

doi: 10.7690/bgzdh.2016.06.001

## 大水深垂直发射航行器水弹道稳定性分析

王占莹, 程少华, 于海涛, 王冠军, 裴金亮  
(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 为使航行器在水下运动姿态及轨迹不偏离理论弹道, 对大水深自浮式垂直发射航行器弹道稳定性进行研究。结合水下发射航行器运动稳定性理论分析方法, 对其进行稳定性数值仿真分析, 针对浮力项在航行器自浮式垂直发射过程中对弹道稳定性所起的作用, 研究航行器浮心位置对水弹道稳定性的影响。结果表明: 对于静不稳定的航行器, 浮心位置设计必须在质心前, 并满足浮力矩可以抵抗定常流体力矩干扰才能满足航行器的稳定性要求。该研究为航行器流体结构布局设计和水弹道稳定性设计奠定了基础。

**关键词:** 水弹道; 大水深; 稳定性

**中图分类号:** TJ65<sup>+</sup>5.1 **文献标志码:** A

## Stability Studies of Trajectory of Launched Vehicles Under Deep Water

Wang Zhanying, Cheng Shaohua, Yu Haitao, Wang Guanjun, Pei Jinliang  
(Beijing Institute of Astronautical System Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** In order to prevent the vertical launched vehicles under deep water departing from trajectory in theory, the stability of trajectory is studied. Based on the stability theory and underwater trajectory model, the stability is simulated and analyzed in different conditions. Due to the buoyancy-term is important to the stability of uncontrolled vertical launched vehicles, the influence on stability of trajectory of the center of buoyancy is studied, and impact of determination of the relation among the three center of mass, pressure and buoyancy upon stability of trajectory can be clarified, and the center of buoyancy must be in front of the mass center and the determination of them must be long enough for vehicle with relaxed static stability. The study may contribute to the engineering design of hydrodynamic structural layout and the stability studies of trajectory in theory.

**Keywords:** trajectory; under deep water; stability

### 0 引言

潜艇在航行过程中, 最大潜深可达几百米以上, 具有良好的隐蔽性。由于目前技术水平的限制, 潜射航行器发射深度远达不到这个水平。发射水深是潜射航行器的一个关键技术指标, 也是关乎潜艇隐蔽发射的主要技术指标, 对潜艇发射时段的安全性具有重要的影响, 但发射水深问题也是潜射航行器发射面临的一个重要技术难点, 对航行器在水下环境适应能力提出了更高的要求。自浮式发射是实现大水深发射的一种重要技术途径, 而这种发射方式对水弹道姿态稳定性设计提出了更高的要求。

目前国内在水下发射航行器稳定性研究上, 大部分是关于超空泡鱼雷水平发射和有舵控制水下发射方面。例如邹启明等<sup>[1]</sup>通过根轨迹法对超空泡鱼雷运动稳定性进行了分析; 白涛等<sup>[2]</sup>采用分叉法求系统分叉点来确定航行器模型稳定运动的范围; 刘曜等<sup>[3]</sup>通过数值仿真分析了航行器在舵控下的近水面航行器稳定性; 冯光等<sup>[4]</sup>运用细长体理论计算了超空泡状态下航行器的流体动力和水弹道特性, 分析了超空泡航行器的运动稳定性等。无动力自浮式

垂直发射对出水姿态角和角速度有严格的定量指标要求, 航行器在水下航行过程中不可避免地会受到来自外部及自身的扰动, 使航行器的姿态及轨迹偏离理论弹道。航行器在水下航行过程中如果姿态运动不稳定, 就很难在出水分离点使姿态运动满足严格的定量指标要求; 因此, 航行器运动稳定性设计问题就成为航行器设计研制中的关键问题之一。

笔者针对大水深自浮式垂直发射航行器弹道稳定性进行了研究。由于采用自浮式发射, 航行器呈正浮力状态, 浮力矩在姿态参数中起到重要作用, 尤其对于静不稳定的航行器, 浮力矩在弹道稳定性的作用更为重要。因此, 航行器运动稳定性设计需要将正浮力构型与纵向静稳定度相结合, 在航行器流体动力布局设计中进行考虑, 更直观来说, 需要同时考虑航行器浮心、压心和重心之间的相对关系, 确保航行器在干扰作用下很快恢复弹道参数稳定性。

### 1 数学模型

#### 1.1 航行器自浮式垂直发射水弹道模型

航行器在重力、浮力和流体动力等的影响下(弹

收稿日期: 2016-02-18; 修回日期: 2016-03-27

作者简介: 王占莹(1983—), 女, 北京人, 硕士, 工程师, 从事水弹道相关研究。

体对航行器反作用力在此忽略不计), 位移和姿态参数不断发生变化。其运动学方程<sup>[5-9]</sup>满足:

$$Q_A \frac{dX}{dt} = R_A + \Delta G + W_A \quad (1)$$

式中:

$$Q_A = \begin{bmatrix} m + \lambda_{11} & 0 & 0 & 0 & mz_c & -my_c \\ 0 & m + \lambda_{22} & 0 & 0 & 0 & mx_c + \lambda_{26} \\ 0 & 0 & m + \lambda_{33} & my_c & -mx_c + \lambda_{35} & 0 \\ 0 & -mz_c & my_c & J_x + \lambda_{44} & 0 & 0 \\ mz_c & 0 & -mx_c + \lambda_{35} & 0 & J_y + \lambda_{55} & 0 \\ -my_c & mx_c + \lambda_{26} & 0 & 0 & 0 & J_z + \lambda_{66} \end{bmatrix},$$

$m$  为航行器质量,  $J_x$ 、 $J_y$  和  $J_z$  为航行器体轴系 3 个方向转动惯量,  $x_c$ 、 $y_c$  和  $z_c$  为航行器体轴系 3 个方向的质心坐标;  $X = [v_{x1} \ v_{y1} \ v_{z1} \ w_{x1} \ w_{y1} \ w_{z1}]$ ;  $R_A$  为所受的定常流体力和部分非定常流体力;  $\Delta G$  为重力和浮力作用项;  $W_A$  为运动交叉项。

水下发射航行器通常为轴对称体,  $y_c$  和  $z_c$  为零; 因此, 以上的数学模型可以简化为俯仰平面内的运动模型, 其理论运动方程可以展开为:

$$\begin{aligned} (m + \lambda_{11})a_{x1} &= F_{\text{底部推力}} - F_{\text{静压力}} - F_{\text{阻}} - F_{\text{重力}} \\ m\dot{V}_{y1} &= -\lambda_{22}\dot{V}_{y1} - \lambda_{26}\dot{\omega}_{z1} + (B - G)_{y1} + R_{y1} - m\omega_{z1}V_{x1} \quad (2) \\ J_z\dot{\omega}_{z1} &= -\lambda_{26}\dot{V}_{y1} - \lambda_{66}\dot{\omega}_{z1} + L_{z1} + (X_b \times B)_{z1} \end{aligned}$$

其中:  $R_{y1}$  为法向定常流体动力(包括定常法向力和定常法向附加力);  $\lambda_{ii}$  为附加质量项;  $B$  为浮力;  $G$  为重力;  $X_b$  为浮心距离质心间距;  $L_{z1}$  为定常流体力矩(包含俯仰力矩和俯仰阻尼力矩)。

### 1.2 航行器水下运动稳定性分析方法

大水深水下垂直发射时, 在初始法向速度作用下, 具有较大初始姿态扰动, 航行器运动稳定性设计中, 快衰减运动(角运动参数变化)比慢衰减运动(质心运动参数变化)更重要, 更具有实际意义; 因此, 航行器运动稳定性设计主要是快衰减运动稳定性设计。理论分析证明: 只要确保快衰减运动模式的稳定性, 就足以使航行器在曲线爬升段弹道上平稳、准确地达到稳态攻角及稳态俯仰角速度。

1) 根据李雅普诺夫意义下的运动稳定性概念和第一方法(间接法)<sup>[10-11]</sup>, 航行器快衰减运动稳定性设计准则式为:

$$0 < Q < 1 \quad (3)$$

其中  $Q$  为航行器动稳定度,  $Q = 1 + \frac{(\mu - C_y^{\omega_z})m_z^\alpha}{(C_x + C_y^\alpha)m_z^{\omega_z}}$ ,

$\mu = 2m / \rho S_{\text{参考}} L$ , 是相对密度;  $C_y^{\omega_z}$ 、 $m_z^\alpha$ 、 $C_x$ 、 $C_y^\alpha$  和  $m_z^{\omega_z}$  为流体动力系数, 在此动稳定度准则中, 没有考虑浮力矩产生的影响。

动稳定度  $Q > 0$  是快衰减运动渐近稳定的充要条件。其物理意义是, 当航行器受到无论是正攻角还是负攻角的初始扰动后, 在动稳定度  $Q > 0$  时航行器上所产生的扰动力及扰动力矩, 总是使航行器速度矢量的转动角速度方向和航行器纵轴转动角速度的方向按攻角逐渐衰减的方式变化, 同时俯仰角速度也随之衰减。 $Q < 1$  的意义是在于控制航行器俯仰方向运动不出现有超调量的振荡运动, 确保航行器在初始扰动下能迅速、平稳地衰减到稳定值。

#### 2) 稳定性对流体动力布局的要求。

与动稳定度有关的主要是密度和流体动力布局决定的流体动力系数, 其中密度由总体设计参数决定, 不由运动稳定性设计, 俯仰力矩系数和俯仰阻尼力矩系数还与重心位置相关, 而静稳定度  $m_z^\alpha$  同动稳定度密切相关, 在流体布局中通过改变尾翼等布局形式、形状、面积、尾臂(压心距质心距离)和通过改变航行器内部的布局调整质心的位置, 都可有效地改变  $m_z^\alpha$ , 其他流体动力系数也将随之改变, 故在动稳定度影响参数中, 一般只将  $m_z^\alpha$  作为稳定性设计参数。

上文所描述的航行器动稳定性准则, 是对航行器自身流体动力布局弹道动稳定性属性的判断准则, 其中没有考虑浮力矩对水弹道的影响, 而在垂直发射航行器总体设计过程中, 尤其对于相对密度较低的自浮式发射航行器, 浮力矩在姿态运动中起到重要作用; 因此需要考虑浮力矩的设计对弹道稳定性的影响, 这主要涉及到航行器浮心、质心和压心的相对位置关系的设计对弹道稳定性的影响。

#### 3) 浮力矩对稳定性的影响理论分析。

从公式 (2) 可以推导出俯仰角速度计算公式:

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_{z1} &= (-F \times \lambda_{26} + M \times (m + \lambda_{22})) / ((m + \lambda_{22}) \times (J_z + \lambda_{66}) - \lambda_{26}^2) \\ M &= L_{z1} + (L \times B)_{z1} \\ F &= R_{y1} - \omega_{z1} \times m \times V_{x1} - (B - G)_{y1} \end{aligned} \quad (4)$$

可以看出: 俯仰姿态主要受流体动力矩和浮力矩合力矩影响, 显然, 在垂直发射过程中, 航行器在干扰作用下, 若所受俯仰力矩总是产生绕质心的恢复力矩时, 才能保持姿态参数的稳定性。因此在航行器纵向静稳定性的设计中, 可以按俯仰角的稳

定性作为设计指标，可以定义为

$$\frac{\partial M_{zr}}{\partial \phi} < 0。 \quad (5)$$

其中： $M_{zr}$ 为航行器所受绕质心的俯仰力矩之和； $\phi$ 为俯仰角。

若航行器为静稳定的，即  $m_z^\alpha < 0$  ( $m_z^\alpha$ 为定常俯仰力矩系数对攻角的导数)，则流体动力矩总是产生绕质心的恢复力矩，对于浮力所起的作用，与浮心的位置有关，浮心在质心前时，也会产生绕质心的恢复力矩，则此时很容易满足公式 (5) 的要求；浮心在质心后时，会产生俯仰发散力矩，此时，航行器稳定性由流体动力矩和浮力矩综合决定。

若航行器为静不稳定的，即  $m_z^\alpha > 0$ ，流体动力矩总是产生俯仰发散力矩，此时浮力矩的设计就很重要，浮心必须在质心前航行器才有可能满足公式 (5) 的稳定性要求，文中重点分析了航行器为静不稳定时，浮力矩的在航行器稳定性设计中所起的作用和影响规律。

## 2 运动稳定性仿真结果

笔者通过上述稳定性设计理论分析方法，进行了航行器动稳定性分析，并针对大水深自浮式垂直发射过程中存在的各种可能复杂干扰因素，开展了全面的水下发射干扰因素下水弹道仿真分析。通过仿真结果重点针对浮心位置改变对俯仰姿态稳定性的影响规律进行了分析。

### 2.1 动稳定性准则分析

文中所分析航行器为某自浮式大水深垂直发射航行器。航行器为了实现自浮式发射，采用轻质化设计密度较低，流体结构布局特性为无自然空化头型设计，水动力呈全湿流特征，航行器压心在质心前，浮心在质心前距离质心  $2X_0$ 。

由于航行器压心在质心前，因此静稳定度  $m_z^\alpha > 0$ ，航行器是静不稳定的。按照航行器总体特性和流体动力特性参数，根据公式 (3) 计算文中所分析的航行器动稳定度：

$$0 < Q = 1 + \frac{(\mu - C_y^{\alpha_z}) m_z^\alpha}{(C_x + C_y^\alpha) m_z^{\alpha_z}} < 1。$$

可见，航行器流体动力布局满足航行器动稳定性准则判据，而动稳定型准则不能考虑的浮力矩对水弹道稳定性的影响将在仿真结果中具体分析。

### 2.2 干扰下作用下水弹道稳定性仿真结果

笔者针对静不稳定航行器，进行了水下垂直发射不同干扰因素下水弹道参数仿真分析。为了分析压心、浮心与质心相对位置对水弹道稳定性的影响，笔者进行了浮心相对质心不同位置变化对水弹道稳定性的影响计算分析，计算工况见表 1。在同样干扰工况下对比分析了浮心与质心相对位置变化下航行器弹道参数稳定性差异性，具体见图 1~图 9。

表 1 稳定性分析计算工况

| 航行器压心<br>相对质心位置 | 干扰因素类型                         | 浮心相对<br>质心位置       |
|-----------------|--------------------------------|--------------------|
| 在质心前<br>(静不稳定)  | 初始俯仰角偏差 $\phi_0/(\circ)$       | $2X_0$<br>$1.3X_0$ |
|                 | 初始俯仰角速度偏差<br>$W_0/((\circ)/s)$ | $2X_0$<br>$1.3X_0$ |
|                 | 水中干扰力和力矩(量值与流<br>体动力相当)        | $2X_0$             |
|                 |                                | $1.3X_0$           |

#### 1) 初始姿态角度扰动稳定性分析。

取航行器初始  $\Delta\phi_0^\circ$  偏差俯仰角作为初始扰动条件，进行垂直发射水弹道仿真计算，结果见图 1~图 3。从仿真结果可以看出：由于初始攻角为零，同时发射速度很小，初始状态定常流体力矩为零，航行器俯仰方向最初只受到浮力矩作用，而浮力矩在初始姿态角偏差下，产生扶正力矩，产生正向俯仰角速度，随后在浮力作用下航行器上升并且攻角逐渐增大，在负攻角下产生负向流体力矩，俯仰角速度开始减小甚至发散。

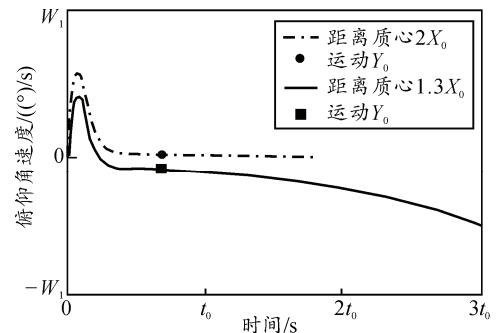


图 1 俯仰角速度变化历程

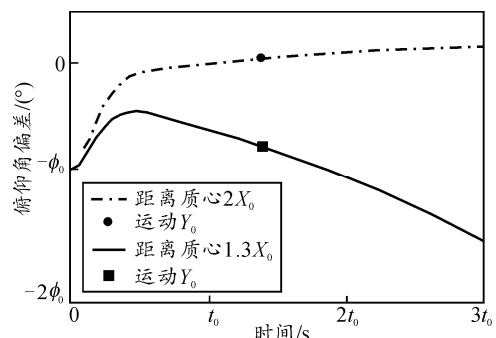


图 2 俯仰角偏差变化历程

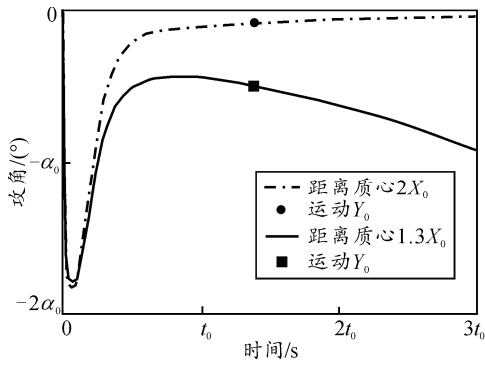


图 3 攻角变化历程

通过不同浮心位置的水弹道计算对比分析，浮心距离质心的位置更近后，由于公式 (2) 中  $L$  减小，浮力矩减小，而浮心在质心前时，浮力矩总是起到减小姿态角的作用；因此，浮力矩在垂直发射中可以起到稳定弹体姿态的作用，而浮心位置更接近质心后，由于浮力臂减小，浮力矩对姿态稳定所起的作用减小，航行器在初始姿态角度扰动下很难恢复姿态稳定性。

2) 初始姿态角速度扰动稳定性分析。

取航行器初始俯仰角速度  $W_0$  干扰条件作为初始干扰因素，进行水弹道仿真计算分析，仿真结果见图 4~图 6。通过对比不同浮心位置的水下发射俯仰姿态参数可以发现，虽然在浮力矩作用下俯仰角速度最初都向零值附近收敛，但随着后续攻角的增大，流体动力矩在负攻角作用下产生发散力矩，浮心距离质心距离大时，浮力矩可以平衡流体动力矩的作用，俯仰角速度和俯仰姿态逐渐趋于稳定状态，而随着浮心距离质心距离减小，由于公式 (2) 中  $L$  减小，浮力矩减小，航行器在初始俯仰姿态角速度扰动下很难抵抗流体动力干扰，难以恢复俯仰姿态稳定性。

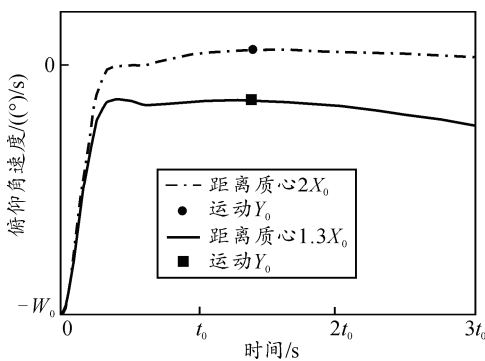


图 4 俯仰角速度变化历程

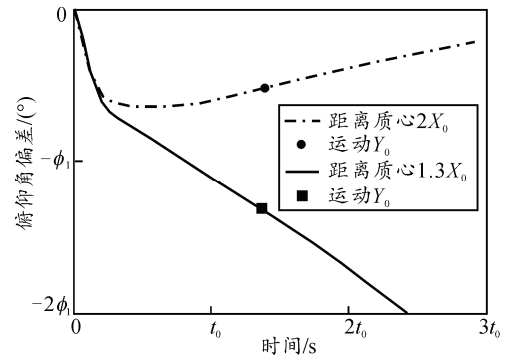


图 5 俯仰角偏差变化历程

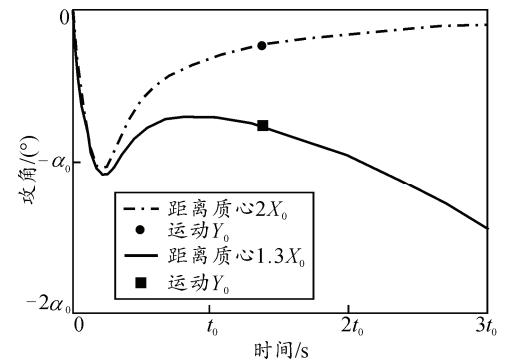


图 6 攻角变化历程

3) 干扰力和力矩稳定性分析。

在航行器水下发射过程中施加干扰力和力矩，干扰力量级与流体动力相当，水弹道仿真结果见图 7~图 9。航行器垂直发射过程中在干扰外力作用下，航行器产生扰动角速度，俯仰姿态发生变化，当俯仰姿态角偏差发展到一定量值后，浮力矩产生恢复力矩，当浮心离质心距离大时，浮力矩量值达到可以抵抗流体动力和干扰力的作用，俯仰姿态逐渐恢复稳定，而当浮心位置向质心靠近时，由于公式 (2) 中  $L$  减小，浮力矩减小，浮心位置改变后浮力矩对俯仰姿态稳定所起的作用减小，航行器在干扰力和力矩扰动下很难恢复姿态稳定性。

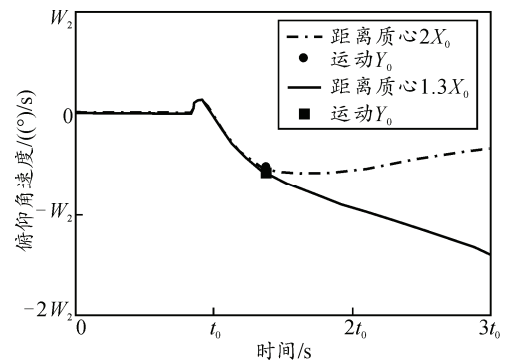


图 7 俯仰角速度变化历程

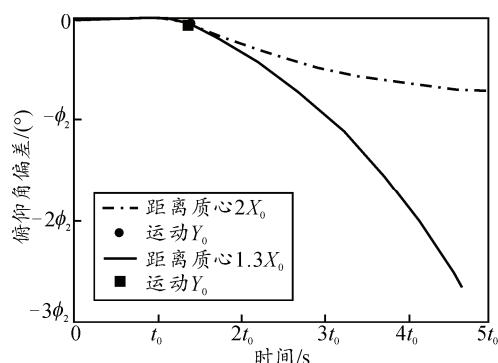


图8 俯仰角偏差变化历程

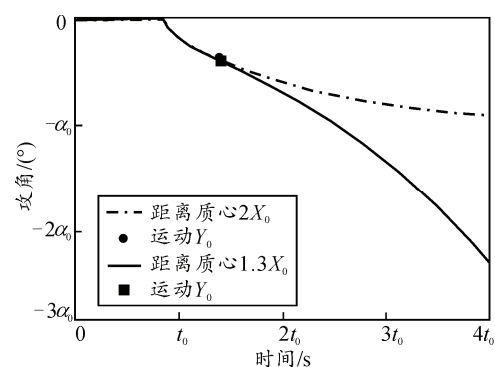


图9 攻角变化历程

通过以上航行器在初始姿态干扰、干扰力等不同干扰因素以及浮心位置变化下的弹道姿态参数仿真计算分析,可以得出关于航行器水弹道稳定性的如下规律:

1) 文中分析的航行器是静不稳定的。在浮心距离质心较远距离时可以实现航行器在扰动下的自稳定性(发生干扰时浮力矩作用大于流体动力矩作用,即  $L_{z1} < -(L \times B)_{z1}$ ),说明不能完全只根据静稳定性来判断航行器运动稳定性,当浮力矩的作用占优势时,可以抵消流体动力静不稳定的影响。

2) 通过不同浮心位置对姿态参数稳定性影响分析,浮心在质心前时,距离质心越远,浮力矩所起的稳定性作用越大,水弹道在干扰作用下恢复稳定性越快。

3) 通过浮心与质心相对位置关系影响,可以分析出对于航行器压心和浮心都在质心前时,姿态受到扰动时由于航行器处于上升状态,在攻角作用下俯仰力矩是起到偏离垂直姿态的作用,而浮力矩是起扶正航行器姿态的作用。因此在水弹道是否能够在干扰作用下恢复稳定性,要看流体动力和浮力的设计影响量值。从不同浮心位置影响来看,浮心在质心前离质心越远,姿态参数越容易稳定,浮心距离质心近时弹道参数越难控制达到出水过程的稳定性要求。

4) 动稳定度准则中没有考虑浮力矩的影响,但对于自浮式垂直发射这种密度较低的航行器来说,浮力矩对水弹道稳定性的影响很大。因此大水深垂直发射水弹道稳定性设计时,还是需要通过航行器压心、质心和浮心三者之间相对位置关系合理布局来实现。

### 3 结论

笔者通过无动力航行器运动稳定性理论分析方法,并针对航行器浮心、压心和质心三者相对位置关系进行大水深垂直发射水弹道稳定性仿真分析,获得以下结论:

1) 在航行器静不稳定的情况下,合理进行浮心位置设计可以实现航行器在扰动下的自稳定性,这说明不能完全根据静稳定性来判断动稳定性。

2) 航行器流体动力布局和总体结构布局的设计中可以参考动稳定性判断准则进行水弹道稳定性分析,但对于自浮式垂直发射这种密度较低的航行器来说,不可忽略浮力矩对水弹道稳定性的作用。因此对于大水深垂直发射方式水弹道稳定性更直观的设计还是应通过航行器压心、质心和浮心三者之间相对位置关系更为合理。

### 参考文献:

- [1] 邹启明,王改娣.超高速水下航行器纵向运动稳定性分析[J].鱼雷技术,2013(6):406-409.
- [2] 白涛,孙尧,莫宏伟.水下高速运动体运动稳定性的分叉分析[J].哈尔滨工业大学学报,2009(5):95-98.
- [3] 刘曜,张永,胡德斌.潜射导弹运载器的水弹道控制及近水面航行的稳定性分析[J].弹箭与制导学报,2005(S9):190-197.
- [4] 冯光,颜开.超空泡航行器水下弹道的数值计算[J].船舶力学,2005(9):1-8.
- [5] 马震宇,刘曜.无动力运载器水弹道特性计算[J].四川兵工学报,2011(6):4-7.
- [6] 方宁,宋召青.潜载垂直发射导弹水下弹道建模与仿真[J].海军航空工程学院学报,2010(3):311-314.
- [7] 葛晖,张宇文,卜广志,等.基于Matlab/Simulink的潜射导弹运载器水弹道仿真[J].弹箭与制导学报,2003(3):53-55.
- [8] 黄寿康.流体动力弹道载荷环境[M].北京:宇航出版社,1991:418-429.
- [9] 韩锋,张宇文,栗夫园.无动力运载器水下弹道的建模与仿真[J].计算机仿真,2014(3):51-54.
- [10] 荣建德.无动力运载器的姿态运动稳定性研究[J].水动力学研究与进展,1998(3):88-94.
- [11] 荣建德.水下运载器性能的分析与设计[M].2008:121-145.