

刚性跨接管海上运输及安装设计的标准化研究

刘毅 (天津北海油人力资源咨询服务有限责任公司深圳分公司, 天津 518000)

摘要: 刚性跨接管主要应用于深水油气田的开发, 是水下生产系统的重要组成部分, 它将生产系统中的水下采油树、管线终端、管汇及输油海管等重要设施串联为一个有机的整体, 维持整个系统的正常运转。本文以南海某大型深水项目为例, 国内首次对同一油田近 25 根尺寸规格各异的跨接管进行安装的背景, 分析如何对跨接管的海上运输及安装进行标准化设计, 使该设计体系同时适应不同跨接管的运输和安装工作, 从而简化设计、预制和安装过程。标准化设计主要包括利用海上结构设计分析软件 SACS 对辅助锚固结构和跨接管进行设计分析以及海上吊装分析, 利用海洋工程动力学软件 OrcaFlex 进行水动力分析模拟安装过程等, 该设计标准化的研究提出了针对大批量跨接管高效安装的设计方案, 对未来的深水刚性跨接管的安装提供了参考。

关键词: 工程设计标准化; 海上运输; 刚性跨接管安装; 跨接管吊梁

0 引言

刚性跨接管是水下生产系统的重要组成部分, 连接于采油树和管汇之间, 可传输油气以及向油井注水, 它由管道本体、终端连接器、螺旋列板等组成, 通过水下机器人的操作, 可将终端连接器与水下生产设备可靠连接。刚性跨接管普遍过长过高, 通过设计辅助的锚固结构使其临时固定于船舶甲板上, 在不同的海况条件下, 分别对辅助结构及跨接管进行强度分析, 确保将其安全运输至目标地点。到达目标地点后, 船舶吊机将跨接管吊装, 通过吊装分析及海上安装过程分析, 为其顺利与生产设备连接提供依据。

以南海某大型深水项目为例, 对跨接管的海上运输及安装设计标准化研究, 需要安装的跨接管外观形式为“M型”, 总长 25~50m 不等, 直径 4.5~18 英寸, 高度 5~11m, 重量最重达 80t, 将该批规格尺寸相差较大的跨接管从码头吊装至船舶, 并通过辅助结构和索具对其进行临时锚固, 防止运输过程中的恶劣海况使跨接管产生位移和翻转导致的损坏, 随后将该批跨接管运输至南海, 在水下 1500m 处进行安装。

1 海上运输分析及设计

1.1 跨接管总体布置标准化

通过边界条件传递法和耦合分析法可实现船舶、上部结构和适航固定结构的集成分析, 从而优化总体布置, 计算依据有阻力系数设计 (LRFD Load and Resistance Factor Design) 和工作应力设计 (WSD Working Stress Design)。由于跨接管的长度最短为 25m, 高度最低为 5m, 且考虑到海上吊装过程的效率和安全性, 减少跨接管翻身的工序, 将跨接管竖立布置于船舶甲板上更为合理, 如图 1 所示。船舶在航行过程中由于各种海况条件的

作用, 使船舶发生各个方向的运动, 跨接管和辅助锚固结构将会额外受到水平和垂直方向的惯性载荷, 考虑将辅助结构尽可能的布置于靠近船舶中心处, 可以有效的降低作用在结构上的惯性力。因此, 在运输该批跨接管时, 采用每航次布置两根跨接管, 跨接管吊梁及其支撑架位于船舶左右舷靠近船中处, 为了便于跨接管的海上下放, 两根跨接管靠近船舷侧以船宽中心线为中心轴对称布置, 如图 2 所示。

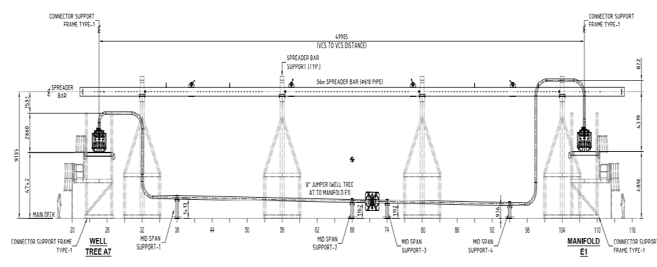


图 1 跨接管立面布置图

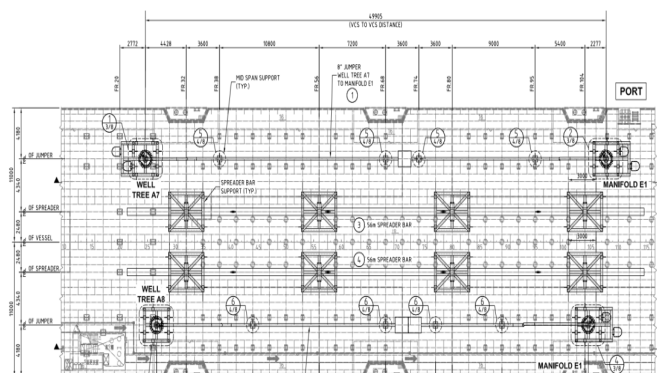


图 2 跨接管总体平面布置图

跨接管的吊梁支撑架沿船长方向均匀分布, 并设

置于船舶甲板强结构处，之后的每一航次吊梁支撑架及吊梁将不再改变锚固位置，由于跨接管与吊梁预先通过吊索连接，不同长度跨接管沿船长布置位置应匹配吊梁支撑架，船宽位置保持不变，使每一航次的跨接管总体布置变化最小，现场作业工作量最少，对于支撑架的强度及船舶甲板强结构处只需要进行一次强度校核，就能满足所有航次的要求，设计分析工作量也相应减少。

1.2 跨接管连接器支撑架及吊梁支撑架标准化

水下生产系统中的设备连接端口高度的不同，使同一跨接管两端连接器的高度不一致，且各个跨接管终端连接器都各不相同，因此需要设计一个能适合各个跨接管连接器的支撑架平台，将支撑平台的立柱设计为直径 8 英寸圆管，再将平台四角处设置直径 10 英寸圆管，通过管套管的形式使平台的高度可以自由调整，来匹配每根跨接管的连接器，即可升降式支撑架平台。连接器的重量为 2-10t 不等，通过紧固带固定于平台结构上。吊梁支撑架设有限位结构，可以对吊梁完全限位，无需用紧固带对吊梁进行固定。

连接器支撑架及吊梁支撑架通过码板与船舶甲板进行固定，码板焊接与甲板上，并卡接于支撑架底部的工字钢，设置在 X 和 Y 方向，用于限制支撑架在三个方向的位移，在码板处设置相应约束。

根据表 1 设置多种不同海况来计算支撑架、跨接管和吊梁的强度，得出 UC 值见图 3（UC 值为结构所受应力与许用应力的比值），并得出支撑架约束处的支反力如图 4。

根据支反力校核码板的弯曲应力、剪切应力、拉应力、冯·米塞斯等效应力以及焊缝强度，船舶甲板底部结构同样通过以上参数和方法进行校核或用 ANSYS Workbench 进行结构建模有限元分析。根据焊接规范，焊缝许用应力应为 0.3 倍的焊材抗拉强度，等效应力与许用应力的比值应小于 1，焊缝所受等效应力见式（1）。

表 1 中：

R 为横摇时 Y 方向加速度， m/s^2 ；

P 为纵倾时 X 方向加速度， m/s^2 ；

H 为纵倾时 Z 方向加速度， m/s^2 ；

WX 为 X 方向风载，kN（风速 36m/s 或 70 节，空气密度 $1.226kg/m^3$ ）；

WY 为 Y 方向风载，kN（风速 36m/s 或 70 节，空气密度 $1.226kg/m^3$ ）；

G 为结构自重。

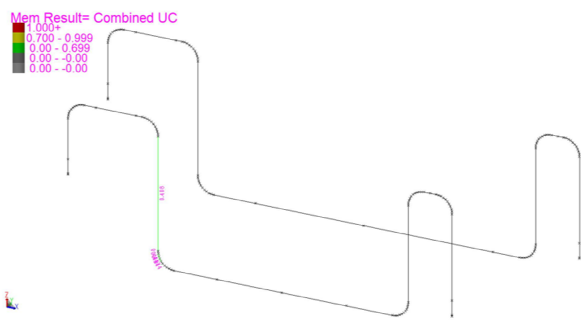


Figure 5-6: Jumpers SACS UC Plot (UC > 0.4)

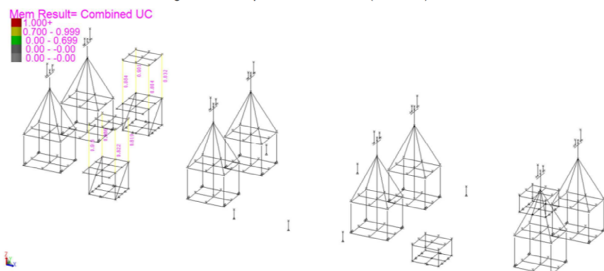


Figure 5-8: Jumper & Spreader Bar Supports SACS UC Plot (UC > 0.8)

图 3 跨接管和支撑架 UC 值图

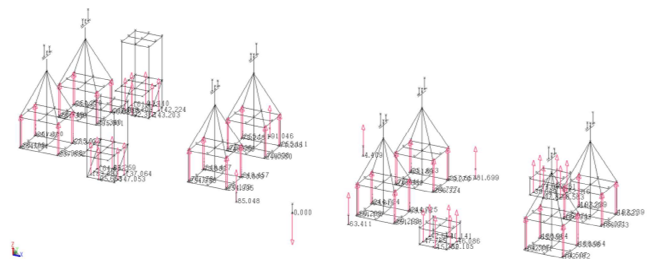


Figure 5-9: Maximum Vertical (Z) Reactions

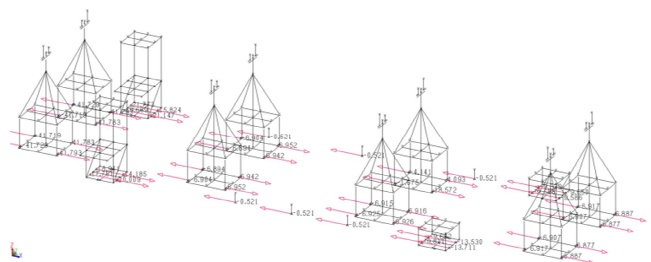


Figure 5-10: Maximum Horizontal (X) Reactions

图 4 支撑架支反力

$$fcw_1 = ((f_{bw1} + f_{tw1})^2 + 3 * f_{vw1}^2)^{0.5} \quad (1)$$

式中：

fcw_1 为等效应力，MPa；

f_{bw1} 为弯曲正应力，MPa；

f_{tw1} 为拉应力，MPa；

f_{w1} 为剪切应力, MPa。

1.3 跨接管绑扎与中段支撑标准化

跨接管的两端临时固定于平台结构上, 由于跨接管自身存在高度差的缘故, 波浪影响船舶运动时, 对于跨接管本体最高点和最低点会产生过大的弯矩, 容易使跨接管本体造成损坏, 因此在高点设置可调节长度的紧固带, 由于跨接管跨距过长, 在低点沿船长方向均匀设置中段支撑, 并设置于船舶强结构肋位, 紧固带和中段支撑的设置适用于各种规格的跨接管, 且中段支撑的位置保持不变。

紧固带在计算分析软件中以尺寸相近的圆管进行模拟, 并将其修正为受拉的杆件使其保持张紧状态, 紧固带与 D 形环相连, D 形环焊接于甲板强结构处, 紧固带与甲板间约束应释放 XYZ 三个方向的弯矩, 设置为 111000, 计算结果中各紧固带和跨接管所受张力云图如图 5 所示, 低于紧固件的安全工作载荷, 满足所有跨接管的强度要求。

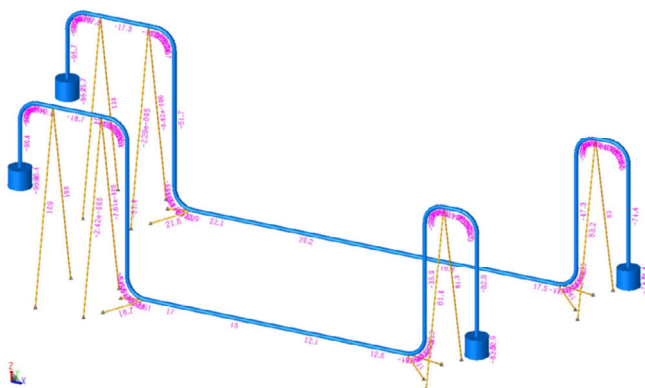


图 5 紧固带和跨接管所受张力云图

2 海上安装分析及设计

2.1 吊梁结构标准化

本次需要安装的跨接管外观形式为“M型”, 总长 25~50m 不等, 且存在较大高度差, 为了标准化吊装形式, 减小跨接管起吊时所受的水平压力, 避免对跨接管造成损坏, 设计一种法兰式万用跨接管吊梁, 其由一个长截和两个短截组成, 通过法兰连接, 可灵活调节长度匹配该批不同规格型号的跨接管, 重复使用, 使施工工序更加标准化, 提高了施工效率。吊梁的限位结构用于跨接管不同位置吊点的吊带限位和吊梁本体海上运输的限位。

吊梁底座有双八字型支腿和箱形底座两种形式, 如图 6 所示, 配合限位结构, 使吊梁在海上运输过程

中更加稳定牢固, 且不需要使用紧固带加以紧固, 减少了不必要的工序。吊梁的底座、拖拽结构、ROV 把手和索具回收结构等功能性设计, 确保跨接管在整个运输和安装过程的稳定性和安全性。

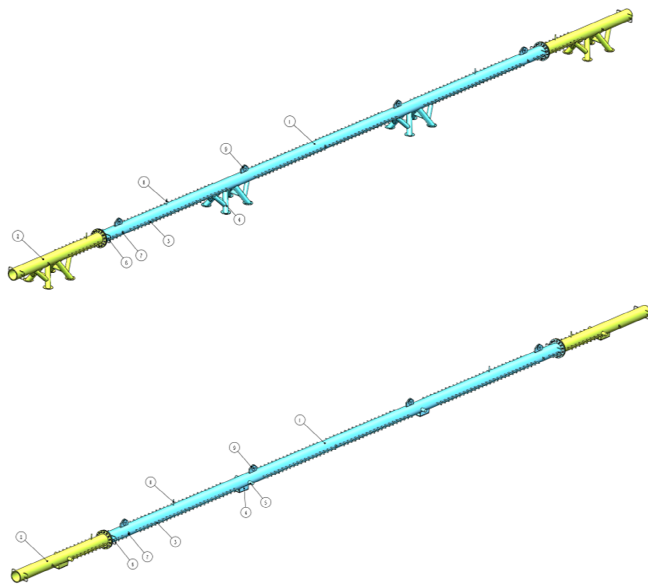


图 6 法兰式万用跨接管吊梁

2.2 吊装索具标准化

吊装索具标准化包括了吊机吊钩与吊梁间的吊装索具连接形式标准化, 吊梁与跨接管间的吊装索具连接形式标准化, 索具规格的标准化, 吊点分布标准化四个方面, 极大简化了现场跨接管吊装作业和吊装设计的工作。

在跨接管吊装计算分析时, 为确保满足计算软件算法规则稳定模型, 需将跨接管连接器底部和吊梁端部设置为弱弹簧, 代表实际吊装时牵引绳的牵引力, 吊索使用与钢丝绳同等直径的圆管模拟, 并使其保持张紧。

并根据设计规范的要求, 计算荷载还应考虑吊装时动态放大系数 DAF (Dynamic Amplification Factor), 偏心荷载系数 SKL (Skewloads), 重量偏差系数, 重心偏移系数等, 水下吊装时还应考虑结构受浮力的作用。

对于吊装索具的选型, 例如钢丝绳, 需要考虑的公称安全系数 γ_{sf} 见式 (2), 包括吊装系数 γ_f , 结果影响系数 γ_c , 绳索折减系数 γ_r 见式 (3), 端部影响系数 γ_s , 弯折折减系数 γ_b , 磨损系数 γ_w , 材料系数 γ_m , 钢丝绳的最小破断载荷 MBL (Minimum

Breaking Load) 与公称安全系数 γ_{sf} 的比值即为钢丝绳所能承受的最大动态载荷 F_{sling} 见式 (4)。

计算结果主要评估吊梁和跨接管在动态吊装荷载作用下的应力值、利用因子和所承受的张拉力。

$$\gamma_{sf} = \max(\gamma_f \gamma_c \gamma_r \gamma_m \gamma_w, 2.3 \gamma_r \gamma_w) \quad (2)$$

$$\gamma_r = \max(\gamma_b \gamma_s) \quad (3)$$

$$F_{sling} < \frac{MBL_{sling}}{\gamma_{sf}} \quad (4)$$

吊机吊钩与吊梁间的吊装索具连接主要由四腿钢丝绳、卸扣及环形吊带组成, 经过计算评估此种连接方式和索具规格符合本批次所有跨接管的吊装。吊梁与跨接管间采用 6-7 根垂直索具组合进行连接, 垂直索具组合分别设置在跨接两端连接器, M 形两端最高处, M 形两端最低处, 若最低处跨距过大, 最低处中间增设一根垂直索具组合。

具体设计方案如图 7 所示, 垂直索具组合上方与吊梁两限位结构之间采用环形吊带锁吊, 环形吊带与卸扣连接, 卸扣连接蝴蝶扣, 蝴蝶扣与链条两端相连, 可以确保链条能自由调节长度, 另一端蝴蝶扣与卸扣连接, 下方设置环形吊带以及 ROV 钩等, 根据上文提到的计算方法进行吊装索具选型后, 最后通过调节链条长度即可快速匹配尺寸不一的跨接管的吊装作业, 该设计能同时满足以上四个方面的标准化设计内容, 实现了吊装索具标准化设计。

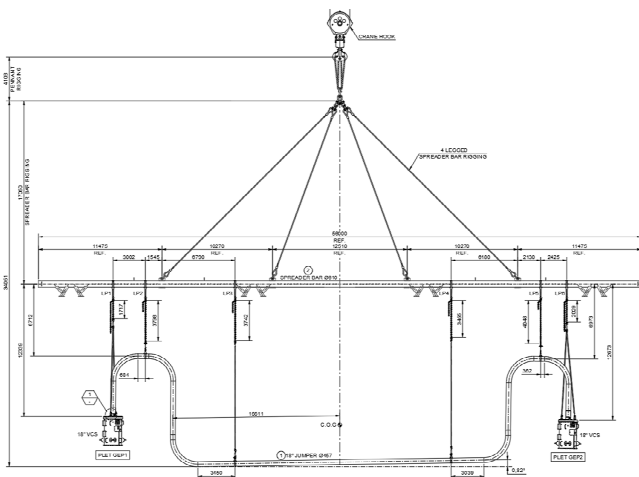


图 7 跨接管吊装示意图

2.3 跨接管海上安装分析

跨接管的海上安装分析目的是为跨接管提供初步安装的天气窗口, 对五个阶段进行分析, 第一阶段为空中提升阶段, 第二阶段为跨接管 25% 淹没状态, 第

三阶段为 50% 淹没状态, 第四阶段为完全浸没状态, 第五阶段为开启升沉补偿降至水下设备处, 如图 8 所示。

根据船舶主尺度和幅值响应算子 (RAO response amplitude operator), 跨接管、吊梁、索具、吊机及环境的基本参数, 利用 OrcaFlex 软件计算出五个阶段静态和动态时索具的最大张力, 其中动态分析主要考虑不同波浪平均跨零周期和不同波高海况条件下的索具受力情况, 超过索具安全载荷时的海况将禁止安装跨接管。

水动力荷载见式 (5) 除了考虑自重、浮力 F_ρ 外, 根据 DNV-RP-H103 规范还应考虑附加质量 M_a 见式 (6)、拍击力 F_{slam} 见式 (7) 和拖拽阻力 F_{drag} 见式 (8), 当跨接管与水开始接触时会产生拍击力, 当跨接管进入水面后, 拍击力减小, 产生拖拽阻力。此外, 根据吊索松弛标准, 为了避免吊索受到突然发生的快速载荷, 应确保水动力 $F_{hyd} \leq 0.9$ 倍静载 F_{static} 。

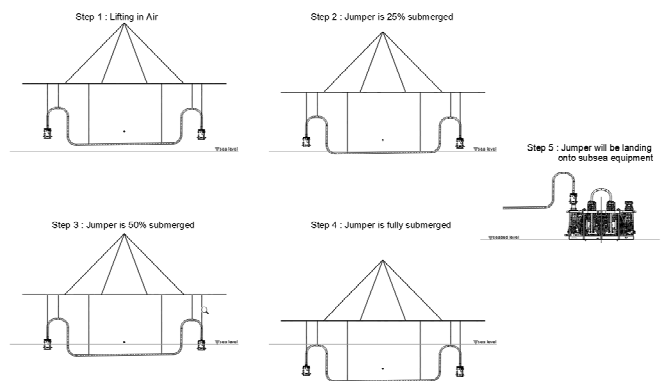


图 8 跨接管安装的五个阶段

$$F_{hyd} := \sqrt{\left[\overrightarrow{(F_{drag} + F_{slam})} \right]^2 + \left[\overrightarrow{(F_{mass} - F_\rho)} \right]^2} \quad (5)$$

$$M_a = \rho \cdot C_a \cdot V_{ref} \quad (6)$$

$$F_s = 0.5 \rho C_s A_s (v - \dot{\eta})^2 \quad (7)$$

$$F_d = 0.5 \rho C_D A_D (v - \dot{\eta}) |v - \dot{\eta}| \quad (8)$$

式中:

F_{hyd} 为水动力荷载, N;

F_{mass} 为附加荷载, N;

ρ 为海水密度, kg/m^3 ;

C_a 为附加质量系数;

V_{ref} 为参考物体体积, m^3 ;

C_s 为拍击系数;

A_s 为拍击区水平投影面积, m^2 ;

- v 为拍击区的垂直水粒子速度, m/s;
 η 为被吊物体垂直速度, m/s;
 C_D 为物体的拖拽系数;
 A_p 为物体水平投影面积, m^2 。

3 结语

本文以南海某大型深水项目为例,介绍了刚性跨接管海上运输布置阶段的标准化设计,连接器支撑架、吊梁支撑架、跨接管绑扎和中段支撑的计算分析与它们的标准化设计,以及跨接管在海上安装阶段的分析及设计,包含吊梁结构标准化及吊装索具标准化,使不同种跨接管的装船布置、辅助锚固结构、吊装结构、吊装索具和安装方法形成统一的设计规划和作业流程,对于多种规格跨接管的运输和安装,只需要一套设计就能覆盖大部分的工作内容,而不再需要针对不同规格跨接管设计不同种方案,该项目的成功实践在深水跨接管安装的设计环节积累了宝贵的经验,对未来类似项目提供参考的同时,我们需要思考如何发扬工程设计标准化思维,在面对工程难题时如何将不同事物的相似点提取出来,通过一个设计方案将它们彼此建立某种联系,可能问题会迎刃而解,得到意想不到的效果。

参考文献:

- [1] DNV-RP-H103.Modelling and Analysis of Marine Operations[Z].DNV,2011.
- [2] 原庆东,林影炼,张玉勇,等.深水超长超重跨接管的设计与安装技术[J].中国海上油气,2017(6):136-142.
- [3] 于雷,朱绍宇,于淼.API规范和LOC手册在海洋工程吊装分析中的应用[J].中国造船,2012,53(A02):124-129.
- [4] API RP 2A-WSD.Recommended Practice for Planning,Designing and Constructing Fixed Offshore Platform[Z].API,2014.
- [5] Hyun-Sung Kim,Byoung Wand Kim,Dongho Jung,et al.Numerical Study for Topside Effect on Behavior of Deck Transportation Vessel and Seafastening Structure[C].OCEANS 2017-Aberdeen,2017.
- [6] DNVGL-ST-N001.Marine Operations and Marine Warranty[Z].DNVGL,2016.
- [7] DNV-OS-H205.Lifting Operations[Z].DNV,2014.

作者简介:

刘毅(1987-),男,湖北咸宁人,本科,工程师,研究方向:机电工程。

表1 载荷工况

工况名称	工况描述	工况组合
LCC1	船舶正向横摇,正向垂荡	+R+H+WY+G
LCC2	船舶正向横摇,负向垂荡	+R-H+WY+G
LCC3	船舶负向横摇,正向垂荡	-R+H-WY+G
LCC4	船舶负向横摇,负向垂荡	-R-H-WY+G
LCC5	船舶正向纵倾,正向垂荡	+P+H+WX+G
LCC6	船舶正向纵倾,负向垂荡	+P-H+WX+G
LCC7	船舶负向纵倾,正向垂荡	-P+H-WX+G

LCC8	船舶负向纵倾, 负向垂荡	$-P-H-WX+G$
LCC9	船舶正向 80% 横摇, 正向 60% 纵倾, 正向垂荡	$+0.8R+0.6P+H+0.8WY+0.6WX+G$
LCC10	船舶正向 80% 横摇, 正向 60% 纵倾, 负向垂荡	$+0.8R+0.6P-H+0.8WY+0.6WX+G$
LCC11	船舶正向 80% 横摇, 负向 60% 纵倾, 正向垂荡	$+0.8R-0.6P+H+0.8WY-0.6WX+G$
LCC12	船舶正向 80% 横摇, 负向 60% 纵倾, 负向垂荡	$+0.8R-0.6P-H+0.8WY-0.6WX+G$
LCC13	船舶负向 80% 横摇, 正向 60% 纵倾, 正向垂荡	$-0.8R+0.6P+H-0.8WY+0.6WX+G$
LCC14	船舶负向 80% 横摇, 正向 60% 纵倾, 负向垂荡	$-0.8R+0.6P-H-0.8WY+0.6WX+G$
LCC15	船舶负向 80% 横摇, 负向 60% 纵倾, 正向垂荡	$-0.8R-0.6P+H-0.8WY-0.6WX+G$
LCC16	船舶负向 80% 横摇, 负向 60% 纵倾, 负向垂荡	$-0.8R-0.6P-H-0.8WY-0.6WX+G$
LCC17	船舶正向 80% 纵倾, 正向 60% 横摇, 正向垂荡	$+0.8P+0.6R+H+0.8WX+0.6WY+G$
LCC18	船舶正向 80% 纵倾, 正向 60% 横摇, 负向垂荡	$+0.8P+0.6R-H+0.8WX+0.6WY+G$
LCC19	船舶正向 80% 纵倾, 负向 60% 横摇, 正向垂荡	$+0.8P-0.6R+H+0.8WX-0.6WY+G$
LCC20	船舶正向 80% 纵倾, 负向 60% 横摇, 负向垂荡	$+0.8P-0.6R-H+0.8WX-0.6WY+G$
LCC21	船舶负向 80% 纵倾, 正向 60% 横摇, 正向垂荡	$-0.8P+0.6R+H-0.8WX+0.6WY+G$
LCC22	船舶负向 80% 纵倾, 正向 60% 横摇, 负向垂荡	$-0.8P+0.6R-H-0.8WX+0.6WY+G$
LCC23	船舶负向 80% 纵倾, 负向 60% 横摇, 正向垂荡	$-0.8P-0.6R+H-0.8WX-0.6WY+G$
LCC24	船舶负向 80% 纵倾, 负向 60% 横摇, 负向垂荡	$-0.8P-0.6R-H-0.8WX-0.6WY+G$