

旋转导向钻井工具稳定平台静力学有限元计算

李军强 彭 勇 张绍槐 闫文辉

(西安石油大学机械工程学院, 陕西西安 710065)

摘 要: 稳定平台安装在旋转导向钻井工具的内部, 对其外形尺寸有特殊要求, 要求尽可能地细小, 同时又要承载巨大的动态冲击载荷, 所以旋转导向钻井工具稳定平台的刚度和稳定平台控制轴的强度直接关系到稳定平台能否正常工作及其寿命的长短。针对开发设计的稳定平台进行了静力学分析, 分别建立了稳定平台刚度分析和控制轴强度分析的力学模型, 利用有限元分析软件计算了稳定平台的刚度和控制轴的强度。从计算结果可以看出, 稳定平台控制轴的最大应力不超过 306 MPa, 发生在靠近下轴承处, 强度安全系数大于 2.7, 满足强度要求。发电机涡轮处最大横向位移为 0.528 mm, 刚度安全系数大于 2.8, 满足刚度要求。稳定平台最大挠度为 3.321 mm, 偏大, 可能会影响稳定平台的动态平衡性能, 有必要进一步采取措施, 改进设计。

关键词: 旋转钻井; 导向钻井; 钻井工具; 稳定器; 静力学; 有限元法

中图分类号: TE921⁺.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-0890 (2006) 05-0014-04

旋转导向钻井技术是 20 世纪 90 年代发展起来的一项全新的钻井技术。它具有机械钻速快、井眼轨迹控制精度高、井眼净化效果好、位移延伸能力强等特点, 是导向钻井技术发展的一次质的飞跃^[1-7]。目前国际上许多著名公司已开发出商业化产品。国内从 20 世纪 90 年代中期开始研究旋转导向技术, 目前已经取得了一些研究成果。近几年, 西安石油大学等单位开展了调制式旋转导向钻井技术的理论研究和技术创新工作。调制式旋转导向钻井系统由于钻柱与井壁之间不存在静止点, 因此在钻井过程中更能体现旋转钻井的优越性。该系统导向力的大小和方向主要是由稳定平台控制的。当需要最大导向力时, 稳定平台控制轴就带动上盘阀旋转, 使上盘阀稳定在预定方向, 控制上盘阀高压孔方向恒定。在钻柱旋转过程中, 每个巴掌依次在该方向附近伸出并拍打井壁, 导向机构对井壁的作用力就是拍打力的合力。该合力的反力就是钻柱受到的导向力, 方向沿着上盘阀预定方向的反方向。当不需要导向时, 稳定平台带动上盘阀以和钻柱不同的某一转速匀速转动, 这时巴掌均匀拍打井壁四周, 导向工具可控制的液压导向力的合力为零, 此时导向工具呈中性工作状态, 达到稳斜稳方位的效果。因此稳定平台的闭环控制是调制式旋转导向钻井系统的关键^[8-11]。

稳定平台安装在旋转导向钻井工具的内部, 承担着传递扭矩、承载巨大轴向横向冲击载荷的重任。在这些载荷的作用下, 稳定平台会产生复杂的纵横弯曲变形。

由于旋转导向钻井工具本身狭小细长, 发电机轴又是稳定平台控制轴的一部分, 所以对稳定平台的外形尺寸和稳定平台控制轴要求尽可能细小。因而, 旋转导向钻井工具稳定平台刚度和控制轴的强度计算十分重要, 直接关系到稳定平台能否正常工作和其寿命的长短。

为此, 笔者对稳定平台进行了静力学分析, 分别建立了稳定平台刚度分析和控制轴强度分析的力学模型, 利用有限元分析软件进行了计算分析, 结果表明, 稳定平台的刚度和控制轴的强度均能满足设计要求。

1 稳定平台结构

稳定平台安装在旋转导向钻井工具的内部, 在钻井过程中随钻铤一起旋转。稳定平台主要由上下涡轮发电机、控制轴及电子仓组成, 其结构如图 1 所示。

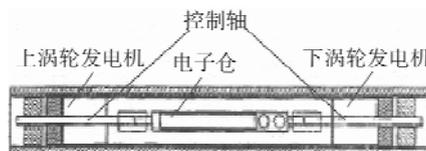


图 1 稳定平台结构

收稿日期: 2006-04-11; 改回日期: 2006-06-11

基金项目: 国家自然科学基金项目“复杂条件下钻井技术基础研究”(编号: 50234030)、国家 863“十五”重大项目“旋转导向钻井系统关键技术研究”(编号: 2003AA602013) 部分研究成果

作者简介: 李军强 (1964—), 男, 陕西礼泉人, 2000 年毕业于西北工业大学工程力学专业, 获博士学位, 副教授。

联系电话: (029) 88382608

工作时，上下涡轮发电机的涡轮在钻井液带动下旋转，而涡轮和导向工具内壁仅有 1.5 mm 的间隙，所以对稳定平台的横向变形有严格的限制。另外，由于控制轴的直径很小，而且在井下工作时有 15g 的冲击加速度，所以控制轴的强度也是必须考虑的问题。

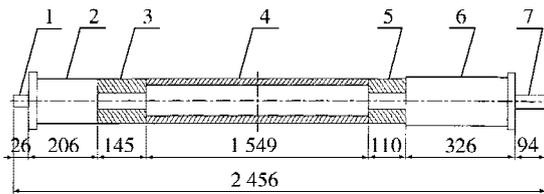
2 稳定平台刚度计算

2.1 力学模型

由于几何结构和受力状态的复杂性，在建立有限元模型时必须对实际结构和受力情况进行等效简化处理。根据对实际设计结构的分析，进行刚度分析时，稳定平台结构两端轴承之间可以简化为如图 2 所示的阶梯轴结构（图中长度单位为 mm）。因为主要关心的是发电机涡轮处的弯曲挠度，考虑到发电机内部缠满线圈，刚度分析时把发电机看成实心圆柱，涡轮厚度 65 mm。

2.2 主要参数

内轴 1 和 7 的材料是合金结构钢 40CrNiMoA,



1. 内轴；2. 上发电机；3. 上接头；
4. 电子仓；5. 下接头；6. 下发电机；7. 内轴

图 2 稳定平台刚度分析力学模型

上下发电机 2 和 6 的材料是优质碳素结构钢，上下接头 3、5 和电子仓 4 的材料是钛合金 TC4。各种材料的泊松比 μ 都取 0.3，在计算时将材料性质定义为线弹性材料。具体的几何参数和物理参数见表 1。

2.3 网格划分

根据分析，采用三维弹性梁单元 BEAM4。为了精确计算上下发电机涡轮处的挠度，采用人工划分单元和自动划分单元相结合的方法，共分成 125 个单元，在设计所重点关注的两个涡轮的上下边缘处建有节点。

表 1 刚度分析几何参数和物理参数

段	长度/m	直径/ 10^{-3} m	面积/ 10^{-4} m ²	惯性矩/ 10^{-7} m ⁴	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	线密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	弹性模量/ $10^9 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
1	0.026	25	4.906 3	0.192	7 800	3.827	210
2	0.206	77	46.542 7	17.247	7 800	36.303	210
3	0.145	77/30	39.477 7	16.850	4 450	17.568	113
4	1.549	77/60	18.282 7	10.888	4 450	8.136	113
5	0.110	77/30	39.477 7	16.850	4 450	17.568	113
6	0.326	77	46.542 7	17.247	7 800	36.303	210
7	0.094	25	4.906 3	0.192	7 800	3.827	210

2.4 边界条件

建立空间坐标系： x 方向沿着稳定平台的轴线方向， y 方向和 z 方向沿着互相垂直的两个横线方向，坐标原点取在上轴承处。

根据稳定平台的上下轴承性质，上轴承看作是固定端约束，即在三个坐标方向的位移和转角都为 0，即 $U_x = U_y = U_z = \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$ ；下轴承看作是小车模型，即 $U_y = U_z = \theta_y = \theta_z = 0$ 。

2.5 计算载荷

稳定平台在工作时受力非常复杂，计算时必须进行简化处理，略去次要因素（摩擦力、摩擦力矩、流固耦合作用等）。对稳定平台起主要作用的载荷有轴向和横向 15g 的冲击载荷、作用在上下涡轮叶片上向下的大约 10 kN 的轴向力以及 12 N·m 的扭矩。

2.6 计算结果及分析

稳定平台刚度计算是一个复杂的纵横弯曲问题，

所以必须考虑应力强化效应进行非线性求解。因为稳定平台的刚度问题主要是上下发电机涡轮处的横向位移限制，如果涡轮与导向工具内壁之间的间隙太小，涡轮旋转时就会与工具内壁碰撞，就不能正常工作。如果涡轮与导向工具内壁之间的间隙太大，就会影响涡轮发电机的效率。

笔者在设计中，涡轮与导向工具内壁之间的间隙取为 1.5 mm，刚度问题主要关心的是涡轮处的横向位移大小。

从有限元计算结果可以得到：上发电机涡轮上端处挠度 0.047 mm，下端处挠度 0.281 mm；下发电机涡轮上端处挠度 0.528 mm，下端处挠度 0.248 mm。最大挠度为 3.321 mm，发生在电子仓中间偏下 125 mm 处。从计算结果可以看出，发电机涡轮处最大横向位移为 0.528 mm，小于 1.5 mm 的限制条件，刚度安全系数大于 2.8，满足刚度要求。

3 控制轴强度计算

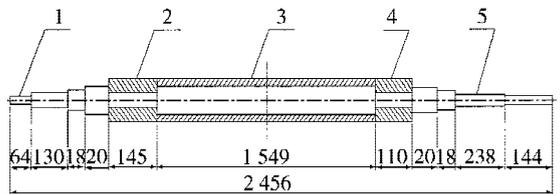
3.1 力学模型

根据对实际设计结构的分析,分析控制轴强度时可以简化为如图3所示的阶梯轴结构(图中长度单位为mm)。因为主要关心的是发电机上内轴的强度,所以分析强度时把除内轴外的发电机部分与内轴分开,考虑到发电机内轴上缠满线圈,计算时把发电机内轴上的线圈和外部的转子当作附加质量处理。

3.2 主要参数

各对应部件的材料与稳定平台的相同,计算时也

将材料性质定义为线弹性材料。具体的几何参数和物理参数见表2。



1. 内轴; 2. 上接头; 3. 电子仓; 4. 下接头; 5. 内轴

图3 控制轴强度分析力学模型

表2 强度分析几何参数和物理参数

段	长度/m	直径/ 10^{-3} m	面积/ 10^{-4} m ²	惯性矩/ 10^{-7} m ⁴	密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	线密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	附加质量/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$	拉压弹性模量/ $10^9 \text{N} \cdot \text{m}^{-2}$
1	0.026	25	4.906 3	0.191 7	7 800	3.827	0	210
2	0.038	25	4.906 3	0.191 7	7 800	3.827	32.476	210
3	0.130	30	7.065 0	0.397 4	7 800	5.511	30.792	210
4	0.018	36	10.173 6	0.824 1	7 800	7.935	28.368	210
5	0.020	45	15.896 3	2.011 9	7 800	12.400	23.903	210
6	0.145	77/30	39.477 7	16.850 0	4 450	17.568	0	113
7	1.549	77/60	18.282 7	10.888 0	4 450	8.136	0	113
8	0.110	77/30	39.477 7	16.850 0	4 450	17.568	0	113
9	0.020	45	15.896 3	2.011 9	7 800	12.400	23.903	210
10	0.018	36	10.173 6	0.824 1	7 800	7.935	28.368	210
11	0.238	30	7.065 0	0.397 4	7 800	5.511	30.792	210
12	0.050	25	4.906 3	0.191 7	7 800	3.827	32.476	210
13	0.094	25	4.906 3	0.191 7	7 800	3.827	0	210

3.3 网格划分

根据分析,采用三维弹性梁单元 BEAM4。为了精确计算,采用人工划分单元和自动划分相结合的方法,共分130个单元。

3.4 边界条件

根据控制轴的上下轴承性质,上轴承看作是固定端约束,即在三个坐标方向的位移和转角都为0,即 $U_x=U_y=U_z=\theta_x=\theta_y=\theta_z=0$;下轴承看作是小车模型,即 $U_y=U_z=\theta_y=\theta_z=0$ 。

3.5 计算载荷

对控制轴起主要作用的载荷有:轴向和横向15g的冲击载荷、作用在上下涡轮叶片上向下的大约10kN的轴向力以及12N·m的扭矩。

3.6 计算结果及分析

控制轴强度计算是一个复杂的纵横弯曲问题,所以必须考虑应力强化效应进行非线性求解。从有限元计算结果可以得到:最大应力为306MPa,发生在最下端约束附近横截面。钛合金TC4的屈服极限 $\sigma_s=860$

MPa,40CrNiMoA合金结构钢的屈服极限 $\sigma_s=835$ MPa,所以强度安全系数大于2.7,满足强度要求。

4 结 论

1) 控制轴最大应力不超过306MPa,发生在靠近下轴承处,强度安全系数大于2.7,满足强度要求。

2) 发电机涡轮处最大横向位移为0.528mm,刚度安全系数大于2.8,满足刚度要求。

3) 稳定平台最大挠度为3.321mm,偏大,可能会影响稳定平台的动态平衡性能,有必要进一步采取措施,改进设计。

4) 对稳定平台的静力学特性进行了研究,所得结果有一定的参考价值,关于稳定平台的动力学特性,需进行下一步研究。

参 考 文 献

[1] 张绍槐,狄勤丰.用旋转导向钻井系统钻大位移井[J].石油

- 学报, 2000, 21 (1): 76-80.
- [2] 苏义脑, 窦修荣, 王家进. 旋转导向钻井系统的功能、特性和典型结构 [J]. 石油钻采工艺, 2003, 25 (4): 5-7.
- [3] Downton G, Klausen T S, et al. New directions in rotary steerable drilling [J]. Oilfield Review, 2000, 12 (1): 18-29.
- [4] 杨剑锋, 张绍槐. 旋转导向闭环钻井系统 [J]. 石油钻采工艺, 2003, 25 (1): 1-5.
- [5] 王卫彬, 秦利民, 刘俊, 等. 导向钻井井下控制理论与技术的发展 [J]. 石油钻探技术, 2004, 32 (6): 64-67.
- [6] 于文平, 狄勤丰. 滑动导向钻具组合连续导向钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2003, 31 (2): 1-3.
- [7] 张锦宏. 江苏油田滑动导向工具连续导向钻井技术的应用与效益评价 [J]. 石油钻探技术, 2003, 31 (3): 22-23.
- [8] 汤南, 穆向阳. 调制式旋转导向钻井工具稳定平台控制机构研究 [J]. 石油钻采工艺, 2003, 25 (3): 9-12.
- [9] 汤南, 霍爱清, 崔琪琳. 基于状态空间法的旋转导向钻井工具控制系统研究 [J]. 石油学报, 2004, 25 (2): 89-92.
- [10] 韩来聚, 王瑞和, 刘新华, 等. 调制式旋转导向钻井系统稳定平台控制原理及性能分析 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 2004, 28 (5): 49-51, 60.
- [11] 彭勇, 闫文辉, 李继博. 旋转导向钻井工具导向力优化设计 [J]. 石油钻探技术, 2006, 34 (2): 10-14.

[审稿 狄勤丰]

The Finite Element Calculation of Statics on A Stabilized Platform for Rotary-Steering Drilling

Li Junqiang Peng Yong Zhang Shaohuai Yan Wenhui

(Department of Mechanical Engineering, Xi'an Petroleum University, Xi'an, Shanxi, 710065, China)

Abstract: A stabilized platform is installed inside a rotary-steering drilling tool. It is subjected a huge dynamic impact, and meanwhile its dimensions have to be as small as possible. Therefore, both the rigidity of a stabilized platform and the strength of its control axles are crucial factors that directly determine its work conditions and its life. For the stabilized platform designed by the authors, two mechanical models are established respectively to analyze the rigidity of stabilized platform and the strength of its control axles. The rigidity and the strength are computed using finite element software based on the two models. The computational results indicate that the maximum stress of a control axle is 306 MPa which occurs nearby the lower bearing with a permitted strength safety factor of more than 2.7, the maximum lateral deformation of its turbine generators is 0.528 mm with a permitted rigidity safety factor more than 2.8, the maximum deflection of the whole stabilized platform is 3.321 mm. This deflection, a little bit larger than permitted, may be harmful to the dynamic balance performance of a stabilized platform. Therefore, it is necessary to take further measures to improve the design.

Key words: rotary drilling; navigational drilling; drilling tool; stabilizer; statics; finite element method

大陆架尾管悬挂器、浮箍和浮鞋创国内下深纪录

在中国石化重点科探井、亚洲第一垂直深井——塔深 1 井五开固井中, 大陆架公司为该井专门设计制造的 SSX-A 型双锥双液缸尾管悬挂器、浮箍和浮鞋分别在井深 6 637 和 8 405 m 应用成功, 创造了国内同类固井工具的下深纪录。

由于塔深 1 井超深、压力大、温度高、井身结构复杂, 因此, 要求所有固井工具均为特殊结构、非常规尺寸、特殊扣型, 且对固井工具可靠性要求高。为此, 大陆架公司自主研发了 $\phi 339.7$ 、 $\phi 273.1$ 、 $\phi 206.4$ 、 $\phi 193.7$ 、 $\phi 158.8$ 和 $\phi 139.7$ mm ($\phi 127.0$ mm) 套管固井的所有配套尾管悬挂器、水泥头、液压分级注水泥器、扶正短节、浮箍和浮鞋等工具。

塔深 1 井五开采用 $\phi 165.1$ mm 钻头钻至井深 8 408 m 完钻, 悬挂器下深 6 637 m (静止温度 150 °C), 井底 8 405 m (浮箍和浮鞋处) 静止温度达到 180 °C。采用大陆架公司专门设计的 SSX-A 型 $\phi 206.4$ mm \times $\phi 139.7$ mm 尾管悬挂器悬挂 $\phi 139.7$ mm VAM TOP 半无接箍 + $\phi 127.0$ mm FOX 无接箍复合尾管, 尾管长达 1 768 m。这种悬挂器采用双锥双液缸结构, 悬挂能力达到 900 kN, 出厂密封试压 25 MPa, 密封件耐温超过 180 °C; 耐高温浮箍、浮鞋出厂前都经过 25 MPa 的反向密封试压。

塔深 1 井五开固井的顺利完成, 标志着大陆架公司又创造了一个新的悬挂器及浮箍、浮鞋下深纪录, 也证明了国产固井工具完全可以替代国外产品, 满足超深井固井的需求。

[郑晓志 供稿]