

钻杆扭矩扭应力动态分析*

杨惠民 陈泽华

(中国地质大学)

介绍了钻杆回转时扭应力的采集、处理与分析方法,认为扭矩频率是疲劳折断钻杆的主要因素。这种频率的变化与孔深有关。建议钻机的转速应避免钻机固有的扭距频率。

关键词: 钻杆; 疲劳折断; 扭矩频率; 扭应力; 扭应力幅; 扭应力循环次数

疲劳折断是最常见的钻杆折断形式,它是钻杆在孔内受到随机变化的多种载荷复合作用而引起的,诸如轴压力、扭矩、摩擦力、孔壁对钻杆的支承力,以及钻杆回转过程中产生的扭振和纵向振动,等等。其中起主要作用的是扭矩,主要体现在钻杆所受的平均扭应力、扭应力幅和应力循环次数上。高转速钻进时,回转扭矩和扭振大增,相应地扭应力幅及平均扭应力也随之增大,特别是扭振增大使扭应力幅加大,从而加速了钻杆的疲劳破坏。绳索取心钻进所用薄壁钻杆,其寿命一般低于常规钻杆,因而影响了该项技术的进一步推广。钻机传动元件所受回转载荷,也与钻杆扭矩密切相关。因此,研究钻杆所受扭矩、扭应力,揭示其变化规律,对于提高钻机设计水平,寻求提高钻杆疲劳强度的途径,具有重要意义。

疲劳破坏理论研究表明,当平均应力和应力幅相同时,后者对材料的破坏程度远大于前者。因此,本文着重讨论扭矩和扭应力的动态变化,即应力幅的变化。另外,由于回转扭矩中存在多个周期分量,若要查明钻杆扭应力单位时间内的循环次数,就必须先找出对疲劳破坏起主要作用的扭矩周期分量。

回转扭矩现场微机 实时采集

1. 回转扭矩数据微机采集系统^[1]

为了真实地记录随机变化着的钻杆回转扭矩,我们采用TP801-B型单板机作为采集系统主机。考虑到直接在钻机传动链末端采集回转扭矩很困难,因此对电动机的输出功率和主轴转速同时采集,然后将其转换为回转扭矩。这是基于以下假设的:钻机传动系统是刚性的,传动元件在传递载荷时不发生数学特性上的变化。这样,回转器所受的回转功率与电动机输出功率就完全一致。图1为数据采集及处理过程流程图。

采集系统的采集频率为50 Hz,每个样本记录的采样点在2K(2048)个以上,满足数学分析要求。整个系统的误差小于3.3%。

2. 回转扭矩的现场采集

在北京、河南等地先后采集了4个钻孔的回转扭矩数据。实测回转载荷一时间历程图见图2。

* 田雪丰、周辉峰、何学志参加了部分工作。

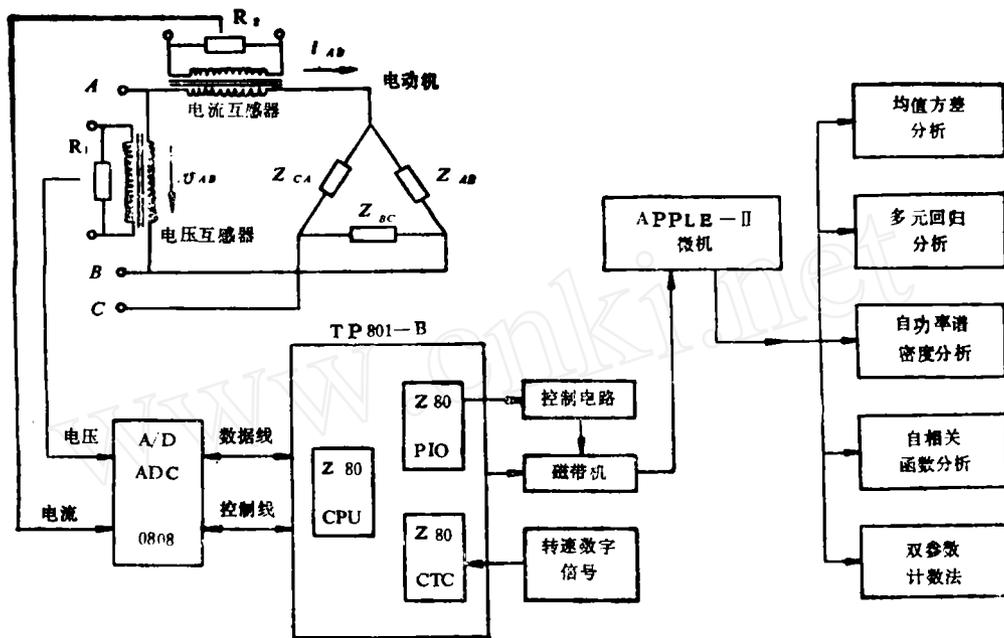


图 1 回转扭矩数据采集、处理流程图

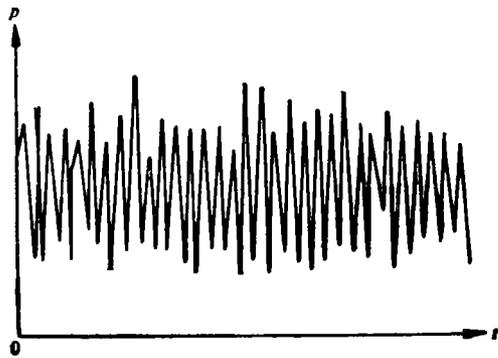


图 2 回转载荷—时间流程图

钻孔No I: 在北京101队放马峪铁矿区采集, XU-600-3型钻机, 绳索取心金刚石钻进, $\phi 53 \times 4.5\text{mm}$ 钻杆, 冲洗液为皂化液加清水, 钻孔角度 90° , 孔深385m。

钻孔No II: 钻孔角度 82° , 孔深260m, 其余条件同钻孔No I。

钻孔No III: 在河南2队桐柏老湾金矿区采集, XY-4型钻机, 常规金刚石钻进, $\phi 50 \times 6.5\text{mm}$ 钻杆, 钻孔角度 82° , 孔深210m。

钻孔No IV: 孔深380m, 其余条件同钻孔No III。

回转扭矩分析的数学基础

钻杆在孔内回转时, 回转—扭矩时间历程是一个随机过程, 即具有各态历经性的平稳的随机过程^①, 但采集时只可能出现一个扭矩时间历程。记录下的扭矩时间历程的数学特征, 与可能出现的扭矩时间历程是相同的。这就可以用记录下的扭矩时间历程, 代表采集那段时间的回转扭矩^[2,3]。而且, 因为回转扭矩时间历程各态历经性是平稳的, 故可对其进行自相关函数分析和自功率谱密度分析。

1. 自相关函数分析

回转扭矩的自相关函数分析, 可以提供回转扭矩在时域上的信息, 以找出扭矩的周期分量及其强弱。若一个样本记录的采样点

① 陈泽华: 钻机回转载荷分析, 1988年。

为 N ，两相邻采样点之间的时间间隔为 Δt ，则可以写出自相关函数的离散形式如下：

$$R(i\Delta t) = \frac{1}{N-i} \sum_{k=1}^{N-i} x(k\Delta t) \cdot x(k\Delta t + i\Delta t) \quad (1)$$

式中， $R(i\Delta t)$ ——延迟时间为 $i\Delta t$ 时的自相关函数； i ——第 i 个采样点，且 $t=0, 1, 2, \dots, N-1$ ； $x(t)$ ——时间为 t 的回转扭矩， $t=i\Delta t$ 或 $k\Delta t$ 。通常用自相关系数 ρ 来衡量周期性的强弱，

$$\rho = R(i\Delta t)/R(0) \quad (2)$$

2. 自功率谱密度分析

自功率谱密度分析可以提供回转扭矩在频率域上的信息，找出扭矩的各个频率分量及其能量大小，查明对钻杆疲劳破坏起主要作用的频率分量。对一个平稳的确定信号 $x(t)$ ，其自功率谱密度离散形式为：

$$G_x(f) = S_x(f) \cdot S_x^*(f) \quad (3)$$

$$S_x(f) = \sum_{r=0}^{N-1} x_r \cdot e^{-2\pi jnr/N} \quad (4)$$

$G_x(f)$ ——频率为 f 的自功率谱密度，其值越大，说明频率为 f 处振动越大； $S_x^*(f)$ —— $S_x(f)$ 的共轭复数； N ——信号 $x(t)$ 的一个样本记录的采样点数； n ——频率系列， $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ ； r ——时间系列， $r=0, 1, 2, \dots, N-1$ ； f ——频率分量， $f = \frac{n}{N} f_{\text{采}}$ ($f_{\text{采}}$ 为采样频率)。

将采集到的各扭矩一时间历程的样本，按上述方法在计算机上处理^[4]，即可得到扭矩在时域、频域方面的信息。

实测扭矩数据处理

以某一挡转速钻进时，假定转速恒定不变，则回转功率与扭矩振动的变化形式完全相同，只是幅值不同。因此，可以用回转功率样本记录来分析回转扭矩。4个实测孔的自相关函数和自功率谱密度分析结果见图3~12。

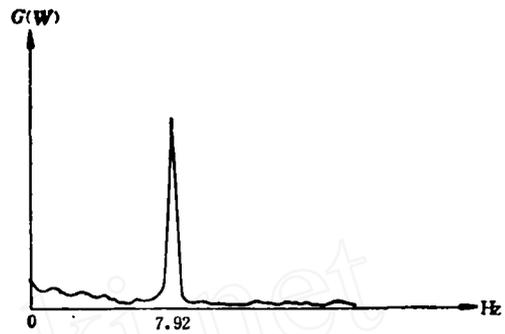


图3 钻孔No II的自功率谱密度图
 $H=106\text{m}$, $n=1096\text{r/min}$, $G_{\text{max}}=78$

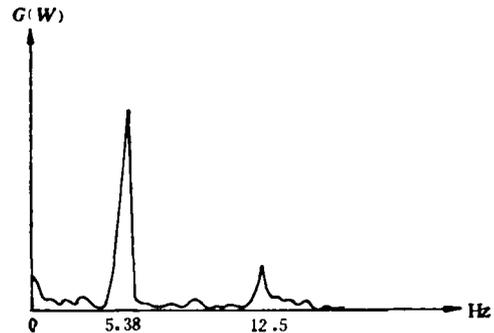


图4 钻孔No III的自功率谱密度图
 $H=154\text{m}$, $n=819\text{r/min}$, $G_{\text{max}}=65$

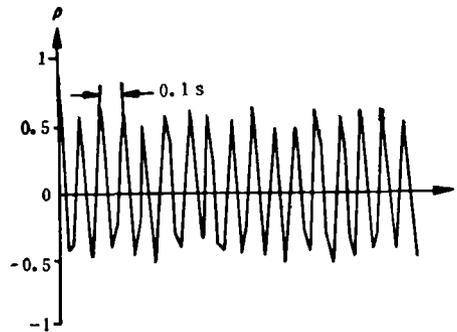


图5 钻孔No IV的自相关函数图
 $H=241\text{m}$, $n=574\text{r/min}$, $\rho_{\text{max}}=0.63$

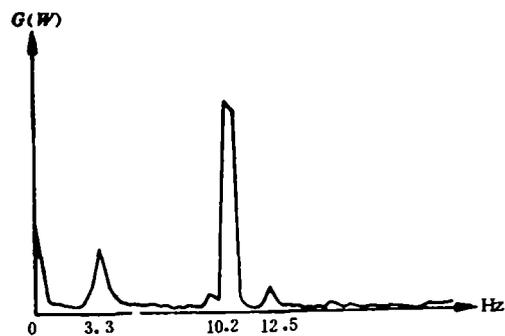


图6 钻孔No IV的自功率谱密度图
 $H=241\text{m}$, $n=574\text{r/min}$, $G_{\text{max}}=80.4$

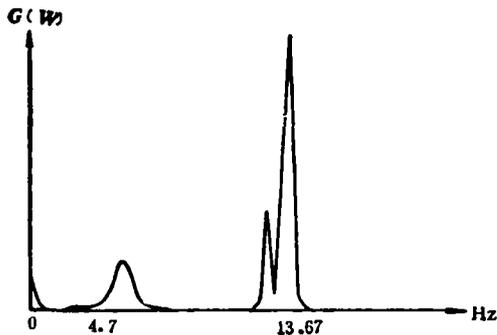


图 7 钻孔No III的自功率谱密度图
 $H=180\text{m}$, $n=819\text{r/min}$, $G_{\text{max}}=47.2$

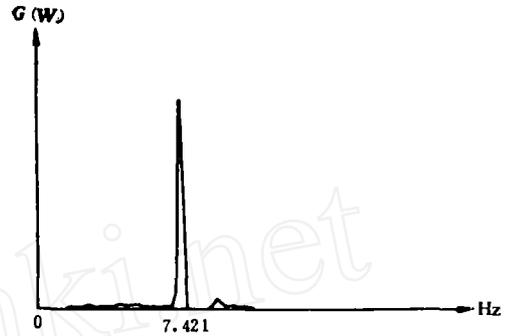


图 10 钻孔No I自功率谱密度图
 $H=33\text{m}$, $n=655\text{r/min}$, $G_{\text{max}}=1964$

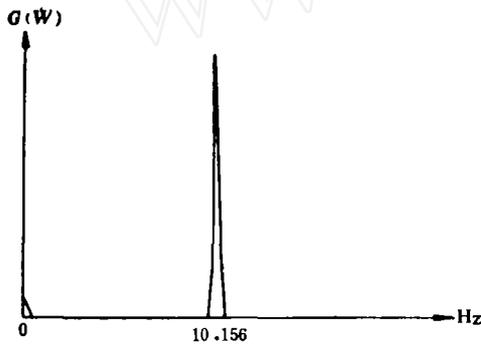


图 8 钻孔No II自功率谱密度图
 $H=244\text{m}$, $n=1096\text{r/min}$, $G_{\text{max}}=1098.4$

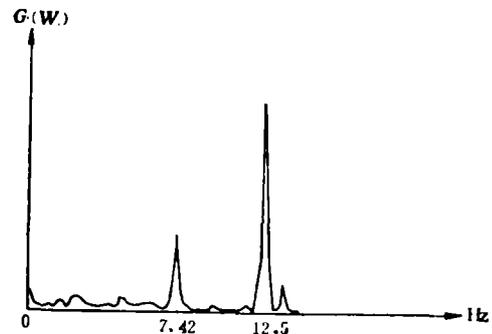


图 11 钻孔No IV的自功率谱密度图
 $H=342\text{m}$, $n=819\text{r/min}$, $G_{\text{max}}=84.5$

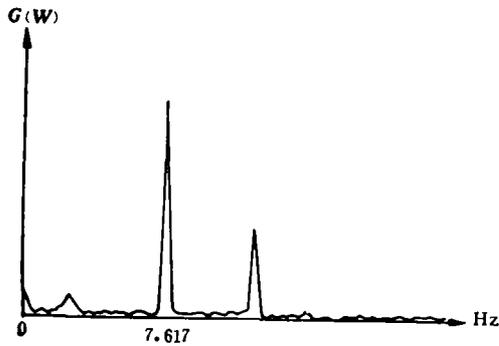


图 9 钻孔No I的自功率谱密度图
 $H=334\text{m}$, $n=1096\text{r/min}$

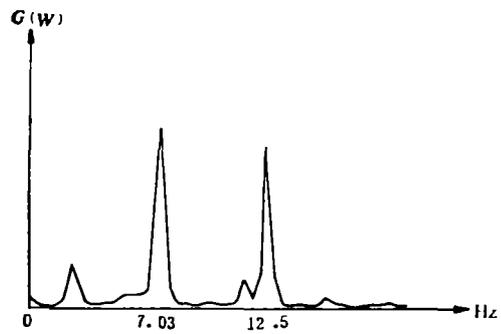


图 12 钻孔No IV的自功率谱密度图
 $H=374\text{m}$, $n=574\text{r/min}$, $G_{\text{max}}=21.9$

从以上各图可以看出:

(1) 回转扭矩一时间历程是一个平稳窄带过程, 即扭矩在一狭窄范围内集中了绝大部分能量。如果把窄带的中心频率看作是扭矩的频率, 则扭矩频率只与孔深有关, 且随孔深加大而降低, 而与钻杆转速、钻杆壁

厚无关。并且, 在孔深200m左右扭矩频率值发生突变。如图4中的频率为5.38Hz, 而图8中的频率为10.156Hz。同时, 在频率由低向高的突变过程中存在一个过渡区, 如图6、7中都是高、低频率并存, 但孔稍深(如图10)时, 低频消失或很小。

(2) 自相关函数分析和自功率谱分析得出的结果是一致的。根据同一样本记录分析, 图5得出的扭矩周期为0.1s, 图6得出的频率为10.2Hz。这一点也证明了扭矩一时间历程是平稳过程这一结论^[2,3]。

(3) 从自功率谱密度图看, 绳索取心钻杆扭矩振动比常规金刚石钻进钻杆剧烈。根据钻孔No I 和No II 各样本记录得出的谱密度较大, 说明绳索取心钻杆所受动载大, 同时钻杆壁薄也加剧了钻杆的疲劳损伤, 其疲劳寿命低于常规金刚石钻杆。

实测数据结果分析及其应用

1. 钻杆回转扭矩频率公式的推导

从以上分析可知, 扭矩频率仅与孔深有关, 而与转速等无关。孔深达到200m左右时, 频率会发生突变。因此, 以这个深度为基准, 分别对扭矩频率作数学拟合。

(1) 孔深小于200m时, 扭矩频率 f 的拟合公式为:

$$f = 830 / L \quad (5)$$

式中, L 为孔深 (m)。

将式(5)的计算值与实测数据的处理值对比于表1。

表1中的实测频率1的谱密度比实测频率2的大。从表中可以看出, 实测频率值与拟合计算值基本吻合。随着孔深加大, 钻杆回转载荷加大, 钻杆的疲劳损伤也加快。因此, 研究中深孔钻杆扭矩频率更为重要。

(2) 当孔深达到200m时, 扭矩频率向更高的频率转换, 但仍与孔深有关。对大于200m的钻孔扭矩频率作数学拟合, 得出扭矩频率与孔深的关系式为:

$$f = 2500 / L \quad (6)$$

将式(6)的计算值与不同孔深的实测扭矩频率值对比列于表2。

由表2可见, 实测频率值与拟合计算值吻合较好。故式(6)可在实际工作中运用。

表 1

钻孔号	孔深 (m)	计算频率 (Hz)	实测频率(Hz)	
			1	2
I	100	8.30	8.40	
	103	8.06	7.92	
	236	3.52	10.30	
	263	3.15	9.18	3.12
II	106	7.83	7.92	
	110	7.54	7.72	
	124	6.69	6.83	
	151	5.49	5.90	
	223	3.72	10.70	3.63
III	125	6.69	6.72	12.50
	154	5.39	5.38	12.50
	174	4.77	5.08	12.50
	180	4.61	13.67	12.50
	208	3.99	3.91	12.50
IV	100	8.30	8.25	
	104	7.98	8.20	12.50
	110	7.54	7.71	12.50
	168	4.94	5.2	12.50
	241	3.44	10.2	3.51

表 2

孔深 (m)	计算频率 (Hz)	绳索取心钻进, XU-600-3		常规金刚石钻进, XY-4		孔深 (m)	计算频率 (Hz)
		实测频率(Hz)	误差(%)	实测频率(Hz)	误差(%)		
244	10.24	10.20	0.39	10.35	-1.0	400	6.25
260	9.61	9.33	3.00	9.67	-0.70	500	5.00
294	9.50	8.38	1.40	8.70	-2.30	600	4.17
334	7.49	7.65	-2.20	7.80	-4.00	700	3.57
360	6.94	6.90	0.62	7.00	-0.80	800	3.12
374	6.68	6.60	0.12	6.90	-3.10	1000	2.50

2. 单位时间内扭应力的循环次数

研究钻机传动元件和钻杆所受扭应力及其在单位时间内的循环次数,是疲劳强度设计的基础。如钻机传动元件和钻杆结构尺寸已经确定,其所受扭应力 τ 可表示为:

$$\tau = T \cdot k \quad (7)$$

式中, T 为扭矩; k 为取决于钻机传动元件和钻杆材质、截面尺寸的常数。因此, τ 的变化过程与 T 在频率上完全一致,只是幅值不同。由于钻进中钻机各传动元件所受到的回转功率 P , 就是钻杆的回转功率, 各传动元件的转速和所受扭矩大小尽管不同,但其扭矩频率与钻杆的扭矩频率却相同。因此,根据式(5)和(6)可以得出单位时间内钻杆、钻机传动元件所受扭应力的循环次数 η_k 为:

(1) 孔深小于200m时:

$$\eta_k = 830 \times 60 / L \quad (\text{次/分钟}) \quad (8)$$

(2) 孔深大于200m时:

$$\eta_k = 2500 \times 60 / L \quad (\text{次/分钟}) \quad (9)$$

扭应力的的大小只能根据功率谱的密度作出定性分析。而研究扭应力幅和平均扭应力幅值及其概率分布,则可以借助于双参数循环计数法处理扭矩或扭应力来实现。

3. XY-4型钻机的固有扭振频率研究

分析用XY-4型钻机所打NoⅢ、NoⅣ号钻孔不同孔深样本记录的自功率谱密度,并将其结果绘制在同一平面上,则可得到扭转功率谱场图(图13)。

图13表明,无论钻孔多深,在频率12.5 Hz处都或多或少地存在一个谱密度峰值,而XU-600-3型钻机所打的两个孔则不存在这个峰值,说明它是来自钻机本身,而不是钻

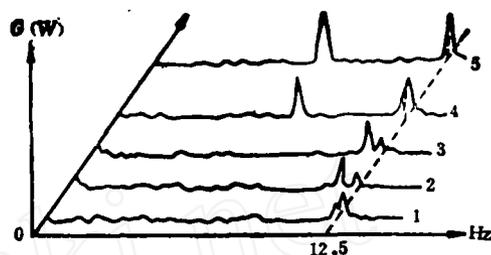


图 13 XY-4型钻机扭转功率谱场图

1—180m, 819r/min, 2—241m, 574r/min,
3—226m, 1190r/min, 4—324m, 819r/min,
5—374m, 574r/min

杆。由此可以判定频率12.5Hz是XY-4型钻机的固有扭振频率。在实际工作中,用XY-4型钻机的819r/min(13.65Hz)转速挡钻进时,卡盘和回转器摇晃,扭振剧烈。在设计钻机时,建议将各挡转速与钻机的固有扭振频率避开。

综上所述,回转扭矩一时间历程是平稳窄带过程。钻杆所受扭矩有较强的周期性。钻机传动元件和钻杆所受扭矩的频率仅与孔深有关,而与其他因素无关。孔深小于200m时,钻机传动元件和钻杆所受扭应力在单位时间内的循环次数 $\eta_k = 4.98 \times 10^4 / L$, 孔深大于200m后, $\eta_k = 1.5 \times 10^5 / L$ (次/分)。自功率谱密度分析可用于研究钻机的固有扭振频率。

参 考 文 献

- [1] 杨惠民等,《全国第一次探矿机械仪器学术会论文集》,1988年
- [2] J. S. 贝达特等,《随机数据分析方法》,国防工业出版社,1982年
- [3] 庄表中等编著,《随机振动概论》,地震出版社,1982年
- [4] P. D. Wech, IEEE Trans. Audio and Electroacoust., V, AV-15, №2, June, 1967.

A Dynamic Analysis on the Torsional Stress of a Drilling Rod

Yang Huimin Chen Zehua

The collection, processing and analysis of the torsional stress data of a revolving drilling rod are dealt with in this paper. It shows that torsional vibration frequency is the main factor for the fatigue break of the drilling rod and the variation of this frequency is in relationship with the hole depth. Thus the rotating speed of the drilling rig should be kept away from the intrinsic torsional vibration frequency of the drilling rod.