

漂浮式光伏组合式支撑结构整体吊装模拟优化及 误差控制分析

闫翔宇^{1,2}, 于绍轩¹, 柳英洲¹, 高喜峰^{1,3}, 姚 焱^{1,3}, 练继建^{1,2}

(1. 天津理工大学海洋能源学院, 天津 300384; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300072;
3. 天津市海洋清洁能源开发与利用重点实验室, 天津 300384)

摘 要: 对一种新型海上漂浮式光伏组合式支撑结构的整体吊装入海施工技术进行研究, 采用有限元软件 ANSYS 对支撑结构整体吊装入水的施工过程进行数值仿真, 通过对比分析确定组合式支撑结构底部构件选型优化方案, 对两点吊装、三点吊装和四点吊装的施工过程进行分析比选, 确定组合式支撑结构的最佳吊点布置方案; 着重分析吊耳位置、吊装缆绳长度等误差量对组合式支撑结构吊装过程中内力和变形等的影响规律, 提出相应的误差控制指标。分析结果表明: 吊点位置为长边三等分点的四点吊装工况最优; 吊耳位置误差超过 10 mm 时, 吊装缆绳内力不均匀差值超过 57%, 建议吊耳位置误差控制在 ± 5 mm 以内; 吊装缆绳长度误差超过 67.5 mm 时, 整体结构变形达到 77 mm, 结构竖向变形差超过 35 mm, 建议吊装缆绳长度控制在 67.5 mm 内。

关键词: 光伏组件; 海上漂浮式结构; 误差分析; 数值仿真; 整体吊装; 组合式支撑结构; 施工分析

中图分类号: TK511

文献标志码: A

0 引 言

在“双碳”目标引领下, 中国持续推动能源绿色低碳转型, 风能和太阳能等新型能源得到迅速发展。受陆上太阳能光伏土地资源开发几近饱和的限制, 结合中国海岸线绵长, 可开发海上光伏的海洋面积达到约 71 万 hm^2 的条件, 国家能源局提出“稳妥建设海上风电基地, 谋划启动建设海上光伏”, 因此海上光伏是未来太阳能发展的必然趋势, 特别是发展海上漂浮式光伏, 对开发深远海洋能源具有重要意义。

根据浮体结构的水线面及结构特征, 漂浮式光伏可分为浮筒/浮管式、半潜式、薄膜式 3 种。国内外学者对不同漂浮式光伏的浮体结构开展了系统研究: Cazzaniga 等^[1]提出采用聚乙烯管作为浮管支撑的标准化钢架构成光伏平台结构, 并用于 Suvereto 和 Colignola 等湖面、水库上的漂浮式电站项目; 唐宜昌等^[2]提出多模块化的半潜式漂浮平台模型并对其进行了考虑系泊作用的水动力响应分析; 熊立超等^[3]证明了膜结构在波浪和水流中的随浪性和稳定性。已有研究表明, 浮管式浮体结构随浪性差, 半潜式光伏适用于深远海且造价高维修困难, 膜结构尚处于科研阶段, 后期维修难度大^[4], 因此, 迫切需要研发造价低、易维修、随浪性好的漂浮式光伏组合式支撑结构以应对复杂的海上工况, 实现海上光能的有效

利用。

漂浮式光伏的支撑结构通常采用岸上组装后整体下水的方式, 影响其平稳运行的因素众多^[5], 其中由陆入海是施工的重要组成部分, 其质量和安全是直接影响光伏电站能否在全寿命周期内正常运营的关键^[6-7]。国内外学者已对不同海洋构筑物的施工形式展开研究: 李林等^[8]建立了单桩结构吊装耦合模型, 基于时域仿真模拟得到吊缆拉力情况; 魏宇墨^[9]对三筒导管架结构吊装下水过程开展了频域和时域分析, 分析了不同吊装布置形式对结构运动响应和吊缆张力的影响; 刘俊峰等^[10]采用现场原型试验的方法对单柱复合筒型基础的沉放过程进行了分析, 验证了吸力安装的安全性和可控性; Ataie 等^[11]建立了风力机整体吊装施工过程的有限元模型, 分析了各工况下风机结构的动力响应; 武斌斌^[12]研究了异型海上构筑物拆除吊装过程, 指出合理布置吊点可减少重心变化对吊装过程的影响; 刘建锋等^[13]对固定式海洋平台组块的拆除吊装提出设置 5 个吊钩位置和 5 组吊绳, 有效解决了因吊绳制造误差或配扣偏差而存在每根吊绳实际长度与其理论长度不一致的问题。目前海上构筑物的施工过程分析主要集中在大型和异型结构的安装与拆除工作上, 鲜见针对漂浮式光伏电站平台结构开展吊装施工全过程分析的文献。针对漂浮式光伏结构的施工需进行吊点位置的确定和

收稿日期: 2025-01-21

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4200700); 天津市科技计划(23ZYQYGX00140)

通信作者: 柳英洲(1994—), 男, 博士、讲师, 主要从事漂浮式海上光伏、海上风机动力特性等方面的研究。liuyingzhou@email.tjut.edu.cn

优化,进而保证吊装过程中的变形和受力在整体结构所能承受的合理范围内,从而达到施工过程不影响海上漂浮式光伏结构正常服役状态的目的。

本文以一种新型漂浮式光伏组合式支撑结构为对象,开展整体吊装模拟优化分析及误差控制研究,确定最优吊装方案和吊装过程中关键因素的误差控制指标,以期为海上光伏漂浮式支撑结构的施工质量提供技术保障。

1 考虑施工影响的新型组合式浮体结构布置优化分析

1.1 新型漂浮式光伏组合式支撑结构布置

漂浮式光伏新型组合式支撑结构区别于现有的浮管/浮子式的漂浮式光伏^[4],采用组装成型的模块化小型矩形结构,该结构平面为矩形,长 7496 mm 宽 3666 mm,由外圈钢框架和内部浮块构成。其中外圈钢框架由 3 条横向 T 型钢和两条纵向角钢通过焊接组成,并在角钢上方设置 C 型檩条用于支承光伏组件。内部设置 4 个 3608 mm×1808 mm×600 mm 浮块以提供浮力,浮块由高密度聚苯乙烯发泡复合材料构成,整体结构布置如图 1 所示。

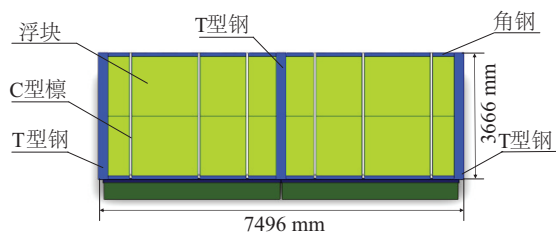


图1 漂浮式光伏组合式支撑结构方案

Fig. 1 Scheme of combined supporting structure for floating photovoltaic systems

该新型组合式支撑结构在海上服役状态下,光伏组件及附属设备等的荷载直接传递给 C 型檩条,进而传递到外圈钢框架上;4 个内部浮块主要为钢框架提供浮力,从而实现结构在竖直方向上的受力平衡。但在吊装过程中,由于浮块与钢框架构件间的摩擦力不足以支承浮块自身重量,且安装过程中钢框架与浮块之间存在缝隙,可能发生浮块脱出钢框架的现象,因此需考虑施工过程的结构受力状态对新型组合式支撑结构的布置进行改进。

1.2 改进方案比选及分析

1.2.1 结构布置改进方案

为避免吊装过程中出现浮块脱出钢架的现象,提出在钢框架下设置扁钢和方钢管两种结构布置改进方案,如图 2 所示。扁钢方案为在浮体下部增设宽 50 mm、厚 5 mm 的条状扁钢。方钢管方案为在浮体下部增设截面为 60 mm×30 mm×3 mm 的方钢管。扁钢或方钢管均与钢框架刚性连接。

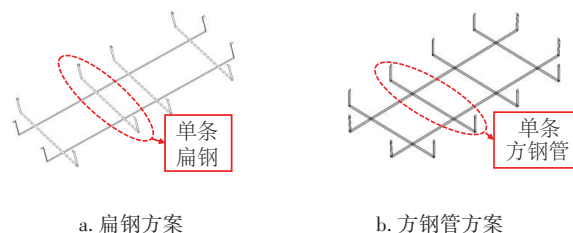


图2 两种结构布置改进方案

Fig. 2 Improved layout schemes for two types of structures

1.2.2 改进结构布置模型建立

建立单条扁钢模型、单条方钢管模型和分别设置扁钢和方钢管的支撑整体结构组合式模型,其中在单条扁钢模型和单条方钢管模型中将浮块重量采用面荷载形式施加,如图 3 所示。扁钢和方钢管采用 Solid 单元模拟,材质为 Q235B 钢材料,在钢框架接触部分设置固定约束。

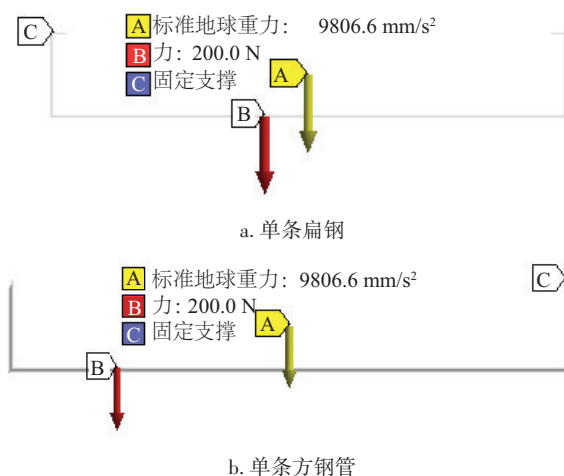
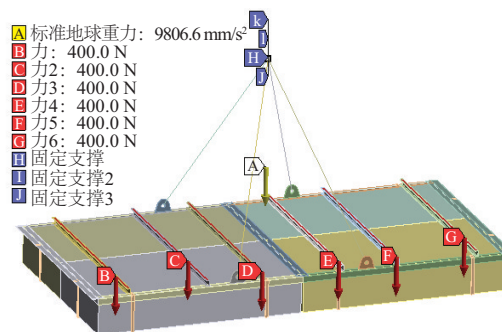


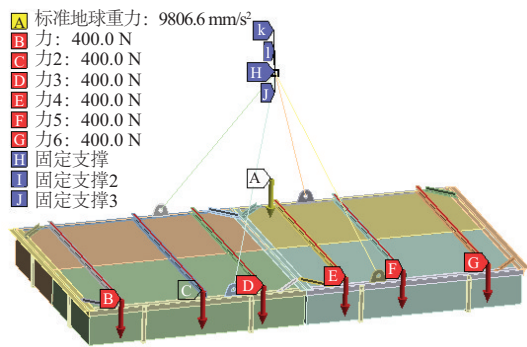
图3 单条结构模型

Fig. 3 Single structure model

设置扁钢和方钢管的组合式支撑结构模型,如图 4 所示,缆绳采用 Cable 单元,强度级别为 1670 MPa;组合式支撑结构均采用 Solid 单元,其中 T 型钢截面为 100 mm×200 mm×8 mm×8 mm,角钢截面为 100 mm×6 mm,檩条截面为 100 mm×50 mm×20 mm,吊耳选型为标准钢板吊耳,厚度为 18 mm,所述钢构部分材质为 Q235B;浮块部分材料为高密度聚苯乙烯



a. 扁钢组合式支撑结构模型



b. 方钢管组合式支撑结构模型

图4 整体结构模型

Fig. 4 Overall structure model

发泡复合材料,密度为 38.1 kg/m^3 ,弹性模量为 100 MPa ,泊松比为 0.39 。边界条件设置方法:缆绳上部吊点距组合式支撑结构上表面高度为 3 m ,并设置固定约束;吊耳与缆绳接触部分设置铰接。将光伏组件及附属设备的重量以面荷载形式施加于C型檩条上表面,钢框架结构与浮块结构采用摩擦接触。

1.2.3 分析结果

单条扁钢模型和单条方钢管模型的分析结果如图5所示,设置扁钢和方钢管的组合式支撑结构模型的分析结果如图6所示。对比图5可得,两种方案的最大变形都出现在构件跨中,扁钢的变形远大于方钢管;扁钢方案最大应力为 339.3 MPa ,已超过材料的屈服应力 235 MPa 。方钢管方案的变形与应力在合理范围内,对整个框架结构不会产生较大影响。

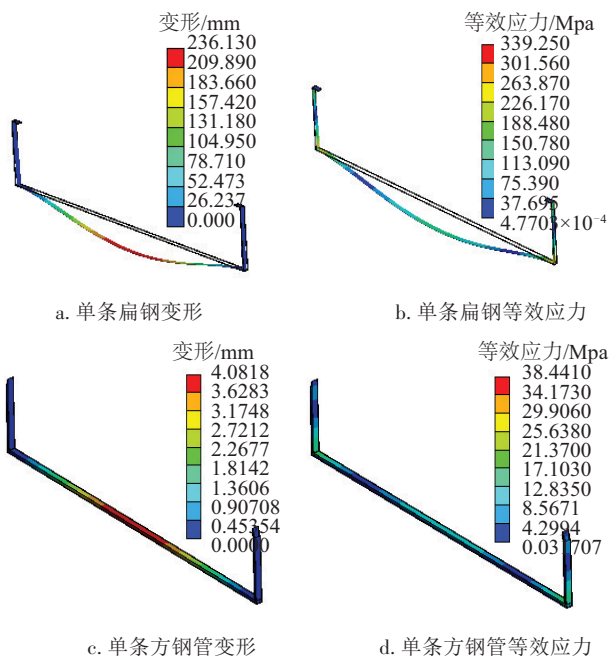
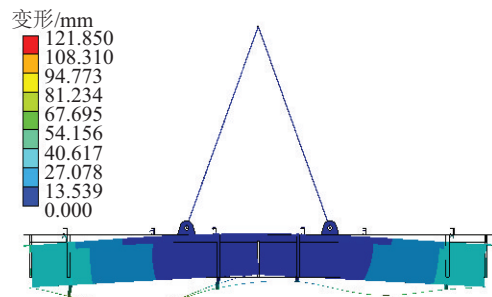


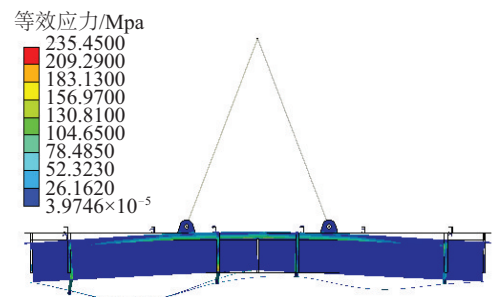
图5 单条扁钢及单条方钢管分析结果

Fig. 5 Analysis results of single flat steel and single square steel tube member

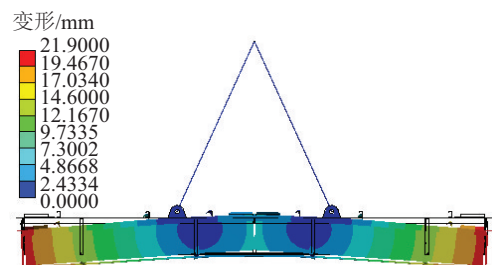
由图6可知,设置扁钢的组合式支撑结构变形最大为 121.9 mm ,出现在下部的扁钢;最大应力为 235.5 MPa ,出现在扁钢底部转角处。设置方钢管的组合式支撑结构的变形最大为 24.3 mm ,出现在钢框架外侧T型钢处;最大应力为 127.1 MPa ,出现在方钢管与角钢连接处。



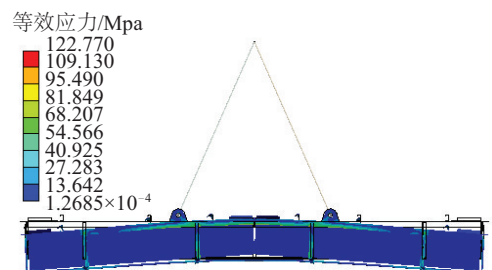
a. 扁钢组合总变形



b. 扁钢组合等效应力



c. 方钢管组合总变形



d. 方钢管组合等效应力

图6 扁钢组合及方钢管组合式支撑结构分析结果

Fig. 6 Analysis results of flat steel combined supporting structure and combined supporting structure with square steel tubes

两方案在整体吊装过程中不同部位的受力、变形和缆绳

最大轴向力情况如表 1 所示。由表 1 可知,方管式结构相较于扁钢式结构的钢框架和浮块最大变形量分别减小 82.0% 和 48.3%,最大应力分别减小 47.9% 和 47.8%,因此选取设置方钢管的组合式支撑结构作为实施方案。同时,为增强钢框架各角部的结构刚度,分别在角点处增设加强角钢,最终确定的漂浮式光伏组合式支撑结构如图 7 所示。

表 1 两种方案吊装过程分析结果对比

Table 1 Comparison of lifting process analysis results between two schemes

方案名称	最大变形/mm		最大应力/MPa		缆绳最大轴向力/N
	钢框架	浮块	钢框架	浮块	
扁钢	121.9	40.8	235.5	26.1	4413.2
方钢管	21.9	21.1	122.8	13.6	4511.4

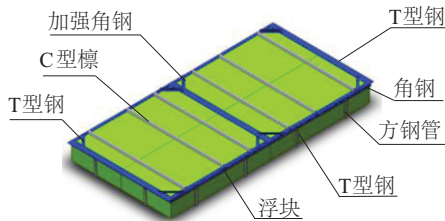


图 7 漂浮式光伏组合式结构

Fig. 7 Combined structure of floating photovoltaic systems

2 漂浮式光伏新型组合式支承结构整体吊装力学性能分析

为探究漂浮式光伏新型组合式支撑结构整体吊装入海过程的受力情况,本节提出两点吊装、三点吊装和四点吊装 3 种方案,每种方案通过设置不同的吊点布置进行分析,以确定最优的结构吊装方案。本节模型建立方法同 1.2.2 节。预设的吊点位置如图 8 所示,其中 A#吊点位于钢框架结构的长边中点,B#、C#、D#、E#、F#位置如图 8 中尺寸标注,具体吊装工况如表 2 所示。

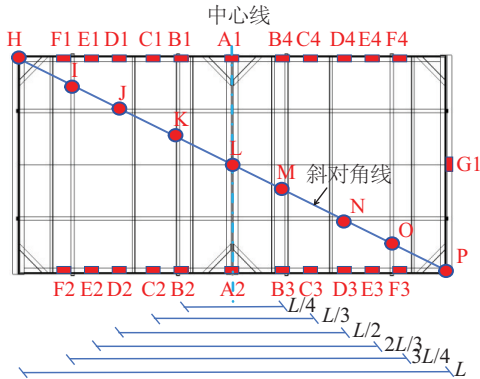


图 8 吊点位置

Fig. 8 Diagram of lifting point locations

表 2 吊装工况

Table 2 Lifting conditions

工况编号	吊点数量	吊点位置
L1	2	A1、A2
L2		B1、B3
L3		C1、C3
L4		D1、D3
L5		E1、E3
L6		F1、F3
Z1	3	B1、B3、B4
Z2		C1、C3、C4
Z3		D1、D3、D4
Z4		E1、E3、E4
Z5		F1、F3、F4
R1		G1、B1、B2
R2	4	G1、C1、C2
R3		G1、D1、D2
R4		G1、E1、E2
R5		G1、F1、F2
S1		B1、B2、B3、B4
S2		C1、C2、C3、C4
S3	4	D1、D2、D3、D4
S4		E1、E2、E3、E4
S5		F1、F2、F3、F4
S5		F1、F2、F3、F4

2.1 两点吊装

在两点吊装过程中,为保证整体漂浮式光伏组合式支撑结构的平衡和稳定性,考虑进行异侧对称吊装方案(表 2 中 L1~L6)。

6 种两点吊装方案的主要分析结果如图 9 所示。由图 9 可知,随着吊点距对称轴线距离的增加,变形量与缆绳轴力总体呈增大趋势;钢构件应力呈先减小后增大的趋势,应力最小值工况的跨度出现在长轴的三等分点处,为 232.1 MPa;其余工况方案均超过 235 MPa。两点吊装虽有吊耳数量少的优势,但吊装过程对整体结构的影响较大,对缆绳的强度要求较高,故一般不建议采用两点吊装形式。

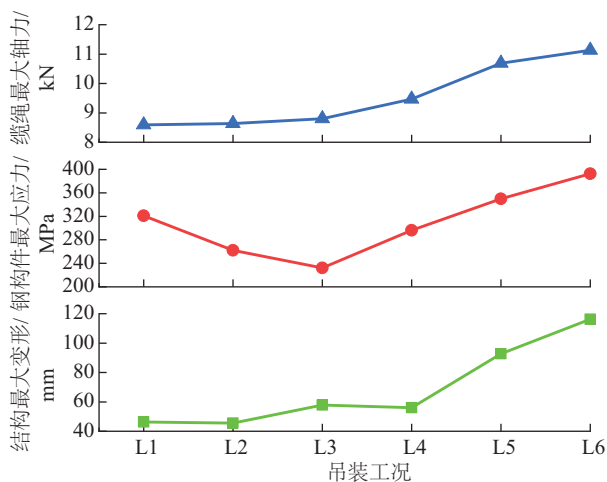
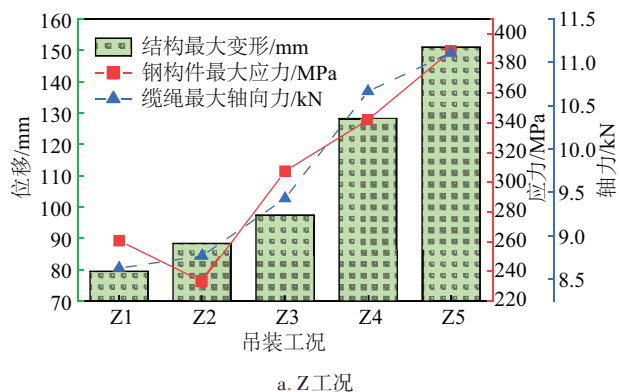


图9 两点吊装工况下结构最大变形、钢构件最大应力与缆绳最大轴力

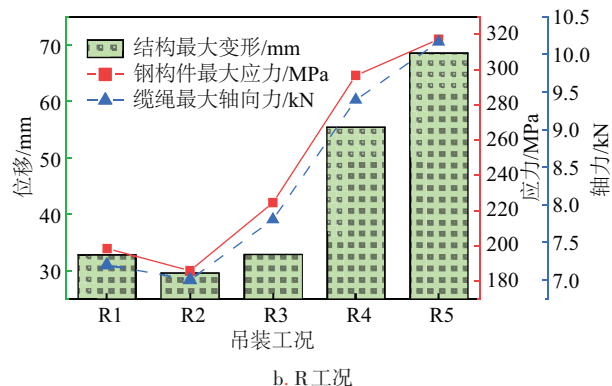
Fig. 9 Maximum deformation of structure, maximum stress of steel members, and maximum axial force of cables under two-point lifting condition

2.2 三点吊装

与两点吊装方案类似,为保证吊装过程中整体漂浮式光伏组合式支撑结构不出现严重倾斜,三点吊装考虑的吊点位置方案如表2中Z1~Z5和R1~R5所示。Z1~Z5吊装方案分析结果如图10a所示,最大变形随吊耳距离中心轴线位置的增大而增加,出现较大变形的区域面积也不断增大,结构最大变形约150.9 mm,如图11a所示。钢构件应力最值呈先减小后增加的趋势,其中Z2工况下的钢构件应力最小,为233.26 MPa;轴力整体呈逐渐增大的趋势。R1~R5吊装方案分析结果如图10所示,在G1吊点不变的情况下,随着其余吊点距中心轴线距离的不断增大,结构最大变形呈先增加后减少的趋势,且在R2工况时为最小值29.6 mm;随着变形量的不断增大,较大变形的区域面积也不断增大,最终达到R5工况下的变形,如图11b所示。在R工况中,变形最值柱状图、钢构件应力最值及缆绳轴力最值具有相似的增减性关系,最佳吊点位置均为R2工况。



a. Z工况

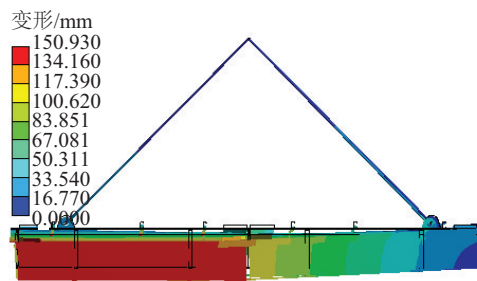


b. R工况

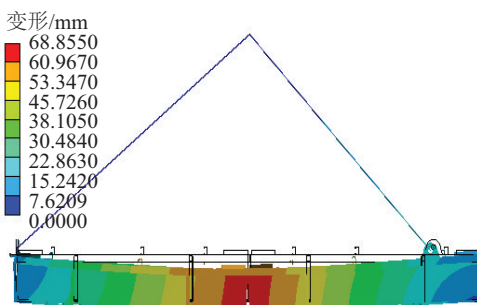
图10 三点吊装工况下结构最大变形、钢构件最大应力与缆绳最大轴力

Fig. 10 Maximum deformation of structure, maximum stress of steel members, and maximum axial force of cables under three-point lifting condition

结合图10可知,最佳吊点位置为长边的三等分点位置,且在同等情况下R工况的最大变形远小于Z工况;以R2与Z2工况为例,结构最大变形、钢构件最大应力和缆绳最大轴力分别减少66.5%、20.26%和20.1%。



a. Z5工况下结构变形



b. R5工况下结构变形

图11 总体变形结构

Fig. 11 Overall deformation structure diagram

2.3 四点吊装

四点吊装的施工工况为表2中所列的S1~S5,基于有限元分析可得,四点吊装工况下结构最大变形、钢构件最大应力与缆绳最大轴力如图12所示,当吊点位置处于S2和S3工况时,最大变形分别为21.9和20.9 mm,两者变形相差极小。S2

工况下应力最小,仅为 122.77 MPa,较其他四点吊装工况有明显优势;S2 工况下,缆绳所受轴力较 S1 工况变化不大,保证了吊装过程中较小的结构变形和钢构件所受应力,结合 S2 工况下四点吊装总体变形(图 13),其变形云图呈均匀增长的趋势,因此可认为 S2 吊装方案是较优的吊装方案。

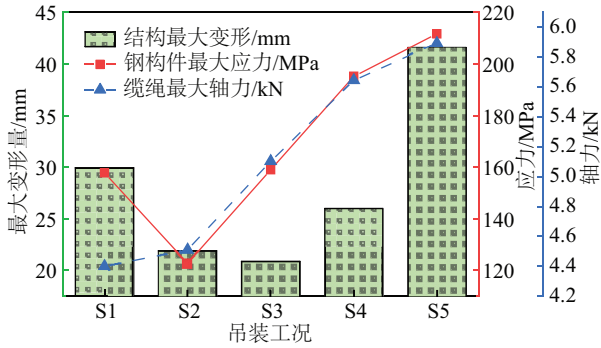


图 12 四点吊装工况下最大变形量、钢框架最大应力与缆绳最大轴向力图

Fig. 12 Diagram of maximum deformation, maximum stress of steel frame, and maximum axial force of cables under four-point lifting condition

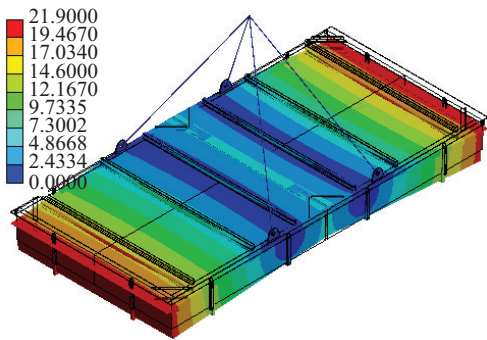


图 13 S2 工况下四点吊装总体变形

Fig. 13 Overall deformation of four-point lifting under condition S2

相较于两点和三点吊装工况,四点吊装方案缆绳所受的轴力以及整体结构构件应力均为最小,单根缆绳的最大轴力不超过 6 kN。综合多点吊装工况对比分析可知,在相同吊点数量情况下,最优吊点位置出现在长边三等分点位置,即图 8 所示的编号 C 点处。

3 吊装过程误差影响分析

根据已有研究成果,吊装过程中的误差会对整体结构的受力性能产生影响,因此开展吊装误差分析十分必要。在忽略外部荷载对吊装施工影响的情况下,误差主要包括吊耳位置定位不准确而产生的吊耳位置误差以及吊装过程中缆绳选择不恰当而产生的缆绳长度误差。在 S2 四点吊装工况下,吊耳及缆绳的布置情况如图 14 所示,C1~C4 为吊耳编

号,L1~L4 为缆绳编号。

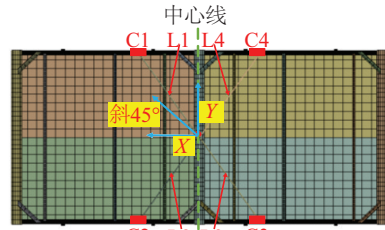


图 14 S2 工况下吊耳及缆绳布置

Fig. 14 Layout diagram of lifting lugs and cables under condition S2

3.1 吊耳位置误差分析

基于 2、3 节确定的四点吊装最优方案 S2 可能产生的单吊耳与双吊耳位置误差进行分析。具体误差工况如表 3 所示。

表 3 吊耳误差工况

Table 3 Conditions of lifting lug errors

误差类型	误差工况	吊耳编号 (图 14)	距中心线位置 误差/mm
单吊耳	S2a	C1	30
	S2b		20
	S2d		10
	S2e		-10
	S2f		20
	S2g		30
	S2h		30
双吊耳 同侧	S2i	C1、C2	20
	S2j		10
	S2k		-10
	S2l		20
	S2m		30
	S2n		30
	S2o		20
双吊耳 异侧	S2p	C1、C3	10
	S2q		-10
	S2r		20
	S2r		30
	S2r		30

通过提取不同误差工况下斜对角线剖面浮块下部节点变形后的位移情况来反吊耳误差对结构变形及倾斜程度的影响。浮块下部节点位置如图 8 中 H#、I#、J#、K#、L#、M#、N#、O#、P#所示。S2a、S2g、S2h、S2m、S2n、S2r 误差工况下各节点位移情况如图 15 所示。由图 15 可得,在不同误差工况

内,浮块下部各节点位移较0误差点相差极小,且任意工况两端点H#、P#节点位移差值均小于5%,因此吊耳误差对结构的整体变形以及倾斜程度影响较小,可忽略。

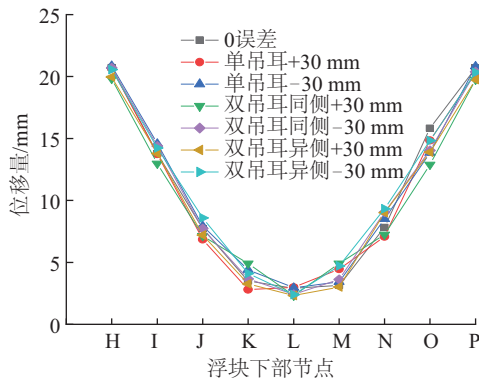
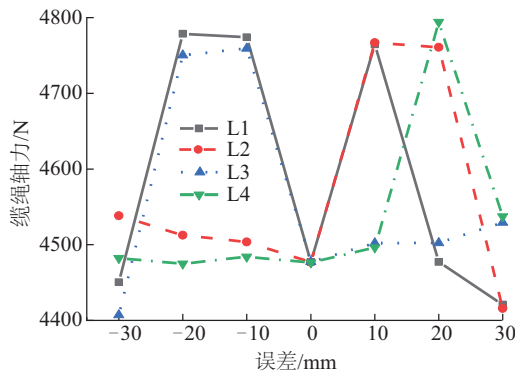


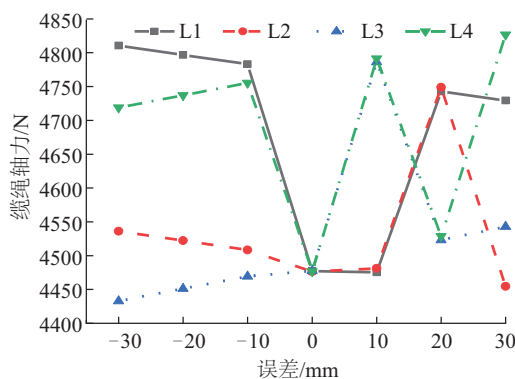
图15 3类吊耳误差在 ± 30 mm工况下各节点位移

Fig. 15 Displacement of each node under ± 30 mm error conditions for three types of lifting lugs

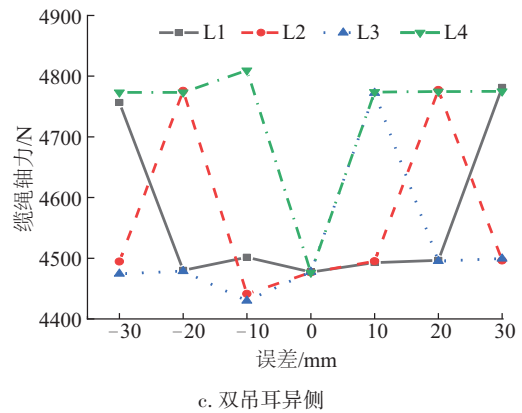
吊耳位置误差对缆绳轴力的影响如图16所示。由图16可知,当单吊耳从C1位置向中心线移动时,L1、L3的轴力呈震荡趋势,L2、L4轴力变化并不明显;当C1位置远离中心线时,L1、L2、L4呈震荡趋势,L3轴力变化不明显。双吊耳同侧C1、C2位置向中心线移动时,L1、L4轴力明显增大,L2、L3轴力变化不明显;C1、C2位置远离中心线时,4条缆绳轴力均呈明显的震荡趋势。异侧吊耳C1、C3产生误差时,除L3外,其他3条缆绳轴力变化关于0误差位置均呈对称分布,误差对缆绳轴力差值影响明显。



a. 单吊耳



b. 双吊耳同侧



c. 双吊耳异侧

图16 吊耳位置误差对缆绳轴力的影响

Fig. 16 Influence of lifting lug position error on cable axial force

综上,各缆绳轴力随吊耳误差的增大呈复杂的变化趋势,这使得缆绳轴力出现不同大小的差值,较大的轴力差值将导致吊装过程中产生振动、摇晃等不确定性现象的发生,从而影响整个施工过程的稳定性。因此,建议在实际工程中严格控制吊耳位置误差在 ± 5 mm之内,从而保证吊装入海工作的顺利进行。

3.2 吊装缆绳长度误差分析

在实际施工过程中,缆绳长度误差会造成上部吊点的位置偏差。本文选取距地面高度3 m的上部吊点作为吊装基准平面,吊点偏差布置如图14所示,分别讨论上部吊点沿X轴方向、Y轴方向及斜45°方向+100、+200、+300 mm的偏差分析。上部吊点位置偏差与缆绳长度的关系,如表4所示。上部吊点位置偏差对结构形变的影响如图17所示,结合表3可得,当缆绳长度误差导致上部吊点位置向X轴与XY平面内斜45°方向偏移时,对整体结构变形量的影响最为显著,X轴在+300 mm偏差后的最大变形为230.62 mm,较0 mm偏差位置增加208.72 mm;各误差工况中Y轴方向偏差+100 mm时变形最小,达到0 mm偏差位置的149.79%,由此可得缆绳长度误差对整体结构的最大变形量影响极大。

探究缆绳长度误差对结构倾斜程度的影响时所用方法与吊耳误差分析方法相同。缆绳长度误差下各节点的位移情况如图18所示。由图18可知,当缆绳长度误差为0时,结构斜对角线角部位移差值(H#、P#)近乎为0,此时整体结构为水平稳定状态;随着误差值的增加,角部位移差值显著增大,倾斜程度更加明显。在相同误差值下,XY平面内斜45°方向和长轴(X轴)偏差对整体结构的倾斜程度影响明显大于短轴方向(Y轴),误差在200 mm范围内,两者对整体结构倾斜程度的影响极为相似,当误差达到300 mm时,长轴方向的影响作用明显增大(如图19)此时角部位移差值为53.5 mm。

表4 上部吊点位置偏差与缆绳长度关系

Table 4 Relationship between position deviation of upper lifting points and cable lengths

缆绳长度	L1 长度	L2 长度	L3 长度	L4 长度	差值
原点	3612.9	3612.9	3612.9	3612.9	0
X轴+100	3580.5	3580.5	3648.0	3648.0	67.5
X轴+200	3550.5	3550.5	3685.1	3685.1	134.8
X轴+300	3523.2	3523.2	3724.7	3724.7	201.7
Y轴+100	3564.8	3663.2	3663.2	3564.8	98.4
Y轴+200	3518.8	3715.4	3715.4	3518.8	196.5
Y轴+300	3475.1	3769.6	3769.6	3475.1	294.5
斜45°+100	3555.2	3625.2	3672.4	3603.5	117.2
斜45°+200	3499.4	3640.3	3733.7	3596.6	234.3
斜45°+300	3445.6	3658.0	3796.6	3592.5	351.0

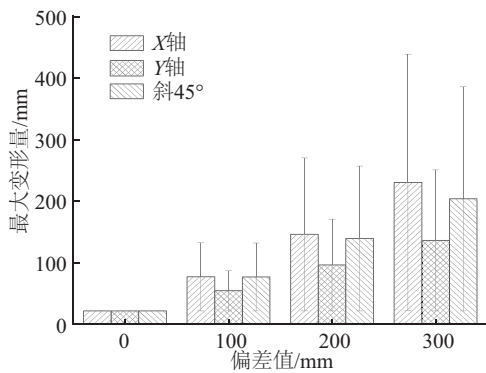


图17 上部吊点位置偏差对结构变形的影响

Fig. 17 Influence of position deviation of upper lifting points on structural deformation

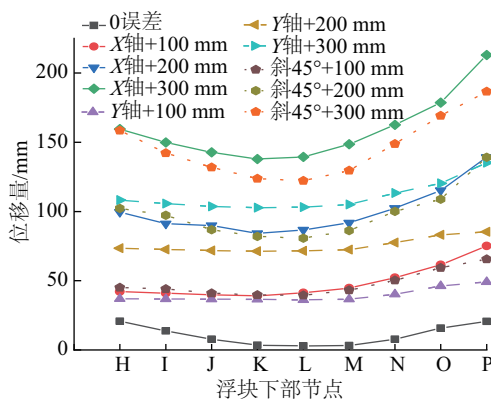


图18 缆绳长度误差工况下各节点位移

Fig. 18 Displacement of each node under cable length error conditions

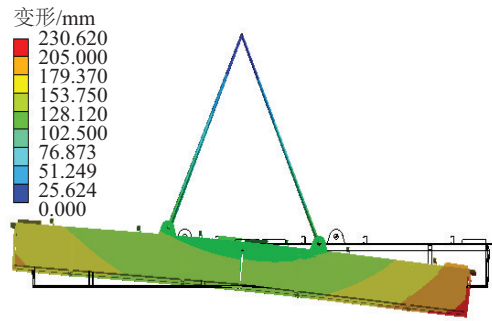


图19 X轴+300 mm工况下整体结构的倾斜变形情况

Fig. 19 Inclination deformation of overall structure under +300 mm deviation condition along X-axis

4 结 论

本文采用有限元方法对于海上漂浮式光伏组合式支撑结构吊装相关技术开展研究,得出以下主要结论:

1) 新型组合式支撑结构的入海需考虑施工过程的结构受力状态对结构本身的影响,进而完善并改进结构体系。

2) 在相同吊点数量情况下,吊点位置为长边三等分点的吊装工况最优;三点吊装中均匀分散吊点位置明显有利于吊装施工;综合来看,四点吊装中的三等分点工况处于最佳吊装位置,相较于同等情况下的其他工况具有较好的总变形、较小的应力极值及较合理的索力值。

3) 吊耳位置偏差对吊装过程中整体结构倾斜程度影响较小,但对缆绳轴力的影响显著,进而使得各缆绳间存在轴力差值,因此导致吊装过程的结构稳定性难以控制,误差值应严格控制在 ± 5 mm内。

4) 吊装缆绳长度误差在施工过程中将导致上部吊点位置发生偏差,对吊装过程中结构的变形量以及倾斜程度具有显著影响。若误差值存在应当严格控制在 67.5 mm 范围内,且合理布置长短缆绳位置,进而减少误差影响程度。

[参考文献]

- [1] CAZZANIGA R, CICU M, ROSA-CLOT M, et al. Floating photovoltaic plants: performance analysis and design solutions [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2018, 81: 1730-1741.
- [2] TANG Y C, CHEN X, HUANG G Z, et al. Dynamic analysis of multi-module floating photovoltaic platforms with composite mooring system by considering tidal variation and platform configuration [J]. Ocean engineering, 2024, 312: 119243.
- [3] XIONG L C, LE C H, ZHANG P Y, et al. Hydrodynamic characteristics of floating photovoltaic systems based on membrane structures in maritime environment [J]. Ocean engineering, 2025, 315: 119827.

- [4] 耿宝磊, 唐旭, 金瑞佳. 海上浮式光伏结构及其水动力问题研究展望[J]. 海洋工程, 2024, 42(3): 190-208.
GENG B L, TANG X, JIN R J. Prospects for research on offshore floating photovoltaic structures and their hydrodynamic issues[J]. The ocean engineering, 2024, 42(3): 190-208.
- [5] 柳英洲, 王文华, 李昕, 等. 考虑桩基础柔性的地震风浪作用下海上风力机结构耦合响应机理研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 67-76.
LIU Y Z, WANG W H, LI X, et al. Research of coupling mechanisms of offshore wind turbines with pile foundation flexibilities under earthquake, wind and wave load [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(3): 67-76.
- [6] 林逸凡, 杨梓豪, 刘玉飞, 等. 中国沿海风电施工窗口期及功效分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 273-280.
LIN Y F, YANG Z H, LIU Y F, et al. Analysis of weather window and construction efficiency for wind power development in offshore China [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(1): 273-280.
- [7] 马宇轩, 闵烨, 闫中杰, 等. 基于离散数值分析技术的海上风电机组安装施工规划模拟研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(6): 673-679.
MA Y X, MIN Y, YAN Z J, et al. Simulation research on aggregate installation planning for offshore wind turbines installation based non-discrete numerical analysis[J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(6): 673-679.
- [8] LI L, GAO Z, MOAN T, et al. Analysis of lifting operation of a monopile for an offshore wind turbine considering vessel shielding effects [J]. Marine structures, 2014, 39: 287-314.
- [9] 魏宇墨. 海上风电三筒导管架基础下放过程运动特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2020.
WEI Y M. Dynamic characteristics analysis of three-bucket jacket for offshore wind turbines during lowering process [D]. Tianjin: Tianjin University, 2020.
- [10] 刘俊峰, 倪道俊, 校建东, 等. 海上风电单柱复合筒型基础沉放过程分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 239-243.
LIU J F, NI D J, XIAO J D, et al. Analysis of penetrating process of single-column composite bucket foundation for offshore wind turbine [J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(3): 239-243.
- [11] ATA EI B, YUAN S, REN Z R, et al. Effects of structural flexibility on the dynamic responses of low-height lifting mechanism for offshore wind turbine installation [J]. Marine structures, 2023, 89: 103399.
- [12] 武斌斌. 异型结构物海上拆除吊装分析[J]. 中国海洋平台, 2017, 32(2): 29-33.
WU B B. Analysis of abnormal structures offshore dismantlement lifting [J]. China offshore platform, 2017, 32(2): 29-33.
- [13] 刘建峰, 杜颖, 王彦多, 等. 泰国湾固定式海洋平台组块拆除关键技术[J]. 船海工程, 2022, 51(6): 86-91.
LIU J F, DU Y, WANG Y D, et al. Key techniques of topside removal design for the fixed offshore platforms in gulf of Thailand [J]. Ship & ocean engineering, 2022, 51(6): 86-91.

OPTIMIZATION SIMULATION AND ERROR CONTROL ANALYSIS OF INTEGRAL LIFTING FOR FLOATING PHOTOVOLTAIC SUPPORT STRUCTURES

Yan Xiangyu^{1,2}, Yu Shaoxuan¹, Liu Yingzhou¹, Gao Xifeng^{1,3}, Yao Ye^{1,3}, Lian Jijian^{1,2}

(1. School of Ocean Energy, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Tianjin Key Laboratory of Marine Clean Energy Development and Utilization, Tianjin 300384, China)

Abstract: This paper investigates the integral lifting and launching technology for a new type of offshore floating photovoltaic (FPV) modular support structure. Based on the finite element software ANSYS, numerical simulations of the entire lifting and launching process of the support structure into the water were conducted. Through comparative analysis, an optimized selection scheme for the bottom components of the modular support structure was determined. The construction processes of two-point lifting, three-point lifting, and four-point lifting were analyzed and compared to identify the optimal lifting point arrangement for the modular support structure. The influence of errors, such as the position of lifting lugs and the length of lifting cables, on the internal forces and deformations during the lifting process of the modular support structure was emphatically analyzed, and corresponding error control indices were proposed. The analysis results indicate that the four-point lifting condition with lifting points at the trisection points of the long sides is optimal. When the position error of the lifting lugs exceeds 10 mm, the uneven difference in the internal forces of the lifting cables exceeds 57%, suggesting that the position error of the lifting lugs should be controlled within ± 5 mm. When the length error of the lifting cables exceeds 67.5 mm, the overall structural deformation reaches 77 mm, and the vertical deformation difference of the structure exceeds 35 mm, recommending that the length error of the lifting cables be controlled within 67.5 mm.

Keywords: offshore floating structure; error analysis; numerical simulation; integral lifting; composite support structure; construction stage analysis