

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.3969/j.issn.1001-0890.2013.03.012

# 基于球面波传播理论的钻头趋近邻井防碰预测模型

何保生<sup>1</sup>, 刘华亮<sup>2</sup>, 刘刚<sup>2</sup>, 杨全枝<sup>2</sup>, 耿占力<sup>1</sup>

(1. 中海油研究总院, 北京 100027; 2. 中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛 266580)

**摘要:** 为实现丛式井地面防碰监测预警系统有效预测正钻井与邻井间距离的功能, 建立了钻头趋近邻井防碰预测模型。该模型依据弹性波的球面扩散和衰减吸收理论, 通过分析实测数据的幅值衰减规律而建立。利用该模型, 通过地面实时监测、分析、计算风险邻井套管的振动信号特征, 可求取钻头与邻井套管的距离, 识别钻头碰撞邻井井筒的可能性并及时预警。根据渤海某油田的防碰监测数据, 用所建模型计算出了监测井段钻头与邻井套管的距离; 对比测井数据计算的井眼扫描距离和模型计算结果发现, 利用该预测模型求解的钻头与邻井间的距离与测井数据得到的井间距离有明确的对应关系, 表明所建模型可以作为丛式井地面防碰监测预警系统预测井间距离的一种计算方式。

**关键词:** 丛式井 防碰 球面波 钻头 振动波 套管 数学模型

**中图分类号:** TE28<sup>+1</sup>    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-0890(2013)03-0062-05

## Anti-Collision Prediction Model for Drill Bit Approaching Adjacent Well Based on Spherical Wave Propagation Theory

He Baosheng<sup>1</sup>, Liu Hualiang<sup>2</sup>, Liu Gang<sup>2</sup>, Yang Quanzhi<sup>2</sup>, Geng Zhanli<sup>1</sup>

(1. CNOOC Research Institute, Beijing, 100027, China; 2. School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Huadong), Qingdao, Shandong, 266580, China)

**Abstract:** In order to improve the effectiveness of anti-collision system in offshore cluster well drilling anti-collision prediction model of drill bit approaching adjacent well was built based on the theory of elastic waves in spherical spreading and absorption attenuation, and amplitude attenuation pattern analysis of actual measured data. Through adjacent well casing vibration monitoring and data processing, the distance between the drill bit and adjacent well casing can be calculated by using the model, and the chance of well collision can be identified and warning provided. The model was used to analyze the casing vibration signals of adjacent wells in Bohai Sea, and gave the distance between drill bit and adjacent well casing. The distance between drill bit and adjacent well casing calculated from the model and well distance from log data matched well. It demonstrated that the model can be used to predict the distance between drilling and adjacent well, which could provide a new technical support for safe drilling of offshore cluster wells.

**Key words:** cluster wells; anti-collision; spherical wave; bit; vibration wave; casing; mathematical model

随着国内外部分海上油田开采进入中后期, 对加密调整井的需求不断增大, 导致海上平台井眼密度越来越大, 井眼防碰问题日趋突出<sup>[1]</sup>。目前钻井施工中采用的常规防碰检测技术(如钻井的整体优化设计、井眼轨迹控制<sup>[2]</sup>和防碰扫描<sup>[3-4]</sup>等)在某些情况下已无法满足现场防碰要求。由于随钻测量系统数据传输量小, 实时传输数据采样率受限, 测量点信息滞后(有时间差)等原因, 使实时防碰扫描存在滞后性及准确性受限等问题<sup>[5-7]</sup>。而利用专人在防碰段钻进时监听邻井套管判断井下钻头是否碰撞邻

收稿日期: 2012-12-16; 改回日期: 2013-04-23。

**作者简介:** 何保生(1972—), 男, 河南潢川人, 1994年毕业于江汉石油学院钻井工程专业, 高级工程师, 主要从事油气井钻井完井及采油方面的科研工作。

**联系方式:** hebsh@cnooc.com.cn。

**基金项目:** “十一五”国家科技重大专项“海上油田丛式井网整体加密及综合调整技术”之子课题“定向井防碰地面监测及预警系统研究”(编号: 2008ZX05024-004-006)、“十二五”国家科技重大专项“海上油田丛式井网整体加密及综合调整技术”之子课题“海上油田丛式井网整体加密调整多平台钻井趋近井筒监测方法研究”(编号: 2011ZX05024-002-010)资助。

井套管的方法,受监听人员的经验和平台周围环境噪声(风雨雷电、海浪、平台设备运行噪声等)的影响较大,实施难度较大,可靠性受到影响。因此,在人工监听方法的启发下,研制开发了丛式井地面防碰监测预警系统,该系统可在钻进过程中对风险邻井进行在线实时监测,在钻头碰到邻井套管之前进行预警<sup>[8]</sup>。而为了使该系统能具有有效预测正钻井与邻井间距离的功能,研究了基于所监测钻头诱发地面套管振动波特征识别钻头趋近距离的预测模型。

## 1 丛式井防碰监测预警系统工作原理

关于丛式井中正钻井与邻井间的防碰,目前的主要做法是,根据测井和随钻测量数据得到的井斜角、方位角及井深等参数,利用井眼轨迹计算及防碰预测软件,预测各井眼间的距离,当井间距离小于安全井距时进行预警(如中国海油采用的是分离系数<sup>[9]</sup>,当分离系数小于 1.0 时停钻,当分离系数小于 1.5 时预警),以防止井眼碰撞事故发生。而在现行的加密调整增产措施下,井间距离和分离系数常常超越现有的技术限制,也超出了靠轨迹扫描和优化轨道设计进行防碰施工的可控范围,钻头钻到邻井套管的风险日渐增大,而丛式井地面防碰监测预警系统可以有效解决该类问题。

丛式井地面防碰监测预警系统由振动检测传感器、信号滤波放大系统、数据采集系统和采集分析软件等构成(如图 1 所示),其监测目的是预测钻头距离风险邻井套管的距离以评价施工风险的大小,要预测钻头与风险邻井套管的距离需要根据振动信号在地层及套管中的传播、衰减规律,得出距离预测模型;监测原理是,通过安装在正钻井和风险邻井套

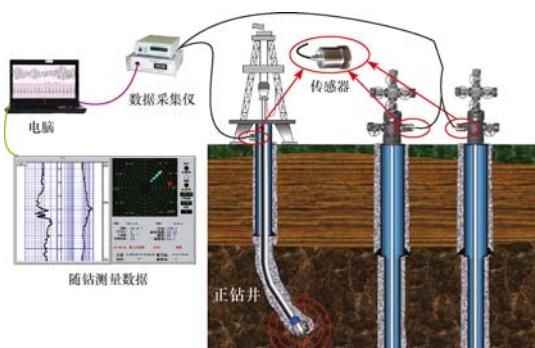


图 1 丛式井地面防碰监测预警系统的基本构成

Fig. 1 Components of the anti-collision system in off-shore cluster well drilling

管顶端的加速度传感器采集沿地层、套管传播到地面的钻头破岩振动信号,通过数据采集仪对数据进行滤波放大处理,利用数据采集分析软件对信号进行特征提取以判断钻头趋近邻井套管的趋势。

其中,信号采集系统的工作原理是:传递到套管头处的振动信号(模拟信号)引起与之相连的传感器共振,其内部的压电片受到撞击惯性力的作用会发生变形,在导电极面上由于压电晶体的压电效应而产生电荷,由此将模拟信号(振动信号)转换成与之对应的电信号,并将之传输到采集仪;信号采集仪将这些信号经放大、调理等处理后以某种数据的形式存储于计算机内;信号采集完成后,利用采集软件的数据分析处理模块对采集的数据进行时域分析、频域分析以及编辑滤波等分析操作,完成数据的前期处理。

## 2 钻头振动波传播规律

在钻头破碎地层时,钻头运动和破岩过程中所产生的振动波会在地层中传播,将振动能量传递至邻井套管;套管对振动信号具有快速、低衰减的传播特性<sup>[10]</sup>,可以采用套管作为连接井底与地面的高效信息通道,实时传输和反映井下钻头趋近套管信息。即钻头振动波在地层及套管中的传播,实质上是波源能量以波的形式传播的过程。

### 2.1 振动波在地层中的传播特性

振动波在地层中传播时,能量的衰减主要有 2 种形式<sup>[11]</sup>:1)当球面波向外传播时,分布在球面上的能量随着球面半径和面积的增大,单位面积上的能量降低,信号振幅与离开振源的距离成反比,这种随传播距离增加而引起振幅减小的现象称为“球面发散效应”;2)振动波在地层中传播时,由于地层的弹塑性和非均质性,振动质点间的摩擦使波的机械能转变为热能,使其弹性能量在通过介质时逐渐减小,称为“介质吸收效应”。

钻头产生的波为球面波(如图 2 所示),两球面的半径分别为  $r_1$  和  $r_2$ ,对应的球面面积分别为  $S_1$  和  $S_2$ 。由于通过  $S_1$  和  $S_2$  的波的能量相等,故:

$$I_{S1} S_1 = I_{S2} S_2 \quad (1)$$

式中:  $r_1, r_2$  分别为球面波传播半径, m;  $S_1, S_2$  分别为  $r_1, r_2$  对应的球面面积,  $m^2$ ;  $I_{S1}$  为  $S_1$  对应波的强度,  $W/m^2$ ;  $I_{S2}$  为  $S_2$  对应波的强度,  $W/m^2$ 。

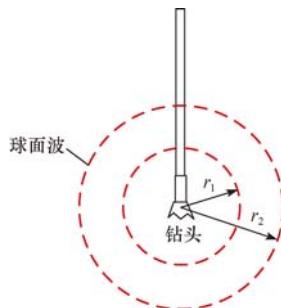


图 2 钻头产生的球面波(垂直剖面投影)示意

Fig. 2 Spherical wave generated by drill bit (vertical profile projection)

波的强度  $I$  为单位时间内通过单位面积的波的能量,它正比于振幅  $A$  的平方:

$$I \propto A^2 \quad (2)$$

则:

$$\frac{I_{s1}}{I_{s2}} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \Rightarrow \frac{A_1^2}{A_2^2} = \frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (3)$$

故有:

$$A_r = \frac{A_0}{r} \Big|_{r_0=1} \quad (4)$$

式中:  $I$  为单位面积波的能量,  $\text{W/m}^2$ ;  $A$  为震源传播至某点的振幅,  $\text{mm/s}^2$ ;  $r$  为传播距离,  $\text{m}$ ;  $A_1, A_2$  分别为传播距离为  $r_1, r_2$  时的幅值,  $\text{mm/s}^2$ ;  $A_0$  为单位距离处的幅值, 为震源初始幅值,  $\text{mm/s}^2$ ;  $A_r$  为传播距离为  $r$  时的幅值,  $\text{mm/s}^2$ 。

## 2.2 振动波在套管中的传播特性

相关研究表明<sup>[12]</sup>, 振动波在套管中的能量衰减主要与套管的长度、壁厚、接头数量和内外含液量等因素有关。套管接箍使套管柱成为周期性结构物, 由此引起的带阻效应(频带的通带和阻带, 如果振动波的频率位于通带内, 波的衰减较小; 反之, 如果振动波的频率位于阻带内, 波的衰减则较大)对振动波的能量衰减有一定影响。另外, 波能量在套管中的衰减还受到套管周围介质的影响, 包括胶结面的胶结质量、水泥环的弹性模量与厚度等。若忽略球面扩张引起的能量降低, 只考虑介质吸收引起的损失, 振动波在套管中的传播方程可以写为:

$$A_d = A_r e^{-\beta h} \quad (5)$$

式中:  $A_d$  为地面监测的幅值,  $\text{mm/s}^2$ ;  $A_r$  为传播距离为  $r$  时的幅值, 可作为套管振动波的初始振幅,  $\text{mm/s}^2$ ;  $h$  为沿套管传播的距离(为邻井井口至与钻头同垂深处的距离),  $\text{m}$ ;  $\beta$  为钻井液-套管-水泥环组成系统的衰减系数,  $1/\text{m}$ 。

## 3 钻头趋近邻井防碰预测模型的建立与验证

### 3.1 模型的建立

根据钻头振动波在地层及套管中的传播规律, 综合考虑波的能量球面扩散和能量吸收衰减, 结合式(4)和式(5)建立以下防碰预测模型:

$$r = A_0 \frac{e^{-\beta h}}{A_d} \quad (6)$$

式(6)中,  $A_d$  从监测数据得到,  $h$  从邻井井深数据获得,  $\beta$  和  $A_0$  利用每开次钻水泥塞过程中套管振动信号的幅值变化由式(6)统计得出, 因为钻水泥塞时钻头产生振动波的能量大、信号特征明显。

### 3.2 模型的验证

丛式井地面防碰监测预警系统在渤海某海上油田钻井现场进行了现场试验, 试验在 L 平台(井号以 L 开头)进行, 利用 Compass 进行防碰扫描选定 L11 井的风险邻井为 L5 井和 L8 井, 采集相应的数据。欲利用笔者所建模型计算相应的井间距离, 应先求取套管传播衰减系数。

#### 3.2.1 套管传播衰减系数求取及模型确定

在 L11 井二开钻水泥塞过程中, 采集 L5 井套管头振动信号幅值随 L11 井井深变化的关系: 井深 246 m 处对应的信号幅值为 3.103 758 mm/s<sup>2</sup>, 井深 248 m 处对应的信号幅值为 2.986 247 mm/s<sup>2</sup>, 井深 250 m 处对应的信号幅值为 2.892 438 mm/s<sup>2</sup>, 井深 252 m 处对应的信号幅值为 2.773 867 mm/s<sup>2</sup>。

在同一井身结构条件下, 钻水泥塞过程中一般保持钻压、转速不变, 套管下部结构位置固定, 可以近似认为钻头作用产生的震源初始幅值  $A_0$  相同, 即同一井深下其衰减系数不变。对 L11 井钻水泥塞数据进行拟合(拟合曲线如图 3 所示), 根据拟合结果并结合式(5), 得到该井套管传播衰减系数  $\beta = 0.0185/\text{m}$ , 震源初始幅值  $A_0 = 290.52 \text{ mm/s}^2$ 。则对于 L11 井和 L5 井而言, 钻头趋近邻井防碰预测模型为:

$$r = \frac{290.52}{A_d} e^{-0.0185h} \quad (7)$$

#### 3.2.2 钻头趋近邻井防碰预测模型验证

取 L5 井 250~500 m 井段(依据 Compass 扫描

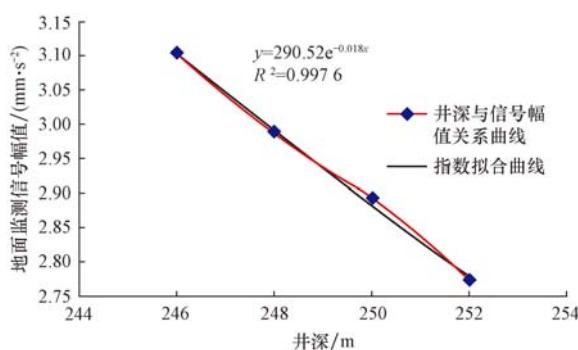


图 3 L5 井套管传播衰减系数拟合曲线

Fig. 3 Fitting curve of casing attenuation coefficient of Well L5

结果确定),以 5 m 为一测点,分别使用笔者所建距离预测模型和 Compass 软件计算井间距(井口中心距),结果见表 1。

由表 1 可知:1)当井间距离较小时,防碰预警系统模型计算结果误差较小,如井深 250~450 m 内,平均相对误差仅为 6.44 %,计算准确度较高;2)所建模型计算的井间距离与防碰扫描得到的井间距离有明确的对应关系,在 300~360 m 井深范围内井间有趋近趋势,在 360~450 m 井深范围内井间有远离趋势;3)随着井深和井间距离的增加,误差变大,例如井深 445 m 处,模型计算的 L11 井与 L5 井

表 1 L11 和 L5 井的距离及误差分析

Table 1 Distance between Well L11 and L5 and error analysis

井深/m	预测模型 计算距离/m	Compass 扫描 中心距/m	相对误差, %	井深/m	预测模型 计算距离/m	Compass 扫描 中心距/m	相对误差, %
255	9.36	9.20	1.74	380	9.78	9.58	2.09
260	9.47	9.45	0.21	385	10.56	9.94	6.24
265	9.57	9.63	0.62	390	11.59	10.29	12.63
270	10.00	9.78	2.25	395	12.33	11.33	8.83
275	9.48	9.86	3.85	400	12.83	12.60	1.83
280	9.69	9.92	2.32	405	13.55	13.26	2.19
285	9.89	9.91	0.20	410	14.33	13.91	3.02
290	10.10	9.87	2.33	415	14.86	14.56	2.06
295	10.07	9.78	2.97	420	16.00	15.18	5.40
300	9.85	9.66	1.97	425	16.55	15.79	4.81
305	9.74	9.49	2.63	430	18.01	16.37	10.02
310	9.69	9.29	4.31	435	19.12	16.93	12.94
315	9.42	9.06	3.97	440	19.97	17.45	14.44
320	9.47	8.80	7.61	445	20.30	17.93	13.22
325	9.06	8.54	6.09	450	23.39	18.45	26.78
330	8.85	8.27	7.01	455	23.62	18.91	24.91
335	8.44	8.03	5.11	460	26.05	19.45	33.93
340	8.00	7.81	2.43	465	26.63	19.77	34.70
345	7.76	7.64	1.57	470	26.99	19.17	40.79
350	7.73	7.56	2.25	475	27.65	20.55	34.55
355	7.64	7.54	1.33	480	27.30	20.91	30.56
360	8.14	7.66	6.27	485	27.15	21.24	27.82
365	7.89	7.77	1.54	490	27.83	21.56	29.08
370	8.51	8.15	4.42	495	28.95	21.84	32.55
375	9.10	8.52	6.81	500	28.57	22.13	29.10

最近距离为 20.30 m, 防碰扫描的最近距离为 17.93 m 的, 相对误差为 13.22 %。分析认为, 误差变大的原因是随着井深和井间最近距离的增加, 地面采集到的振动信号的信噪比降低;另外, 所建立的模型忽略了地层对振动波的吸收衰减作用, 而实际上随着井间距离的增大, 这种地层的吸收衰减并不

能忽略, 这样就导致井间距离较大时, 模型预测结果与防碰扫描结果产生了较大误差。因此, 在浅层段钻头距风险井距离较小时, 笔者所建的模型可作为丛式井地面防碰监测预警系统预测井间距离的一种计算方式, 说明基于球面波在地层及套管中的传播及衰减规律得到的距离预测模型在原理和计算结果

上的可行性,有助于提高监测预警系统井间距离预测的有效性;但毕竟在油田现场的试验应用尚不够,还有待于今后在实践中继续验证完善。

## 4 结论与建议

1) 基于弹性波的球面扩散和吸收衰减理论,建立了钻头趋近临井防碰预测模型,利用振动信号特征可求解钻头与风险邻井套管间的距离。

2) 钻头趋近邻井防碰预测模型在浅井段、钻头距风险邻井套管距离较小时,计算结果具有较高的精度,与基于测井数据的轨迹防碰扫描结果有明确的对应关系。

3) 随着井深和井间距离的增加,地面采集到的振动信号的信噪比逐渐降低,加之钻头趋近邻井防碰预测模型忽略了地层对振动波的吸收衰减作用,计算误差较大。

4) 建议通过多井钻水泥塞过程中的套管振动信号分析,得出该地区信号传播衰减系数。进一步研究地层特性对信号衰减的影响,为准确计算钻头趋近距离和远距离防碰预警提供更准确的模型。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 何保生,刘刚,王平双,等.基于钻头运动诱发套管头振动信号检测的井眼防碰监测方法[J].中国工程科学,2011,13(5):74-77.  
He Baosheng, Liu Gang, Wang Pingshuang, et al. Anti-collision monitoring based on detecting casing head vibration induced by drill movements[J]. Engineering Sciences, 2011, 13(5): 74-77.
- [2] 吴宏均,令文学,初永涛.吉林油田浅层丛式水平井井眼轨迹控制技术[J].石油钻探技术,2011,39(5):31-34.  
Wu Hongjun, Ling Wenzhong, Chu Yongtao. Trajectory control technology for shallow cluster horizontal wells in Jilin Oilfield [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2011, 39(5): 31-34.
- [3] 刘永旺,管志川,史玉才,等.井眼防碰技术存在的问题及主动防碰方法探讨[J].石油钻采工艺,2011,33(6):14-18.  
Liu Yongwang, Guan Zhichuan, Shi Yucai, et al. Discussion on problems of wellbore anti-collision technology and active anti-collision methods[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2011, 33(6): 14-18.

- [4] 鲁港,常汉章,邢玉德,等.邻井间最近距离扫描的快速算法[J].石油钻探技术,2007,35(3):23-26.  
Lu Gang, Chang Hanzhang, Xing Yude, et al. Fast algorithm for scanning the nearest distance among adjacent wells[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2007, 35(3): 23-26.
- [5] Nitin Sharma, Mike McDonald, Jeffrey Mohammed, et al. Optimizing directional drilling while minimizing the risk of well collision in offshore drilling[R]. SPE 124246, 2009.
- [6] Benny Poedjono, Chinh Phan Van, Guy J Lombardo, et al. Anti-collision risk management for real-world well placement[R]. SPE 121094, 2009.
- [7] 刘刚,孙金,何宝生,等.定向井防碰地面监测系统设计及现场试验[J].石油钻探技术,2012,40(1):7-11.  
Liu Gang, Sun Jin, He Baosheng, et al. Design and field test of surface monitoring system for directional wells anti-collision [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(1): 7-11.
- [8] 刘刚,孔得臣,孙金,等.套管头振动信号特征应用于油井防碰监测的可行性分析[J].中国海上油气,2012,24(3):54-57.  
Liu Gang, Kong Dechen, Sun Jin, et al. Feasibility analysis on application of casing head vibration signal in wellbore anti-collision monitoring[J]. China Offshore Oil and Gas, 2012, 24(3): 54-57.
- [9] 刁斌斌,高德利.邻井定向分离系数计算方法[J].石油钻探技术,2012,40(1):22-27.  
Diao Binbin, Gao Deli. Calculation method of adjacent well oriented separation factors[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2012, 40(1): 22-27.
- [10] 陈正翔,江松青,张维衡.圆柱壳中结构振动波的传播特性[J].振动工程学报,1998,11(4):450-456.  
Chen Zhengxiang, Jiang Songqing, Zhang Weiheng. Dispersion characteristics of structure vibration waves in cylindrical shells[J]. Journal of Vibration Engineering, 1998, 11(4): 450-456.
- [11] 张家田.丛式钻井防碰预警系统测量模型的建立[J].西北大学学报:自然科学版,2001,31(5):418-420.  
Zhang Jiatian. Test model of group drilling defend touch yellow alert system[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 2001, 31(5): 418-420.
- [12] 刘合,王秀喜.套损井整形冲击应力波的传播机理研究[J].工程力学,2005,22(4):206-210.  
Liu He, Wang Xiuxi. Mechanism of impact stress wave spread in reshaping of destroyed casing well[J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(4): 206-210.

[编辑 令文学]