



17004307

上海交通大学硕士学位论文

船舶垂荡纵摇运动评估程序开发 及在船型优化上的应用

硕士研究生：王晋楷

学 号：117010910107

导 师：王建华

申 请 学 位：工学硕士

学 科：船舶与海洋工程

所 在 单 位：船舶海洋与建筑工程院

答 辩 日 期：2020 年 1 月

授予学位单位：上海交通大学

Dissertation Submitted to Shanghai Jiao Tong University
for the Degree of Master

**DEVELOPMENT OF SHIP HEAVE AND
PITCH MOTIONS EVALUATION
PROGRAM AND APPLICATION IN SHIP
HULL FORM OPTIMIZATION**

| | |
|---------------------------------------|---|
| Candidate: | Jinkai Wang |
| Student ID: | 117010910107 |
| Supervisor: | Jianhua Wang |
| Academic Degree Applied for: | Master of Engineering |
| Speciality: | Naval Architecture and Ocean Engineering |
| Affiliation: | School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering |
| Date of Defence: | Jan, 2020 |
| Degree-Conferring-Institution: | Shanghai Jiao Tong University |



17004307

船舶垂荡纵摇运动评估程序开发及在船型优化上的应用

摘要

船舶水动力性能评估是船舶型线优化的重要环节，快速准确的评估手段是目前船型优化领域的一个重要课题。对于以耐波性能为目标的船体型线优化，一套快速计算船舶在波浪中各自由度运动的耐波性评估程序是进行船型优化的基础。目前，基于粘性流理论的计算船舶在波浪中运动的方法虽然可以较为准确的评估船舶的运动，但计算时间长，需要大量计算资源，从而导致船型优化周期十分冗长，同时对船体型线的变形容错率较低。因此，能够实现快速计算的基于势流理论的方法非常适用于船型优化中，而发展较为成熟的切片法可以进一步降低计算时间，同时可以得到较为满意的评估结果。

本文基于切片理论，自主编写了一套计算船舶在规则波中以一定速度航行时的垂荡和纵摇运动的 C 语言程序。在计算船舶二维剖面水动力系数时，采用基于 Lewis 剖面方法的 Tasai 图谱，插值求解得到单位长度各剖面的附加质量和阻尼系数。根据切片法原理和公式求解船体垂荡纵摇及其耦合运动的水动力系数以及波浪力（矩），代入垂荡纵摇运动微分方程组中，求解微分方程组特解，得到船舶在一定波浪条件下的垂荡纵摇运动幅值响应。

为了验证本文自编程序的有效性，首先对数值船型 Wigley 和标准船模 Series60 在各遭遇频率下的水动力系数、波浪力（矩）以及垂荡纵摇运动进行求解。通过与试验结果对比，验证了程序计算船舶垂荡纵摇运动的快速性和有效性，可以进一步应用到船体型线优化中。随后，对标准船模 KCS 进行了以减小垂荡运动幅值为目标的船体型线优化设计，采用平移法对船体型线进行变形得到一系列样本船型，并利



17004307

用本文自编程序进行垂荡运动求解，建立 Kriging 近似模型，利用遗传法进行最优船型求解，最后利用基于粘性流的 naoe-FOAM-SJTU 求解器对优化船型进行验证，结果表明本次优化设计降低了 KCS 在波浪中垂荡运动幅值，同时证明了本文程序可以应用到船舶型线优化中。

关键词：切片法、耐波性、Lewis 剖面、Tasai 图谱、船型优化

DEVELOPMENT OF SHIP HEAVE AND PITCH MOTIONS EVALUATION PROGRAM AND APPLICATION IN SHIP HULL FORM OPTIMIZATION

ABSTRACT

Ship hydrodynamic performance evaluation is an important part in ship hull form optimization, and rapid and accurate evaluation method is an important topic in the field of ship hull form optimization. For the hull form optimization with the aim of seakeeping, a set of seakeeping evaluation program which can rapidly calculate ship motions of each degree of freedom in waves is the basis of ship hull form optimization. At present, although ship motion calculation method based on viscous flow theory can accurately evaluate the motions of ship, the calculation time is long and a lot of calculation resources are needed, which leads to the long optimization period of ship hull form and the low fault tolerance of ship hull deformation. Therefore, the methods based on potential flow theory, which can realize fast calculation, is very suitable for ship hull form optimization, and the strip method , whose development is relatively mature, can further reduce the calculation time and obtain satisfactory evaluation results.

Based on the strip theory, this paper develops a set of C-language program for calculating the heave and pitch motions of a ship in a regular wave at a certain speed. In the calculation of the hydrodynamic coefficients of the two-dimensional sections of the ship, the added mass and the damping coefficient of each section of unit length are obtained by using the Tasai graphics, which are based on the Lewis section method. According to the principle and formula of the strip method, the hydrodynamic coefficients of heave, pitch and their coupling motions and the wave force (moment) of the ship are solved. When they are substituted

in the differential equation group of heave and pitch motions, the special solutions are solved, which can obtain the heave and pitching motion amplitude response of the ship under a certain wave condition.

In order to verify the effectiveness of the program in this paper, the numerical ship model Wigley and the standard ship model Series60 are calculated by the program, and the hydrodynamic coefficients of heave, pitch and their coupled motions, the wave force and moment at each encounter frequency are solved. By comparing the results with the experiment values, it is proved that the program can calculate heave and pitch motions rapidly and effectively, which can be further applied to ship hull form optimization. Then, a ship hull form optimization design with the aim of reducing heave motion is applied to the standard ship model KCS. Ship hull is deformed by translation method, and a series of sample ships are obtained. Then the heave amplitude of each sample ship is obtained by self-designed program, and a Kriging approximation model is established. The optimal ship form is solved by the genetic method, and the optimized ship form is verified by using the naoe-FOAM-SJTU solver based on the viscous flow theory. The results show that this optimization design reduces the heave motion amplitude of the KCS in the wave, and proves that the program can be applied to ship hull form optimization.

KEY WORDS: Strip method, Seakeeping, Lewis section, Tasai graphics, Ship hull foam optimization

目 录

| | |
|--------------------------|------|
| 船舶垂荡纵摇运动评估程序开发及在船型优化上的应用 | II |
| 摘要 | II |
| ABSTRACT | IV |
| 目录 | V |
| 图录 | VIII |
| 表录 | IX |
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 课题的背景及意义 | 1 |
| 1.2 国内外研究与进展 | 3 |
| 1.2.1 国外研究进展 | 3 |
| 1.2.2 国内研究进展 | 10 |
| 1.3 本文主要工作 | 15 |
| 第二章 船舶在波浪中垂荡纵摇运动分析 | 18 |
| 2.1 船舶在波浪中运动概述 | 18 |
| 2.2 基于线性势流理论的切片法 | 20 |
| 2.2.1 切片法的基本假设 | 21 |
| 2.2.2 入射波及遭遇频率 | 21 |
| 2.2.3 船体运动方程 | 21 |
| 2.2.4 船体切片运动分析 | 22 |
| 2.2.5 船体切片的流体载荷分析 | 22 |
| 2.2.6 船舶在波浪中运动的微分方程 | 25 |
| 2.3 二维水动力系数的计算 | 27 |
| 2.3.1 二维辐射问题 | 27 |
| 2.3.2 二维振荡流场多极展开 | 28 |
| 2.3.3 多参数保角变换形式 | 28 |
| 2.3.4 奇点势求解 | 30 |
| 2.3.5 振荡流场速度势表达式 | 31 |
| 2.3.6 Tasai 图谱 | 32 |
| 2.4 本章小结 | 33 |

| | |
|------------------------------|----|
| 第三章 船舶纵向运动评估程序实现 | 35 |
| 3.1 程序流程图 | 35 |
| 3.2 Tasai 图谱插值 | 36 |
| 3.2.1 剖面形状计算 | 36 |
| 3.2.2 三次样条插值方法 | 36 |
| 3.2.3 追赶法求解插值方程 | 38 |
| 3.2.4 Tasai 图谱插值结果 | 39 |
| 3.3 纵向运动微分方程求解 | 40 |
| 3.3.1 船体水动力系数求解 | 40 |
| 3.3.2 波浪扰动力（矩）求解 | 42 |
| 3.3.3 纵向运动幅值响应求解 | 43 |
| 3.4 本章小结 | 45 |
| 第四章 船舶在规则波中纵向运动评估 | 46 |
| 4.1 Wigley 船型验证计算 | 46 |
| 4.1.1 Wigley 船体参数及工况设置 | 46 |
| 4.1.2 Wigley 剖面水动力系数计算 | 47 |
| 4.1.3 Wigley 纵向运动水动力系数计算 | 49 |
| 4.1.4 Wigley 纵向运动求解 | 53 |
| 4.3 Series60 船型验证计算 | 57 |
| 4.2.1 Series60 船型参数及工况设置 | 57 |
| 4.2.2 Series60 剖面水动力系数计算 | 58 |
| 4.2.3 Series60 纵向运动水动力系数计算 | 60 |
| 4.2.4 Series60 纵向运动求解 | 65 |
| 4.3 本章小结 | 67 |
| 第五章 KCS 纵向运动评估及船型优化设计 | 69 |
| 5.1 优化对象及工况设置 | 69 |
| 5.2 KCS 纵向运动计算 | 70 |
| 5.2.1 KCS 剖面水动力系数计算 | 70 |
| 5.2.2 KCS 船模纵向运动水动力系数计算 | 72 |
| 5.2.3 KCS 纵向运动求解 | 74 |
| 5.3 KCS 垂荡运动优化设计 | 77 |
| 5.3.1 目标函数及约束条件 | 77 |

| | |
|-------------------------------|-----------|
| 5.3.2 船体变形方法..... | 78 |
| 5.3.3 优化策略..... | 80 |
| 5.4 优化设计结果及验证..... | 81 |
| 5.4.1 优化结果..... | 81 |
| 5.4.2 优化结果验证..... | 83 |
| 5.5 本章小结..... | 84 |
| 第六章 结论与展望..... | 85 |
| 6.1 结论..... | 85 |
| 6.2 研究展望..... | 86 |
| 参考文献..... | 87 |
| 致谢..... | 95 |
| 攻读硕士学位期间已发表或录用的论文..... | 97 |

图录

| | |
|---|----|
| 图 1-1 船型设计模式对比图..... | 1 |
| 图 1-2 TASAI 绘制的计算水动力系数图谱..... | 6 |
| 图 1-3 INSEAN 水池 DTMB5415 优化型线对比图..... | 9 |
| 图 1-4 INSEAN 水池 DTMB5415 耐波性优化结果..... | 9 |
| 图 1-5 S-175 集装箱船纵向运动计算结果..... | 11 |
| 图 1-6 Wigley (Fr=0.3) 水动力系数计算结果..... | 12 |
| 图 1-7 DTMB5415 优化前后兴波对比..... | 14 |
| 图 2-1 剖面的保角变换..... | 29 |
| 图 3-1 垂荡纵摇运动评估程序流程图..... | 35 |
| 图 3-2 Tasai 图谱与其插值函数曲线对比图..... | 40 |
| 图 4-1 Wigley 船模示意图..... | 46 |
| 图 4-2 Wigley 水下切片示意图..... | 47 |
| 图 4-3 Wigley (Fr=0.3) 纵向运动附加质量结果对比..... | 50 |
| 图 4-4 Wigley (Fr=0.3) 纵向运动阻尼系数结果对比..... | 52 |
| 图 4-5 Wigley (Fr=0.3) 波浪力(矩)结果对比..... | 54 |
| 图 4-6 Wigley (Fr=0.3) 垂荡纵摇运动幅值对比..... | 56 |
| 图 4-7 Series 60 船模示意图..... | 57 |
| 图 4-8 Series 60 船模水下切片示意图..... | 58 |
| 图 4-9 Series 60 (Fr=0.2) 纵向运动附加质量结果对比..... | 62 |
| 图 4-10 Series60 (Fr=0.2) 纵向运动阻尼系数结果对比..... | 64 |
| 图 4-11 Series60 (Fr=0.2) 垂荡纵摇运动幅值对比..... | 67 |
| 图 5-1 KCS 船模示意图..... | 69 |
| 图 5-2 KCS 船模水下切片示意图..... | 70 |
| 图 5-3 KCS (Fr=0.261) 垂荡纵摇运动幅值对比..... | 77 |
| 图 5-4 平移法示意图..... | 79 |
| 图 5-5 KCS 优化船与母型船型线对比..... | 81 |
| 图 5-6 KCS (Fr=0.261) 优化前后垂荡纵摇运动幅值对比..... | 82 |
| 图 5-7 KCS (Fr=0.261) 优化船与母型船垂荡纵摇时域曲线对比..... | 84 |

表 录

| | |
|-----------------------------------|----|
| 表 3-1 TASAI 图谱曲线样本点..... | 39 |
| 表 4-1 Wigley 船型的主尺度及参数..... | 46 |
| 表 4-2 Wigley 船水线下各剖面形状参数..... | 47 |
| 表 4-3 Wigley 各剖面水动力系数..... | 48 |
| 表 4-4 Wigley 纵向运动附加质量..... | 49 |
| 表 4-5 Wigley 纵向运动阻尼系数..... | 51 |
| 表 4-6 Wigley 纵向运动阻尼系数..... | 53 |
| 表 4-7 Wigley 垂荡纵摇运动幅值响应..... | 55 |
| 表 4-8 Series 60 船模主尺度及参数..... | 57 |
| 表 4-9 Series 60 船模水线下各剖面形状参数..... | 58 |
| 表 4-10 Series 60 各剖面水动力系数..... | 59 |
| 表 4-11 Series 60 纵向运动附加质量..... | 60 |
| 表 4-12 Series 60 纵向运动阻尼系数..... | 62 |
| 表 4-13 Series 60 波浪力（矩）..... | 65 |
| 表 4-14 Series 60 垂荡纵摇运动幅值响应..... | 66 |
| 表 5-1 KCS 船模主尺度及参数..... | 69 |
| 表 5-2 KCS 船模水线下各剖面形状参数..... | 70 |
| 表 5-3 KCS 各剖面水动力系数..... | 71 |
| 表 5-4 KCS 纵向运动附加质量..... | 73 |
| 表 5-5 KCS 纵向运动阻尼系数..... | 73 |
| 表 5-6 KCS 波浪力（矩）..... | 74 |
| 表 5-7 KCS 垂荡纵摇运动幅值响应..... | 75 |
| 表 5-8 KCS 船型优化设计工况..... | 78 |
| 表 5-9 样本船型计算结果..... | 80 |
| 表 5-10 遗传算法基本参数配置..... | 81 |

第一章 绪论

1.1 课题的背景及意义

随着国家的发展和人民生活水平的提高，无论是国防军事还是物流运输，都对船舶的性能提出更高的要求，船舶各项性能的提升以及高性能船舶的设计成为目前船舶领域的重要课题。船体型线对船舶性能有重要的影响，型线的改变会使船舶的各项性能发生改变，因此船体的型线设计是船舶设计中的重要一环。如何通过改变船舶型线使船舶性能达到最优是目前船舶领域急需解决的关键技术。传统型线设计方法多采用母型船改造的方法，通过各种方法对优秀船型进行改造，并进行船模试验来验证经改造后的新船型是否满足性能要求，若不能满足要求，则重新修改船型再进行性能评估，反复迭代，直到满足性能要求。这种传统方法设计周期长，成本高，并且需要船舶设计师的大量经验，同时，最终得到的船型仅是满足要求的可行船型，而非各项性能相对优秀的最优船型。

随着计算机科学的飞速发展，计算流体力学（Computational Fluid Dynamics）成为船舶设计的一个重要学科。基于 CFD 技术的船型优化设计成为船舶设计的重要课题。船体型线的综合优化设计是通过一系列变形方法对母型船型线进行改变，生成一系列不同型线的样本船，对样本船进行水动力性能评估，并在评估结果与船型之间建立近似模型，最后采用最优化技术寻找最优船型，使船舶各种水动力性能达到相对最优。

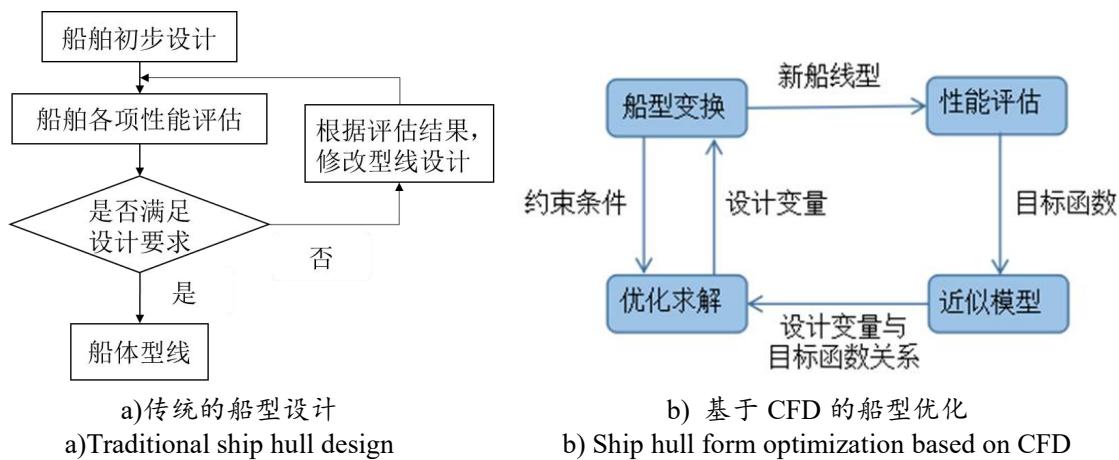


图 1-1 船型设计模式对比图
Fig.1-1 Comparison of ship hull form design models

船舶性能评估是船舶型线设计优化过程中的重要环节之一，快速有效的评估手段和方法是船型优化设计得到优秀船型的基础。在船舶型线的优化设计中，我们考虑的船舶水动力性能主要包括快速性、耐波性以及操纵性，通常我们使用 CFD 方法来进行水动力性能的评估，比如船舶兴波阻力评估方面常用的方法有 Michell 积分、格林公式方法、面元法等；评估粘性阻力分方法主要有边界层理论和考虑粘性的 RANS 方法；评估船舶耐波性的方法也可以分为基于粘流的 RANS 方法以及基于势流理论的切片法、三维面元法、二维半理论等；计算船舶操纵性的方法有细长体理论、RANS 方法、切片理论等。虽然每个性能都有若干方法可以选择，但有些方法并不适用于船型优化设计。由于船型优化过程中需要计算大量的样本船型的水动力性能，因此性能评估方法需要满足计算速度快，计算占用量少等特点。

目前，课题组已经自主开发出基于考虑粘性的 RANS 方法的求解器 naoe-FOAM-SJTU，该求解器能够准确地评估求解上述提到的三种主要的水动力性能，即快速性、耐波性和操纵性。然而，虽然利用考虑粘性的 RANS 方法来计算水动力性能更接近实际情况，但是计算时间长，占用计算资源多，不适合进行批量计算。而我们现在研究的船体型线优化问题是通过给定船型变换的变量参数，利用多种变形方法，在一定范围内得到几十个甚至上百个优化样本点，即几十个甚至上百个不同的优化船型，通过对这几十个样本船型水动力性能的分析计算，建立近似模型，并利用最优化方法得到最优船型。如果我们利用 RANS 方法计算大量的样本船型的水动力性能，那么计算量是巨大的，计算时间非常长，占用大量的计算资源。因此，如何快速有效评估船舶水动力性能，并应用到船型优化问题上，缩短船型优化周期，节约计算资源成为船型优化的一个重要课题。利用势流方法计算船舶水动力性能时间短，可以节约大量计算资源，适合于船舶型线优化课题的研究。目前由课题组自主开发的基于 Neumann-Michell 势流理论的 NMShip-SJTU 求解器可以快速计算船舶的兴波阻力，且精度良好，大大降低了船舶兴波阻力的优化周期。同样，船舶的耐波性也可以采用势流的方法比如切片法和面元法进行计算，再结合现有的船体变形方法和最优化方法，我们就可以对船舶的耐波性进行快速优化。

基于势流方法的船舶在波浪中航行的运动计算发展较为成熟。主要有切片法、三维面元法等。三维势流方法是直接根据船舶在波浪中运动的定解条件求解三维扰动速度势，从而得到船舶在波浪中的受力情况和运动情况，然而三维势流方法的求解过程复杂且需要大量时间，尤其是考虑船舶以一定航速行驶时。基于细长

体假设的二维切片理论可以计算船舶在波浪中航行时的五自由度运动，包括升沉、横荡、纵摇、横摇，首摇。切片法无需求解三维有航速的边值问题，仅通过求解二维横剖面的零航速水动力系数等即可以求得船舶在波浪中的运动情况，将三维问题转化为二维问题解决。同时，切片法求解船舶耐波性，计算速度快，对船型的适用性好，运动评估结果较为准确，因此非常适用于船型优化中的耐波性评估。

目前，由课题组自主开发的船型优化求解器 OPTShip-SJTU 结合了 NMShip-SJTU 求解器，能够进行船舶兴波阻力的优化计算，并取得良好效果。而耐波性的计算还仅能通过基于黏流的方法进行计算，优化周期相当长，且消耗大量计算资源。因此，本文致力于编写一套基于切片法计算船舶在波浪中垂荡和纵摇运动的程序，来完善组内船型优化求解器 OPTShip-SJTU 在快速计算耐波性方面的欠缺，在完成程序后利用标准船模进行验证，并进行以船舶耐波性为目标的船型优化设计，验证程序在船型优化中的适用性，为船舶水动力性能的综合优化提供条件。

1.2 国内外相关研究与进展

1.2.1 国外研究进展

(1) 船舶在波浪中的运动研究

船舶在波浪中的运动的数值分析和计算经过几十年的发展，经历了从二维到三维，从线性到非线性的发展。基于势流理论的船舶波浪中运动计算已较为成熟，尤其是二维切片理论已经广泛应用到船舶工程中。切片法最早是由 Korvin-kroukovsky 等^[1] (1955) 提出，将细长体的概念应用到船舶运动计算中，随后，Korvin-kroukovsky 等^[2] (1957) 进行完善，利用相对运动的概念推导出了船舶迎浪前行的纵向运动方程，即普通切片法 (O.S.M.)，普通切片法是首个计算船舶在波浪中运动的方法，但仅限于船舶的垂荡和纵摇运动。

随后，Gerritsma 等^[3] (1967) 对普通切片法加以修正，考虑了船舶航速的影响，修正后的切片法计算船舶迎浪时的运动结果与试验结果吻合良好，该方法也被称为改良切片理论 (M.S.T.)。

到六十年代末，一种新型切片方法被提出，日本学者田才福造和高木又男^[4] (1969) 通过假定船体二维剖面的流体动力是由该二维剖面相对于周围流体的平均速度来确定的，这样可以导出辐射力项不考虑顶端效应的船舶运动方程。Salvesen 等^[5] (1970) 在建立了船舶以一定航速斜浪运动的数学模型后，引入切片

理论的假定，进行简化，推导出船舶在规则波中垂荡纵摇耦合运动、横荡、横摇及首摇耦合运动的简化方程，从而使理论更加合理，与田才福造的方法不同点在于扰动力的计算方法和考虑端部效应影响，Salvesen 提出的方法被称为 STF 方法，该方法可以计算船舶在任意遭遇角下，不包括纵荡在内的垂荡、纵摇、横摇、首摇以及横荡五自由度运动。

与此同时，苏联学者 Borodai^[6] (1969) 和德国学者 Soding^[7] (1969) 也同时进行了基于切片理论的船舶运动分析。Conolly 等^[8] (1969) 研究了船舶在一定航速下任意遭遇角时，垂荡、纵摇和横摇的耦合运动。

由于 STF 方法存在一定的限制条件，适用范围有限，学者们开始将各种理论应用到切片法中，来扩大切片法的适用范围。Maruo^[9] (1970) 提出插值理论，在波长较短时，该理论可以转化为切片法，当波长较长时，该理论转化为细长体理论。Newman^[10] (1978) 提出统一场理论 (unified theory)，其在内部流场中包括基于切片理论的速度势解，而在外部域中，考虑到水动力对船长方向的干扰，需要由一个解来匹配外部流场的船舶扰动。这种方法利用切片法来解内部流场，在船长方向上放置三维源强来表示外部流场，在内部流场和外部流场交接处应用匹配法，使中间流场中也可以得到速度势的解。之后，Lee 等^[11,12] (1967,1971) 结合切片法和统一场理论，将 Frank 精密拟合方法应用到双体船的运动预报，计算了 SWATH4 和 SWATH6A 两个小水线面双体船的垂荡、纵摇、横摇运动，与试验结果符合较好。Nakos 和 Scalvounos^[13] (1990) 根据统一场理论进行理论计算，所得结果与试验结果进行比较，得到了较切片法更优的评估结果。

理论上，切片理论适用于中低速船舶的计算，而不适用于高速船舶，然而 Blok 等^[14] (1984) 利用切片法对高速排水型船舶进行计算，结果表明当傅汝德数达到 0.57-1.4 时，利用切片法计算船舶的垂荡纵摇运动仍可以得到满意结果。Keuning^[15] (1988) 通过比较船舶在高航速下沿船长分布的各剖面的附加质量和阻尼系数的计算结果，证实了当傅汝德数在 0.57 以下时，利用切片法可以计算得到船体水动力系数，当傅汝德数达到 1.4 时，需要进行吃水修正，也可以得到满意的计算结果。

切片理论除计算线性频域问题外，各国学者逐渐将切片法应用到解决非线性和频域问题中去。Jensen 和 Pedersen^[16] (1981) 提出了一种预报船舶在不规则波中非线性垂向响应的频域二阶理论，利用二阶的切片理论计算航行在单向随机海浪中的船舶的波浪垂向诱导载荷。Fang 等^[17] (1993) 将切片理论应用到船舶运动的时域计算中，求解了船舶在大幅波中的非线性运动。

随着二维切片法的不断发展，一种新型介于二维和三维间的计算方法逐渐形成。Chapman^[18,19]（1975,1976）首先提出了高速细长体理论，即二维半理论的思想，所谓二维半理论指的是控制方程和物体表面条件均为二维的，但是由于考虑航速的影响，自由表面条件为三维的。Yeung 等^[20]（1981）将二维半理论的思想拓展应用到船舶耐波性上，将切片法中的低速假设除去，仅保留细长体假设并且不考虑定常流动的影响，这样便可以计算告诉船的耐波性能。随后 Faltinsen 等^[21]（1991）、Takaki 等^[22]（1995）在求解二维剖面时域非线性问题时使用简单格林函数法。但是对于复杂船体形状该方法不够完善，并且会消耗大量时间进行求解且耗费时间，Faltinsen^[23]（2005）对二维半方法进行了系统的阐述。

学者 Schellin 和 Ostergaard^[24]（1996）分别利用二维切片理论和三维面元法对大型高速集装箱船 FLOKSTRA，进行了船舶运动及波浪载荷线性响应的计算，结果表明切片理论方法预报的垂向波浪诱导载荷通常高于面元法预报的结果，而对于水平波浪载荷出现相反的结果。

近年来，为了解决工程上的非线性问题，许多学者开始从频域计算转向时域计算，Kristiansen 等^[25]（2005）、Fan 等^[26]（2006）、Kim 等^[27]（2007）利用频域计算结果，通过变换得到辐射力的时延函数以及脉冲响应函数，并进行卷积计算得到辐射力和干扰力，对时域微分方程积分即可解得船舶的运动响应。Graefe^[28]（2014）将稳态扰动势分为两部分，分别由平底上下稳定源进行模拟，满足了平底的边界条件，进而分析了浅水中的耐波性问题。Martic^[29]（2014）基于线性势流理论，将波浪漂移力作为二阶波浪荷载计算了附加阻力并利用传递函数给出了船舶的响应幅值。比较了完整船和受损船的耐波特性。

综上所述，二维切片理论虽然有诸多限制，但是计算简便，耗时少，同时在不断改进和发展中，因此目前仍然是计算船舶在波浪中运动响应的最普遍的方法。

（2）二维剖面水动力系数研究

切片法计算船舶在波浪中的载荷和运动情况的一个重要条件首先就是需要计算各个横剖面的二维水动力系数，即剖面的附加质量和阻尼系数，这是切片法的基础。目前，计算二维剖面水动力系数的方法主要有二参数保角变换法，即 Lewis 剖面法，源汇分布法以及有限元法。

早在 1929 年，学者 Lewis^[30]便率先利用切片的概念来研究船体结构在高频率震动时的水动力问题，进而提出用简单的剖面参数，如剖面的宽度、吃水以及横剖面面积等来定义剖面，这样定义的剖面又叫做 Lewis 剖面。

Havelock^[31] (1942) 和 Ursell^[32] (1949) 利用满足波浪条件以及柱体表面条件的一系列脉动源放置于柱体表面来替代做垂荡运动的二维柱体，认为二维柱体所受阻尼力在单位时间内所做的平均功等于其在振荡时单位时间内向两边传播的波能。Grim^[33] (1960) 将 Ursell 所求解得到的二维圆柱体在水表面振荡的边值问题的解加以变形，将圆柱问题的解通过二参数的保角变换映射到 Lewis 剖面上，便可求得问题的解。

Lewis 剖面仅在剖面系数上与原剖面相同，而实际形状却并不相同，这对于常规船型的横剖面是满足精度要求的，但对于一些横剖面面积系数较小，或者包括球鼻艏切面面积导致面积系数过大的剖面，Lewis 剖面在精度上便有所欠缺。Landweber 等^[34] (1957) 将 Lewis 的二参数保角变换推广到更一般 N 参数形式。日本学者 Tasai^[35] (1960) 采用多个参数而非两个参数进行映射，将满足要求的源汇放置在坐标原点，使其产生满足辐射条件的速度势，同时选取另一个速度势，使其和源汇产生的速度势叠加来满足所有的边界条件，根据该叠加速度势便可求得剖面的二维水动力系数，这样使得方法的适用范围以及解得精度都有所改善，同时，Tasai^[36] (1960) 又对足够多的船体横剖面外形进行了计算，绘制出确定二维水动力系数的参数图谱。

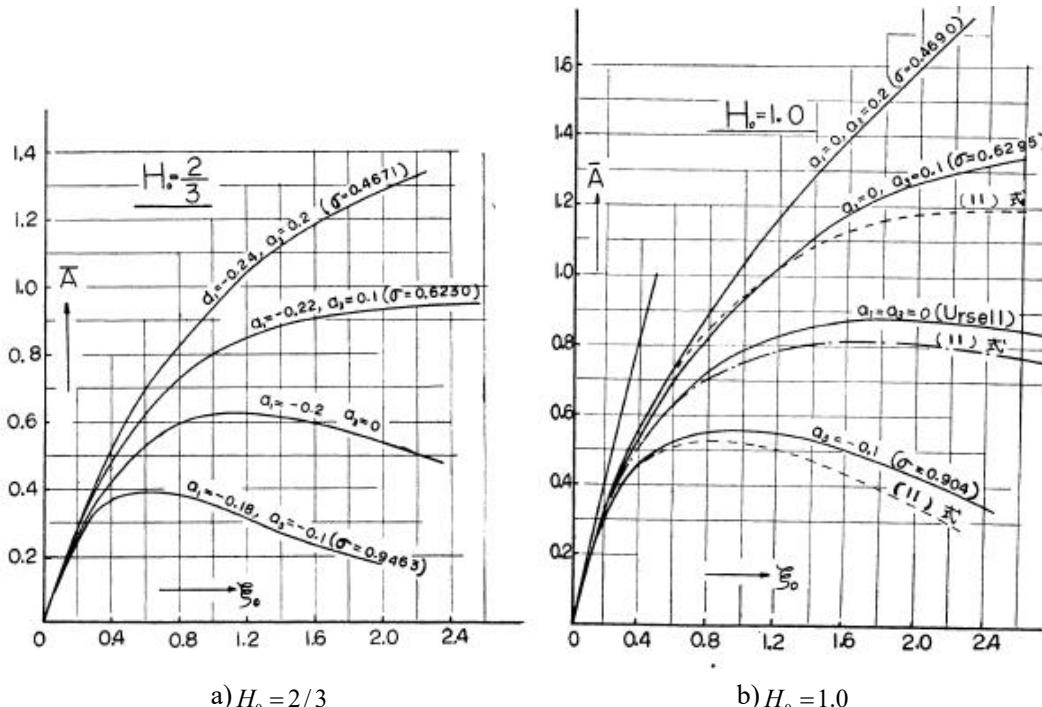


图 1-2 Tasai 绘制的计算水动力系数图谱^[36]
Fig.1-2 Tasai graphics for hydrodynamic coefficient calculation

Landweber 等^[37](1967)采用 Bieberbach 逆变换方法来进行映射转换。Smith^[38](1967) 将 Lewis 剖面进行改进，成功利用保角变换的方式将船体剖面转换成一个圆形剖面，并且确定了让任意船体剖面达到要求精度的保角变换系数。

Von Kerczek 和 Tuck^[39](1969)提出了一种基于最小二乘法和 Newton-Raphson 方法的迭代方法用来改进保角变换的映射。De Jong^[40] (1973) 基于 Fourier 级数的正交性又提出了另一种方法。

与此同时，Frank^[41] (1967) 将点源分布在船体剖面周界来拟合外部流场，使其满足二维拉普拉斯方程以及各个边界条件，求解定解条件得到任意剖面的振荡速度势，进而求解船体表面压力分布。这种方法适用于各种形状的剖面，精度不受剖面形状影响，尤其是可以保证船舶首尾处较为复杂的剖面形状的精度。

随后，Bei 等^[42] (1974) 将有限元法应用到二维水动力系数的求解中，该方法同样可以计算任意剖面形状，还可以求解三维物体的附加值阿玲，但较为复杂。

除此之外，不少学者还对船舶的二维剖面进行了试验研究，Porter^[43] (1960) 测量了鼓形圆柱体上的总垂直力和压力分布。Paulling 和 Richardson^[44] (1962) 在四个不同的剖面上进行了实验，测量了总力、压力分布、波高和相位角。Vugts^[45] (1968) 在五个不同的截面上进行了升沉、首摇和横摇运动的实验，并将实验结果与基于多参数保教变换的理论方法进行了比较。结果表明理论方法在升沉和首摇运动上与试验值吻合较好。

Westlake 等^[46] (2000) 提出了一种多参数保角映射技术，可以准确描述现实船舶剖面。利用物理面和参考平面间的单一坐标关系，将圆变换到任意形状部分的非线性方程组进行线性化，这样可以计算弓形凹入部分以及舱底龙骨和轴支架的特殊剖面，并且可以计算不对称剖面。

(3) 以耐波性为目标的船型优化研究

无论对民船还是军舰来说，耐波性都是船舶及其重要的性能之一，良好的耐波性可以保证船舶的安全性以及军舰的作战能力。然而长久以来，船舶型线优化多侧重于船舶的快速性优化，基于船舶耐波性的型线优化研究不是很多，而船舶快速性优良的船舶在波浪上航行的性能并不一定优良，因此，船舶耐波性的优化成为当下的一个重要课题。

上世纪 90 年代末，各国的学者开始利用最优化理论，使用较为简单的优化算法，在性能评估上采用基于势流理论的较为快速的兴波阻力计算方法对中高速船舶的型线进行优化研究，以降低船舶的兴波阻力，并展开了广泛的研究^[5-11]。

Peri 和 Campana^[47-48] (2003) 通过 Bezier 曲面进行船型变换，得到 172 个样本船型并构建近似模型，建立变形量与性能评估结果之间的函数关系，基于势流理论原理对总阻力以及耐波性指标，即船舶的垂荡和纵摇运动进行了多目标优化，优化后总阻力降低 5.38%，垂荡运动的峰值降低了 2.54%，纵摇运动峰值降低了 5.42%。

之后，Tahara 和 Peri、Campana^[49-51] (2006, 2008) 分别采用 NURBS 方法和自由变形方法 (FFD) 两种方法变换船型，利用 RANS 方法计算阻力，利用切片理论进行纵摇运动和横摇运动的计算，来同时优化船舶的阻力性能和耐波性能，得到优化船型。

由于船舶的静水中的水动力性能与其耐波性能之间存在着权衡，通常不能获得推进与耐波这两个函数的全局最优，Zalek^[52] (2007) 通过利用多目标种群进化算法，来搜索同时考虑推进性能和耐波性能的全局非占优解或 Pareto 前沿。Kim 和 Yang^[53] (2010) 采用 RBF 和平移法对船舶局部和整体的型线进行了变换，基于 Neumann-Michell 势流理论和 Bale 的耐波性指数对 DTMB 5415 进行了船舶阻力和耐波性优化，并采用多目标遗传算法对三个航速下的阻力和耐波性进行综合优化，最终得到系列优化船型。

Campana 等^[54-57] (2009, 2010, 2012) 采用 FILLED, DIRECT, DDFPSO 等不同的优化算法对集装箱船 S175 顶浪航行时的垂荡幅值响应算子进行了优化，结果表明由于 FILLED 算法本身具有局部搜索步骤所以 DDFPSO 以及 DIRECT 优化算法需要至少 600 次高精度评价，而 FILLED 最少需要 320 次高精度评价就可以达到相同的减小幅度。

Bagheri^[58] (2014) 利用遗传算法，以首垂线向后 0.15 倍垂线间长处的垂向运动幅值作为目标函数，在两个航速下对 S60 船型和 Wigley 船型在顶浪规则波中的耐波性进行了优化，优化后垂向运动响应幅值分别下降 33% 和 27%。

北约 RTO 任务小组 AVT-204^[59] (2015) 整合了欧美六个国家数值试验水池的 SBD 方法，以 DTMB 5415 船型为优化对象，以阻力性能和耐波性为优化目标对各个 SBD 方法进行了测试。在这些 SBD 方法中，水动力性能评估手段包括势流方法和 RANS 方法；设计修正方法包括正交基函数的线性扩展、基于控制点上的松弛系数法，以及基于 CAESES/FRIENDSHIP 框架的参数化建模等；多目标优化算法包括确定性粒子群优化算法的多目标扩展、序列二次规划方法，以及非占优排序遗传算法。结果表明意大利 INSEAN 水池和美国爱荷华州大学采用的低保

真度求解器达到了最好的优化效果，阻力性能优化了 10%，同时耐波性能优化了 9%。

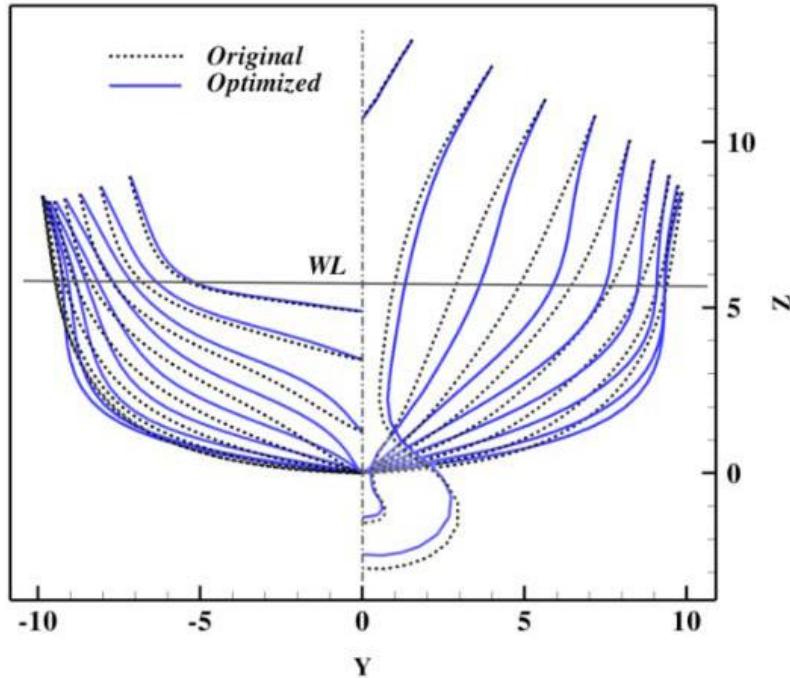
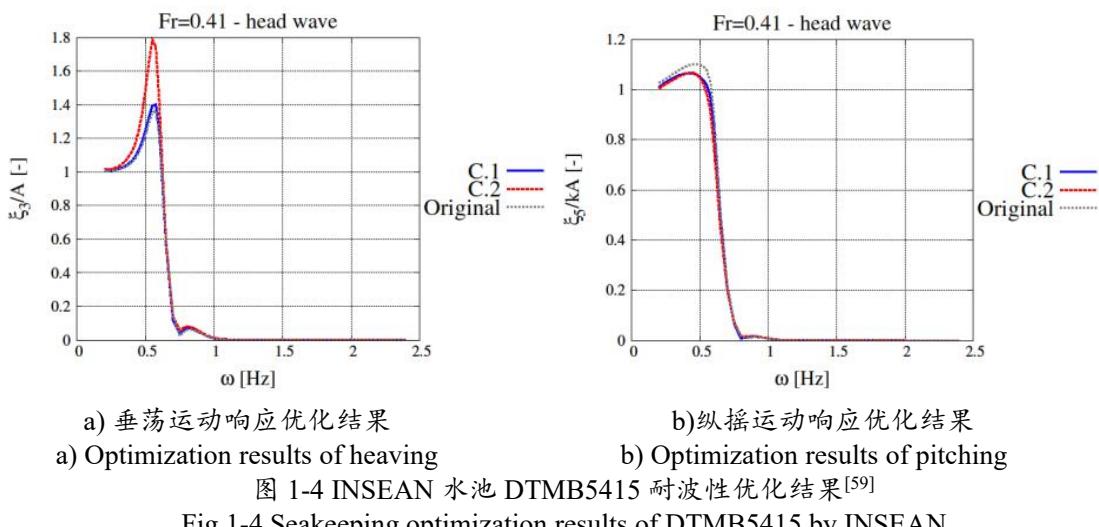


图 1-3 INSEAN 水池 DTMB5415 优化型线对比图^[59]
Fig.1-3 Comparison of Optimal and initial hull lines of DTMB5415 by INSEAN



Vernengo 等^[60](2015)对某小水面高速双体船的阻力和耐波性能进行了优化，兴波阻力和耐波性均采用线性 Rankine 源三维面元法进行计算，采用多目标全局

遗传算法，同时给定全局以及局部变形，最终优化后，兴波阻力下降 15%，垂向运动加速度下降了 30%。

目前，国外学者对以船舶耐波性为目标的船型优化研究已有一些成果，应用到船型优化中的耐波性评估方法主要集中在基于势流理论的二维切片理论和三维面元法等，也有少数学者使用基于粘性流方法对船舶耐波性进行评估，而优化的目标主要集中在船舶在波浪中的运动，以及包括阻力在内的多目标优化。

1.2.2 国内研究进展

(1) 船舶在波浪中的运动研究

国内学者对船舶在波浪中运动的研究紧随国际的步伐，戴遗山等^[61]（1977）利用切片法加多系数保角变换将单位半圆高精度地拟合成任意形状的二维剖面后，推导出船舶迎浪前行时，推导出剖面的升沉附加质量和阻尼系数，计算船舶垂荡和纵摇运动的水动力系数以及波浪力，求解纵向运动耦合方程组，得到船舶迎浪航行于规则波中的垂荡、纵摇运动幅值。随后，在此基础上，戴遗山等^[62]（1978）又用同样的基本方法进行延伸计算船舶在任意遭遇角下规则波中五自由度的运动幅值以及二维不规则波中五自由度运动的平均幅值等。

与此同时，方钟圣^[63]（1978）对于船舶在不规则横波中的非线性横摇运动的计算方法，提出了一种基图谱的估算船舶横摇角的实用计算方法，并将计算结果与非线性横摇运动时域解进行对比，结果表明图谱方法是简单有效的。

于家鹏等^[64]（1979）根据 Smith[38]提出的 Lewis 剖面法的改进方法，提出了更方便在计算机上进行计算的多参数保角变换方法，并进行了二维剖面水动力系数的计算，同时根据切片法计算了船舶在波浪中的运动。

孙伯起等^[65]（1984）阐述了三维势流方法的数值方法，给出了计算运动响应函数的理论基础以及计算公式，包括二阶力（矩）的计算公式，并对对称剖面的物体给出循环矩阵方法求解方程，使计算内存降低，提升了计算速度。

徐能兹等^[66]（1984）就日本 S-175 集装箱船舶的波浪载荷进行了船模试验与线性切片理论的计算结果进行比较，结果表明利用切片理论计算的船舶波浪载荷沿纵坐标分布情况与试验值存在较大差异，但纵向运动结果与试验较为吻合，一般来说，线性切片理论可以用来预报快速船舶的纵向运动。

刘应中和缪国平^[67]（1985）阐述了规则波对固定二维物体的二阶非线性影响并求得二阶绕射势，进而求得了二阶定常波浪力，结合切片理论，可以预报船舶以及半潜平台的二阶波浪力和二阶运动。

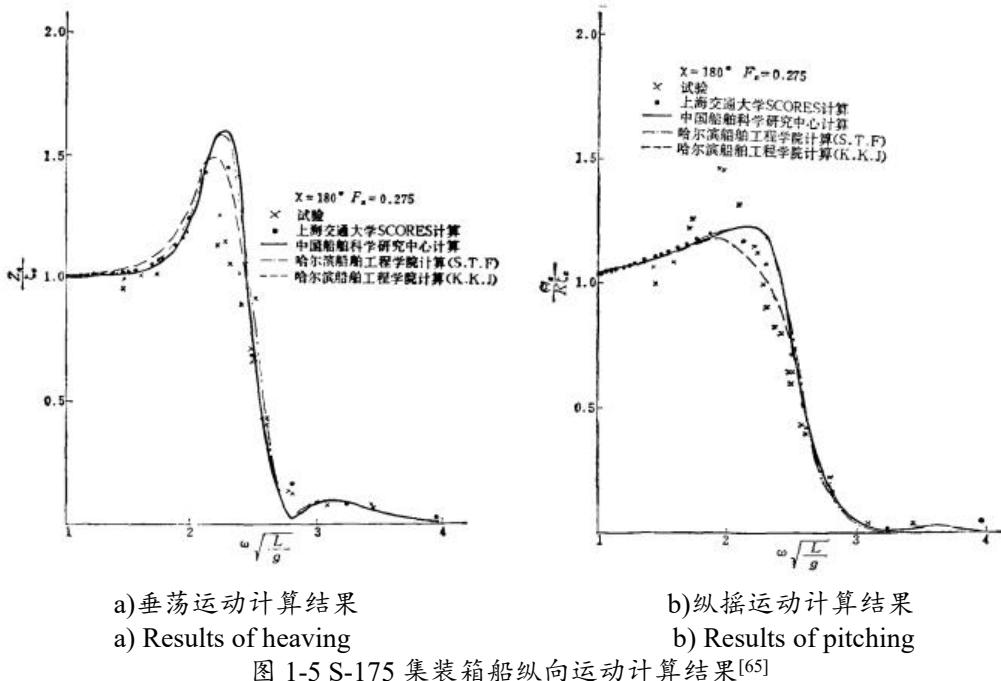
图 1-5 S-175 集装箱船纵向运动计算结果^[65]

Fig.1-5 Longitudinal motion results of S-175

贺五洲等^[68]（1986）提出利用简单格林函数求解三维物体做各项振荡时水动力系数的数值方法，并编制程序，计算了水面振荡半球、圆盘等典型情况的水动力系数，将水面振荡的方盒三维计算结果与切片理论结果进行比较，结果表明基于简单格林函数的三维方法具有效率高，适用性广的优点。

陈超核等^[69]（1989）提出了一种预报船舶在迎浪规则波中升沉纵摇耦合运动以及垂向弯矩的非线性响应的方法。在原有的切片法的基础上，增加非线性的浮力项、流体动量以及阻尼力项，并求解运动方程的频域解，结果表明非线性切片理论的计算结果与试验结果较为一致。

段文洋^[70]（1995）研究了从频域一阶理论到二阶理论，从时域线性理论到非线性理论，系统研究了船舶在波浪中运动的水动力问题，提出了基于格林函数线元积分的解析公式，大幅提高时域计算的精度。系统阐述了二维剖面水动力的线性及非线性计算，根据频域和时域的方法编写了全套计算程序，为二维水动力问题提供完备的手段。

贺五洲等^[71]（1998）将预报船舶运动和波浪载荷的切片理论进行了扩展，应用到船舶在有限水深中迎浪航行的波浪力和纵向运动进行求解，并且将表面积变化后引起的船舶受力和运动的非线性考虑进去，结果表明该方法便捷实用，可用于船舶大幅纵向运动的预报中。

高速细长体理论被提出后，国内学者开始对二维半理论进行研究。段文洋等^[72]（2001）引入瞬态自由表面格林函数，提高了数值计算的效率和健全性。随后，段文洋等^[73]（2002）又对高速双体船 Model5b 的辐射水动力应用高速细长体理论进行计算，并给出在顶浪规则波中的垂向运动幅值响应的理论预报结果。

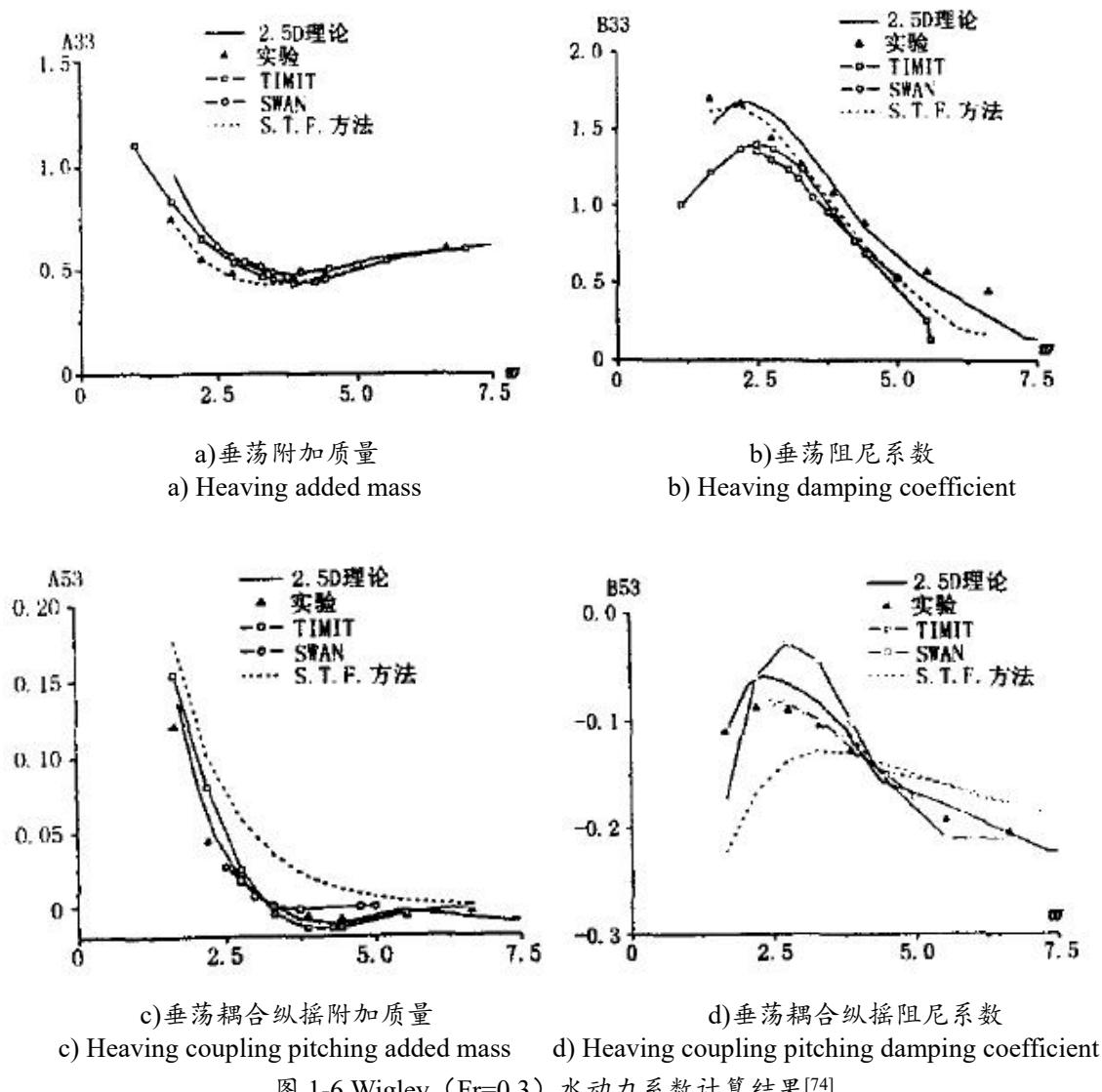


图 1-6 Wigley ($Fr=0.3$) 水动力系数计算结果^[74]
Fig.1-6 Hydrodynamic coefficient results of Wigley ($Fr=0.3$)

马山^[74]（2002）采用二维时域格林函数求解告诉细长体理论下的流场以及船舶水动力系数等，将结果与切片理论计算结果进行对比，并分析了自由面对船舶运动水动力系数的影响。段文洋和马山^[75]（2003）根据二维半理论对

Wigley 船模的纵向运动水动力系数以及波浪力(矩)进行计算, 将结果与 STF 法、三维时域方法以及船模试验数据进行对比, 结果表明二维半理论计算结果和三维方法给出的预报结果精度相当, 且计算效率高, 适合高速船舶的耐波性预报。戴仰山等^[76] (2007) 对二维半方法进行了系统的阐述。

张海彬^[77] (2004) 利用基于三维频域格林函数的分布源法, 对 FPSO 储油轮以及半潜式平台的波浪载荷进行了研究, 结果表明三维方法的计算结果较切片法的计算结果更接近于试验值。朱仁传等^[78] (2007) 利用在时域内直接给出基于时域格林函数的积分方程的方法, 由物面边界条件求解到物理量的时历。王毅等^[79] (2012) 应用 Rankine 源三维面元法对三体船在波浪中的纵摇和升沉进行了计算, 结果表明三维 Rankine 源法的计算时间比三维移动脉动源方法更短, 且较好地反映了三体船侧体布局对运动响应的影响。

(2) 以耐波性为目标的船型优化研究

国外基于 CFD 技术的船型优化不断发展, 并取得良好进展, 国内学者也开展关于船型优化的研究。

国内船型优化研究起步较晚, 冯佰威和刘祖源^[80] (2008) 对于国内外的船型优化研究进展进行综述, 并提出基于 CFD 技术的船型优化的关键技术和优化流程。冯佰威、刘祖源等^[81-87] (2009 ~ 2010) 以降低总阻力为目标, 对某集装箱船进行了首部型线优化设计, 在船型变换方法上采用叠加融合方法, 水动力性能评估方面, 兴波阻力利用 SHIPFLOW 软件计算, 摩擦阻力以及粘压阻力采用 Holtrop 方法进行估算, 优化算法上采用遗传算法, 并且将这些模块用 iSIGHT 优化平台集成起来。

杨铭^[88] (2010) 以金枪鱼围网渔船为优化对象, 利用 iSIHGT 多学科优化软件平台, 搭构了一个基于此优化平台软件的船型生成和耐波性优化优化系统。其中船型生成系统是通过对船型参数的改变, 进而改变船体型线; 耐波性优化系统是基于 Wasim 的耐波性计算结果所绘制图谱的耐波性插值计算程序, 以有义纵摇角、砰击程度、首部垂向加速度、有义横摇角等船舶运动响应指标为目标, 最终得到优化船型。

王殿飞等^[89] (2011) 对一艘主体和片体均为 Wigley 船型的五体船在波浪中的运动和增阻性能的片体布局的多目标优化研究, 运动和增阻均采用三维面元法进行计算, 以片体相对于主体的位置为设计变量, 采用遗传算法进行了优化, 得到了 Pareto 优化解集。

邱辽原等^[90]（2011）以船舶阻力和耐波性为目标，对某油船进行了型线优化。这几，同样也采用 iSIGHT 优化平台进行集成，利用叠加融合法进行船型变换，最后采用多目标遗传算法来求解 Pareto 优化解集，最终总阻力降低了 3%。

王道远^[91]（2016）利用 Massurf 软件建立滑行艇的船体模型，并进行船型变换，将船体模型导入 Gambit 软件进行有限元划分，并将有限元模型导入 Hydrostar 软件进行耐波性计算，对滑行艇的耐波性进行型线优化设计，最后利用层次分析法选出最优船型。

陈悦等^[92]（2016）基于 ISIGHT 平台对三体维护船侧体布局进行了阻力和耐波性能的多目标优化研究，三体维护船在不规则波中运动的总阻力、垂荡纵摇有义值作为优化目标，设计变量为侧体的纵向及横向位置，采用多目标遗传算法进行优化，最终获得阻力和耐波综合最优的三体维护船的侧体布局。

王刚成等^[93]（2018）对 KCS 标准船模进行了以船舶兴波阻力、垂荡和纵摇幅值的多目标优化，利用 Rankine 源非线性势流理论和三维频域面元法对 KCS 的耐波性进行评估，利用遗传算法进行多目标优化设计，优化船字设计航速下兴波阻力降低 16.01%，垂荡纵摇运动有益幅值分别降低 1.69% 和 4.81%。

本课题组吴建威和刘晓义等^[94-98]（2014～2017）对船型变换方法进行了研究，包括自由变形方法、平移法以及径向基函数方法；同时对各类优化算法以及近似技术进行研究，包括多目标遗传算法、基于随机搜索的遗传算法以及基于梯度的序列二次规划算法，通过 C++ 程序形成了一套本课题组自主开发的船型优化软件 OPTShip-SJTU，其中水动力性能评估模块包括基于 Neumann-Michell (NM) 理论的势流方法和基于 RANS 方程的粘性流方法。同时应用 OPTShip-SJTU 对 Wigley 船模、Series60 船模、DTMB5415 船模等进行了单目标和多目标优化设计，并取得了一定的优化效果。

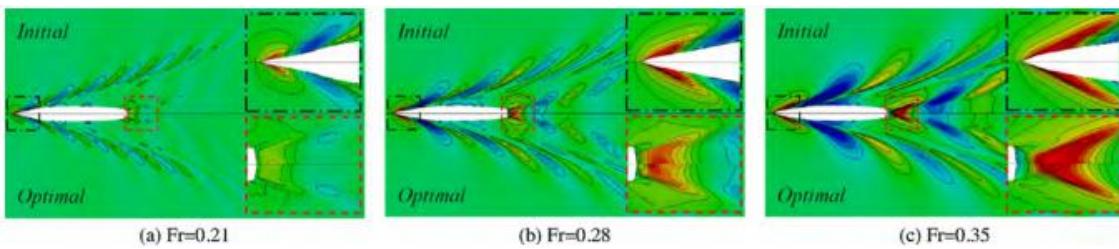


图 1-7 DTMB5415 优化前后兴波对比^[98]

Fig.1-7 Comparison of wave pattern between initial hull and optimal hull of DTMB

本课题组缪爱琴等^[99]（2018）使用 OPTShip-SJTU 船型优化软件对 KCS 船模进行了垂荡和纵摇运动的多目标优化设计，利用课题组自主开发的基于 RANS 方

程的粘性流求解器 naoe-FOAM-SJTU 求解器对 KCS 的垂荡和纵摇运动进行评估，采用多目标遗传算法进行优化设计，最终得到两条最优船型，第一条优化船型垂荡运动幅值降低 9.94%、纵摇运动幅值降低 1.69%，第二条优化船型垂荡运动幅值降低 9.6%、纵摇运动幅值降低 2.89%。

综上所述，国内学者对船型优化的研究紧跟国际步伐，研究了不同几何重构方法、水动力性能评估方法、以及优化算法等。但是大多数研究是基于商业软件或对其的二次开发，缺少自主创新，同时优化目标大多数集中在阻力的降低，而对耐波性的优化较少。

1.3 本文主要工作

本论文根据切片理论编写了一套计算船舶在线性规则波中垂荡及纵摇运动的评估程序，其中二维剖面水动力系数计算采用基于多参数保角变换法的 Tasai 图谱进行插值计算，降低评估时间，并利用 Wigley 船模和 Series60 船模对程序的计算结果进行验证，最后对 KCS 船模进行以耐波性为目标船型优化设计，在运动评估计算时采用本文编写的评估程序，最终得到垂荡运动幅度降低的优化船型并利用 RANS 方法对优化结果进行验证，结果表明本程序可以应用到以耐波性为目标的船型优化设计中。

本文具体工作如下：

(1) 了解船舶在波浪中的运动的各类方法，掌握切片理论的基本原理，根据参考文献及相关教材，分析推导船舶在线性规则波中的运动时的力学关系以及运动分析，推导求解船舶船体运动的附加质量和阻尼系数，推导船舶所受波浪力(矩)的公式，推导船舶在规则波中垂荡纵摇运动的微分方程组，建立船舶在波浪中垂荡纵摇运动的数学模型。

(2) 了解二维剖面水动力系数的各种计算方法，掌握多参数保角变换方法的原理及在计算水动力系数时的应用，掌握 Tasai 图谱的绘制原理，根据 Tasai 图谱对船舶剖面进行计算得到无因次水动力质量以及无穷远处波幅与船体振荡运动幅值之比，求解船体剖面的附加质量和阻尼系数。

(3) 根据切片理论，利用数值积分方法计算船体水动力系数，利用三次样条曲线插值方法对 Tasai 图谱进行插值计算，利用追赶法对插值方程进行求解，利用 Gauss 列主元消去法求解船舶垂荡纵摇运动耦合方程组，集成各种数值计算方法，基于 C++ 程序语言，编写了一套快速计算船舶在波浪中垂荡纵摇运动的评估程序。该程序可以得到船舶在波浪中纵向运动的水动力系数、所受波浪力(矩)以及垂

荡纵摇频率响应。

(4) 以 Wigley 船模和 Series60 船模为对象, 利用本文程序计算了一些列波浪条件下的船体的垂荡、纵摇及其耦合运动的附加质量和阻尼系数、船体所受波浪力和绕 y 轴的波浪力矩、以及船体垂荡纵摇运动的频率响应。并与试验值进行对比, 结果表明本文程序的大多数计算结果与试验结果较为吻合, 一些结果存在一定误差但在可接受范围内, 验证了本文自编程序的快速性和有效性, 为船型优化设计提供条件。

(5) 最后, 本文以 KCS 集装箱船模为对象, 首先利用本文自编程序计算了其在各个波浪条件下的垂荡纵摇运动, 并与试验值进行比对, 结果表明在某些波浪条件下, 程序计算结果与试验值较为吻合, 在该波浪条件下, 利用课题组自主开发的船型优化软件 OPTShip-SJTU, 进一步对 KCS 船模进行了以降低垂荡运动幅值为目标的船型优化设计, 得到垂荡运动幅值最小的优化船型, 并利用基于 RANS 方法的 naoe-FOAM-SJTU 求解器计算母型船和优化船的相关数据进行比较, 验证优化结果的可靠性。

(6) 目前本课题组对以耐波性为目标的船型优化研究中, 主要使用基于 RANS 方程的粘性流方法进行船舶运动的计算, 虽然评估结果精确可靠, 但是计算时间较长, 使优化周期增长。利用本文编写的程序对船舶在波浪中的纵向运动进行评估可以极大缩短评估时间, 进而降低船型优化时间, 节约计算资源, 适合作为性能的初步评估手段。

本文各章节主要内容概括如下:

第一章介绍了课题的研究背景与意义, 对船舶在波浪中的运动、二维剖面水动力系数计算、以及以耐波性为目标的船型优化设计三个方面, 进行了国内外研究进展的梳理, 对现阶段的研究成果和未来的方向提出看法, 最后详细阐述了本文的主要工作和框架。

第二章主要介绍程序的理论基础。首先对船舶在波浪中运动进行概述, 进而介绍的基于线性势流理论的切片法。阐述了保角变换法求解二维切片水动力系数。最后介绍了田才图谱的原理、适用条件和使用方法。

第三章呈现了本文自主编写的程序流程图, 然后对程序中使用的数值方法, 包括数值积分方法、三次样条插值方法、追赶法求解插值方程、Gauss 列主元消去法求解线性方程组等进行了简要的介绍, 最终形成了船舶波浪中纵向运动评估程序。



17004307

第四章以 Wigley 船模和 Series60 船模为对象进行计算，来验证本文程序的有效性，计算得到二者在各工况下的垂荡纵摇及其耦合运动的水动力系数、波浪力（矩）以及垂荡纵摇运动幅值响应。基本与试验值吻合，可以较为准确地计算船舶的纵向运动。

第五章以 KCS 船模为优化对象，利用 OPTShip-SJTU 船型优化软件开展船体型线优化设计。采用平移法方法对船舶整体进行船型变换，以降低船舶垂荡幅值为目标进行优化。利用本文开发的程序对样本船进行评估，得到垂荡运动幅值响应。构建 Kriging 近似模型，利用遗传算法求解最优船型。最后利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对优化结果进行验证，结果表明优化结果是可靠的。

第六章对本文的工作内容进行了梳理总结，并对未来的研究工作提出展望。

第二章 船舶在波浪中垂荡纵摇运动分析

2.1 船舶在波浪中运动概述

首先定义坐标系，本文在描述船舶在波浪中运动时，坐标系选取随船行进的直角坐标系 $O-xyz$ ， z 轴穿过船舶重心 G ，垂直向上， xOy 平面与静水面重合， x 轴正向为船舶的前进方向，整个坐标系为右手坐标系。

首先考虑无航速时，船舶在规则波下的微幅运动，则船舶在规则波中作六自由度运动， η_1 、 η_2 、 η_3 分别表示纵荡、横荡和垂荡， η_4 、 η_5 、 η_6 分别表示横摇角、纵摇角和首摇角。入射波为规则波，将波幅和船舶的运动作为一阶无穷小，忽略二阶以及更高阶的无穷小，则将问题转化为线性问题，适用于叠加原理。

根据线性势流理论，由于船体无航速，则船体周围流场总速度势仅由非定常势组成，为了求得稳态解，将总速度势的时间和空间因素剖离，可以写成如下形式：

$$\Phi(x, y, z, t) = \operatorname{Re} [\varphi(x, y, z) e^{-i\omega t}] \quad (2.1)$$

根据叠加原理，总速度势由入射波势 Φ_0 、辐射势 $\Phi_k (k=1 \sim 6)$ 以及绕射势 Φ_7 和构成：

$$\Phi(x, y, z, t) = \sum_{i=0}^7 \Phi_i(x, y, z, t) \quad (2.2)$$

$$\varphi(x, y, z) = \varphi_0 + \sum_{i=1}^6 v_i \varphi_i + \varphi_7 \quad (2.3)$$

其中， v_i 表示含有相位差的复振幅。

根据伯努利方程，仅考虑一阶动压力，且不计 $-\rho zg$ 项，则船体表面一点动压カ：

$$p(x, y, z, t) = -\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \operatorname{Re} \left[i \rho \omega (\varphi_0 + \sum_{i=1}^6 v_i \varphi_i + \varphi_7) e^{-i\omega t} \right] \quad (2.4)$$

将动压力 p 沿船体平均湿表面积 S_H 积分，则可以得到船体所受的流体动力和动力矩：

$$F_k = \iint_{S_H} p n_k ds = \operatorname{Re} \left[(f_{0k} + \sum_{i=1}^6 T_{ik} v_i + f_{7k}) e^{-i\omega t} \right] \quad (2.5)$$

其中, $f_{0k} = i\rho\omega \iint_{S_H} \varphi_0 n_k ds$ 为入射波的力 (矩);
 $f_{7k} = i\rho\omega \iint_{S_H} \varphi_7 n_k ds$ 为绕射波的力 (矩);
 $T_{jk} = i\rho\omega \iint_{S_H} \varphi_j n_k ds$ 为船体做单位速度 j 自由度运动时收到 k 方向的辐射力
(矩)。

对辐射力 (矩) 进行如下分解:

$$\operatorname{Re}(T_{jk} v_j e^{-i\omega t}) = \rho \operatorname{Re}(i\omega e^{-i\omega t} v_j \iint_{S_H} \varphi_j n_k ds) = -\ddot{\eta}_j A_{kj} - \dot{\eta}_j B_{kj} \quad (2.6)$$

$$A_{kj} = \rho \iint_{S_H} \operatorname{Re}(\varphi_j) n_k ds \quad (2.7)$$

$$B_{kj} = \rho\omega \iint_{S_H} \operatorname{Im}(\varphi_j) n_k ds \quad (2.8)$$

辐射力 (矩) 由两部分组成, 其中第一部分和船体的加速度成正比, 比例系数 A_{kj} 为附加质量, 第二部分与船体的速度成正比, 比例系数 B_{kj} 为阻尼系数。

将辐射力 (矩) 分解后, 船体所受流体动力 (矩) 可以表达为:

$$F_k = \operatorname{Re}[(f_{0k} + f_{7k}) e^{-i\omega t}] - \sum_{j=1}^6 (\ddot{\eta}_j A_{kj} + \dot{\eta}_j B_{kj}) \quad (k=1 \sim 6) \quad (2.9)$$

由船体在规则波中线性响应的物面条件,

$$\frac{\partial \varphi_j}{\partial z} = n_j \quad (j=1 \sim 6), \quad \frac{\partial \varphi_7}{\partial n} = -\frac{\partial \varphi_0}{\partial n} \quad (2.10)$$

绕射波的力 (矩) f_{7k} 可由辐射势 φ_k 和入射势 φ_0 来表达:

$$f_{7k} = i\rho\omega \iint_{S_H} \varphi_k \frac{\partial \varphi_0}{\partial n} ds \quad (2.11)$$

船体除了受到流体动力 (矩) 外, 还受到静力 (矩) 的作用, 即伯努利公式中 $-\rho zg$ 项。仅考虑一阶力, 忽略二阶及以上的力, 静力可表达为:

$$\mathbf{F} = \rho g \forall \mathbf{k} - \rho g A_{wp} (\eta_3 - \eta_5 x_f) \mathbf{k} \quad (2.12)$$

$$x_f = \frac{1}{A_{wp}} \iint_{wp} x dx dy \quad (2.13)$$

其中, \forall 为船舶的排水体积; wp 为水线面; A_{wp} 为水线面面积。

静力矩的一阶部分可表达为:

$$\mathbf{M} = -\rho g (\eta_4 z_B \forall + \eta_4 L_{22}) \mathbf{i} - \rho g (\eta_5 z_B \forall + \eta_5 L_{11} - A_{wp} \eta_3 x_f) \mathbf{j} \quad (2.14)$$

其中,

$$z_B = \frac{1}{\forall} \iiint_V z dv, \quad L_{jj} = \iint_{wp} x_j^2 dx_1 dx_2 \quad (2.15)$$

同时，静力矩还需考虑船体重力的影响，船体重力 $\mathbf{G} = (0, 0, -mg)$ ， m 为船体质量，重心位置记为 $\mathbf{r}_G = (0, 0, z_G)$ ，由重力引起的静力矩为：

$$(\boldsymbol{\eta}_R \times \mathbf{r}_G) \times \mathbf{G} = (mgz_G\eta_4, mgz_G\eta_5, 0) \quad (2.16)$$

再由质量矩阵，最终可以得到无航速船体在规则波中的线性运动方程组：

$$\left\{ \begin{array}{l} (m + A_{11})\ddot{\eta}_1 + B_{11}\dot{\eta}_1 + A_{13}\ddot{\eta}_3 + B_{13}\dot{\eta}_3 + (mz_G + A_{15})\ddot{\eta}_5 + B_{15}\dot{\eta}_5 \\ \quad = \text{Re}[(f_{01} + f_{71})e^{-i\omega t}] \\ A_{31}\ddot{\eta}_1 + B_{31}\dot{\eta}_1 + (m + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 \\ \quad = \text{Re}[(f_{03} + f_{73})e^{-i\omega t}] \\ (mz_G + A_{51})\ddot{\eta}_1 + B_{51}\dot{\eta}_1 + A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 + (I_{22} + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 \\ \quad = \text{Re}[(f_{05} + f_{75})e^{-i\omega t}] \\ (m + A_{22})\ddot{\eta}_2 + B_{22}\dot{\eta}_2 + (A_{24} - mz_G)\ddot{\eta}_4 + B_{24}\dot{\eta}_4 + A_{26}\ddot{\eta}_6 + B_{26}\dot{\eta}_6 \\ \quad = \text{Re}[(f_{02} + f_{72})e^{-i\omega t}] \\ (A_{42} - mz_G)\ddot{\eta}_2 + B_{42}\dot{\eta}_2 + (I_{11} + A_{44})\ddot{\eta}_4 + B_{44}\dot{\eta}_4 + C_{44}\eta_4 + (I_{13} + A_{46})\ddot{\eta}_6 + B_{46}\dot{\eta}_6 \\ \quad = \text{Re}[(f_{04} + f_{74})e^{-i\omega t}] \\ A_{62}\ddot{\eta}_2 + B_{62}\dot{\eta}_2 + (I_{31} + A_{64})\ddot{\eta}_4 + B_{64}\dot{\eta}_4 + (I_{33} + A_{66})\ddot{\eta}_6 + B_{55}\dot{\eta}_6 \\ \quad = \text{Re}[(f_{06} + f_{76})e^{-i\omega t}] \end{array} \right. \quad (2.17)$$

其中，

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{33} = \rho g A_{wp} \\ C_{35} = C_{53} = -\rho g \iint_{wp} x dx dy \\ C_{44} = \rho g \forall (z_B - z_G) + \rho g \iint_{wp} y^2 dx dy \\ C_{55} = \rho g \forall (z_B - z_G) + \rho g \iint_{wp} x^2 dx dy \end{array} \right. \quad (2.18)$$

上述微分方程组可以分为两组，前三个微分方程可以求解纵荡 η_1 、垂荡 η_3 、纵摇 η_5 三个自由度的运动；后三个微分方程可以求解横荡 η_2 、横摇 η_4 、首摇 η_6 三个自由度的运动。

2.2 基于线性势流理论的切片法

由于求解船体表面的流体载荷是三维流动问题，而且直接求解船体周围的辐射势和绕射势不容易计算，因此，目前常用切片法预报船舶在波浪中行进时的运动，切片法无需求解三维有航速的边值问题，仅需要求解船舶各个横剖面的二维零航速的水动力问题即可，是一种可应用到工程实际的理论计算方法。

2.2.1 切片法的基本假设

首先，切片法需要对船体和波浪条件做一系列假定：

- (1) 细长体假定，船体为细长体，船体表面的单位法线向量的三个方向分量中 x 方向忽略不计，流场沿纵向的变化很慢，可以用在各个横剖面处的二维流场来代表相近区域的三维流场；
- (2) 船舶航速不太高，波浪频率不太低；
- (3) 不计定常扰动势的影响。

2.2.2 入射波及遭遇频率

设船舶航速为 U ，入射波波幅为 ζ_a ，船舶与波浪的遭遇角为 μ ，波浪的波数为 k ，波浪频率为 ω ，则遭遇频率为：

$$\omega_e = \omega - U k \cos \mu \quad (2.19)$$

当船舶迎浪前行时，遭遇角 $\mu=\pi$ ，遭遇频率为：

$$\omega_e = \omega + \frac{U \omega^2}{g} \quad (2.20)$$

入射波的波形坐标为：

$$\zeta = \zeta_a \cos(kx \cos \mu + ky \sin \mu - \omega_e t) \quad (2.21)$$

2.2.3 船体运动方程

由前文所述，船舶在规则波中可以建立六自由度运动方程，且可以分为两组分别由三个微分方程组成的互不耦合的运动方程组，纵向运动方程组包括纵荡、垂荡和纵摇，横向方程组包括横荡、横摇和首摇。由切片理论，不考虑船舶的进退运动即纵荡，则由刚体力学可以得到船舶在波浪中运动的纵向及横向运动方程组，纵向运动方程组为：

$$\begin{cases} m \ddot{\eta}_3 = \int_L f_z(x, t) dx \\ J_{yy} \ddot{\eta}_5 = - \int_L x f_z(x, t) dx \end{cases} \quad (2.22)$$

横向运动方程组为：

$$\begin{cases} m\ddot{\eta}_2 = \int_L f_y(x, t) dx \\ J_{xx}\ddot{\eta}_4 = \int_L M_G(x, t) dx \\ J_{zz}\ddot{\eta}_6 = \int_L xf_y(x, t) dx \end{cases} \quad (2.23)$$

其中， J_{xx} 、 J_{yy} 、 J_{zz} 表示船体质量对 x 、 y 、 z 轴的惯性矩； $f_y(x, t)$ 和 $f_z(x, t)$ 分别为作用在单位长度船体上的流体力 $f(x, t)$ 的水平分量和垂直分量； M_G 为流体力 $f(x, t)$ 对 Gx 轴的矩。

2.2.4 船体切片的运动分析

设某一切片距离船体重心 G 的纵向距离为 x ，由于在实际情况下，船舶的纵摇和首摇角度很小，暂且忽略不计，则船体切片做平面运动。在切片平面内建立平面坐标系 yOz ，基点 O 为 Ox 轴与切片的交点。基点 O 的水平位移和垂向位移分别记为 $v(t)$ 和 $w(t)$ ，切片绕基点 O 旋转的角度移记为 $\theta(x)$ 。

由运动学理论，切片的平面位移和速度可表达为：

$$\begin{cases} v = \eta_2 + (x\eta_6 - \overline{OG}\eta_4) \\ w = \eta_3 - x\eta_5 \\ \theta = \eta_4 \end{cases} \quad (2.24)$$

$$\begin{cases} \dot{v} = \dot{\eta}_2 + (x\dot{\eta}_6 - \overline{OG}\dot{\eta}_4) - U\eta_6 \\ \dot{w} = \dot{\eta}_3 - x\dot{\eta}_5 + U\eta_5 \\ \dot{\theta} = \dot{\eta}_4 \end{cases} \quad (2.25)$$

2.2.5 船体切片的流体载荷分析

对于在波浪中航行的船舶，由于航速的存在，其周围流场不仅包括非定常势还包括定常势，因此，总速度势可以表达为：

$$\Phi(x, y, z, t) = [-Ux + \Phi_s(x, y, z)] + \Phi_T(x, y, z, t) \quad (2.26)$$

其中， $\Phi_s(x, y, z)$ 为定常扰动势，通常可以忽略不计； $\Phi_T(x, y, z, t)$ 为非定常势，包括已知的入射波势 Φ_W 、未知的绕射势 Φ_D 和辐射势 Φ_R 。

根据伯努利方程，船体表面上任一点的脉动压力：

$$p(x, y, z, t) = -\rho g z - \rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} = p_s + p_r + p_w + p_d \quad (2.27)$$

其中， $p_s = -\rho g z$ 表示由于船体运动而引起的流体静压力的变化；

$p_R = -\rho \frac{d}{dt} \Phi_R$ 表示由于船体运动而引起的辐射压力;

$p_W = -\rho \frac{d}{dt} \Phi_W$ 表示入射波所引起的波浪压力;

$p_D = -\rho \frac{d}{dt} \Phi_D$ 表示由于船体存在引起的绕射波压力。

将脉动压力 p 沿船舶横剖面的水下周界 C 进行积分, 便可得到作用于该横剖面纵向位置附近船体单位长度的水平流体力 $f_y(x, t)$ 、垂直流体力 $f_z(x, t)$ 以及流体力 $f(x, t)$ 对 Gx 轴的矩 M_G :

$$\begin{cases} f_y = \int_C p \frac{\partial y}{\partial n} dl = - \int_C pdz \\ f_z = \int_C p \frac{\partial z}{\partial n} dl = - \int_C pdy \\ M_G = \int_C p \left(y \frac{\partial z}{\partial n} - (z + \overline{OG}) \frac{\partial y}{\partial n} \right) dl = \int_C p [ydy + (z + \overline{OG})dz] \end{cases} \quad (2.28)$$

由上面公式的形式, 流体力 $f_y(x, t)$ 和 $f_z(x, t)$ 以及矩 M_G 与压力 p 相对应也可以分成四部分来表示, 即回复力 f_s 、辐射力 f_R 、绕射力 f_D 以及入射波浪力 f_W 。下面将会对每个组成部分进行分析。

船体横剖面的静吃水设为 T , 水线宽度设为 B , 浸湿面积设为 S 及其对 Gx 轴的静矩设为 S_G , 横剖面的二维水动力系数包括: 垂荡附加质量 m_z 、横荡附加质量 m_y 、横摇附加质量 m_θ 、垂荡阻尼系数 N_z 、横荡阻尼系数 N_y 、横摇阻尼系数 N_θ , 横荡及横摇的附加质量耦合力臂为 l_m 、横荡及横摇的阻尼系数耦合力臂为 l_n 。

(1) 静水回复力 f_s

当横剖面发生垂向位移 w 或转动角位移 θ 时, 静水回复力以及静水回复力矩为:

$$f_s : \begin{cases} f_{sy} = 0 \\ f_{sz} = \int_C (-\rho gw) dy = -\rho g B (\eta_3 - x\eta_5) \\ M_{sg} = \int_C (-\rho gy\theta) [ydy + (z + \overline{OG})dz] = -\rho g \left(\frac{1}{12} B^3 + S_G \right) \eta_4 \end{cases} \quad (2.29)$$

(2) 辐射力 f_R

单位复速度的二维辐射势与二维水动力系数之间存在一定关系, 可以将横剖面的辐射力由切片复速度与二维水动力系数表示:

$$f_R : \begin{cases} f_{RY} = -\frac{d}{dt} \left[\left(m_y + \frac{N_y}{i\omega_e} \right) \dot{v} + \left(m_y l_m + \frac{N_y l_n}{i\omega_e} \right) \dot{\eta}_4 \right] \\ f_{RZ} = -\frac{d}{dt} \left[\left(m_z + \frac{n_z}{i\omega_e} \right) \dot{w} \right] \\ M_{RO} = -\frac{d}{dt} \left[\left(m_y l_m + \frac{N_y l_n}{i\omega_e} \right) \dot{v} + \left(m_\theta + \frac{n_\theta}{i\omega_e} \right) \dot{\eta}_4 \right] \\ M_{RG} = m_{RO} - \overline{OG} \cdot f_{RY} \end{cases} \quad (2.30)$$

(3) 波浪主干扰力 f_w

由线性波浪理论，无限水深情况下的入射波势为：

$$\Phi_W(x, y, z, t) = i \frac{g}{\omega} \zeta_a e^{kz} e^{i(\omega_e t + kx \cos \beta - ky \sin \beta)} \quad (2.31)$$

入射波压力为：

$$p_w = \rho g \zeta e^{kz} = \rho g \zeta_a e^{kz} e^{i(\omega_e t + kx \cos \beta - ky \sin \beta)} \quad (2.32)$$

对入射波压力沿横剖面的周界 C 积分，可以得到波浪主干扰力：

$$f_w : \begin{cases} f_{WY} = - \int_C p_w dz \\ f_{WZ} = \int_C p_w dy \\ M_{WG} = \int_C p_w [y dy + (z + \overline{OG}) dz] \end{cases} \quad (2.33)$$

(4) 绕射力 f_d

为了得到绕射力的表达式，首先取适当点 $(x, 0, -\bar{T})$ 作为波浪代表点，假定该点的水平和垂向复速度分别为 \bar{u}_y 、 \bar{u}_z ，此时，绕射力可以近似地用等效的辐射力来表示：

$$f_d : \begin{cases} f_{DY} = \frac{d}{dt} \left[\left(m_y + \frac{N_y}{i\omega_e} \right) \bar{u}_y \right] \\ f_{DZ} = \frac{d}{dt} \left[\left(m_z + \frac{N_z}{i\omega_e} \right) \bar{u}_z \right] \\ m_{DO} = \frac{d}{dt} \left[\left(m_y l_m + \frac{N_y l_n}{i\omega_e} \right) \bar{u}_y \right] \\ m_{DG} = m_{DO} - \overline{OG} \cdot f_{DY} \end{cases} \quad (2.34)$$

其中，计算水平复速度 \bar{u}_y 时， $\bar{T} = T / 2$ ，在计算垂直复速度 \bar{u}_z 时， $\bar{T} = T^*$ ， T^* 可以看成由波浪造成的波浪压力的合力作用点在静水面以下的距离，对于一般船型， T^* 可以近似取为横剖面的平均吃水。波浪代表点的水平和垂向复速度可表达为：

$$\begin{cases} \bar{u}_y = i\omega\zeta_a \sin \beta \cdot e^{-k\bar{T}} \cdot e^{i(\omega_e t + kx \cos \beta)}, & \bar{T} = T^* \\ \bar{u}_z = i\omega\zeta_a \cdot e^{-k\bar{T}} \cdot e^{i(\omega_e t + kx \cos \beta)}, & \bar{T} = T/2 \end{cases} \quad (2.35)$$

2.2.6 船舶在波浪中运动的微分方程

将上述切片的流体力和流体力矩代入船舶纵向运动方程(2.22)和横向运动方程(2.23)中,进行整理,得到船舶运动微分方程。纵向运动微分方程组标准形式:

$$\begin{cases} (m + A_{33})\ddot{\eta}_3 + B_{33}\dot{\eta}_3 + C_{33}\eta_3 + A_{35}\ddot{\eta}_5 + B_{35}\dot{\eta}_5 + C_{35}\eta_5 \\ = F_{3C} \cos \omega_e t + F_{3S} \sin \omega_e t \\ A_{53}\ddot{\eta}_3 + B_{53}\dot{\eta}_3 + C_{53}\eta_3 + (I_{22} + A_{55})\ddot{\eta}_5 + B_{55}\dot{\eta}_5 + C_{55}\eta_5 \\ = F_{5C} \cos \omega_e t + F_{5S} \sin \omega_e t \end{cases} \quad (2.36)$$

横向运动微分方程组的标准形式为:

$$\begin{cases} (m + A_{22})\ddot{\eta}_2 + B_{22}\dot{\eta}_2 + C_{22}\eta_2 + A_{24}\ddot{\eta}_4 + B_{24}\dot{\eta}_4 + C_{24}\eta_4 \\ + A_{26}\ddot{\eta}_6 + B_{26}\dot{\eta}_6 + C_{26}\eta_6 = F_{2C} \cos \omega_e t + F_{2S} \sin \omega_e t \\ A_{42}\ddot{\eta}_2 + B_{42}\dot{\eta}_2 + C_{42}\eta_2 + (I_{11} + A_{44})\ddot{\eta}_4 + B_{44}\dot{\eta}_4 + C_{44}\eta_4 \\ + A_{46}\ddot{\eta}_6 + B_{46}\dot{\eta}_6 + C_{46}\eta_6 = F_{4C} \cos \omega_e t + F_{4S} \sin \omega_e t \\ A_{62}\ddot{\eta}_2 + B_{62}\dot{\eta}_2 + C_{62}\eta_2 + A_{64}\ddot{\eta}_4 + B_{64}\dot{\eta}_4 + C_{64}\eta_4 \\ + (I_{33} + A_{66})\ddot{\eta}_6 + B_{55}\dot{\eta}_6 + A_{55}\eta_6 = F_{6C} \cos \omega_e t + F_{6S} \sin \omega_e t \end{cases} \quad (2.37)$$

由于本文主要研究船舶在规则波中的纵向运动,因此仅列出纵向微分方程中的系数表达式,横向微分方程组的系数表达式可以参见文献[101]。

$$A_{33} = \int_L m_z(x) dx - \frac{U}{\omega_e^2} N_z^a \quad (2.38)$$

$$B_{33} = \int_L N_z(x) dx + U m_z^a \quad (2.39)$$

$$A_{35} = - \int_L m_z(x) x dx - \frac{U}{\omega_e^2} \int_L N_z(x) dx + \frac{U}{\omega_e^2} x_a N_z^a - \frac{U^2}{\omega_e^2} m_z^a \quad (2.40)$$

$$B_{35} = - \int_L N_z(x) x dx + U \int_L m_z(x) dx - U x_a m_z^a - \frac{U^2}{\omega_e^2} N_z^a \quad (2.41)$$

$$A_{53} = - \int_L m_z(x) x dx + \frac{U}{\omega_e^2} \int_L N_z(x) dx + \frac{U}{\omega_e^2} x_a N_z^a \quad (2.42)$$

$$B_{53} = - \int_L N_z(x) x dx - U \int_L m_z(x) dx - U x_a m_z^a \quad (2.43)$$

$$A_{55} = \int_L m_z(x) x^2 dx - \frac{U^2}{\omega_e^2} \int_L m_z(x) dx - \frac{U}{\omega_e^2} x_a^2 N_z^a + \frac{U^2}{\omega_e^2} x_a m_z^a \quad (2.44)$$

$$B_{55} = \int_L N_z(x) x^2 dx + \frac{U^2}{\omega_e^2} \int_L N_z(x) dx + U x_a^2 m_z^a + \frac{U^2}{\omega_e^2} x_a N_z^a \quad (2.45)$$

其中， $m_z(x)$ 和 $N_z(x)$ 分别表示纵向位置为 x 的船体横剖面的垂荡附加质量和阻尼系数； x_a ， m_z^a 和 N_z^a 分别表示最后一个剖面的纵向位置、最后一个剖面的垂荡附加质量和阻尼系数。

$$F_3 \begin{matrix} \cos \\ \sin \end{matrix} \varepsilon_F = \zeta_a \times \left\{ \begin{array}{l} 2\rho g \int_L \frac{\cos(kx \cos \mu)}{\sin} \left[\int_0^{y_w} e^{kz} \cos(ky \sin \mu) dy \right] dx \\ \mp \omega \int_L \left[N_z(x) - U \frac{dm_z(x)}{dx} \right] e^{-kT^*} \frac{\sin(kx \cos \mu)}{\cos} dx \\ - \omega^2 \int_L m_z(x) e^{-kT^*} \frac{\sin(kx \cos \mu)}{\cos} dx \\ + \frac{U \omega}{\omega_e} e^{-kT^*} \frac{\cos(kx_a \cos \mu)}{\sin} \end{array} \right\} \quad (2.46)$$

$$F_5 \begin{matrix} \cos \\ \sin \end{matrix} \varepsilon_M = \zeta_a \times \left\{ \begin{array}{l} -2\rho g \int_L \frac{\cos(kx \cos \mu)}{\sin} x \left[\int_0^b e^{kz} \cos(ky \sin \mu) dy \right] dx \\ \pm \omega \int_L \left[N_z(x) - U \frac{dm_z(x)}{dx} \right] x e^{-kT^*} \frac{\sin(kx \cos \mu)}{\cos} dx \\ + \omega^2 \int_L m_z(x) x e^{-kT^*} \frac{\cos(kx \cos \mu)}{\sin} dx \\ - \frac{U \omega}{\omega_e} \int_L N_z(x) e^{-kT^*} \frac{\cos(kx \cos \mu)}{\sin} dx \\ - \frac{U \omega}{\omega_e} N_a x_a e^{-kT^*} \frac{\cos(kx_a \cos \mu)}{\sin} \end{array} \right\} \quad (2.47)$$

其中， ε_F 和 ε_M 分别表示船体垂向波浪力 F_3 和绕 y 轴的波浪力矩 F_5 与波浪的相位角。

$$\begin{cases} F_{3C} = F_3 \cos \varepsilon_F \\ F_{3S} = F_3 \sin \varepsilon_F \end{cases} \quad (2.48)$$

$$\begin{cases} F_{5C} = F_5 \cos \varepsilon_M \\ F_{5S} = F_5 \sin \varepsilon_M \end{cases} \quad (2.49)$$

2.3 二维水动力系数的计算

利用切片理论计算船舶在规则波中运动响应的基础是计算船体各个横剖面的水动力系数。目前较为典型并且应用广泛的方法主要是源汇分布法和保角变换法，而本文采用的刘易斯剖面方法是一种多参数保教变换法，该方法能够避免在确定保角变换系数时存在的一些困难，并且对于常规的船型剖面是足够精确的，且计算时间要比源汇分布法少很多，因此非常适合作为快速计算船舶在波浪中运动的方法。

2.3.1 二维辐射问题

二维辐射问题指的是一无限长的柱体，在静水面做微幅简谐强迫振荡运动，从而产生扰动流场，对应的速度势为二维辐射势。

考虑柱体的振荡频率为 ω 。其振荡运动包括横荡 $X_1(t)$ 、垂荡 $X_2(t)$ 、横摇 $X_3(t)$ 三种基本运动，复数表示形式为：

$$X_j(t) = X_{ja} e^{i\omega t} = X_{ja} e^{i\varepsilon} e^{i\omega t} \quad (2.50)$$

其中， X_{ja} 为 j 模式运动的幅值， ε 为运动初始相位， X_j 表示复数振幅。

运动的速度和加速度可表示为：

$$\dot{X}_j(t) = i\omega X_j(t) \quad (2.51)$$

$$\ddot{X}_j(t) = -\omega^2 X_j(t) \quad (2.52)$$

扰动速度势可以表示成上述三种基本运动的叠加：

$$\Phi(x, y, t) = \varphi(x, y) e^{i\omega t} = e^{i\omega t} \sum_{j=1}^3 i\omega X_j \varphi_j(x, y) = \sum_{j=1}^3 \dot{X}_j(t) \varphi_j(x, y) \quad (2.53)$$

$\varphi_j(x, y)$ 可为复数函数表示具有单位复速度的 j 模式运动所引起的辐射势。

求解扰动速度势的定解条件包括连续性方程[L]、底部条件[B]、自由表面条件[F]、物面条件[S]以及远方辐射条件[R]：

$$\begin{cases} [L]: \left(\frac{\partial}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial y^2} \right) \varphi_j = 0, \text{ 流体域内} \\ [B]: \nabla \varphi_j = 0, \text{ 无限水深情况} \\ [F]: \left(\frac{\partial}{\partial y} - \nu \right) \varphi_j = 0, \text{ 平均水表面 } y = 0 \\ [S]: \frac{\partial}{\partial n} \varphi_j = n_j, \text{ 横剖面周界 } C \text{ 上} \\ [R]: \lim_{x \rightarrow \pm\infty} \left(\frac{\partial}{\partial x} \pm ik \right) \varphi_j = 0, \text{ 控制面 } x = \pm\infty \end{cases} \quad (2.54)$$

其中， $\nu = \omega^2 / g$ 。

通过求解上述定解问题可以得到 $\varphi_j(x, y)$ ，进而可以求解真实扰动势 $\Phi(x, y, t)$ 。

2.3.2 二维振荡流场的多级展开

多级展开法求解二维振荡流场是将二维流场速度势 $\Phi(x, y, t)$ 分解成两部分 $\Phi^{(1)}(x, y, t)$ 和 $\Phi^{(2)}(x, y, t)$ 来满足定解条件 (2.54)，从而简化问题。

$\Phi^{(1)}$ 满足底部条件 [B]、自由表面条件 [F] 以及在远方考虑物体兴波的辐射条件 [R]，可以通过在原点处放置点源和点汇以及偶极来实现。

$\Phi^{(2)}$ 满足底部条件 [B]、自由表面条件 [F] 以及在远方波幅为零的辐射条件 $[\bar{R}]$ ，需要取拉普拉斯方程在极坐标下分离变量解，对于船体剖面需要进行保角变换。

最终，总速度势 $\Phi = \Phi^{(1)} + \Phi^{(2)}$ ，需要满足物面条件 [S]。

2.3.3 多参数剖面保角变换形式

将 z 平面上的任意形状剖面轮廓 C 及其关于 x 轴的镜像轮廓作为整个周界的外部域，通过保角变换，将其转化为 ζ 平面上的单位圆外部域，并且使两个外部域的无限远点所对应的解析函数满足如下形式：

$$z = f(\zeta) = \sum_{n=0}^{\infty} a_{n-1} \zeta^{-n+1} \quad (2.55)$$

其中， a_{n-1} 为实系数，复数 $z = x + iy$ ； $\zeta = \bar{x} + i\bar{y} = re^{i\theta}$ ， $0 \leq \theta \leq \pi$ 。

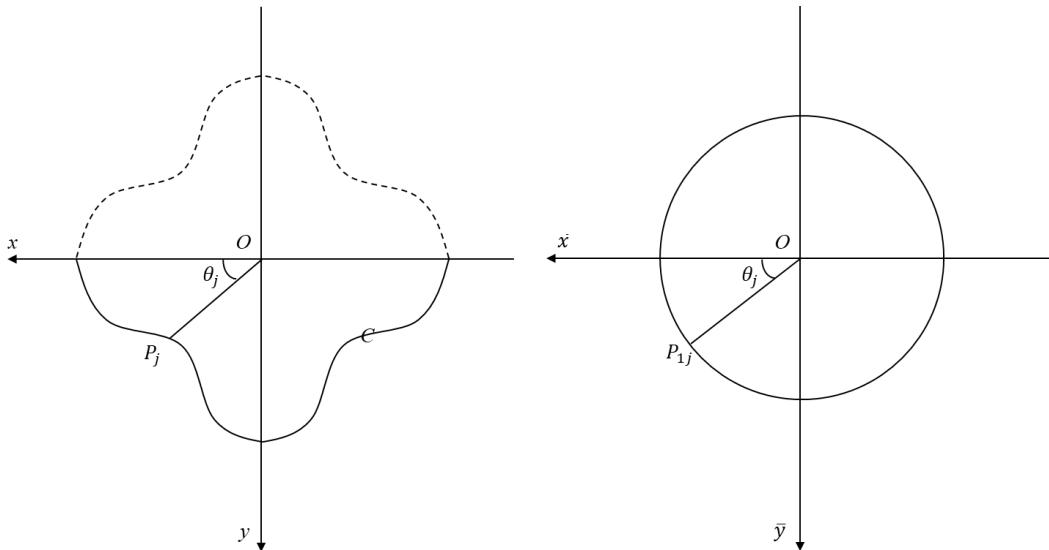


图 2-1 剖面的保角变换
Fig.2-1 Conformal transformation of cross-section

当剖面关于 y 轴对称，则上述的保角变换函数可以简化改写为：

$$z = f(\zeta) = \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n-1} \zeta^{-2n+1} \quad (2.56)$$

所谓 Lewis 剖面是指保角变换函数为三参数，即 $n=2$ ，当设 $M = a_{-1}$ ：为尺度因子，保角变换函数转换为二参数，可表达如下：

$$z/M = f(\zeta)/M = \zeta + a_1 \zeta^{-1} + a_3 \zeta^{-3} \quad (2.57)$$

通过上述三参数保角变换函数将 ζ 平面上的单位圆转换为 z 平面上的半剖面轮廓，该剖面的吃水为 T 、水线半宽为 b 、横剖面面积为 A 。由此得到保角变换函数的系数为：

$$\begin{cases} M = b / (1 + a_1 + a_3) \\ a_3 = \left[-(b + T) + \sqrt{(b + T)^2 + 8(Tb - \frac{4}{\pi}A)} \right] / 4M \\ a_1 = (b - T) / 2M \end{cases} \quad (2.58)$$

2.3.4 奇点势的求解

根据直角坐标系与极坐标的转换公式，将连续性方程[L]条件，即二维拉普拉斯方程转换为极坐标形式：

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \varphi(r, \theta) = 0 \quad (0 \leq \theta \leq \pi) \quad (2.59)$$

该方程解的基本形式如下：

$$\varphi_m(r, \theta) = r^{-m} (A_m \cos m\theta + B_m \sin m\theta), \quad m = 1, 2, 3 \dots \quad (2.60)$$

自由表面条件[F]借助边界上法向导数的转换关系，得到极坐标形式：

$$\left(\pm \frac{\partial}{\partial \theta} + kr \left| \frac{dz}{d\zeta} \right| \right) \varphi(r, \theta) = 0 \quad (\theta = 0, \pi) \quad (2.61)$$

其中，

$$\begin{aligned} \left| \frac{dz}{d\zeta} \right|_{\theta=0,\pi} &= - \sum_{n=0}^{\infty} (n-1) a_{n-1} r^{-n} \cos n\theta \Big|_{\theta=0,\pi} \\ &= \begin{cases} - \sum_{n=0}^{\infty} (n-1) a_{n-1} r^{-n}, & \theta = 0 \\ - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n (n-1) a_{n-1} r^{-n}, & \theta = \pi \end{cases} \end{aligned} \quad (2.62)$$

将底部条件[B]以及远方辐射条件[R]合并，可表示成如下形式：

$$\varphi(r, \theta) = 0 \quad (r \rightarrow \infty) \quad (2.63)$$

对于圆柱体，上述问题基本解可以表达为：

$$\varphi_{m+1}(r, \theta) = \frac{\cos(m+1)\theta}{r^{m+1}} - k \sum_{n=0}^{\infty} b_{n-1} \frac{\sin(m+n)\theta}{r^{m+n}} \quad (2.64)$$

为了让上述基本解同时满足自由表面条件，只需令

$$b_{n-1} = - \frac{n-1}{m+n} a_{n-1}, \quad n = 0, 1, \dots, m = 1, 2, \dots \quad (2.65)$$

当考虑剖面关于y轴对称，则基本解变化为：

$$\varphi_{m+1}(r, \theta) = \frac{\cos(m+1)\theta}{r^{m+1}} + k \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n-1} \frac{2n-1}{m+2n} \frac{\sin(m+2n)\theta}{r^{m+2n}} \quad (2.66)$$

当 m 取奇数, 则所对应的流场关于 y 轴也是对称的, 基本解变化为:

$$\varphi_{2m}(r, \theta) = \frac{\cos 2m\theta}{r^{2m}} + k \sum_{n=0}^{\infty} a_{2n-1} \frac{2n-1}{2m+2n-1} \frac{\sin(2m+2n-1)\theta}{r^{2m+2n-1}} \quad (2.67)$$

考虑 Lewis 剖面, 即 $n=2$, 上述基本解转换为:

$$\begin{aligned} \varphi_{2m}(r, \theta) = & \frac{\cos 2m\theta}{r^{2m}} + ka_{-1} \frac{-1}{2m-1} \frac{\sin(2m-1)\theta}{r^{2m-1}} \\ & + ka_1 \frac{1}{2m+1} \frac{\sin(2m+1)\theta}{r^{2m+1}} + ka_3 \frac{3}{2m+3} \frac{\sin(2m+3)\theta}{r^{2m+3}} \end{aligned} \quad (2.68)$$

2.3.5 振荡流场速度势表达式

振荡流场速度势的完整表达式可以表示为:

$$\begin{aligned} \varphi(x, y) = & (p_0 + jq_0)[\varphi_{c0}(x, y) + j\varphi_{s0}(x, y)] \\ & +(p_1 + jq_1)[\varphi_{c1}(x, y) + j\varphi_{s1}(x, y)] \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} (p_{m+1} + jq_{m+1})\varphi_{m+1}(x, y) \end{aligned} \quad (2.69)$$

其中, $[\varphi_{c0}(x, y) + j\varphi_{s0}(x, y)]$ 和 $[\varphi_{c1}(x, y) + j\varphi_{s1}(x, y)]$ 分别表示放置在原点处的单位强苏点源和偶极子的速度势; $\varphi_{m+1}(x, y)$ 为上一小节推导得出的奇点势; $(p_{m+1} + jq_{m+1})$ 为一组待定系数。

点源的势函数与流函数为:

$$\varphi_0 + i\psi_0 = -PV \int_0^\infty \frac{e^{i\kappa z}}{\kappa - \nu} d\kappa + j\pi e^{ivz} \quad (2.70)$$

偶极子的势函数与流函数为:

$$\varphi_1 + i\psi_1 = \frac{\partial}{\partial x}(\varphi_0 + i\psi_0) = \frac{1}{z} - iv \left[PV \int_0^\infty \frac{e^{i\kappa z}}{\kappa - \nu} d\kappa + j\pi e^{ivz} \right] \quad (2.71)$$

分离实数部分与虚数部分:

$$\varphi_0 = \varphi_{c0} + j\varphi_{s0} = -PV \int_0^\infty \frac{e^{-\kappa y} \cos \kappa x}{\kappa - \nu} d\kappa + j\pi e^{-vy} \cos vx \quad (2.72)$$

$$\varphi_1 = \varphi_{cl} + j\varphi_{sl} = \frac{x}{x^2 + y^2} + \nu \left[PV \int_0^\infty \frac{e^{-\kappa y} \sin \kappa x}{\kappa - \nu} d\kappa - j\pi e^{-\nu y} \sin \nu x \right] \quad (2.73)$$

由于船体剖面关于 y 轴对称，速度势的表达式可以进一步简化：

$$\varphi(x, y) = (p_l + jq_l)[\varphi_{cl}(x, y) + j\varphi_{sl}(x, y)] + \sum_{m=1}^{\infty} (p_{2m+l} + jq_{2m+l})\varphi_{2m+l}(x, y) \quad (2.74)$$

其中， $l=0,1$ 分别表示对称流场（垂荡）和反对称流场（横荡和横摇）。

得到振荡流场速度势待定表达式后，根据物面条件 $[R]$ ，便可以进一步确定表达式中的待定系数，然后根据前文所述，代入到伯努利方程中得到水动压力，根据二维水动力系数的定义便可以求得船体剖面的附加质量和阻尼系数。

2.3.6 Tasai 图谱

由于本文主要探讨船舶在波浪中的纵向运动，由纵向运动微分方程组 (2.36) 以及船体水动力系数表达式 (2.38) ~ (2.45)，横剖面二维水动力系数中，本文主要关注垂向阻尼系数和附加质量，日本学者 Tasai 利用 Ursell 的方法，同时利用 Lewis 剖面就散了一般船体剖面的垂荡水动力系数，并形成了 Tasai 图谱。

根据 Tasai 图谱，二维剖面垂荡阻尼系数可以表达为：

$$N_z(x) = \frac{\rho g^2 \bar{A}_z^2(x)}{\omega_e^3} \quad (2.75)$$

其中， $\bar{A}_z(x) = \zeta_a / z_a$ 表示在 x 处剖面的无穷远处的波幅与柱体垂荡运动的幅值之比。二维剖面的垂荡阻尼系数可以表达为：

$$m_z(x) = \frac{1}{8} \rho \pi B(x)^2 C(x) \quad (2.76)$$

其中， $C(x)$ 表示无因次水动力质量。当我们已知船体剖面的形状以及振荡频率，系数 $\bar{A}_z(x)$ 和 $C(x)$ 势函可以由 Tasai 图谱查得。

Tasai 图谱由两组图谱组成，分别用来计算系数 $\bar{A}_z(x)$ 和 $C(x)$ ，剖面的形状参数由无因次化参数 H_0 和 σ 表示：

$$H_0(x) = \frac{B(x)}{2T(x)} \quad (2.77)$$

$$\sigma(x) = \frac{S(x)}{B(x)T(x)} \quad (2.78)$$

振荡频率也由无因次化形式表示：

$$\xi_T(x) = \frac{\omega_e^2 T(x)}{g} \quad (2.79)$$

上述各参数的变化范围为：

$$H_0(x) = 0.2 \sim 2.0 \quad (2.80)$$

$$\sigma(x) = 0.5 \sim 1.0 \quad (2.81)$$

$$\xi_T(x) = 0.25 \sim 2.0 \quad (2.82)$$

文献[36]中所呈现的 Tasai 图谱根据当参数 H_0 分别为 $2/3$ 、 1.0 、 1.25 、 1.5 、 2.0 时，在不同 σ 情况下绘制而成的 $\bar{A}_z(x)$ 和 $C(x)$ 值关于 ξ_T 值变化的曲线；文献[100]中所呈现的 Tasai 图谱是 ξ_T 分别为 0.25 、 0.5 、 1.0 、 1.5 、 2.0 时，在不同 H_0 情况下绘制而成的 \bar{A}_z 和 C 值关于 σ 值变化的曲线，本文采用第二种图谱形式，计算 \bar{A}_z 和 C 值的步骤如下：

- (1) 确定剖面 σ 值，在每张图谱上进行第一次插值得到不同 H_0 值和 ξ_T 值对应的 \bar{A}_z 和 C 值插值结果；
- (2) 确定剖面 H_0 值，由不同 H_0 值对应的 \bar{A}_z 和 C 值进行第二次插值，得到满足 σ 值和 H_0 值的不同 ξ_T 值对应的 \bar{A}_z 和 C 值插值结果；
- (3) 最后根据剖面的 ξ_T 值进行第三次插值，得到同时满足三个参数的 \bar{A}_z 和 C 值。

确定 \bar{A}_z 和 C 值后，代入公式(2.75)和(2.76)，便可得到剖面的垂荡阻尼系数和附加质量，在代回船体水动力系数表达式，便可以得出船体垂荡、纵摇及其耦合运动的水动力系数。

2.4 本章小结

本章主要介绍程序的理论基础。首先对船舶在波浪中运动进行概述，进而介绍的基于线性势流理论的切片法计算船舶在波浪中的运动，包括切片法的基本假



17004307

设和适用条件、入射波的基本概念、船舶的运动方程、船体切片的运动分析以及流体载荷分析，最终得到船舶在波浪中运动的两组微分方程组，并对纵向运动方程组中的系数加以说明。然后阐述了二维剖面水动力系数的计算，这是切片法的基础，着重介绍保角变换法求解二维切片水动力系数，包括二维辐射问题、二维振荡流场的多极展开、多参数的保角变换形式、奇点势的求解以及振荡流场速度势的表达式。最后介绍了 Tasai 图谱的原理、适用条件和使用方法。

第三章 船舶纵向运动评估程序实现

3.1 程序流程图

本程序流程图如图 3.1 所示。

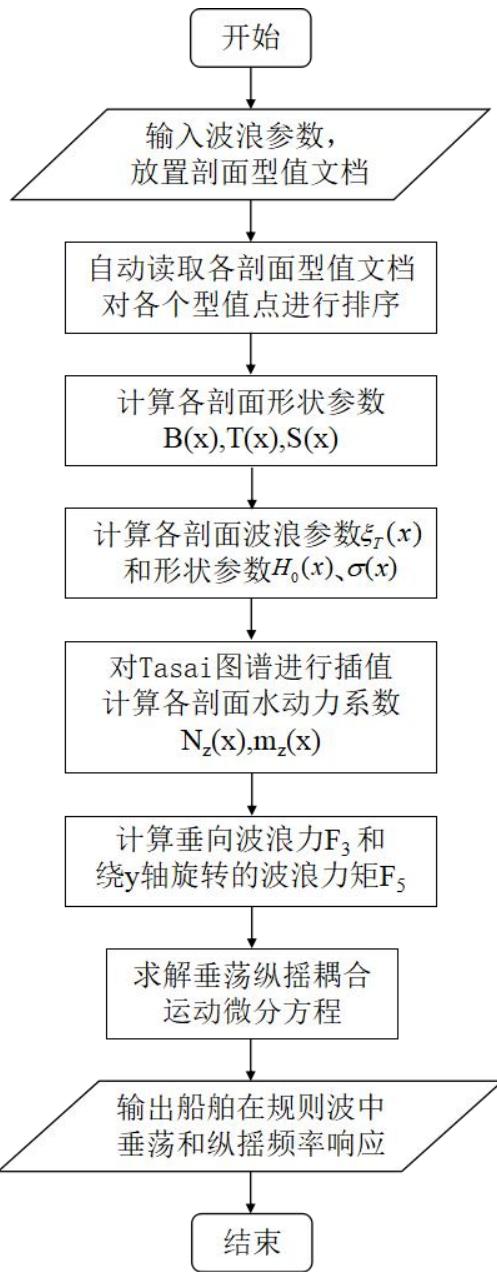


图 3-1 垂荡纵摇运动评估程序流程图

Fig.3-1 The flowchart of the evaluation program of heaving and pitching motions

本文自主编写的船舶纵向运动快速评估程序所需的主要输入参数包括波浪频率 ω 和船体型线，程序首先会对各个横剖面进行计算，得到各横剖面的水线宽 $B(x)$ 、吃水 $T(x)$ 以及横剖面积 $S(x)$ ，进一步确定各个横剖面的波浪参数 $\xi_T(x)$ 和形状参数 $H_0(x)$ 、 $\sigma(x)$ 。利用三次样条插值法，对 Tasai 图谱进行插值计算，得到系数 $\bar{A}_z(x)$ 和 $C(x)$ ，从而计算出每个横剖面的垂向附加质量 $m_z(x)$ 和阻尼系数 $N_z(x)$ 。由各个横剖面的水动力系数，进一步计算船体垂荡和纵摇及其耦合水动力系数 A_{ij} 、 B_{ij} ，船体所受垂向波浪力 F_3 和绕 y 轴旋转的波浪力矩 F_5 参数最终将各个系数代入纵向运动微分方程组，根据微分方程组的特解形式，进一步得到四元一次线性方程组，利用龙格-库塔法求解该线性方程组，得到纵向微分方程组的特解，便可得到垂荡和纵摇运动的频率响应。

3.2 Tasai 图谱插值

3.2.1 剖面形状计算

设船舶纵向位置为 x 的横剖面均匀分布 $2N - 1$ 个型值点，由于船舶横剖面的对称性，现仅考虑 $y \geq 0$ 半个剖面的 N 个型值点 (x, y_i, z_i) ，其中 $i = 1, 2, \dots, N$ ，首先将这 N 个型值点按照 z 坐标进行排序，由于考虑水面及以下部分， $z \leq 0$ ，因此设定 $z_1 \geq z_2 \geq \dots \geq z_N$ 剖面型值点排序之后，剖面的型宽、吃水可以用下面公式求解：

$$B(x) = 2 \max \{y_1, y_2, \dots, y_N\} \quad (3.1)$$

$$T(x) = -z_N \quad (3.2)$$

剖面的面积由数值积分方法梯形法求解：

$$S(x) = 2 \sum_{i=1}^{N-1} (y_i + y_{i+1})(z_i - z_{i+1}) \quad (3.3)$$

3.2.2 三次样条插值方法

程序中 Tasai 图谱的插值方法选取节点具有二阶连续导数的三次样条插值法，该方法计算简便，具有较好的稳定性和收敛性，并且易于在计算机上实现。

三次样条插值法是利用待定的三次插值多项式 $P_3(x)$ 逐步迭代来逼近原函数

$f(x)$ 的方法。首先, 定义三次多项式插值函数, 在区间 $[a, b]$ 上的若干节点 (x_i, y_i) 满足 $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$, 这些节点构成原函数 $f(x_i) = y_i$ 。则可定义三次插值多项式 $P_3(x)$:

$$(1) \quad P_3(x_i) = y_i \quad (i = 0, 1, \dots, n);$$

(2) $P_3(x)$ 为一分段三次多项式函数, 满足:

$$P_{3i}(x) = \alpha_{i0} + \alpha_{i1}x + \alpha_{i2}x^2 + \alpha_{i3}x^3, \quad x \in [x_{i-1}, x_i] \quad (3.4)$$

(3) $P_3(x)$, $P'_3(x)$, $P''_3(x)$ 在区间 $[a, b]$ 上连续。

下面利用三弯矩法求解插值函数, 首先设

$$P''_3(x_i) = M_i \quad (i = 0, 1, \dots, n) \quad (3.5)$$

在子区间 $[x_{i-1}, x_i]$ 上的三次多项式函数 $P_3(x) = P_{3i}(x)$, 满足:

$$P''_{3i}(x) = M_{i-1} \frac{x - x_i}{x_{i-1} - x_i} + M_i \frac{x - x_{i-1}}{x_i - x_{i-1}}, \quad x \in [x_{i-1}, x_i] \quad (3.6)$$

连续进行两次积分, 可以得到:

$$P_{3i}(x) = M_{i-1} \frac{(x_i - x)^3}{6h_i} + M_i \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_i} + A_i(x - x_{i-1}) + B_i \quad (3.7)$$

其中, $h_i = x_i - x_{i-1}$, 根据插值条件 $P_{3i}(x_{i-1}) = y_{i-1}$, $P_{3i}(x_i) = y_i$, 代入上式, 可以得到:

$$A_i = \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} - \frac{h_i}{6}(M_i - M_{i-1}) \quad (3.8)$$

$$B_i = y_{i-1} - \frac{1}{6}M_{i-1}h_i^2 \quad (3.9)$$

根据连续条件, 有

$$P'_{3i}(x_i - 0) = P'_{3i+1}(x_i + 0) \quad (3.10)$$

由式 (3.7) 可以得到:

$$P'_{3i}(x_i - 0) = \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i} + \frac{h_i}{6}M_{i-1} - \frac{h_i}{3}M_i \quad (3.11)$$

$$P'_{3i+1}(x_i+0) = \frac{y_{i+1} - y_i}{h_i} + \frac{h_{i+1}}{6} M_i - \frac{h_{i+1}}{3} M_{i+1} \quad (3.12)$$

将式 (3.11) 和 (3.12) 代入 (3.10), 整理可以得到:

$$h_i M_{i-1} + 2(h_i + h_{i+1})M_i + h_i M_{i+1} = 6\left(\frac{y_{i+1} - y_i}{h_{i+1}} - \frac{y_i - y_{i-1}}{h_i}\right) \quad (3.13)$$

设定边界条件为自然边界条件, 即 $P''_3(x_0)=0, P''_3(x_n)=0$, 表示两端没有弯矩作用, 即 $M_0=0, M_n=0$, 则可以得到含有 $n-1$ 个未知数 M_1, M_2, \dots, M_{n-1} 的线性方程组, 该方程组为主三对角方程组, 因此可以使用追赶法进行数值求解。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} 2(h_0 + h_1) & h_1 & 0 & \cdots & 0 \\ h_1 & 2(h_1 + h_2) & h_2 & \cdots & 0 \\ 0 & h_2 & 2(h_2 + h_3) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 2(h_{n-2} + h_{n-1}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ M_3 \\ \vdots \\ M_{n-1} \end{bmatrix} \\ & = 6 \begin{bmatrix} \frac{y_2 - y_1}{h_1} - \frac{y_1 - y_0}{h_0} \\ \frac{y_3 - y_2}{h_2} - \frac{y_2 - y_1}{h_1} \\ \frac{y_4 - y_3}{h_3} - \frac{y_3 - y_2}{h_2} \\ \vdots \\ \frac{y_n - y_{n-1}}{h_{n-1}} - \frac{y_{n-1} - y_{n-2}}{h_{n-2}} \end{bmatrix} \quad (3.14) \end{aligned}$$

3.2.3 追赶法求解插值方程组

将方程组 (3.14) 写成 $Ax = b$ 形式, 将其中的三对角系数矩阵 A 进行 LU 分解:

$$A = LU \quad (3.15)$$

$$\begin{cases} L[i, i-1] = A[i, i-1] / A[i-1, i-1], i = 2, 3, \dots, n \\ L[i, i] = 1, i = 1, 2, \dots, n \\ U[i, i] = A[i, i] - A[i-1, i] \cdot L[i, i-1], i = 2, 3, \dots, n \\ U[i, i+1] = U[i, i+1], i = 1, 2, \dots, n-1 \\ U[1, 1] = A[1, 1] \end{cases} \quad (3.16)$$

则原方程组可以写成:

$$Ux = L^{-1}b \quad (3.17)$$

根据上式, 对 b 矩阵进行更新:

$$b[i] = b[i] - b[i-1] \cdot L[i, i-1], i = 2, 3, \dots, n \quad (3.18)$$

对于 (3.17) 上三角方程组, 从最后一行开始进行回代求解, 可逐步求得 $M_{n-1}, M_{n-2}, \dots, M_1$:

$$\begin{cases} x[n] = b[n] / U[n, n] \\ x[i] = (b[i] - U[i, i+1] \cdot x[i+1]) / U[i, i], i = n-1, n-2, \dots, 1 \end{cases} \quad (3.19)$$

将求得的 M_1, M_2, \dots, M_{n-1} 代入式 (3.7) 中, 便可得到三次样条插值函数。

3.2.4 Tasai 图谱插值结果

根据前两小节的方法, 实现插值程序代码, 利用图像取点程序, 在 Tasai 图谱的每一条曲线上取若干样本点 (x_i, y_i) , 以 $\xi_T = 1.0$, $H_0 = 1.0$ 时系数 \bar{A}_z 关于 σ 的单一曲线为例, 样本点如表 3-1 所示。

表 3-1 Tasai 图谱曲线样本点 ($\xi_T = 1.0$, $H_0 = 1.0$)
Table 3-1 Sample points of Tasai graphic ($\xi_T = 1.0$, $H_0 = 1.0$)

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| σ | 0.472 | 0.501 | 0.534 | 0.576 | 0.613 | 0.663 | 0.694 | 0.722 | 0.748 |
| \bar{A}_z | 1.06 | 1.03 | 1.01 | 0.98 | 0.948 | 0.903 | 0.871 | 0.847 | 0.814 |
| 序号 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| σ | 0.774 | 0.803 | 0.844 | 0.860 | 0.889 | 0.925 | 0.946 | 0.962 | 0.982 |
| \bar{A}_z | 0.788 | 0.749 | 0.702 | 0.675 | 0.634 | 0.581 | 0.542 | 0.513 | 0.474 |

根据选取的样本点, 计算插值函数, 为了验证插值结果的可靠性, 以 $\xi_T = 1.0$ 时计算 \bar{A}_z 的图谱为例, 绘制插值函数图像, 并与图谱进行对比, 如图 3-1 所示。

从图中可以看出，插值函数与原图谱基本保持一致，可以应用到下一步计算中。

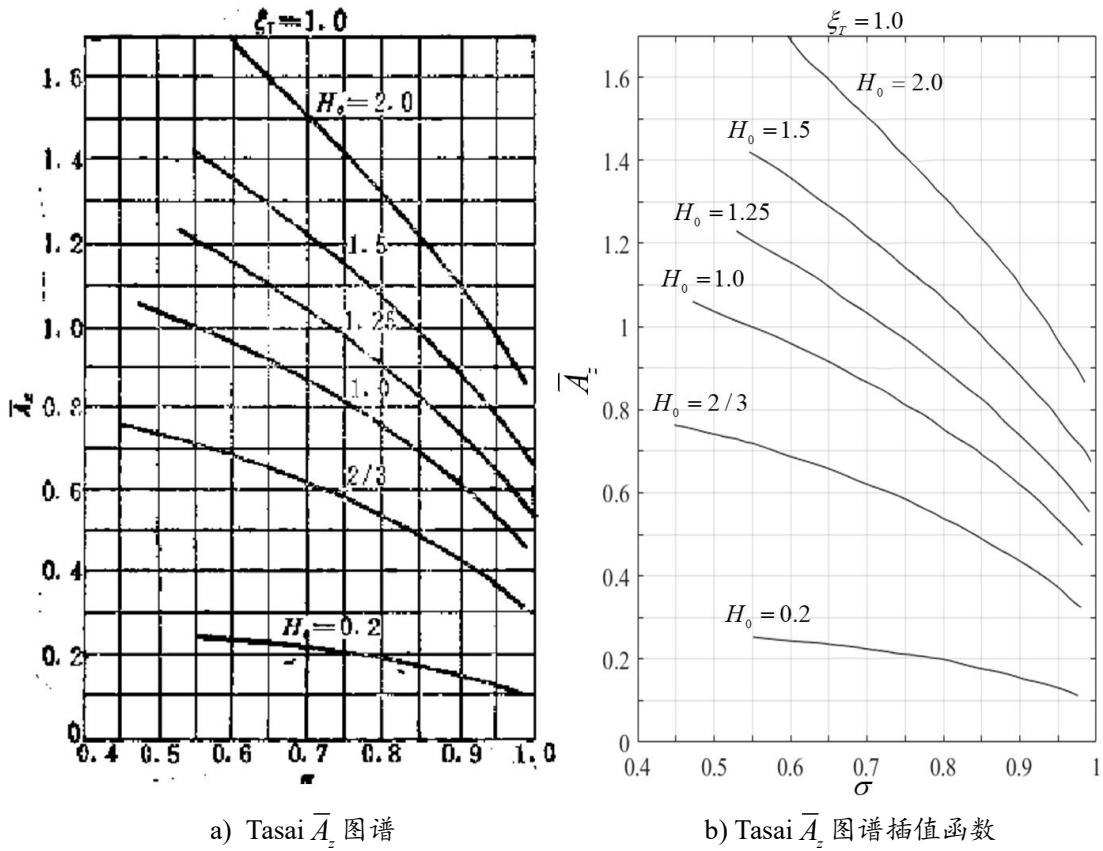


图 3-2 Tasai 图谱与其插值函数曲线对比图($\xi_T=1.0$)

Fig.3-2 Comparison between Tasai graph and its interpolation function curves

3.3 纵向运动微分方程求解

3.3.1 船体水动力系数求解

在利用 Tasai 图谱得到船体各个横剖面的水动力系数之后，需要进一步计算船体垂荡纵摇及其耦合水动力系数，程序采用复合梯形法进行数值积分。首先建立梯形法函数，对于沿船长 L 进行的积分，各横剖面纵向位置为 x_i ($i=1, 2, \dots, n$)，对应被积函数为 y_i ($i=1, 2, \dots, n$)，其中 n 为剖面数量，设首尾处的纵向位置为 x_0 和 x_{n+1} ，对应被积函数 y_0 和 y_{n+1} 通常取 0，则复合梯形法的形式为：

$$\int_L y dx = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n (y_i + y_{i+1})(x_{i+1} - x_i) \quad (3.20)$$

当横剖面选取的间隔一致，设步长均为 Δx ，则上述公式可改写为：

$$\int_L y dx = \frac{\Delta x}{2} \sum_{i=0}^n (y_i + y_{i+1}) \quad (3.21)$$

将船舶垂荡、纵摇及其耦合运动的水动力系数表达为梯形法形式：

(1) 垂荡附加质量 A_{33}

$$A_{33} = \int_L m_z(x) dx - \frac{U}{\omega_e^2} N_z^a = \sum_{i=0}^n \frac{m_z(x_i) + m_z(x_{i+1})}{2} \Delta x - \frac{U}{\omega_e^2} N(x_n) \quad (3.22)$$

(2) 垂荡阻尼系数 B_{33}

$$B_{33} = \int_L N_z(x) dx + U m_z^a = \sum_{i=0}^n \frac{N_z(x_i) + N_z(x_{i+1})}{2} \Delta x + U m_z(x_n) \quad (3.23)$$

(3) 纵摇附加质量 A_{55}

$$\begin{aligned} A_{55} &= \int_L m_z(x) x^2 dx - \frac{U^2}{\omega_e^2} \int_L m_z(x) dx - \frac{U}{\omega_e^2} x_a^2 N_z^a + \frac{U^2}{\omega_e^2} x_a m_z^a \\ &= \frac{\Delta x}{2} \sum_{i=0}^n [m_z(x_i) x_i^2 + m_z(x_{i+1}) x_{i+1}^2] - \frac{U^2 \Delta x}{2 \omega_e^2} \sum_{i=0}^n [m_z(x_i) + m_z(x_{i+1})] \\ &\quad - \frac{U}{\omega_e^2} [x_n^2 N_z(x_n) - U x_n m_z(x_n)] \end{aligned} \quad (3.24)$$

(4) 纵摇阻尼系数 B_{55}

$$\begin{aligned} B_{55} &= \int_L N_z(x) x^2 dx + \frac{U^2}{\omega_e^2} \int_L N_z(x) dx + U x_a^2 m_z^a + \frac{U^2}{\omega_e^2} x_a N_z^a \\ &= \frac{\Delta x}{2} \sum_{i=0}^n [N_z(x_i) x_i^2 + N_z(x_{i+1}) x_{i+1}^2] + \frac{U^2 \Delta x}{2 \omega_e^2} \sum_{i=0}^n [N_z(x_i) + N_z(x_{i+1})] \\ &\quad + U x_n^2 m_z(x_n) + \frac{U^2}{\omega_e^2} x_n N_z(x_n) \end{aligned} \quad (3.25)$$

(5) 垂荡耦合纵摇附加质量 A_{35}

$$\begin{aligned}
A_{35} &= -\int_L m_z(x) dx - \frac{U}{\omega_e^2} \int_L N_z(x) dx + \frac{U}{\omega_e^2} x_a N_z^a - \frac{U^2}{\omega_e^2} m_z^a \\
&= -\frac{\Delta x}{2} \sum_{i=0}^n [m_z(x_i) x_i + m_z(x_{i+1}) x_{i+1}] - \frac{U \Delta x}{2 \omega_e^2} \sum_{i=0}^n [N_z(x_i) + N_z(x_{i+1})] \\
&\quad + \frac{U}{\omega_e^2} [x_n N_z(x_n) - U m_z(x_n)]
\end{aligned} \quad (3.26)$$

(6) 垂荡耦合纵摇阻尼系数 B_{35}

$$\begin{aligned}
B_{35} &= -\int_L N_z(x) dx + U \int_L m_z(x) dx - U x_a m_z^a - \frac{U^2}{\omega_e^2} N_z^a \\
&= -\frac{\Delta x}{2} \sum_{i=0}^n [N_z(x_i) x_i + N_z(x_{i+1}) x_{i+1}] + \frac{U \Delta x}{2} \sum_{i=0}^n [m_z(x_i) + m_z(x_{i+1})] \\
&\quad - \frac{U^2}{\omega_e^2} N_z(x_n)
\end{aligned} \quad (3.27)$$

(7) 纵摇耦合垂荡附加质量 A_{53}

$$\begin{aligned}
A_{53} &= -\int_L m_z(x) dx + \frac{U}{\omega_e^2} \int_L N_z(x) dx + \frac{U}{\omega_e^2} x_a N_z^a \\
&= -\frac{\Delta x}{2} \sum_{i=0}^n [m_z(x_i) x_i + m_z(x_{i+1}) x_{i+1}] + \frac{U \Delta x}{2 \omega_e^2} \sum_{i=0}^n [N_z(x_i) + N_z(x_{i+1})] \\
&\quad + \frac{U}{\omega_e^2} x_n N_z(x_n)
\end{aligned} \quad (3.28)$$

(8) 垂荡耦合纵摇阻尼系数 B_{53}

$$\begin{aligned}
B_{53} &= -\int_L N_z(x) dx - U \int_L m_z(x) dx - U x_a m_z^a \\
&= -\frac{\Delta x}{2} \sum_{i=0}^n [N_z(x_i) x_i + N_z(x_{i+1}) x_{i+1}] - \frac{U \Delta x}{2} \sum_{i=0}^n [m_z(x_i) + m_z(x_{i+1})] \\
&\quad - U x_n m_z(x_n)
\end{aligned} \quad (3.29)$$

3.3.2 波浪扰动力（矩）求解

式(2.46)和(2.47)给出了波浪力和波浪力矩的正弦和余弦部分与波浪幅值之间的关系式，求解可以得到波浪力（矩）与波浪幅值之比，表达式之中的积分项同样采用梯形法进行数值积分。

将波浪力的表达式分为四个部分进行计算后相加，得到波浪力正弦和余弦部分与波浪幅值比：

$$f_1 = 2\rho g \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\cos(kx_i \cos \mu) yzc(x_i) + \cos(kx_{i+1} \cos \mu) yzc(x_{i+1})}{2} \Delta x \quad (3.30)$$

其中，参数 $yzc(x_i)$ 表达为：

$$yzc(x_i) = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{e^{-kz_i} \cos(ky_i \sin \mu) + e^{-kz_{i+1}} \cos(ky_{i+1} \sin \mu)}{2} \Delta z \quad (3.31)$$

$$f_2 = \mp \omega \sum_{i=1}^{n-1} \left\{ \begin{aligned} & \left[N_z(x_i) - Um_z'(x_i) \right] e^{-kT^*} \frac{\sin(kx_i \cos \mu)}{\cos(kx_i \cos \mu)} \\ & + \left[N_z(x_{i+1}) - Um_z'(x_{i+1}) \right] e^{-kT^*} \frac{\sin(kx_{i+1} \cos \mu)}{\cos(kx_{i+1} \cos \mu)} \end{aligned} \right\} \frac{1}{2} \Delta x \quad (3.32)$$

其中，参数 $m_z'(x_i)$ 表达为：

$$m_z'(x_i) = \frac{dm_z(x_i)}{dx} = \frac{m_z(x_{i+1}) - m_z(x_{i-1})}{x_{i+1} - x_{i-1}} \quad (3.33)$$

$$f_3 = -\omega^2 \sum_{i=1}^{n-1} \frac{m_z(x_i) e^{-kT^*} \frac{\sin(kx_i \cos \mu)}{\cos(kx_i \cos \mu)} + m_z(x_{i+1}) e^{-kT^*} \frac{\sin(kx_{i+1} \cos \mu)}{\cos(kx_{i+1} \cos \mu)}}{2} \Delta x \quad (3.34)$$

$$f_{c4} = \frac{U\omega}{\omega_e} e^{-kT^*} \frac{\cos(kx_a \cos \mu)}{\sin(kx_a \cos \mu)} \quad (3.35)$$

波浪力的表达式为：

$$F_a \frac{\cos}{\sin} \varepsilon_{F\zeta} = \zeta_a \times (f_1 + f_2 + f_3 + f_4) \quad (3.36)$$

绕 y 轴的波浪力矩可以使用同样的方法进行计算得到，这里不进行赘述。

3.3.3 纵向运动幅值响应求解

根据前两小节的计算，船舶在规则波中纵向运动微分方程组（2.36）中的各项系数均已得到，根据微分方程组的形式，我们可以得到该方程组的特解形式为：

$$\begin{cases} \eta_3 = \eta_{3a} \cos(\omega_e t + \varepsilon_{3\zeta}) = \eta_{3c} \cos \omega_e t - \eta_{3s} \sin \omega_e t \\ \eta_5 = \eta_{5a} \cos(\omega_e t + \varepsilon_{5\zeta}) = \eta_{5c} \cos \omega_e t - \eta_{5s} \sin \omega_e t \end{cases} \quad (3.37)$$

该特解便是在遭遇频率为 ω_e 时船舶的垂荡和纵摇运动。其中， η_{3a} 和 η_{5a} 分别为垂荡运动幅值和纵摇运动幅值； $\varepsilon_{3\zeta}$ 和 $\varepsilon_{5\zeta}$ 分别为垂荡和纵摇与波浪的相位。对垂荡和纵摇运动特解表达式求导得到：

$$\begin{cases} \eta_3' = -\eta_{3c}\omega_e \sin \omega_e t - \eta_{3s}\omega_e \cos \omega_e t \\ \eta_5' = -\eta_{5c}\omega_e \cos \omega_e t - \eta_{5s}\omega_e \sin \omega_e t \end{cases} \quad (3.38)$$

$$\begin{cases} \eta_3'' = -\eta_{3c}\omega_e^2 \cos \omega_e t + \eta_{3s}\omega_e^2 \sin \omega_e t \\ \eta_5'' = -\eta_{5c}\omega_e^2 \cos \omega_e t + \eta_{5s}\omega_e^2 \sin \omega_e t \end{cases} \quad (3.39)$$

将垂荡纵摇运动特解表达式及其导数回代到微分方程中，可以得到关于 η_{3c} ，

η_{3s} ， η_{5c} 和 η_{5s} 的四元一次方程组：

$$\begin{cases} [C_{33} - \omega_e^2(m + A_{33})]\eta_{3c} - \omega_e B_{33}\eta_{3s} + (C_{35} - \omega_e^2 A_{35})\eta_{5c} - \omega_e B_{35}\eta_{5s} = F_{3c} \\ -\omega_e B_{33}\eta_{3c} + [\omega_e^2(m + A_{33}) - C_{33}]\eta_{3s} - \omega_e B_{35}\eta_{5c} + (\omega_e^2 A_{35} - C_{35})\eta_{5s} = F_{3s} \\ (C_{53} - \omega_e^2 A_{53})\eta_{3c} - \omega_e B_{53}\eta_{3s} + [C_{55} - \omega_e^2(I_{22} + A_{55})]\eta_{5c} - \omega_e B_{55}\eta_{5s} = F_{5c} \\ -\omega_e B_{53}\eta_{3c} + (\omega_e^2 A_{53} - C_{53})\eta_{3s} - \omega_e B_{55}\eta_{5c} + [\omega_e^2(I_{22} + A_{55}) - C_{55}]\eta_{5s} = F_{5s} \end{cases} \quad (3.40)$$

将波浪力（矩）的幅值响应代入上述方程组中进行求解，便可求得垂荡和纵摇运动的幅值响应 η_3/ζ_a 和 η_5/ζ_a 。

对于四元一次方程组，采用解析法进行求解时，会出现当计算得到趋近于 0 的极小值时，除法运算使最终结果为极大值的扩大效应，因此采用数值解法。对于四元一次方程组求解，Gauss 列主元消去法算法稳定，易于编程实现，本文开发的纵向运动评估程序采用 Gauss 列主元消去法对线性方程组进行求解。

列主元消去法的基本思想是在进行第 k 步消元时，将第 k 列上绝对值最大的元素 a_{ik} 作为主元素，将元素 a_{ik} 所在的第 i 个方程与第 k 个方程位置进行调换，然后再按顺序消元法进行消元计算。当 $i=k$ 时，则无需调换。

对于 n 阶线性方程组 $Ax=b$ ，首先按列选取主元素：

$$|a_{pk}| = \max_{k \leq i \leq n} |a_{ik}| \neq 0 \quad (3.41)$$

交换增广矩阵 $[A, b]$ 的 p 、 k 两行的元素后进行消元：

$$\begin{cases} a_{ij}^{(k+1)} = a_{ij}^{(k)} - m_{ik} a_{kj}^{(k)}, (i, j = k+1, \dots, n) \\ b_i^{(k+1)} = b_i^{(k)} - m_{ik} b_k^{(k)} \end{cases} \quad (3.42)$$

将消元后的结果存储在系数矩阵中，进行回代得到线性方程组的解：



17004307

$$\begin{cases} x_n = b_n^{(n)} / a_{nn}^{(n)} \\ x_i = (b_i^{(i)} - \sum_{j=i+1}^n a_{ij}^{(i)} x_j) / a_{ii}^{(i)}, i = n-1, \dots, 1 \end{cases} \quad (3.43)$$

3.4 本章小结

本章首先呈现了本文自主编写的程序流程图,然后分 Tasai 图谱插值和纵向运动微分方程求解两个模块对数值方法以及程序实现进行介绍,在 Tasai 图谱插值模块,首先利用数值积分方法进行剖面形状和参数的计算,然后利用三次样条插值方法建立插值方程,利用追赶法求解插值方程,得到插值函数,最后将 Tasai 图谱数据导入程序文档中,进行插值计算。在纵向运动微分方程求解模块,首先利用数值积分方法求解船体水动力系数和波浪扰动力(矩),然后利用 Gauss 列主元消去法求解纵向运动微分方程形成的四元一次线性方程组,得到最终的运动幅值响应。

第四章 船舶在规则波中纵向运动评估

4.1 Wigley 船型验证计算

4.1.1 Wigley 船体参数及工况设置

Wigley 船型是一种数学船型，常用于船舶数值试验的验证中，本文首先利用 Wigley 船型对本文开发的评估程序进行验证。船模的主尺度及船型参数如表 4-1 所示，模型图如图 4-1 所示。

表 4-1 Wigley 船型的主尺度及参数
Table 4-1 Main dimensions and parameters of Wigley

| 项目 | 符号 | 单位 | 数值 |
|--------|----------|-------|--------|
| 垂线间长 | L_{PP} | m | 3.0 |
| 型宽 | B | m | 0.3 |
| 吃水 | T | m | 0.1875 |
| 方形系数 | C_B | — | 0.56 |
| 排水体积 | ∇ | m^3 | 0.0945 |
| 重心高度 | x_G | m | 0.17 |
| 纵向惯性半径 | K_{yy} | m^2 | 0.75 |

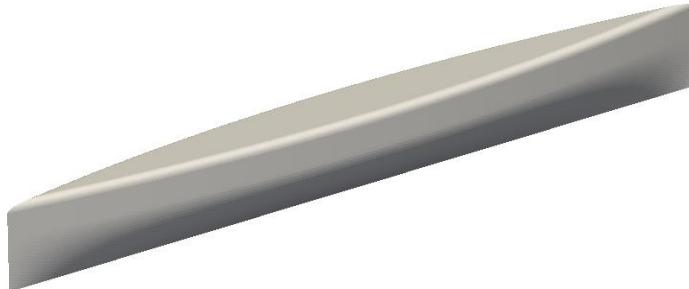


图 4-1 Wigley 船模示意图
Fig.4-1 Wigley model

由于 Wigley 船型关于中横剖面对称，选取两侧各 8 个剖面，共 17 个横剖面

进行计算，剖面间隔为 0.15 米，如图 4-2 所示。

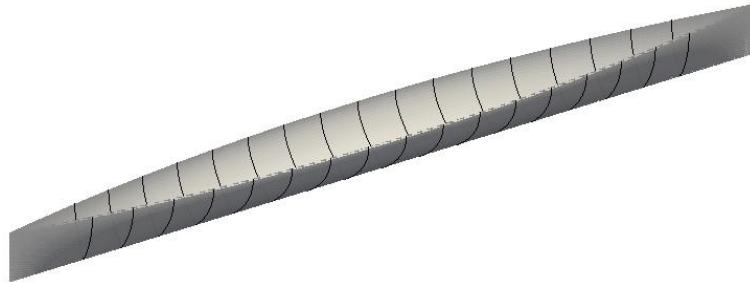


图 4-2 Wigley 水下切片示意图
Fig.4-2 the sections of Wigley under waterline

船舶在 $Fr=0.3$ 航速下迎浪前行，遭遇波浪为线性规则波，波浪频率变化范围为 2.6 s^{-1} 到 5.2 s^{-1} ，每隔 0.2 s^{-1} 设置一个工况进行计算，共十四个工况。对应波长变化范围为 2.28m 到 9.12m。

4.1.2 Wigley 剖面水动力系数计算

将 Wigley 各剖面型值点写入 txt 文档中，首先利用程序进行型值点读取和排序，从而计算水线下各剖面的面积及形状参数，结果如表 4-2 所示。

表 4-2 Wigley 船水线下各剖面形状参数
Table 4-2 Shape parameters of each section under waterline of Wigley

| 剖面序号 | 纵向位置 x (m) | 剖面面积 S (m^2) | 剖面系数 σ | 剖面系数 H_0 | 波浪系数 ξ_T |
|------|-----------------|------------------------------|---------------|------------|--------------|
| 01 | -1.20 | 0.0135 | 0.6666 | 0.2874 | 0.5849 |
| 02 | -1.05 | 0.0191 | 0.6667 | 0.4075 | 0.5849 |
| 03 | -0.90 | 0.0240 | 0.6666 | 0.5119 | 0.5849 |
| 04 | -0.75 | 0.0281 | 0.6666 | 0.5997 | 0.5849 |
| 05 | -0.60 | 0.0315 | 0.6666 | 0.6715 | 0.5849 |
| 06 | -0.45 | 0.0341 | 0.6665 | 0.7277 | 0.5849 |
| 07 | -0.30 | 0.0360 | 0.6665 | 0.7676 | 0.5849 |
| 08 | -0.15 | 0.0371 | 0.6664 | 0.7917 | 0.5849 |
| 09 | 0.00 | 0.0375 | 0.6664 | 0.7995 | 0.5849 |
| 10 | 0.15 | 0.0371 | 0.6664 | 0.7917 | 0.5849 |
| 11 | 0.30 | 0.0360 | 0.6665 | 0.7676 | 0.5849 |

表 4-2 (续)

| 剖面序号 | 纵向位置 x (m) | 剖面面积 S (m^2) | 剖面系数 σ | 剖面系数 H_0 | 波浪系数 ζ_T |
|------|-----------------|-----------------------|---------------|------------|----------------|
| 12 | 0.45 | 0.0341 | 0.6665 | 0.7277 | 0.5849 |
| 13 | 0.60 | 0.0315 | 0.6666 | 0.6715 | 0.5849 |
| 14 | 0.75 | 0.0281 | 0.6666 | 0.5997 | 0.5849 |
| 15 | 0.90 | 0.0240 | 0.6666 | 0.5119 | 0.5849 |
| 16 | 1.05 | 0.0191 | 0.6666 | 0.4075 | 0.5849 |
| 17 | 1.20 | 0.0135 | 0.6666 | 0.2874 | 0.5849 |

在得到各横剖面参数后，运行 Tasai_Spline() 函数，求解各横剖面的插值系数 \bar{A}_z 和 C ，以及水动力系数 $m_z(x)$ 和 $N_z(x)$ ，结果如表 4-3 所示。

表 4-3 Wigley 各剖面水动力系数
Table 4-3 Hydrodynamic coefficients of each section of Wigley

| 剖面序号 | 纵向位置 x (m) | 系数 \bar{A}_z | 系数 C | 垂向附加质量 m_z (kg) | 垂向阻尼系数 N_z ($kg \cdot s/m$) |
|------|-----------------|----------------|--------|----------------------|------------------------------------|
| 01 | -1.20 | 0.2387 | 0.4222 | 1.974 | 33.204 |
| 02 | -1.05 | 0.3204 | 0.4712 | 4.428 | 59.831 |
| 03 | -0.90 | 0.3901 | 0.5086 | 7.545 | 88.679 |
| 04 | -0.75 | 0.4471 | 0.5345 | 10.882 | 116.487 |
| 05 | -0.60 | 0.4923 | 0.5508 | 14.060 | 141.247 |
| 06 | -0.45 | 0.5267 | 0.5602 | 16.792 | 161.673 |
| 07 | -0.30 | 0.5506 | 0.5654 | 18.854 | 176.647 |
| 08 | -0.15 | 0.5648 | 0.5680 | 20.150 | 185.892 |
| 09 | 0.00 | 0.5694 | 0.5688 | 20.580 | 188.928 |
| 10 | 0.15 | 0.5648 | 0.5680 | 20.150 | 185.896 |
| 11 | 0.30 | 0.5506 | 0.5654 | 18.854 | 176.673 |
| 12 | 0.45 | 0.5267 | 0.5602 | 16.792 | 161.692 |
| 13 | 0.60 | 0.4924 | 0.5508 | 14.059 | 141.285 |
| 14 | 0.75 | 0.4471 | 0.5345 | 10.881 | 116.519 |
| 15 | 0.90 | 0.3902 | 0.5086 | 7.544 | 88.728 |

表 4-3 (续)

| 剖面序号 | 纵向位置 x (m) | 系数 \bar{A}_z | 系数 C | 垂向附加质量 m_z (kg) | 垂向阻尼系数 N_z (kg·s/m) |
|------|-----------------|----------------|--------|----------------------|--------------------------|
| 16 | 1.05 | 0.3205 | 0.4710 | 4.426 | 59.874 |
| 17 | 1.20 | 0.2388 | 0.4220 | 1.973 | 33.220 |

4.1.3 Wigley 纵向运动水动力系数计算

得到 Wigley 各剖面的二维水动力系数后, 计算各个波浪频率下船舶整体垂荡和纵摇及其耦合水动力系数, 其中, 附加质量计算结果如表 4-4 所示。

表 4-4 Wigley 纵向运动附加质量
Table 4-4 Added mass of longitudinal motions of Wigley

| 波浪频率 ω (s ⁻¹) | 遭遇频率 ω_e (s ⁻¹) | 垂荡附加质 量 A_{33} (kg) | 垂荡耦合纵 摇附加质量 A_{35} (kg·m) | 纵摇耦合垂 荡附加质量 A_{53} (kg·m) | 纵摇附加质量 A_{55} (kg·m ²) |
|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|
| 2.6 | 3.721 | 54.233 | -36.377 | 24.242 | 23.090 |
| 2.8 | 4.100 | 51.810 | -30.679 | 19.962 | 20.827 |
| 3.0 | 4.493 | 49.050 | -26.071 | 16.492 | 18.723 |
| 3.2 | 4.898 | 46.207 | -22.057 | 13.450 | 16.856 |
| 3.4 | 5.317 | 43.669 | -18.319 | 10.588 | 15.383 |
| 3.6 | 5.749 | 41.754 | -14.807 | 7.878 | 14.408 |
| 3.8 | 6.195 | 40.534 | -11.630 | 5.421 | 13.897 |
| 4.0 | 6.654 | 39.965 | -8.857 | 3.283 | 13.765 |
| 4.2 | 7.126 | 39.838 | -6.519 | 1.496 | 13.846 |
| 4.4 | 7.611 | 39.758 | -4.612 | 1.223 | 13.884 |
| 4.6 | 8.109 | 39.647 | -3.082 | 1.531 | 13.816 |
| 4.8 | 8.621 | 39.718 | -1.869 | 1.188 | 13.760 |
| 5.0 | 9.146 | 40.290 | -0.921 | 1.022 | 13.904 |
| 5.2 | 9.685 | 41.506 | -0.189 | 1.002 | 14.344 |

根据上表结果, 将遭遇频率和各运动的附加质量进行无因次化, 绘制各运动附加质量随遭遇频率变化的曲线, 与试验值、基于源汇法的切片法、三维势流理

论结果进行对比,如图 4-3 所示。其中遭遇频率和水动力系数的无因次化公式如式(4.1)和(4.2)所示。

$$\begin{cases} A_{ij} = \frac{a_{ij}}{\rho \nabla L^{(m_i+n_j)}} \\ B_{ij} = \frac{b_{ij}}{\rho \nabla L^{(m_i+n_j)}} \sqrt{L/g} \end{cases} \quad \text{其中, } m_i = \begin{cases} 0 & i=3 \\ 1 & i=5 \end{cases} \quad n_j = \begin{cases} 0 & j=3 \\ 1 & j=5 \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\omega = \varpi \sqrt{L/g} \quad (4.2)$$

各运动附加质量的对比结果表明:

(1) 垂荡附加质量 A_{33} 其在低频率时与试验值及其他方法计算得到的结果基本一致,在较大频率时与试验值有一定偏差,精度较三维方法略差;

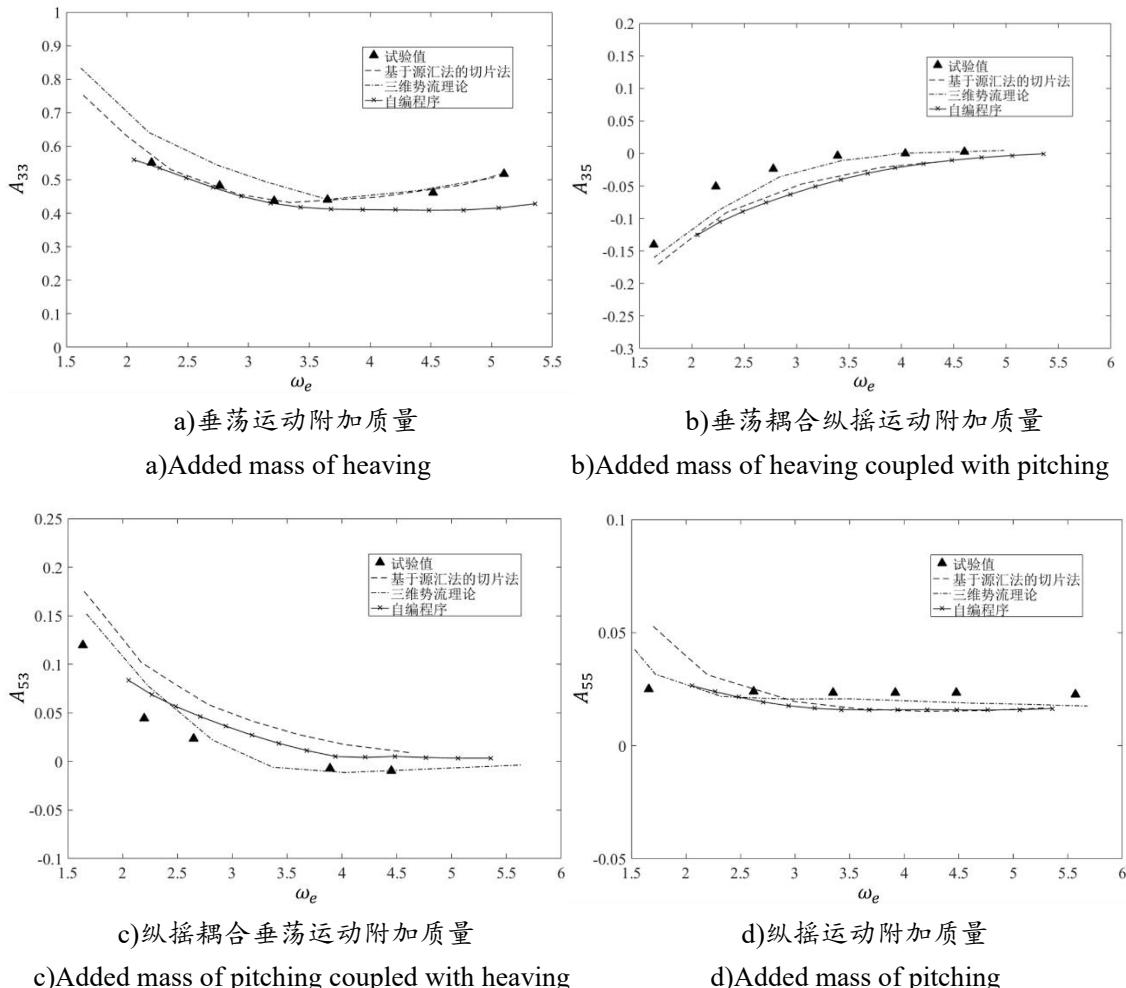


图 4-3 Wigley (Fr=0.3) 纵向运动附加质量结果对比

Fig.4-3 Comparison of added mass of longitudinal motions of Wigley (Fr=0.3)

(2) 垂荡耦合纵摇附加质量 A_{35} 在低频时与试验值相比有一定偏差, 当频率逐渐变高, 误差逐步减小, 精度与源汇法相差不多, 但低于三维势流理论;

(3) 纵摇耦合垂荡附加质量 A_{53} 的计算结果整体与试验值相差不大, 计算结果吻合度甚至超过源汇法, 但较三维势流理论精度略低;

(4) 纵摇附加质量 A_{55} 的计算结果与试验值保持一致, 三种计算方法结果一致, 计算精度略低于三维直流动理论。

综上所述, 由本文自主开发的程序计算的各运动附加质量总体趋势与试验值基本吻合, 虽然精度不如三维势流理论, 但是仍可以计算出较为准确的附加质量值, 可以代入运动微分方程进行后续运动的求解。

程序计算所得的各运动阻尼系数结果如表 4-5 所示。

表 4-5 Wigley 纵向运动阻尼系数
Table 4-5 Damping coefficient of longitudinal motions of Wigley

| 波浪频率 $\omega(\text{s}^{-1})$ | 遭遇频率 $\omega_e(\text{s}^{-1})$ | 垂荡阻尼系 数 B_{33} ($\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}$) | 垂荡耦合纵 摇阻尼系数 B_{35} ($\text{kg}\cdot\text{s}$) | 纵摇耦合垂 荡阻尼系数 B_{53} ($\text{kg}\cdot\text{s}$) | 纵摇阻尼系数 B_{55} ($\text{kg}\cdot\text{s}\cdot\text{m}$) |
|---------------------------------|-----------------------------------|--|---|---|---|
| 2.6 | 3.721 | 298.431 | 90.623 | -102.626 | 108.488 |
| 2.8 | 4.100 | 309.669 | 85.726 | -98.825 | 107.190 |
| 3.0 | 4.493 | 320.655 | 80.212 | -94.698 | 106.669 |
| 3.2 | 4.898 | 328.245 | 74.581 | -90.501 | 105.248 |
| 3.4 | 5.317 | 328.728 | 69.614 | -86.675 | 101.262 |
| 3.6 | 5.749 | 320.599 | 65.944 | -83.603 | 94.193 |
| 3.8 | 6.195 | 305.413 | 63.708 | -81.400 | 84.827 |
| 4.0 | 6.654 | 285.294 | 62.794 | -80.043 | 74.069 |
| 4.2 | 7.126 | 262.685 | 62.735 | -79.320 | 62.826 |
| 4.4 | 7.611 | 239.993 | 62.678 | -78.804 | 51.875 |
| 4.6 | 8.109 | 218.151 | 62.441 | -78.429 | 41.568 |
| 4.8 | 8.621 | 197.499 | 62.459 | -78.449 | 32.178 |
| 5.0 | 9.146 | 178.53 | 63.407 | -79.233 | 24.089 |
| 5.2 | 9.685 | 161.612 | 65.590 | -80.918 | 17.422 |

根据上表结果, 将遭遇频率和各运动的阻尼系数进行无因次化, 并绘制各阻尼系数随遭遇频率变化的曲线, 同样与试验值、三维势流方法以及以源汇分布法

为基础的切片法结果进行对比, 如图 4-3 所示。结果表明:

- (1) 垂荡阻尼系数 B_{33} 其在低频率时与试验值相差较大, 和源汇法结算结果相当, 但在中高频时, 与试验值完全吻合, 精度甚至优于三维势流理论;
- (2) 垂荡耦合纵摇阻尼系数 B_{35} 在中低频时与试验值较为一致, 在高频时与试验结果相差较大, 精度低于三维势流方法以及源汇法;
- (3) 纵摇耦合垂荡阻尼系数 B_{53} 的计算结果整体与试验值较为一致, 精度与源汇法相当, 但是低于三维方法;
- (4) 纵摇阻尼系数 B_{55} 的计算结果在低频时较试验值高, 在高频时较试验结果低, 计算精度较源汇法高, 但仍低于三维势流理论。

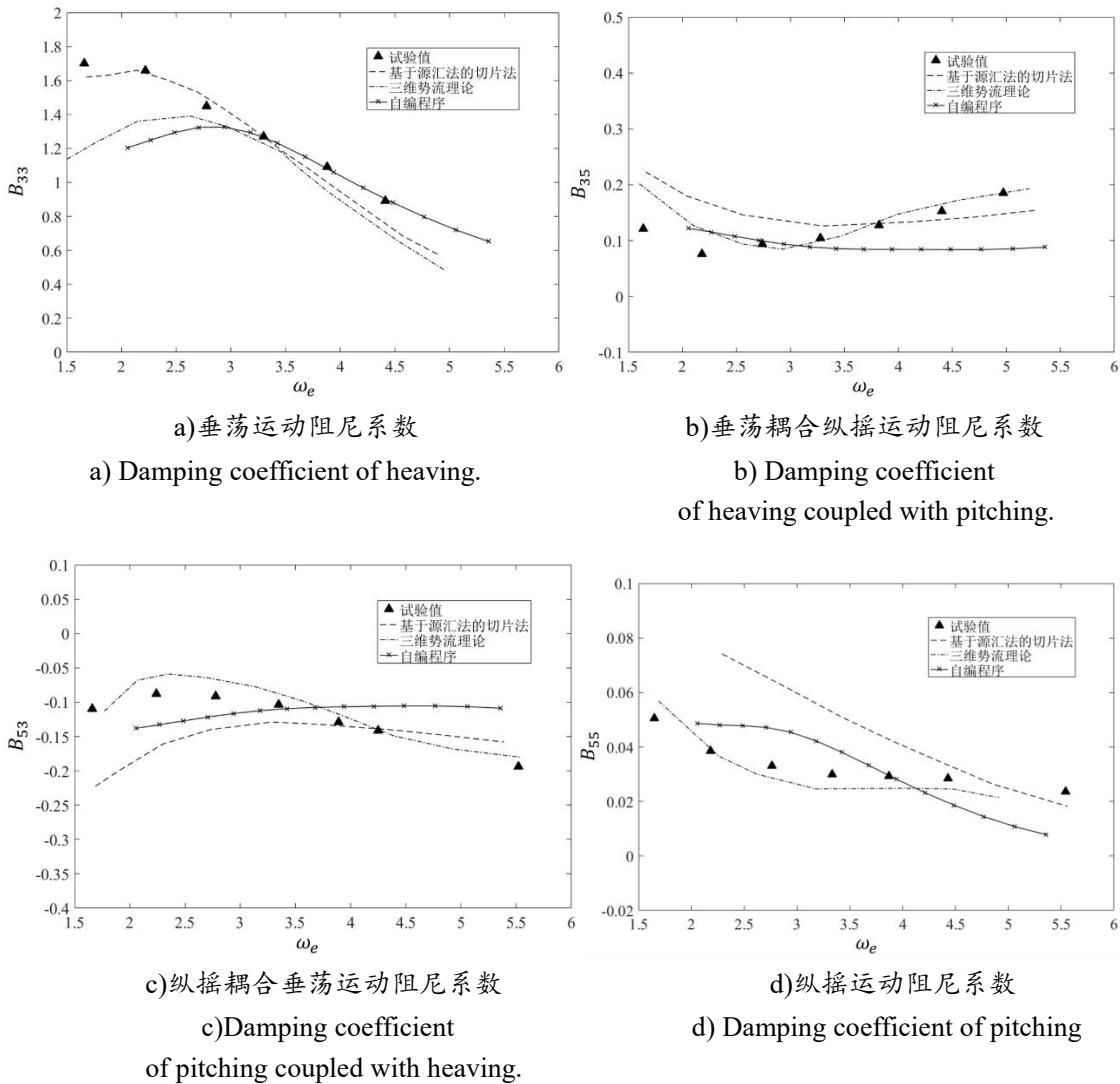


图 4-4 Wigley($Fr=0.3$)纵向运动阻尼系数结果对比

Fig.4-4 Comparison of damping coefficient of longitudinal motions of Wigley($Fr=0.3$)

综上所述，由本文自主开发的程序计算的各阻尼系数总体趋势与试验值基本吻合，虽然精度与三维势流方法有一定差距，但与源汇法不相上下，满足后续计算的精度，可以代入运动微分方程进行后续运动的求解。

4.1.4 Wigley 纵向运动求解

由各剖面的水动力系数，计算船体所受纵向波浪力以及绕 y 轴旋转的波浪力矩与波浪幅值的比值，计算结果如表 4-6 所示。

表 4-6 Wigley 波浪力（矩）
Table 4-6 Wave force and moment of Wigley

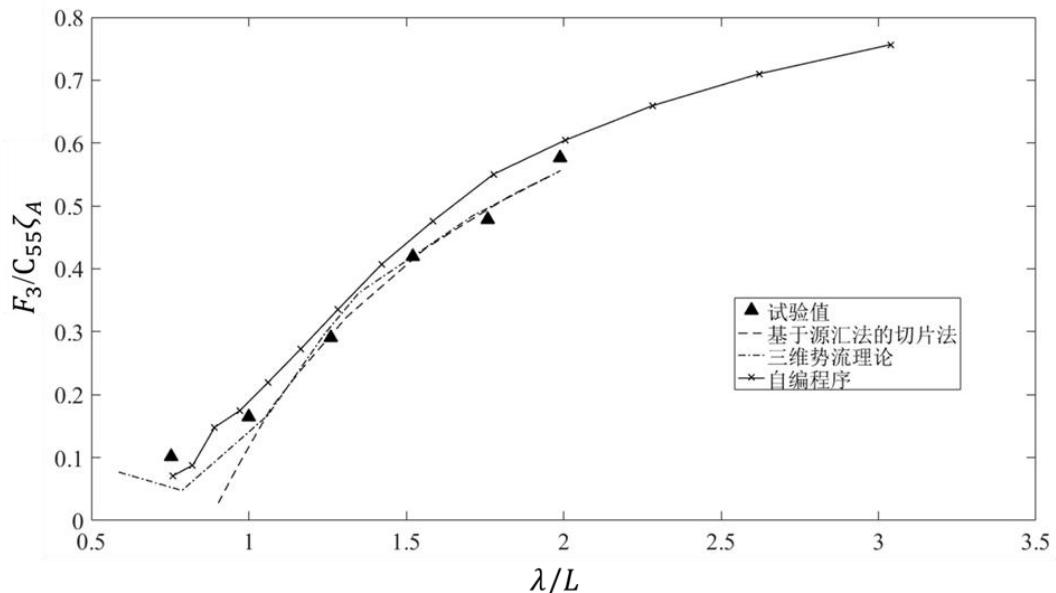
| 波浪频率 $\omega(\text{s}^{-1})$ | 波长 $\lambda(\text{m})$ | 波浪力 F_3 的 波浪幅值响应 $F_3 / \zeta_A (\text{N/m})$ | 波浪力矩 F_5 的 波浪幅值响应 $F_5 / \zeta_A (\text{N})$ |
|---------------------------------|---------------------------|---|--|
| 2.6 | 9.118 | 4543.18 | 1339.28 |
| 2.8 | 7.862 | 4263.68 | 1468.57 |
| 3.0 | 6.849 | 3960.63 | 1588.29 |
| 3.2 | 6.019 | 3632.30 | 1693.63 |
| 3.4 | 5.332 | 3305.87 | 1777.92 |
| 3.6 | 4.756 | 2859.95 | 1832.73 |
| 3.8 | 4.269 | 2448.02 | 1849.70 |
| 4.0 | 3.852 | 2016.81 | 1821.96 |
| 4.2 | 3.494 | 1636.33 | 1746.27 |
| 4.4 | 3.184 | 1318.78 | 1624.69 |
| 4.6 | 2.913 | 1047.99 | 1459.15 |
| 4.8 | 2.675 | 889.64 | 1249.92 |
| 5.0 | 2.466 | 525.75 | 997.71 |
| 5.2 | 2.280 | 428.98 | 709.71 |

将波浪力（矩）的波浪幅值响应进行无因次化，无因次化公式如下：

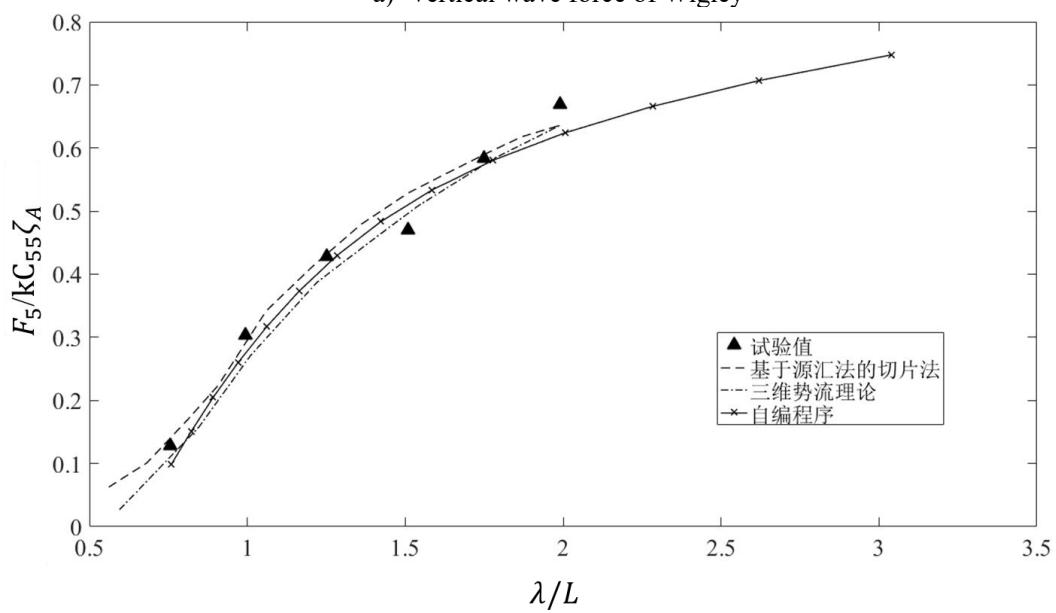
$$\begin{cases} F_3 / \zeta_A = F_3 / C_{33} \zeta_A \\ F_5 / \zeta_A = F_5 / k C_{33} \zeta_A \end{cases} \quad (4.3)$$

绘制波浪力（矩）随无因次化波长变化的曲线，如图 4-5 所示。对比结果表

明, 波浪力和波浪力矩的值总体趋势均与试验值保持一致, 在具体数值上存在一定误差, 在波浪力的计算时, 精度不如三维势流理论和源汇法好, 但差距不大; 在计算波浪力矩时, 与其他两个计算方法的精度不相上下, 在某些波长的计算时, 甚至优于其他方法, 可以代入微分方程进行运动求解。



a) 船体垂向波浪力 F_3
a) Vertical wave force of Wigley



b) 船体绕 y 轴波浪力矩 F_5
b) Wave moment around y-axis of Wigley
图 4-5 Wigley($Fr=0.3$) 波浪力(矩)结果对比

Fig.4-5 Comparison of Wave force and moment of Wigley($Fr=0.3$)

得到各个水动力系数、波浪力（矩）后，将各个系数代入纵向运动微分方程中，求解特解，得到 Wigley 在 $Fr=0.3$ 时的垂荡和纵摇运动的幅值响应 η_3 / ζ_A 和 η_5 / ζ_A ，计算结果如表 4-7 所示。

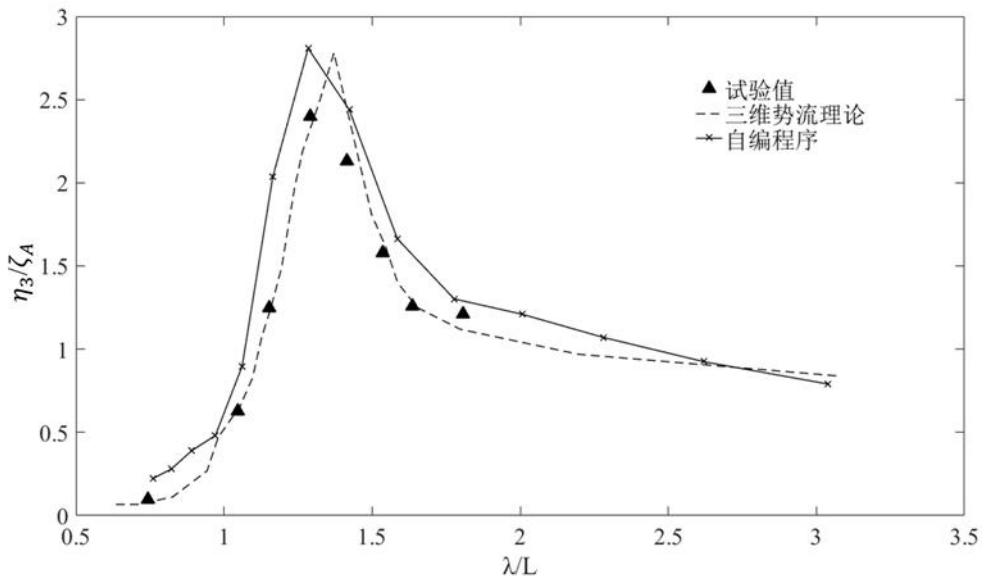
表 4-7 Wigley 垂荡纵摇运动幅值响应
Table 4-7 Heaving and pitching amplitude response of Wigley

| 波浪频率 $\omega (s^{-1})$ | 波长 $\lambda (m)$ | 垂荡幅值响应 η_3 / ζ_A | 纵摇幅值响应 $\eta_5 / \zeta_A (m^{-1})$ |
|---------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------------|
| 2.6 | 9.118 | 0.7906 | 0.5116 |
| 2.8 | 7.862 | 0.9247 | 0.6135 |
| 3.0 | 6.849 | 1.0696 | 0.7860 |
| 3.2 | 6.019 | 1.2101 | 0.9958 |
| 3.4 | 5.332 | 1.3019 | 1.3634 |
| 3.6 | 4.756 | 1.6628 | 2.3255 |
| 3.8 | 4.269 | 2.3385 | 2.2801 |
| 4.0 | 3.852 | 2.6069 | 1.6421 |
| 4.2 | 3.494 | 1.8353 | 1.0546 |
| 4.4 | 3.184 | 0.8973 | 0.6053 |
| 4.6 | 2.913 | 0.4817 | 0.5335 |
| 4.8 | 2.675 | 0.3913 | 0.5772 |
| 5.0 | 2.466 | 0.2795 | 0.4950 |
| 5.2 | 2.280 | 0.2225 | 0.5236 |

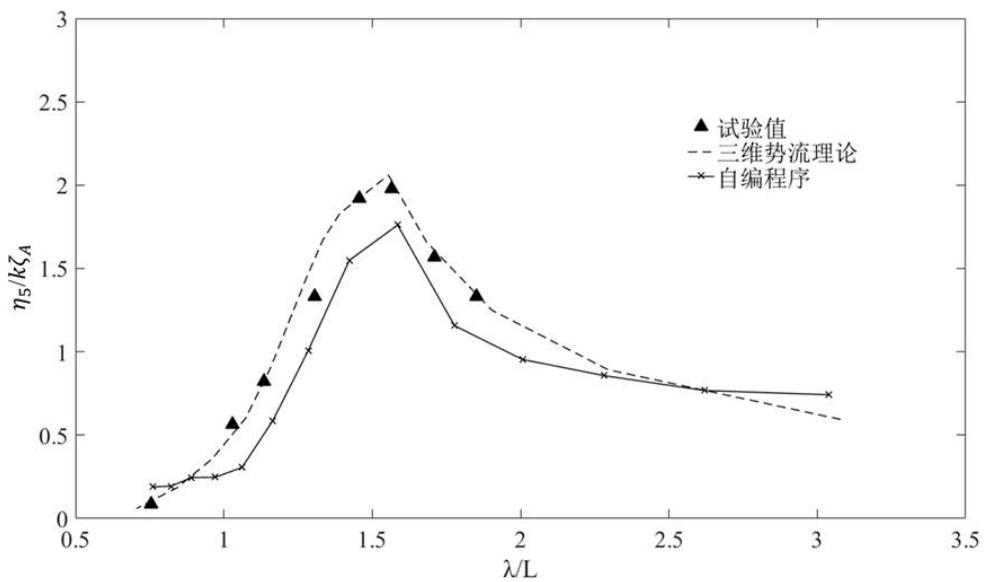
将计算结果无因次化绘制随波长变化的曲线，并与试验值、三维势流方法进行比较，如图 4-6 所示。对比结果表明：

(1) 由本文自主编写的评估程序对垂荡运动的计算结果整体比试验值偏大，但总体趋势与试验结果保持一致。本文计算精度较三维势流理论略低，但仍能较为准确地预报出 Wigley 船模在不同波浪条件下的垂荡运动幅值，对于船舶设计初，船型优化设计的运动评估程序来说，精度是满足要求的。

(2) 本文自编程序计算纵摇幅值的结果整体较试验值为小，同样，也与试验结果的趋势保持一致，但是精度较三维势流方法略差，在波长较短时，略大于试验结果，而在其他波长情况下均小于试验值。与垂荡运动相同，对于船型优化设计来说，精度是满足要求的。



a) 垂荡运动幅值
a) Amplitude of heaving of Wigley



b) 纵摇运动幅值
b) Amplitude of pitching of Wigley

图 4-6 Wigley($Fr=0.3$)垂荡纵摇运动幅值对比

Fig.4-6 Comparison of heaving and pitching amplitude of Wigley($Fr=0.3$)

4.2 Series 60 船型验证计算

4.2.1 Series60 船模参数及工况设置

为进一步验证本文开发程序计算船舶在波浪中纵向运动的有效性，本文采用 Series 60 船模进行进一步验证。船模的主尺度及船型参数如表 4-8 所示，模型图如图 4-7 所示。

表 4-8 Series 60 船模主尺度及参数
Table 4-8 Main dimensions and parameters of Series 60

| 项目 | 符号 | 单位 | 数值 |
|--------|----------|-------|--------|
| 垂线间长 | L_{PP} | m | 2.258 |
| 型宽 | B | m | 0.322 |
| 吃水 | T | m | 0.129 |
| 方形系数 | C_B | — | 0.7 |
| 排水体积 | ∇ | m^3 | 0.0657 |
| 重心高度 | x_G | m | 0.129 |
| 纵向惯性半径 | K_{yy} | m | 0.5645 |



图 4-7 Series 60 船模示意图
Fig.4-7 Series 60 model

在船体中横剖面前后各取 11 个横剖面，剖面间隔为 0.1 米，如图 4-8 所示。由于靠近船首和船尾的两个剖面的剖面形状过于细长，计算得到这两个剖面的剖面参数不满足 Tasai 图谱的计算要求，因此在进行插值计算时将前后两个剖面舍去，整体以数值积分的形式进行计算，因此共 21 个剖面作为切片法切片进行计算。

Series 60 船模在线性规则波中以 $Fr=0.2$ 的速度迎浪前行，波浪频率变化范围为 3.0s^{-1} 到 6.0s^{-1} ，每隔 0.2s^{-1} 设置一个工况进行计算，共 16 个工况。对应遭遇频率变化范围为 4.5s^{-1} 到 12.0s^{-1} ，对应波浪波长变化范围为 1.71m 到 6.84m。

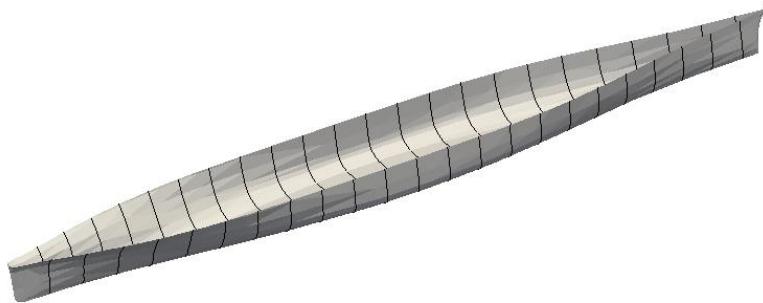


图 4-8 Series 60 船模水下切片示意图
Fig.4-8 Sections of Series 60 under waterline

4.2.2 Series60 剖面水动力系数计算结果

将 Series60 船模各剖面型值点写入 txt 文档中，程序读取文档并计算水线下各剖面的面积及形状参数，结果如表 4-9 所示，其中波浪参数是以波浪频率为 4 s^{-1} ，遭遇频率为 6.65 s^{-1} 的情况为例计算得到。

表 4-9 Series 60 船模水线下各剖面形状参数
Table 4-9 Shape parameters of each section under waterline of Series60

| 剖面序号 | 纵向位置 x (m) | 剖面面积 S (m^2) | 剖面系数 σ | 剖面系数 H_0 | 波浪系数 ξ_T |
|------|-----------------|------------------------------|---------------|------------|--------------|
| 01 | -1.11 | 0.0063 | 0.7883 | 0.2402 | 0.5823 |
| 02 | -1.01 | 0.0100 | 0.8011 | 0.3754 | 0.5822 |
| 03 | -0.91 | 0.0148 | 0.8042 | 0.5522 | 0.5822 |
| 04 | -0.81 | 0.0199 | 0.8213 | 0.7289 | 0.5822 |
| 05 | -0.71 | 0.0252 | 0.8466 | 0.8931 | 0.5822 |
| 06 | -0.61 | 0.0299 | 0.8678 | 1.1035 | 0.5822 |
| 07 | -0.51 | 0.0339 | 0.9021 | 1.1299 | 0.5822 |
| 08 | -0.41 | 0.0370 | 0.9297 | 1.1960 | 0.5822 |
| 09 | -0.31 | 0.0387 | 0.9489 | 1.2243 | 0.5822 |
| 10 | -0.21 | 0.0393 | 0.9521 | 1.2393 | 0.5822 |
| 11 | -0.11 | 0.0400 | 0.9643 | 1.2467 | 0.5822 |
| 12 | -0.01 | 0.0395 | 0.9521 | 1.2464 | 0.5822 |

表 4-9 (续)

| 剖面序号 | 纵向位置 x (m) | 剖面面积 S (m^2) | 剖面系数 σ | 剖面系数 H_0 | 波浪系数 ξ_T |
|------|-----------------|-----------------------|---------------|------------|--------------|
| 13 | 0.09 | 0.0388 | 0.9387 | 1.2433 | 0.5822 |
| 14 | 0.19 | 0.0380 | 0.9225 | 1.2391 | 0.5822 |
| 15 | 0.29 | 0.0368 | 0.8975 | 1.2330 | 0.5822 |
| 16 | 0.39 | 0.0339 | 0.8403 | 1.2104 | 0.5822 |
| 17 | 0.49 | 0.0306 | 0.7825 | 1.1752 | 0.5822 |
| 18 | 0.59 | 0.0263 | 0.7203 | 1.0974 | 0.5822 |
| 19 | 0.69 | 0.0211 | 0.6469 | 0.9805 | 0.5822 |
| 20 | 0.79 | 0.0154 | 0.5715 | 0.8095 | 0.5822 |
| 21 | 0.89 | 0.0096 | 0.4837 | 0.5960 | 0.5822 |

在得到各横剖面参数后，运行 Tasai_Spline() 函数，求解各横剖面的插值系数 \bar{A}_z 和 C ，以及水动力系数 $m_z(x)$ 和 $N_z(x)$ ，同样，以波浪频率为 4s^{-1} ，对应遭遇频率为 6.65s^{-1} 的情况为例，计算结果如表 4-10 所示。

表 4-10 Series 60 各剖面水动力系数($\omega_e = 6.65\text{s}^{-1}$)Table 4-10 Hydrodynamic coefficients of each section of Series 60 ($\omega_e = 6.65\text{s}^{-1}$)

| 剖面序号 | 纵向位置 x (m) | 系数 \bar{A}_z | 系数 C | 垂向附加质量 $m_z(\text{kg})$ | 垂向阻尼系数 $N_z(\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m})$ |
|------|-----------------|----------------|--------|----------------------------|--|
| 01 | -1.11 | 0.1938 | 0.4954 | 0.766 | 12.577 |
| 02 | -1.01 | 0.2738 | 0.5396 | 2.038 | 25.106 |
| 03 | -0.91 | 0.3770 | 0.5762 | 4.707 | 47.587 |
| 04 | -0.81 | 0.4692 | 0.6143 | 8.746 | 73.736 |
| 05 | -0.71 | 0.5415 | 0.6451 | 13.789 | 98.199 |
| 06 | -0.61 | 0.5953 | 0.6691 | 19.196 | 118.685 |
| 07 | -0.51 | 0.6149 | 0.7035 | 24.064 | 126.638 |
| 08 | -0.41 | 0.6248 | 0.7344 | 28.147 | 130.745 |
| 09 | -0.31 | 0.6186 | 0.7704 | 30.945 | 128.165 |
| 10 | -0.21 | 0.6226 | 0.7762 | 31.940 | 129.795 |
| 11 | -0.11 | 0.6166 | 0.7957 | 33.136 | 127.327 |

表 4-10 (续)

| 剖面序号 | 纵向位置 x (m) | 系数 \bar{A}_z | 系数 C | 垂向附加质量 m_z (kg) | 垂向阻尼系数 N_z (kg·s/m) |
|------|-----------------|----------------|--------|----------------------|--------------------------|
| 12 | -0.01 | 0.6259 | 0.7753 | 32.269 | 131.139 |
| 13 | 0.09 | 0.6374 | 0.7469 | 30.932 | 136.066 |
| 14 | 0.19 | 0.6517 | 0.7195 | 29.595 | 142.220 |
| 15 | 0.29 | 0.6648 | 0.6937 | 28.256 | 148.007 |
| 16 | 0.39 | 0.6994 | 0.6558 | 25.745 | 163.828 |
| 17 | 0.49 | 0.7155 | 0.6215 | 22.996 | 171.416 |
| 18 | 0.59 | 0.7091 | 0.5943 | 19.174 | 168.400 |
| 19 | 0.69 | 0.6743 | 0.5824 | 15.002 | 152.260 |
| 20 | 0.79 | 0.6003 | 0.5862 | 10.293 | 120.692 |
| 21 | 0.89 | 0.4779 | 0.5716 | 5.440 | 76.475 |

4.2.3 Series60 纵向运动水动力系数计算

得到 Series60 船模各个剖面的二维水动力系数后，根据切片法原理，计算不同波浪频率下船舶整体垂荡和纵摇及其耦合水动力系数，其中，附加质量计算结果如表 4-10 所示。

表 4-11 Series 60 纵向运动附加质量
Table 4-11 Added mass of longitudinal motions of Series 60

| 波浪频率 ω (s ⁻¹) | 遭遇频率 ω_e (s ⁻¹) | 垂荡附加质 量 A_{33} (kg) | 垂荡耦合纵 摇附加质量 A_{35} (kg·m) | 纵摇耦合垂 荡附加质量 A_{53} (kg·m) | 纵摇附加质量 A_{55} (kg·m ²) |
|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---|
| 3.0 | 4.493 | 53.513 | -24.300 | 26.713 | 19.981 |
| 3.2 | 4.898 | 51.752 | -18.544 | 21.441 | 18.136 |
| 3.4 | 5.317 | 49.897 | -14.244 | 17.604 | 16.578 |
| 3.6 | 5.749 | 48.130 | -10.873 | 14.614 | 15.296 |
| 3.8 | 6.195 | 46.747 | -8.137 | 12.075 | 14.328 |
| 4.0 | 6.654 | 46.098 | -5.902 | 9.752 | 13.727 |
| 4.2 | 7.126 | 46.281 | -4.136 | 7.626 | 13.455 |
| 4.4 | 7.611 | 47.265 | -2.810 | 5.713 | 13.455 |

表 4-11 (续)

| 波浪频率 ω (s^{-1}) | 遭遇频率 ω_e (s^{-1}) | 垂荡附加质量 A_{33} (kg) | 垂荡耦合纵摇附加质量 A_{35} (kg·m) | 纵摇耦合垂荡附加质量 A_{53} (kg·m) | 纵摇附加质量 A_{55} (kg·m 2) |
|-------------------------------|---------------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| 4.6 | 8.109 | 48.895 | -1.872 | 4.028 | 13.656 |
| 4.8 | 8.621 | 50.838 | -1.245 | 2.599 | 13.959 |
| 5.0 | 9.146 | 52.585 | -0.824 | 1.462 | 14.238 |
| 5.2 | 9.685 | 53.995 | -0.543 | 0.572 | 14.467 |
| 5.4 | 10.236 | 55.210 | -0.342 | -0.148 | 14.679 |
| 5.6 | 10.801 | 56.479 | -0.251 | -0.776 | 14.923 |
| 5.8 | 11.379 | 58.042 | -0.269 | -1.342 | 15.240 |
| 6.0 | 11.971 | 59.893 | -0.378 | -1.883 | 15.624 |

根据上表结果，将垂荡和纵摇及其耦合运动的附加质量进行无因次化，绘制其随遭遇频率变化的曲线，并与试验值三维势流法计算结果对比，如图 4-9 所示。

Series60 船模垂荡和纵摇及其耦合附加质量的对比结果表明：

(1) 垂荡附加质量 A_{33} 的本文计算结果的整体趋势与试验值保持一致，在各个频率下的计算结果均略小于试验结果，在中高频率情况下与试验值非常接近，在低频率条件下精度低于三维势流方法；

(2) 垂荡耦合纵摇附加质量 A_{35} 的计算对比结果与 Wigley 船型的计算对比结果类似，在低频率时与试验结果有较大的偏差，精度远不如三维势流方法；随着频率的增大，偏差逐渐减小，在中高频时，本程序的计算结果与实验结果颇为一致，精度甚至略优于三维势流方法；

(3) 纵摇耦合垂荡附加质量 A_{53} 的计算结果与 A_{35} 的计算结果趋势相反，在低频率时，计算结果偏大，与试验值有较大偏差，精度低于三维势流方法；当频率变大，与试验值的差异逐渐减小，在中高频时，本程序计算结果与试验值较为一致，可以应用到下一步计算中；

(4) 纵摇附加质量 A_{55} 的自编程序计算结果在各个频率下都与试验值吻合较好，趋势和试验值一致，在高频时甚至优于三维势流理论的结果。

同时考虑 Wigley 船模和 Series60 船模的计算对比结果，本文自编程序计算 A_{33} 和 A_{55} 在各个频率下都能够与试验值吻合较好，误差均在允许范围内。而 A_{35} 和 A_{53} 的结果在低频率时与试验值结果相差较大，但是在中高频时与试验值结果较为一

致，可以代入运动微分方程进行后续运动的求解。

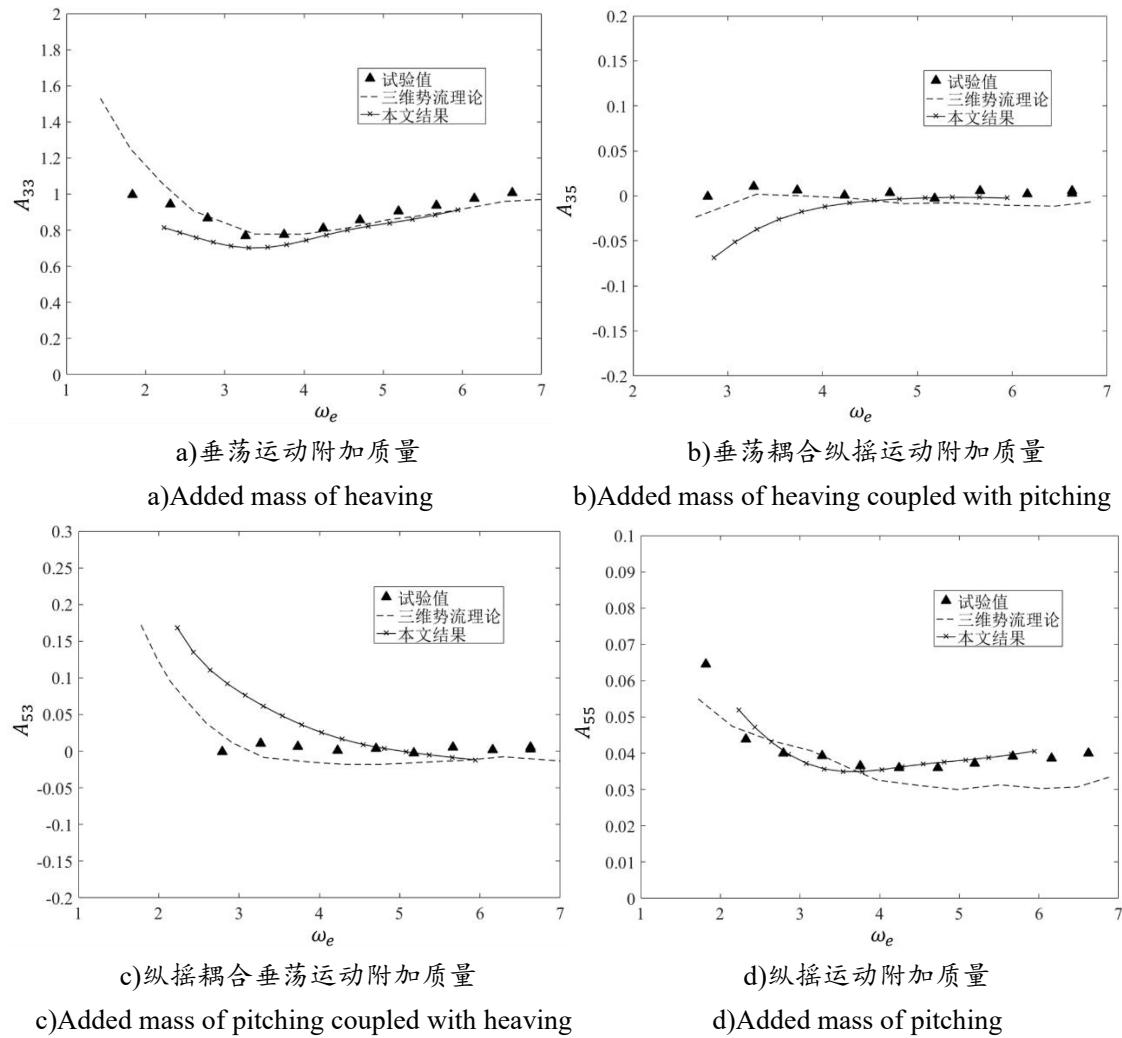


图 4-9 Series 60($Fr=0.2$)纵向运动附加质量结果对比

Fig.4-9 Comparison of added mass of longitudinal motions of Series 60($Fr=0.2$)

自编程序计算所得的垂荡和纵摇及其耦合阻尼系数结果如表 4-11 所示。

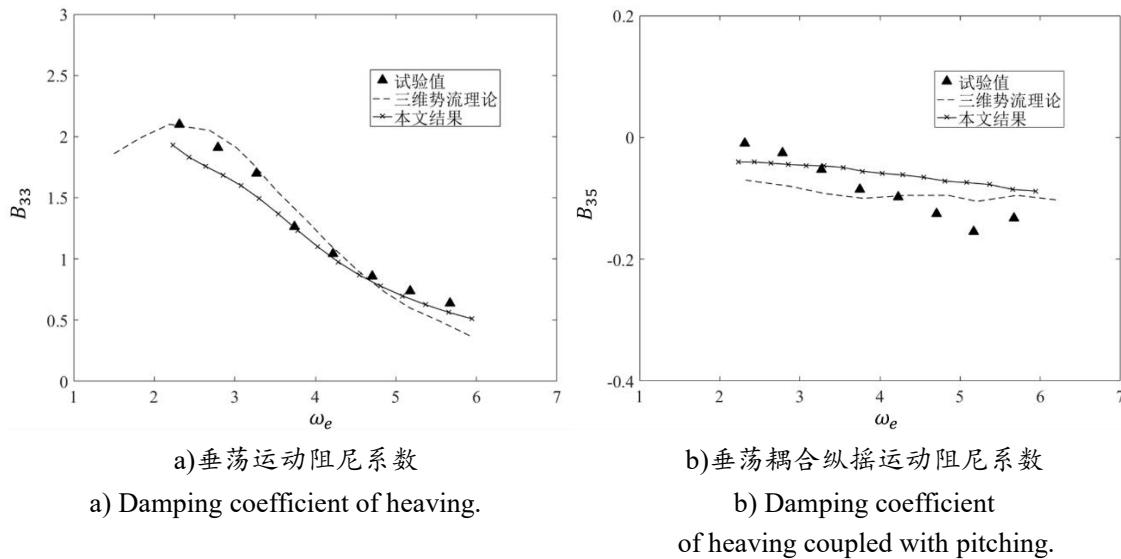
表 4-12 Series60 纵向运动阻尼系数
Table 4-12 Damping coefficient of longitudinal motions of Series60

| 波浪频率 $\omega(s^{-1})$ | 遭遇频率 $\omega_e(s^{-1})$ | 垂荡阻尼系 数 B_{33} (kg·s/m) | 垂荡耦合纵 摇阻尼系数 B_{35} (kg·s) | 纵摇耦合垂 荡阻尼系数 B_{53} (kg·s) | 纵摇阻尼系数 B_{55} (kg·s·m) |
|--------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 3.0 | 4.493 | 360.865 | -18.162 | -10.293 | 155.210 |
| 3.2 | 4.898 | 342.701 | -18.205 | -13.276 | 143.540 |

表 4-12 (续)

| 波浪频率 ω (s ⁻¹) | 遭遇频率 ω_e (s ⁻¹) | 垂荡阻尼系数 B_{33} (kg·s/m) | 垂荡耦合纵摇阻尼系数 B_{35} (kg·s) | 纵摇耦合垂荡阻尼系数 B_{53} (kg·s) | 纵摇阻尼系数 B_{55} (kg·s·m) |
|-------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| 3.4 | 5.317 | 328.447 | -19.136 | -16.814 | 134.918 |
| 3.6 | 5.749 | 314.984 | -20.052 | -25.109 | 127.645 |
| 3.8 | 6.195 | 299.320 | -20.784 | -33.511 | 120.343 |
| 4.0 | 6.654 | 279.370 | -21.237 | -42.156 | 112.110 |
| 4.2 | 7.126 | 256.028 | -22.273 | -49.097 | 103.106 |
| 4.4 | 7.611 | 230.974 | -25.116 | -56.850 | 93.740 |
| 4.6 | 8.109 | 205.977 | -26.693 | -63.222 | 84.443 |
| 4.8 | 8.621 | 182.762 | -27.849 | -70.250 | 75.648 |
| 5.0 | 9.146 | 162.691 | -29.672 | -75.109 | 67.716 |
| 5.2 | 9.685 | 145.525 | -32.416 | -79.857 | 60.663 |
| 5.4 | 10.236 | 130.563 | -33.559 | -82.423 | 54.421 |
| 5.6 | 10.801 | 117.322 | -34.984 | -85.489 | 48.996 |
| 5.8 | 11.379 | 105.615 | -38.602 | -89.483 | 44.390 |
| 6.0 | 11.971 | 95.551 | -39.897 | -94.389 | 40.517 |

绘制 Series60 船模垂荡和纵摇及其耦合运动的无因次化阻尼系数随遭遇频率变化的曲线并与试验值、三维势流结果进行对比，如图 4-10 所示。



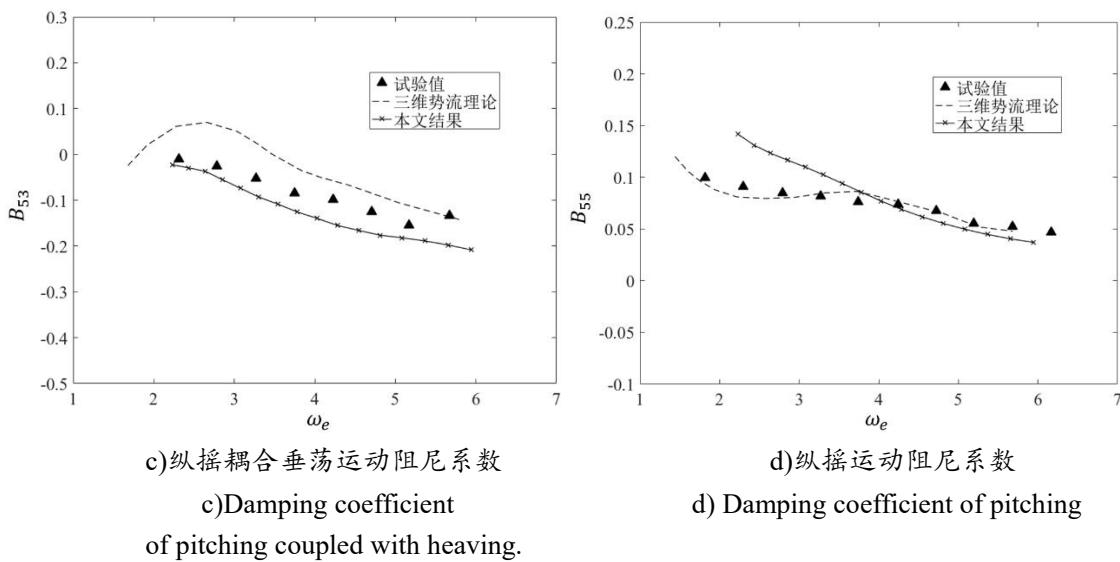


图 4-10 Series60($Fr=0.2$)纵向运动阻尼系数结果对比
Fig.4-10 Comparison of damping coefficient of longitudinal motions of Series60($Fr=0.2$)

Series60 船模垂荡和纵摇及其耦合阻尼系数的对比结果表明：

- (1) 垂荡阻尼系数 B_{33} 的本文程序计算结果与试验值较为一致，在高频时与试验结果吻合良好，精度甚至优于三维方法，但在低频时计算结果稍低于试验结果，精度也低于三维势流方法；
- (2) 垂荡耦合纵摇阻尼系数 B_{35} 的两种方法的计算结果均与试验值存在一定差异，相较来说，三维势流理论的计算精度更高；
- (3) 纵摇耦合垂荡阻尼系数 B_{53} 的本文程序计算结果的整体趋势与试验值较为一致，整体略小于试验值，相反，三维方法的结果要比试验值偏大，在精度上，某些频率下，本文结果优于三维方法；
- (4) Series60 船模的纵摇阻尼系数 B_{55} 的自编程序计算结果与 Wigley 船模 B_{55} 的计算结果情况类似，二者均在低频时较试验值高，在高频时较试验结果低，精度也低于三维势流方法。但整体相差不大，计算得到的值基本满足后续计算的要求。

同时考虑 Wigley 船模和 Series60 船模的计算对比结果，本文自编程序计算 B_{33} 在各个频率下都能够与试验值颇为一致，误差较小。而 A_{35} 、 A_{33} 和 A_{55} 的计算结果在不同频率下与试验值有一定差异，但整体差异不大，可以代入运动微分方程进行后续运动的求解。

4.2.4 Series60 纵向运动求解

由各剖面的水动力系数，计算 Series60 船模所受纵向波浪力以及绕 y 轴旋转的波浪力矩与波浪幅值的比值，计算结果如表 4-12 所示。

表 4-13 Series60 波浪力（矩）
Table 4-13 Wave force and moment of Series60

| 波浪频率 $\omega(\text{s}^{-1})$ | 波长 $\lambda(\text{m})$ | 波浪力 F_3 的 波浪幅值响应 $F_3 / \zeta_A (\text{N/m})$ | 波浪力矩 F_5 的 波浪幅值响应 $F_5 / \zeta_A (\text{N})$ |
|---------------------------------|---------------------------|---|--|
| 3.0 | 6.849 | 4158.37 | 2164.80 |
| 3.2 | 6.019 | 3825.34 | 2283.16 |
| 3.4 | 5.332 | 3457.19 | 2386.85 |
| 3.6 | 4.756 | 3055.49 | 2466.88 |
| 3.8 | 4.269 | 2622.06 | 2514.18 |
| 4.0 | 3.852 | 2159.47 | 2519.76 |
| 4.2 | 3.494 | 1674.63 | 2476.72 |
| 4.4 | 3.184 | 1180.21 | 2379.65 |
| 4.6 | 2.913 | 702.12 | 2225.32 |
| 4.8 | 2.675 | 339.28 | 2014.00 |
| 5.0 | 2.466 | 440.74 | 1750.66 |
| 5.2 | 2.280 | 773.35 | 1442.30 |
| 5.4 | 2.114 | 1078.83 | 1098.02 |
| 5.6 | 1.966 | 1314.95 | 730.45 |
| 5.8 | 1.832 | 1467.15 | 362.82 |
| 6.0 | 1.712 | 1523.94 | 166.53 |

在得到 Series60 船模在各波浪频率下的垂荡、纵摇及其耦合运动的水动力系数以及垂向波浪力，绕 y 轴的波浪力矩后，代入垂荡纵摇耦合运动微分方程组中，求解方程特解，便得到 Series60 船模在 $\text{Fr}=0.2$ 时的垂荡和纵摇运动的幅值响应 η_3 / ζ_A 和 η_5 / ζ_A ，本文程序计算结果如表 4-13 所示。

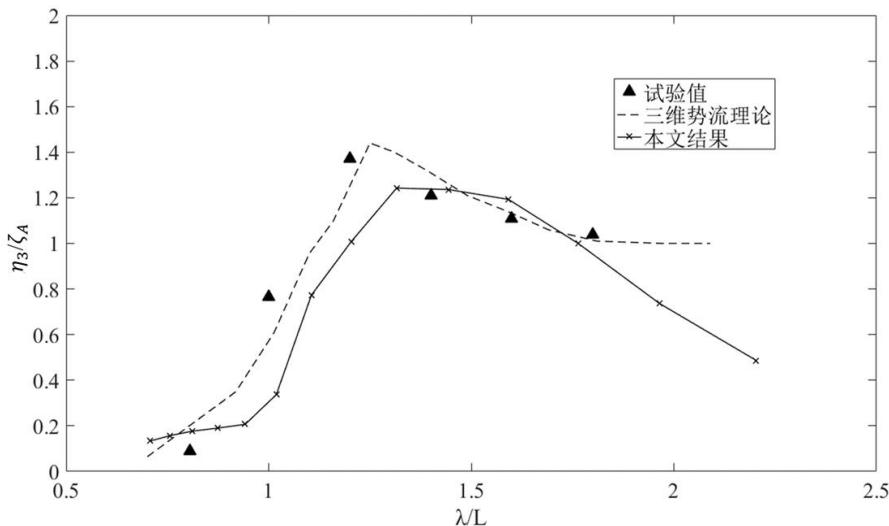
表 4-14 Series60 垂荡纵摇运动幅值响应
Table 4-14 Heaving and pitching amplitude response of Series60

| 波浪频率 ω (s ⁻¹) | 波长 λ (m) | 垂荡幅值响应 η_3 / ζ_A | 纵摇幅值响应 η_5 / ζ_A (m ⁻¹) |
|-------------------------------------|---------------------|------------------------------|---|
| 3.0 | 6.849 | 0.6530 | 1.3057 |
| 3.2 | 6.019 | 0.4777 | 1.5674 |
| 3.4 | 5.332 | 0.4868 | 1.8457 |
| 3.6 | 4.756 | 0.7356 | 2.1961 |
| 3.8 | 4.269 | 0.9997 | 2.5093 |
| 4.0 | 3.852 | 1.1928 | 2.7940 |
| 4.2 | 3.494 | 1.2362 | 3.0072 |
| 4.4 | 3.184 | 1.2425 | 3.0354 |
| 4.6 | 2.913 | 1.0080 | 2.4963 |
| 4.8 | 2.675 | 0.7735 | 1.8726 |
| 5.0 | 2.466 | 0.3371 | 1.4124 |
| 5.2 | 2.280 | 0.2067 | 1.0290 |
| 5.4 | 2.114 | 0.1901 | 0.7066 |
| 5.6 | 1.966 | 0.1770 | 0.4393 |
| 5.8 | 1.832 | 0.1574 | 0.3710 |
| 6.0 | 1.712 | 0.1335 | 0.3524 |

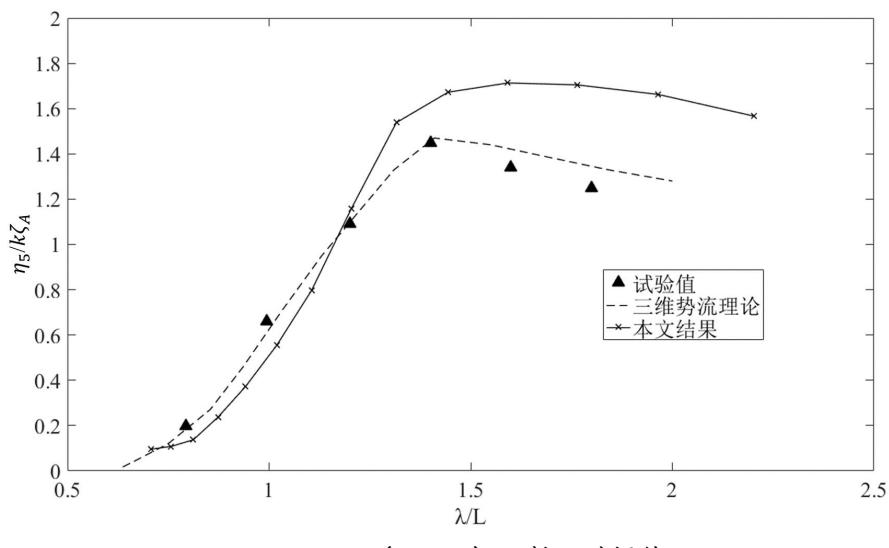
将 Series60 船模在 $Fr=0.2$ 时的垂荡和纵摇运动的计算结果无因次化，绘制随无因次化波长变化的曲线，并与试验值、三维势流理论方法比较，如图 4-11 所示。对比结果表明：

(1) 对于垂荡运动幅值响应 η_3 / ζ_A ，本文自编程序的计算结果与试验结果的整体趋势保持一致，虽然计算精度与三维势流方法相比存在一定的差距，但是仍能够反映 Series60 船模在波浪中的垂荡运动情况。在波长较小时，程序计算结果较试验值为小，在相对波长为 1.5 左右时，程序评估结果与试验值最为接近。

(2) 对于纵摇运动幅值响应 $\eta_5 / k\zeta_A$ ，本文自编程序计算结果总体趋势与试验值相符，在波长较短，频率较高时，与试验值、三维势流方法计算结果吻合较好，精度略低于三维方法；在低频时，计算结果与试验值有一定偏差，整体较试验值为大，计算精度远不如三维势流方法。



a) Series60 (Fr=0.2) 垂荡运动幅值
a) Amplitude of heaving of Series60 (Fr=0.2)



b) Series60 (Fr=0.2) 纵摇运动幅值
b) Amplitude of pitching of Series60 (Fr=0.2)

图 4-11 Series60 (Fr=0.2) 垂荡纵摇运动幅值对比

Fig.4-11 Comparison of heaving and pitching amplitude of Series60 (Fr=0.2)

4.3 本章小结

本章首先以 Wigley 船模为对象进行计算，来验证本文程序的有效性，选取 17 个横剖面，设置不同频率共 14 个工况进行计算，结果得到 Wigley 在各工况下的垂荡纵摇及其耦合运动的水动力系数、波浪力（矩）以及垂荡纵摇运动幅值响应。



17004307

与试验数据对比结果表明：大部分水动力系数吻合较好， B_{35} 和 B_{53} 、 B_{55} 较试验值有一定误差；波浪力较试验值偏大，而波浪力矩吻合较好；运动幅值响应总体趋势与试验值吻合，其中垂荡幅值计算结果偏大，纵摇结果偏小。

然后又对 Series60 船模进行计算，选取 21 个横剖面，设置 16 个工况。计算结果与试验数据比较表明：水动力系数 A_{35} 、 A_{53} 、 B_{55} 在频率较小时有较大误差， B_{35} 在频率较大时较试验值偏大，其余水动力系数吻合良好；垂荡运动计算结果与试验值吻合良好，但纵摇运动的计算结果在长波时较试验值偏大。

根据两个船型的计算结果，本文评估程序计算得到结果基本与试验值吻合，虽然精度不如三维势流方法，但是与源汇法不相上下，甚至在某些水动力系数的计算上由于源汇法，因此可以较为准确地计算船舶的纵向运动。

第五章 KCS 纵向运动评估及船型优化设计

经过第四章 Wigley 和 Series60 两个船模对程序的验证，本程序完成一条船的纵向运动评估仅需要 3~5 秒，可以快速对批量船型进行评估计算，适用于船体型线优化设计。因此本章选取 KCS 标准模型，以降低垂荡运动幅值为目标，首先进行纵向运动评估结果验证，再利用平移法对船体进行变形，生成一系列样本船，利用本文自编程序对样本船进行评估，最后采用遗传法进行寻优，得到最终优化船型。

5.1 优化对象及工况设置

KCS (KRISO Container Ship) 是韩国船舶与海洋工程研究所设计的现代集装箱船，现作为标准模型广泛用于计算水动力学的验证中。本文中涉及的 KCS 船模及试验数据来自文献[101]。KCS 船模示意图如图 5-1 所示，主尺度及船型系数如表 5-1 所示。

表 5-1 KCS 船模主尺度及参数
Table 5-1 Main dimensions and parameters of KCS

| 项目 | 符号 | 单位 | 数值 |
|--------|-----------------|----------------|--------|
| 垂线间长 | L _{PP} | m | 6.070 |
| 型宽 | B | m | 0.850 |
| 吃水 | T | m | 0.285 |
| 方形系数 | C _B | — | 0.651 |
| 排水体积 | Δ | m ³ | 0.9571 |
| 重心高度 | x _G | m | 0.378 |
| 纵向惯性半径 | K _{yy} | m | 1.5175 |



图 5-1 KCS 船模示意图
Fig.5-1 KCS model

在沿船长方向取 23 个横剖面，剖面间隔为 0.2428m，如图 5-2 所示。由于靠近船尾的两个横剖面形状的剖面面积系数过小，不满足 Tasai 图谱的计算要求，因此在进行插值计算时将这两个剖面舍去，整体以数值积分的形式进行计算，因此共 21 个剖面作为切片法的切片进行计算。

KCS 船模在线性规则波中以 $Fr=0.261$ 的航速迎浪前行，在纵向运动评估计算中，波浪频率变化范围为 2.2s^{-1} 到 3.9s^{-1} ，间隔为 0.1s^{-1} 或 0.2s^{-1} 置一个工况进行计算，共 14 个工况。对应遭遇频率变化范围为 3.2s^{-1} 到 7.0s^{-1} ，对应波浪波长变化范围为 4.1m 到 12.7m。

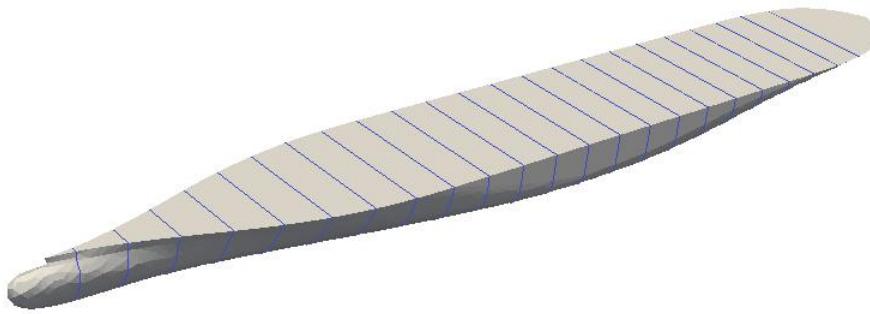


图 5-2 KCS 船模水下切片示意图
Fig.5-2 the sections of KCS under waterline

5.2 KCS 纵向运动计算

5.2.1 KCS 剖面水动力系数计算

将 KCS 船模的各剖面型值点写入 txt 文档中，程序读取文档并计算水线下各剖面的面积及形状参数，结果如表 5-2 所示，其中波浪参数是以波浪频率为 3s^{-1} ，遭遇频率为 4.85s^{-1} 的情况为例计算得到。

表 5-2 KCS 船模水线下各剖面形状参数
Table 5-2 Shape parameters of each section under waterline of KCS

| 剖面序号 | 纵向位置 x (m) | 剖面面积 S (m^2) | 剖面系数 σ | 剖面系数 H_0 | 波浪系数 ζ_T |
|------|-----------------|------------------------------|---------------|------------|----------------|
| 01 | -1.4264 | 0.1421 | 0.5993 | 1.4907 | 0.6756 |
| 02 | -1.1836 | 0.1715 | 0.7230 | 1.4907 | 0.6756 |

表 5-2 (续)

| 剖面序号 | 纵向位置 x (m) | 剖面面积 S (m^2) | 剖面系数 σ | 剖面系数 H_0 | 波浪系数 ξ_T |
|------|-----------------|-----------------------|---------------|------------|--------------|
| 03 | -0.9408 | 0.1933 | 0.8152 | 1.4907 | 0.6756 |
| 04 | -0.6980 | 0.2084 | 0.8786 | 1.4907 | 0.6756 |
| 05 | -0.4552 | 0.2194 | 0.9250 | 1.4907 | 0.6756 |
| 06 | -0.2124 | 0.2273 | 0.9585 | 1.4907 | 0.6756 |
| 07 | 0.0303 | 0.2269 | 0.9569 | 1.4907 | 0.6756 |
| 08 | 0.2731 | 0.2282 | 0.9623 | 1.4907 | 0.6756 |
| 09 | 0.5159 | 0.2309 | 0.9737 | 1.4907 | 0.6756 |
| 10 | 0.7587 | 0.2267 | 0.9559 | 1.4907 | 0.6756 |
| 11 | 1.0015 | 0.2278 | 0.9606 | 1.4907 | 0.6756 |
| 12 | 1.2443 | 0.2139 | 0.9021 | 1.4907 | 0.6756 |
| 13 | 1.4871 | 0.2109 | 0.8897 | 1.4901 | 0.6756 |
| 14 | 1.7299 | 0.1934 | 0.8296 | 1.4653 | 0.6756 |
| 15 | 1.9727 | 0.1741 | 0.7858 | 1.3926 | 0.6756 |
| 16 | 2.2155 | 0.1486 | 0.7423 | 1.2583 | 0.6756 |
| 17 | 2.4583 | 0.1126 | 0.6693 | 1.0571 | 0.6756 |
| 18 | 2.7011 | 0.0853 | 0.6725 | 0.7977 | 0.6756 |
| 19 | 2.9439 | 0.0550 | 0.6753 | 0.5123 | 0.6756 |
| 20 | 3.1867 | 0.0319 | 0.7514 | 0.2673 | 0.6756 |
| 21 | 3.4295 | 0.0228 | 0.6432 | 0.2230 | 0.6756 |

在得到各横剖面参数后，运行 Tasai_Spline() 函数，求解各横剖面的插值系数 \bar{A}_z 和 C ，以及水动力系数 $m_z(x)$ 和 $N_z(x)$ ，同样，以波浪频率为 3s^{-1} ，对应遭遇频率为 4.85s^{-1} 的情况为例，计算结果如表 5-3 所示。

表 5-3 KCS 各剖面水动力系数 ($\omega_e = 4.85\text{s}^{-1}$)Table 5-3 Hydrodynamic coefficients of each section of KCS ($\omega_e = 4.85\text{s}^{-1}$)

| 剖面序号 | 纵向位置 x (m) | 系数 \bar{A}_z | 系数 C | 垂向附加质量 $m_z(\text{kg})$ | 垂向阻尼系数 $N_z(\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m})$ |
|------|-----------------|----------------|--------|----------------------------|--|
| 01 | -1.4264 | 1.0710 | 0.6904 | 196.469 | 993.143 |

表 5-3 (续)

| 剖面序号 | 纵向位置 x (m) | 系数 \bar{A}_z | 系数 C | 垂向附加质量 m_z (kg) | 垂向阻尼系数 N_z (kg·s/m) |
|------|-----------------|----------------|--------|----------------------|--------------------------|
| 02 | -1.1836 | 0.9836 | 0.6479 | 184.389 | 837.698 |
| 03 | -0.9408 | 0.8993 | 0.6532 | 185.896 | 700.317 |
| 04 | -0.6980 | 0.8375 | 0.6873 | 195.586 | 607.259 |
| 05 | -0.4552 | 0.7904 | 0.7275 | 207.032 | 541.023 |
| 06 | -0.2124 | 0.7491 | 0.7676 | 218.449 | 485.857 |
| 07 | 0.0303 | 0.7515 | 0.7651 | 217.751 | 489.028 |
| 08 | 0.2731 | 0.7433 | 0.7737 | 220.191 | 478.412 |
| 09 | 0.5159 | 0.7369 | 0.7874 | 224.078 | 470.187 |
| 10 | 0.7587 | 0.7530 | 0.7647 | 217.649 | 490.962 |
| 11 | 1.0015 | 0.7460 | 0.7719 | 219.673 | 481.876 |
| 12 | 1.2443 | 0.8137 | 0.7061 | 200.953 | 573.352 |
| 13 | 1.4871 | 0.8260 | 0.6957 | 197.831 | 590.696 |
| 14 | 1.7299 | 0.8746 | 0.6576 | 180.808 | 662.382 |
| 15 | 1.9727 | 0.8795 | 0.6327 | 157.131 | 669.803 |
| 16 | 2.2155 | 0.8397 | 0.6008 | 121.832 | 610.520 |
| 17 | 2.4583 | 0.7701 | 0.5600 | 80.129 | 513.553 |
| 18 | 2.7011 | 0.6185 | 0.5403 | 44.035 | 331.252 |
| 19 | 2.9439 | 0.4268 | 0.4736 | 15.921 | 157.692 |
| 20 | 3.1867 | 0.2331 | 0.4253 | 3.893 | 47.061 |
| 21 | 3.4295 | 0.2141 | 0.3378 | 2.150 | 39.683 |

5.2.2 KCS 船模纵向运动水动力系数

得到 KCS 船模各个剖面的二维水动力系数后, 根据切片法原理, 计算不同波浪频率下船舶整体垂荡和纵摇及其耦合水动力系数, 其中, 附加质量计算结果如表 5-4 所示。

表 5-4 KCS 纵向运动附加质量
Table 5-4 Added mass of longitudinal motions of KCS

| 波浪频率 $\omega(\text{s}^{-1})$ | 遭遇频率 $\omega_e(\text{s}^{-1})$ | 垂荡附加质量 $A_{33}(\text{kg})$ | 垂荡耦合纵摇附加质量 $A_{35}(\text{kg}\cdot\text{m})$ | 纵摇耦合垂荡附加质量 $A_{53}(\text{kg}\cdot\text{m})$ | 纵摇附加质量 $A_{55}(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$ |
|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--|--|--|
| 2.2 | 3.194 | 971.036 | -1117.760 | 459.424 | 1904.95 |
| 2.4 | 3.583 | 924.249 | -889.800 | 277.006 | 1730.78 |
| 2.6 | 3.988 | 879.029 | -724.856 | 157.700 | 1578.05 |
| 2.8 | 4.410 | 848.830 | -601.988 | 62.774 | 1463.85 |
| 2.9 | 4.627 | 843.110 | -554.817 | 18.202 | 1425.84 |
| 3.0 | 4.848 | 844.085 | -516.859 | -25.222 | 1400.56 |
| 3.1 | 5.073 | 851.598 | -487.637 | -67.682 | 1387.40 |
| 3.2 | 5.302 | 865.011 | -466.367 | -109.031 | 1385.13 |
| 3.3 | 5.536 | 883.059 | -451.853 | -148.708 | 1391.74 |
| 3.4 | 5.773 | 903.686 | -442.382 | -185.635 | 1404.10 |
| 3.5 | 6.015 | 923.933 | -435.640 | -218.148 | 1417.89 |
| 3.6 | 6.261 | 941.913 | -429.920 | -245.420 | 1430.33 |
| 3.8 | 6.765 | 971.641 | -420.078 | -286.538 | 1451.27 |
| 3.9 | 7.023 | 984.360 | -415.972 | -301.863 | 140.52 |

自编程序计算所得的垂荡和纵摇及其耦合阻尼系数结果如表 5-5 所示。

表 5-5 KCS 纵向运动阻尼系数
Table 5-5 Damping coefficient of longitudinal motions of KCS

| 波浪频率 $\omega(\text{s}^{-1})$ | 遭遇频率 $\omega_e(\text{s}^{-1})$ | 垂荡阻尼系数 $B_{33}(\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m})$ | 垂荡耦合纵摇阻尼系数 $B_{35}(\text{kg}\cdot\text{s})$ | 纵摇耦合垂荡阻尼系数 $B_{53}(\text{kg}\cdot\text{s})$ | 纵摇阻尼系数 $B_{55}(\text{kg}\cdot\text{s}\cdot\text{m})$ |
|---------------------------------|-----------------------------------|---|--|--|---|
| 2.2 | 3.194 | 3998.94 | 387.89 | -3540.20 | 9385.71 |
| 2.4 | 3.583 | 3722.16 | 392.80 | -3343.29 | 8601.84 |
| 2.6 | 3.988 | 3487.76 | 393.99 | -3157.36 | 8008.12 |
| 2.8 | 4.410 | 3211.57 | 455.59 | -2972.07 | 7399.25 |
| 2.9 | 4.627 | 3047.42 | 520.66 | -2883.06 | 7060.99 |
| 3.0 | 4.848 | 2870.48 | 606.74 | -2800.08 | 6704.97 |

表 5-5 (续)

| 波浪频率 $\omega(\text{s}^{-1})$ | 遭遇频率 $\omega_e(\text{s}^{-1})$ | 垂荡阻尼系数 B_{33} ($\text{kg}\cdot\text{s}/\text{m}$) | 垂荡耦合纵摇阻尼系数 B_{35} ($\text{kg}\cdot\text{s}$) | 纵摇耦合垂荡阻尼系数 B_{53} ($\text{kg}\cdot\text{s}$) | 纵摇阻尼系数 B_{55} ($\text{kg}\cdot\text{s}\cdot\text{m}$) |
|---------------------------------|-----------------------------------|---|---|---|---|
| 3.1 | 5.073 | 2685.16 | 711.01 | -2725.32 | 6336.68 |
| 3.2 | 5.302 | 2496.18 | 829.55 | -2660.08 | 5962.36 |
| 3.3 | 5.536 | 2308.42 | 957.18 | -2604.49 | 5588.76 |
| 3.4 | 5.773 | 2126.75 | 1087.18 | -2556.96 | 5222.88 |
| 3.5 | 6.015 | 1955.82 | 1211.21 | -2513.90 | 4871.63 |
| 3.6 | 6.261 | 1797.71 | 1324.46 | -2472.54 | 4538.98 |
| 3.8 | 6.765 | 1519.34 | 1520.11 | -2395.74 | 3935.58 |
| 3.9 | 7.023 | 1399.33 | 1604.47 | -2362.25 | 3669.31 |

5.2.3 KCS 纵向运动求解

由各剖面的水动力系数, 计算 KCS 船模所受纵向波浪力以及绕 y 轴旋转的波浪力矩与波浪幅值的比值, 计算结果如表 5-6 所示。

表 5-6 KCS 波浪力 (矩)
Table 5-6 Wave force and moment of KCS

| 波浪频率 $\omega(\text{s}^{-1})$ | 波长 $\lambda(\text{m})$ | 波浪力 F_3 的 波浪幅值响应 $F_3 / \zeta_A (\text{N}/\text{m})$ | 波浪力矩 F_5 的 波浪幅值响应 $F_5 / \zeta_A (\text{N})$ |
|---------------------------------|---------------------------|--|--|
| 2.2 | 12.735 | 30712.80 | 30184.83 |
| 2.4 | 10.701 | 27913.51 | 34683.42 |
| 2.6 | 9.118 | 24551.58 | 39402.15 |
| 2.8 | 7.862 | 21137.33 | 40617.00 |
| 2.9 | 7.329 | 20022.59 | 41148.61 |
| 3.0 | 6.849 | 17970.44 | 40177.82 |
| 3.1 | 6.414 | 17210.89 | 38282.18 |
| 3.2 | 6.019 | 15813.67 | 36262.62 |
| 3.3 | 5.660 | 15200.27 | 34247.28 |
| 3.4 | 5.332 | 13795.02 | 32386.35 |

表 5-6 (续)

| 波浪频率 $\omega(s^{-1})$ | 波长 $\lambda(m)$ | 波浪力 F_3 的 波浪幅值响应 $F_3 / \zeta_A(N/m)$ | 波浪力矩 F_5 的 波浪幅值响应 $F_5 / \zeta_A(N)$ |
|--------------------------|--------------------|---|--|
| 3.5 | 5.032 | 13036.57 | 29810.66 |
| 3.6 | 4.756 | 11379.21 | 27566.71 |
| 3.8 | 4.269 | 9726.93 | 22193.90 |
| 3.9 | 4.052 | 9324.18 | 19127.40 |

在得到 KCS 船模在各波浪频率下的垂荡、纵摇及其耦合运动的水动力系数以及垂向波浪力，绕 y 轴的波浪力矩后，代入垂荡纵摇耦合运动微分方程组中，求解方程特解，便得到 KCS 船模在 $Fr=0.261$ 时的垂荡和纵摇运动的幅值响应 η_3 / ζ_A 和 η_5 / ζ_A ，自编程序计算结果如表 5-7 所示。

表 5-7 KCS 垂荡纵摇运动幅值响应
Table 5-7 Heaving and pitching amplitude response of KCS

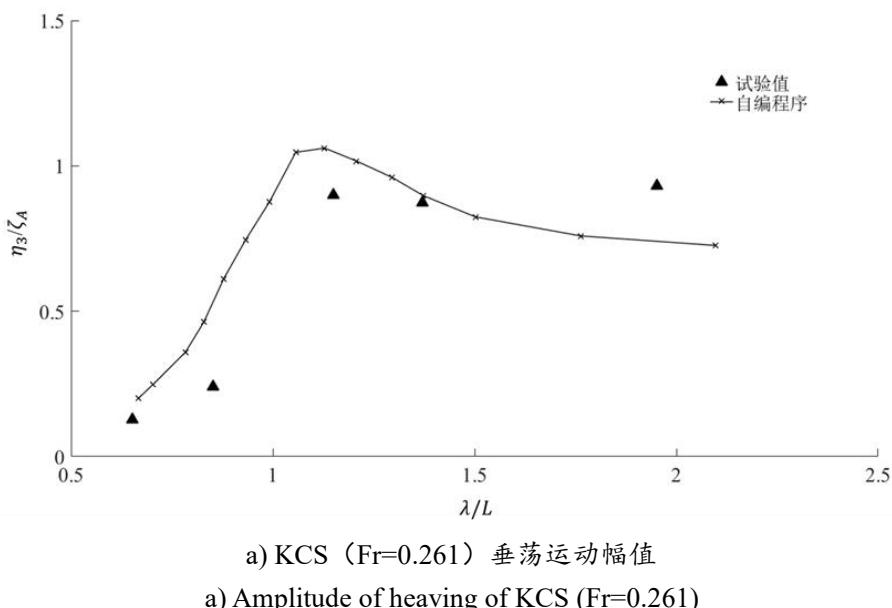
| 波浪频率 $\omega(s^{-1})$ | 波长 $\lambda(m)$ | 垂荡幅值响应 η_3 / ζ_A | 纵摇幅值响应 $\eta_5 / \zeta_A(m^{-1})$ |
|--------------------------|--------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| 2.2 | 12.735 | 0.7262 | 0.3726 |
| 2.4 | 10.701 | 0.7591 | 0.4731 |
| 2.6 | 9.118 | 0.8245 | 0.6002 |
| 2.8 | 7.862 | 0.9605 | 0.7267 |
| 2.9 | 7.329 | 1.0166 | 0.8208 |
| 3.0 | 6.849 | 1.0611 | 0.9234 |
| 3.1 | 6.414 | 1.0464 | 1.0193 |
| 3.2 | 6.019 | 0.8762 | 0.9784 |
| 3.3 | 5.660 | 0.7452 | 0.8205 |
| 3.4 | 5.332 | 0.6120 | 0.6345 |
| 3.5 | 5.032 | 0.4625 | 0.4693 |
| 3.6 | 4.756 | 0.3595 | 0.3334 |
| 3.8 | 4.269 | 0.2482 | 0.1292 |
| 3.9 | 4.052 | 0.2015 | 0.0502 |

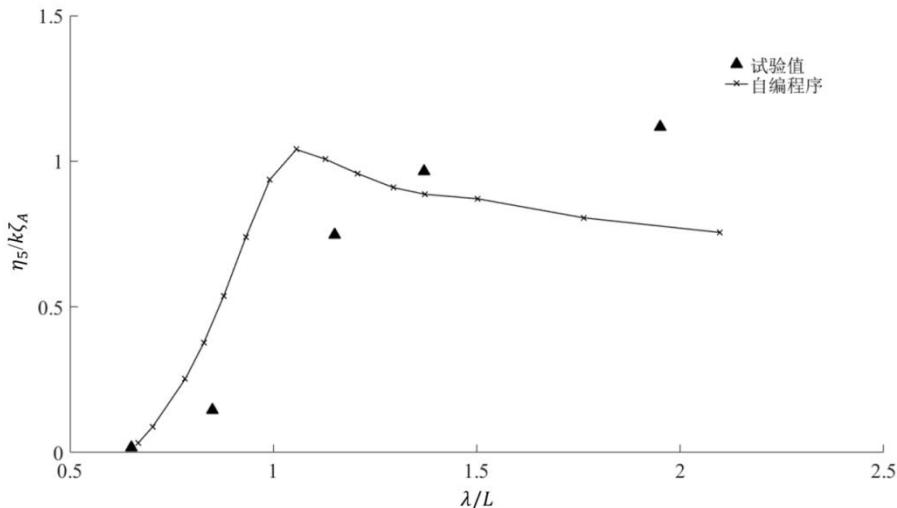
将 KCS 船模在 $Fr=0.261$ 时的垂荡和纵摇运动的计算结果无因次化, 绘制随无因次化波长变化的曲线, 并与试验值比较, 如图 5-3 所示。对比结果表明:

(1) 对于垂荡运动幅值响应 η_3 / ζ_A , 本文自编程序的计算结果与试验结果的整体趋势保持一致, 在波长较短时, 计算值较试验值偏大, 当波长较长时, 计算值较试验值偏小。在无因次化波长为 1.371, 即波长为 8.321m 时, 计算值与试验值吻合较好, 相对误差为 4.3%, 因此在之后的船型优化设计中, 拟选用波长为 8.321m 时的工况进行以减小船舶垂荡运动幅值为目标的优化过程。

(2) 对于纵摇运动幅值响应 $\eta_5 / k\zeta_A$, 本文自编程序计算结果总体趋势与试验值相符, 波长较短时, 计算值整体较试验值偏大, 随着波长逐渐增长, 计算值与试验值逐渐贴近, 当在波长较长时, 程序计算值较与试验值偏小。在波长为 8.321m 处, 计算值略小于试验值, 相对误差为 8.56%。

由此可以看出, 对于 KCS 船, 当波长为 8.321m 的工况下, 无论是垂荡运动还是纵摇运动, 计算值与试验值均较为吻合, 因此可以以该工况进行下一步的船型优化设计。





b) KCS (Fr=0.261) 纵摇运动幅值

b) Amplitude of pitching of KCS (Fr=0.261)

图 5-3 KCS (Fr=0.261) 垂荡纵摇运动幅值对比

Fig.5-3 Comparison of heaving and pitching amplitude of KCS (Fr=0.261)

5.3 KCS 垂荡运动优化设计

5.3.1 目标函数及约束条件

(1) 目标函数

由试验数据可以看出, KCS 船模在相对波长在 1 到 2 间, 船舶的垂荡运动幅值处于较高的状态, 同时也是船舶常常遭遇到的波浪情况。又根据本文开发程序对 KCS 纵向运动的评估结果, 当波长为 8.321m 时, 程序计算的垂荡运动幅值响应结果与试验结果吻合较好, 因此选定在该波长条件下进行船型优化设计。

本次优化设计的工况为: KCS 船模以 $Fr = 0.261$ 的航速迎浪航行于波长为 8.321m, 波高为 0.149m 的线性规则波中。优化目标为在此工况下船舶的垂荡运动幅度最小。目标函数为:

$$F = \eta_3 / \eta_{30} \quad (5.1)$$

式中, η_3 为优化船型在该工况下的垂荡运动幅值, η_{30} 为母型船在该工况下的垂荡运动幅值, 由程序计算所得母型船垂荡运动幅值响应 η_{30} / ζ 为 0.8975。其中 ζ 为 0.07466m。因此母型船垂荡运动幅值 η_{30} 为 0.0652m。本次优化设计工况数据见表 5-8。

表 5-8 KCS 船型优化设计工况
Table 5-8 Work condition of KCS ship hull form optimization design

| 项目 | 符号 | 单位 | 数值 |
|-----------|---------------------|-------|--------|
| 波长 | λ | m | 8.321 |
| 波高 | H_s | m | 1.149 |
| 波幅 | ζ | m | 0.0745 |
| 傅汝德数 | Fr | — | 0.261 |
| 母型船垂荡幅值 | η_{30} | m | 0.0669 |
| 母型船垂荡频率响应 | η_{30} / ζ | — | 0.8975 |
| 垂线间长 | L_{pp} | m | 6.070 |
| 型宽 | B | m | 0.850 |
| 吃水 | T | m | 0.285 |
| 排水体积 | ∇ | m^3 | 0.9571 |
| 湿表面积 | S_w | m^2 | 6.699 |

(2) 约束条件

在船型变换的过程中，为了防止变换得到与实际不相符的船型，需要明确变形设计的约束条件。本次变形设计的约束条件为船体的主尺度 L_{pp} 、B、T 保持不变，排水量变化幅度在 $\pm 0.5\%$ ，船体湿表面积变化幅度在 $\pm 0.5\%$ 。

5.3.2 船体变形方法

本次船型变换的方法采用平移法 (Shifting Method)，平移法是一种较为简便的参数化建模方法。它的操作对象是船舶的横剖面面积曲线，利用修改函数，修改船舶的横剖面面积曲线，再将各横剖面沿船长方向进行一定顺序的平移，最终得到船型变换后新的型线。

为了在船舶横剖面进行平移后可以得到连续协调的船体型线，在平移法中需要引入 g:

$$g = \begin{cases} \alpha_1 \left[0.5(1 - \cos 2\pi \frac{x - \alpha_2}{\alpha_2 - x_1}) \right]^{0.5}, & x_1 \leq x \leq \alpha_2 \\ -\alpha_1 \left[0.5(1 - \cos 2\pi \frac{x - \alpha_2}{\alpha_2 - x_2}) \right]^{0.5}, & \alpha_2 \leq x \leq x_2 \\ 0, & elsewhere \end{cases} \quad (5.2)$$

其中, x_1 和 x_2 为船舶变形区域的起始纵向位置, α_1 为变形的最大幅度, α_1 为变换区域内的不动剖面的纵向位置。示意图如图 5-4 所示。

平移法的特点是参数较少, 及设计变量较少, 简单易行效率高, 且可以对船舶进行大范围的变形, 由于本次优化设计的船舶运动评估程序也是基于切片理论, 因此使用平移法进行全船范围内的整体变形, 会使评估结果有较大变化, 因此本次优化设计采用平移法进行船体型线变换。

由于是全船范围的变形, 因此参数 x_1 和 x_2 保持不变, 分别为 0 和 1, 最大幅度参数和不动点位置参数为本次优化设计的设计变量, 取值范围均为 $[-0.04:0.04]$ 。

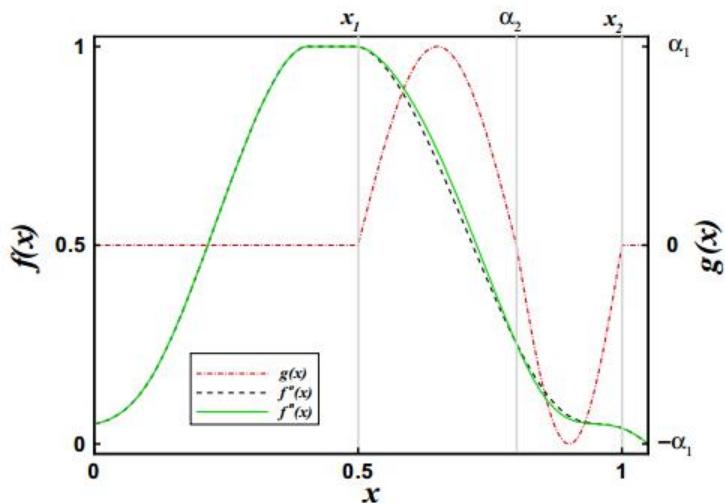


图 5-4 平移法示意图^[99]
Fig.5-4 Principle of shifting method

5.3.3 优化策略

本次优化通过优化拉丁方 OLHS (Optimal Latin Hypercube Sampling) 试验设计方法在变量范围内选取 20 个样本点, 根据变量关系变化得到 20 个样本船型, 并利用本文编写的船舶纵向运动评估程序, 对该 20 个新船型进行计算, 得到 20 个新船型在优化工况下的垂荡运动幅值响应。结果如表 5-9 所示。

表 5-9 样本船型计算结果
Table 5-9 Calculation result of sample ships

| 序号 | 设计变量 α_1 | 设计变量 α_2 | 垂荡幅值 η_3 / ζ | 目标函数 F |
|----|--------------------|--------------------|--------------------------|-------------|
| 01 | -0.0172 | 0.0146 | 0.9154 | 102.0% |
| 02 | 0.0202 | 0.0015 | 0.8432 | 93.9% |
| 03 | -0.0248 | 0.0008 | 0.873 | 97.3% |
| 04 | 0.0346 | 0.0176 | 0.9627 | 107.3% |
| 05 | 0.0011 | 0.0291 | 0.8932 | 99.5% |
| 06 | 0.0286 | 0.0077 | 0.8312 | 92.6% |
| 07 | -0.0380 | 0.0178 | 0.9238 | 102.9% |
| 08 | -0.0208 | -0.0124 | 0.9072 | 101.1% |
| 09 | 0.0057 | -0.0299 | 0.9512 | 106.0% |
| 10 | -0.0382 | -0.0398 | 0.9208 | 102.6% |
| 11 | 0.0205 | 0.0129 | 0.9291 | 103.5% |
| 12 | 0.0014 | -0.0132 | 0.8938 | 99.6% |
| 13 | -0.0077 | 0.0151 | 0.8829 | 98.4% |
| 14 | 0.0031 | -0.0235 | 0.9129 | 101.7% |
| 15 | -0.0172 | 0.0311 | 0.9038 | 100.7% |
| 16 | -0.0177 | 0.0143 | 0.9437 | 105.1% |
| 17 | -0.0033 | 0.0280 | 0.9183 | 102.3% |
| 18 | -0.0098 | -0.0095 | 0.8936 | 99.6% |
| 19 | 0.0167 | 0.0021 | 0.8539 | 95.1% |
| 20 | -0.0101 | -0.0103 | 0.9214 | 102.7% |

建立关于设计变量和垂荡运动幅值之间的 Kriging 近似模型。最后, 利用单目

标全局优化算法遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 求解得到最优船型，遗传算法参数如表 5-10 所示。

表 5-10 遗传算法基本参数配置
Table 5-10 Basic parameters of genetic algorithm

| 每代个体数 | 遗传率 | 交叉率 | 变异率 | 最大迭代数 |
|-------|-----|-----|-----|-------|
| 40 | 0.2 | 0.8 | 0.2 | 100 |

5.4 优化设计结果及验证

5.4.1 优化结果

当迭代次数达到 100 次时，目标函数已达到最小值，设计变量 α_1 和 α_2 也已经收敛，最优船型方案所对应的设计变量值、目标函数值以及约束条件变化量如表 5-11 所示。

表 5-11 最优方案
Table 5-11 Optimal solution

| α_1 | α_2 | η_3 / ζ | F | ∇ | S_{wet} |
|------------|------------|------------------|-------|----------|-----------|
| 0.0286 | 0.0077 | 0.8312 | 92.6% | 0.416% | 0.312% |

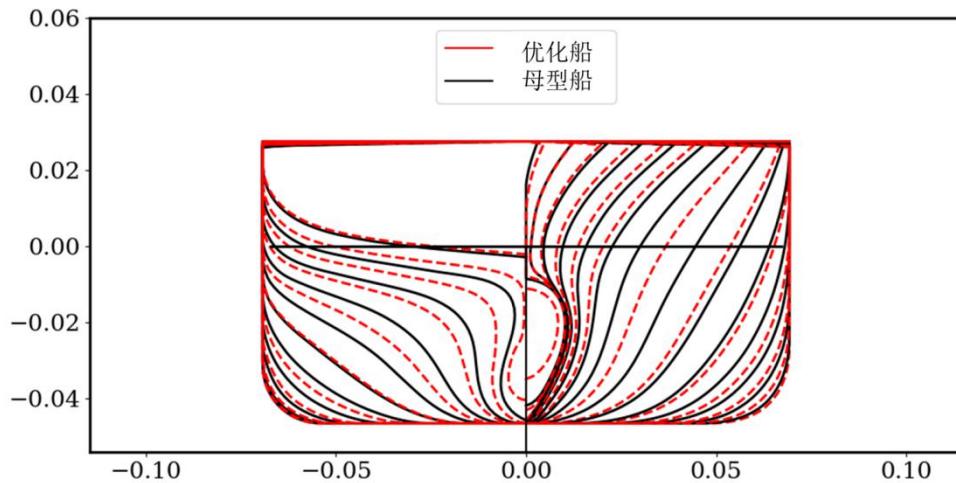
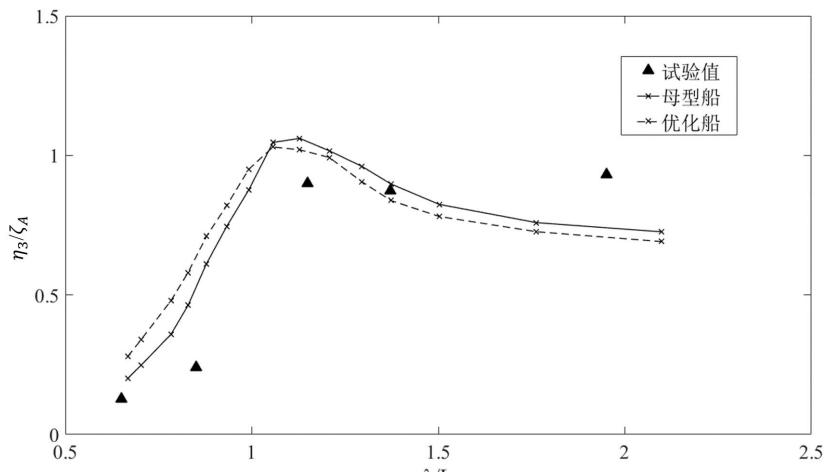


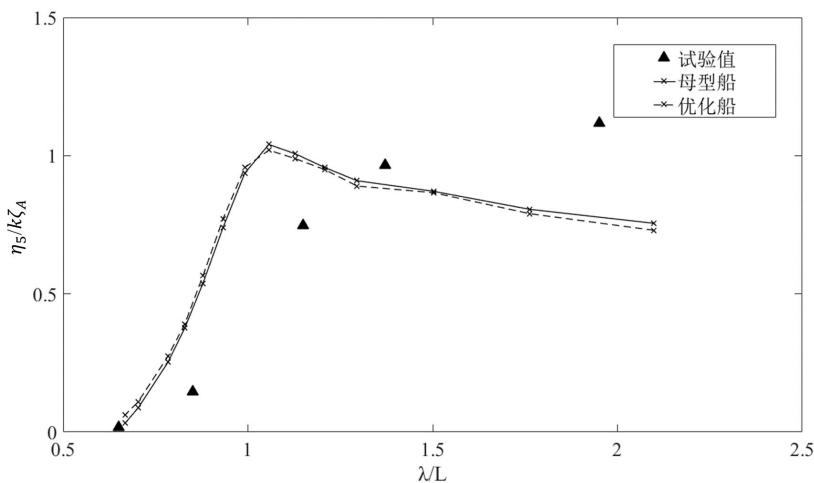
图 5-5 优化船与母型船型线对比
Fig.5-5 Comparison of hull form lines between initial and optimal design

最终船型优化设计方案使 KCS 船以 $Fr = 0.261$ 的航速迎浪航行于波长为 $8.321m$, 波高为 $0.149m$ 的线性规则波中时, 垂荡运动幅值降低 7.4% , 排水体积增大 0.416% , 湿表面积增加 0.312% , 满足约束条件的要求。最优船型对应的横剖线与母型船横剖线对比图如图 5-5 所示。由横剖面型线的对比可以看出, 优化船首尾处向平行中体过度区域适当外扩, 首尾处型线适当内缩, 进流角减小。

再次利用本文程序计算优化船型在不同波长条件下的垂荡和纵摇幅值响应, 并与母型船进行对比, 如图 5-6 所示。



a) KCS ($Fr=0.261$) 垂荡运动幅值
a) Amplitude of heaving of KCS ($Fr=0.261$)



b) KCS ($Fr=0.261$) 纵摇运动幅值
b) Amplitude of pitching of KCS ($Fr=0.261$)
图 5-6 KCS($Fr=0.261$)优化前后垂荡纵摇运动幅值对比

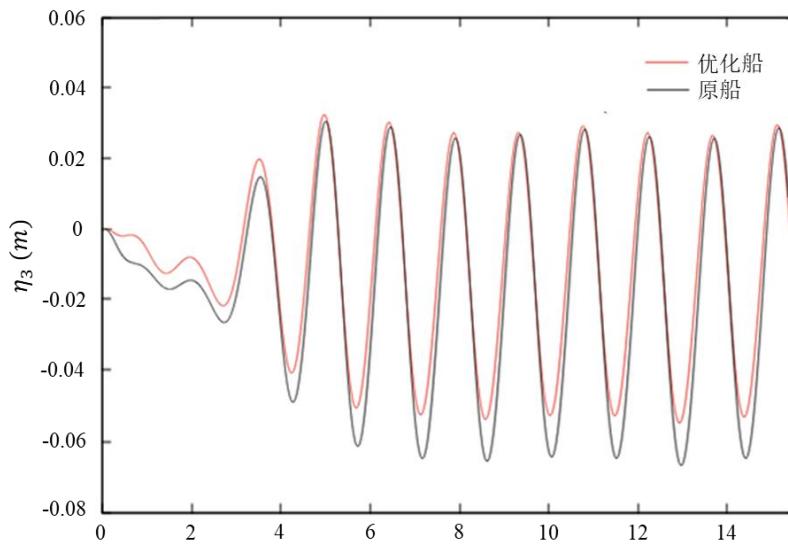
Fig.5-6 Comparison of heaving and pitching between initial and optimal hull of KCS($Fr=0.261$)

从图中可以看出，KCS 船模在优化工况下垂荡运动幅值明显降低，同时在相对波长为 1 至 2 之间，垂荡幅值均有明显下降，下降幅度较为均衡；在波长较短时，优化船型的垂荡幅值高于原始船。对于纵摇运动，优化船和原始船型之间的差异较小，在波长较长时，优化船的纵摇幅值略小于母型船，在波长较短时，优化船的纵摇幅值与母型船基本保持一致。

5.4.2 优化结果验证

为了验证本次优化设计结果的可靠性，利用基于 RANS 方程的 naoe-FOAM-SJTU 求解器对优化船型和母型船的纵向运动进行计算。文献[100]利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器计算了 KCS 在 5 个不同波长工况下的垂荡和纵摇运动，并与试验值进行比对，结果表明 naoe-FOAM-SJTU 求解器计算 KCS 纵向运动与试验值能够吻合良好，可以进行验证分析。

在相同波浪工况下，利用 naoe-FOAM-SJTU 求解器对优化船和母型船进行计算，得到二者在优化设计工况下垂荡和纵摇运动的时域曲线，并进行对比，如图 5-6 所示。从图中可以看出，对于垂荡运动，母型船的垂荡最大幅值的绝对值为 0.066m，优化船的垂荡最大幅值的绝对值为 0.057m，降低了 13.6%，验证了本次船型优化设计的有效性。对于纵摇运动，原始船和优化船之间差异较小。



a) 垂荡运动时域曲线
a) Time domain curves of heave motion

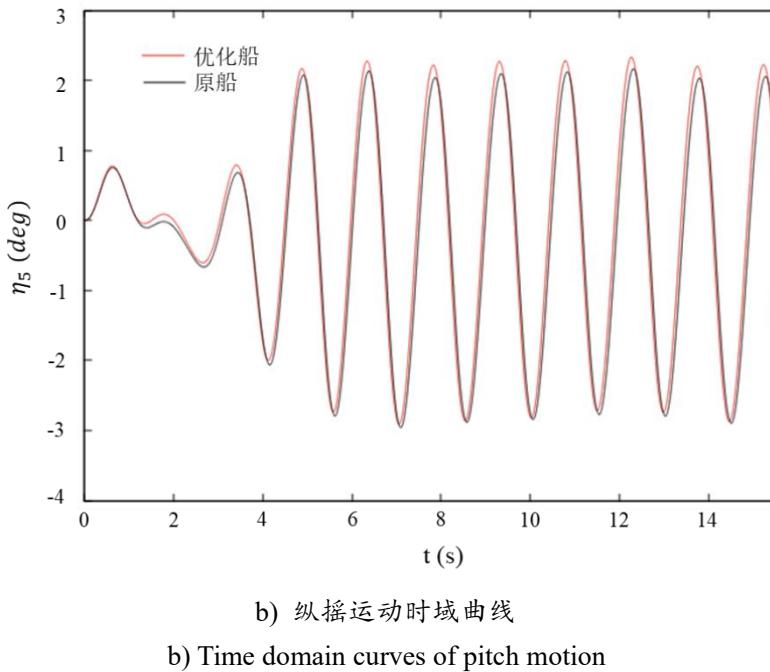


图 5-7 优化船与母型船垂荡纵摇运动对比
Fig.5-7 Comparison of heave and pitch motions between original and optimal design

5.5 本章小结

本章以 KCS 船模为优化对象，首先利用本文程序对母型船的垂荡纵摇运动进行计算，根据计算结果，选取与试验值最为吻合的工况，利用 OPTShip-SJTUc 船型优化软件开展船体型线优化设计。采用平移法方法对船舶整体进行船型变换，选取波长为 8.321m，船舶 $Fr = 0.261$ 的航速迎浪航行作为优化工况，以降低船舶垂荡幅值为目标进行优化。在设计变量的范围内生成 20 个样本船型，分别利用本文开发的程序对该 20 个样本船进行评估，得到垂荡运动幅值响应。在垂荡幅值与设计变量间构建 Kriging 近似模型，最后利用遗传算法求解最优船型。结果表明优化船型较母型船垂荡运动幅值降低 7.4%，并且船型满足约束条件。利用高精度地基于 RANS 方程的 naoe-FOAM-SJTU 求解器对优化结果进行验证，结果表明以本文自编程序作为耐波性评估手段，进行船型优化设计是合理的，结果是可靠的。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本论文对船舶在波浪中的运动、二维剖面水动力系数计算、以及以耐波性为目标的船型优化设计三个方面的国内外研究进展进行梳理。以切片理论为基础，在计算剖面水动力系数时采用 Tasai 图谱插值，使用数值积分方法、三次样条插值方法、追赶法、Gauss 列主元消去法等多种数值方法，以 C++ 为编译语言，编写了一套计算船舶在线性规则波中垂荡及纵摇运动的评估程序。以 Wigley 船模和 Series60 船模为对象，验证程序计算结果的准确性。最后，以 KCS 船模为对象，进行以耐波性为目标船型优化设计，在运动评估计算时采用本文编写的评估程序，最终得到垂荡运动幅度降低的优化船型并利用 RANS 方法对优化结果进行验证。本论文主要结论如下：

- (1) 本文自编程序计算船舶垂荡、纵摇及其耦合运动的水动力系数，基本上能够与试验值保持一致，尤其是系数 A_{33} 、 A_{55} 、 B_{33} 、 B_{55} 的计算与试验结果吻合较小，其余水动力系数与试验值有一定差异但总体可以接受；
- (2) 本文自编程序计算船舶在波浪中的垂荡和纵摇运动，结果的总体趋势与实验数据保持一致，尤其在波长为船长的 0.8-1.4 倍范围内，与试验结果吻合较好，可以较为准确的评估船舶的运动情况，对于波长较长或较短的情况，本文程序的计算结果与试验值有一定差异；
- (3) 以本程序作为耐波性能评估手段，进而展开船型优化设计得到的最终优化船型，垂荡运动幅值有所降低，且经过高精度求解验证，优化结果是可靠的。
- (4) 利用本程序对船舶运动评估可以极大减少评估时间，一个工况计算时间为 3-5 秒，非常适用于批量船型的耐波性评估，对于船型优化问题，可以极大缩短优化周期，节约计算资源。
- (5) 本程序在计算船体剖面的水动力系数时，使用 Tasai 图谱进行插值，该图谱对计算船型有一定限制，适合于计算横剖面较为饱满的船型。
- (6) 本程序虽然可以较为准确地评估船舶在波浪中的纵向运动，但是精度略差，不适合进行船舶最终的分析计算，而是非常适用于船舶设计之初，对船体型线进行修改计算。

6.2 研究展望

本文完成了基于切片理论的船舶纵向运动评估程序的开发，并对若干船型进行了验证，并对 KCS 进行以耐波性为目标的船型优化设计，极大减小优化周期，并且评估结果是可靠的。但是由于时间以及其他客观条件的限制，本文仍存在一定的局限。在今后的研究工作中，可以进一步开展以下工作：

(1) 本文在计算船体剖面水动力系数时，采用 Tasai 图谱插值的方法，该图谱对剖面形状存在一定限制，对于一些高性能新型船舶，该方法便不能适用，因此可以利用源汇拟合法来求解二维水动力系数，以提高程序的适用性；

(2) 本文仅对船舶在迎浪前行时的运动进行计算验证，但是没有对斜浪运动的船舶进行评估，在之后的研究中，可以对船舶在斜浪情况下的垂荡纵摇运动进行评估验证；

(3) 本程序可以计算船舶在波浪中的垂荡纵摇运动进行评估，而在切片理论中，还可以计算横摇、首摇、横荡的运动，在今后的研究中，可以进一步完善程序来计算横向运动。

(4) 在船型优化设计研究中，需要对大量样本船型进行计算，本程序计算船型时需要手动生成型值文档，放入算例文件中，虽然不需耗费大量时间，但是仍然较为麻烦，在今后的研究中可以尝试自动生成型值文档并放入程序文件夹中，进一步节约优化时间。

参 考 文 献

- [1] Korvin kroukovsky B.V. Investigation of ship motions in regular waves[J]. SNAME, 1955.
- [2] Korvin kroukovsky B.V. Pitching and heaving motions of a ship in regular waves[J]. SNAME, 1957.
- [3] Gerritsma J.& Beukelman W. Analysis of the modified strip theory for the calculation of ship motions and wave bending moments[J]. ISP, 1967, Vol.14, No.156.
- [4] 田才福造, 高木又男. 规则波中の应答理论及び计算法[J]. 耐航性に关するシンポジウム, 日本造船学会, 1969, 第一回:1~5.
- [5] Salvesen N., Tuck E.O., Faltinsen O. Ship motions and sea loads[J]. SNAME, 1970, Vol.78:250-287.
- [6] Borodai I.K., Netsvetayev Y.A. Ship motion in ocean waves[J]. Sudostroenie, 1969.
- [7] Soding H. Eine modifikation der streifenmethode[J]. Schiffstechnik, 16, 1969.
- [8] Conolly J.E., Eng B.S.C. Rolling and its stabilization by active fine[J]. RINA, 1969, Vol.111, No.1.
- [9] Maruo H. An improvement of the slender body theory for oscillating ships with zero forward speed[D]. Yokohama National University, 1970.
- [10] Newman J.N. The theory of ship motions[J]. Advances in Applied Mechanics, 1978, 18: 221—83.
- [11] Lee C.M. Theoretical Prediction of Motion of Small-Waterplane-Area, Twin-Hull (SWATH) Ships in Waves[J]. Naval Ship Research and Development Center, Bathesda, 1976.
- [12] Lee C.M., Jones H.J., Bedel W. Added Mass and Damping Coefficients of Heaving Twin Cylinders in a Free Surface[R]. Naval Ship Research and Development Center, Bathesda, 1971.
- [13] Nakos D.E., Sclavounos P.D. Ship motions by a three-dimensional Rankine panel method[C]. Proceeding 18th Symposium on Naval Hydrodynamic, University of Michigan, National Academy Press, 1990.

- [14] Blok J J., Beukelman W. The high speed displacement ship systematic series hull forms[J]. SNAME, 1984, Vol.92:125-150.
- [15] Keuning J A. Distribution of added mass and damping along the length of a ship model at high forward speed[R]. Report No.817 -P, Ship Hydro. Lab, Delft University of Technology, The Netherlands, 1988.
- [16] Jensen J.J., Pedersen P.T. Bending Moments and Shear Forces in Ships Sailing in Irregular Waves[J]. Journal of Ship Research, 1981, 25(4):243-251.
- [17] Fang M.C., Lee M.L., Lee C.K. Time simulating of water shipping for a ship advancing in large longitudinal waves[J]. Journal of Ship Research, 1993, 37(2):126-137.
- [18] Chapman R B. Numerical solution for hydrodynamic forces on a surface-piercing plate oscillating in yaw and sway[C]. 1st Int'l Conf. on Numerical Ship Hydrodynamics, Bathesda Maryland, 1975.
- [19] Chapman R B. Free-Surface Effect for Yawed Surface-Piercing Plates[J]. Journal of Ship Research, 1976, 20(3):125-136.
- [20] Yeung R W, Kim S H. Radiation forces on ships with forward speed[C]. Proc. 3rd Int. Conf. Numer. Ship Hydrodyn, Paris, France, 1981.
- [21] Faltinsen O.M., Zhao R, Umeda N. Numerical Predictions of Ship Motions at High Forward Speed[J]. Philosophical Transactions Physical Sciences & Engineering, 1991, 334(1634):241-252.
- [22] Takaki M, Lin X. Theoretical Prediction of Seakeeping of Seakeeping Qualities of High Speed Vessels[J]. Seakeeping, 1995.
- [23] Faltinsen O.M., Hydrodynamics of High-Speed Marine Vehicles[M]. Cambridge University Press, New York, 2005.
- [24] Schellin T E, Östergaard C, Soares C G. Uncertainty assessment of low frequency load effects for containerships[J]. Marine Structures, 1996, 9(s 3-4):313-332.
- [25] Kristiansen E., Åsmund Hjulstad, Egeland O. State-space representation of radiation forces in time-domain vessel models[J]. Ocean Engineering, 2006, 32(17):2195-2216.
- [26] Fan J, Huang X. A time domain method for calculating motions of a ship sailing

- on random waves[C]. STAB, Rio de Janeiro, Brazil, 2006.
- [27] Kim Y, Nam B W, Kim D W, et al. Study on coupling effects of ship motion and sloshing[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(16):2176-2187.
- [28] Graefe A V. Rankine source method for seakeeping analysis in shallow water[C]. ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2014, V08AT06A017.
- [29] Martić I. Evaluation of seakeeping characteristics of intact and damaged ship[J]. 2014.
- [30] Lewis F.M. The inertia of water surrounding a vibrating ship[J]. Transactions SNAME, 1929, 27:1-20.
- [31] Havelock T.H. The drifting force on a ship among waves[J]. The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1942, 33(221):467-475.
- [32] Ursell F. On the heaving motion of a circular cylinder on the surface of a fluid[J]. The Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics, 1949, 2(2):218-231.
- [33] Grim O. A method of a more precise computation of heaving and pitching motions both in smooth water and in waves[C], 3rd Symp. Naval Hydrodynamics, Scheveningen, 1960.
- [34] Landweber L., Macagno M.C. Added mass of two-dimensional forms oscillating in a free surface[J]. Journal of Ship Research, 1957, 1:20-29.
- [35] Tasai F. Formula for calculating hydrodynamic force of a cylinder heaving on a free surface[J]. Rep. Res. Inst. Appl. Mech: kyushu Univ., 1960:71-74.
- [36] Tasai F. On the damping porce and added mass of ships heaving and pitching[J]. Educational Theatre Journal, 1960, 1959(105):1.
- [37] Landweber L., Macagno M. Added masses of two-dimensional forms by conformal mapping[J]. Journal of Ship Research, 1967, June:109-116.
- [38] Smith W.E. Computation of pitch and heave motions for arbitrary ship forms[J]. ISP, 1967, Vol.14, No.155.
- [39] Von Kerczek C. and Tuck E.O. The representation of ship hulls by conformal mapping functions[J]. Journal of Ship Research, 1969, 13:284—298.

- [40] De Jong B. Computation of the hydrodynamic coefficients of oscillating cylinders[R]. TNO Report 145a, Netherlands Research Centre, 1973.
- [41] Frank W. Oscillations of cylinders in or below the free surface of deep fluids[R]. NSRDC Report, 2375, 1967.
- [42] Bei K.J., Yeung R.W. Numerical solutions to free surface flow problems[C]. 10th Symp. on Naval Hydrodynamics, Cambridge, 1974.
- [43] Porter W.R. Pressure distribution, added mass and damping coefficients for cylinders oscillating in a free surface[R]. Series 82-16, University of California, Institute of Engineering Research, 1960.
- [44] Paulling, J. R., Richardson, R. K. Measurement of pressures, forces and radiating waves for cylinders oscillating in a free surface[J]. Series 82, Issue 2, University of California, 1962.
- [45] Vugts J.H. The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface[R]. Report No.194, Laboratorium Voor Scheepsbouwkunde, Technische Hogeschool Delft, 1968.
- [46] Westlake P C, Wilson P A. A new conformal mapping technique for ship sections[J]. International Shipbuilding Progress, 2000, 47(449): 5-22.
- [47] Peri D, Campana E F. High-fidelity models in global optimization[M]. Global Optimization and Constraint Satisfaction. Springer Berlin Heidelberg, 2003:112-126.
- [48] Peri D, Campana E F. Multidisciplinary design optimization of a naval surface combatant[J]. Journal of Ship Research, 2003, 47(1): 1-12.
- [49] Peri D, Pinto A, Campana E F. Multi-objective optimization of expensive objective functions with variable fidelity models[M]. Large-Scale Nonlinear Optimization. 2006, 83: 223-241.
- [50] Campana E F, Fasano G, Peri D, Pinto A. Particle swarm optimization: efficient globally convergent modifications[M] III European Conference on Computational Mechanics. Springer Netherlands, 5-8 June, 2006: 5-8.
- [51] Tahara Y, Peri D, Campana E F, Stern F. Computational fluid dynamics-based multi-objective optimization of a surface combatant using a global optimization method[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2008, 13(2): 95-116.

- [52] Zalek S.F. Multi-criterion evolutionary optimization of ship hull forms for propulsion and seakeeping[D]. University of Michigan, 2007.
- [53] Kim H, Yang C, Noblesse F. Hull form optimization for reduced resistance and improved seakeeping via practical designed-oriented CFD tools[C]. Conference on Grand Challenges in Modeling & Simulation. 2010:375-385.
- [54] Campana E F, Liuzzi G, Lucidi S, Peri D, Piccialli V, Pinto A. New global optimization methods for ship design problems[J]. Optimization & Engineering, 2009, 10(4): 533-555.
- [55] Campana E F, Fasano G, Peri D, Pinto A. Nonlinear programming approaches in the multidisciplinary design optimization of a sailing yacht keel fin[J]. Pamm, 2010, 7(1): 1060601-1060602.
- [56] Campana E F, Fasano G, Pinto A. Dynamic analysis for the selection of parameters and initial population, in particle swarm optimization[J]. Journal of Global Optimization, 2010, 48(3):347-397.
- [57] Diez M, Peri D, Fasano G, Campana E F. Hydrodynamic optimization of a keel fin of a sailing boat: a multidisciplinary robust formulation for ship design[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2012, 46(4): 613-625.
- [58] Bagheri H. Optimizing the Seakeeping Performance of Ship Hull Forms Using Genetic Algorithm[J]. International Journal on Marine Navigation & Safety of Sea Transportation, 2014, 8(1):49-57.
- [59] Diez M, Serani A, Campana E F, et al. Multi-objective Hydrodynamic Optimization of the DTMB 5415 for Resistance and Seakeeping[C]. FAST 2015, International Conference on FAST Sea Transportation. 2015.
- [60] Vernengo G, Brizzolara S, Bruzzone D. Resistance and Seakeeping Optimization of a Fast Multihull Passenger Ferry[J]. International Journal of Offshore & Polar Engineering, 2015, 25(1):26-34.
- [61] 戴遗山, 顾懋祥, 王太舒. 船舶适航性的计算方法(迎浪纵向运动) [J]. 船工科技, 1977, 1.
- [62] 戴遗山, 顾懋祥, 王太舒. 船舶适航性的计算方法(五个自由度运动) [J]. 船工科技, 1978, 1:3-47.

- [63] 方钟圣. 船舶在不规则横浪中非线性横摇运动的估算[J]. 中国造船, 1978(01):29-52.
- [64] 于家鹏, 达荣庭. 剖面的保角变换及其在船舶运动计算中的应用[J]. 中国造船, 1979(01):29-44.
- [65] 孙伯起, 董慎言, 达荣庭等. 不规则波浪中任意三元零航速物体的二阶力计算[J]. 水动力学研究与进展, 1984(01):76-90.
- [66] 徐能兹, 沈进威, 陈瑞章等. S-175 集装箱船舶波浪载荷的船模试验与线性切片理论计算的比较[J]. 中国造船, 1984(2):69-82.
- [67] 刘应中, 缪国平. 二维物体上的二阶波浪力[J]. 中国造船, 1985(03):3-16.
- [68] 贺五洲, 戴遗山. 简单 Green 函数法求解三维水动力系数[J]. 中国造船, 1986(2):3-17.
- [69] 陈超核, 沈进威, 徐秉汉. 规则波中船舶非线性波浪弯矩的时域计算[J]. 中国造船, 1989(3):69-81.
- [70] 段文洋. 船舶大幅运动非线性水动力研究[D]. 哈尔滨工程大学, 1995.
- [71] 贺五洲, 周正全. 水面舰船迎浪航行时大幅运动预报的切片算法[J]. 中国造船, 1998(1).
- [72] 段文洋, 贺五洲. 高速排水型船的运动性能预报[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(12):82-85.
- [73] 段文洋, 贺五洲. 高速细长体理论在双体船运动计算中的应用[J]. 工程力学, 2002, 19(2):138-142.
- [74] 马山. 基于二维半理论的垂向船舶运动和波浪载荷预报[D]. 哈尔滨工程大学, 2002.
- [75] 段文洋, 马山. 船舶运动水动力线性解二维、二维半和三维方法的比较[C]//全国水动力学学术会议. 2003.
- [76] 戴仰山, 沈进威, 宋竞正. 船舶波浪载荷[M], 国防工业出版社. 2007.
- [77] 张海彬. FPSO 储油轮与半潜式平台波浪载荷三维计算方法研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2004.

- [78] 朱仁传, 林兆伟, 缪国平. 甲板上浪问题的研究进展[J]. 水动力学研究与进展, 2007, 22(3):387-395.
- [79] 王毅, 卢晓平, 赵军强, 等. 以 Rankine 源三维面元法求解三体船纵摇与升沉运动[J]. 中国舰船研究, 2012, 07(2):29-36.
- [80] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 等. 基于 CFD 的船型自动优化技术研究[C] 船舶水动力学学术会议暨中国船舶学术界进入 ITTC30 周年纪念会. 2008.
- [81] Feng B, Liu Z, Zhan C, Chang H, Cheng X. Ship hull automatic optimization techniques research based on CFD[C]. IEEE, International Conference on Computer-Aided Industrial Design & Conceptual Design, 2009: 663-667.
- [82] 冯佰威, 刘祖源, 谢伟, 詹成胜. 船舶 CAD/CFD 集成优化接口开发及应用研究[J]. 船舶工程, 2009, 31(1): 116-119.
- [83] 冯佰威, 刘祖源, 聂剑宁, 常海超, 程细得. 基于 iSIGHT 的船舶多学科综合优化集成平台的建立[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, 33(5): 897-899.
- [84] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 常海超. 船舶 CAD/CFD 一体化设计过程集成技术研究[C]. CAD/CAM 学术交流会议, 2009: 649-651.
- [85] 冯佰威, 刘祖源, 常海超. 多学科设计优化技术在船舶初步设计中的应用[J]. 中国造船, 2009, (04): 109-116.
- [86] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 常海超. 基于船型修改融合方法的参数化建模技术[J]. 计算机辅助工程, 2010, 19(4): 3-7.
- [87] 冯佰威, 刘祖源, 詹成胜, 常海超. 船舶 CAD/CFD 一体化设计过程集成技术研究[J]. 武汉理工大学学报, 2010, 34(4): 649-651.
- [88] 杨铭. 基于 iSIGHT 的船型生成及耐波性优化研究[D]. 武汉理工大学, 2010.
- [89] 王殿飞, 马宁, 顾解坤, 等. 考虑波浪增阻的五体船片体布局耐波性多目标优化[C]. 中国国际船艇展暨高性能船学术报告会. 2011.
- [90] 邱辽原, 谢伟, 姜治芳, 等. 基于参数化 CAD 模型的船型阻力/耐波性一体化设计[J]. 中国舰船研究, 2011, 06(1): 18-21.

- [91] 王道远. 基于 Hydrostar 的滑行艇耐波性优化研究[D]. 2016.
- [92] 陈悦, 彭鹏, 喻嵩. 基于 ISIGHT 的三体维护船侧体布局多目标优化研究 [J]. 船舶工程, 2016(11):24-28.
- [93] 王刚成, 马宁, 顾解忡. 基于 Kriging 代理模型的船舶水动力性能多目标快速协同优化[J]. 上海交通大学学报 (自然版) , 2018, 52(6): 666-673.
- [94] 刘晓义, 吴建威, 赵敏, et al. 基于 NM 理论和序列二次规划的船型优化设计 [C]. 船舶水动力学学术会议, 2015.
- [95] 吴建威, 刘晓义, 万德成. 基于 NM 理论的船型优化技术应用[C]. 第十七届中国海洋 (岸) 工程学术讨论会论文集 (上) , 2015.
- [96] 刘晓义, 吴建威, 万德成. 基于遗传算法与 NM 理论的船型优化[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2016, 31(5): 535-541.
- [97] Liu X, Zhao M, Wan D, Wu J. Hull Form Multi-Objective Optimization for a Container Ship with Neumann-Michell Theory and Approximation Model[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2017, 27(4): 423-432.
- [98] Wu J, Liu X, Zhao M, Wan D. Neumann-Michell theory-based multi-objective optimization of hull form for a naval surface combatant, Applied Ocean Research, 2017, 63: 129-141.
- [99] Aiqin Miao, Taiwen Chen, Xiaozhou Qi, Decheng Wan, Multi-objective Optimization Design of KCS Based on Seakeeping Performance[C]. the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference Sapporo, Japan, June 10-15, 2018, pp.639-645.
- [100] 陶尧森. 船舶耐波性[M]. 上海交通大学出版社, 上海, 1985.
- [101] Simonsen C., Otzen J., Stern F. EFD and CFD for KCS heaving and pitching in regular head waves[C]. Proc. 27th Symp. Naval Hydrodynamics, Seoul, Korea, 2008.

致 谢

时光荏苒，两年半的时间转瞬即逝，回想初来交大，研究生阶段的学习和生活对于我来说一切都是未知的，心中有迷茫也有期待。今天，当时的迷茫已经烟消云散，我也已然是当时期待的我，而这一切都要感谢在这两年半时间里给予我莫大帮助的我的老师们、实验室的兄弟姐妹、我的室友们、我的家人和朋友们。站在人生现阶段的终点，即将踏上人生下一阶段，回想这期间的点点滴滴，我想要表达我最真挚的感恩！

首先我要感恩导师万德成教授，您不仅会教书，还会育人，除了科研上给予我们指导，还不断培养我们的科研精神，引导我们诚信务实、刻苦钻研，任何事情上都应有严谨缜密的思维。我非常敬佩您在科研、工作中的兢兢业业的精神，在未来的工作中，我也会向您一样时刻保持认真负责的态度，做好每一项工作。除此之外，您在生活上也给予我们很多关心，您希望我们课题组的同学都能够全面发展，团结一心，鼓励我们组织实验室的文体活动、户外出游，并资助实验室购买图书、水果和零食等，让我们能够在一个轻松的环境中开展科研工作。在这里，我想要对您表达我由衷的感谢，希望您身体健康，工作顺利，生活美满！

感恩王建华老师，感谢您在科研和学习中的悉心教导，在我科研迷茫时，寄予我中肯的建议，每一次的组会汇报，您都认真聆听，对于我不正确的地方给予及时纠正，并给出合理建议。同时，我还要感谢朱政老师，您帮助我们处理各种大小事务，协助课题组展开工作，让我们更高效地学习科研，在这里感谢您的付出，在这里，祝您工作顺利，健康幸福！

感恩我的师姐缪爱琴，每当我科研出现问题，你总是耐心帮我解答，给予我中肯的指导，在我出现偏差的时候，总是给我及时的补救；感恩我的师兄刘鑫旺，无论我提出再小的问题，你都不厌其烦地为我解答，和我一起讨论问题的解决方案，给予我支持；感恩我的师兄陈泰文、漆小舟，虽然你们已经毕业一年了，但是在我研一还对科研较为迷茫时，给与我指导。感谢我们优化小组的师兄师姐，一直以来给予我莫大的支持，最后祝师兄师姐做出更多科研成果，早日拿到博士学位！

感恩实验室并肩作战的小伙伴，在科研中我们互相给予支持，在生活中互相帮助，在这里希望你们都能够在各行各业取得成就，为课题组、为学校、为国家做出卓越的贡献！



17004307

感恩我的室友吴凡和张仲祥，谢谢你们在学习科研、生活、找工作上对我的帮助，希望你们毕业后在自己的岗位上闯出一片天！

感恩我的父母，无论什么事情你们都在背后默默支持我，你们教会我如何做人，在品德上，生活中都给我莫大的支持，尊重我的决定。每当我难过伤心时，就会想家，这时候爸妈就会安慰我，指导我，在我步入工作后，可能又会远离家乡，但我永远爱你们。

最后，感恩每一位帮助我、支持我的人，是你们成就我的现在，也会成就我的未来！



17004307

攻读硕士学位期间已发表或录用的论文

- [1] 王晋楷, 万德成. 基于 Lewis 剖面法的船舶纵向运动的快速评估[J]. 中国造船.
- [2] 王晋楷, 缪爱琴, 万德成, 基于兴波阻力最小的集装箱船船型优化[C]. 第二十九届全国水动力学研讨会论文集, 2018 年 8 月 24-27 日, 江苏镇江, pp.1114-1124.
- [3] **Jinkai Wang**, Decheng Wan, Quick Evaluation of Seakeeping Performance for Ship Hull Form Optimization[C], 11th International Workshop on Ship and Marine Hydrodynamics, Hamburg, Germany, September 22-25, 2019.
- [4] Xinwang Liu, **Jinkai Wang**, Decheng Wan, Hull Form Optimization Design of KCS at Full Speed Range Based on Resistance Performance in Calm Water[C]. the Twenty-eighth (2018) International Ocean and Polar Engineering Conference Sapporo, Japan, June 10-15, 2018, pp.626-632.



17004307

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《船舶垂荡纵摇运动评估程序开发及在船型优化上的应用》，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：王青松

日期：2020 年 2 月 28 日

上海交通大学
学位论文版权使用授权书

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。本人授权上海交通大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ，在____年解密后适用本授权书。

本学位论文属于
 不保密 .

(请在以上方框内打“√”)


学位论文作者签名：王清梅

指导教师签名：江建华

日期：2020年 2月 28日

日期：2020年 2月 28日

上海交通大学硕士学位论文答辩决议书



117010910107

| | | | | | |
|------|--------------------------|------|--------------|------|----------------|
| 姓名 | 王晋楷 | 学号 | 117010910107 | 所在学科 | 船舶与海洋工程 |
| 指导教师 | 王建华 | 答辩日期 | 2020-01-09 | 答辩地点 | 闵行校区木兰船建大楼B801 |
| 论文题目 | 船舶垂荡纵摇运动评估程序开发及在船型优化上的应用 | | | | |

投票表决结果: 5/5 (同意票数/实到委员数/应到委员数) 答辩结论: 通过 未通过
 评语和决议:

论文对船舶垂荡纵摇运动评估及在船型优化上的应用开展研究,选题正确,切合工程需要,具有重要的理论意义和工程应用价值。

论文主要工作如下: (1) 开发了一套基于切片理论,可用于预报船舶在规则波中以一定速度航行时的垂荡和纵摇运动的程序; (2) 通过Wigley和S60两型船标准算例对该程序进行了考核验证; (3) 将该程序用于以降低船舶垂荡幅值为目标的KCS船的型线优化,为今后考虑快速性能、操纵性能以及布置方面的综合性能需求的优化设计提供了基础。

论文研究内容丰富,技术路线正确,数据翔实,结果可信。论文结构完整,条理清晰,逻辑性强。论文撰写行文流畅,图表规范。论文已达到硕士学位论文的要求,是一篇优秀的硕士论文。论文工作表明作者已掌握本学科坚实的基础理论和系统的专业知识,具有较强的独立从事科研工作的能力。

论文作者在答辩中思路清晰,回答问题正确。经答辩委员会投票表决,全票(5票)一致同意通过论文答辩,并建议授予硕士学位。

谢锡麟

2020年1月9日

| 答辩委员会成员签名 | 职务 | 姓名 | 职称 | 单位 | 签名 |
|-----------|----|-----|-------|-------------|------------|
| | 主席 | 谢锡麟 | 教授 | 复旦大学 | <u>谢锡麟</u> |
| | 委员 | 邹早建 | 教授 | 上海交通大学 | <u>邹早建</u> |
| | 委员 | 傅江妍 | 高工 | 中船集团第701研究所 | <u>傅江妍</u> |
| | 委员 | 陈康 | 研究员 | 上海船舶研究设计院 | <u>陈康</u> |
| | 委员 | 万德成 | 教授 | 上海交通大学 | <u>万德成</u> |
| | 秘书 | 赵伟文 | 助理研究员 | 上海交通大学 | <u>赵伟文</u> |