

# 基于 Lewis 剖面法快速评估船舶纵向运动

王晋楷, 万德成\*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室  
船海计算水动力学研究中心 (CMHL), 上海 200240)

## 摘 要

快速、有效的耐波性评估程序可显著缩短优化计算的周期。为了补充现有船型优化软件 OPTShip-SJTU 在耐波性评估方面的空缺,以切片法为基础编写了一套船舶升沉、纵摇运动的评估程序。该程序采用 Lewis 剖面法,对 Tasai 图谱进行插值求解二维水动力系数,能在保证准确性的基础上缩短评估时间。以一艘 Wigley 船模为评估对象,利用该程序计算了在  $Fr = 0.3$  时迎浪航行时的纵摇与升沉及其耦合运动的水动力系数、波浪载荷以及运动响应。并与试验进行对比。该程序计算结果与试验值较为一致,可应用于船舶在波浪中纵向运动的快速评估。

关 键 词: 耐波性;切片理论; Lewis 剖面法; Tasai 图谱

中图分类号: 661.1

文献标志码: A

## 0 引 言

在船体型线的优化设计中主要考虑快速性、耐波性和操纵性等水动力性能,其中,通过减小阻力来提高航速是大多数船型优化的目标。然而随着航速的提高,不可避免带来耐波性能的影响。

如何在减少阻力的同时保持较好的耐波性是船型优化的重要环节。在船型优化过程中,往往通过母型船的船型变换,形成大量新的样本船。目前课题组使用自主开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU 求解器来计算船舶耐波性,可以得到满意的精度,但是计算时间较长,难以在短时间内计算批量船型。

评估船舶耐波性能基于粘性理论或基于势流理论。基于粘性理论的方法计算精度高,但是计算时间长,不适用于要批量计算的船型优化研究。势流理论方法可以较为快速地计算船舶在波浪中的运动,从而节约计算时间和计算资源。在众多势流理论方法中,基于细长体假设的切片法发展较为成熟,具有计算速度快、船型适用范围广等优点,能够较为准确地评估船舶在波浪中的纵摇、升沉等那些对耐波性有重要影响的运动。

切片法计算船舶运动的基础是二维剖面水动力系数的计算。二参数的保角变换方法,即 Lewis 剖面法对于常规船型的剖面有较为满意的精度,且计算速度比源汇分布方法快很多,适合用作初步评估的手段。许多学者对 Lewis 剖面进行了数值计算,形成了不同的图谱<sup>[1]</sup>,可以快速确定剖面水动力系数的参数值。日本学者 Tasai<sup>[2]</sup>根据 Ursell 理论对 Lewis 剖面进行了计算,得到 Tasai 图谱。陶尧森<sup>[3]</sup>等对水动力

收稿日期: 2019-11-15; 修改稿收稿日期: 2020-03-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809169, 51879159, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099)、上海高校特聘教授(东方学者)岗位跟踪计划(2013022)、上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)、工信部数值水池创新专项课题(2016-23/09)资助项目

系数的计算进行简化, 采用的是萨利卡也夫图谱和康德里可夫公式。其中康德里可夫公式是由田才图谱回归得到的代数表达式。实践表明这种图谱简化计算可以应用于工程计算, 计算速度快, 特别适用于船型优化设计。侯圣贤<sup>[4]</sup>利用田才图谱进行数值仿真, 计算某集装箱船的纵摇升沉运动, 得到了满意的结果。

本文在计算各个切片的水动力系数时, 利用基于 Lewis 剖面法的 Tasai 图谱进行插值, 计算各个横剖面的二维水动力系数, 然后将其引入按切片理论简化后的纵摇和升沉运动耦合方程。求解该方程, 可得到船舶在规则波中升沉和纵摇运动的频率响应。

## 1 数值方法

自主编写的船舶纵向运动快速评估程序中, 输入参数包括波浪频率  $\omega$  和船体型线。首先计算各横剖面的水线宽  $B(x)$ 、吃水  $T(x)$  以及横剖面积  $S(x)$ , 并确定各横剖面的波浪参数  $\xi_T(x)$  和形状参数  $H_0(x)$ 、 $\sigma(x)$ 。对 Tasai 图谱用三次样条进行插值计算, 得到系数  $\bar{A}_z(x)$  和  $C(x)$ , 从而计算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的水动力系数  $A_{ij}$ 、 $B_{ij}$  作用于船体的垂向波浪力和绕  $y$  轴旋转的波浪力矩等参数。然后将各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, 得到四元一次线性方程组。用龙格-库塔法求解该线性方程组, 便可得到垂荡和纵摇运动的频率响应。计算流程如图 1 所示。

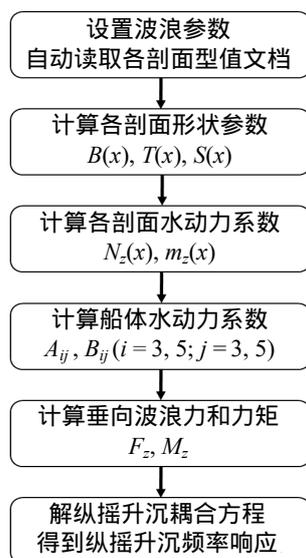


图 1 船舶纵向运动快速评估程序流程图

### 1.1 Lewis 剖面法及其计算图谱

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  $\zeta$  平面上单位圆的外部域。当剖面关于  $y$  轴对称时, 两个外部域的无限远点所对应的解析函数满足式 (1):

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

所谓 Lewis 剖面是指保角变换函数除以尺度因子并取为二参数形式:

$$z/M = f(\zeta)/M = \zeta + a_1\zeta^{-1} + a_3\zeta^{-3} \quad (2)$$

图 2 为剖面的保角变换。

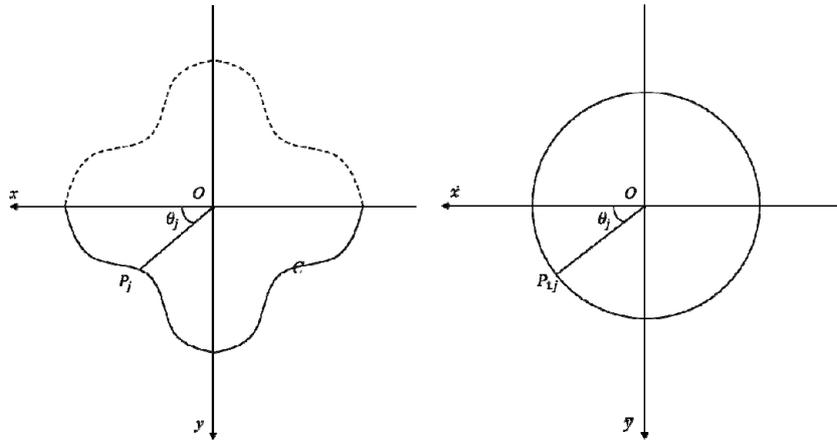


图 2 剖面的保角变换

Lewis 剖面有许多计算图谱，在本评估程序中采用 Tasai 图谱来计算船体横剖面的水动力系数。首先将图谱数据导入程序中。对于给定的横剖面形状和波浪参数，对图谱进行 3 次三项式插值，得到计算横剖面水动力系数的参数。

振荡频率以无因次形式给出：

$$\xi_T(x) = \frac{\omega^2 T(x)}{g} \quad (3)$$

剖面形状以剖面水线宽、吃水、以及剖面面积的无因次形式给出，而各横剖面面积由数值积分方法计算。

$$H_0(x) = \frac{B(x)}{2T(x)} \quad (4)$$

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

各剖面参数自动输入图谱插值函数，并进行插值计算，得到无穷远处波幅与升沉运动幅值的比  $\bar{A}_z(x) = \zeta_a / z_a$  以及无因次水动力质量  $C(x)$ 。 $\bar{A}_z$  和  $C$  的计算步骤如下：

- (1) 确定剖面  $\sigma$  值，在每张图谱上进行第一次插值，得到不同  $H_0$  值和  $\xi_T$  值对应的  $\bar{A}_z$  和  $C$ ；
- (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  $\sigma$  值和  $H_0$  值且与  $\xi_T$  值对应的  $\bar{A}_z$  和  $C$ ；
- (3) 根据剖面的  $\xi_T$  值进行第三次插值，得到同时满足三个参数的  $\bar{A}_z$  和  $C$ 。

各横剖面的附加质量和阻尼系数可由下式计算得到：

$$N_z(x) = \frac{1}{\omega^3} \rho g^2 \bar{A}_z^2(x) \quad (5)$$

$$m_z(x) = \frac{1}{8} \rho \pi B^2(x) C(x) \quad (6)$$

利用刘易斯剖面的计算图谱计算剖面的水动力系数, 可以显著减少计算时间, 且具有一定的准确性, 适用于大多数常规船型。

## 1.2 计算船体水动力系数及垂向波浪力和力矩

对于船舶升沉和纵摇的耦合运动, 其附加质量和阻尼系数与航速、航向、船型、以及各剖面水动力系数有关。

考虑船舶以航速  $U$  航行, 遭遇频率为  $\omega_e$ , 以船舶升沉附加质量  $A_{33}$ 、升沉阻尼系数  $B_{33}$ 、升沉复原力系数  $C_{33}$  为例, 进行数值积分:

$$A_{33} = \int_L m_z(x) dx - \frac{U}{\omega_e^2} N_z^a = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{m_z(x_i) + m_z(x_{i+1})}{2} \Delta x - \frac{U}{\omega_e^2} N(x_n) \quad (7)$$

$$B_{33} = \int_L m_z(x) dx - U m_z^a = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{N_z(x_i) + N_z(x_{i+1})}{2} \Delta x - U m_z(x_n) \quad (8)$$

$$C_{33} = \rho g \int_L B(x) dx = \rho g \sum_{i=1}^{n-1} \frac{B(x_i) + B(x_{i+1})}{2} \Delta x \quad (9)$$

式中,  $N_z^a$  和  $m_z^a$  分别表示最后一个横剖面的阻尼系数和附加质量。

类似地, 船舶受到的垂向波浪力和绕  $y$  轴的波浪力矩也可表示为与各横剖面水动力系数有关的表达式。现以波浪力为例, 进行数值积分。波浪力可以表达为正弦和余弦两部分的相加, 如式 (10) 所示。

$$F(t) = F_{zc} \cos \omega_e t + F_{zs} \sin \omega_e t \quad (10)$$

$$F_{zc} = F_{za} \cos \varepsilon_F \quad (11)$$

$$F_{zs} = F_{za} \sin \varepsilon_F \quad (12)$$

式中,  $\varepsilon_F$  为波浪力  $F$  与波浪的相位角,  $F_{za}$  为垂向波浪力幅值。

垂向波浪力的正弦和余弦部分可表示为

$$\begin{aligned} F_{za} \cos \varepsilon_F = & \zeta_a \left( 2\rho g \int_L \cos(kx \cos \mu) \left( \int_0^y e^{kz} \cos(ky \sin \mu) dy \right) dx \right. \\ & + m\omega \int_L \left( N_z(x) - U \frac{dm_z(x)}{dx} \right) e^{-kT^*} \sin(kx \cos \mu) dx \\ & \left. - \omega^2 \int_L m_z(x) e^{-kT^*} \sin(kx \cos \mu) dx + \frac{U\omega}{\omega_e} e^{-kT^*} \cos(kx \cos \mu) \right) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} F_{za} \sin \varepsilon_F = & \zeta_a \left( 2\rho g \int_L \sin(kx \sin \mu) \left( \int_0^y e^{kz} \sin(kx_a \cos \mu) dy \right) dx \right. \\ & + m\omega \int_L \left( N_z(x) - U \frac{dm_z(x)}{dx} \right) e^{-kT^*} \cos(ky \sin \mu) dx \\ & \left. - \omega^2 m_z(x) e^{-kT^*} \cos(kx \sin \mu) dx + \frac{U\omega}{\omega_e} e^{-kT^*} \sin(kx_a \sin \mu) \right) \end{aligned}$$

## 1.3 求解升沉纵摇频率响应

船舶在波浪中的纵摇-升沉耦合运动方程式可表示为<sup>[5]</sup>

$$\begin{aligned} (m + A_{33}) \ddot{z} + B_{33} \dot{z} + C_{33} z + A_{35} \ddot{\theta} + B_{35} \dot{\theta} + C_{35} \theta &= F(t) \\ (I_{yy} + A_{55}) \ddot{\theta} + B_{55} \dot{\theta} + C_{55} \theta + A_{53} \ddot{z} + B_{53} \dot{z} + C_{53} z &= M(t) \end{aligned} \quad (14)$$

式中,  $m$  表示船体质量,  $I_{yy}$  表示船体质量对  $y$  轴的惯性矩。

耦合运动方程中的各项系数由已有的程序计算得到, 代入式 (14) 表示的二阶微分方程组。求方程组的特解, 如式 (15) 所示, 得到遭遇频率为  $\omega_e$  的升沉、纵摇强迫振荡运动:

$$\begin{aligned} z &= z_c \cos \omega_e t - z_s \sin \omega_e t = z_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{z\zeta}) \\ \theta &= \theta_c \cos \omega_e t - \theta_s \sin \omega_e t = \theta_a \cos(\omega_e t + \varepsilon_{\theta\zeta}) \end{aligned} \quad (15)$$

将上述关于  $z$ 、 $\theta$  的二阶微分方程组转化为关于  $z_c$ 、 $z_s$ 、 $\theta_c$ 、 $\theta_s$  的四元一次线性方程组进行求解。解析法存在的扩大效应, 会在求解过程中将极小值错解为极大值, 为此在程序中采用数值解法。用高斯消去法来求解线性方程组, 最终得到升沉纵摇频率响应函数的模:

$$\begin{aligned} \mu_3 &= \frac{z_a}{\zeta_a} \\ \mu_5 &= \frac{\theta_a}{\zeta_a} \end{aligned} \quad (16)$$

## 2 算 例

用 Wigley 船型来验证评估程序的有效性。该船的主尺度及参数如表 1 所示, 计算工况为船舶在  $Fr = 0.3$  时在规则波中迎浪前进, 遭遇频率变化范围为  $4 \sim 10 \text{ s}^{-1}$ 。

表 1 Wigley 船型的主尺度及参数

船长/m	船宽/m	吃水/m	排水体积/ $\text{m}^3$	速度/(m/s)	傅汝德数
3.0	0.3	0.1875	0.0946	1.627	0.3

为了研究横剖面个数的选择是否对最终的计算结果有影响, 在船长方向上分别取了 17 个和 25 个剖面分别进行计算。在每个计算工况下得到船体水动力系数曲线、船体受到的垂向波浪力和波浪力矩曲线, 船体升沉纵摇频率响应曲线等, 并将数值计算结果与试验值、基于三维方法的 SWAN 商业软件计算结果、以及基于源汇拟合的切片法计算结果进行比较和分析。其中, 水动力系数和波浪力试验数据以及其他方法数据来自文献[6], 升沉纵摇频率响应的试验数据来自文献[7], 关于计算结果的无因次表达式详见文献[8]。

### 2.1 船体水动力系数

通过本文自主开发的评估程序计算可以得到升沉、纵摇及其耦合附加质量和阻尼系数。为了节约篇幅, 这里仅展示升沉、纵摇附加质量和阻尼系数, 如图 3 所示。

(1) 垂荡附加质量计算结果和试验基本吻合, 在遭遇频率较大时本文自主开发程序的计算结果要比试验值和其他方法计算结果略小。此外切片数量对该系数的影响不显著。

(2) 纵摇附加质量的计算结果与试验相比整体偏小, 但差别较小, 同时计算结果要比其他方法得到的结果略好一些。采用 25 个切面进行计算的结果比 17 个切面的计算结果略大一些, 更接近试验值。

(3) 垂荡阻尼系数的计算结果整体趋势与试验保持一致, 但在低频时较试验值大, 而在高频时较试验值小, 不过数值差异较小。此外, 采用 25 个切片的计算结果在低频时更加接近试验值, 而在高频时切面数量对结果的影响不大。

(4) 纵摇阻尼系数的计算结果在低频段与试验值结果有一定差异, 而在高频段与试验符合较好。

在某些频率下的计算结果要比三维方法好。在低频时 25 个切面的计算结果要比 17 个切片更接近试验值, 而在高频时切片数量的影响不显著。

综上所述, 本文自主开发的程序计算船体的水动力系数总体上与试验值一致, 误差也在可允许范围之内, 可以满足后续求解运动方程的要求。同时, 切片数量对某些系数在某些频率下的计算结果有一定的影响。当切片数量较多时, 计算结果要比切片数少的情况好。

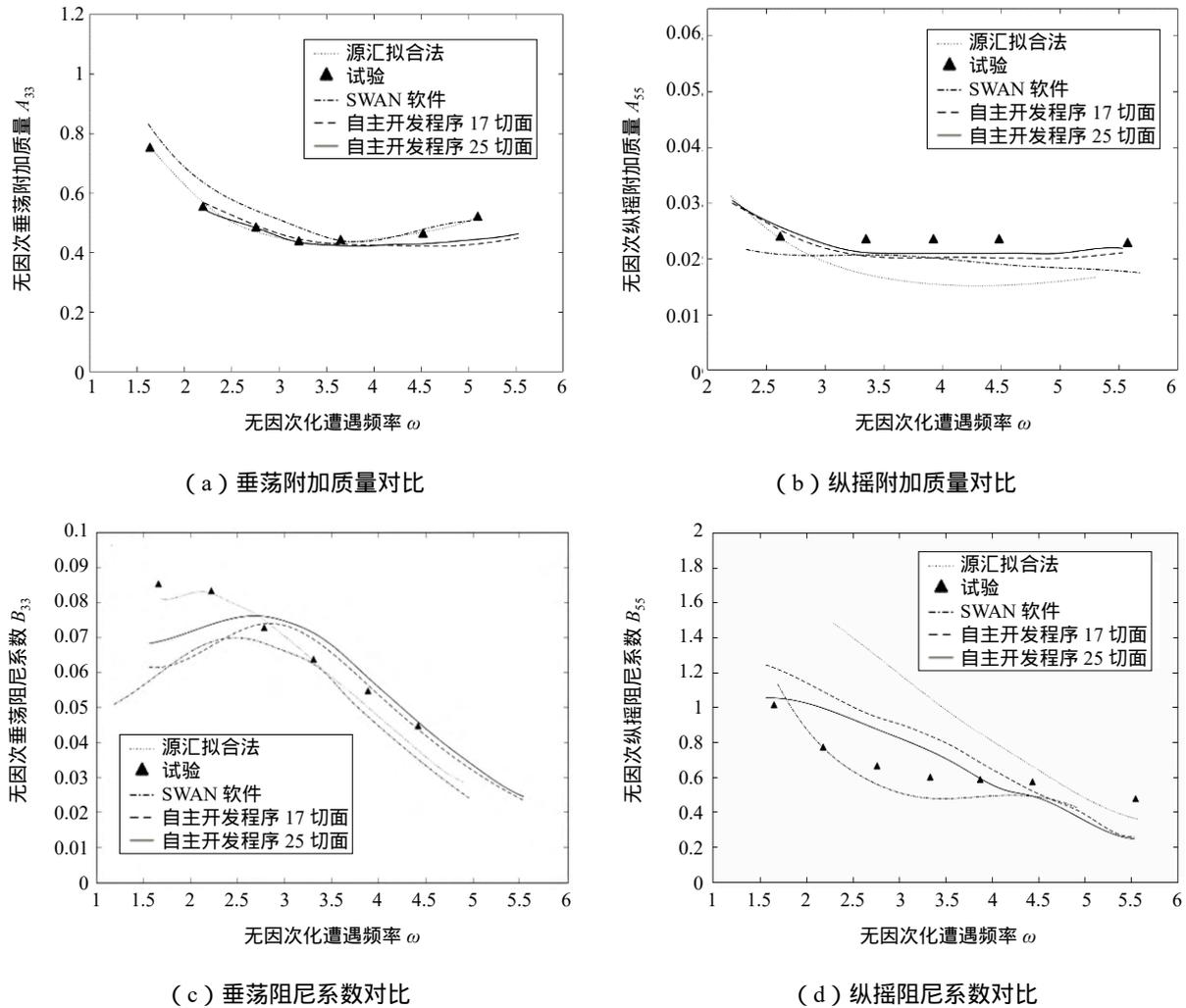


图 3 升沉纵摇水动力系数计算结果

## 2.2 船体垂向波浪力和力矩的计算结果

通过本文的评估程序计算, 可以计算得到在各频率下船体所受的垂向波浪力和绕  $y$  轴的波浪力矩, 同样选取 17 个切面和 25 个切面进行计算, 得到的计算结果与试验值和其他方法计算结果进行比较, 如图 4 所示。从图中我们可以看到:

(1) 船体波浪力和波浪力矩的总体趋势与试验结果颇为一致, 由本文的评估程序计算得到的波浪力和波浪力矩在大部分频率下要比试验值大, 没有三维方法及源汇拟合方法评估的准确, 但是与试验值相差的数值并不大, 基本上在可接受范围内。

(2) 同时我们可以看到剖面数量在波浪力和力矩的评估上所造成的影响并不大, 采用 25 个切面的计算结果要比采用 17 个剖面的计算结果略大, 原因可能是在采用数值积分方法时切面的数量造成的一定误差。

综上所述,本文自主开发的评估程序在计算波浪力和波浪力矩的结果总体与试验值较为一致,差值保持在允许范围之内,可以采用所得的计算结果进行接下来升沉纵摇运动的计算,且剖面数量对于波浪力和力矩的计算影响较小,可以根据最终运动的计算结果进行选择。

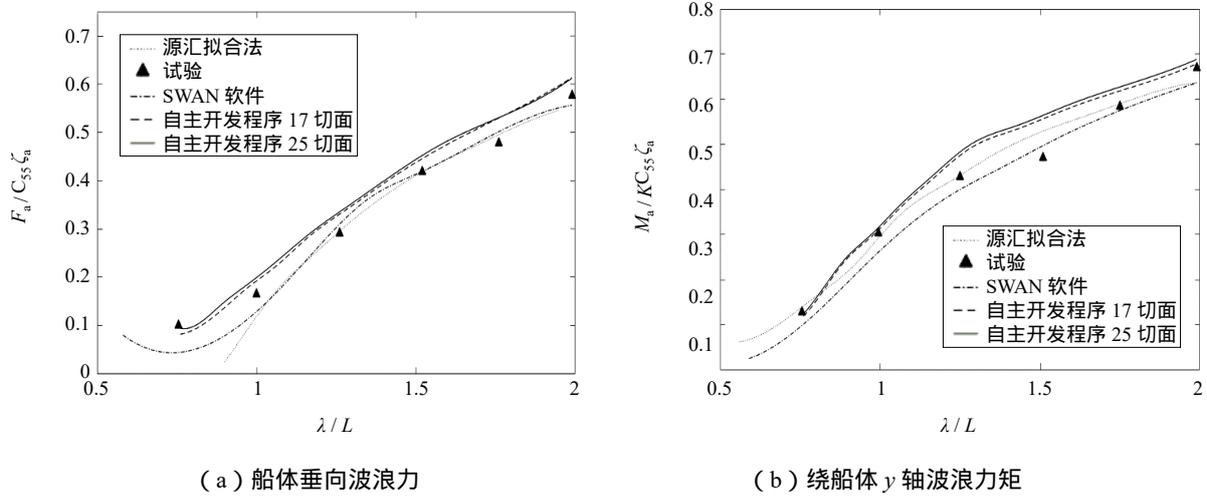


图4 波浪力和力矩计算结果

### 2.3 船舶升沉、纵摇频率响应

根据以上计算得到船体水动力系数、波浪力和力矩,通过本文的评估程序进行升沉-纵摇运动耦合方程的求解,得到在各个波浪频率下船舶升沉和纵摇的频率响应函数的模,并将不同切片数量时的计算结果与试验进行对比,如图5所示。可以看出,本文所开发的程序计算的频率响应总体上与试验结果在趋势上吻合良好。升沉运动频率响应在波浪频率较大时吻合较好,采用25个切面的计算结果更加接近试验值,而在低频率时,本文计算结果要比试验值偏大。纵摇运动频率响应在低频率和高频率时计算结果与试验值吻合良好,但在中频率时计算结果比试验值偏小。

综上所述,本文自主开发的评估程序能够较为准确地计算升沉纵摇运动频率响应,切片数量对计算结果有一定影响,但相差不大。作为初步的运动计算,本文开发的评估程序在总体上与试验值的差值是可以接受的,能够较为准确地评估船舶在规则波中的升沉和纵摇运动。

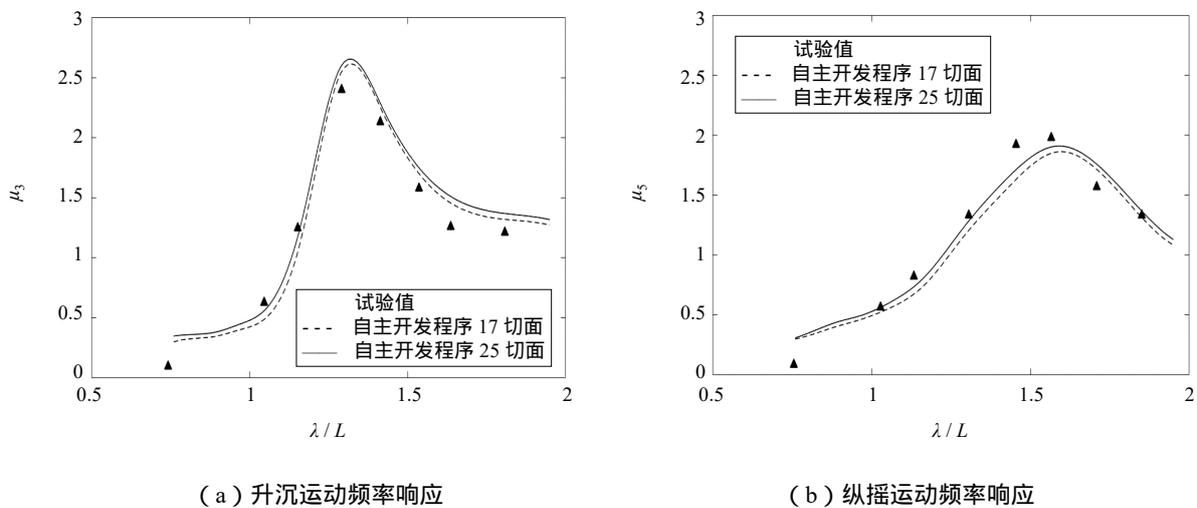


图5 升沉、纵摇运动频率响应计算结果

### 3 结 论

为了减少船舶在波浪中运动的计算时间, 从而缩短以耐波性为目标的船舶型线优化周期, 自主开发了一套基于切片理论的船舶升沉-纵摇运动快速评估程序。总体上采用切片法, 而在计算每个切面水动力系数时采用刘易斯剖面的田才图谱, 这样可进一步减少运动的计算时间。

而以 Wigley 船型为计算模型, 在剖面数量为 17 和 25 两种情况下, 计算船舶在  $Fr = 0.3$  时迎浪前行的水动力系数、波浪力、力矩以及升沉、纵摇运动响应。计算一个频率工况仅需要 3~5 s, 显著缩短了评估时间。通过将计算结果与试验值及其他方法计算结果进行比较, 显示本文开发的评估程序在计算的水动力系数、波浪力以及运动响应总体上符合试验结果, 在某些系数的计算方面还优于三维方法, 计算结果与试验值的差值不大, 可以满足船型优化的要求。

本程序在使用中还有若干问题需要加以改进:

(1) 在目前的程序中, 船型输入是依靠读取型值文档来实现的。在船型优化时, 需要对大量船型进行计算评估, 为此需要对船型输入模进行修正, 使其能自动读取不同船型的数据以减少评估时间。

(2) 需要对船型变化进行敏感性验证, 以确保船型发生变化时求解器足够敏感。这是本程序可应用于船型优化研究的基础。

(3) 还需要通过多种船型的计算和比较, 进一步验证本程序计算结果的准确性和有效性。

### 致 谢

本文工作国家自然科学基金项目 (51809169, 51879159)、国家重点研发计划项目 (2019YFB1704200, 2019YFC0312400), 长江学者奖励计划 (T2014099), 上海市优秀学术带头人计划 (17XD1402300), 工信部数值水池创新专项课题 (2016-23/09) 资助项目。在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- [1] 陶尧森. 船舶耐波性[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1985: 55-72.
- [2] TASI F. On the damping force and added mass of ships heaving and pitching[J]. Educational Theatre Journal, 1960, 1959(105): 1.
- [3] 陶尧森, 冯铁城. 舰船优化设计中耐波性计算方法的探讨[J]. 船舶力学, 2000(2).
- [4] 侯圣贤. 迎浪航行时船舶垂荡纵摇运动建模与仿真[D]. 大连: 大连海事大学, 2015.
- [5] 陈小邹. 船舶在波浪中频域分析[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(2): 24-27.
- [6] 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.
- [7] BINGHAM H B. Simulating ship motions in the time domain[D]. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA, 1994.
- [8] 马山. 高速船舶运动与波浪载荷计算的二维半理论研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2005.

# Rapid Evaluation of Ship's Longitudinal Motions in Waves Based on Lewis Section Method

WANG Jinkai, WAN Decheng\*

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), State Key Laboratory of Ocean Engineering,  
School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

## Abstract

In order to realize rapid optimization of sea-keeping performance, an evaluation program for heaving and pitching motions of a ship is developed, which can be added into the existing software OPTShip-SJTU developed by the authors' research group for ship hull form optimization. Based on Lewis section method, hydrodynamic coefficients of sections are calculated by interpolating Tasai graphics. A Wigley ship model is taken as the evaluation object. When  $Fr = 0.3$ , hydrodynamic coefficients, wave forces and motion response of the ship are calculated with this evaluation program and compared with the experiment. It is shown that calculation results of the program are in good agreement with that of the experiment, and evaluation time period can be greatly shortened, so as to realize rapid evaluation of ship's longitudinal motions.

**Key words:** sea-keeping; strip theory; Lewis section method; Tasai graphics

## 作者简介

王晋楷 男, 1994年生, 硕士研究生。主要研究方向为船型优化等。

万德成 男, 1967年生, 长江学者特聘教授, 博士生导师。主要从事船舶与海洋工程水动力学、流体力学高性能计算、船舶与海洋工程水动力学 CAE 软件等研究。

\*通讯作者: 万德成