1/9$  较为合适。在实际操船航行中，帆的拱度还必须视风速的大小进行调整。例如在小风中驶船，如果帆的拱度过大，气流将没有足够的能量弯曲平顺地流过帆的背面，使帆的推力损失，所以适度调平拱度反而是有利的<sup>[8]</sup>。

有些级别的帆船，装备有前帆和主帆。这时，除了两帆都必须保持合适的帆形外，它们之间的相对位置及流体动力干扰也是重要的<sup>[9]</sup>。

#### 4. 逆风驶船的最佳战术

迎面来风时，可以利用帆上风压的向前分量推动帆船前进，以之字形的曲折航线反复换抢驶向上风目标。如果船相对于真风的航向角偏小，风不着力，帆船前进困难；如果航向角偏大，则会浪费一些航程和时间。因此，逆风赛程往往是整个比赛中最容易拉开成绩差距的航程。如图 7 所示，在力学上，我们可以把问题处理为寻求最佳的操船战术（如合适的航向角和转帆角），使帆船到达上风标的时间最短或者逆真风向的船速  $v_{mg}$  最大。

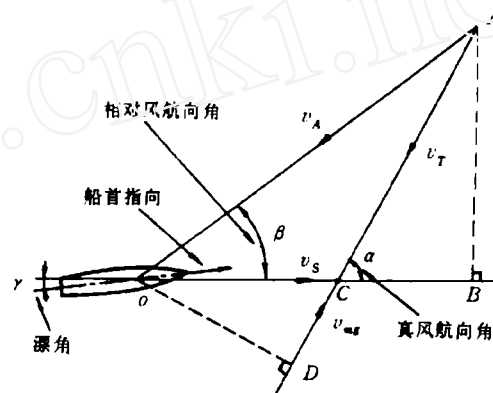


图 7 最大逆风航速  $v_{mg}$  之定义

首先考虑定常风作用下的逆风驶船问题。这时，帆船的受力关系如图 3 所示，力的平衡方程为

$$R = L \sin \beta - D \cos \beta \quad (5)$$

$$S = L \cos \beta + D \sin \beta \quad (6)$$

如前所述， $R$  和  $S$  分别为船体的阻力和横向力， $L$  和  $D$  分别为帆上的升力和阻力， $\beta$  为相对风航向角。若将船看作是个有椭圆型负荷分布的机翼，则船体的阻力可表达为

$$R = P_h q + \frac{S^2}{4C_h q} \quad (7)$$

式中  $q = 1/2 \rho_w v_s^2$  为流体动压力， $\rho_w$  为水的密度。上式右端第一项为无漂角时的船体阻力，也有人称为寄生阻力，如前所述，它包括了船的摩擦阻力、粘压阻力和兴波阻力； $P_h$  有面

积的因次, 或可称为寄生阻力面积. 右端第二项为诱导阻力, 其中  $C_h$  可定义为有效俘获面积.

与之类似, 我们可把帆的阻力表达为

$$D = P_s Q + \frac{L^2}{4C_s Q} \quad (8)$$

其中  $Q = \frac{1}{2} \rho_a v_A^2$ ,  $\rho_a$  为空气密度,  $P_s$  和  $C_s$  分别为帆的寄生阻力面积和有效俘获面积.

帆的升力按帆调整后的攻角、拱度等变化, 若定义一个帆调整系数  $\tau$ , 把升力可表示为

$$L = 2QC_s \tau \quad (9)$$

将上述阻力和升力的表达式代入式 (5), 并引入无因次系数: 帆效率  $\eta_s = C_s/P_s$ , 船体效率  $\eta_h = C_h/P_h$ , 船、帆俘获面积比  $\kappa = \rho_w C_h/\rho_a C_s$  和速度比  $x = v_A/v_S$ , 则有

$$F(x, \tau, \beta) = 2\tau \sin \beta - (\eta_s^{-1} + \tau^2) \cos \beta - \frac{\kappa}{\eta_h x^2} - \frac{x^2}{\kappa} \left[ \tau \cos \beta + \frac{1}{2}(\eta_s^{-1} + \tau^2) \sin \beta \right]^2 = 0 \quad (10)$$

式中相对风航向角  $\beta$  和帆调整系数  $\tau$  都是变量, 可通过船的转动和帆的调节来达到. 如果固定  $\beta$ , 最小的  $x$  (最大的艇速  $v_s$ ) 即依赖于最佳的  $\tau$ . 由式 (10) 有

$$dF = F_x dx + F_\tau d\tau + F_\beta d\beta = 0 \quad (11)$$

现因  $d\beta = 0, dx = 0$ , 按上式必须有  $F_\tau = 0$ , 即

$$F_\tau(x, \tau, \beta) = 2 \sin \beta - 2\tau \cos \beta - 2 \frac{x^2}{\kappa} \left[ \tau \cos \beta + \frac{1}{2}(\eta_s^{-1} + \tau^2) \sin \beta \right] (\cos \beta + \tau \sin \beta) \quad (12)$$

从 (10) 式和 (12) 式中消去  $x^2/\kappa$  易见, 对每一  $\beta$  角, 最佳帆调整系数  $\tau$  只依赖于  $\eta_s$  和  $\eta_h$ . 接下来, 我们即要求寻找一组满足方程 (10) 和 (12) 的  $x, \beta$  和  $\tau$ , 使得船的迎风速度  $v_{mg}(v_S \cos \alpha)$  为最大.

由图 7 中速度间的三角关系可把相对于真风  $v_T$  的逆风速度  $v_{mg}$  表示为

$$y(x, \beta) = \frac{v_S \cos \alpha}{v_T} = \frac{x \cos \beta - 1}{1 + x^2 - 2x \cos \beta} \quad (13)$$

欲使  $y(x, \beta)$  达到最大, 变量  $x, \beta$  须满足

$$dy = y_\beta d\beta + y_x dx = 0 \quad (14)$$

在帆最佳调整的情况下, 由式 (11) 和 (14) 中消去  $d\beta$  和  $dx$ , 得

$$G(x, \tau, \beta) = F_x y_\beta - F_\beta y_x = 0 \quad (15)$$

它与式 (10) 和 (12) 一起组成了求解最佳  $x, \tau, \beta$  的联立方程组. 按这组  $x, \tau, \beta$  值, 可由图 27 所示的几何关系确定最佳真风航向角  $\alpha$ ; 由式 (13) 确定最大逆真风船速  $v_{mg}(= v_S \cos \alpha)$ ; 并由式 (9) 和帆的升力曲线求出帆的最佳调整角 (即帆对表现风向的攻角). 若求得的  $\tau$  值及帆的升力超出实际可能, 则可取最大的升力来确定  $\tau$ , 然后解式 (10) 和 (15) 组成的方程组以确定此时最佳的  $x$  和  $\beta$ . 上述方程组的求解可用数值迭代法进行, 有关细节可参见文 [10].

上述方法曾用来对— 5.5m 的帆船 Antiope 号作了实际计算. 船体和帆的一些特征参数可按实验结果或理论计算得到. 经迭代计算得到最佳真风航向角  $\alpha$  为  $49.2^\circ$ , 这时的逆风最大航速为  $0.609v_T$ , 最佳帆调整系数  $\tau$  为  $0.403$ . 实际上, 按该  $\tau$  值所得的帆升力系数超过了该帆所能达到的升力最大值. 若取该帆的最大升力来确定  $\tau (= 0.343)$ , 可求得最佳真风航向角为  $47.7^\circ$ , 逆风最大航速为  $0.602v_T$ , 比无升力限制时约低 1%.

当船速或风速有变化时, 问题是非定常的. 若不计垂直于船速方向的加速度和船的转动加速度, 式 (5) 可改写为

$$m\dot{v}_S = L \sin \beta - D \cos \beta - R \quad (16)$$

引进无因次速度系数  $\sigma = v_S/v_T$ , 上式又可记为

$$\dot{\sigma} = \dot{v}_S/v_T = v_T f(\sigma, \alpha, \tau) \quad (17)$$

该式为船在逆风驶帆时的基本动力约束条件.

在这一条件下, 对比赛中的逆风赛程, 我们很自然地要求有效地操纵帆船在最短的时间内到达上风处的绕标或终点线. 在力学上, 这一要求可处理为使泛函

$$J = \int_t^{t_f} v_S \cos \alpha dt \quad (18)$$

有最大值<sup>[11]</sup>. 这里  $J$  有距离的因次,  $t$  为当前时刻,  $t_f$  为到达上风目标处的时刻. 也就是说, 当船驶行一定的迎风距离时, 我们希望费时  $t_f - t$  最少. 这一极值问题可用最优化理论中的庞特里雅金极大值原理来处理<sup>[12]</sup>. 最后可得在帆处于最佳调整状态时逆风航行最佳操船的必要条件为

$$\tan \alpha = \left( \frac{[\sigma \cos \alpha]_{\text{oss}}}{\sigma \cos \alpha} - 1 \right) \frac{\partial f / \partial \alpha}{f(\sigma, \alpha)} \quad (19)$$

其中  $[\sigma \cos \alpha]_{\text{oss}}$  为逆风最佳定常航行时的  $\sigma \cos \alpha$  值. 对 Antiope 型帆船, 这一方程的解如图 8 所示. 由图可见, 最佳定常航行状态只是上述方程通解中的一个解 (图中表现为一个点). 按这一最佳操船战术曲线, 可以看出, 当艇速过低 ( $\sigma < \sigma_{\text{最佳}}$ ) 时, 船应稍转向下风, 使船的真风航向角  $\alpha$  加大. 这时, 船速逐渐有所增加. 随着船速的增加,  $\alpha$  应逐渐减小, 使船回复到定常状态. 当船速过大时, 最佳操船战术要求船稍转向上风, 使  $\alpha$  减小. 当船速逐渐减小时,  $\alpha$  应渐渐增大, 回复到最佳定常状态.

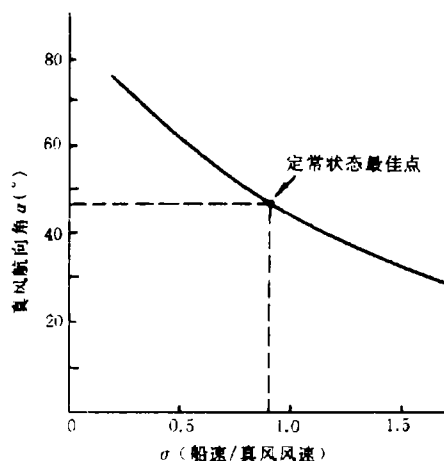


图 8 最佳操船战术

应该注意的是, 这里的航向角是相对真风讨论的, 而不是相对于表观风的相对风航向角, 因为相对风航向角的变化可能导致船员采取一种错误的战术. 例如, 当真风方向不变, 速度减小时, 相对风向船首靠拢 (即  $\beta$  角减小), 船员很可能使船向下风方向转动以保持原来的相对风航向角  $\beta$ . 事实上, 这一措施恰与最佳逆风操船战术的要求相悖. 按最佳战术要



求, 这时船应向上风方向转动, 因为这时相对于真风风速来说, 船速显得过大. 图 9 至图 12 即清楚地表明了真风风速减小时最佳操船的战术及其效果. 这些图也是对 Antiope 号的参数按本节的动力模型计算得到. 计算时设船最初处于最佳逆风航行状态, 10s 后, 风速从 4.88m/s 突然降至 3.66m/s. 图 9 表示若按最佳操船战术, 船员应保持的真风航向角; 图 10 为这时船速  $v_S$  的变化. 作为比较, 还列出了如保持真风航向角  $\alpha$  为常数时  $v_S$  的变化. 尽管最佳操船时  $v_S$  下降比  $\alpha$  为常数时快, 但从图 11 可见, 逆风船速在风速减小的初期以最佳操船状态为大. 图 12 为以最佳战术操船与以保持  $\alpha$  为常数操船所得的逆真风方向航行距离增益, 由图可见最佳操船战术的优越性. 当风速突然增加时, 我们也可通过比较看出最佳操船战术的效果, 这里不再列图说明.

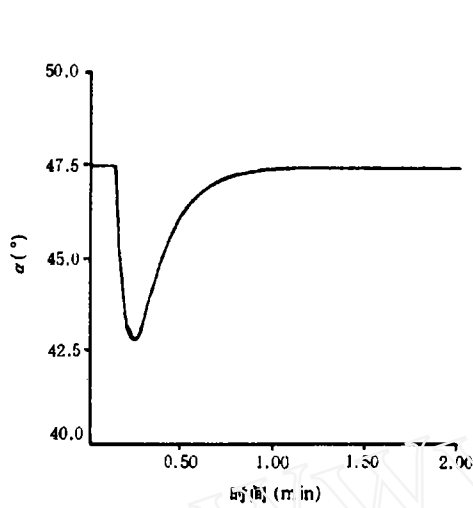


图 9 最佳操船的真风航向角

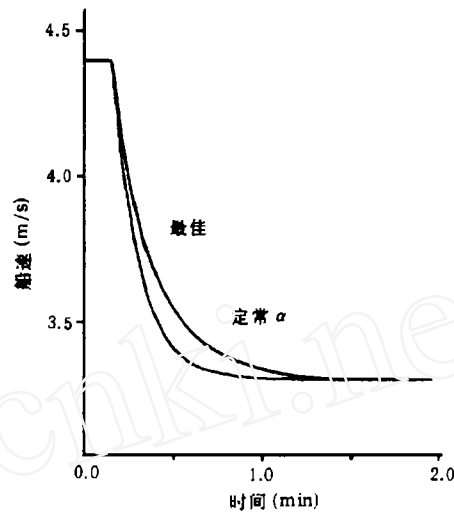


图 10 船速比较

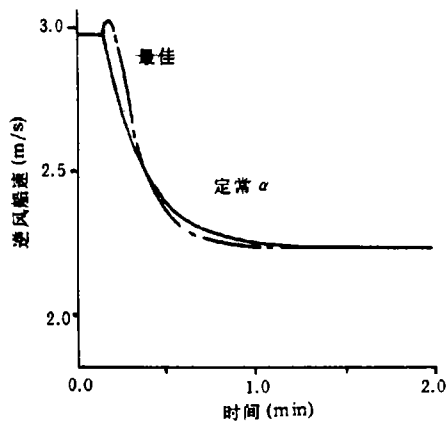


图 11 逆风船速比较

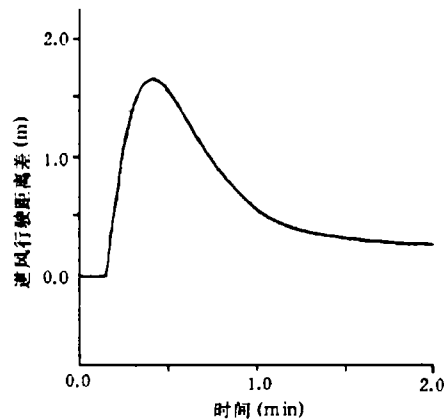


图 12 逆风行驶距离差

## 5. 关于帆船运动研究的考虑

由上述讨论可见, 影响帆船航行性能的因素十分复杂. 尽管大多数级别的帆船赛规则要求使用指定的船型和帆型, 在船体和帆本身的流体动力性能改善方面能做的工作有限, 但由于航行中内外状态的多变性, 船体姿态的合理控制、帆形的最佳调整, 对外界环境条件

(包括风、浪)及其变化的判断和应变的战术等等都对帆船整体航行性能和运动成绩有重要的甚至决定性的作用。因此,帆船运动水平的提高不仅要求船员有丰富的经验和熟练的技巧,还有赖于船员对帆船运动力学机理的深刻了解和灵活应用,包括对其使用的船和帆在各种情况下力学性能的切实掌握。

以往国内外的研究工作多数着眼于船体和帆的孤立的流体动力特性及其改进上,对各种因素联合作用下综合航行性能的研究比较少。从目前我国专业帆船运动队的实际训练情况来看,大都以实船跑标训练为主要手段,这对提高操船的熟练程度和积累经验无疑是至关重要的,但对一次成功的跑标是否是最佳的,能否进一步提高成绩,通过何种途径提高等问题缺乏科学的特别是定量的判断依据。据此来看,为提高帆船运动的水平,当前迫切需要进行的研究工作或许可分成下列两大方面:一是加强船体与帆的流体动力性能及船与帆流体动力干扰的研究;二是提高训练的科学化和定量化程度。前者的研究重点应着眼于状态变化(如船航行姿态、帆形、风浪条件等的变化)对船和帆流体动力性能及总体航行性能的定量影响。这一目的主要可通过试验手段达到。由于赛用帆船船型小,可直接用实船在船模试验池中进行试验,帆的性能及调节的影响则可在风洞中进行实体试验。这些定量的研究成果是训练科学化和定量化的依托。在后一方面的研究中,由于实船跑标状态不易控制和重复,建设室内模拟训练台或许是个方向。这一训练台是个多自由度的转台,在模拟的风速风向下,由船员在训练台上操作,根据调节器应力测定,给出相应的船体和帆的流体动力性能(由前一方面的研究提供),从而按理论模型通过计算机联网给出船的航行要素,并在屏幕上显示航行轨迹。判定船员操作的优劣和改进的方向,对训练起到科学的指导作用。

总起来说,帆船运动力学机理的研究对提高帆船运动水平有积极的意义,这一点已被体育界和力学界越来越多的人士所认识。本文的综述只是这方面努力中的一部分。

#### 参 考 文 献

- [1] Davidson K S M. Some experimental studies of the sailing yacht. *SNAME*, 1936, 44: 288-312
- [2] Milgram J H. The design and construction of yacht sails. MIT S. M. Thesis, 1962
- [3] Larsson L. Scientific methods in yacht design. *Annu Rev Fluid Mech*, 1990, 22: 349-385
- [4] 库德莱瓦蒂 T M 和扎哈洛夫 B H. 风帆船航速计算方法. 船舶译丛, 1988, 3: 20-25
- [5] 邵世明, 姜次平. 船舶阻力. 上海: 上海交通大学出版社, 1987
- [6] Herreschoff H C. Hydrodynamics and aerodynamics of the sailing yacht. *Trans SNAME*, 1964, 72: 445-492
- [7] Barnaby K C. Basic Naval Architecture, Hutchinson Scientific and Technical. 4th Edition. London, 1963
- [8] 盛立仕. 帆船驾驶. 航海运动参考资料, 1987, 4-5: 53-77
- [9] 新开明二, 矢頭康彦. ダブルメンブレヤールの空力特征解析. 西部造船会会报, 81: 71-83
- [10] Letcher J S Jr. Optimum windward performance of sailing craft. *J. of Hydronautics*, 1976, 10(4): 140-144
- [11] Copps E M. How to sail a pencil boat upon a paper sea. 14th AIAA Symp. on the Aerol Hydronautics on Sailing, California, 1984: 47-56
- [12] 海宁·吐尔. 最优化方法. 北京: 机械工业出版社, 1982

(本文于 1993 年 6 月 29 日收到)