基于Modelica语言的AUV浮力调节系统

建模与仿真

王文双1

1中国船舶科学研究中心 实船试验与船型研究部，上海 200011

摘要：本文针对AUV在水下工作时需保持在固定深度的工作需求，为验证AUV通过压载系统进行水下定深保持的效果和能力，基于多领域统一物理系统建模语言——Modelica构建运动模块、压载模块和控制模块，采用PID控制变量泵的输入和输出。利用Modelica基础组件和自定义的组件搭建AUV浮力调节系统模型，经过仿真分析表明：AUV的下潜和定深过程符合实际，在下潜后的第81s左右能够稳定保持在固定深度，证明了本系统仿真方案的可行性，为后续水下潜器的设计和优化提供有效参考。

关键词：AUV；Modelica；浮力调节；系统仿真

# **0引言**

自主水下航行器（autonomous underwater vehicle，AUV）作为一种新型水下无人平台，近年来在海洋资源开发、科学研究、军事应用及应急救援等领域展现出了巨大的潜力和价值。由于其具有良好的自主性、隐蔽性、环境适应性以及高效费比等特点，能够在复杂的水下环境中执行多种任务，如地形测量、资源勘探、环境监测和情报侦察等，当前已经成为了国内外的研究热点[1]。随着计算机技术、人工智能技术和传感器技术的不断发展，AUV的性能将不断提升，应用领域也将不断拓展。目前的AUV多采用多推进器或推进器与舵联合操纵的方式实现定深，这种方式需要推进器持续运转，耗能较大，这对于内部空间极为重要的AUV来说，难以达到长时水下作业的功能。

浮力调节系统可通过调节AUV的重力和浮力大小，实现深度控制。按照浮力调节的动力来源划分，可分为主动浮力调节和被动浮力调节[2]，其中主动浮力调节是指利用AUV自身携带的能源来进行浮力的调整，如压载水、压缩空气等；被动浮力调节是利用外界环境的能量进行浮力的调整，所以耗能较少，这种方式主要用于变深过程中的浮力补偿，由于在设计时需要明确试验水域不同深度的水文信息，因此难以获得广泛的应用。本文主要针对主动浮力调节开展研究。

通过压载水的排注水来调整AUV的重力大小和重心位置是实现浮态调整的重要方式之一，一般通过液压泵和截止阀或换向阀实现进、排水的切换，具有结构简单、体积小、重量轻的优点。袁晓宇等[3]应用模糊控制算法对UUV定深进行了快速控制，兼顾了系统的快速性与稳定性。王洪斌等[4]提出一种基于粒子群优化的AUV定深跟踪有限时间控制算法，可有效提高垂直面欠驱动自治水下机器人的定深控制系统的响应速度。乔冰等[5]针对大深度潜航器水下空间运动问题，在搭建的仿真模型基础上，对潜航器在螺旋下潜、抛载过渡、定角爬升、稳定至水面航行状态下的水下运动过程进行了仿真和评估。

# **1 Modelica语言概述**

Modelica是一种面向对象、采用非因果建模与陈述式建模的多领域物理系统建模语言[6]，可应用于几乎所有工程领域。该语言可融合机、电、液、热、控等多领域的基础组件模型，通过微分代数方程描述组件之间的关系，无需对连接关系和求解序列进行解耦和推导[7]，这有助于提高组件的复用性和模型的灵活性。

Modelica语言应用面向对象的思想，支持采用分层机制、组件连接机制和继承机制构建模型，可简化模型结构的复杂程度。该语言可根据系统的真实物理拓扑结构进行建模，其组件视图具有与真实系统相似的结构层次与布局[8]。谢虎等[9]基于Modelica建模语言构建了航行器虚拟样机及其定深控制模型，以浮力调节的的响应时间和调节量为目标进行了优化；Beshbichi Omar[10]基于Modelica面向对象的特性提出了一种新的模拟浮式海上风机（FOWT）的全耦合动态响应的建模方法。王瑞等[11]利用Modelica语言针对PID控制的阀控缸系统进行了建模和仿真，结果与在AMESIM中建立的相同系统仿真下的结果基本一致。

采用Modelica语言建模仿真流程如图1所示，针对一个复杂问题首先需要对问题进行分析和分解，对得到的子模块进行建模，Modelica提供了大量基础组件库，如Fluid、Mechanics、Electrical等，但是对于特殊的子问题，需要根据实际需要有针对性地进行自定义构建特定模型，最后将所有子模型构建系统模型，并进行仿真计算。

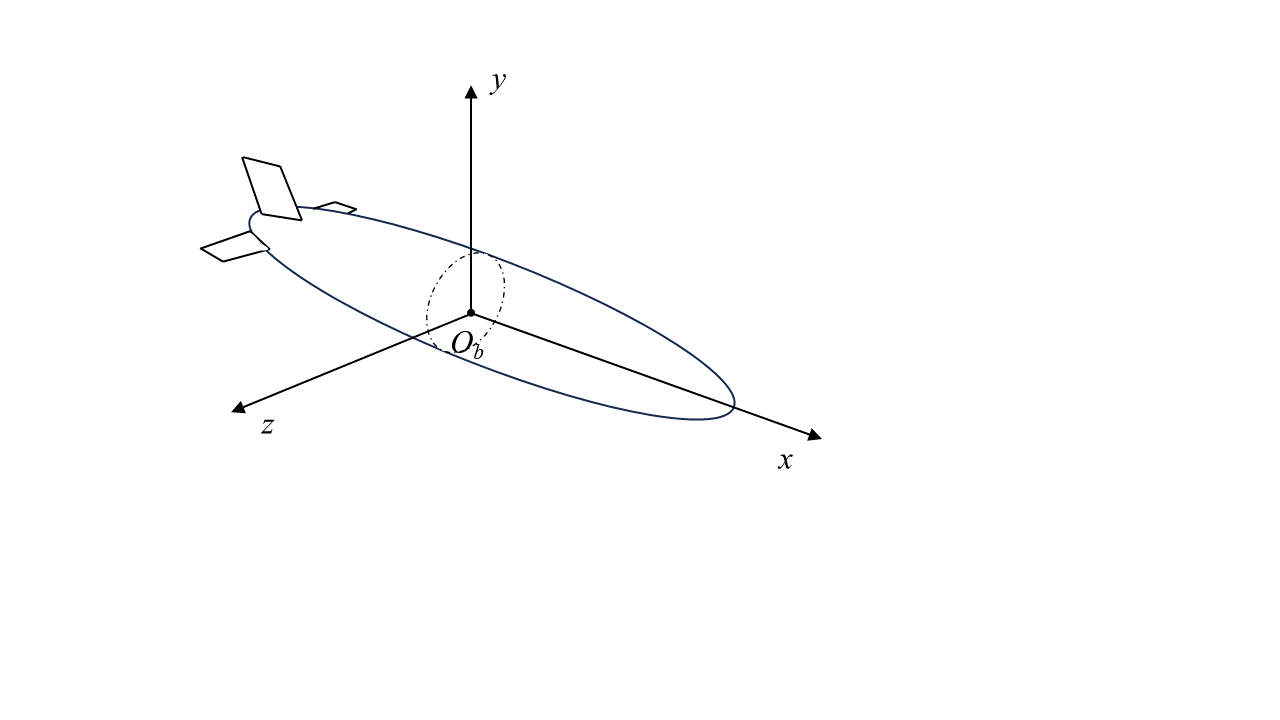
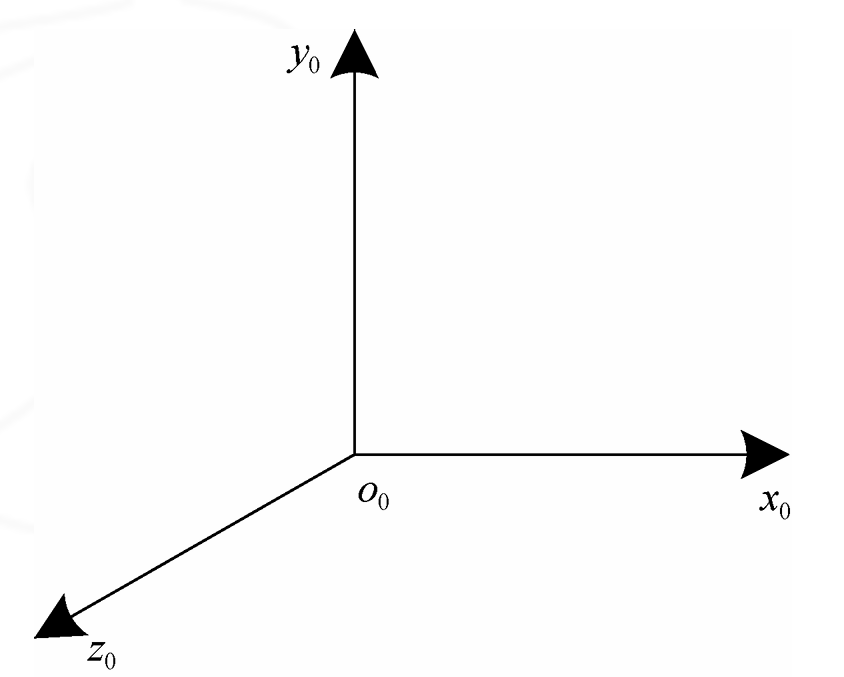


图1 Modelica建模仿真流程

# **2 AUV系统建模**

## 2.1 潜航器运动描述

建立潜航器的运动模型是进行仿真分析的基础，根据潜航器的空间运动特点，建立数学模型。本文采用大地坐标系和随体一起运动的体坐标系，如图2所示。体坐标系的原点选在潜航器的浮心处；*ox*轴沿潜航器纵向并指向前方；*oy* 轴与*ox*轴垂直并指向上方；*oz*轴垂直于*ox*和*oy*轴，从潜航器尾部向前看*oz*轴指向右侧。



a.大地坐标系 b.体系坐标系

图2 大地作坐标系和体坐标系

体坐标系相对与大地坐标系的姿态，利用3个姿态角进行描述，分别为俯仰角、偏航角、横滚角。从大地坐标系到体坐标系的转换矩阵为：



展开表达式有：



建立潜航器空间运动数学模型时，可视其为刚体，将流体动力和其他作用力作为外力。根据上述坐标系及转换矩阵推导出空间运动方程，由描述潜航器空间运动的航行轨迹方程和转动运动方程组成，具体数学模型描述为：





式中：为潜航器相对于大地坐标系的位置； 为潜航器浮心在体坐标系中相对于对各坐标轴的速度分量；为潜航器旋转角速度在体坐标系中相对各坐标轴的角速度分量。

## 2.2 液压泵模块

液压泵是系统中的动力原件，作用是将动力机械能转换成工作油液的压力能。对于变量泵，泵输出流量的微分方程为：



式中，为输出流量，为泵的转速，为泵的排量，为泵的总泄漏系数，为泵的高压腔压力。对于所有真实泵，总泄露包括内泄漏和外泄露，内泄漏是指从高压口向低压口的回流，也称反泄露，外泄漏是指从泵腔内透过活塞流入到泵外部的现象，两者均与泵腔内的压力有关。

## 2.3 控制模块

PID控制器能够将给定的输入值与系统的反馈值进行比较，然后将产生的偏差值进行比例、积分、微分三种控制结果进行线性组合，然后将输出结果输入到被控对象[12]。PID控制器通过比例、积分和微分环节共同作用来调整系统性能，控制原理如式（6）。



图3 典型PID控制原理图



式中，为控制量；为偏差；为比例增益；为积分时间常数；为微分时间常数。

PID控制器包括比例、积分、微分三个控制环节，比例环节：调整系统误差，提高系统响应速度，设定值要适当，过大的比例增益可能导致系统振荡，影响稳定性；积分环节：调整系统静差，提高系统控制精度，较大的积分时间常数能改善改善稳态性能但精度较低，较小的积分时间常数能够提高精度但增加调整时间，可能引起振荡。微分环节：引入超前修正信号以减少控制系统的超调量，增加稳定性。

Modelica基础模型库中通用的PID控制单元如图4所示。

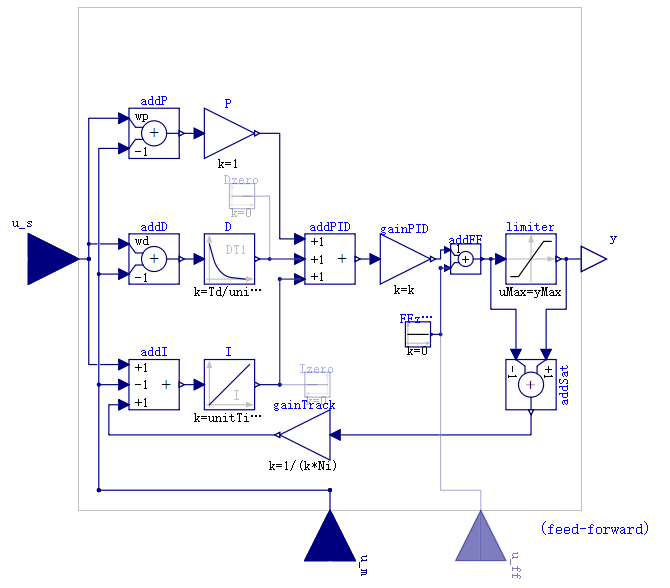


图4 PID单元模型

图中，“u\_s”表示输入的设定值， “u\_m”表示测量值。“P”、“I”、“D”分别表示比例、积分、微分三个控制模块，三者共同影响输出量的数值和变化，最终在“limiter”的最值限制下输出“y”。

# **3基于Modelica语言的仿真计算**

本文基于Modelica语言构建AUV浮力调节与控制模型，模拟AUV从水面启动后达到指定深度并定深保持的过程。本次仿真的相关参数设置如表1所示：

表 1 仿真参数设置表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 物理量 | 单位 | 数值 |
| 水下航行器自重*M* | kg | 830 |
| 水下航行器体积*V* | m3 | 1.13 |
| 压载水舱体积*Vb* | m3 | 0.35 |
| 水下航行器水下最大横截面积*S* | m2 | 1.45 |
| 水下保持深度*h* | m | 10 |
| 比例增益 | - | 10 |
| 积分时间常数 | - | 4 |
| 微分时间常数 | - | 3 |
| 压载泵最大转速*R* | rpm | 2000 |

首先建立基本的运动模型，按照表1的参数建立基本的运动模型，为测试模型的可行性与真实性，假定重力与浮力不变，为模型施加一个正弦变化的外力，得到的运动测试曲线如图5所示，曲线反映出的结果与理论趋势和数值接近。

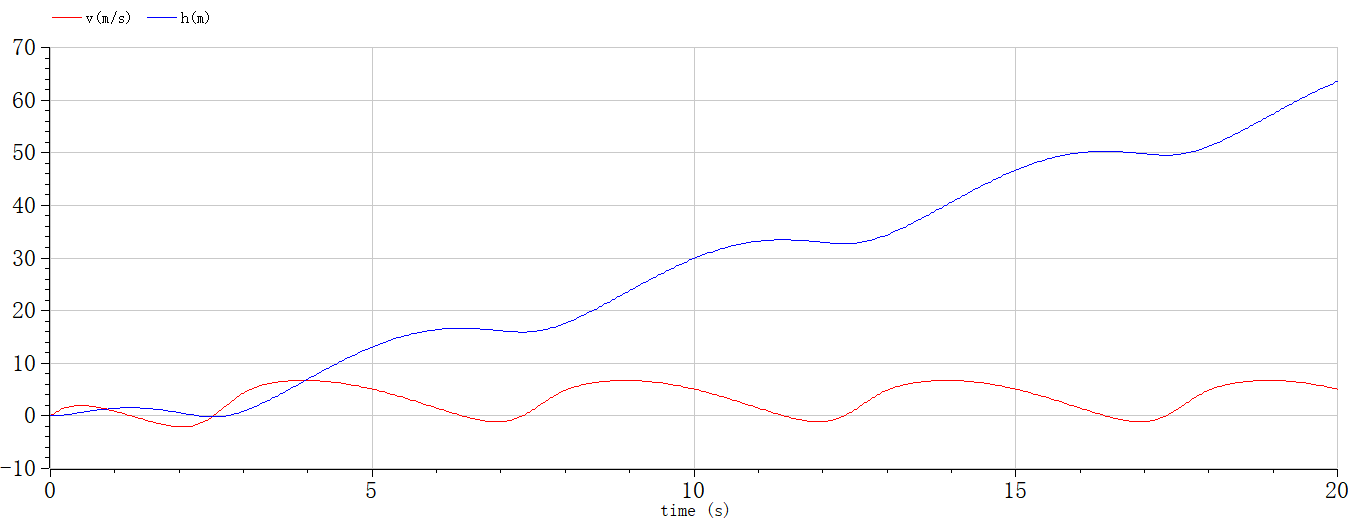


图5 测试模型运算结果

本文涉及的AUV舱内设置两个压载舱，压载舱为空舱时AUV能够在水面上保持正浮状态，开启作业后需下潜至指定深度。为实现其功能，通过压载水系统进行调节。下潜时通过压载泵将海水注入到压载舱内，完全潜入水下后通过PID控制压载泵的转速，实现压载水量的调节。

利用Modelica语言构建AUV的压载系统仿真模型如图6所示。

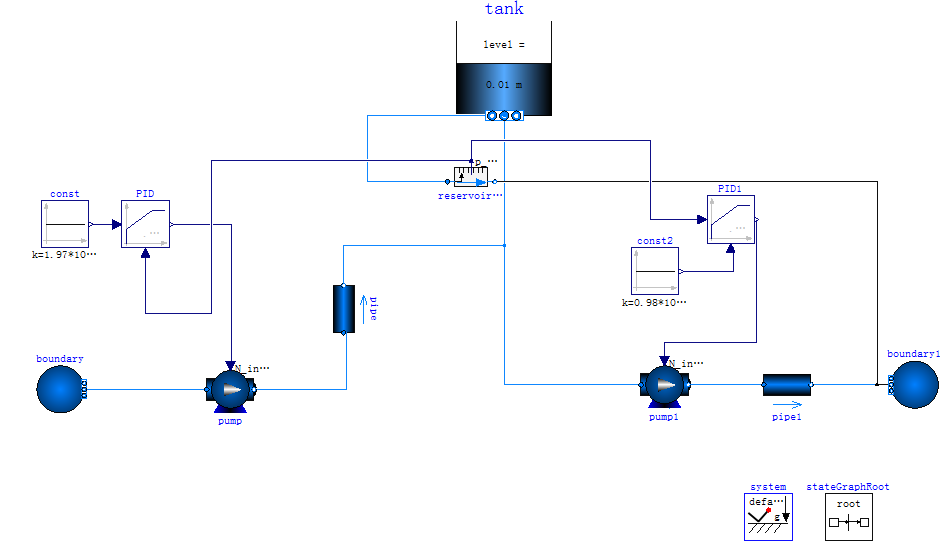


图6 基于Modelica构建的压载系统模型

设置仿真时间为200s，采用dassl求解器运算，仿真结果如图7所示。从图中可以看到，仿真开始后，AUV逐渐开始下潜，初始下潜速度较快，到达10m深度之后由于惯性作用会继续下潜，最大深度能够达到13.8m。为保持在10m的深度，压载水量会通过压载泵进行缓慢调节，AUV在水下10m深度处进行多次升沉运动，每次运动幅度逐渐减小，直到81s时达到维持在固定深度的状态。

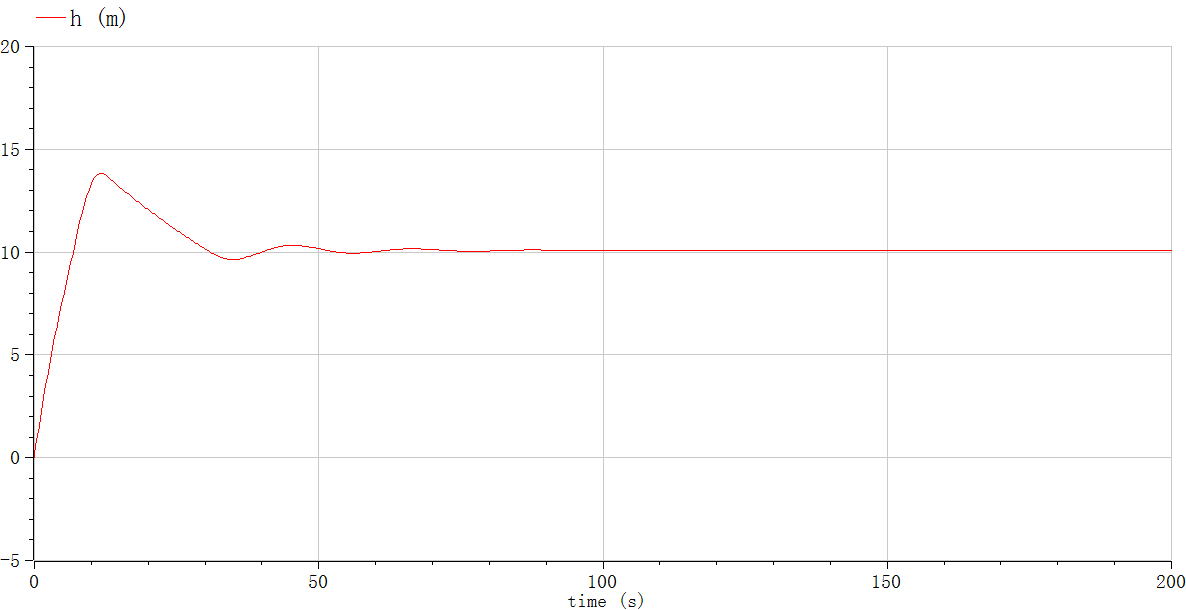


图7 深度h随时间变化情况

# **4结论**

本文针对某型AUV水面和水下作业的功能特点，对浮力调节系统进行建模与仿真。基于Modelica语言构建运动模块、压载模块和控制模块，利用Modelica模型库中的组件和自定义的组件搭建AUV浮力调节系统模型，以仿真模型为基础，通过仿真方法分析了AUV从水面到水下的运动及保持定深的全过程。仿真结果表明：利用本文设计的AUV浮力调节系统，通过仿真计算可以得到符合预期的下潜运动过程和定深保持状态，在下潜后的第81s时能够稳定保持在期望深度处。在仿真过程前期，压载泵的转速较高，但随着AUV的深度逐渐向着设定深度靠近，压载泵的调节量也会随之减少，直至停止运行，因此在整个过程中，并不会损耗较多能耗，相对于仅采用螺旋桨进行深度调节的方式，具有较高的控制精度和显著的节能效果。

通过对需要在水下定深作业的AUV进行建模与仿真，为设计人员在系统设计阶段提供了下潜方案和定深控制的有效验证手段，仿真结果能够为控制、压载等方面的设计提供参考，提前释放设计风险。

**参考文献**

1. 王得成.AUV浮力调节与安全抛载系统研究[D].哈尔滨工程大学,2015.
2. 李奔,黄哲敏,何斌,等.自主水下航行器变浮力系统研究现状及控制技术[J].中国舰船研究,2022,17(05):134-147.DOI:10.19693/j.issn.1673-3185.02856.
3. 袁晓宇,龚喜.模糊控制算法在UUV定深控制中的应用[J].水雷战与舰船防护,2012,20(03):76-79.
4. 王洪斌,苏博,王跃灵,等.基于粒子群优化的AUV定深跟踪有限时间控制[C]//第37届中国控制会议论文集（D）. 中国自动化学会控制理论专业委员会, 2018:6.
5. 乔冰,刘鑫,袁龙.大深度潜航器水下空间运动建模与仿真[J].数字海洋与水下攻防,2020,3(01):65-70.DOI:10.19838/j.issn.2096-5753.2020.01.012.
6. 赵建军,丁建完,周凡利,等.Modelica语言及其多领域统一建模与仿真机理[J].系统仿真学报,2006,(S2):570-573.
7. 胡锦涛,陈路,杨浩,等.基于Modelica的交流伺服控制系统建模与仿真[J].软件导刊,2024,23(01):8-13.
8. 韩枫,谢基榕.基于Modelica语言的ROV力学系统建模与仿真[J].船舶力学,2021,25(01):65-72.
9. 谢虎,吴维,董元发,等.UUV定深控制模型参数优化设计方法[J].数字海洋与水下攻防,2024,7(02):177-185.DOI:10.19838/j.issn.2096-5753.2024.02.006.
10. Omar B E ,Yihan X ,Chen M O . An object-oriented method for fully coupled analysis of floating offshore wind turbines through mapping of aerodynamic coefficients [J]. Marine Structures, 2021, 78
11. 王瑞,梁全.PID控制的阀控缸系统的Modelica建模与仿真实现[J].机械工程师,2024,(02):70-73.
12. 徐永坤.基于Modelica的潜液泵系统动态特性及能耗仿真分析[D].华中科技大学,2020.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2020.002741.

作者简介：王文双、男、1997年8月、工程师、主要从事船舶与海洋工程数字化与仿真分析。