

上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

BACHELOR'S THESIS



论文题目： 波浪场细长体入水过程数值模拟研究

学生姓名：	<u>解熹焱</u>
学生学号：	<u>0010900990</u>
专 业：	<u>工程力学</u>
指导教师：	<u>陈瑛</u>
学 院(系)：	<u>船舶海洋与建筑工程学院</u>

上海交通大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

上海交通大学

学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。

本学位论文属于 ☐ 公开论文

☐ 内部论文，☐ 1 年/☐ 2 年/☐ 3 年 解密后适用本授权书。

☐ 秘密论文，____ 年（不超过 10 年）解密后适用本授权书。

☐ 机密论文，____ 年（不超过 20 年）解密后适用本授权书。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：

指导教师签名：

日期： 年 月 日

日期： 年 月 日

波浪场细长体入水过程数值模拟研究

摘 要

中文摘要应该将学位论文的内容要点简短明了地表达出来，应该包含论文中的基本信息，体现科研工作的核心思想。摘要内容应涉及本项科研工作的目的和意义、研究方法、研究成果、结论及意义。注意突出学位论文中具有创新性的成果和新见解的部分。摘要中不宜使用公式、化学结构式、图表和非公知公用的符号和术语，不标注引用文献编号。硕士学位论文中文摘要字数为 500 字左右，博士学位论文中文摘要字数为 800 字左右。英文摘要内容应与中文摘要内容一致。

摘要页的下方注明本文的关键词（4~6 个）。

关键词： 上海交大，饮水思源，爱国荣校

A SAMPLE DOCUMENT FOR L^AT_EX-BASED SJTU THESIS TEMPLATE

ABSTRACT

Shanghai Jiao Tong University (SJTU) is a key university in China. SJTU was founded in 1896. It is one of the oldest universities in China. The University has nurtured large numbers of outstanding figures include JIANG Zemin, DING Guangen, QIAN Xuesen, Wu Wenjun, WANG An, etc.

SJTU has beautiful campuses, Bao Zhaolong Library, Various laboratories. It has been actively involved in international academic exchange programs. It is the center of CERNet in east China region, through computer networks, SJTU has faster and closer connection with the world.

Key words: SJTU, master thesis, XeTeX/LaTeX template

目 录

第一章 简介	1
1.1 二级标题	1
1.1.1 三级标题	1
1.2 脚注	1
1.3 字体	1
第二章 研究背景	3
第三章 超空泡入水问题的基本理论	4
3.1 多相流数学模型	4
3.2 入水空泡模型	4
3.2.1 自由面空气和气体空泡模型	4
3.2.2 空化模型	5
第四章 数值计算方法	6
4.1 几何模型和网格划分	6
4.2 边界条件	6
4.3 动量源项消波法	7
4.4 数值方法	7
4.5 界面捕捉的 VOF 方法	7
4.6 重叠网格技术	7
4.7 实验设计	8
第五章 结果与分析	10
5.1 稳定的波浪场结果	10
5.2 不同入水阶段的密度分布	11
第六章 数学与引用文献的标注	13
6.1 数学	13
6.1.1 数字和单位	13
6.1.2 数学符号和公式	13
6.1.3 定理环境	14
6.2 引用文献的标注	14
第七章 浮动体	16
7.1 插图	16
7.1.1 单个图形	16
7.1.2 多个图形	17
7.2 表格	18
7.2.1 基本表格	18
7.2.2 复杂表格	18
7.3 算法环境	20
7.4 代码环境	20
全文总结	22

参考文献	23
附录 A Maxwell Equations	25
附录 B 绘制流程图	26
致 谢	27
学术论文和科研成果目录	28
个人简历	29

插图索引

图 5-1 波浪场密度 (ρ) 图	10
图 5-2 波浪场压强 (p) 分布图	10
图 5-3 波浪场 x 方向速度 (u) 分布图	10
图 5-4 波浪场 y 方向速度 (v) 分布图	11
图 5-5 $t = 0s$ 时局部密度图	11
图 5-6 $t = 0.5s$ 时局部密度图	11
图 5-7 $t = 0.9s$ 时局部密度图	12
图 5-8 $t = 2.0s$ 时局部密度图	12
图 7-1 出现在插图索引中	16
图 7-2 中文题图	17
图 7-3 并排第一个图	17
图 7-4 并排第二个图	17
图 7-5 包含子图题的范例 (使用 subcaptionbox)	17
图 7-6 包含子图题的范例 (使用 subfigure)	18

表格索引

表 7-1 一个颇为标准的三线表	18
表 7-2 一个带有脚注的表格的例子	19
表 7-3 实验数据	19

算法索引

算法 7-1 算法示例.....	20
------------------	----



符号对照表

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数

μ 磁导率

ϵ 介电常数



第一章 简介

这是 SJTUTHESES 的示例文档，基本上覆盖了模板中所有格式的设置。建议大家在使用模板之前，除了阅读《SJTUTHESES 使用文档》，这个示例文档也最好能看一看。

1.1 二级标题

1.1.1 三级标题

(1) 四级标题

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

1.2 脚注

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. ^①

1.3 字体

上海交通大学是我国历史最悠久的高等学府之一，是教育部直属、教育部与上海市共建的全国重点大学，是国家“七五”、“八五”重点建设和“211工程”、“985工程”的首批建设高校。经过115年的不懈努力，上海交通大学已经成为一所“综合性、研究型、国际化”的国内一流、国际知名大学，并正在向世界一流大学稳步迈进。

十九世纪末，甲午战败，民族危难。中国近代著名实业家、教育家盛宣怀和一批有识之士秉持“自强首在储才，储才必先兴学”的信念，于1896年在上海创办了交通大学的前身——南洋公学。建校伊始，学校即坚持“求实学，务实业”的宗旨，以培养“第一等人才”为教育目标，精勤进取，笃行不倦，在二十世纪二三十年代已成为国内著名的高等学府，被誉为“东方MIT”。抗战时期，广大师生历尽艰难，移转租界，内迁重庆，坚持办学，不少学生投笔从戎，浴血沙场。解放前夕，广大师生积极投身民主革命，学校被誉为“民主堡垒”。

新中国成立初期，为配合国家经济建设的需要，学校调整出相当一部分优势专业、师资设备，支持国内兄弟院校的发展。五十年代中期，学校又响应国家建设大西北的号召，根据国务院决定，部分迁往西安，分为交通大学上海部分和西安部分。1959年3月两部分同时被列为全国重点大学，7月经国务院批准分别独立建制，交通大学上海部分启用“上海交通大学”校名。历经西迁、两地办学、独立办学等变迁，为构建新中国的高等教育体系，促进社会主义建设做出了重要贡献。六七十年代，学校先后归属国防科工委和六机部领导，积极投身国防人才培养和国防科研，为“两弹一星”和国防现代化做出了巨大贡献。

^① Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur.

改革开放以来，学校以“敢为天下先”的精神，大胆推进改革：率先组成教授代表团访问美国，率先实行校内管理体制改革，率先接受海外友人巨资捐赠等，有力地推动了学校的教学科研改革。1984年，邓小平同志亲切接见了学校领导和师生代表，对学校的各项改革给予了充分肯定。在国家和上海市的大力支持下，学校以“上水平、创一流”为目标，以学科建设为龙头，先后恢复和兴建了理科、管理学科、生命学科、法学和人文学科等。1999年，上海农学院并入；2005年，与上海第二医科大学强强合并。至此，学校完成了综合性大学的学科布局。近年来，通过国家“985工程”和“211工程”的建设，学校高层次人才日渐汇聚，科研实力快速提升，实现了向研究型大学的转变。与此同时，学校通过与美国密西根大学等世界一流大学合作办学，实施国际化战略取得重要突破。1985年开始闵行校区建设，历经20多年，已基本建设成设施完善，环境优美的现代化大学校园，并已完成了办学重心向闵行校区的转移。学校现有徐汇、闵行、法华、七宝和重庆南路（卢湾）5个校区，总占地面积4840亩。通过一系列的改革和建设，学校的各项办学指标大幅度上升，实现了跨越式发展，整体实力显著增强，为建设世界一流大学奠定了坚实的基础。

交通大学始终把人才培养作为办学的根本任务。一百多年来，学校为国家和社会培养了20余万各类优秀人才，包括一批杰出的政治家、科学家、社会活动家、实业家、工程技术专家和医学专家，如江泽民、陆定一、丁关根、汪道涵、钱学森、吴文俊、徐光宪、张光斗、黄炎培、邵力子、李叔同、蔡锷、邹韬奋、陈敏章、王振义、陈竺等。在中国科学院、中国工程院院士中，有200余位交大校友；在国家23位“两弹一星”功臣中，有6位交大校友；在18位国家最高科学技术奖获得者中，有3位来自交大。交大创造了中国近现代发展史上的诸多“第一”：中国最早的内燃机、最早的电机、最早的中文打字机等；新中国第一艘万吨轮、第一艘核潜艇、第一艘气垫船、第一艘水翼艇、自主设计的第一代战斗机、第一枚运载火箭、第一颗人造卫星、第一例心脏二尖瓣分离术、第一例成功移植同种原位肝手术、第一例成功抢救大面积烧伤病人手术等，都凝聚着交大师生和校友的心血智慧。改革开放以来，一批年轻的校友已在世界各地、各行各业崭露头角。

[无\lishu字体。]截至2011年12月31日，学校共有24个学院/直属系（另有继续教育学院、技术学院和国际教育学院），19个直属单位，12家附属医院，全日制本科生16802人、研究生24495人（其中博士研究生5059人）；有专任教师2979名，其中教授835名；中国科学院院士15名，中国工程院院士20名，中组部“千人计划”49名，“长江学者”95名，国家杰出青年基金获得者80名，国家重点基础研究发展计划（973计划）首席科学家24名，国家重大科学研究计划首席科学家9名，国家基金委创新研究群体6个，教育部创新团队17个。

[无\youyuan字体。]学校现有本科专业68个，涵盖经济学、法学、文学、理学、工学、农学、医学、管理学和艺术等九个学科门类；拥有国家级教学及人才培养基地7个，国家级校外实践教育基地5个，国家级实验教学示范中心5个，上海市实验教学示范中心4个；有国家级教学团队8个，上海市教学团队15个；有国家级教学名师7人，上海市教学名师35人；有国家级精品课程46门，上海市精品课程117门；有国家级双语示范课程7门；2001、2005和2009年，作为第一完成单位，共获得国家级教学成果37项、上海市教学成果157项。

第二章 研究背景

第三章 超空泡入水问题的基本理论

超空泡入水过程是一个多介质且时变的流体问题，其基本理论可由多相流数学模型和入水空泡模型进行阐述。

3.1 多相流数学模型

在航行体超空泡进入波浪场的环境下，整体环境为气-液-汽三相的波浪场环境，空气与水均满足流体基本的连续性方程，动量方程以及能量守恒方程，

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3-1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \quad (3-2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i(\rho E + p)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (3-3)$$

上式为连续性方程，动量方程以及能量守恒方程的张量表示法，其中 ρ 为流体密度， μ 为动力学粘性系数， p 为压强， E 为内能与动能之和。 u_i 为流体速度，是一个三维向量。

实际的入水过程都需要借助湍流模型表述^[1]，对于流场中的气体和液体，均满足

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \phi \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_\phi \quad (3-4)$$

其中 ϕ 是流场中关于 \mathbf{x} 和 t 的连续函数。

在气液两相流的环境下，需要引入各相的体积分数，满足，

$$\sum_{q=1}^3 \alpha_q = 1 \quad (3-5)$$

由于两相流模型中气液均满足相同形式的控制方程，因而混合介质下的各物理量可表达为以下形式：

$$\phi = \begin{cases} \sum_{q=1}^3 \alpha_q \phi_q & \phi = \rho, \mu \\ \sum_{q=1}^3 \alpha_q \phi_q \rho_q / \sum_{q=1}^3 \alpha_q \rho_q & \phi = E, T \end{cases} \quad (3-6)$$

而各相还需要满足输运方程：

$$\frac{\partial(\rho_q \alpha_q)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_q \alpha_q u_i)}{\partial x_i} = \begin{cases} 0 & q = gas \\ S & q = vapor \end{cases} \quad (3-7)$$

3.2 入水空泡模型

3.2.1 自由面空气和气体空泡模型

本项目的入水问题采用 Mixture 模型，对于航行体入水时形成的空泡，其中气相体积也满足方程3-7，故有，

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \alpha_g) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g \alpha_g u_i) = 0 \quad (3-8)$$

3.2.2 空化模型

当物体超高速 ($10^3 m/s$) 入水时, 会发生显著的自然空化现象, 其中蒸汽相满足以下形式的输运方程:

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j \alpha_v) = S_e - S_c \quad (3-9)$$

其中 $S_e - S_c$ 为相变速率, 典型的空化模型中, 有,

$$S_e = C_e \rho_v \alpha_l \frac{\max(p_v - p, 0)}{(1/2 \rho_l U_\infty^2) t_\infty} \quad (3-10)$$

$$S_c = C_c \frac{\rho_v}{t_\infty} (\alpha_l - \alpha_g)^2 (1 - \alpha_l \alpha_g) \quad (3-11)$$

其中 C 为经验系数, 下标 l 、 v 、 g 分别代表液相、蒸汽相和气相, α 为各相的体积分数。

第四章 数值计算方法

为了实现对超空泡物体进入波浪场的模拟,本文借助流体力学计算软件 **Fluent** 对不同的入水条件进行数值模拟。本文首先确定了计算的几何模型和区域,进行恰当的网格划分,给予合适的 **UDF** 边界条件,选用适当的数值方法,从而实现了波浪场的模拟。之后借助界面捕捉的 **VOF** 方法以及重叠网格技术,实现了航行体入水的方案设计。

4.1 几何模型和网格划分

本文为了模拟五级海况^[2]的环境,选取的环境场背景网格为 $300\text{m} \times 60\text{m} \times 10\text{m}$ 的长方体区域。模拟水深 40m , 波长 40m , 波高近 3m 。由于水面附近的计算精度要求高,故以水面所在平面为最精细的网格,两侧以一定比例按等比数列扩大其网格间距。入水过程发生在波浪船舶方向的 $0 < x < 200$ 范围内,后半区域 $200 < x < 300$ 为消波区。工作区划分为均匀网格,每个波长内大约 80 个网格,消波区采用快速增大的粗糙网格,总体网格量为 84 万,可以足够精细地描述波浪场环境。

运动网格为围绕入水细长航行体的圆柱体网格。细长航行体的长度 5m , 直径 0.5m 。网格沿圆柱体轴线方向采用等距划分,沿径向方向从外至内按照等比数列距离缩小,以增强靠近物体表面部分的精度。在模拟过程中,动网格始终环绕着入水物体,与入水物体之间的相对位置保持不变,并使用重叠网格技术以进行区域内的数值模拟。在初始状态下,背景网格与运动网格如图 4-1 所示

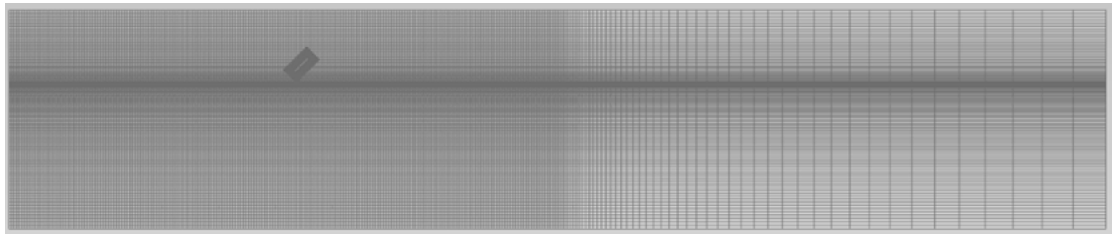


图 4-1 入水角度 45° 的初始重叠网格

4.2 边界条件

采用速度边界作为输入的造波方法进行二阶 Stokes 波的模拟,入口处实时给定波高 η 以及 x 方向和 y 方向的水质点速度 (u, v) ^[3]。

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t + \Phi_0) + \frac{kH^2 \cosh ky}{16 \sinh^3 kd} (\cosh 2kd + 2) \cos 2(kx - \omega t) \quad (4-1)$$

$$u = \frac{\pi H \cosh k(y+d)}{T \sinh kd} \cos(kx - \omega t) + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\cosh 2k(y+d)}{\sinh^4 kd} \cos 2(kx - \omega t) \quad (4-2)$$

$$v = \frac{\pi H \sinh k(y+d)}{T \sinh kd} + \frac{3}{4} \frac{\pi H}{T} \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\sinh 2k(y+d)}{\sinh^4 kd} \sin 2(kx - \omega t) \quad (4-3)$$

在确定了左侧入口处的速度边界条件后,为了保证入口和出口流量守恒,右侧出口给定与入口 Stokes 波的静漂移相对应的均匀速度。本模型模拟的是三维环境,但 z 方向的动力

学特性是轴对称的, 因而 z 方向的两个表面采用的是对称面边界条件。 $y = 0$ 的边界为海底, 给定固壁边界条件, $y = 60$ 的边界为大气, 给定压力出口边界。

4.3 动量源项消波法

单纯采用速度边界作为输入时, 会发生波浪反射的现象, 影响波浪场效果。对于这个问题, 可以采用动量源项消波法使结果更准确^[4-6]。本文使用动量源项消波法的区域为 $200 < x < 300$ 的消波区。对于 Navier-Stokes 方程, 增加一动量源项, 有

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(p + \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + S_i \quad (4-4)$$

其中 S 即为增加的动量源项, 可采用如下形式确定:

$$S_i = [C(x) - 1] \left[\frac{\rho}{\Delta t} (u_{iC} - U_i) - \rho u_{jC} \frac{\partial u_{iC}}{\partial x_j} - \frac{\partial p_C}{\partial x_i} + \rho f_i \right] \quad (4-5)$$

其中 $C(x)$ 为任意光滑函数, 下标 C 为计算值。在本次模拟场景下, $C(x)$ 取值为

$$C(x) = 0.9985 + 0.0015t - 0.9985e^{-t/0.025}, t = 1 - \frac{x}{l} \quad (4-6)$$

其中 x 为质点距消波区左端的距离, l 为消波区长度

4.4 数值方法

数值模拟在上述网格划分和边界条件等的基础之上, 借助商业计算流体软件 **Fluent**, 设定具体地数值方法。模型整体是基于压力的时变迭代方法, 考虑重力的影响。以水为主相, 气为次相, 水相为不可压缩流体, 气相采用理想气体模型考虑其压缩性。采用 **RNG k-epsilon** 模型结合壁面函数的方法计算湍流效应。数值算法采用压力速度耦合算法。

4.5 界面捕捉的 VOF 方法

在通常的数值模拟过程中, 我们在每个单元中对每相使用一个值 α 来表示该相的体积分数, 并确保各项的体积分数之和为 1, 但这种表示方法没有给出各项在这个单元内的交界面形状, 使用 **VOF** 方法则可以重构出交界面形状^[7], 例如, 使用平行于网格的直线对交界面进行拟合, 对应的则为 **SOLA-VOF** 算法。本模拟过程采用的是二阶 **PLIC** 算法, 可以得到更精确的自由面和空泡形状。这种 **VOF** 界面捕捉方法与前述的动量源项消波法完全兼容^[5]。

4.6 重叠网格技术

我们将航行体包裹在一小块子区域中, 该子区域处于整个计算区域工作区的适当位置。针对子区域和外部计算域的不同疏密要求分别划分网格。子区域与外部区域的交界处通过滑移面相互匹配, 并使网格尽量均匀过渡。由于入水问题的计算域是随时间变化的, 我们将采用动网格技术实现不断变化的求解域。动网格的方法根据每个时刻边界的新位置对网格进行自动更新。存在移动边界的任意控制体上的某一标量 ϕ 的守恒方程的积分形式可以写作:

$$\int_V \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_A \rho\phi(u_i - (u_g)_i) dA_i = \int_V S_\phi dV + \int_A \Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x_i} dA_i \quad (4-7)$$

其中 u_g 是网格移动速度。

边界的运动导致计算域的网格也要发生相应的运动和变形。动网格方法中, 有一类区域的网格只发生一定的运动, 构成单元的各个面的运动速度相同, 因此网格本身并没有变形。此时, 只要采用如上式的控制方程即可, 而不必额外对网格进行调整。另一类区域的网格必须通过变形才能调整, 它根据当前时刻的边界位置和速度以及时间步长, 确定下一时刻的边界位置, 再在邻近移动边界的局部区域对网格进行调整, 甚至重新划分网格。弹簧平滑方法、动态分层方法、网格重构等方法都是较为常用的方法。针对航行体出水问题的特点, 我们在计算过程中将尽量采用动态分层方法, 通过滑移面使包裹着航行体的子区域相对于外部区域向上运动。

在结构化网格中, 所有与移动区域相邻的网格拓扑结构都是柱形, 可以使用动态铺层方法。它根据动边界附近层的高度来添加或移除与移动边界相邻的网格层。

动态铺层法指定在每一个动边界附近的理想层高度。根据网格层 j 的高度, 相邻于动边界的网格层 j 被分割或者与附近的网格层 i 合并。如果 j 层上的网格拉伸了, 网格高度可以扩展到:

$$h_{\min} > (1 + \alpha_s)h_{\text{ideal}} \quad (4-8)$$

式中, h_{\min} 是 j 层网格的最小高度, h_{ideal} 是理想网格高度, α_s 是分裂因子。当达到上述条件后, 网格将根据指定的固定高度或者固定比率进行分割。当指定固定高度时, 网格层会分裂成两层, 一层是固定高度 h_{ideal} , 另一层是 $h - h_{\text{ideal}}$; 当指定固定比率时, 新生成的网格高度比率为 α_s , 如果 j 层上的网格被压缩时, 压缩将进行到下式的程度:

$$h_{\min} < \alpha_c h_{\text{ideal}} \quad (4-9)$$

式中, α_c 是溃灭因子。当达到上面的条件时, 被压缩的层 j 就会和它之上的层 i 合并。

对于非结构化网格, 采用局部网格重构法更新网格。局部网格重构法将那些不满足倾斜度或者大小准则的网格标记, 然后重新生成网格, 同时将计算得到的变量值插值到旧网格上: (a) 网格大于指定的最大网格尺寸。(b) 网格小于指定的最小网格尺寸。(c) 网格倾斜度大于指定的最大倾斜度。以简单的四面体网格构成的圆柱为例。当其底部移动时, 采用与动态铺层法类似的方法, 分析连接在边界上的网格高度, 根据指定的理想面高和分离/合并因子来分离或合并网格。当第 j 层网格拉伸时, 如果 $h_{\min} > (1 + \alpha_h)h_{\text{ideal}}$, 网格面就根据预先设定的面高分裂, 新的面高等于理想面高。当第 j 层压缩时, 如果满足 $h_{\min} < \alpha_h h_{\text{ideal}}$, 被压缩的层 j 则与之上的层 i 合并。这里的 h_{ideal} 是理想面高, α 是高度因子。

4.7 实验设计

为了探究不同入射角度和入射相位对航行体运动的影响, 在方案设计中会针对不同入射角度和入射相位进行数值模拟实验。在对航行体入水过程进行模拟之前, 首先使航行体在水面上方以一定的姿态保持静止状态, 以选取的波浪参数进行数值水池造波。然后, 待工作区的波面形状趋于稳定状态之后, 采用重叠网格方法和动网格技术使航行体的格子区域开始向下(垂直或带倾角)运动。根据所需要的入水波浪相位, 调整好恰当的航行体启动时刻, 以指定的入水速度和入水角度运动至水面, 之后的入水阶段采用完全自由运动。

针对航行体在不同波浪相位($0^\circ - 270^\circ$)入水过程进行数值模拟时, 0° 相位表示航行体头部触及水面时位于波浪的波峰位置, 180° 相位表示位于波谷位置, 90° 和 270° 相位表示

位于波峰和波谷的中间位置。

对于不同的波浪相位和航行体倾角，航行体在启动时刻之后的初始运动速度均统一为 10m/s ，运动总时长 t 为 2s ，每个时间步为 0.001s ，每个时间步迭代 50 次。

第五章 结果与分析

本次实验共运行了 9 个样例，航行体入射角度分别为 90° 垂直入射以及 60° 和 45° 入射。所有样例的均运行 2 秒，并保留了各运行时段的动力学状态。

5.1 稳定的波浪场结果

在进行完网格划分，边界条件设计，引入动量源项消波法之后，通过合适的数值方法，成功模拟了稳定的波浪场结果。下面为波浪传播某时刻的密度图，压强分布图和速度分布图。

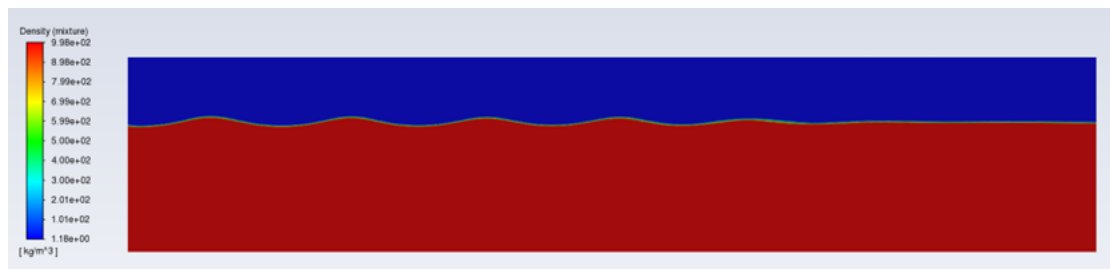


图 5-1 波浪场密度 (ρ) 图

波浪场压强分布如图5-2所示，可以看到，空气和水体之间的压力区分明显，液体区域随深度增加压强逐渐升高。

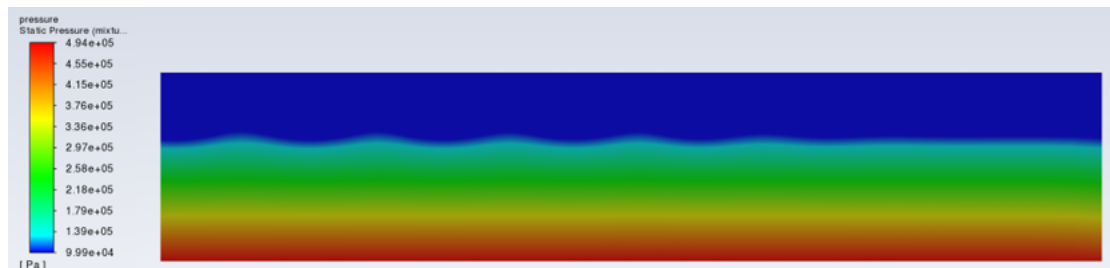


图 5-2 波浪场压强 (p) 分布图

波浪场速度分布图如图5-3,5-4所示，在工作区呈现典型的波浪场速度分布特征，在消波区存在一定的 u 分布，也符合动量源项消波法的结果。

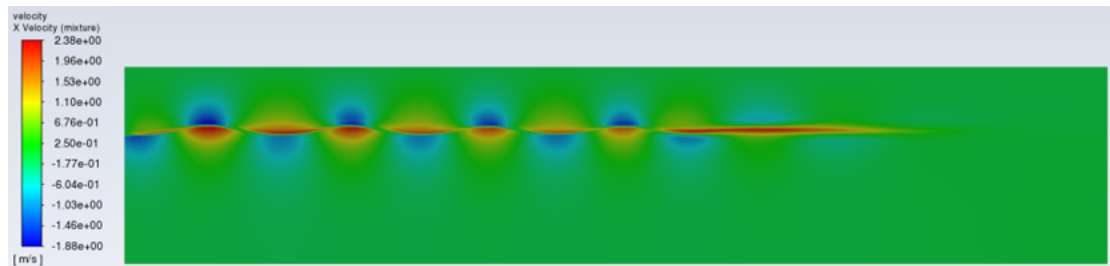


图 5-3 波浪场 x 方向速度 (u) 分布图

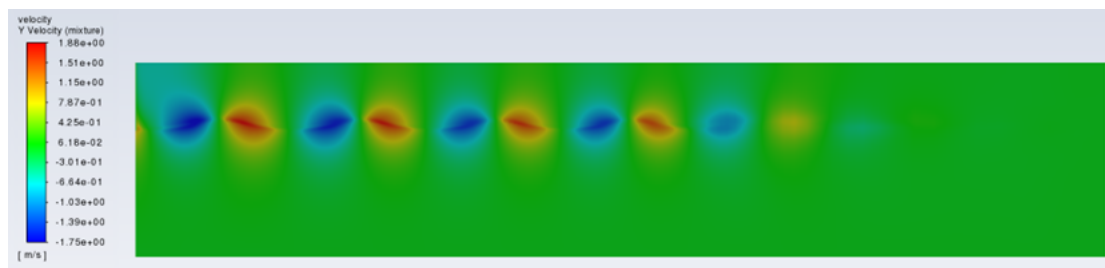


图 5-4 波浪场 y 方向速度 (v) 分布图

5.2 不同入水阶段的密度分布

在考虑并应用 VOF 捕捉方法和重叠网格技术后，可以顺利地进行入水数值模拟实验。数值模拟实验共进行 $t_{\max} = 2s$ 。以下是入射倾角为 45° 时，运行 $0s$ 、 $0.5s$ 、 $0.7s$ 、 $0.9s$ 、 $2.0s$ 的局部密度图。

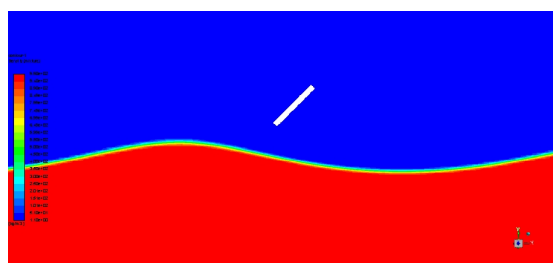


图 5-5 $t = 0s$ 时局部密度图

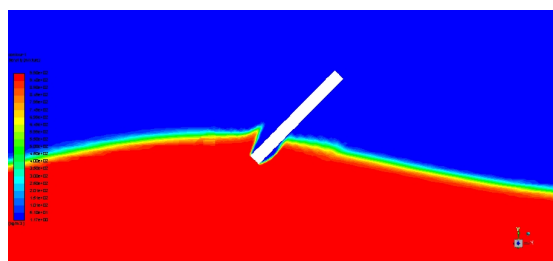
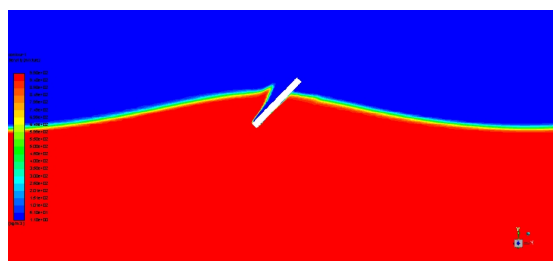


图 5-6 $t = 0.5s$ 时局部密度图



$t = 0.7s$ 时局部密度图

可以看到入水过程发生了显著的空泡现象。

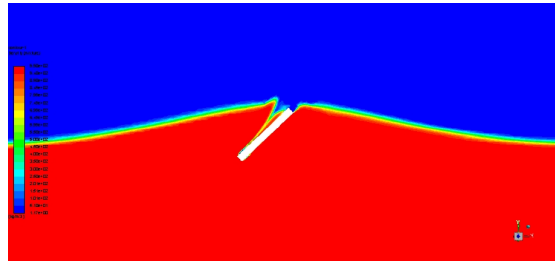


图 5-7 $t = 0.9s$ 时局部密度图

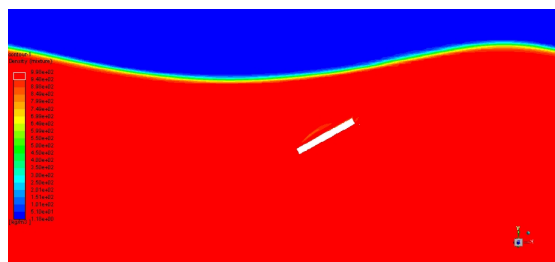


图 5-8 $t = 2.0s$ 时局部密度图

第六章 数学与引用文献的标注

6.1 数学

6.1.1 数字和单位

宏包 `siunitx` 提供了更好的数字和单位支持:

- 12 345.678 90
- 0.3×10^{45}
- $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- m m
-
- 10 和 20
- 10, 20 和 30
- 0.13 mm, 0.67 mm 和 0.80 mm
- 10~20
- $10^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$

6.1.2 数学符号和公式

按照国标 GB/T 3102.11—1993《物理科学和技术中使用的数学符号》，微分符号 d 应使用直立体。除此之外，数学常数也应使用直立体:

- 微分符号 d : `\dd`
- 圆周率 π : `\uppi`
- 自然对数的底 e : `\ee`
- 虚数单位 i, j : `\ii \jj`

公式应另起一行居中排版。公式后应注明编号，按章顺序编排，编号右端对齐。

$$\text{e}^{\text{i}\pi} + 1 = 0, \quad (6-1)$$

$$\frac{\text{d}^2 u}{\text{d}t^2} = \int f(x) \text{d}x. \quad (6-2)$$

公式末尾是需要添加标点符号的，至于用逗号还是句号，取决于公式下面一句是接着公式说的，还是另起一句。

$$\frac{2h}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{\sin(\omega\delta)}{\omega} \cos(\omega x) \text{d}\omega = \begin{cases} h, & |x| < \delta, \\ \frac{h}{2}, & x = \pm\delta, \\ 0, & |x| > \delta. \end{cases} \quad (6-3)$$

公式较长时最好在等号“=”处转行。

$$\begin{aligned} & I(X_3; X_4) - I(X_3; X_4 \mid X_1) - I(X_3; X_4 \mid X_2) \\ &= [I(X_3; X_4) - I(X_3; X_4 \mid X_1)] - I(X_3; X_4 \mid \tilde{X}_2) \end{aligned} \quad (6-4)$$

$$= I(X_1; X_3; X_4) - I(X_3; X_4 \mid \tilde{X}_2). \quad (6-5)$$

如果在等号处转行难以实现,也可在 +、-、×、÷ 运算符号处转行,转行时运算符号仅书写于转行式前,不重复书写。

$$\frac{1}{2}\Delta(f_{ij}f^{ij}) = 2\left(\sum_{i<j}\chi_{ij}(\sigma_i - \sigma_j)^2 + f^{ij}\nabla_j\nabla_i(\Delta f) + \nabla_k f_{ij}\nabla^k f^{ij} + f^{ij}f^k[2\nabla_i R_{jk} - \nabla_k R_{ij}]\right). \quad (6-6)$$

6.1.3 定理环境

示例文件中使用 `ntheorem` 宏包配置了定理、引理和证明等环境。用户也可以使用 `amsthm` 宏包。

这里举一个“定理”和“证明”的例子。

定理 6.1 (留数定理) 假设 U 是复平面上一个单连通开子集, a_1, \dots, a_n 是复平面上有限个点, f 是定义在 $U \setminus \{a_1, \dots, a_n\}$ 上的全纯函数, 如果 γ 是一条把 a_1, \dots, a_n 包围起来的可求长曲线, 但不过任何一个 a_k , 并且其起点与终点重合, 那么:

$$\oint_{\gamma} f(z) dz = 2\pi i \sum_{k=1}^n I(\gamma, a_k) \text{Res}(f, a_k). \quad (6-7)$$

如果 γ 是若尔当曲线, 那么 $I(\gamma, a_k) = 1$, 因此:

$$\oint_{\gamma} f(z) dz = 2\pi i \sum_{k=1}^n \text{Res}(f, a_k). \quad (6-8)$$

在这里, $\text{Res}(f, a_k)$ 表示 f 在点 a_k 的留数, $I(\gamma, a_k)$ 表示 γ 关于点 a_k 的卷绕数。卷绕数是一个整数, 它描述了曲线 γ 绕过点 a_k 的次数。如果 γ 依逆时针方向绕着 a_k 移动, 卷绕数就是一个正数, 如果 γ 根本不绕过 a_k , 卷绕数就是零。

定理 6.1 的证明。

证明 首先, 由……

其次, ……

所以……

□

6.2 引用文献的标注

按照教务处的要求, 参考文献外观应符合国标 GB/T 7714 的要求。模版使用 `BibLaTeX` 配合 `biblatex-gb7714-2015` 样式包^① 控制参考文献的输出样式, 后端采用 `biber` 管理文献。

请注意 `biblatex-gb7714-2015` 宏包 2016 年 9 月才加入 CTAN, 如果你使用的 `TeX` 系统版本较旧, 可能没有包含 `biblatex-gb7714-2015` 宏包, 需要手动安装。`BibLaTeX` 与 `biblatex-gb7714-2015` 目前在活跃地更新, 为避免一些兼容性问题, 推荐使用较新的版本。

正文中引用参考文献时, 使用 `\cite{key1, key2, key3...}` 可以产生“上标引用的参考文献”, 如^[8-10]。使用 `\parencite{key1, key2, key3...}` 则可以产生水平引用的参考文献, 例如 [11-13]。请看下面的例子, 将会穿插使用水平的和上标的参考文献: 普

^① <https://www.ctan.org/pkg/biblatex-gb7714-2015>

通图书 [8, 14], 论文集、会议录^[15], 科技报告 [16], 学位论文^[17], 专利文献 [12, 18], 专著中析出的文献^[9, 19], 期刊中析出的文献 [11, 20], 报纸中析出的文献^[21], 电子文献 [22-24]。

可以使用 `\nocite{key1, key2, key3...}` 将参考文献条目加入到文献表中但不在正文中引用。使用 `\nocite{*}` 可以将参考文献数据库中的所有条目加入到文献表中。

第七章 浮动体

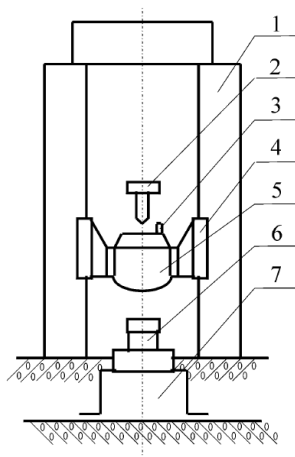
7.1 插图

插图功能是利用 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 的特定编译程序提供的机制实现的，不同的编译程序支持不同的图形方式。有的同学可能听说“ $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 只支持 EPS”，事实上这种说法是不准确的。 $\text{X}_{\text{E}}\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 可以很方便地插入 EPS、PDF、PNG、JPEG 格式的图片。

一般图形都是处在浮动环境中。之所以称为浮动是指最终排版效果图形的位置不一定与源文件中的位置对应，这也是刚使用 $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 同学可能遇到的问题。如果要强制固定浮动图形的位置，请使用 `float` 宏包，它提供了 `[H]` 参数。

7.1.1 单个图形

图要有图题，研究生图题采用中英文对照，并置于图的编号之后，图的编号和图题应置于图下方的居中位置。引用图应在图题右上角标出文献来源。当插图中组成部件由数字或字母等编号表示时，可在插图下方添加图注进行说明，如图 7-1 所示。



1. 立柱 2. 提升释放机构 3. 标准冲击加速度计
4. 导轨 5. 重锤 6. 被校力传感器 7. 底座

图 7-1 单个图形示例^[29]。如果表格的标题很长，那么在表格索引中就会很不美观。可以在前面用中括号写一个简短的标题，这个标题会出现在索引中。

Figure 7-1 Stay hungry, stay foolish.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

7.1.2 多个图形

简单插入多个图形的例子如图 7-2 所示。这两个水平并列放置的子图共用一个图形计数器，没有各自的子图题。

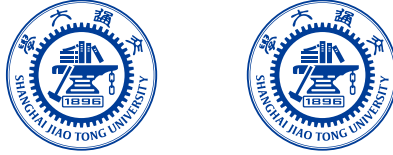


图 7-2 中文题图

Figure 7-2 English caption

如果多个图形相互独立，并不共用一个图形计数器，那么用 minipage 或者 parbox 就可以，如图 7-3 与图 7-4。



图 7-3 并排第一个图



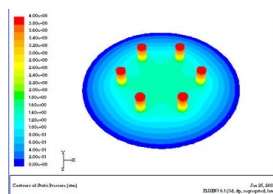
图 7-4 并排第二个图

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

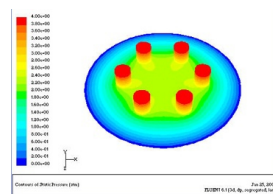
如果要为共用一个计数器的多个子图添加子图题，建议使用较新的 subcaption 宏包，不建议使用 subfigure 或 subfig 等宏包。

推荐使用 subcaption 宏包的 \subcaptionbox 并排子图，子图题置于子图之下，子图号用 a)、b) 等表示。也可以使用 subcaption 宏包的 \subcaption（放在 minipage 中，用法同 \caption）。

搭配 bcaption 宏包时，可以启用 \subcaptionbox 和 \subcaption 的双语变种 \bisubcaptionbox 和 \bisubcaption，如图 7-5 所示。



a) $R_3 = 1.5\text{mm}$ 时轴承的压力分布云图
a) Pressure contour of bearing when $R_3 = 1.5\text{mm}$



b) $R_3 = 2.5\text{mm}$ 时轴承的压力分布云图
b) Pressure contour of bearing when $R_3 = 2.5\text{mm}$

图 7-5 包含子图题的范例（使用 subcaptionbox）

Figure 7-5 Example with subcaptionbox

subcaption 宏包也提供了 subfigure 和 subtable 环境，如图 7-6。



a) 校徽



b) 校名。注意这个图略矮些，subfigure 中同一行的子图在顶端对齐。

图 7-6 包含子图题的范例（使用 subfigure）

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

7.2 表格

7.2.1 基本表格

编排表格应简单明了，表达一致，明晰易懂，表文呼应、内容一致。表题置于表上，研究生学位论文可以用中、英文两种文字居中排写，中文在上，也可以只用中文。

表格的编排建议采用国际通行的三线表^①。三线表可以使用 booktabs 提供的 \toprule、\midrule 和 \bottomrule。它们与 longtable 能很好的配合使用。

表 7-1 一个颇为标准的三线表^②

Item		
Animal	Description	Price (\$)
Gnat	per gram	13.65
	each	0.01
Gnu	stuffed	92.50
Emu	stuffed	33.33
Armadillo	frozen	8.99

7.2.2 复杂表格

我们经常会在表格下方标注数据来源，或者对表格里面的条目进行解释。可以用 threeparttable 实现带有脚注的表格，如表 7-2。

^① 三线表，以其形式简洁、功能分明、阅读方便而在科技论文中被推荐使用。三线表通常只有 3 条线，即顶线、底线和栏目线，没有竖线。

^② 这个例子来自《Publication quality tables in LaTeX》（booktabs 宏包的文档）。这也是一个在表格中使用脚注的例子，请留意与 threeparttable 实现的效果有何不同。

表 7-2 一个带有脚注的表格的例子
Table 7-2 A Table with footnotes

total	20 ^a		40		60	
	www	k	www	k	www	k
	4.22 (2.12)	120.0140 ^b	333.15	0.0411	444.99	0.1387
	168.6123	10.86	255.37	0.0353	376.14	0.1058
	6.761	0.007	235.37	0.0267	348.66	0.1010

^a the first note.

^b the second note.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipisicing elit, sed do eiusmod tempor incididunt ut labore et dolore magna aliqua. Ut enim ad minim veniam, quis nostrud exercitation ullamco laboris nisi ut aliquip ex ea commodo consequat. Duis aute irure dolor in reprehenderit in voluptate velit esse cillum dolore eu fugiat nulla pariatur. Excepteur sint occaecat cupidatat non proident, sunt in culpa qui officia deserunt mollit anim id est laborum.

如某个表需要转页接排, 可以用 **longtable** 实现。接排时表题省略, 表头应重复书写, 并在右上方写“续表 xx”, 如表 7-3。

表 7-3 实验数据
Table 7-3 Experimental data

测试程序	正常运行 时间 (s)	同步 时间 (s)	检查点 时间 (s)	卷回恢复 时间 (s)	进程迁移 时间 (s)	检查点 文件 (KB)
CG.A.2	23.05	0.002	0.116	0.035	0.589	32491
CG.A.4	15.06	0.003	0.067	0.021	0.351	18211
CG.A.8	13.38	0.004	0.072	0.023	0.210	9890
CG.B.2	867.45	0.002	0.864	0.232	3.256	228562
CG.B.4	501.61	0.003	0.438	0.136	2.075	123862
CG.B.8	384.65	0.004	0.457	0.108	1.235	63777
MG.A.2	112.27	0.002	0.846	0.237	3.930	236473
MG.A.4	59.84	0.003	0.442	0.128	2.070	123875
MG.A.8	31.38	0.003	0.476	0.114	1.041	60627
MG.B.2	526.28	0.002	0.821	0.238	4.176	236635
MG.B.4	280.11	0.003	0.432	0.130	1.706	123793
MG.B.8	148.29	0.003	0.442	0.116	0.893	60600
LU.A.2	2116.54	0.002	0.110	0.030	0.532	28754
LU.A.4	1102.50	0.002	0.069	0.017	0.255	14915
LU.A.8	574.47	0.003	0.067	0.016	0.192	8655
LU.B.2	9712.87	0.002	0.357	0.104	1.734	101975
LU.B.4	4757.80	0.003	0.190	0.056	0.808	53522

续下页

续表 7-3

测试程序	正常运行 时间 (s)	同步 时间 (s)	检查点 时间 (s)	卷回恢复 时间 (s)	进程迁移 时间 (s)	检查点 文件 (KB)
LU.B.8	2444.05	0.004	0.222	0.057	0.548	30134
EP.A.2	123.81	0.002	0.010	0.003	0.074	1834
EP.A.4	61.92	0.003	0.011	0.004	0.073	1743
EP.A.8	31.06	0.004	0.017	0.005	0.073	1661
EP.B.2	495.49	0.001	0.009	0.003	0.196	2011
EP.B.4	247.69	0.002	0.012	0.004	0.122	1663
EP.B.8	126.74	0.003	0.017	0.005	0.083	1656
SP.A.2	123.81	0.002	0.010	0.003	0.074	1854
SP.A.4	51.92	0.003	0.011	0.004	0.073	1543
SP.A.8	31.06	0.004	0.017	0.005	0.073	1671
SP.B.2	495.49	0.001	0.009	0.003	0.196	2411
SP.B.4 ^a	247.69	0.002	0.014	0.006	0.152	2653
SP.B.8 ^b	126.74	0.003	0.017	0.005	0.082	1755

^a 一个脚注

^b 另一个脚注

7.3 算法环境

算法环境可以使用 `algorithms` 宏包或者较新的 `algorithm2e` 实现。算法 7-1 是一个使用 `algorithm2e` 的例子。关于排版算法环境的具体方法，请阅读相关宏包的官方文档。

算法 7-1 算法示例

Data: this text

Result: how to write algorithm with \LaTeX 2 ϵ

```

1 initialization;
2 while not at end of this document do
3   read current;
4   if understand then
5     go to next section;
6     current section becomes this one;
7   else
8     go back to the beginning of current section;
9   end
10 end
```

7.4 代码环境

我们可以在论文中插入算法，但是不建议插入大段的代码。如果确实需要插入代码，建议使用 `listings` 宏包。

```
#include <stdio.h>
```

```
#include <unistd.h>
#include <sys/types.h>
#include <sys/wait.h>

int main() {
    pid_t pid;

    switch ((pid = fork())) {
        case -1:
            printf("fork failed\n");
            break;
        case 0:
            /* child calls exec */
            execl("/bin/ls", "ls", "-l", (char*)0);
            printf("execl failed\n");
            break;
        default:
            /* parent uses wait to suspend execution until child finishes */
            wait((int*)0);
            printf("is completed\n");
            break;
    }

    return 0;
}
```


全文总结

这里是全文总结内容。

2015年2月28日，中央在北京召开全国精神文明建设工作表彰暨学雷锋志愿服务大会，公布全国文明城市（区）、文明村镇、文明单位名单。上海交通大学荣获全国文明单位称号。

全国文明单位这一荣誉是对交大人始终高度重视文明文化工作的肯定，是对交大长期以来文明创建工作成绩的褒奖。在学校党委、文明委的领导下，交大坚持将文明创建工作纳入学校建设世界一流大学的工作中，全体师生医护员工群策群力、积极开拓，落实国家和上海市有关文明创建的各项要求，以改革创新、科学发展为主线，以质量提升为目标，聚焦文明创建工作出现的重点和难点，优化文明创建工作机制，传播学校良好形象，提升社会美誉度，显著增强学校软实力。2007至2012年间，上海交大连续三届荣获“上海市文明单位”称号，成为创建全国文明单位的新起点。

上海交大自启动争创全国文明单位工作以来，凝魂聚气、改革创新，积极培育和践行社会主义核心价值观。坚持统筹兼顾、多措并举，将争创全国文明单位与学校各项中心工作紧密结合，着力构建学校文明创建新格局，不断提升师生医护员工文明素养，以“冲击世界一流大学汇聚强大精神动力”为指导思想，以“聚焦改革、多元推进、以评促建、丰富内涵、彰显特色”为工作原则，并由全体校领导群策领衔“党的建设深化、思想教育深入、办学成绩显著、大学文化丰富、校园环境优化、社会责任担当”六大板块共28项重点突破工作，全面展现近年来交大文明创建工作的全貌和成就。

进入新阶段，学校将继续开拓文明创建工作新格局，不断深化工作理念和工作实践，创新工作载体、丰富活动内涵、凸显创建成效，积极服务于学校各项中心工作和改革发展的大局面，在上级党委、文明委的关心下，在学校党委的直接领导下，与时俱进、开拓创新，为深化内涵建设、加快建成世界一流大学、推动国家进步和社会发展而努力奋斗！

上海交通大学医学院附属仁济医院也获得全国文明单位称号。

参考文献

- [1] KLIAFAS Y, HOLT M. LDV measurements of a turbulent air-solid two-phase flow in a 90° bend. 1987. <https://doi.org/10.1007/BF00776177>. DOI: 10.1007/BF00776177.
- [2] 夏征农. 辞海-军事分册[M]//. 上海: 上海辞书出版社, 1987.
- [3] 邹志利. 水波理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [4] 周勤俊, 王本龙, 兰雅梅, 等. 海堤越浪的数值模拟[J/OL]. 力学季刊, 2005: 629-633(2005-12-30). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SHLX200504019&DbName=CJFQ2005>.
- [5] 秦楠, 鲁传敬, 李杰. 数值波流水池构造方法研究[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2013, 28: 349-356.
- [6] PERIC R, ABDEL-MAKSoud M. Reliable Damping of Free Surface Waves in Numerical Simulations[J]. Ship Technology Research, 2015, 63. DOI: 10.1080/09377255.2015.1119921.
- [7] HIRT C, NICHOLS B. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries[J/OL]. Journal of Computational Physics, 1981, 39(1): 201-225. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0021999181901455>. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(81\)90145-5](https://doi.org/10.1016/0021-9991(81)90145-5).
- [8] 余敏. 出版集团研究[M]. 北京: 中国书籍出版社, 2001: 179-193.
- [9] 程根伟. 1998 年长江洪水的成因与减灾对策[M]// 许厚泽, 赵其国. 长江流域洪涝灾害与科技对策. 北京: 科学出版社, 1999: 32-36.
- [10] 中国图书馆学会. 图书馆学通讯[J]. 1957(1)-1990(4). 北京: 北京图书馆, 1957-1990.
- [11] 李晓东, 张庆红, 叶瑾琳. 气候学研究的若干理论问题[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 1999, 35(1): 101-106.
- [12] 姜锡洲. 一种温热外敷药制备方案: 中国, 88105607.3[P]. 1989-07-26.
- [13] HOPKINSON A. UNIMARC and metadata: Dublin core[EB/OL]. [1999-12-08]. <http://www.ifla.org/IV/ifla64/138-161e.htm>.
- [14] 蒋有绪, 郭泉水, 马娟, 等. 中国森林群落分类及其群落学特征[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 11-12.
- [15] 中国力学学会. 第 3 届全国实验流体力学学术会议论文集[C]. 天津: 天津大学出版社, 1990: 20-24.
- [16] World Health Organization. Factors regulating the immune response: report of WHO Scientific Group[R]. Geneva: WHO, 1970.
- [17] 张志祥. 间断动力系统的随机扰动及其在守恒律方程中的应用[D]. 北京: 北京大学数学学院, 1998: 50-55.
- [18] 河北绿洲生态环境科技有限公司. 一种荒漠化地区生态植被综合培育种植方法: 中国, 01129210.5[P/OL]. 2001-10-24 [2002-05-28]. <http://211.152.9.47/sipoasp/zlijs/hyjs-yx-new.asp?recid=01129210.5&leixin>.

- [19] 国家标准局信息分类编码研究所. GB/T 2659-1986 世界各国和地区名称代码[S]//全国文献工作标准化技术委员会. 文献工作国家标准汇编: 3. 北京: 中国标准出版社, 1988: 59-92.
- [20] 李炳穆. 理想的图书管理员和信息专家的素养与形象[J]. 图书情报工作, 2000(2): 5-8.
- [21] 丁文祥. 数字革命与竞争国际化[N]. 中国青年报, 2000-11-20(15).
- [22] 江向东. 互联网环境下的信息处理与图书管理系统解决方案[J/OL]. 情报学报, 1999, 18(2): 4 [2000-01-18]. <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical/qbxb/qbxb99/qbxb990203>.
- [23] CHRISTINE M. Plant physiology: plant biology in the Genome Era[J/OL]. Science, 1998, 281: 331-332 [1998-09-23]. <http://www.sciencemag.org/cgi/collection/anatmorp>.
- [24] 萧钰. 出版业信息化迈入人快车道[EB/OL]. (2001-12-19) [2002-04-15]. <http://www.creader.com/news/20011219/200112190019.html>.
- [25] 杨瑞林, 李力军, 李玉成. 新型低合金高强韧性耐磨钢的研究[J]. 钢铁, 1999, 34(7): 41-45.
- [26] SCHINSTOCK D, CUTTINO J. Real time kinematic solutions of a non-contacting, three dimensional metrology frame[J]. Precision Engineering, 2000, 24(1): 70-76.
- [27] 温诗铸. 摩擦学原理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1990: 296-300.
- [28] 国家技术监督局. GB/T 16159-1996 汉语拼音正词法基本规则[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [29] 何闻. 标准动态力发生装置国内外研究现状[J]. 机电工程, 1999(2): 47-49.

附录 A Maxwell Equations

选择二维情况，有如下的偏振矢量：

$$\mathbf{E} = E_z(r, \theta) \hat{\mathbf{z}}, \quad (\text{A-1a})$$

$$\mathbf{H} = H_r(r, \theta) \hat{\mathbf{r}} + H_\theta(r, \theta) \hat{\boldsymbol{\theta}}. \quad (\text{A-1b})$$

对上式求旋度：

$$\nabla \times \mathbf{E} = \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} \hat{\mathbf{r}} - \frac{\partial E_z}{\partial r} \hat{\boldsymbol{\theta}}, \quad (\text{A-2a})$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right] \hat{\mathbf{z}}. \quad (\text{A-2b})$$

因为在柱坐标系下， $\bar{\mu}$ 是对角的，所以 Maxwell 方程组中电场 \mathbf{E} 的旋度：

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega \mathbf{B}, \quad (\text{A-3a})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} \hat{\mathbf{r}} - \frac{\partial E_z}{\partial r} \hat{\boldsymbol{\theta}} = i\omega \mu_r H_r \hat{\mathbf{r}} + i\omega \mu_\theta H_\theta \hat{\boldsymbol{\theta}}. \quad (\text{A-3b})$$

所以 \mathbf{H} 的各个分量可以写为：

$$H_r = \frac{1}{i\omega \mu_r} \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta}, \quad (\text{A-4a})$$

$$H_\theta = -\frac{1}{i\omega \mu_\theta} \frac{\partial E_z}{\partial r}. \quad (\text{A-4b})$$

同样地，在柱坐标系下， $\bar{\epsilon}$ 是对角的，所以 Maxwell 方程组中磁场 \mathbf{H} 的旋度：

$$\nabla \times \mathbf{H} = -i\omega \mathbf{D}, \quad (\text{A-5a})$$

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} \right] \hat{\mathbf{z}} = -i\omega \bar{\epsilon} \mathbf{E} = -i\omega \epsilon_z E_z \hat{\mathbf{z}}, \quad (\text{A-5b})$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\theta) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \theta} = -i\omega \epsilon_z E_z. \quad (\text{A-5c})$$

由此我们可以得到关于 E_z 的波函数方程：

$$\frac{1}{\mu_\theta \epsilon_z} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{\mu_r \epsilon_z} \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \theta^2} + \omega^2 E_z = 0. \quad (\text{A-6})$$

附录 B 绘制流程图

图 B-1 是一张流程图示意。使用 tikz 环境，搭配四种预定义节点（startstop、process、decision和io），可以容易地绘制出流程图。

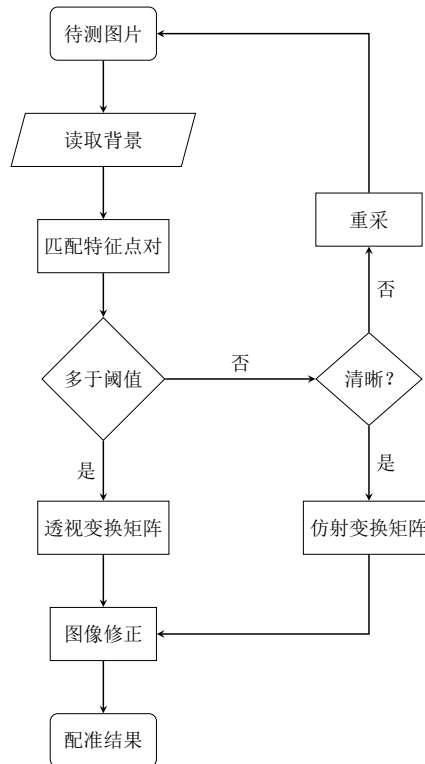


图 B-1 绘制流程图效果

Figure B-1 Flow chart

致 谢

感谢那位最先制作出博士学位论文 \LaTeX 模板的交大物理系同学！

感谢 William Wang 同学对模板移植做出的巨大贡献！

感谢 @weijianwen 学长一直以来的开发和维护工作！

感谢 @sjtug 以及 @dyweb 对 0.9.5 之后版本的开发和维护工作！

感谢所有为模板贡献过代码的同学们, 以及所有测试和使用模板的各位同学！

感谢 \LaTeX 和 SJTUTHESES, 帮我节省了不少时间。

学术论文和科研成果目录

学术论文

- [1] Chen H, Chan C T. Acoustic cloaking in three dimensions using acoustic metamaterials[J]. Applied Physics Letters, 2007, 91:183518.
- [2] Chen H, Wu B I, Zhang B, et al. Electromagnetic Wave Interactions with a Metamaterial Cloak[J]. Physical Review Letters, 2007, 99(6):63903.

专利

- [3] 第一发明人,“永动机”, 专利申请号 202510149890.0

个人简历

基本情况

某某，yyyy 年 mm 月生于 xxxx。

教育背景

- yyyy 年 mm 月至今，上海交通大学，博士研究生，xx 专业
- yyyy 年 mm 月至 yyyy 年 mm 月，上海交通大学，硕士研究生，xx 专业
- yyyy 年 mm 月至 yyyy 年 mm 月，上海交通大学，本科，xx 专业

研究兴趣

L^AT_EX 排版

联系方式

- 地址：上海市闵行区东川路 800 号，200240
- E-mail: xxx@sjtu.edu.cn

A SAMPLE DOCUMENT FOR L^AT_EX-BASED SJTU THESIS TEMPLATE

An imperial edict issued in 1896 by Emperor Guangxu, established Nanyang Public School in Shanghai. The normal school, school of foreign studies, middle school and a high school were established. Sheng Xuanhuai, the person responsible for proposing the idea to the emperor, became the first president and is regarded as the founder of the university.

During the 1930s, the university gained a reputation of nurturing top engineers. After the foundation of People's Republic, some faculties were transferred to other universities. A significant amount of its faculty were sent in 1956, by the national government, to Xi'an to help build up Xi'an Jiao Tong University in western China. Afterwards, the school was officially renamed Shanghai Jiao Tong University.

Since the reform and opening up policy in China, SJTU has taken the lead in management reform of institutions for higher education, regaining its vigor and vitality with an unprecedented momentum of growth. SJTU includes five beautiful campuses, Xuhui, Minhang, Luwan Qibao, and Fahu, taking up an area of about 3,225,833 m². A number of disciplines have been advancing towards the top echelon internationally, and a batch of burgeoning branches of learning have taken an important position domestically.

Today SJTU has 31 schools (departments), 63 undergraduate programs, 250 masters-degree programs, 203 Ph.D. programs, 28 post-doctorate programs, and 11 state key laboratories and national engineering research centers.

SJTU boasts a large number of famous scientists and professors, including 35 academics of the Academy of Sciences and Academy of Engineering, 95 accredited professors and chair professors of the "Cheung Kong Scholars Program" and more than 2,000 professors and associate professors.

Its total enrollment of students amounts to 35,929, of which 1,564 are international students. There are 16,802 undergraduates, and 17,563 masters and Ph.D. candidates. After more than a century of operation, Jiao Tong University has inherited the old tradition of "high starting points, solid foundation, strict requirements and extensive practice." Students from SJTU have won top prizes in various competitions, including ACM International Collegiate Programming Contest, International Mathematical Contest in Modeling and Electronics Design Contests. Famous alumni include Jiang Zemin, Lu Dingyi, Ding Guangen, Wang Daohan, Qian Xuesen, Wu Wenjun, Zou Taofen, Mao Yisheng, Cai Er, Huang Yanpei, Shao Lizi, Wang An and many more. More than 200 of the academics of the Chinese Academy of Sciences and Chinese Academy of Engineering are alumni of Jiao Tong University.