文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-5178 /（中图刊号）：380GL019

面向核电水池水下机器人线缆扰动效应分析

许雯艳　李战东
沈阳航空航天大学民用航空学院
DOI:10.12238/mef.v3i9.2879

[摘　要] 以实现核电水池日常巡查与应急焊接修复为目的，设计了一款可搭载焊接作业设备的有缆水下机器人。为了实现水下机器人的精确控制，分析了机器人尾端线缆对本体的扰动效应。以机器人的动力学模型为基础，借助数值计算，分别求得在无缆状态、有缆状态下机器人纵向运动、垂向运动、横滚翻转运动和摇艏运动的运动速度、位移随着时间的变化，通过计算结果对比，量化了尾端线缆对于机体的扰动效应。研究结果表明，该种方法可以用于评估线缆扰动对机器人运动的影响，并能够为机器人的改进设计和制定控制策略提供依据。
[关键词] 水下机器人；动力学模型；线缆；扰动效应；核电水池
中图分类号：TP242.6　文献标识码：A

Analysis of Cable Disturbance Effect of Underwater Robot for Nuclear Power Pool

Wenyan Xu, Zhandong Li
Civil Aviation Academy, Shenyang Aerospace University

[Abstract] In order to achieve the purpose of daily inspection of nuclear power pool and emergency welding repair, a cabled underwater robot that can carry welding equipment is designed. In order to realize the precise control of the underwater robot, the disturbance effect of the robot tail cable on the body is analyzed. Based on the dynamics model of the robot, with the help of numerical calculation, the speed and displacement of the robot's longitudinal motion, vertical motion, roll and flip motion and bow motion in the state of no cable and cable are obtained with time, and through the comparison of the calculation results, the disturbance effect of the tail cable on the body is quantified. The research results show that this method can be used to evaluate the influence of cable disturbance on the robot's motion, and can provide a basis for the improved design of the robot and the formulation of control strategies.
[Key words] underwater robot; kinetic model; cable; disturbance effect; nuclear power pool

1 水下机器人简介

文中设计了一款具备全方位运动功能的开架式水下机器人，并在内部搭载焊接装置和观通设备以实现应急状态下核电水池的焊接修复和日常状态下的水下巡查。水下机器人系统包括：本体框架，控制舱，推进器，尾端线缆和绞盘车等。为了结构紧凑，焊接作业装置和观通设备置于机体内部。线缆承担传输信号任务，并可以为机体和作业装置提供电能。因此，线缆长度直径的长径比要大于海洋ROV拖缆的长径比。线缆由外护套、铠装、内护套、铝护套、绝缘层和布线等部分组成，线缆的布放和回收由绞盘车完成。

2 动力学建模

为了便于描述机器人位置和姿态变化，分别建立了固定坐标系E-ξ η ζ和运动坐标系0-xyz。其中，固定坐标系、运动坐标系的原点分别置于水面上和几何中心上。

在固定坐标系下，机器人位置与姿态可由矩阵$R=[L,\Lambda]^T$表示，其中位置向量表示为$L=[\xi,\eta,\zeta]^T$，姿态矢量为$\Lambda=[\varphi,\theta,\psi]^T$。在运动坐标系中，速度可由矩阵$V=[V_g,\Omega]^T$表示，其中线速度可表示为$V_g=[u,v,w]^t$，角速度可表示为$\Omega=[p,q,r]^t$。机器人受力可由矩阵$\tau=[\tau_1,\tau_2]^T$表示，力矢量可表示为$\tau_1=[X,Y,Z]^T$，力矩矢量可表示为$\tau_2=[K,M,N]^T$。

为了实现对机器人的精确控制，并根据机器人的结构特点，并基于Fossen提出的水下机器人建模理论，提出了适用于该款机器人动力学方程，如下：

$$M\dot{V}+C(V)V+D(V)V+g(\lambda)=\tau \quad (1)$$

M是质量与附加质量的惯性矩阵，表示为：

$$M=\begin{bmatrix} m-X_{\dot{u}} & 0 & 0 & 0 & mz_G & -my_G \\ 0 & m-Y_{\dot{v}} & 0 & -mz_G & 0 & mx_G \\ 0 & 0 & m-Z_{\dot{w}} & my_G & -mx_G & 0 \\ 0 & -mz_G & my_G & I_x-K_{\dot{p}} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ mz_G & 0 & -mx_G & -I_{yx} & I_y-M_{\dot{q}} & -I_{yz} \\ -my_G & mx_G & 0 & -I_{zx} & -I_{zy} & I_z-N_{\dot{r}} \end{bmatrix}$$

Copyright © This word is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-5178 /（中图刊号）：380GL019

式中m表示机体质量，x_G、y_G、z_G表示机体重心，i_x、i_y、i_z表示转动惯量，$i_{xy}=i_{yz}$、$i_{xz}=i_{zx}$、$i_{yz}=i_{zy}$表示转动惯量积。C(V)表示机器人的科里奥力和向心力矩阵，其中非零元素为：

$$\begin{cases} C(5,1)=-C(4,2)=mw+Z_{\dot{w}}w \\ C(4,3)=-C(6,1)=mv+Y_{\dot{v}}v \\ C(6,2)=-C(5,3)=mu+X_{\dot{u}}u \\ C(1,5)=-C(2,4)=mw-Z_{\dot{w}}w \\ C(3,4)=-C(1,6)=mv-Y_{\dot{v}}v \\ C(2,6)=-C(3,5)=mu-X_{\dot{u}}u \\ C(5,4)=-C(4,5)=I_{yz}q+I_{xz}p-I_z r+N_{\dot{r}}r \\ C(4,6)=-C(6,4)=I_{yz}r+I_{xy}p-I_y q+M_{\dot{q}}q \\ C(6,5)=-C(5,6)=I_{xz}r+I_{xy}q-I_x p+K_{\dot{p}}p \end{cases} \tag{3}$$

D(V)表示阻尼矩阵：

$$D(V)=-diag(X_u+X_{u|u|}|u|,Y_v+Y_{v|v|}|v|,Z_w+Z_{w|w|}|w|,K_p+K_{p|p|}|p|,M_q+M_{q|q|}|q|,N_r+N_{r|r|}|r|) \tag{4}$$

在固定坐标系下，g(λ)表示恢复力产生的力、力矩：

$$g(\lambda)=\begin{bmatrix} (G-B)\sin\theta \\ -(G-B)\cos\theta\sin\varphi \\ -(G-B)\cos\theta\cos\varphi \\ -(y_G G-y_B B)\cos\theta\cos\varphi+(z_G G-z_B B)\cos\theta\sin\varphi \\ (z_G G-z_B B)\sin\theta+(x_G G-x_B B)\cos\theta\cos\varphi \\ -(x_G G-x_B B)\cos\theta\sin\varphi-(y_G G-y_B B)\sin\theta \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中G和B分别表示机器人重力和浮力，其中x_B、y_B、z_B表示浮心。τ为推进器产生推力和力矩，表示为：

$$\tau=\begin{bmatrix} (-F_1-F_2+F_3+F_4)\cos\alpha \\ (-F_1+F_2-F_3+F_4)\sin\alpha \\ -(F_5+F_6+F_7+F_8) \\ -F_5D_{5x}+F_6D_{6x}-F_7D_{7x}+F_8D_{8x} \\ F_5D_{5y}+F_6D_{6y}-F_7D_{7y}-F_8D_{8y} \\ \left(\sum_{i=2,3}F_i\left(D_{ix}\sin\alpha+D_{iy}\cos\alpha\right)-\sum_{i=1,4}F_i\left(D_{ix}\sin\alpha+D_{iy}\cos\alpha\right)\right) \end{bmatrix} \tag{6}$$

推进器产生的推力表示为F_i(i=1, 2,…,8)，单个推进器最大推力F=50N，安装角α=30°，推进器轴与坐标轴之间的距离用d_{ij}表示(j=x, y, z)。

式(2)～(4)中的惯性类水动力系数、粘性类水动力系数以及耦合类水动力系数可以通过经验公式、仿真、试验等方法得到，不作详细介绍。

3 机器人运动仿真

在本节中，基于已有的机器人的动力学方程，可以将其看作是速度V_G=[u, v, w, p, q, r]T与时间t的常微分方程组，通过Matlab求解，以实现对机器人的空间运动研究。分别求解了无缆状态下和有缆状态下水下机器人动力学方程，通过计算结果的对比，分析尾端线缆对机器人的扰动效应。

3.1无缆机器人运动仿真

由于不考虑线缆对机器人本体扰动效应，因此，机体受力包括推进器产生的推力、周围流体产生的水动力、重力和浮力。当机体作纵向直航运动时，初始的位置设为R=[0, 0, 0, 0, 0, 0]^T，初始速度为V_G=[0, 0,0, 0, 0, 0]$_T$。在纵向最大推力作用下，机器人线速度与线位移变化，如图1所示。

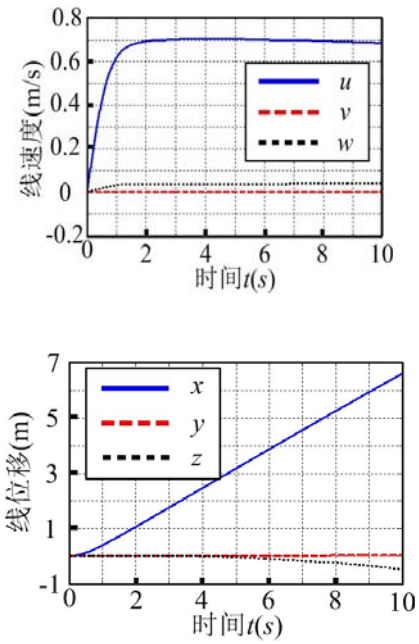

图1 纵向最大推力下机器人的线速度与线位移

当顶层推进器输出最大推力时，机器人将作垂向加速度运动，此时，垂向线速度与位移随时间的变化如图2所示。

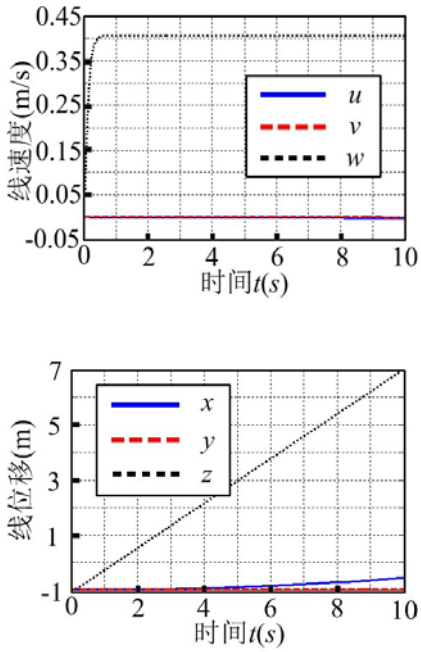

图2 垂向最大推力下机器人的线速度和线位移

为了实现机器人对水池侧壁的附着定位，在顶层推进器输出的最大横滚力矩作用下，机器人将实现90°横滚翻转运动。通过仿真计算，可以得到在翻转运动时，机器人的横滚角速度与角位移变化情况，计算结果如图3所示。

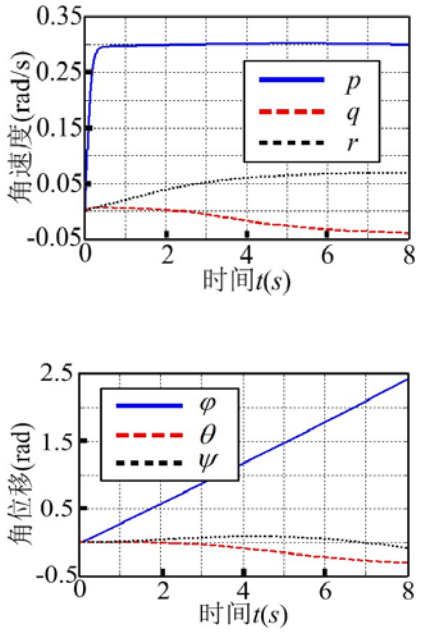

图3 最大横滚力矩下机器人的角速度与角位移

Copyright © This word is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

在最大摇艏力矩作用下，机器人将在水平面内摇艏运动，通过仿真计算，可以得到摇艏角速度、角位移随时间的变化情况，其结果如图4所示。

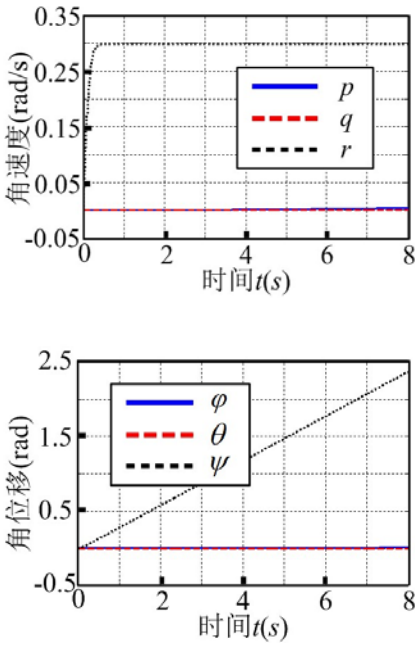

图4最大摇艏力矩下机器人的角速度和角位移

通过对图1观察可知，机体在纵向最大推力作用下，大约在1.5s后达到最大纵向速度，其值约为0.7m/s，经过10s运动后，纵向位移大约6.5 m。由图2可知，机体在垂向最大推力作用下，大约在0.5s后达到最大垂向速度，其值约为0.4 m/s，经过10 s运动后，垂向位移大约7m。通过对图3观察可知，机器人在最大横滚力矩作用下，大约经过0.3 s加速运动后，达到最大横滚角速度，其值大约是0.3rad/s，经过大约6.5 s机器人完成90° 横滚翻转。由图4可知，机器人在最大摇艏力矩作用下，大约0.5s加速运动后，其值约是0.3 rad/s，经过8 s运动后，其角位移大约为2.2rad。

3.2有缆机器人动力仿真

在机器人运动时，尾端线缆将会对机器人产生扰动效应，该种扰动效应是通过线缆连接点作用于机器人上的，最大表征就是改变机体的运动状态与轨迹。在固定坐标系下，线缆力可以表示为：

$$\tau_{ct}(t)=\left[\tau_{ct\xi}\ \ \tau_{ct\eta}\ \ \tau_{ct\zeta}\ \ \tau_{cm\xi}\ \ \tau_{cm\eta}\ \ \tau_{cm\zeta}\right]^T \tag{7}$$

通过坐标变换，在固定坐标系下，线缆下端点副法向剪切力S_b、张力S_t、法向剪切力S_n可以表示为：

$$\tau_{ct}(t)=\begin{bmatrix}\tau_{ct\xi}\\ \tau_{ct\eta}\\ \tau_{ct\zeta}\end{bmatrix}=-\begin{bmatrix}S_b\cos\vartheta+S_t\sin\vartheta\cos\phi-S_n\sin\vartheta\sin\phi\\ -S_b\sin\vartheta+S_t\cos\vartheta\cos\phi-S_n\cos\vartheta\sin\phi\\ S_t\sin\phi+S_n\cos\phi\end{bmatrix} \tag{8}$$

线缆对机器人产生的扰动力矩来源于两部分，一是线缆下端直接作用力矩 $\tau_{cm1}=[\tau_{cm1\xi},\ \tau_{cm1\eta},\ \tau_{cm1\zeta}]^T$，可以表示为：

$$\tau_{cm1}(t)=-\begin{bmatrix}M_b\cos\vartheta+M_t\sin\vartheta\cos\phi-M_n\sin\vartheta\sin\phi\\ -M_b\sin\vartheta+M_t\cos\vartheta\cos\phi-M_n\cos\vartheta\sin\phi\\ M_t\sin\phi+M_n\cos\phi\end{bmatrix} \tag{9}$$

二是下端点的线缆力通过安装点对机器人产生的扰动力矩 $\tau_{cm2}=[\tau_{cm2\xi},\ \tau_{cm2\eta},\ \tau_{cm2\zeta}]^T$。固定坐标系下，机体上安装点位置坐标被设为$r_c=(x_c, y_c, z_c)^T$，由此可得：

$$\tau_{cm2}(t)=\begin{bmatrix}x_c\\ y_c\\ z_c\end{bmatrix}\times\begin{bmatrix}\tau_{ct\xi}\\ \tau_{ct\eta}\\ \tau_{ct\zeta}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}y_c\tau_{ct\zeta}-z_c\tau_{ct\eta}\\ z_c\tau_{ct\xi}-x_c\tau_{ct\zeta}\\ x_c\tau_{ct\eta}-y_c\tau_{ct\xi}\end{bmatrix} \tag{10}$$

当机器人纵向运动时，在底层推进器共同作用下，机器人作直线加速度运动，伴随着线缆扰动作用，位移、速度随时间变化，观察可知，在机器人纵向加速度运动时，经过0.75s速度达到最大值，其值约为0.65m/s，而横向、垂向速度基本为0m/s，对于机器人的位移，运动10s后，纵向位移约为6.0m，而横向、垂向位移均小于1m。

当顶层推进器最大推力作用下，机器人将会作垂向加速度运动，线缆将会对机器人产生扰动作用，此时机体的线位移、速度随的变化，如图5所示。

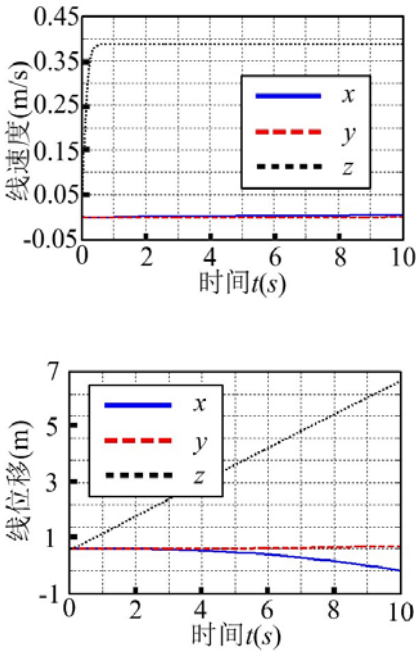

图5 垂向最大推力下有缆机器人线速度和位移

为了实现对水池侧壁的附着，在顶层推进器的共同作用下，机器人将发生横滚翻转运动，在线缆扰动作用下，机器人的角速度和角位移随时间t的变化情况，如图6所示。

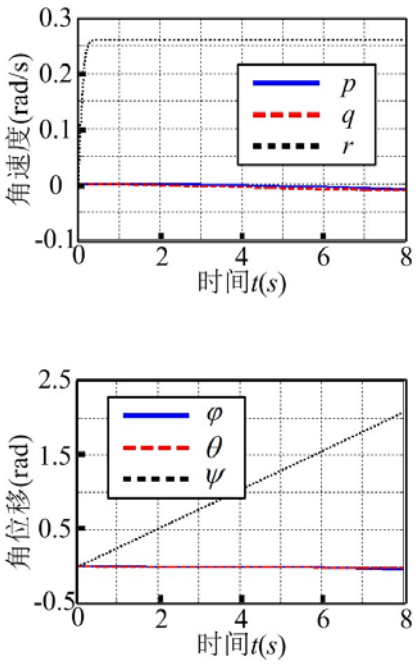

图6 最大横滚力矩下有缆机器人的角速度和角位移

Copyright © This word is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.

机器人在底层推进器共同作用下，将会发生摇艏运动，在线缆扰动作用下，通过仿真计算，可以得到机器人角速度和角位移随时间t的变化情况，如图7所示。

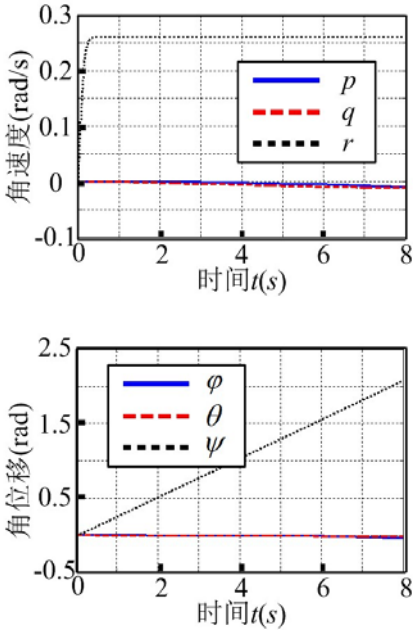

图7　机器人与绞盘车的原理样机

通过对图5观察，可以得到机器人运动10s后，最大垂向速度可以达到0.38m/s，而纵向、横向速度约为0m/s，机器人运动10s后，垂向位移约为3.75 m，纵向位移约为0.5 m，横向位移为0 m。通过对图6观察可知，机器人在横滚加速度运动时，经过0.3 s后，达到横滚角速度的最大值约0.25 rad/s，对于机器人的角位移，大约经过6.3 s后，机器人完成90° 横滚翻转，而摇艏、俯仰角位移约为0 rad。由图7观察可知，机器人在摇艏加速度运动时，经过0.35 s后达到最大速度，其值约0.26 rad/s，横滚、俯仰角速度是0 rad/s，经过8 s运动后，摇艏角位移约为2.05 rad，而俯仰、横滚角位移约为0 rad。

4 结束语

基于水下机器人的动力学方程，以推进器推力为输入条件，分别计算了有缆和无缆状态下机体的空间运动。通过以上的分析，可以得到以下的结论：

(1)为了实现对核电水池的日常巡查和应急状态下的焊接修复，研究了一款可以搭载焊接作业设备和观测设备的水下机器人系统；

(2)在机器人平移运动时，相比于无缆运动状态，在线缆扰动影响下，最大纵向、垂向运动速度分别减少8.4%和8.64%，在10s内，位移分别减小4.7%和6.25%；

(3)在机器人变姿运动时，在线缆扰动影响下，最大横滚、摇艏角速度分别减少16.6%和13.3%，而横滚翻转90° 的时间大约增加了17.3%。

[参考文献]

[1]Ramadass G A,Ramesh S,Selvakumar J M,et al.Deep-ocean Exploration Using Remotely Operated Vehicle at Gas Hydrate Site in Krishna-Godavari Basin, Bay of Bengal[J].Current Science,2010, 99(6):809-815.

[2]Salgado J T, Gonzalez J L, Maetinez L F, et al. Deep Water ROV Design for the Mexican Oil Industry[C]. Oceans’10 IEEE Sydney,2010:1-6.

[3]Ark S J, Yeu T K, Yoon S M, et al. A Study of Sweeping Coverage Path Planning Method for Deep-sea Manganese Nodule Mining Robot[C].Oceans’10 IEEE Sydney, 2011:1-5.

[4]Fossen T I. Guidance and Control of Ocean Vehicles [M]. New York: Wiley New York,1994.

作者简介：

许雯艳（2000--），女，汉族，江苏泰州市人，本科，研究方向：飞行器质量与可靠性。

Copyright © This word is licensed under a Commons Attibution-Non Commercial 4.0 International License.