

文章编号:1000-6893(2009)08-1429-06

柔性绳索体展开过程数值模拟及实验

赵国伟,熊会宾,黄海,闫泽红

(北京航空航天大学 宇航学院,北京 100191)

Simulation and Experiment on Deployment Process of Flexible Rope

Zhao Guowei, Xiong Huibin, Huang Hai, Yan Zehong

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

摘要: 基于离散质点系统假设,将柔性网体的网目结点近似为集中质量球单元,结点间的网线近似为杆单元,引入 Kawabata 拉伸张力应变模型,考虑气动力影响,建立柔性网体的动力学方程,运用四阶 Runge-Kutta 法进行数值计算,根据能量损耗量对速度修正,基于 OpenGL 后处理显示,实现了对柔性网体运动过程的仿真,并与警用网枪发射实验加以对比,仿真结果与实验一致。对比了空气动力系数的不同确定形式对网体展开的影响,空气动力系数由雷诺数函数确定时,仿真结果更接近实际情况。

关键词: 绳索体;数值模拟;展开;实验;空气动力

中图分类号: V214.9; TP391.9 **文献标识码:** A

Abstract: Based on the discretized mass system hypothesis, a flexible net is assumed to be divided into lumped mass elements at mesh nodes and cylindrical elements at mesh bars. Dynamic equations are established by using the Kawabata tensile stress-strain model and considering the impact of aerodynamics. The solution, using fourth-order Runge-Kutta method and amending the speed in accordance with the wastage of energy, can determine the state of the flexible net including the location and speed of each element at any moment, and the deployment process of the flexible net is visualized by using OpenGL. The numerical model is testified by using defensive net gun launch tests. There is good agreement between the experimental and theoretical values for net shape configuration, and the method can simulate the deployment process of the net shape. By comparing the deployment processes of the flexible net with different aerodynamic coefficients, it is found that simulation results are closer to the real situation when the aerodynamic coefficients are determined by the function of the Reynolds number.

Key words: rope; numerical simulation; deployment; experiments; aerodynamics

复杂绳索体在航空航天及其他领域应用广泛,如降落伞、回收伞和警用网枪的飞网等。通常,绳索体是通过反复实验测试进行设计的,如果将计算机仿真技术应用于其设计过程中,设计时间、成本将大幅度减少,国外已开始通过柔性绳索体仿真指导设计。建立柔性绳索体模拟仿真模型的方法一般有几何、物理和几何-物理混合法^[1-5]。具有代表性的工作有,X. Provot^[6]运用质子-弹簧模型对织物进行仿真;T. Takagi等^[7]利用集中质量方法,开发了网体外形构造和载荷分析(NaLA)系统,为网体设计提供模拟手段。国内关于绳索体的研究,侧重于阻力因子的测定^[8-9],詹杰民等^[10]对渔网水动力进行了实验研究。

经典的质子-弹簧模型利用线性弹簧力来定义张力,不能有效地仿真织物的运动状态。对于流体介质中运动的绳索体,流体作用力对其影响较大。本文基于离散质点系统假设,引入 Kawabata 拉伸张力应变模型^[11],考虑材料变形能量损耗和空气动力系数取值形式对绳索仿真效果的影响,研究了柔性平面网体发射展开过程的数值模拟方法,并进行实验验证。

1 动力学模型

假设网体由球单元和杆单元构成,如图 1 所示,网目结点近似为集中质量球单元,结点间的网线近似为圆柱杆单元,且质量均位于单元中心。

忽略材料阻尼等,球单元和杆单元间的作用力由两者中心的距离和网线材料拉伸张力应变曲线等决定,不考虑空气浮力的情况下,单个球单元或杆单元的动力学方程可表示为

收稿日期:2008-06-17; 修订日期:2008-09-22

基金项目:国家级项目

通讯作者:赵国伟 E-mail: zhaoguowei@buaa.edu.cn

$$m_i \mathbf{a} = \mathbf{T} - \mathbf{F} + \mathbf{W} \quad (1)$$

式中： m_i 为单元 i 的质量； \mathbf{a} 为单元加速度； \mathbf{T} 为球单元(或杆单元)与相邻杆单元(或球单元)间的张力； \mathbf{F} 为单元运动中所受空气动力； \mathbf{W} 为单元自重。

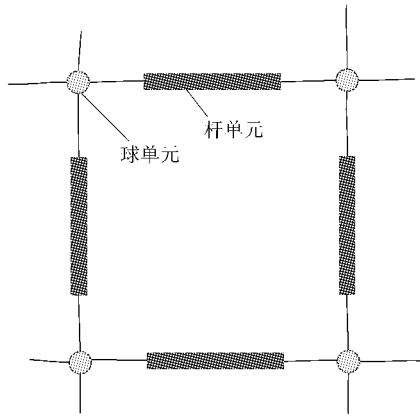


图1 网体近似示意图

Fig. 1 Hypothetical sketch map of net

1.1 球单元

球单元在运动过程中,主要受张力、空气动力和重力作用,与4根杆单元相连的球单元受力情况如图2所示。

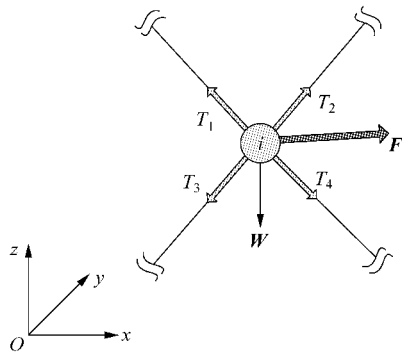


图2 球单元受力情况

Fig. 2 Mechanical balance of sphere element

Kawabata 拉伸张力应变模型体现出了网线拉伸时的非线性和变形滞后行为,在运动过程中,每段网线的张紧状态分为拉伸和回复两种情况。

$$T_j = \begin{cases} 0 & \epsilon \leq 0 \\ f_l(\epsilon) & \epsilon > 0(\text{拉伸}) \\ f_u(\epsilon) & \epsilon > 0(\text{回复}) \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中： ϵ 为网线应变,最大应变为 ϵ_{\max} ； $f_l(\epsilon)$ 为拉伸时的张力； $f_u(\epsilon)$ 为回复过程的张力。

$$f_l(\epsilon) = \frac{f_{\max}^2 L_T^4 \epsilon}{2W_T \left[(L_T - 1) \frac{L_T f_{\max}}{2W_T} \epsilon + 1 \right]^3} \quad (3)$$

$$f_u(\epsilon) = \frac{f_{\max}^2 R_T^3 L_T^4 \epsilon}{2W_T \left[(L_T R_T - 100) \frac{L_T f_{\max}}{2W_T} \epsilon + 100 \right]^3} \quad (4)$$

式中： f_{\max} 为张力极限, N； W_T 为单位长度抗拉能, $N \cdot m/m$ ； L_T 为拉伸线性比； R_T 为回弹变形, %。

应变 ϵ 由相邻球单元与杆单元中心的距离 l_s 确定,其计算公式为

$$\epsilon = (l_s - l_0) / l_0 \quad (5)$$

式中： l_0 为自由绳长(网目尺寸的一半)。当单元间距离小于 l_0 时,张力为 0。

球单元 i 到杆单元 j 的单位坐标矢量为 $\mathbf{e}_{ij} = [e_{ijx} \ e_{ijy} \ e_{ijz}]$,则张力 \mathbf{T} 的各矢量分量为

$$\left. \begin{aligned} T_x &= \sum_{j=1}^n T_j e_{ijx} \\ T_y &= \sum_{j=1}^n T_j e_{ijy} \\ T_z &= \sum_{j=1}^n T_j e_{ijz} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

球单元所受的空气动力 \mathbf{F} 的分量为

$$\left. \begin{aligned} F_x &= \frac{1}{2} \rho C_D S |\dot{x}_i| \dot{x}_i \\ F_y &= \frac{1}{2} \rho C_D S |\dot{y}_i| \dot{y}_i \\ F_z &= \frac{1}{2} \rho C_D S |\dot{z}_i| \dot{z}_i \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中： ρ 为空气密度； C_D 为空气动力系数； S 为单元的有效迎风面积； $[\dot{x}_i \ \dot{y}_i \ \dot{z}_i]$ 为单元位置对时间 t 的一阶导数,即速度。

重力为 $\mathbf{W} = [0 \ 0 \ -m_i g]^T$ 。

由此可得球单元的动力学方程为

$$\left. \begin{aligned} m_i \ddot{x}_i &= T_x - F_x \\ m_i \ddot{y}_i &= T_y - F_y \\ m_i \ddot{z}_i &= T_z - F_z - m_i g \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

动力学方程的微分表达式为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_i &= f_1(x_i, y_i, z_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, t) \\ \ddot{y}_i &= g_1(x_i, y_i, z_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, t) \\ \ddot{z}_i &= h_1(x_i, y_i, z_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, t) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

($j = 1, 4$)

1.2 杆单元

在杆单元上建立局部直角坐标系 $O_i \tau \eta \xi$,原点位于单元中心, τ 轴指向为相邻球单元 1 到球单元 2 方向, η 和 ξ 通过正交化确定。圆柱形单元受

力情况(忽略转矩)如图 3 所示。

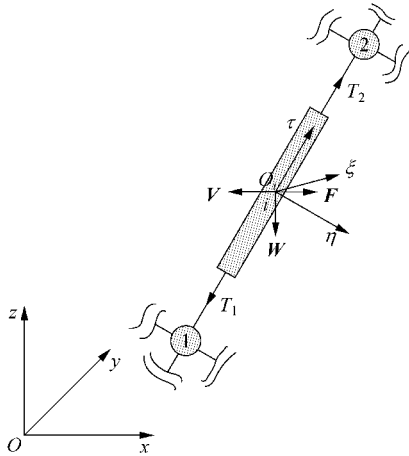


图 3 圆柱形单元受力情况

Fig. 3 Mechanical balance of cylinder element

杆单元 i 到球单元 1 和单元 2 的矢量分别为 e_{i1} 和 e_{i2} , 局部坐标系 $O_i\tau\eta\xi$ 各轴单位矢量分别为 $e_\tau = [x_\tau \ y_\tau \ z_\tau]$, $e_\eta = [x_\eta \ y_\eta \ z_\eta]$ 和 $e_\xi = [x_\xi \ y_\xi \ z_\xi]$ 。张力在 τ, η 和 ξ 轴上的分量为

$$\left. \begin{aligned} T_\tau &= \sum_{j=1}^2 T_j e_{ij} \cdot e_\tau^T \\ T_\eta &= \sum_{j=1}^2 T_j e_{ij} \cdot e_\eta^T \\ T_\xi &= \sum_{j=1}^2 T_j e_{ij} \cdot e_\xi^T \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

杆单元被近似为圆柱形,故须考虑单元在不同方向上的空气动力。杆单元速度为 \mathbf{V} , 将其投影到 $O_i\tau\eta\xi$ 坐标系上,速度分量为 $[\dot{\tau}_i \ \dot{\eta}_i \ \dot{\xi}_i]$ 。得到各方向的空气动力分量为

$$\left. \begin{aligned} F_{D\tau} &= \frac{1}{2} \rho C_{D\tau} S_\tau |\dot{\tau}_i| |\dot{\tau}_i| \\ F_{D\eta} &= \frac{1}{2} \rho C_{D\eta} S_\eta |\dot{\eta}_i| |\dot{\eta}_i| \\ F_{D\xi} &= \frac{1}{2} \rho C_{D\xi} S_\xi |\dot{\xi}_i| |\dot{\xi}_i| \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中: $C_{D\tau}, S_\tau$ ($C_{D\eta}, S_\eta$ 或 $C_{D\xi}, S_\xi$) 分别为 τ (η 或 ξ) 轴方向上的空气动力系数和有效迎风面积。

局部坐标系各轴上的重力分量为

$$W_\tau = \mathbf{W} \cdot e_\tau^T, W_\eta = \mathbf{W} \cdot e_\eta^T, W_\xi = \mathbf{W} \cdot e_\xi^T \quad (12)$$

因此,杆单元 i 的动力学方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} m_i \ddot{\tau}_i &= T_\tau - F_{D\tau} + W_\tau \\ m_i \ddot{\eta}_i &= T_\eta - F_{D\eta} + W_\eta \\ m_i \ddot{\xi}_i &= T_\xi - F_{D\xi} + W_\xi \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中: $[\ddot{\tau}_i \ \ddot{\eta}_i \ \ddot{\xi}_i]$ 为单元 i 在局部坐标系上的加速度分量。通过坐标变换,有

$$\left. \begin{aligned} [\dot{x}_i \ \dot{y}_i \ \dot{z}_i]^T &= \mathbf{C} [\dot{\tau}_i \ \dot{\eta}_i \ \dot{\xi}_i]^T \\ [\ddot{x}_i \ \ddot{y}_i \ \ddot{z}_i]^T &= \mathbf{C} [\ddot{\tau}_i \ \ddot{\eta}_i \ \ddot{\xi}_i]^T \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: \mathbf{C} 为坐标变换矩阵。经变换,杆单元动力学方程可表示为

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_i &= f_2(x_i, y_i, z_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, x_j, y_j, z_j, t) \\ \ddot{y}_i &= g_2(x_i, y_i, z_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, x_j, y_j, z_j, t) \\ \ddot{z}_i &= h_2(x_i, y_i, z_i, \dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i, x_j, y_j, z_j, t) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

($j=1, 2$)

2 模拟准则

2.1 能量修正

网线的 Kawabata 拉伸曲线如图 4 所示。

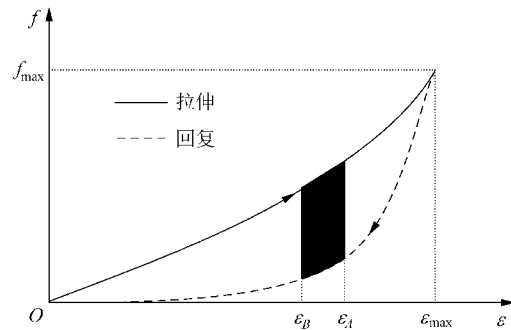


图 4 网线拉伸图

Fig. 4 Stress-strain curve of net thread

网线变形时表现为非线性和变形滞后特点,回复过程中有能量损耗。在某步长内,网线变形由 A 点到 B 点时,图 4 阴影部分即为单位长度能量损耗量。对于单元 i 在步长 Δt 内的能量关系为

$$E_0 = E_{\Delta t} + W_s + W_g + W_f \quad (16)$$

式中: E_0 为初始动能; $E_{\Delta t}$ 为步长终止时刻动能; W_s 为网线变形能增量; W_g 为重力势能增量; W_f 为空气动力作用所损耗的能量。

考虑与单元相连的网线变形的拉伸和回复两种情况,网线变形能增量 W_s 表达式为

$$W_s = \sum_{j=1}^{n_1} W_{l,ij} - \sum_{k=1}^{n_2} W_{u,ik} \quad (17)$$

式中: $W_{l,ij}$ 为拉伸网线的吸收能; $W_{u,ik}$ 为回复网线的释放能,且

$$W_{l,ij} = \int_{l_{ij}(0)}^{l_{ij}(\Delta t)} f_i dl \quad (18)$$

$$W_{u,ik} = \int_{l_{ik}(0)}^{l_{ik}(\Delta t)} f_u dl \quad (19)$$

式中: $l_{ij}(0)$ 和 $l_{ij}(\Delta t)$ 分别为拉伸网线的步长初始

长度和终止长度; $l_{ik}(0)$ 和 $l_{ik}(\Delta t)$ 分别为回复网线的步长初始长度和终止长度。

根据终止时刻动能 $E_{\Delta t}$ 对单元速度进行修正, 单元 i 在步长 Δt 后的修正速度 V_{ia} 满足关系式

$$\frac{1}{2}m_i |V_{ia}|^2 = E_{\Delta t} \quad (20)$$

$$V_{ia} = |V_{ia}| \frac{V_{it}}{|V_{it}|} \quad (21)$$

式中: V_{it} 为计算得到的单元 i 在步长 Δt 后的速度。

2.2 空气动力系数

网体飞行过程中, 空气动力的影响较大, 仿真研究空气动力系数 C_D 的不同取值方式对网体展开效果的影响。

文献[6]中, 空气动力系数 C_D 设为常值, 如表1所示。

表1 空气动力系数(常值)

Table 1 Aerodynamic coefficients (constants)

类型	C_D		
	τ	η	ξ
球单元	1.0	1.0	1.0
杆单元	0.1	1.2	1.2

然而, 当雷诺数 $Re < 200$ 时, C_D 值迅速变化, 将 C_D 设为常数不尽合理。文献[12]通过实验给出了 C_D-Re 曲线, 其中球单元

$$C_D = 10^{1.2} Re^{-0.6} \quad (22)$$

杆单元

$$C_{D\tau} = 0.1, C_{D\eta} = 10^{0.7} Re^{-0.3}, C_{D\xi} = 10^{0.7} Re^{-0.3} \quad (23)$$

雷诺数 $Re = \rho VL/\mu$, 其中: L 为流场的特征长度(球单元取球体直径, 杆单元在 η 轴和 ξ 轴方向上取杆单元长度); μ 为流体黏度。

2.3 数值方法

对球单元和杆单元的动力学方程进行降阶处理, 各单元运动学方程的统一表达式为

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} &= f(X_i, \dot{X}_i, X_j, t), & \frac{dx_i}{dt} &= \dot{x}_i \\ \frac{dy_i}{dt} &= g(X_i, \dot{X}_i, X_j, t), & \frac{dy_i}{dt} &= \dot{y}_i \\ \frac{dz_i}{dt} &= h(X_i, \dot{X}_i, X_j, t), & \frac{dz_i}{dt} &= \dot{z}_i \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

因此, 网体展开过程的数值模拟变换为给定

初始条件下一阶微分方程组的求解问题。考虑算法的精度和数值稳定性^[13-15], 利用四阶 Runge-Kutta 法对式(24)进行求解, 得到单元在任一时刻的位置 $X_i(x_i, y_i, z_i)$ 和速度 $\dot{X}_i(\dot{x}_i, \dot{y}_i, \dot{z}_i)$ 。

3 仿真与实验

实验发射工具采用 SWQ-A 型单发警用网枪(如图5所示), 网枪发射实验参数如表2所示。网体由圆柱形网筒储存, 空爆弹提供发射能量, 发射4个弹头, 牵引网体出筒, 向前方运动, 直至展开, 由于空气动力和重力作用, 最终落到地面上。

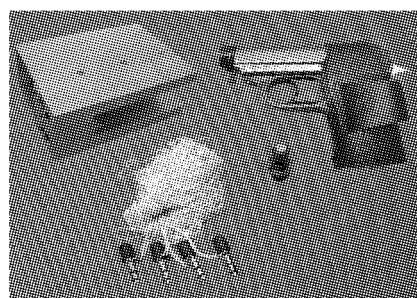


图5 SWQ-A 型警用网枪

Fig. 5 SWQ-A defensive net gun

表2 网枪发射实验参数

Table 2 Experimental parameters of net launch

参数	数值
发射初速度/($m \cdot s^{-1}$)	25
网枪仰角/($^\circ$)	30

为便于网体展开, 将网筒两对角发射孔间角度改为 50° , 如图6所示。选择无风天气进行实验, 以保证网体运动时空气条件为平流。

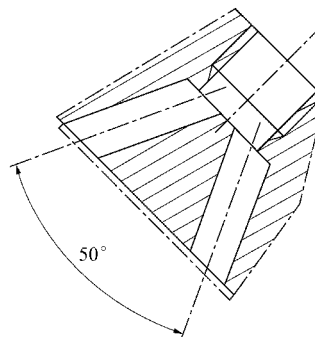


图6 发射孔角度示意图

Fig. 6 Launch pad angle

针对单发警用网枪发射实验, 对平面网体展开过程进行仿真, 如图7所示。各参数与实体网相符, 如表3所示。

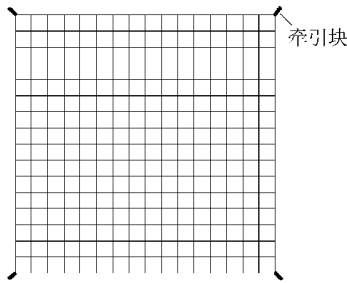


图 7 平面网体
Fig. 7 Plane net

表 3 网体运动仿真主要参数表

Table 3 Emulational main parameters of net motion

参数	数值
材料	尼龙 66 3500 D/3ply
网体总质量/g	45
网线等效直径/mm	1
网目大小/(cm×cm)	20×20
网目规模/个	16×16
牵引块质量/g	18
牵引块初始速度/(m·s ⁻¹)	25

考虑 Runge-Kutta 法的数值稳定性要求,球单元和杆单元质量采取加权分配,网体总质量平均分配到各单元,单元对应的空气动力有效迎风面积由相应质量得到。

4 结果与讨论

利用 C++ 语言,编程求解网体运动微分方程组,基于 OpenGL 实现后处理显示。图 8 是网体展开仿真图,图 9 是网体展开实验图。

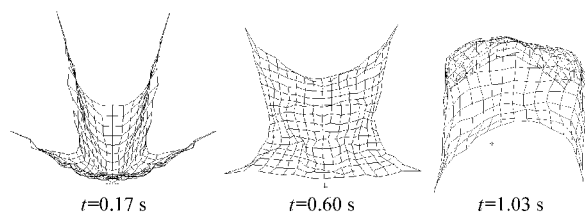


图 8 网体展开过程仿真图

Fig. 8 Emulational pictures of net deployment process

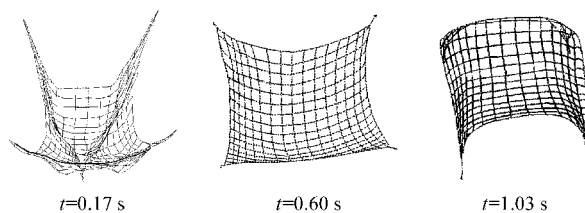


图 9 网体展开过程实验图

Fig. 9 Experimental pictures of net deployment process

实验中展开状态各网目变形排列较规则,流线型效果较好。仿真结果虽然在某些部位出现畸形变形,但总体效果与实验一致,并且保证了时间同步性,能够实时反映出网体运动状态。

将质点-弹簧模型与本文改进模型进行了仿真对比,仿真效果分别如图 10 和图 11 所示。

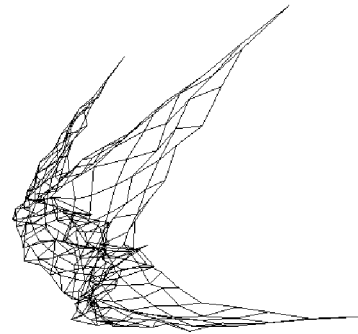


图 10 质点-弹簧模型
Fig. 10 Mass-spring model

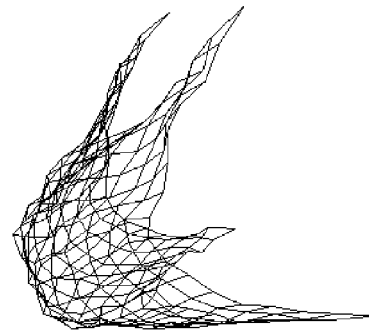
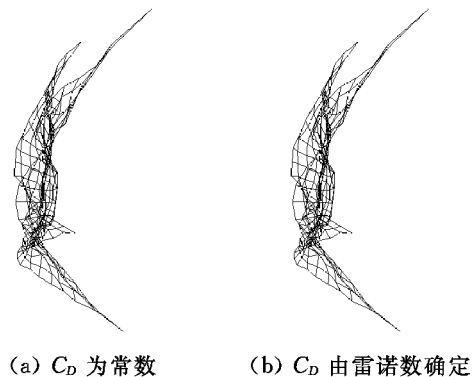


图 11 改进模型
Fig. 11 Mended model

结果表明,本文考虑网线间张力内耗和变形滞后现象,对速度进行修正,可以有效减轻展开过程中网体底部的前凸现象。

结合考虑能量损耗,对比了空气动力系数 C_D 取常数和由雷诺数函数确定时两种情况对网体运动仿真的影响,两种情况下仿真效果如图 12 所示。



(a) C_D 为常数 (b) C_D 由雷诺数确定
图 12 在 C_D 取不同值情况下的仿真对比

Fig. 12 Contrast in different definition of C_D

结果表明,在网体展开状态时, C_D 由雷诺数函数确定时,流线型效果优于取常数时,在网体展开后的开始落地阶段区别明显。

5 结 论

基于离散质点系统假设,考虑网线间张力内耗和变形滞后现象,引入 Kawabata 拉伸张力应变模型,根据能量损耗对速度进行修正,实现了柔性网体展开运动的数值模拟;与质点-弹簧模型仿真结果对比表明,改进模型得到的仿真效果与实验结果有更高的一致性;空气动力系数由雷诺数实验曲线确定时,仿真的网体流线型效果优于其取常数的情况。

参 考 文 献

- [1] Bessonau J S, Marichal D. Study of the dynamics of submerged supple nets (applications to trawls)[J]. *Ocean Eng*, 1998, 25(7): 563-583.
- [2] Niedzwiedz G, Hopp M. Rope and net calculations applied to problems in marine engineering and fisheries research [J]. *Arch Fish Mar Res*, 1998, 46: 125-138.
- [3] Takagi T, Suzuki K, Hiraishi T. Development of the numerical simulation method of dynamic fishing net shape [J]. *Nippon Suisan Gakkaishi*, 2002, 68(3): 320-326.
- [4] Thresher R, Nath J. Anchor-last deployment simulation by lumped masses[J]. *J Waterways Harbors Coast Eng Div*, 1975, 101(4): 419-433.
- [5] Walton T S, Polachek H. Calculation of transient motion of submerged cables[J]. *Math Comput*, 1960, 14(1): 27-46.
- [6] Provot X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior [C] // *Proceedings of Graphics Interface '95*. 1995: 147-154.
- [7] Takagi T, Shimizu T. Validity and layout of "NaLA": a net configuration and loading analysis system[J]. *Fisheries Research*, 2004, 66(2/3): 235-243.
- [8] 桂福坤, 王伟霞. 网箱工程发展现状及展望[J]. *大连水产学院学报*, 2002, 17(1): 70-78.
Gui Fukun, Wang Weixia. The development and prospect of sea cage engineering[J]. *Journal of Dalian Fisheries University*, 2002, 17(1): 70-78. (in Chinese)
- [9] 李玉成, 桂福坤. 平面无结节网衣水阻力系数的试验研究[J]. *海洋学报*, 2006, 28(5): 145-151.
Li Yucheng, Gui Fukun. Study on the drag coefficient of nodeless plane fishing net[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2006, 28(5): 145-151. (in Chinese)
- [10] 詹杰民, 胡由展, 赵陶, 等. 渔网水动力试验研究及分析[J]. *海洋工程*, 2002, 20(2): 50-59.
Zhan Jiemin, Hu Youzhan, Zhao Tao, et al. Hydrodynamic experiment and analysis of fishing net[J]. *The Ocean Engineering*, 2002, 20(2): 50-59. (in Chinese)
- [11] Taibi E H, Hammouche A. Model of the tensile stress-strain behavior of fabrics[J]. *Textile Research Journal*, 2002, 71(7): 582-586.
- [12] Rouse H. *Elementary mechanics of fluids*[M]. New York: Dover, 1978: 232-270.
- [13] Kang Y M, Choi J H, Cho H G. Fast and stable animation of cloth with an approximated implicit method[C] // *Proceedings of Computer Graphics International Conference*. 2000: 247-255.
- [14] Volino P, Courchesne M, Magnenat-Thalmann N. Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects[C] // *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. 1995: 137-144.
- [15] 凌海燕, 姜建国. 数值积分法在织物仿真中的应用[J]. *计算机仿真*, 2003, 20(4): 12-14.
Ling Haiyan, Jiang Jianguo. The application of numerical integration in cloth simulation[J]. *Computer Simulation*, 2003, 20(4): 12-14. (in Chinese)

作者简介:

赵国伟(1976—) 男,博士,副教授。主要研究方向:航天器结构及机构动力学与控制。

Tel: 010-82339067

E-mail: zhaoguowei@buaa.edu.cn

熊会宾(1983—) 男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器设计。

Tel: 010-82339194

E-mail: hbxiong7632@163.com

黄海(1967—) 男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:飞行器结构设计与优化、空间智能结构和空间碎片防护等。

Tel: 010-82316611

E-mail: hhuang@buaa.edu.cn

闫泽红(1985—) 男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器设计。

Tel: 010-82339194

E-mail: yanzehong@gmail.com

(编辑:李铁柏,徐晓)