

水平定向对接穿越及导向技术研究

王瑞¹, 王伯雄¹, 康健², 张金¹

(1. 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084; 2. 装甲兵工程学院再制造系, 北京 100072)

摘要:水平定向对接穿越技术有效解决了传统水平定向钻进无法完成长距离穿越, 以及无法穿越两侧均含砾石等复杂地层的问题。介绍了水平定向对接穿越技术以及该技术在国内外应用, 详细分析了基于三轴加速度计和三轴磁阻传感器的对接穿越导向技术, 基于轴向磁铁产生的磁场建立了对接模型。

关键词:非开挖; 水平定向钻进; 对接穿越; 导向

中图分类号: P634.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2009)09-0069-03

Study of Horizontal Directional Intersection and Guidance Technology/WANG Rui¹, WANG Bo-xiong¹, KANG Jian², ZHANG Jin¹ (1. Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Department of Remanufacture, Armored Force Engineering Institute, Beijing 100072, China)

Abstract: The horizontal directional intersection (HDI) technology effectively solves the problems that the long-distance crossing and the gravel stratum crossing can't be realized by the traditional horizontal directional drilling (HDD). This paper introduced the horizontal directional intersection technology and its application both at home and abroad, analyzed the crossing intersection guidance technology that was based on triaxial accelerometers and triaxial reluctance sensor in great detail; and intersection model was established based on the magnetic field generated from an axial magnet.

Key words: no-dig; horizontal directional drilling (HDI); intersection; guidance

0 引言

水平定向钻进技术是近 40 年发展起来的一项非开挖铺设管线技术, 以其经济、高效、污染小、不影响交通等优点, 已经逐渐替代了开挖沟槽铺设管线的方法。传统的水平定向钻进技术利用水平定向钻机, 以导向孔轨迹可控的方式进行单向钻进, 这对于穿越距离短、精度要求低的穿越作业比较容易实现, 但在穿越距离超过 2000 m 时, 由于受地质条件和钻杆强度的制约, 穿越时地层对钻头和钻杆的阻力和阻力矩增大, 钻杆会发生变形、失稳等现象, 使得钻头的方向控制变得困难, 难以保证钻头出土时出土点的准确度。以河流穿越为例, 大型河流的穿越距离都在 2000 m 以上, 仅在国内, 2007 年 3 月钱塘江的穿越距离就达到了 2454 m, 2008 年 1 月珠江的穿越距离更是达到了 2630 m^[1]。

另外, 在穿越含有砾石等复杂地层时, 为阻隔砾石塌陷破坏已成形的导向孔, 必须在入土点和出土点铺设套管, 这就要求入土点侧钻机的钻杆能够精确通过套管。但就目前水平定向钻进的导向水平而言, 达到此导向精度是很困难的^[2]。

如果能够在出土点预先钻好导向孔, 然后引导

入土点侧钻机的钻杆进入该导向孔, 则钻杆所受到的阻力和阻力矩就会大大减小, 出土点的位置就可以准确确定, 同时入土点侧钻机的钻杆也可以顺利通过套管, 这就很好地解决了上述两个问题。

1 水平定向对接穿越原理

水平定向对接穿越是使用两台钻机首先在入土点和出土点两侧分别进行单向穿越, 在两侧钻头按照预定轨迹到达对接区域时, 通过导向系统完成两侧钻头的定位和导向孔对接, 进而出土点侧钻杆从导向孔中退出, 同时入土点侧钻杆进入出土点导向孔至出土点, 从而完成整个穿越作业, 如图 1 所示。

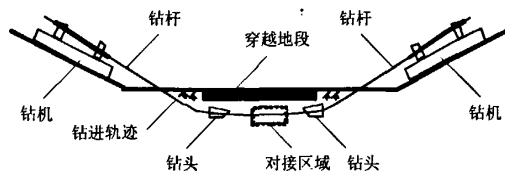


图1 水平定向对接穿越示意图

2 对接穿越应用情况

水平定向对接穿越由美国的 Prime Horizontal

收稿日期: 2009-04-08

作者简介: 王瑞(1982-), 男(汉族), 安徽人, 清华大学博士研究生, 仪器科学与技术专业, 研究方向为精密测试与仪器, 北京市清华大学精密仪器与机械学系 4202 室, thu_wr_npu@126.com。

Ltd. 公司与 Vector Magnetics 公司于 1999 年联合开发成功,并于 2001 年首次将该技术应用到穿越工程中^[3]。

在国外,水平定向对接穿越的最长距离为美国波斯湾 11 km 穿越,该次穿越共分 4 段进行,其中最长的一段穿越距离超过 4 km;NACAP 公司采用该技术在法国的 Rhone(隆河)河谷成功穿越河谷两侧厚重的砾石层,铺设一条总长超过 1036 m、管线直径 609.6 mm 的钢质天然气管道;在德国北部莱茵河,使用该技术完成的水平定向钻岩石穿越距离达 2500 m,其中岩石的最大抗压强度达到 160 MPa;2005 年 8 月,德国 LMR 钻进公司采用该技术在易北河成功铺设一条长 2626 m、管线直径 350 mm 的输油 PE 管线。

在国内,2005 年,华元公司采用该技术在舟山外钓岛至册子岛海底管道定向钻穿越工程中成功铺设了长 2350 m、管线直径 610 mm 的海底管道;2007 年 3 月和 2008 年 1 月,中石油管道局穿越公司采用该技术分别在钱塘江和珠江成功铺设长 2454 m、管线直径 813 mm 和长 2630 m、管线直径 660 mm 的天然气管道。

3 对接穿越导向技术

在对接穿越的单向钻进阶段,通过实时测量钻头的姿态和位置,随时了解钻孔是否偏离设计轨迹,以便采取合适的控制手段进行纠偏,保证导向孔能够准确地按照设计轨迹延伸;在对接区域,更是要通过导向系统完成入土点和出土点侧钻机钻头的精确定位,从而实现导向孔的准确对接。因此,导向技术就成了定向钻对接穿越施工中的关键技术之一。

3.1 单向钻进导向

在穿越过程中,钻孔方向是通过控制钻头上的造斜面决定的,当钻头一边回转一边给进时,则造斜面在一周内所受阻力不变,钻孔实现直线钻进;当钻头只给进而不回转时,钻头的造斜面在造斜方向受到阻力,钻孔将向造斜方向弯曲。这样,就可以根据钻具的当前姿态及时调整钻头的造斜方向,实现可控向钻进。因此,必须实现钻具姿态的实时测量^[4]。在导航学中,载体的姿态测量常用航向角、

俯仰角和横滚角来表示,与之对应,在对接穿越中用的是倾角、方位角和工具面向角来表示姿态。倾角为钻具轴线与竖直方向之间的夹角,它反映了钻具相对水平面的倾斜程度。方位角为钻具轴线在水平面的投影与正北方向之间的夹角,它反映了水平面内钻具运动的方向。工具面向角为钻头的造斜方向在钻具横截面内的投影与某一参考方向之间的夹角,它反映了导向孔轨迹下一步的延伸方向。

三个姿态角的测量主要是借鉴惯性测量技术,即利用三轴加速度计和三轴磁阻传感器对地球的重力加速度和地磁场强度进行测量。建立地理坐标系 $ONED$ 和钻具坐标系 $oXYZ$,如图 2 所示。其中, N 、 E 、 D 轴分别指向正北、正东和重力方向, X 轴沿钻具轴线指向钻头前进方向, Z 轴位于钻具横截面内指向钻头造斜方向, Y 轴与 X 轴、 Z 轴垂直并构成右手正交坐标系。此时,倾角为 X 轴与竖直方向之间的夹角,用 θ 表示;方位角为 X 轴在水平面的投影与正北方向之间的夹角,用 α 表示;工具面向角为 Z 轴与钻孔垂直面的夹角,用 γ 表示。角度的方向都是按照 $oXYZ$ 坐标系右手系的方向为正。 $oXYZ$ 相对 $ONED$ 的 3 个转角分别为倾角、方位角和工具面向角。

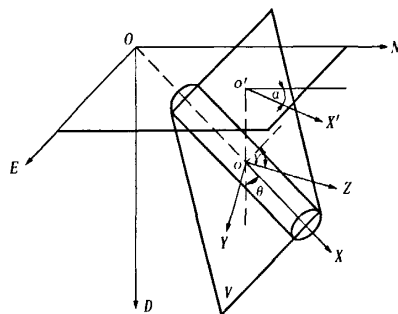


图2 地理坐标系和钻具坐标系

根据欧拉刚体的有限旋转定理,载体在空间中的姿态可用载体坐标系相对于地理坐标系的有限转动来表示,每次转动的角度即为欧拉角。那么,钻具坐标系显然可以看成是地理坐标系绕对应的轴经过 3 次坐标旋转得到的。按照上述定义,3 次旋转的角度即为倾角、方位角和工具面向角。每次旋转都可以用相应的变换矩阵来表示,则两坐标系之间的变换矩阵 R 表示为:

$$R = R_{\alpha} R_{\theta} R_{\gamma} = \begin{bmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha & 0 \\ -\sin\alpha & \cos\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin\theta & 0 & -\cos\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \cos\theta & 0 & \sin\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\gamma & \sin\gamma \\ 0 & -\sin\gamma & \cos\gamma \end{bmatrix} \quad (1)$$

重力加速度 g 在两坐标系之间的关系为:

$$[G_X, G_Y, G_Z]^T = R_g [G_N, G_E, G_D]^T \quad (2)$$

式中: G_X, G_Y, G_Z ——重力加速度 g 在 X, Y, Z 三轴上的分量, 由三轴加速度计测量得到; G_N, G_E, G_D ——重力加速度 g 在 N, E, D 三轴上的分量。

容易得到:

$$G_N = 0 \quad (3)$$

$$G_E = 0 \quad (4)$$

$$G_D = g \quad (5)$$

将式(1)、(3)、(4)、(5)代入式(2), 求解得:

$$\theta = \arctan \frac{\sqrt{G_Y^2 + G_Z^2}}{-G_X} \quad (6)$$

$$\gamma = \arctan(G_Y/G_Z) \quad (7)$$

地磁场强度 H 在两坐标系之间的关系为:

$$[H_X, H_Y, H_Z]^T = R_g [H_N, H_E, H_D]^T \quad (8)$$

式中: H_X, H_Y, H_Z ——地磁场强度 H 在 X, Y, Z 三轴上的分量, 由三轴磁阻传感器测量得到; H_N, H_E, H_D ——地磁场强度 H 在 N, E, D 三轴上的分量。

忽略地磁偏角和地磁倾角, 容易得到:

$$H_N = H \quad (9)$$

$$H_E = 0 \quad (10)$$

$$H_D = 0 \quad (11)$$

将式(1)、(9)、(10)、(11)代入式(8), 求解得:

$$\alpha = \arctan \frac{-(H_Y \cos \gamma - H_Z \sin \gamma)}{\sin \theta (H_Y \sin \gamma + H_Z \cos \gamma) + H_X \cos \theta} \quad (12)$$

将式(6)、(7)代入式(12), 求解得:

$$\alpha = \arctan \frac{g(H_Y G_Y - H_Y G_Z)}{H_X(G_Y^2 + G_Z^2) - G_X(H_Y G_Y + H_Z G_Z)} \quad (13)$$

这样, 就可以通过三轴加速度计和三轴磁阻传感器的测量值, 计算出倾角、方位角和工具面向角, 从而确定钻具的姿态。

3.2 对接导向

在导向孔对接过程中, 单纯依靠之前的姿态测量方法无法满足两钻头相对位置的精确定位, 为此采用在一侧钻具中增加一个轴向磁铁, 建立人工磁场, 利用另一侧的随钻测量单元测量其相对于轴向磁铁在三轴上的磁场强度, 以确定两侧钻头的相对位置^[5]。

由于轴向磁铁在钻具末端处磁场的非连续性, 以及对接时两侧钻头间距离远大于轴向磁铁长度, 因此可以将轴向磁铁近似看作一个磁极, 其磁场以磁极为中心径向发散, 大小与距磁极距离的平方成

反比。图3表示了轴向磁铁所在钻具在靠近另一侧钻具时, 随钻测量单元测量到的磁场强度三轴分布。假设轴向磁铁所在钻具从右向左靠近另一侧钻具, 如图4所示, 由图3中 H_X 先正后负分布, 可以推断出磁极的极性为正。由 $H_Y = 0$ 可以推断出轴向磁铁所在钻具在另一侧钻具的左右方向而不是上下方向。而结合 $H_Z > 0$ 和磁极的极性, 可以推断出轴向磁铁所在钻具位于另一侧钻具的左方。

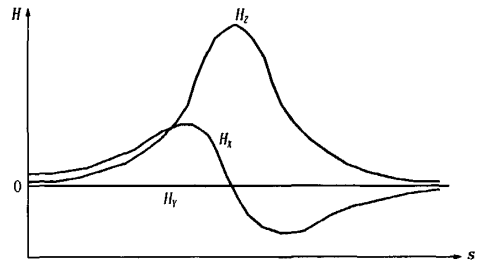


图3 轴向磁铁磁场在三轴上的分布

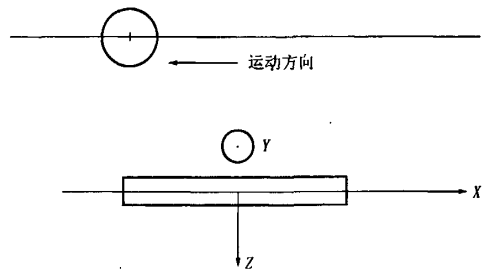


图4 两侧钻具相对位置关系

4 结论

在水平定向钻进中运用对接穿越技术突破了穿越距离局限的“瓶颈”, 理论上可以达到 5000 m 的穿越距离, 在穿越含有砾石层的岩石时, 也可应用对接穿越技术使入土点侧钻机钻头顺利通过出土点套管。因此水平定向对接穿越技术使水平定向钻进技术的应用得到了扩展, 而其中关键的导向技术的突破保证了对接穿越的成功实施, 将对国内的穿越市场产生深远的影响。

参考文献:

- [1] 尹刚乾, 汤学峰. 磨刀门水道水平定向钻穿越施工技术[J]. 非开挖技术, 2008, 25(1-2): 45-47.
- [2] 楼岱莹. 对接穿越技术在水平定向钻穿越中的应用[J]. 非开挖技术, 2006, 23(4): 1-3.
- [3] [http://www.prime-horizontal.com/\[DB/OL\]](http://www.prime-horizontal.com/[DB/OL]).
- [4] 徐涛, 罗武胜, 吕海宝, 等. 地下定向钻进姿态测量系统的设计[J]. 中国惯性技术学报, 2004, 12(2): 5-8.
- [5] 霍宇翔. 隆河河谷的对接穿越[J]. 非开挖技术, 2004, 21(2-3): 80-82.