

套管井电磁探伤仪信号系统研究

套管井电磁探伤仪器主要用于检测套管的壁厚、腐蚀、穿孔和变形等损伤情况。基于瞬变电磁场理论和套损监测原理，用Matlab软件来提取电磁探伤仪的特征信号，分析套管不同典型缺陷类型。研究结果表明，电磁探伤信号与套管损伤程度和套管厚度有对应的因果关系，其突变部分对应着套管的损伤、接箍和射孔等重要信息。为了分析套管损伤情况，重点研究了研究信号突变点的峰值和倾斜度检测方法，为电磁探伤信号的特征提取和缺陷识别提供依据。

宋美华/西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室



宋美华/硕士研究生

在我国，石油作为重要的战略资源，其应用广泛存在于工业生产及民用的各个领域，是我国经济快速增长的强劲动力，国内对其需求量也在不断加大。因此，如何更有效地提高井下油采收率和油田的产能效益成为一项重要课题，这对我国石油工业领域今后的发展起着至关重要的影响。开展套损预防与治理技术的研究应用，弄清复杂地层套损机理，寻求相应的预防措施，及时检验出带病井的损伤套管，延长套管使用寿命，可以更好地控制和决策油井的整修和生产与停产周期，并且将更有利于地层介质的勘探和剩余油的二次开采，这对提高油气田整体开发的安全和效益具有巨大作用。套管是保证井筒完整性并保障正常生产的关键部件，是维持油井运行的生命线。随着油田套损井数逐年增多，套管损坏状况^[1]检查及预防已成为油田开发过程中的重点工作。使用套管井电磁探伤仪器来监测套管损伤情

况，依据相关试验建立套管电磁测井理论和检测方法，比较全面地了解套管并套管的损坏状况，为修井方案的制定和实施提供相关依据和必要的技术支持。

文中，套管井电磁探伤仪器采用的是一种非接触式的检测方法，基于瞬变电磁理论，可以准确地检测出油套管的损坏情况，并能为套管并套损的预防、大修、报废及套损机理分析等提供详实可靠的依据，能有效降低施工作业的繁琐程度，对井场节能降耗具有一定的经济意义。套管井电磁探伤仪器检测电磁探伤的信号突出部分对应套管的损伤，发现井下套管所出现的问题，着重分析研究信号峰值和倾斜率，提取电磁探伤特征信号，准确地检测出油气井井下套管的损坏状况、方位和种类，有助于分析套损机理，制定套损预防方案，有利于提高油气开采效率，在套损井井况监测和油气水井井况普查等方面具有广泛的应用前景。

瞬变电磁套损检测理论研究

套管井电磁探伤仪器以瞬变电磁法为理论基础，检测原理为法拉第电磁感应定律。检测系统由发射装置和接收装置组成，工作过程依次为发射、电磁感应和接收三部分。检测时将探头放置于套管中，给探头的发射线圈通以双极性矩形脉冲信号，当发射线圈中电流脉冲突然关断时，将在周围产生磁场，该磁场称为一次场，根据导体中的电磁渗透理论，其磁力线穿过套管，在套管中产生涡流即二次场。在脉冲电流的间歇期

关键词/Keywords

电磁探测 ·
Matlab ·
瞬变电磁场 ·
套管损伤 ·

国家自然科学基金项目（41174160），陕西省科技统筹创新工程项目（2012KTCL01-10）。

间, 套管中产生的涡流在接收探头的接收线圈中 will 产生一个随时间衰减的感应电动势 ε , 即

$$\varepsilon = S \frac{dB}{dt} \quad (1)$$

式中, ε 为感应电动势; S 为线圈面积; B 为磁通量。

如果套管的特性发生改变, 如变形、孔洞、腐蚀和裂缝等, 必然会对套管中的涡流产生影响, 并且套管内发生损伤对涡流的影响程度与其对涡流的干扰程度成比例关系。图1为当套管有不同程度的损伤时对涡流的影响示意图。其中, 图1a为损伤的方向与涡流流向相平行, 此时对涡流的影响较小, 探测性较低; 图1b为损伤垂直涡流流向, 此时对涡流的影响较大, 探测性较高。

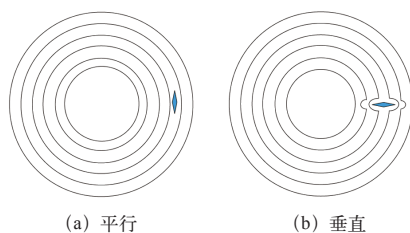


图1 套管损伤对涡流流向的影响

由图1可知, 涡流总是沿着非导电障碍物周围的最小电阻路径流动。当损伤方向平行于涡流流向时, 涡流变化较小, 而损伤垂直于涡流流向时, 涡流变化较大, 因此在电磁探伤系统中采用多个探头进行套管损伤检测, 以确定每个方向的损伤都能被检测到, 提高损伤检测的准确度。图2为纵向探头检测原理图, 其涡流与探头中电流流向相同, 纵向损伤阻碍涡流流动, 因此可敏锐探测纵向的损伤。图3为横向探头检测原理, 探头与套管的轴向垂直放置, 涡流方向与套管轴向相同, 则

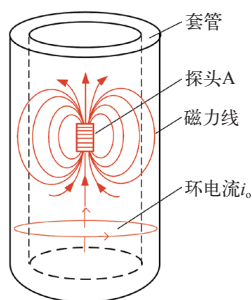


图2 纵向探头检测原理

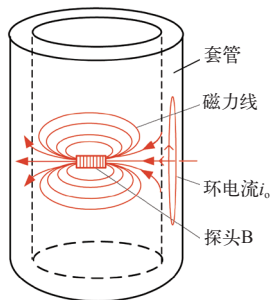


图3 横向探头检测原理

当有横向裂纹出现, 裂缝的走向和涡流的方向垂直, 可进行探测。原理上, 如果损伤纵向长度较小, 横向探头将无法探测。同理, 横向探头也无法探测纵向损伤。因此, 两个探头相互配合可进行各种损伤的检测以及损伤类型区分, 比如孔装损伤和大面积的深度腐蚀, 两个探头都将产生反应, 以此可对损伤类别进行区分。

电磁探伤特征信号研究

电磁探伤获取的原始数据其数据量大, 需要进行信号的分类和信号特征的提取, 即经过加工、处理, 提取其中与损伤有因果关系信息。特征的组合优化问题涉及到特征选择和特征提取两部分, 特征选择是从信号的特征空间中删去一些特征描述量, 得到精简后的特征相量, 特征提取则是用比原维数低的维数描述信号的特征。

1. 套管缺陷典型类型分析

理想的瞬变电磁检测信号如图4所示, 其中峰值的时间用来对缺陷和壁厚变化位置进行定位, 而信号的倾斜率和峰值大小(峰值与参考值之差)用来对信号进行定量计算。因此, 电磁探伤信号的特征提取就是对信号突变处的信号特征的提取。

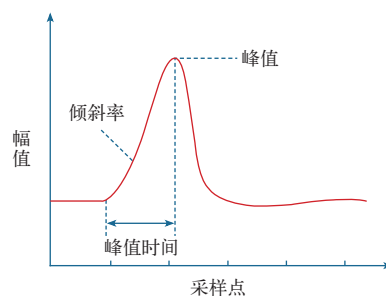


图4 脉冲涡流检测信号的时域波形

电磁探伤检测中上升和下跳沿附近以及一些起伏变化剧烈的部分蕴含了套管的缺陷信息, 对曲线突变点的研究就是对缺陷的定位和尺寸信息的研究。因此, 提取出描述这些突变信号的参数和位置, 就相当于得到了套管的具体信息。在电磁探伤信号中, 需要提取的信号为峰值、峰值时间和倾斜率, 其中峰值和峰值时间可以通过求取信号极大值点、计算信号异常点时间和个数来提

取,而信号的倾斜率的计算等效为信号奇异性的Lipschitz指数的计算。

2. 信号峰值检测研究

电磁探伤检测信号的峰值检测找到信号的波峰的位置和振幅,如果将一个信号看做一个函数,那么检测信号的波峰位置和振幅就是查找函数的极值点和极值。极值的概念来自数学应用中的最值问题。定义在一个有界闭区间上的每一个连续函数都必定达到其最大值和最小值,如果不是边界点就一定是内点,称为极值点。

在函数中极值的定义为:设 $y=f(x)$ 在 x_0 某一邻域内有定义,如果对于该邻域内异于 x_0 的任意点 x 都有,那么当 $f(x)<f(x_0)$,则称 $f(x_0)$ 为 $f(x)$ 的极大值, x_0 称为 $f(x)$ 的极大值点; $f(x)>f(x_0)$,则称 $f(x_0)$ 为 $f(x)$ 的极小值, x_0 称为 $f(x)$ 的极小值点。

极值的判别条件:若函数 $f(x)$ 在 x_0 可导,且在 x_0 处取得极值,则 $f'(x_0)=0$ 。

- 1) 若 $x<x_0$ 时, $f'(x_0)>0$;当 $x>x_0$ 时, $f'(x_0)<0$,则 $f(x)$ 在点 x_0 取得极大值 $f(x_0)$ 。
- 2) 若 $x<x_0$ 时, $f'(x_0)<0$;当 $x>x_0$ 时, $f'(x_0)>0$,则 $f(x)$ 在点 x_0 取得极小值 $f(x_0)$ 。
- 3) 若 $f''(x_0)<0$,则 $f(x)$ 在 x_0 取得极大值。
- 4) 若 $f''(x_0)>0$,则 $f(x)$ 在 x_0 取得极小值。

在函数中可以根据极值判别条件来进行极值的判断,但电磁探伤信号为离散信号,因此指定一个宽度的数据来进行二次多项式的拟合,将拟合数据用极值的判别条件进行判别。此宽度应不小于3的值,并且不大于波峰/波谷的1/2,并且并且对于无噪数据可以更小(但应大于2)。理想情况下,宽度应当尽可能的小,但是必须保持适度,从而避免由噪声引起的错误峰值检测。宽度过大可能降低波峰的显示振幅并改变其显示位置。对于含噪数据,由于噪声遮蔽了实际波峰,故该值不应过小。

根据此方法可以有效地取得信号的峰值信息,但是工程信号中大多含有噪声,且噪声大多都含有极值点,提取的极值信号中含有大量的无用信息,因此提出用阈值来剔除信号中无用的极值。

设定阈值后,对于每个波峰或波谷,二次拟

合后结果将与阈值进行比较。低于阈值的波峰和高于阈值的波谷都将被忽略。只有在程序处理了波峰或波谷之外约宽度/2个数据点后,才可能检测到波峰或波谷。如图5所示,有9个极值点,设定阈值后,小于阈值的①②③④个极点将不被检测。

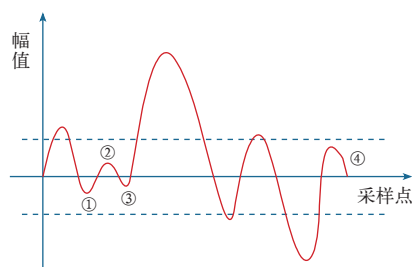


图5 信号添加阈值示意图

根据对电磁探伤特征信号的理论研究,以bumps信号作为原始信号按照上述方法,利用Matlab为平台,进行信号极大值的信号提取,结果如图6所示。

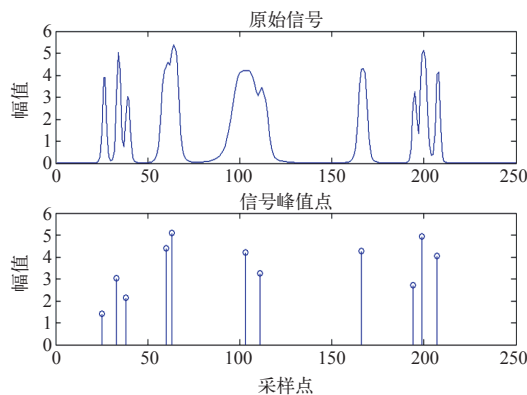


图6 信号极大值点的提取

特征信号提取方法研究

1. 特征信号提取理论研究

信号发生突变的被称为信号具有奇异性,Lipschitz指数被用来定量描述信号的奇异性,其定义如下。

令 $0\leq\alpha\leq 1$,如存在一个常数 C ,使

$$\forall t\in R,|f(t)-f(t_0)|\leq C|t-t_0|^\alpha \quad (2)$$

式(2)成立,则称 $f(t)$ 在点 t_0 有Lipschitz指数 α 。当存在 $t_0\in[a,b]$ 且常数 C 与 t_0 无关,则称 $f(t)$ 在区间 $[a,b]$ 是一致性Lipschitz α 的。 α 的上界值称为

Lipschitz奇异性。

由Lipschitz指数的定义可以看出 α 越大,奇异性越小,函数越光滑;反之, α 越小表明函数在该点处变换越剧烈,奇异性越大。若一个函数 $f(t)$ 在一点连续且一次可微,但倒数不连续,那么其在这点的Lipschitz指为1;若 $f(t)$ 在点 t_0 处间断,则这点的Lipschitz指数为0。Lipschitz指数越大, $f(t)$ 越光滑。

通常的情况下信号的奇异性变具有局部性。它可分为两种情况。

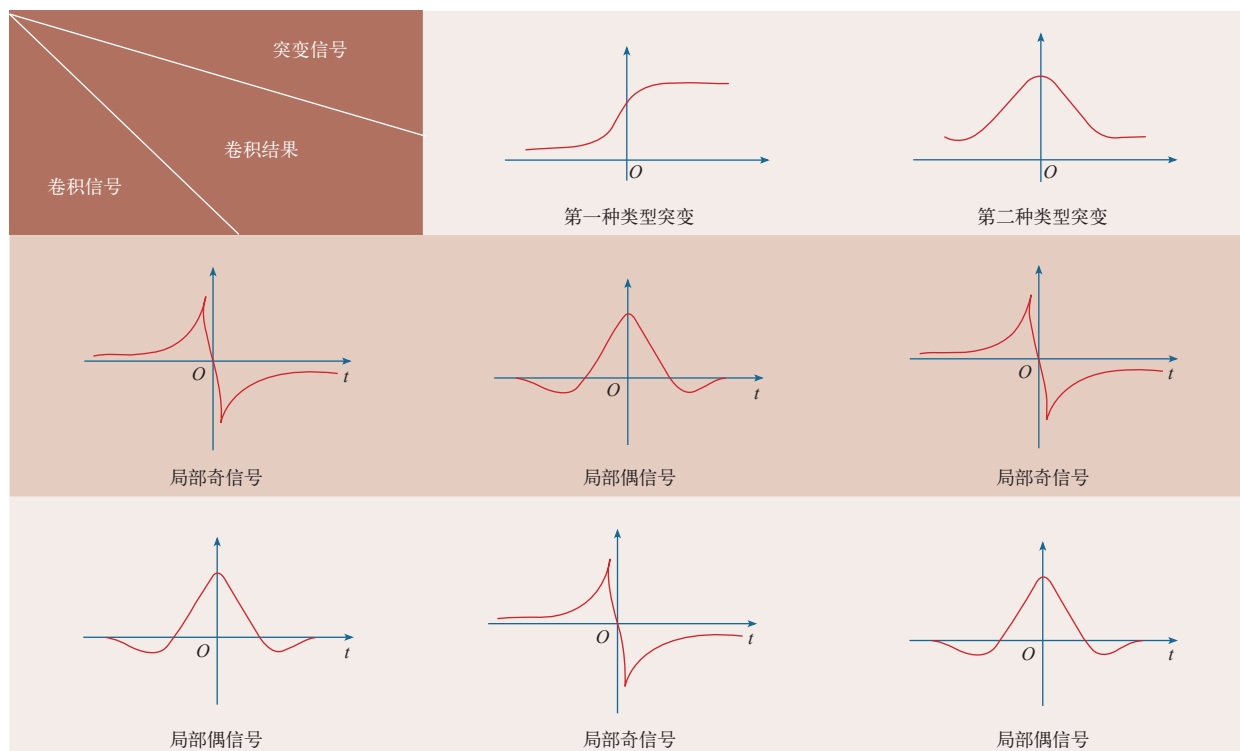
1) 信号在某时候幅值发生突变进而引起的信号的非连续性,关于突变中心点局部偶对称,突变处成为第一种类型的间断点。

2) 信号的外观很光滑,幅值突变不明显,一阶微分发生突变且一阶微分不连续,关于突变中心点局部奇对称,突变处成为第二种类型的间断点。

在小波多尺度边缘检测即对突变点的检测中,信号的多尺度边缘包含了信号的大部分信息并可根据他们获得信号的良好重构。因此,用多尺度边缘代替测量信号进行缺陷信号的定位分析,是非常有用的。可将小波变换模极大值的尺度参数、平移参数以及幅值作为目标的特征量。信号发生突变即信号的奇异点,一般用Lipschitz指数来描述。当尺度越来越精细时,小波变换模的极大值将收敛于信号的奇异点,其衰减速度取决于信号在突变点的Lipschitz指数。

瞬变电磁检测中的损伤信号表现为第一种类型间断点,而套管材质变化、壁厚变化以及大面积腐蚀属于第二种类型间断点。为了进行突变点的检测,构造一个局部奇对称和一个局部偶对称的窗函数,分别与发生局部突变的信号进行卷积,求取卷积结果,则有如下表所示的规律。

表 突变信号卷积结果



取平滑偶函数式(3),构造局部奇对称和局部偶对称的函数

$$\theta(t) = \cos t, t \in [-\pi/2, \pi/2] \quad (3)$$

式中, $\theta(t)$ 是偶对称的,则 $d\theta/dt$ 为局部奇对称窗函

数, $d^2\theta/dt^2$ 为局部偶对称窗函数。用 $d\theta/dt$ 和 $d^2\theta/dt^2$ 与两类突变信号进行卷积,则会出现类似与上表的特征。

若将函数 $f(t)$ 看作是信号, $\theta(t)$ 看作是滤波器,

那么信号的导数与滤波器的卷积结果可以看作是滤波器的导数与信号的卷积。则平滑函数 $\theta(t)$ 是一个低通函数，而 $d\theta/dt$ （当具有足够快的衰减性时）是一个局部奇对称的带通函数， $d^2\theta/dt^2$ （当具有足够快的衰减性时）是一个局部偶对称的带通函数。

小波函数可利用一般的平滑函数去构造。例如选 $\theta(t)$ 为高斯函数，则利用其导数可以构造Morlet小波和Maar小波。这种构造方法对离散型的时间序列分析非常合适，先用一个光滑函数将离散型变量曲线“磨光”成连续型函数，然后套用连续小波分析方法。

通过小波函数的分析可以知道，小波函数既具有局部奇对称性，也具有局部偶对称性，因此可以通过构造小波函数进行小波变换来体现信号的局部突变特征。

于是，通过内积和卷积形式

$$\int f(\tau)\Psi^{(m)}(\tau-t)d\tau = \int f(\xi+t)\Psi^{(m)}(\xi)d\xi \quad m=1,2$$

$$\int f(\tau)\Psi^{(m)}(t-\tau)d\tau = \int f(\xi+t)\Psi^{(m)}(-\xi)d\xi \quad m=1,2$$

(4)

由此可见，小波变换 $W^{(1)}f(t)$ 、 $W^{(2)}f(t)$ 分别是函数 $f(t)$ 在尺度 s 下由 $\varphi(t)$ 平滑后再取一阶、二阶导数。且在局部范围内，小波变换（内积）的极大值点或过零点位置与信号突变点位置的对应关系是与卷积结果（见上表）是相同的。这就是采用局部极值点可检测信号突变点的原理。

2. 特征信号的提取方法

电磁探伤的特征信号提取主要利用LabVIEW调用Matlab的方法进行程序的设计。主要功能是提取信号中突变点特征，并通过分类器进行信号特征分类。其中特征提取的部分基于样条小波离散小波变换，它调用Matlab信号处理工具箱函数conv实现一维数组的卷积，然后将结果两端截断，得到与输出信号长度一致的输出，因而能准确地确定奇异点的位置。通过理论分析，小波阈值滤波的参数选择为coif3小波基、4层小波分解和启发式阈值（heursure）的方法作为电磁探伤的信号滤波方法。利用LabVIEW混合编程技术来实现小波阈值滤波，对实际测井数据进行滤波，信号噪声

部分得到有效滤除，且有用信号保存良好。在LabVIEW中利用函数节点，直接调用Matlab函数实现小波滤波。图7为一段实际测井信号滤波后结果。

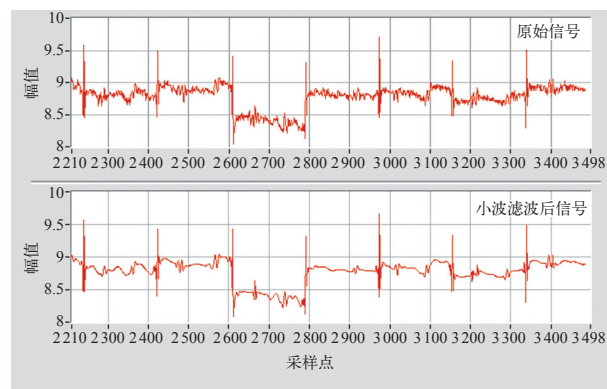


图7 小波阈值滤波结果

试验结果

套管井电磁探伤仪器以瞬变电磁法为理论基础，研究了套损检测的基本原理，建立了套损检测的理论模型，分析了套管的电磁响应特性，并对影响检测效果的相关因素进行了仿真分析。用LabVIEW软件采集信号数据，以Matlab为仿真工具，以小波阈值滤波为最终滤波方法，作为处理和提取电磁探伤特征信号的具体方法，其测试结果达到预期要求。

结束语

套管的损坏不但会造成巨大的经济损失，而且直接影响油水井的使用寿命及油气田产量。套管井电磁探伤仪器基于电磁探伤监测原理，提取并分析电磁探伤特征信号，得到对应的损伤情况和套管壁厚，对损坏井的修井作业提供直接的资料。还能够对井下套管损坏的因素及原因进行分析，为套管的修复和所采取的预防措施提供科学依据。

参考文献

- [1] 王丽忱，甄鉴，朱桂清. 国外套管腐蚀检测技术研究进展[J]. 科技导报，2014，32(18)：67-72.

(收稿日期：2015-04-28) EA