

文章编号:1002-3682(2016)04-0051-07

## 深水 AUV 系统湿模态分析\*

段宝生

(中海油田服务股份有限公司 物探事业部,天津 300451)

**摘 要:**以国家科技重大专项研制的深水 AUV 系统为研究对象,借助商业软件 ANSYS,从一个新的角度——AUV 湿模态分析,研究了各种外界激励的频率特性。为避免 AUV 发生共振,应保证 AUV 所受到的各种外界激励的频率远低于 AUV 的第 7 阶固有频率,基于此,我们对 AUV 航行时的干扰源、AUV 搭载的机械结构以及 AUV 附属结构的对于 AUV 本体的产生的激励频率进行了计算。计算结果显示,低于 AUV 本体的固有频率,不会对 AUV 的稳定性产生影响,实现了 AUV 本体振动不会影响各传感器的正常工作设计。

**关键词:**自治水下航行器;湿模态分析;ANSYS;仿真计算

**中图分类号:** P75      **文献标识码:** A      **doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2016.04.006

自治水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV),依靠自身携带的能源,搭载不同的任务传感器在指定海域按预先设定的航线航行,来完成指定水域的测量与勘探任务。与其他水下机器人相比,水下自治航行器通过声通讯进行信息交互,不受脐带缆的束缚,具有更高的灵活性,在长时序、大纵深的涉海活动中具有更广阔的前景。以美国为首的西方国家在 AUV 的研制应用领域已经走在了前列,实现了商业化,我国 AUV 研究起步于 20 世纪 80 年代,目前处于样机研制阶段,尚未实现商业化。1994 年“探索者”号研制成功,其下潜深度达到 1 000 m,成为我国到达深海的先驱。随后 CR-01 和 CR-02 研制成功,其中 CR-01 于 1997 年在太平洋中国矿区完成了各种实验任务,获得了大量宝贵数据。在军用领域我国先后研制出来“智水 I”、“智水 II”、“智水 III”及“智水 IV”等军用智能机器人,这标志着我国在水下智能机器人的研究方面已接近世界先进水平。

中海油田服务股份有限公司与天津大学 2010 年联合承担国家重大专项子课题“深水 AUV 系统设计与制造技术研究”,成功制造出搭载侧扫、潜剖及多波束等多种专业级海洋测绘传感器的大型 AUV 系统,如图 1 所示,并进行了多次任务性海试,取得令人满意的结果<sup>[1-3]</sup>。

\* 收稿日期:2016-03-22

资助项目:国家科技重大专项——深水工程勘察船及配套技术(2008ZX05027-004)

作者简介:段宝生(1987-),男,工程师,本科,主要从事海洋工程勘察方面研究. E-mail: dbs19861213@163.com

(李 燕 编辑)



图1 研制的 AUV

Fig.1 The AUV developed by the major national science and technology projects

在样机研制过程中发现,当外界激励的频率接近 AUV 的固有频率时,AUV 自身振动对其测量精度产生了不可忽略的影响。模态分析可获得结构的固有频率,是对结构进行振动分析的重要手段,AUV 工作时处于水中时,由于水的密度与其结构相比不能忽略,会对结构的模态产生影响,其表现形式为附加质量。因此,我们对 AUV 进行湿模态分析,使所设计的深水 AUV 自身的固有频率远离外界干扰的频率,以保证 AUV 航行的稳定性。

## 1 AUV 湿模态的计算原理

处于流体中的结构体在受到外界的作用力时,其运动状态自然会发生变化,而结构体运动状态的变化又会反过来影响周围流体的流动状态,流体对结构体的作用力也会因此发生变化,如此,流体与结构体相互发生作用,直到达到一种平衡状态,这便是流固耦合现象<sup>[4]</sup>。结构的湿模态分析便是流固耦合分析的一种。

从计算方法上,流固耦合计算可分为直接耦合式解法和分离解法<sup>[5]</sup>。直接耦合解法在同一个求解器中同时求解流体和结构体控制方程,不存在时间滞后的问题,但其存在着求解耗时及收敛困难等问题。分离解法分别求解流体方程和结构体方程,然后在耦合面上进行交互,此方法虽然存在时间滞后的缺点,但由于计算简单,对资源的消耗较少,已经得到了广泛的应用。

基于无损声波方程:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0, \quad (1)$$

式中, $c$  为声速; $P$  为压力; $t$  为时间。经离散、替换后,流固耦合面处结构所受到的流体压力与结构运动引起的流体速度可以通过下式交互计算获得:

$$\begin{bmatrix} [M_e] & [0] \\ [M^s] & [M_e^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_e\} \\ \{\dot{P}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_e] & [0] \\ [0] & [C_e^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_e\} \\ \{\dot{P}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_e] & [K^s] \\ [0] & [K_e^p] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{u_e\} \\ \{P_e\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_e\} \\ \{0\} \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

式中, $\{P_e\}$  为节点压力矢量; $\{u_e\}$  为位移压力矢量; $\{u\}$  为交界面处结构的位移矢量; $[M_e^p]$  为流体质量矩阵; $[K_e^p]$  为流体刚度矩阵; $[C_e^p]$  为流体阻力矩阵。

我们采用商业软件 ANSYS 进行 AUV 的湿模态分析,从计算方法上属于分离求解方法,从数据传输角度来说为双向求解方法。

## 2 AUV 湿模态计算

### 2.1 AUV 计算模型的建立

AUV 湿模态分析时所采用的模型如图 2 所示。由于结构湿模态分析的精度与流体区域的长度关系不大,计算时取流体区域长度与 AUV 的长度相等。流体区域的截面取为正方形,边长为 AUV 直径的 6 倍。

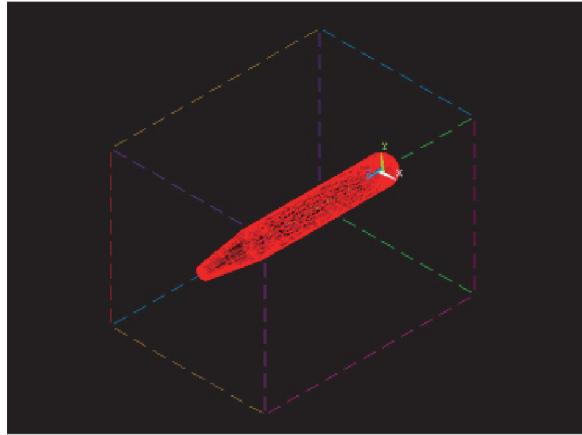


图 2 AUV 湿模态计算模型

Fig. 2 The calculation model for the wet mode of AUV

AUV 的湿模态计算属于流固耦合计算的一种,需要同时对结构区域与流体域进行求解。因此,需要分别对 AUV 本体及 AUV 周围的流体进行网格划分,为降低网格划分的难度,划分网格时采用非结构化网格,划分后的网格如图 3 所示。

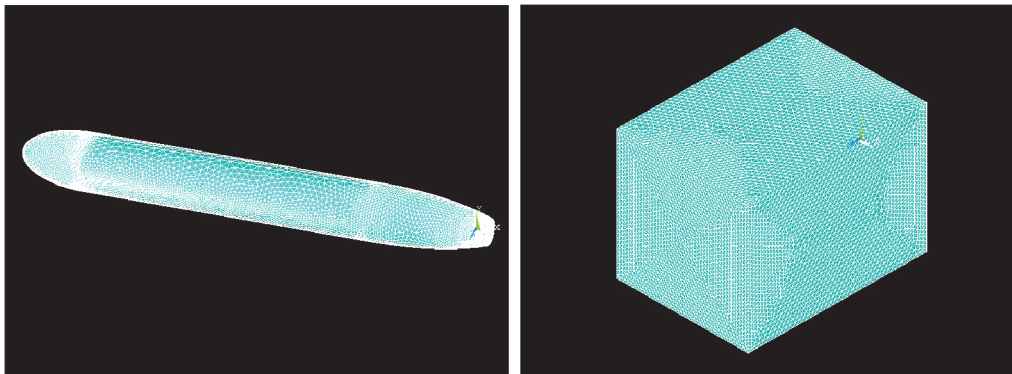


图 3 AUV 本体和流体区域计算网格

Fig. 3 The computational grid for the AUV body and the fluid region Division

### 2.2 AUV 各阶湿模态分析

为方便计算,在进行 AUV 湿模态分析时,假设 AUV 内部质量均匀分布,即认为 AUV 内部的传感器等结构的质量均匀的分布在 AUV 的内部空间。利用 ANSYS 中流

体声方法计算对 AUV 进行湿模态分析后得到 AUV 各阶的频率如表 1 所示。

表 1 AUV 各阶振动频率

Table 1 Vibration frequency of each order of AUV

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	$0.22 \times 10^{-4}$	6	$0.76 \times 10^{-4}$
2	$0.20 \times 10^{-4}$	7	123.86
3	$0.46 \times 10^{-4}$	8	123.88
4	$0.55 \times 10^{-4}$	9	250.98
5	$0.62 \times 10^{-4}$	10	289.03

通过计算可知 AUV 前六阶模态时自身结构并未发生变形, AUV 自身类似于刚体发生的主要是各方向的平动及绕各轴的转动, 因此, 其前六阶频率也较低。从第 7 阶模态开始, AUV 自身结构开始发生变形, AUV 不再表现为刚体, 振动频率也发生突变。实际应用中我们关注的主要是第 7 阶及以后的模态, 因为 AUV 一旦发生共振将严重影响 AUV 的可靠性及所搭载传感器的测量精度。

### 2.3 深度对 AUV 湿模态的影响

AUV 在执行任务时, 会根据需要由水面下潜到不同的深度或高度(距海底)进行勘察作业, 随着 AUV 下潜深度的增大, 流体作用在 AUV 表面的压强也会随着增大, 流体作用在 AUV 表面上的压强会对 AUV 的形变产生影响, 从而 AUV 各阶的振型及共振频率也会随之发生改变。本文研究 AUV 由水面下潜到 1 500 m 水深处时 AUV 共振频率的变化情况, 计算时深度的增加主要体现为 AUV 所受压力的增大。由计算结果(图 4)可知, AUV 的各阶共振频率随 AUV 深度的增加而成减小的趋势。AUV 下潜到 1 500 m 时, 其第 7 阶固有频率约下降了 5%, 第 8 阶和第 9 阶固有频率分别约下降了 12% 和 14%。

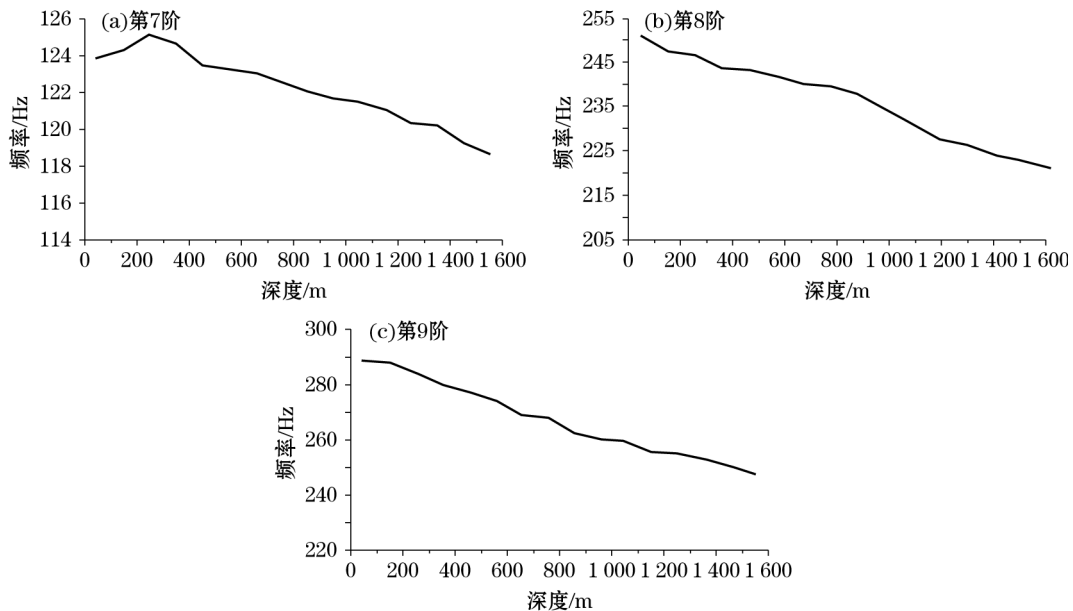


图 4 AUV 固有频率随深度的变化

Fig. 4 The Change of the natural frequency of AUV with the water depth

在 AUV 实际应用中为避免 AUV 发生共振,一般应保证 AUV 所受到的各种外界激励的频率远低于 AUV 的第 7 阶固有频率。由计算结果可以看出,为保证 AUV 运行的可靠性,应以 AUV 处于最大设计深度时的第 7 阶固有频率为准,研究外界激励对 AUV 航行稳定性的影响。

### 3 湿模态计算在 AUV 设计中的应用

#### 3.1 AUV 航行时的干扰源

AUV 在航行过程中会受到各种外界干扰的激励。自然存在的干扰例如:海洋中的波浪、小尺度的湍流、洋流及海水对流、浮力频率等。AUV 自身机械结构工作产生的干扰,如:螺旋桨的转动、舵机的动作等。AUV 的附属结构引起的涡脱落造成的干扰,如:流体流经 AUV 背上的天线、声通讯等结构时的涡脱落。

其中,自然界自身存在的干扰频率一般都较低,一般都远低于 100 Hz,因此认为其不会引起 AUV 结构的振动,在此忽略自然界固有的激励对 AUV 结构的影响。

#### 3.2 AUV 上机械结构的设计

AUV 上设有应急抛载装置、抛缆机构、螺旋桨和舵机机构,这些机械结构动作时都会对 AUV 产生激励,为保证 AUV 的可靠性,在设计时应使这些激励的频率远低于 AUV 的固有频率。

在 AUV 航行过程中动作最频繁的为螺旋桨,螺旋桨由电机直接驱动,最大转速为 700 r/min,相应的频率为 11.67 Hz,远低于 AUV 的共振频率,主推系统满足使用要求。

AUV 在航行过程中的转向及航向保持,由转向舵机完成,转向电机的转速为 1000 r/min,相应的频率为 16.67 Hz,因不会激起 AUV 系统的共振,转向舵机系统满足使用要求。

AUV 航行过程中的下潜、上浮及定深或定高航行的保持由 AUV 的俯仰舵机系统完成,俯仰电机的转速为 2 400 r/min,相应的频率为 40 Hz,与 AUV 的共振频率相距较远,不会引起 AUV 的共振,俯仰舵机系统满足使用要求。

AUV 上安装的应急抛载装置通过电机转动释放重物,抛载电机为国外进口模块化产品,由于其电机转速较低(小于 1 000 r/min),且抛载装置很少启动,因此不考虑其动作时对 AUV 航行稳定性的影响。

AUV 抛缆装置通过抛缆电机推动杠杆来释放抛缆浮子,抛缆电机的转速为 1000 r/min,转换频率为 16.67 Hz,此频率远低于 AUV 自身结构的固有频率,抛缆装置满足使用要求。

#### 3.3 AUV 附属结构尺寸的选取

AUV 脊背上树立声通讯换能器及无线、GPS、北斗、铱星等天线以保证 AUV 的正常通讯与定位功能,尾部一般装有尾翼与舵等结构。这些结构附加于 AUV 主体上破坏了 AUV 周围的流场,当流体流经这些结构中的钝体部分时会发生分离产生涡脱落,这将造成流体压力的波动,从而引起 AUV 附加结构物的振动,对 AUV 来说这相当于一定频率的外部激励。因此,在确定 AUV 附属结构物的尺寸时,应使流体绕经结构物时的涡脱频率远离 AUV 的共振频率。我们主要讨论流体流经圆柱体、平板等常见 AUV 附属结构

时涡脱落对 AUV 本体振动的影响。

#### 1) 钝体为圆柱体

在流体流经 AUV 附属结构的雷诺数范围内( $2 \times 10^4 < Re < 2 \times 10^5$ ), 可认为斯特罗哈数  $S$  近似为一常数,  $S=0.21$ 。因此, 当 AUV 附加结构的特征尺寸位于  $10 \sim 100$  mm 范围内时, 当 AUV 航行速度为  $2$  m/s 时, 其对应的涡脱频率为  $4.2 \sim 42.0$  Hz。此频率明显低于 AUV 自身结构的固有频率, 因此, 当搭载所需附加结构时, AUV 可正常工作。

#### 2) 钝体为薄板

由于 AUV 操纵性及稳定性的需要目前广泛采用平板来作为舵或者尾翼的结构。因此, 当流体流经尾翼等薄板结构时会发生分离, 产生涡脱落, 对 AUV 产生激励作用, 当此频率接近 AUV 本身结构的固有频率时, 便可能引起 AUV 的共振。

设计的 AUV 采用矢量推进系统, 因此没有舵。但为保证 AUV 航行时的稳定性, AUV 加有薄板型尾翼, 研究发现薄板结构的斯特罗哈数  $S < 0.2$ 。AUV 设计时所采用的尾翼厚度约为  $8$  mm, 流体流经 AUV 尾翼时, 产生的流体力频率小于  $50$  Hz, 可见, 此频率距 AUV 的固有频率较远, 不会引起 AUV 的共振, 因此 AUV 尾翼的尺寸符合使用要求。

## 4 总语

通过对确定外形的 AUV 系统进行湿模态分析, 研究了 AUV 在工作过程中各阶频率的响应情况, 为避免 AUV 发生共振, 应保证 AUV 所受到的各种外界激励的频率远低于 AUV 的第 7 阶固有频率, 基于此, 我们对 AUV 航行时的干扰源、AUV 搭载的机械结构以及 AUV 附属结构的对于 AUV 本体的产生的激励频率进行了计算。计算结果显示, 低于 AUV 本体的固有频率, 不会对 AUV 的稳定性产生影响, 实现了 AUV 本体振动不会影响各传感器的正常工作设计。研制的 AUV 样机在我国海域进行了试产应用, 取得了良好的效果, 验证了文章仿真结果的正确性。

### 参考文献:

- [1] ZHANG H W, HAO L, WANG Y H, et al. The general design of a seafloor surveying AUV system[R]. USA: MTS/IEEE Oceans, 2013.
- [2] ZHANG H W, HAO L. Structure and hydrodynamics optimizations of landing autonomois underwater vehicle[J]. Advanced Materials Research, 2013(694-697):1641-1645.
- [3] WANG Y, SHAO S, WANG S. Navigation system design of a deep-sea AUV analysis of TUCOS-Is navigation system determines AUV parameters[J]. Sea Technology, 2013, 54(8):57-61.
- [4] 邢景棠, 周盛, 崔尔杰. 流固耦合力学概述[J]. 力学进展, 1997, 27(1):19-38.
- [5] 宋学官, 蔡林, 张华. Ansys 流固耦合分析与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.



---

## Wet Modal Analysis of Deepwater AUV System

DUAN Bao-sheng

(*Geophysical-China Oilfield Services Limited*, Tianjin 300451, China)

**Abstract:** From a new angle of the wet modal analysis of AUV (Autonomous Underwater Vehicle), the characteristics of externally excited frequencies that the AUV which was developed by the major national science and technology projects is possibly subjected to are studied by means of the commercial software ANSYS. To avoid the resonance of AUV, the externally excited frequencies that the AUV is subjected to should be much lower than its seventh order natural frequency. Based on this, the excitation frequencies on the AUV body, which are produced by the interference sources occurring during the navigation of the AUV, the mechanical structures carried by the AUV and the accessory structures of the AUV, are calculated. The calculated frequencies are all lower than the natural frequency of the AUV body, indicating that the stability of the AUV can not be impacted on.

**Key words:** Autonomous Underwater Vehicle; wet mode analysis; ANSYS; simulation calculation