

雷伞分离装置振动机理与解脱性能

李 晖,王德石,朱拥勇

(海军工程大学 兵器工程系,武汉 430033)

摘要:基于机械振动理论,建立了雷伞分离装置的振动模型,研究了雷伞分离装置的振动机理。研究表明,支承结构使得分离装置的固有频率由一个变为两个,通过计算、测试或者由经验估计,可以确定支承结构的刚度,使雷伞分离装置易于解脱。

关键词:雷伞系统;分离装置;止推轴承;自由度

中图分类号:TJ63;TU352.11

文献标识码:A

文章编号:1006-0707(2013)01-0035-04

The Vibration Mechanism and Disengagement Capability of Mine-umbrella Installation

LI Hui, WANG De-shi, ZHU Yong-yong

(Department of Weaponry Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: Based on mechanism vibration theory, the vibration model of mine-umbrella installation was set up. And the vibration mechanism was investigated based on the model. The results show that: the supporting structure makes the natural frequencies change from one to two. And the stiffness of the supporting structure could be fixed by calculation, testing or experience to make the mine-umbrella installation disengage easily.

Key words: mine-umbrella system; apartment installation; bearing; freedom

直升机或固定翼飞机空投鱼雷在进入预定点后,都要在降落伞的作用下稳定减速后鱼雷入水,雷伞分离。此后,鱼雷才能进行空中和水下弹道的有机衔接并按照一定的程序搜索、跟踪并攻击目标潜艇。因此,对于鱼雷入水阶段雷伞分离机理以及解脱装置(解脱机构)振动特性的研究对于空中反潜武器系统战斗力的形成和提高具有重大意义^[1-2]。

解脱机构采用机械惯性球锁结构。惯性重块约束卡在鱼雷尾轴排气阀环形槽内的钢球,当雷体入水时,入水冲击所产生的惯性力导致轴向负过载,当产生的轴向负过载达到惯性解锁门限时,解脱重块向前运动,释放雷伞之间的连接钢球,钢球从环形槽中掉出,解除对鱼雷的约束,实现雷伞分离,空中稳定装置在解脱弹簧和水冲力的作用下远离雷体。

1 雷伞分离装置的组成

解脱装置属于惯性脱伞机构,采用排气阀为雷伞连接件(解脱部件连接关系见图1)。鱼雷尾轴排气阀与空中稳定装置连接,排气阀固连在战斗载荷发动机内轴上,降落伞通过释扭轴承与伞舱固连,伞舱和解脱机构的套筒固连,再通过连接钢珠和战斗载荷排气阀相连。

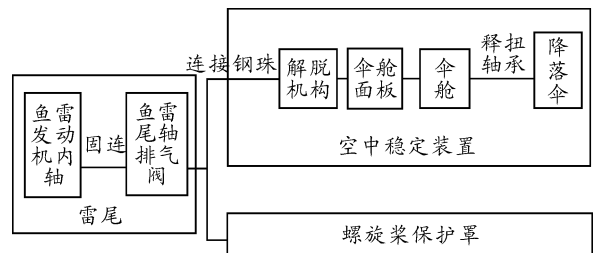


图1 雷伞分离装置

2 二自由度振动模型

将鱼雷的轴与壳体固联,因此鱼雷和解脱重块可看作是二自由度系统(如图2所示)。设 m_1 为鱼雷的质量, m_2 为解脱重块质量, k_2 为复位弹簧刚度。由于重力只改变系统的平衡位置,不考虑重力的影响。

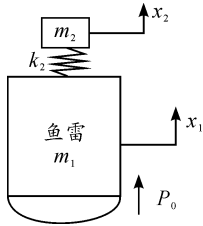


图2 二自由度振动模型

系统受初始扰动后,由于恢复力的作用,2物块将分别在各自的平衡位置附近做无阻尼自由振动。系统的位置可由2物块的坐标 x_1, x_2 完全确定。应用牛顿定律得

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x}_1 = k_2(x_2 - x_1) \\ m_2 \ddot{x}_2 = -k_2(x_2 - x_1) \end{cases} \quad (1)$$

整理得

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = 0 \quad (2)$$

设方程(2)的特解为

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \sin(pt + \alpha) \quad (3)$$

照此假设,在运动过程中二坐标将同时达到极大值,并同时经过平衡位置,即坐标 x_1, x_2 做同步谐振动。将式(3)带入式(2)得

$$\begin{cases} (k_2 - p^2 m_1)A_1 - k_2 A_2 = 0 \\ -k_2 A_1 + (k_2 - p^2 m_2)A_2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

若 A_1, A_2 即有非零解,因此有

$$\Delta(p^2) = \begin{vmatrix} k_2 - p^2 m_1 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - p^2 m_2 \end{vmatrix} = 0 \quad (5)$$

展开得

$$m_1 m_2 p^4 - (m_1 k_2 + m_2 k_2) p^2 = 0 \quad (6)$$

此式是 p^2 的二次方程,称为系统的特征方程,解之得

$$\begin{cases} p_1^2 = 0 \\ p_2^2 = \frac{m_1 k_2 + m_2 k_2}{m_1 m_2} \end{cases} \quad (7)$$

式中,较小的频率 p_1 为第一固有频率; p_2 为第二固有频率,完全取决于系统的物理参数。将 p_1, p_2 的值分别代入式(4),由于方程是齐次的,可得到对应于二固有频率的振幅比

$$\begin{cases} r_1 = \frac{A_2^{(1)}}{A_1^{(1)}} = \frac{x_2^{(1)}}{x_1^{(1)}} = 1 \\ r_2 = \frac{A_2^{(2)}}{A_1^{(2)}} = \frac{x_2^{(2)}}{x_1^{(2)}} = \frac{k_2 - p_2^2 m_1}{k_2} = -\frac{m_1}{m_2} \end{cases} \quad (8)$$

相应的固有振型为

$$\varphi_1 = [1 \quad 1]^T, \varphi_2 = [1 \quad -\frac{m_1}{m_2}]^T \quad (9)$$

系统的运动由刚体运动叠加简谐振动而成

$$x(t) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} (a_1 + b_1 t) + \begin{bmatrix} 1 \\ -\frac{m_1}{m_2} \end{bmatrix} (a_2 \cos p_2 t + b_2 \sin p_2 t) \quad (10)$$

式中: $\vec{a} = [a_1 \quad a_2]^T, \vec{b} = [b_1 \quad b_2]^T$ 可由初始条件确定。

当鱼雷入水时,雷体受到冲量 P_0 作用,设入水时雷体与解脱重块间的连接件来不及发生变形,从而冲击结束时系统运动的初始条件为

$$\begin{cases} x(0) = \begin{bmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \end{bmatrix} = 0 \\ \dot{x}(0) = \begin{bmatrix} \dot{x}_1(0) \\ \dot{x}_2(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0/m_1 \\ 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

设系统的运动为

$$x(t) = \varphi_1(a_1 t + b_1) + \varphi_2(a_2 \cos p_2 t + b_2 \sin p_2 t) = \Phi \left\{ \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \cos p_2 t \end{bmatrix} \vec{a} + \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & \sin p_2 t \end{bmatrix} \vec{b} \right\} \quad (12)$$

$$\text{式中 } p_2 = \sqrt{\frac{m_1 k_2 + m_2 k_2}{m_1 m_2}}, \Phi = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -\frac{m_1}{m_2} \end{bmatrix}。$$

代入初始条件得

$$\vec{a} = 0, \vec{b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{p_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -\frac{m_1}{m_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} P_0 \\ m_1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{P_0}{m_1 + m_2} \begin{bmatrix} 1 \\ \frac{m_2}{m_1 p_2} \end{bmatrix} \quad (13)$$

故系统运动为

$$x(t) = \Phi \begin{bmatrix} t & 0 \\ 0 & \sin p_2 t \end{bmatrix} \vec{b} = \frac{P_0}{m_1 + m_2} \begin{bmatrix} t + \frac{m_2}{m_1 p_2} \sin p_2 t \\ t - \frac{1}{p_2} \sin p_2 t \end{bmatrix} \quad (14)$$

3 三自由度振动模型

对于操雷,由于解脱重块通过排气阀与内轴相连,而内轴被至于主推轴承上,因此可将其视为三自由度系统(如图3所示)。设 m_1^1 为鱼雷(不含内轴)的质量, m_1^2 为内轴质量

(即鱼雷质量 $m_1 = m_1^1 + m_1^2$), k_1 为止推轴承的等效刚度; m_2 为解脱重块质量, k_2 为复位弹簧刚度。由于重力只改变系统的平衡位置, 不考虑重力的影响。

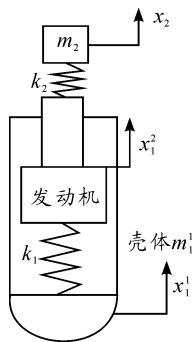


图3 三自由度振动模型

系统中 3 物块的位置可分别由其坐标 x_1^1, x_1^2, x_2 (以各自的平衡位置为原点) 完全确定。应用牛顿定律写出系统自由振动的运动方程

$$\begin{bmatrix} m_1^1 & 0 & 0 \\ 0 & m_1^2 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1^1 \\ \ddot{x}_1^2 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1^1 \\ x_1^2 \\ x_2 \end{Bmatrix} = 0 \quad (15)$$

设系统运动方程的特解为

$$\begin{cases} x_1^1 = A_1 \sin(pt + \alpha) \\ x_1^2 = A_2 \sin(pt + \alpha) \\ x_2 = A_2 \sin(pt + \alpha) \end{cases} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)得

$$\begin{bmatrix} k_1 - p^2 m_1^1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 - p^2 m_1^2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 - p^2 m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_2 \end{Bmatrix} = 0 \quad (17)$$

因此, 特征矩阵为

$$H = \begin{bmatrix} k_1 - p^2 m_1^1 & -k_1 & 0 \\ -k_1 & k_1 + k_2 - p^2 m_1^2 & -k_2 \\ 0 & -k_2 & k_2 - p^2 m_2 \end{bmatrix}$$

从而频率方程为

$$\Delta(p^2) = p^2 \{ p^4 m_1^1 m_1^2 m_2 - p^2 [m_2 m_1 k_1 + k_2 m_1^1 (m_1^2 + m_2)] + k_1 k_2 m_2 + k_1 k_2 m_1 \} = 0 \quad (18)$$

解之, 得

$$p_1^2 = 0, \quad p_2^2 = \frac{m_1 m_2 k_1 + k_2 m_1^1 (m_1^2 + m_2) - \sqrt{\Delta}}{2 m_1^1 m_1^2 m_2} \quad (19)$$

式中

$$\Delta = [m_1 m_2 k_1 + k_2 m_1^1 (m_1^2 + m_2)]^2 - 4 m_1^1 m_1^2 m_2 (k_1 k_2 m_2 + m_1 k_1 k_2)$$

从而有

$$\begin{cases} \varphi_1 = [1 \quad 1 \quad 1]^T \\ \varphi_2 = [1 \quad \frac{k_1 - p_2^2 m_1^1}{k_1} \quad \frac{k_2 (k_1 - p_2^2 m_1^1)}{k_1 (k_2 - p_2^2 m_2)}]^T \\ \varphi_3 = [1 \quad \frac{k_1 - p_3^2 m_1^1}{k_1} \quad \frac{k_2 (k_1 - p_3^2 m_1^1)}{k_1 (k_2 - p_3^2 m_2)}]^T \end{cases} \quad (20)$$

系统的运动由刚体运动叠加简谐振动而成

$$x(t) = \varphi_1 (a_1 + b_1 t) + \varphi_2 (a_2 \cos p_2 t + b_2 \sin p_2 t) + \varphi_3 (a_3 \cos p_3 t + b_3 \sin p_3 t) \quad (21)$$

式中: $\Phi = [\varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \varphi_3]$; $\vec{a} = [a_1 \quad a_2 \quad a_3]^T$; $\vec{b} = [b_1 \quad b_2 \quad b_3]^T$ 可由初始条件确定。

当鱼雷入水时, 雷体受到冲量 P_0 作用, 设入水时雷体与解脱重块间的连接件来不及发生变形, 从而冲击结束时系统运动的初始条件为

$$x(0) = \begin{cases} x_1^1(0) \\ x_1^2(0) \\ x_2(0) \end{cases} = 0, \quad \dot{x}(0) = \begin{cases} \dot{x}_1^1(0) \\ \dot{x}_1^2(0) \\ \dot{x}_2(0) \end{cases} = \begin{cases} P_0/m_1 \\ 0 \\ 0 \end{cases} \quad (22)$$

将式(22)代入式(21)得

$$x(0) = \Phi \vec{a} = 0, \quad \dot{x}(0) = \Phi \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & 0 \\ 0 & 0 & p_3 \end{bmatrix} \vec{b} = \begin{bmatrix} P_0/m_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

解出得

$$\vec{a} = 0, \quad \vec{b} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1/p_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/p_3 \end{bmatrix} \Phi^{-1} \begin{bmatrix} P_0/m_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

故系统运动为

$$x(t) = \Phi \begin{bmatrix} t & 0 & 0 \\ 0 & \sin p_2 t & 0 \\ 0 & 0 & \sin p_3 t \end{bmatrix} \vec{b}$$

4 数值仿真及数据分析

当取重块 $m_2 = 0.8 \text{ kg}$, 鱼雷(不含内轴)的质量 $m_1^1 = 200 \text{ kg}$, 内轴质量 $m_1^2 = 10 \text{ kg}$ (即鱼雷质量 $m_1 = m_1^1 + m_1^2 = 210 \text{ kg}$), 复位弹簧刚度 $k_2 = 1.6 \times 10^3 \text{ N/m}$, $P_0 = 7 \times 10^3 \text{ N} \cdot \text{s}$ 时, 给出 2 种情况下, x_2 处的运动比较(如图 4 所示)。

从图 4 给出的仿真结果可以得出:

1) 在相同条件下, 即 $k_1 = 1.6 \times 10^3 \text{ N/m}$, $k_2 = 1.6 \times 10^8 \text{ N/m}$, $P_0 = 80 \text{ N} \cdot \text{s}$, 计算相对位移, 得出两种模型均能解脱, 此时两种模型推算效果优良。

2) 支撑弹簧刚度减小时, 计算相对位移, 此时 k_1 大于 $9.6 \times 10^6 \text{ N/m}$ 时可以解脱, k_1 小于 $9.6 \times 10^6 \text{ N/m}$ 时则不能解脱。

3) 复位弹簧刚度变化时, 计算相对位移, 此时 k_2 大于 $5.6 \times 10^4 \text{ N/m}$ 时可以解脱, k_2 小于 $5.6 \times 10^4 \text{ N/m}$ 时则不能解脱。

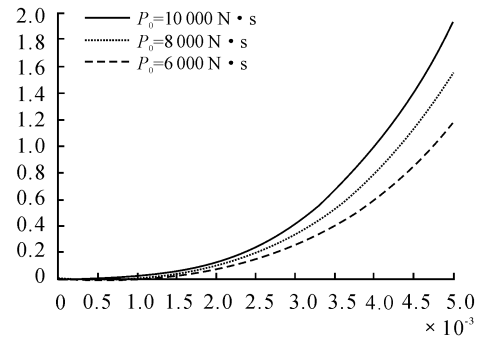
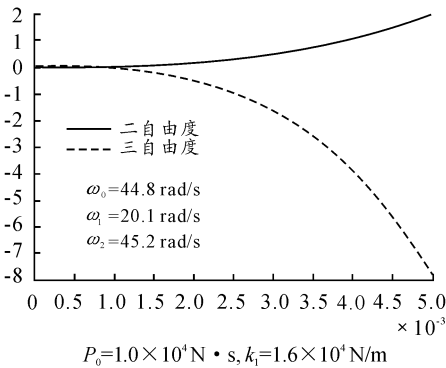
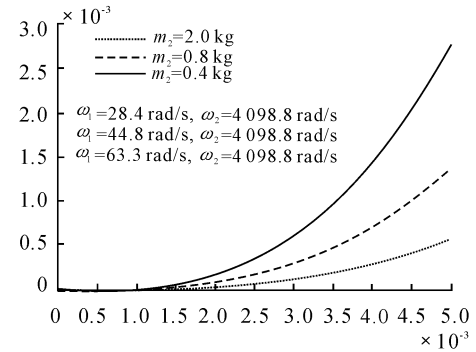
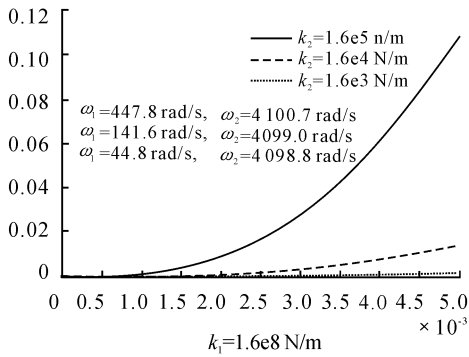
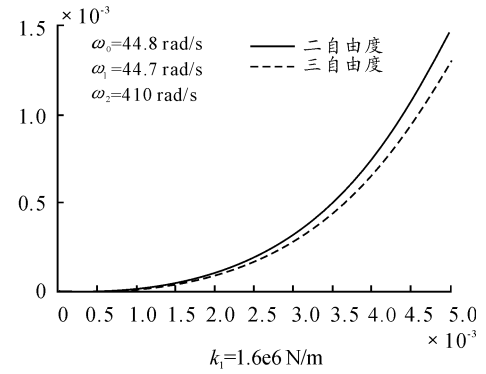
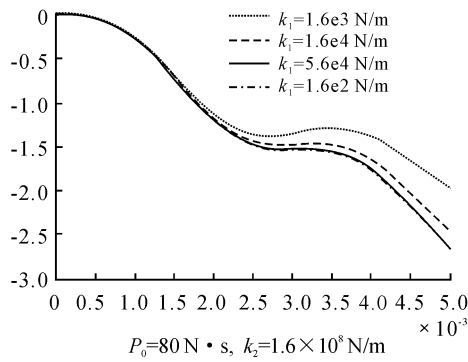
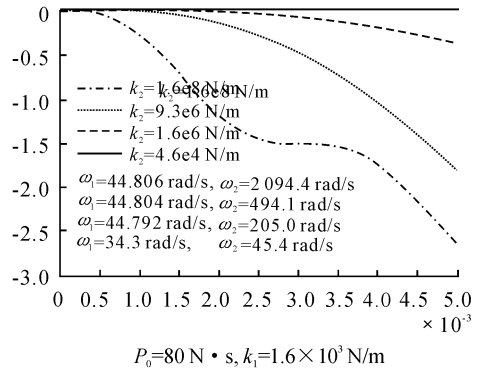
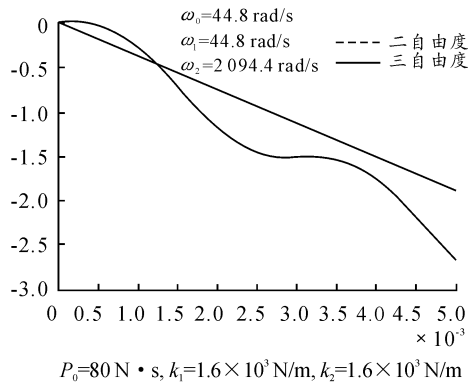


图4 2种情况下 x_2 处的加速度