

往复式水下动力工具的动力特性分析

王东明 李 鸿 张耀良

(哈尔滨工程大学数力系, 哈尔滨 150001)

【摘要】 用动态静力法对一种往复式水下动力工具的动力特性进行了研究。利用计算机的计算结果绘制了位移、速度、加速度曲线和输出力曲线, 并且分析了海况对动力工具动力特性的影响, 为进一步研制水下动力工具提供了必要的理论依据。^①

关键词: 水下动力工具; 复平面向量分析法; 动态静力法

中国图书资料分类号: O313

0 引 言

舰船、潜艇和海洋平台等都需要经常进行维护修理, 这就离不开水下工具, 水下工具是人手或机械手的延伸。水下工具按动力源来分, 可分为手动工具和动力工具。动力工具按其运动形式来分, 又可分为旋转式和往复式两种。本文研究一种往复式水下动力工具的动力特性。这种动力工具的功能是锤击、铲削和切割。锤击主要是用来打击潜艇和舰船表面的寄生物; 铲削是为了除去污垢和锈斑; 切割的对象是非金属绳索和较细的电缆。

1 往复式水下动力工具的简化模型

往复式水下动力工具可以简化为一平面机构(如图1)。该机构用压力油驱动液压电动机, 把它的旋转运动经连杆机构转换成滑块的往复直线运动。在滑块上更换各种工具, 便可进行各种水下作业。该机构密封于一个壳体内, 仅有滑块和其上安装的工具与海水相接触。

图1中各杆件的尺寸和质量为: $AB = l_1 = 30\text{mm}$, $m_1 = 2\text{kg}$; $BC = l_2 = 80\text{mm}$, $m_2 = 6\text{kg}$; $CD = l_3 = 100\text{mm}$, $m_3 = 7.2\text{kg}$; $CE = l_4 = 100\text{mm}$, $m_4 = 7.2\text{kg}$ 。

各杆件对其质心的转动惯量分别为:

$$J_1 = 0.00045\text{kgm}^2; J_2 = 0.0096\text{kgm}^2; J_3 = J_4 = 0.018\text{kgm}^2$$

^① 收稿日期: 1995-04-01
责任编辑: 徐若冰

该机构当 $\varphi_1 = 0$ 时 A, B, C 三点共线, D, C, E 三点共线, 且 $AC \perp DE$, 故

$$AD = \sqrt{(AB + BC)^2 + CD^2} = \sqrt{(l_1 + l_2)^2 + l_3^2}, \quad \alpha = \text{tg}^{-1} \frac{l_3}{l_1 + l_2}$$

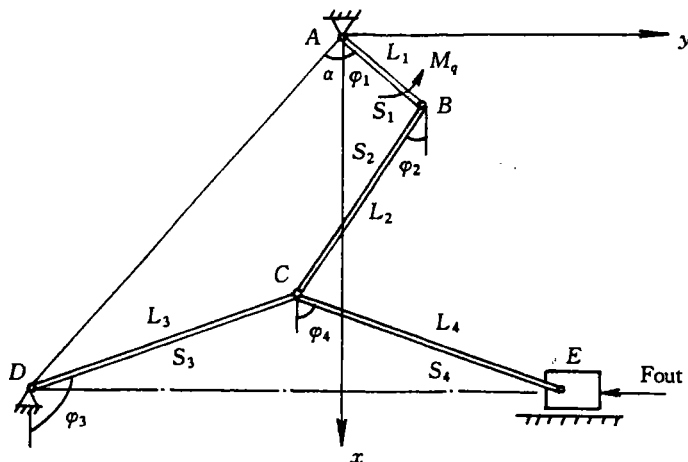


图1 机构简图

2 机构的运动分析

我们应用复平面向量分析法对机构进行运动分析。矢量方程 $L_1 + L_2 = AD + L_3$ 写成复数形式

$$l_1 e^{i\varphi_1} + l_2 e^{i\varphi_2} = AD e^{i\alpha} + l_3 e^{i\varphi_3} \quad (1)$$

利用欧拉公式展开后可得

$$\begin{cases} l_1 \cos \varphi_1 + l_2 \cos \varphi_2 = l_1 + l_2 + l_3 \cos \varphi_3 \\ l_1 \sin \varphi_1 + l_2 \sin \varphi_2 = -l_3 + l_3 \sin \varphi_3 \end{cases} \quad (2)$$

消去 φ_2 得

$$Z_1 \cos \varphi_3 + Z_2 \sin \varphi_3 + Z_3 = 0 \quad (3)$$

$$\text{式中} \quad Z_1 = l_1 + l_2 - l_1 \cos \varphi; \quad Z_2 = -l_3 - l_1 \sin \varphi; \quad Z_3 = \frac{Z_1^2 + Z_2^2 + l_3^2 - l_2^2}{2l_3}$$

把三角的万能置换公式代入式(3), 式(2)得

$$\varphi_3 = 2 \text{tg}^{-1} \frac{Z_2 + \sqrt{Z_1^2 + Z_2^2 - Z_3^2}}{Z_1 - Z_3}$$

$$\varphi_2 = \text{tg}^{-1} \frac{Z_2 + l_3 \sin \varphi_3}{Z_2 + l_3 \cos \varphi_3}$$

为求各杆件的角速度, 对式(1)求导得

$$l_1 \omega_1 e^{i\varphi_1} + l_2 \omega_2 i e^{i\varphi_2} = l_3 \omega_3 i e^{i\varphi_3} \quad (4)$$

对式(4)两边同乘 $e^{-i\varphi_3}$, 并用欧拉公式展开后得

$$\omega_2 = -\omega_1 \frac{l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_3)}{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)} \quad (5)$$

$$\omega_3 = -\omega_1 \frac{l_1 \sin(\varphi_1 - \varphi_2)}{l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2)} \quad (6)$$

为求角加速度,对式(4)求导并用求 ω 同样的方法,且考虑到 $\varepsilon_1 = 0$,可得

$$\varepsilon_2 = \frac{l_3 \omega_3^2 - l_1 \omega_1^2 \cos(\varphi_1 - \varphi_3) - l_2 \omega_2^2 \cos(\varphi_2 - \varphi_3)}{l_2 \sin(\varphi_2 - \varphi_3)} \quad (7)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{l_2 \omega_2^2 + l_1 \omega_1^2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) - l_3 \omega_3^2 \cos(\varphi_3 - \varphi_2)}{l_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_2)} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{因为} \quad \varphi_3 &= \pi - \varphi_4 \\ \text{所以} \quad \omega_4 &= -\omega_3, \quad \varepsilon_4 = -\varepsilon_3 \end{aligned} \quad (9)$$

下面求各杆质心和滑块的速度和加速度。各杆的质心坐标为: $S_1(\frac{x_A + x_B}{2}, \frac{y_A + y_B}{2})$; $S_2(\frac{x_B + x_C}{2}, \frac{y_B + y_C}{2})$; $S_3(\frac{x_C + x_D}{2}, \frac{y_C + y_D}{2})$; $S_4(\frac{x_C + x_E}{2}, \frac{y_C + y_E}{2})$ 对质心坐标求导,就可得质心的速度、加速度。

$$S_1: v_{x1} = -\frac{l_1}{2} \omega_1 \sin \varphi_1; v_{y1} = \frac{l_1}{2} \omega_1 \cos \varphi_1$$

$$a_{x1} = -\frac{l_1}{2} \omega_1^2 \cos \varphi_1; a_{y1} = -\frac{l_1}{2} \omega_1^2 \sin \varphi_1$$

$$S_2: v_{x2} = -l_1 \omega_1 \sin \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \omega_2 \sin \varphi_2; v_{y2} = l_1 \omega_1 \cos \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \omega_2 \cos \varphi_2$$

$$a_{x2} = -l_1 \omega_1^2 \cos \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \varepsilon_2 \sin \varphi_2 - \frac{l_2}{2} \omega_2^2 \cos \varphi_2$$

$$a_{y2} = -l_1 \omega_1^2 \sin \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \varepsilon_2 \cos \varphi_2 - \frac{l_2}{2} \omega_2^2 \sin \varphi_2$$

$$S_3: v_{x3} = -\frac{l_1}{2} \omega_1 \sin \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \omega_2 \sin \varphi_2; v_{y3} = \frac{l_1}{2} \omega_1 \cos \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \omega_2 \cos \varphi_2$$

$$a_{x3} = -\frac{l_1}{2} \omega_1^2 \cos \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \varepsilon_2 \sin \varphi_2 - \frac{l_2}{2} \omega_2^2 \cos \varphi_2$$

$$a_{y3} = -\frac{l_1}{2} \omega_1^2 \sin \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \varepsilon_2 \cos \varphi_2 - \frac{l_2}{2} \omega_2^2 \sin \varphi_2$$

$$S_4: v_{x4} = -\frac{l_1}{2} \omega_1 \sin \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \omega_2 \sin \varphi_2; v_{y4} = \frac{l_1}{2} \omega_1 \cos \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \omega_2 \cos \varphi_2 + l_3 \omega_4 \cos \varphi_4$$

$$a_{x4} = -\frac{l_1}{2} \omega_1^2 \cos \varphi_1 - \frac{l_2}{2} \omega_2^2 \cos \varphi_2 - \frac{l_2}{2} \varepsilon_2 \sin \varphi_2$$

$$a_{y4} = -\frac{l_1}{2} \omega_1^2 \sin \varphi_1 + \frac{l_2}{2} \varepsilon_2 \cos \varphi_2 - \frac{l_2}{2} \omega_2^2 \sin \varphi_2 + l_3 \varepsilon_4 \cos \varphi_4 - l_3 \omega_4^2 \sin \varphi_4$$

滑块 E 的速度和加速度为

$$v_E = 2l_3 \omega_4 \cos \varphi_4, \quad a_E = 2l_3 \varepsilon_4 \cos \varphi_4 - 2l_3 \omega_4^2 \sin \varphi_4 \quad (10)$$

3 机构的动力分析

我们应用动态静力法对机构进行动力分析。由达朗伯原理可知,作用在系统上的主动力系、约束力系和惯性力系在形式上构成平衡力系。

各杆件的受力图如图2. 其中惯性力主矢(作用在质心处)和主矩均未画出。它们是:

$$F_{gx}'' = -m_i a_{ix} ; F_{gy}'' = -m_i a_{iy} ; M_c'' = -J_c \epsilon_i \quad (11)$$

各杆件的动态平衡方程为

$$AB: \begin{cases} R_{Ax} - R_{Bx} + m_1 g - m_2 a_{x1} = 0 \\ R_{Ay} - R_{By} - m_1 a_{y1} = 0 \\ (R_{Ax} + R_{Bx}) \frac{l_1}{2} \sin \varphi_1 - (R_{Ay} + R_{By}) \frac{l_1}{2} \cos \varphi_1 + M = 0 \end{cases}$$

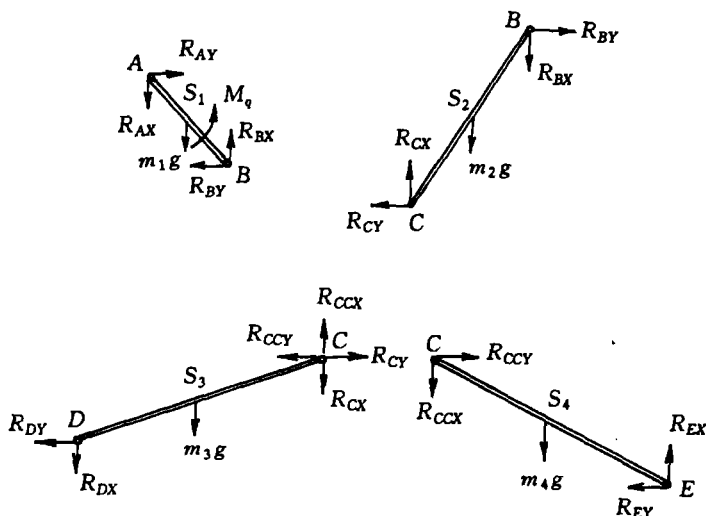


图2 受力图

$$BC: \begin{cases} R_{Bx} - R_{Cx} + m_2 g - m_2 a_{x2} = 0 \\ R_{By} - R_{Cy} - m_2 a_{y2} = 0 \\ (R_{Bx} + R_{Cx}) \frac{l_2}{2} \sin \varphi_1 - (R_{By} + R_{Cy}) \frac{l_2}{2} \cos \varphi_2 - J_2 \epsilon_2 = 0 \end{cases}$$

$$CD: \begin{cases} R_{Cx} - R_{CCx} - R_{Dx} + m_3 g - m_3 a_{x3} = 0 \\ R_{Cy} - R_{CCy} - R_{Dy} - m_3 a_{y3} = 0 \\ -(R_{Cx} - R_{CCx} - R_{Dx}) \frac{l_3}{2} \sin \varphi_3 + (R_{Cy} - R_{CCy} + R_{Dy}) \frac{l_3}{2} \cos \varphi_3 - J_3 \epsilon_3 = 0 \end{cases}$$

$$CE: \begin{cases} R_{CCx} - R_{Ex} + m_4 g - m_4 a_{x4} = 0 \\ R_{CCy} - R_{Ey} - m_4 a_{y4} = 0 \\ (R_{CCx} + R_{Ex}) \frac{l_4}{2} \sin \varphi_4 - (R_{CCy} + R_{Ey}) \frac{l_4}{2} \cos \varphi_4 - J_4 \epsilon_4 = 0 \end{cases}$$

为了便于计算机运算, 可把方程写成矩阵形式

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & \cdots & a_{112} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & \cdots & a_{212} \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ a_{112} & \cdots & \cdots & \cdots & a_{1212} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} R_{Ax} \\ R_{Ay} \\ R_{Bx} \\ R_{By} \\ R_{Cx} \\ R_{Cy} \\ R_{CCx} \\ R_{CCy} \\ R_{Dx} \\ R_{Dy} \\ R_{Ex} \\ R_{Ey} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} m_1 a_{x1} - m_1 g \\ m_1 a_{y1} \\ J_1 \epsilon_1 - M \\ m_2 a_{x2} - m_2 g \\ m_2 a_{y2} \\ J_2 \epsilon_2 \\ m_3 a_{x3} - m_3 g \\ m_3 a_{y3} \\ J_3 \epsilon_3 \\ m_4 a_{x4} - m_4 g \\ m_4 a_{y4} \\ J_4 \epsilon_4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)可以简写成 $[a_{ij}]\{R\} = \{F_i\}$, $(i, j = 1, 2, \cdots 12)$. 为了求未知力, 也可写成逆阵形式

$$\{R\} = [a_{ij}]^{-1}\{F_i\}$$

4 计算结果分析

通过计算机编程运算, 并根据计算结果, 我们绘制了如下几条曲线: 滑块 E 的位移曲线、速度曲线、加速度曲线和输出力曲线(如图 3~图 6 所示)。

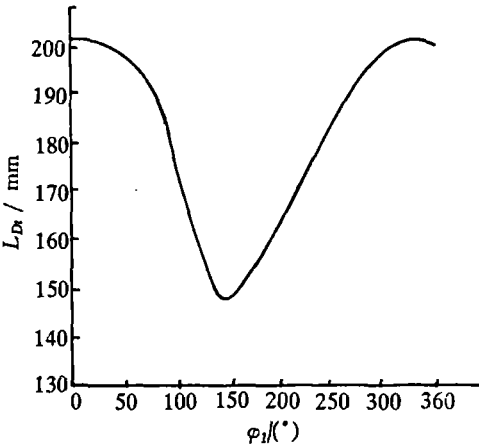


图 3 位移曲线

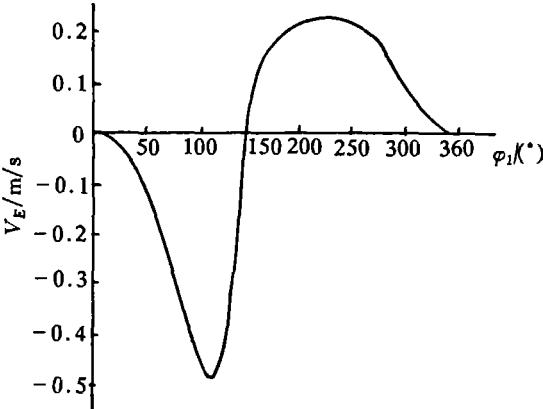


图 4 速度曲线

从特性曲线可以看出, 机构在 $\varphi_1 = 0, \varphi_1 = 148.5^\circ$ 时处于极限位置, 滑块 E 的最大位移为 52.1mm; 机构具有急回特性, 其行程速比系数为 1.423; 因滑块的加速度连续变化; 无突变, 故机构无冲击; 滑块的输出力均在 2.1kN 以上, 工作行程中输出力在 4.4kN 以上, 能够满足设计要求; 在极限位置时, 输出力的理论值可达到无穷大, 这对水下作业也是有利的。

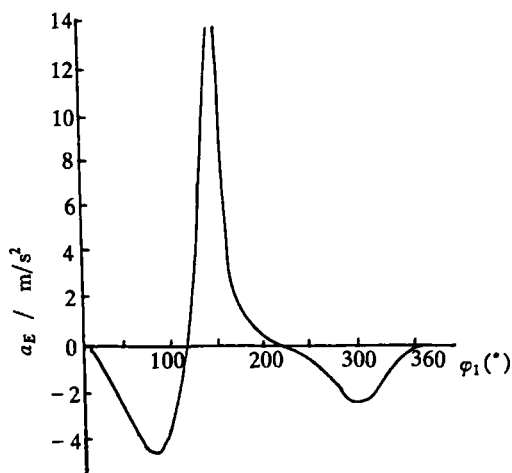


图5 加速度曲线

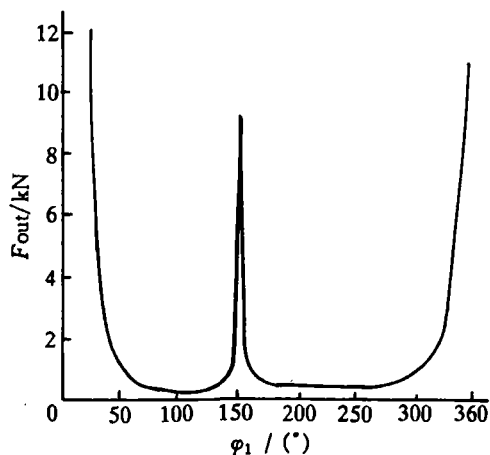


图6 输出力曲线

5 海况的影响

该水下动力工具的主要工作机构密封在一个铸造金属壳体内,只有滑块和其上安装的工具与海水接触。下面我们来研究海况对动力特性的影响。

5.1 海浪

海面上常见的风浪一般可用不规则波来描述,波浪的运动在水中产生动压力,它的强弱与波幅有关,由文献[4]可知

$$\xi_a^T = \xi_a e^{-K|T|} \quad (13)$$

式中 ξ_a 为自由水面的波幅, ξ_a^T 为水深 T 处的波幅, $K = 2\pi/\lambda$ (λ 为波长)。在水下 ($\xi, -Z$) 处由波动产生的动压力为

$$\Delta P = \rho g \xi_a e^{-K|T|} \cos(K\xi - \omega t + \epsilon) \quad (14)$$

若取 $T = \lambda/2$, 可以算出

$$\frac{\Delta P /_{T=\lambda/2}}{\Delta P /_{T=0}} = e^{-\pi} = 0.04$$

因一般情况下浪的波长为 1.56~14m, 而水下作业深度常超过 5~6m, 所以波浪引起的动压力与静压力相比非常微小, 又因为整个机构只有滑块和作业工具与海水接触, 而它们的尺寸也很小, 故静压力也可以忽略不计。

5.2 海流

海流是海水水平或垂直地从一个地区向另一个地区的大规模的非周期性运动。由作用在海平面上的风力引起的海流称为风生海流, 也称漂流。海流与海浪相比, 其运动方向与规律比较稳定, 且流动缓慢, 而我们研究的动力工具体积小, 相对来说速度又较高, 所以海流的影响一般也可以忽略。

5.3 海水的粘性阻尼

物体在水中运动时受到的粘性阻尼的计算公式^[5]为

$$Q = \frac{1}{2} C \rho S v^2 \quad (15)$$

式中 C 为阻尼系数, S 为物体的最大横截面积, v 为物体运动速度。如果我们取 $C = 1.16$, $S = 3 \times 10^{-3} \text{m}^2$, $v = 0.4868 \text{m/s}$, $\rho = 1.09 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, 代入式(15)可得最大粘性阻力约为 0.4494N 。很显然, 海水的粘性阻力较小, 忽略它不影响我们上面分析中得出的结果。

综上所述, 海况诸因素对我们研究的水下动力工具影响不大, 与在空气中相比基本相同。这与有关的实验结果也是相吻合的。

参 考 文 献

- 1 白师学. 高等机构学. 上海:上海科学技术出版社, 1988
- 2 [美]哈克曼 D T, 考戴 D W. 水下工具. 北京:海洋出版社, 1986
- 3 [美]保罗 B. 机构运动学和动力学. 上海:上海科学技术出版社, 1983
- 4 陶尧森. 船舶的耐波性. 上海:上海交通大学出版社, 1983
- 5 [苏]叶果洛夫 B N. 水下拖曳系统. 北京:海洋出版社, 1988

The Analysis of Dynamic Characteristics of Underwater Reciprocating Device

Wang Dongming Li Hong Zhang Yaoliang

(Dept. of Mathematics and Mechanics, Harbin Engineering University, Harbin 150001)

Abstract

In this paper, the dynamic characteristics of an underwater reciprocating device for a ship are investigated by dynamic equilibrium method. The curves of displacement, velocity acceleration and output force are plotted with the computing results. Then, the influence of ocean current on the dynamic characteristics of underwater device is analysed. It provides scientific basis for developing the underwater device.

Key words: underwater device; vector analysis method in complex plane; dynamic equilibrium method.