

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2105855

# 面向油气钻井振动测量的空间三轴加速度 传感器阵列研究

黄 哲

(胜利石油工程公司钻井工艺研究院 东营 257000)

**摘 要:** 在油气钻井领域中,由于钻杆柱长细比极大、地层非均质、作业参数不稳定等因素影响,钻头在井下存在多主频、多维度、多振幅复合的六自由度复杂振动,严重制约了油气钻井的安全高效进行。基于刚体运动理论,常规平面阵列方案存在方程欠定问题,难以进行角速度推算;常规空间阵列方案则需要在Z轴安装阵列传感器,无法满足钻井领域钻具内部中空预留流体通道的要求。文章设计了一种六棱柱框架的空间加速度传感器阵列,以同心圆形式预留中央流体通道,基于无约束最小二乘与神经网络推算,通过冗余配置实现了钻具三轴振动(加速度)与扭转(角速度、角加速度)的求解,载体等效坐标系振动参数推算误差小于 $5 \times 10^{-3}$ ,符合油气钻井领域应用标准,为油气钻井领域振动调制创造了数据基础,并对常规领域传感器振动测试技术的工程实现具有一定的借鉴意义。

**关键词:** 石油与天然气;钻具振动;振动测量;空间构型

**中图分类号:** TB936;TE242 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4020

## Method of drilling vibration measurement based on spatial array of accelerometers

Huang Zhe

(Drilling Research Technology Institute of Shengli Petroleum Engineering Company, Dongying 257000, China)

**Abstract:** Affected by slenderness ratio of drilling string, anisotropism of formation, unstable parameter of operation, drilling bit suffers a complex vibration of six degrees of freedom with multiple dominant frequency, dimension and amplitude. It seriously restricts the safety and efficiency of drilling operation. According to the theory of rigid motion, the angular velocity reckoning is difficult by the current planar array scheme, and central fluid channel cannot be reserved by the conventional space array. In this paper, a spatial array with a central fluid channel was proposed. Least squares and neural network was also established to reckon the vibration parameters. The average error of reckoned vibration parameters is less than  $5 \times 10^{-3}$ , which meet the application requirements of drilling operation. The proposed method and array scheme provide the data base to the vibration conditioning of drilling string, and contribute to the research of sensor vibration test.

**Keywords:** oil and gas;drilling vibration;vibration measurement;spatial configuration

## 0 引 言

油气钻井领域中,受钻柱长细比极大、地层参数非均质、作业参数不稳定等条件影响<sup>[1]</sup>,钻杆柱极易产生多主频、多维度、多振幅复合的六自由度复杂非线性振动,导致钻柱结构发生严重的疲劳破坏,制约了油气钻井的安全高效进行<sup>[2]</sup>。因此,油气钻井领域中多采用理论建模与近钻头测量的方式进行钻具振动研究。然而<sup>[1,3]</sup>,由于钻柱长细比通常可达20 000以上,现有模型与方法并不能完全反应

井下钻具的真实工况;受钻具本身力学特性、几何形态等多种因素影响,井下测量装置在近端测量数据与待测钻具实际情况亦存在一定偏差。分布式、小型化、耐高温的井下振动测量装置是油气钻井领域的迫切要求。

而在传统应用中,振动测量普遍以光学测量方式进行,例如南京航空航天大学的机器视觉振动识别技术<sup>[4]</sup>、电子科技大学的视觉识别测量技术<sup>[5]</sup>、江苏大学的激光移频振动测量技术<sup>[6]</sup>、哈尔滨工业大学的自混合干涉振动测量技术<sup>[7]</sup>等。但是此类方法虽然测量精度较高,但由于需要激光收发

收稿日期:2021-02-28

或视觉传感器配套使用,普遍存在设备体积大、价格贵、适用范围小等弊端,无法满足油气钻井领域的应用要求。

随着近些年微机电(MEMS)技术的发展,MEMS 传感器测量精度与可靠性逐步提高。基于 MEMS 惯性传感器阵列的六自由度振动测量技术也开始获得了行业的认可<sup>[8]</sup>。一般而言,现有传感器阵列构型可以分为空间型与平面型两类,如哈尔滨工业大学的 12 轴 12 加速度传感器平面构型<sup>[9]</sup>、陆军工程大学赵天贺设计的 9 轴 3 加速度传感器平面构型<sup>[10]</sup>,海军 704 所叶嘉等<sup>[11]</sup>、军械工程学院陈海龙等<sup>[12]</sup>、中国航空工业集团付强等<sup>[13]</sup>分别设计的 12 轴 4 加速度传感器空间构型等。然而,通过文献调研分析发现,上述平面阵列构型通常面临参数方程欠定问题,难以进行长时间测量的角速度直接求解;空间构型则需要在阵列装置 Z 轴安装传感器,不具备阵列装置内部中空的结构设计条件。因此,现阶段油气钻井领域中小型化测量装置仍采用“内部居中安装、旁通流道”或“偏心安装、三轴加速度估算”的方式实现<sup>[14-16]</sup>,分别面临“沿程压力损耗大”与“抗噪性差、难以测量钻具涡动”的问题。

针对上述问题,本文结合油气钻井领域实际要求,设计了一种空间内三轴加速度传感器阵列构型,给出了基于无约束最小二乘法与人工神经网络的振动参数推算模型,能够满足有效进行被测钻具加速度与角速度测量,为油气领域沿钻具测量与传感器阵列设计提供了借鉴。

### 1 空间三轴加速度传感器阵列构型

与常规机械的振动测量不同,油气钻井领域钻杆是一套长细比极大的管柱串组合,其内部中空,外径通常为 139.7 mm,总长 3 000~8 000 m。因此,为保证测量与分析准确性,对其进行局部振动测量时,往往要求阵列载体等效坐标系  $\alpha$  与底部钻具坐标系  $\beta$  同轴如图 1(a)所示。一般而言,现有传感器阵列构型可以分为空间型与平面型两类。其中,9 与 12 轴加速度计阵列是较为典型的平面阵列构型<sup>[11,13,17]</sup>。对比图 1(b)可以发现,此类空间构型在载体等效坐标系  $Z_\alpha$  轴设置阵列传感器,结构上无法同时满足  $\alpha-\beta$  坐标系同轴与钻杆内部中空的要求。如图 1(c)、(d)所示两种典型的平面阵列构型<sup>[10,18]</sup>,其多边形平面阵列结构虽能够满足钻具内部中空要求,但由于参数求解方程欠定,除加速度、角加速度外,无法直接有效的获取振动装置的角速度,难以对钻具涡动与粘滑进行准确定量分析。

鉴于上述弊端,结合常规平面与空间阵列构型优势,提出了一种棱柱式加速度计空间阵列。根据几何关系,具有相同直径外接圆的正多边形,其内切圆直径与多边形边数成正比,其边长与边数成反比。因此,综合考虑常用钻杆柱内径(60 mm)与耐高温 MEMS 传感器尺寸规格,构建六棱柱式加速度空间阵列如图 2 所示。

分别以棱柱轴向与径向构建笛卡尔坐标系,形成阵列载体等效坐标系  $\alpha$ ,其  $Z_\alpha$  轴与棱柱轴向对齐, $X_\alpha$  与  $Y_\alpha$  轴

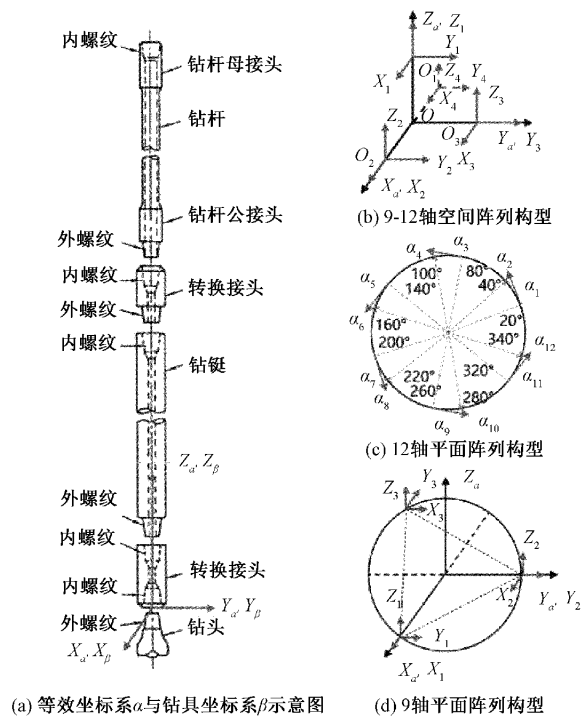


图 1 常见钻具组合与传感器阵列构型

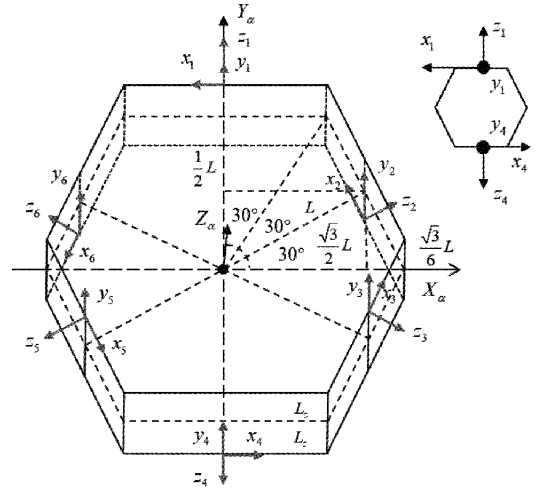


图 2 六棱柱式 18 轴加速度空间阵列

分别指向一侧棱边与侧面。三轴加速度传感器 1-6 上下交错分布于棱柱侧面,各传感器  $y_i$  轴与  $Y_\alpha$  同向, $z_i$  轴垂直侧面指向外侧。根据惯性导航原理,空间中任两笛卡尔坐标系相对关系可通过转换矩阵  $C$  表达如式(1)所示。

$$R^{(i)} = C_{\beta}^{i\alpha} R^{(\alpha)} \quad (1)$$

其中, $R^{(i)}$  与  $R^{(\alpha)}$  分别为传感器坐标系 1-6 与阵列载体等效坐标系  $\alpha$  的基向量。

根据几何关系,各传感器坐标系 1-6 可以看作阵列载体等效坐标系  $\alpha$  分别以  $Y_\alpha-Z_\alpha-Y_\alpha$  三轴为旋转轴逆时针旋转  $\theta_j^{i=1-6}$  角获得,其坐标系转换矩阵  $C$  可表达如式(2)所示。

$$\mathbf{C}_\beta^i = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & 0 & -\sin\theta_3 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_3 & 0 & \cos\theta_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & \sin\theta_2 & 0 \\ -\sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & -\sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta_1 & 0 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中,

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix}^{(i=1-6)} = \frac{\pi}{6} \begin{bmatrix} 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 1 & -1 & -3 & -5 & 5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

令六棱柱边长为  $L_1$ , 传感器 1-6 上下两两交错, 交错间距为  $L_2$ , 则各传感器 1-6 相对载体等效坐标系的位置  $L_x, L_y, L_z$  可表达为矩阵形式如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} L_x \\ L_y \\ L_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{3}}{2}L_1 & \frac{\sqrt{3}}{2}L_1 & 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2}L_1 & -\frac{\sqrt{3}}{2}L_1 \\ L_1 & \frac{1}{2}L_1 & -\frac{1}{2}L_1 & -L_1 & -\frac{1}{2}L_1 & -\frac{1}{2}L_1 \\ L_2 & -L_2 & L_2 & -L_2 & L_2 & -L_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 2 振动参数推算

根据刚体运动理论, 刚体任意位置运动参数由式(5)表示。常规平面阵列构型中  $L_2 = 0$ , 经初等行变换后有  $\mathbf{R}([\Phi, \Psi]) \neq \mathbf{R}(\Phi) = 9 < 12, \mathbf{R}(\Phi[1:9]) = 8 < 9, \mathbf{R}(\Phi[4:12]) = 6 < 9$ 。即, 若将刚体加速度、角加速度、角速度视为无关变量, 则式(5)必定不相容。因此, 常规多边形平面阵列角速度通常需要角加速度积分获取如式(6)所示, 面临着长时间测量的巨大累积误差。常规油气领域则多采用径向加速度估算钻具轴向扭转角速度如式(7)所示, 无法获取钻具径向各轴扭转角速度。

$$\Psi = \mathbf{C}_\beta^{i=1-6} \begin{bmatrix} x + \dot{w}_y L_z - \dot{w}_z L_y - (w_y^2 + w_z^2)L_x + w_x w_y L_y + w_x w_z L_z \\ y - \dot{w}_x L_z + \dot{w}_z L_x + w_x w_y L_x - (w_x^2 + w_z^2)L_y + w_y w_z L_z \\ z + \dot{w}_x L_y - \dot{w}_y L_x + w_x w_z L_x + w_y w_z L_y - (w_x^2 + w_y^2)L_z \end{bmatrix}^{(a)} =$$

$$\Phi \begin{bmatrix} x & y & z & \dot{w}_x & \dot{w}_y & \dot{w}_z & w_x^2 & w_y^2 & w_z^2 & w_x w_y & w_y w_z & w_x w_z \end{bmatrix}^T = \Phi \mathbf{F} = [x \ y \ z]_{i=1-6}^T \quad (5)$$

$$w_{i=x,y,z} = \int \dot{w}_{i=x,y,z} dt \quad (6)$$

$$w = \sqrt{a_{rad}/r} \quad (7)$$

其中,  $\Phi$  为由  $L_1$  与  $L_2$  构成的  $18 \times 12$  维系数矩阵,  $x, y, z$  为三轴加速度,  $\dot{w}_x, \dot{w}_y, \dot{w}_z$  为三轴角加速度,  $w_x, w_y, w_z$  为三轴角速度,  $r$  为传感器安装半径,  $a_{rad}$  为径向加速度,  $i$  为坐标轴指向。

基于六棱柱空间阵列构型, 相邻传感器上下交错  $L_2 \neq 0$ , 基于初等行变换可得阵列载体等效坐标系中点处加速度如式(8)所示, 其中脚标 1-6 与传感器 1-6 对应。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}^{(a)} = \frac{1}{12} \begin{bmatrix} 3(x_3 + x_4 + x_5 - x_1 - x_2 - x_6) \\ 3(z_1 + z_2 + z_6 - z_3 - z_4 - z_5) \\ 2(y_1 + y_2 + y_3 + y_4 + y_5 + y_6) \end{bmatrix} \quad (8)$$

代入式(5)并经初等行变换后系数矩阵可化简为  $9 \times 9$  维系数矩阵, 若视  $\dot{w}_{j=x,y,z}, w_{j=x,y,z}, w_j w_{k \neq j}$  为无关变量, 则基于广义逆运算可求得等效坐标系中角加速度与角速度关系如式(9)~(11)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{w}_x \\ \dot{w}_y \\ \dot{w}_z \end{bmatrix}^{(a)} = \left\{ \begin{bmatrix} 2L_2(2y_1 + y_2 - y_3 - 2y_4 - y_5 + y_6) \\ 2\sqrt{3}L_2(-y_2 - y_3 + y_5 + y_6) \\ 4L_2(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6) \end{bmatrix} + \left. \begin{bmatrix} L_1(-2z_1 + z_2 + z_3 - 2z_4 + z_5 + z_6) \\ L_1(-2x_1 + x_2 + x_3 - 2x_4 + x_5 + x_6) \\ 0 \end{bmatrix} + \left. \begin{bmatrix} \sqrt{3}L_1(x_2 - x_3 + x_5 - x_6) \\ \sqrt{3}L_1(-z_2 + z_3 - z_5 + z_6) \\ 0 \end{bmatrix} \right\} / (24L_1L_2) \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} w_x^2 \\ w_y^2 \\ w_z^2 \end{bmatrix}^{(a)} = \left\{ \begin{bmatrix} L_1(-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6) \\ L_1(-y_1 + y_2 - y_3 + y_4 - y_5 + y_6) \\ L_1(y_1 - y_2 + y_3 - y_4 + y_5 - y_6) \end{bmatrix} + \left. \begin{bmatrix} L_2(-2z_1 + z_2 + z_3 - 2z_4 + z_5 + z_6) \\ L_2(2z_1 - z_2 - z_3 + 2z_4 - z_5 - z_6) \\ -2L_2(z_1 + z_2 + z_3 + z_4 + z_5 + z_6) \end{bmatrix} + \left. \begin{bmatrix} \sqrt{3}L_2(-x_2 + x_3 - x_5 + x_6) \\ \sqrt{3}L_2(x_2 - x_3 + x_5 - x_6) \\ 0 \end{bmatrix} \right\} / (12L_1L_2) \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} w_x w_y \\ w_x w_z \\ w_y w_z \end{bmatrix}^{(a)} = \left\{ \begin{bmatrix} 2L_2(-2x_1 + x_2 + x_3 - 2x_4 + x_5 + x_6) \\ L_1(-2x_1 + x_2 + x_3 - 2x_4 + x_5 + x_6) \\ \sqrt{3}L_1(-x_2 + x_3 - x_5 + x_6) \end{bmatrix} + \left. \begin{bmatrix} 0 \\ 2\sqrt{3}L_2(y_2 + y_3 - y_5 - y_6) \\ 2L_2(2y_1 + y_2 - y_3 - 2y_4 - y_5 + y_6) \end{bmatrix} + \left. \begin{bmatrix} 2\sqrt{3}L_2(z_2 - z_3 + z_5 - z_6) \\ \sqrt{3}L_1(-z_2 + z_3 - z_5 + z_6) \\ L_1(2z_1 - z_2 - z_3 + 2z_4 - z_5 - z_6) \end{bmatrix} \right\} / (24L_1L_2) \quad (11)$$

继而, 采用无约束优化方法, 将式(8)、(9)代入式(5), 化简可得关于角速度  $w_{j=x,y,z}$  的非线性方程组  $[f_i] = \Psi - \Phi \mathbf{F}$ , 构建方程组  $\mathbf{F} = [f_1, f_2, \dots, f_9]^T$ , 则有雅各比矩阵  $\mathbf{DF}$  如式(12)所示。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{DF} &= \text{Jacobian}([f_1 \ f_2 \ \cdots \ f_9], [w_x \ w_y \ w_z]) = \\
 &\begin{bmatrix} -2L_1w_y - 2L_2w_z & -2L_1w_x & -2L_2w_x \\ L_1w_y + L_2w_z - \sqrt{3}L_1w_x & L_1w_x + \sqrt{3}L_1w_y - \sqrt{3}L_2w_z & L_2w_x - \sqrt{3}L_2w_y \\ L_1w_y + L_2w_z + \sqrt{3}L_1w_x & L_1w_x - \sqrt{3}L_1w_y + \sqrt{3}L_2w_z & L_2w_x + \sqrt{3}L_2w_y \\ -4L_2w_x & 2L_1w_z - 4L_2w_y & 2L_1w_y \\ 4L_2w_x + \sqrt{3}L_1w_z & L_1w_z + 4L_2w_y & L_1w_y + \sqrt{3}L_1w_x \\ \sqrt{3}L_1w_z - 4L_2w_x & -L_1w_z - 4L_2w_y & \sqrt{3}L_1w_x - L_1w_y \\ -4L_1w_x & 2L_2w_z & 2L_2w_y - 4L_1w_z \\ \sqrt{3}L_1w_y - L_1w_x - \sqrt{3}L_2w_z & \sqrt{3}L_1w_x - L_2w_z - 3L_1w_y & -4L_1w_z - L_2w_y - \sqrt{3}L_2w_x \\ \sqrt{3}L_2w_z - \sqrt{3}L_1w_y - L_1w_x & -3L_1w_y - L_2w_z - \sqrt{3}L_1w_x & \sqrt{3}L_2w_x - L_2w_y - 4L_1w_z \end{bmatrix} \quad (12)
 \end{aligned}$$

令,

$$\mathbf{G} = [\mathbf{DF}(w_{j=x,y,z})]^T \mathbf{DF}(w_{j=x,y,z}) \quad (13)$$

则角速度  $w_{j=x,y,z}$  可由式(14)迭代求其最小二乘解。

$$\begin{cases} \Delta w^{(k+1)} = -\mathbf{G}(w^{(k)}) [\mathbf{DF}(w^{(k)})]^T \mathbf{F}(w^{(k)}) \leq \delta \\ w^{(k+1)} = w^{(k)} + \Delta w^{(k+1)} \end{cases} \quad (14)$$

### 3 数值仿真与改进

为验证前述传感器阵列对复杂钻具振动测量的有效性,基于钻具振动一般模式开展数值仿真分析。如图 1(a) 建立底部钻具坐标系  $\beta$ , 令钻具整体沿  $Z_\alpha/Z_\beta$  轴稳定旋转并发生扭转粘滑, 同时引入三轴冲击与涡动复合如式(15)~(17)所示。

$$\begin{cases} x^{(a)} = \omega_z^2 r \\ y^{(a)} = \omega_z^2 r + 20\sin(50t) \\ z^{(a)} = 50\sin(50t) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} w_x^{(a)(k+1)} = w_x^{(a)(k)} + \dot{w}_x^{(a)} t, w_x^{(a)(1)} = 0 \\ w_y^{(a)(k+1)} = w_y^{(a)(k)} + \dot{w}_y^{(a)} t, w_y^{(a)(1)} = 0 \\ w_z^{(a)(k+1)} = w_z^{(a)(k)} + \dot{w}_z^{(a)} t, w_z^{(a)(1)} = \pi/2 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \dot{w}_x = 5\sin(100t) \\ \dot{w}_y = 5\sin(100t) \\ \dot{w}_z = 10\sin(100t) \end{cases} \quad (17)$$

其中,  $r$  为传感器阵列内切圆半径,  $t$  为测量时间,  $(k)$  与  $(k+1)$  为时序上标,  $(a)$  为坐标系上标。

如图 2 所示, 令阵列载体等效坐标系  $\alpha$  各轴与底部钻具坐标系对应, 各传感器引入标准差为 0.01 g 的随机噪声。取  $2L_2=L_1=r=30$  mm, 采样率 1 000 Hz, 采集时间 5 s。

以  $\beta$  系 Y 轴与 Z 轴数据为例, 传感器阵列仿真结果分别如图 3、4 所示。显然, 前述阵列构型与无约束推算方法克服了基于式(6)、(7)、(18)的常规方法无法有效求解阵列 X、Y 轴(钻具径向)角速度的弊端, 能够有效求解钻具复合振动的冲击与扭转(角速度、角加速度)参数。统计其推算误差参数如表 1 所示, 可以发现, 基于前述无约束推

算方法, 相较于阵列 Y 轴(钻具径向), 阵列 Z 轴(钻具轴向)推算参数值与真实值拟合更好, 且推算精度远高于常规方法。

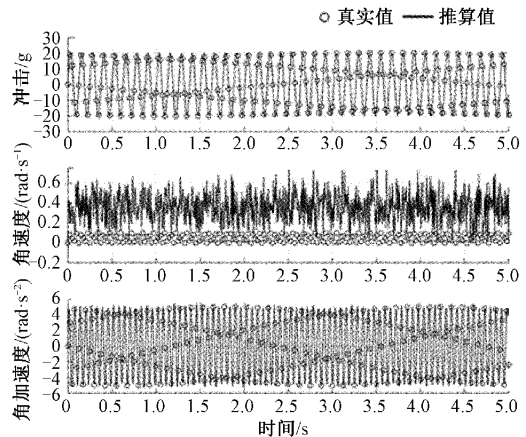


图 3 传感器阵列仿真结果示意图(Y 轴)

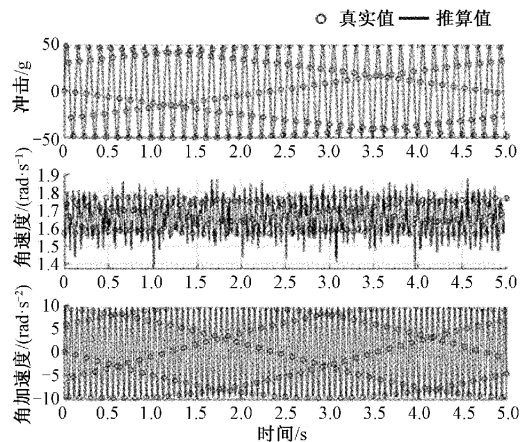


图 4 传感器阵列仿真结果示意图(Z 轴)

$$w_z = \sqrt{\sum_{i=1}^6 |z_i|} / 6/r \quad (18)$$

但是, 需要注意的是, 阵列 Y 轴(钻具径向)推算角速度与真实值存在较大偏差。将图 3 角速度曲线局部放大, 如图 5 所示, 对比无噪声条件推算结果。可以发现, 无噪声干扰下, 推算角速度可以较好的与真实值拟合, 统计可

知其平均误差为  $1.66 \times 10^{-4}$ , 均方误差  $4.17 \times 10^{-7}$ 。由此可以认为, 前述空间阵列与推算方法实质上可以获得较为精确的角速度推算值, 但受噪声干扰严重。

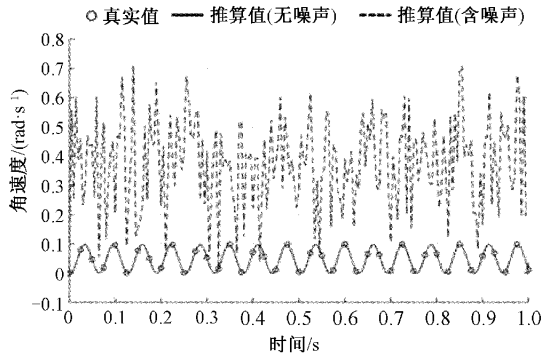


图 5 阵列 Y 轴角速度推算对比

究其根本, 式(10)与(11)中  $w_j^2_{-x,y,z}$ 、 $w_j w_{k=j}$  实际上并非无关变量, 由其构成的角速度非线性方程组在传感器噪声干扰下难以保证有解或唯一解。需结合实际物理意义进一步开展传感器测量值与推算参数的数据挖掘。

基于物理意义, 任意时刻的刚体旋转角速度与其前一时刻的角速度、角加速度存在历史联系。因此, 以传感器测量数据、当前与前序时刻推算角加速度为输入参数, 以角速度为输出参数, 建立时间序列神经网络如图 6 所示。基于式(5), 以及式(15)~(17), 构造无噪声条件下真实数据与测量数据集, 分别取 80% : 15% : 5% 作为模型构建的训练、验证、测试数据。

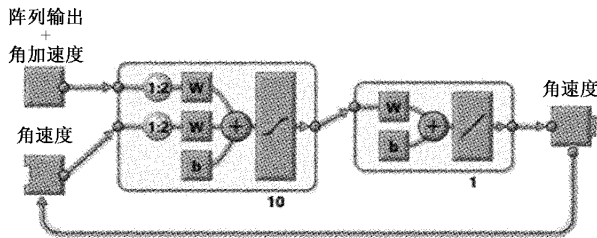


图 6 神经网络结构

训练结果如图 7 所示, 阵列 Y 轴角速度训练误差基本符合正态分布, 输出误差绝对值小于  $1.1 \times 10^{-5}$ , 小于前述推算方法无噪声干扰时  $1.66 \times 10^{-4}$  的平均误差。引入噪声干扰, 重新计算阵列 Y 轴角速度如图 8 所示, 误差参数如表 1 所示。

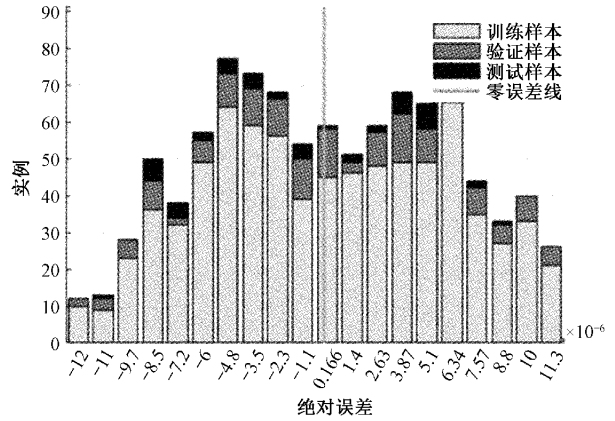


图 7 神经网络训练误差直方图

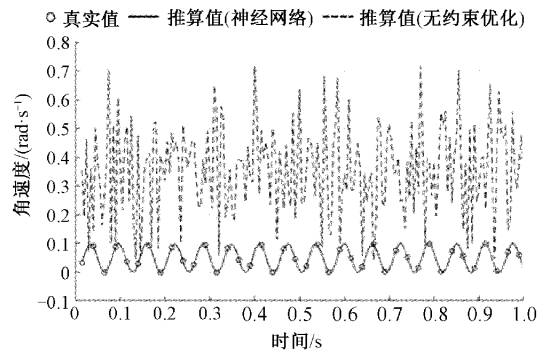


图 8 阵列 Y 轴角速度推算对比

显然, 相对于原无约束方法, 使用时间序列神经网络可以极大提高阵列 Y 轴与 Z 轴推算角速度的抗噪性, 统计其平均绝对误差分别为  $1.2 \times 10^{-3}$  与  $3.0 \times 10^{-3}$ , 远低于无约束方法推算误差, 且符合油气钻井行业应用要求。

表 1 推算误差

推算方法	振动参数	平均绝对误差 Y/Z 轴	绝对误差均方差 Y/Z 轴
本文式(8)~(14)	冲击	$4.7 \times 10^{-3} / 3.3 \times 10^{-3}$	$3.6 \times 10^{-3} / 1.7 \times 10^{-5}$
	角速度	$3.1 \times 10^{-1} / 4.5 \times 10^{-2}$	$1.2 \times 10^{-1} / 3.2 \times 10^{-3}$
	角加速度	$1.4 \times 10^{-1} / 1.1 \times 10^{-1}$	$2.9 \times 10^{-2} / 1.8 \times 10^{-2}$
常规式(6)	角速度(5 s)	$2.3 \times 10^{-2} / 1.6$	$7.5 \times 10^{-4} / 2.5$
	(扩展至 1 h)	7.5/13.0	83.7/247.5
常规式(7)、式(18)	角速度	无解/14.4	无解/231.5
本文神经网络	角速度	$1.2 \times 10^{-3} / 3.0 \times 10^{-3}$	$2.1 \times 10^{-6} / 1.4 \times 10^{-5}$

#### 4 结 论

轴向振动、侧向冲击、涡动、粘滑以及参数共振是油气

钻井领域作业管柱面临的严峻问题, 其底部钻具振动是多主频、多维度、多振幅的六自由度复杂振动的复合。常规近端井下测量与理论模拟分析相较于实际情况存在较大

偏差,在不改变当前钻井工艺与装备结构的前提下研发耐高温、抗冲击、小型化、分布式振动测量装置是安全高效钻井的迫切要求。

然而,由于常规空间阵列方案需要在Z轴安装阵列传感器,无法满足钻井领域钻具内部中空预留流体通道的要求;平面阵列方案则由于方程组欠定问题,不符合刚体运动理论中角速度(钻具扭转)求解条件,仅能通过离心加速度估算或使用角加速度积分方法求解,在实际钻井过程中面临着抗噪性差与累积误差极大的弊端。

针对于此,设计了基于六棱柱结构的三轴加速度计阵列构型,能够同时满足 $\alpha-\beta$ 坐标系同轴、钻杆内部中空的结构要求。基于相邻传感器上下交错的结构设计,结合理论推导,使得原振动参数方程组正定,从理论上解决了钻具扭转参数难以求解的弊端,且求解参数无累积误差。基于无约束方法与人工智能方法提出了振动参数推算方法。仿真分析结果表明,推算方法可靠、有效,平均误差低于 $5 \times 10^{-3}$ ,满足油气钻井领域应用要求,并对常规领域传感器振动测试技术的工程实现具有一定的借鉴意义。

但是,需要注意的是,井下钻具振动是一种极为复杂的复合振动,基于神经网络模型的振动参数推算在不同振动响应下势必存在不同的输出表现。进一步开展室内与现场试验,进行振动参数神经网络推算模型的普适性优化与改进显得尤为必要。

#### 参考文献

- [1] 狄勤丰,平俊超,李宁,等. 钻柱振动信息测量技术研究进展[J]. 力学与实践, 2015, 37(5):565-579.
- [2] DONG G, CHEN P. A review of the evaluation, control, and application technologies for drill string vibrations and shocks in oil and gas well[J]. Shock and Vibration, 2016, 2016:1-34.
- [3] BARYSHNIKOV A, CALDERONI A, LIGRONE A, et al. A new approach to the analysis of drillstring fatigue behavior [J]. SPE Drilling & Completion, 2013, 12(2):77-84.
- [4] 彭聪,缪卫东,曾聪. 基于机器视觉的轻型梁三维振动测量方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021:1-8.
- [5] 孙溢膺,董明利,乔玉军. 基于摄影测量的大型风机叶片运行模态分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10):170-177.
- [6] 徐众,张西良. 基于激光移频回馈技术远距离振动测量研究[J]. 应用光学, 2020, 41(6):149-155.
- [7] 姜春雷. 基于多重反馈自混合干涉的振动测量技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2017.
- [8] 刘超军. 无陀螺惯性测量单元关键技术的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2017.
- [9] 杨杰. 无陀螺捷联惯导系统加速计构型研究与误差分析[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2011.
- [10] 赵天贺,汪伟,陈海龙. 平面三轴加速度传感器阵列振动测试方法研究[J]. 电子测量技术, 2019, 42(15):117-122.
- [11] 叶嘉,黄宋均,陈荣. 六自由度振动测量装置的设计及试验验证[J]. 机电设备, 2018, 35(2):12-15,19.
- [12] 陈海龙,汪伟,栾军英. 基于加速度传感器阵列六自由度振动测试方法研究[J]. 现代制造工程, 2014(8):97-102.
- [13] 付强,戴晓彬,魏元. 基于加速度计阵列的六自由度振动台测试方法研究[J]. 计测技术, 2019, 39(1):28-33.
- [14] HUANG Z, HUANG Z, SU Y N, et al. A feasible method for the trajectory measurement of radial jet drilling laterals [J]. SPE Drilling & Completion, 2019, 35(1): 125-135.
- [15] HUANG Z, HUANG Z, LONG W, et al. Trajectory measurement of radial jet drilling wells: improved tool and data processing [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2020, 142(3), DOI: 10.1115/1.4044622.
- [16] SUGIURA J, JONES S. A drill bit and a drilling motor with embedded high-frequency (1 600 Hz) drilling dynamics sensors provide new insights into challenging downhole drilling conditions [J]. SPE Drilling & Completion, 2019, 34(3), DOI: 10.2118/194138-ms.
- [17] 石永强,李雨菲,车录锋. 基于MEMS加速度计阵列的测斜仪设计[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(9):66-68,72.
- [18] 赵天贺,汪伟,陈海龙. 基于平面加速度传感器阵列振动测试的可拆卸传感器安装板设计[J]. 新技术新工艺, 2019(5):36-39.

#### 作者简介

黄哲,工学博士,主要研究方向为惯性导航与惯性仪器、井下装备小型化、数字化智能化钻井。

E-mail:bob202303@163.com