

Application and Design of Multi-Parameter Testing and Analysis System for Sailing*YAO Zhi-ming^{1,2}, SUN Yi-ning^{1*}, HAN Tao^{1,2}

1. The Key Laboratory of Biomimetic Sensing and Advanced Robot Technology, Anhui Province, Hefei Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China

Abstract: Sailing is a complicated aquatic sports item. After the controllable and uncontrollable factors that influenced achievement being researched and analyzed, measurable indices that evaluate the sailboat's sailing trim and feasible testing & analyzing project are proposed, a set of multi-parameter testing and analysis system is designed. Testing and analysis system integrates the data collection, analysis, real-time display, transmission and storage functions, using the techniques of multi-sensor information fusion and the methods of sport biomechanics to extract information from a mass of data, studying the relation model among the force on rigging, wind direction angle and velocity, quantification indices based on rigging scales and effective velocity that evaluates the sea route selection are proposed. The system has been on probation in China Sail-boat Team, the effect was remarkable.

Key words: sailing; multi-parameter testing; information fusion; sport biomechanics; effective velocity

EEACC: 7230; 7210

帆船运动多参数测试分析系统的研制及应用*姚志明^{1,2}, 孙怡宁^{1*}, 撤涛^{1,2}

1. 中国科学院合肥智能机械研究所安徽省仿生感知与先进机器人技术重点实验室, 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学自动化系, 合肥 230027

摘要: 帆船运动是一项复杂的水上运动项目。在调研和分析影响成绩的可控因素和不可控因素的基础上, 提出评价帆船航行状态的可测量指标和可行性测试分析方案, 研制了一套船载多参数测试分析系统。测试分析系统集成数据采集、分析、实时显示、传输和存储功能于一体, 运用多传感器数据融合技术和运动生物力学分析方法对大量数据进行信息提取, 研究帆绳力与风向角、航速之间的关系模型, 提出帆绳标度法量化操帆指标和用有效航速评价航线选择方法。系统已在国家帆船队进行试用, 效果显著。

关键词: 帆船运动; 多参数测量; 信息融合; 运动生物力学; 有效航速

中图分类号: TP274.2

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)01-0182-05

帆船运动由帆翼空气动力学与船体水动力学共同作用提供动力, 该运动是一项复杂的水上运动项目。影响帆船运动状态的主要因素有: 环境因素、器材因素、技战术因素。环境因素大致包括: 风速风向、流速流向、气压状况、潮汐和涌流、海浪等; 器材因素大致包括: 帆型、船型、操作索具等; 技战术因素大致包括: 运动心理、运动规则掌握程度、操帆技术、

控船压舷技术, 综合决策能力等。在这些因素中, 环境是可变因素, 其数学模型比较复杂; ISAF(国际帆联)对比赛用船在器材上有明确规定, 因此对于特定项目的运动, 器材因素可以排除在外; 技战术是最能反映运动员运动水平的一个因素, 也是最难把握和量化的一个因素, 绝大部分运动员和教练员主要靠经验积累来提高运动水平和执教水平, 这对于提高

基金项目: 国家科技攻关计划课题资助(2005BA904B04)

收稿日期: 2007-07-29 **修改日期:** 2007-09-30

我们国家帆船运动水平和备战 2008 年奥运会在时间上具有较大的挑战性。

帆船前行动力由风提供。当帆船在前行时, 帆面成不规则弧形, 凹面称为迎风面, 凸面称为背风面。根据伯努力定律^[1]可知: 由于流经迎风面和背风面两面的气流速度不一样, 气流在帆的两面将产生压差, 这个压差作用在帆面上形成升力, 升力便拉或者推着船前行, 如图 1 所示。

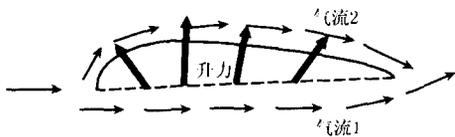


图 1 帆翼升力产生示意图

由理论分析^[1-2]可知, 要想获得最大航度, 帆与风必须成最佳夹角以使船获得最大前行动力。至今, 国内外对于帆船帆板运动的研究^[3-6]主要采用特定条件仿真、试验方法和数值模拟方法, 如风洞试验测定帆翼的空气动力学性能, 航速预测(VPP), 航迹预测。这些方法为帆船帆板器材研发提供了非常重要的理论依据, 也为运动训练和指导提供了一定的理论指导。但由于帆船帆板运动本身的复杂性, 风洞和水池试验无法模拟真实航行环境, 数值模拟会因为参数的增加而使模型变得复杂而庞大。国家帆船队为了能够更好地备战 2008 年奥运会, 为了奥运会上能够夺得更多金牌, 强烈需要明确如何在不同环境条件下获得最大航速。根据国家队的意愿以及体育训练科学化的需要, 我们研制了一种帆船运动多参数测试分析系统。本文运用运动生物力学分析方法对帆船运动进行分析, 通过研制的系统同步测量风速风向、流速流向、航速航向及帆绳力等参数, 用数据融合和信息提取等方法, 建立各参数与有效航速的关系模型, 为实船训练获得最大有效航速提供量化指标。该系统目前已在国家帆船队激光级(Laser)部分试验使用, 效果显著。

1 系统结构及硬件设计

为了明确帆船运动学、动力学各参数与实际航速间的关系模型, 需要同步测量风速风向、航速航向、流速流向以及帆面张力分布等各参数, 通过多传感器信息融合和数据对比等数据处理方法, 从各参数曲线中提取出帆角、风向角与有效航速之间的关系模型。系统组成如图 2 所示。通过对中央控制器 MSP430F149 单片机编程产生同步时钟序列, 时钟序列控制多参数测量模块同步测量风速风向等参数。风速风向仪可以安装在帆船上, 也可以安装在

特制的浮标上。若安装在特制浮标上, 则需要在风速风向仪和帆船上各加一个无线同步模块, 这样才能保证测得参数的时间一致性。单片机控制采集多参数测量模块测得的数据, 再经数据处理, 最后将处理的结果以数字和图形的方式在液晶上进行同步显示, 同时将数据存储到外部存储器上, 以便将数据上传到上位机进行分析、对比等处理。

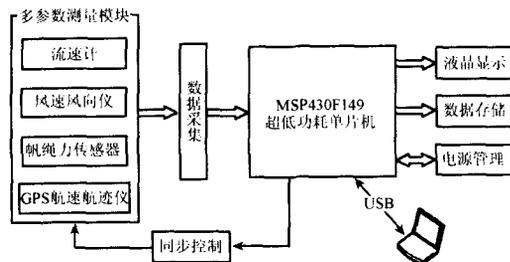


图 2 测试分析系统框图

1.1 结构设计

该测试分析系统工作在海水环境下, 所以系统结构上除了要满足人机工程学要求外, 还必须满足防水防腐要求。为了获得船行过程中海域位置上变化的气象参数, 本文设计的系统将风速风向仪安装在帆船桅杆顶端, 数据处理上采用差分方法消除船速引起的风速误差。这一方法即可保证测得的风速风向与其他参数的时空一致性, 也能保证数据的准确度和精度。同理, 流速计安装在帆船底部合适位置, 以消除因安装在特制浮标或教练艇上引起的空间不一致。另外, 可以采用将柔性压阻或压电式传感器固定在帆上的方法测量帆面张力。但由于目前柔性传感器工艺、尺寸的限制, 此方法很难避免破坏帆面。而帆也比较昂贵, 同时又具有不可破坏性, 所以本文采用专门设计的一维力传感器测量帆绳力, 然后通过数值计算模拟帆面张力的方法来解决这一问题, 以后将在此工作的基础上进行帆面张力柔性传感器的研制, 力争解决这一难题。船载终端将主控制器和基于 GPS 技术的航速航向测试模块集成在一起, 可以减少结构设计工艺, 减小系统体积, 减轻系统重量。系统结构设计简单、美观大方, 装卸方便, 防水防腐性能严格满足要求, 安装示意图如图 3。

1.2 多参数测量模块

如图 3, 该模块由流速计、风速风向仪、帆绳力传感器和 GPS 航速航向模块组成。

流速计采用基于霍尔传感器的三叶轮设计, 水流推动叶轮转动, 叶轮转动使定磁场中磁场变化, 霍尔传感器检测磁场变化, 通过对应关系计算得到相对流速, 通过与航速差值可计算出绝对流速。量程:

60 m/s,精度:±2%×测量值。

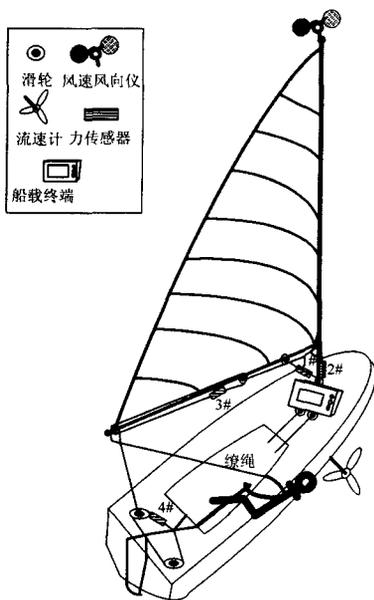


图3 系统安装结构示意图

风速风向仪采用小型叶轮尾翼结构设计。风速风向传感器通过检测与风速成线性关系的磁电开关产生的信号脉冲频率来测风速,通过检测尾翼转动引起的基准电压下电位器上电压变化来测风向。同样可以采用差值方法计算出绝对风速。风速量程:1.0 m/s~50 m/s($\leq \pm 2\%$),最大抗风能力:60 m/s,风向量程:($0^\circ \sim 360^\circ, \leq \pm 5^\circ$)。

GPS 航速航迹模块基于 GPS 定位技术,根据 4~6 颗卫星给出的空间定位坐标和多普勒频移解算出帆船航行速度。同时,还可以利用 GPS 定位技术测定规定航线中四个浮标的空间位置,然后通过计算得到帆船航行中的有效航速(实际航速在两目标连线上的速度分量),文中数据分析部分将详细说明。GPS 刷新频率:1 Hz,测速精度:0.1 m/s。

帆绳力传感器采用自主研发的 E 型梁式结构压阻式应变片和专门的信号调理电路设计,结构设计精巧,安装方便,适用于不同粗细、不同类型的帆绳。量程:0~3 000 N,综合精度:1%FS(满量程)。

1.3 MSP430 单片机

MSP430 单片机是 TI 公司推出的一种超低功耗 16 位单片机,能够在低电压下以超低功耗状态工作,特别适用于手持终端设备等低功耗要求场合;其控制器具有强大的处理能力和丰富的片内资源;F 系列还自带 FLASH 存储器,可以方便高效地进行在线编程和下载。

MSP430 系列单片机最显著的特点是它的超低功耗,在 1.8~3.6 V 电压、1MHz 时钟条件下工作,耗电电流在 0.1~400 mA 之间,RAM 在节电模式

下耗电为 0.1 mA,等待模式下仅为 0.7 mA。本设计选用 MSP430F149 单片机作为系统控制器。

MSP430F149 具有以下主要特点:

(1)功能强大的 CPU 内核:16 位 CPU 和高效的 RISC 指令系统。无外扩的数据/地址总线,在 8MHz 时钟时可达 125ns 的指令周期,具有 16 个快速响应中断,能及时处理各种紧急事件。

(2)丰富的片内外围功能模块:12 位的 A/D 转换器 ADC12 有 8 个外通道,4 个内通道,高达 200 kbit/s 的采样速度,多种采样方式;两路 USART 通讯串口,可用于 UART 模式或 SPI 模式;片内有精密硬件乘法器、两个 16 位定时器、看门狗定时器 Watchdog Timer,6 个并行口 P1~P6,48 条 I/O 口线,其中 P1、P2 口具有中断能力,适用于多通道数据采集系统。

(3)超低功耗:拥有 5 种低功耗模式,以适应不同需求。其中 LPM4(数据保持模式)仅耗电 0.1A,工作状态耗电为 200 mA;CPU 从低功耗模式唤醒到工作模式只需 6 μ s,切换非常迅速。

(4)Flash 存储器:片内集成多达 60 kB 的 Flash ROM 存储空间,使用廉价的 JTAG 接口转换器即可对单片机进行在线调试、编译和下载,无需额外的高电压烧结。且 JTAG 口可直接和仿真器(FET)相连,无须另外的仿真工具,方便实用,开发成本低。按照特定的方式将 MSP430 内部的熔丝熔断可保护芯片程序不被窃取,具有高保密性。

1.4 存储模块

为了对参数进行解析、比对分析等进行上位机软件处理,需要保存实训中测得的参数。而单片机的 RAM 最大只有 2 KB,无法满足 4~5 h 的训练数据存储空间要求,我们选用 ATMEL 公司的 8 MB 容量 AT45DB642 存储器。AT45DB642 是一种单 2.7 V 电压供电,具有两种接口,使用串行或者并行方式访问数据,可以广泛用于程序代码和数据存储等方面的 FLASH 存储器。

1.5 液晶显示模块

系统需要以数字和图形方式实时显示测得的各参数及分析结果,综合功耗及海面上视觉环境要求,我们选用图形点阵液晶显示模块 LCM160803。该液晶模块可显示内容 160×80 点阵,77.0×51.0 视域,T6963C 控制器,FSTN 黑白模式,带白色背光(可软件控制背光开关),5 V 工作电压,背光关时只需 22 mA 工作电流。因为液晶显示模块自带控制器,所以 MSP430 单片机与液晶模块的电路连接非常简单,可节省单片机引

脚留作其他模块使用。由于液晶模块逻辑工作电压为 5 V,所以单片机与液晶模块之间需要电平转换模块才能使液晶正常工作。为了节省系统功耗,单片机引脚 P4.0 与液晶模块背光源负极 K 之间通过 NPN 型三极管连接,编程实现键控液晶背光的开/关;液晶模块对比度调节引脚 V₀、负电压输出引脚 V_{OUT}和地 VSS 与滑动变阻器连接,以控制液晶对比度来调节显示效果。液晶模块与 MSP430F149 的电路连接如图 4。

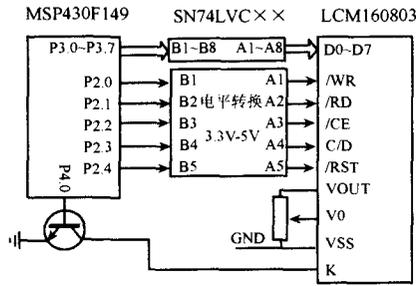


图 4 MSP430F149 与液晶接口电路

1.6 USB 通信模块

USB 接口用于系统与电脑之间通讯。我们选用 Philips 公司的 PDIUSB12,它是一款性价比很高的 USB 器件,并且完全符合 USB1.1 版规范,可与任何外部微控制器实现高速串行数据传输(2M byte/s),支持完全自治的直接内存存取 DMA 操作,并具有主端点的双缓冲配置。

2 数据分析与软件设计

系统测得风速风向、航速航向、流速以及帆绳力等各参数后,除了在液晶上动态显示之外,更重要的是需要对这些参数进行分析,挖掘出这些参数之间潜在的关系模型。

图 3 中,四个一维力传感器分别测量帆绳受力情况。其中,1# 测斜拉器拉力 F_1 ,2# 测前帆角拉力 F_2 ,3# 测后帆角拉力 F_3 ,4# 测缭绳拉力 F_4 。运动员在航行中通过四根绳索来调节帆的拱度、曲度及帆角 γ ,最终间接调节风向角 β 、帆攻角(也叫迎角) α 到最佳角度,使帆船获得最大航速。GPS 航迹模块测量船的航速 V_s 及方位角,风速风向仪测量风速 V_T 及方位角,流速计测量流速 V_L 。其中,风速 V_T 是相对值,由航速 V_s 与真实风速 V_0 合成;流速 V_L 也是相对值,由航速 V_s 与真实流速 V_i 合成。以上参数均为矢量,且均为时间函数,如图 5。

图 5 中, V'_s 是航行风,与航速 V_s 大小相等,方向相反; V_e 是有效航速,为航速 V_s 在两目标连线上的速度分量, A 为航向与两目标连线夹角;帆攻角 α

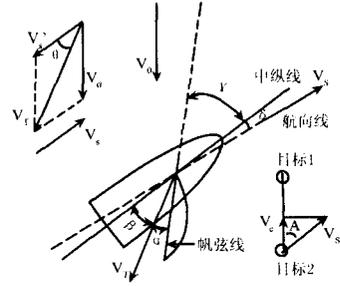


图 5 航行角度分析图

为相对风(也叫感觉风)与帆弦线之间夹角;风向角 β 为相对风与船体中纵线之间夹角,其大小可由测得的航速角度和风速角度计算得到;帆角 γ 为帆弦线与船体中纵线之间夹角; δ 为帆船航向与船体中纵线之间夹角,称为漂角,一般情况下 δ 较小,其影响基本可忽略; θ 为航行风 V'_s 与相对风速 V_T 之间夹角。各参数数学关系式如下:

$$\gamma = \alpha + \beta \tag{1}$$

$$\beta = \theta + \delta \tag{2}$$

当 δ 忽略不计时, $\theta = \beta$

$$V_0 = V_s + V_T \tag{3}$$

$$|V_e| = |V_s| \cos A \tag{4}$$

在帆船运动中,由于海面上航线不易标定,迎风航行时也无法直线航行,所以航行过程中很难判断航线选择是否合适。而我们发现,通过以上公式计算有效航速 V_e ,引进有效航速来评价航线选择的优劣是一个非常简单而有效的方法。

帆绳力 F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 反映的是风对帆面的作用力,由伯努力定律可知:帆面拱度和曲度适中情况下,帆两面气流流速差异越大,风对帆的拉力/推力越大,航行速度越快。所以,为了获得最大有效航速,要选择好航线,同时需要调整帆角和风向角到最佳。而实际航行中,运动员只能通过调节舵和操作索具来调节航向、帆角和风向角。通过缭绳调节帆角,斜拉器和前、后帆角调节帆的拱度和曲度,帆绳上的力信息与角度参数和风力大小相关,通过多传感器信息融合方法可从这些信息中挖掘出航速与角度、风速、流速之间的关系模型,最终根据模糊计算

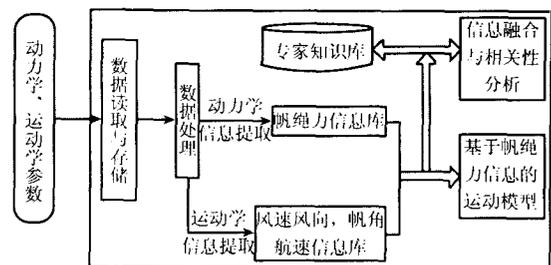


图 6 软件设计框图

和专家知识以标度形式给出一定气象环境下对应帆绳调节位置,给出帆绳调节具体指标,方便运动员操作。因此,上位机软件设计上需要对获得的各运动学和动力学信息进行加工和处理,对数据进行管理,建立帆船运动训练专家系统。

3 应用及测试结果

国家帆船队激光级(Laser)2007年5月下旬使用我们研制的系统对部分运动员进行了测试分析。图7为某运动员的部分测试分析结果曲线图。在上位机软件中拖动棕色扫描线可以读取任意位置处曲线上的力值,同时在数字表盘显示航向角(航行方向与真实风向之间夹角)、风速、航速和流速等。还可以选中某一段区域进行放大、求方差等处理。根据多次、多人测试分析后,将测试结果进行横向和纵向比较,检验原有经验的同时获取新的知识。将分析结果用于帆绳调节刻度标定,使调帆指标量化,使运动员调帆操作有规可循,效果显著。采用有效航速评价航线选择优劣的方法有效地解决海上航行航线选择及优化问题。

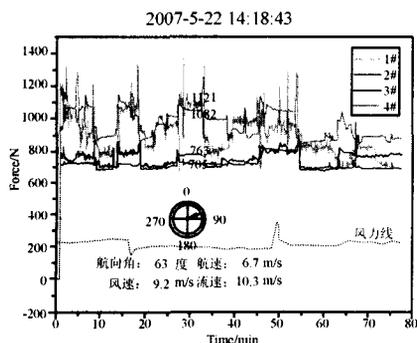


图7 测试分析结果

4 结束语

本文在分析帆船运动动力学和运动学特性的基

础上,提出了一种帆船运动多参数可行性测试方案,介绍了测试分析系统的结构原理以及数据分析方法,提出了采用有效航速评价航线选择优劣以及帆绳标度法控制帆角和风向角的方法,为帆船运动状态评价指标量化提供了有效技术手段。为中国帆船队提高科学训练水平、备战2008奥运会提供有力帮助。将测量参数和分析结果建立专门数据库,为帆船运动训练专家系统的建立奠定基础。另外,经过进一步的研究,该系统还可用于航速航迹预测。

参考文献:

- [1] 徐华舫. 空气动力学基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1992.
- [2] 王树杰,张宪强,张树青. 帆板运动迎风航行力学分析及航线选择[J]. 体育科学,2005,25(8):56-58.
- [3] Gale T J, Walls J T. Development of a Sailing Dinghy Simulator [J]. Simulation,2000,74(3): 167-179.
- [4] Haibo Xia, Shiotani S, Kobayashi E, Wakabayashi N. Estimation of Ship's Course for Sailing on Route by Navigation Simulation in Coastal Water[J]. Journal of Japan Institute of Navigation,2006,115:51-57Sept.
- [5] Ge Yan, Meng Qing-chun, Wei Zhen-gang, Gao Yun, Yan Chuan-jun. Optimum path Planning Method for Straightaway Sailing Race Based on Dynamic Programming[J]. Control and Decision,2005,20(12):1360-1369.
- [6] 柏开祥,王德恂,韩久瑞. 帆板流体力学研究的综述[J]. 首都体育学院学报,2006,18(2):26-31.
- [7] 胡大可. MSP430系列单片机C语言程序设计与开发[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [8] 郑秀媛. 运动生物力学进展[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [9] 卢德明. 运动生物力学测量方法[M]. 北京:北京体育大学出版社,2001.
- [10] Lawrence A. Klein 著,戴亚平等译. 多传感器数据融合理论及应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.



姚志明(1983-),男,在读博士研究生,主要研究方向为运动生物力学及基于生物电信息的人体医学物理学,zhmyao@gmail.com



孙怡宁(1963-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为传感器技术、机电一体化、生物生理信息获取及数字体育,先后参加或主持多项国家863、自然科学基金和科技攻关项目,近年来在IEEE、IF-AC等国外刊物和会议发表论文11篇、国内刊物和会议发表论文55篇,获得发明专利11项、实用新型专利15项,ynsun@iim.ac.cn