

深井旋转轴套流场的 CFD 模拟

兰 伟, 曾良才, 陈新元, 朱 瑾

(武汉科技大学机械自动化学院, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 旋转轴套在超深井工作时, 其井下流动是三维湍流流动, 旋转轴套的旋转和表面曲率效应以及随之而来的哥氏力和离心力, 使流场在超深井的流动中极其复杂, 同时, 由于流体介质泥浆属于液固两相流, 更致使内部流场测试困难, 而且超深井中的工况在使用常规方法已很难得到较准确的数据。为此, 将计算流体力学软件 Fluent 应用于超深井下流场的模拟, 基于 Navier - Stokes 方程和 Reynolds 应力方程模型, 建立多种仿真模型, 在相同条件下, 使用 CFD 仿真软件 Fluent 模拟仿真的不同结果, 优化与旋转轴套叶片设计相关的几何参数, 提高了其工作效率和耐用性, 从而保证叶轮具有良好的性能。

关键词: 湍流; 哥氏力; 离心力; Fluent

中图分类号: TE24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 - 7428(2008)11 - 0020 - 04

CFD Simulation on the Flow Field of Drill Head in the Deep Well/LAN Wei, ZENG Liang-cai, CHEN Xin-yuan, ZHU Jin (College of Machinery & Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430081, China)

Abstract: When the drill bit is drilling in the ultra-deep well, the flow field is in 3 - D turbulence. The revolving and the surface curvature effect of the drill bit, as well as the following coriolis force and the centrifugal force make the flow field extremely complex in the ultra-deep well. Simultaneously, because the fluid medium mud belongs to two-phase currents of fluid and solid, which makes the test of internal flow field more difficult. The fluid dynamics software-fluent is applied in the ultra-deep well, based on the Navier-Stokes equation and the Reynolds stress equation model, several models are built in the paper. In the same conditions, the different results are stimulated by CFD simulation software Fluent; relative designing geometry parameters are optimized.

Key words: turbulence; Coriolis force; centrifugal force; Fluent

随着中国陆地科学钻探工程项目的开展, 在 4500 m 以下的深井、超深井以及高陡构造、易斜难钻地区的油气直井钻探中对钻探技术提出了更高的要求, 旋转导向系统由于具有摩阻小, 钻深能力强, 井眼光滑, 安全事故小, 钻速快等优点, 成为深井及超深井钻探必不可少的导向钻进系统。本文研究在井下可靠连续工作旋转轴套的力学模型, 建立具有导流蜗轮的导向套和旋转钻柱组合的多场耦合动力学理论模型, 揭示导流蜗轮的安装个数、安装位置、导流叶片数、叶片倾角、叶片长度等关键参数与相对转速差的关系曲线, 探寻合理的转矩控制规律。为垂直钻具的能量提取及相关元件的研制提供理论依据; 同时也为优化叶轮的设计提供参考方法。对研制高性能的自动垂直钻井工具乃至自动定向钻井工具起着重要作用。

1 自动垂直钻井工具工作原理

如图 1 所示为自动垂直钻井工具的基本结构。

它主要包括一个不旋转的导向套, 有一个中心轴穿过导向套, 把钻头与旋转的钻杆连接起来, 带动钻头旋转钻进。导向套与中心轴之间通过轴承连接, 使导向套保持相对静止。导向套的下端靠近钻头处是导向稳定器, 它主要是由 4 个可独立伸缩的导向块所组成。

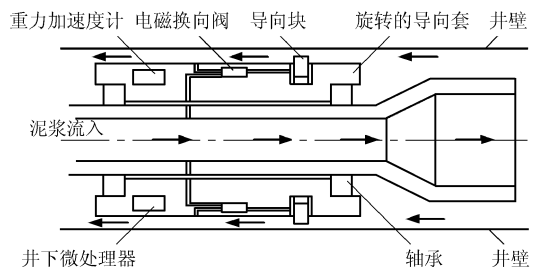


图 1 自动垂直钻井工具的基本结构

如图 2 所示, 导向块都布置于导向套内, 因此导向块也与井壁之间保持相对静止。导向块的伸缩装置是一套液压控制系统, 它包括活塞和液压控制阀, 它们都位于静止的导向套内, 液压控制系统的压力

收稿日期: 2008 - 05 - 29

作者简介: 兰伟(1982 -), 男(汉族), 湖北仙桃人, 武汉科技大学硕士研究生在读, 机械电子工程专业, 研究方向为流体机械动力学及钻井工程。湖北省武汉市武汉科技大学校本部机械学院 207 号信箱, lantao.cool@163.com; 曾良才(1964 -), 男(汉族), 湖北仙桃人, 武汉科技大学教授, 机械电子专业, 工学博士, 主要研究方向为流体传动与控制及钻井控制工程。

来源于泥浆压力,整个液压系统为同一压力系统。导向套内同时还装有井下微处理器和一个双轴重力加速度计。重力加速度计可以测定井眼的井斜及方位,井下微处理器接收重力加速度计传来的信号,经过判别处理后,向液压电磁阀发出指令,控制液压系统,从而控制导向块的伸缩。图 3 为本文研究的旋转轴套结构图。

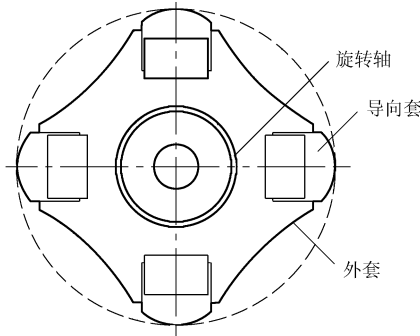


图 2 自动垂直系统导向原理示意图

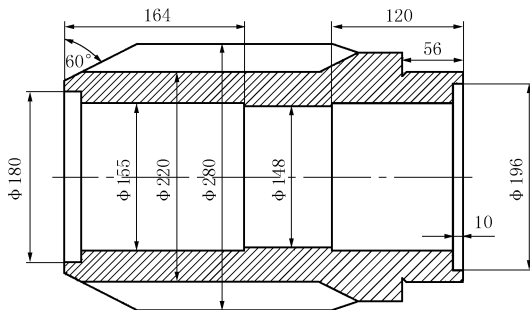


图 3 旋转轴套结构图

自动垂直钻井其控制过程为:当井眼发生偏斜时,井下微处理器经过分析判断,然后向导向块液压控制系统发出命令,使近钻头可调稳定器靠近井眼高边方向的导向块伸出顶向上井壁,这相当于使井下钻具靠近钻头处受到一个横向集中力的作用,这一横向集中力使钻头产生一定的降斜力,从而使井眼回到垂直轨道上来。当井眼回到垂直轨道上后,井下微处理器命令导向块收回,使近钻头处的横向力消失,让钻头垂直钻进。这样在井下形成一种自动闭环控制,不仅提高了井眼轨道的控制精度,还节约了调整钻具所用的时间。其井下闭环控制原理图如图 4 所示。

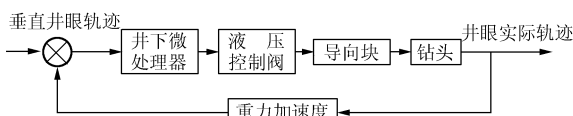


图 4 自动垂直钻井工具的井下闭环控制原理图

2 物理数学模型

2.1 物理模型

由于 Fluent 前处理软件 gambit 绘图功能不强,所以该旋转轴套物理模型在三维建模软件 Pro/E 中建立,具体参数为:叶片 3 片,叶片倾角 $\alpha = 45^\circ$,模型总长 $l = 350 \text{ mm}$;井壁直径 $d = 305 \text{ mm}$,旋转轴套外径 $d = 298 \text{ mm}$;转速 $v = 1200 \text{ L/min}$,流场入口压力 $P = 50 \text{ MPa}$ 。由于轴承与旋转钻具之间的间隙非常小,对结果影响较小,所以在建立模型中忽略其间隙影响,其物理模型如图 5 所示。

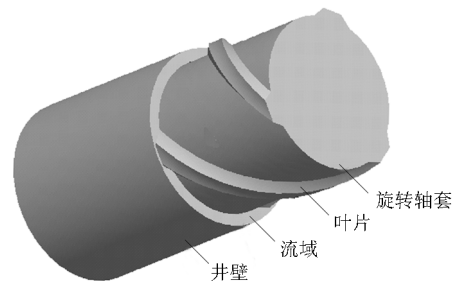


图 5 物理模型

2.2 数学模型

流域计算所用的方程是以 $N - S$ 方程及其简化形式为主的方程组。目前,由于直接求解 $N - S$ 方程的 DNS 方法在工程上运用有很大的困难,而且从工程上的观点来看,重要的是湍流所引起的平均流场的变化,是流场的整体效果。所以本论文采用时均化的 Reynolds 方程,这样可以避免 DNS 与 LES 方法计算量大的问题,而且对工程实际应用可以取得很好的效果。

2.2.1 质量守恒的连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) \quad (1)$$

2.2.2 动量守恒的运动方程(牛顿流体 $N - S$ 方程)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i' u_j'}) - \frac{\partial p}{\partial x_i} + S_i \quad (2)$$

式中 i, j 的取值范围是 $(1, 2, 3)$ 。

2.2.3 能量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \text{div}(\rho c_p v^p T) = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + S \quad (3)$$

2.2.4 Reynolds 应力输送方程

涡粘模型中的零方程模型或两方程模型都采用各向同性的湍流粘度来计算湍流应力,这些模型难以考虑旋转流动及流动方向表面曲率的变化影响。为了克服这些缺点,本论文中采用 Reynolds 应力方

程模型。Reynolds 应力方程模型为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u_i' u_j')}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k u_i' u_j')}{\partial x_k} \\ = & -\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu}{\sigma_t} \frac{\partial u_i' u_j'}{\partial x_k} + \frac{\mu}{\sigma_t} \frac{\partial u_i' u_j'}{\partial x_k} \right) - \\ & \rho \left(u_i' u_k' \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + u_j' u_k' \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) - \frac{\mu}{\rho Pr_i} \left(g_i \frac{\partial \rho}{\partial x_j} + g_j \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) - \\ & C_{1\rho} \frac{\varepsilon}{k} \left(u_i' u_j' - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - C_2 \left(p_{ij} - \frac{1}{3} p_{kk} \delta_{ij} \right) + \\ & C_{1'\rho} \frac{\varepsilon}{k} \left(u_k' u_m' n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} u_i' u_k' n_j n_k - \right. \\ & \left. \frac{3}{2} u_j' u_k' n_i n_k \right) \frac{k^{3/2}}{C_1 \varepsilon d} + \\ & C_{2'} \left(\varphi_{km,2} n_k n_m \delta_{ij} - \frac{3}{2} \varphi_{jk,2} n_j n_k - \frac{3}{2} \varphi_{jk,2} n_i n_k \right) \frac{k^{3/2}}{C_1 \varepsilon d} - \\ & \frac{3}{2} \rho \varepsilon \delta_{ij} - 2\rho \Omega_k \left(u_j' u_m' e_{ikm} + u_i' u_m' e_{jkm} \right) \quad (4) \end{aligned}$$

由于上述得到的 Reynolds 应力方程中, 包含有湍动能 k 和耗散率 ε , 所以需要补充 $k-\varepsilon$ 方程。

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} \\ = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ij} + G_{ij}) - \rho \varepsilon \quad (5) \\ & \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} \\ = & \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} C_{1\varepsilon} (P_{ij} + G_{ij}) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6) \end{aligned}$$

式中: P_{ij} ——剪应力产生项; G_{ij} ——浮力产生项, 由于这里是不可压流体, 可认为 $G_{ij} = 0$; μ ——湍流粘度, 按下式计算:

$$\mu = \rho C_\mu (k^2 / \varepsilon) \quad (7)$$

$C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 0.82$, $\sigma_\varepsilon = 1.0$, 由于本论文所研究的对象, 流体主流方向与重力方向平行, 所以 $C_{3\varepsilon} = 1$ 。

以上几个基本方程建立以后, 可为下文模拟提供理论依据。

3 模型的 CFD 模拟

3.1 网格的划分

在三维建模软件 Pro/E 中把模型建立好后, 存储为 step 格式, 导入 Fluent 前处理软件 gambit 中进行网格划分。本文采用贴体网格划分, 由于流域的三维立体图的形状比较复杂, 划分结构网格不是很方便, 所以对其进行非结构网格划分, 并进行入口、出口等相关边界条件设定。导向套下方为流体入

口, 流体流过导向套与井壁之间的空隙, 并从导向套上方流出, 故本文分析的流域为这段区域。图 6 为流域网格划分后所显示的图形。计算的最大体积网格为: $7.22322e - 008 \text{ m}^3$; 最小体积网格为: $2.829502e - 009 \text{ m}^3$; 网格节点数为 63686 个。

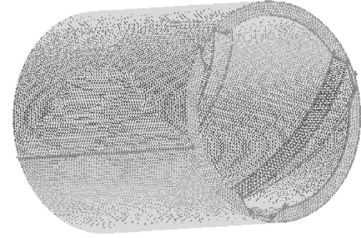


图 6 流域网格划分

3.2 Fluent 中模拟

本文采用 Fluent5/6 进行计算, 当进出口边界的流量残差和各个速度以及动能耗散等变量的残差均小于 10^{-3} 时以及进出口压力不再变化时, 认为计算收敛。将控制方程变换到贴体坐标系中, 针对流体控制方程的特点, 采用二阶中心差分格式离散化扩散项和源项, 对于控制方程中的对流项采用一阶迎风格式。计算中采用的湍流模型为 Reynolds 应力方程模型, 它比单方程和双方程模型更加严格地考虑了流线弯曲、旋涡、旋转和张力快速变化, 它对于复杂流动总体上有更高的预测精度。虽然可以用 SIMPLE 算法, 但是 SIMPLE 算法中采用欠松弛因子, 而它比较难以确定的, 所以采用 SIMPLEC 差分格式, 它比 SIMPLE 算法的收敛速度提高 30% ~ 50%。

设置转动参考系, 为了考虑旋转轴套旋转对流场的影响, 将转动参考坐标系设在与旋转轴套一起旋转的流体区域内。考虑到是液固两相流, 在选择求解器的时候不准备采用耦合式求解器, 因为在耦合式求解器中无 Mixture 模型, 所以选择分离式求解器。多相流模型为 Mixture 模型, 由于泥浆主要为水(或油)、重晶石粉(或粘土)及化学药品按严格的配置工艺生产的一种钻井液, 为模拟计算方便, 在这里需简化为水与重晶石粉两种成分。考虑边界条件以及设置相关求解控制参数, 进行迭代计算。

4 数值模拟结果分析

迭代 780 步达到残差均小于 10^{-4} 的要求, 再结合从 Fluent 的通量报告功能中质量流量守恒可知, 该次模拟达到收敛。

从图 7 中可以看出在流域中的叶片右下处入口

压力明显比它的左上处压力大,而且随着叶片旋转方向,压力逐渐减小。叶片的顶面压力基本保持不变,在下端两侧压力较小,到上端后两侧压力又逐渐升高,与实际情况较为接近。

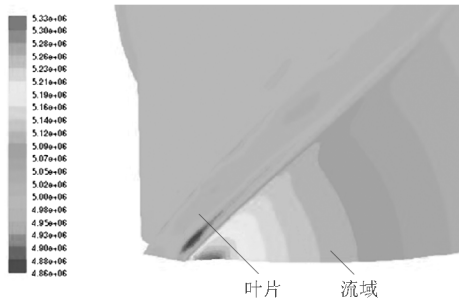


图7 旋转轴套叶片等高线图

从图 8、9 中可看出,在叶片入口处明显出现了流动紊乱,它表明旋转轴套存在设计不合理的地方,原因在于旋转轴套叶片进口角度偏小,导致该叶片接近出口处产生径向漩涡,即流动死区。进一步的设计改进过程中,应加大叶片角度或增加叶片数。但是,叶片数的增加会受到制造工业及排挤作用的限制,所以上述改进措施必须采取折中处理。

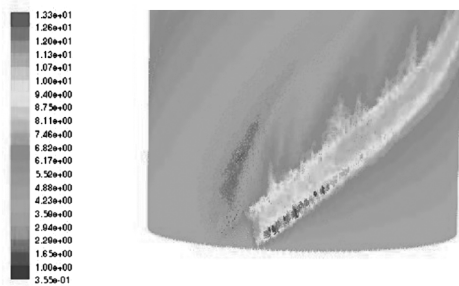


图8 速度矢量图

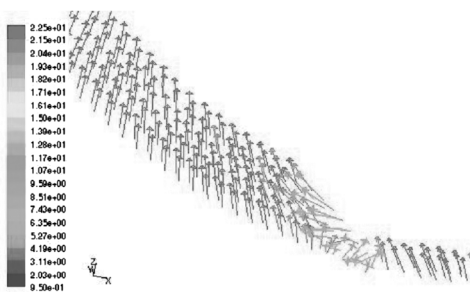


图9 入口速度矢量图

从 Fluent 仿真软件后处理报告中可知,叶片在流场所受的绕 Y 轴力矩为 2.1 N·m,为了对比不同参数下叶片所受到流场中的力矩情况,固分别建立倾角为 45°、60°等不同叶片参数,在如前述 Fluent 中仿真参数不变和网格划分方法相同情况下所得到的各个叶片在流场中的绕 Y 轴力矩,结果见表 1。

表 1 各个叶片流场所受之力矩

序号	叶片倾角 / (°)	叶片长度 /mm	叶片个数 /个	叶片力矩 / (N·m)
1	45	370	4	8.69
2	45	365	6	18.3
3	60	370	4	26.4
4	60	365	6	12.5
5	45	350	3	2.1

5 结论

(1) 基于 Fluent 软件的 CFD 方法,可以模拟出接近于真实情况定性的旋涡效应流场变化结果。

(2) 虽然 Fluent 和 Gambit 软件提供了丰富的模型,但是在进行旋转轴套的建模时,选出的模型要尽可能符合流场中的实际情况,这样才能做出准确的预测,笔者选用 Reynolds 应力方程模型即是一个很好的例证。

(3) 在 Pro/E 实体建模时,为了建模的方便,以及提高在 Gambit 划分网格和 Fluent 中仿真的效率,可适当忽略一些次要影响因素,优化实验模型。

(4) 对比不同参数下的仿真结果,从表 1 中寻找合理的力矩参数,同时参考到制造的工艺性和其它一些因素,选取 60°倾角、6 片叶片的旋转轴套为好。从而揭示导流蜗轮的安装个数、导流叶片数、叶片倾角等关键参数,探寻合理的转矩控制规律。

(5) 因篇幅有限,大量模型仿真结果没有完全展示,但是通过上述的相同模拟,可以得到大量的实验数据,通过比较结果,为制造旋转轴套以及确定叶片的倾角、叶片个数等提供了理论基础。

参考文献:

- [1] 陶文铨.数值传热学(第2版)[M].西安:西安交通大学出版社,2002.
- [2] Lane G L, Schwarz M P, Evans G M. Comparison of CFD Methods for Modeling of Stirred Tanks[A]. Proceedings of 10th European Conference on Mixing[C]. Delft: Delft University of Technology, 2000. 273 - 280.
- [3] 任静,张伟,吴林,等.基于 CFD 流态分析技术的水力机组转轮改型研究[J].机械工程学报,2000,(4).
- [4] 王福军.计算流体力学动力学分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [5] 苏义脑.井下控制工程学研究进展[M].北京:石油工业出版社,2003.
- [6] 苏义脑.自动垂直钻井工具的设计及自动控制方法[J].石油学报,2001,(7).
- [7] Fluent 6.0 User's Guide(Volume 1 - 5)[Z]. Fluent Inc.
- [8] Tetsuo Yonezawa. Robotic Controlled Drilling: A New Rotary Steerable Drilling System for the Oil and Gas Industry[R]. Dallas, Texas: IADC/SPE Drilling Conference, 2002.
- [9] R. G. Bland, J. W. Reeve. Rotary Steerable Drilling Fluid[R]. Jakarta, Indonesia: SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference, 2001.