

基于有限元的舰船推进轴系合理校中计算方法

周 瑞

中国舰船研究设计中心,上海 201108

摘 要: 推进轴系的合理校中直接关系到舰船推进系统运行和舰船航行的安全性与可靠性,因此,其计算方法的合理性和准确性是推进系统研究的重要内容之一。基于有限元分析,建立了舰船推进轴系合理校中计算模型,并计入了螺旋桨水动力、齿轮动态啮合力、轴承刚度、轴承变位、轴段剪切变形以及运行温度等因素对推进轴系校中的影响。以某型舰船的推进轴系为研究对象,采用所提出的方法进行了推进轴系冷态、热态以及安装状态的合理校中计算分析,并与Kamewa公司采用Shaft Analysis AB软件的计算结果进行了对比,平均计算偏差小于1.54%。

关键词: 推进轴系; 校中; 有限元分析

中图分类号:U664.2

文献标志码:A

文章编号:1673-3185(2012)03-74-05

Calculation Method for Ship Propulsion Shafting Alignment Based on Finite Element Analysis

ZHOU Rui

Shanghai Division, China Ship Development and Design Center, Shanghai 201108, China

Abstract: The propulsion shafting alignment directly affects the security and reliability of the propulsion system operation and the ship navigation, the rationality and accuracy of the alignment calculation method is important for propulsion system. In this paper, a propulsion shafting alignment method based on finite element analysis was proposed. The proposed method investigated the factors such as propeller hydrodynamic force, gear dynamic meshing force, bearing stiffness, bearing displacement, shear deformation for the shafting and operation temperature. The alignment analysis was respectively performed under cold state, warm state and installation state for a propulsion shafting. The results of proposed method agree well with the calculation results of Shaft Analysis AB software in the same conditions, and the mean calculation error is less than 1.54%.

Key words: propulsion shafting; alignment; finite element analysis

0 引 言

推进轴系是舰船推进系统的重要组成部分,其运行状态取决于轴系的设计、制造和安装,同时又影响到舰船推进系统运行和舰船航行的安全性与可靠性^[1]。轴系校中计算分为冷态校中计算和热态校中计算两种,其中冷态校中计算主要用于指导轴系的安装和检验,热态校中计算则是轴系

安全运行的保障。合理的轴系校中应该是冷、热态兼优的结果,即各轴承负载均衡、各截面应力分布合理、轴系挠度及转角控制优良。实践证明,校中不良的轴系在运转时会造成轴承迅速磨损,甚至是造成摩擦副烧结,以及尾管密封元件异常磨损而导致泄漏、船体尾部振动加剧等^[2]。

目前,国内外关于推进轴系校中常用的计算方法有3种,即传递矩阵法、三弯矩法和有限元

收稿日期:2011-12-22

基金项目:国家部委基金资助项目

作者简介:周 瑞(1980-),男,博士,工程师。

通信作者:周 瑞。

法。传递矩阵法编程简单、运算速度快,但存在适用性差、数值计算结果容易产生不稳定等问题^[3-5]。三弯矩法的计算精度高、适用性强,但计算量偏大,并且当需要计入外加力偶、线性均布载荷及轴段剪切变形时,需要对其进行改进,且编程复杂^[6-7]。有限元法作为近年来兴起的一种计算方法,可以在船舶轴系校中计算中方便地计入更多影响因素,使得计算模型更接近船舶轴系实际运转时的状态,从而得到更加准确的计算结果。因此,有限元法在船舶推进轴系校中计算中得到了广泛的应用和发展^[8]。

本文将给出一种基于有限元的推进轴系合理校中计算方法,在计算模型中计入螺旋桨水动力、齿轮动态啮合力、轴承刚度、轴承变位、轴段剪切变形及运行温度等因素的影响。运用 Matlab 编制计算程序,对某型舰船推进轴系进行了冷态、热态以及安装状态校中计算,并与 Kamewa 公司采用 Shaft Analysis AB 软件的计算结果进行对比分析。

1 有限元法轴系校中计算

1.1 梁单元刚度矩阵

进行船舶推进轴系弹性校中计算时,轴系通常简化为一个多支承的变截面连续梁系统,承受横向载荷和弯曲力矩的作用。对于任意平面梁单元,有限元计算模型如图 1 所示,当计入剪切变形影响时,平面梁单元的刚度矩阵为^[9]:

$$K_L = \frac{1}{1+\beta} \cdot \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{(4+\beta)EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{(2-\beta)EI}{L} \\ -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ \frac{6EI}{L^2} & \frac{(2-\beta)EI}{L} & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{(4+\beta)EI}{L} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, EI 为轴截面抗弯刚度; L 为轴段长度, m ; $\beta = \frac{12EI \cdot k}{G \cdot A \cdot L^2}$, 为剪切变形影响系数,其中 $k =$

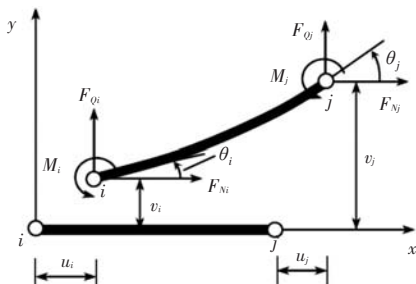


图 1 平面梁单元受力模型

Fig.1 Mechanical model of plane beam element

1.11, 为截面不均匀系数, G 为剪切弹性模量; A 为截面面积, m^2 。

1.2 结点力向量

推进轴系校中计算有限元模型中的结点力向量由分布力(矩)的等效结点力和结点上的集中力(矩)两部分组成。作用在轴系上的分布力(矩)包括分布横向力、分布弯曲力矩和分布扭矩等,这些非结点载荷可以按照虚功相等的原则等效转换到分配到单元结点上的力上,其计算公式参见文献[10]。作用在结点上的集中力(矩)包括集中质量、集中弯矩和轴承支承变位产生的弹性力,其中轴承支承变位产生的弹性力为:

$$F = K_b \delta \quad (2)$$

式中, K_b 为轴承支承的刚度值; δ 为轴承支承的变位值。

1.3 坐标变换

推导梁单元刚度矩阵和计算分布力(矩)的等效结点力时,采用的是局部坐标系,坐标轴方向由梁的截面主方向确定。但是,轴系的实际结构可能由具有不同方向和处于不同位置的梁单元构成,其整体刚度矩阵和结点力向量不能由局部坐标下的矩阵简单地叠加生成,因此,必须建立一个统一的整体坐标系。

假设整体坐标轴 $x-y$ 与局部坐标轴 $x'-y'$ 相交成 α 角,如图 2 所示。计算时,首先将单元上的结点力和位移转换到整体坐标系,单元刚度矩阵亦作坐标变换,然后才可按照叠加规则直接相加组成整体刚度矩阵。对于平面梁单元,其刚度矩阵和等效结点力的转换矩阵为:

$$T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

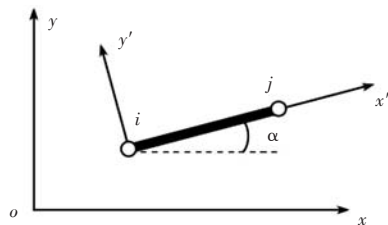


图 2 整体和局部坐标轴位置

Fig.2 Global and local coordinate axes

1.4 生成整体刚度矩阵和整体结点力列阵

整体刚度矩阵 K 由平面梁单元刚度矩阵和轴承支承单元刚度矩阵两部分组成。将平面梁单元的 4 阶刚度矩阵 K_L 加以扩大,写成 $2n \times 2n$ 的

方阵:

$$\mathbf{K}_{2n \times 2n}^e = \begin{bmatrix} \cdots & i & \cdots & j & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & \mathbf{K}_{ii} & \cdots & \mathbf{K}_{ij} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & \mathbf{K}_{ji} & \cdots & \mathbf{K}_{jj} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{matrix} \vdots \\ i \\ \vdots \\ j \\ \vdots \end{matrix} \quad (4)$$

式中, n 为结点数; 虚点和空处的元素为 2×2 的零矩阵; i 和 j 表示分块意义下子矩阵 \mathbf{K}_{ij} 等所在的行和列(实际上是两行两列), i 和 j 的顺序按照结点编号从小到大排列。

通过将所有平面梁单元刚度矩阵 \mathbf{K}_L 中的 4 个子矩阵按其单元结点编号在式(4)的格式中进行对号叠加, 即可得到刚度矩阵 \mathbf{K}' 。

进行推进轴系弹性校中计算时, 轴承接地端受到约束, 轴承支承简化为一维单结点弹簧单元, 将 \mathbf{K}_B 按轴承支承单元的结点编号在 \mathbf{K}' 中进行对号叠加, 即可得到整体刚度矩阵 \mathbf{K} 。

同样, 假设各单元结点力向量为 \mathbf{f}_i , 将结点力向量加以扩大, 写成 $2n \times 1$ 阶的列阵:

$$\mathbf{f}_{2n \times 1}^e = \begin{bmatrix} \cdots & i & \cdots & j & \cdots \\ \cdots & \mathbf{f}_i^T & \cdots & \mathbf{f}_j^T & \cdots \end{bmatrix} \quad (5)$$

之后, 按照有限元叠加规则直接相加, 即可得到整体结点力列阵 \mathbf{f} 。

1.5 求解系统方程

假设轴系被离散成 n_e 个平面梁单元和 n 个单元结点, 则整体结点位移列阵 δ 为:

$$\delta_{2n \times 1}^T = [\delta_1^T \quad \delta_2^T \quad \cdots \quad \delta_n^T]^T \quad (6)$$

因此, 可得到系统方程为:

$$\mathbf{K}\delta = \mathbf{f} \quad (7)$$

式中, 整体刚度矩阵 \mathbf{K} 为奇异矩阵, 不能直接求解。在轴系校中计算有限元模型中, 每个节点有两个自由度, 当某个节点的某个自由度受到约束时, 假设该自由度在整体结点位移列阵中的位置为 i , 则将 \mathbf{K} 中的元素 K_{ii} 置为 1, 第 i 行和第 i 列的其它元素置为零, 整体结点力列阵中相应的元素 $f_i = \beta$ (β 为该自由度的约束值), 即可采用“划行列法”进行求解。

引入约束条件后的系统方程变为:

$$\mathbf{K}^e \delta^e = \mathbf{f}^e \quad (8)$$

式中, \mathbf{K}^e 和 \mathbf{f}^e 分别为经过划行列处理后的剩余矩阵。

求解方程(8)可得到整体结点位移列阵 δ , 进而求出各结点处的位移、转角、剪力和弯矩, 以及

各轴承支承的支反力。

2 计算程序流程图

基于上述轴系校中计算的有限元方法, 在 Matlab 软件环境下利用 M 语言编制了轴系校中计算软件, 其程序流程如图 3 所示。

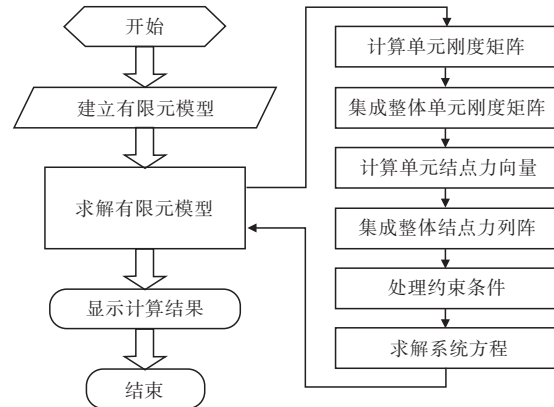


图3 计算程序流程图

Fig.3 Flow chart of the developed software

利用该软件进行轴系校中计算分析时, 可以方便地计入螺旋桨水动力、齿轮动态啮合力、轴承支承刚度、轴段剪切变形以及运行温度等多种因素对校中计算结果的影响。

3 算例分析

以某型船的轴系为研究对象, 计算轴系在冷态、热态以及安装工况条件下的校中结果。该套轴系全长 31.5 m, 分别由推进器轴、尾轴和中间轴组成, 共布置 6 个轴承, 包括 3 只水润滑轴承和 3 只油润滑轴承, 如图 4 所示。推进轴系首端与齿轮箱大齿轮输出端相连, 额定工况下的螺旋桨转速约为 270 r/min, 推力约为 275 kN。

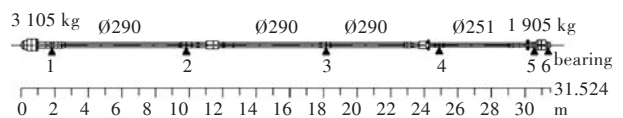


图4 推进轴系布置示意图

Fig.4 Layout of the propulsion shafting

3.1 冷态校中计算结果

冷态工况下推进轴系校中计算计及了轴承支反力、轴承支承刚度和轴段剪切变形的影响, 计算结果如图 5 所示, 图中给出了轴系上各截面处的挠度、转角、剪力以及弯矩的数值结果。

表 1 列出了冷态工况下各轴承负荷的计算结果, 为了对比, 将 Kamewa 公司采用 Shaft Analysis AB 轴系校中计算软件计算得到的结果同时列于表 1。由表 1 可看出, 采用本文计算程序得到的冷

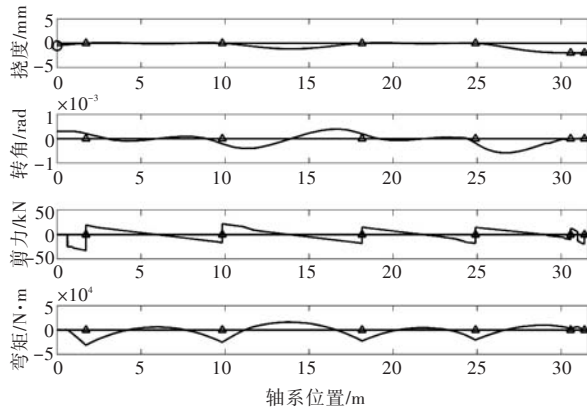


图5 推进轴系冷态校中计算结果

Fig.5 Shaft alignment calculation results in cold state

态工况下的轴承负荷计算结果与Kamewa公司给出的结果一致性良好。

表1 冷态校中计算结果对比

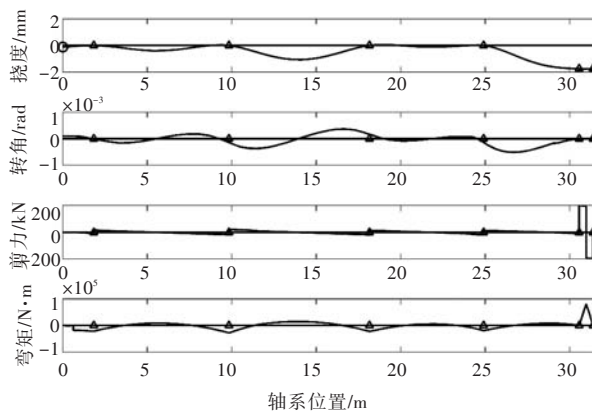
Tab.1 Comparison of calculation results in cold state

轴承 编号	本文计算结果		Kamewa 计算结果	
	变位/mm	负荷/kN	变位/mm	负荷/kN
1	0.00	52.63	0.00	52.61
2	0.00	39.02	0.00	39.01
3	0.00	33.97	0.00	33.79
4	0.00	31.76	0.00	32.80
5	-2.00	21.21	-2.00	21.89
6	-2.00	19.49	-2.00	19.77

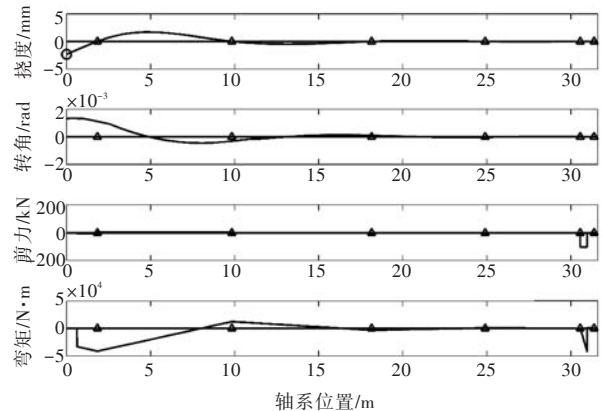
3.2 热态校中计算结果

热态工况下的校中计算除了计及冷态工况下的影响因素以外,还需考虑螺旋桨水动力、齿轮动态啮合力以及运行温度造成的支承膨胀变位等因素的影响。在热态工况下,推进轴系在垂直和水平方向上各截面处的挠度、转角、剪力以及弯矩的数值计算结果如图6所示。

表2列出了在热态工况下各轴承负荷的计算结果,Kamewa公司的计算结果也同时列于表2。由表2可看出,在热态工况下,采用本文计算程序得到的垂直与水平方向上的轴承负荷计算结果与



(a) in vertical direction



(b) in horizontal direction

图6 推进轴系热态校中计算结果

Fig.6 Shaft alignment calculation results in warm state

Kamewa相应的计算结果均保持了良好的一致性,误差很小。

表2 热态校中计算结果对比

Tab.2 Comparison of calculation results in warm state

轴承 编号	本文计算结果		Kamewa 计算结果	
	垂向负荷/kN	水平负荷/kN	垂向负荷/kN	水平负荷/kN
1	25.38	13.72	25.40	13.72
2	40.53	-8.59	40.54	-8.59
3	33.64	2.47	33.78	2.47
4	31.96	-0.76	31.04	-0.74
5	209.13	-103.46	207.88	-103.57
6	199.81	3.39	200.03	3.48

3.3 安装状态计算结果

推进轴系在安装状态的挠度曲线如图7所示。从图中可看出,整个轴系分为3段,同时,为了实现对中以及安装方便,增加了两个临时辅助支承(T1和T2)。在安装状态下,各轴承以及两个临时辅助支承的负荷如表3所示,轴系两个连接端面位置处(图7中椭圆标记处)的开口和偏移的计算结果如表4所示。同样,Kamewa的计算结果也列于相应的表格中。

分别对比表3和表4可以看出,在安装状态下,推进轴系采用本文计算程序得到的各轴承支承和临时辅助支承的负荷以及两个轴系连接端面位置处开口和偏移值的计算结果均与Kamewa公司提供的计算结果保持了很小的误差。

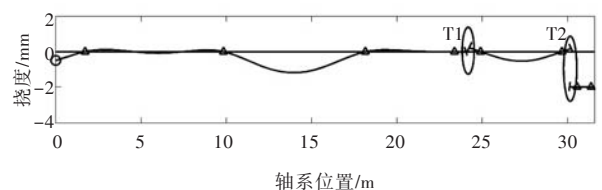


图7 轴系安装状态挠度曲线

Fig.7 Shaftline deflection curve in open shafting state

表3 安装状态轴承负荷计算结果对比

Tab.3 Comparison of bearing load in open shafting state

轴承 编号	本文计算结果		Kamewa 计算结果	
	变位/mm	负荷/kN	变位/mm	负荷/kN
1	0.00	52.59	0.00	52.61
2	0.00	39.12	0.00	39.14
3	0.00	33.02	0.00	33.12
T1	0.00	15.22	0.00	14.87
4	0.00	12.24	0.00	12.07
T2	0.00	12.76	0.00	11.26
5	-2.00	19.34	-2.00	19.41
6	-2.00	15.92	-2.00	15.58

表4 安装状态开口、偏移计算结果对比

Tab.4 Comparison of gap and sag in open shafting state

位置 编号	本文计算结果		Kamewa 计算结果	
	偏移/mm	开口/mm	偏移/mm	开口/mm
1	0.18	0.23	0.18	0.22
2	0.20	2.17	0.19	2.16

4 结 语

本文给出了一种基于有限元的舰船推进轴系合理校中计算方法,所建立的模型能够计入螺旋桨水动力、齿轮动态啮合力、轴承刚度、轴承变位、轴段剪切变形等多种因素对校中状态的影响,更加逼近轴系实际运行的物理模型。基于 Matlab 环境编制了计算程序,并以某型舰船推进轴系为研究对象进行了冷态工况、热态工况以及安装状态下的轴系校中计算,3个工况下的计算结果与 Kamewa 计算结果的偏差分别为 1.42%、0.68% 和 2.29%,平均计算偏差小于 1.54%,验证了所提方法的正确性和所开发软件的计算精度。

参考文献:

- [1] 周继良,邹鸿钧. 船舶轴系校中原理及应用[M]. 北京:人民交通出版社,1985.
- [2] 周瑞平,徐立华,张昇平,等. 船舶推进轴系校中若干技术问题研究[J]. 船舶工程,2004,26(6):48-52.
ZHOU R P, XU L H, ZHANG S P, et al. Study on some technical problems in alignment of ship propulsion shafting[J]. Ship Engineering, 2004, 26(6): 48-52.
- [3] 魏海军,王宏志. 船舶轴系校中多支承问题的研究[J]. 船舶力学,2001,5(1):49-54.
WEI H J, WANG H Z. Study on multi-bearings of ship-ping shaft system alignment[J]. Journal of Ship Mechanics, 2001, 5(1): 49-54.
- [4] 王宏志,魏海军,关德林,等. 中间轴承对船舶轴系力学状态影响的数字模拟[J]. 船舶力学,2006,10(1):98-105.
WANG H Z, WEI H J, GUAN D L, et al. Numerical simulation on ship shafting mechanics condition of intermediate bearing [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(1): 98-105.
- [5] 张洪田. 船舶轴系合理校中技术研究[J]. 黑龙江工程学院学报,2003,17(4):3-7.
ZHANG H T. Research on alignment technique for marine shafting [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2003, 17(4): 3-7.
- [6] 周瑞平,张昇平,杨建国. 三弯矩方程的改进及在船舶轴系动态校中中的应用[J]. 船舶工程,2003,25(1):40-43.
ZHOU R P, ZHANG S P, YANG J G. Application of improved three-moment equation in dynamic alignment of ship shafting [J]. Ship Engineering, 2003, 25(1): 40-43.
- [7] 周瑞平. 超大型船舶推进轴系校中理论研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2005.
ZHOU R P. The Theoretic studies on the propulsion shafting alignment of ultra-large vessels [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2005.
- [8] 耿厚才,饶柱石,崔升. 船舶轴系油膜计算与轴承反力分析[J]. 船舶力学,2004,8(5):120-124.
GENG H C, RAO Z S, CUI S. Oil film calculations and reaction analyses for marine shaft system [J]. Journal of Ship Mechanics, 2004, 8(5): 120-124.
- [9] ZHOU R P, XU L J, LI B R, et al. Improvement of finite element analysis in the propulsion shaft alignment [J]. Journal of Ship Mechanics, 2005, 9(3): 111-117.
- [10] 徐荣桥. 结构分析的有限元法与 MATLAB 程序设计[M]. 北京:人民交通出版社,2006.

[责任编辑:喻 菁]