

超空泡射弹动力学稳定性分析

张丁雄, 侯 健

(海军工程大学, 武汉 430033)

摘要:运用动力学方法研究了超空泡射弹在水中的稳定性,建立了水中运动的数学模型。分析表明:细长型的弹丸外形设计加快了射弹在弹丸轴方向上运动的衰减,对弹丸在水中运动的稳定性有很大的影响,能提高弹丸水中运动的稳定性。

关键词:超空泡;水动力;高速射弹;动力学

中图分类号:TJ391

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2012)09-0021-02

超空泡射弹将超空泡技术应用到水下射弹中。研究表明,利用超空泡技术进行减阻,可以使阻力降低90%以上,提高弹丸在水中运动的稳定性。弹丸在水中运动时,若出现角速度的初始扰动,弹丸尾部将与空穴下表面撞击并回弹,进而与空穴上边界表面撞击再回弹,这种非定常运动形态,可使其在前进中获得动态平衡,直到空穴变小,过渡到空穴下边界的一部分与物面滑行相切的形态,对这种运动形态的模拟计算表明,他在理论上也是成立的。本文通过对弹丸与空泡边界表面碰撞的动力学分析,得出弹丸外形设计对射弹运动稳定性的影响规律。

1 数学模型

根据文献[1]进行数学建模,为了简化问题,本文只对超空泡纵向稳定性进行研究。建立图1所示的坐标系, (x, y, z, o) 为定坐标系, (x_1, y_1, o_1) 是以空化器中心为原点的动坐标系。其中, x_1 是弹丸运动的方向,弹丸在这个方向上做直线运动,任意小扰动后弹丸在 y_1 方向产生1个速度分量。

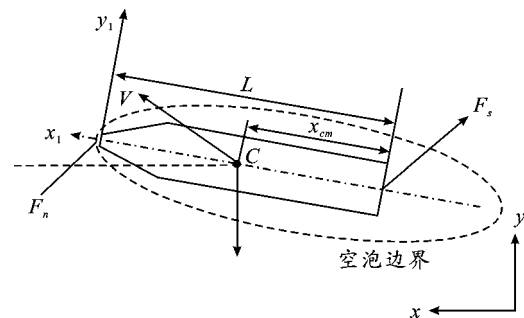


图1 超空泡射弹运动时力的分析

图1中: m 是弹丸的质量; L 为弹体全长; θ 为弹丸的轴线与水平线所成的夹角; ω 为转动角速度; α 为弹丸实际速

度与轴线所成的夹角; x_{cm} 是重心距弹丸底部中心的距离; F_n 为水对前端空化器的作用力; F_s 为弹体尾部与空穴边界撞击时产生的水动力。

弹丸在水中运动时,在动坐标系中满足力的平衡方程:

$$\begin{cases} m \left[\frac{du}{dt} - \omega^2(L - x_c) + 2v\omega \right] = \sum F_{x1} \\ m \left[\frac{dv}{dt} + (L - x_c) \frac{d\omega}{dx} - 2u\omega \right] = \sum F_{y1} \\ I_0 \frac{d\omega}{dt} \sum M_{z1} \end{cases}$$

式中: I_0 为弹体绕重心 C 的惯性矩(包括附连水惯性矩); u 为 x_1 方向上的速度分量; v 为 y_1 方向上的速度分量。

由文献[1]可知, F_n 在圆盘的纵轴线上。 F_s 可以分解为 x_1 方向上的水阻力 F_{sx1} 和 y_1 方向上的水撞击力 F_{sy1} , 见图2。 F_n, F_{sx1}, F_{sy1} 的大小可由文献[2]得到。

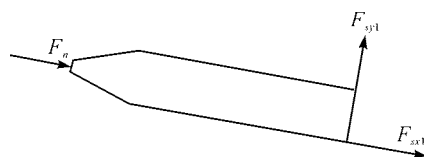


图2 作用于弹丸的水动力和撞击力

因为 $u^2 \gg v^2, \rho A_c k u^2 \gg 2mL\omega^2, l_k/L \ll 1$

$$\begin{cases} \frac{du}{dt} = -\frac{1}{2m} \rho C_{s0} u^2 F(A_c, R, l_k, \theta) \\ \frac{dv}{dt} = v^2 [(M_1 l_k) + M_2 (l_k x_{cm}) (L - x_{cm})] + \\ 2v [\omega M_2 (L x_{cm} l_k) (L - x_{cm})] + \omega u \\ \frac{d\omega}{dt} = -M_2 [v^2 (l_k x_{cm}) + 2v\omega (L x_{cm} l_k)] \end{cases} \quad (1)$$

其中:

$$M_1 = - (K\rho D)/m, \quad M_2 = (K\rho D)/I_0$$

$$F(A_c, R, l_k, \theta) = A_c + R^2 \cos^{-1} \left(\frac{R - l_k \tan \theta}{r} \right) - (R - l_k \tan \theta) (\sqrt{D l_k \tan \theta})$$

式中: A_c 为圆盘空化器的面积; K 为与空化器形状有关的常数, 当空化器为圆盘时, 取 2π ; R 为射弹的半径; D 为圆盘的直径; ρ 为液体的密度; l_k 为弹体尾部浸湿水线长度。

空穴的长度一般相对于弹丸很大, 故在弹体尾部与空泡壁发生碰撞的周围可认为空泡壁是水平的, 假设此处的空穴轴向截面半径为 R_k , 弹丸的长细比为 ε , 如图 3 所示。

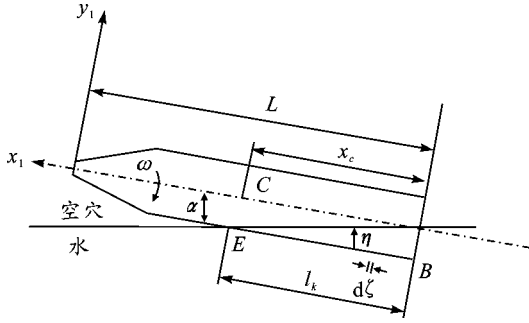


图 3 撞击力的计算

当 B 弹丸没有发生转动时, 在坐标系 ox_1y_1 中, B 的坐标为 $(-L, -R)$, 经过旋转矩阵 $\begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$ 旋转后 B 的坐标为 $(-L \cos \alpha + R \sin \alpha, -L \sin \alpha - R \cos \alpha)$, 又因为直线 BE 斜率为 $\tan \alpha$, 故可求出直线方程为:

$$y = x \tan \alpha - \frac{R}{\cos \alpha}$$

易得 E 的坐标为 $\left(\frac{-R_k}{\tan \alpha} + \frac{R}{\sin \alpha}, -R_k \right)$, $l_k = (x_E - x_B) / \cos \alpha$, $\varepsilon = L/D$, $D = 2R$, 因此

$$l_k = -R_k \csc \theta + D \left(\varepsilon + \csc 2\alpha - \frac{1}{2} \tan \alpha \right) \quad (2)$$

l_k 与 α 的关系如图 4 所示。

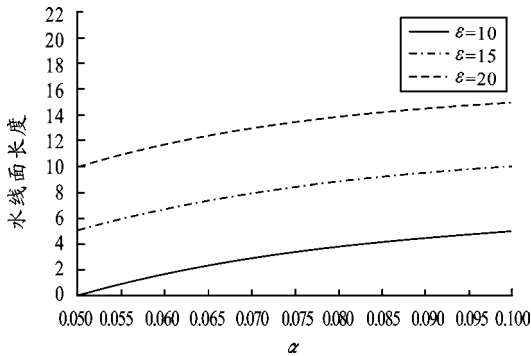


图 4 扰动角与水线长度的关系

从图 4 可以看出: 当 α 增大时, l_k 随之增大, 即弹丸尾部与空穴壁的相交更加深入, 与实际一致; 当弹丸的细长比 ε 增大时, l_k 也随着增大。

设射弹绕流为理想可压缩流体无旋定常运动, 为避免尾部空泡回注射流形成的数学奇异性, 采用 Riabushinsky 空泡

闭合方式(即空泡以与射弹对称的形式闭合), 将坐标原点建立在空泡顶点处。

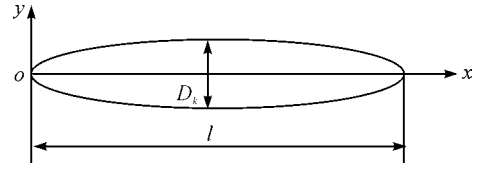


图 5 超空泡外形

空泡外形方程为:

$$\frac{(x - l/2)^2}{(l/2)^2} + \frac{y^2}{(D_k/2)^2} = 1$$

D_k 和 l 在文献中[3]中给出了研究者得出的多种经验公式, 利用 Matlab 将各种经验公式绘制曲线, 如图 6、图 7 所示。

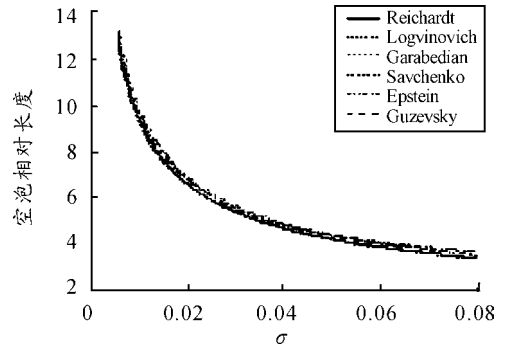


图 6 空化数与空泡长度的关系

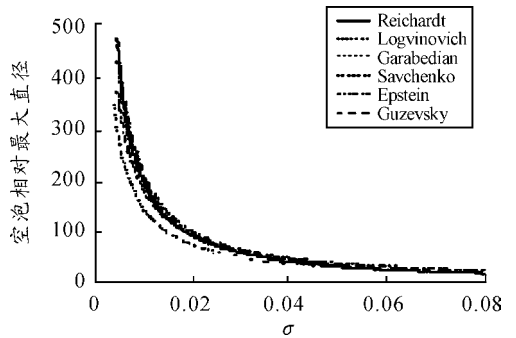


图 7 空化数与空泡最大直径的关系

从图 6、图 7 可以看出, 各超空泡外形计算公式在圆盘空化器情形时计算结果基本一致。

本文根据文献[4]和文献[5], 有:

$$D_k = d_c \sqrt{\frac{c_{s0}(1 + \sigma)}{\sigma}}$$

$$l = \frac{d_c}{\sigma} \sqrt{c_{s0}(1 + \sigma) \ln \left(\frac{1}{\sigma} \right)}$$

R_E 为椭圆空泡模型中 E 点距长轴的距离。

因为 θ 很小, 当 $x = L$ 时, 有

$$R_k \approx \sqrt{\frac{\sigma}{\ln \frac{1}{\sigma}}} \cdot \sqrt{L} \cdot \left(\frac{d_c}{\sigma} \sqrt{c_{s0}(1 + \sigma) \ln \left(\frac{1}{\sigma} \right)} - L \right) \quad (3)$$