



海上漂浮式光伏多浮体间电缆跨接方法研究

孔祥玉 邵阳苹 付强 俞露杰 刘宏斌

Study on a cable jumper method for offshore floating photovoltaic systems with multiple floating bodies

KONG Xiangyu, SHAO Yangping, FU Qiang, YU Lujie, LIU Hongbin

引用本文:

孔祥玉, 邵阳苹, 付强, 俞露杰, 刘宏斌. 海上漂浮式光伏多浮体间电缆跨接方法研究[J]. 北科大: 工程科学学报, 2025, 47(2): 389–400. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.11.001

KONG Xiangyu, SHAO Yangping, FU Qiang, YU Lujie, LIU Hongbin. Study on a cable jumper method for offshore floating photovoltaic systems with multiple floating bodies[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(2): 389–400. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.11.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.04.11.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多目标粒子群优化算法研究综述

Overview of multiobjective particle swarm optimization algorithm

工程科学学报. 2021, 43(6): 745 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.10.31.001>

钢中不同形状夹杂物在超重力场中上浮模拟研究

Numerical simulation study on the floating of inclusions of different shapes in steel in a supergravity field

工程科学学报. 2024, 46(5): 812 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.06.16.002>

基于粒子群算法的转炉用氧节能优化调度

Optimal scheduling of converter oxygen based on particle swarm optimization

工程科学学报. 2021, 43(2): 279 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2020.04.02.002>

基于多目标粒子群优化的污水处理系统自适应评判控制

Adaptive critic control for wastewater treatment systems based on multiobjective particle swarm optimization

工程科学学报. 2024, 46(5): 908 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.04.15.001>

应力比对TC4钛合金超高周疲劳失效机理的影响

Effect of stress ratio on the very high–cycle fatigue failure mechanism of TC4 titanium alloy

工程科学学报. 2019, 41(2): 254 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.02.013>

激光增材镍基合金内部疲劳失效行为研究

Investigation of the internal failure mechanism of laser–additively manufactured nickel–based superalloy

工程科学学报. 2024, 46(12): 2207 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.01.27.001>

海上漂浮式光伏多浮体间电缆跨接方法研究

孔祥玉^{1,2)}, 邵阳苹¹⁾, 付强^{1)✉}, 俞露杰²⁾, 刘宏斌¹⁾

1) 天津市新能源电力变换传输与智能控制重点实验室(天津理工大学), 天津 300384 2) 天津大学电气自动化与信息工程学院, 天津 300072

✉通信作者, E-mail: fuqiang6369@hotmail.com

摘要 浮体间跨接电缆因设计不合理, 在运行期间出现过度弯曲、拉伸、与浮体碰撞等现象, 影响系统可靠运行. 针对跨浮体电缆容易出现疲劳失效的问题, 本文提出一种海上漂浮式光伏多浮体间电缆跨接方法. 首先, 对浮体结构进行分析, 确定典型六边形浮体间的电缆跨接方案. 其次, 通过分析浮体结构对跨接方案的影响, 确定电缆跨浮体设计步骤中的关键参数与限制条件; 通过与现阶段跨接电缆保护手段对比, 提出一种通过合理规划跨接参数满足运行要求的方法, 建立电缆跨接方案两阶段求解框架; 采用信赖域粒子群算法在第一阶段求解出跨接方案变量的可行解区域, 第二阶段在可行解区域中求解出疲劳寿命最大值作为跨接方案最优解. 最后, 在 Orcaflex 软件搭建电缆跨接模型对最终方案进行校验, 通过算例分析验证本文所提方法的有效性. 研究表明, 通过对合理规划跨接电缆路径, 可以在一定程度上缓解电缆的弯曲状态, 降低疲劳损伤, 可以在运行年限期间可靠运行.

关键词 漂浮式光伏; 电缆; 跨浮体连接; 疲劳失效; 信赖域粒子群

分类号 TK513.5

Study on a cable jumper method for offshore floating photovoltaic systems with multiple floating bodies

KONG Xiangyu^{1,2)}, SHAO Yangping¹⁾, FU Qiang^{1)✉}, YU Lujie²⁾, LIU Hongbin¹⁾

1) Tianjin Key Laboratory of New Energy Power Conversion, Transmission and Intelligent Control (Tianjin University of Technology), Tianjin 300384, China

2) School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

✉Corresponding author, E-mail: fuqiang6369@hotmail.com

ABSTRACT Owing to the flawed design of the jumper cable between floating bodies, excessive bending, stretching, and collision with the floating bodies occurred during operation, thereby affecting the reliable operation of the system. To solve the problem of fatigue failure in cross-floating cables, this study proposes a method for interconnecting cables between multiple floating bodies in offshore floating photovoltaic systems. First, the structure of the floating body is analyzed, and the cable-jumper scheme between typical hexagonal floating bodies is determined. Second, by analyzing the influence of the floating body structure on the jumper scheme, the key parameters and limiting conditions in the design steps of the cable straddle float were determined. A method is proposed to meet operational requirements through the reasonable planning of jumper parameters, and a two-stage solution framework for cable jumper schemes is established. In the first stage, trust-region particle swarm optimization is employed to determine the feasible solution region of the spanning scheme variables. In the second stage, the maximum fatigue life in the feasible solution region is determined as the optimal solution. Finally, a cable jumper model was built using Orcaflex software to verify the proposed scheme, and the effectiveness of

收稿日期: 2024-04-11

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB4200703)

the proposed method was demonstrated through an example analysis. The research shows that through reasonable planning of the jumper cable path, the bending state of the cable can be alleviated to a certain extent, thereby reducing fatigue damage and ensuring reliable operation during the operational period. (1) Optimizing the jumper parameters through reasonable planning of the jumper path can improve the reliability of flexible cables in harsh environments. This approach achieves the desired effect while reducing both time and economic costs compared with the use of protection devices such as bending limiters. (2) Cosserat theory was used to accurately model flexible cables, fully considering the influence of cable structural parameters on linear lines. The maximum fatigue life was identified as the key focus in solving the framework presented in this study, which is consistent with the simulation results obtained using Orcaflex software. This demonstrates the feasibility and effectiveness of the proposed framework and solution method. (3) In the floating scenario, the solution for the cable jumper scheme should focus on the bending protection of both ends and the middle part. This can be achieved through the installation of protective devices or the reasonable selection of parameters, such as cable length and effective span, through careful analysis.

KEY WORDS floating photovoltaic; cable; cross-floating body connection; fatigue failure; trust region particle swarm

我国拥有 1.8 万公里的大陆海岸线, 沿海省份大多工业发达, 但电力和土地资源紧缺, 只能长期依靠外部购电等方式解决用电紧张问题. 海上光伏电站, 尤其是深水区的漂浮式光伏, 能实现就近消纳, 满足东部沿海省份的高用电需求, 目前已成为全球普遍认可的工程应用形式. 沿海省份陆续出台海上光伏的支持政策, 涉及江苏、山东、天津等地, 预估可安装海上光伏容量超过 70 GW. 虽然海上光伏前景看好, 但面临海上高温、高湿、高盐雾、强风、强浪、强降水等挑战, 对漂浮式光伏电站的耐候性和安全性建设要求更高. 目前漂浮式项目大多以单浮体为主^[1], 通过多浮体单元的连接进行规模化建设. 考虑多浮体间电气连接受波浪的影响, 并兼顾技术性和经济性, 诸多技术问题亟需研究^[2].

作为浮体间电能传输和信号传递的重要载体, 跨接缆的可靠性决定了漂浮式光伏电站能否稳定运行^[3-5]. 部分已建成项目电缆采用在浮体之间增加不锈钢铰接通过浮体承载、漂浮在海面上的跨接方式, 但对于漂浮式浮体间电缆架空式跨接仍处于初步设计阶段. 由于海洋环境的复杂性, 浮体间电缆需要具有较高的耐候性, 在波浪力的作用下, 其承受轴向拉伸和弯曲扭转的荷载, 拉伸和弯曲都不能超过电缆本身最大允许张力和最小弯曲半径, 同时电缆与浮体平台的碰撞亦不能忽略. 因此需要对跨接电缆进行精确建模与合理规划^[6-7].

在柔性缆线型分析方面, 一般采用静态分析和动态校核的分析策略. 早期使用不考虑缆线弯曲刚度的悬链线方程进行静态分析, 基于悬链线方程规律求解出电缆空间变化量, 对缆长要求高且不能反映缆线内部参数变化^[8-9]. 随着计算机和

有限元分析的发展, 出现了将缆线离散成微小单元进行集中载荷仿真的集中质量法^[10]; 通过质点-弹簧法建立缆线的动力学模型, 得到缆线在动态过程中的位姿变化^[11]; 一些用于缆线动态分析的商业软件 (Orcaflex、Riflex) 通过仿真验证结果的可靠性^[12-14]. 为确保运行期间跨接缆的可靠运行, 一方面可通过调整缆线自身的结构参数, 适应频繁移动或弯曲的场景; 另一方面可以使用缆线支撑或保护设备^[15], 在缆线最易疲劳部位进行防护, 降低疲劳损伤. 在对缆线进行布线设计过程中, 如果合理规划缆线的路径, 可以在不使用保护设备的前提下使缆线满足运行要求, 在考虑缆线刚度的前提下, 可以采用智能算法对缆线路径进行寻优. 文献 [16] 提出使用启发式优化算法的缆线路径规划模型, 得到施工成本最小的缆线路径规划结果. 文献 [17] 在快速搜索随机数算法 (Rapidly-exploring random trees, RRT) 基础上, 提出使用 Dijkstra 算法路径优化策略, 解决初始规划路径冗余较多问题从而确定最优规划路径. 文献 [18] 为解决路径寻优中局部解逃逸问题, 在粒子群算法中引入混沌变异思想, 提高了局部寻优性能的精确性. 文献 [19] 将缆线运动过程分解为位置预估和位置修正两部分, 基于位置的动力学算法 (Position based dynamics, PBD) 将缆线分解成不同位置和方向的粒子集合通过确定粒子间的实时状态实现缆线的动态仿真.

基于以上分析, 针对漂浮式场景下柔性缆线仿真和路径规划, 本文的创新性工作主要体现在: 使用 Cosserat 理论对柔性缆线进行数值分析, 充分考虑缆线自身刚度对路径规划的影响, 确定通过合理规划缆线路径达到满足可靠运行要求的设计方法; 采用信赖域粒子群算法在可行解范围内引入

疲劳寿命目标值确定最优路径,并在 Orcaflex 软件通过与使用限弯器装置对照组进行对比分析,验证本文方法的有效性。

1 基于浮体结构的跨接电缆设计

1.1 漂浮式光伏的浮体结构

海上光伏按照应用场景可分为桩基固定式和漂浮式两大类。采用缆绳系泊固定的漂浮式光伏适应水深的的能力比桩基固定式更强,正逐步从近海向深远海发展^[20]。漂浮式浮体间跨接电缆受到波浪力的影响时,会随浮体运动出现频繁弯曲和拉伸。为保证系统可靠运行,电缆型号的选择尤为重要。铜导体因其良好的抗疲劳特性广泛应用在海工、油气等行业,在漂浮式场景下也需铜导体发挥其稳定特性。另外,电缆的铠装层和护套材料等特性都需要根据运行环境和实际需求进行选择。

大面积矩形光伏阵列多建设在水位变化小的湖泊、水库等地。深海大多选择能够抵抗严重动态载荷的三角形或者六边形浮体,而六边形阵列相对于三角形利用率更高,也更加节省建造材料。因此,本文以高密度聚乙烯浮管+支架(主浮管+上弦管)六边形漂浮式浮体的典型结构为例进行跨接电缆方案设计,典型六边形浮体结构如图1所示。

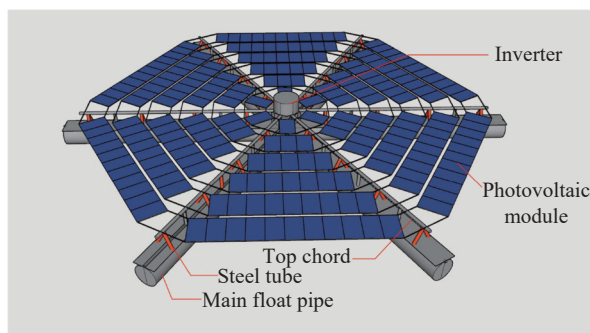


图1 六边形浮体结构示意图

Fig.1 Schematic of a hexagonal floating body structure

1.2 漂浮式光伏电缆跨接方案

漂浮式光伏项目中,箱变一般位于浮体阵列中的任一浮体上,其余浮体上的逆变器与箱变连接需要通过低压电缆跨浮体实现。低压电缆通过浮体单元逆变器向下与主浮管连接,在沿主浮管铺设一定距离后使用钢绞线将电缆悬挂至上弦管端部,与相邻浮体完成跨接。六边形浮体结构的跨接电缆铺设方案示意如图2所示。

此方案不仅降低了施工难度,还预留出了主浮管上方的检修通道,方便运维。电缆采用钢绞线悬挂方式铺设,可有效缓冲相邻浮体运动对跨接

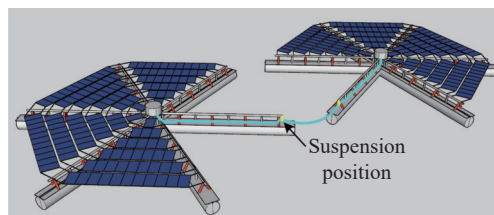


图2 六边形浮体结构的跨接电缆铺设示意图

Fig.2 Layout diagram of jumper cable for hexagonal floating body structures

电缆的影响。

在浮体运动过程中,跨接电缆两端和中间部分会因自身重力或浮体位置变化出现过度弯曲的现象,现阶段对悬浮式电缆的弯曲保护常采用防弯器、限弯器、套管之间相互组合来实现。防弯器等装置应用在柔性管缆与刚性固定端的连接处,可实现端部柔性管缆的平滑过渡,在动态荷载显著的工况下具有明显的疲劳保护的作用。工程上普遍认为安装弯曲保护的线缆没有必要再验证柔性缆的安全性,忽略了防弯器等装置与柔性缆之间的耦合作用。虽然限制了线缆的极值曲率,但很难判断在周期性的动态荷载下对线缆是否有积极作用;电缆和限弯器等装置的生产厂家不一致,后续进行分析设计时间成本高,且针对具体环境进行设计经济性差。基于上述原因,本文使用优化电缆跨接路径的方法与加装防弯器等装置的线缆进行对照分析,验证本文所提方法的有效性。

1.3 电缆跨浮体设计步骤

为避免因跨接缆长度、跨接点位置、悬挂高度设计不合理,导致电缆在运行年限期间出现过度弯曲拉伸造成疲劳失效现象,确保电缆25年可靠运行,需围绕以上三点进行电缆跨接方案设计。

电缆跨接方案设计方法主要包括四个步骤:(1)基于浮体结构确定电缆跨接方案;(2)确定电缆跨接方案中涉及的关键参数;(3)对关键参数进行求解;(4)对求解结果进行校验。具体步骤如图3所示。其中,对关键参数求解是本文设计重点,阶段一确定跨接缆参数选择范围,阶段二引入疲劳寿命求解最终跨接方案,运行要求不高的场景通过阶段一即可确定跨接方案,要求高的场景需要两阶段求解。

2 电缆跨浮体方案关键参数分析

2.1 浮体运行场景分析

在系泊系统和波浪力的作用下,相邻浮体在运行期间会出现一定范围内的位置变化。在进行

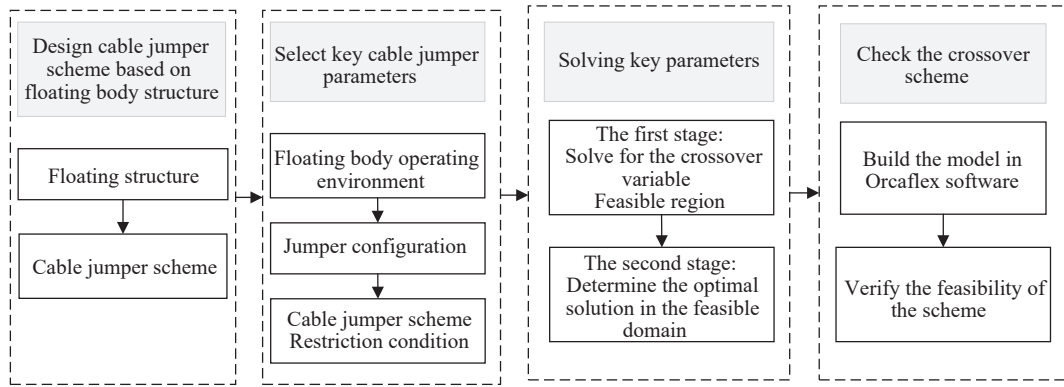


图 3 线缆跨浮体设计步骤

Fig.3 Design procedure of cable spanning floating bodies

跨接缆方案设计之前需要对浮体阵列进行水动力分析, 确定浮体的运动范围。

定义相邻浮体在静水时为理想工况, 在波浪力作用下运动范围内可归纳为三种极限工况, 分别为极限工况 1——水平距离最远; 极限工况 2——浮体相撞水平距离最近; 极限工况 3——两浮体一上一下垂直距离最大. 相邻浮体三种极限工况示意如图 4 所示. 三种极限情况下相邻浮体主浮管端部距离分别为 b_1 、 b_2 、 b_3 .

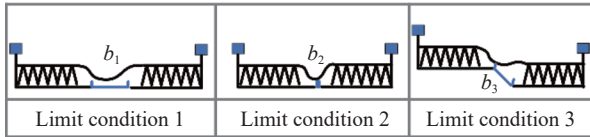


图 4 相邻浮体三种极限工况示意

Fig.4 Three extreme working conditions of adjacent floating bodies

跨接缆两端的悬挂点在上弦管上, 因上弦管与主浮管长度不同, 需要明确悬挂点与主浮管端部的空间关系. 电缆跨接部分浮体结构示意图如图 5 所示.

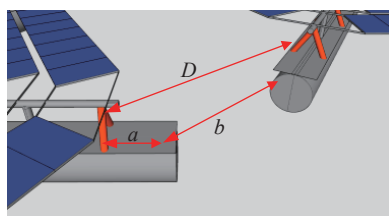


图 5 电缆跨接部分浮体结构示意图

Fig.5 Schematic of the floating body structure with a cable jumper

单浮体中上弦管与主浮管平行, 相邻主浮管有 120° 夹角. 定义相邻主浮管端部距离为 b , 上弦管端部距离为 D , 上弦管与主浮管的长度差为 a , 上下浮动最大距离为 c . 通过几何计算出 D 和 a 、 b 、 c 的关系为

$$D = \sqrt{(\sqrt{3}a + b)^2 + c^2} \quad (1)$$

上弦管距离为 D_1 、 D_2 、 D_3 分别对应 b_1 、 b_2 、 b_3 . 为确保电缆在运行期间不会被拉断, 初始跨接缆长度 L_0 等于 D_1 、 D_2 、 D_3 中的最大值, 即

$$L_0 = \max[D_1, D_2, D_3] \quad (2)$$

2.2 跨接缆构型分析

运行期间频繁过度弯曲拉伸的电缆会出现疲劳失效, 原因在于弯曲时超过自身的最小弯曲半径 R_{min} , 相邻浮体反方向运动时, 跨接缆超过了最大允许拉力 F_{max} , 因此规定电缆弯曲半径 R 和拉力 F 的取值范围为

$$R \geq R_{min} \quad (3)$$

$$F \leq F_{max} \quad (4)$$

电缆两端通过钢绞线悬挂到上弦管, 与相邻浮体完成跨接, 跨接方案此时涉及 3 个参数, 悬挂高度 h 、跨接长度 L 、悬挂位置 x . 电缆悬挂示意如图 6 所示.

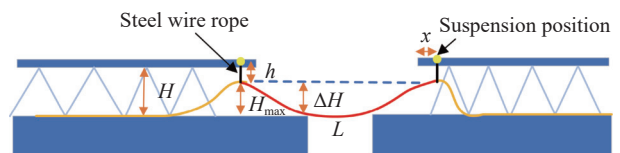


图 6 电缆悬挂示意图

Fig.6 Cable suspension diagram

通过调整钢绞线长度可以使电缆在运行期间不与浮体结构发生碰撞, 钢绞线越长, 对跨接电缆的缓冲作用越好, 也越容易出现碰撞危险, 需要限制电缆跨接部分的垂度. 上弦管与主浮管的高度差为 H , H 与悬挂高度 h 的差值为最大允许高度 H_{max} , 即电缆悬挂点与主浮管端部上方电缆的高度差 ΔH 不能超过 H_{max} , 表示为

$$\Delta H < H_{max} \quad (5)$$

式中, H_{\max} 取决于 H 和 h , $H_{\max}=H-h$.

通过调整 L 和 x 可以缓解跨接缆在运行期间的弯曲变形程度, 减少疲劳损伤. L 、 x 的调整示意图如图 7 所示.

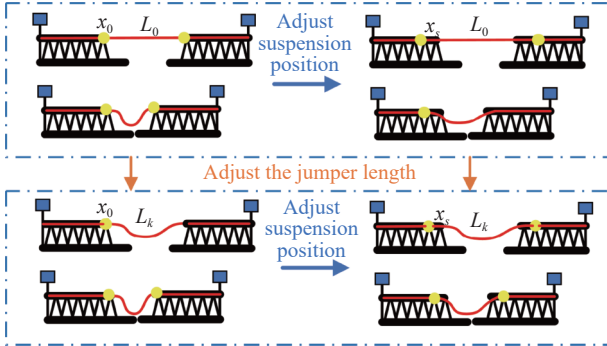


图 7 跨接长度与悬挂位置调整示意图

Fig.7 Adjustment of the jumper length and suspension position

定义最终跨接方案中悬挂位置为 x_s , 跨接缆初始长度为 L_k , 最终跨接缆长度 L_{final} 为

$$L_{\text{final}} = L_k + 2x_s \quad (6)$$

跨接缆悬挂高度的求解可以转化为钢绞线的长度求解, 形成钢绞线长度矩阵 $\mathbf{h} = [h_0, h_1, \dots, h_m]$, 其中 $h_0 \sim h_m$ 的取值范围为 $(0, H)$. 设置跨接缆初始长度矩阵 $\mathbf{L} = [L_0, L_1, \dots, L_k]$, L_0 作为最小值, 为浮体间最大距离, 按照工程习惯设置长度裕度等间隔增加进行计算. 为方便检修, 悬挂位置应尽可能靠近上弦管端部, 根据实际需求设置悬挂范围, 形成悬挂位置矩阵 $\mathbf{x} = [x_0, x_1, \dots, x_s]$, 其中 x_0 为上弦管端部, 以上三种矩阵变量取值在保证合理性的前提下根据具体工程设计需要, 划定取值范围, 算例部分进行说明, 这里不做描述. 因此, 跨接长度与悬挂位置的变化范围可表示为:

$$\mathbf{L}^T \mathbf{x} = \begin{bmatrix} L_0 x_0 & L_0 x_1 & \dots & L_0 x_s \\ L_1 x_0 & L_1 x_1 & \dots & L_1 x_s \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_k x_0 & L_k x_1 & \dots & L_k x_s \end{bmatrix} \quad (7)$$

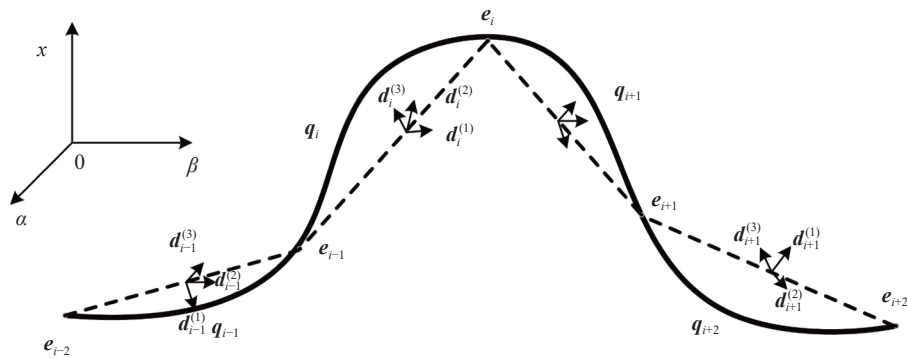


图 8 电缆的离散模型

Fig.8 Discrete model of the cable

3 跨接方案参数求解

电缆跨接方案参数求解可分为两个阶段, 第一阶段: 在矩阵 \mathbf{L} 、 \mathbf{x} 、 \mathbf{h} 变化范围内对电缆曲率进行计算, 筛选出满足限制条件的变量组合进入备选方案矩阵 \mathbf{A} 中, \mathbf{A} 中每一参数都包含了关于 \mathbf{L} 、 \mathbf{x} 、 \mathbf{h} 的三个变量; 第二阶段: 计算 \mathbf{A} 中各参数的疲劳寿命, 选择最大值对应的 L_k 、 x_s 、 h_m 作为电缆跨接方案最优解.

3.1 第一阶段

在运行周期内, 不同变量下的电缆变化过程可以看作由无数个连续的静止状态组成. 基于弹性力学最小势能原理, 电缆处于平衡状态时总势能在边界条件下最小, 通过求解最小势能时电缆各离散节点的位置与弯扭程度可确定电缆处于平衡状态时的空间位姿^[21]. 为准确描述电缆在运行期间的变形程度和位姿变化, 基于 Cosserat 理论引入以下分析框架. 电缆的离散模型如图 8 所示.

将电缆沿中心线离散成首尾相连相同长度的 n 段电缆, 每段表示为 $\mathbf{q}_i (i = 1, 2, 3, \dots, n)$, 包括 $n+1$ 个节点, 可表示为 $\mathbf{e}_i (i = 0, 1, 2, \dots, n+1)$. 其中第 i 段电缆对应的截面坐标系 \mathbf{d}_i 表示为

$$\mathbf{q}_i = \mathbf{e}_i - \mathbf{e}_{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$\mathbf{d}_i = [\mathbf{d}_i^{(1)} \quad \mathbf{d}_i^{(2)} \quad \mathbf{d}_i^{(3)}] \quad (9)$$

线缆空间中心线上选定一点可以建立弧坐标 s , 任一点的位置都可以由 s 确定, 矢径 \mathbf{r} 表示电缆中心线的空间位置, \mathbf{r} 为 s 的单值连续可微函数, 线缆位置可在 $0-\alpha\beta\chi$ 坐标系中通过两端位置进行标识, 第 i 段线缆位置以及弯扭形变可表达为

$$\mathbf{r}(\mathbf{q}_i) = [\alpha(\mathbf{e}_i) - \alpha(\mathbf{e}_{i-1}), \beta(\mathbf{e}_i) - \beta(\mathbf{e}_{i-1}), \chi(\mathbf{e}_i) - \chi(\mathbf{e}_{i-1})] \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\Omega}(\mathbf{q}_i) = \frac{1}{2} \sum_{v=1}^3 \mathbf{d}_i^{(v)} \times \frac{d}{ds} \mathbf{d}_i^{(v)} \quad (11)$$

式中, $\mathbf{r}(q_i)$ 表示第 i 段线缆中心线的空间位置矢量, $\boldsymbol{\Omega}(q_i)$ 表示第 i 段线缆弯扭度矢量.

使用数值计算需要引入四元数 $\lambda = (\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)^T$ 对线缆弯扭度矢量 $\boldsymbol{\Omega}$ 进行表达:

$$\boldsymbol{\Omega} = 2\bar{\lambda}\lambda' \quad (12)$$

展开式为:

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{\Omega}_1 \\ \boldsymbol{\Omega}_2 \\ \boldsymbol{\Omega}_3 \end{pmatrix} = 2 \begin{pmatrix} \lambda_0\lambda'_1 - \lambda_1\lambda'_0 - \lambda_2\lambda'_3 + \lambda_3\lambda'_2 \\ \lambda_0\lambda'_2 + \lambda_1\lambda'_3 - \lambda_2\lambda'_0 - \lambda_3\lambda'_1 \\ \lambda_0\lambda'_3 - \lambda_1\lambda'_2 + \lambda_2\lambda'_1 - \lambda_3\lambda'_0 \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中: $\bar{\lambda}$ 为四元数 λ 的共轭四元数, λ' 为四元数 λ 对时间 t 的微分; 线缆弯扭度矢量 $\boldsymbol{\Omega}$ 的三种分量 $\boldsymbol{\Omega}_1$, $\boldsymbol{\Omega}_2$, $\boldsymbol{\Omega}_3$ 分别表示线缆中心线围绕截面方向 $\mathbf{d}^{(1)}$, $\mathbf{d}^{(2)}$, $\mathbf{d}^{(3)}$ 的旋转的程度, 此时线缆的弯扭程度可以由当前状态与初始状态的差值表示, 其中 $\Delta\boldsymbol{\Omega}_1$, $\Delta\boldsymbol{\Omega}_2$ 表示弯曲应变, $\Delta\boldsymbol{\Omega}_3$ 表示扭转应变. 因此, 第 i 段线缆在空间中的形态可以由 $\boldsymbol{\Omega}_1(q_i)$, $\boldsymbol{\Omega}_2(q_i)$, $\boldsymbol{\Omega}_3(q_i)$ 确定.

线缆在平衡状态时只具备弹性势能和重力势能, 弹性势能与弯曲刚度 K_b 和扭转刚度 K_t 有以下关系:

$$\begin{cases} E_{b,i} = \frac{1}{2}K_b\kappa_i^2 = \frac{1}{2}J\frac{\pi R_b^4}{4}\kappa_i^2 \\ E_{t,i} = \frac{1}{2}K_t\boldsymbol{\Omega}_3^2(q_i) = G\frac{\pi R_b^4}{4}\boldsymbol{\Omega}_3^2(q_i) \end{cases} \quad (14)$$

式中, $E_{b,i}$, $E_{t,i}$ 分别表示第 i 段线缆的弯曲势能和扭转势能, J 为圆横截面的惯性矩, R_b 为圆横截面的半径, G 为线缆材料的弹性模量, 线缆曲率 κ_i 与弯扭度分量 $\boldsymbol{\Omega}_1(q_i)$, $\boldsymbol{\Omega}_2(q_i)$ 存在 $\kappa_i^2 = \boldsymbol{\Omega}_1^2(q_i) + \boldsymbol{\Omega}_2^2(q_i)$ 的关系.

假设离散后线缆单元长度为 l , 重力加速度为 g , 每个单元的质量为 m , 线缆总质量为 nm , 则第 i 单元所具有的重力势能为:

$$E_{w,i} = mg = \rho\pi R_b^2lg \quad (15)$$

式中, $E_{w,i}$ 表示第 i 段线缆的重力势能, ρ 为线缆材料的密度.

通过式 (14) 和式 (15) 可以计算出线缆的总势能 E 为:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_{b,i} + \sum_{i=1}^{n-1} E_{t,i} + \sum_{i=1}^n E_{w,i} \quad (16)$$

在一定约束下, 总势能最小时线缆处于平衡状态, 可以通过求解 E 的最小值, 确定线缆静止时的位置和弯扭度, 属于约束非线性最优化问题^[22], 优化模型为:

$$f(\mathbf{A}) = \min E \quad (17)$$

线缆模型存在多个约束, 引入罚函数将约束

加入到目标函数中, 罚函数可将约束非线性最优化问题转化为无约束优化问题, 使用信赖域方法对模型进行求解.

线缆在运行过程中出现的变形与位置变化与内外约束有关^[23], 内部约束限制了变形程度, 外部约束限制了变形过程. 其中, 第 i 段线缆内部约束包括三个方面, 分别用 $C_{1,i}$, $C_{2,i}$, $C_{3,i}$ 表示.

在没有外力作用下, 线缆的弯曲扭转程度为 0, 不发生变形时, 弯扭矢量应与初始值一致:

$$C_{1,i}: \quad \Delta\boldsymbol{\Omega}_i = \mathbf{0}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

当四元数的模为零时, 势能会变得无限大, 可以避免产生因抗弯抗扭刚度较大出现的 V 型情况的出现, 因此需要对引用旋转四元数限制单位模长, 应该满足

$$C_{2,i}: \quad \lambda_i^T \lambda_i - 1 = 0, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (19)$$

因本文不考虑线缆的拉伸变量, 需要限制变形后离散段长度与初始一致:

$$C_{3,i}: \quad \mathbf{q}_i/l_i - \mathbf{d}_i^{(3)} = \mathbf{0}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

3.2 第二阶段

跨接缆作为浮体间传输电能的低压电缆, 与海底动态缆相比结构上较简单, 运行期间受到的疲劳损伤主要考虑线缆内导体与铠装层, 其余结构以及结构间的相互影响可以忽略. 线缆的运行寿命与外力损伤、化学腐蚀、老化有关, 本文只分析因外力作用导致的金属疲劳损伤, 因此寿命分析只作为求解方法参考.

采用应力系数法计算线缆的疲劳寿命, 跨接缆主要的受力结构为铠装层和内导体, 需要对其应力分配进行分析, 可表示为

$$\sigma = Q_t T + Q_c (S_\alpha \sin\theta - S_\beta \cos\theta) \quad (21)$$

式中: σ 为线缆应力系数; Q_t 为结构有效张力-应力系数; Q_c 为结构曲率-应力系数; S_α , S_β 分别为 α 、 β 方向上的曲率分量; T 为线缆所受张力; θ 为疲劳点在圆周上的方位角.

为适用于线缆结构的 S-N 曲线, 需要修正平均应力

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_b} \right) \quad (22)$$

式中: σ_a 为应力幅值; σ_{-1} 为循环比等于 -1 时的疲劳极限; σ_m 为平均应力; σ_b 为材料的强度极限.

结合线缆铠装层和内导体结构的 S-N 曲线, 使用疲劳应力表示线缆的疲劳能力, 即

$$N_j = u(\Delta\sigma_j)^{-w} \quad (23)$$

式中: N_j 为运行期间第 j 种海况的数量; u, w 为疲劳测试获取的经验常数; $\Delta\sigma_j$ 为第 j 种海况应力幅值的变化量。

基于线性疲劳损伤累积准则^[24], 经过循环载荷后积累的损伤为

$$O_L = \sum_{j=1}^{N_j} O_j P_j \quad (24)$$

式中: O_L 为长期疲劳损伤累积; P_j 为每种海况发生的概率; O_j 表示第 j 种海况造成的疲劳损伤。

电缆疲劳寿命为所受疲劳损伤的倒数, 最终疲劳寿命用 Y 表示为

$$Y = 1/O_L \quad (25)$$

针对以上两阶段求解问题, 利用信赖域粒子群算法对电缆跨接参数进行优化。在 2.2 节已将问题转化在求解范围 L, x, h 中寻找满足约束条件的可行解区域, 标记电缆跨接方案三个设计变量为 $M=(L, x, h)$ 。

针对跨接缆方案最优参数求解问题, 本文采用信赖域粒子群算法, 通过引入较强局部搜索能力的信赖域方法, 提高粒子群算法的局部收敛能力; 为确保电缆模型求解的实时性, 利用信赖域初值不影响最优值的选取, 初值在最优值附近时求解速度较快的优势, 将前一位置的离散点状态作为后一点的初值, 显著提高求解效率。

第二阶段优化模型如下

$$\begin{cases} \text{find}[M] \\ f(L_k, x_s, h_m) = \max Y(A) \\ \Delta H \leq H_{\max} \\ \Omega_M \leq \Omega_{\max} \\ \sigma_M \leq \sigma_{\max} \end{cases} \quad (26)$$

式中, M 为设计阶段变量取值范围, Ω_{\max} 和 σ_{\max} 为设计准备阶段所选电缆的固定参数电缆最大弯扭度矢量和最大应力幅值, H_{\max} 表示最大允许高度, Ω_M 和 σ_M 表示此时这组变量代表的电缆在运行期间最大弯扭度矢量和最大应力幅值。

优化模型表示, 根据给定取值范围 M , 在第一阶段确定的备选方案矩阵 A 中, 寻找使疲劳寿命最大, 且满足 Ω_{\max} 、 σ_{\max} 和 H_{\max} 的限制条件的一组最优变量 L_k, x_s, h_m 作为最终的求解结果。

基于信赖域粒子群算法的跨接缆方案参数优化步骤如图 9 所示。

3.3 电缆跨浮体设计流程

电缆跨浮体设计流程如图 10 所示。跨接缆模型构建和求解是本文方法关键步骤, 第一阶段求

解出备选方案可行解区域, 第二阶段通过筛选出疲劳寿命最大值作为方案最优解, 全程使用信赖域粒子群算法, 提高求解效率, 确保跨接缆模型求解准确性和有效性。

4 算例分析

为验证本文所提方法的有效性, 以某海上漂浮式光伏项目为实例进行电缆跨接方案设计。该漂浮式项目中跨接缆的运行环境以及结构参数如表 1、表 2 所示。

根据式 (1) 确定 D_1, D_2, D_3 分别为 1.866 m、0.866 m、1.455 m。极限工况 1 时两浮体空间上相距最远, 因此确定 $L_0=D_1=1.866$ m。本文在以 10% L_0 等幅增加的初始跨接长度矩阵和以上弦管端部为起始点 4 m 悬挂范围内进行求解。以电缆的最大曲率 (2.2) 为限制条件, 求解极限工况 2 和 3 的可行解区域。求解结果分别如图 11(a) 和 (b) 所示。

由图 11 可知, 极限工况 3 整体曲率小于工况 2, 可行解范围更大, 工况 2 悬挂点取值范围 ($x-x_0$) 为 1.0~4.0, 工况 3 取值范围为 0.8~4.0; 跨接缆预留长度 (L_k/L_0) 越多, 可选择悬挂范围越小。以上分析表明为减轻电缆在运行期间的弯曲程度, 应该尽可能缩短预留长度, 远离上弦管端部悬挂。在此条件下计算出电缆的悬挂高度的取值范围, 结果如图 12 所示。

由图 12 可知, 为满足不与浮体结构碰撞的要求, 跨接缆预留长度 (L_k/L_0) 越少, 悬挂点越靠近上弦管端部 ($x-x_0$ 越小), 悬挂高度可选择的范围越大, 最大为 0.53 m。为满足曲率要求, 悬挂点最小为 1 m, 此时 L 不能超过 1.4 L_0 ; 当初始跨接长度为 L_0 时, $x-x_0$ 最大为 1.7 m。因此, 为减小跨接缆与浮体结构碰撞的可能性, 应该尽可能缩短预留长度, 靠近上弦管端部悬挂。

通过以上分析, 为了求解出保证弯曲和不碰撞要求的最优解, 需要进行多目标优化, 本文以求解电缆疲劳寿命最大值为切入点进行分析。

分别求解电缆两端悬挂 (使用钢绞线)、绑定 (不使用钢绞线)、使用限弯器三种跨接方案最优值和疲劳寿命, 结果如表 3 所示。

上述结果都是在求解范围内的最优值, 悬挂相对绑定方案的疲劳寿命有明显提高, 虽然悬挂位置更靠近上弦管端部, 但悬挂方式对电缆的缓冲效果比远端部更能减轻疲劳损伤; 而采用限弯器方案时, 疲劳寿命最大, 跨接成本也最高, 但两端需要远离上弦管端部。

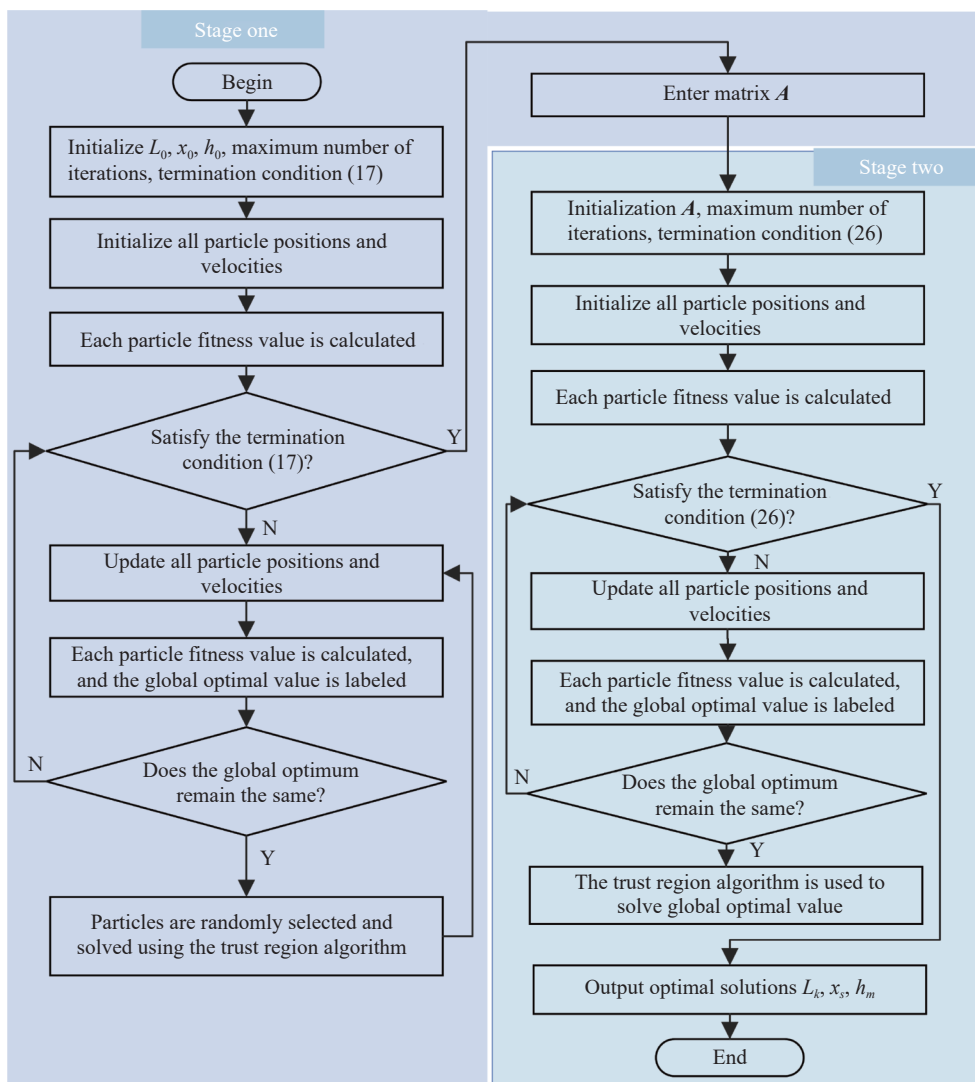


图 9 信赖域粒子群算法求解步骤
Fig.9 Solution steps of the trust region particle swarm algorithm

跨接电缆在运行期间会面临无数个工况, 在 Orcaflex 软件中搭建电缆跨接模型^[25], 以极限工况为边界设置运行场景, 验证最终求解方案的可行性. 验证方案是否可行需满足两个条件: (1) 电缆在运行期间沿缆长分布的曲率都小于 2.2; (2) 电缆的设计寿命为 25 年, 安全系数采用 10 时疲劳寿命需超过 250 年. 通过式 (6) 计算表 3 中使用抗弯器和悬挂方案中最终跨接缆长度分别为 5.65 m 和 4.25 m, 两种方案中沿缆长分布的曲率和疲劳寿命分布如图 13 和图 14 所示.

两种方案的电缆最大曲率都小于 2.2, 疲劳寿命最小值大于 250 年, 表明使用悬挂方案也能达到与使用限弯器相同的效果, 满足设计要求, 且数值求解结果与在 Orcaflex 仿真出的结果误差很小, 验证本文所提方法的有效性和准确性.

对照试验中两端使用长 1 m 的限弯器, 图 13

表明限弯器可以明显降低两端曲率, 但 1 m 处有明显曲率上升现象, 且上升速度超过悬挂方案, 跨接缆中间部位弯曲更严重, 相同条件下, 使用限弯器时应增加跨接缆两端距离. 图 14 中表明最应该注意限弯器出口处的疲劳防护, 而悬挂方案应该注意靠近悬挂点的位置. 电缆两端所受拉力最大, 但因电缆两端被钢绞线悬挂在上弦管上, 对拖拽力起到了缓冲作用; 两端的出线方向与水平面平行, 电缆自身重力产生的拉力大部分作用在距离两端 0.5 m 处.

为了更详细描述电缆跨接参数之间的关系, 以表 2 电缆为例, 对三种极限工况下的电缆进行位置和曲率分析, 如图 15 所示.

由图 15 可以看出工况 2 时电缆的弯曲程度最严重, 工况 1 因电缆趋向于直线, 弯曲程度最小, 而工况 3 比 1 整体曲率小原因在于此时电缆两端

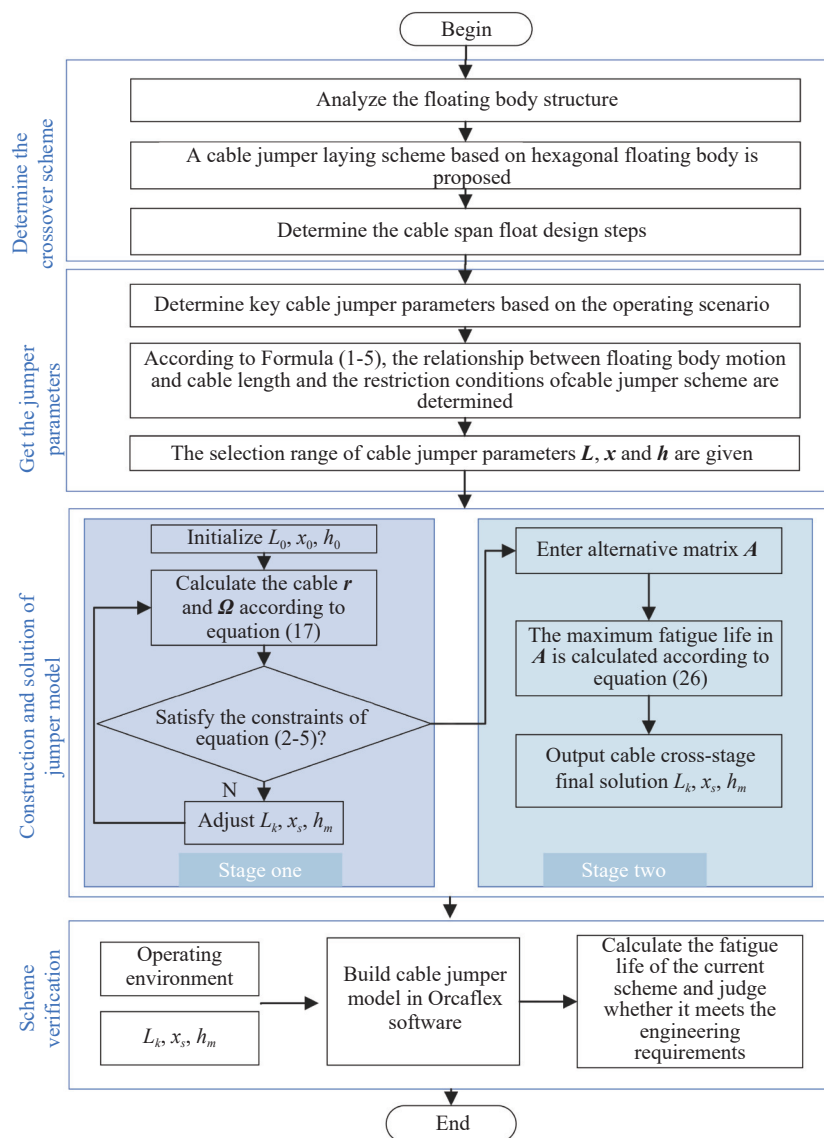


图 10 电缆跨浮体设计流程图

Fig.10 Design flowchart of cable spanning floating bodies

表 1 浮体结构与运行参数

Table 1 Structure and operation parameters of the floating body

Parameter	Data
Length difference between the top string tube and the main float tube	0.5 m
Height difference between the top string tube and the main float tube	2 m
Ideal working condition	Horizontal 0.5 m, vertical 0 m
Extreme working condition 1	Horizontal 1 m, vertical 0 m
Extreme working condition 2	Horizontal 0 m, vertical 0 m
Extreme working condition 3	Horizontal 0.5 m, vertical 0.5 m

属于两端夹持约束,工况 3 的电缆位姿与出线角度更加贴合.文献 [26] 使用悬链线方程计算出不同出线角度的电缆方程,通过改变跨接缆两端的出线角度可以减轻两端在运行期间的弯曲程度.

跨接电缆两端固定,电缆在自身重力作用下

出现弯曲状态,当电缆到达最小弯曲半径时不能再缩小跨接距离,以免破坏结构性能^[27].两端在同一水平位置的电缆达到最小弯曲半径时,为最小跨距;在默认电缆伸长率为 0 的前提下,电缆最大跨距等于电缆长度.当跨接缆处于最大和最小跨

表 2 电缆相关参数

Table 2 Cable parameters

Parameter	Data
Density/(g·cm ⁻³)	2.64
Maximum curvature/(rad·m ⁻¹)	2.2
Bending stiffness/(N·m ²)	11900
Torsional stiffness/(N·m ²)	2548
Maximum tension/kN	28
Mass per unit length/(kg·m ⁻¹)	4.2

距之间时电缆不会因过度弯曲破坏结构性能, 满足最小弯曲半径要求. 以表 2 电缆型号为例, 计算出该电缆在不影响电缆性能的情况下, 跨接缆有效跨距的范围如图 16 所示.

由图 16 可以看出, 当电缆长度到达一定临界值后, 最小跨距曲线饱和, 对于表 2 中电缆长度大于 4.672 m 时, 最小跨距都为 2.645 m. 因此, 可以根据电缆型号确定有效跨距范围进行跨接方案的设计.

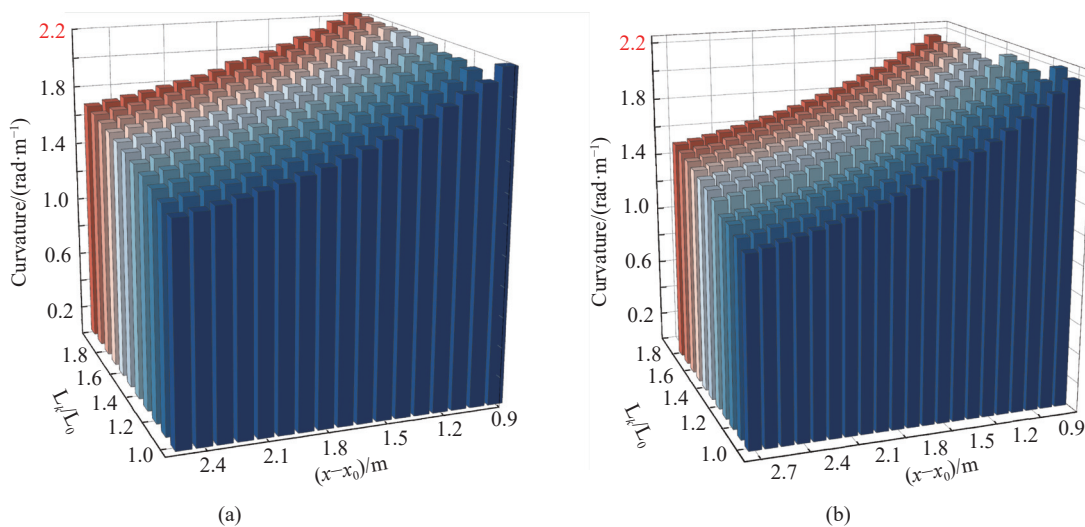


图 11 电缆长度与悬挂位置可行解. (a) 极限工况 2; (b) 极限工况 3

Fig.11 Feasible solutions for cable length and suspension position: (a) extreme working condition 2; (b) extreme working condition 3

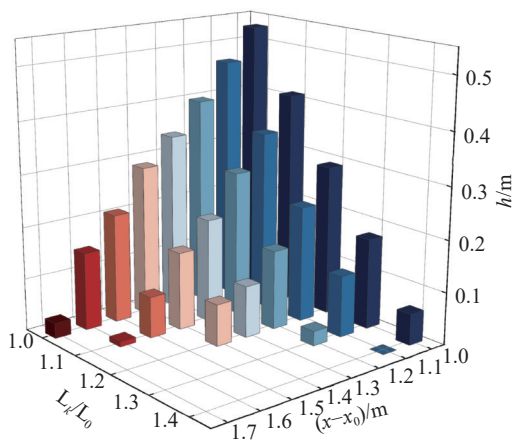


图 12 电缆悬挂高度可行解

Fig.12 Feasible solution for cable suspension height

表 3 浮体结构与运行参数

Table 3 Structure and operation parameters of the floating body

Scheme	Initial jumper length	Suspension position/m	Suspension height/m	Fatigue life/a
Suspend	1.1L ₀	1.1	0.3	257
Bind	1.1L ₀	1.5	0	217
Bend stopper	1.1L ₀	1.8	0	374

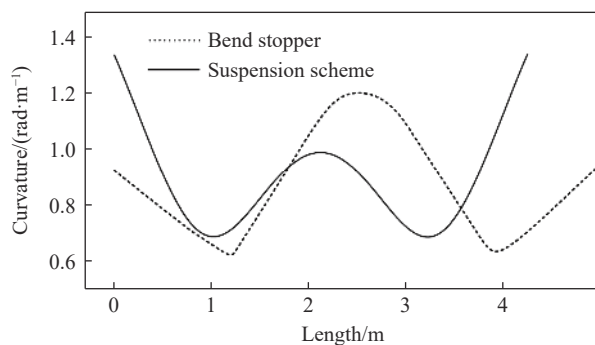


图 13 电缆曲率分布

Fig.13 Cable curvature distribution

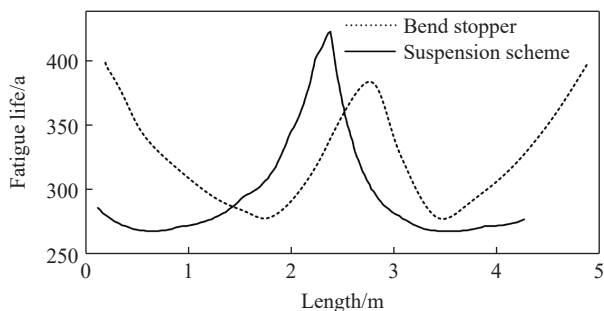


图 14 电缆疲劳寿命分布

Fig.14 Cable fatigue life distribution

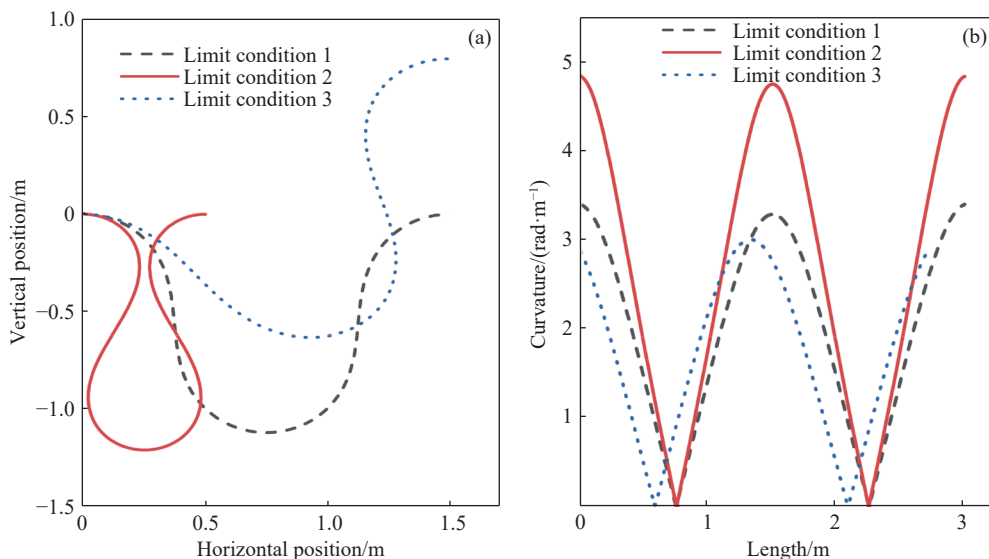


图 15 极限情况下电缆位形 (a) 与曲率分布 (b)

Fig.15 Cable configuration (a) and curvature distribution (b) in extreme cases

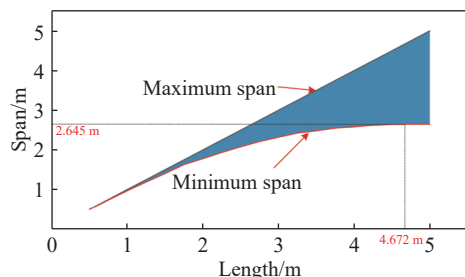


图 16 电缆有效跨距

Fig.16 Effective cable span

在此基础上,求解不同长度在有效跨距范围内,跨接缆的垂度与长度的关系,以电缆两端不受约束(出线角度与上弦管垂直)为对比方案,分析结果如图 17 所示。

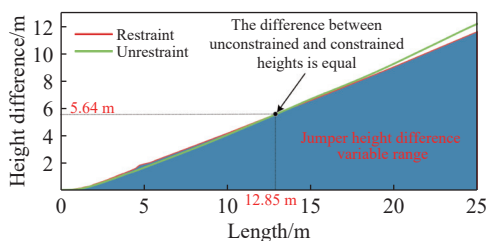


图 17 跨接缆有效高度差

Fig.17 Effective height difference of jumper cables

电缆受自身和夹持约束的限制,跨接缆的最大高度差不能达到线缆长度的一半,通过拟合可以得到跨接缆长度与垂度的关系为 $L=0.4735h-0.4755$. 与不受约束的电缆对比,二者之间的高度差相差很小,二者相等位置在跨接缆长度 12.85 m 处. 本文设计跨接缆长度较小,电缆两端出线角度对本文方法影响不大,当电缆长度较长时,需要考

虑电缆两端出线角度对高度差的影响。

5 结论

针对跨浮体电缆容易出现疲劳失效问题,本文提出一种海上漂浮式光伏电缆跨浮体的设计方法. 并通过工程实例验证所提方法的有效性,并得到如下结论:

(1) 通过合理规划跨接缆路径寻求跨接参数最优解,能提高柔性线缆在恶劣环境下的可靠性,与使用限弯器等保护装置的方法相比,可以在降低时间和经济成本的前提下,达到预期效果。

(2) 使用 cosserat 理论对柔性线缆进行精确建模,充分考虑线缆结构参数对线型的影响,通过求解疲劳寿命最大值作为本文求解框架的关键点,与 Orcaflex 软件仿真结果相近,验证了本文框架和求解方法的可行性和有效性。

(3) 漂浮式场景下电缆跨接方案的求解重点应放在两端与中间部分的弯曲防护上,可以通过安装防护装置进行保护,也可以通过分析电缆长度等参数与有效跨距的关系进行合理选择。

参 考 文 献

- [1] Zhang J F, Yi L, Guo P. Design and optimization of single-module structure of offshore FPV system. *Ship Sci Technol*, 2023, 45(19): 104
(张景飞, 易玲, 郭攀. 海上漂浮式光伏阵列单浮体结构设计. *舰船科学技术*, 2023, 45(19): 104)
- [2] Geng B L, Tang X, Jin R J. Prospects for research on offshore floating photovoltaic structures and their hydrodynamic issues. *Ocean Eng*, 2024, 42(3): 190
(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. 海洋工程, 2024, 42(3): 190
- [3] Cui P Y, Sun X F, Shen H, et al. Linearization modeling of transmission cable for analysis of pv grid tied inversion system. *Acta Energetica Sin*, 2021, 42(1): 21
(崔朋玉, 孙孝峰, 沈虹, 等. 适用于光伏并网系统的传输电缆线性化模型研究. 太阳能学报, 2021, 42(1): 21)
- [4] Guo L, Yuan Y C, Tang W Y, et al. Influence factors of marine towing cable's steady-state configuration and vibration characteristics. *J Ship Mech*, 2023, 27(7): 1061
(郭力, 袁昱超, 唐文勇, 等. 海洋拖缆平衡位形及振动特性影响因素研究. 船舶力学, 2023, 27(7): 1061)
- [5] Dong Z R, Wang F S, Lou O J, et al. Ship pipe route design based on improved NSGA-II. *Comput Integr Manuf Syst*, 2022, 28(4): 1129
(董宗然, 王法胜, 楼偶俊, 等. 基于改进 NSGA-II 的船舶管路路径设计. 计算机集成制造系统, 2022, 28(4): 1129)
- [6] Liu J H, Zhao T, Wang C S, et al. Motional cable harness physical characteristic oriented modeling and kinetic simulation technology in virtual environment. *J Mech Eng*, 2011, 47(9): 117
(刘检华, 赵涛, 王春生, 等. 虚拟环境下的活动线缆物理特性建模与运动仿真技术. 机械工程学报, 2011, 47(9): 117)
- [7] Wang B, Yang J X, Lan X P, et al. Research on digital modeling method of flexible pipeline. *Manuf Autom*, 2024, 46(2): 8
(王波, 杨建新, 兰小平, 等. 柔性管线数字化建模方法研究. 制造业自动化, 2024, 46(2): 8)
- [8] Ni Y M, Ma H Z, Duan D W, et al. Analysis of thermo-mechanical effect of high-voltage cables and calculation of arc slip. *Electr Mach Contr*, 2023, 27(12): 62
(倪一铭, 马宏忠, 段大卫, 等. 高压电缆热机械效应分析与弧幅滑移量计算研究. 电机与控制学报, 2023, 27(12): 62)
- [9] Yang Y, Dong H F, Zhu G, et al. Accurate method for calculation and optimization of jumper hose/cable length. *Ship Ocean Eng*, 2022, 51(3): 90
(杨勇, 董海防, 朱刚, 等. 跨接管缆长度精确计算与优化. 船海工程, 2022, 51(3): 90)
- [10] Liu J X, Gao S, Nian R, et al. Study on hydrodynamic characteristics and depth control of the towed sensors array system. *Mar Struct*, 2023, 92: 103504
- [11] Ma L Y, Xie S F, Liu P Y, et al. Modeling and progression simulation of flexible cables based on mass-spring system. *J Syst Simul*, 2014, 26(4): 733
(马立元, 谢世富, 刘鹏远, 等. 基于质点-弹簧系统的柔性线缆建模及其运动仿真. 系统仿真学报, 2014, 26(4): 733)
- [12] Tan F F, Tan Z H, Luo K. Structural design of die-casting die for industrial cabinet lock handle based on pro/E. *J Phys: Conf Ser*, 2022, 2218(1): 012072
- [13] Lei Y, Li W, Zheng X Y, et al. A floating system integrating a wind turbine with a steel fish farming cage: Experimental validation of the hydrodynamic model. *Mar Struct*, 2024, 93: 103525
- [14] Jin J Z, Su B, Dou R, et al. Numerical modelling of hydrodynamic responses of Ocean Farm 1 in waves and current and validation against model test measurements. *Mar Struct*, 2021, 78: 103017
- [15] Zhou Z X. *Design and Analysis of Suspended Submarine Cable Protection under Fixed Wind Power Platform* [Dissertation]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020
(周志旭. 固定式风电平台下的悬挂海缆保护设计与分析[学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2020)
- [16] Xu T F, Wang T, Ye C M, et al. Research of electric cable path planning based on heuristic optimization algorithm in mixed-land scenario. *Energy Eng*, 2023, 120(11): 2629
- [17] Huang X, Yuan Q N, Li S L. Research on cable path planning technology based on improved RRT algorithm. *Comput Simul*, 2020, 37(12): 332
(黄鑫, 袁庆霓, 李思良. 基于改进 RRT 算法的线缆路径规划研究. 计算机仿真, 2020, 37(12): 332)
- [18] Liu Q, Liu B B, Yu J P, et al. Multi-pipe bundle layout optimization for aero-engine considering double-clamp constraints. *J Mech Eng*, 2021, 57(19): 218
(柳强, 刘贝贝, 于嘉鹏, 等. 考虑双联卡箍约束的航空发动机多管束束敷设优化方法. 机械工程学报, 2021, 57(19): 218)
- [19] Yang W F, Liu J H, Lü N J, et al. Method of cable dynamic simulation based on PBD. *J Mech Eng*, 2024, 60(6): 21
(杨炜烽, 刘检华, 吕乃静, 等. 基于位置动力学的线缆运动过程仿真方法. 机械工程学报, 2024, 60(6): 21)
- [20] Xu P, Li S L, Song Q M, et al. Dynamic response analysis of mooring structure for deep-water floating photovoltaic platform. *Acta Energetica Sin*, 2023, 44(10): 156
(徐普, 黎思亮, 宋启明, 等. 深水漂浮式光伏平台系泊结构动力响应分析. 太阳能学报, 2023, 44(10): 156)
- [21] Wang Z Q, Li J Z, Chen W N, et al. Cosserat Dynamic Modeling and Simulation of Mobile Cable on Satellite. *J Beijing Inst Tech*, 2023, 32(6): 740
- [22] Liu J F, Huang Y T. Multi-objective dynamic facility layout method based on layout space evolutionary strategy. *CIMS*, <https://doi.org/10.13196/j.cims.2023.0593>
(刘景发, 黄奕涛. 基于布局空间进化的多目标动态设备布置方法. 计算机集成制造系统. <https://doi.org/10.13196/j.cims.2023.0593>)
- [23] Müller M, Macklin M, Chentanez N, et al. Detailed rigid body simulation with extended position based dynamics. *Comput Graph Forum*, 2020, 39(8): 101
- [24] Xu S, Guedes Soares C. Evaluation of spectral methods for long term fatigue damage analysis of synthetic fibre mooring ropes based on experimental data. *Ocean Eng*, 2021, 226: 108842
- [25] Hou J, Kang Z, Jing X B. Fatigue damage prediction of steel catenary riser based on OrcaFlex. *Ocean Eng*, 2024, 42(3): 1
(侯静, 康庄, 井学斌. 基于 OrcaFlex 的钢悬链立管疲劳损伤预报. 海洋工程, 2024, 42(3): 1)
- [26] Zhang Y T, Yan J, Zuo D W, et al. Cable assembly simulation modeling under suspended condition. *J Syst Simul*, 2013, 25(7): 1513
(张永涛, 闫静, 左敦稳, 等. 悬挂约束下线缆装配仿真建模. 系统仿真学报, 2013, 25(7): 1513)
- [27] Zhang S, Tang Y F, Xu Y M, et al. Finite element simulation and experimental study on cable bending process of power cable bending mechanism. *Mach Des Res*, 2022, 38(3): 180
(张盛, 汤一帆, 徐勇明, 等. 电力线缆折弯机构的线缆弯曲过程有限元仿真与实验. 机械设计与研究, 2022, 38(3): 180)