

螺杆钻具转子系统不对中的故障产生机理与诊断

马忠海^{1,2}, 刘珈辰^{1,2}, 欧阳景荣^{1,2}, 牟兴刚^{1,2}, 马守发^{1,2}, 王璐^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 螺杆钻具是由多个可以旋转的转轴通过万向联轴器连接成的一个轴系, 主要用来传递转矩从而带动钻头运动。但是在安装或者在万向联轴器自身磨损消耗下, 钻具会出现轴线上的不对中, 进而引发一系列故障, 比如螺杆钻具的螺杆马达转子联轴器偏移、轴承移动、转轴发生形变、油膜失稳等, 导致机器发生振动并造成一系列的危害。因此, 在实验室条件下, 研究井下动力钻具不对中的故障产生机理, 掌握不同故障的特征, 并及时进行故障诊断, 对减小或避免由于转子联轴器不对中而产生的故障具有十分重要的意义。本文借助于DHRMT双跨转子台高度模拟井下的钻具故障, 设置转子不对中的不同故障类型, 通过实验获得钻具转子不对中故障造成的振动特征, 为井下动力钻具设计及改进提供参考依据。

关键词: 螺杆钻具; 转子不对中; 振动特征; 故障诊断; 井下钻具

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)03-0086-08

Research on the mechanism and diagnosis for screw drilling tool misalignment

MA Zhonghai^{1,2}, LIU Jiachen^{1,2}, OUYANG Jingrong^{1,2}, MU Xinggang^{1,2}, MA Shoufa^{1,2}, WANG Lu^{1,2}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Key Laboratory of Deep Geodrilling Technology, Ministry of Natural Resources, Beijing 100083, China)

Abstract: The screw drill tool is a shaft system consisting of a number of rotating shafts connected by a universal coupling, which is used to transfer torque to drive the bit motion. However, owing to the installation or wear and tear of the universal coupling itself, the axial misalignment of the drilling tool will appear, leading to a series of failures, such as offset of the screw motor rotor coupling, bearing movement, shaft deformation, oil film instability, etc., leading to vibration of the tool and a series of hazards. Therefore, it is of great significance to study the failure mechanism of downhole power drilling tool misalignment, grasp the characteristics of different failures, and timely diagnose the failures under laboratory conditions, so as to reduce or avoid the failures caused by misalignment of the rotor coupling. In this paper, the DHRMT double-span rotor bench is used to simulate various downhole drilling tool failures through setting of rotor misalignment, and the vibration characteristics caused by rotor misalignment is obtained through experiments so as to provide a reference for downhole power drilling tool design and improvement.

Key words: screw drill tools; rotor misalignment; vibration characteristics; failure diagnosis; downhole drilling tools

0 引言

现如今钻具的形式越来越多, 常见的有: 井下动力钻具、电动钻具、涡轮钻具等。我们在工程中

一般使用的是井下的动力钻具, 它具有很高的转速, 和PDC钻头^[1-2]配合使用后将大大提高钻进速度。螺杆钻具属于井下动力钻具的一种, 螺杆钻具

收稿日期: 2020-10-28; **修回日期:** 2021-01-31 **DOI:** 10.12143/j.ztgc.2021.03.012

基金项目: 大学生创新创业训练计划项目自主立项研究“智能地质钻探技术及装备仪器研制”(编号: 2018YFC0603405)、“井下钻具转子不对中的故障机理研究与诊断实验设计”(编号: 202011415477)、“基于多传感器数据融合的准垂直井眼轨迹动态测量方法研究”(编号: 41902320)

作者简介: 马忠海, 男, 回族, 1998年生, 本科在读, 地质工程专业, 北京市海淀区学院路29号, 2420360874@qq.com。

引用格式: 马忠海, 刘珈辰, 欧阳景荣, 等. 螺杆钻具转子系统不对中的故障产生机理与诊断[J]. 钻探工程, 2021, 48(3): 86-93.

MA Zhonghai, LIU Jiachen, OUYANG Jingrong, et al. Research on the mechanism and diagnosis for screw drilling tool misalignment [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3): 86-93.

中重要的2个构件是螺杆马达和万向轴,而且万向轴和螺杆马达需要配合使用,万向轴可以看作为一个联轴器,中小型的螺杆钻具一般通过万向联轴器由多个转子连接而成,用来传递运动和扭矩。但是由于钻具在搭建过程中出现误差、机械运转状态下出现热膨胀、受力后发生的变形、机器基础的土体产生的沉降以及万向联轴器自身的磨损等,致使钻具在运动的过程中产生各转子之间的不对中。一旦钻具在运动的过程中发生这种故障时钻具的整个系统将产生一系列不正常的动态效应,从而就会发生轴承损坏、转轴弯曲变形等最终使机器发生异常振动,造成巨大的损失^[3-5]。目前国内在钻具的不对中研究领域主要集中在转子的联轴器方面,收获比较丰富^[6-8],例如孙超等^[9]认为一旦钻具转子联轴器发生不对中故障时,为了确保齿套的受力平衡,使钻具转子联轴器满足其轴线至少与一个半联轴器在啮合区域内交叉,然后可以根据力和力偶的平衡条件确定它们之间存在着一个夹角。相对来说支撑不对中的研究实验少之又少,而且大多数都是针对滑动轴承不对中,关于滚动轴承不对中更是寥寥无几^[10]。齿式联轴器是由半联轴器和中间齿套组成的,它们不能发生相对的移动,之间由主动轴和从动轴相连,这种器械的结构决定了它具有对中调节能力^[11]。转子在轴线保持对中的情况下,联轴器中间齿套和半联轴器之间只存在传递转矩的轴向力,当发生转子轴线出现不对中的情况时,联轴器中间齿套和半联轴器之间的接触情况有所改变,中间齿套产生了多余的轴向力和径向力,因此产生了故障的振动,这就是故障的形成机理^[12-14]。井下钻具转子的联轴器不对中类型可分为3种,分别是平行、角度和综合不对中。当发生不同的故障时振动特征也各不相同。相反,根据振动特征也可以对不对中类型进行辨识与诊断,从而对井下钻具的优化设计提供指导。本文借助于DHRMT双跨转子台模拟出转子不对中情况,采集振动数据,通过对振动数据的分析与总结,获得了不对中故障造成的振动特征。

1 钻具的特定结构——以螺杆马达万向联轴器为例

螺杆钻具构件中仅次于螺杆马达的部件是万向轴,它的作用主要是把马达转子的偏心运动改变

成传动轴的同心运动,还可以传递螺杆马达的转速和扭矩,在原理上是一个联轴器。而且万向轴一般都是钻具中最易受到损坏的构件,一旦失效就会导致钻具的落井事故和多余的起钻和下钻,最终造成钻井作业的事故,所以万向轴的稳定性和耐久性也间接决定着螺杆钻具的使用寿命以及钻井工作的正常进行。挠性万向轴主要是用挠性轴的弹性变形来实现改变传动方向,万向轴首先要承担巨大的扭矩,还要承受一些轴向压力,这就要求轴的直径足够大,但是挠性轴的长度不能太短,就必须增加钻具的总长度,从而在构件上增加了钻井作业难度,说明在水平井和大位移斜井中不适用;瓣式万向轴一般是中间轴体两端分别连接一个瓣式万向节,万向节是由多种形状瓣式体相互咬合,一般情况下,因为瓣式体互相咬合的关系所以就可以用来传递扭矩,中间轴一般是辅助传递的作用,也有一些特殊的瓣式万向轴使瓣齿和中间轴联系到一起传递扭矩。但缺点也很明显,在运动过程中瓣齿和中间轴之间的磨损消耗过大。一般螺杆钻具中的两种万向联轴器都存在不对中以及疲劳损伤等问题。笔者对转子的联轴器不对中进行了理论调查以及实验论证。

2 钻具转子联轴器不对中的类型及工作状况

一般中小型的钻具在转子之间使用的是刚性联轴器,不同种类的联轴器发生的不对中类型、振动特征和最后造成的故障都不同,所以一般情况下分为以下3种类型。

2.1 联轴器平行不对中

联轴器和中间齿套组成一个整体,二者之间不会发生相对移动。如果转子和中心线之间产生径向位移,半联轴器与中间齿套间就会存在错动从而发生平面上的圆周运动(如图1所示)^[15-16]。当半联轴器的轴线与齿套的轴心不在一条轴线上时,就会产生一种由齿套的轴心指向半联轴器的轴心的力。所以说联轴器的轴线在连接处不会同时都分布在齿套轴线的同一侧,因为这时会产生齿套轴线往半联轴器的轴线的方向运动的力,而没有其他力和这个力平衡,从而使得齿套的轴线与半联轴器的轴线发生相对位移,所以就失去了稳定状态。两个半联轴器的轴线在连接区域内几乎不可能同时都分布在齿套轴线的不同侧,因为两个半联轴器对齿套的

径向力的方向是相反的,而且作用点也不相同。这样就会产生一个力偶,且没有多余的力偶与其平衡,会使齿套轴线与半联轴器轴线的夹角发生改变,因而也不是稳定状态。所以,2个半联轴器的轴线中至少要有一条与齿套轴线在啮合区域内相交,这样才能保证力偶和齿套所受的力能够平衡。

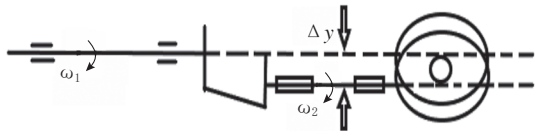


图1 转子联轴器平行不对中
Fig.1 Parallel misalignment of coupling

如图2所示,主动转子的轴心投影设为A,从动转子的轴心投影为B,中间齿套的轴心为K,中间齿套与主动轴的连线为AK,中间齿套与从动轴的连线为BK,AK垂直于BK,设AB长为D,K点坐标为K(x,y),取θ为自变量,则有:

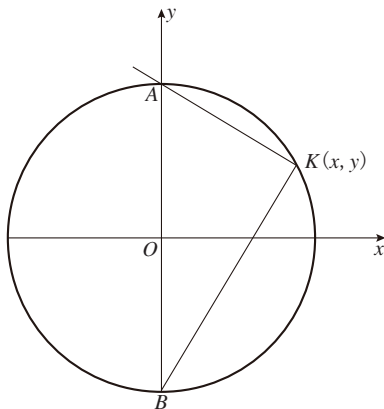


图2 中间齿套运动分析
Fig.2 Movement analysis of the coupling gear sleeve

$$\begin{cases} x = D \sin \theta \cos \theta = \frac{1}{2} D \sin 2\theta \\ y = D \cos \theta \cos \theta = \frac{1}{2} D \cos 2\theta \end{cases} \quad (1)$$

对θ求导,得:

$$\begin{cases} d_x = D \cos 2\theta d\theta \\ d_y = -D \sin 2\theta d\theta \end{cases} \quad (2)$$

K点的线速度为:

$$V_K = \sqrt{(d_x/d_t)^2 + (d_y/d_t)^2} = D d_\theta / d_t \quad (3)$$

当 $d_\theta / d_t = \omega$, 中间齿套和转轴的角速度一样,

可以得出:

$$\omega_K = \frac{2V_K}{D} = 2\omega \quad (4)$$

式中K点的线速度为 V_K (m/s), 得出转子的角速度为K点的转动速度的1/2, 只要转子转速加快到一定程度, 转轴就会有离心力的产生, 促使转子产生振动, 其工频为振动频率的1/2^[17]。

2.2 联轴器角度不对中

如果转轴轴线上发生单侧的角度位移时, 从动和主动转子的ω是不同的(如图3所示)。从动转子的角速度为:

$$\omega_2 = \omega_1 \cos \alpha / (1 - \sin^2 \alpha \cos^2 \varphi_1) \quad (5)$$

式中: ω_1 、 ω_2 ——主动转子和从动转子的角速度, rad/s; α ——从动转子的偏斜角; φ_1 ——主动转子的转角^[18-19]。

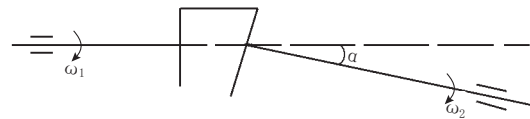


图3 转子联轴器偏角不对中
Fig.3 Angular misalignment of the coupling

当从动转子转速变化2次相当于转轴转动一周时(如图4所示), 从动转子的ω₂范围为:

$$\omega_1 \cos \alpha \leq \omega_2 \leq \omega_1 / \cos \alpha \quad (6)$$

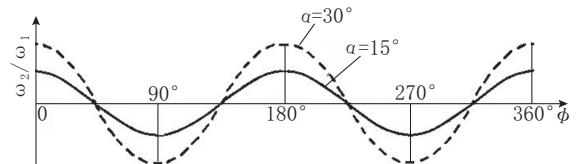


图4 转速比的变化曲线
Fig.4 Variation curve of the rotational speed ratio

当角度不对中时为了消除长轴与短轴中心线的偏角, 联轴器会产生一个弯矩, 最终使转轴在中心向上产生振动^[20-21]。根据对联轴器平行位移不对中的分析和某个截面上的受力分析可以得出以下结论: 由于齿套与半联轴器在每个截面的啮合情况是一种稳定结构, 半联轴器的整体也是一种稳定状态。齿套总有一个回到最稳定状态的趋势, 因此齿套的轴线就会尽量的保持这一稳定状态。当其稳定运行时, 其夹角ΔT不随时间改变。夹角ΔT的确定方法为: 因为两半联轴器的轴线不可能同时均处

在齿套轴线的同侧或异侧,为了保证齿套所受的力和力偶能够平衡2个半联轴器的轴线中至少要有一条与齿套轴线在连接区域内相互交叉,使齿套轴线至少与一条半联轴器的轴线在啮合区域内交叉,根据力和力偶平衡的平衡条件即可求出这个夹角 ΔT 。在实际工况条件下,夹角 ΔT 的大小是由不对中量、外内齿环的设计制造尺寸等多种因素决定的。

2.3 联轴器综合不对中

在工程实践应用时,情况往往很复杂,一般情况下包括转子联轴器的平行和角度不对中,如果二者条件都具备时称之为转子联轴器的综合不对中^[22-23],同时二者的振动机理都会体现,齿套轴线至少与一个半联轴器轴线在连接区域内交叉,它们之间的夹角的大小由齿套所受的径向力所决定,根据力和力偶的平衡原理可以去确定。如果夹角大小保持稳定不变,即两半联轴器轴线与齿套轴线的空间位置保持稳定。

转子角频率和轴向振动频率相同是因为转子转动时存在的附加轴向力加上发生的角度位移的作用,从动转子在转轴轴向上往复转动一次时相当于在一个周期里转子回转了一周(如图5所示)^[24-25]。

3 实验验证

3.1 实验设备搭建

实验借助于DHRMT双跨转子实验台(见图6),该转子试验台采用调速电机给柔性联轴器提供

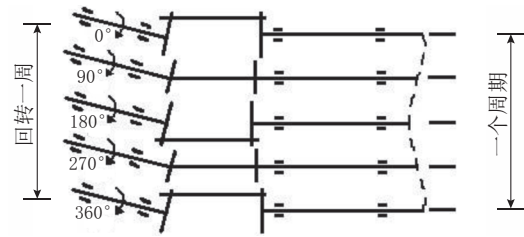


图5 转子不对中的轴线振动

Fig.5 Axial vibration due to rotor misalignment

动力最后使转轴转动起来。主要配件包括转子试验台控制器、动态信号数采仪、柔性联轴器、2个垂直的电涡流传感器、刚性联轴器及4个固定支座。

转子试验台控制器:可以根据不同的故障试验要求,控制转轴的转速;该控制器操作简单、方便,能比较容易地实现对转子工作转速的灵活、精确控制。

动态信号数采仪:连接计算机的分析软件,进行数据的实时传输和显示。

转速通道接口:用来测得转子台调速电机的实时转速值。

振动通道接口:作用是测量传感器所测的转轴旋转的振动信号。

刚性联轴器:用于对接长轴短轴。

柔性联轴器:用于连接长轴,把电机提供的能量传递给转轴使之转动起来。

电涡流传感器:转轴转动时利用2个垂直的电涡流传感器采集转子转动时的动态数据。

轴承:在横向和纵向上固定转轴。

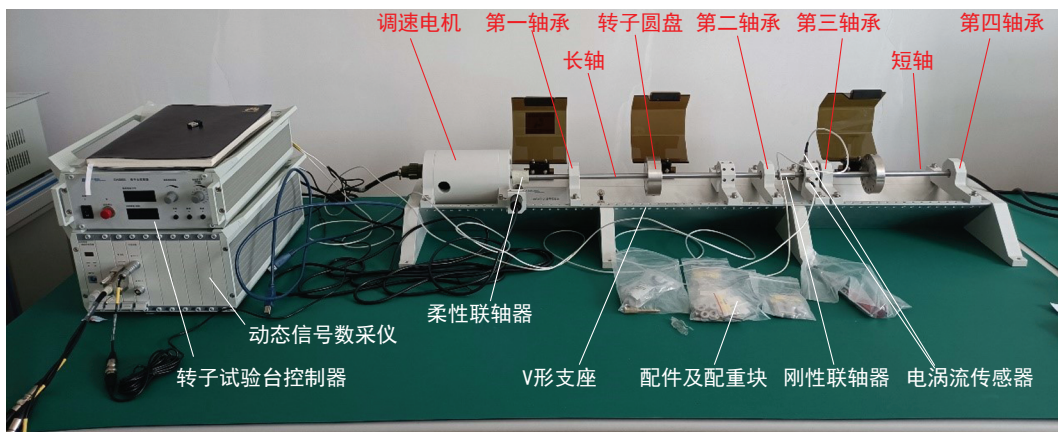


图6 DHRMT双跨转子实验台

Fig.6 DHRMT double span rotor bench

转子圆盘:通过加减配重块来控制加载在短轴和长轴上的重力。

本文一共设置了4组实验,分别为对照实验、联轴器的平行、角度和综合不对中实验。为了方便分析,4组实验的转速均为1500 r/min,采集的信号图谱有:Resampling(整周期重采样波形)记录的是时域波形及转速和相位(横坐标为周期,纵坐标为振动幅值);阶次谱图记录的是传感器在刚性联轴器附近发生移动的信号曲线(横坐标为阶次,纵坐标为各阶次振动幅值);轴心轨迹图记录的是传感器在转轴处测得的对应信号合成的轴心轨迹(横坐标为振动幅值,纵坐标为电涡流电压)。

3.2 对照组实验

为了增加该轴承端在接触面上的高度,本文首先松开第二轴承所在的刚性联轴器,将第二跨的短轴取出,再松开第三轴承座的固定螺丝,在底座和轴承之间增加1个垫片,每个垫片的高度均为0.74 mm,目的是为了在联轴器与转轴之间增加一个摩擦力使试验目的更加精确。首先设计了在不装垫片和转子圆盘的情况下接通转子台控制器电源,使转子台稳定在1500 r/min转速下转动。此时的转动模式是一个理想化的状态,即联轴器没有发生故障。图7(a)可见时域波形中只有1阶转速频率而且很平稳,在阶次谱图图7(b)中1阶频有稳定的高峰,在图7(c)轴心轨迹图的观察中本应观察到的轴心轨迹曲线图是一个理想的圆形,但是由于实验仪器存在误差,在实验过程中可观察到稳定的呈椭圆的轴心轨迹曲线。

3.3 平行不对中实验

在模拟平行不对中的实验时,将第三轴承和第四轴承于V形支座连接处放2个垫片,同时第一轴承和第二轴承只垫高1个垫片,就成功模拟出了井下钻具联轴器平行不对中的故障。在图8(a)Resampling(整周期重采样波形)图中可以看到在时域波形中不但含有1阶转速频率还包含有2阶的频率成分,但是2阶频不明显。在阶次谱图图8(b)中可以看到1倍频比较明显,此外还有2倍频和3倍频且峰值相同都未超过1倍频分量。在轴心轨迹图图8(c)的观察中可看到合成的曲线有类似8字形的趋势。

3.4 角度不对中实验

在模拟角度不对中的实验时,将第二和第三轴承垫高2个垫片而把第一轴承和第四轴承垫高1个

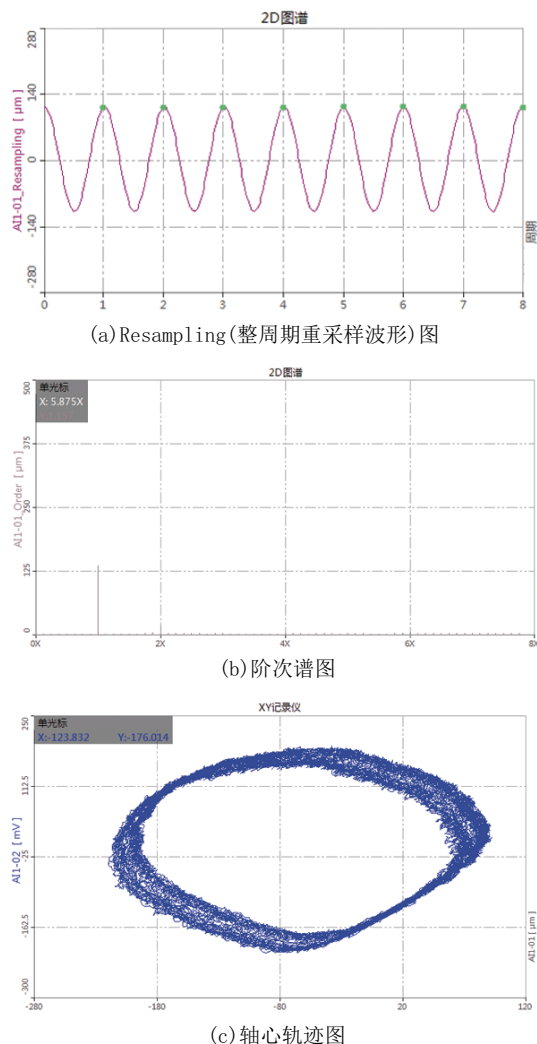


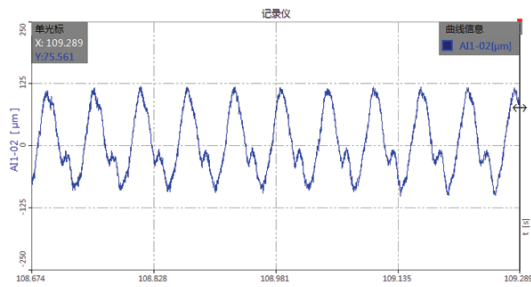
图7 联轴器没有发生故障

Fig.7 Coupling without any failure

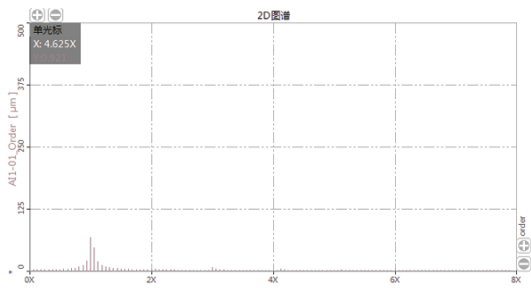
垫片,就成功模拟出联轴器角度不对中。在图9(a)的Resampling(整周期重采样波形)图中可以看到时域波形中只含有1阶频。在阶次谱图图9(b)中,1倍频、3倍频处存在峰值,而且3倍频分量低于1倍频分量。在轴心轨迹图图9(c)的观察中可发现合成的曲线接近一个8字形。

3.5 综合不对中实验

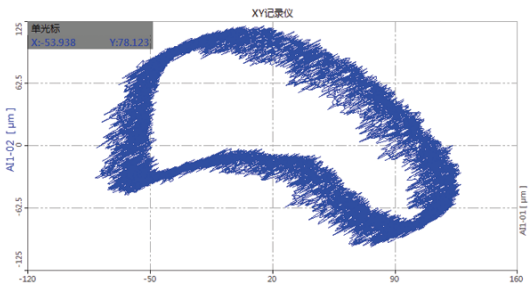
在模拟综合不对中的实验时,将第一和第二轴承垫高2个垫片让它们保持一个平行的高度,再将第三轴承垫高2个垫片,将第四轴承垫高1个垫片,就可以模拟出联轴器的综合不对中故障。在图10(a)的Resampling(整周期重采样波形)图中的时域波形中含有1阶和2阶转速频率的成分。在阶次谱图图10(b)中,1倍频和3倍频处都可以观察到峰



(a) Resampling (整周期重采样波形) 图



(b) 阶次谱图



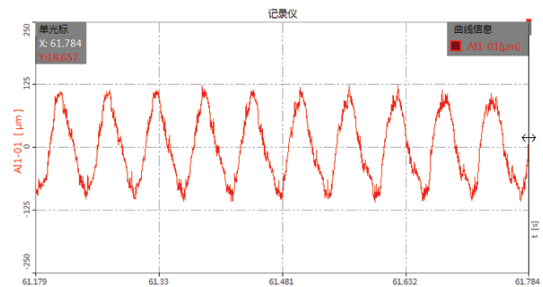
(c) 轴心轨迹图

图 8 联轴器平行不对中

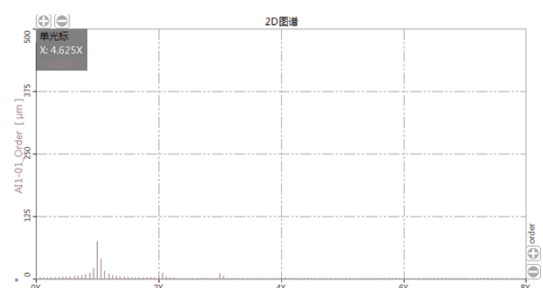
Fig.8 Parallel misalignment of the coupling

值,其中 1 倍频的峰值高于 3 倍频峰值。在轴心轨迹图 10(c)的观察中可观察到合成的轴心轨迹曲线呈内双环椭圆,当提高转速到 2000 r/min 时甚至变为双锥体的结果(如图 10d 所示)。

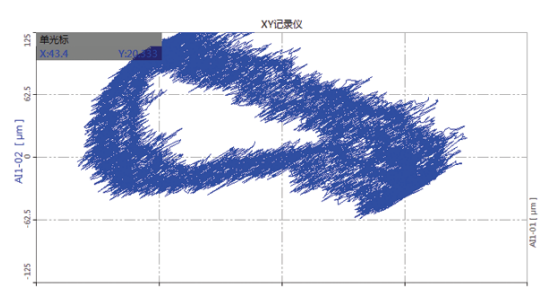
总结以上实验结果,得到了 3 种井下钻具联轴



(a) Resampling (整周期重采样波形) 图



(b) 阶次谱图



(c) 轴心轨迹图

图 9 联轴器角度不对中

Fig.9 Angular misalignment of the coupling

器不对中的振动故障特征如表 1 所示。

4 结语

由于井下动力钻具规模比较大,实验起来费时费力,所以本文在实验室条件下利用 DHRMT 双跨

表 1 联轴器不对中故障特征

Table 1 Fault characteristics of coupling misalignment

| 序号 | 特征参量 | 无故障 | 故障特征 | | |
|----|------|----------|---------------------------|------------------|-----------------------------|
| | | | 平行不对中 | 角度不对中 | 综合不对中 |
| 1 | 时域波形 | 1 阶频波形 | 1 阶频与 2 阶频互相叠加波形, 2 阶频不明显 | 1 阶频 | 1 阶频与 2 阶频互相叠加波形 |
| 2 | 特征频率 | 1 倍频明显较高 | 1 倍频明显较高, 含有 2、3 倍频且相同 | 1 倍频明显较高, 3 倍频较低 | 1 倍频明显较高, 其次为 3 倍频, 2 倍频不明显 |
| 3 | 轴心轨迹 | 圆 | 类似 8 字形 | 8 字形 | 双环椭圆, 严重时为双锥体 |

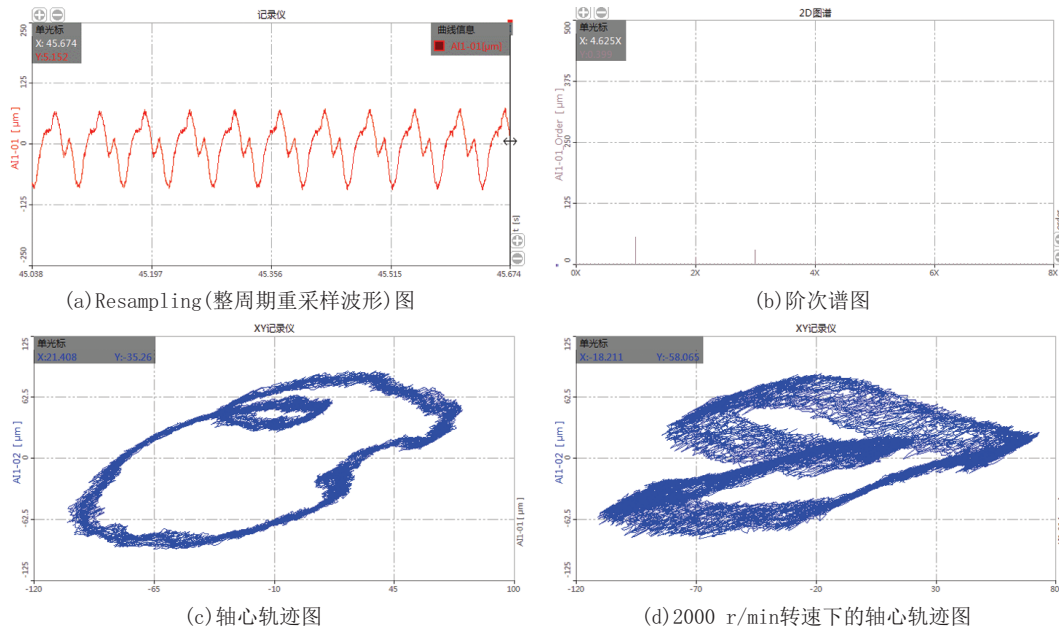


图 10 联轴器综合不对中

Fig.10 Compound misalignment of the coupling

转子实验台仪器高度还原井下钻具联轴器不对中的故障机理,本文进行的不对中实验基本都包括了钻具在井下由于联轴器不对中而引起的故障模型,并且对3种情况造成的故障分别进行了分析。通过不对中试验,以及试验数据的分析可得:当旋转轮廓为类似8字形时联轴器属于平行不对中,当旋转轮廓为8字形时联轴器属于角度不对中,当旋转轮廓为双环椭圆形时联轴器属于综合不对中,当转速很高时甚至为双锥体形。本文的研究成果可以给钻具的设计者提供理论上的参考,为仪器设计的精密性提供帮助。

参考文献(References):

- [1] 徐波. 螺杆钻具和PDC钻头组合在鄂尔多斯工区定向井中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(10): 16-17, 35.
- XU Bo. Application of combination of PDM and PDC bit in directional well in Erdos [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(10): 16-17, 35.
- [2] 李小洋, 李宽, 张永勤, 等. 新型涡轮扭力冲击器的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(12): 40-43, 49.
- LI Xiaoyang, LI Kuan, ZHANG Yongqin, et al. Experiment on a new turbine torsional impactor [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(12): 40-43, 49.
- [3] 李自刚, 李明, 江俊. 不对中联轴器柔性转子系统非线性动力学行为[J]. 动力学与控制学报, 2014, 12(1): 30-35.

LI Zigang, LI Ming, JIANG Jun. Nonlinear dynamics of a flexible rotor system coupled by a misaligned coupling [J]. Journal of Dynamics and Control, 2014, 12(1): 30-35.

- [4] 康维维, 刘宝林, 胡远彪, 等. 钻杆自动传送装置的设计研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(8): 44-47.
- KANG Weiwei, LIU Baolin, HU Yuanbiao, et al. Design and research of pipe intelligent automatic arranging system [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(8): 44-47.
- [5] 刘占生, 赵广, 龙鑫. 转子系统联轴器不对中研究综述[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(5): 321-325.
- LIU Zhansheng, ZHAO Guang, LONG Xin. Survey of the research on coupling with misalignment of rotary machinery [J]. Turbine Technology, 2007, 49(5): 321-325.
- [6] 赵柳东, 李立鑫, 王瑜, 等. 涡轮钻具的研究进展[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(10): 269-274.
- ZHAO Liudong, LI Lixin, WANG Yu, et al. Summary of research progress in turbodrill [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(10): 269-274.
- [7] 钱程远, 王瑜, 张凯, 等. 井下动力钻具轴承发展现状调研[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(2): 46-51.
- QIAN Chengyuan, WANG Yu, ZHANG Kai, et al. Research on the development status of bearings for downhole motor [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(2): 46-51.
- [8] 赵广, 郭嘉楠, 王晓放, 等. 转子-齿式联轴器-轴承系统不对中动力学特性[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(3): 338-345.
- ZHAO Guang, GUO Jianan, WANG Xiaofang, et al. Dynam-

- ics of rotor-gear coupling-bearing system with misalignment[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2011, 51(3): 338-345.
- [9] 孙超,韩捷,关惠玲,等.齿式联轴器联接不对中振动机理及特征分析[J].振动、测试与诊断,2004,24(3):229-233.
SUN Chao, HAN Jie, GUAN Huiling, et al. Analysis of force, motion and vibration of gear coupling with misalignment [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2004, 24(3): 229-233.
- [10] 韩清凯,王美令,赵广,等.转子系统不对中问题的研究进展[J].动力学与控制学报,2016,14(1):1-13.
HAN Qingkai, WANG Meiling, ZHAO Guang, et al. A review of rotor systems with misalignment[J]. Journal of Dynamics and Control, 2016, 14(1):1-13.
- [11] 龙鑫.齿式联轴器不对中动力学特性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
LONG Xin. Analysis of dynamic characteristics of gear coupling with misalignment[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [12] 黎建平.基于小波分析与数据挖掘的旋转机械故障诊断研究[D].赣州:江西理工大学,2010.
LI Jianping. Research on fault diagnosis of rotating machinery based on wavelet analysis and data mining[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2010.
- [13] 宋光雄,宋君辉,梁会钊,等.大型旋转机械不对中故障研究及分析[J].汽轮机技术,2013,55(1):1-5,42.
SONG Guangxiong, SONG Junhui, LIANG Huizhao, et al. Studies and analysis of high capacity rotary machines with misalignments[J]. Turbine Technology, 2013, 55(1):1-5,42.
- [14] 韩捷,石来德.转子系统齿式联接不对中故障的运动学机理研究[J].振动工程学报,2004,17(4):416-420.
HAN Jie, SHI Laide. Study on kinematic mechanism of misalignment fault of rotor system connected by gear coupling[J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(4):416-420.
- [15] 马俊骁,盛伟,潘宏刚.双跨转子平行不对中故障研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2020,16(1):25-29.
MA Junxiao, SHENG Wei, PAN Honggang. Research on parallel misalignment fault of double-span rotor[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2020, 16(1):25-29.
- [16] 许琦,吴昊,赵立超,等.多跨转子系统耦合故障定量诊断方法[J].振动工程学报,2015,28(3):495-502.
XU Qi, WU Hao, ZHAO Lichao, et al. Quantitative coupling fault diagnosis method of multi-span rotor based on harmonic components [J]. Journal of Vibration Engineering, 2015, 28(3), 495-502.
- [17] 万召,荆建平,孟光,等.弹性联轴器不对中转子-轴承系统的非线性动力学特性及稳定性研究[J].振动与冲击,2012,31(24):20-25.
WAN Zhao, JING Jianping, MENG Guang, et al. Nonlinear dynamic behaviors and stability of a rotor-bearing system with flexible coupling misalignment [J]. Vibration and Impact, 2012, 31(24):20-25.
- [18] 李明,阿梅.具有轴承不对中的多跨柔性转子系统非线性动力学研究[J].动力学与控制学报,2011,9(4):309-313.
LI Ming, A Mei. Nonlinear dynamics of flexible multi-rotor system supported on misaligned journal bearing[J]. Journal of Dynamic and Control, 2011, 9(4):309-313.
- [19] 庞智元,潘宏刚,肖增弘,等.双跨转子联轴器偏角不对中试验测量与分析[J].热能动力工程,2020,35(4):62-69,77.
PANG Zhiyuan, PAN Honggang, XIAO Zenghong, et al. Measurement and analysis of misalignment of deviation angle of double-span rotor coupling[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(4):62-69,77.
- [20] 丁磊,杨超君,孔令营.角向不对中可调速盘式异步磁力联轴器的转矩特性分析[J].机械设计与研究,2012,28(6):63-66.
DING Lei, YANG Chaojun, KONG Lingying. Torque characteristics analysis of adjustable axial asynchronous permanent magnet couplings with angular misalignment [J]. Mechanical Design & Research, 2012, 28(6):63-66.
- [21] 牛振华.矿井通风机故障诊断专家系统的研究[D].焦作:河南理工大学,2007.
NIU Zhenhua. Research on the fault diagnosis expert system of mine ventilator [D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2007.
- [22] 张祖德,王玉强.旋转机械转子不对中的故障诊断[J].特钢技术,2010,16(4):56-59.
ZHANG Zude, WANG Yuqiang. Analysis on malfunction of misalignment in rotary machine rotor[J]. Special Steel Technology, 2010, 16(4):56-59.
- [23] 李丽,肖增弘,张超臣,等.多跨多支点转子系统平行不对中故障研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2019,15(4):312-316.
LI Li, XIAO Zenghong, ZHANG Chaochen, et al. Research on parallel misalignment of multi-span multi-supports rotor system [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2019, 15(4):312-316.
- [24] 马文生,李方忠,陈平伟,等.转子不对中非线性动力学特性研究[J].兵器装备工程学报,2019,40(3):217-221.
MA Wensheng, LI Fangzhong, CHEN Pingwei, et al. Study of misalignment nonlinear dynamics characteristics [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(3):217-221.
- [25] 蒋玲莉,陈雨蒙,李学军,等.双转子系统联轴器不对中振动响应分析[J].机械科学与技术,2019,38(9):1350-1356.
JIANG Lingli, CHEN Yumeng, LI Xuejun, et al. Vibration analysis of dual-rotor system with coupling misalignment [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2019, 38(9):1350-1356.