



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 111810112 B

(45) 授权公告日 2021.12.03

(21) 申请号 202010558687.6

CN 111144053 A, 2020.05.12

(22) 申请日 2020.06.18

CN 110792430 A, 2020.02.14

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 110456646 A, 2019.11.15

申请公布号 CN 111810112 A

CN 103266878 A, 2013.08.28

(43) 申请公布日 2020.10.23

CN 108894768 A, 2018.11.27

(73) 专利权人 中国地质大学(武汉)

CN 102425409 A, 2012.04.25

地址 430000 湖北省武汉市洪山区鲁磨路
388号

AU 2013400710 A1, 2016.01.21

CN 208257796 U, 2018.12.18

US 2020011167 A1, 2020.01.09

(72) 发明人 吴敏 张典 陆承达 陈略峰
曹卫华

David C-K Chen, Min Wu. "State-of-the-Art BHA Program Produces Un-Precedented Results". 《International Petroleum Technology Conference》. 2008, 全文.

(74) 专利代理机构 武汉知产时代知识产权代理有限公司 42238

贺艳, 等. "导向钻井工具姿态动态测量的自适应滤波方法". 《西安石油大学学报(自然科学版)》. 2016, 第31卷(第6期), 全文. (续)

代理人 曹雄

(51) Int. Cl.

E21B 44/00 (2006.01)

(续)

审查员 张超

(56) 对比文件

CN 110513043 A, 2019.11.29

CN 110886606 A, 2020.03.17

US 2019292898 A1, 2019.09.26

US 2010175922 A1, 2010.07.15

CN 109477360 A, 2019.03.15

权利要求书3页 说明书11页 附图5页

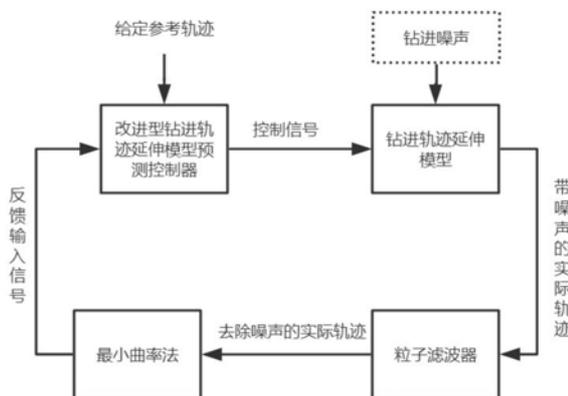
(54) 发明名称

基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法

控制器的环境适应性。

(57) 摘要

本发明提供一种基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法, 包括以下: 建立垂直钻进过程中的钻进轨迹延伸模型; 构建改进型模型预测控制器; 引入粒子滤波器对实际钻进轨迹测量参数进行滤波, 得到降噪后的实钻轨迹参数; 将降噪后的实钻轨迹参数输入至改进型模型预测控制器, 形成垂闭闭环控制。本发明提供的有益效果是: 在纠偏控制中建立了一个粒子滤波器, 能够有效降低测量噪声对垂直钻进纠偏控制带来的影响, 提高控制精度; 在模型预测控制器中引入软约束和可变优化权重, 增加模型预测



CN 111810112 B

[接上页]

(51) Int.Cl.

E21B 7/10 (2006.01)

(56) 对比文件

王燕,等.“垂直钻井系统纠斜机构脉宽调制控制研究”.《石油钻探技术》.2015,第43卷(第2期),全文.

陆承达,等.“离散序列曼彻斯特解码在EM-MWD中的应用研究”.《科学技术与工程》.2015,第15卷(第7期),全文.

龚勋.“基于虚拟仪器自动垂直钻井工具纠斜控制理论与实验研究”.《中国优秀硕士学位论文全文数据库(工程科技I辑)》.2010,(第2期),第13-35页.

1. 一种基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法,其特征在于:具体包括:

S101:建立三维地层坐标系,Z轴为铅垂线方向,X轴指向正东方向,Y轴指向正北方向,根据垂直钻进过程纠偏工艺和噪声分布,建立垂直钻进过程中的钻进轨迹延伸模型;

S102:将所述钻进轨迹延伸模型线性化和离散化,并基于垂直钻进过程中噪声分布特性,引入一个软约束条件和可变优化权重矩阵,构建改进型模型预测控制器,并给定钻进参考轨迹,同时将参考轨迹输入至所述改进型模型预测控制器;开始垂直钻进过程,测量并得到含有噪声的实际钻进轨迹参数;所述参考轨迹,即钻进过程中的参考井斜角、参考方位角和参考水平位移;

S103:引入粒子滤波器,对所述含有噪声的实际钻进轨迹参数进行滤波,得到降噪后的实际钻进轨迹参数;

S104:结合最小曲率法和钻进轨迹延伸模型,将降噪后的实际钻进轨迹参数转换为所述改进型模型预测控制器的反馈输入信号,并将反馈输入信号输入至所述改进型模型预测控制器,形成垂直钻进闭环控制;

步骤S103中,所述粒子滤波器具体为基本粒子滤波器;

步骤S101中,所述钻进轨迹延伸模型如式(1)所示:

$$\begin{cases} \tan \alpha \sin \beta = \tan \alpha_x \\ \tan \alpha \cos \beta = \tan \alpha_y \\ \omega_{SR} = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{S}_x = \dot{S} \tan \alpha_x \\ \dot{S}_y = \dot{S} \tan \alpha_y \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{\alpha}_x = \omega_x + \mu_x = r \omega_{SR} \sin \tilde{\theta}_f + \mu_x \\ \dot{\alpha}_y = \omega_y + \mu_y = r \omega_{SR} \cos \tilde{\theta}_f + \mu_y \end{cases} \quad (3)$$

式(1)、(2)、(3)中, α 为钻进轨迹的井斜角, β 为钻进轨迹的方位角, α_x 为钻进轨迹的井斜角在XOZ平面的投影分量, α_y 为钻进轨迹井斜角在YOZ平面的投影分量; \dot{S} 为钻速; \dot{S}_x 为钻进轨迹水平X方向分量 S_x 的导数; \dot{S}_y 为钻进轨迹水平Y方向分量 S_y 的导数; $\dot{\alpha}_x$ 为 α_x 的导数; $\dot{\alpha}_y$ 为 α_y 的导数; ω_{SR} 为钻进系统导向率; $\tilde{\theta}_f$ 为钻进系统磁工具面向角; r 为钻进系统造斜率; μ_x 为钻进过程中的过程噪声在X方向的分量; μ_y 为钻进过程中的过程噪声在Y方向的分量。

2. 如权利要求1所述的一种基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法,其特征在于:步骤S102中,所述钻进轨迹延伸模型线性化和离散化,具体如式(4)所示:

$$\begin{bmatrix} \hat{S}_{ex}(k+1) \\ \hat{\alpha}_{ex}(k+1) \\ \hat{S}_{ey}(k+1) \\ \hat{\alpha}_{ey}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{S}T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dot{S}T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{S}_{ex}(k) \\ \hat{\alpha}_{ex}(k) \\ \hat{S}_{ey}(k) \\ \hat{\alpha}_{ey}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{ex}(k) \\ \omega_{ey}(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)为所述钻进轨迹延伸模型线性离散化状态空间方程,其中 $\hat{S}_{ex}(k)$ 与 $\hat{S}_{ey}(k)$ 分别为k时刻钻进系统的钻具相对于所述参考轨迹在X轴与Y轴的实际横向位移的滤波器估计值, $\hat{\alpha}_{ex}(k)$ 与 $\hat{\alpha}_{ey}(k)$ 分别为k时刻实际钻进轨迹相对于参考轨迹的井斜角在XOZ与YOZ平面上的投影的滤波器估计值, $\omega_{ex}(k)$ 与 $\omega_{ey}(k)$ 为两个平面上相对于参考导向率的控制增量,T为采样周期。

3.如权利要求2所述的一种基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法,其特征在于:步骤S102中,引入一个软约束条件和可变优化权重矩阵,构建改进型模型预测控制器,具体为:所述改进型模型预测控制器的预测方程为:

$$Y(k) = \Xi_k X(k|k) + \Theta_k W(k) \quad (5)$$

式(5)中, Ξ_k 和 Θ_k 均为预测方程的参数矩阵;式(5)中各矩阵如式(6)所示:

$$Y(k) = \begin{bmatrix} S_{ex}(k+1|k) \\ a_{ex}(k+1|k) \\ S_{ey}(k+1|k) \\ a_{ey}(k+1|k) \\ \dots \\ S_{ex}(k+p|k) \\ a_{ex}(k+p|k) \\ S_{ey}(k+p|k) \\ a_{ey}(k+p|k) \end{bmatrix} W(k) = \begin{bmatrix} \omega_{ex}(k|k) \\ \omega_{ey}(k|k) \\ \omega_{ex}(k+1|k) \\ \omega_{ey}(k+1|k) \\ \dots \\ \omega_{ex}(k+c|k) \\ \omega_{ey}(k+c|k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$x(k|k) = [S_{ex}(k|k) \quad a_{ex}(k|k) \quad S_{ey}(k|k) \quad a_{ey}(k|k)]^T$$

式(6)中,p为预设的预测步长,c为预设的控制步长; $S_{ex}(k+1|k)$ 与 $S_{ey}(k+1|k)$ 分别为k时刻预测到的k+1时刻钻进系统的钻具相对于所述参考轨迹在X轴与Y轴的实际横向位移偏差; $a_{ex}(k+1|k)$ 与 $a_{ey}(k+1|k)$ 分别为k时刻预测到的k+1时刻实际钻进轨迹相对于参考轨迹的井斜角在XOZ与YOZ平面上投影值的偏差;

引入一个软约束条件和可变优化权重矩阵,得到改进型模型预测控制器的优化约束条件,具体如式(7)所示:

$$\begin{aligned} \min J(Y(k), U(k)) &= Y(k)^T Q Y(k) + W(k)^T R W(k) \\ \begin{cases} (\alpha_{rx}(m) + \hat{\alpha}_{ex}(m))^2 + (\alpha_{ry}(m) + \hat{\alpha}_{ey}(m))^2 \leq \alpha_{\max}^2 & (\text{if } \|\hat{\alpha}(k)\| \leq \alpha_{\max}) \\ (\alpha_{rx}(m) + \hat{\alpha}_{ex}(m))^2 + (\alpha_{ry}(m) + \hat{\alpha}_{ey}(m))^2 \leq (\hat{\alpha}(k))^2 & (\text{if } \|\hat{\alpha}(k)\| > \alpha_{\max}) \\ (\omega_{rx}(m) + \omega_{ex}(m))^2 + (\omega_{ry}(m) + \omega_{ey}(m))^2 \leq r^2 \\ m = k+1, \dots, k+p \end{cases} \quad (7) \end{aligned}$$

式(7)中,Q与R分别为预测方程状态量Y(k)与控制量U(k)的权重矩阵;Q的表达式如式(8):

$$Q = [q_{sx}, \frac{b_Q}{1 + e^{-a_Q(\hat{\alpha} - c_Q)}} + d_Q, q_{sy}, \frac{b_Q}{1 + e^{-a_Q(\hat{\alpha} - c_Q)}} + d_Q] \quad (8)$$

其中 q_{sx} 为X方向分量 S_x 的权重, q_{sy} 为Y方向分量 S_y 的权重, a_Q, b_Q, c_Q 和 d_Q 为角度权重因子;

$\alpha_{rx}(m)$ 与 $\alpha_{ry}(m)$ 为 m 时刻参考轨迹的井斜角在 XOZ 与 YOZ 平面上的投影值; $\hat{\alpha}_{ex}(m)$ 与 $\hat{\alpha}_{ey}(m)$ 为 m 时刻实际钻进轨迹相对于参考轨迹的井斜角在 XOZ 与 YOZ 平面上投影值的偏差; $\omega_{rx}(m)$ 和 $\omega_{ry}(m)$ 为 m 时刻参考控制量; $\omega_{ex}(m)$ 与 $\omega_{ey}(m)$ 为 m 时刻实际控制量与参考控制量的偏差; $\hat{\alpha}(k)$ 为 k 时刻井斜角的估计值; α_{max} 为预设的井斜角最大软约束。

4. 如权利要求1所述的一种基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法, 其特征在于: 步骤S104中, 所述反馈输入信号, 具体为: 实际钻进轨迹的井斜角在 XOZ 与 YOZ 平面上的投影值的估计值 $\hat{\alpha}_x$, $\hat{\alpha}_y$ 、实际钻进轨迹的水平位移在 X 方向和 Y 方向的分量的估计值 \hat{S}_x , \hat{S}_y 。

5. 如权利要求1所述的一种基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法, 其特征在于: 步骤S104中, 将反馈输入信号输入至所述改进型模型预测控制器后, 输出信号为磁工具面向角 $\tilde{\theta}_{gf}$ 和导向率 ω_{SR} 的控制增量, 最终的实际控制量具体如式 (9):

$$\begin{cases} \tilde{\theta}_{gf} = \arctan\left(\frac{\omega_{rx} + \omega_{ex}}{\omega_{ry} + \omega_{ey}}\right) \\ \omega_{SR} = \frac{\sqrt{(\omega_{rx} + \omega_{ex})^2 + (\omega_{ry} + \omega_{ey})^2}}{r} \end{cases} \quad (9)。$$

基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及钻进控制领域,尤其涉及一种基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法。

背景技术

[0002] 垂直钻进技术对深层地质钻探具有重要意义,垂直钻进的目标是从井口向下沿铅垂线钻进至目标地层。然而由于地层倾角、各向异性、岩性软硬交替以及下部钻具受力与弯曲变形等因素,工程中容易造成钻进轨迹偏斜。当井斜过大时,会使得现场施工和初始设计方案有较大的偏差,从而降低资源采收率。同时过大的井斜角与方位角还容易造成起下钻困难、钻杆工作条件恶化、粘附卡钻、键槽卡钻等复杂问题,严重影响钻进过程的安全性。因而钻进轨迹纠偏控制十分重要。

[0003] 垂直钻进过程纠偏控制的重要手段为钻进轨迹控制方法,即通过合理控制手段保持钻进轨迹沿着井口铅垂线行进。基于传统工艺和现有文献中研究的垂直钻进纠偏控制方法虽然在一定程度上能够解决轨迹偏斜的问题,但少有研究成果针对垂直钻进过程纠偏控制精度受测量噪声影响的问题进行讨论。测量噪声一方面会导致控制精度下降,另一方面会提高控制器处理状态约束的难度。

[0004] 滤波是解决测量噪声的主要方法,其中拓展卡尔曼滤波器是最常用的滤波器之一,被广泛应用到工业各个领域。但对于非高斯非线性系统的噪声滤波问题,拓展卡尔曼滤波器精度有限。粒子滤波理论是贝叶斯框架下的滤波理论,它基于蒙特卡洛采样定理,能够在各种环境下良好的完成滤波任务。垂直钻进过程机理复杂,其过程噪声具备非高斯特性,因此设计适用于垂直钻进纠偏过程的粒子滤波器将是处理垂直钻进测量噪声的有效手段。

[0005] 针对约束问题,模型预测控制器因其具备显示处理约束的能力,能够胜任各种实际工业控制任务,对于垂直钻进纠偏过程也具有良好的应用效果。然而由于测量噪声影响,在纠偏过程中井斜角容易超限,当井斜角超出一定范围后,会导致模型预测控制器中滚动优化问题缺少可行解,从而导致控制器计算错误。针对这一问题,仍需要进一步研究。

发明内容

[0006] 有鉴于此,本发明提出了一种基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法,将粒子滤波器与改进型模型预测控制相结合,降低测量噪声对纠偏控制造成的负面影响。分析垂直钻进过程纠偏控制需求与工艺限制,研究垂直钻进过程测量噪声与过程噪声的大小与分布特性,进而给出纠偏控制问题的数学描述。然后考虑垂直钻进过程纠偏控制精度受测量噪声影响的问题,引入粒子滤波器,以提高控制精度。最后设计模型预测控制器,实现钻进轨迹的纠偏纠斜,同时通过引入软约束和可变优化权重的方式改进模型预测控制,以降低测量噪声对控制器带来的不利影响。

[0007] 本发明提供了一种基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法,包括以下:

[0008] S101:建立三维地层坐标系,Z轴为铅垂线方向,X轴指向正东方向,Y轴指向正北方,根据垂直钻进过程纠偏工艺和噪声分布,建立垂直钻进过程中的钻进轨迹延伸模型;

[0009] S102:将所述钻进轨迹延伸模型线性化和离散化,并基于垂直钻进过程中噪声分布特性,引入一个软约束条件和可变优化权重矩阵,构建改进型模型预测控制器,并给定钻进参考轨迹,同时将参考轨迹输入至所述改进型模型预测控制器;开始垂直钻进过程,测量并得到含有噪声的实际钻进轨迹参数;所述参考轨迹,即钻进过程中的参考井斜角、参考方位角和参考水平位移;

[0010] S103:引入粒子滤波器,对所述含有噪声的实际钻进轨迹参数进行滤波,得到降噪后的实际钻进轨迹参数;

[0011] S104:结合最小曲率法和钻进轨迹延伸模型,将降噪后的实际钻进轨迹参数转换为所述改进型模型预测控制器的反馈输入信号,并将反馈输入信号输入至所述改进型模型预测控制器,形成垂直钻进闭环控制。

[0012] 进一步地,步骤S101中,所述钻进轨迹延伸模型如式(1)所示:

$$[0013] \quad \begin{cases} \tan \alpha \sin \beta = \tan \alpha_x \\ \tan \alpha \cos \beta = \tan \alpha_y \\ \omega_{SR} = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$[0014] \quad \begin{cases} \dot{S}_x = \dot{S} \tan \alpha_x \\ \dot{S}_y = \dot{S} \tan \alpha_y \end{cases} \quad (2)$$

$$[0015] \quad \begin{cases} \dot{\alpha}_x = \omega_x + \mu_x = r\omega_{SR} \sin \tilde{\theta}_f + \mu_x \\ \dot{\alpha}_y = \omega_y + \mu_y = r\omega_{SR} \cos \tilde{\theta}_f + \mu_y \end{cases} \quad (3)$$

[0016] 式(1)、(2)、(3)中, α 为钻进轨迹的井斜角, β 为钻进轨迹的方位角, α_x 为钻进轨迹的井斜角在XOZ平面的投影分量, α_y 为钻井轨迹井斜角在YOZ平面的投影分量; \dot{S} 为钻速; \dot{S}_x 为钻进轨迹水平X方向分量 S_x 的导数; \dot{S}_y 为钻进轨迹水平Y方向分量 S_y 的导数; $\dot{\alpha}_x$ 为 α_x 的导数; $\dot{\alpha}_y$ 为 α_y 的导数; ω_{SR} 为钻进系统导向率; $\tilde{\theta}_f$ 为钻进系统磁工面向角; r 为钻进系统造斜率; μ_x 为钻进过程中的过程噪声在X方向的分量; μ_y 为钻进过程中的过程噪声在Y方向的分量。

[0017] 进一步地,步骤S102中,所述钻进轨迹延伸模型线性化和离散化,具体如式(4)所示:

$$[0018] \quad \begin{bmatrix} \hat{S}_{ex}(k+1) \\ \hat{\alpha}_{ex}(k+1) \\ \hat{S}_{ey}(k+1) \\ \hat{\alpha}_{ey}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{S}T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dot{S}T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{S}_{ex}(k) \\ \hat{\alpha}_{ex}(k) \\ \hat{S}_{ey}(k) \\ \hat{\alpha}_{ey}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{ex}(k) \\ \omega_{ey}(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0019] 式(4)为所述钻进轨迹延伸模型线性离散化状态空间方程,其中 $\hat{S}_{ex}(k)$ 与 $\hat{S}_{ey}(k)$ 分别为k时刻钻进系统的钻具相对于所述参考轨迹在X轴与Y轴的实际横向位移的滤波器估计

值, $\hat{\alpha}_{ex}(k)$ 与 $\hat{\alpha}_{ey}(k)$ 分别为k时刻实际钻进轨迹相对于参考轨迹的井斜角在XOZ与YOZ平面上的投影的滤波器估计值, $\omega_{ex}(k)$ 与 $\omega_{ey}(k)$ 为两个平面上相对于参考导向率的控制增量, T为采样周期。

[0020] 进一步地,步骤S102中,引入一个软约束条件和可变优化权重矩阵,构建改进型模型预测控制器,具体为:所述改进型模型预测控制器的预测方程为:

$$[0021] \quad Y(k) = \Xi_k X(k|k) + \Theta_k W(k) \quad (5)$$

[0022] 式(5)中, Ξ_k 和 Θ_k 均为预测方程的参数矩阵;式(5)中各矩阵如式(6)所示:

$$[0023] \quad Y(k) = \begin{bmatrix} S_{ex}(k+1|k) \\ a_{ex}(k+1|k) \\ S_{ey}(k+1|k) \\ a_{ey}(k+1|k) \\ \dots \\ S_{ex}(k+p|k) \\ a_{ex}(k+p|k) \\ S_{ey}(k+p|k) \\ a_{ey}(k+p|k) \end{bmatrix} W(k) = \begin{bmatrix} \omega_{ex}(k|k) \\ \omega_{ey}(k|k) \\ \omega_{ex}(k+1|k) \\ \omega_{ey}(k+1|k) \\ \dots \\ \omega_{ex}(k+c|k) \\ \omega_{ey}(k+c|k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$x(k|k) = [S_{ex}(k|k) \quad a_{ex}(k|k) \quad S_{ey}(k|k) \quad a_{ey}(k|k)]^T$$

[0024] 式(6)中,p为预设的预测步长,c为预设的控制步长; $S_{ex}(k+1|k)$ 与 $S_{ey}(k+1|k)$ 分别为k时刻预测到的k+1时刻钻进系统的钻具相对于所述参考轨迹在X轴与Y轴的实际横向位移偏差; $\alpha_{ex}(k+1|k)$ 与 $\alpha_{ey}(k+1|k)$ 分别为k时刻预测到的k+1时刻实际钻进轨迹相对于参考轨迹的井斜角在XOZ与YOZ平面上投影值的偏差;

[0025] 引入一个软约束条件和可变优化权重矩阵,得到改进型模型预测控制器的优化约束条件,具体如式(7)所示:

$$[0026] \quad \begin{cases} \min J(Y(k), U(k)) = Y(k)^T Q Y(k) + W(k)^T R W(k) \\ \left\{ \begin{array}{l} (\alpha_{rx}(m) + \hat{\alpha}_{ex}(m))^2 + (\alpha_{ry}(m) + \hat{\alpha}_{ey}(m))^2 \leq \alpha_{\max}^2 \quad (\text{if } \|\hat{\alpha}(k)\| \leq \alpha_{\max}) \\ (\alpha_{rx}(m) + \hat{\alpha}_{ex}(m))^2 + (\alpha_{ry}(m) + \hat{\alpha}_{ey}(m))^2 \leq (\hat{\alpha}(k))^2 \quad (\text{if } \|\hat{\alpha}(k)\| > \alpha_{\max}) \\ (\omega_{rx}(m) + \omega_{ex}(m))^2 + (\omega_{ry}(m) + \omega_{ey}(m))^2 \leq r^2 \\ m = k+1, \dots, k+p \end{array} \right. \end{cases} \quad (7)$$

[0027] 式(7)中,Q与R分别为预测方程状态量Y(k)与控制量U(k)的权重矩阵;

[0028] Q的表达式如式(8):

$$[0029] \quad Q = [q_{sx}, \frac{b_Q}{1+e^{-a_Q(\hat{\alpha}-c_Q)}} + d_Q, q_{sy}, \frac{b_Q}{1+e^{-a_Q(\hat{\alpha}-c_Q)}} + d_Q] \quad (8)$$

[0030] 其中 q_{sx} 为X方向分量 S_x 的权重, q_{sy} 为Y方向分量 S_y 的权重, a_Q, b_Q, c_Q 和 d_Q 为角度权重因子; $\alpha_{rx}(m)$ 与 $\alpha_{ry}(m)$ 为m时刻参考轨迹的井斜角在XOZ与YOZ平面上的投影值; $\hat{\alpha}_{ex}(m)$ 与 $\hat{\alpha}_{ey}(m)$ 为m时刻实际钻进轨迹相对于参考轨迹的井斜角在XOZ与YOZ平面上投影值的偏差;

$\omega_{rx}(m)$ 和 $\omega_{ry}(m)$ 为 m 时刻参考控制量; $\omega_{ex}(m)$ 与 $\omega_{ey}(m)$ 为 m 时刻实际控制量与参考控制量的偏差; $\hat{\alpha}(k)$ 为 k 时刻井斜角的估计值; α_{\max} 为预设的井斜角最大软约束。

[0031] 进一步地,步骤S103中,所述粒子滤波器具体为基本粒子滤波器。

[0032] 进一步地,步骤S104中,所述反馈输入信号,具体为:实际钻进轨迹的井斜角在XOZ与YOZ平面上的投影值的估计值 $\hat{\alpha}_x$ 、 $\hat{\alpha}_y$ 、实际钻进轨迹的水平位移在X方向和Y方向的分量的估计值 \hat{S}_x 、 \hat{S}_y 。

[0033] 步骤S104中,将反馈输入信号输入至所述改进型模型预测控制器后,输出信号为磁工具面向角 $\tilde{\theta}_{yf}$ 和导向率 ω_{SR} 的控制增量,最终的实际控制量具体如式 (9):

$$[0034] \quad \begin{cases} \tilde{\theta}_{yf} = \arctan\left(\frac{\omega_{rx} + \omega_{ex}}{\omega_{ry} + \omega_{ey}}\right) \\ \omega_{SR} = \frac{\sqrt{(\omega_{rx} + \omega_{ex})^2 + (\omega_{ry} + \omega_{ey})^2}}{r} \end{cases} \quad (9)。$$

[0035] 本发明提供的有益效果是:在纠偏控制中建立了一个粒子滤波器,能够有效降低测量噪声对垂直钻进纠偏控制带来的影响,提高控制精度;在模型预测控制器中引入软约束和可变优化权重,增加模型预测控制器的环境适应性。

附图说明

[0036] 图1是本发明一种基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法的结构示意图;

[0037] 图2是本发明基于导向钻具的垂直钻进系统结构图

[0038] 图3是本发明轨迹延伸示意图

[0039] 图4是本发明实钻现场的造斜率 r 示意图;

[0040] 图5是本发明粒子滤波器单次滤波效果图;

[0041] 图6是本发明可变优化权重示意图;

[0042] 图7是本发明纠偏控制仿真效果图;

[0043] 图8是本发明纠偏控制仿真控制量效果图。

具体实施方式

[0044] 为使本发明的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合附图对本发明实施方式作进一步地描述。

[0045] 请参考图1,本发明的实施例提供了一种基于粒子滤波和模型预测控制的垂直钻进纠偏控制方法,包括以下:

[0046] S101:建立三维地层坐标系,Z轴为铅垂线方向,X轴指向正东方向,Y轴指向正北方向,根据垂直钻进过程纠偏工艺和噪声分布,建立垂直钻进过程中的钻进轨迹延伸模型;

[0047] S102:将所述钻进轨迹延伸模型线性化和离散化,并基于垂直钻进过程中噪声分布特性,引入一个软约束条件和可变优化权重矩阵,构建改进型模型预测控制器,并给定钻

进参考轨迹,同时将参考轨迹输入至所述改进型模型预测控制器;开始垂直钻进过程,测量并得到含有噪声的实际钻进轨迹参数;所述参考轨迹,即钻进过程中的参考井斜角、参考方位角和参考水平位移;

[0048] S103:引入粒子滤波器,对所述含有噪声的实际钻进轨迹参数进行滤波,得到降噪后的实际钻进轨迹参数;

[0049] S104:结合最小曲率法和钻进轨迹延伸模型,将降噪后的实际钻进轨迹参数转换为所述改进型模型预测控制器的反馈输入信号,并将反馈输入信号输入至所述改进型模型预测控制器,形成垂直钻进闭环控制。

[0050] 为方便对以下公式中的符号解释说明,本发明统一如下定义:

[0051] 变量中,上标带尖括号均为本发明粒子滤波器输出的估计值;

[0052] 变量中上标不带尖括号的均为实际值;

[0053] 变量中,带有r下标的均为给定参考轨迹的参考值;

[0054] 变量中,带有e下标的均为实际值相对于参考量的偏差值;

[0055] 步骤S101,具体为:实际地质钻进中采用的垂直钻进系统构成如图2所示,其主要包含螺杆导向钻具、司钻房、钻杆、钻头、测斜仪与转盘。整个垂直钻进纠偏控制流程为测斜仪测量轨迹参数、计算下一步控制指令、调节转盘与井下螺杆钻具的旋转状态,从而进行定向纠偏。值得注意的是,当转盘与螺杆钻具同时旋转时,系统处于复合钻进状态,此时系统不造斜;仅停止转盘旋转,系统处于定向造斜状态,此时系统提供一定造斜率。通过调节两种状态的工作时间比例,系统可提供不同造斜率。

[0056] 依照上述分析,从钻具运动学角度入手给出轨迹延伸模型作为控制对象模型。建立三维地层坐标系,Z轴为铅垂线方向,向下为正方向,X轴指向正东方向,Y轴指向正北方向。结合图3,轨迹延伸模型如式(1)、(2)和(3)所示:

$$[0057] \begin{cases} \tan \alpha \sin \beta = \tan \alpha_x \\ \tan \alpha \cos \beta = \tan \alpha_y \\ \omega = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2} \end{cases} \quad (1)$$

$$[0058] \begin{cases} \dot{S}_x = \dot{S} \tan \alpha_x \\ \dot{S}_y = \dot{S} \tan \alpha_y \end{cases} \quad (2)$$

$$[0059] \begin{cases} \dot{\alpha}_x = \omega_x + \mu_x = r\omega_{SR} \sin \tilde{\theta}_f + \mu_x \\ \dot{\alpha}_y = \omega_y + \mu_y = r\omega_{SR} \cos \tilde{\theta}_f + \mu_y \end{cases} \quad (3)$$

[0060] 纠偏控制的总体目标为同时调节井斜角 α_x, α_y 与水平位移 S_x, S_y ,使钻成轨迹回归并维持在铅垂线上,即上述状态量为零。系统输入为参考钻进轨迹,在垂直钻进中即为铅垂直线,系统可调节参数为导向率 ω_{SR} 与磁工具面角 $\tilde{\theta}_f$ 。 $\tilde{\theta}_f$ 的大小决定钻进的方向, ω_{SR} 指一个控制周期内系统处于定向造斜状态占钻进时间的比例。

[0061] 由于井内环境恶劣,测量不可避免的具有一定噪声。垂直钻进过程中需保持较低井斜角,因此纠偏控制的精度往往对测量噪声十分敏感。测斜仪主要使用加速度和磁通门传感器进行轨迹测量,与常规传感器一样,其测量噪声主要来源于电子热噪声,噪声分布一

般服从正态分布,随着井深的增加,井斜角的最大测量噪声甚至可能达到 1.5° 。对于过程噪声,如图4所示,基于实际钻进过程数据,过程噪声使得系统最大造斜率 r 在 $1.4^\circ \sim 9.2^\circ/30\text{m}$ 之间浮动,其近似服从一个在尺度和幅值上调整了的伽马 $\Gamma(3,2)$ 分布。

[0062] 由于地质钻进测量限制,工程中常采用定点测量工艺,即钻进一定距离后,停钻测量轨迹参数,钻进距离一般为一根钻杆的长度。同时在垂直钻进过程中,为保证轨迹质量,需保持钻进井斜角小于 α_{\max} 。一旦超过 α_{\max} ,钻进系统应优先降低井斜角,以保证钻进轨迹的质量。此外,导向钻具造斜能力 r 有限。

[0063] 针对钻进过程中非高斯非线性过程的测量噪声问题,本发明为此设计了粒子滤波器。粒子滤波器基于蒙特卡洛采样定理,能够较好的处理非高斯非线性条件下的滤波问题。

[0064] 步骤S103具体为:使用较为广泛的粒子滤波器主要包括基本粒子滤波器、基于优化算法的粒子滤波器、与其他滤波器相结合的粒子滤波器。基本粒子滤波器速度快且容易实现,它基于先验概率分布于测量值,综合估计系统实际状态,其精度取决于先验知识或测量值精度。基于粒子优化算法的粒子滤波主要基于测量值实时调节粒子分布,以期望粒子能够接近后延分布区,其精度取决于测量精度。与其他滤波器相结合的粒子滤波器采用两种滤波算法相结合的方式,通过其他滤波器改变粒子分布,以期望粒子能够接近后延分布区,其精度取决于滤波器精度。

[0065] 然而由于垂直钻进过程井斜角较小,而测量噪声可能高达 1.5° ,因此对于垂直钻进过程的滤波问题,相对于测量值,人工经验更显重要。这使得基于先验知识的基本粒子滤波器更具有优势。因此本发明采用基本粒子滤波算法,设计垂直钻进过程粒子滤波器,其算法伪代码如下表1所示。

[0066] 表1垂直钻进过程粒子滤波器

垂直钻进过程粒子滤波器	
	输入: 测量参数 $\bar{\alpha}, \bar{\beta}$
	输出: 状态估计值 $\hat{\alpha}, \hat{\beta}$
	1: (a) 初始化
[0067]	2: 通过式(3)将测量值转化为模型中用的变量 $(\bar{\alpha}_0, \bar{\beta}_0) \rightarrow (\bar{\alpha}_{x,0}, \bar{\alpha}_{y,0})$
	3: 根据实际工程数据设定测量与过程噪声的先验概率分布 $a_{pex}\mu_x + b_{pex} \sim \Gamma(3,2), a_{pey}\mu_y + b_{pey} \sim \Gamma(3,2)$ $\alpha_x \sim N(0, \sigma_{vx}), \alpha_y \sim N(0, \sigma_{vy})$

4: 从过程噪声先验概率分布中初始化粒子集

$$\left(\hat{\alpha}_{x,0}^i, \frac{1}{N} \right), i=1, 2, \dots, N \sim p(\hat{\alpha}_{x,0})$$

$$\left(\hat{\alpha}_{y,0}^i, \frac{1}{N} \right), i=1, 2, \dots, N \sim p(\hat{\alpha}_{y,0})$$

5: for $k=1 \rightarrow k_{\max}$ do

6: **(b) 重要性采样**

7: 从过程方程(5) (6) 计算各粒子的单步预测值

$$\left\{ \left(\tilde{\alpha}_{x,k}^i, \frac{1}{N} \right), i=1, 2, \dots, N \right\} \sim q(\tilde{\alpha}_{x,k}^i | \hat{\alpha}_{x,k-1}^i)$$

$$\left\{ \left(\tilde{\alpha}_{y,k}^i, \frac{1}{N} \right), i=1, 2, \dots, N \right\} \sim q(\tilde{\alpha}_{y,k}^i | \hat{\alpha}_{y,k-1}^i)$$

8: **(c) 更新权值**

9: 通过式(3)将测量值转化为模型中用的变量

10: $(\bar{\alpha}_k, \bar{\beta}_k) \rightarrow (\bar{\alpha}_{x,k}, \bar{\alpha}_{y,k})$

11: $w_{x,k}^i = w_{x,k-1}^i p(\bar{\alpha}_{x,k} | \tilde{\alpha}_{x,k}^i)$

12: $w_{y,k}^i = w_{y,k-1}^i p(\bar{\alpha}_{y,k} | \tilde{\alpha}_{y,k}^i)$

13: $\tilde{w}_{x,k}^i = \frac{w_{x,k}^i}{\sum w_{x,k}^i}$

14: $\tilde{w}_{y,k}^i = \frac{w_{y,k}^i}{\sum w_{y,k}^i}$

15: **(d) 重采样并计算估计值**

16: $\hat{\alpha}_{x,k} = \sum \tilde{\alpha}_{x,k}^i \tilde{w}_{x,k}^i$

17: $\hat{\alpha}_{y,k} = \sum \tilde{\alpha}_{y,k}^i \tilde{w}_{y,k}^i$

18: 通过式(3)将变量转化为估计测量值

19: $(\hat{\alpha}_{x,k}, \hat{\alpha}_{y,k}) \rightarrow (\hat{\alpha}_k, \hat{\beta}_k)$

27: end for

[0069] 为验证粒子滤波器的有效性,基于垂直钻进轨迹延伸模型设计数值仿真。设定测量噪声服从正态分布 $v_{a,xk}, v_{a,yk} \sim N(0, 0.49)$,即最大测量噪声为 1.5° 。过程噪声服从伽马分布 $(10*\mu_{x,k}+6) \sim \Gamma(3, 2)$, $(10*\mu_{y,k}+6) \sim \Gamma(3, 2)$,即其最大误差为 $4^\circ/30m$ 。将粒子滤波器(PF)与拓展卡尔曼滤波器(EKF)、基于粒子群优化的粒子滤波器(PSOPF)、拓展卡尔曼粒子滤波器(EKPF)进行比较,单次滤波结果如图5所示,同时进行100次蒙特卡洛实验,其结果如表2所示:

[0070] 表2 100次蒙特卡洛滤波结果

滤波算法	α_x		α_y	
	MAE	RSME	MAE	RSME
[0071] PF	0.27373	0.34534	0.28816	0.36065
EKF	0.74752	0.91005	1.0081	1.2032
PSOPF	0.34833	0.42811	0.35194	0.43301
EKFPF	0.32082	0.39788	0.35448	0.43345

[0072] 从单次滤波结果中可看出,粒子滤波器、基于粒子群优化的粒子滤波器、拓展卡尔曼粒子滤波器的误差均远小于测量噪声,而拓展卡尔曼滤波器由于过程噪声为伽马分布,导致滤波器发散。从表一可以看出,基于粒子群优化的粒子滤波器、拓展卡尔曼粒子滤波器都丢失了先验知识,采用误差较大的测量值调节粒子分布,导致滤波误差增加。基本粒子滤波表现良好,且能够通过钻进中其他先验知识,如工程录井数据和邻井数据等,进一步提高滤波精度。

[0073] 为了使控制器具有更高的鲁棒性和显示处理控制限制的能力,纠偏控制选择模型预测控制器。

[0074] 步骤S102具体为:首先需设计模型预测控制器的预测方程。基于步骤1中建立的垂直钻进轨迹延伸模型,需对该模型进行线性化与离散化,以简化控制器设计难度。将井斜角 α_x 与 α_y 与钻具在X轴与Y轴的位移 S_x 与 S_y 作为状态量,导向率 ω_x 与 ω_y 为控制量(导向率 ω_x 与 ω_y 可由导向率 ω_{SR} 与磁工具面向角 $\tilde{\theta}_y$ 计算获得,如(1)所示)。为保障控制精度,本发明将滤波器输出 $\hat{S}_x, \hat{S}_y, \hat{\alpha}_x, \hat{\alpha}_y$ 作为模型预测控制器的反馈信号,同时考虑垂直钻进过程井斜角较小的客观因素,可认为 $\tan \hat{\alpha}_x \approx \hat{\alpha}_x$ 且 $\tan \hat{\alpha}_y \approx \hat{\alpha}_y$,则可得到垂直钻进过程轨迹延伸线性模型:

$$[0075] \begin{bmatrix} \dot{\hat{S}}_x \\ \dot{\hat{\alpha}}_x \\ \dot{\hat{S}}_y \\ \dot{\hat{\alpha}}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \dot{S} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dot{S} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{S}_x \\ \hat{\alpha}_x \\ \hat{S}_y \\ \hat{\alpha}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0076] 对于由于工程中随钻测量系统并非动态测量轨迹参数,而是每钻一定距离停钻测量一次,一般为一根钻杆的长度,因此该模型并不能直接用于控制器设计,对模型进行离散化,并利用差商代替微商,整理后,线性离散状态空间方程如下所示:

$$[0077] \begin{bmatrix} \hat{S}_{ex}(k+1) \\ \hat{\alpha}_{ex}(k+1) \\ \hat{S}_{ey}(k+1) \\ \hat{\alpha}_{ey}(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{S}T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dot{S}T \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{S}_{ex}(k) \\ \hat{\alpha}_{ex}(k) \\ \hat{S}_{ey}(k) \\ \hat{\alpha}_{ey}(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{ex}(k) \\ \omega_{ey}(k) \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0078] 其中 $\hat{S}_{ex}(k)$ 与 $\hat{S}_{ey}(k)$ 分别为钻具相对于参考轨迹的在X轴与Y轴的横向位移, $\hat{\alpha}_{ex}(k)$ 与 $\hat{\alpha}_{ey}(k)$ 分别为实钻轨迹相对于参考轨迹的井斜角在XOZ与YOZ平面上的投影, v 为钻速, $\omega_{ex}(k)$ 与 $\omega_{ey}(k)$ 为两个平面上相对于参考导向率的控制增量。值得一提的是,参考轨迹上的参

考点与当前钻具的垂直深度一致。

[0079] 基于上述离散状态空间方程,设 p 为预测步长, c 为控制步长,的模型预测控制器预测方程可写为:

$$[0080] \quad Y(k) = \Xi_k x(k|k) + \Theta_k W(k) \quad (6)$$

[0081] 其中各矩阵意义为:

$$[0082] \quad Y(k) = \begin{bmatrix} S_{ex}(k+1|k) \\ a_{ex}(k+1|k) \\ S_{ey}(k+1|k) \\ a_{ey}(k+1|k) \\ \dots \\ S_{ex}(k+p|k) \\ a_{ex}(k+p|k) \\ S_{ey}(k+p|k) \\ a_{ey}(k+p|k) \end{bmatrix} W(k) = \begin{bmatrix} \omega_{ex}(k|k) \\ \omega_{ey}(k|k) \\ \omega_{ex}(k+1|k) \\ \omega_{ey}(k+1|k) \\ \dots \\ \omega_{ex}(k+c|k) \\ \omega_{ey}(k+c|k) \end{bmatrix}$$

$$[0083] \quad x(k|k) = [S_{ex}(k|k) \ a_{ex}(k|k) \ S_{ey}(k|k) \ a_{ey}(k|k)]^T$$

[0084] 基于步骤1的约束分析,在垂直钻进过程中,为保证钻进轨迹质量,一般需尽量保持井斜角小于 α_{max} ,一旦井斜超过 α_{max} ,钻进系统应优先降低井斜角,以保证钻进轨迹的质量。此外,导向钻具造斜能力 r 有限。因此结合约束条件,针对纠偏控制系统,我们选取如下优化问题:

$$[0085] \quad \begin{aligned} \min J(Y(k), U(k)) &= Y(k)^T Q Y(k) + W(k)^T R W(k) \\ \left\{ \begin{aligned} \|\hat{\alpha}(k+n)\| &\leq \alpha_{max} \\ \|r\omega_{SR}(k+n)\| &\leq r \\ n &= 1, \dots, p \end{aligned} \right. \end{aligned} \quad (7)$$

[0086] 上述方程中, Q 与 R 分别为状态与控制量的权值矩阵,较大的 Q 值能保证跟踪误差更小,但有可能引起震荡,较大的 R 值能够保证控制量变化更加平缓。在轨迹纠偏的过程中,井斜角一般会接近 α_{max} ,以求更快速完成纠偏工作,然而。收到测量噪声影响,倾斜角不免波动,极端情况可能会使井斜角大大超出 α_{max} ,当井斜角 $\hat{\alpha} > \alpha_{max} + \omega_{\alpha_{max}}$ 时($\omega_{\alpha_{max}}$ 为执行器一周期能提供的最大造斜率),上述优化问题没有可行解,从而导致模型预测控制器计算错误。为解决这一问题,本发明引入一个软约束和可变优化权重,其中软约束保证模型预测控制器总有可行解,同时结合基于sigmoid函数的可变优化权重,在井斜角超出 α_{max} 时使系统优先降低井斜,以保证钻进轨迹质量。可变优化权重如下式和图6所示:

$$[0087] \quad f(x) = \frac{b_Q}{1 + e^{-a_Q(\hat{\alpha} - c_Q)}} + d_Q \quad (8)$$

[0088] 结合软约束和可变优化权重,整理优化问题如(9)式所示:

$$\begin{aligned}
 & \min J(Y(k), U(k)) = Y(k)^T Q Y(k) + W(k)^T R W(k) \\
 [0089] \quad & \begin{cases} (\alpha_{rx}(m) + \hat{\alpha}_{ex}(m))^2 + (\alpha_{ry}(m) + \hat{\alpha}_{ey}(m))^2 \leq \alpha_{\max}^2 & (\text{if } \|\hat{\alpha}(k)\| \leq \alpha_{\max}) \\ (\alpha_{rx}(m) + \hat{\alpha}_{ex}(m))^2 + (\alpha_{ry}(m) + \hat{\alpha}_{ey}(m))^2 \leq (\hat{\alpha}(k))^2 & (\text{if } \|\hat{\alpha}(k)\| > \alpha_{\max}) \\ (\omega_{rx}(m) + \omega_{ex}(m))^2 + (\omega_{ry}(m) + \omega_{ey}(m))^2 \leq r^2 \\ m = k + 1, \dots, k + p \end{cases} \quad (9)
 \end{aligned}$$

[0090] 其中Q为 $[q_{sx}, \frac{b_Q}{1+e^{-a_Q(\hat{\alpha}-c_Q)}} + d_Q, q_{sy}, \frac{b_Q}{1+e^{-a_Q(\hat{\alpha}-c_Q)}} + d_Q]$ 。

[0091] 步骤S104具体为：由于控制器优化的控制量输出是相对于参考控制量的控制增量，因此实际控制量还需在控制增量的基础上增加参考控制量；同时依据模型预测控制规律，实际控制增量应取优化计算后U(k)序列的第一个值u(k)，最终可得实际控制量为：

$$[0092] \quad \begin{cases} \tilde{\theta}_f = \arctan\left(\frac{\omega_{rx} + \omega_{ex}}{\omega_{ry} + \omega_{ey}}\right) \\ \omega_{SR} = \frac{\sqrt{(\omega_{rx} + \omega_{ex})^2 + (\omega_{ry} + \omega_{ey})^2}}{r} \end{cases} \quad (10)$$

[0093] 最后，我们设计数值仿真对纠偏控制方法进行验证。依据某直井现场数据，在600m处，x方向偏移为8.82m，y方向偏移为1.51m，井斜为 1.5° ，方位为 35.9° 。为了更清晰的观测本发明方法中软约束与可变的优化权重的有效性，适当改变初始井斜角为 5.83° ，方位角为 56.6 。依照前面过程分析，假设测量噪声服从高斯 $v_k \sim N(0, 0.49)$ ，其意味着最大测量噪声在 1.4° 左右，过程噪声服从伽马分布 $(12*\mu_k + 6) \sim \Gamma(3, 2)$ ，其意味着最大过程噪声在 $3.4^\circ/30m$ 左右。模型预测参数如表3所示，仿真结果如图7和图8所示。

[0094] 表3仿真参数

参数	数值
最大工具造斜率 r	$6^\circ / 30$ 米
井斜角限制 α_{\max}	小于 3°
[0095] 预测步长 p , 控制步长 c	5
R	[50000, 50000]
Q	$[0.1, \frac{1000}{1+e^{-5(\hat{\alpha}-3)}} + 5, 0.1, \frac{1000}{1+e^{-5(\hat{\alpha}-3)}} + 5]$

[0096] 将本发明提出的控制方法分别与基本模型预测控制方法和仅带有粒子滤波器的模型预测控制方法相比较。对比基本模型预测控制方法，基本模型预测控制方法虽然在一定程度上改善了轨迹的波动趋势，但在有较大测量噪声的情况下，也难以稳定井斜角，使得最终轨迹仍存在较大的水平位置偏移。对比仅带有粒子滤波器的模型预测控制方法，仅带有粒子滤波器的模型预测控制方法分别在600m和643m处出现控制计算错误，所得导向率超过100%，在垂直钻进中没有实际意义。同时从720m到820m之间的井斜角值可看出，由于缺少可变优化权重，仅带有粒子滤波器的模型预测控制方法中的井斜角更容易超出 α_{\max} ，因此其钻进轨迹质量相较本发明的方法要更低。

[0097] 将本发明提出的控制方法分别与基本模型预测控制方法和仅带有粒子滤波器的模型预测控制方法相比较。对比基本模型预测控制方法,基本模型预测控制方法虽然在一定程度上改善了轨迹的波动趋势,但在有较大测量噪声的情况下,也难以稳定井斜角,使得最终轨迹仍存在较大的水平位置偏移。对比仅带有粒子滤波器的模型预测控制方法,仅带有粒子滤波器的模型预测控制方法分别在600m和643m处出现控制计算错误,所得导向率超过100%,在垂直钻进中没有实际意义。同时从720m到820m之间的井斜角值可看出,由于缺少可变优化权重,仅带有粒子滤波器的模型预测控制方法中的井斜角更容易超出 α_{\max} ,因此其钻进轨迹质量相较本发明的方法要更低。

[0098] 本发明实施的有益效果是:在纠偏控制中建立了一个粒子滤波器,能够有效降低测量噪声对垂直钻进纠偏控制带来的影响,提高控制精度;在模型预测控制器中引入软约束和可变优化权重,增加模型预测控制器的环境适应性。

[0099] 在不冲突的情况下,本发明中上述实施例及实施例中的特征可以相互结合。

[0100] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

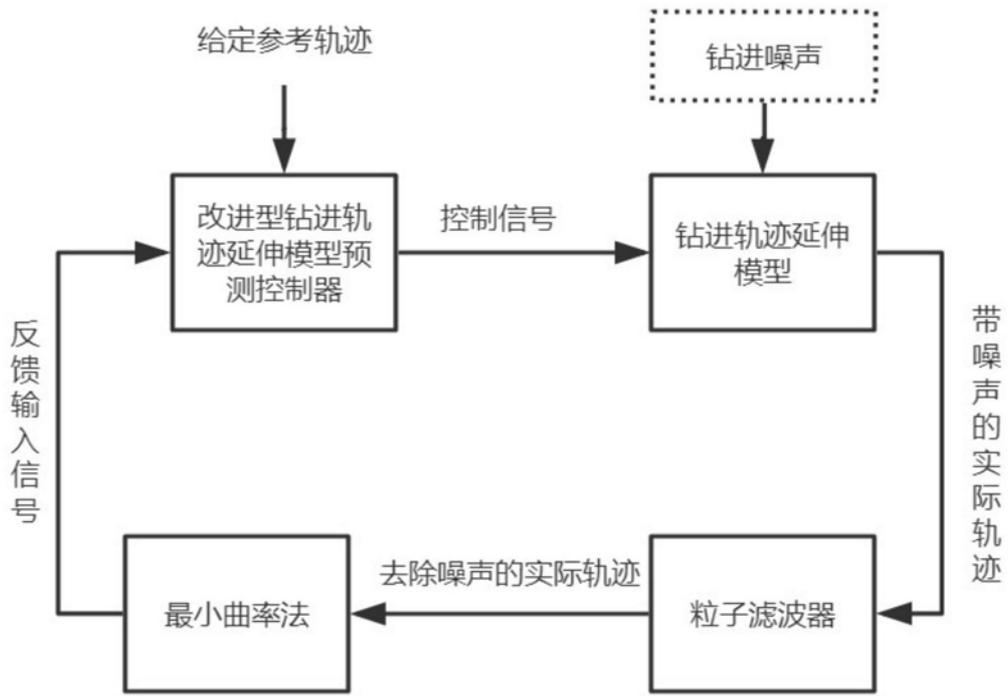


图1

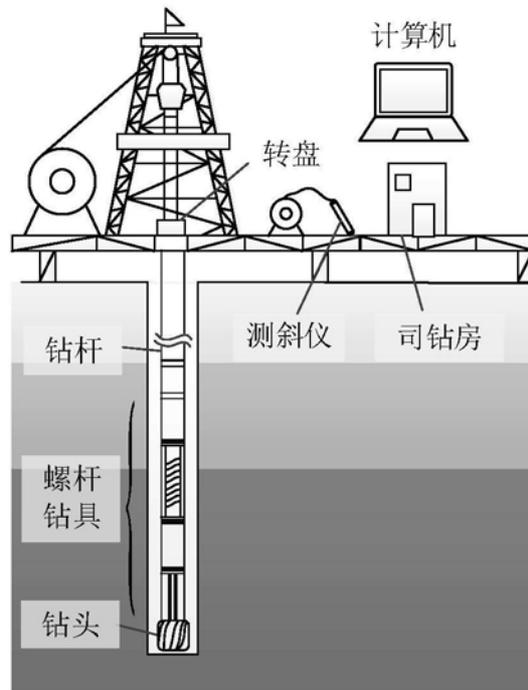


图2

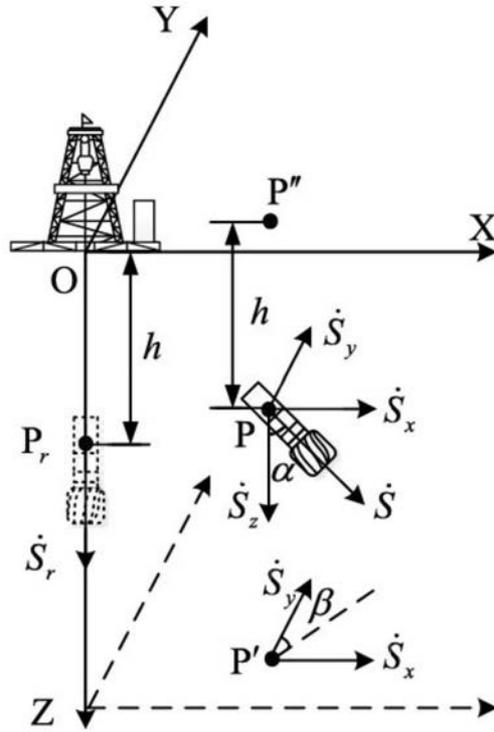


图3

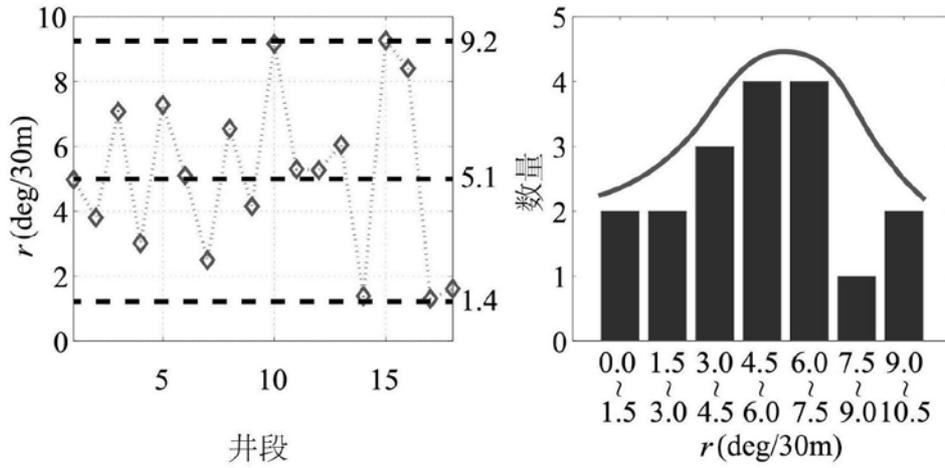


图4

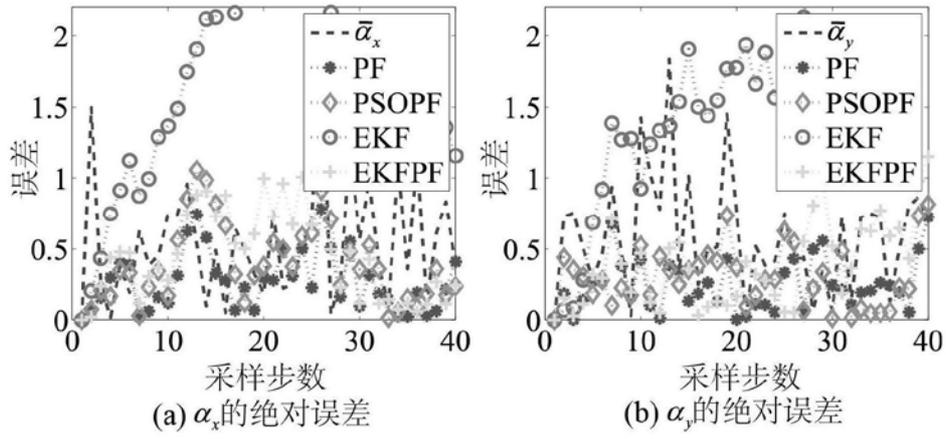


图5

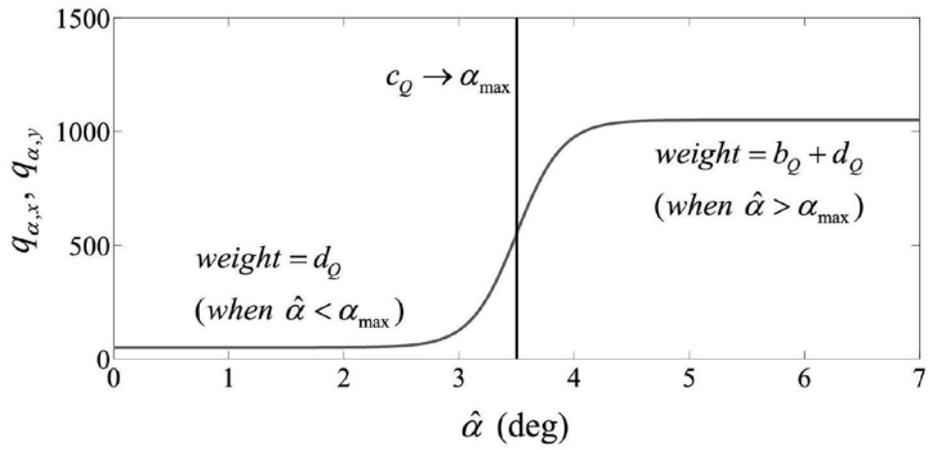


图6

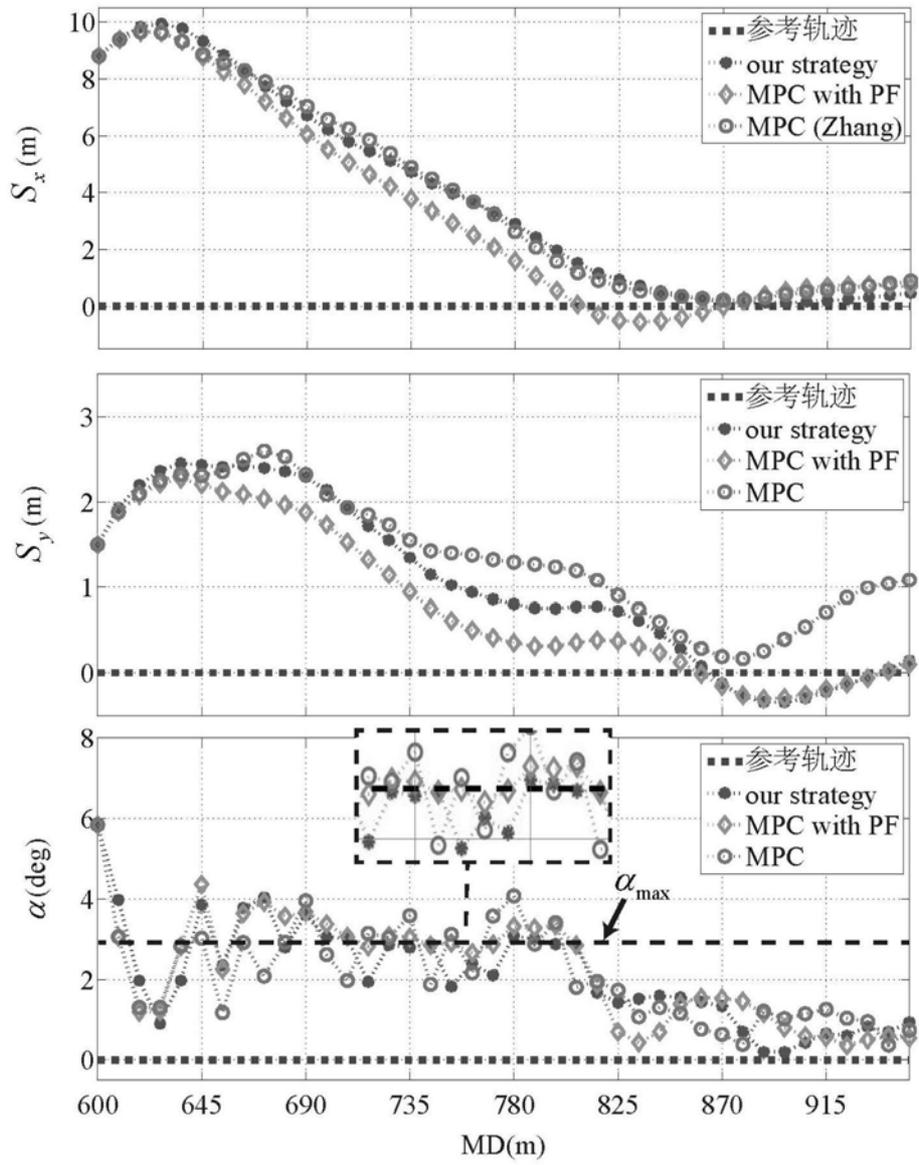


图7

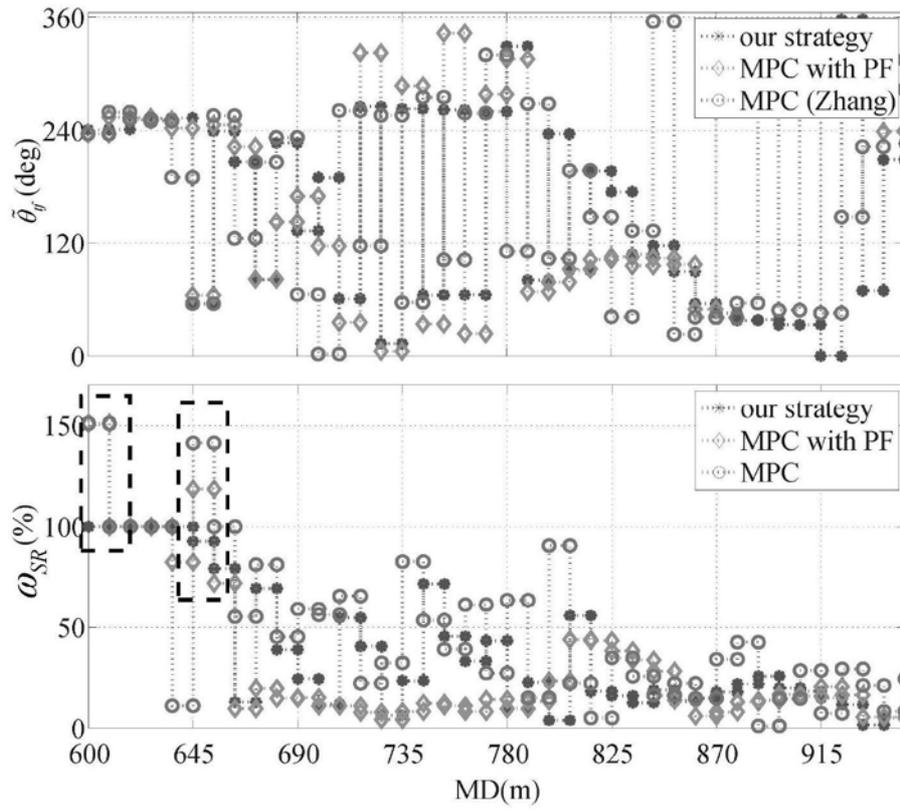


图8