

# 应用最优化方法处理测斜实验数据

余强<sup>1</sup>,潘福熙<sup>2</sup>,周静<sup>3</sup>,赵青峰<sup>4</sup>

(1. 中海油田服务股份有限公司, 北京 101149; 2. 中海石油有限公司天津分公司, 天津 300452;  
3. 西安石油大学, 西安 710061; 4. 中石油西部钻探测井公司, 克拉玛依 834000)

**摘要:**本文介绍了一种应用最优化方法确定测斜仪传感器(加速度传感器,磁通门)的安装误差校正系数的方法。在测斜仪器刻度阶段,需进行传感器线性刻度、轴不正交校正和不同轴校正,涉及到的刻度系数共有21个。可以将该问题转化为标准的非线性最小二乘问题,采用 Gauss-Newton 法获取迭代计算公式,通过编制计算机软件求取最优化刻度系数。从计算结果来看,这种方法确实有限地减小了测量误差。

**关键词:**测斜仪;校正;最优化

中图分类号:TE243

文献标志码:B

## Processing the experiment data of dipmeter by optimization method

YU Qiang<sup>1</sup>, PAN Fu-xi<sup>2</sup>, ZHOU Jing<sup>3</sup>, ZHAO Qing-feng<sup>4</sup>

(1. China Oilfield Service Ltd., Beijing 101149, China; 2. CNOOC Limited Tianjin, Tianjin 300452, China;  
3. Xi'an Petroleum University, Xi'an 710061, China; 4. Western Drilling of CNPC, Kelamayi 834000, China)

**Abstract:** In this paper a method to demarcate the calibration coefficient of the sensor of dipmeter by optimization is introduced. During the calibration, there are 21 calibration factors need to calibrate, involved sensor linear scale, non-orthogonal calibration and non-coaxial calibration. It can be transformed into a least squares problem. Gauss-Newton method can be used to acquire the optimization factors through computer software which programmed from iterative formula. According to calculation results, this method is limited to reduce the measurement error.

**Key words:** dipmeter; calibration; optimization

## 0 引言

目前大多数随钻测量仪(MWD)采用惯性导航原理测量

并眼轨迹,其测量原理如下<sup>[1]</sup>:大地空间存在着重力场和地磁场,在地球上的某一点,重力场方向垂直向下指向地心,而地

3)用FLASH烧写工具依次将Bootloader、内核zImage以及根盘文件系统(Jffs2文件系统烧写到FLASH里。然后就可以启动系统了,linux系统启动过程如图1所示。

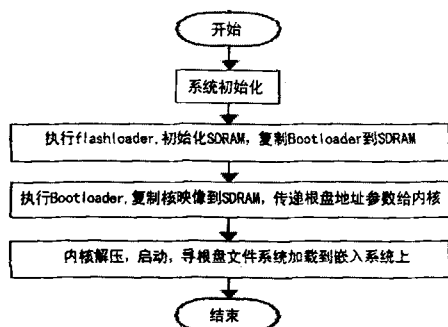


图1 linux系统启动过程

## 5 结论

在当今嵌入式开发领域,linux占有相当重要的地位,已经成功一直到众多的嵌入式开发应用平台。目前,大多移植的linux内核版本为2.6。本文简单介绍了将linux-2.6.30.4移植到S3C2440处理器平台上的主要步骤。□

## 参考文献

- [1] 于明,曾祥焯. ARM9 嵌入式系统设计与实例开发教程[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [2] 华清远见培训中心. 嵌入式Linux应用程序设计[M]. 北京:人民邮电出版社,2007.
- [3] 于明,范书瑞,曾祥焯. Arm9 嵌入式系统设计与开发教程[M]. 北京:电子工业出版社,2006.
- [4] 周立功,王祖麟. ARM 嵌入式系统基础教程(第2版)[M]. 北京:北京航空航天大学,2008.
- [5] 杜文军. 基于ARM的Linux分析与实现[J]. 辽宁石油大学学报,2009,29(2):56-59.
- [6] 刘峥嵘,张智超,许振山,等. 嵌入式Linux应用开发详解[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [7] 王学龙. 嵌入式Linux系统设计与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2001.

**作者简介:**雍泽(1988-),男,成都理工大学电路与系统专业硕士研究生;任家富(1963-),男,教授,硕士生导师,从事信息采集和处理、物探仪器、核仪器研究;朱海宽(1988-),男,成都理工大学通信与信息系统专业硕士研究生。

收稿日期:2012-04-20

磁场方向则与该点在地球上的位置有关,因此,以大地重力方向和磁场方向及与它们垂直的方向为基准建立大地坐标系,即可确定某物体在空间的姿态。如图所示,图1中F为地磁场正方向,I为地磁倾角;G为重力方向。飞机上的惯性导航系统就是采用该法来确定飞机在空间的姿态的,测斜仪也同样采用了该方法。为确定井的姿态,首先建立仪器坐标系和大地坐标系,如图2所示。

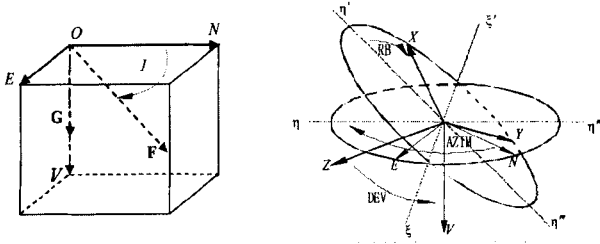


图1 大地坐标系 图2 大地坐标系[NEV]和仪器坐标系[XYZ]

当仪器正方向指向重力方向时,仪器坐标系与大地坐标系重合。对于仪器坐标系(X, Y, Z),若分别在OX, OY, OZ轴上固定加速度传感器和磁通门传感器,我们便可测得重力与地磁场在这三个轴上的分量G<sub>x</sub>, G<sub>y</sub>, G<sub>z</sub>和F<sub>x</sub>, F<sub>y</sub>, F<sub>z</sub>。当仪器坐标系的空间位置发生变化时,各分量值也随之变化。反之,一旦各分量的值被确定,则坐标系在空间的位置便确定了。这便是利用G和F各分量进行定位测量的基本原理。

要确定井的姿态,一般只要确定仪器坐标系相对于大地坐标系的三个角度即可,这三个角度分别为:DEV—井斜角;RB—高边工具面角;AZIM—井斜方位角。

计算以上三个角度,首先将大地坐标系[NEV]作三次旋转,使和仪器坐标系相重合,从中找出它们之间的关系。具体计算方法和公式在这里就不再赘述了。

### 1 测斜误差产生原因

根据现有经验,这种采用惯性导航原理的电子测斜仪器其主要测量误差来源于三个方面:结构安装误差、传感器测量误差和数据处理误差,其中结构安装产生的误差占到整体误差的70%以上<sup>[2]</sup>。

从理论上讲,三个加速度传感器和三个磁通门传感器各自的三个轴线必须两两正交,而且这两个坐标系的对应轴线必须相互重合。此外,这三根轴线还必须与仪器上的固定轴线重合。实际上,由于安装上的原因,即使精心调校,也不可避免的存在因轴不正交和轴与轴不重合而引起的偏差,这个偏差对最终的测量结果有着不可忽视的影响。通过研究发现,可以通过软件的方法将这个由于硬件安装带来的偏差降到最低。

#### 1.1 轴不正交校正<sup>[3]</sup>

设X, Y, Z为线性无关的三个向量,由这三个向量可构成一个空间坐标系,空间中的任何向量都可以表示成这三个向量的线性组合。通过变换X, Y, Z,可以建立空间中任意坐标系。理论上,在空间众多坐标系中存在一种单位正交坐标系,而且在空间任意坐标系和单位正交坐标系之间存在一定的对应关系。在安装误差不超过时,容易推得它们的对应关

系如式(1)

$$\begin{bmatrix} e'_1 \\ e'_2 \\ e'_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ Q_3 & 1 & 0 \\ Q_2 & Q_1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,e'<sub>1</sub>, e'<sub>2</sub>, e'<sub>3</sub>便是构成单位正交坐标系的三个相互垂直的向量,且有|e'<sub>1</sub>| = |e'<sub>2</sub>| = |e'<sub>3</sub>| = 1; e<sub>1</sub>, e<sub>2</sub>, e<sub>3</sub>分别为向量X, Y, Z的单位向量。

可见,在确定了Q<sub>1</sub>, Q<sub>2</sub>, Q<sub>3</sub>后即可将非正交坐标系[X Y Z]中测得的空间向量的三个分量转换到正交坐标系[e'<sub>1</sub>, e'<sub>2</sub>, e'<sub>3</sub>]中去。

#### 1.2 不同轴校正<sup>[3]</sup>

可以证明,空间中不同轴的两个正交坐标系可以通过一个坐标系[X Y Z]相对于另一个坐标系[NEV]作三次旋转从而使两者完全重合。

在安装误差很小的情况下,可以推出他们的对应关系如式(2):

$$\begin{bmatrix} N \\ E \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Q_4 & -Q_5 \\ Q_4 & 1 & Q_6 \\ Q_5 & -Q_6 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2)$$

由此可知,在确定了Q<sub>4</sub>, Q<sub>5</sub>, Q<sub>6</sub>后即可将[X Y Z]坐标系转变到[NEV]坐标系,从而实现坐标系的重合。

除了以上两项校正之外,还有传感器的输出线性度标定。从理论上讲,传感器的输出值应该是线性的。但在实际测试中,传感器随角度变化的输出并非严格线性,因此需要将其拟合为直线,即:Y = KX + B。

### 2 校正系数确定

由以上分析可知,由传感器输出值到可用于计算角度的坐标值,要经过三个环节的校正。

传感器输出线性度标定:在测斜仪中共使用了6个传感器,每个传感器有2个线性标定系数(K, B)。因此在传感器输出线性度标定环节要确定12个系数,即:

$$K_{Cz}, B_{Cz}, K_{Cy}, B_{Cy}, K_{Cx}, B_{Cx}, K_{Fz}, B_{Fz}, K_{Fy}, B_{Fy}, K_{Fx}, B_{Fx}, K_{Fy}, B_{Fy}, K_{Fz}, B_{Fz}$$

轴不正交校正:测斜仪中有三个加速度传感器和三个磁通门传感器,其正方向分别构成两个正交坐标系,都需要进行轴不正交校正,因此共有6个系数:

$$Q_{c1}, Q_{c2}, Q_{c3}, Q_{f1}, Q_{f2}, Q_{f3}$$

不同轴校正:可以以三个加速度传感器构成的正交系为参照系,让三个磁通门传感器构成的正交系经旋转后与参照系重合,因此有以下3个系数:

$$Q_{r4}, Q_{r5}, Q_{r6}$$

综上所述,共有21个系数需要确定。

### 3 数据处理方法

传统的寻求系数的方法是先测量出六个传感在各个不同角度(经过选择之后的具有一定代表性的角度)的输出值,然后对各误差环节单独进行处理,分别求出传感器线性标定系数和轴不正交与不同轴系数。这种方法可以求出在各个环节使误差最小的优化系数,例如,使传感器输出线性度最佳的线性标定系数。这种方法需要对六个传感器分别进行线性度最佳校正,然后再进行不正交与不同轴校正,要经过八次运算

才能得出全部校正系数。并且在线性度校正中产生的误差在下一步计算中将会被放大。同时,这样做并不能够保证使整合了所有系数之后计算出的角度值与实际角度之间的误差最小。

因此,我们可以设想,将所有的误差系数全部带入一个计算公式中,然后整体寻优。这样做简化了计算过程,而且得到的系数应该还是比较理想的结果。那么究竟应该如何整体寻优呢?

在测斜仪系统中我们直接处理的是传感器的输出值。可以这样考虑,将所有传感器输出值的方差和作为目标函数,取使该目标函数获得最小值的最优化系数如公式(3)。

$$F(x) = \sum_{i=1}^3 (G_i - g_i)^2 + \sum_{i=1}^3 (F_i - f_i)^2 \quad (3)$$

式中,  $G_i$  为经过误差校正后的加速度传感器输出值;  $F_i$  为经过误差校正后的磁通门传感器输出值;  $g_i$  为根据角度值计算出的加速度传感器理论输出值;  $f_i$  为根据角度值计算出的磁通门传感器理论输出值。将全部的 21 个系数设为未知数 ( $X_1 \cdots X_{21}$ ), 则  $G_i, F_i$  可以表示为  $x$  的函数。这样问题就转化为标准的非线性最小二乘问题了<sup>[4]</sup>, 如式(4):

$$\min_x F(x) = \sum_{i=1}^n [f_i(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{21})]^2 \quad (4)$$

Gauss-Newton 法是解决非线性最小二乘问题的最基本的方法。设  $J(x)$  是  $f(x)$  的 Jacobi 矩阵<sup>[5]</sup> 如式(5)

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_{21}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_{21}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

则  $f(x)$  的梯度为式(6):

$$g(x) = \sum_{i=1}^n f_i(x) \nabla f_i(x) = J(x)^T f(x) \quad (6)$$

$f(x)$  的 Hesse 矩阵为(7):

$$G(x) = \sum_{i=1}^n (\nabla f_i(x) \nabla f_i(x)^T + f_i(x) \nabla^2 f_i(x)) = J(x)^T J(x) + S(x) \quad (7)$$

因此,目标函数  $f(x)$  的二次模型为式(8)

$$\begin{aligned} m_k(x) &= f(x_k) + g(x_k)^T (x - x_k) + \frac{1}{2} (x - x_k)^T G(x_k) (x - x_k) \\ &= \frac{1}{2} f(x_k)^T f(x_k) + (J(x_k)^T f(x_k))^T (x - x_k) + \\ &\quad \frac{1}{2} (x - x_k)^T (J(x_k)^T f(x_k) + S(x_k)) (x - x_k) \end{aligned} \quad (8)$$

从而,可利用牛顿法解决该问题见式(9)

$$x_{k+1} = x_k - (J(x_k)^T J(x_k) + S(x_k))^{-1} J(x_k)^T f(x_k) \quad (9)$$

Gauss-Newton 法对牛顿法的改进之处在于在目标函数  $f(x)$  的二次模型中忽略二阶信息项  $S(x)$ 。这样,新的二次模型为式(10):

$$\begin{aligned} m_k(x) &= f(x_k) + g(x_k)^T (x - x_k) + \frac{1}{2} (x - x_k)^T G(x_k) (x - x_k) \\ &= \frac{1}{2} f(x_k)^T f(x_k) + (J(x_k)^T f(x_k))^T (x - x_k) + \\ &\quad \frac{1}{2} (x - x_k)^T (J(x_k)^T f(x_k)) (x - x_k) \end{aligned} \quad (10)$$

从而得到式(11):

$$x_{k+1} = x_k - (J(x)^T J(x))^{-1} J(x)^T f(x) \quad (11)$$

可利用该式设计叠代算法,编制计算程序求解最优化系数。

#### 4 数据处理结果

采用这种方法求解校正系数究竟能不能提高测量精度呢?我们可以对比分别用两种方法计算的角度,来检验整体寻优的效果。

采用整体寻优法后井斜角和工具面角的误差分布相对而言收敛了一些,说明了该方法在应用中产生了效果,图3为井斜角误差分布对比,图4为工具面角误差分布对比。由于实验条件的限制(无法屏蔽外界铁磁性物质的磁干扰),方位角的测量存在较大的误差,这里就不再分析了。

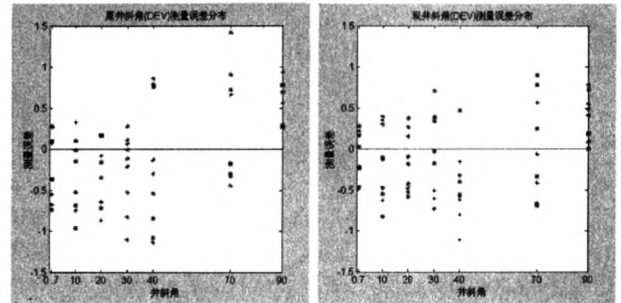


图3 井斜角误差分布对比

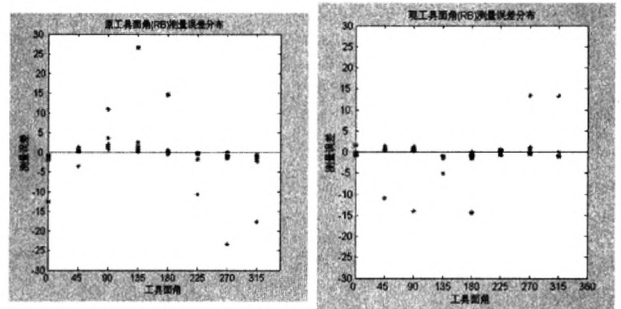


图4 工具面角误差分布对比

计算两组角度的标准差,  $\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2}$

	DEV	RB
$\sigma(x)_1$	0.7969	6.2378
$\sigma(x)_2$	0.4663	4.2779

#### 5 结论

采用整体寻优法大幅度的减小了计算量,一次性地得出了所有的校正系数。从计算结果来看,它确实有限度地提高了校正系数的准确性,使测量误差尽可能的减小了。

那么数据处理的方法还能不能进一步改进呢?答案当然是肯定的。实际上,在产生误差的三个环节中,数据处理的方式还可以更进一步的逼近实际情况。例如,轴不正交与不同轴校正中都涉及到一个三阶方阵,本文中沿用的是传统处理方法中简化了的系统矩阵(为了计算简便),在计算机大规模运算技术广泛应用的今天,完全可以将简化矩阵恢复为原始校正矩阵,把三阶方阵的九个元素<sup>[6]</sup>都设为未知的校正系数;还有传感器归一化处理<sup>[7]</sup>,在理想情况下传感器的输出应该

# 基于 S 函数在自抗扰控制器 Simulink 仿真中的应用

马永光, 冉宁, 赵朋

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 保定 071003)

**摘要:** 自抗扰控制技术是利用非线性理论而设计的新型控制器, 本文在研究自抗扰控制技术的基础上, 以 Matlab/Simulink 为平台, 应用 S 函数编写跟踪微分器、非线性状态误差反馈和扩张状态观测器并实现子系统的封装。通过对火电厂主汽温控制系统的仿真实例, 说明自抗扰技术具有较好的调节品质和抗干扰性。

**关键词:** 自抗扰控制; S-function; 子系统封装; 仿真

**中图分类号:** TP391.9; TP273

**文献标志码:** B

## Application of S-function in Simulink simulation of ADRC

MA Yong-guang, RAN Ning, ZHAO Peng

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** ADRC technology is using nonlinear theory and design of the new controller, based on the study of ADRC technology, on the basis of using Matlab/Simulink for platforms, application S function write tracking differentiator, nonlinear combination and extended state observer and implement subsystems encapsulation. Through the main steam temperature control system power simulation example, showing auto-disturbances-rejection technology has stronger robustness, quickness and has high practical value.

**Key words:** ADRC; S-function; subsystem package; simulation

### 0 引言

经典的 PID 控制器在现代过程控制系统中占有主导地位, 工业过程控制的 PID 控制原理是根据误差来生成消除误差的控制策略。但是 PID 有其局限性<sup>[1]</sup>:

1) 比例、微分、积分的线性组合容易引起快速性和超调性的矛盾;

2) 理想微分器的不可实现, 实际微分器往往用惯性超前环节或差分器代替, 放大了噪声信号;

3) 积分作用增加了不稳定因素, 可能引起积分饱和。

针对经典的线性 PID 控制器不能满足控制系统的要求, 韩京清研究员经过数十年的努力, 从传统 PID 原理出发, 利用

非线性机制开发了一些具有特殊功能的环节, 研制出新型控制器——自抗扰控制器<sup>[2]</sup>。它不依赖于被控对象的数学模型, 结构明晰、算法简单、响应速度快, 在未知强非线性和不确定扰动作用下都能够保证控制精度, 具有很好的应用前景。

### 1 自抗扰控制器

#### 1.1 自抗扰控制器的结构及原理

自抗扰控制器由三个部分组成:

1) 跟踪微分器(TD): 为系统输入安排过渡过程, 得到光滑的输入信号以及输入信号的微分信号;

2) 扩张状态观测器(ESO): 估计出实时作用量而给予补

偿。是线性的, 但实际上并非如此, 而且经过低通滤波、多路开关、A/D 转换之后非线性误差可有能成为误差的主要来源, 因此, 可以考虑抛开线性校正的思维定式, 对测量值作非线性校正, 如二次校正、三次校正等, 哪种模型效果好就采用哪一种。如果这样的话, 待定系数就会增加到 45 个, 甚至更多, 这就要求数据样本要足够大。

但是用软件处理的方法来提高测量精度并不是万能的, 只有当传感器的安装误差不超过  $\pm 1^\circ$  时才能起到应有的作用, 最根本的解决方法还是应该从仪器硬件入手, 从源头减小误差。□

#### 参考文献

- [1] 付鑫生, 周静, 等. 惯性导航原理在确定井的姿态中的应用[J]. 测井技术, 1992, (6): 451-456.
- [2] 乔红兵, 郭继坤. 钻井测斜仪的误差分析[J]. 煤矿机械, 2003, (8): 41-43.

- [3] 付鑫生, 周静. 提高带有惯性导航部件的测斜仪精度的方法[J]. 测井技术, 1993, (1): 71-77.
- [4] 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1989: 324-326.
- [5] 张智星, 孙春在, 水古英二. 神经-模糊和软计算[M]. 陕西: 西安交通大学出版社, 2000: 112-113.
- [6] 龚承亮, 龚永萍. 磁性测斜仪安装误差的补偿[J]. 惯导与仪表, 2000, (2): 10-13.
- [7] 李继华, 王俊, 陈忠强, 等. 连续测斜仪测量校正方法研究与应用[J]. 石油仪器, 2010, 24(2): 40-42.

**作者简介:** 余强(1977-), 男, 工程师, 从事石油测井仪器研发工作; 周静, 女, 教授, 从事石油井下测控技术; 赵青峰, 男, 工程师, 从事石油测井工程作业。

**收稿日期:** 2012-03-28