

环境适应性设计与分析

水下载荷对垂直发射潜航器结构影响仿真研究

李玉杰, 刘文一

(中国人民解放军 91550 部队 41 分队, 辽宁 大连 116023)

摘要: **目的** 研究水下载荷对垂直发射潜航器结构的影响。**方法** 采用流体分析软件计算潜航器周围的压力场分布, 利用有限元分析软件建立水下潜航器有限元模型, 将计算得到的压力场加载到潜航器有限元模型后, 仿真计算潜航器在水中向上运动不同时刻的应力和变形。**结果** 随着潜航器的上升, 水对弹的轴压影响逐渐减小, 潜航器的弯矩和剪切力越来越大。随着潜航器向上运动, 其加速度和速度变小, 水对潜航器的压力载荷也变小。潜航器发射后, 尾部虽然已经不承担发射载荷, 但是随着这个载荷的消失, 头部的变形逐渐减小。**结论** 由于存在攻角, 潜航器在铅垂和水平方向亦有力的分量, 从而使潜航器受到的水下载荷更为复杂。

关键词: 水下载荷; 垂直发射; 结构; 应力; 变形

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.07.001

中图分类号: TJ768.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)07-0001-05

Numerical Simulation on Influences of Underwater Load on Structure of Underwater Vertical Launching Vehicle

LI Yu-jie, LIU Wen-yi

(Unit 41 of PLA 91550, Dalian 116023, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the effects of underwater loading over the structure of underwater vertical launching vehicle. The pressure field around the underwater vehicle was calculated with fluid analysis software; and the finite element model was built with software of finite element analysis; the pressure field was loaded into the finite element model; the stress and the deformation of the underwater vehicle in different time of upward motion in the water was simulated and calculated. During the upward motion of the underwater vehicle, the effect of water on the axial pressure of spring was reduced; the bending moment and shear force of it increased. The acceleration and velocity was reduced. The pressure loading of water on the underwater vehicle was reduced. After the vehicle was launched, there was launching loading at the tail, and the deformation of loading also disappeared accordingly. Because of attack angle, the underwater vehicle has both horizontal and vertical loading, so the underwater loading of vertical underwater is more complex.

KEY WORDS: underwater loading; vertical launching; structure; strains and stresses; displacement

采用垂直方式在水下发射潜航器时, 由于潜航器的运动方向与横向水流的运动方向存在夹角, 使潜航器受到横向来流的作用。一方面横向流在潜航器的横

截面上产生了剪力和弯矩, 直接影响到潜航器的结构强度; 另一方面横向流使潜航器的姿态发生变化。潜航器水下垂直发射过程中, 其各个关键截面的载荷时

收稿日期: 2020-03-13; 修订日期: 2020-04-16

Received: 2020-03-13; Revised: 2020-04-16

作者简介: 李玉杰(1991—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为武器试验与鉴定。

Biography: LI Yu-jie (1991—), Male, Master, Assistant engineer, Research focus: weapon test and appraisal.

刻发生变化,若某个截面的结构强度较弱,则潜航器结构有可能因结构被破坏而造成发射失败,因此有必要研究水下载荷对垂直发射潜航器结构强度的影响。

1 压力场计算

1.1 计算域

用截面法来计算,先在 Gambit 软件中建立计算模型, Gambit 是面向 CFD 分析的高质量前处理器,其主要功能包括几何建模和网格生成。计算域宽 20 m,长 100 m,如图 1 所示。

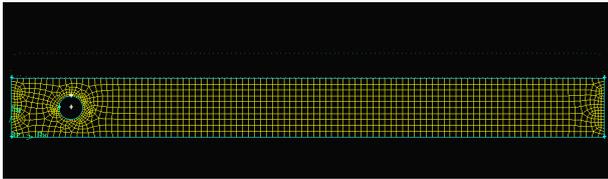


图 1 计算域网格

Fig.1 Computational domain grid

潜航器在水中垂直发射,可以看作是圆柱绕流问题。根据模型的特性,选择 Fluent 软件作为求解器。Fluent 是基于非结构化网格的通用 CFD 求解器,针对非结构性网格模型设计,是用有限元法求解不可压缩流及中度可压缩流流场问题的 CFD 软件。

将计算模型导入流体计算软件 Fluent 中计算,计算中应用了 Karama 漩涡模型,流动为定常流动。

1.2 边界条件

计算中圆柱截面的边界条件可根据潜航器在水中不同时刻受到水动力的大小来取值,计算中设定流动为定常流动,即:计算域中入口条件为 VELOCITY_INLET,出口条件为 OUTFLOW。计算中取水深 3H,潜航器水平运动速度为 6 km/h。

1.3 流体计算结果

计算得到了发射后 3H 深度时,潜航器周围流体的速度和压力分布,如图 2 所示。

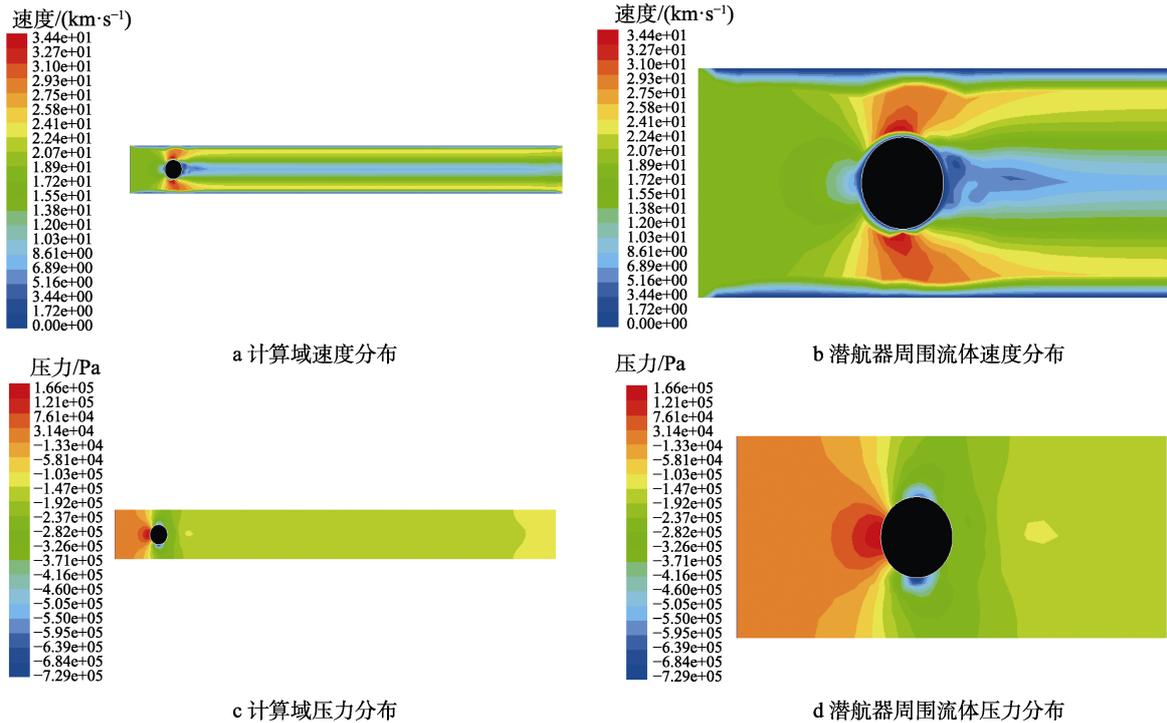


图 2 速度和压力分布

Fig.2 Velocity and pressure distribution: a) velocity distribution in computational domain; b) velocity distribution of fluid around the underwater vehicle; c) pressure distribution in calculation domain; d) distribution of fluid pressure around the underwater vehicle

从图 2a、b 可以看出,由于潜航器存在横向运动,从而造成航行器两侧流体速度最快,受 Karama 漩涡影响,潜航器背水面速度最低。同样,从图 2c、d 可以看出,航行器迎水面比背水面压力高,两侧压力较小。相同于 3H 深度的计算,分别计算在 2H 和 H 深度潜航器周围的流体分布情况,并将计算结果作为横向载荷边界条件导入 MSC. Nastran 有限元分析软件,

进行载荷计算。

MSC. Nastran 是世界 CAE 工业标准及最流行的大型通用结构有限元分析软件, MSC. Nastran 的分析功能覆盖了绝大多数工程应用领域,并为用户提供了方便的模块化功能项。其主要功能模块有:基本分析模块、动力学分析模块、热传导模块、非线性分析模块、设计灵敏度分析及优化模块、超单元分析模块、

气动弹性分析模块、DMAP 用户开发工具模块及高级对称分析模块。

2 载荷计算

2.1 计算模型

在前处理软件里建立了航行器的实体模型, 采用 IsoMesh 网格划分器划分了网格, 采用 Quad 型网格, 这样划分的目的是为了设置网格大小, 并控制疏密度。共划分 772 个单元, 1429 个节点。潜航器的实体模型和有限元网格模型如图 3 所示。

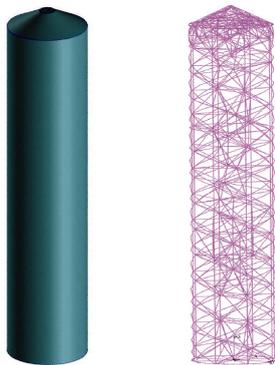


图 3 潜航器几何模型及有限元模型

Fig.3 Geometric model and finite element model of the underwater vehicle

2.2 计算方法

潜航器在水中运动时, 不受任何约束, 可视为 6 自由度自由。此时对它施加边界条件不能用 Displacement 约束, 而应该用到 Nastran 的高级功能: Inertia Relief, 即惯性释放。

有两种方法可以实现惯性释放: 第一种是在数据段中写入“PARAM, INREL, -1”语句, 并对 SUPORT 卡片进行修改; 第二种方法是使用自动惯性释放, 在数据段中写入“PARAM, INREL, -2”, 不写 SUPORT 卡片, MSC.NASTRAN 自动选择 SUPORT 约束的自由度。文中采用第二种方法。

在选取 Load/BCs 后, 分析 Deck 文件, 生成 Nastran 的输入文件: *.bdf, 手动提取*.bdf 文件后, 在文件中填入控制语句。

2.3 边界条件

潜航器顶部边界条件: 海水压力, 随水深变化而变化; 潜航器底部边界条件: 底部燃气压力, 距离海平面越近, 燃气压力越小; 横向边界条件: 给定深度, 流体分析软件计算得到的潜航器周围的压力场分布。

3 结果及分析

计算潜航器发射后距离海平面 $3H$ 、 $2H$ 、 H 三个

深度潜航器在外压载荷下的变形、应变和应力以及 H 时刻的弯矩。

3.1 变形量

仿真计算得到了潜航器在水深 $3H$ 、 $2H$ 、 H 深度的变形云图, 如图 4 所示。由图 4 对比可以看出, 随着潜航器距离海平面越来越远, 潜航器的最大变形量逐渐减小。 $3H$ 、 $2H$ 、 H 深度潜航器的最大变形量分别为 5.12×10^{-5} 、 4.88×10^{-5} 、 1.6×10^{-5} m。出现最大变形量的位置也发生了较大变化, $3H$ 深度时潜航器头部部位被压至潜航器内部, 最大变形位置亦出现在该处; $2H$ 深度时头部也被挤压, 但没有 $3H$ 深度时严重, 最大变形位置亦出现在该处; H 时刻头部也被挤压, 但远远没有 $3H$ 深度和 $2H$ 深度时严重。

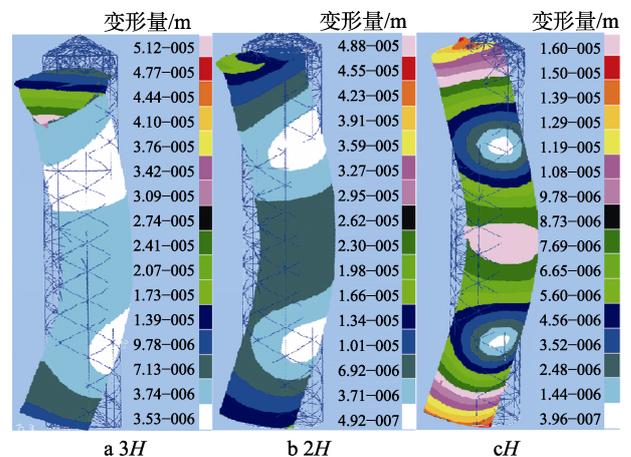


图 4 不同深度潜航器的变形量

Fig.4 Deformation of underwater vehicle at different depths

出现以上现象的原因为: 随着潜航器在水中的深度变小, 加速度和速度变小, 水对潜航器的压力载荷也变小, 这是造成潜航器变形变小的原因之一; 潜航器发射后, 潜航器尾部虽然已经不受潜航器弹射燃气和水蒸气的压力载荷, 但是随着这个载荷的消失, 潜航器要释放潜航器射燃气和水蒸气挤压的压缩能, 能量的释放不是瞬态的, 因此随着时间的推移, 头部的变形逐渐减小。

3.2 应力与应变

仿真计算得到了潜航器在水深 $3H$ 、 $2H$ 和 H 深度的应力和应变, 如图 5 和图 6 所示。

由图 5 可以看出, 潜航器的最大应变均出现在头部。随着时间推移, 潜航器的应变逐渐减小。其原因是水对潜航器的压力载荷减小, 导致潜航器弹射压力消失。 H 深度时, 在潜航器的中间位置出现了较大应变, 如图 5c 所示。结合图 4 来看, 潜航器的弯曲变形程度随着潜航器的上升而变大, 潜航器受到的弯矩亦变大。出现这样的现象是由于潜航器在水中并非垂直于水平面飞行, 而是与水平面有一定夹角。这样, 潜航器在垂直和平行与水平面的方向上有加速度分

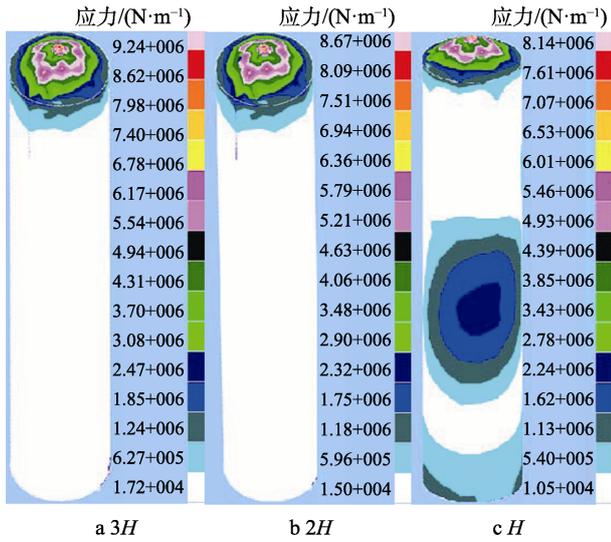


图5 不同深度潜航器应力分布
Fig.5 Stress distribution of underwater vehicle at different depths

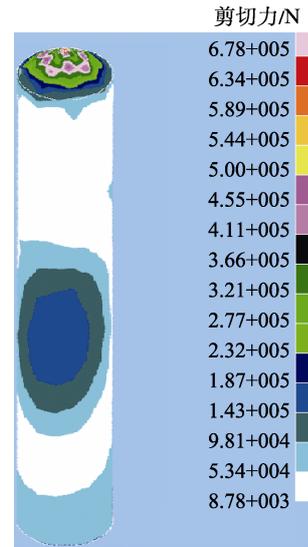


图7 H深度潜航器剪切力分布
Fig.7 Shear force distribution of underwater vehicle at H depth

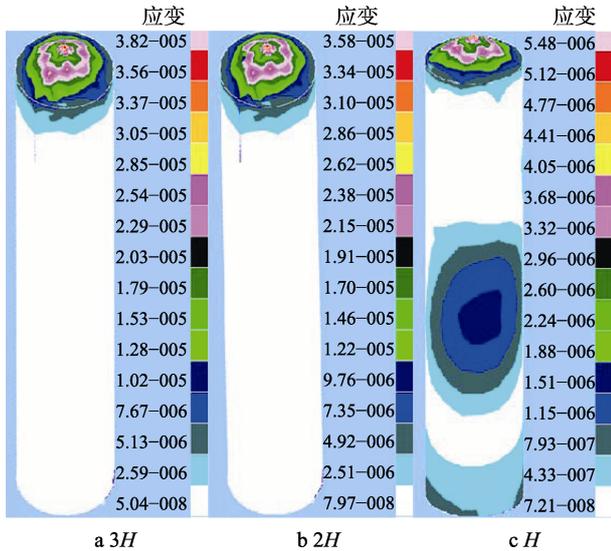


图6 不同深度潜航器应变云图
Fig.6 Strain nephogram of underwater vehicle at different depths

量，亦为有力的分量。随着时间的推移，这个力逐渐积累，从而造成在 H 深度时，潜航器受到弯矩最大，在潜航器的中间位置出现了较大应变。

由图6可以看出，随着潜航器上升，其受到的应力逐渐减小，并且与其对应深度的应变具有一致性。这也是水对潜航器的压力载荷减小，潜航器弹射压力消失的结果。潜航器在 H 深度时，潜航器的中间位置出现了应力集中现象。从理论力学的角度分析，弯矩最大的地方也是应力集中的地方，从而验证了计算结果与经典理论具有良好的一致性。

由于 H 深度时潜航器的中间位置出现了应力集中现象，因此有必要对这个时刻受到的剪切力进行计算。图7为计算得到的 H 深度时潜航器剪切力的计算结果，潜航器所受的最大剪切力为 6.78×10^5 N，位

置出现在头部，中间部位的剪切力为 1.43×10^5 N。

4 结论

通过对潜航器发射后距水面 $3H$ 、 $2H$ 和 H 时周围流场压力和所承载荷的计算，得出这些时刻下潜航器的变形、应变、应力以及深度 H 时的弯矩，得到以下结论。

1) 深度为 $3H$ 、 $2H$ 和 H 时，潜航器的最大变形量分别为 5.12×10^{-5} 、 4.88×10^{-5} 、 1.6×10^{-5} m。出现最大变形量的位置发生了较大变化，深度 $3H$ 时，头部被压至潜航器内部，最大变形位置亦出现在被压缩的最深处；深度 $2H$ 时头部也被挤压，但没有 $3H$ 深度时严重，最大变形位置亦出现在被压缩的最深处；深度 H 时头部也被挤压，但远远没有上两个计算时刻严重。

2) 随着潜航器向上运动，其加速度和速度变小，水对潜航器的压力载荷也变小，这是造成潜航器变形逐渐变小的原因之一。

3) 潜航器发射后，尾部虽然已经不受潜航器射燃气和水蒸气的压力载荷，但是随着这个载荷的消失，潜航器要释放潜航器射燃气和水蒸气挤压的压缩能，能量的释放不是瞬态的，因此随着时间的推移，头部的变形逐渐减小。

4) 在 H 深度时，潜航器的中间部位出现了较大应变，对比深度 $3H$ 、 $2H$ 和 H 的变形云图，潜航器的弯曲程度随着潜航器的上升而变大。在弯矩、剪切力和沿潜航器轴压力载荷的作用下，潜航器的中间部位出现了应力集中现象，并且受到了较大的剪切力。在这些外力的共同作用下，潜航器的中间受到的载荷最大，假如这个部位的材料强度较弱，并

且结构设计有缺陷的话, 潜航器有可能在这个部位被破坏。

参考文献:

- [1] 马爱军, 周传月, 王旭. PATRAN 和 NASTRAN 有限元分析专业教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
MA Ai-jun, ZHOU Chuan-yue, WANG Xu. Professional Course of PATRAN and NASTRAN Finite Element Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [2] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
LIU Hong-wen. Mechanics of Materials[M]. Beijing: Higher Education Press, 1996.
- [3] 张永昌. MSC. NASTRAN 有限元分析理论基础与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
ZHANG Yong-chang. Theoretical Basis and Application of MSC. NASTRAN Finite Element Analysis[M]. Beijing: Science Press, 2004.
- [4] 杨剑, 张璞, 陈火红. 新编 MD NASTRAN 有限元实例教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
YANG Jian, ZHANG Pu, CHEN Huo-hong. A New Example Course of MD NASTRAN Finite Element[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [5] 刘兵山, 黄聪. PATRAN 从入门到精通[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
LIU Bing-shan, HUANG Cong. Patran: from Introduction to Mastery[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2003.
- [6] 冯国庆, 任慧龙. 无需约束的结构准静态有限元分析方法[C]// MSC.SOFTWARE 中国用户论文集. 2004.
FENG Guo-qing, REN hui-long. Quasi-static FEA for Structures without any Boundary Constraint[C]// MSC. SOFTWARE Chinese User Papers. 2004.
- [7] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
ZHU Bo-fang. Principle and Application of Finite Element Method[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2004.
- [8] 余旭东. 潜航器现代结构设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
YU Xu-dong. Modern Structure Design of Submarine[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.
- [9] 刘文一, 李玉龙, 吴训涛. 基于分布水动力压力的飞行器水下载荷计算方法研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2019, 336(1): 20-23.
LIU Wen-yi, LI Yu-long, WU Xun-tao. Research on Calculation method of Underwater Load of Aircraft Based on Distributed Hydrodynamic Pressure[J]. Missiles and Space Vehicles, 2019, 336(1): 20-23.
- [10] 焦冀光, 杨春, 刘文一, 等. 潜艇发射筒保护盖力学性能分析[J]. 装备环境工程, 2017, 14(4): 87-90.
JIAO Ji-guang, YANG Chun, LIU Wen-yi, et al. Mechanical Property of Submarine Launch Canister Protection Cover[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(4): 87-90.
- [11] 巩明, 王汉平, 杨鸣, 等. 模拟弹水下垂直发射载荷分析[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(5): 41-44.
GONG Ming, WANG Han-ping, YANG Ming, et al. Numerical Analysis on Loading over the Emulating Vertical Missile Launching from Submarine[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2015, 35(5): 41-44.
- [12] 燕国军, 阎君, 权晓波, 等. 水下航行体垂直发射尾部流场数值计算[J]. 导弹与航天运载技术, 2012(3): 42-46.
YAN Guo-jun, YAN Jun, QUAN Xiao-bo, et al. Numerical Study on Tail Flow Field of Underwater Vehicle in Vertical Launching [J]. Missiles and Space Vehicles, 2012(3): 42-46.
- [13] 蓝仁恩, 张志勇, 于殿君, 等. 导弹水下垂直发射过程数值仿真分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2013(5): 51-53.
LAN Ren-en, ZHANG Zhi-yong, YU Dian-jun, et al. Simulation and Analysis of Launching Process in Missile Underwater Vertical Launching Process[J]. Missiles and Space Vehicles, 2013(5): 51-53.
- [14] 侯金瑛, 谭大成, 毕世华, 等. 同心筒发射潜载导弹过程数值研究[J]. 固体火箭技术, 2011, 34(1): 9-13.
HOU Jin-ying, TAN Da-cheng, BI Shi-hua, et al. Numerical Research on the Process of Launching Submarine Missile by Concentric Canister Launcher[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2011, 34(1): 9-13.