帆船运动的风力分析及仿真

安徽财经大学信息工程学院　王　芳

[摘　要] 本文讨论了帆船运动的基本动力学原理，分析了风力对帆的影响，如何使帆产生推力驱动帆船的前进，并采用三维动画软件 3ds max 和此平台上的动态模拟系统 reactor 进行帆船的建模和运动仿真，通过设置物理属性值及不同的风向和所得到的运动轨迹图分析和观察帆船的运动，得出结果表明用 3ds max 的动态模拟系统 reactor 来模拟帆船运动是可行的，符合动力学规律。

[关键词] 帆船运动　3ds max　仿真　帆　推力

1 引言

帆船是一项海上运动项目，它的运动依赖于作用在船体和帆上的水流动力和空气动力的平衡[1]。最近几十年来，对帆船的研究已有很大进展，但是研究方向大都集中在对帆船结构的优化，重点是帆船的稳态空气动力和水动力特性。近几年，由于在娱乐和体育竞赛领域中小型帆船的数量有了极大的提高，对于帆船自动舵以及抢风行驶的研究也日益得到了重视[4]，但在帆船运动仿真方面研究的较少。

3ds max 是世界上应用最广泛的三维动画制作软件，它的动力学仿真系统 reactor 功能较完善，在动力学预览窗口中具有实时人机交互的功能，可以自由移动物体来观看动力学效果，这样就可以把它的很强大的实时交互环境与一定精度的动力学仿真结合起来。这种仿真方法在模拟布料运动，机械零件运动，刚体碰撞等许多外界现象时[6]，快速而直观，本文就是使用这种仿真方法来模拟帆船的运动。

虽然现在船舶仿真技术发展迅速，目前也已有用 3ds max 软件进行仿真的文章发表，其一是利用其脚本语言 Max script 来描述船舶在不规则波浪下的运动，其二是文献[7]中利用 reactor 动力学模块，对船舶模型在水中的交互运动进行了预报，但具体到帆船运动的仿真研究，即如何以直观的方式得到帆船在海上运动的模拟效果，目前还没有这方面的研究成果出现。因此，如何找到一种好的方法，能够较精确地建立帆船模型，并能够通过改变一些力学参数来仿真帆船运动，就成为一项非常有必要的研究。

本文的工作是探讨帆船运动的基本原理和分析风力作用于船帆的情况，然后利用 3ds max 8 平台的 reactor 动力学系统来仿真帆船在海面上运动，通过改变对帆船运动有影响的一些物理参数，比如风向，以直观的方式得到帆船在海水中的运动效果。

2 帆船运动的力学原理

帆船在海上运动所需考虑的因素很多，所受到的总的力可以用下面的公式来表达：

总的受力 = 水动力 + 空气动力 + 扰动

其中水动力是水作用在船体上的力，空气动力是风作用在帆上的力，扰动是依赖于海况的风、浪和气流的波动力[3]。

一般人认为帆船是被风推着跑的，其实风的动力以两种形式作用于帆，如图 1、图 2 所示，帆船的最大动力来源是所谓的“伯努利效应”。

当空气流动得快的时候，在正面挡住它的物体就会受到空气的冲击，这种冲击产生的压力称为动压力。当帆船如图 1 所示顺风行驶时，就是空气对帆的动压力推动帆船前进的。由“流速增加，压强降低”的伯努利原理知道，当空气向一个方向流动时，它向侧面作用的力就要相对减小。也就是说气体流动速度越大的地方，动压力压强越大，而静压力压强越小。流速愈小的地方，动压力压强愈小而静压力压强愈大。这样气体流速小的地方对流速大的地方就会产生一个侧向的压力，这个力称为静压力。当迎风行驶时，船正是在风的静压力推动下前进的[4]，如图 2 所示。

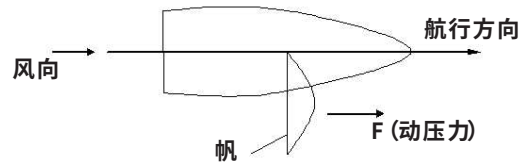

图 1 帆船顺风行驶

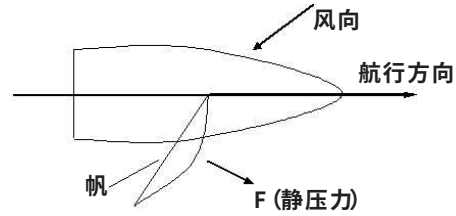

图 2 帆船迎风行驶

帆所受静压力的产生，主要是帆具有像机翼一样的弧形。把帆的横截面和机翼的横截面对照一下，就可以看到它们的共同点。当气流通过帆或机翼时，由于机翼上面和帆的前面的气流要走更长的距离来和机翼下面和帆后面的气流相会合，因而就加快了流速，使帆的前面和后面及机翼的上面和底面的气流产生了不同的流速。流速慢处的压强比流速快处的静压强大，这个压强差使机翼产生了向上的升力，也使帆获得了向前的推力[4]。

帆船与普通船只的最大区别是没有内在的动力装置，风对帆的推力就成为帆船前进的主动力。风向和风力不仅影响船的航向，而且还影响船的前进速度[4]。运动员必须正确掌握风向角，才能充分利用风力来驾驶帆船。风向角有六类，为了简化控制，将其分为两类，一类称为迎风角(0°～80°)，另一类称为顺风角(80°～180°)。这样对于帆船，就有两种操船的策略：一个是当风向角 <80°时，顶风行驶；另一种是风向角 >80°时，顺风自由航行[2]。

3 船帆受力分析

图 3 描述了真风风速、相对风速和船速三者之间的矢量关系。其中$\overline{V}_T$代表真风风速矢量，它表示固定目标上感知的风速和风向；$\overline{V}_B$为船速，方向是沿着船体的中轴线；$\overline{V}_A$为相对风速或表观风速，方向由速度三角形确定，它是运动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[4]。

当风以一定的攻角吹向帆时，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，这一横漂力由船体以一定的漂角运动时所受水动作用力的横向分量平衡。帆船的受力可由图 4 表示，这时帆船以速度 v_B 与真风 v_T 成 α 角航行，漂角为 γ，相对风 v_A 与船速成 β 角，与风帆弦线间的夹角为 α_ω（即几何攻角），φ 为帆的调整角。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。按几何关系可得帆的推力为[5]

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

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

横向力（垂直于前进方向）为

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

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。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[5]。

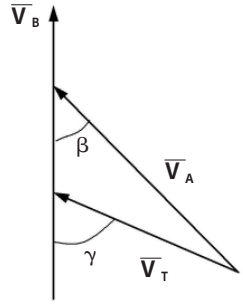

图 3 船速、真风向和相对风向的速度三角形

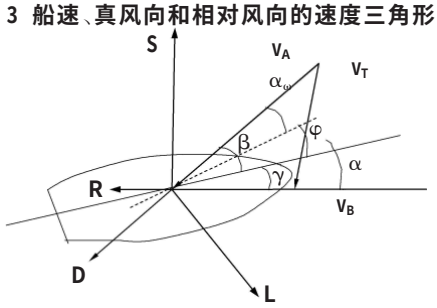

图 4 帆船受力图

如图 5 所示，风以相对速度 V_A 吹向光滑的帆面，风向和帆面之间的夹角为 α。速度 V_A 可以分解为平行和垂直于帆面的两个分速度 V_{A1} 和 V_{A2}。当帆面较光滑时，$V_{A1}\approx V_A\cos\alpha$，$V_{A2}\approx V_A\sin\alpha$。单位时间里吹到帆面的质量为 m 的空气动量改变大小约为 mV_{A2}，方向垂直于帆面指向外。因此，帆面所受到的压力为：

$$F_T=mV_A\sin\alpha=\rho_\alpha AV_A^2\sin\alpha \quad (3)$$

式中，ρ_α 为空气密度，A 为帆的面积。压力 F_T 可分解为沿着船的龙骨线指向前进方向的分力 F_R 和垂直于前进方向的横向分力 F_H。由于帆船船体具有特殊的流线型构造（船体浸入水中的横向面积远大于纵向截面积），故水对船体侧面的推力远大于正面的阻力。垂直于船的前进方向的横向分力 F_H 与这个方向上水对船的作用力 F_S 相互抵消，即 $F_H=F_S$。假设帆面与船前进方向的夹角为 β，则指向前进方向的分力如下式：

$$\begin{aligned}F_R&=F_T\sin\beta\\&=\rho_\alpha AV_A^2\sin\alpha\sin\beta\\&=\frac{1}{2}\rho_\alpha AV_A^2[\cos(\alpha-\beta)-\cos(\alpha+\beta)]\end{aligned} \quad (4)$$

分力 F_R 通过帆与船体的连接轴传递到船体，这就是使帆船前进的动力[4]。

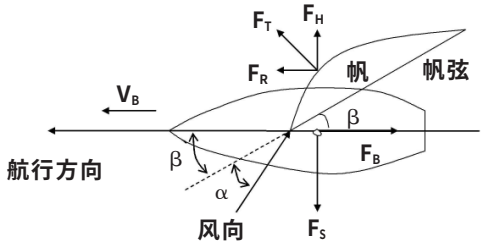

图 5 帆船迎风行驶受力分析

4 帆船运动仿真实验

4.1 实验原理

首先在 3ds max 8 平台上建立帆船模型，设置场景、灯光等，然后利用此平台上的 reactor 动力学系统对模型的属性进行设置，使其满足帆船运动的条件。在时域中对其分析并求解，可以得到每个自由度的解随时间变化的离散值，然后通过本仿真系统将解自动加载到帆船三维模型上，让其产生实时运动，并可生成一般的动画文件或图片，最后可以通过轨迹视图面板，得到每一时刻的精确值[6]。

4.2 实验步骤

在 3ds max 中建模有三种方式，mesh、patch 和 NURBS 方式，本文中用到的帆船模型是采用 mesh 方式建模的。将帆船的船体、桅杆、帆和稳向板按一定的比例建好，并赋予相应的材质，图 6 是建好的帆船模型。由于帆船的船体、桅杆和稳向板是一起运动的，所以要放在同一个 group 组中，创建一个复合刚体。打开组，为每个组成员设置 Mass（质量），因是复合刚体，只能整体指定 Elasticity（弹性）和 Friction（摩擦力）的大小。同时把舵加入到已创建的刚体集中。为帆创建一个布料集合，并将将帆固定在桅杆上。

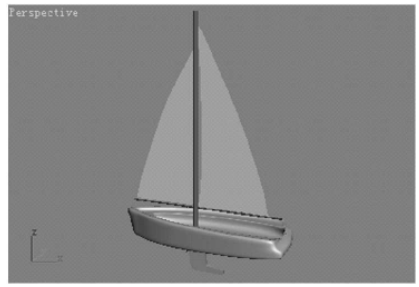

图 6 帆船模型

创建海水，在视图中用鼠标左键拖拽出一个水面的空间绑定物体，打开修改器面板，设置密度、阻尼、波动属性等相关参数。因为水是一种空间绑定物体，在渲染时看不见，故要创建一个网格物体来代替水面。创建一个平面并将其绑定到水上，并赋予材质。

创建风力，设 y 轴为风力的正方向，调整风向，与 y 轴成 30°角，并修改相应的属性值。

给帆船模型和海水附以材质，所有场景搭建好后就可以进行动力学求解了。在动力学求解前需进行预览，因为求解是不可恢复的，所以在求解前进行预览是很有必要的。此外在动力学预览窗口中具有人机交互的先进功能，可以自由地移动物体来观看动力学效果，并且可以把当前的状态更新到 3ds max 的视图中[7]，预览视图见图 7。

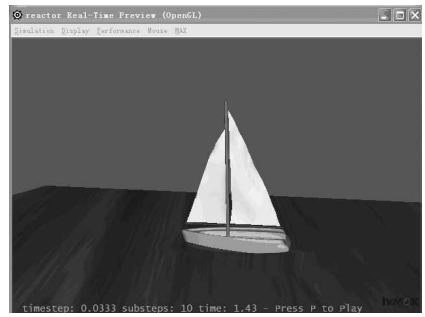

图 7 reactor 预览视图

时间轴设置从 0 到 300 帧（1 秒 30 帧），在 3ds max 中系统默认是 0 到 100 帧，但 0 到 100 帧时间太短，渲染成动画后看到的帆船运动不明显。设置完后就可以求解了，系统会自动求解，求解完后的数据自动保存在文件中。

4.3 实验结果

图 8 是顺风时风向与帆成 30°角时的帆船运动轨迹图，显示了从 0 到 300 帧的运动路线，横轴表示时间帧数，纵轴表示位移。在本仿真实验中，风向设置的是 y 轴正方向。图中 x 轴、y 轴、z 轴三条轨迹线分别表示的是帆船在 x 轴、y 轴、z 轴三个方向的运动路线。x 轴轨迹是一条波动阻尼 （下转第 438 页）

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

其中 $K=\frac{(b-a)}{b}$

系统在参数 $\alpha=8,\beta=14,\gamma=0.5,a=-1,b=1.5$ 时，处于混沌吸引子状态，运动是不规则的，其相图如图 4 所示：

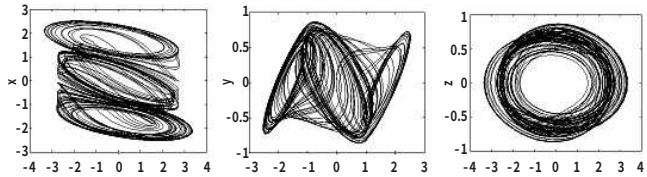

图 4 系统相图

当其它参数不变，只改变 α 时，系统的全局分岔图如图 5 所示：

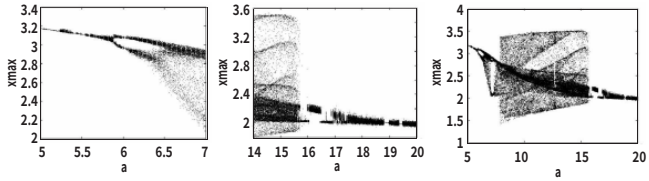

图 5 系统的全局分岔图

图 6 给出了系统以 a 为变量的分岔过程的相图。

3 结论

本文通过对该混沌电路进行分析并采用 MATLAB 进行计算机仿真[7]，在混沌振荡过程中，出现了双涡卷混沌吸引子，改变其参数和初始值，电路呈现出丰富的混沌动力学行为。从图 5 和图 6 可以看出，当 a＜6.6 时，电路呈现出周期运动；当 6.6＜a＜17 时，系统出现混沌状态；当 a＞17 时，系统出现逆分岔过程，又变回周期运动。

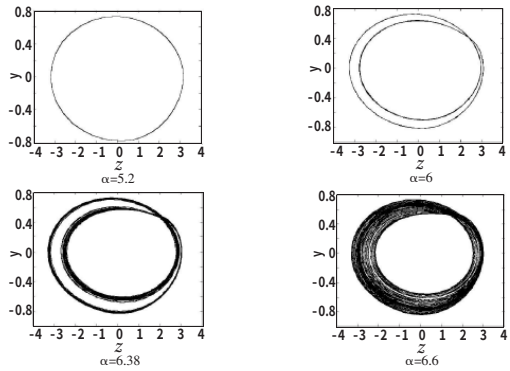

图 6 周期运动相图（当 α=5.2，6，6.6 时）

参考文献

[1]J C Sprott. Complex Behavior of Simple System[C].International Conference on complex Systems, 2000

[2]Tzuyin Wu,Min-Shin Chen. Chaos control of modified-Chua's circuit system[J].Physics D, 2002, (2867):1-6

[3]刘崇新.蔡氏对偶混沌电路分析[J].物理学报 2002(51):1198-1201

[4]刘崇新,李剑,金黎.一个具有负电容的三阶自制混沌电路分析[J].通信学报,2003,24(6):155-160

[5]胡承忠.对负电阻及其应用的研究[J].信息技术与应用,2004,(5):40-42

[6]牛武.基于非线性电阻的 RLC 混沌电路实验分析[J].物理实验,2001,21(11):11-12

[7]王小辉,谢胜曙,张志伟.基于 MATALB 的混沌系统仿真与分析[J].现代电子技术,2006,(10):105-107

（上接第 436 页）曲线，因为帆船在开始运动时是处于静止状态，为了摆脱这个状态，由于海水的波动和风力的作用，帆船就会上下波动，随着时间的推移波动逐渐减小，最后趋向于零。Y 轴轨迹是帆船运动的速度曲线，因为帆船是由静止开始运动，由于风力对帆的作用，使得帆的推力 T 需克服船体的阻力 R 来推动帆船的前进，当 T=R 时，帆船开始作匀速直线运动，所以开始时运动位移会有一个扰动，速度接近零，从 32 帧左右开始，轨迹线趋于线性，即帆船以匀速直线运动前进，此时外界合力为零。而 z 轴方向与受力方向和运动方向始终都是正交，所以速度始终为零，位移也接近零。

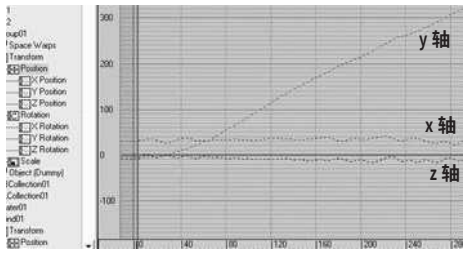

图 8 风向（顺风）与帆成 30°角的帆船运动轨迹

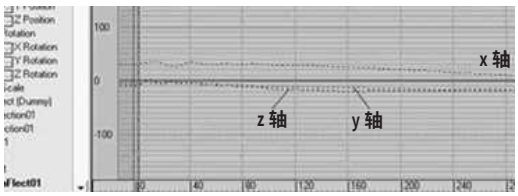

图 9 风向与帆平行时的帆船运动轨迹

图 9 是风向与帆平行时的帆船运动轨迹。帆船航行的动力是由风提供的，所以改变风对帆的作用力和方向就可以改变帆船的运行状态。当风向平行于帆时，即风向与帆的夹角 =0，由式（3）可知帆面所受的压力为零，使帆船前进的动力也就为零，所以就无法推动帆船的前进。由图中可看出，由于风力的无效，帆船无法前进，x 轴、y 轴、z 轴三条轨迹线保持平行，其位移值无变化。

5 小结

本文详细介绍了帆船运动的动力学原理，分析了船帆受风力影响的情况，并利用 3ds max 平台的 reactor 动力学系统对船帆受风向改变时的帆船运动进行了仿真，通过对其运动轨迹的分析可以得出帆船运动符合动力学规律，即当帆的推力大小等于船体的阻力时，帆船的运动为匀速直线运动；当风向与帆的夹角为 0 时，风力无效帆船无法前进。帆船运动仿真的完善将对了解研究帆船在海水中的运动起到重要作用。

参考文献

[1]Jaehoon Yoo,Hyoung Tae Kim.Computational and experimental study on performance of sails of a yacht [J].Ocean Engineering,2006 (33): 1322-1342

[2]葛艳，孟庆春，张文等.帆船的模糊自适应控制方法研究[J].哈尔滨工业大学学报，2005. 37(12)：1658-1661

[3]Jaime Abril, Jaime Salom.Fuzzy Control of a Sailboat [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 1997.16：359-375

[4]葛艳.基于模糊-进化理论的帆船运动路线规划研究[博士学位论文][D].青岛：中国海洋大学，2005

[5]缪国平.帆船运动的力学原理[J].力学与实践，1994.16(1)：9-18

[6]卞钢，刘寅东.基于 3ds max 的船舶三维运动仿真[J].计算机仿真，2004.22(5)：216-218

[7]黄少刚.3ds max 6 动画制作高级教程[M].北京：清华大学出版社，2004

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net