

DOI: 10.3901/JME.2009.01.309

钢丝绳中缺陷的描述方法

陈厚桂¹ 李晋² 康宜华³ 武新军³

- (1. 武汉大学电气工程学院 武汉 430072;
2. 周口师范学院物理与电子工程系 周口 466000;
3. 华中科技大学机械科学与工程学院 武汉 430074)

摘要: 研究钢丝绳及钢丝绳中缺陷的描述方法。基于对钢丝绳结构和承载特性的分析, 提出一个描述钢丝绳结构的矢量, 这个矢量由6个结构参数构成, 它们是股层号、股号、股的旋转角(简称股旋角)、钢丝层号、钢丝号和钢丝的旋转角(简称丝旋角)。为了引申出缺陷的描述方法, 定义钢丝绳中距离的广义度量; 定义钢丝、钢丝绳、断丝和磨损, 钢丝用8个参数描述, 它们是上述的6个结构参数和新增加的两个参数, 新增加的两个参数是丝旋角变动和钢丝直径; 钢丝绳定义成钢丝的集合; 断丝用上述的6个结构参数和新增加的两个参数描述, 新增加的两个参数是断口宽度和钢丝直径; 磨损用上述的6个结构参数和新增加的两个参数描述, 新增加的两个参数是丝旋角变动和磨损比。以密封钢丝绳和六股钢丝绳为例, 说明该描述方法的应用。实例表明, 在新描述方法的支持下, 钢丝绳中的缺陷可以被抽象地用数学语言进行描述。

关键词: 钢丝绳 试样 缺陷 描述方法

中图分类号: TP11 TP391

Description Method of Wire Rope Flaw

CHEN Hougui¹ LI Jin² KANG Yihua³ WU Xinjun³

- (1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072;
2. Department of Physics and Electronic Engineering, Zhoukou Normal University, Zhoukou 466000;
3. School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract: A novel description method is developed to study wire rope and its defects. The structure and loading performance of wire ropes are analyzed to build a structure vector of wire rope, the vector comprises six structure parameters which are the number of strand layer, the number of strand, the rotation angle of strand, the number of wire layer, the number of wire and the rotation angle of wire. In order to explicate the description method of defects, a generalized metric of the distance in wires is defined; Wire, wire rope, broken wire and wire wear are defined. Wire is described by using eight parameters, and they are the six parameters mentioned above and two newly added parameters, i.e. the change of wire rotation angle and the diameter of wire. Wire rope is defined as a wire set. Broken wire is described by using six parameters mentioned above and two newly added parameters, i.e. the width of fracture and the diameter of wire. Wire wear is described by using the six parameters mentioned above and two newly added parameters, i.e. the change of wire rotation angle and the wear ratio. Two examples, locked-coil wire rope and six-strand wire rope, are taken to illustrate the application of this description method. The examples indicate that flaws in wire rope can be described abstractly by using mathematic language under the support of the new description method.

Key words: Wire rope Specimens Flaw Description method

0 前言

钢丝绳是现代工业普遍使用的一种承拉构件,

广泛应用于海洋工程^[1]、钻采^[2]、航空^[3]和桥梁^[4]等领域。安全性对钢丝绳非常重要, 特别是在一些特殊场合如桥梁、索道等, 如果出现钢丝绳断裂, 其后果将是灾难性的。因此, 对钢丝绳(如钢丝绳工作特性^[5-8], 钢丝绳无损检测方法^[9]等)的研究, 一直是学者所关注的重点。

研究钢丝绳的工作特性,最有效的方法是利用试验和试验数据对钢丝绳进行研究^[5],试验是其极其重要的部分。电磁法^[9]是应用最广泛的钢丝绳无损检测方法,是一门交叉科学,是物理学、信息学等不同学科的融合;在电磁探伤方法的研究中,需要制作大量的带有不同缺陷的钢丝绳试样,然后通过试验采集各种数据,最后基于试验数据研究信号处理和缺陷识别算法,因此试验也是其重要部分。对于基于试验的钢丝绳研究,如何制作标准试样非常关键,关系到钢丝绳研究的系统性和研究结论的完备性。

钢丝绳标准试样研究是研究如何配置和制作缺陷的课题,其核心是对钢丝绳缺陷集的研究,而对钢丝绳缺陷集的研究来说,缺陷的表达是其基础。目前主要用笛卡尔坐标描述钢丝绳中的缺陷^[6-8],即用缺陷在钢丝绳中的 x , y 和 z 坐标来定义缺陷的位置,用文字和图形描述缺陷的形状。这种描述方式在实际应用中存在以下不足。

(1) 钢丝绳缺陷之间的相对位置对钢丝绳的特性造成重要的影响,与钢丝绳的结构密切相关,现有描述方法不易表现钢丝绳的结构关系。

(2) 钢丝绳由数十甚至数百根钢丝扭结而成,钢丝的空间位置非常多,缺陷的组合非常复杂;现有描述方法在描述组合缺陷,特别是复杂组合缺陷时工作量很大。

(3) 现有描述方法缺乏对钢丝绳描述的系统性,容易造成研究对象的遗漏。

缺陷描述方法是钢丝绳研究的首要支撑,因此有必要针对钢丝绳的结构研究出一种描述钢丝绳缺陷的新方法,以弥补现有描述方法的不足,为钢丝绳标准试样构造的核心——缺陷集及标样空间的研究提供支持。

在文献[10]中,对缺陷集的构造和度量已经作了初步的阐述,本文主要研究缺陷的描述方法。

1 钢丝绳的描述方法

1.1 钢丝绳的结构和承载功能分析

钢丝绳是由钢丝组成的载荷自动分配系统,图 1 是典型钢丝绳的结构图。钢丝是一种典型的多次螺旋体,捻制时,钢丝首先绕股芯旋转形成绳股,此时的钢丝成为一次螺旋体;然后绳股绕绳芯旋转形成钢丝绳,此时的钢丝成为二次螺旋体。对于一些特殊用途的钢丝绳,钢丝绳会绕绳芯旋转使钢丝成为三次螺旋体。

描述钢丝绳几何特征的基本参数如下^[11]。

- (1) 尺寸:对于圆钢丝绳指其外接圆的直径。
- (2) 结构:指钢丝绳的结构形式。

(3) 捻向:指钢丝在股中和股在钢丝绳中的旋转方向。

(4) 捻距:指钢丝绳中的一股绕绳芯旋转一周,沿钢丝绳轴向走过的距离。

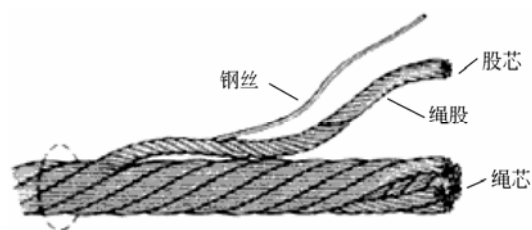


图 1 典型钢丝绳的结构图

研究表明,由于钢丝绳构造的独特性,除了其截面内总的截面积损失之外,缺陷的分布和集中程度也对钢丝绳的剩余承载力造成影响^[12]。此外,由于钢丝之间存在着挤压和摩擦,在经过恢复长度之后,缺陷对承载力的影响会逐渐消失^[13-14]。因此,对钢丝绳承载力造成影响的是恢复长度内缺陷的尺寸和分布,而不仅仅是缺陷的形状和尺寸。一种有效的缺陷描述方法不仅能反映出缺陷在截面内的位置以及缺陷之间的关系,而且能反映出缺陷在钢丝绳轴向的位置和缺陷之间的关系。

1.2 钢丝绳的描述方法

在经典的空间描述系统中,最常用的是笛卡尔坐标系(直角坐标系)、柱坐标系和球坐标系。

钢丝绳的承载是通过钢丝绳中的钢丝、钢丝层、钢丝股和股层实现的。图 2 是典型的多层股钢丝绳的截面图,它由三层绳股构成,最内层为绳芯,股数为 1,次外层的股数为 6,最外层的股数为 12。

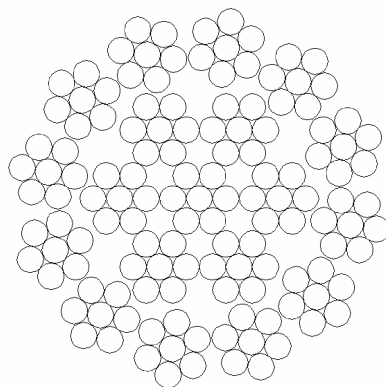


图 2 多层股钢丝绳的截面图

当描述该绳中的钢丝时,需要按顺序确定其所在的股层号,股号,股的螺旋角(简称股旋角),钢丝层号,钢丝号,钢丝的螺旋角(简称丝旋角)。

用股层号、股号、股旋角、钢丝层号、钢丝号和丝旋角 6 个参数构成的矢量表示钢丝中心的轨

迹，即

$$s=(n_{sl}, n_s, \varphi_s, n_{wl}, n_w, \varphi_w) \quad (1)$$

式中， n_{sl} 为股层号， n_s 为股号， φ_s 为股旋角， n_{wl} 为钢丝层号， n_w 为钢丝号， φ_w 为丝旋角。

为了引申定义出钢丝和缺陷，定义一个以式(1)中各参数的物理意义为坐标轴的广义结构坐标系，坐标系中的点为钢丝中心在钢丝绳中的位置。

在结构坐标系下，定义点之间距离的一个广义度量，即

$$d=s_2 - s_1 = (n_{sl}^{(2)}, n_s^{(2)}, \varphi_s^{(2)}, n_{wl}^{(2)}, n_w^{(2)}, \varphi_w^{(2)}) - (n_{sl}^{(1)}, n_s^{(1)}, \varphi_s^{(1)}, n_{wl}^{(1)}, n_w^{(1)}, \varphi_w^{(1)}) = (n_{sl}^{(2)} - n_{sl}^{(1)}, n_s^{(2)} - n_s^{(1)}, \varphi_s^{(2)} - \varphi_s^{(1)}, n_{wl}^{(2)} - n_{wl}^{(1)}, n_w^{(2)} - n_w^{(1)}, \varphi_w^{(2)} - \varphi_w^{(1)}) \quad (2)$$

式(2)中， φ_w 和 φ_s 可以通过股与丝之间的捻角关系转换得到，即

$$\varphi_w^{k,l} = \frac{r_s^i \cot \alpha_s^i \csc \alpha_s^i \tan \alpha_w^k}{r_w^k} \varphi_s^{i,j} \quad (3)$$

式中， $\varphi_w^{k,l}$ 为第 k 钢丝层第 l 根钢丝的螺旋角， r_s^i 为第 i 层股股芯的轨迹圆半径，第 α_s^i 为第 i 股层的捻角， α_w^k 为第 K 钢丝层的捻角， r_w^k 为第 k 层钢丝轴心的轨迹圆半径， $\varphi_s^{i,j}$ 为第 i 层第 j 股钢丝股股芯的螺旋角。

对于图 2 所示的钢丝绳中的两点 $s_1=(1, 2, 20, 2, 1, 35)$ 和 $s_2=(2, 3, 60, 3, 3, 95)$ ，根据定义，其距离为 $(1, 1, 40, 1, 2, 60)$ ，表示两个实体点相差 1 个股层、1 个股号、 40° 股旋角、1 个钢丝层、2 个钢丝号和 60° 丝旋角。

对于图 2 所示钢丝绳中的两点 $s_1=(1, 2, 20, 2, 1, 35)$ 和 $s_2=(1, 2, 60, 2, 1, 95)$ ，根据定义，其距离为 $(0, 0, 40, 0, 0, 60)$ ，表示两个实体点相差 0 个股层、0 个股号、 40° 股旋角、0 个钢丝层、0 个钢丝号和 60° 丝旋角，说明两个点是同一根钢丝上的两个轴心点。

多层股钢丝绳结构参数见表 1。

表 1 多层股钢丝绳结构参数

参数名称	含义
D	多股钢丝绳的公称外径
N_s^i	第 i 股层的股数
α_s^i	第 i 股层的捻角
r_s^i	第 i 股层的股芯的轨迹半径
N_w^i	第 i 钢丝层的钢丝数
α_w^i	第 i 钢丝层的捻角
r_w^i	第 i 钢丝层的钢丝圆心的轨迹半径

将上述指标综合后，定义钢丝绳中的钢丝为

$$(n_{sl}, n_s, \varphi_s^{(o)}, n_{wl}, n_w, \varphi_w^{(o)}, \varphi_w^{(e)} - \varphi_w^{(s)}, d)$$

式中， n_{sl} 为钢丝所在股的股层号， n_s 为钢丝所在股的股号， n_{wl} 为钢丝所在层的层号， n_w 为钢丝号， $\varphi_s^{(o)}$ 为钢丝几何中心的股旋角， $\varphi_w^{(o)}$ 为钢丝几何中心的丝旋角， $\varphi_w^{(s)}$ 为钢丝始断面中心的丝旋角， $\varphi_w^{(e)}$ 为钢丝终断面中心的丝旋角， d 为钢丝直径。

钢丝绳可以定义成钢丝的集合，用钢丝集来描述，即

$$C = \{b_i | b_i = (n_{sl}^{(i)}, n_s^{(i)}, \varphi_s^{(o,i)}, n_{wl}^{(i)}, n_w^{(i)}, \varphi_w^{(o,i)}, \varphi_w^{(e,i)} - \varphi_w^{(s,i)}, d^{(i)}), i \in \mathbf{N}\}$$

1.3 与笛卡尔坐标的变换

下面分析与笛卡尔坐标的变换，建立图 3 所示的直角坐标系。

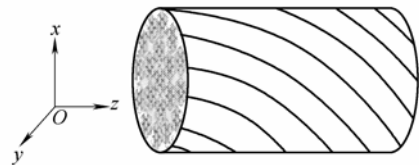


图 3 多层股钢丝绳的直角坐标关系

图 3 所示的股层、股及钢丝层之间的关系如图 4 所示，其中的 r_s^i 为第 i 层股的股芯圆的轨迹半径， $\beta_s^{i,j}$ 为第 i 层股第 j 股的起始角， $\varphi_s^{i,j}$ 为第 i 层股第 j 股的螺旋升角。

图 3 所示的股芯的几何关系如图 4a 所示。股芯 O' 在 Oxy 坐标系中的坐标为

$$\begin{pmatrix} x_{O'} \\ y_{O'} \end{pmatrix} = r_s^i \begin{pmatrix} \cos(\beta_s^{i,j} + \varphi_s^{i,j}) \\ \sin(\beta_s^{i,j} + \varphi_s^{i,j}) \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中， $\beta_s^{i,j}$ 为第 i 层第 j 股钢丝股股芯的起始角。

图 3 中钢丝的几何关系如图 4b 所示。钢丝圆心 O'' 在 Oxy 坐标系中的坐标为

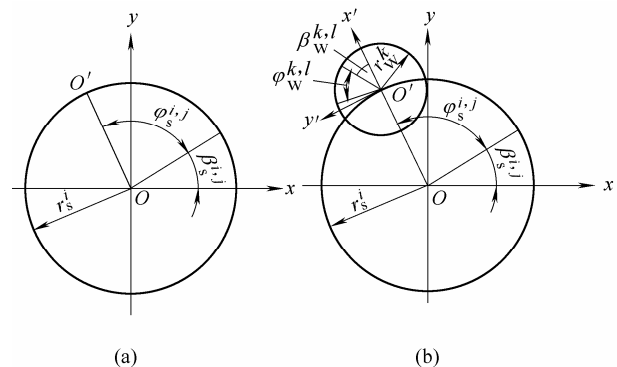


图 4 钢丝绳空间几何关系计算图

$$\begin{pmatrix} x_o'' \\ y_o'' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_o' \\ y_o' \end{pmatrix} + r_w^k \begin{pmatrix} \cos(\beta_s^{i,j} + \varphi_s^{i,j}) & -\sin(\beta_s^{i,j} + \varphi_s^{i,j}) \\ \sin(\beta_s^{i,j} + \varphi_s^{i,j}) & \cos(\beta_s^{i,j} + \varphi_s^{i,j}) \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos(\beta_w^{k,l} + \varphi_w^{k,l}) \\ \sin(\beta_w^{k,l} + \varphi_w^{k,l}) \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中, r_w^k 为第 k 层钢丝轴心的轨迹圆半径, $\beta_w^{k,l}$ 为第 k 钢丝层第 l 根钢丝的起始角, $\varphi_w^{k,l}$ 为第 k 钢丝层第 l 根钢丝的螺旋角。

根据钢丝绳的捻角关系, 有

$$z_{O'} = r_s^i \varphi_s^{i,j} \cot \alpha_s^i \quad (6)$$

$$z_{O''} = r_w^k \varphi_w^{k,l} \cot \alpha_w^k \sin \alpha_s^i \quad (7)$$

$$z_{O'} = z_{O''} \quad (8)$$

2 钢丝绳中缺陷的描述方法

缺陷的描述由缺陷的位置和几何形状构成。位置参数描述缺陷在钢丝绳中的位置, 包括股层号、股号、股旋角、钢丝层号、钢丝号和丝旋角。几何形状用缺陷两断面的距离和缺陷的截面形状参数描述, 缺陷的截面形状参数对圆股绳中的断丝指钢丝直径, 对圆股钢丝绳中的磨损指磨损深度或磨损比。

2.1 磨损类缺陷的描述方法

根据磨损的性质, 磨损可以分为两类: 一类是钢丝之间相对滑移造成的磨损, 其特征为沿钢丝螺旋状连续磨损; 另一类为钢丝绳与外部构件接触造成的磨损, 其特征为钢丝绳表面钢丝的非连续性磨损。钢丝磨损的断面形状如图 5a 所示, 图 5b 为钢丝磨损量计算示意图。

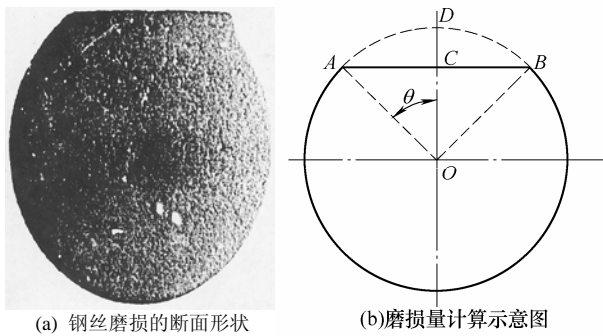


图 5 钢丝磨损量的断面形状和磨损计算示意图

在图 5b 所示的钢丝磨损量计算图中, 钢丝半径 OD 为 R , 磨损深度 CD 为 h , 钢丝的磨损面积为 $S_{ACBD} = S_{AOBD} - S_{AOBC}$, 定义钢丝的磨损比 $\varepsilon = S_{ACBD} / S_O$, 定义磨损深度比 $\sigma = h / R$, 其中 h 为钢丝的磨损深度。

分析可知, 钢丝的磨损比 ε 为 σ 的函数, 与钢丝绳的半径无关。通过磨损深度 h 或磨损深度比 σ

可以量化描述钢丝磨损截面的特征。表 2 是 σ 与 ε 对照表。

表 2 σ 与 ε 对照表

磨损深度比 σ	0.31	0.68	1.00	1.32	1.69
磨损比 ε	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9

磨损截面的形状参数可以通过磨损深度 h 或者磨损深度比 σ 来表征。

按照钢丝绳缺陷描述方法的定义, 磨损可以用磨损区几何中心的位置坐标 $(n_{sl}, n_s, \varphi_s, n_{wl}, n_w, \varphi_w)$, 两断面的长度 $(0, 0, \varphi_s^{(e)} - \varphi_s^{(s)}, 0, 0, \varphi_w^{(e)} - \varphi_w^{(s)})$ 以及磨损深度比 σ 描述。综合后, 定义钢丝绳中某处的磨损为

$$(n_{sl}, n_s, \varphi_s^{(o)}, n_{wl}, n_w, \varphi_w^{(o)}, \varphi_w^{(e)} - \varphi_w^{(s)}, \sigma) \quad (9)$$

式中, n_{sl} 为磨损的股层号, n_s 为磨损的绳股号, $\varphi_s^{(o)}$ 为磨损区几何中心的股旋角, n_{wl} 为磨损的钢丝层号, n_w 为磨损的钢丝号, $\varphi_w^{(o)}$ 为磨损区几何中心的丝旋角, $\varphi_w^{(e)}$ 为磨损始断面的丝旋角, $\varphi_w^{(s)}$ 为磨损终断面的丝旋角, σ 为磨损深度比。

磨损在钢丝绳中的轴向位置可以根据式(9), 参照式(6)~(8)给出。

2.2 断丝类缺陷的描述方法

断丝类缺陷的断口形状形式众多。从对承载力的影响角度考虑, 断口形状可以用等效垂直断口来描述, 如图 6 所示, 断口形状用断口等效宽度和钢丝直径描述。

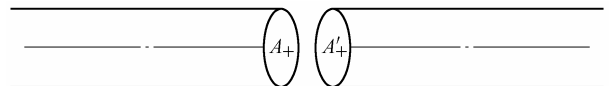


图 6 断丝计算简图

断丝可以用断口几何中心的位置坐标 $(n_{sl}, n_s, \varphi_s, n_{wl}, n_w, \varphi_w)$, 断口两断面的距离 $(0, 0, \varphi_s^{(e)} - \varphi_s^{(s)}, 0, 0, \varphi_w^{(e)} - \varphi_w^{(s)})$, 以及钢丝绳直径 d 描述。将上述指标综合后, 定义断丝为

$$(n_{sl}, n_s, \varphi_s^{(o)}, n_{wl}, n_w, \varphi_w^{(o)}, \varphi_w^{(e)} - \varphi_w^{(s)}, d) \quad (10)$$

式中, n_{sl} 为断丝的股层号, n_s 为断丝的绳股号, $\varphi_s^{(o)}$ 为断丝区几何中心的股旋角, n_{wl} 为断丝的钢丝层号, n_w 为断丝的钢丝号, $\varphi_w^{(o)}$ 为断丝区几何中心的丝旋角, $\varphi_w^{(e)}$ 为断丝始断面中心的丝旋角, $\varphi_w^{(s)}$ 为断丝终断面中心的丝旋角, d 为钢丝直径。

对于小断口断丝, $OO' \approx \overline{OO'}$, 断丝的定义式(10)中的 $\varphi_w^{(e)} - \varphi_w^{(s)}$ 用断口的等效宽度描述, 即小断口断丝为

$$(n_{sl}, n_s, \varphi_s^{(o)}, n_{wl}, n_w, \varphi_w^{(o)}, b, d) \quad (11)$$

式中， b 为断丝的等效断口宽度。

断丝在钢丝绳中的轴向位置可以根据式(10)或式(11)，参照式(6)~(8)给出。

3 应用实例

3.1 单股钢丝绳中的断丝

单股钢丝绳为所有钢丝绕相同的绳芯捻制而成，在描述断丝时 n_{sl} ， n_s 和 φ_s 为0，用 N 表示，依据断丝的定义式(11)，单股钢丝绳中的断丝描述为 $(N, N, N, n_{wl}, n_w, \varphi_w^{(o)}, b, d)$ 。

图7为密封钢丝绳中的断丝示意图。图示的密封钢丝绳外层Z形钢丝数为21根，钢丝规格为6mm；次外层钢丝数为16根，钢丝规格为5mm；内部为圆形钢丝，直径为3.6mm；钢丝层编号由外至内分别为1，2，3，4。在图7a、7b所示的位置发现6处断丝，断口宽度为1.5mm，用I，II，III，IV，V，VI标出，图7a截面的螺旋角为0°，图7b的螺旋角为70°，图中阴影部分标识的钢丝的标号为1，其他钢丝按逆时针方向编号。断丝描述如表3所示。

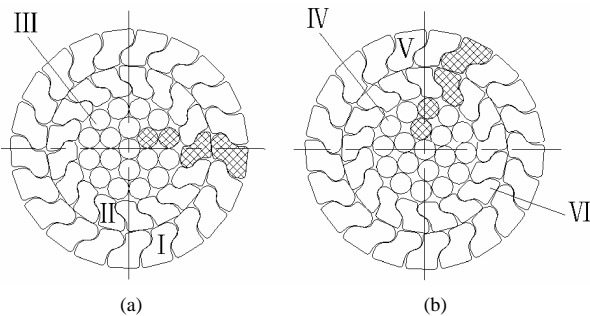


图7 密封钢丝绳缺陷位置示意图

表3 密封钢丝绳的断丝描述

断丝号	结构坐标	笛卡尔坐标表示
I	$(N, N, N, 1, 18, 0, 1.5, 6)$	坐标(5.3, -16.7, 0)，宽度1.5 mm，公称值6 mm
II	$(N, N, N, 2, 13, 0, 1.5, 5)$	坐标(-3.5, -11.2, 0)，宽度1.5 mm，公称值5 mm
III	$(N, N, N, 3, 5, 0, 1.5, 3.6)$	坐标(-4.9, 4.9, 0)，宽度1.5 mm，直径3.6 mm
IV	$(N, N, N, 3, 3, 70, 1.5, 3.6)$	坐标(-5.7, 4.0, 70)，宽度1.5 mm，直径3.6 mm
V	$(N, N, N, 1, 3, 70, 1.5, 6)$	坐标(-3.1, 17.2, 70)，宽度1.5 mm，公称值6 mm
VI	$(N, N, N, 2, 13, 70, 1.5, 5)$	坐标(9.4, -7.1, 70)，宽度1.5 mm，公称值5 mm

表3显示，I号断丝与V号断丝，II号断丝与VI号断丝，III号断丝与IV号断丝分别为同层钢丝；II号断丝与VI号断丝位同一根钢丝上出现的断丝，

断丝的相差为70°。

3.2 6股圆股钢丝绳中的断丝

由于6股钢丝绳不存在股层， n_{sl} 用 N 标示，依据断丝的定义式(11)，6股钢丝绳中的断丝描述为 $(N, n_s, \varphi_s^o, n_{wl}, n_w, \varphi_w^o, b, d)$ 。

图8为6股钢丝绳中的断丝示意图。图示的6股圆股钢丝绳的股数为6，每股钢丝层的钢丝数由内至外分别为12、6。组成钢丝的直径为1mm，外层钢丝的层号为1，次外层钢丝的层号为2。

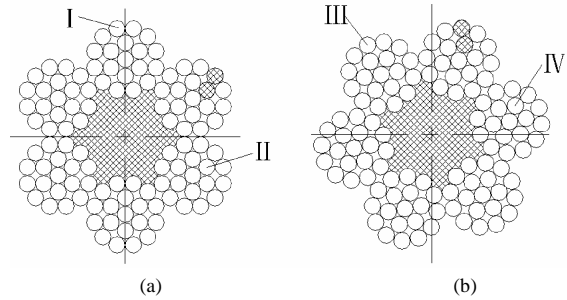


图8 6股钢丝绳中的断丝示意图

在图8a、8b所示的位置发现四处断丝，其断口宽度为1.5mm，用I，II，III，IV标出；图8a截面的螺旋角为0°，图8b中螺旋角为50°；图中阴影标示的钢丝的标号为1，其他钢丝按逆时针方向编号。6股钢丝绳的断丝描述如表4所示。

表4 6股钢丝绳的断丝描述

断丝号	结构坐标	笛卡尔坐标表示
I	$(N, 2, 0, 1, 1, 0, 1.5, 1)$	坐标(-1.0, 13.1, 0)，断口宽度1.5 mm，直径1 mm
II	$(N, 5, 0, 2, 2, 0, 1.5, 1)$	坐标(9.9, -3.8, 0)，断口宽度1.5 mm，直径1 mm
III	$(N, 2, 12, 1, 50, 70, 1.5, 1)$	坐标(-7.7, 10.7, 50)，断口宽度1.5 mm，直径1 mm
IV	$(N, 5, 50, 2, 2, 70, 1.5, 1)$	坐标(10.0, 3.5, 50)，断口宽度1.5 mm，直径1 mm

表4显示，I号断丝与III号断丝，II号断丝与IV号断丝为同层钢丝；II号断丝与IV号断丝为同一根钢丝上的断丝，断丝相差为50°；I号断丝与III号断丝为相邻钢丝上的断丝，断丝相差为50°。

对比和分析表明，用笛卡尔坐标描述断丝时，断丝的描述不但繁琐，而且有关断丝的结构信息不明显。用结构坐标描述断丝时，断丝的描述以及断丝的相对位置关系比较清晰。

4 结论

(1) 钢丝用股层号、股号、股旋角、钢丝层号、钢丝号、丝旋角变动和钢丝直径构成的矢量描述。钢丝绳描述成钢丝集。

(2) 磨损用股层号、股号、股旋角、钢丝层号、钢丝号、丝旋角变动和磨损比构成的矢量描述。

(3) 断丝用股层号、股号、股旋角、钢丝层号、钢丝号、断口宽度和钢丝直径构成的矢量描述。

参 考 文 献

- [1] CHAPLIN C R. Torsional failure of a wire rope mooring line during installation in deepwater[J]. *Engineering Failure Analysis*, 1998, 6(2): 67-82.
- [2] ZHANG D K, GE S R, QIANG Y H. Research on the fatigue and fracture behavior due to the fretting wear of steel wire in hoisting rope[J]. *Wear*, 2003, (255): 1 233-1 237.
- [3] GIGLIO M, MANES A. Bending fatigue tests on a metallic wire rope for aircraft rescue hoists[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2003, 10(2): 223-235.
- [4] TROY. Widest cable-stayed bridge in the world[J]. *National Driller*, 2002, 23 (6): 10.
- [5] PATON A G, CASEY N F, FAIRBAIRN J, et al. Advances in the fatigue assessment of wire ropes[J]. *Ocean Engineering*, 2001, 28(5): 491-518.
- [6] EVANS J J, RIDGE I M L, CHAPLIN C R. Wire strain variations in normal and overloaded ropes in tension-tension fatigue and their effect on endurance[J]. *J. Strain Analysis*, 2001, 36(2): 219-230.
- [7] OPLATKA G, ROTH M. Relation between number and distribution of wire breaks and residual breaking force [C]//OIPPEEC Round Table Conference on Wire Rope Discard Criteria. Zurich, 1989: 9.1-9.13.
- [8] SUH Jeong-In, CHANG Sung Pil. Experimental study on fatigue behavior of wire ropes[J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22(4): 339-347.
- [9] The University of Reading. Wire rope non-destructive testing survey of instrument manufacturers[R]. The Health and Safety Executive, Offshore Technology Report, OTO 2000-064.
- [10] 陈厚桂, 何利勇, 康宜华, 等. 钢丝绳断丝检测仪器评估中标样制作方法研究[J]. *计量学报*, 2007, 28(2): 150-153.
- CHEN Hougui, HE Liyong, KANG Yihua, et al. Research on reference standard for wire rope nondestructive testing instrument evaluation[J]. *A. M. S.*, 2007, 28(2): 150-153.
- [11] GB/T 8707-1988. 钢丝绳标记代号[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
- GB/T 8707-1988. Steel wire ropes-standard designations [S]. Beijing: Standards Press of China, 1988.
- [12] CHAPLIN C R, TANTRUM N R H. The influences of wire break distribution on strength[C]//OIPPEEC Round Table Conference on Endurance Research of Wire Rope and Its Practical Applications, East Kilbride, Glasgow, Scotland, 1985: 3.3.1-3.3.20.
- [13] VELINSKY S A, ANDERSON G L, COSTELLO G A. Wire rope with a complex cross-section[J]. *ASCE J. Eng. Mechanics*, 1984, 110(3): 380-391.
- [14] RAOOF M, KRAINCANIC I. Analysis of large diameter wire ropes[J]. *ASCE J. Engng. Mechanics*, 1995, 121(6): 667-675.

作者简介: 陈厚桂, 男, 1973 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为无损检测新技术及其评估。

E-mail: hougui_ch@163.com