

随钻测斜技术现状与发展趋势

尹浩, 梁健, 吴纪修, 李宽, 孙建华, 李鑫森

(中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000)

摘要:在桩基领域,随着基础设施建筑对桩基础承载能力和桩孔垂直度的质量控制要求越来越高,现有常规桩基成孔监测技术已不能满足要求;在钻探领域,随着深井、超深井、科学钻探井及水平井的成井要求越来越高,由于地层因素、工艺技术等导致的实际钻孔轨迹偏离设计轨迹的井斜问题愈发突出,井斜的监控变得越来越严格,现有仪器已不能很好地满足钻孔轨迹测量的高精度要求。针对上述问题,本文梳理了随钻测斜技术发展现状,并结合地质岩心钻探、旋挖桩孔施工工艺特点,提出实现绳索取心钻探钻孔轨迹和大直径长钻孔灌注桩孔垂直度高精度实时监测的方案,这一思路的推广将对指导施工操作、保证钻孔/桩孔的整体质量产生积极影响。

关键词:灌注桩;岩心钻探;井斜;随钻测斜;孔身轨迹;准随钻测量

中图分类号:P634.7;TE927 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)S1-0033-06

Status of inclination measurement-while-drilling technology and its development trend in the pile foundation field

YIN Hao, LIANG Jian, WU Jixiu, LI Kuan, SUN Jianhua, LI Xinmiao

(Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: In the field of pile foundation, with ever demanding quality control requirements for the bearing capacity of pile foundation and the verticality of pile hole in infrastructure construction, the existing conventional pile foundation hole boring monitoring technology cannot meet the requirements; it is also true with drilling of deep wells, ultra deep wells, scientific exploration wells and horizontal wells due to the deviation of the actual drilling trajectory from the design trajectory caused by formation factors and drilling processes. As a result, deviation monitoring becomes more and more strict, and the existing instruments cannot meet the requirements for high-precision drilling trajectory measurement. In view of the above problems, this paper sorts out the development status of inclination measurement-while-drilling technology, and in reference to the characteristics of geological core drilling and rotary pile hole drilling technology, puts forward a high-precision real-time monitoring scheme for the wire-line coring drilling trajectory and for the verticality of large-diameter and long bored pile holes. The promotion of this scheme will positively guide the construction operation and ensure the overall quality of the drilling / pile hole.

Key words: cast-in-place pile; core drilling; well deviation; measure while drilling; hole trajectory; quasi MWD

0 引言

井斜问题是成孔施工中的一个关键技术问题。

尤其随着孔深的增加,地层的复杂多变导致井斜问题变得更加突出,钻进效率低、施工成本高及钻孔

收稿日期:2021-05-31 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.S1.006

基金项目:中国地质调查局勘探技术研究所所管项目“旋挖无线随钻测斜系统研制”(编号:YB202002)、“高精度深孔轨迹测量短节研制”(编号:ZD202106);中国地质调查局地质调查项目“青海共和盆地贵德—达连海地区干热岩资源调查评价(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号:DD20211337)、“深海钻探技术与工程支撑(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号:DD20190585)、“共和盆地恰卜恰干热岩试验性开发与评价(中国地质科学院勘探技术研究所)”(编号:DD20190136);国家重点研发计划课题“高性能薄壁绳索取心钻杆研制”(编号:2018YFC0603403);国家自然科学基金项目“科学超深井铝合金钻杆的腐蚀防护机制研究”(编号:41772390)

作者简介:尹浩,男,回族,1987年生,工程师,硕士,地质工程专业,从事钻探工艺和钻具研发工作,河北省廊坊市金光道77号,837275137@qq.com。

引用格式:尹浩,梁健,吴纪修,等.随钻测斜技术现状与发展趋势[J].钻探工程,2021,48(S1):33-38.

YIN Hao, LIANG Jian, WU Jixiu, et al. Status of inclination measurement-while-drilling technology and its development trend in the pile foundation field[J]. Drilling Engineering, 2021,48(S1):33-38.

轨迹不符合设计要求等严重地影响了施工进度,有时不得不重钻纠斜甚至钻孔报废。自20世纪20年代起,针对井斜原理及相关防斜、纠斜的技术方法等核心问题,很多学者开展了大量研究,并取得了一定的成果,使人们对井斜的产生机理、井斜的监测方法、井斜的控制方法有了进一步的认识,缓解了井斜带来的经济损失,产生了一定的工程价值。随着对井斜的进一步认知,人们意识到井斜问题是避免不了的,只能通过早发现、早“治疗”,尽量减小其带来的不良影响^[1]。

以现有技术水平,井斜问题无法避免地发生在油气钻井、岩心钻探成孔、桩基础灌注桩成孔的过程中。因此,实时地对钻孔的偏斜情况进行检测并通过规程参数控制而保证孔身质量在工程设计要求范围内,是十分有必要而不可替代的。

在灌注桩孔的井斜测量技术方面,常规的成孔检测技术主要包括超声波法和接触式仪器组合法,实施周期长、劳动程度大,在同一个桩孔中不适合频繁地、短间隔地实施。然而,随着我国交通与城市现代化建设的快速发展,高层建筑、桥梁、港口、铁路等的桩基础对承载能力与地貌的需求越来越高,对桩基承载力稳定性、经济性的要求越来越高,这就对灌注桩孔的成孔检测技术提出了更高的要求,满足精确度的同时须兼顾成本低、效率高等指标要求。一般规定,大直径长孔灌注桩的直径 $D \geq 800$ mm、桩长 $L \geq 50$ m的灌注桩,其主要用于大型、特大型、特殊地段或跨海的建筑基础,成孔时连续作业时间较长,质量控制难度大,工程造价成本高。这种情况下,桩孔垂直度的控制显得尤为重要,如果桩孔垂直度超出规定阈值,轻则预置钢筋笼困难而扩径修孔,重则回填重钻,均对施工周期与经济成本控制带来了严峻挑战。所以桩孔垂直度的控制效果直接影响桩基的施工进度、成孔与成桩质量及其承载力等,如果不能第一时间发现孔身偏斜超标而采取相关补救措施,将随着时间的推移而产生更加难以挽回的技术问题。因此,对于桩孔垂直度的监控,需要作为重中之重来抓。桩孔垂直度超标发现不及时和处理之后会带来一些列问题,表现为:成孔过程中在起下钻时遇阻,需要频繁转动钻头解卡送钻;孔壁质量差,易发生坍塌掉块导致卡钻或钻头下不到底;桩孔与临桩发生干涉串通;成孔后,由于全角变化率超标而导致钢筋笼下孔到位困难;成桩由于弯曲而直接导

致其称重能力下降。《公路桥涵施工技术规范》要求钻孔灌注桩桩孔垂直度应控制在1.0%以内。《公路工程质量检验评定标准》规定钻孔灌注桩成孔后必须开展桩位、孔径、孔深以及桩身混凝土强度等相关技术指标的检测,其中钻孔桩垂直度不得超过桩长的1.0%,且 ≥ 500 mm。特别是对于50 m及以上超长桩,根据实体工程的具体要求,桩基垂直度的施工控制要求更严格,甚至要求达到0.1%。桩孔垂直度的质量控制要求越来越高,现有常规桩基成孔监测技术已不能满足要求。然而,针对这一问题,市场依赖超声波测井成像技术进行钻孔垂直度标定,工作效率低,并没有用于旋挖钻机的配套随钻无线测量系统,实现桩孔垂直度的实时监测与质量控制^[2-6]。

在钻探领域,随着深井、超深井、科学钻探井及水平井的成井要求越来越高,由于受地层因素、工艺技术等因素影响导致的实际钻孔轨迹偏离设计轨迹的井斜问题愈发突出,井斜的随钻实时监控变得越来越严格,现有仪器已不能很好地满足钻孔轨迹测量的高精度要求^[7-9]。

综上,有必要对现有随钻测斜技术进行分析对比,厘清测垂、测斜的关键技术,指出相关技术的发展趋势与解决问题的方向,对提高桩基、地质岩心钻探等成孔质量具有十分重要的意义。

1 随钻测斜技术

1.1 发展历程

在早期油气井开采过程中,人们为了增加储层中靶率,需要保证井眼的垂直度,测斜技术应运而生。后来要求更高的定向井、水平井、分支井等油气开采井的提出与推广,配套的测量工具也随着工业技术的发展而新陈代谢,不断升级,从虹吸测斜到照相测斜再到现在广泛推广应用的电子测斜,性能稳定性、测量精确性等技术性能越来越高。

虹吸测斜技术是利用地球重力作用下的水平液面为特性进行井斜测量的,在这一技术指导下,虹吸测斜仪被研制、推广应用。由于操作周期长、检测过程繁琐,虹吸测斜法基本已被取缔。后来提出的照相测斜技术将地球重力与地磁特性相结合,通过摆锤与指南针实现井斜测量的同时也获取了钻孔偏斜方位。这一技术产生于20世纪70年代,并在80年代在油田得到推广普及,配套仪器包括照相式单点测斜仪和照相式多点测斜仪,其中照

相式多点测斜仪因后处理操作要求高而被电子式多点测斜仪取缔。随着工业技术发展而出现的电子测斜技术,利用加速度计进行井斜测量和电子罗盘测量钻孔的偏斜方位。这一技术自从20世纪70年代末引入我国后,在国内相关技术人员的努力下,单点电子测斜仪、多点电子测斜仪相继被研制成功^[10-12]。

随着孔深及孔身质量要求的不断提高,为解决常规测斜设备的频繁测量劳动强度高、工作效率低的问题,随钻测斜技术一直随着测斜技术的进步而逐步发展。有线随钻测量仪器和无线随钻测量仪器

(Measurement While Drilling, MWD)于20世纪90年代初期引入到我国,并通过国家重点项目扶持,相关关键技术得到了高效突破和有效解决,研制成功的有线随钻测量仪器和无线随钻测量仪器得到了成功的推广应用,形成了成熟的产业化产品。

从表1中可以看出,电子测斜仪推广效果最好、受众最多,照相测斜仪次之。电子测斜仪相对于随钻测量仪器,抗温能力弱,实施步骤多,操作周期长,不能实现随钻随测^[13-16]。

表1 各测斜仪性能对比

类型	最高压力/MPa	最高耐温/°C	测量时间	测量方式	用途
照相单点式	100	105	长	吊测/投测/自浮	直井
电子单点式	100	125	长	吊测/投测/自浮	直井
电子单多点式	100	125	长	吊测/投测	直井/定向井
有线随钻式	100	150	短	随钻	定向井/水平井
无线随钻式	100	150	短	随钻	定向井/水平井

对于随钻测斜技术在旋挖灌注桩成孔技术领域的应用尚处于空白阶段;对于随钻测斜技术在地质岩心钻探技术领域的应用也处于起步研究阶段,且多测量井斜(顶角),缺少方位数据,无法实现钻孔轨迹实时监测。

1.2 现状评述

1.2.1 钻孔测斜技术

随着地质勘查及基础工程发展的需求越来越高,钻孔测斜技术受到了广泛的关注,相关专家学者对这一技术领域的“卡脖子”难题进行了研究并取得了一定成功,使钻孔测斜仪器的稳定性、准确度和抗恶劣工况的能力有所提高。

钻孔测斜技术首先由Stanley D. Wilson于1952年首次提出,于20世纪50年代实现商用,并在后续20年内实现广泛推广,这一时期的测斜仪以摆式机械测斜仪为主。当代的测斜技术是在20世纪80年代由于电子技术的进步而发展起来的,通过电子加速度计结合电子罗盘实现偏斜角度与偏斜方位的测量,这一技术因测量精度相对提高而快速地被市场接受,但受制于当时基础工业水平而导致仪器普遍体积偏大、抗振性能差,因此不能实现小口径钻孔偏斜情况测量。在这种市场需求下,陀螺测斜技术得到了快速发展,测量精度与仪器体积均得到了改善。

随着电子半导体技术的不断进步,新型的半导体传感器得到了快速的发展,多功能、高性能的电子传感器逐步替代机械式传感器而占领了测斜仪器领域市场。这些传感器不仅在体积、性能上远远领先于机械式传感器,而且其抗振能力及测量频率上也得到了提升,这些进步为随钻测斜技术的发展奠定了基础。

新中国成立初期,我国为了保障地质勘探事业的稳步发展,从发达国家引进了测斜技术。随后,1959年上海地质仪器厂应运而生,其生产的测斜仪被广泛应用到国内市场。后续20年,以西安石油勘探仪器厂为代表的生产厂家与国内相关研究机构联合开展了测斜技术的攻关,取得了显著突破。20世纪90年代,为了满足国家经济快速发展的需求,更高要求的测斜技术及器具研制被提上日程,在国家扶持下,单点定向测斜仪、多点连续测斜仪、陀螺测斜仪、有线随钻测斜仪、无线随钻测斜仪等相继研制成功,我国测斜技术在这一时期发展到了较高水平。进入21世纪以来,受益于新型材料、集成电路等基础技术的发展,测斜技术的发展被推进了一个新时期。激光陀螺、光纤加速度计、光纤陀螺、高精度压电陀螺、膜电位传感器及其他高集成度芯片在测斜仪器的研制中受到了极大的关注和应用,进一

步提高了测斜仪的适用性和测量精度,减小了仪器的体积,并使我国在钻孔测斜技术方面站在了世界前列^[17-21]。

1.2.2 随钻测斜技术

随着钻孔测斜技术的发展与复杂钻孔监测需求的提高,随钻测斜技术应运而生。相对于传统钻孔测斜技术,随钻测斜技术的关键问题是实现信号从孔内到地表的高效且可靠的传输。多年来研究人员一直致力于研究一种简单可靠的随钻测斜技术。

1950年,泥浆脉冲传输技术被 Arps J.J. 提出;1971年,Mobil R&D 公司验证了正弦波泥浆传输技术的正确性和可行性;1973年,Hughes 公司的无线随钻测斜仪得到商业化;1978年,随钻测量系统(MWD)由 TELECO 公司正式推向市场。20世纪80年代,随钻测量技术得到快速发展,斯伦贝谢、EASTMAN 等公司分别推出了多种型号的 MWD 系统,其测量功能也由之前的井斜、方位等参数测量发展扩充到钻压、转速、温度等钻头参数和电阻率、孔隙度等地层参数。如今,无线随钻测斜技术已经发展为一项不可或缺的必备技术,在钻探领域取得了显著经济社会效益和工程价值^[22-25]。

我国于20世纪70年代开展随钻测斜技术研究,直到90年代中期,受无线随钻测斜技术在国外获得广泛成功应用的影响,我国开始重视这一技术的研究。初始阶段,在引进国外先进技术仪器的基础上,重点开展应用研究,以解决阻挠钻井工程的一些关键技术难题和完善配套的钻井技术为主。后续随着我国基础工业的发展,在产、学、研的模式推动下,我国主要生产厂家与科研单位联合攻关,推动了无线随钻测斜技术的国产化进程,并最终实现了国产化。

地表与孔内的信号传输是随钻测斜技术实现的关键问题。对于这一问题的研究,国外开展了大量的理论研究。目前公认可行的信号传输技术有电缆传输、泥浆脉冲传输、电磁波传输、声波传输等4种,其中泥浆脉冲传输技术应用最广且最成熟,基本覆盖了全部MWD系统的信号传输方式^[26]。

泥浆脉冲技术的基本原理是首先将测获的数据调制为脉冲信号,然后通过脉冲信号实现脉冲发生器阀头与限流环的过流面积的控制,泥浆循环压耗产生变化,并通过液柱压力脉冲传到地表,配合相关信号解译技术实现孔内数据的获取。这一过程中涉

及到的关键研究内容包括孔内信息调制编码、压力脉冲产生和控制、脉冲在泥浆中的传输特性、地表信息的接收和解译技术等^[27-28]。

在泥浆脉冲传输特性方面,脉冲在泥浆中的传输规律、传输速度的影响、信号衰减、钻柱振动对传输的影响、钻柱与泥浆组成耦合系统中的传输特性等关键问题的解决,对MWD的优化改进具有重要的科学意义。在地表信号接收及解译方面,信号识别技术、滤波技术及显示处理等是主要研究内容,其进一步开展将使得MWD技术更高效、更安全地服役于钻探工程^[29-30]。

我国在泥浆脉冲技术领域的研究起步较晚,进度缓慢,其研究内容多以现场应用为主,缺少相关核心技术的理论支撑。大庆石油学院的刘修缮、中国石油勘探开发研究院的苏义脑等对泥浆脉冲技术相关的脉冲信号传输特性、衰减原理及影响信号传播的机理等进行了研究。房军、苏义脑等对泥浆脉冲信号发生器的结构参数进行了研究及优化分析,构建了脉冲发生器的工作系统模型,并通过仿真计算分析开展了脉冲发生器工作特性研究,最终给出了脉冲发生器样机设计方案^[31-36]。

1.2.3 旋挖灌注桩成孔测斜技术

常规的旋挖灌注桩成孔检测技术主要包括超声波法和接触式仪器组合法。

超声波法要求被检测孔径(槽宽)应 ≤ 0.5 m、 ≥ 5.0 m,检测中探头升降速度不宜大于10 m/min。孔径检测精度可达到0.2%。缺点是超声波法成孔检测需要在钻孔清孔完毕,孔中泥浆内气泡基本消散后进行,时效性低。超声波法测斜桩孔垂直度如图1所示。

接触式仪器组合法在被测孔径 < 1.2 m时,孔径检测误差 $\leq \pm 15$ mm;被测孔径 ≥ 1.2 m时,孔径检测误差 $\leq \pm 25$ mm,顶角测量范围:0°~10°,分辨率为0.6°,也需要在钻孔清孔完毕后进行测试,检测中探头升降速度不宜超过10 m/min^[37-38]。

考虑到泥浆静压与无线信号衰减的影响,常规随钻测斜技术无法直接应用于旋挖灌注桩孔的井斜检测。因此,针对大直径长桩孔垂直度高精度监测这一实际问题,市场并没有用于旋挖钻机的配套随钻无线测量系统,实现桩孔垂直度的实时监测与质量控制。

考虑到旋挖灌注桩孔每回次提钻取心的施工特

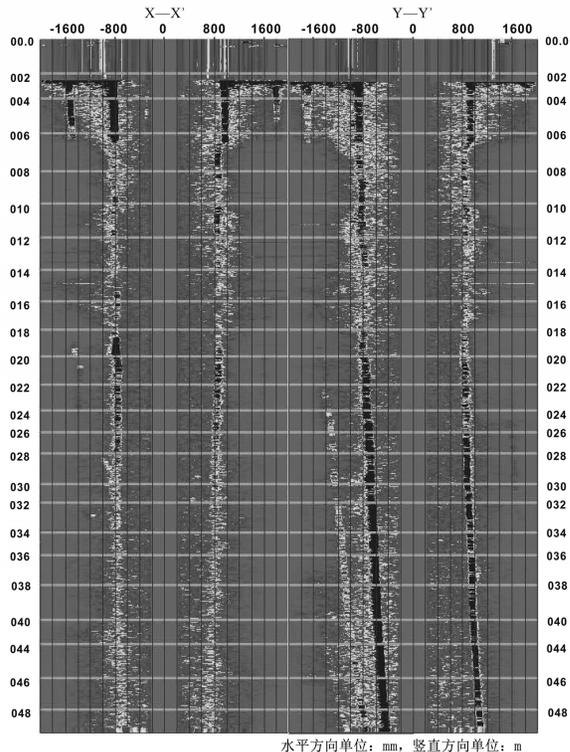


图1 超声波法测量桩孔垂直度检测

点,采用井下测井数据采集、存储,地表回传,每回次一监测的“随钻测斜”方案具有更高的经济性与可行性。考虑灌注桩孔对垂直度监测精度的高要求,采用孔身三维轨迹水平投影法标定桩孔垂直度阈值的方案,相比较直接测量井斜,对井斜、方位角测量的传感器精度要求更低,降低了研发成本,提高了最终测量精度。

2 发展前景预测

对于旋挖桩基成孔与地质岩心钻探,其共同特点是回次进尺比较短,且需要将满管或满钻的岩心/土体从孔内取出到地表,基于这种施工工艺特点,对灌注桩桩孔垂直度测量技术和地质岩心钻探钻孔轨迹检测方法的发展趋势预测如下。

随着我国现代化建设对铁路、水利、港口等大型工程的需求不断增加,土建工程迅速发展,灌注桩孔的施工口径与深度也随之增加,常规的成孔监测方法已不能很好地满足这种需求。随钻测斜技术在灌注桩孔成孔监测中的应用是未来的发展方向,这将实现对大直径长钻孔灌注桩孔垂直度的实时监测,从而指导施工操作,及时发现并纠正井斜问题,保证大直径长钻孔灌注桩的整体质量。基于旋挖灌注桩

提钻取心及回次取心长度短的施工特点和钻孔扩孔率存在而形成的钻头在提钻过程中贴着孔壁且与孔轴线相平行的结构特点,采用具有测量数据记录存储功能的近钻头测量装置,实现起下钻过程中钻头姿态数据的高精度检测,并在地表无线传输测获数据到上位机而实现每回次孔身轨迹监测,即“准随钻测量”。这种测量方案通过孔身三维轨迹水平投影法标定桩孔垂直度阈值,实现桩孔垂直度的测量,具有一定的可行性和推广应用性。

随着深井、超深井、科学钻探井及水平井的成井要求越来越高,由于地层因素、工艺技术等导致的实际钻孔轨迹偏离设计轨迹的井斜问题愈发突出,井斜的监控变得越来越严格,而对于满眼小泵量的工艺特点,现有MWD仪器不能很好地满足钻孔轨迹测量的数据传输。采用具有存储功能的测量装置集成于内管总成上,通过陀螺仪测量钻柱轴线姿态角而实现对钻孔轨迹的回次实时监测,确定实时的井底空间位置,解决绳索取心钻探、定向取心钻探等钻孔轨迹测量及指导对接井“牵手”问题;也可单独用于石油钻井,提供三维轨迹测量服务。

3 结论

(1)三高(耐高温、耐高压、高精度)是未来钻孔测斜技术的发展方向,在此基础上,未来随钻测斜技术的发展方向是井下和地面信息的实时传递技术。

(2)随钻测斜技术在旋挖灌注桩成孔技术领域的应用尚处于空白阶段,但随着大直径长钻孔灌注桩孔垂直度实时监测需求的增加,其在灌注桩成孔监测中的应用是未来的发展方向,这将指导施工操作,及时发现并纠正井斜问题,保证大直径长钻孔灌注桩的整体质量。

(3)采用每回次实施孔身数据测量存储并蓝牙无线回传上位机从而得到灌注桩孔身三维轨迹,实现“准随钻测量”,将降低研发难度和成本,提高技术的可行性和产品推广应用性。

参考文献:

- [1] 井斜控制方案设计方法[J].石油学报,2015,36(7):890-896.
- [2] 史佩栋.实用桩基工程手册[M].北京:人民交通出版社,1999.
- [3] 池跃君,顾晓鲁.大直径超长灌注桩承载性状的试验研究[J].工业建筑,2000(8):26-29.
- [4] 李政.数字测斜系统的设计与实现[D].武汉:武汉科技大学,2009.

- [5] JTJ O41—2000,公路桥涵施工技术规范[S].
- [6] JTGF 80/1—2004,公路工程质量检验评定标准[S].
- [7] 郭先敏,成冠琪,蔡西茂,等.全姿态随钻陀螺测斜技术[J].石油机械,2016,44(6):1-6.
- [8] 汤国起,肖圣泗.钻孔测斜技术的现状与开发应用前景[J].探矿工程,1999(S1):235-238.
- [9] 王岚.钻孔测斜技术发展现状及展望[C]//安全高效煤矿地质保障技术及应用——中国地质学会学术年会文集,2007.
- [10] 李番军.连续测斜仪研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006.
- [11] 王德义,孙联璧,李秀芬.单点照像测斜仪:CN94209529.4[P].1994.
- [12] 孙联璧,王晓强,王德义.多点照像测斜仪:CN94209530.8[P].1994.
- [13] 桂德洙.浅谈钻井测斜仪[J].石油钻采工艺,1999,21(5):45-49.
- [14] 刘白雁,王新宇,杜勇刚,等.井斜实时测量方法研究[J].中国测试技术,2007,33(4):5-8.
- [15] 刘玉江,吕轲.国外FEWD技术简介[J].石油知识,1999(1):25-26.
- [16] 贾炜镔.50型有线随钻测斜定向系统及现场应用[J].石油工业技术监督,1994(6):23-24.
- [17] 汪海阁,苏义脑.直井防斜打快理论研究进展[J].石油学报,2004,25(3):86-90.
- [18] 高宝奎,高德利.直径防斜原理综述[J].石油钻采工艺,1996,18(6):8-13.
- [19] 孙岗.防斜打快技术现状与对策[J].石油天然气工业,2003,23(3):67-69.
- [20] 张绍槐,张洁.21世纪中国钻井技术发展与创新[J].石油学报,2001,22(6):63-68.
- [21] 桂德洙.浅谈钻井测斜仪[J].石油钻采工艺,1999,21(5):45-49.
- [22] 熊育坤.国外井下随钻测量传输系统概述[J].石油机械,1990,18(4):23-26.
- [23] McDonald W J. Four different systems used for MWD[J]. Oil & Gas J., 1978,76(14):115-124.
- [24] Marvin, Ziemer, Kelly A, et al. Mud pulse MWD systems report[R]. JPT, 1981.
- [25] 王宁.水平井随钻测量技术[C]//水平井配套技术专题调研报告集.1992.
- [26] 王若.随钻测量技术发展史[J].石油仪器,2001,15(2):5-7,15.
- [27] 赖信坚.随钻测量技术与传感器原理探讨[J].石油钻采工艺,1991,13(4):9-17.
- [28] 张涛,鄢泰宁,卢春华.无线随钻测量系统的工作原理与应用现状[J].西部探矿工程,2005(2):126-128.
- [29] 田树林.SDI-MWD无线随钻测量仪信号质量的影响因素分析及控制[J].石油钻探技术,2004,32(4):78-79.
- [30] 苏义脑,窦修荣.随钻测量、随钻测井与录井工具[J].石油钻采工艺,2005,27(1):74-78.
- [31] 刘修善,苏义脑.钻井液脉冲信号的传输特性分析[J].石油钻采工艺,2000,22(4):8-10.
- [32] 何书山,刘修善.钻井液正脉冲信号的衰减分析[J].钻采工艺,2001,24(6):1-3,12.
- [33] 刘修善,郭钧.钻井液脉冲传输速度的分布规律[J].钻采工艺,2000,23(4):74-76.
- [34] 刘修善,岑章志,苏义脑.钻井液脉冲传输速度的影响因素分析[J].石油钻采工艺,1999,21(5):1-4,9.
- [35] 房军,苏义脑.随钻测量阀控制液压信号发生器动态数学模型[J].石油机械,2004,32(6):26-28.
- [36] 房军,苏义脑.液压信号发生器基本类型与信号产生的原理[J].石油钻探技术,2004,32(2):39-41.
- [37] GB/T 50202—2002,建筑地基基础工程施工质量验收规范[S].
- [38] DB/T 29-112—2010,钻孔灌注桩成孔、地下连续墙成槽检测技术规程(天津)[S].