

动力调谐陀螺钻孔测斜仪的开发与应用

季伟峰, 李 忠, 赵燕来

(中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 610081)

摘 要:动力调谐陀螺钻孔测斜仪是一种新型精密测斜系统,它利用惯性导航技术来进行钻孔测量,该系统可以自动寻北,各测点之间数据没有关联,消除了以往陀螺测斜仪的累计误差,提高了钻孔测斜精度,适用于在有磁干扰的钻孔、钻杆和套管内进行轨迹测量。介绍了动力调谐陀螺钻孔测斜仪的构成、测量原理、特点及应用情况等。

关键词:动力调谐陀螺;加速度计;测斜仪

中图分类号:P634.7 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2008)01-0033-03

Development and Application of Dynamically Tuned Gyro Inclinometer/JI Wei-feng, LI Zhong, ZHAO Yan-lai (The Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 610081, China)

Abstract: The article briefly introduces the configuration, measuring principle, characters and application of the dynamically tuned gyro inclinometer. It is a new type of inclinometer system, can automatically seek north by inertial navigation technique, and each measure point data has no connection with total amount error of former gyro inclinometer being removed and measure accuracy being raised. It is suitable for measurement of boring trace in borehole, drilling pipe and casing with magnetic interference.

Key words: dynamically tuned gyro; accelerometer; inclinometer

1 简介

陀螺钻孔测斜仪是一种不受地磁干扰和周围环境磁性影响的钻孔轨迹测量仪器,主要用于磁性矿区钻孔、套管、钻杆等进行钻孔轨迹测量,当然也可在其他不受磁干扰的钻孔中进行轨迹测量。早期使用的陀螺测斜仪称为框架式陀螺测斜仪,它的主要优点是抗冲击能力较强,可以实现连续测量,但它有 2 个主要缺点:一是测量过程繁琐,在下孔测量之前要进行地面定向,测量完成后,仪器还要在地面重新进行校准,以补偿误差数据;另一个缺点是结构上的内外框架支承的摩擦力造成陀螺漂移较大,且无法补偿消除,使其不仅精度低而且外径较大。

动力调谐陀螺(简称动调陀螺)是 20 世纪 60 年代出现的继框架式陀螺之后的一种新型陀螺。由于动调陀螺采用了无框架结构,转子通过挠性支承与驱动电机的转轴相连,在达到动力调谐时,平衡环振荡所产生的动力反弹性力矩抵消了挠性支承所固有的机械弹性力矩,使转子所受的弹性约束接近于零,从而使陀螺的漂移大大降低,可以达到 $0.01^\circ/\text{h}$,漂移的降低使测量的精度得到了大幅度的提高。与框架陀螺相比,由于改进了转子部分的结构,采用

刚性及灵敏度好的挠性接头做支承,减小了干扰力矩,故该种陀螺体积小,启动时间短,采用动调陀螺开发的测斜仪精度较框架陀螺测斜仪有很大改善。其缺点是抗冲击能力弱,测斜仪目前只能实现多点测量而不能连续测量。

国外生产的动调陀螺测斜仪,主要有俄罗斯和美国的产 品,服务对象主要是油田,价格较贵,约在 400 万元人民币左右,因国外实行技术保护,目前其产品已经无法实现进口,而仅向国内用户提供技术服务。

我所从 2003 年开始从事动调陀螺测斜技术的研究和产品开发,通过努力,目前已经研制出该测斜仪产品,并成功通过了野外试验、计量测试、产品鉴定等相关工作,为国产测斜仪产品增加了新品种,解决了以往陀螺测斜仪存在的累计误差问题,提高了钻孔轨迹测量精度。

2 动调陀螺钻孔测斜仪组成

动调陀螺钻孔测斜仪主要包括地面部分和井下部分,如图 1 所示,地面部分和井下部分通过测井电缆相连。

收稿日期:2007-10-20

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“高 度 钻 孔 新 器 具 新 工 艺 研 究”(编 号:科[2002]021-01)

作者简介:季伟峰(1961-),男(汉族),江苏江阴人,中国地质科学院探矿工艺研究所教授级高级工程师,探矿工程专业,从事钻孔测斜仪、岩土工程监测仪器和地质灾害监测防治技术研究,四川省成都市一环路北二段 1 号,jwf@cgiat.com;李忠(1972-),男(汉族),四川遂宁人,中国地质科学院探矿工艺研究所高级工程师,探矿工程专业,硕士,从事钻孔测斜仪及岩土工程监测仪器、仪表研究开发工作,lizhong_iet@126.com。

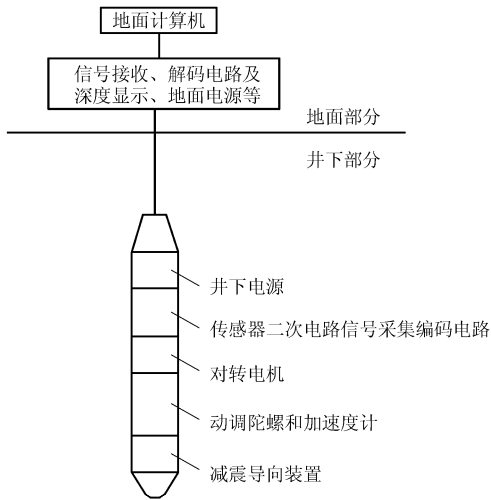


图 1 动调陀螺钻孔测斜仪结构图

2.1 地面部分

地面部分主要包括信号接收和解码电路、深度显示、地面电源和计算机。

(1) 信号接收和解码电路的作用是接收从井下发送到地面的信号, 解码后再转发到地面计算机进行处理。

(2) 深度显示部分是接收绞车控制系统的光电脉冲信号, 将其转变成深度值并显示。

(3) 地面电源的功能是将交流电源转变成直流电源, 供井下传感器和电路部分使用, 与信号接收和解码电路以及深度显示等组装在一起, 成为地面控制箱。

(4) 地面计算机的功能是根据井下发送到地面的陀螺和加速度计信号值, 计算出仪器所在钻孔位置的空间方位, 即顶角、方位角和工具面角, 同时通过其发出控制指令对井下仪器进行不同的操作。

2.2 井下部分

井下部分包括动调陀螺和加速度计传感器组成的惯性体组件、对转电机、井下二次电源、数据采集及编码电路和陀螺、加速度计二次电路等。

(1) 惯性体是整个仪器的核心部件, 它由 2 个石英挠性加速度计和 1 个双轴动调陀螺构成。动调陀螺与加速度计采用捷联式机械编排, 将动调陀螺与加速度计直接安装在具有精确定位基准的惯性体上, 组成惯性体组件, 即 2 个加速度计固定在惯性体的 2 个正交平面上, 加速度计的输出轴与惯性体组件的轴线垂直, 动调陀螺的自转轴与惯性体组件的轴线重合。

(2) 对转电机的作用是使惯性组件在测量时作相差 180° 的两次测量, 从而消除其惯性组件的固定

漂移误差。

(3) 传感器二次电路包括陀螺动力调谐反馈系统以及加速度计的二次电路等。

(4) 信号采集与编码电路完成对陀螺和加速度计的数据采集、控制及井下系统与地面系统之间的通讯等功能。它接收到地面发来的命令后, 对其进行解码后完成各自的功能。

(5) 井下二次电源的作用是将井上供给的高压直流电源进行变换, 得到低压直流电源, 为井下系统提供工作电压。

3 测量原理

动调陀螺钻孔测斜仪的测量模式是将测斜仪下放到某一预定位置, 使测斜仪保持稳定, 测斜仪的动调陀螺、加速度计分别敏感地球自转角速度 ω_e 和地球重力加速度 G , 根据动调陀螺和加速度计的输出值计算出该位置处钻孔的方位角 A 、顶角 I 和仪器的工具面角 T , 至此完成一个点的测量, 再把测斜仪移动到另一位置, 重复上述动作, 再进行该点的测量。

顶角 I 、方位角 A 和工具面角 T 的解算过程如下: 以动调陀螺钻孔测斜仪坐标系 (即测量装置坐标系) 为参考坐标系, 逆时针方向转动为正向, 并设动调陀螺测斜仪所在的纬度为 φ 。坐标变换情况如下: 地理系东北天 ($OEN\xi$ 或 $OX_0Y_0Z_0$) 先绕 OZ_0 正向转动角 A 到 $OX_1Y_1Z_1$, 再绕 OY_1 正向转动角 I 到达 $OX_2Y_2Z_2$, 最后绕地 OZ_2 向转动角 T 到达 $OX_3Y_3Z_3$, $OX_3Y_3Z_3$ 即为动调陀螺钻孔测斜仪坐标系。其中角 A 为方位角, 角 I 为顶角, 角 T 为工具面角, 如图 2 所示。

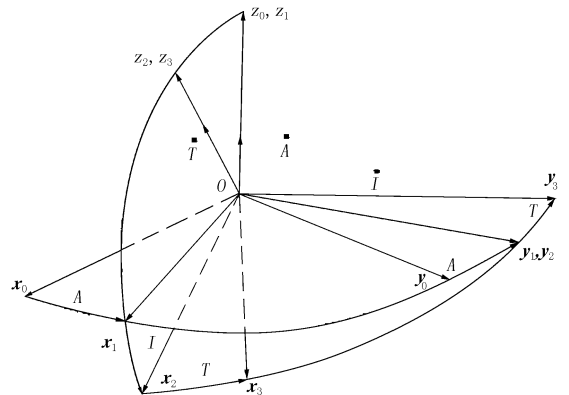


图 2 动调陀螺钻孔测斜仪坐标变换示意图

地理坐标系与仪器坐标系间的方向余弦阵 (坐标变换关系) 为:

$$C_0^3 = C_2^3 C_1^2 C_0^1 = \begin{bmatrix} \cos T & \sin T & 0 \\ -\sin T & \cos T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos I & 0 & -\sin I \\ -0 & 1 & 0 \\ \sin I & 0 & \cos I \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos A & \sin A & 0 \\ -\sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos A \cos I \cos T - \sin A \sin T & \sin A \cos I \cos T + \cos A \sin T & -\sin I \cos T \\ -\cos T \cos I \sin T - \sin A \cos T & -\sin A \cos I \sin T + \cos A \cos T & \sin I \sin T \\ \cos A \sin I & \sin A \sin I & \cos I \end{bmatrix}$$

只要测得沿探管坐标轴上的地球角速度 ω_x 、 ω_y 和重力加速度 a_x 、 a_y 这 4 个参数和给定当地的纬度即可求得探管的方位角、顶角和工具面角,其计算公式为:

$$\text{顶角: } I = \arcsin \frac{\sqrt{a_x^2 + a_y^2}}{g}$$

$$\text{工具面角: } T = -\arctg \frac{a_y}{a_x}$$

方位角:

$$A = \arctg \frac{g(a_x \omega_x + a_y \omega_y) + \omega_c \sin \varphi (a_x^2 + a_y^2)}{(a_x \omega_y - a_y \omega_x) \sqrt{g^2 - (a_x^2 + a_y^2)}}$$

由此可知顶角 I 和工具面角 T 只与加速度计的输出值有关,而方位角 A 与动调陀螺和加速度计的输出值都有关。

4 主要特点及适用范围

动调陀螺钻孔测斜仪是利用惯性导航技术来进行钻孔测量,它利用了惯性导航装置自主性强、导航精度高、可靠性好的特点,采用双轴动调陀螺和加速度计传感器组成的捷联式寻北系统,通过陀螺测量出地球自转角速率的分量、通过加速度计测量地球重力加速度分量,再通过相关公式计算出钻孔顶角、方位角和工具面角。该钻孔测斜仪具有以下特点:

(1) 漂移小、精度高、各测点之间的数据没有关联,消除了以往陀螺测斜仪的累计误差,有效地提高了钻孔轨迹测量结果的准确性。

(2) 工作过程自动寻北,不需要地面初始定向,测量前后均无需校北,消除了人为误差。

(3) 不受地质和周围环境影响,抗磁性干扰,可在钻杆、磁性套管及磁性矿区使用。

动调陀螺钻孔测斜仪主要用于:

(1) 在钻杆、油管、套管以及裸眼井中进行钻孔轨迹的测量。

(2) 在受磁性干扰的矿区钻孔中进行轨迹的测量。

(3) 开窗侧钻定向等。

5 应用情况及效果

动调陀螺钻孔测斜仪已在四川彭州、米易、西昌和湖南安江等地进行了多次钻孔测量,获得了满意的效果。

5.1 彭州勘查钻孔测量

该钻孔位于四川省彭州市通济镇雾坪村,为石灰岩矿地质勘查钻孔,钻孔孔深 260 m,测量目的是为计算矿产储量提供依据,通过测量数据较好地完成了储量计算。

5.2 米易先导孔测量

该钻孔是攀枝花钢铁(集团)公司白马铁矿一期工程 2 号溜井的先导孔,孔深 170 m,位于铁矿区,受磁性干扰,测量目的是为了计算出钻孔的三维坐标值,以保证该钻孔与下面的巷道能顺利贯通,通过测量提交的钻孔轨迹数据,顺利实现了对接。

5.3 西昌地热井测量

该钻孔是四川省西昌市的一个温泉井,其孔深 1018 m,钻孔内已下有套管,受磁性干扰,测量目的是进行钻孔质量的常规检查,测量精度达到了要求。

5.4 湖南安江竖井先导孔测量

该钻孔为邵怀高速隧道竖井导向孔,孔深 375 m,测量需要在钻杆内进行,受磁性干扰,其测量目的是计算钻孔三维坐标,以保证该钻孔与下面的隧道能顺利贯通,通过测量提交的钻孔坐标数据,目前已顺利贯通。

6 结语

动调陀螺钻孔测斜仪是依据航空寻北仪的惯性导航原理研制的一种新型精密测斜系统,其核心惯性体部分采用了航空尖端技术,特别适用于在有磁干扰的钻孔、钻杆和套管内进行测量。

该系统因采用动调陀螺替代传统陀螺测斜仪中使用的框架陀螺,从而使陀螺的漂移大大降低,漂移的降低使测量的精度得到了大幅度的提高。另外,在使用过程中,该系统可以自动寻北,测量前后无需校北,操作使用方便;而且其测点之间数据没有关联,消除了以往陀螺钻孔测斜仪中的累计误差。

(下转第 39 页)

通讯调试,可以与上位机联机通讯。

钻探数据采集系统首先在钻机性能测试进行试验应用,钻机检测的参数数据有:主轴转矩、主轴转速、钻进速度、累计进尺、给进/起拔力、油温度、机壳温度、马达温度、油泵温度、油缸温度、环境温度、系统压力、回油压力、马达进口压力、马达出口压力、油缸进口压力、油缸出口压力、输入功率、油泵流量、给进/起拔速度、冷却水压力,回转加载装置制动转矩、转速、吸收功率,钻机的输出功率、效率、机架变形参数等。数据采集系统是钻机测试系统的一个 CAN 现场总线网络节点,采集的数据通过 CAN 总线网络传送到上位机系统主控制器进行数据处理显示存储。根据钻机测试传感器的类型和测试范围,在钻探数据采集系统的键盘上,很方便的进行每一个数据通道模块的集成,零点的确定,测试量程范围,满度量程,显示量程的设定。更换成传感器后,可方便的在面板上用数字电位器重新设定参数数据,使用非常方便。在钻机测试系统中配有上位工控机,操作设置更加方便。

钻机测试技术性能指标如下:

(1)温度通道:测量范围 $-20 \sim 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$; 测量精度 $\pm 0.2\% \text{ F} \cdot \text{S}$; 传感器形式为 Pt100 或 Cu50; 4 位 LED 循环显示。

(2)压力通道:测量范围 $0 \sim 60 \text{ MPa}$; 测量精度 $\pm 0.2\% \text{ F} \cdot \text{S}$; 传感器形式为压阻式; 4 位 LED 循环显示。

(3)流量通道:测量范围 $0 \sim 400 \text{ L/min}$; 测量精度 $\pm 0.2\% \text{ F} \cdot \text{S}$; 传感器形式为速度式涡轮二线标准输出传感器; 4 位 LED 循环显示。

(4)给进/起拔力通道:测量范围 $0 \sim 500 \text{ kN}$; 测

量精度 $\pm 0.25\% \text{ F} \cdot \text{S}$; 传感器形式为电阻应变式拉压力 mv 级输出传感器; 4 位 LED 循环显示。

(5)转矩通道:测量范围 $0 \sim 15000 \text{ N} \cdot \text{m}$; 测量精度 $\pm 0.2\% \text{ F} \cdot \text{S}$; 传感器形式为相位输出传感器; 6 位 LED 循环显示。

(6)转速:测量范围 $0 \sim 5000 \text{ r/min}$; 测量精度 $\pm 1\% \text{ F} \cdot \text{S}$; 传感器形式为磁电式脉冲输出传感器; 4 位 LED 循环显示。

(7)功率:测量范围 $0 \sim 150 \text{ kW}$; 测量精度 $\pm 0.2\% \text{ F} \cdot \text{S}$; 传感器形式为功率变送器; 4 位 LED 循环显示。

(8)其他参数:零点、范围、量程、满度、精度取决于对应的传感器。

7 结语

钻探数据采集系统使用一年多以来,运行稳定,采集数据准确,使用方便,到达了设计的目的。

钻探参数数据智能采集系统,使用方便,采集通道适用于各种不同类型的传感器;通道组合多达 1024 个,给大量数据采集带来方便;系统的每个通道分别按数字键调零准确可靠;采用数字方式标定,只需输入传感器量程和显示范围;报警值可任意设置;与上位机通信握手也很方便,数据采集系统,采用一根普通双绞线连接现场 CAN 智能模块,现场的连线很少,增加新的现场测量设备,就近接在原有的 CAN 智能模块上;可单独使用,也可以与系统配套使用;系统适用于钻探现场的恶劣环境,也可用于一般工业环境。钻探参数数据智能采集系统的使用给数据采集控制系统集成将会带来极大的方便,提高工作效率,将会大大提高社会效益和经济效益。

(上接第 35 页)

该成果主要面向国内,覆盖全国市场,项目成果能够用于地质找矿勘探、水利水电、能源、核工业、化工、煤炭、交通、基础建设等领域内的钻孔测斜。

随着经济发展和国家对地质工作的进一步加强,各行业领域中的钻探工作量和资金投入也在不断增多,2006 年,仅中央地勘单位的钻探总进尺就超过了 250 万 m ,而其他商业性的钻探工作量就更多,对钻孔测斜仪的需求也将不断增大,因此项目成果具有十分良好的市场开发潜力。

通过多个钻孔的测量使用,证明该仪器测量准确、可靠,操作简便,适用面广,是今后一段时间钻孔测斜仪的主要发展方向,其应用前景良好。

还需努力的方面是要提高仪器的抗冲击能力和降低其产品成本,以期更好的为地质钻孔测斜服务。

参考文献:

- [1] 北京兴捷科技发展有限公司. 陀螺测斜测井系统技术手册 [Z]. 2003.
- [2] 北京兴捷科技发展有限公司. 陀螺测斜测井系统操作手册 [Z]. 2003.
- [3] 滕强院. 动调陀螺测斜仪在连续测量模式下的数据传输方法研究及实现 [D]. 北京:北京航空航天大学, 2001.
- [4] 林士鄂. 动力调谐陀螺仪 [M]. 北京:国防工业出版社, 1983.
- [5] 郭秀中, 于波, 陈云相. 陀螺仪理论及应用 [M]. 北京:航空工业出版社, 1987.
- [6] 邓正隆. 惯性导航原理 [M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 1981.