

钢丝绳抗旋转性能的理论分析与实验验证

李艳春, 王洪林, 徐亚威

(武汉船用机械有限责任公司, 湖北 武汉 430084)

摘要: 以钢丝绳抗旋转性能的理论研究为基础, 结合不同结构、品牌钢丝绳抗旋转系数实验研究, 确定多层股钢丝绳是具有良好抗旋转性能的钢丝绳结构。同时提出了后续抗旋转性能检测的改进方向和目标。

关键词: 碎石桩; 护岸边坡; 整体稳定性; 效果分析

中图分类号: TD532 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006—7973 (2022) 04—0140—03

1 引言

钢丝绳由于在制造过程中, 存在钢丝合股、绳股合绳等特殊的捻制工艺, 形成复杂的螺旋结构, 使得整绳在受到轴向拉力时, 会产生一定程度的散开趋势。若此时钢丝绳一端固定, 另一端自由向下, 钢丝绳将会转过一定的角度。这种现象通常被称为钢丝绳的旋转特性。

实际应用中, 由于钢丝绳的旋转特性可能导致出现打大角度的偏转甚至打结, 这将会影响设备的正常使用。尤其对一些大型设备, 只能采用重新安装甚至更换钢丝绳来解决问题, 因此具有良好抗旋转性能钢丝绳的应用就显得尤为重要。

2 钢丝绳抗旋转性能理论研究

钢丝绳产生旋转是由于在其横截面上的扭矩力 M 的作用。为减少钢丝绳的旋转, 通过特定的结构设计和工艺设计, 使两个相反方向的旋转力矩达到近似平衡。因此该抗旋转钢丝绳通常也被称为微旋转钢丝绳。

2.1 钢丝绳抗旋转性能的数学原理

根据材料力学理论, 杆件受拉伸和扭转时关于变形的两个独立方程:

$$\left. \begin{aligned} Q &= E \cdot \varepsilon \\ M &= G \cdot J_p \cdot \frac{d\psi}{dx} = \frac{G \cdot J_p}{l} \cdot \psi = B \cdot \psi \end{aligned} \right\} \quad 2.1$$

式中: E ——杆件的弹性模量; ε ——变形量 (应变); $G \cdot J_p$ ——抗扭刚度; B ——单位长度的扭转刚度; ψ ——当截面间距为 l , 各截面扭矩相等时的扭转角。

上述变形方程可以作为钢丝绳承受拉伸载荷时的基本受力情况。

仅用 $M = \frac{G \cdot J_p}{l} \cdot \psi$ 来简要分析钢丝绳的旋转情况可知, 旋转角度 ψ 与扭转力矩 M 及钢丝绳的悬挂长度 l 均为正比的关系; 当扭转力矩 $M=0$ 时, 旋转角度 $\psi=0$, 此时钢丝绳处于不旋转状态。

但是, 钢丝绳中的绳股和钢丝是呈圆柱螺旋线状态, 当受到负载作用时, 拉伸和扭转同时存在并且相互影响。因此, 其变形应同时满足下列方程:

$$\left. \begin{aligned} Q &= E \cdot \varepsilon + C \cdot \psi \\ M &= B \cdot \psi + C \cdot \varepsilon \end{aligned} \right\} \quad 2.2$$

当 $C=0$ 时, 钢丝绳的变形与杆件的变形等价。同时, 当 $C=0$, $M=0$ 时, 钢丝绳才不会旋转。 C 是钢丝绳受拉和受扭的相互影响变形系数, 实际上是钢丝绳的抗旋转系数。

2.1.1 单层股钢丝绳抗旋转的数学原理

具有纤维芯的单层股钢丝绳, 其影响系数 C 可以用如下式子表达:

$$C = n \cdot E_0 \cdot r_0 \cdot \cos 2\alpha \cdot \sin \alpha \pm n C_0 (\cos 2\alpha + 4 \sin^4 \alpha - \sin^2 \alpha) \cdot \cos \alpha \quad 2.3$$

考虑钢丝绳捻角 α 在通常在 $10^\circ \sim 20^\circ$ 之间, 因此上式中舍去 $\sin \alpha$ 二次以上因式, 近似得到:

$$C = n (E_0 \cdot r_0 \cdot \sin \alpha \pm C_0 \cdot \cos \alpha) \cdot \cos 2\alpha \quad 2.4$$

式中: n ——钢丝绳中股的数目; E_0 ——单根股绳的纵向刚度; r_0 ——股层的捻制圆半径; C_0 ——单根股的影响系数; α ——钢丝绳的捻角。

当钢丝绳为交互捻时, C_0 为负值; 同向捻时, C_0 取正值。

单层股钢丝绳为了满足 $M=0$ 不旋转条件, 一般采用交互捻, 且 $C=0$, 那么:

$$E_0 \cdot r_0 \cdot \sin \alpha - C_0 \cdot \cos \alpha = 0 \quad 2.5 \text{ 即 } \frac{C_0}{E_0} = r_0 \cdot \tan \alpha \quad 2.6$$

而刚度系数 C_0 可近似地表示为:

$$C_0 = E \cdot F \cos^2 \beta \cdot \sin \beta \sum n_i \cdot r_i \quad 2.7$$

$$\text{且 } E_0 = E \cdot F \cos^3 \beta \cdot \sum n_i \quad 2.8$$

式中: β ——股的捻角; n_i ——股中钢丝根数; r_i ——股中各钢丝层的捻制半径。

将 2.7、2.8 代入 2.6 中, 得:

$$\frac{\tan \alpha}{\tan \beta} = \frac{\sum n_i \cdot r_i}{r_0 \cdot \sum n_i} \quad 2.9$$

对于式 2.9, 由于 $r_0 \cdot \sum n_i > \sum n_i \cdot r_i$, 所以 $\beta > \alpha$, 即股的捻角应大于绳的捻角, 绳的捻距相应地大于股的捻距, 这样才能达到不旋转。因此, 单层股抗旋转钢丝绳中, 应该缩小股的捻距, 增大绳的捻距, 并尽量减少股数, 将股制成异形股, 以便增大股的力矩之和来抵消绳的力矩, 满足不旋转的要求。

2.1.2 多层股钢丝绳抗旋转的数学原理

在单层股抗旋转的数学原理基础上, 对于多层股钢丝绳, 某一股层的刚度系数表示如下:

$$C_i = n_i \cdot E_i \cdot F_i \cdot R_i \cdot \cos^2 \alpha_i \cdot \sin \alpha_i \quad 2.10$$

式中: n_i ——该层股的股数; E_i ——钢丝的弹性模量 (各层均相同); F_i ——该层股中的单根股的截面积; R_i ——该股层的捻制圆半径; α_i ——股在绳中的捻角。

对于两层股钢丝绳的不旋转条件:

$$C = \sum C_i = C_1 + C_2 = 0 \quad 2.11$$

要使 $M=0$, 其相邻层股的捻向应相反, 所以:

$$C = n_2 \cdot F_2 \cdot R_2 \cdot \cos^2 \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2 - n_1 \cdot F_1 \cdot R_1 \cdot \cos^2 \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1 = 0 \quad 2.12$$

或

$$C = S_2 \cdot R_2 \cdot \cos^2 \alpha_2 \cdot \sin \alpha_2 - S_1 \cdot R_1 \cdot \cos^2 \alpha_1 \cdot \sin \alpha_1 = 0 \quad 2.13$$

式中: S_1 ——内层股的横截面积, S_2 ——外层股的横截面积。

且 $S_1 = n_1 \cdot F_1$

$$S_2 = n_2 \cdot F_2$$

如果两层股在绳中捻角相等, 即 $\alpha_1 = \alpha_2$, 则有

$$S_1 \cdot R_1 = S_2 \cdot R_2$$

$$\text{即 } \frac{S_1}{S_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

2.2 钢丝绳抗旋转性能的结构研究

理论上, 不同类别钢丝绳均能通过结构参数或制作工艺的专门设计, 形成具有一定抗旋转性能的产品。按照钢丝绳的结构组成, 抗旋转钢丝绳可分为单层股结构和多层股结构。

(1) 单层股抗旋转钢丝绳。单层股抗旋转能力十分有限, 而且由于其特殊的结构组成, 无论是最初的圆股结构还是改良后的压实股结构, 其疲劳寿命较低的问题并未得到根本解决。因此, 目前欧洲企业对单层股抗旋转钢丝绳的使用十分谨慎。

(2) 多层股抗旋转钢丝绳。多层股抗旋转钢丝绳

包括 2 层股抗旋转钢丝绳和 3 层股抗旋转钢丝绳。对于圆股多层股钢丝绳而言, 由于钢丝绳外层股数相差很多, 在相同条件下, 内层绳的扭转力矩之和与外层绳的扭转力矩之和难以相互抵消, 因此必须通过其他条件来达到不旋转的性能。

传统 2 层股钢丝绳为外层股 11-12 根 2 次合绳结构, 该结构钢丝绳并不具有良好的抗旋转性能。因此为了改善抗旋转性能, 逐渐发展出外层股数为 15-18 根的 2 层股抗旋转钢丝绳。早期 3 层股抗旋转钢丝绳多采用外层股 17-18 根 3 次合绳结构, 其抗旋转性能较 2 层股抗旋转钢丝绳有明显改善, 但仍然有许多不足之处。为了提高其抗旋转性能, 通过试验结果对比发现, 在组绳股数相同的情况下, 3 层股 2 次合绳比 3 次合绳在抗旋转性能和破断拉力上均有所提高。因此, 3 层股 2 次合绳结构逐渐成为 3 层股抗旋转钢丝绳的主流结构。

3 钢丝绳抗旋转性能实验研究

3.1 实验原理说明

通过前面的分析可知, 钢丝绳的抗旋转性能可以通过刚度系数 C 进行表征, 而刚度系数值只与钢丝绳的结构参数有关。对于承受拉伸载荷的钢丝绳, 其扭转力矩可以表达为:

$$M = S \cdot C \cdot d \quad 3.1$$

那么钢丝绳抗旋转系数:

$$C = \frac{M}{S \cdot d} \quad 3.2$$

其中: M ——钢丝绳扭转力矩, S ——钢丝绳张力, d ——钢丝绳公称直径。

事实上, 关于钢丝绳抗旋转性能的测定, 目前主要有《ISO 21669 Steel wire ropes—Determination of rotational properties》和《GB/T 31979-2015 钢丝绳—旋转性能测定方法》两项标准。跟国际标准相比, 国家标准中增加的测定方法中检测设备的专业化程度更高, 操作更加便捷, 便于连续、多次检测操作, 而检测精度更高、检测数据更加全面。这种检测方法的主要步骤如下:

(1) 将钢丝绳试样安装在钢丝绳固定装置上;

(2) 测量钢丝绳试样的自由长度, 并确定角度测量装置的基准点;

(3) 由加载测量装置对钢丝绳试样施加试验力至钢丝绳最小破断拉力的 20%, 并保持稳定;

(4) 施加力期间应保持钢丝绳试样的固定端和自由端均不产生旋转;

- (5) 通过扭矩测量仪器测量并记录钢丝绳试样产生的扭矩；
- (6) 解除自由端设置的旋转约束装置，钢丝绳试样自由旋转，通过角度测量装置测量并记录钢丝绳扭矩为零时的旋转角度；
- (7) 在解除自由端设置的旋转约束装置后，钢丝绳试样旋转过程中应保持所规定的力不变；
- (8) 最终记录的旋转角度应是扭矩值为零时的旋转角度。

检测方案图如图 1 所示：

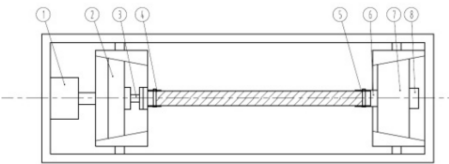


图 1

其中：

- 1 – 加载测力装置；
- 2 – 固定端楔块；
- 3 – 扭矩测量仪器；
- 4 – 钢丝绳固定装置 a；
- 5 – 钢丝绳固定装置 b；
- 6 – 角度测量装置；
- 7 – 自由端楔块；
- 8 – 阻选装装置；

3.2 钢丝绳抗旋转性能实验

3.2.1 实验设备及实验内容

根据国家标准的实验方法，一台立式安装的钢丝绳抗旋转性能试验机包括 100T 液压主机、1200 NM 扭矩输出及传动系统、两套万能型测控系统、计算机、数据处理软件以及各种附件等组成。

根据国家标准的实验方法，该实验过程如下：

- (1) 选取 6 根 3m 长的钢丝绳，并按照试验机安装接口对钢丝绳两端进行浇注；实验选取的钢丝绳信息如表 1：

表 1

序号	品牌	钢丝绳结构	钢丝绳公称直径 mm	20%最小破断拉力 kN
1	国外 A	35W*K7, 同向捻	28	145.8
2	国外 B	8*K31, 交互捻	34	206
3	国外 C	35W*K7, 同向捻	34	200
4	国产 D	35W*K7, 同向捻	34	177
5	国产 E	35W*K7, 交互捻	34	168
6	国产 E	6*K36, 交互捻	34	168

- (2) 主机液压缸加载至指定力张力值，加载速率不高于 1kN/s，并在到达规定的张拉力矩后，记录相应的扭矩值

3.2.2 实验结果

根据上述试验步骤，通过对比不同品牌、相同品牌不同结构的钢丝绳在相同的拉力条件下产生的扭转力矩，得到抗扭转系数，对比扭矩值的大小。试验结果如表 2 所示：

表 2

序号	品牌	钢丝绳结构	扭矩值 N*m	抗扭转系数%
1	国外 A	35W*K7, 同向捻	18.73	0.458
2	国外 B	8*K31, 交互捻	648.5	9.26
3	国外 C	35W*K7, 同向捻	12.25	0.18
4	国产 D	35W*K7, 同向捻	20.74	0.345
5	国产 E	35W*K7, 交互捻	47.43	0.857
6	国产 E	6*K36, 交互捻	458.4	8.07

3.3 实验结果分析

通过上述实验结果不难看出：

- (1) 单层股钢丝绳扭矩值均显著高于三层股钢丝绳，说明单层股钢丝绳难以获得较好的抗旋转性能；
- (2) 国外品牌钢丝绳抗扭转性能领先于国内，说明钢丝绳的设计和制作工艺能够直接影响钢丝绳的抗旋转性能。

4 结语

通过上述理论分析及试验验证，多层股钢丝绳是抗扭转性能方面有明显的优势。但是检测设备的精度对实验结果存在较大的影响，而且抗扭转系数缺少公认的数值，这也是后续试验检测需要解决的问题。

参考文献：

[1] 秦万信, 白成海. 关于我国多股抗旋转钢丝绳发展方向的思考 (续完) [J]. 金属制品, 2016, 42(06): 6-14.

[2] 李宁, 陈其华, 陈元野, 常国富. 大起升高度门座起重机起升钢丝绳扭转打结分析和处理 [J]. 起重运输机械, 2011(04): 53-56.

[3] 潘志勇, 邱煌明, 钢丝绳生产工艺, 湖南大学出版社, 2008 年.

[4] Klaus Feyrer, Wire Ropes (Tension, Endurance, Reliability), Second Edition.