

# 船舶舵轴及轴承结构摩擦激振建模研究

张宝情, 黄亚农, 陈国琳, 何海洋  
(武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430064)

**摘 要:** 根据粘着-滑动机理和摩擦力-相对滑动速度关系的负斜率机理对船舶舵轴及轴承结构的摩擦激振现象进行了物理建模, 从理论上分析了摩擦激振现象的产生机理, 为进一步研究打下了理论基础。

**关键词:** 摩擦激振; 机理; 建模

**中图分类号:** U664.2 **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-7649(2009)12-0029-03 **DOI** 10.3404/j.issn.1672-7649.2009.12.007

## Modeling analysis of friction stimulating vibration for rudderpost and bearing framework of shipping

ZHANG Bao-qing<sup>1</sup>, HUANG Ya-nong<sup>1</sup>, CHEN Guo-lin<sup>1</sup>, HE Haiyang<sup>1</sup>  
(Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430064, China)

**Abstract** In this paper a physical modeling is put up to the friction stimulating vibration of rudderpost and bearing framework of shipping on the basis of stick-slip motion mechanism and negative friction-velocity slope mechanism, and the mechanism of friction stimulating vibration is analyzed in theory, which lay the theory foundation for more research.

**Key words** friction stimulating vibration; stick-slip motion mechanism; negative friction-velocity slope mechanism

## 0 引 言

船舶舵轴及轴承之间的摩擦力会激励舵轴轴承、支承结构、舵板产生振动, 这个过程称为摩擦激振。摩擦激振产生的振动会大大降低舵轴及轴承的使用寿命及可靠性, 需要大力降低或消除。

船舶的舵轴轴承浸没在海水中, 工作频繁, 负载变化大, 应力变化大, 润滑条件非常复杂, 研究难度较大, 但研究成功后可发现类似情况下的摩擦激振机理, 知道摩擦激振的影响因素, 找出降低或消除摩擦激振强度的方法, 进而提高舵轴及轴承的使用寿命及可靠性, 因此具有很强的理论意义和现实意义。

## 1 船舶舵轴及轴承结构摩擦激振定性分析

船舶舵轴及轴承工作示意图见图 1。

设船舶最大转舵速率为  $V_s$ , 舵轴直径为  $D$ , 则舵

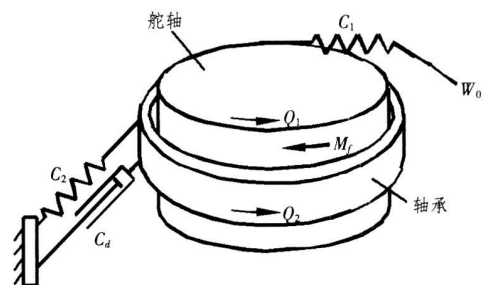


图 1 简化摩擦转动系统

Fig. 1 Simplified turning system of vibration

轴外圆最大线速度  $V$  可由下式得到:

$$V = DV_s. \quad (1)$$

最大转舵速率  $V_s$  一般为  $10^\circ/\text{s}$  以下, 舵轴直径  $D$  一般为  $1\text{ m}$  以下, 经计算, 舵轴外圆最大线速度  $V$  为  $0.087\text{ m/s}$  以下。可见舵轴相对于轴承的滑动速度很低。

收稿日期: 2009-08-11

作者简介: 张宝情 (1975-), 男, 工程师, 从事舰船液压控制系统研究工作。

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

设在最大舵角  $A$  时, 舵板法向力为  $F_{B0}$ , 则舵角为  $\alpha$  时, 舵板法向力  $F_B = F_{B0} \alpha / A$ 。可见舵角  $\alpha$  变化时, 舵板法向力  $F_B$  也会同步变化。

由于舵轴相对于轴承的滑动速度很低, 并且在舵板法向力的作用下, 舵轴与轴承产生很大的接触应力, 加上舵轴与轴承之间润滑状态恶劣, 转动时因摩擦系数变化易发生较大的粘滑效应, 从而产生波动的摩擦力; 另一方面, 舵板经常转动, 随着舵角  $\alpha$  不断变化, 舵板法向力也不断变化, 相应舵轴轴承摩擦副的压力不断变化, 导致摩擦力不断变化波动。由于波动的摩擦力正是摩擦振动产生的原因, 因此舵轴轴承结构会产生振动。

## 2 船舶舵轴及轴承结构摩擦激振建模研究

研究表明, 摩擦激振机理主要有 4 种: 粘着-滑动机理、摩擦力-相对滑动速度关系的负斜率机理、自锁-滑动机理和模态耦合机理, 其中粘着-滑动机理和摩擦力-相对滑动速度关系的负斜率机理的适用范围和船舶舵轴轴承的工作状态相似, 因此我们根据这 2 种机理建立舵轴轴承摩擦激振的物理模型。

### 2.1 粘着-滑动机理物理模型

舵轴轴承结构组成的摩擦机械转动系统可用图 1 的简化转动系统加以模拟。模拟系统包括舵轴和轴承结构, 舵轴相对于轴承结构转动。舵轴等效为由转动惯量为  $J_1$  的质量块和 1 个扭转刚度为  $C_1$  的弹簧组成的复合体,  $C_1$  是包括液压操舵系统和舵传动装置的 1 个等效刚度; 舵轴轴承结构等效为由转动惯量为  $J_2$  的转动惯量块、1 个扭转刚度为  $C_2$  的弹簧和 1 个阻尼系数为  $C_d$  的阻尼器组成的复合体, 该弹簧和阻尼器左端固定于船体上。

角位移为  $Q_1$  的舵轴相对于角位移为  $Q_2$  的轴承结构转动, 受到作用于舵轴和轴承之间的摩擦力矩  $M_f$  作用。设图 1 所示系统的初始状态为弹簧  $C_1$  及  $C_2$  处于自然状态, 且舵轴是静止的。当给以角速度为  $W_0$  的运动时, 在舵轴上的驱动力矩还没有达到足以克服舵轴和轴承间的静摩擦力矩之前, 就不会有舵轴相对于轴承的运动即粘着阶段; 然后, 假如舵轴相对于轴承开始转动即滑动阶段, 弹簧就减载, 于是驱动力矩就下降某一数量; 当舵轴上的驱动力矩降低到低于动摩擦力矩时, 就会形成第二次粘着阶段, 这又引起驱动力矩增加, 直到第二次滑动阶段运动开始, 如此继续交替下去。

舵轴和轴承的受力平衡图分别如图 2 和图 3 所

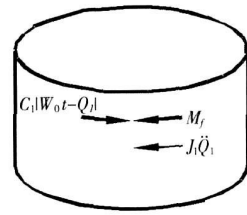


图 2 舵轴受力平衡图

Fig. 2 Force balance fig of rudderpost

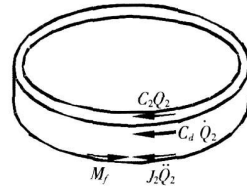


图 3 轴承受力平衡图

Fig. 3 Force balance fig of bearing

示, 由图可分别得舵轴和轴承的受力平衡方程。

$$\text{对于舵轴: } C_1(W_0 t - Q_1) = M_f + J_1 \ddot{Q}_1; \quad (2)$$

$$\text{对于轴承: } M_f = C_2 Q_2 + C_d \dot{Q}_2 + J_2 \ddot{Q}_2. \quad (3)$$

舵轴半径为  $R$ , 摩擦力  $F$  是摩擦副相对运动速度  $V$  的函数。

$$V = Q_1 R - Q_2 R = (Q_1 - Q_2) R,$$

$$F = f(|V|) = f(|Q_1 - Q_2| R). \quad (4)$$

则  $M_f = F R = f(|Q_1 - Q_2| R) R$ 。

由式 (2) ~ (4) 可得:

$$Q_1 = -C_1 Q_1 / J_1 + C_1 W_0 t / J_1 - f(|Q_1 - Q_2| R) R / J_1, \quad (5)$$

$$Q_2 = -C_d Q_2 / J_2 - C_2 Q_2 / J_2 + f(|Q_1 - Q_2| R) R / J_2. \quad (6)$$

通过计算机模拟式 (5) 和式 (6) 组成的微分方程组, 在舵轴的低速运动情况下, 摩擦系统会产生典型的粘滑震荡运动, 如图 4 所示。

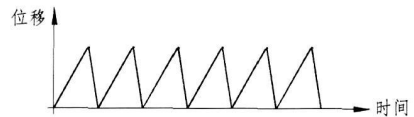


图 4 摩擦系统的粘滑震荡曲线

Fig. 4 Stick-slip motion curve of friction system

### 2.2 摩擦力-相对滑动速度关系的负斜率机理物理模型

金属滑动摩擦面之间的摩擦力  $F$  与摩擦面之间的相对滑动速度  $V$  之间的关系大致如图 5 所示。图中  $F_0$  是相对滑动速度为 0 时的最大静摩擦力。在干摩

擦或润滑不充分的摩擦工况下, 摩擦力会随着滑动速度的上升而下降。对有润滑的摩擦, 当相对速度增加到一定程度后, 形成油膜, 摩擦力性质转变为液体的内摩擦, 因而摩擦力又会随着相对滑动速度的上升而增加。图中, 0-P 区域和 P-q 区域分别为摩擦力的下降特性区域和上升区域。

舵轴轴承由于工作在低速重载下, 又处于海水中, 润滑条件恶劣, 因此常处于干摩擦或润滑不充分的摩擦工况下, 相应摩擦力  $F$  与相对滑动速度  $V$  之间的关系曲线处于 0-P 区域, 即存在摩擦力-相对滑动速度关系的负斜率, 在这种情况下, 常出现摩擦激振。

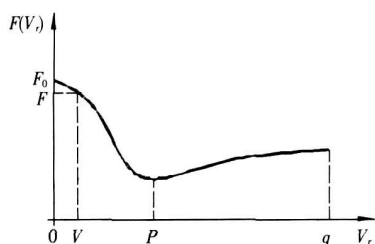


图 5 金属滑动摩擦面的摩擦力-相对滑动速度曲线

Fig 5 Friction-velocity curve of metal gliding

舵轴轴承结构的单自由度模型可用图 6 的简化滑动系统加以模拟。模拟系统包括舵轴和轴承结构, 舵轴以角速度  $W_b$  运动。舵轴轴承结构等效为由转动惯量为  $J$  的质量块、1 个扭转刚度为  $k$  的弹簧和 1 个阻尼系数为  $C$  的阻尼器组成的复合体, 该弹簧和阻尼器左端固定于船体上。

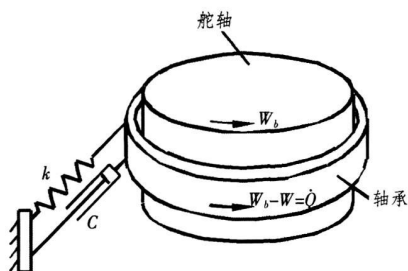


图 6 摩擦振动物理模型

Fig. 6 Physical modeling of friction and vibration

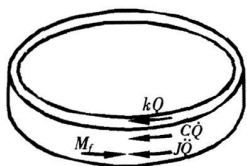


图 7 轴承受力平衡图

Fig. 7 Force balance fig of rudderpost

由图 7 可以写出轴承的力平衡方程式

$$J \dot{Q} + C \dot{Q} + kQ = M_f \quad (7)$$

轴承内半径为  $R$ , 角位移为  $Q$ , 舵轴相对于轴承的运动角速度  $W = W_b - \dot{Q}$ , 设摩擦力-相对滑动速度关系曲线上  $V = W/R$  处对应斜率的绝对值为  $\eta$ , 舵轴与轴承间静摩擦力为  $F_0$ , 考虑到舵轴外圆线速度很低, 可近似认为舵轴轴承的摩擦力-相对滑动速度关系曲线为直线, 则  $V$  处对应摩擦力  $F = F_0 - \eta V$ , 则有:

$$M_f = FR = (F_0 - \eta V)R = (F_0 - \eta W/R)R = F_0 R - \eta W. \quad (8)$$

式 (7) 变为:

$$J \dot{Q} + (C - \eta) \dot{Q} + kQ = F_0 R - \eta W_b = F_0 R - \eta (W_b - \dot{Q}), \quad (9)$$

即

$$J \dot{Q} + (C - \eta) \dot{Q} + kQ = F_0 R - \eta W_b \quad (10)$$

式 (10) 的解为:

$$Q = A e^{\frac{\eta - c}{2J} t} \left( \cos \omega t + \frac{c - \eta}{2J\omega} \sin \omega t \right) + \frac{(F_0 R - \eta W_b)}{k}, \quad (11)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{J} - \frac{(c - \eta)^2}{4J^2}}.$$

此解表示的是一个往复振动, 当  $\eta > c$  时, 表示舵轴轴承结构的振动将无限增大, 此即摩擦力-相对滑动速度关系的负斜率引起摩擦振动的理论解释; 当  $\eta < c$  时, 表示在初始扰动下发生的振动将逐渐减少, 直至消失。

### 3 结 语

通过以上建模研究可知, 在粘着-滑动机理和摩擦力-相对滑动速度关系的驱动力低刚度和负斜率机理作用下, 舵轴轴承结构会产生摩擦激振现象。这 2 种机理比较适合于船舶舵轴轴承结构摩擦激振机理研究。我们将在下一步工作中具体化这 2 种机理的物理模型, 找出影响舵轴轴承结构摩擦激振的主要因素, 进而通过调整这些因素, 达到降低摩擦激振强度的目的。

### 参考文献:

- [1] 温诗铸, 黄平. 摩擦学原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008