

1-2-2019

Dynamics Simulation of Breaking Underwater Cable Based on Lumped Mass Method

Zhongxian Zhu

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Yin Yong

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Helong Shen

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Dynamics Simulation of Breaking Underwater Cable Based on Lumped Mass Method

Abstract

Abstract: In order to numerically simulate and predict the dynamics behavior of a breaking cable, *the dynamics model of the underwater cable is built up based on the lumped mass method, and the classical Runge-Kutta method is used to solve the model. The breaking cable is simulated by exerting appropriate boundary conditions. The dynamics behaviors of immediately and slowly breaking cable are studied. The results indicate that the velocity of the nodes around the breaking point reaches the maximum in a very short time, and then the disturbance propagates outside in form of elastic-wave. Tension and velocity distribute more uniformly along the cable in case of breaking slowly, leading to a more uniform distribution of kinetic energy in the cable, The number of nodes with high velocity is reduced and the duration of high velocity motion is shortened; The simulation reveals the mechanism of disturbance's propagation in the form of elastic wave and proves that slow breaking cables are less dangerous than fast breaking ones.*

Keywords

underwater cable, breaking cable, dynamic simulation, lumped mass method, elastic wave

Recommended Citation

Zhu Zhongxian, Yin Yong, Shen Helong. Dynamics Simulation of Breaking Underwater Cable Based on Lumped Mass Method[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(1): 228-234.

基于集中质量法的水下缆索破断动力学仿真

朱忠显, 尹勇, 神和龙

(大连海事大学航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为数值模拟和预测缆索破断的动力学特性, 基于集中质量法建立了水下缆索的动力学模型, 采用经典的 Runge-Kutta 法进行数值解算; 通过设置合适的边界条件实现对缆索破断的模拟, 并对快速破断和缓慢破断的动力学行为进行了研究; 数值模拟结果表明, 破断点及其附近节点的速度在破断后极短的时间内达到最大值, 之后扰动以弹性波的形式向破断点以远的方向传播; 缓慢破断时张力和速度在缆索上能够更加均匀地分布, 使得动能在整条缆索上的分布更加均匀, 从而能够高速运动的缆索节点数目更少, 节点维持高速运动的时间更短; 揭示了扰动以弹性波的形式在破断缆索上的传播机制, 用数值的方法证明缓慢破断比快速破断更加安全。

关键词: 水下缆索; 破断缆索; 动力学仿真; 集中质量法; 弹性波

中图分类号: P391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 01-0228-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201801029

Dynamics Simulation of Breaking Underwater Cable Based on Lumped Mass Method

Zhu Zhongxian, Yin Yong, Shen Helong

(Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: In order to numerically simulate and predict the dynamics behavior of a breaking cable, the dynamics model of the underwater cable is built up based on the lumped mass method, and the classical Runge-Kutta method is used to solve the model. The breaking cable is simulated by exerting appropriate boundary conditions. The dynamics behaviors of immediately and slowly breaking cable are studied. The results indicate that the velocity of the nodes around the breaking point reaches the maximum in a very short time, and then the disturbance propagates outside in form of elastic-wave. Tension and velocity distribute more uniformly along the cable in case of breaking slowly, leading to a more uniform distribution of kinetic energy in the cable. The number of nodes with high velocity is reduced and the duration of high velocity motion is shortened; The simulation reveals the mechanism of disturbance's propagation in the form of elastic wave and proves that slow breaking cables are less dangerous than fast breaking ones.

Keywords: underwater cable; breaking cable; dynamic simulation; lumped mass method; elastic wave

引言

合成缆索破断之前的伸长量可达刚缆的 30 倍



收稿日期: 2015-12-21 修回日期: 2016-04-07;
基金项目: 国家 863 计划(2015AA016404), 交通部应用基础研究(2014329225370), 中央高校基本科研业务费专项资金(3132016310);
作者简介: 朱忠显(1986-), 男, 山东单县, 博士生, 研究方向为航海动态仿真。

以上, 能够储存大量的能量, 并在破断瞬间将其转化为动能, 该过程中产生的高速反弹会对周围的设备和人员造成极大的伤害。目前, 对缆索破断动力学特性的研究主要采用试验方法。Feyrer^[1]用试验的方法研究了缆索的反弹现象, 对不同材料和构造形式的缆索在室外进行了试验, 缆索的运动通过相机进行记录并通过对记录的结果的测量给出缆索

<http://www.china-simulation.com>

运动的定性结论。Bitting^[2]进行了类似的试验, 采用较短的缆索在室内进行试验, 通过精确测量出每一帧中缆索的位置研究其运动。试验的方法耗费大量的人力和物力, 不易操作且有精度上的限制。因而, 如果能用数值的方法对缆索的破断行为进行模拟和研究将会有很大的意义。

水下缆索的动力学建模方法有集中质量法、有限元法和有限差分法等。其中, 集中质量法物理意义明确, 算法简单易懂, 具有广泛的适用性及扩展性。Chai 等^[3]总结了集中质量法的特点, 将集中质量法进行了扩展, 并将弯矩和扭矩的作用、与海底的接触问题等引入到水下缆索的动力学模型中, 研究了不同工况下缆索的运动性能。王飞^[4-11]等基于集中质量法建立了水下缆索的动力学模型, 充分考虑了环境作用力和弯矩、海底交互作用等的影响, 并实现了缆索收放过程的动态仿真。

本文基于集中质量法建立水下缆索的动力学模型并进行数值解算, 通过设置合适的边界条件模拟缆索的破断, 并研究缆索破断后的动力学特性。

1 水下缆索动力学模型及数值解算

如图 1 所示, 本文基于集中质量法将水下缆索在空间上进行离散。缆索总长度为 S , 以任一端 $s=0$ 为第 $i=0$ 个节点; 另一端点处 $s=S$, 为第 $i=N$ 个节点。根据需要分别建立缆索的惯性坐标系 $o-xyz$ 和局部坐标系 $i-btn$ 。两坐标系均为右手系, 并可通过姿态角 (ϕ, θ) 相互关联。由局部坐标系到惯性坐标系的转换矩阵为:

$$[A] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \cos \phi & -\sin \theta \sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \cos \phi & -\cos \theta \sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

该矩阵为单位正交矩阵, 其逆矩阵为其转置矩阵。

取任一微元段进行受力分析, 并将所有受力集中到两端的节点上。对第 i 个节点应用牛顿第二定律, 可得到节点的控制方程:

$$M_i \ddot{x}_i = \Delta T_i + B_i + G_i + F_{Di} + F_{bendi} \quad (1)$$

式中: \ddot{x}_i 为节点加速度; ΔT_i 为节点受到的张力;

B_i 和 G_i 分别为节点的浮力和重力; F_{Di} 为流体动力, 按 Ablow 和 Huang 等人的方法计算^[12-13]; M_i 为质量矩阵, 包括惯性质量 m_i 和节点在水中的附加质量 M_{ai} ; F_{bendi} 为弯矩诱导作用力。

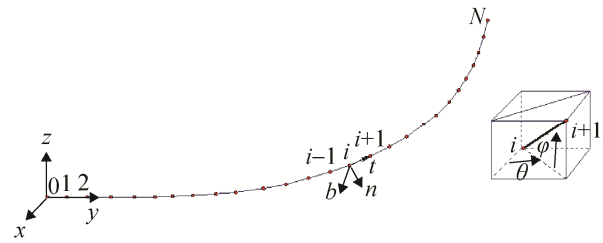


图 1 缆索坐标系

Fig. 1 Coordinate system of line

(1) 张力

由缆索的材料特性和变形确定。在破断行为的研究中, 合成纤维缆索在破断前承受极大的预张力, 其应力-应变关系是非线性的:

$$\begin{cases} \Delta T_i = T_{i+1/2} - T_{i-1/2} \\ T_{i+1/2} = T(\varepsilon_{i+1/2}), \quad T_{i-1/2} = T(\varepsilon_{i-1/2}) \\ \varepsilon_{i+1/2} = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2 + (z_{i+1} - z_i)^2} / l_{i+1/2} - 1 \end{cases} \quad (2)$$

其中, ε 为形变量, l 为相邻两节点间未伸长的长度; 下标 $i-1/2$ 和 $i+1/2$ 分别表示节点 $i-1$ 到 i 和节点 i 到 $i+1$ 之间的物理量。

(2) 弯矩作用力

按王飞^[4,6]的方法, 仅考虑弯矩零点和曲率零点对应的情况, 弯矩 M_s 和剪力 Q 可写为:

$$\begin{cases} M_s = EI \cdot \tau \times \frac{d\tau}{ds_\varepsilon} \\ Q = \frac{\partial M_s}{\partial s_\varepsilon} \times \tau \end{cases}$$

其中, $\tau_{i+1/2} = (x_{i+1} - x_i) / |x_{i+1} - x_i|$, E 为杨氏模量, I 表示惯性矩。

作用于锚泊线上的弯矩诱导分布 q 为:

$$q = -[Q_{s+ds} - Q_s] / ds = - \left[\left(\frac{\partial M_s}{\partial s_\varepsilon} \times \tau + \frac{\partial^2 M_s}{\partial s_\varepsilon^2} ds_\varepsilon \right) \times \left(\tau + \frac{\partial \tau}{\partial s_\varepsilon} ds_\varepsilon \right) - \frac{\partial M_s}{\partial s_\varepsilon} \times \tau \right] / ds_\varepsilon \approx - \frac{\partial^2 M_s}{\partial s_\varepsilon^2} \times \tau - \frac{\partial M_s}{\partial s_\varepsilon} \frac{\partial \tau}{\partial s_\varepsilon}$$

作用于节点 i 上的弯矩诱导载荷可以近似为：
 $F_{bendi} = q_i(l_{i+1/2} + l_{i-1/2}) / 2 = -(Q_{i+1/2} - Q_{i-1/2})$ (3)

(3) 模型解算

设置缆索左端为固定端，右端为自由端，并由稳态计算得到缆索的初始条件。联立控制方程(1)，并由 $v = dx/dt$ ，可得到偏微分方程组：

$$\begin{cases} d\dot{x}_i/dt = M_{ai}^{-1} \cdot F_i \\ d\dot{x}_i/dt = \dot{x}_i \end{cases} \quad (i = 0, 1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

对方程组(4)采用经典的 Runge-Kutta 法求解，可得到节点在任一时刻运动状态。

2 缆索破断的数值仿真

为了数值模拟和预测缆索的破断行为，选取一条 60.0 m 长的尼龙缆进行试验，该缆索的物理参数如表 1 所示，参数取自文献[14]。为了对比和验证本文建模方法和仿真结果的正确性，本文采用与文献[14]相同的方法进行仿真试验。

表 1 缆索参数

Tab. 1 Physical properties of breaking cable

参数项目	长度/m	直径/m	横截面积/m ²	密度/(kg/m ³)
参数值	60.0	0.05	1.964 10 ⁻³	1140.0
参数项目	质量/(kg/m)	重量/(N/m)	法向阻力系数	切向阻力系数
参数值	2.238	21.96	1.50	0.01

Athanasios Andreas Tjavaras^[14]根据 Bitting^[2]提供的试验数据进行数值拟合，得到尼龙缆的应力-应变函数关系和其一阶导数：

$$\begin{cases} T(\varepsilon) = f(\varepsilon) = p_1 \tanh(p_2 \varepsilon + p_3) + p_4 + p_5 \varepsilon \\ T'(\varepsilon) = f'(\varepsilon) = p_1 p_2 \operatorname{sech}^2(p_2 \varepsilon + p_3) + p_5 \end{cases} \quad (5)$$

其中， $p_1 = 2.703 \times 10^5 N$ ， $p_2 = 10.2$ ， $p_3 = -2.128$ ， $p_4 = 2.627 \times 10^5 N$ ， $p_5 = 135.5 N$ 。该尼龙缆在形变量 $\varepsilon = 0$ 时产生零张力，在压缩形变时 ($\varepsilon < 0$) 产生负张力，其中 $\varepsilon = -0.05$ 时张力值为 -485.68 N。

可变形缆索在突加外载荷时产生的形变和随之产生的应力变化并不能立即传递到缆索的各个部分。在扰动的初始阶段，只有加载处的相邻区域内才会受扰动而发生张力变化和形变，该区域外的部分仍处于未受扰动状态。之后，扰动以弹性波的

形式向远处传播，根据文献[14]，弹性波的传播速度主要取决于施加在缆索上的初始预张力：

$$c_e = \sqrt{T'(\varepsilon) / m} \quad (6)$$

为模拟缆索破断过程，假设 $t = 0$ 时刻在右端点处开始破断，水平外力 F_h 和垂向外力 F_v 在 t_{br} 时间内减小到 0，它们随时间变化的函数为：

$$F_h = F_{h,st} \cos^2\left(\frac{\pi t}{2 t_{br}}\right), F_v = F_{v,st} \cos^2\left(\frac{\pi t}{2 t_{br}}\right) \quad (7)$$

3 快速破断模拟

为研究不同初始静态预张力对缆索破断动力学行为的影响，选取不同的初始静态预张力进行 4 组试验。低张力试验(Run 1)的初始静态预张力为 45 000 N，缆索静态伸长率为 9.94%；中间张力试验(Run 2)和(Run 3)的初始静态预张力分别为 180 000 N 和 315 000 N，缆索静态伸长率分别为 17.8% 和 22.8%；高张力试验(Run 4)的初始静态预张力 450 000 N，缆索静态伸长率为 29.2%。破断时间设置为 $t_{br} = 5$ ms。根据公式(9)，四组试验中弹性波传播时间分别为 91 ms, 57 ms, 55 ms 和 75 ms。图 2 和图 3 中各分图总绘制时间为 200 ms，各曲线之间的时间间隔为 10 ms。

缆索在初始静态预张力作用下的形状几乎为一条直线，破断后短时间内节点的 x 轴向运动占主要地位。初始静态预张力越大产生的轴向反弹量越大，破断点在 200 ms 内在 x 方向上的反弹量分别为 6.37 m、12.66 m、16.87 m 和 21.74 m。垂向运动量极小，为厘米级。

图 2 为破断缆索的张力分布随时间变化的曲线，水平坐标为未伸长的缆索标记 s ，垂向为张力值。各分图中曲线顶部接近水平的直线为破断前的初始静态预张力，破断后右端点附近节点迅速向左侧反弹，张力立即变为 0，但左侧大部分节点的张力和运动仍然未受到干扰。随后扰动向左侧以弹性波的形式传播。扰动到达固定端后，该处节点张力立即下降，随后各节点张力由节点之间的相对运动决定。各分图中左端固定点处张力开始下降前曲线的条数反映了弹性波传递到左端消耗的时间。

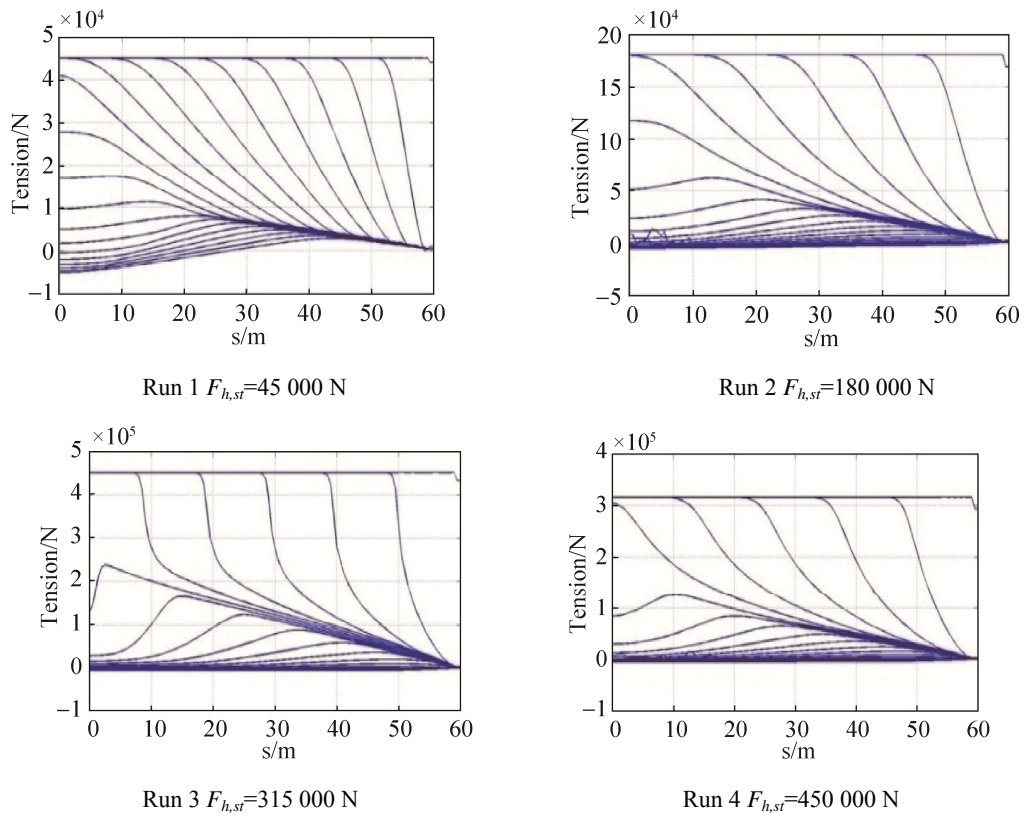


图 2 破断缆索张力分布随时间变化曲线(破断时间: 5 ms)

Fig. 2 Variation with time of the tension distribution of a breaking line (breaking time: 5 ms)

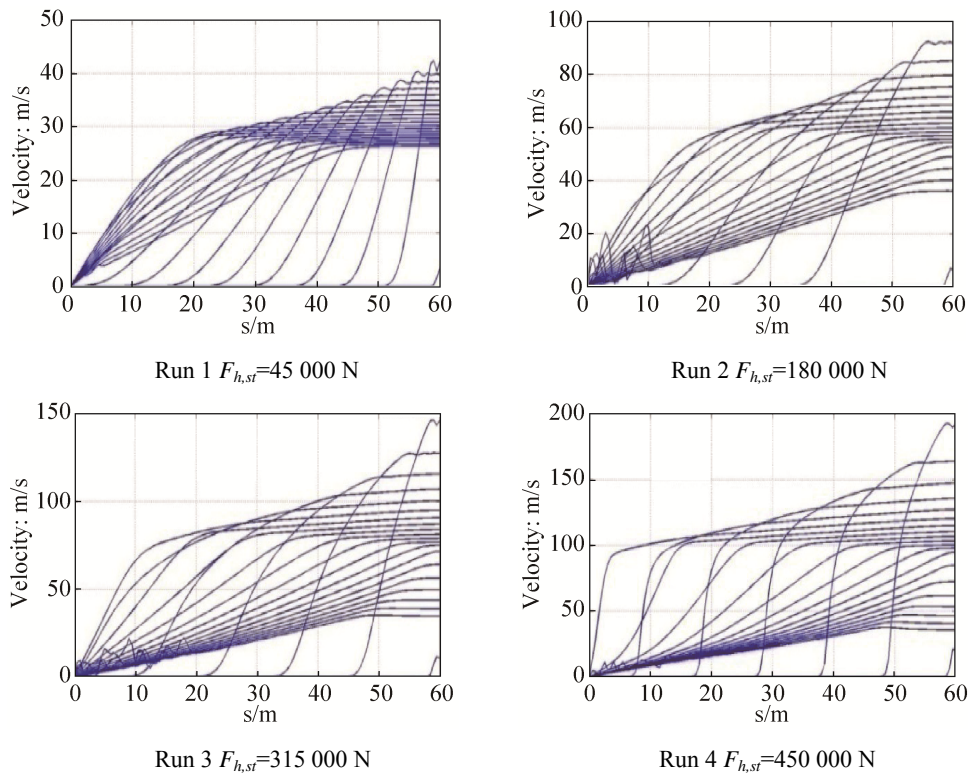


图 3 破断缆索速度分布随时间变化曲线(破断时间: 5 ms)

Fig. 3 Variation with time of the velocity distribution of a breaking line (breaking time: 5 ms)

图3为缆索上节点的速度分布随时间变化的曲线,横轴为未伸长的缆索标记 s ,纵轴为节点的速度值。各分图中底部接近水平的直线为各节点在破断前速度。破断后右端附近节点的速度迅速增加,并在极短的时间内(10 ms)达到最大值,而此时左侧大部分节点速度仍然未受干扰。随后,扰动同样以弹性波的形式向左侧固定端传播。左端点受扰动前的曲线条数反映了弹性波传递到左端的时间。

图4为破断点速度随时间变化的曲线,初始静态张力越大破断点可达到的速度越大。其中,Run 4中破断点最大速度可达200 m/s以上,完全能够对其周围的人员和设备造成极大的破坏。由于流体动力的作用,破断点速度达到最大值逐渐减小。

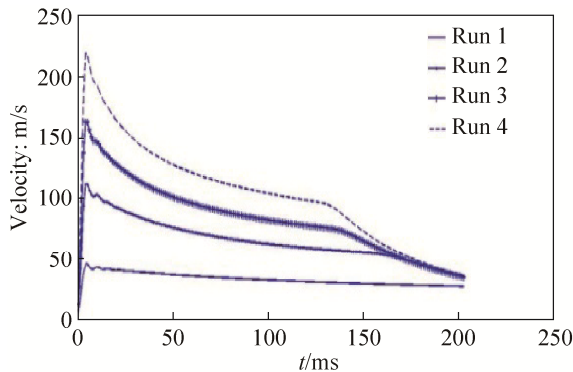


图4 破断点的速度-时间曲线(破断时间: 5 ms)

Fig. 4 Variation with time of the velocity of breaking node (breaking time: 5 ms)

4 缓慢破断模拟

“缓慢破断”指破断点处的初始静态预张力减少到0的时间 t_{br} 较长。缆索大都设计为多股绞缠形式,发生破断时多股相继破断,几乎不可能所有股同时发生破断。处于完好状态的股将继续承受载荷,但其承载能力将会随着破断过程逐渐减小,直到破断完成降低为0。为评估破断时间 t_{br} 对破断后缆索动力学特性的影响进行4组试验,各试验中破断时间均为 $t_{br}=50$ ms。图5,图6各分图中的总绘制时间为250 ms,各曲线之间的时间间隔为10 ms。破断点在破断后200 ms内的水平位移量分别为7.57 m、12.86 m、16.87 m和20.74 m,与快速破

断中相差不大,并未因破断时间的增加而发生明显变化。垂向运动量仍然极小,仍为厘米级。

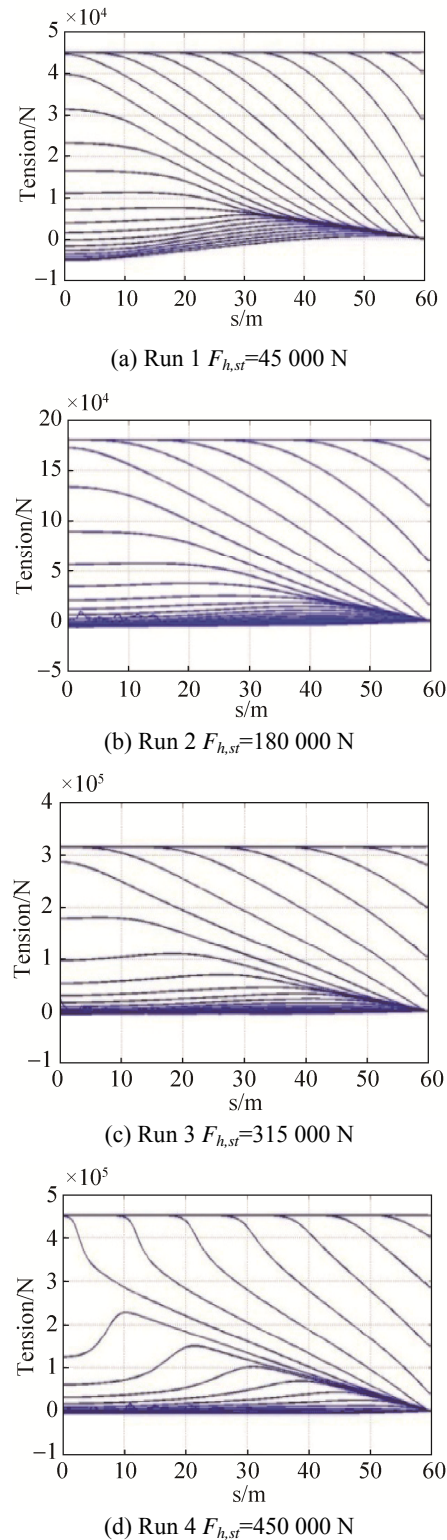


图5 破断缆索张力分布随时间变化曲线(破断时间:50 ms)

Fig. 5 Variation with time of the tension distribution of a breaking line (breaking time: 50 ms)

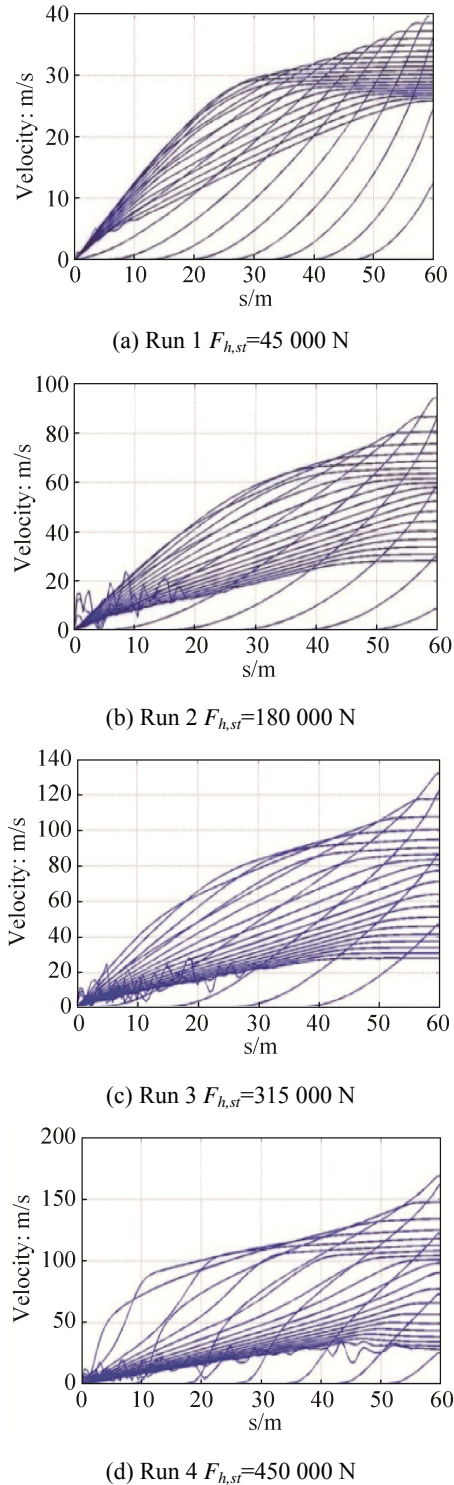


图 6 破断缆索速度分布随时间变化曲线(破断时间:50 ms)
Fig. 6 Variation with time of the velocity distribution of a breaking line (breaking time: 50 ms)

图 5 为张力分布随时间变化的曲线。与图 2 对比可以看出, 破断时间 t_{br} 增加后, 张力沿缆长方向上的变化更加平缓, 说明张力沿缆索的分布更

加均匀。由于初始静态预张力减少到 0 的时间增加, 破断点处的张力变化变缓。这种平缓的扰动以弹性波形式传播到整条缆索, 使得整条缆索上的张力分布比快速破断更加均匀。

图 6 为破断后缆索的速度分布随时间变化的曲线。与图 3 对比可以看出, 速度分布曲线也变得平缓, 说明缆索上各节点的速度分布也更加均匀。破断点能够达到的最大速度仍然与初始静态预张力的大小有关, 但由于缓慢破断中右端附近节点的运动受流体动力作用的时间增加, 右侧节点获得的最大速度比快速破断时有所减少。任一时刻, 整条缆索上能够以较高的速度运动的长度比快速破断时更短, 说明缆索能够高速运动的节点数目更少, 节点维持高速运动的时间减少。

相同初始静态预张力作用下缆索的静态伸长量和存储的能量是相同的, 破断释放出的能量相同。图 5 和图 6 表明缓慢破断时张力和速度在整条缆索上的分布更加均匀, 即动能在缆索上的分布更加均匀, 破断点附近所能够达到较高速度的节点数目更少, 节点能够维持高速运动的时间也减少。因而, 缓慢破断相对于快速破断更加安全。

图 7 为破断点的速度随时间变化的曲线。破断点在完全破断(50 ms)前就达到最大速度, 之后速度在流体动力的作用下下降。与快速破断相比(图 4), 破断点的运动趋势一致, 但缓慢破断在完全破断前有更长的时间受到流体动力的作用, 能量消耗比快速破断更多, 能达到的最大速度比快速破断略小。

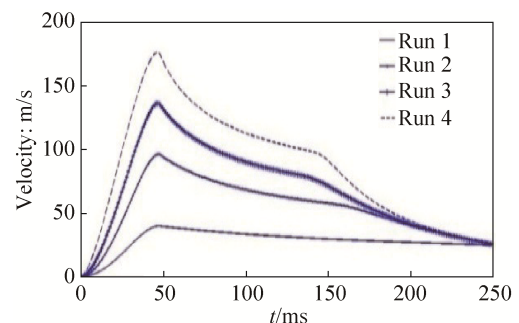


图 7 破断点的速度-时间曲线(破断时间: 50 ms)
Fig. 7 Variation with time of the velocity of the breaking node (breaking time: 50 ms)

5 结论

为了研究水下缆索的动力学特性和缆索破断后的动力学行为,基于集中质量法建立了水下缆索的动力学模型,通过设置合适的边界条件对破断后的缆索进行仿真;选取一条长度为60.0 m的尼龙缆作为仿真对象,研究其在快速破断和缓慢破断时的动力学特性。模拟结果表明:

(1) 缆索破断后极短时间内破断点附近节点开始受到扰动,之后扰动以弹性波的形式向远处传播,弹性波的传播速度由初始静态预张力和应力-应变关系决定。仿真结果揭示了扰动以弹性波的形式在缆索上的传播机制。

(2) 破断点附近节点的速度在破断后短时间内达到较高水平,最大可达几十甚至几百米每秒,足以对处于其周围的人员和设备造成极大的破坏。初始预张力越大,破断后右侧节点的速度越大,造成的危害也越大。

(3) 缆索缓慢破断时,张力和动能在缆索上的更均匀地分布,高速运动的节点数目更少,节点维持高速运动的时间更短,从而用数值模拟的方法说明缓慢破断将会比快速破断更加安全。

参考文献:

- [1] IK Feyrer. Break Test Carried Out on Various Ropes in Order to Determine the Energy of Lash Back at Break[J]. University of Stuttgart, 1978.
- [2] Kenneth R Bitting. A Snapback Evaluation Technique for Synthetic Lines [Accession Number: ADA119070], DTIC Document, 1982.
- [3] YT Chai, KS Varyani, NDP Barltrop. Three-dimensional Lump-Mass formulation of a catenary riser with bending, torsion and irregular seabed interaction effect[J]. Ocean engineering(S0029-8018), 2002, 29(12): 1503-1525.
- [4] 王飞. 海洋勘探拖曳系统运动仿真与控制技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
Wang Fei. Simulation and control research of marine towed seismic system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006.
- [5] 王飞, 黄国樑, 刘天威. 规则波作用下水下拖缆数值分析研究[J]. 海洋工程, 2006, 24(1): 92-97.
Wang Fei, Huang Guoliang, Liu Tian-wei. Dynamic

- study of towed cable in regular waves[J]. Ocean Engineering, 2006, 24(1): 92-97.
- [6] 王飞. 各向异性弯矩扭矩作用下导流缆运动建模与仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34(5): 549-554.
Wang Fei. Modeling and simulation of faired cable with anisotropic bending moment and torque[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2013, 34(5):549-554.
- [7] 王飞, 黄国樑. 导流缆拖曳系统准动态运动建模及仿真[J]. 上海交通大学学报(自然科学版), 2012, 46(10): 1658-1664.
Wang Fei, Huang Guoliang. Semi-Dynamic modeling and simulation study of underwater faired cable[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University(Natural Science Edition), 2012, 46(10): 1658-1664.
- [8] 朱艳杰, 朱克强, 杨冰卡, 等. 基于凝集质量法的海洋缆索动力学建模与仿真技术[J]. 海洋工程, 2014, 32(1): 112-116.
Zhu Yanjie, Zhu Keqiang, Yan Bingka, et al. Dynamics modeling and emulation technique of the marine cable considering tension and compression bending torsion deformation[J]. Ocean Engineering, 2014, 32(1): 112-116.
- [9] YANG Bing-ka, ZHU Ke-qiang, ZHU Yan-jie, et al. Dynamic response of towed line array[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B(S1001-6058), 2013, 25(4): 616-619.
- [10] 李马兰. 铺缆船拖链建模及航迹控制技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
Li Malan. Research on towline's mathematic model and track control method of a cable laying ship[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013.
- [11] 朱忠显, 尹勇, 神和龙. 锚操作模拟器中锚泊系统的建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(10): 2285-2290.
Zhu Zhongxian, Yin Yong, Shen Helong. Modeling and Simulation of the Mooring System in Anchor Handling Simulator[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(10): 2285-2090.
- [12] CM Ablow, S Schechter. Numerical simulation of undersea cable dynamics[J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 1983, 10(6): 443-457.
- [13] Shan Huang. Dynamic analysis of three-dimensional marine cables[J]. Ocean Engineering(S0029-8018), 1994, 21(6): 587-605.
- [14] Athanassios Andreas Tjavaras. The dynamics of highly extensible cables[D]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology, 1996.