arXiv:2512.19820v1 [physics.flu-dyn] 22 Dec 2025

面向横浪中自由航行船舶临界波组方法的统计验证

提交至《海洋工程》的预印本

Kevin M. Silva[1,⋆] **和 Kevin J. Maki**[2]

[1]海军水面作战中心卡德洛克分部，美国[2]海军建筑与海洋工程系，密歇根大学，美国[⋆]通讯作者：kevin.m.silva14.civ@us.navy.mil

2025年12月24日

摘要

采用确定性波组方法研究极端事件的统计特性，通常将问题简化为航速为零或以恒定航速和航向航行的船舶。相比之下，自由航行船舶具有六自由度（6-DoF），因而会出现更加复杂多样的极端响应事件。本文详细介绍了将临界波组（CWG）方法扩展至自由航行船舶，并证明该方法对横浪中的船舶进行概率计算所得结果，与有限蒙特卡洛数据集的结果具有可比性。本研究是对CWG方法自由航行实现进行正式验证的关键第一步。

***K*关键词** 极端事　　件、临界波组、自由航行、初始条件、耐波性、船舶水动力学　　s

引言

在整个服役期间，海军舰船会遭遇各种各样的波浪，这些波浪可能引发极端响应。正确评估这些极端事件，不仅对新船舶的设计至关重要，对现役船队的运营也同样重要。此类极端响应事件包括倾覆、偏航失控以及可能导致灾难性故障的巨大载荷，并可能造成船舶、设备和人员的损失。准确量化这类事件发生的概率固然至关重要，同时也必须定量观测船舶极端响应，以便研究并理解其背后的致因机制。

由于海洋具有随机性，采用蒙特卡洛方法直接计算极端事件统计并不可行，因为这需要很长的暴露时间。为避免长时间暴露的需求，人们采用了多种概率方法来量化极端事件。例如，超阈值峰值法（POT）（Campbell 和 Belenky，2010a）和包络超阈值峰值法（EPOT）（Campbell 和 Belenky，2010b；Belenky 和 Campbell，2011；Campbell 等，2023年）。除了外推方法之外，还有分段时间法，它利用危险距离方法识别极端事件（Belenky，1993；Belenky 等，2010；Weems 等，2020年；Belenky 等，2024）。

然而，这些极端事件概率方法无法提供物理上可实现的事件，关注的重点更多在于概率计算。波组和波浪片段方法则更侧重于观测极端事件；概率量化只是通过观测足够多经过专门设计的事件而产生的副产品。

部分波群和波浪片段方法包括设计载荷生成器（DLG）（Alford，2008年；Alford 等人，2011年；Kim，2012年）、结合降阶波群的高斯过程回归（GPR）序贯抽样（Mohamad 和 Sapsis，2018年；Sapsis，2021年）、利用高斯过程回归（GPR）和Karhunen-Loève（KL）展开表示波场与船舶运动（Guth 和 Sapsis，2022年），以及临界波群（CWG）方法（Themelis和Spyrou，2007年；Anastopoulos 等人，2016年；Anastopoulos和Spyrou，2016年、2017年、2019）。

采用确定性波组方法观测和量化极端事件统计特性的研究，大多涉及诸如仅考虑零航速或恒定航速和航向等简化处理。然而，自由航行船舶以六自由度（6-DoF）运动，纵荡、横荡和艏摇运动与螺旋桨力及舵力共同作用，可能导致船舶极端响应事件，甚至发生倾覆。极端事件不仅由大型波浪事件触发，还取决于船舶如何遭遇波浪，以及船舶在波场中的位置。将确定性波组方法应用于自由航行船舶时，一个主要挑战是确保船舶与波组的遭遇在不同波组和遭遇条件下具有可重复性和一致性，从而准确开展概率评估。

在广受欢迎的波组和波浪事件方法中，只有CWG方法已扩展为自由航行实现，用于Silva等人(2022)和Silva (2023)开展的计算流体力学（CFD）仿真。尽管先前研究已证明该方法可行，并展示了利用CFD评估极端事件的可行性，但CFD仿真的计算成本过高，无法对该框架进行统计验证。

本文旨在以先前研究为基础，通过采用大幅运动程序（LAMP）（Silva等人(2022)和Silva(2023)开发的CWG方法自由航行实现，利用势流模拟，推进其统计验证。采用计算成本低于计算流体力学（CFD）的计算工具，可构建更大的数据集，以比较CWG方法的概率计算结果。本文将介绍本研究采用的CWG方法、将其扩展至自由航行船舶的方法，并详细介绍一项案例研究，为完整验证自由航行船舶CWG方法的统计有效性奠定基础。

临界波组方法

CWG方法是一种概率框架，通过利用目标确定性波组观测船舶极端响应事件并量化其发生概率。CWG方法最初由Themelis和Spyrou (2007年提出，用于规则波，随后由Anastopoulos 等人 (2016年)扩展至不规则波；Anastopoulos和Spyrou (2016年、2017年、2019)。本文主要采用Anastopoulos和Spyrou (2019)提出的方法，并在Silva(2023年)中作了进一步详细说明。

超越概率

CWG方法旨在计算给定响应 ϕ 超过指定关注阈值 ϕ_{crit}的概率。CWG方法假定， ϕ 超过 ϕ_{crit} 的概率是作用于船舶的波组以及波组遭遇时船舶运动状态的函数；本文将后者称为遭遇条件，在CWG相关文献中也称为初始条件。对于任意参数化波组的样本空间 G以及遭遇条件的样本空间 E，超越概率通常可表示为：

$$p\left[\phi > \phi_{\text{crit}}\right] = \int \mathbf{1}_{\Theta(g,e)>\phi_{\text{crit}}} f_{G,E}\left(g,e\right) dg\, de \tag{1}$$

其中 $f_{G,E}\left(g,e\right)$ 是波组及遭遇条件的联合概率密度函数（PDF）， Θ 是一个映射，用于描述给定波组和遭遇条件（$\theta = \Theta\left(g,e\right)$）下船舶的绝对最大响应，而 $\mathbf{1}_{\Theta(g,e)>\phi_{\text{crit}}}$ 是一个指示函数：当某一特定波组/遭遇条件组合超过给定阈值时，取值为 1；否则取值为 0。为计算方程（1），需要预测不同波组和遭遇条件下的船舶响应，以建立映射 Θ。由于海洋具有随机性，波组和遭遇条件存在无限种可能的组合，因此完整计算 Θ 的成本很高。

CWG方法着重于确定方程（1）中由指示函数形成的边界。沿着该指示函数边界的相应波组和遭遇条件会产生接近超过指定响应阈值 ϕ_{crit}的响应。这些波组称为临界波组。

公式（1）未对波群形状或遭遇条件的性质作出任何假设。为实际求解公式（1），必须将遭遇条件离散化，并根据波群形状对波群进行参数化，从而建立一组互斥且完备的波群。在任意形状参数 q 和遭遇条件 ec_k下，公式（1）可改写为：

$$p\left[\phi > \phi_{\text{crit}}\right] = \sum_{k} p\left[\bigcup_{q} wg_{k,q}, ec_k\right] \tag{2}$$

其中， ec_k 为 k^{th} 遭遇条件，$wg_{k,\ q}$ 为在 k^{th} 遭遇条件和 q^{th}波群形状下导致响应超过指定阈值的所有波群。

本文依据持续长度对波群进行分类 j ，并依据波周期分组 m进行分类。采用 j 和 m 进行参数化后，得到的波群包含相同数量的波浪，且组内每个波浪的周期都处于相近范围。引入 j 和 m后，方程（2）可进一步展开为:

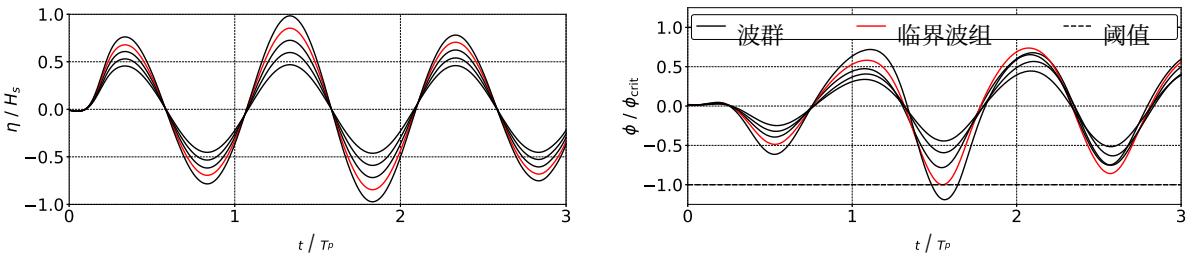
$$p\left[\phi > \phi_{\text{crit}}\right] = \sum_{k} \sum_{m} p\left[\bigcup_{j} wg_{m,j}^{(k)}\right] \times p\left[ec_k\right] \tag{3}$$

其中， $wg_{m\ ,\ j}^{(k)}$ 是所有会导致超越阈值的波群，这些波群包含 j 个波浪，波周期处于 m^{th} 波周期范围内，并满足 k^{th} 遭遇条件。假设对于足够大的响应，波群$wg_{m\ ,\ j}^{(k)}$ 属于稀有事件，且彼此在统计上相互独立，则方程（3）可进一步改写为:

$$p\left[\phi > \phi_{\text{crit}}\right] = \sum_{k} \sum_{m} \left(1 - \prod_{j} \left(1 - p\left[wg_{m,j}^{(k)}\right]\right)\right) \times p\left[ec_k\right] \tag{4}$$

其中，超越概率现分解为两个独立部分：满足k^{th} 遭遇条件 $p\left[ec_k\right]$ 的概率，以及波群超越概率 $p\left[wg_{m,j}^{(k)}\right]$，针对 m^{th} 波周期范围、组内 j 个波浪以及k^{th} 遭遇条件。有关超越概率推导的更多细节，请参见Anastopoulos和Spyrou（2019）和Silva（2023年）。

图1 展示了一系列波面升高 η 波组，其 j 和 m相同，但波高各不相同。 H_s 表示有效波高， t 表示时间，而 T_p 表示峰值波周期。图中还展示了相应的船舶响应，见图1。逐渐增大波组波高，最终会出现一个波组，使船舶响应达到指定阈值，如图1中的红色部分所示。假设波高大于临界波组的任何波组也会超过响应阈值。因此，计算超越概率时需要了解临界波组，而不需要了解波高较小的波组。



(a) 波群　　(b) 响应

图1：针对一组形状相似的波组，确定临界波组。

波组构建

本文中的波群采用Anastopoulos和Spyrou (2019)提出的相同方法构建，该方法利用马尔可夫链考量连续波浪的波高和周期之间的统计关系。给定波组中最大波浪的波高和周期，可运用马尔可夫链方法预测最可能出现的前序波浪和后续波浪。序列中每个波浪的描述仅取决于与其最接近的

连续波浪，这是由马尔可夫链的无记忆特性决定的。因此，一个包含 j 个波浪的波组，仅凭组中最大波浪的波高 H_c 和周期 T_c 即可完整描述。

公式（5）和（6）展示了如何根据当前波高 t_n 和周期 h_{n-1}，以及转移核 t_{n-1}，计算最可能出现的连续波浪的周期 $f_{T_n|H_{n-1},\ T_{n-1}}\ (t_n|h_{n-1},\ t_{n-1})$。转移核是一个条件概率密度函数（PDF），表示后续波浪周期 t_n 与当前波浪的波高和周期之间的关系。本文通过生成大量随机不规则波的数据集，并利用实际数据建立统计关系来求得转移核，而非采用 Anastopoulos 等人（2016年）中介绍的谱方法。

$$\overline{t_n} = \frac{1}{p_{T_n}} \int_{T_{cr,m}} t_n f_{T_n|H_{n-1},T_{n-1}}\left(t_n|h_{n-1},t_{n-1}\right) dt_n \tag{5}$$

$$p_{T_n} = \int_{T_{cr,m}} f_{T_n|H_{n-1},T_{n-1}}\left(t_n|h_{n-1},t_{n-1}\right) dt_n \tag{6}$$

公式（7）描述了如何根据公式（5）和（6）中通过马尔可夫链预测的最可能波浪周期，以及当前波浪的波高 h_{n-1} 和周期 t_{n-1}，预测序列中最可能出现的波高 h_n。

$$\overline{h_n} = \int_0^\infty h_n f_{H_n|T_n,H_{n-1},T_{n-1}}\left(h_n|\overline{t_n},h_{n-1},t_{n-1}\right) dh_n \tag{7}$$

马尔可夫链程序基于波组中最大波浪的波高 H_c 和周期 T_c 以及波组中的波浪数量 j，对波组内各个波浪的波高和周期进行确定性预测。

然而，为了在水动力仿真工具或实验波浪水池中进行评估，需要对波群进行连续的时间表示。图 2 展示了确定性波组高程连续时间表示的生成过程 η，其对应的时间为 t。红色圆圈表示使用公式（5）至（7）对波群中每个波浪的波高和周期进行的马尔可夫链预测。蓝色方块表示附加约束，其假设波群中的每个波浪在波高和周期方面均具有对称性。对于波群中的每个波浪，假设波峰和波谷各为波高的一半，并将波峰和波谷处的波面升高时间导数设为零，以确保它们是极值点。此外，波峰和波谷位于相邻零交叉点所界定时间间隔的中心，零交叉点则出现在当前波浪周期一半的时刻。利用马尔可夫链预测和几何约束，通过三角插值生成连续时间表示，将波群定义为一系列傅里叶分量。

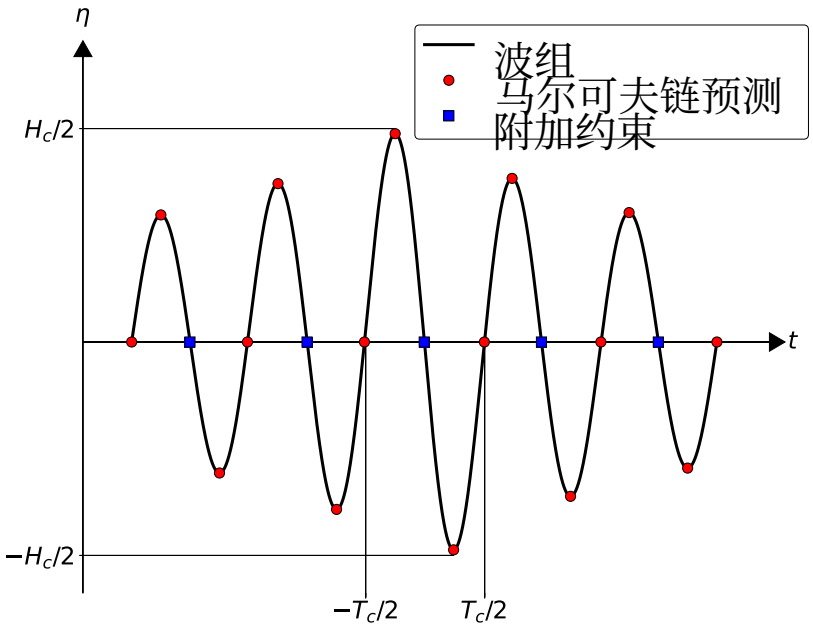
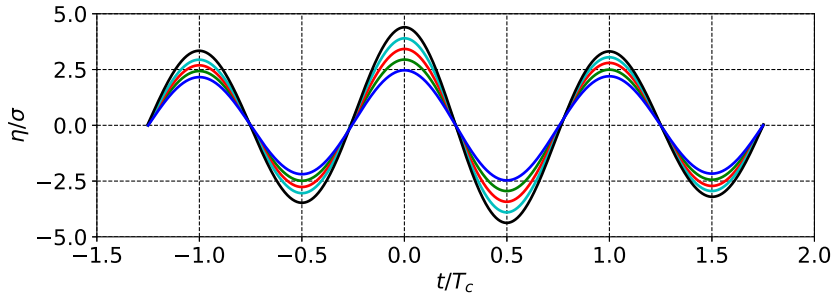


图2：马尔可夫链构造波组及附加几何约束（图改编自Anastopoulos和Spyrou（2016年）。

图 3 展示了波高和周期相同的波群示例 T_c 和 j，同时改变 H_c 的数值，以展示波群中最大波浪对后续波浪的影响。 σ 是随机波观测中波高的标准差。



具有相同 T_c、 j 以及 $H_c = 5\sigma$、 6σ、 7σ、 8σ 和 9σ 的波组系综。

波组概率

方程（1）至（7）展示了超越概率的整体计算、临界波组的识别，以及利用马尔可夫链构建确定性波群的过程。然而，求解方程（4）需要计算波组超过临界波组 $p\left[wg_{m,1}^{(k)}\right]$ 的概率，该计算针对 m^{th} 波周期范围、波组中有 j 个波浪以及 k^{th} 遭遇条件。方程（8）给出了波组超越概率，其中波组大于临界波组的概率，是波组中的波浪 H_j 大于临界波组中对应波浪 $\mathbf{h}_{cr}^{(k)}{}_{,\ j,\ m}$ 且波组中波浪的周期 T_j 处于波周期范围 $T_{cr,\ m}$内的联合概率。

$$p\left[wg_{m,j}^{(k)}\right] = p\left[\mathbf{H}_j > \mathbf{h}_{cr,j,m}^{(k)}, \mathbf{T}_j \in T_{cr,m}\right] \tag{8}$$

根据Anastopoulos和Spyrou (2019)的研究，$p\left[wg_{m,j}^{(k)}\right]$ 可利用马尔可夫链关系，通过方程（9）至（14）计算。更详细的推导和说明见Silva (2023年)。

$$p\left[wg_{m,j}^{(k)}\right] = p_0 \times \prod_{n=2}^{j} \frac{p_1^{(n)} \times p_2^{(n)}}{p_{01}^{(n-1)} \times p_{02}^{(n-1)}} \tag{9}$$

$$p_1^{(n)} = \int_{T_{cr,m}} \int_{T_{cr,m}} f_{T_n,T_{n-1}|\mathbf{H}_n}\left(t_n, t_{n-1}|\mathbf{H}_n > \mathbf{h}_{cr,n}\right) dt_n dt_{n-1} \tag{10}$$

$$p_2^{(n)} = \int_{h_{cr,n}}^{+\infty} \int_{h_{cr,n}}^{+\infty} f_{H_n,H_{n-1}}\left(h_n, h_{n-1}\right) dh_n dh_{n-1} \tag{11}$$

$$p_{01}^{(n)} = \int_{T_{cr,m}} f_{T_n|\mathbf{H}_n}\left(t_n|\mathbf{H}_n > \mathbf{h}_{cr,n}\right) dt_n \tag{12}$$

$$p_{02}^{(n)} = \int_{h_{cr,n}}^{+\infty} f_{H_n}\left(h_n\right) dh_n \tag{13}$$

$$p_0 = p_{01}^{(1)} \times p_{02}^{(1)} \tag{14}$$

自然初始条件

CWG方法此前的实现中，Themelis和Spyrou(2007)；Anastopoulos 等人(2016年)；Anastopoulos和Spyrou(2016年、2017年、2019）均考虑了横摇的单自由度常微分方程（ODE）模型。在这类模型中，遭遇波群时的整个动态状态都可以通过一个初始条件轻松定义。然而，在现实情况以及高保真水动力仿真工具中，无法通过初始条件瞬时完整地规定船舶及其周围流体的整个动力状态。因此，Silva和Maki(2021、2024）；Silva等人(2021）提出了自然初始条件，用于将CWG方法与计算流体力学结合，研究二维船中剖面的极端横摇；随后，Silva等人(2022）以及Silva (2023）又将其扩展至自由航行船舶。自然初始条件的核心思想是让遭遇条件自然形成，而非强行将船舶状态指定为初始条件。该方法将确定性波群嵌入此前观测到的不规则海况系综中，使船舶驶向目标波群时自然产生不同的遭遇条件，从而实现目标遭遇条件。这种方法避免了显式指定初始条件所带来的问题，转而使流体流动和船舶响应自然发展。此外，以这种方式规定遭遇条件，既保留了为常微分方程开发的CWG方法的完整性，也使该方法能够应用于更高保真的数值水动力仿真工具和物理实验。

考虑一艘自由航行的船舶在随机海况中开始航行，该海况随空间和时间演变。在此次实现过程中，某种特定的目标遭遇条件于时间 t_e 出现。船舶在遭遇坐标系中经历的波浪，可近似表示为波面升高 $\eta^{(\mathrm{E})}{}_{\mathrm{IP}}(t)$；截至时间 t_e，这段波浪称为不规则前奏。船速

$$U_e = x_e / t_e$$

也可以根据船舶在时间 t_e 内航行距离 x_e 来估算。确定性波群通过傅里叶分量在地固坐标系中定义，由此得到原点处（x，$y = 0$，0）的波组高程时间历程：

$$\eta_{\mathrm{WG}}(t) = \sum_f a_{g_f} cos\left(\omega_{g_f} t + \phi_{g_f}\right) \tag{15}$$

其中 a_{g_f}， ω_{g_f}，且 ϕ_{g_f}分别为描述确定性波群的傅里叶幅值、频率和相。图 4 展示了由代表某一波组的傅里叶分量所描述的原点处波面升高。由于傅里叶分量仅对应于该波组，因此波组会在时间和空间上连续重复。

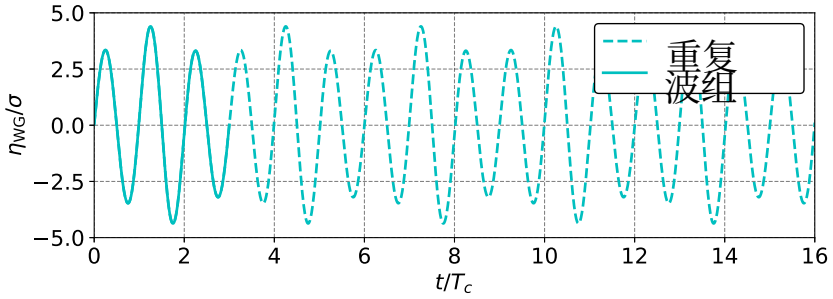


图 4：原点处确定性波群及其傅里叶分量的表示。

利用深水色散关系计算波数 $k_{g_f} = \omega_{g_f}^2/g$，并结合 U_e，可以估计船舶在恒定移动坐标系中遭遇波组的情况，从而将单点处的波组时间历程转换为空间和时间上重复的波列。 g 此处指重力加速度。由此可将公式（15）修改为用于描述估计遭遇坐标系中的波组：

$$\eta_{\mathrm{WG}}^{(\mathrm{E})}(t) = \sum_f a_{g_f} cos\left(\omega_{g_f} t - k_{g_f}(\cos(\mu) U_e t) + \phi_{g_f}\right) \tag{16}$$

其中 μ 为波向，定义为 180 度表示迎浪，0 度表示顺浪，90 度表示右舷横浪。图 5 显示了船舶以 $t = 0$恒定航速和航向通过原点时所遭遇的波场。

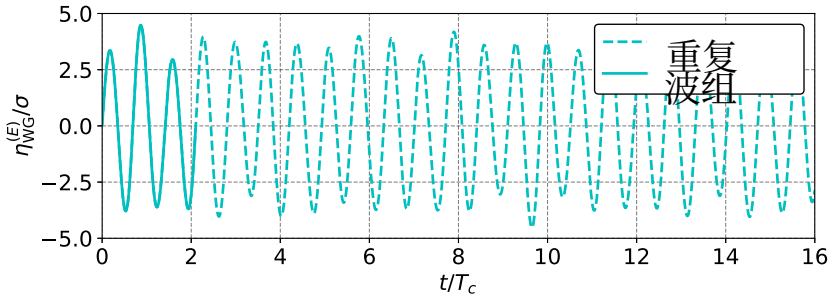


图 5：遭遇的 波面升高以恒定航速和航向穿过重复波组波场 。

由于船舶的前进速度，所关注的波组是在不同的时间间隔内遭遇的。与原点处的波组高程一样，遭遇的波组通过傅里叶表示在时间上重复。

为构造一个物理上可实现的极端事件，将遭遇坐标系中的确定性波组 $\eta^{(\mathrm{E})}{}_{\mathrm{WG}}(t)$ 嵌入遭遇到的不规则前奏 $\eta^{(\mathrm{E})}{}_{\mathrm{IP}}(t)$ 中。遭遇波组 $\eta^{(\mathrm{E})}{}_{\mathrm{WG}}(t)$ 平移 t_e，使波组的初始上穿越从位置 x_e 开始，从而确保遭遇波组 $\eta^{(\mathrm{E})}{}_{\mathrm{WG}}(t)$ 直接从 t_e 开始。在估计遭遇坐标系 $U_e t$ 中，使用混合函数β_1 和 β_2 构成新的复合波浪场：

$$\eta_{\mathrm{C}}^{(\mathrm{E})}(t) = (1-\beta_2)\left[(1-\beta_1)\eta_{\mathrm{IP}}^{(\mathrm{E})}(t) + \beta_1 \eta_{\mathrm{WG}}^{(\mathrm{E})}(t-t_e)\right] + \beta_2 \eta_{\mathrm{IP}}^{(\mathrm{E})}(t) \tag{17}$$

其中，每个混合函数定义如下：

$$\beta = \frac{1}{2}\left(1 + \tanh\left(\frac{t - t_e}{t_o}\right)\right) \tag{18}$$

函数 β_1 和 β_2 分别对应波组起始端和结束端的混合过程。图6 展示了将波组嵌入不规则波列以生成单个复合波列的混合过程。图6 中的波面升高和时间分别以指定波谱 σ 的波高标准差以及波组中最大波浪的周期 T_c进行无量纲化。

时间尺度 t_o 根据方程（19）选取，其中系数 0.9 对应于区间起始处第一个信号约 95% 的占比，以及区间末尾处第二个信号约 95% 的占比。方程（19）得到一个复合波，其中大部分混合过程发生在两个时长为 $T_p/5$的时间区间内。为构成完整的复合波列， t_o 对于 β_1 和 β_2均相同，而 t_e 则取决于波组的起始和结束位置。在评估极端船舶响应时，不考虑波组之后的复合波列部分，但波浪生成时需要这部分，以确保所关注的波群序列不会在观测时间内重复出现。

$$t_o = \frac{T_p}{10 \cdot \tanh^{-1}(0.9)} \tag{19}$$

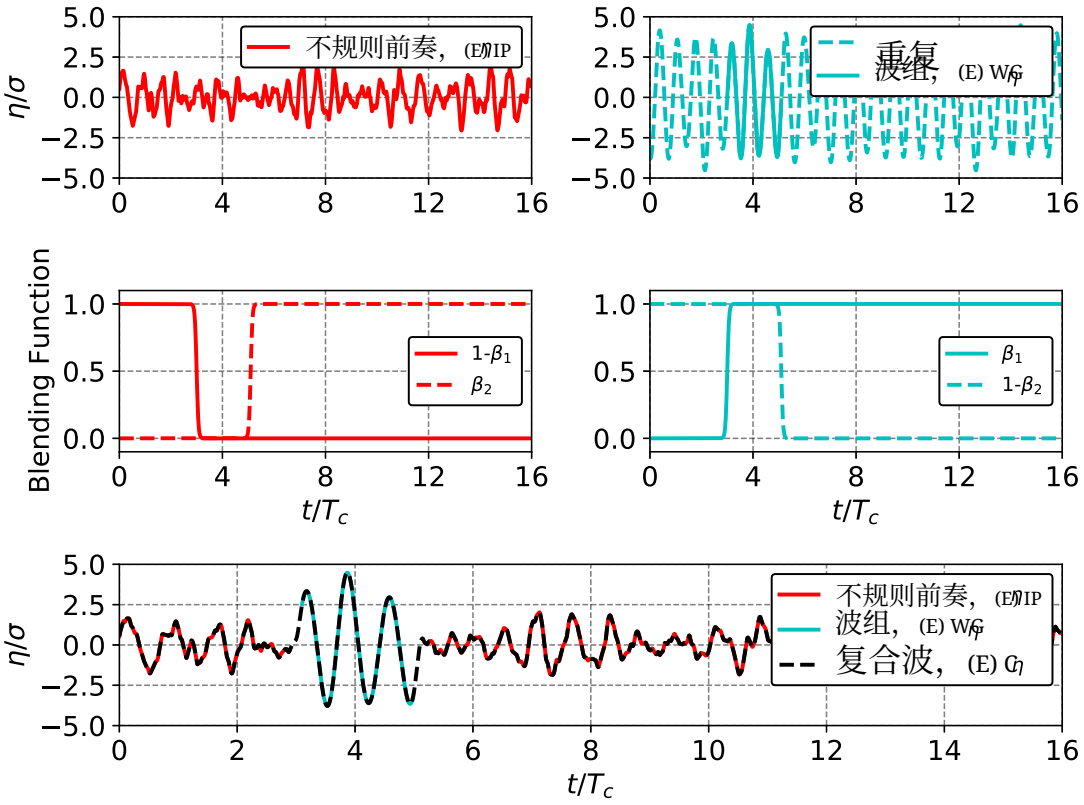


图6：在估计遭遇坐标系中，将确定性波组嵌入不规则前奏，从而形成复合波。

图 6 所示的混合过程生成了估计遭遇坐标系中的复合波列描述 $\eta^{(\mathrm{E})}{}_{\mathrm{C}}(t)$。为了生成仿真或实验所需的波浪，需要对波场进行完整的空间和时间描述。因此，必须将 $\eta^{(\mathrm{E})}{}_{\mathrm{C}}(t)$ 转换到地固坐标系。在型宽浪至迎浪（90-180 /180-270 度）情况下，可利用关系式 $\omega_e = \omega_o - \Psi\omega_o^2$ 直接进行转换，其中

$\Psi = \cos(\mu)U_e/g$。将频率转换至绝对参考系，并通过色散关系计算波数后，得到的复合波列 $\eta^{(\mathrm{E})}\ \mathrm{C}\ (\mathbf{x}\ t)$ 是空间和时间的函数。然而，在迎浪至顺浪（0–90、270–360 度）情况下，由于船舶相对于波浪传播方向的运动，多普勒效应会导致转换结果呈多值性。图 7 展示了三对一映射问题：在适当条件下，一个遭遇频率 ω_e 可能对应三个不同的绝对频率ω_o。 Nielsen (2017年) 提出了一种算法来解决这一问题。在存在这种多值问题的情况下，可将遭遇频率映射到三个不同的绝对频率。随后，根据由遭遇坐标系中的傅里叶分量估算得到的名义波谱，对原始对应的振幅傅里叶分量施加比例因子。

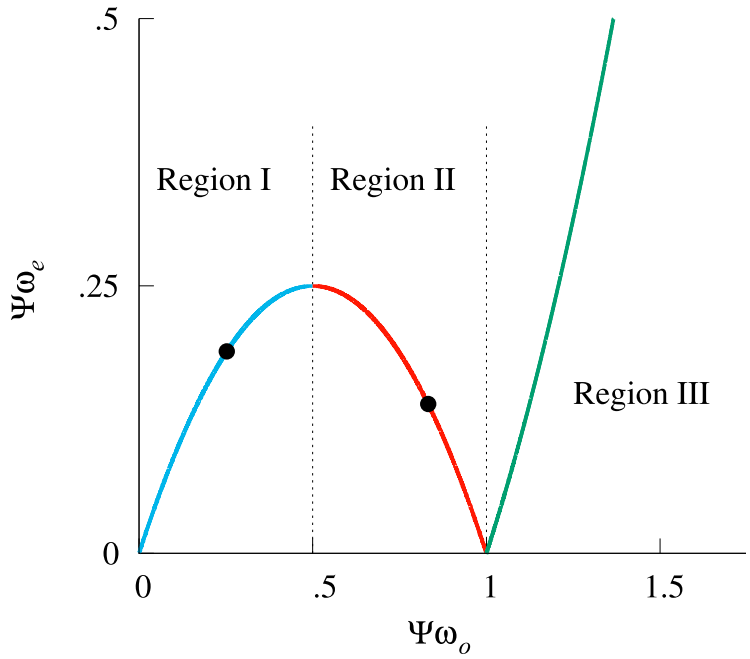


图7：遭遇频率（ω_e）与绝对频率（ω_o）之间的关系（Xu等人，2020年）。

自然初始条件法能够以自然的方式施加目标遭遇条件并生成波组，无需采用侵入性和非物理的措施或机制（无论是物理的还是虚拟的）。观测所需的所有必要信息都包含在复合波列中。图8 展示了一组复合波，这些复合波具有相同的波组，但不规则前奏各不相同。图8 中的时程经过了平移，使波组中最大波峰出现的时间一致，以此说明该方法。所有不规则前奏都必须考虑波浪生成的逐渐增强过程，以及船舶达到目标航速所需的时间。这一逻辑确保船舶能够重现先前观测到的、导致目标遭遇条件的结果。

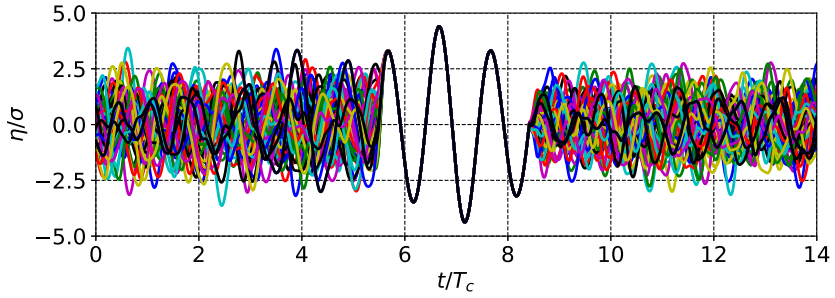


图8：同一波组中不同波浪及其对应的不规则前奏的系综；这些波浪在时间上进行了平移，使得波组中最大波浪的峰值出现在同一时刻。

自然初始条件法的另一项优势是，可以确定一组满足相同遭遇条件的独立不规则波列。这一识别使得构建一组复合波列成为可能，从而可通过研究进一步了解对遭遇条件的敏感性。例如，如果遭遇条件仅考虑横摇和横摇速度，而横荡速度却有显著影响，那么便可找到横荡速度不同的不规则前奏，以评估横荡的重要性。反之，如果在考察大横摇时选取了不合适的遭遇条件，例如升沉运动和纵荡速度，那么识别出不适用的量也很容易。在相同遭遇条件和波组下，船舶响应会出现显著差异。对于更复杂的失效机制，例如因突然转向而导致的倾覆，自然初始条件方法的这一特点尤为实用，因为遭遇条件中应考虑哪些量并不明显。

案例研究

本文提出的利用CWG方法对自由航行船舶极端船舶运动进行建模的方法，通过使用LAMP对戴维·泰勒模型盆地（DTMB）5415船体型线开展的仿真加以展示。本研究采用LAMP-3公式，其中水动力学（辐射和绕射）以平均湿表面为基础求解（船体线性），而静水力学和弗劳德-克雷洛夫力则在瞬时湿表面上求解（船体非线性）。这种混合非线性方法能够以一般船体非线性公式所需计算量的一小部分，解析船舶—波浪问题中的大部分非线性效应，并支持较大的横向运动和自由航行船舶仿真。

表1 列出了 DTMB 5415 案例研究的装载状态和流体属性。该装载状态源自针对 5415M 开展的 CFD验证研究，见 Sadat-Hosseini等（2015）；流体属性则代表温度为 20° 的海水（ITTC，2011）。在 LAMP模拟中，DTMB5415 可自由进行纵荡、横荡、升沉、横摇、纵摇和艏摇。船舶的前进速度由Lee等（2003）提出的准稳态螺旋桨性能模型控制；舵则建模为低展弦比翼板，并由比例-积分-微分（PID）控制器驱动，以保持航向。

表2 总结了本研究所考虑的海况和运行条件。研究针对由 JONSWAP谱（Hasselmann等，1973）描述的 7 级海况长峰海况，构建了波群数据库。本研究考虑的速度为 20 节，航向为 90 度（横浪）。对于 CWG方法，选取横摇作为关注量，并将横摇和横摇速度作为遭遇条件。横荡速度等其他关注量也可作为遭遇条件。然而，先前采用 CWG方法开展的研究表明，仅考虑横摇和横摇速度，便足以准确预测超越概率。

进行了两小时的随机不规则波模拟，以确定用于自然初始条件的波列以及遭遇条件的概率。图 9展示了两小时随机不规则波的横摇角与速度的联合概率分布。图 10 展示了两小时随机不规则波模拟（20 次实现）的横摇角与速度时间历程，以及所选的遭遇条件。45 个遭遇条件分别在横摇角和横摇速度范围内均匀分布，使遭遇条件对覆盖联合概率分布的大部分区域。从时间历程中选取不规则前奏，并在目标遭遇条件出现时嵌入波群。

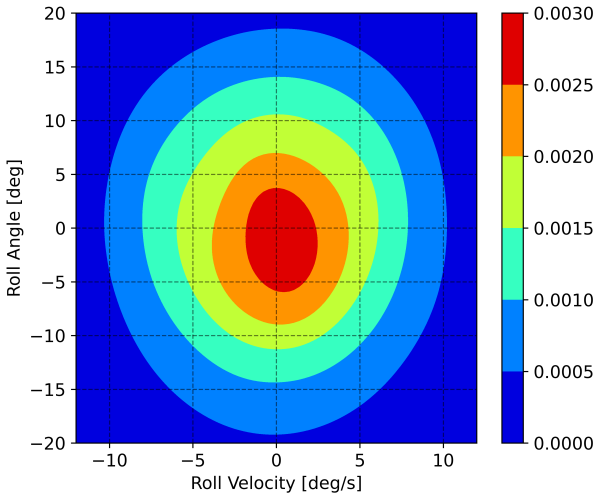
在本案例研究中，针对 $j \leq 3$, T_c 构建波群， T_c 范围为 13 至 17 s，步长为 1 s； H_c范围为 8 至 21 m，步长为 1 m。将所有波群与遭遇条件组合，构成一套完整的复合波列。对所有复合波列进行了 LAMP模拟。针对每个阈值，根据 H_c 对横摇角进行插值，以确定一个 H_c 数值，使其超过所关注的各个阈值。

表1：DTMB 5415 LAMP模拟的装载状态和流体属性。

属性	单位	数值
垂线间长	m	142.0
Beam	m	19.06
吃水	m	6.15
排水量	吨	8431.8
纵向重心（艉垂线前方 +）	m	70.317
垂向重心（基线上方）	m	7.51
横向稳心高度	m	1.95
横摇回转半径	m	7.62
纵摇回转半径	m	35.50
艏摇回转半径	m	35.50
水的密度	千克/米³	1024.81
水的运动黏度	m^2/s	1.0508e-6
重力加速度	m/s^2	9.80665

表2：DTMB 5415案例研究的运行和海况条件。

属性	单位	数值
速度	节	20
标题	deg	90
海况	-	7
波谱		JONSWAP
有效波高， H_s	m	9.0
峰值周期 , T_p	s	15
单次运行时长	s	360
验证数据集	hr	1,000



Figu图 9：遭遇条件的概率分布 。

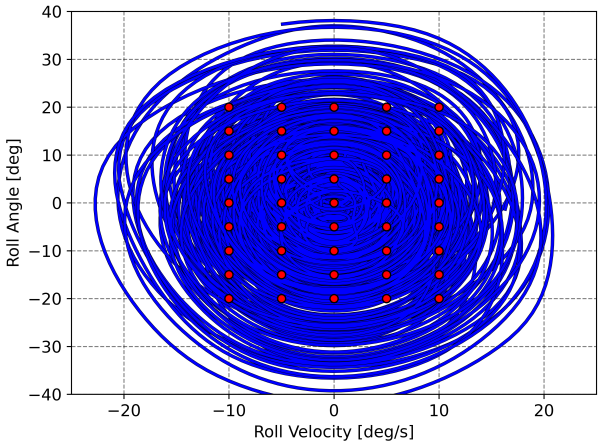


图10：从随机不规则波中选取的遭遇条件。

图 11 展示了CWG方法自由航行实现与1,000小时随机不规则波模拟在不同横摇角阈值下的超越概率对比。自由航行CWG方法实现预测的超越概率以红色圆圈和红色实线表示，1,000小时随机不规则波模拟则以黑色实线表示。总体而言，对于在这1,000小时内被超过的阈值，CWG方法计算出的概率能够准确代表蒙特卡洛数据集。

这是验证CWG方法自由航行实现的第一步，仍需进一步研究。在得出CWG实现能够令人满意地再现自由航行船舶横摇超越概率的结论之前，还需要规模大得多的验证数据集，并将研究扩展到其他速度和航向。

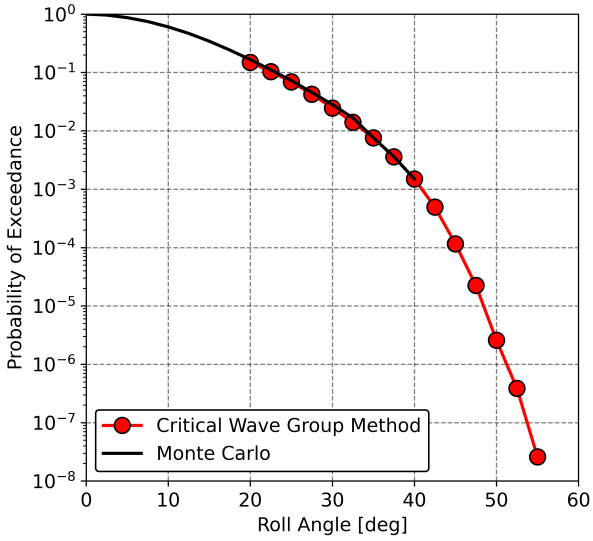


图11：7级海况下横摇的超越概率。

讨论

案例研究中呈现的结果表明，采用自由航行CWG方法预测的超越概率与基准1,000小时蒙特卡洛模拟结果高度吻合。这种一致性意义重大，因为它表明，自然初始条件方法能够有效捕捉支配极端

横浪横摇事件的关键物理机制。概率框架似乎能够恰当地权衡临界波组结构和船舶遭遇波浪时的动态状态各自的影响。这项有限验证取得的成功表明，该方法并非只是理论构想，而是一种实用工具，能够识别并利用影响最大的船舶-波浪相互作用，从而高效预测稀有事件。

不过，必须承认仿真所采用的 LAMP-3公式固有的局限性。尽管这种融合方法能够处理主导大幅横摇的关键船体非线性福汝德－克雷洛夫力和静水力，但它无法充分捕捉波浪辐射和绕射中的完全非线性效应，也没有对黏性效应进行建模。因此，诸如舭龙骨产生的显著涡脱落，或碎波对船体的影响等现象，只能通过近似方式处理。对于横浪中的极端横摇，图 11 所示的一致性表明，最关键的非线性效应得到了较好的体现。不过，若要将这一验证推广到其他非线性效应占主导地位的情形，仍是未来一项至关重要的工作。

从实际应用角度来看，这些发现标志着朝着建立一种计算上可行的框架迈出了重要一步，可用于船舶设计早期阶段评估极端事件发生概率，或为运营提供指导。船舶设计人员可以运用这一方法评估不同船型的性能，或制定安全包络，而无需采用蛮力蒙特卡洛模拟——这类模拟往往耗时过长且计算成本高昂。量化概率并观察物理事件的能力带来了双重益处，对于理解和降低风险至关重要。

结论

本文详细介绍了用于预测极端横摇的CWG方法自由航行实现。文中介绍了CWG方法中的概率计算和波组构建，以及利用自然初始条件概念对自由航行船舶方法的扩展。在横浪条件下，针对单一速度和海况对自由航行实现进行了有限验证，结果表明，CWG方法的概率计算能够准确再现1,000小时随机不规则波的预测结果。

本文是按照Silva等人（2023年）和Silva （2023年所提出的CWG方法自由航行实现正式验证的第一步。下一步将把验证数据集扩展至更长的暴露时间窗口，以验证针对更极端、低概率事件的概率估计。此外，纳入不同的速度和航向也至关重要，尤其是艉斜浪，因为已知该海况会引发复杂且危险的动态横摇行为。在这些条件下取得成功，将证明该框架对于一些最具挑战性的操作场景具有稳健性。

为提高该框架的实用性，未来工作还将研究采用长短期记忆（LSTM）神经网络作为代理模型。通过免去针对每一组波群与遭遇条件组合进行完整时域模拟的需求，这种方法可以大幅降低计算成本，使其能够用于快速、迭代式的设计评估。最后，完善的框架必须纳入确定性波群和遭遇条件中的不确定性，正如Silva (2023)所提出的那样。量化这种不确定性，将为最终概率估计提供至关重要的置信界限，使该框架在实际设计和操作决策中更加稳健。完成这些工作后，将形成一种用于估计极端事件的方法；它不仅完整，也是一种实用工具，能够弥补当前在真实条件下量化和观测自由航行船舶极端事件能力方面的重大缺口。

致谢

本研究由美国国防部（DoD）科学、数学与转型研究（SMART）奖学金、海军水面作战中心卡德罗克分部（NSWCCD）延长任期培训（ETT）以及NSWCCD海军创新科学与工程（NISE）计划提供支持。作者还谨此感谢美国海军研究局对本研究的支持；本研究由项目经理Woei-Min Lin通过合同N00014-20-1-2096提供资助。

参考文献

L. Alford。《使用非均匀相位分布估算极端响应》。博士论文，密歇根大学，安娜堡，密歇根州，2008年。

L. K. Alford、D.-H. Kim 和 A. W. Troesch。利用设计载荷生成器的非均匀傅里叶相位分布估算极端砰击压力。《海洋工程》，38(5)：748–762，2011年。ISSN 0029-8018。doi：https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2010.12.008。P. A. Anastopoulos 和 K. J. Spyrou。基于真实波组激励的船舶动态稳性评估。《海洋工程》，120：256–263，2016年。ISSN 0029-8018。doi：https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.04.018。P. A. Anastopoulos 和 K. J. Spyrou。评估临界波组方法在横浪中计算船舶极端响应概率的效果。载于《第16届国际船舶稳性研讨会论文集》，第131–138页，塞尔维亚贝尔格莱德，2017年。P. A. Anastopoulos 和 K. J. Spyrou。评估临界波组方法在横浪中计算船舶倾覆概率的效果。《海洋工程》，187：106213，2019。ISSN 0029-8018。doi：https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106213。P. A. Anastopoulos、K. J. Spyrou、C. C. Bassler 和 V. Belenky。迈向改进的临界波组方法，以评估不规则海况下大型船舶运动的概率。《概率工程力学》，44：18–27，2016年。ISSN 0266-8920。doi：https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2015.12.009。V. Belenky。一种倾覆概率计算方法。《船舶研究期刊》，37：200–207，1993年。V. Belenky 和 B. Campbell。利用包络峰值超阈值（EPOT）法通过统计外推评估平稳随机过程的超越率。技术报告 NSWCCD-50-TR-2011/032，海军水面作战中心卡德洛克分部水动力学部，美国马里兰州西贝塞斯达，2011年。V. Belenky、K. M. Weems、W. Lin 和 K. J. Spyrou。利用分段时间法数值评估斜浪中的倾覆概率。载于《第28届海军水动力学研讨会论文集》，2010年。V. Belenky、K. M. Weems、W.-M. Lin、V. Pipiras 和 T. P. Sapsis。利用分段时间法估算倾覆概率。《海洋工程》，292：116452，2024年。ISSN 0029-8018。doi：https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023. 116452。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801823028366。B. Campbell 和 V. Belenky。通过统计外推评估大横摇的概率。载于《第11届船舶及其他浮体实用设计国际研讨会论文集》，2010a。B. Campbell 和 V. Belenky。利用蒙特卡罗法评估短期风险。载于《第11届国际船舶稳性研讨会论文集》，2010b。B. Campbell、V. Belenky、V. Pipiras、K. Weems 和 T. P. Sapsis。利用包络峰值超阈值法估算大横摇角的概率。《海洋工程》，290：116296，2023年。doi：https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.116296。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002980182302680X。S. Guth 和 T. P. Sapsis。基于波浪过程的高斯过程回归，用于船舶动力学中的极端事件统计：兼顾 Karhunen–Loève 收敛与瞬态特征。《海洋工程》，266：112633，2022年。ISSN 0029-8018。doi：https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.112633。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801822019163。K. Hasselmann、T. Barnett、E. Bouws、H. Carlson、D. Cartwright、K. Enke、J. Ewing、H. Gienapp、D. Hasselmann、P. Kruseman、A. Meerburg、P. Müller、D. Olbers、K. Richter、W. Sell 和 H. Walden。联合北海波浪计划（JONSWAP）期间风浪增长和涌浪衰减的测量。德国水文研究所，德国汉堡，1973年。ITTC。《淡水和海水性质》。ITTC程序7.5-02-01-03，修订版02，第26届国际拖曳水池会议，2011年。D.-H. Kim。《设计载荷生成器：船舶与海上工程应用中的极端环境载荷估算》。博士论文，密歇根大学，安娜堡，密歇根州，2012年。T. Lee、K. Ahn、H. Lee 和 D. Yum。现代船体水动力系数的经验预测。载于《国际海洋模拟与船舶操纵性会议（MARSIM 03）论文集》，2003年。W. Lin、M. Meinhold、N. Salvesen 和 D. Yue。船舶设计中的大幅运动和波浪载荷。载于《第20届海军水动力学研讨会论文集》，1994年。W. M. Lin、J. R. Bergquist、M. D. Collette、D. Liut、T. W. Treakle 和 K. M. Weems。LAMP系统用户指南。技术报告，SAIC，美国马里兰州安纳波利斯，2007年。M. A. Mohamad 和 T. P. Sapsis。非线性动力系统极端事件统计的序贯采样策略。《美国国家科学院院刊》，115(44)：11138–11143，2018年。ISSN 0027-8424。doi：10.1073/pnas.1813263115。

U. D. Nielsen. 从一艘前进中的船舶上观测时，将波浪能谱从遭遇域转换到绝对域。《应用海洋研究》, 69:160–172, 2017年。ISSN 0141-1187。doi: https://doi.org/10.1016/j.apor. 2017.10.011. H. Sadat-Hosseini, D. Kim, S. Toxopeus, M. Diez, and F. Stern. 不规则波中全附体自由航行5415M的计算流体力学与势流模拟。载于 世界海事技术大会, 2015. T. P. Sapsis. 流体流动与波浪中极端事件的统计特性。《流体力学年度评论》, 53(第53卷，2021年):85–111, 2021年。ISSN 1545-4479。doi: https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-030420-032810.
URLhttps://www.annualreviews.org/content/journals/10.1146/annurev-fluid-030420-032810.
K. Silva, B. Knight, and K. Maki. 利用计算流体力学和神经网络对自由航行船舶的极端横摇进行数值预测。载于第*34*届海军水动力学研讨会论文集, 2022.K. M. Silva. 一种由计算流体力学驱动的机器学习框架，用于观测和量化船舶极端响应. 博士论文，密歇根大学，密歇根州安娜堡，2023年。K. M. Silva and K. J. Maki. 临界波组方法的计算流体力学实现进展。《海洋工程》, 235:109451, 2021年。ISSN 0029-8018。doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021. 109451. K. M. Silva and K. J. Maki. 利用计算流体力学和神经网络实现临界波组方法。《海洋工程》, 292:116468, 2024年。ISSN 0029-8018。doi: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng. 2023.116468.
URLhttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801823028524. K. M. Silva, W. Xu, and K. J. Maki. 利用计算流体力学和神经网络实现临界波组方法。载于 第一届国际船舶与海洋结构物稳性与安全会议（*STAB&S 2021*）, 2021. N. Themelis and K. J. Spyrou. 船舶稳性的概率评估。《*SNAME*汇刊》, 115:181–206, 2007. K. Weems, V. Belenky, K. Spyrou, A. S., and K. Silva. 数值估算由突然转向导致的倾覆概率。载于第*33*届海军水动力学研讨会论文集, 2020. W. Xu, G. P. Filip, and K. J. Maki. 一种利用设计事件理论和计算流体力学预测船舶极端响应的方法。《船舶研究期刊》, 64:48–60, 2020年。