

新型双折线绳槽结构与实验研究

葛建兵^{1,2,3}, 龚宪生^{1,2}, 彭霞³, 刘劲军⁴

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044;
3. 石河子大学 机械电气工程学院, 新疆 石河子 832000; 4. 洛阳矿山机械工程设计研究院有限责任公司, 河南 洛阳 471039)

摘 要: 为了适应超深矿井钢丝绳的多层缠绕和平稳过渡的需求,提出了一种新的层间过渡原理. 设计了5层缠绕钢丝绳的绳槽,分析了绳槽主要结构参数选择范围和方法. 根据钢丝绳平稳过渡条件,提出折线区圆心角的二次螺旋线计算方法. 研究表明:绳槽间隙取 $0.03d \sim 0.4d$,绳槽深度取 $0.3d \sim 0.5d$,上层钢丝绳的圈数比下层钢丝绳的圈数多2圈;新型双折线绳槽能够实现钢丝绳的多层缠绕和整齐排绳,根据二次螺旋线方法得到的折线区圆心角能够使钢丝绳在缠绕过程中无滑动现象.

关 键 词: 钢丝绳;多层缠绕;平稳过渡;双折线绳槽;结构设计

中图分类号: TD 534 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2019)07-0997-06

Structural Design and Experimental Research of New Double-Folded Groove

GE Jian-bing^{1,2,3}, GONG Xian-sheng^{1,2}, PENG Xia³, LIU Jin-jun⁴

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Mechanical and Electrical Engineering College, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 4. Luoyang Mining Machinery Engineering Design Institute Co., Ltd., Luoyang 471039, China. Corresponding author: GONG Xian-sheng, E-mail: cqxsong@cqu.edu.cn)

Abstract: To ensure the stable transition of the multi-layer steel wire rope in the ultra-deep mine hoist, a new interlayer transition principle was proposed. The five-layer wire rope transition device was designed, and the range and method of the main structural parameters of the rope groove were analyzed. Based on the requirement for the stable transition of wire ropes, the twice spiral method of the central angle of the fold line was presented. The results showed that the optimal groove clearance is $0.03d \sim 0.4d$, and the groove depth is $0.3d \sim 0.5d$. The number of loops of the upper layer wire rope was twice more than that of the lower layer wire rope. The new multi-layer transition device reveals both multi-layer winding and neat arrangement of wire ropes, and the central angle of the fold line obtained by the twice spiral method can help the wire rope avoid sliding in the winding process.

Key words: wire rope; multilayer winding; stable transition; double-folded groove; structural design

随着社会发展,对矿产资源的需求日益增加,世界各国正在转向地下深层开采,在矿业大国南非的矿石开采深度已经达到 $2\,500 \sim 4\,000\text{ m}^{[1]}$,其多使用双绳缠绕式双卷筒提升机,六七十年代安装的提升高度达 $2\,370\text{ m}$ 的4层缠绕双卷筒提

升机仍在安全运行.目前,我国矿井提升装备主要采用的单绳缠绕式提升机和摩擦式提升机,均不能很好满足深井($h > 1\,500\text{ m}$)提升的需要,从提升机械设计角度上看,我国与国外的差别主要体现在钢丝绳缠绕层数、安全系数等方面^[2-3].随着

我国冶金、机械制造等工业水平的不断提高,双绳双卷筒提升系统将在我国的超深井中得到广泛应用. 缠绕式双绳双卷筒提升系统与单绳缠绕式提升装备的不同在于:卷筒上分为两个绳区,两根钢丝绳分别缠绕于各绳区的绳槽上,并通过天轮调节使得两钢丝绳同步提升罐笼. 对于深井提升,高速重载提升的动载荷巨大,复杂工况严重影响提升设备平稳性. 因此,必须对提升装备进行全面的理论分析和结构设计. 学者在钢丝绳模型、振动控制、摩擦磨损、安全运行等方面取得了重要研究成果^[4-13]. 但是,由于现有矿井提升机的安全运行要求,我国还没有 4 层、5 层钢丝绳多层缠绕卷筒,4 层、5 层钢丝绳过渡装置的设计研究也未见报道,钢丝绳多层缠绕的理论亟待进一步研究.

为此,本文提出一种新型多层双折线绳槽的过渡装置结构设计原理,为了使钢丝绳在圈间过渡时不产生相对滑动,对其重要结构参数——过渡区的圆心角提出二次螺线计算方法. 并以 5 层缠绕卷筒为例,进行缠绕实验,验证相关结构参数的合理性.

1 钢丝绳层间过渡原理

双绳双卷筒缠绕式提升设备采用双折线绳槽. 双折线绳槽在一个缠绕周期内有两个很长的直线区和两个短的折线区,这就使得在多层缠绕时大部分时间钢丝绳在下一层钢丝绳形成的直线段绳槽中缠绕,直线段绳槽有良好的导向作用,保证了钢丝绳的规则缠绕和排绳的稳定性,同时,大幅减小钢丝绳的摩擦磨损,改善钢丝绳之间的接触应力,提高钢丝绳的使用寿命. 提升机卷筒折线区两边安装有过渡装置,过渡装置的结构尺寸影响钢丝绳在过渡过程中的受力状态,对钢丝绳排绳稳定性起到关键作用.

1.1 新型多层缠绕层间过渡原理

新型多层缠绕层间过渡原理见图 1:在折线区 I,各层层间过渡的钢丝绳沿着箭头所示的方向,通过过渡装置的层间过渡槽螺旋上升以实现层间过渡. 为避免钢丝绳的同层干涉,在折线区 II(见图 2),利用圈间过渡块的导向槽,再次同层轴向偏转半个钢丝绳节距.

1.2 新型双折线绳槽的结构

新型双折线绳槽的结构如图 2 所示,它是 5 层钢丝绳双折线绳槽,与现有里巴斯绳槽组成相似,其原理如图 2a 所示,主要由底部的绳槽、过渡装置组成. 其中过渡装置由平过渡块、层间过渡

块、圈间过渡块组成,但在结构形式上与现有的 3 层过渡装置有很大差别,其三维模型如图 2b 所示. 新型钢丝绳的各层宽度不相同:总体上呈现底层窄,随着层数的增加各层宽度逐渐增大. 相应地,过渡块的宽度、高度都比里巴斯绳槽的过渡块尺寸大.

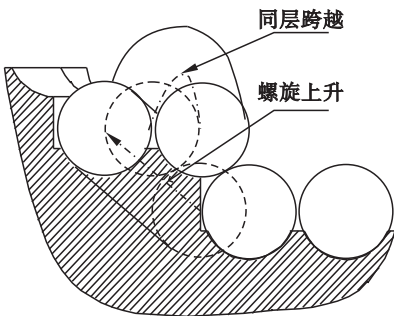


图 1 折线区 I 层间过渡原理
Fig. 1 Interlayer transition principle in fold line area I

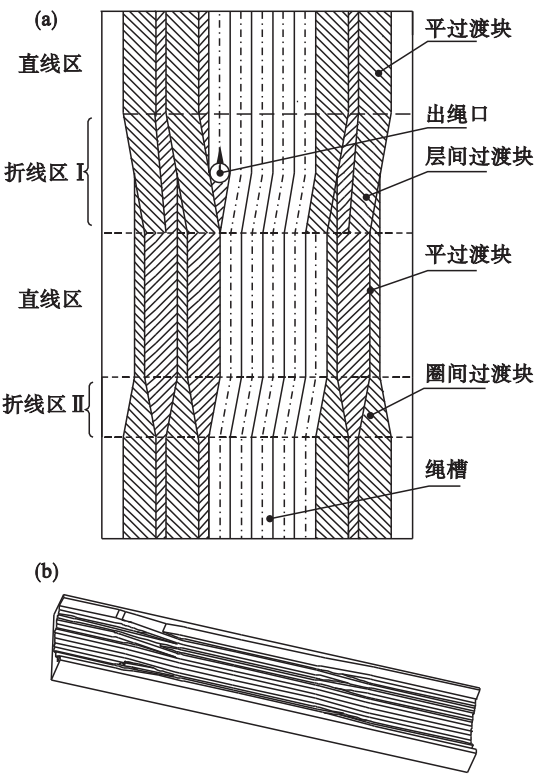


图 2 新型双折线绳槽结构
Fig. 2 Structure of the new double-folded groove
(a)—展开图;(b)—三维模型.

1.3 钢丝绳的缠绕运动

如图 2a 所示,钢丝绳在卷筒的带动下做缠绕运动,第 1 层钢丝绳按箭头方向沿着点划线从左向右运动,最后到达折线区 I,在层间过渡块的抬升作用下,再做螺旋运动上升到第 2 层高度,继续向右移动,在折线区总共向右移动了一个节距 $(d + \varepsilon)$ 的轴向位移. 再沿着平过渡块,做圆周直线运动,到折线区 II,在圈间过渡块的导向槽作用

下,完成首次第 2 层圈间过渡. 钢丝绳继续做圆周直线运动,再次到达折线区 I,跨越做螺旋上升的下层钢丝绳,实现在层间过渡块中的第二次轴向左移,完成第 2 层钢丝绳在折线区 I 的第一次圈间过渡. 接着,钢丝绳在同层钢丝绳排绳力、卷筒的带动下,从右向左运动,到达绳槽左边的折线区 I. 不断重复上述过程,实现钢丝绳的 3 层、4 层、5 层等的多层缠绕.

2 新型双折线绳槽的主要结构尺寸计算方法

新型双折线绳槽的主要几何参数有:钢丝绳直径 d ,绳槽间隙 ε ,绳槽深度 h_s ,第 m 层缠绳区宽度 B_m ,绳槽直径 D ,折线区圆心角 β . 其中钢丝绳直径 d 、直径比 $\eta = D/d$ 应符合国家安全标准^[3],如图 3 所示的绳槽横截面:绳槽间隙 ε 一般在 $0.03 d \sim 0.4 d$ 内选取,应保证对钢丝绳有良好的支撑,同层相邻的两圈钢丝绳不接触;保证上层钢丝绳绳圈不嵌入下层两绳圈所形成的间隙,避免造成卡绳;绳槽深度 h_s 通常在 $0.3 d \sim 0.5 d$ 范围内选取.

第 m 层的宽度为 $B_m = [n + 2(m - 1)](d + \varepsilon)$, n 为第 1 层绳的圈数,上式表明:上层钢丝绳的圈数比下层钢丝绳的圈数多 2 圈. 绳槽的总宽 B ,总高度 H 应符合规定^[3],而针对单绳双层缠绕卷筒采用的折线区圆心角 β ,仅有折线区长度大于 $12 d$ 的规定^[3]. 但是折线区圆心角与钢丝绳的平稳过渡问题密切相关^[9].

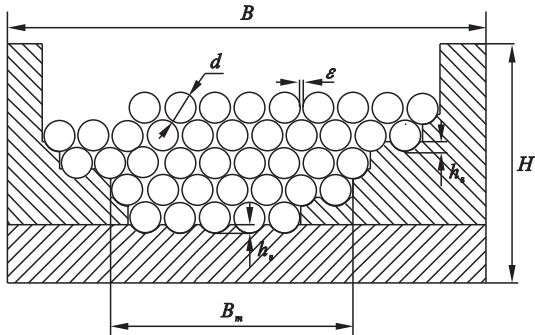


图 3 绳槽横截面

Fig. 3 Cross section of rope grooves

3 折线区圆心角的二次螺旋线设计方法

折线区圆心角是整个绳槽的重要参数,它影响钢丝绳在过渡时产生的动张力大小和钢丝绳的振动规律. 不合理的折线区圆心角必将引起钢

绳在圈间过渡时的滑动冲击,加速钢丝绳的摩擦磨损. 为此,Peng 等^[13]首先运用微分几何、力学、数学分析的方法,导出过渡角度的理论计算公式,并在此基础上,进行了相应的改进,使之适应折线区过渡的情况,但是由于公式只给出 ε/d 与过渡区圆心角的关系,限制了它的应用. 弦线平稳缠绕物体的方法也运用微分几何、力学原理^[14]. 在上述研究基础上,本文提出钢丝绳在过渡区不产生滑动的二次螺旋线设计方法.

由于钢丝绳轴线在圈间过渡时形成的曲线是条测地线(二次螺旋线),而螺旋线的重要参数是螺旋升角,不同的圆心角都有一个相应的螺旋线,首要任务是找到一条螺旋线,使得该曲线上的每一点都满足关系式:

$$k_g/k_n \leq \tan(\gamma) = \mu. \tag{1}$$

式中: k_g, k_n 分别是曲面上曲线的法曲率和测地率; γ 为钢丝绳之间的摩擦角; μ 为钢丝绳之间的摩擦系数. 式(1)的工程意义是保证钢丝绳能平稳缠绕,无滑动冲击现象发生.

3.1 建立钢丝绳过渡的曲线、曲面方程

为便于建立钢丝绳多层缠绕的数学模型,对钢丝绳模型作如下基本假设:

- ①平面假设:钢丝绳的横截面在变形后仍保持为平面,且形状和大小不变;
- ②多层缠绕钢丝绳的拉、剪切、扭转和弯曲变形均为小变形;
- ③不计因拉伸变形导致的长度方向的线密度改变;
- ④钢丝绳为各向同性的线弹性材料.

为了建立上层钢丝绳轴线方程,需要建立钢丝绳轴线上的一点在不同坐标系下的坐标及其相互关系. 如图 4 所示,惯性坐标系 M_0 置于卷筒中心, Z 轴沿着卷筒轴线, X 轴沿着径向, Y 轴为圆的切线方向. 设下层钢丝绳轴线上的一点在固定坐标系 M_0 中的坐标 $P_0 = [x_0, y_0, z_0]^T$,其中,

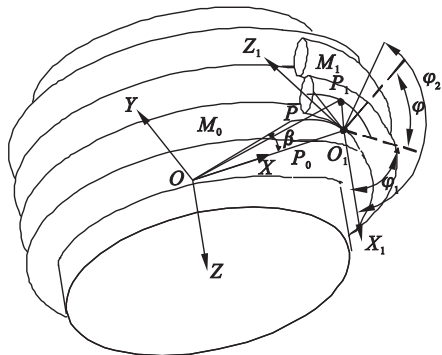


图 4 钢丝绳的多层缠绕模型

Fig. 4 Multi-layer winding model of wire ropes

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= R\cos(\omega_1 t) = R\cos\theta, \\ y_0 &= R\sin(\omega_1 t) = R\sin\theta, \\ z_0 &= v_0 t, \\ v_0 &= R\omega_1 \tan(\alpha_1). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$
$$\theta = \beta \cos\alpha_1. \quad (3)$$

式中: R 为卷筒半径; ω_1 为卷筒角速度; α_1 为下层钢丝绳的螺旋升角, $\alpha_1 = \arctan(d/(D\beta))$; θ 为卷筒绕 Z 轴转动角,即折线区圆心角; β 为钢丝绳圆心角(见图 2); v_0 为下层钢丝绳沿着 Z 轴的速度. 上层钢丝绳轴线上一点在随动坐标系 M_1 中坐标为 $\boldsymbol{P}_2 = [x_2, y_2, z_2]^T$, 其中:

$$\left. \begin{aligned} x_2 &= r\cos(\omega_2 t) = r\cos\varphi, \\ y_2 &= r\sin(\omega_2 t) = r\sin\varphi, \\ z_2 &= v_2 t, \\ v_2 &= r\omega_2 \tan(\alpha_2). \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R\cos\theta + (\cos\theta\sin\varphi_1 - \sin\theta\sin\alpha_1\cos\varphi_1)r\cos\varphi - (-\cos\theta\cos\varphi_1 - \sin\theta\sin\alpha_1\sin\varphi_1)r\sin\varphi \\ R\sin\theta + (\sin\theta\sin\varphi_1 + \cos\theta\sin\alpha_1\cos\varphi_1)r\cos\varphi - (-\sin\theta\cos\varphi_1 + \cos\theta\sin\alpha_1\sin\varphi_1)r\sin\varphi \\ R\theta\tan\alpha_1 + \cos\alpha_1\cos\varphi_1r\cos\varphi - \cos\alpha_1\sin\varphi_1r\sin\varphi \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式中: $\varphi_1 = \arccos((d + \varepsilon)/(2d))$; $\varphi_2 = \pi - \varphi_1$ (如图 4 所示). 并有

$$\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2. \quad (6)$$

上层钢丝绳在折线区的圈间过渡过程,可看作上层钢丝绳缠绕下层钢丝绳的过程,只是这个螺旋缠绕受到空间限制,上层钢丝绳轴线总共旋转了 $\varphi_2 - \varphi_1$. 所以,在折线区的任意时间 t 内,下层钢丝绳线长度 $l = \int_0^\theta ds$, 就是上层钢丝绳上升高度:

$$\boldsymbol{r}_p(\varphi) = \begin{bmatrix} R\cos\theta + (\cos\theta\sin\varphi_1 - \sin\theta\sin\alpha_1\cos\varphi_1)r\cos\varphi + (\cos\theta\cos\varphi_1 + \sin\theta\sin\alpha_1\sin\varphi_1)r\sin\varphi \\ R\sin\theta + (\sin\theta\sin\varphi_1 + \cos\theta\sin\alpha_1\cos\varphi_1)r\cos\varphi + (\sin\theta\cos\varphi_1 - \cos\theta\sin\alpha_1\sin\varphi_1)r\sin\varphi \\ R\theta\tan\alpha_1 + \cos\alpha_1\cos\varphi_1r\cos\varphi - \cos\alpha_1\sin\varphi_1r\sin\varphi \end{bmatrix}. \quad (9)$$

根据上层钢丝绳轴线方程,可得上层钢丝绳 轴线所在螺旋曲面的方程:

$$\boldsymbol{r}_s(u, v) = \begin{bmatrix} R\cos u + (\cos u\sin\varphi_1 - \sin u\sin\alpha_1\cos\varphi_1)r\cos\varphi - (-\cos u\cos\varphi_1 - \sin u\sin\alpha_1\sin\varphi_1)r\sin\varphi \\ R\sin u + (\sin u\sin\varphi_1 + \cos u\sin\alpha_1\cos\varphi_1)r\cos\varphi - (-\sin u\cos\varphi_1 + \cos u\sin\alpha_1\sin\varphi_1)r\sin\varphi \\ R u \tan\alpha_1 + \cos\alpha_1\cos\varphi_1r\cos\varphi - \cos\alpha_1\sin\varphi_1r\sin\varphi \end{bmatrix}. \quad (10)$$

3.2 钢丝绳平稳过渡的非线性方程

曲面 $\boldsymbol{r}_s(u, v)$ 上曲线 $\boldsymbol{r}_p(\varphi)$ 的测地曲率 k_g 、法曲率 k_n ,由微分几何理论得下列两式:

$$k_g = k(\alpha, \beta, n), \quad (11)$$

$$k_n = \frac{Ldu^2 + 2Mdudv + Ndv^2}{Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2}. \quad (12)$$

式(11),式(12)中,

$$k = \frac{|\boldsymbol{r}'_p(\varphi) \times \boldsymbol{r}''_p(\varphi)|}{|\boldsymbol{r}'_p(\varphi)|^3}, \alpha = \frac{\boldsymbol{r}'_p(\varphi)}{|\boldsymbol{r}'_p(\varphi)|},$$

式中: r 为上下两层钢丝绳轴线的距离; v_2 为上层钢丝绳相对下层钢丝绳的缠绕线速度; φ 为上层钢丝绳缠绕下层钢丝绳的角度; ω_2 为钢丝绳沿着随动坐标系 M_1 中 Z_1 轴的角速度; α_2 为上层钢丝绳在 M_1 中的螺旋升角, $\alpha_2 = \pi/2 - \arctan(d/(D + d\cos\phi_1))$.

利用欧拉角坐标变换方法和式(2)、式(4)得 \boldsymbol{P}_2 在固定坐标系 M_0 中的坐标. 由 $\boldsymbol{P} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{P}_2 + \boldsymbol{P}_0$,得

$$l = \int_0^\theta ds = \int_0^\theta [x'_0(t)^2 + y'^2_0(t) + z'^2_0(t)]^{1/2} dt = \int_0^\theta ((R\omega_1)^2 + (R\omega_1 \tan(\alpha_1))^2)^{1/2} dt = v_2 t. \quad (7)$$

式中, $x'_0(t)$, $y'_0(t)$ 和 $z'_0(t)$ 分别表示 $x_0(t)$, $y_0(t)$ 和 $z_0(t)$ 的导数.

由式(7)可得

$$\theta = r \tan\alpha_2 \cos\alpha_1 / R. \quad (8)$$

因此,将式(8)代入式(5),上层钢丝绳轴线方程为

$$\boldsymbol{n} = \frac{\boldsymbol{r}_u(u, v) \times \boldsymbol{r}_v(u, v)}{|\boldsymbol{r}_u(u, v) \times \boldsymbol{r}_v(u, v)|},$$
$$\beta = \frac{(\boldsymbol{r}'_p(\varphi) \times \boldsymbol{r}''_p(\varphi)) \cdot \boldsymbol{r}'_p(\varphi) - (\boldsymbol{r}'_p(\varphi) \times \boldsymbol{r}'_p(\varphi)) \cdot \boldsymbol{r}''_p(\varphi)}{|\boldsymbol{r}'_p(\varphi)| \|\boldsymbol{r}'_p(\varphi) \times \boldsymbol{r}''_p(\varphi)\|},$$
$$E = \boldsymbol{r}_u(u, v) \cdot \boldsymbol{r}_u(u, v) = \left| \frac{\partial x}{\partial u} \right|^2 + \left| \frac{\partial y}{\partial u} \right|^2 + \left| \frac{\partial z}{\partial u} \right|^2,$$
$$F = \boldsymbol{r}_u(u, v) \cdot \boldsymbol{r}_v(u, v) = \left| \frac{\partial x}{\partial u} \right| \left| \frac{\partial x}{\partial v} \right| + \left| \frac{\partial y}{\partial u} \right| \left| \frac{\partial y}{\partial v} \right| + \left| \frac{\partial z}{\partial u} \right| \left| \frac{\partial z}{\partial v} \right|,$$

$$G=\boldsymbol{r}_v(u,v)\cdot\boldsymbol{r}_v(u,v)=\left|\frac{\partial\boldsymbol{x}}{\partial v}\right|^2+\left|\frac{\partial\boldsymbol{y}}{\partial v}\right|^2+\left|\frac{\partial\boldsymbol{z}}{\partial v}\right|^2,$$
$$D_e=(EG-F^2)^{1/2},$$
$$L=\boldsymbol{r}_u(u,v)\cdot\boldsymbol{n}=\frac{(\boldsymbol{r}_{uu}(u,v),\boldsymbol{r}_u(u,v),\boldsymbol{r}_v(u,v))}{D_e},$$
$$M=\boldsymbol{r}_{uv}(u,v)\cdot\boldsymbol{n}=\frac{(\boldsymbol{r}_{uv}(u,v),\boldsymbol{r}_u(u,v),\boldsymbol{r}_v(u,v))}{D_e},$$
$$N=\boldsymbol{r}_{vv}(u,v)\cdot\boldsymbol{n}=\frac{(\boldsymbol{r}_{vv}(u,v),\boldsymbol{r}_u(u,v),\boldsymbol{r}_v(u,v))}{D_e}.$$

根据式(9),式(10),用 Maple 编程求得式(11)和式(12)的具体表达式 k_g,k_n ,连同边界条件式(6)代入非线性方程式(1),得到最佳的一层钢丝绳圆心角 β_1 . 再代入式(3)求得折线区圆心角.

4 多层缠绕卷筒提升实验

为了验证新型双折线绳槽参数的合理性,进行 5 层钢丝绳卷筒的缠绕实验,将 5 层新型双折线绳槽主要参数按表 1 进行设计制造,其中折线区圆心角为 16.6409° . 并在中信重工机械股份集团的双绳双卷筒提升系统实验台进行实验,实验现场如图 5 所示. 该双绳双卷筒提升系统的井架有效高 40 m,地面以下基础坑深 7 m,总高度为 47 m. 两卷筒之间夹角 1.5° ,摩擦圈第一层缠 3 圈,第 2 层缠 5 圈,第 3 层缠 2 圈. 钢丝绳缠绕运动仅从第 3 层的第 3 圈开始,到第 4 层的第 8 圈结束. 提升加速度在 $0.5\sim1.8\text{ m/s}^2$,并进行多次提升下放实验. 实验表明:新型双折线绳槽可实现多层钢丝绳缠绕、整齐排绳,未出现卡绳、绞绳等异常现象.

表 1 新型双折线绳槽参数
Table 1 Parameters of the new double-folded groove

绳槽名义直径 D/mm	钢丝绳直径 d/mm	钢丝绳间隙 ε/mm	摩擦系数 μ	钢丝绳圆心角/ $(^\circ)$				
				第一层 β_1	第二层 β_2	第三层 β_3	第四层 β_4	第五层 β_5
800	10	0.7	0.16	16.641 0	16.128 8	15.637 3	15.165 5	14.712 4

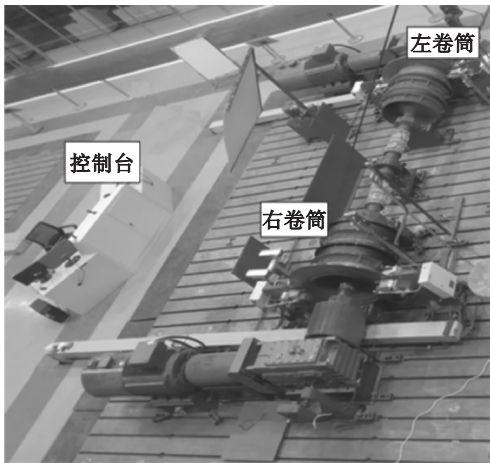


图 5 5 层钢丝绳缠绕实验现场

Fig. 5 Five layer wire rope winding experimental site

5 结 论

- 1) 提出一种新型多层双折线绳槽的设计原理,所设计的新型双折线绳槽可以实现钢丝绳的多层缠绕和整齐排绳.
- 2) 提出了新型双折线绳槽主要参数选择范围与方法;绳槽间隙 ε 一般在 $0.03\,d\sim0.4\,d$,绳槽深度 h_s 通常在 $0.3\,d\sim0.5\,d$,第 m 层缠绳区宽度为 $B_m=[n+2(m-1)](d+\varepsilon)$,折线区圆心角

可用二次螺旋线计算方法设计.

3) 所建立的钢丝绳多层过渡模型准确反映了钢丝绳在多层过渡时的运动轨迹;二次螺旋线法设计的折线区圆心角能够实现钢丝绳平稳过渡,钢丝绳在缠绕过程中无滑动冲击现象.

参考文献:

[1] 刘劲军,邹声勇,张步斌,等.我国大型千米深井提升机械的发展趋势[J]. 矿山机械,2012,40(7):1-5.
(Liu Jin-jun, Zou Sheng-yong, Zhang Bu-bin, et al. Discussion trend of domestic large hoisting equipments for deep shafts of thousands meters[J]. Mining & Processing Equipment,2012,40(7):1-5.)

[2] Alfred C. Mine hoisting in deep shafts in the 1st half of 21st century[J]. Acta Montanistica Slovaca, 2002, 7(3): 188-192.

[3] 中国国家标准化管理委员会. 矿井提升机和矿用提升绞车安全要求: GB20181—2006[S]. 北京: 中国标准出版社,2007.
(The China National Standardization Management Committee. Mine hoists and mine winders-safety requirements: GB20181—2006[S]. Beijing: Standards Press of China,2007.)

[4] 庞哈利,杜素忠. 基于间隙理念的钢丝绳产品结构参数求解方法[J]. 东北大学学报(自然科学版),2009,30(3): 329-332,353.
(Pang Ha-li, Du Su-zhong. A clearance-based method of designing and solving structural parameters of steel wire rope [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2009,30(3):329-332,353.)