

# 底部钻具组合的涡动特征分析

姚永汉 狄勤丰 朱卫平 胡以宝 王文昌 姚建林

(上海市应用数学和力学研究所(上海大学)上海市能源与环境工程中的关键力学问题重点实验室,上海 200072)

**摘 要:**编制了井底钻具组合动力学特性的模拟程序,模拟结果与文献中的结果对比表明,所编模拟程序的模拟结果正确。利用井底钻具组合动力学特性的模拟程序模拟了钻铤形心的径向速度、径向加速度、涡动加速度、涡动速度功率谱以及相图,较全面地反映了井底钻具组合的动力学特性。结果表明:井底钻具组合在特定的情况下可以做规则涡动,更多的是做非规则涡动,没有运动周期;做规则涡动时,钻铤形心的涡动速度较小,其径向速度、径向加速度和涡动加速度均为 0。在文中条件下,钻铤形心的涡动速度高达 568.73 r/min,远大于规则向后涡动速度(79.41 r/min),该种状态的出现对钻具组合的导向能力及安全性将造成很大的影响,值得进一步探讨。

**关键词:**钻具组合;钻柱振动;动力学;数学模型;数值模拟

**中图分类号:**TE21;TE921<sup>+</sup>.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0890(2010)04-0084-05

## Analysis of Whirling Properties of Bottom Hole Assembly

Yao Yonghan Di Qinfeng Zhu Weiping Hu Yibao Wang Wenchang Yao Jianlin

(Shanghai University, Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai Key Laboratory of Mechanics in Energy and Environment Engineering, Shanghai, 200072, China)

**Abstract:** A program was made using Matlab to investigate the dynamic properties of bottom hole assembly (BHA), the calculated results agree with reported results. The simulations radial speed, radial acceleration, whirl acceleration, spectrum of whirl speed and phase portrait show the dynamic properties of BHA comprehensively. The result shows that the whirl of BHA can be regular under given conditions, while it is non-regular in most cases. When it is regular, the whirl speed of drilling collar is small with zero radial speed, radial acceleration and whirl acceleration. Under the condition described in this paper, the maximum whirl speed of BHA is 568.73 r/min which is larger than regular back whirl speed of 79.41 r/min. This dynamic property affects the steering ability and the safety of BHA which needs further study.

**Key words:** bottom hole assembly; drilling string vibration; dynamics; mathematical model; numerical simulation

底部钻具组合(bottom hole assembly, BHA)是控制井眼轨迹的主要工具,也是井下测试工具的主要载体,因此, BHA 的动力学特性对井眼轨迹控制精度、井下测试资料的准确性及设备的安全性具有重要影响。纵观钻柱动力学的发展历史可知<sup>[1-4]</sup>, 国内外学者建立了各种模型来尽可能地反映钻井过程中钻柱运动的真实情况。1991 年, J. D. Jansen 首次系统地将转子动力学理论应用于 BHA 动力学特性研究, 结果较好地反映了 BHA 的涡动特性<sup>[5]</sup>, 而且这种有效性已得到初步检验<sup>[6-7]</sup>。J. D. Jansen 的

研究揭示了钻柱的动力响应有很强的非线性, 甚至可能进入混沌状态, 并在现场得到了较好的验证。1997 年, A. P. Christoforou 利用 Rayleigh 梁模型对

**收稿日期:**2009-07-13; **改回日期:**2010-06-17

**基金项目:**国家自然科学基金项目“磁独立六加速度计井眼轨迹参数测量技术的理论研究”(编号:50174047)和“空气钻井直井易斜机理及其控制技术研究”(编号:50674065)及上海市科委项目“西部地区高陡构造油气资源快速钻探技术研究”(编号:061658035)资助

**作者简介:**姚永汉(1984—),男,贵州荔波人,2007 年毕业于山东大学工程力学专业,在读硕士研究生。

**联系方式:**(021)56333256, yaoyonghan2006@163.com

BHA 的动力学特性进行了研究,其研究结果较好地反映了 BHA 的力学特性<sup>[8]</sup>,但没有考虑钻井液附加质量以及稳定器间隙的影响。2007 年, Y. A. Khulief 综合考虑纵向和横向振动的耦合、横向和扭转振动的耦合、惯性力以及粘滑运动,并用有限元方法求得钻柱的动态响应<sup>[9]</sup>,但忽略了钻柱与井壁的接触及钻井液与钻柱的相互作用,也没考虑稳定器间隙的影响。笔者以 J. D. Jansen 的研究为基础,考虑 BHA 与井壁的接触、钻井液附加质量以及稳定器间隙等综合因素,利用转子动力学理论,计算了钻铤形心的径向速度、径向加速度、涡动加速度、涡动速度功率谱图以及相图等,以对 BHA 的动力学特性进行进一步的描述。

## 1 BHA 动力学模型及动力学特性模拟

把底部钻具组合(BHA)简化为质量弹簧模型(mass-spring model),可得其动力学方程<sup>[5,10]</sup>为:

$$\{\beta(\ddot{r} + 2i\dot{r}\dot{\theta} + i\ddot{\theta} - r\dot{\theta}^2) + \xi|\dot{r} + ir\dot{\theta}|(\dot{r} + ir\dot{\theta}) + Q_k\} \exp(i\theta) = \varepsilon\eta^2 \exp(i\eta\tau + i\zeta_0) - iQ_g \quad (1)$$

式中:  $(r, \theta)$  为极坐标;  $Q_g$  为井眼倾斜影响下的重力项;  $Q_k$  为恢复力项。

$$Q_g = -imgf_b \sin\alpha / (c_0 k) \quad (2)$$

$$Q_k = \begin{cases} 0 & 0 \leq r \leq \delta \\ r - \delta + i\phi(\delta - \delta^2/r) & \delta < r \leq 1 \\ r - \delta + i\phi(\delta - \delta^2/r) + (1 + iS\mu_c)\rho(r - 1) + \nu\dot{r} & r > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$S = \text{sgn}(\dot{\theta} + \eta R_c) \quad (4)$$

式中:  $k$  为钻铤的等效刚度, N/m;  $r = q/c_0$ ;  $c_0$  为钻铤间隙,  $c_0 = 0.5(D_h - D_c)$ , m;  $D_h$ 、 $D_c$  分别为井眼、钻柱的直径, m;  $\beta = (m + m_f)/m$ ;  $m$ ,  $m_f$  分别为钻柱、钻井液的等效质量, kg;  $\delta = s_0/c_0$ ;  $s_0$  为稳定器间隙,  $s_0 = 0.5(D_h - D_s)$ , m;  $D_s$  为稳定器直径, m;  $\varepsilon = e/c_0$ ;  $e$  为偏心距, m;  $\omega$  为固有频率,  $\omega = \sqrt{k/m}$ , Hz;  $\eta = \Omega/\omega$ ;  $\Omega$  为转速, r/min;  $\xi = c_f c_0/m$ ;  $c_f$  为钻井液的等效阻尼系数;  $\tau = \omega t$ ;  $t$  为时间, s;  $\nu = c_w/m\omega$ ;  $c_w$  为井壁阻尼系数;  $\rho = k_w/k$ ;  $k_w$  为井壁的修正刚度系数, N/m;  $\phi$  为稳定器与井壁的摩擦角, rad;  $\mu_c$  为钻柱与井壁的摩擦因数;  $\zeta_0$  为初始相位角, rad;  $f_b$  为浮力系数;  $\alpha$  为井眼倾斜角, rad;  $R_c = D_c/(D_h - D_c)$ 。

文献[10]利用式(1)计算了一双稳定器钻具组合的动力学特性。双稳定器钻具组合的参数: 钻铤外径为 0.228 6 m, 钻铤内径为 0.076 2 m; 两个稳

定器的外径都为 0.419 1 m, 两稳定器之间的距离为 19.81 m; 井眼直径为 0.444 5 m。计算时用到的其他参数:  $\beta = 1.40$ ;  $\delta = 0.20$ ;  $\varepsilon = 0.12$ ;  $\eta = 0.90$ ;  $\phi = 0.20$  rad;  $\mu_c = 0.10$ ;  $Q_g = 0$ ;  $h = 0.006 3$ ;  $t_0 = 0$ ;  $t_{\text{end}} = 250$  s。

笔者首先编制了井底钻具组合动力学特性的模拟程序(模拟程序的流程图见图 1), 并利用文献[10]的结果对模拟程序的准确性进行验证。图 2 为模拟结果与文献[10]的计算结果比较。从图 2 可以看出, 两者一致性好, 说明笔者所编模拟程序的模拟结果是正确的。

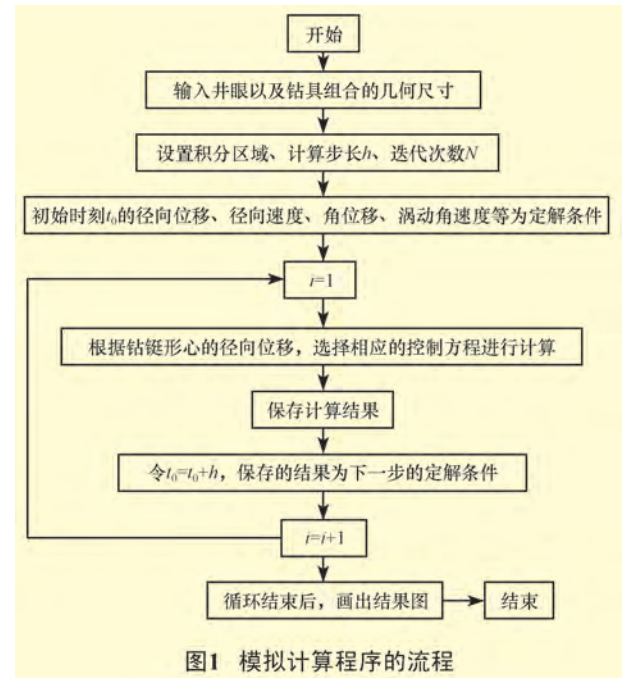


图1 模拟计算程序的流程

## 2 BHA 涡动特性分析

钻具的涡动已为理论和实验所证实,其反映的是在钻进过程中钻具绕井眼轴线运动的特征,是钻具与井壁碰摩的结果。其涡动轨迹十分复杂,涡动特征无法很好地用模型加以描述,因此,在文献[11]中,用沿井壁向前或向后做无滑动运动这种有规则的涡动来对钻柱涡动的性质进行描述,并给出了后涡动角速度临界值的计算模型。

$$\Omega_b = \frac{r}{R-r}\Omega \quad (5)$$

式中:  $\Omega_b$  为涡动角速度;  $\Omega$  为钻具绕自身轴线的转动速度;  $R$  为井眼半径;  $r$  为钻具半径。

文献[12]对这种规则涡动也进行了探讨,并认为由于钻铤做向后无滑动涡动时消耗的能量较小,因而是相对稳定的状态,存在机会较多。

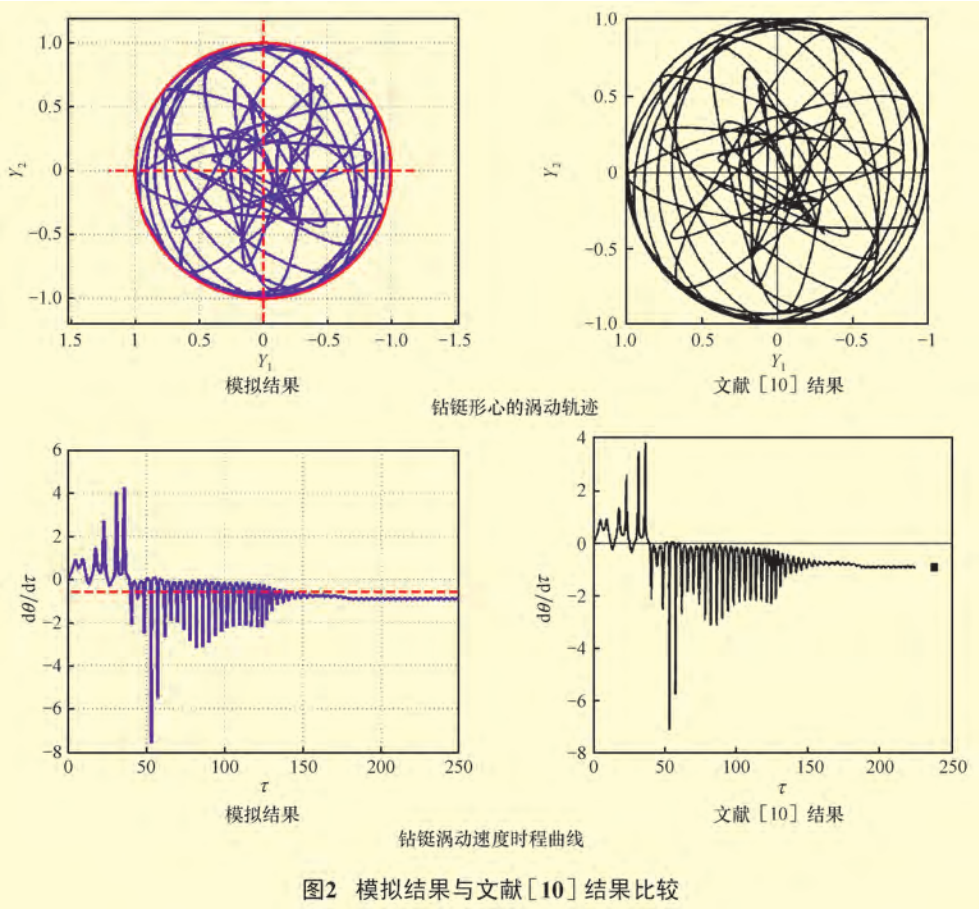


图2 模拟结果与文献[10]结果比较

图 3~图 10 是底部钻具组合涡动特性的模拟结果。从图 3 可以清楚地看到钻铤与井壁的碰撞特征和由此引起的涡动特性。但只观察钻铤形心的涡动轨迹图,无法判断涡动的性质,必须与涡动速度的时程曲线结合才能判断具体的涡动特性。从图 4 可以看出,刚开始时,钻铤的形心表现为向前涡动(角速度为正);当  $\tau > 35$  时,钻铤形心表现为向后涡动特征;当  $\tau > 164$  时,开始表现为较稳定的规则向后涡动。

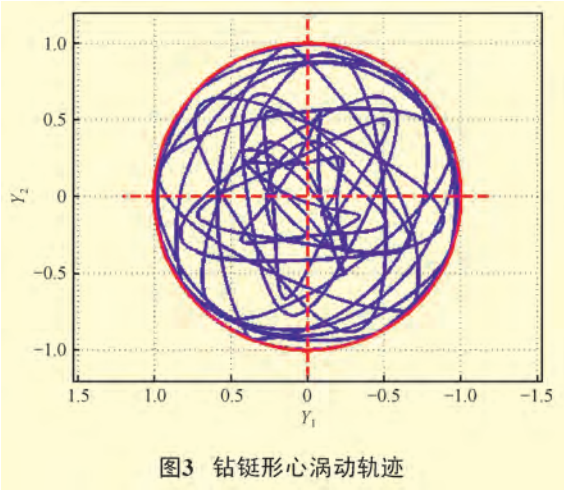


图3 钻铤形心涡动轨迹

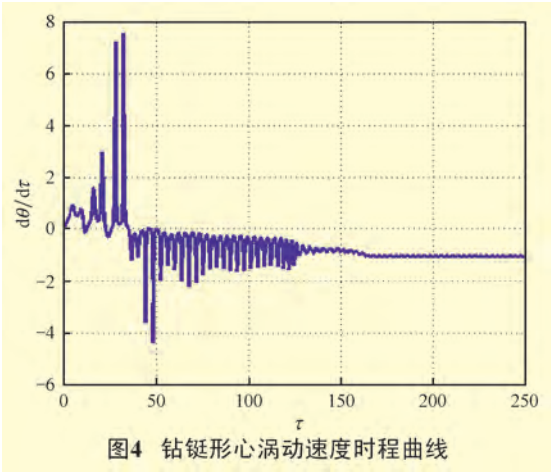


图4 钻铤形心涡动速度时程曲线

钻铤形成向后涡动的动力源于钻铤与井壁的接触力。在转子动力学中,将转子与定子之间的接触定义为两种接触作用:1)“部分碰摩”,即间隙接触;2)“全周碰摩”,即连续接触<sup>[13]</sup>。钻铤与井壁之间的接触关系与之类似,规则涡动对应于不存在滑移速度时的“全周碰摩”,而更多的情况是,钻铤的涡动是由于钻铤与井壁的“部分碰摩”,即间隙接触所引起的。

图 5 和图 6 分别为钻铤形心径向位移和径向速度时程曲线。图 5 反映了钻铤形心涡动的位移与钻



柱间隙之间的关系,当 $r=1$ 时表明钻铤与井壁有接触关系,或是碰撞,或是紧贴。分析图 5 可知,当 $\tau>164$ 时径向位移 $r$ 恒等于 1,说明钻铤开始贴着井壁运动。图 6 反映了钻铤涡动过程中钻铤形心的径向速度的波动情况,更直观地反映了钻铤横向振动的激烈程度。从图 6 可以看出,钻铤形心的径向速度为 $-0.3987\sim0.5148$ ,等效于 $-0.3380\sim0.4364\text{ m/s}$ ,最后径向速度趋于 0,同样反映了钻铤贴井壁运动的特征。

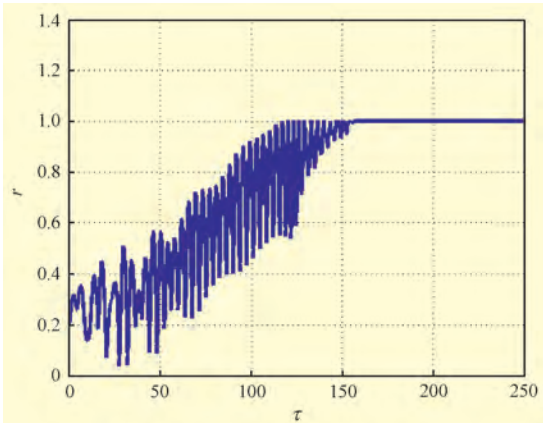


图5 钻铤形心径向位移时程曲线

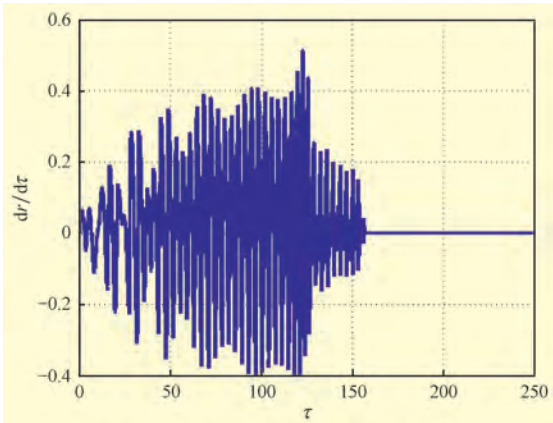


图6 钻铤形心径向速度时程曲线

图 3~图 6 体现了这样一种规律:当 $\tau<35$ 时钻铤做一般前涡运动,涡动速度最大为 7.583(等效于 568.73 r/min);在 $35<\tau<164$ 时钻铤做一般后涡运动,涡动速度极值为 $-4.358$ (等效于 326.85 r/min);在 $\tau>164$ 时钻铤做规则后涡运动,涡动速度约为 $1.02\sim1.06$ (等效于 76.5~79.5 r/min),按式(5)计算的规则涡动速度为 79.41 r/min。由此可以看出,当规则后涡出现时,钻铤的转动角速度较小。

图 7 和图 8 分别为钻铤形心的涡动速度功率谱图及相图。从图 8 可以看出:径向位移 $r$ 等于 1,说

明钻铤与井壁发生碰撞;相轨不封闭,说明钻铤形心的运动没有周期性。从图 7 也可以看出,该条件下钻铤形心的运动无周期性。

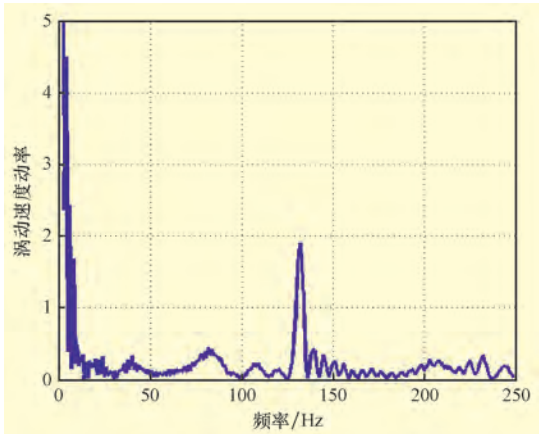


图7 钻铤形心涡动速度功率谱密度

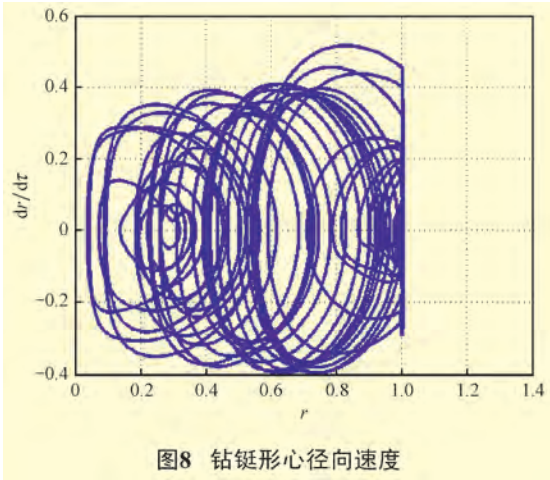


图8 钻铤形心径向速度

图 9 和图 10 分别为钻铤形心的径向加速度、涡动加速度时程曲线。从图 9、图 10 可以发现:径向加速度、涡动加速度都在正负值之间反复变化;径向加速度为 $-33.95\sim9.03$ ,等效于 $-225.95\sim60.10\text{ m/s}^2$ ; $\tau>164$ ,径向加速度恒为 0,因为此时钻铤只

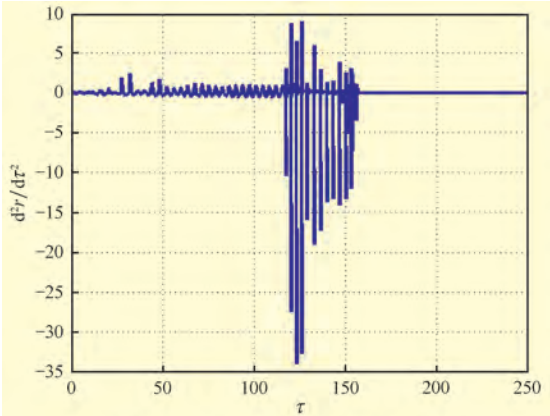


图9 钻铤形心径向加速度时程曲线

贴着井壁运动,径向方向没有运动; $\tau=32.52$ 时,涡动加速度瞬时可达 $-36.11$ ;  $\tau=32.37$ 时,涡动加速度为 $36.06$ ;最后涡动加速度几乎为 $0$ ,进一步说明钻铤贴着井壁做无滑动的规则涡动。

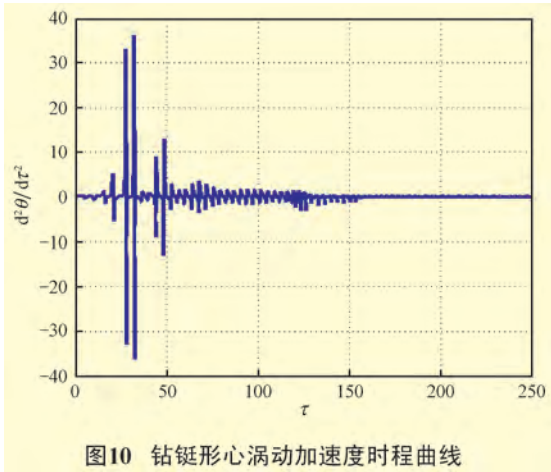


图10 钻铤形心涡动加速度时程曲线

### 3 结 论

1) 在钻进过程中,BHA 与井壁的接触作用比较复杂,BHA 与井壁接触促使 BHA 向后涡动。

2) 通过数值模拟发现,当规则后涡动出现时,钻铤形心的涡动速度较小,钻铤形心的径向速度、径向加速度、涡动加速度都为 $0$ ,钻铤形心的运动较稳定。

3) 根据规则涡动速度模型,求得无滑动向后规则涡动的速度为 $79.41$  r/min,而数值模拟结果表明,无滑动向后规则涡动的速度为 $76.5\sim 79.5$  r/min。两种计算方法的计算结果相近,但最大涡动速度则高达 $568.73$  r/min,这较好地反映了不规则后涡动对钻具安全性的影响。

4) 由钻铤形心径向速度相图和涡动速度功率谱图可以看出,钻铤形心的运动没有周期性。

5) 文中的结果是在特定条件下计算得到的,但钻井过程中 BHA 的运动形式还受到其他许多因素(钻压、井眼的倾斜角、钻井液密度等)的影响,其涡动特征会更加复杂,因而有待于进一步深入研究。

### 参 考 文 献

- [1] 苏华,张学鸿,王惠德. 钻柱力学发展综述之三: 钻柱动力学[J]. 大庆石油学院学报,1994,18(3):45-53.
- [2] 狄勤丰,王文昌,胡以宝,等. 钻柱动力学研究及应用进展[J]. 天然气工业,2006,26(4):57-59.
- [3] 胡以宝,狄勤丰,邹海洋,等. 钻柱动力学研究及监控技术新进展[J]. 石油钻探技术,2006,34(6):7-10.
- [4] 李子丰,梁尔国. 钻柱力学研究现状及进展[J]. 石油钻采工艺,2008,30(2):1-9.
- [5] Jansen J D. Non-linear rotor dynamics as applied to oilwell drillstring vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 147(1):115-135.
- [6] 狄勤丰,朱卫平,姚建林,等. 预弯曲动力学防斜打快钻具组合动力学模型[J]. 石油学报,2007,28(6):118-121.
- [7] 狄勤丰,朱卫平,姚建林,等. 空气钻井钻具组合动力学特征及井斜机理研究[J]. 石油学报,2008,29(6):917-921.
- [8] Christoforou A P, Yigit A S. Dynamic modelling of rotating drillstrings with borehole interactions[J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 206(2):243-260.
- [9] Khulief Y A, Al-Sulaiman F A, Bashmal S. Vibration analysis of drillstrings with self-excited stick-slip oscillations [J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 299(3): 540-558.
- [10] Jansen J D. Whirl and chaotic motion of stabilized drill collars [J]. SPE Drilling Engineering, 1992, 7(2): 107-114.
- [11] Vandiver J K, James W, Shyu Rong-Juin. Case studies of the bending vibration and whirling motion of drill collars[J]. SPE Drilling Engineering, 1990,5(4): 282-290.
- [12] 高德利,高宝奎,狄瑞平. 钻柱涡动特性分析[J]. 石油钻采工艺,1996,18(6): 9-13.
- [13] 闻邦椿,顾家柳,夏松波,等. 高等转子动力学:理论、技术与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2000:472.

## 胜利油田成功研制出水平井连续油管测井设备

连续油管测井是把连续油管作为测井仪器的输送设备,将电缆预先装入连续管中,测井仪器连在连续油管顶端下入井内进行测试。该方法从根本上解决了带压起下电缆的密封难题,可带压测直井、斜井、水平井的注入剖面 and 产液剖面,解决水平井测试难题,并且在测井过程中可进行循环洗井。近年来,连续油管作为水平井测试仪器的主要输送方式在国内得到了迅速发展。但我国所用连续油管测井设备都是进口的,为打破技术垄断,降低开发成本,胜利油田研制出了水平井连续油管测井设备。该设备在胜利油田临盘、河口和东辛采油厂的3口水平井的找水和产液剖面的测试工作中得到了成功应用,其中施工井最大水平段长达200 m 以上。该设备的成功研制,填补了国内在连续油管测井装备领域的空白,同时也标志着胜利油田在连续油管作业技术领域取得了新突破。