

# 直流海缆敷设张力特性研究

刘利林<sup>1</sup>, 王岭<sup>2</sup>, 林秀浩<sup>1</sup>, 岳浩<sup>3</sup>, 刘文勋<sup>3</sup>

(1. 南方电网能源发展研究院有限责任公司, 广东 广州 510530;

2. 国网湖北省电力公司武汉供电公司, 湖北 武汉 430013;

3. 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 直流海缆是深远海风电送出的核心装备之一, 其施工质量对海上风电场的安全运行至关重要。基于悬链线计算模型, 提出了直流海缆敷设张力计算方法。利用计算模型, 研究了敷设水深、敷设速度及海缆铠装结构及材料对海缆敷设张力的影响规律, 并计算了海缆入水角与敷设速度之间的变化关系。基于计算结果所提出的直流海缆敷设张力及弯曲半径控制措施, 可指导深远海直流海缆工程建设。

**关键词:** 直流海缆; 敷设; 张力

中图分类号: TM 615 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)02-0070-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240212

## Research on Tension Characteristics of DC Submarine Cable Laying

LIU Lilin<sup>1</sup>, WANG Ling<sup>2</sup>, LIN Xiuhao<sup>1</sup>, YUE Hao<sup>3</sup>, LIU Wenxun<sup>3</sup>

(1. China Southern Power Grid Energy Development Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510530,

Guangdong, China; 2. State Grid Wuhan Electric Power Supply Company, Wuhan 430013,

Hubei, China; 3. Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd.

of CPECC, Wuhan 430071, Hubei, China)

**Abstract:** DC submarine cable is one of the most important equipment of long-distance offshore wind power transmission, and its construction reliability are critical to the safe operation of offshore wind farms. Based on the catenary calculation model, the calculation method for tension of DC submarine cable laying is proposed. Using the calculation model, the influence of laying depth, laying speed, submarine cable armor structure and materials on the tension of submarine cable laying is studied. The variation law between the angle of submarine cable entry and laying speed is also calculated. Based on the calculation results, the proposed control measures for the tension of DC submarine cable laying and bending radius can guide the construction of long-distance offshore DC submarine cable project.

**Key words:** DC submarine cable; laying; tension

## 0 引言

近年来, 中国海上风电蓬勃发展, 近海风电并网规模屡创新高。随着近海风电资源的开发殆尽, 发展深远海风电已经成为实现“碳达峰、碳中和”战略的重要抓手。

海上风电送出有交流输电和直流输电两种方式, 由于长距离条件下充电功率过大、电压升高以及

过电压等问题, 交流输电不能满足深远海大容量海上风电送出的需求。直流输电具有输送距离远、运行调控灵活等优点, 是大规模、远距离海上风电送出的理想方式。作为深远海风电送出的核心装备之一, 直流海缆的施工可靠性对海上风电场的安全运行至关重要。直流海缆敷设张力对施工效果、运行安全有着重要影响。敷设张力过大时, 海缆将难以随着埋设机的作业而沉入沟槽中, 且容易在洋流的作用下产生共振, 引起绝缘失效; 严重的情况下, 敷

设张力会超过允许值引起海缆本体结构损伤。敷设张力过小时,海缆容易在海床上产生扭转变形,无法得到有效保护。

受海洋地域环境、海洋水文、技术等条件的影响,中国海缆施工主要集中在近海区域,水深一般不超过 50 m,敷设长度在 100 km 内。在深远海海缆施工方面,中国施工企业缺少相关经验,直接制约了中国深远海风电大规模的开发利用。文献[1]采用数值计算方法分析了海底光缆在敷设过程中的动态特性,计算方法复杂,制约了在工程中的推广应用。文献[2]通过建模分析了海底电缆受力对作业设备的要求。

下面采用 CIGRE TB 623<sup>[3]</sup> 推荐的计算模型,对典型直流海缆敷设过程中的张力特性进行了计算,研究了影响张力的主要因素,并提出了控制张力的主要措施。研究成果对深远海直流海缆设计、施工及运行具有重要指导意义。

## 1 海缆敷设张力计算模型

### 1.1 悬链线计算模型

悬链线是一种曲线,因其形状与悬在两端的绳子在均匀引力作用下掉下来之形相似而名。适当选择坐标系后,悬链线的方程是一个双曲余弦函数。直流海缆敷设作业时,若敷设作业船在平静海面上以恒定速度作业,从敷设作业船滑轮放线点至海床触地点之间的海缆可视同悬链线,如图 1 所示。直流海缆简化成悬链线计算模型的假定条件为:1) 电缆无弯曲刚度;2) 电缆移动入水时为自然入水状态,不受额外拉力;3) 电缆的单位长度重量均匀相同。

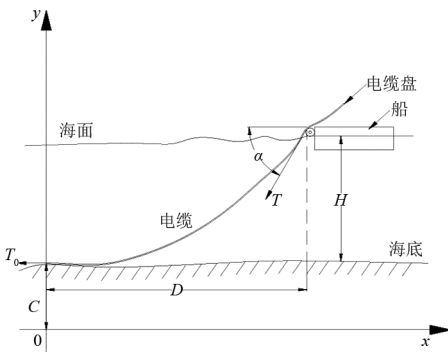


图 1 海缆悬链线敷设计算模型

除了非常浅的作业水深外,海缆的弯曲刚度大多数情况下可以忽略;敷设速度很慢时,施加于电缆上的拉力也可以忽略,电缆荷载沿线长基本呈均匀分布。因此,在这些假定条件下,悬链线模型可满足工程需要。图 1 中, $D$ 、 $H$  分别为海缆在敷设船悬挂点至海缆在海床触地点之间的水平及垂直距离, $m$ ;  $T_0$  为海缆在海床触地点水平张力(退扭力), $N$ ;  $T$  为敷设船出口海缆承受的张力, $N$ ;  $\alpha$  为电缆入水角, $^\circ$ 。因此,直流海缆敷设的悬链线模型可表示为:

$$y = c \cosh \frac{x}{c} \quad (1)$$

$$c = \frac{T_0}{W} \quad (2)$$

$$W = 1.08W_a - \pi r^2 \times 1000 \quad (3)$$

式中: $c$  为悬链线常数; $W$  为单位长度海缆在水中的重量, $N/m$ ;  $W_a$  为单位长度海缆在空气中的重量, $N/m$ ;  $r$  为海缆半径, $m$ 。

海缆悬挂点张力及海床触地点水平张力按式(4)一式(6)计算。

$$T = T_0 + WH \quad (4)$$

$$T_0 = T \cos \alpha \quad (5)$$

$$T = \frac{WH}{1 - \cos \alpha} T_0 = WH \frac{\cos \alpha}{1 - \cos \alpha} \quad (6)$$

式中, $H$  为海缆悬挂点至海缆在海床触地点之间垂直距离, $m$ 。

海缆敷设时应根据水深、电缆重量和需要的敷设张力控制入水角的范围,一般在  $30^\circ \sim 60^\circ$  之间,水深超过 30 m 时,角度应接近  $60^\circ$ 。入水角过大会使海缆产生扭转,入水角过小会导致海缆张力过大而损坏海缆。

海缆的入水角可由式(7)计算。

$$\cos \alpha = -\frac{W}{176rv^2} + \sqrt{\left(\frac{W}{176rv^2}\right)^2 + 1} \quad (7)$$

式中, $v$  为电缆敷设船的绝对速度, $m/s$ 。

海缆在海床触地点弯曲半径可由式(8)计算。

$$R_0 = c = \frac{H \cos \alpha}{1 - \cos \alpha} \quad (8)$$

海缆悬挂点至海床触地点之间的水平距离及水中海缆长度、重量按式(9)一式(11)计算。

$$D = H \cdot \frac{\sinh^{-1}(\tan \alpha)}{\sec \alpha - 1} \quad (9)$$

$$L = c \cdot \sinh \frac{D}{c} \quad (10)$$

$$W_1 = W \cdot L \quad (11)$$

式中: $D$ 为海缆悬挂点至海缆在海床触地点之间的水平距离,m; $L$ 为水中海缆长度,m; $W_1$ 为水中自由悬挂的电缆重量,N。

## 1.2 海缆张力分配计算

海缆敷设过程中,海缆导体和铠装的张力分配与两层结构的截面成正比,可按式(12)一式(13)计算。

$$T_{Co} = \frac{A_{Co} \cdot E_{Co}}{A_{Co} \cdot E_{Co} + A_{Ar} \cdot E_{Ar}} \cdot T \quad (12)$$

$$T_{AR} = T - T_{Co} \quad (13)$$

式中: $T_{Co}$ 为导体承受的张力,N; $T_{AR}$ 为铠装层承受的张力,N; $A_{Co}$ 为导体截面, $\text{mm}^2$ ; $E_{Co}$ 为导体层弹性模量, $\text{N}/\text{mm}^2$ ; $A_{Ar}$ 为铠装层截面, $\text{mm}^2$ ; $E_{Ar}$ 为铠装层弹性模量, $\text{N}/\text{mm}^2$ 。

## 2 海缆敷设张力影响因素分析

### 2.1 张力计算边界条件

以某 $\pm 250$  kV 交联聚乙烯电缆直流海缆为例进行敷设张力计算,海缆结构如图 2 所示,海缆参数如表 1 所示。海缆铜导体截面为  $2500 \text{ mm}^2$ ,弹性模量为  $10\,000 \text{ N}/\text{mm}^2$ ,抗拉强度为  $70 \text{ N}/\text{mm}^2$ ;铠装层镀锌钢丝单丝外径为  $6.0 \text{ mm}$ ,共 75 根镀锌钢丝,弹性模量为  $205\,000 \text{ N}/\text{mm}^2$ ,镀锌钢丝单位抗拉强度为  $350 \text{ N}/\text{mm}^2$ ,铠装层总截面为  $2121 \text{ mm}^2$ 。

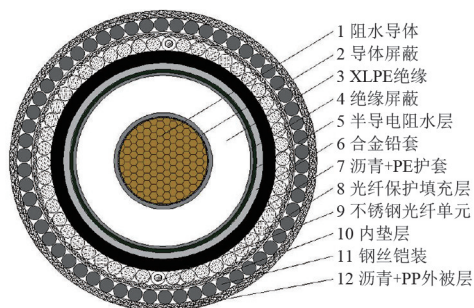


图 2 直流海缆结构

根据材料抗拉强度和对应的截面积,计算得到海底电缆导体允许承受的最大张力为  $175 \text{ kN}$ ,铠装

层允许承受的最大张力为  $742 \text{ kN}$ 。根据式(12)计算得到铠装层承受的张力占海底电缆纵向张力的  $94.6\%$ 。因此,敷设施工时,海缆张力主要靠铠装层承受,导体承受的张力非常小。由铠装层允许承受最大张力推算得到海缆能够承受的最大张力为  $785 \text{ kN}$ 。

表 1 直流海缆参数表

名称	数值
导体标称截面/ $\text{mm}^2$	2500
型线阻水导体外径/ $\text{mm}$	57.7
半导体捆扎带厚度/ $\text{mm}$	0.27
半导体捆扎带外径/ $\text{mm}$	58.8
导体屏蔽厚度/ $\text{mm}$	2.0
导体屏蔽外径/ $\text{mm}$	62.8
XLPE 绝缘厚度/ $\text{mm}$	20.0
XLPE 绝缘外径/ $\text{mm}$	102.8
绝缘屏蔽厚度/ $\text{mm}$	1.2
绝缘屏蔽外径/ $\text{mm}$	105.2
半导体阻水层厚度/ $\text{mm}$	2.0
半导体阻水层外径/ $\text{mm}$	109.2
铅套厚度/ $\text{mm}$	4.1
铅套外径/ $\text{mm}$	117.4
聚乙烯护套厚度/ $\text{mm}$	3.9
聚乙烯护套外径/ $\text{mm}$	125.4
光单元保护层厚度/ $\text{mm}$	5.5
光纤单元直径/ $\text{mm}$	5.0
内衬层厚度/ $\text{mm}$	1.5
钢丝铠装层厚度/ $\text{mm}$	5.2
铠装外径/ $\text{mm}$	149.8
防腐层+外被层厚度/ $\text{mm}$	3.8
海缆近似外径/ $\text{mm}$	157.4
海缆在空气中单位长度质量/ $(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	634

### 2.2 影响因素分析

#### 2.2.1 海缆敷设张力与水深的关系

由式(6)计算得到敷设速度为  $15 \text{ m/s}$  时,海缆在船尾(即悬挂点)承受的张力与水深关系如图 3 所示。从图中可知,敷设水深增加,海缆承受的张力随之线性增加。在敷设速度为  $15 \text{ m/s}$ 、海缆能够承受的最大纵向张力为  $785 \text{ kN}$  时,对应的最大敷设水深约为  $275 \text{ m}$ 。

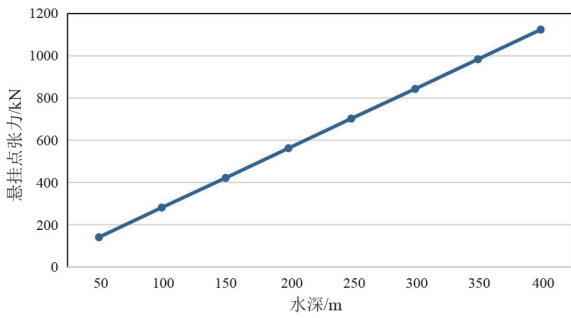


图3 海缆敷设张力与水深的关系

### 2.2.2 海缆敷设张力与敷设速度的关系

由式(6)、式(7)计算得到水深 50 m 时海缆在船尾(即悬挂点)承受的张力与敷设速度关系如图 4 所示。从图 4 可知,海缆承受的张力随敷设速度的增加而增加,这是由于敷设速度增加导致海缆与海床夹角减小,引起张力增加。水深 50 m 条件下,敷设速度为 5 m/s 时,海缆张力仅为 10.77 kN;敷设速度为 20 m/s 时,海缆张力增加到 261.39 kN;而敷设速度超过 20 m/s 后,张力增加的速度迅速加大。结合海缆能够承受的最大张力,敷设速度在 30 m/s 以内时,海缆悬点处承受的张力均不会超过允许值,因此在深远海施工时,敷设速度应严格控制不超过 30 m/s,这样对控制敷设张力、保证施工质量和安全具有重要意义。

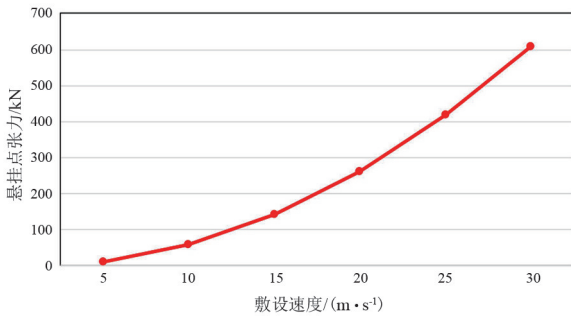


图4 海缆敷设张力与敷设速度的关系

### 2.2.3 海缆入水角与敷设速度的关系

敷设速度除了影响海缆张力外,还会影响海缆入水角,由式(7)计算得到海缆入水角与敷设速度关系如图 5 所示。从图 5 可知,海缆入水角随敷设速度的增加而减小。敷设速度增加时,海缆所受张力迅速增加,导致入水角度减小。结合海缆敷设张力与速度的关系,海缆在近海及潮间带敷设时,敷设速度建议控制在 10 m/s 以下,对应的入水角应不超过 60°;在深远海施工时,敷设速度建议控制在 20~30 m/s,入水角应不超过 30°。

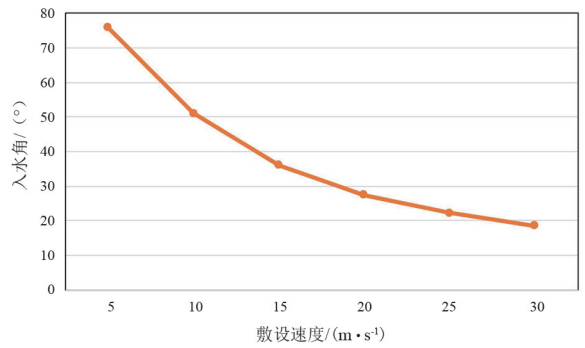


图5 海缆入水角与敷设速度的关系

### 2.2.4 海缆敷设张力与铠装结构及材料的关系

对于采用镀锌钢丝铠装的深海直流海缆工程,当海缆承受张力超过材料抗拉强度时,需要提高海缆铠装层机械强度,采用双层铠装或者抗拉强度更高的铠装材料。初步考虑在原有 75 根镀锌钢丝的基础上增加一层钢丝,以及采用抗拉强度为 800 N/mm<sup>2</sup>的磷青铜两种方案下,计算海缆敷设张力与水深的关系。

采用双层镀锌钢丝铠装时,内层钢丝铠装的数量为 75 根,外层钢丝铠装的数量为 85 根。采用式(12)计算得到铠装层承受的张力占海缆总张力的 97.4%。由铠装层承受最大张力允许值推算得到海缆能够承受的最大张力为 1626 kN,如表 2 所示。敷设速度为 15 m/s 时,对应的最大敷设水深约为 575 m;敷设速度为 25 m/s 时,对应的最大敷设水深约为 195 m。

采用抗拉强度为 800 N/mm<sup>2</sup>的单层磷青铜丝(弹性模量 113 000 N/mm<sup>2</sup>)铠装,计算得到铠装层承受的张力占海缆总张力的 90.6%。由铠装层承受张力允许值推算得到海缆能够承受的最大张力为 1852 kN,如表 2 所示。敷设速度为 15 m/s 时,对应的最大敷设水深约为 657 m;敷设速度为 25 m/s 时,对应的最大敷设水深约为 222 m。

表2 铠装结构及材料参数

铠装材料	单层 镀锌钢丝	双层 镀锌钢丝	单层 磷青铜丝
铠装截面/mm <sup>2</sup>	2121	4524	2121
抗拉强度/(N·mm <sup>-2</sup> )	350	350	800
铠装层允许张力/kN	742	1583	1696
铠装层张力占海缆 张力比值/%	94.6	97.4	90.6
海缆承受最大张力/kN	785	1626	1852

因此,对于水深较大的直流送出海缆工程,为了

确保海缆敷设安全,应全面提升铠装层设计强度,采用双层铠装或者抗拉强度更高的铠装材料。

### 3 海缆敷设张力控制措施

从前面计算可知,海缆敷设过程中,影响张力的因素非常多。为了确保海缆本体以及敷设施工作业安全,建议采取如下措施对海缆张力进行控制。

1)海缆敷设入水前,应采取退扭措施,减小海床触地点水平张力,避免电缆发生扭结。对于深远海长距离的直流送出海缆,推荐采用旋转水平转盘实现退扭。

2)海缆敷设过程中,应实时监测海缆入水角及张力。入水角是敷设张力和速度的综合反映,当敷设速度过快时,入水角增大,需及时用盘缘刹车或履带牵引机制动;反之则应减小制动力,甚至要送出海缆。

3)选用合理的海缆铠装结构。从前述分析可知,与单层镀锌圆钢丝铠装相比,采用双层钢丝铠装或者抗拉强度更高的铠装材料时,海缆能承受的纵向张力和适用的水深均大幅增加。在工程设计阶段,应结合勘察资料准确计算海缆敷设过程中的最大张力,进而针对性选择铠装层结构及材料。常用的海缆铠装结构有单层铠装、双层铠装、组合铠装及扁钢(铜)丝铠等,其中常用于大深水工况的一般为双层铠装及扁钢(铜)丝铠。

### 4 结 论

直流海缆是深远海风电送出的核心装备之一,其施工质量对海上风电场的安全运行至关重要。上面采用 CIGRE TB 623 推荐的计算模型,研究了直流海缆敷设张力特性。

直流海缆敷设张力计算采用悬链线模型,通过计算发现,海缆敷设张力主要靠铠装层承受,一般在 95%左右,导体承受的张力非常小。敷设水深及敷设速度增加时,海缆承受的张力随之增加,根据理论计算值,敷设速度宜控制在 20~30 m/s,实际施工时可适当减少,以保证施工安全。海缆入水角随敷设速度的增加而减小,水深超过 30 m 时,角度应接近 60°。对于水深较大的直流送出海缆工程,应全面提升铠装层设计强度,采用双层铠装或者抗拉强度更高的铠装材料,并在敷设前充分退扭,敷设过程中应

实时监测海缆入水角及张力。所做研究结论对深远海直流海缆工程建设具有指导意义。

#### 参考文献

- [1] 张太佶,胡晓为.海底电缆在敷设中的受力分析[J].船舶,2009,20(3):15-20.
- [2] 卢正通,乐彦杰,吴颖君,等.海底电缆施工作业机械受力建模分析[J].电气技术与经济,2020(4):1-5.
- [3] Recommendations For Mechanical Testing of Submarine Cables: CIGRE TB 623-2015[S].
- [4] 电力规划设计总院.城市电力电缆线路设计技术规定:DL/T 5221—2016[S].北京:中国计划出版社,2016.
- [5] 曹淑刚,张吉,孙小钎,等.考虑弯曲刚度的高压海缆敷设受力分析[J].太阳能学报,2019,40(10):3009-3016.
- [6] 岳浩,吴高波,李健,等.均匀流作用下海底电缆涡激振动的试验研究[J].电力勘测设计,2019(9):7-13.
- [7] 姚兴隆,迟岩,韩毅平,等.考虑船舶粘性阻尼的海缆敷设及登陆分析[J].光通信研究,2020(2):30-35.
- [8] 廖星,李健,岳浩,等.洋流作用下海底电缆稳定性研究[J].电力勘测设计,2020(2):9-15.
- [9] 应启良,魏东,高小庆,等.我国高压及超高压交联聚乙烯绝缘电力电缆的应用与发展[J].电线电缆,2001(3):3-9.
- [10] 乐彦杰,郑新龙,黄崇武,等.海底电缆张力弯曲试验装置结构受力有限元分析[J].机械科学与技术,2021,40(9):1385-1390.
- [11] 吴庆华,马凌,岳浩,等.500 kV 海南联网工程海底电缆线路设计[J].上海电气技术,2021,14(3):5-9.
- [12] 张洪亮,张建民,于洪森,等.高压电缆大截面分割导体焊接后的机械性能及缓冲阻水层设计[J].电线电缆,2018(4):36-39.

#### 作者简介:

刘利林(1983),男,硕士,高级工程师,研究方向为输电工程技术;

王 岭(1991),男,硕士,工程师,研究方向为输变电工程管理;

林秀浩(1972),男,高级经济师,研究方向为输变电技术管理;

岳 浩(1988),男,硕士,高级工程师,研究方向为输电工程技术;

刘文勳(1982),男,硕士,高级工程师,研究方向为输电工程技术。

(收稿日期:2023-09-15)