

基于三维水弹性理论的 COMPASS-THAFTS 软件开发及应用

倪歆韵, 王墨伟, 田超

(中国船舶科学研究中心, 无锡, 214082, Email: nixinyun@cssrc.com.cn)

摘要: 三维水弹性理论是评估船体结构性能和水动力性能的重要理论, 尤其在结构的载荷特性、疲劳特性、结构强度等的评估方面起到了重要的作用。但目前国内尚未形成一款性能优良、界面友好、被用户广泛接受的三维水弹性力学分析软件。中国船舶科学研究中心和中国船级社通过战略合作, 将现有的、国际领先的三维水弹性程序源代码进行包装, 开发了 COMPASS-THAFTS 软件, 该软件集成了频域、时域计算模块。本文对该软件的频域模块进行了简单的介绍, 并给出了一个应用测试算例。

关键词: 水弹性; 软件; 框架; 短期预报

1 引言

水弹性理论是将结构力学和浮体水动力学有机地结合起来, 对评估浮体结构的总体性能提供了一个更有效的方法。传统上分析结构的载荷特性是将结构所受到的流体压力转移给结构单元, 再进一步做结构性能分析, 这一过程是单向的, 无法考虑结构变形对流体压力的影响。而三维水弹性理论可以突破这一限制, 基于模态分析方法, 建立广义动力学方程, 耦合求解结构的模态响应和水动力, 从而实现结构变形和流体压力的双向耦合。对小尺度结构而言, 虽然结构的变形基本可以忽略, 但通过此方法可以直接获得结构的疲劳特性、结构强度等, 对大尺度、超大尺度结构而言, 流体压力引起的弹性变形不可忽略, 应用三维水弹性理论可以获得更加符合实际情况的结果。因此, 相比于传统的方法, 此方法对船体或平台结构性能的准确、快速评估具有更加实际的意义。

从 Bishop 等的经典著作开始^[1], 船舶水弹性力学成为一门学科, 基于耐波性理论和结构动力学理论, Price 等于 1984 年发展了可以分析三维复杂外形浮式结构物水弹性响应的分析理论和方法, 提出了一个适用范围更广的流固耦合边界条件, 即 Price-Wu 边界条件,

建立了一般三维水弹性的线性理论^[2]。杜双兴^[3]和王大云^[4]分别对航行船体线性水弹性进行了频域和时域研究，杜双兴在已经发展起来的三维水弹性力学分析方法的基础上完善了三维水弹性力学频域分析方法，建立起来的方法可以考虑非均匀稳态流和航速的影响，进一步拓展了水弹性理论的应用范围，王大云根据三维时域格林函数和广义的流固耦合边界条件，推导了水弹性三维时域积分方程和时域水动力系数的计算公式，建立了在时域内对超大型浮式结构物进行分析的三维水弹性方法。1997年，吴有生院士将三维线性水弹性理论拓展到二阶非线性理论^[5]，推导出了弹性模态的二阶波浪力计算表达式，基于此研究成果，陈徐均建立了锚泊浮体一阶及二阶水弹性力学分析方法^[6]，在进行水弹性计算时可以考虑一阶和二阶力对系泊浮式结构物的运动响应、强度及系泊力等的影响^[7]，田超更为严格地考虑了航速与定常兴波流场对船舶水弹性响应的影响，并建立了大浪中航行船舶的三维非线性水弹性分析方法^[8]，倪歆韵在计算锚泊系统的张力时考虑了浮体弹性变形的影响，并开发了时域锚泊系统分析软件模块^[9]。近十几年，水弹性力学的研究和应用得到了很大的发展^[10]，水弹性力学在超大型浮式结构物^{[12]-[14]}、小水线面双体船^{[15][16]}等大型浮式结构和船舶的运动响应和强度分析等方面得到了大量的应用。

目前，国内外已经出现了基于三维水弹性理论的软件开发和应用，如法国 BV 船级社的 Homer 软件、国内哈尔滨工程大学发布的 WALCS 软件等。中国船舶科学研究中心在三维水弹性理论的研究方面一直走在世界的前列，在 2016 年与中国船级社签订了三维水弹性软件开发的战略合作协议，经过两年的技术攻关，现已形成一套集频域功能和时域功能的三维水弹性软件。本文将对其中的频域模块做简要介绍，并采用此软件对某一船型做应用测试。

2 三维水弹性理论

三维线性水弹性力学理论^[2]可用于分析船体结构与流体耦合作用下的船体水弹性响应，船体结构的总变形可以用若干主模态的线性叠加来实现，流场内任意一点的总速度势可以表示为：

$$\phi(x, y, z, t) = \phi_I(x, y, z, t) + \phi_D(x, y, z, t) + \sum_{r=1}^m \phi_r(x, y, z, t) \quad (1)$$

其中， $\phi_I(x, y, z, t)$ 为波浪入射势， $\phi_D(x, y, z, t)$ 为波浪绕射势， $\phi_r(x, y, z, t)$ 结构弹性变形诱导的辐射势， m 为自由浮体的主模态数，其中前六阶为刚体运动。

在微幅入射波和微幅运动假设前提下，各速度势可以使用分离变量法将位置坐标和时间分离开，可以表示为：

$$\begin{aligned} \phi_I(x, y, z, t) &= \phi_I(x, y, z) e^{i\omega t} \\ \phi_D(x, y, z, t) &= \phi_D(x, y, z) e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\phi_r(x, y, z, t) = \phi_r(x, y, z) p_r e^{i\omega t}$$

所有模态线性叠加后，船体任一点的位置矢量可以表示为：

$$\bar{u} = \sum_{r=1}^m p_r(t) \bar{u}_r = \bar{\Omega} + \sum_{r=7}^m p_r(t) \bar{u}_r \quad (3)$$

其中， $p_r(t)$ 为 r 阶模态的主坐标响应， $p_r(t) = \text{Re}\{p_r e^{i\omega t}\}$ ； $\bar{u}_r = \{u_r, v_r, w_r, \alpha_r, \beta_r, \gamma_r\}$ 为各阶广义位移； $\bar{\Omega} = \{u_0, v_0, w_0, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0\}$ 为广义刚体位移。

假定船体结构周围为理想、不可压缩流体，波浪幅值为小量，可得到船体的线性水弹性力学运动方程为^[2]：

$$[a+A]\{\ddot{p}\} + [b+B]\{\dot{p}\} + [c+C+C_m]\{p\} = \{\Xi(t)\} \quad (4)$$

其中， $\{p\} = \{p_1(t), p_2(t), \dots, p_m(t)\}$ ，是船体的主坐标响应； $[A]$ ， $[B]$ 和 $[C]$ 分别为广义附加质量矩阵、附加阻尼矩阵、流体恢复力矩阵； $\{\Xi(t)\}$ 为广义波浪激励力列阵。

根据模态叠加原理，可得到该频率下浮体结构任意剖面上的外载荷传递函数：

$$F(t) = \sum_{r=1}^m F^{(r)} p_r(t), \quad M(t) = \sum_{r=1}^m M^{(r)} p_r(t) \quad (6)$$

3 COMPASS-THAFTS 软件框架

图 1 给出了软件的整体界面，软件界面包含了上部的工具栏、左侧的参数配置和执行计算窗口、右侧的图形显示窗口。整个软件分为业务层、框架层、功能层。业务层主要针对的是软件可以实现的功能，框架层是整个软件框架的设置，功能层是前后处理功能的开发等（图 2）。

在业务层中会涉及到软件核心代码的计算，频域水弹性计算模块的核心主要包含三部分，分别是几何处理模块、水动力参数计算模块和结构动

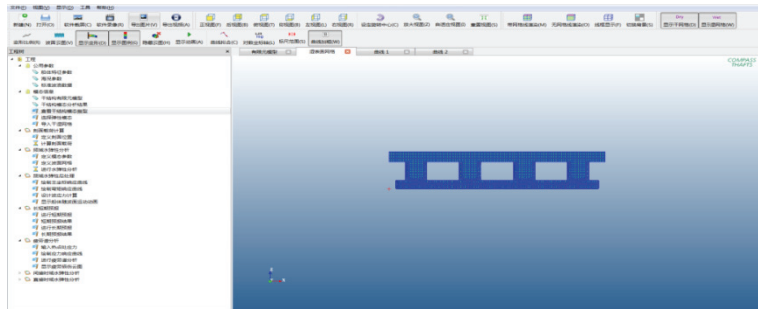


图 1 COMPASS-THAFTS 软件界面

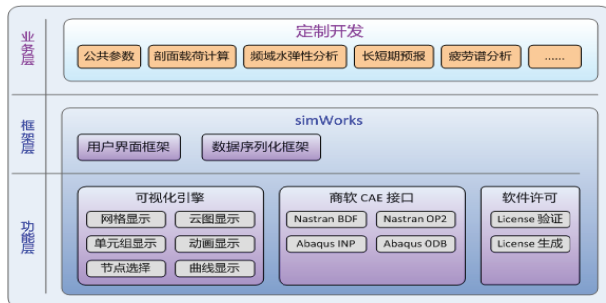


图 2 COMPASS-THAFTS 软件整体框架

力学方程求解模块。图 3 给出了每一个模块的计算过程。几何处理模块通过读取输入数据，获取相关几何信息，计算单元面积、法向以及其它的几何特征量，获取广义流体恢复力矩阵，将计算结果输出到数据文本，实现湿表面网格的图形显示。水动力参数计算模块读取几何处理模块生成的数据和波浪条件，计算入射波速度势和辐射和绕射速度势，获取船体不同频率下的波浪激励力和水动力系数。将水动力参数计算模块中获得的结果提供给结构动力学方程求解模块，计算各模态的主坐标响应。在获得主坐标响应和各种模态信息后即可对结构物的结构性能进行评估。

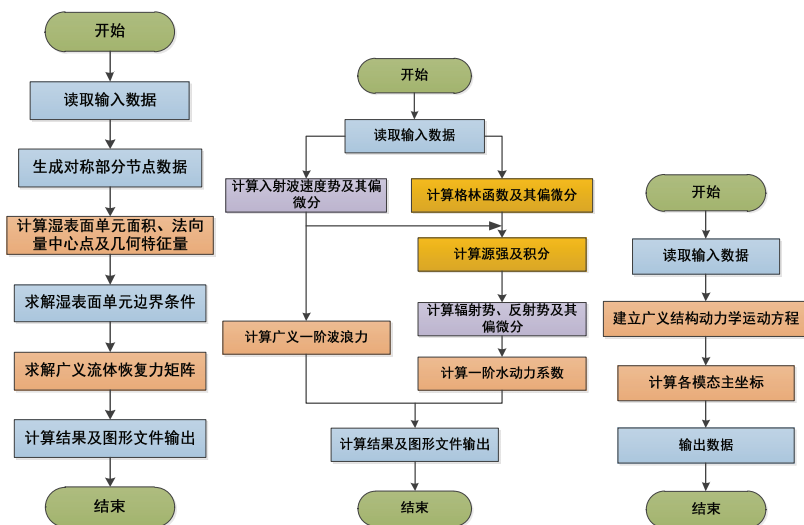


图 3 频域模块主坐标响应计算流程

4 算例应用

4.1 计算对象

本算例的分析对象为一大型散货船，船长 295m，船宽 46m，结构吃水 18.1m。通过 MSC.Patran 建立整船三维模型，并输出干结构有限元模型、干结构表面网格和湿表面水动力网格。其中，干结构有限元模型包含 11427 个节点，31839 个单元；干结构表面网格包含 1785 个面单元，水动力表面网格采用“THAFTS”分析程序规定的湿坐标系。Patran 建立的有限元模型如图 4 所示，其主尺度及其他主要参数见表 1。

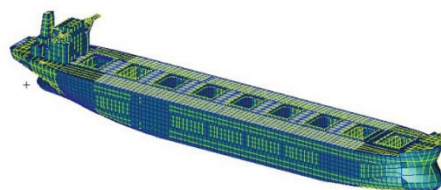


图 4 180KDWT 散货船有限元模型

表 1 180KDW 散货船主要参数

名称	符号	单位	量值
两柱间长	LBP	m	285
船艏距重心的水平距离	LCG	m	136.4
重心距静水面的垂直距离	CG	m	-3.946
排水体积	DISPV	m ³	201490
船体质量	M	kg	2.0678e+08
横摇惯性矩	AI44	kg*m ²	3.42104e+10
纵摇惯性矩	AI55	kg*m ²	1.02351e+12
艏摇惯性矩	AI66	kg*m ²	1.05773e+12
横摇、艏摇惯性矩	AI46	kg*m ²	4.19086

4.2 计算结果

4.2.1 传递函数比对

图 5 给出 0° 浪向下 RAO 的比较结果。从比较的曲线可以看出，此软件频域模块给出了准确的运动响应结果。图 6 和图 7 给出了顶浪和斜浪 45° 状态下船体中横剖面的垂向弯矩传递函数。

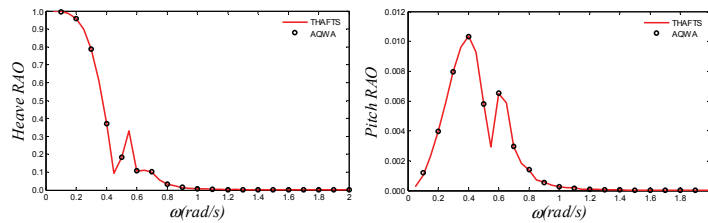


图 5 浪向角为 0° 的 RAO 计算

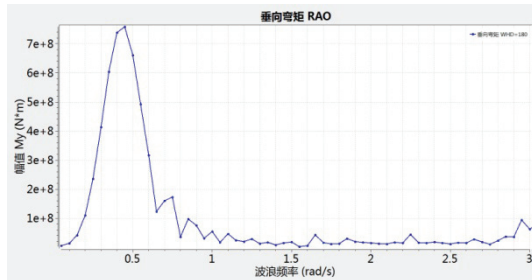


图 6 顶浪船体中横剖面垂向弯矩传递函数

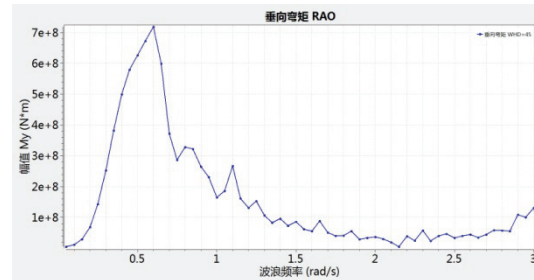


图 7 斜浪 45° 船体中横剖面垂向弯矩传递函数

4.2.2 短期预报

采用 Jonswap 波浪谱对船体中横剖面载荷进行短期预报，谱峰提升因子取 3.3，有义波高取 5.0m，谱峰周期取 8.0s，表 2 给出了此海况条件下船体中横剖面载荷在各浪向下的有义值。从表 2 中数据可以看出，垂向弯矩和轴向力在浪向 60° 时出现最大值，扭转弯矩和水平力在浪向 75° 时出现最大值，水平弯矩在浪向 120°、垂向剪力在浪向 45° 时出现最大值。图 8 给出了垂向弯矩有义值随浪向的变化关系，总体而言，随着浪向角变大，垂向弯矩有

义值先变大后变小，在浪向 60°时出现最大值。

表 2 中横剖面载荷短期预报有意义值

浪向角 (°)	Mx (N·m)	My (N·m)	Mz (N·m)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
0	7.94E+05	5.82E+08	9.25E+04	8.89E+05	6.72E+02	5.42E+06
15	6.08E+08	6.03E+08	1.93E+08	9.16E+05	5.60E+05	5.57E+06
30	1.28E+09	6.76E+08	4.02E+08	1.01E+06	1.18E+06	6.19E+06
45	2.12E+09	7.85E+08	6.64E+08	1.19E+06	1.97E+06	7.71E+06
60	4.25E+09	1.09E+09	1.31E+09	1.40E+06	3.95E+06	7.43E+06
75	4.51E+09	1.01E+09	1.35E+09	1.23E+06	4.24E+06	5.14E+06
90	9.32E+08	7.67E+08	2.86E+08	8.56E+05	8.69E+05	2.78E+06
105	3.90E+09	4.92E+08	1.28E+09	6.05E+05	3.54E+06	3.24E+06
120	4.51E+09	6.41E+08	1.44E+09	6.46E+05	4.14E+06	4.95E+06
135	2.34E+09	4.67E+08	7.38E+08	5.67E+05	2.15E+06	5.53E+06
150	1.42E+09	3.71E+08	4.40E+08	3.90E+05	1.32E+06	4.34E+06
165	6.83E+08	3.01E+08	2.08E+08	2.75E+05	6.38E+05	3.81E+06
180	6.82E+05	2.89E+08	6.50E+04	2.68E+05	6.92E+02	3.74E+06

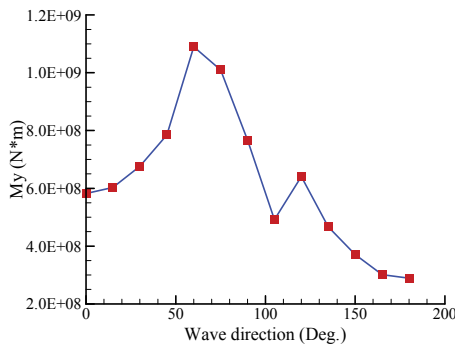


图 8 中横剖面垂向弯矩有意义值随浪向变化关系

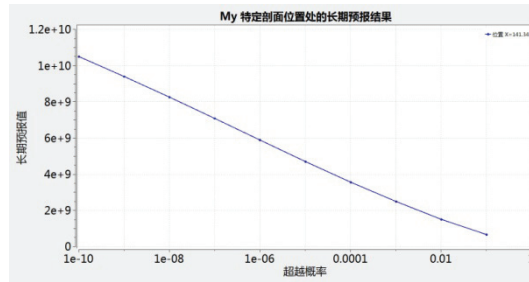


图 9 中横剖面垂向弯矩长期预报值随超越概率的变化

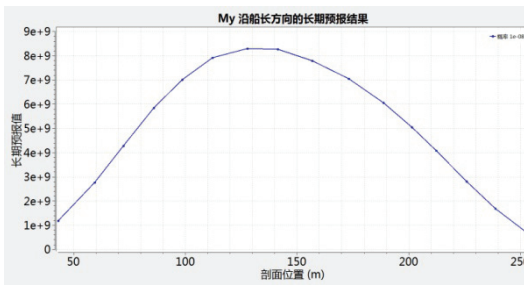


图 10 垂向弯矩长期预报值沿船长的变化

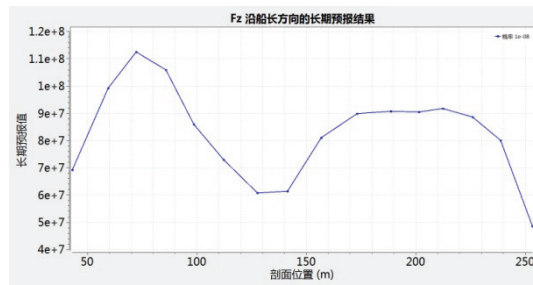


图 11 垂向剪力长期预报值沿船长的变化

4.2.3 长期期预报

基于全球波浪散布图，本文采用 COMPASS-THAFTS 软件对对船体中横剖面载荷进行长期预报，波浪谱为 Jonswap 波浪谱，谱峰提升因子取 3.3。图 9 给出了不同超越概率水平下的垂向弯矩长期预报值，在超越概率取 10^{-8} 时，其长期预报值为 $8.25E+9N \cdot m$ 。图 10

和图 11 分别给出了垂向弯矩和垂向剪力长期预报值沿船长的变化,弯矩随船长先变大后变小,在中横剖面附近垂向弯矩出现最大值;垂向剪力呈现“M”形状,在中横剖面附近较小,在 1/4 剖面和 3/4 剖面值较大。

5 小结

基于三维水弹性水弹性理论开发了 COMPASS-THAFTS 软件,对频域模块的整体功能框架和核心计算流程进行了介绍。针对某一散货船,采用此软件计算了其水动力系数和运动传递函数,并与商业软件的计算结果进行了比对,两者吻合很好。在某一波浪条件下,对船体的中横剖面载荷进行了短期预报,并对垂向弯矩预报值沿浪向的变化规律做了分析。此软件亦可实现对船体剖面载荷的长期预报,基于全球波浪散布图,对散货船在不同超越概率水平下的剖面载荷进行预报。此软件的开发应用将使得工程技术人员能够更加方便快捷地对船体和海洋结构的结构性能进行分析,可以实现海洋结构物在波浪中的动态显示,具有很强的应用和推广价值。

参考文献

- 1 Bishop R.E.D., Price W.G..Hydroelasticity of Ships. London, Cambridge University Press, 1979.
- 2 Wu Y. S..Hydroelasticity of floating bodies. [PhD Thesis]. Brunel University, U.K., 1984.
- 3 杜双兴.完善的三维航行船体线性水弹性力学频域分析方法.[博士论文].无锡:中国船舶科学研究中心,1996.
- 4 王大云.三维船舶水弹性学的时域分析方法.[博士论文].无锡:中国船舶科学研究中心,1996.
- 5 Wu, Y.S., Hisaaki, M., Takeshi, K.. The second order hydrodynamic actions on a flexible body. SEISAN-KENKYU, 1997, 49:190-201.
- 6 陈徐均.浮体二阶非线性水弹性力学分析方法[D].无锡:中国船舶科学研究中心,2001.
- 7 陈徐均,吴有生,崔维成,等.海洋浮体二阶非线性水弹性力学分析—基本理论.船舶力学,2002,04:33-44.
- 8 田超.航行船舶的非线性水弹性理论与应用研究.[博士论文].上海:上海交通大学,2007.
- 9 倪歆韵.考虑浮体弹性变形的锚泊系统时域耦合分析.[博士论文].无锡:中国船舶科学研究中心,2016.
- 10 田超,吴有生.船舶水弹性力学理论的研究进展[J].中国造船,2008,04:1-11.
- 11 Wu Y S. and Cui W C. Advances in the three-dimensional hydroelasticity of ships. Special Issue on Fluid-Structure Interactions to Honour Geraint Price, Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2009, 223 (3): 331-348.

- 12 Wang Zhijun, Li Runpei, Shu Zhi. Study on hydroelastic response of box-shaped very large floating structure in regular waves. *Ocean Engineering*, 2001,19(3):9-13.
- 13 Liu Yingzhong, Cui Weicheng. Mat-type VLFS on a seaway over an uneven bottom. *Journal of Ship Mechanics*, 2007, 11(3):321-327
- 14 杨鹏, 顾学康. 超大型浮体模块水弹性响应和结构强度分析. *船舶力学*,2015,19(5): 553-565.
- 15 Wu Yousheng, Ni Qijun, Xie Wei, et al. Hydrodynamic performance and structural design of a SWATH ship *Journal of Ship Mechanics*, 2008, 12(3):388-400.
- 16 叶永林,吴有生,邹明松,等.基于水弹性力学的SWATH船结构振动与噪声分析.*船舶力学*,2013,17(4):430-438.

The development and application COMPASS-THAFTS based on three-dimensional hydroelasticity theory

NI Xin-yun, WANG Mo-wei, TIAN Chao

(China Ship Scientific Research Center, Wuxi, 214082, Email: nixinyun@cssrc.com.cn)

Abstract: Three-dimensional Hydroelasticity theory is an important theory to evaluate the performance of hull structure and hydrodynamic performance, especially in the evaluation of load characteristics, fatigue characteristics, structural strength and so on. However, at present, there is not yet a three-dimensional hydroelastic analysis software with good performance, friendly interface and widely accepted by users in China. Through strategic cooperation, China Ship Scientific Research Center and China Classification Society have developed COMPASS-THAFTS software, which integrates frequency domain and time domain computing modules, by packaging the existing and internationally leading three-dimensional hydroelastic program source code. In this paper, the frequency domain module of the software is briefly introduced, and an application test example is given.

Key words: Hydroelasticity; Software; framework; short-term forecast