

# 船艏轴架模态分析

祁玉荣 金咸定

上海交通大学结构力学研究所

# 船艏轴架模态分析

## Modal Analysis of Ship Brackets

祁玉荣 金咸定  
(上海交通大学)

**摘要：**采用有限元数值计算方法，以某船为代表，建立船艏轴架模态分析的数学模型，计算并分析军规中所要求的艏轴架的一阶频率。在此过程中，利用模态质量对艏轴系统的频率进行筛选，从而得到 P 字架的横向和 A 字架的横、纵、垂向的一阶频率，并与军规中的要求相比较，校核艏轴架的模态特性，并阐述了该方法在将来的其他结构的模态鉴别的适用性。

**关键词：**艏轴架，模态，有限元，P 字架，A 字架

**Abstract :** Adopting finite element method, a ship as example, establishing the brackets' mathematic modal for modal analysis, the first natural frequencies of the brackets, which is needed in military criterion, have been calculated and analyzed. During this course, the first natural frequencies of P-bracket and the first horizontal、longitudinal、vertical natural frequencies of A-bracket have been chosen by modal effective mass from the whole natural frequencies, which is compared with requirement of military criterion. Checking the modal characters of brackets, the availability of the method for choosing natural frequencies by modal effective mass has been illustrated.

**Key words:** Brackets, Modal, FEM, P-Bracket, A-Bracket

### 1. 前言

艏轴架是船体系统的一个重要组成部分。艏轴架系统则包括由主机输出端推力轴承到螺旋桨之间的传动轴以及支撑轴的单、双臂支架，以及艏轴和螺旋桨等，甚至包括一部分相连船体底部，结构相当复杂，因此，艏轴架及其系统模态振型的研究是一个值得探讨的课题。尽管我国规范对艏轴架有参数规定，但随着技术的不断的进步和国外船舶的引进，旧规范仍停留在七、八十年代的水准上，并存在若干模糊和矛盾之处，为此通过对某船艏轴架为代表，引进了多方面的详细的结构力学特性分析，并以此对现行规范提出部分改进意见。

本文根据我国现行规范和现有有限元数值计算 (MSC.Patran、MSC.Nastran) 软件，通过对船艏轴架及其系统进行振动模态的计算，求得艏轴架系统的固有频率和固有振型，并将其和规范中的计算相比较，为船艏轴架结构设计和特性指标校核提供技术支持，并为进一步

分析和修订规范对于船艏轴架的相关规定提供依据。

## 2. 模态分析理论方法

振动是结构系统常见的问题之一，模态分析的基本思想和核心内容是确定用以描述结构系统特性的固有频率和振型的模态参数。模态计算分析从结构特性与材料特性等原始参数开始，采用有限元法形成系统的离散数学模型——质量矩阵和刚度矩阵，然后求解特征值，确定模态参数。

任意一个典型的系统振动模态分析基本方程如下：

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f(t)\} \quad (2-1)$$

式中 $[M]$ 为质量矩阵， $[C]$ 为阻尼矩阵， $[K]$ 为系统的刚度矩阵， $\{x\}$ ， $\{\dot{x}\}$ ， $\{\ddot{x}\}$ 分别是系统的位移、速度和加速度矢量，对无阻尼系统，自由振动方程为：

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = \{0\} \quad (2-2)$$

对于任何一阶固有频率 $\omega_i$ ，必有相应的特征向量 $\{\psi\}_i$ 与之对应，即

$$([K] - \omega_i^2 [M])\{\psi\}_i = \{0\} \quad (2-3)$$

$\omega_i$ 为第*i*阶自由振动的圆频率。

这就是个典型的特征值问题方程，可以求解*n*个 $\omega^2$ 的值以及*n*个 $\{\psi\}_i$ 的特征值。

## 3. 我国标准的近似计算

我国标准规定，凡首制船舶均应进行艏轴架的自由振动计算。在我国的标准中，单、双臂的固有频率的近似计算规定了其技术要求与方法，要求计算艏轴架单臂横向一阶、双臂横向、纵向和垂向和纵向一阶，根据 95 年和 99 年国家标准分别做计算，结果见表 3-1：

表 3-1 艏轴架固有频率的近似计算

频率	f 双臂横向	f 双臂垂向	f 双臂纵向	f 单臂横向
95 标准	40.0	85.84	20.88	29.87
99 标准	48.94	105.05	26.46	31.0

由表可见，不同标准规定的艏轴架固有频率计算本身就存在着较大的差异。

## 4. 有限元模型的建立

为了进一步分析艏轴架系统的模态，建立其有限元模型，对于某船的艏轴架，其典型的

有限元模型见图 4-1，图中艮轴架沿 X 方向分布，其中部用单臂架（P 字架）支撑，在接近螺旋桨的艮端由双臂架（A 字架）支撑。P 字架和 A 字架在与船体相接的部位边界条件为固支，轴前端与船体相连位置边界条件也为固支。螺旋桨被看做一个大质量点加在轴的末端。在规范中曾规定艮轴架系统按梁系模型处理，为了探讨与标准之差别，本文中上述结构均用体单元模拟。

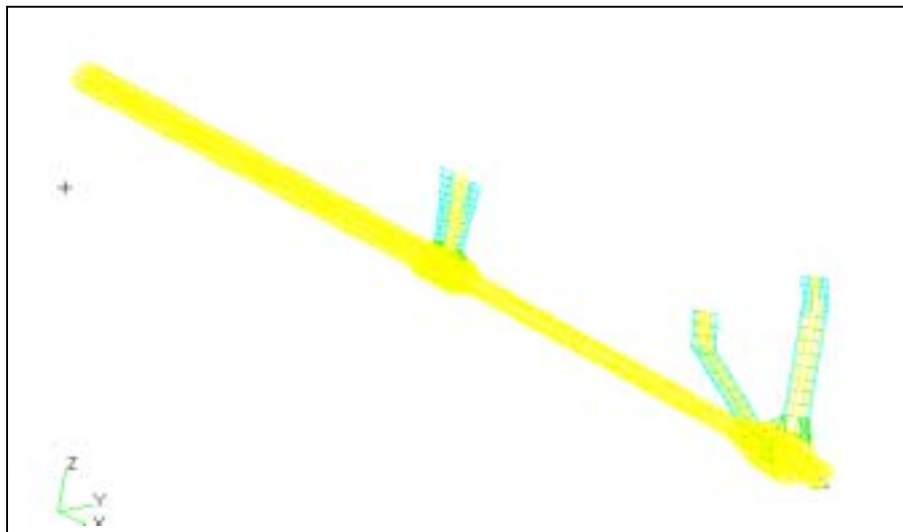


图 4-1 艮轴系统结构有限元

## 5. 有限元模态计算

利用 MSC.Patran、MSC.Nastran 有限元分析软件对船舶的艮轴架进行模态计算，并且利用模态质量进行了对于耦合系统的模态进行了鉴别后，取出与支架相应的振动频率。和规范中的要求相比较，最后的出结论。

### 5.1 整个系统的前 20 阶频率

对整个系统做模态计算后就可以的出系统的前 20 阶湿模态，频率数值如下：

表 4-2 艮轴架系统的实体模型的前二十阶湿模态

实体单元	模态频率
第 (1) 阶	17.915
第 (2) 阶	21.436
第 (3) 阶	25.337
第 (4) 阶	27.971
第 (5) 阶	31.645
第 (6) 阶	32.739
第 (7) 阶	34.688
第 (8) 阶	45.946
第 (9) 阶	61.112
第 (10) 阶	63.508

第 (11) 阶	68.362
第 (12) 阶	84.592
第 (13) 阶	88.692
第 (14) 阶	109.75
第 (15) 阶	116.56
第 (16) 阶	121.12
第 (17) 阶	127.9
第 (18) 阶	130.96
第 (19) 阶	141.22
第 (20) 阶	142.52

表中所有的 20 阶模态，分别具有不同的特点

## 5.2 结合有效模态质量 (modal effective mass) 和振型鉴别模态

为了对众多的模态进行分辨和鉴别，利用 MSC.Patran 的特有指令，在输出模态振型的同时，也输出艏轴架系统的各广义自由度上的模态质量，其计算公式为：

$$\bar{P}_a = \frac{\sum_i M_i \bar{X}_{ia}}{\sum_i M_i \bar{X}_{ia}^2} \quad (5-1)$$

$$\bar{M}_a = \bar{P}_a \sum_i M_i \bar{X}_{ia} = \frac{\left[ \sum_i M_i \bar{X}_{ia} \right]^2}{\sum_i M_i \bar{X}_{ia}^2} \quad (5-2)$$

数值如下：

表 4-3 艏轴架系统模态所对应的有效模态质量分布

系统阶数	T1	T2	T3
1	8.8511e-006	0.3660	3.1283e-005
2	0.0013	0.0838	5.4140e-005
3	0.0239	8.7538e-004	0.2272
4	0.1093	0.0013	0.0053
5	0.0032	0.3760	0.0321
6	0.0391	0.0636	0.0346
7	0.1894	7.5993e-004	0.2657
8	1.1892e-005	0.0052	1.2733e-004
9	0.2968	0.0033	0.0761
10	0.0104	0.0095	0.0045
11	1.3361e-005	5.6678e-005	0.0016
12	0.0172	8.3882e-004	0.0508
13	5.9809e-005	0.0342	3.3667e-004
14	4.5020e-004	0.0059	6.5302e-004
15	0.1032	4.7224e-004	0.0087

16	3.3398e-004	0.0390	8.6707e-004
17	0.0072	0.0019	0.0312
18	0.0141	0.0067	0.2556
19	0.1019	3.9146e-004	0.0011
20	0.0821	3.3665e-005	0.0034
Total	1.0	1.0	1.0

其中 T1、T2、T3 分别位有限元模型中的三个坐标轴方向，即 T1 相应于船舶的纵向、T2 相应于船舶的横向、T3 相应于船舶的垂向的位移模态质量。系统模态质量所占比例较大的时候才会出现部件的固有频率，所以在选择部件模态时，可以不考虑那些模态质量很小的部分。

在 T1 栏里，除去模态质量较小（小于  $10^{-3}$ ）的几阶后，模态质量由大到小的阶数分别为：9, 7, 4, 15, 19, 20, 6, 3, 12, 18, 10, 17, 5, 2，这些阶数里面均表示系统参与纵向振动部分大一些，结合振型可以选出第 4 阶为 A 字架纵向一阶，频率数值为：27.971；在 T2 栏里，除去模态质量较小（小于  $10^{-3}$ ）的几阶后，模态质量由大到小的阶数分别为：5, 1, 2, 6, 16, 13, 10, 18, 14, 8, 9, 17, 4，这些阶数里面均表示系统参与横向振动部分大一些，再结合振型可以看出第 6 阶和第 10 阶分别为 P 字架横向振动一阶和 A 字架横向振动的一阶，频率数值分别为：32.739, 63.506；在 T3 栏里，除去模态质量较小（小于  $10^{-3}$ ）的几阶后，模态质量由大到小的阶数分别为：7, 18, 3, 9, 12, 6, 5, 17, 12, 15, 4, 10, 20, 11, 19，这些阶数里面均表示系统参与垂向振动部分大一些，结合振型可以选出第 15 阶为 A 字架垂向一阶，频率数值为：116.56。

### 5.3 计算结果分析

利用了模态质量就能方便的找出所要求解的模态频率，单臂的横向一阶和双臂的横、纵、垂向的一阶也就可以解决了，其三维实体的振型如下：

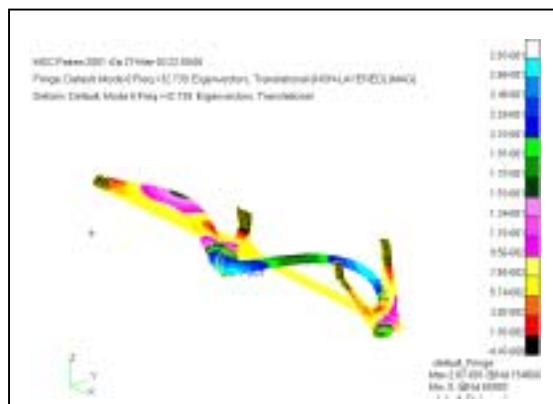


图 4-1 单臂横向一阶



图 4-2 双臂纵向一阶



图 4-3 双臂横向一阶

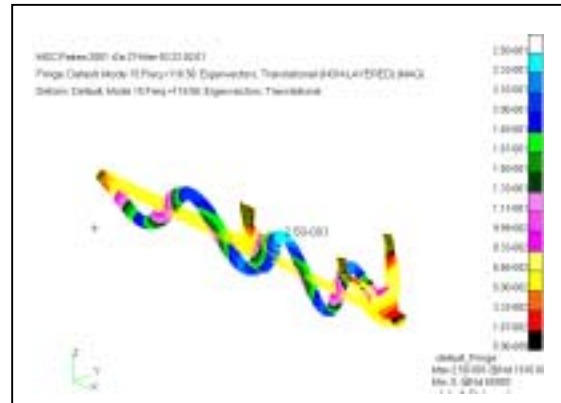


图 4-4 双臂垂向一阶

经过以上有限元的计算和模态质量的计算与比较后可以得出，单、双臂架的几个方向上得一阶频率，数值分别如下：

表 4-4 单、双臂实体单元的一阶频率

	f(双臂横向)	f(双臂垂向)	f(双臂纵向)	f(单臂横向)
频率	63.508	116.56	27.971	32.739
与 95 标准的误差	35.8%	26.35%	25.35%	2.87%
与 99 标准的误差	22.9%	9.87%	5.4%	5.3%

表 4-4 是用有限元法分析三维实体的艏轴架系统后所鉴别出的艏轴架(P 字架和 A 字架)的几个方向的一阶频率,以及 95 标准的近似计算结果与有限元计算的误差和 99 年标准的近似计算结果与有限元计算的误差。99 年标准计算的结果普遍比 95 年标准更接近于实际模型的计算结果。

按照标准规定,艏轴架的第一阶固有频率,应当与螺旋桨的叶频错开 20% 的频率储备。该船最高转速为 266.1 转/分,其叶片数为五叶,螺旋桨的叶片频率为 22.175Hz,本船属于低避螺旋桨的叶片频率,或者说是柔性设计。

## 6. 结论

本文采用有限元方法与数学仿真法相结合的方法,利用 MSC 先进的有限元建模计算的软件工具,对船舶的艏轴架关于标准所严格要求的一阶频率做了详细的计算,它适用于水面船舶艏轴架模态特性的设计和优化,并能为我国标准的修订提供若干意见和建议。

在模态的选取的过程中采用了模态质量法,这样就可以将所要的模态,缩小到一定的范围,对于鉴别模态提供数值上的依据。另外有关附连水对于艏轴架频率的影响,有待于进一

步的研究。

## 7. 参考文献

- [1]金咸定 船体振动学 上海：上海交通大学出版社 1987
- [2]李晓雷，等 机械振动基础 北京：北京理工大学出版社 1996
- [3]曹书谦，等 振动结构模态分析 理论试验与应用 天津：天津大学出版社 2001
- [4]傅方志 振动模态分析与参数识别 北京：机械工业出版社 1990
- [5]Harris M. Dynamic vibration absorbers and auxiliary mass dampers. Shock and Vibration Handbook. 1996
- [6]Seato K. Method of estimating equivalent mass of multi-degree-of-freedom system. JSME, 1987, 30: 75~81
- [7]James G H, Carne T G, Lauffer J P. The Mutual Excitation Technique(NEXT) for Modal Parameter Extraction from Operating Structures, Modal Analysis, 1995, 10 (14)