

# Structural Design of Marine Umbilical Armored Wire

Hongcheng Chen, Haiyan Guo\*, Wenqing Liu, Jingjing Yu

College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong  
Email: [chenhongcheng@stu.ouc.edu.com](mailto:chenhongcheng@stu.ouc.edu.com), [hyguo@ouc.edu.cn](mailto:hyguo@ouc.edu.cn)

Received: May 19<sup>th</sup>, 2019; accepted: June 3<sup>rd</sup>, 2019; published: June 10<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

Armored steel wire is an important strength component of the umbilical, which can bear the load of stretching and torsion in complex marine environment and can protect the central core. In order to ensure the torsion balance and stress balance of umbilical, the armored steel wire is usually designed as two or more layers and wound outside the central core in opposite directions. In this paper, a theoretical design method of armored steel wire of umbilical is discussed, and a theoretical model of double armored umbilical is established. The results show that the spiral angle and diameter of the armored wire have a certain effect on the mechanical strength of the umbilical.

## Keywords

Umbilical, Armored Steel Wire, Mechanical Strength, Structural Design

---

# 海洋脐带缆铠装钢丝的结构设计

陈洪程, 郭海燕\*, 刘文青, 于晶晶

中国海洋大学工程学院, 山东 青岛  
Email: [chenhongcheng@stu.ouc.edu.com](mailto:chenhongcheng@stu.ouc.edu.com), [hyguo@ouc.edu.cn](mailto:hyguo@ouc.edu.cn)

收稿日期: 2019年5月19日; 录用日期: 2019年6月3日; 发布日期: 2019年6月10日

---

## 摘要

铠装钢丝是脐带缆的重要强度构件, 起到承担复杂海洋环境中的拉伸、扭转等荷载和保护中心内核的作用。为保证脐带缆扭转平衡和应力平衡, 工程中通常将铠装钢丝设计成双层或多层且异向缠绕在中心内

\*通讯作者。

核外。本文论述了一种海洋脐带缆铠装钢丝的理论设计方法,建立了双层铠装脐带缆理论模型。结果表明,铠装钢丝的螺旋角度和直径对海洋脐带缆的机械强度有一定的影响。

## 关键词

脐带缆, 铠装钢丝, 机械强度, 结构设计

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

针对传统海上生产平台存在建设周期长、成本高和抵抗灾害能力弱等问题,水下生产系统逐渐成为深水油气资源开发的主流模式[1]。海洋脐带缆是一种海洋柔性管缆,是顶部浮体与水下生产系统以及采油树之间的纽带,被称为运输海洋油气的“生命线”[2]。铠装钢丝作为脐带缆的强度构件,可有效抵抗复杂深海环境中的拉伸荷载和疲劳荷载[3]。

铠装钢丝结构分析和设计是脐带缆设计的重要内容。国内外有许多专家学者对此做了大量的研究:Hruska [4] [5]在忽略螺旋钢丝抗弯能力的前提下,分析了单根螺旋钢丝的拉伸行为并叠加,即得到了其整体拉伸刚度。Knapp [6]针对脐带缆螺旋构件的拉扭耦合现象,利用变分原理分别推导出了螺旋构件在不同约束条件下的拉伸和扭转刚度,这是螺旋缠绕结构拉扭耦合的里程碑。然后 Knapp [7]指出,当脐带缆铠装层为两层或多层时,为保证扭转平衡,通常将铠装钢丝反向铺设,且铠装钢丝螺旋角度和根数等相关参数应该满足一定的扭转平衡方程。国内学者周学军[8]等在三维空间几何变换的基础上,研究了铠装钢丝在空间缠绕的规律,提出了一种铠装脐带缆较为精确的建模方法,但建模较为复杂,在实际中应用较为困难。杨志勋[9]研究表明,铠装钢丝尺寸对脐带缆截面力学性能影响较大,且分析了单根铠装钢丝最小拉伸力、最大允许拉力与其螺旋角度、半径的关系。张梁[10]等引入经验参数,对单根铠装钢丝承担拉伸和扭转荷载时的刚度和应力进行了推导,但进行分析时只考虑了铠装钢丝的作用而忽略了中心内核的贡献。

以上研究大多是在忽略中心内核作用的前提下研究单根铠装钢丝的力学性能,没有考虑铠装钢丝层对脐带缆整体的影响。本文首先建立了数学模型,推导了铠装钢丝数量与其直径、螺旋角度之间的关系。在此基础上又探讨了当铠装钢丝直径或螺旋角度一定时,其螺旋角度或直径变化对脐带缆整体截面力学性能的影响。

## 2. 脐带缆铠装钢丝尺寸设计

双层铠装脐带缆是在脐带缆中心内核缠绕两层异向的铠装钢丝形成铠装层,并裹上外护套而构成。由于铠装钢丝的数量随着其螺旋角度和直径的变化而变化,故进行铠装钢丝设计时需要对其数量进行探讨。选取铠装层内层的单根螺旋钢丝,将其沿着脐带缆轴线展开,如图1所示。

对铠装钢丝数量的推导时,可基于以下假定[11]:

- 1) 平截面假定,即变形前后螺旋铠装钢丝截面保持平整,伸长和扭转等变形量相等。
- 2) 小变形假定,即在线性分析过程中,管缆的应变参数要远小于1。
- 3) 轴向构件和螺旋构件材质均符合均匀、各向同性和线弹性的假定。

同时考虑到铠装钢丝实际上有间隙,为简化模型,假定铠装钢丝紧密排布。

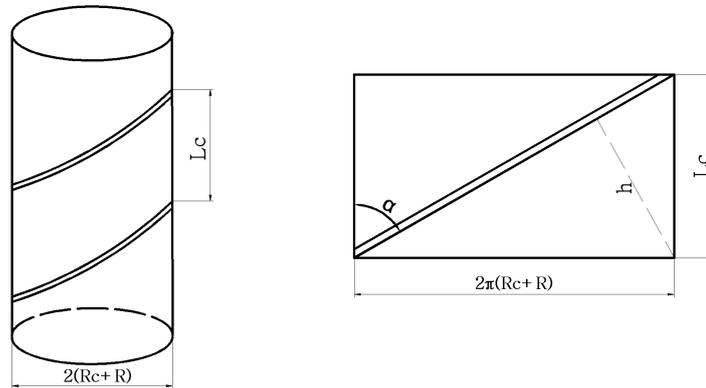


Figure 1. Schematic diagram of helical wire along the central cylinder  
图 1. 螺旋钢丝沿中心圆柱体轴向剪开示意图

其中,  $R_c$  为中心圆柱体的半径,  $R$  为铠装钢丝的半径,  $\alpha$  螺旋角度,  $L_c$  为螺旋节距。

由几何关系可知, 钢丝直径沿着轴向方向的投影长度为  $2R/\sin \alpha$ 。

在紧密缠绕情况下, 内层铠装钢丝数量约束条件为

$$n_{\text{内}} \cdot 2R/\sin \alpha \leq L_c = 2\pi(R_c + R)/\tan \alpha$$

即

$$n_{\text{内}} \leq \frac{\pi(R_c + R)\cos \alpha}{R} \quad (1)$$

同理可得外层铠装钢丝的数量

$$n_{\text{外}} \leq \frac{\pi(R_c + 3R)\cos \alpha}{R} \quad (2)$$

且  $n_{\text{内}}$ 、 $n_{\text{外}}$  应取整数。

### 3. 脐带缆铠装钢丝的强度设计

对于铠装脐带缆, 其拉伸刚度  $EA$  和扭转刚度  $GJ$  均与边界条件有关, 计算公式[5]如下:

拉伸刚度:

$$\text{可以扭转时 } EA = k_{11} - k_{12} \frac{k_{21}}{k_{22}} \quad (3)$$

$$\text{不可扭转时 } EA = k_{11} \quad (4)$$

$$\text{可以拉伸时 } GJ = k_{22} - k_{21} \frac{k_{12}}{k_{11}} \quad (5)$$

$$\text{不可拉伸时 } GJ = k_{22} \quad (6)$$

上述各式中各项系数的表达式分别为:

$$k_{11} = \sum_{i=1}^n \left[ E_i A_i \left( 1 - \frac{\Theta R_c}{2 R_i} \tan^2 \alpha_i \right) \cos^3 \alpha_i \right] + E_c A_c \quad (7)$$

$$k_{12} = \sum_{i=1}^n E_i A_i R_i \sin \alpha_i \cos^2 \alpha_i \quad (8)$$

$$k_{21} = \sum_{i=1}^n E_i A_i R_i \left( 1 - \frac{\Theta R_c}{2 R_i} \tan^2 \alpha_i \right) \sin \alpha_i \cos^2 \alpha_i \quad (9)$$

$$k_{22} = \sum_{i=1}^n E_i A_i R_i^2 \sin^2 \alpha_i \cos \alpha_i + G_c J_c \quad (10)$$

式中， $E_i A_i$  为螺旋构件的抗拉刚度； $E_c A_c$ 、 $G_c J_c$  分别为轴向构件的抗拉刚度和抗扭刚度； $R_i$  是节圆半径； $R_c$  是螺旋构件接触半径； $\alpha$  是螺旋构件的螺旋角度； $\Theta = 0$  时，中心内核为刚性， $\Theta = 1$  时，中心内核不可压缩。

### 3.1. 铠装脐带缆理论分析模型

双层铠装脐带缆由中心内核、双层铠装钢丝以及外护套组成，其中中心内核从内到外分别是裹有护套的中心钢管、螺旋管件层和内层护套。本节选用了某工程实例的脐带缆，中心内核的螺旋管件螺旋角度均为  $12^\circ$ ，模型见图 2，中心内核结构尺寸见表 1，材料特性见表 2。由于铠装钢丝为螺旋缠绕结构，故脐带缆会产生拉扭耦合效应，其整体拉伸或者扭转刚度会随着约束条件的变化而变化。当脐带缆受扭时，可设允许拉伸和不允许拉伸两种约束条件；当脐带缆受拉时，可设允许扭转和不允许扭转两种约束条件。

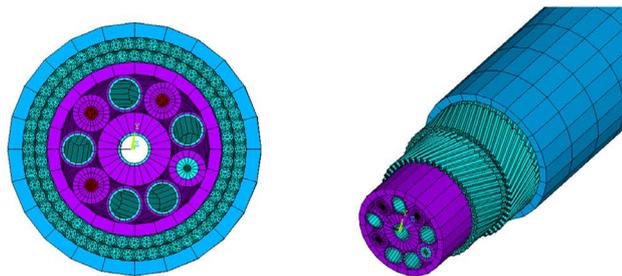


Figure 2. Model of double armoured umbilical  
图 2. 双层铠装脐带缆模型

Table 1. Dimension of umbilical central core

表 1. 脐带缆中心内核尺寸

单元类型	外径/mm	壁厚/mm	截面面积/mm <sup>2</sup>
中心钢管	13.6	1.0	39.6
中心聚合物保护层	30.8	8.4	591.1
螺旋功能管件层	61.6	15.6	-
内层聚合物保护套	71.6	5.0	1046.15

Table 2. Material properties

表 2. 材料特性

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度/kg·m <sup>3</sup>
钢材	210	0.3	7800
铜导线	109	0.33	8900
聚合物	1.5	0.48	1000

### 3.2. 铠装钢丝螺旋角度的设计

本节均选定铠装钢丝半径为 2.5 mm。利用公式(1) (2)分别计算出铠装钢丝内外层数量,见表 3。基于此分别计算比较脐带缆整体拉伸和扭转强度随铠装钢丝螺旋角度的变化情况。在进行铠装钢丝螺旋角度和半径的设计时,由于外护套截面面积较小且弹性模量较小,可忽略外护套的贡献。

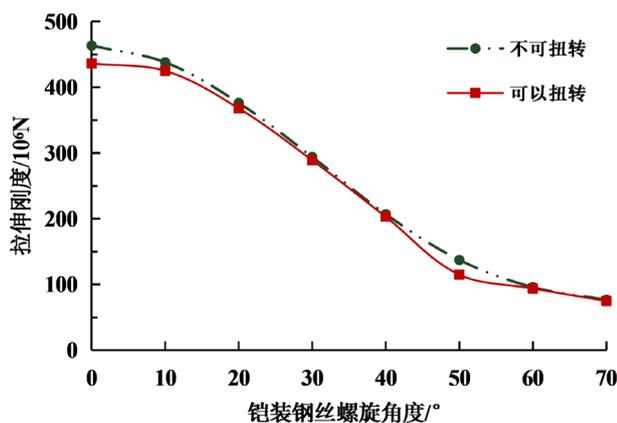
**Table 3.** Number of armoured steel wire

**表 3.** 铠装钢丝数量

螺旋角度/ $^{\circ}$	0	10	20	30	40	50	60	70
$n_{内}$	46	45	43	40	35	29	23	15
$n_{外}$	49	48	46	43	38	37	24	16

#### 3.2.1. 铠装钢丝螺旋角度与整体拉伸刚度的关系

不同约束条件下脐带缆整体拉伸刚度与铠装钢丝螺旋角度的关系见图 3。可知,两种约束条件下,脐带缆整体拉伸刚度随铠装钢丝螺旋角度的变化趋势一致。当铠装钢丝螺旋角度从  $0^{\circ}$  增加到  $10^{\circ}$  时,脐带缆整体拉伸刚度略有下降,但下降得并不明显, $10^{\circ}$  时脐带缆整体拉伸刚度约为  $0^{\circ}$  时的 95%。当铠装钢丝的螺旋角度从  $10^{\circ}$  增大到  $50^{\circ}$  时,脐带缆整体拉伸刚度下降速率进一步加大, $20^{\circ}$ 、 $30^{\circ}$ 、 $40^{\circ}$  和  $50^{\circ}$  时拉伸刚度约为  $0^{\circ}$  时的 81%、63%、45%和 30%,这表明,随着螺旋角度的增大,铠装钢丝的抗拉性能明显削弱。在脐带缆设计中要求铠装钢丝所提供的抗拉刚度能够达到整体的 60%~80%,因此,为保证脐带缆整体有较大的拉伸强度,通常将螺旋角度设置为不超过  $20^{\circ}$ 。



**Figure 3.** Relationship between torsional stiffness of umbilical and spiral angle of armored steel wire and spiral angle of armored steel wire

**图 3.** 脐带缆拉伸刚度与铠装钢丝螺旋角度的关系

#### 3.2.2. 铠装钢丝螺旋角度与整体扭转刚度的关系

图 4 为不同约束条件下脐带缆整体扭转刚度与铠装螺旋钢丝的关系。可知,两种约束条件下,脐带缆整体扭转刚度随铠装钢丝螺旋角度的变化趋势一致。铠装钢丝螺旋角度小于  $40^{\circ}$  时,脐带缆整体扭转刚度随着铠装钢丝螺旋角度的增大而增大,且近似为线性关系。当螺旋角度超过  $40^{\circ}$  时,脐带缆整体扭转刚度开始明显下降,螺旋角度超过一定角度后,扭转刚度反而低于  $0^{\circ}$  时的扭转刚度,这表明较大的螺旋角度会对脐带缆扭转刚度会产生不利的影响。为保证脐带缆整体有较大的扭转刚度,铠装钢丝的螺旋角度也不宜过大。

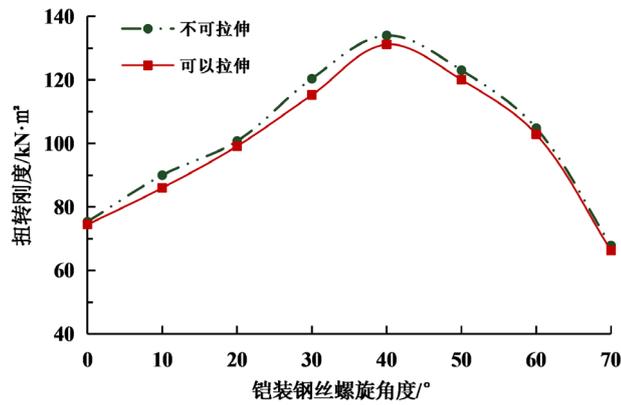


Figure 4. Relationship between torsional stiffness of umbilical and spiral angle of armored steel wire and spiral angle of armored steel wire  
 图 4. 脐带缆扭转刚度与铠装钢丝螺旋角度的关系

### 3.3. 铠装钢丝半径的设计

本节均设定铠装钢丝螺旋角度为 10°。利用公式(1) (2)分别计算出铠装钢丝内外层数量，见表 4。基于此分别计算比较脐带缆整体拉伸和扭转强度随铠装钢丝半径的变化情况。

Table 4. Number of armoured steel wire  
 表 4. 铠装钢丝数量

钢丝半径/mm	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
$n_{p1}$	223	112	75	56	45	38	33	29	26	23
$n_{p2}$	226	115	78	60	48	41	36	32	29	26

#### 3.3.1. 铠装钢丝半径与整体拉伸刚度的关系

图 5 反映了不同约束条件下脐带缆整体拉伸刚度与铠装钢丝半径的关系。可知，不同边界条件下，铠装脐带缆整体拉伸刚度均随着铠装钢丝半径的增大而增大，且近似为线性关系。

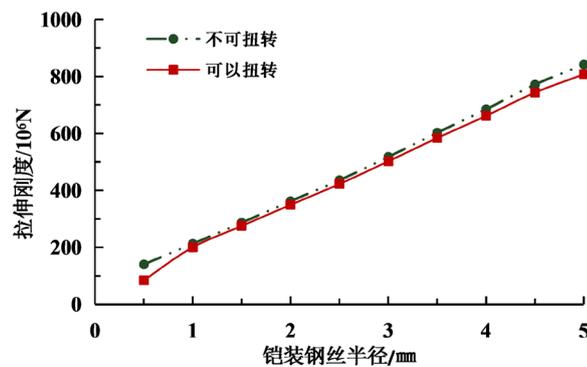


Figure 5. Relationship between tensile stiffness of umbilical and radius of armored steel wire and radius of armored steel wire  
 图 5. 脐带缆拉伸刚度与铠装钢丝半径的关系

#### 3.3.2. 铠装钢丝半径与整体扭转刚度的关系

脐带缆整体扭转刚度与铠装钢丝半径的关系见图 6。可知，不同边界条件下，铠装脐带缆整体扭转

刚度随着铠装钢丝半径的增大而增大，且近似为线性关系。理论上，铠装钢丝半径越大，脐带缆整体拉伸和扭转刚度也越大。然而钢丝密度较大，当采用较大直径时，脐带缆质量急剧增大，不能满足海底水动力稳定性、疲劳和干涉的要求。因此，为充分利用铠装钢丝的抗拉和抗扭性能，可在满足脐带缆外径重量比不超过  $10^{-3}$  m/kg 的前提下，合理选用截面尺寸较大的铠装钢丝。

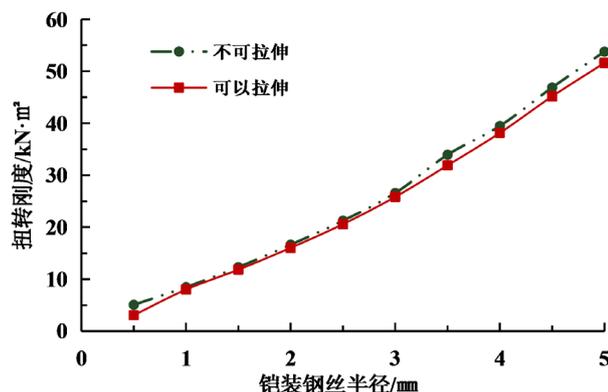


Figure 6. Relationship between torsional stiffness of umbilical and radius of armored steel wire and radius of armored steel wire

图 6. 脐带缆扭转刚度与铠装钢丝半径的关系

#### 4. 结论

本文建立了数学模型，推导了脐带缆铠装层结构设计参数数量、直径和螺旋角度的关系。基于此模型，探讨了脐带缆整体拉伸刚度、扭转刚度与铠装钢丝直径、螺旋角度的关系，得出如下结论：

1) 对脐带缆铠装钢丝初步设计时，由中心内核半径、铠装钢丝半径和螺旋角度即可初步确定各层铠装钢丝的数量。

2) 在两种约束条件下，脐带缆模型的拉伸刚度随着铠装钢丝螺旋角度的增大而减小，螺旋角度较小时，拉伸刚度削弱不明显，螺旋角度较大时，拉伸刚度急剧下降。脐带缆扭转刚度随着铠装钢丝螺旋角度的增大先缓慢增大而后迅速下降。

3) 在两种约束条件下，脐带缆模型的拉伸刚度和扭转刚度均随着铠装钢丝半径的增大而增大，且近似为线性关系。工程中可在满足外径重量比的前提下，合理选用半径较大的铠装钢丝。

#### 参考文献

- [1] 李志刚, 贾鹏, 王洪海, 张宁, 王立权. 水下生产系统发展现状和研究热点[J]. 哈尔滨工程大学学报, 1-8.
- [2] 王玮, 孙丽萍, 白勇. 水下油气生产系统[J]. 中国海洋平台, 2009, 24(6): 41-45.
- [3] Yue, Q.J., Lu, Q.Z., Yan, J. and Zheng, J.X. (2013) Andrew Palmer. Tension Behavior Prediction of Flexible Pipelines in Shallow Water. *Ocean Engineering*, **58**, 201-207. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.11.002>
- [4] Hruska, F.H. (1951) Calculation of Stresses in Wire Ropes. *Wire and Wire Products*, **26**, 766-767, 799-801.
- [5] Hruska, F.H. (1952) Radial Forces in Wire Ropes. *Wire and Wire Products*, **27**, 459-463.
- [6] Knapp, R.H. (1979) Derivation of a New Stiffness Matrix for Helically Armoured Cables Considering Tension and Torsion. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, **14**, 515-529. <https://doi.org/10.1002/nme.1620140405>
- [7] Knapp, R.H. (1981) Torque and Stress Balance Design for Helically Armoured Cables. *Journal of Engineering for Industry*, **103**, 61-66. <https://doi.org/10.1115/1.3184460>
- [8] 周学军, 王瑛剑, 伍先俊, 等. 一种精确海缆铠装钢丝几何建模法探讨[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(15):

80-83.

- [9] 杨志勋. 脐带缆结构设计与分析方法研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2012: 33-35.
- [10] 张梁, 丁伟宸, 徐霄龙, 等. 脐带缆铠装钢丝力学性能研究[J]. 中国造船, 2015(56): 42-51.
- [11] Custodio, A.B. and Vaz, M.A. (2002) A Nonlinear Formulation for the Axisym-Metric Response of Umbilical Cables and Flexible Pipes. *Applied Ocean Research*, **24**, 21-29. [https://doi.org/10.1016/S0141-1187\(02\)00007-X](https://doi.org/10.1016/S0141-1187(02)00007-X)

**知网检索的两种方式:**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2167-6631, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [met@hanspub.org](mailto:met@hanspub.org)