

基于DBSCAN算法的孔深测量与地层反演理论研究

李璇, 赵大军

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130061)

摘要: 论文针对地质勘探取心工况复杂、钻进深度大、事故发生率高、岩性复杂、钻进参数难以获取、无法实时掌握钻进状态的难题,在充分调研现有工况识别技术的采集原理、功能种类、现场实测的基础上,结合钻探智能化、自动化的发展方向,运用硬件与软件结合的思想,设计了实时测量钻进参数的方案。论文首次提出使用DBSCAN(针对噪声空间基于分布密度进行聚类的算法)密度聚类法分析钻进参数,结合光电编码器增量的正负性进行工况判别,以获取钻头位置以及钻孔深度。该方案可以判别钻进状态,获取钻进工艺参数,将测量数据作为所钻地层的可钻参数来反演地层。钻机的自动化、智能化研究能获取大量地层资料,有利于推进钻进工艺学发展,实现从经验钻探到智能钻探的突破。同时,为智能钻进系统奠定基础。

关键词: 立轴钻机;孔深测量;工况识别;地层反演;DBSCAN密度聚类

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2021)S1-0047-05

Theoretical research on hole depth measurement and formation inversion based on DBSCAN algorithm

LI Xuan, ZHAO Dajun

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130061, China)

Abstract: In view of the problems of complex geological exploration coring conditions, large drilling depth, high accident rate, complex lithology, difficulty in obtaining drilling parameters, and inability to know drilling status in real time, with full investigation of existing working condition identification technologies in terms of collection principle, functional types and field measurement, a scheme for real-time measurement of drilling parameters is designed by the methodology of combining hardware and software in reference to the development direction of intelligent and automatic drilling. In this paper, the density clustering method of DBSCAN (clustering algorithm based on distribution density for noise space) is proposed for the first time to analyze drilling parameters, and to determine working conditions jointly with the positive and negative increment of the photoelectric encoder, so as to obtain the bit position and drilling depth. This scheme can distinguish drilling state, obtain drilling process parameters, and invert the formation with the measured data as drillable parameters of the drilled formation. Research on automatic and intelligent drilling rig can obtain a large amount of formation data, which is beneficial to promote the development of drilling technology and realize the breakthrough from experience drilling to intelligent drilling. At the same time, it lays a foundation for the intelligent drilling system.

Key words: spindle drill; hole depth measurement; working condition identification; formation inversion; DBSCAN density clustering

0 引言

矿物资源是支撑人类赖以生存的物质基础,是影响国家安全与经济发展的战略资源,也是构成生

态环境的要素。近年来,我国矿产资源消费量持续增长,将在未来相当长的时间内保持增长趋势。国家正处于强化科技带动矿业发展时期,利用科技创

收稿日期:2021-05-31 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.S1.008

作者简介:李璇,女,汉族,1994年生,博士在读,从事智能钻进方向的研究工作,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号,1149965096@qq.com。

引用格式:李璇,赵大军.基于DBSCAN算法的孔深测量与地层反演理论研究[J].钻探工程,2021,48(S1):47-51.

LI Xuan, ZHAO Dajun. Theoretical research on hole depth measurement and formation inversion based on DBSCAN algorithm [J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):47-51.

新,引领传统矿业加速向智能、安全、高效、绿色方向发展^[1]。

大数据、人工智能、云计算、移动互联等新兴科技正在高速与传统行业融合,在资源勘探与开发工作中,我们已经实现了钻进过程中的自动化控制,将基础的钻具行为变为控制逻辑从而实现自主执行,大大减少了现场施工的人工成本。但是钻探过程是钻具与地层极其复杂的交互过程,我们尚未突破钻具结构的智能设计、孔内工况的智能感知、数据的实时处理以及钻孔质量评估等技术,系统面对不同的钻进情况,无法智能安排工序,仍然需要专业人员介入进行判断,距离真正的无人化钻进存在很大差距^[2]。

随着地质勘探向深部发展,钻探工况愈发复杂,凭借人工经验控制钻探工序愈发困难,孔内事故频发,增加了钻探成本。因此,通过监测钻进参数以识别工况、识别钻具状态、分析地层,是安全、高效钻进的基础,能降低现场工作人员的劳动强度、提高钻进效率、大幅减少孔内事故。

基于钻探的实际需求,世界各国从未停止对钻参仪的研究,促进了钻探技术的发展。美国MD-TOTCO公司开发了SR-WellWatch钻参仪^[3-5],可以实时检测钩载压力、钻进压力、钢丝绳张力、钻进时间、钻进速度、钻孔深度与钻头位置、钻杆转速和扭矩、泥浆液容积以及补给/损失量、泵速、泵量等钻进参数。同时,该钻参仪能够监测大钩载荷、泵压、孔内压力等危险部位,当该部位的测量值超出阈值时自动发出异常报警。英国RIGSERV公司研制了SmartDrill-21钻参仪系统^[3-4],该系统可检测钻进中几乎所有钻探参数的同时,通过人机交互功能优化钻进参数,控制钻进过程。加拿大Datalog公司开发了WWEDR钻参仪注重于气体钻进^[6],可检测常见气体浓度,对超限气体进行报警;该系统能够实时检测钻压、转速、钻柱扭矩、泵压、泵量等钻进参数,实现多参数的融合分析,增大对钻进过程的指导作用。日本研制的BDR-5钻参仪主要应用于立轴钻机^[7-8],能够实时采集钻进参数并对超限参数自动报警,但该钻机在孔深测量上存在较大误差。俄罗斯KYPC系列钻参仪同样应用在立轴式钻机上^[9],可测量除孔深外的基本钻探参数,不具备报警功能。国内引入国外钻参仪后,结合各勘探行业特点,消化吸收了它们的长处,研制出一系列应用广泛的钻参

仪。上海伸开石油化工有限公司SK-2Z系列钻参仪应用于石油勘探^[10],在监测近百项数据的同时,能够进行远程计算机监控并传回后台,后方专家亦可远程对实时数据进行指导。中国地质大学(武汉)成功研制了DDW-3型钻参仪^[11-14],该钻参仪能监测钻参数据、自动生成约束条件、简单识别工况,还可以结合测斜仪数据,绘制孔底三维坐标进行中靶预测。山东煤田地质局研制了ZC系列立轴钻机用钻参仪^[15-16],可监测多项钻参数并控制钻杆的装卸,为地质勘探与水文监测提供技术支持。

国内外的钻参仪多为油田钻进设计,国外钻参仪与国内钻机兼容性差,且多为英文操作界面,难以推广;在野外恶劣的施工环境下,国内钻参仪虽然适应性好,但智能化程度较低,稳定性差,缺乏成熟的检测原理,仅可根据传感器测得的数据进行简单的反馈,不具备智能化的工况识别^[17]。

本文针对地质勘探智能化程度低的问题,设计了传感器与算法结合的测量方案,利用传感器的精准度修正算法判断的错误,利用算法较高的成功率校正传感器的各种工况下的误差,从而得到准确的孔深。得到一系列钻深与钻参的数据点后,基于孔深测量所用的DBSCAN密度聚类法,对钻进的地层进行分类,重建地层模型,分析异常地质体,提供较为准确的地质资料。

1 钻进参数测量的基本原理

1.1 基本钻进参数的组成

在钻进参数中,钻压是关键参数之一,钻进过程中,钻头在钻压的作用下吃入地层,旋转破碎岩石,所以钻头吃入地层的初始深度以及岩石破碎的体积由钻压的大小决定,直接影响着钻进效率。水平钻进需要钻杆传递更大的给进力,当钻压过大时,钻杆会产生弯曲。钻压也是控制钻孔轨迹的重要参数。反过来,水平孔内的特殊工况也会在钻压上得到显示,例如钻进状态、断钻、烧钻等。

转速也是分析钻进工况的重量参数之一,转速的瞬时值曲线在正常情况下是一条直线,只在小范围内波动,但在钻进过程中遇到复杂地层(松散、破碎、坚硬、层理节理及裂隙发育)时易发生卡、埋钻等意外工况,转速曲线会发生骤变或出现剧烈抖动的锯齿状。因此,为判别工况和优化钻进工艺,需要对钻机的转速进行实时监测。

钻速是衡量钻井工艺效果的重要指标,在钻进过程中,常用进尺量和平均钻进速度衡量钻头的质量,确定岩石的可钻性。同时,瞬时钻进速度是判别钻具在钻进过程中是否处于正态状态以及钻进参数是否合理的重要依据。

1.2 孔深的测量方案设计

钻速本质上属于孔深测量的再计算数值,在钻井工程中,多数人将线速度通过工具转化为角速度进行监测,如转速扭矩一体传感器、电磁脉冲转速传感器、光电编码器等。光电编码器根据信号输出的格式以及计数方式主要分为增量式与绝对式。由于钻进深度过大且现场空间有限,使用测量范围受限绝对式编码器不符合实际工程需求,而增量式编码器体积小,便于现场安装。编码器的主轴上存在脉冲码盘结构,码盘上均匀分布着光栅,光栅将码盘划分为透光与遮光区段。当主轴转动时,透光区段与遮光区段代表着二进制的0与1,不同的组合代表着不同大小的数字,每转过一个透光区,就发出一个脉冲信号,计数器的脉冲值加一。由于光栅的个数是确定的,当编码器主轴旋转一圈时,将沿着信号线发射固定数量的脉冲,使用计数器累加固定时间内脉冲值便可计算出该时段内的位移变化。主轴正转与反转时,都会产生两路相位差为 90° 的脉冲序列,根据二者的超前、滞后关系可以区分正转反转。钻进时,钻机的给进机构驱动立轴向下运动,在导向杆上设计齿条,导向杆随着立轴同步向下运动,通过齿轮齿条机构带动齿轮旋转,钻机速度就等于齿轮的线速度。齿轮与光电编码器同轴,那么光电编码器旋转的角速度也就是齿轮的角速度,光电编码器输出脉冲信号反映了齿轮旋转的速度。

1.2.1 钻进状态识别的必要性

将钻杆的前后移动与编码器主轴的角位移挂钩,当钻杆向前移动时,编码器产生增量,反之产生减量。然而当下放钻具时,钻头不处于钻进状态,编码器即使反馈增量也不能使用此时的钻进参数代表该深度下的地层岩性。当钻机松开钻杆,立轴向上移动时,编码器的累加值减小,钻杆却保持静止,所以不能用编码器的累加值代表钻头的位置。正常钻进时,齿轮旋转的角速度就是钻机的钻进速度,累计的最大值就是钻孔深度。因此,我们只关注编码器发生增量的时刻,在钻机处于钻进状态时,将编码器的增量累加,计算获得真实的

孔深。

孔深测量的关键点在于钻进状态的判别,由于钻进地层的岩性不同,即使是同一种岩石,在不同的钻进状态下,所反馈在钻具上的钻压、扭矩也存在着上下波动的情况。岩石基于成分占比的不同,成分种类的不同,存在近乎无限的组合情况,因此依靠识别地层所属的岩石种类进行基于该种岩石钻进参数的钻进状态判断是不现实的。钻进过程中,遇见地下水或地下空洞,此时的钻进参数与处于钻井液中空转的钻参几乎一致,若判定为非钻进状态,不累加编码器的增量会导致孔深的测量失准。

1.2.2 钻进状态识别的原理

钻进的地层具备非均质性,但是在钻进的一定深度范围内地层具备均一性,离孔底越近的历史钻进数据越接近所钻地层的钻参。利用这一特性,为每一个历史数据设置影响系数,该值越大,越影响当前钻进状态的判断。在钻头第一次启动,下移钻杆直到接触到岩石的过程属于非钻进过程,该过程采集的数据设定为编队2,记录此时的钻压、扭矩、转速以及钻深;当钻头接触到岩石的瞬间,钻压出现极大倍率的骤增,系统识别此状态,并将此数据点设定为编队1,同样记录此时的钻参;之后,每采集到一个钻参数据,计算该点与历史数据点孔深之间的距离,进行归一化并倒转,离该数据点最近的点,影响系数设为1;然后,计算该点与每个数据点在钻压、扭矩、转速3个维度上的欧式距离并求和,再以影响系数为权重彼此相加,最终得到该点的判定值,与某个钻进状态数据点越接近越认为属于该钻进状态。

1.2.3 钻进状态识别的步骤

基于孔深影响系数的钻进状态判别仅为初步结果,需结合编码器传递的增减变量共同确定。当钻头第一次吃入岩石时,设编码器的累加值与孔深值为零,编码器的累加值不间断地对编码器传递的增减变量不停累加,而孔深仅在条件允许的情况下进行更新。当编码器传递增量时,意味着给进机构向下移动,此时钻具可能处于正常钻进、扫孔、正常下钻3种情况。若采集到某一数据点为增量且系统判定为钻进状态时,孔深的值加上编码器在该段时间内的增值。假设此时,编码器向数据端传递增值,且系统判定为钻进状态,若编码器累加值不小于孔深值,则视为钻具此刻处于正常钻进状态,后台使用编码器的累加值代替孔深值,消除此前钻进状态

误判的影响;若编码器的累加值小于孔深值,且最近3次编码器传递负变量时,钻机的转速大于零,则视钻机所处的状态为扫孔下钻,此时后台令孔深值不变,但是更新编码器的累加值;若编码器的累加值小于孔深且最近3次编码器传递负变量时不存在转速,则视钻机处于为倒杆后的下降阶段将编码器的累加值用孔深代替;若该数据点被系统判定为非钻进状态,但编码器的累计读数不小于孔深,则视为钻机处于钻进状态但钻进状态判别失效,更正该项数据的编队;若数据点被判别为非钻进状态的同时,编码器的累加读数小于孔深,则钻机处于正常下钻,孔深值不变,实时更新编码器的累加值。钻进状态的

识别存在失效的可能性,故利用了编码器累加值的绝对可靠性以及第一次钻入岩石钻进状态判别的准确性对该误差进行消除。当倒杆时,钻杆的位置不变,但编码器的累加值减少,所以利用钻机重新处于钻进状态时,钻头位置等于孔深位置这一特性,消除倒杆对编码器累加值准确性的影响。孔深值与编码器累加值相互配合,消除各自的误差,更正数据点的编队,提高钻进系统判别的可靠性。当正常钻进状态判别失效时,仍可利用编码器累计值与孔深值进行修正;当扫孔识别失效时,系统识别为正常下钻,处理结果与扫孔一致,不存在误差。

孔深测量方案流程如图1所示。

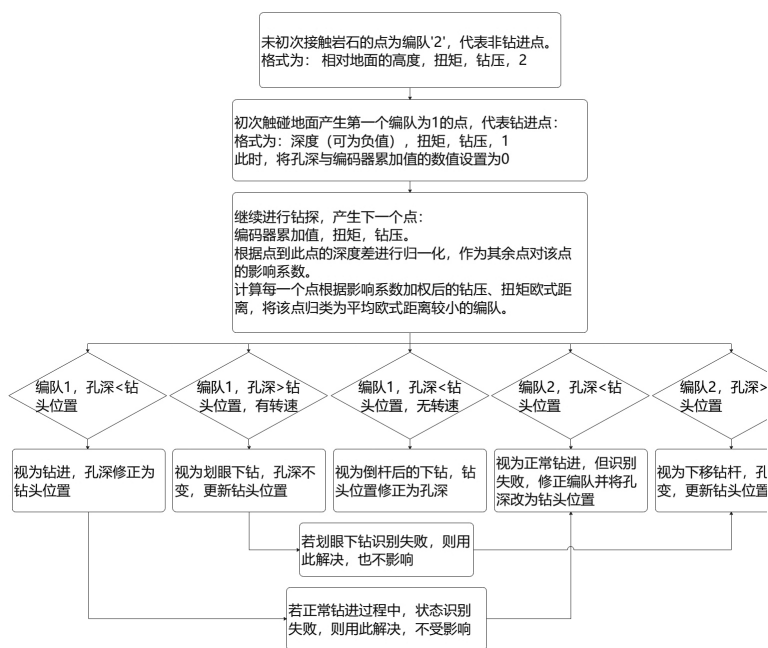


图1 孔深测量方案流程图

2 地层反演

利用孔深值与编码器累加值的配合,我们可以获取地下每一个孔深值对应的钻压、扭矩、转速数据。由于地层在一定范围内,使用同一钻进参数具备相似性,所以将历史数据点以多维的形式表达出来时,相似岩性的地层会出现聚集的情况。点发生聚集现象时,在多维空间上,这些点分布区域的密度会上升,若采用DBSCAN密度聚类算法,可以分析样本分布的紧密程度,将所有样本划分为不同的类别以区分地层。

2.1 DBSCAN算法原理

DBSCAN算法对个体与关系的定义如下:邻域、核心对象、密度直达、密度可达、密度相连。顾名思义,邻域是指某点在一定范围内的样本集;核心对象是以该点为中心点且该点邻域范围内包含一定数量邻域点的中心点;密度直达是邻域点与中心点之间的关系;密度可达是一组具备传递性的序列,该序列中的每个点都在上一个点的邻域范围内,且均由核心对象组成;密度相连即这些点组成的群体,群体内的个点均属于密度相连关系。不同于传统的聚类法,DBSCAN不需要输入待识别样本的类别数量,

它可以发现任意形状的聚类簇,这符合同一地层钻参波动较大的实际情况。首先,对每一个数据点进行处理,依靠距离度量的方式,找到该点的邻域子样本集,若该子样本集的个数满足聚类簇的最小数量限制,则将该点加入核心对象集,否则对下一个点进行处理;在核心对象集中任意选取一个点,找到与此点邻域有交集的所有核心对象点,并以这些点为中心不断生长,直到不存在新的核心对象点为止,将找到的所有点加入类别1;在初始数据中,除类别1外随机选取一点,重复上述操作,直到对所有点进行排序。该方法对初始点的选取不具备敏感性,聚类结果不存在偏倚。

2.2 地层分类的原理

使用孔深测量方法完成一次水平孔钻进后,生成一系列孔深、钻压、扭矩、转速的历史数据点。由于钻进的地层在一定深度范围内具备均一性,所以钻参在该范围内处于正常波动状态,利用这一特性,使用DBSCAN算法可以将相似的点聚类,得到地层的数量与对应的数据点位置。首先,遍历所有的数据点,计算所有数据点在多维空间上两两相关的欧式距离并求和,得到一系列该值小于设定距离且邻域点大于数量设定下限的核心对象点;然后,随机选取一个核心对象点,遍历其余所有的未分类的核心对象点,查看是否与该点存在交集,若存在交集则加入该点的簇中;不断重复上述操作,直到其余所有核心对象点与该簇内的对象不存在交集,将该簇归类为1;重复上述操作,直到所有核心对象点被分类。分类完成后,我们得到簇的数量与簇内点的明确信息,利用深度进行校正,反馈修改距离的判定,直到一定深度内的所有点所处的深度在均值范围内正常波动。当簇内存在深度异常点时,结合实际的数据,判别该点所属的异常类型,如破碎带、软硬互层、地下空洞或地下水。使用该方法,可以根据孔深与钻参历史数据反演地层,得到地层模型。

3 结论

(1)分析了我国目前钻进系统存在的主要问题:智能化程度较低,无法准确识别工况,仅能依靠测量的参数绘制曲线,未利用数据点进行地层分析;孔深测量不准确,因为无法准确识别工况,所以不能校正各个工况下导致的孔深测量误差。

(2)讨论了实时掌握工况的重要性,只有准确

识别钻进状态才能计算孔深值与钻头位置,获取钻头工作状态下的钻进参数。通过合理分析钻具工况情况,设计了孔深测量方案,基于深度影响系数对钻进状态进行判断,最大化利用了编码器累加值的准确性与钻进状态判别的优越性,消除了钻进状态判别失误的误差以及倒杆导致的钻头位置误差。

(3)使用DBSCAN密度聚类法对历史数据进行地层反演,得到不同钻进深度下的地层模型,用于工况以及事故分析。

钻探的影响因素非常复杂,利用钻压、扭矩、转速对其进行分类不够精准,本文对地质勘探钻进参数的获取做了初步研究,为智能化钻进奠定了基础。

参考文献:

- [1] 张涛.全液压深孔岩心钻机CAN总线钻进参数监测系统的设计[D].武汉:中国地质大学,2014.
- [2] 张恒春.智能化多功能实验台钻进参数检测与控制系统的设计与实现[D].武汉:中国地质大学,2012.
- [3] 刘春晖.油田钻井实时监测系统[D].青岛:山东科技大学,2004.
- [4] 赵秀绍.基于马丁戴克仪表的数据系统开发与应用[D].武汉:中国地质大学,2003.
- [5] 陈学辉.Petron钻井仪表系统简介[J].钻采工艺,2003,26(6):98-99.
- [6] Datalog International[EB/OL].http://www.wellwizard.com.
- [7] 韩金亭.日本BDR-5系列钻参仪试验及应用效果[J].山东煤炭科技,2001(5):18-19.
- [8] 张丰春.日产BDR-5型钻参仪在煤田钻探中的应用[J].探矿工程,1995(6):31-32.
- [9] A. E. Козловский, 鄢泰宁, 汤凤林.俄中两国钻探最优化技术的进展[J].地质科技情报,1999(S1):8-11
- [10] 神开科技工程公司.SK-DLS2000说明书(培训教材)[Z].上海:神开科技公司,2002.
- [11] 鄢泰宁,龚元明,姚爱国,等.钻探微机智能监测系统的研制与应用[J].长江水利教育,1997,14(4):58-60.
- [12] 龚元明,鄢泰宁.DDW钻探微机多功能监测系统在野外生产中的应用效果[J].探矿工程,1994(2):42-45.
- [13] 鄢泰宁,等.CUG-1钻探微机智能监测系统研制报告[R].武汉:中国地质大学(武汉),1995.
- [14] 田宜平.CUG-1钻探微机智能监测系统的研制及工况识别软件的开发[D].武汉:中国地质大学(武汉),1996.
- [15] 张丰春.ZCY-1型钻参仪在煤田钻探中的应用[J].煤田地质与勘探,1999(S1):76-77.
- [16] 张义国,刘振祥,马延荣.ZCY系列钻井参数监测仪硬件系统[J].西部探矿工程,2002(S1):285-286.
- [17] 王清峰.从自动到智能,实现钻探技术新突破[N].中国煤炭报,2020-05-09(003).