

# 基于粒子系统的舰船航迹仿真

赵欣, 李凤霞, 战守义

(北京理工大学计算机科学技术学院, 北京 100081)

**摘要:** 提出一种基于开尔文波理论和粒子系统技术的船行波模拟方法, 采用开尔文波理论构建二维船行波模型, 使用粒子系统技术对船行波的三维模型进行动态建模, 从实际观察出发, 根据艏浪、艮浪的形状特征、作用范围和浪花的随机运动特性, 给出艏浪、艮浪的粒子系统建模方法。实验证明该方法能快速逼真地模拟舰船航行时的航迹。

**关键词:** 舰船航迹; 艏浪; 艮浪; 船行波; 开尔文波; 粒子系统

## Ship Wakes Simulation Based on Particle Systems

ZHAO Xin, LI Feng-xia, ZHAN Shou-yi

(School of Computer Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**【Abstract】** This paper proposes a new ship waves modeling method based on Kelvin waves and particle systems, which gives out 2-D ship waves model by using Kelvin waves theory, and extends the model from 2-D to 3-D by using particle systems. The bow wakes and stern wakes modeling methods using particle systems are proposed, which are based on the shape characteristics and stochastic movements of the two wakes. Experimental results show that the modeling methods are efficient and realistic in ship wakes simulation.

**【Key words】** ship wakes; bow wakes; stern wakes; ship waves; Kelvin waves; particle systems

### 1 概述

舰船航迹是一种复杂的水流现象, 它包括艏浪、艮浪和船行波等水流效果。由于舰船航迹具有形状的不规则性和内在的复杂性, 其实时仿真一直是虚拟海战场视景仿真的研究热点和难点。粒子系统理论是描述动态不规则物体的常用方法<sup>[1]</sup>, 可用于模拟复杂的自然现象, 因此, 一些研究者将其引入舰船航迹的仿真中<sup>[2-3]</sup>。本文以舰船航迹中的艏浪、艮浪和船行波为研究对象, 基于粒子系统技术提出一种新的舰船航迹仿真方法。

### 2 船行波建模

#### 2.1 基于开尔文波的二维船行波模型

根据船舶流体力学中的开尔文波理论, 深水水面上一运动点源所形成的扰动波系称为开尔文波<sup>[4]</sup>, 其波峰线轨迹方程如下:

$$x = X_1 \cos \theta \left( 1 - \frac{1}{2} \cos^2 \theta \right), y = \frac{1}{2} X_1 \cos^2 \theta \sin \theta \quad (1)$$

其中,  $X_1$  表示扰源相对原点的运动距离, 反映了扰动波系中波间隔的大小;  $\theta$  表示扰源与波峰线上的点连线后与扰源运动方向所成的夹角,  $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 。对于不同的常数  $X_1$ , 给定一组  $\theta$ , 可由式(1)计算出一组  $(x, y)$ 。图 1 为多组  $(x, y)$  数据绘制的开尔文波的波峰线轨迹。该轨迹包含横波和纵波 2 部分, 波系的最大半张角约为  $19.5^\circ$ 。

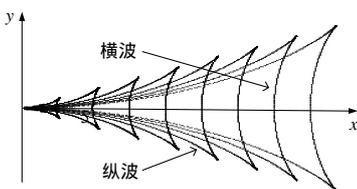


图 1 开尔文波的波峰线轨迹

由于开尔文波与舰船航行时波系的定性特征非常一致, 因此本文基于开尔文波理论模拟舰船航行时的船行波。为满足实际仿真需求, 对式(1)作进一步调整。

(1) 由于受船身覆水的影响, 开尔文波中的横波在实际船行波航迹中体现得并不明显, 而扩散波与舰船两侧的 V-形航迹非常吻合, 因此需要消除波峰线轨迹中的横波而保留扩散波。消除可通过调整  $\theta$  的取值范围实现。 $\theta$  的取值越大, 所形成的开尔文波越趋于扩散波, 因此, 本文选取  $[-\pi/8, \pi/8]$  和  $[\pi/8, \pi/2]$  作为  $\theta$  的取值范围, 形成的波系形状如图 2 所示。

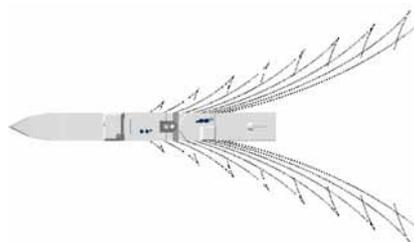


图 2 调整后的波峰线轨迹

(2) 舰船航速影响着舰船击水的作用力和排水的流速, 当航速增大时, 击水的作用力增大, 排水流速加快, 航迹变长, 船行波的波间隔加大; 当航速减小时, 击水的作用力减小, 排水流速变慢, 航迹变短, 船行波的波间隔变小, 因此, 船行波的航迹大小与舰船航速密不可分。由于航速的大小代表单位时间内扰源的运动距离, 因此可设  $X_1 = V \cdot t$ , 其中,  $V$  表示航速;  $X_1$  表示  $t$  秒内扰源的运动距离。这里固定  $t$  的取值,

**基金项目:** 国家部委自然科学基金资助项目

**作者简介:** 赵欣(1974-), 女, 博士研究生, 主研方向: 虚拟现实与仿真; 李凤霞、战守义, 教授

**收稿日期:** 2007-09-07 **E-mail:** zx38610@bit.edu.cn

从而使航迹大小只与航速  $V$  有关。

调整后的开尔文波的波峰线轨迹将作为船行波的波峰线轨迹，其方程为

$$\begin{aligned} x &= V \cdot t \cdot \cos \theta \left( 1 - \frac{1}{2} \cos^2 \theta \right) \\ y &= \frac{1}{2} V \cdot t \cdot \cos^2 \theta \sin \theta \end{aligned} \quad (2)$$

其中， $\theta \in [-\pi/2, -\pi/8] \cup [\pi/8, \pi/2]$ 。

## 2.2 船行波的粒子系统建模

船行波的波峰线轨迹方程是一个二维平面方程，其生成的船行波航迹属于二维波。为满足实际的三维仿真需求，这里假设船行波水流是从二维船行波的波峰线上向外喷出的一团团浪花粒子。每个粒子在自己的存活期内按照一定的规律扩散直至消失，只要粒子的生命足够长，就能保持整条航迹的形态。此时，船行波水流的模拟问题就转变为粒子系统的建模问题。

### (1) 初始位置

船行波的波峰线轨迹构成了船行波水流的基本骨架，浪花粒子由该骨架向外喷射。为保证浪花具有散乱的立体效果，粒子的初始喷射位置应在骨架周围一定范围内随机选取，每个选取点都向外喷射一定数量的粒子。粒子的初始位置计算如下：

$$\begin{aligned} x_0 &= V \cdot t \cdot \cos \theta \left( 1 - \frac{1}{2} \cos^2 \theta \right) + \text{Rand}() \\ y_0 &= \text{Rand}() \\ z_0 &= \frac{1}{2} V \cdot t \cdot \cos^2 \theta \sin \theta + \text{Rand}() \end{aligned}$$

其中， $(x_0, y_0, z_0)$  是粒子的初始位置； $\text{Rand}()$  是随机偏移量。

### (2) 初始速度

这里假设粒子从初始位置喷射后做自由落体运动，为保证粒子喷射的散乱性，其初始运动方向应为一定角度范围内的随机量。具体的计算方法如下：

$$\begin{aligned} V &= \langle V_x, V_y, V_z \rangle \\ \theta &= C_1 \cdot \text{Rand}() \\ \beta &= C_2 \cdot \text{Rand}() \\ V_x &= S \cdot \cos(\theta) \cdot \cos(\beta) \\ V_y &= S \cdot \sin(\theta) \\ V_z &= S \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\beta) \end{aligned}$$

其中， $\theta$  表示方向矢量与水平面的夹角， $C_1$  表示该夹角最大值； $\beta$  表示方向矢量的水平投影与  $Z$  轴的夹角， $C_2$  表示该夹角最大值； $\text{Rand}()$  表示  $0 \sim 1$  的随机数； $S$  表示速率。

### (3) 初始加速度

由于船舶溅起的浪花粒子做自由落体运动，其初始加速度可设为

$$a_x = 0, a_y = -9.8, a_z = 0$$

### (4) 位置更新

粒子产生  $t$  秒后，将由初始位置  $(x_0, y_0, z_0)$  运动至  $(x, y, z)$ ，由于粒子做自由落体运动，因此  $(x, y, z)$  值为

$$\begin{aligned} x &= x_0 + V_x \cdot t + \frac{1}{2} a_x \cdot t^2 \\ y &= y_0 + V_y \cdot t + \frac{1}{2} a_y \cdot t^2 \\ z &= z_0 + V_z \cdot t + \frac{1}{2} a_z \cdot t^2 \end{aligned}$$

## 3 船浪和艏浪建模

由于船浪和艏浪的形成比较复杂，相关的理论探讨也较少，因此目前还没有成型的理论可用于船浪和艏浪的建模。

但由实际观察可知，船浪和艏浪都是由杂乱无章的浪花粒子组成的，这些粒子的运动具有随机性，可用随机过程的方法进行建模。

### 3.1 船浪的粒子系统建模

船浪位于舰船的首部，它是海水与船首外板发生碰撞而形成的白色浪花和飞沫。模拟时可在船首外板周围的海平面上设定一扇形区域，该区域的圆心与船头触水面的端顶点重合，如图 3 所示。粒子从该区域内随机向外喷射，不考虑粒子间的碰撞作用，射出后的粒子做匀减速抛物线运动。

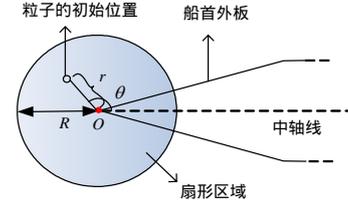


图 3 船浪粒子生成区域示意图(俯视)

### (1) 初始位置

船浪粒子的初始位置应在船首周围的扇形区域内随机选取：

$$\begin{aligned} x_0 &= O_x - r \cdot \cos \theta \\ y_0 &= 0 \\ z_0 &= O_z + r \cdot \sin \theta \\ r &= \text{Rand}(0, R) \end{aligned}$$

其中， $(x_0, y_0, z_0)$  是粒子的初始位置； $r$  是初始位置点与扇形圆心的距离，其取值是  $0 \sim R$  的随机数， $R$  是扇形的半径； $O(O_x, O_z)$  是扇形的圆心； $\theta$  是任意点与舰船中轴线所成的角度，其取值在扇形的角度范围之内。

### (2) 初始速度和加速度

由于粒子离船头越近受到舰船的冲击越大，因此粒子的初始速率与粒子的初始位置有关。这里假设粒子离圆心越近，初始速率越大，离圆心越远，初始速率越小。为产生图 4 所示的粒子运动轨迹，粒子的初始喷射角度和粒子初始加速度需要随着与圆心距离的加大而减小。具体计算公式如下：

$$\begin{aligned} V_x &= v_{\max} \cdot \cos \beta \cdot \cos \theta \cdot \frac{(R-r)}{R} \\ V_y &= v_{\max} \cdot \sin \beta \cdot \frac{(R-r)}{R} \\ V_z &= v_{\max} \cdot \cos \beta \cdot \sin \theta \cdot \frac{(R-r)}{R} \\ \beta &= \frac{3\pi}{4} \cdot \frac{(R-r)}{R} \\ a_x &= 0 \\ a_y &= a_{\max} \cdot \frac{(R-r)}{R} \\ a_z &= 0 \end{aligned}$$

其中， $(V_x, V_y, V_z)$  是粒子的初始速度； $\beta$  是初始喷射角度； $(a_x, a_y, a_z)$  是初始加速度； $a_{\max}$  是垂直方向的最大初始加速度； $v_{\max}$  是粒子的最大初始速率。

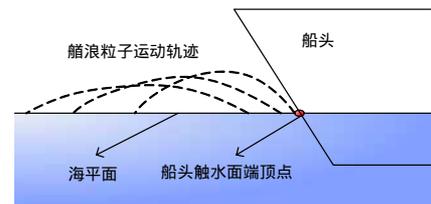


图 4 船浪粒子运动轨迹示意图(平视)

### (3)位置更新

设粒子射出后在水平方向上做匀速运动，在垂直方向上做匀减速运动，直到粒子沉入海面，其生命周期结束。粒子射出  $t$  秒时的位置  $(x, y, z)$  计算如下：

$$\begin{aligned} x &= x_0 + V_x \cdot t + \frac{1}{2} a_x \cdot t^2 \\ y &= y_0 + V_y \cdot t + \frac{1}{2} a_y \cdot t^2 \\ z &= z_0 + V_z \cdot t + \frac{1}{2} a_z \cdot t^2 \end{aligned}$$

### 3.2 舰浪的粒子系统建模

舰浪位于舰船的尾部，螺旋桨的击水和海水的填充作用会在舰船尾部产生涡旋及环流，涡旋扩散形成浪花，称为舰浪。根据实际观察，舰浪的形成区域近似为梯形，因此可在船尾设定一梯形区域，舰浪的浪花粒子就在该区域内运动，粒子从梯形前端的交汇点处射出，如图 5 所示。

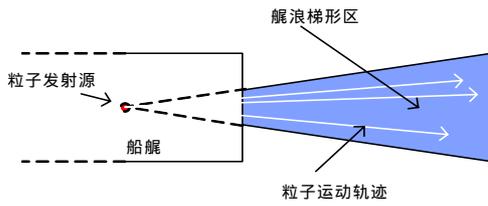


图 5 舰浪粒子生成区域示意图(俯视)

#### (1)初始位置

由于舰浪粒子的发射源位于船尾前端梯形两腰边的交汇点，因此粒子的初始位置  $(x_0, y_0, z_0)$  等于交汇点处的坐标  $(p_0, p_0, p_0)$ 。

#### (2)初始速度和加速度

由于粒子射出时的速度和加速度具有随机性，因此其初始速度和初始加速度设定如下：

$$\begin{aligned} V_x &= v_{\max} \cdot \cos \beta \cdot \cos \alpha \cdot \text{Rand}() \\ V_y &= v_{\max} \cdot \sin \beta \cdot \text{Rand}() \\ V_z &= v_{\max} \cdot \cos \beta \cdot \sin \alpha \cdot \text{Rand}() \\ \beta &= \beta_{\max} \cdot \text{Rand}() \\ \alpha &= \pm \alpha_{\max} \cdot \text{Rand}() \\ a_x &= 0 \\ a_y &= a_{\max} \cdot \text{Rand}() \\ a_z &= 0 \end{aligned}$$

其中， $(V_x, V_y, V_z)$  是粒子的初始速度， $v_{\max}$  是粒子的最大初始速率； $\beta$  是粒子射出时的仰角， $\beta_{\max}$  是最大仰角； $\alpha$  是粒子射出时在水平方向上与梯形轴线的夹角， $\alpha_{\max}$  是最大夹角； $\text{Rand}()$  是 0~1 内的随机数； $(a_x, a_y, a_z)$  是初始加速度， $a_{\max}$  是垂直方向上的最大初始加速度。

#### (3)位置和速度更新

为获得理想的粒子运动效果，可设粒子射出后在水平方向上做匀速运动，在垂直方向上做匀减速运动，直到粒子沉入海面，其生命周期结束。粒子射出  $t$  秒时的位置  $(x, y, z)$  计算如下：

$$\begin{aligned} x &= x_0 + V_x \cdot t + \frac{1}{2} a_x \cdot t^2 \\ y &= y_0 + V_y \cdot t + \frac{1}{2} a_y \cdot t^2 \\ z &= z_0 + V_z \cdot t + \frac{1}{2} a_z \cdot t^2 \end{aligned}$$

### 4 航迹浪花的绘制与实现

为了验证算法的有效性，本文进行了仿真实验。实验的

软件环境为 Windows XP, VC++6.0 和 OpenGL；硬件环境为 Intel CPU P4 3.0 GHz、256 MB RAM、GeForce 6600 显卡、128 MB 显存。

图 6 给出了使用本文算法的舰船航迹仿真效果图，该图采用 OpenGL 图形扩展中提供的 point sprites 功能完成粒子系统的绘制。每帧所绘制的 point sprites 粒子个数大约为 54 000，绘制帧速平均为每秒 57 帧。图 7 是该航迹效果的俯视图，从中可以清晰地看见使用本文算法所生成的舰浪、舰浪和船行波效果。



图 6 使用本文算法的舰船航迹仿真效果图



图 7 使用本文算法的舰船航迹俯视图效果图

为便于比较，本文还对 Goss 算法<sup>[2]</sup>进行了仿真实验。图 8 是其仿真效果图，Goss 采用线粒子作为基本粒子模拟了船行波效果，实验中所采用的粒子个数大约为 32 000 个，绘制帧速平均为每秒 64 帧。通过比较可以看出，本文的仿真效果更加全面和真实。



图 8 使用 Goss 算法的船行波仿真效果图

### 5 结束语

本文采用粒子系统技术对舰船航迹中的舰浪、舰浪和船行波进行了研究，基于开尔文波理论及粒子系统技术对船行波建模。与已有方法相比，本文的方法更符合船行波水流的物理运动规律。同时给出基于随机过程的舰浪、舰浪建模方法，该方法从实际观察出发，简单易行。从仿真结果来看，使用本文方法模拟的舰船航迹能获得比较真实的仿真效果，且生成速度快，适用于虚拟海战场的实时视景仿真中。

#### 参考文献

- [1] Reeves W T. Particle Systems—A Technique for Modeling a Class of Fuzzy Objects[J]. Computer Graphics, 1983, 17(3): 359-376.
- [2] Michael E, Goss A. Real Time Particle System for Display of Ship Wakes[J]. IEEE Computer Graphics & Applications, 1990, 272(7): 30-35.
- [3] 尹 勇, 任鸿翔, 张秀凤, 等. 航海仿真虚拟环境的海浪视景生成技术[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(3): 313-315.
- [4] 夏国泽. 船舶流体力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.