

基于桩基础全断面作业的竖井掘进机结构设计与分析

雷腾¹ 李双辉² 蒋强²

1 国网重庆市电力公司建设分公司, 重庆 401120

2 重庆理工大学机械工程学院, 重庆 400054

[摘要]为解决传统桩基础施工中机械化程度低、效率低、人员劳动强度大、易发生安全事故等问题, 研发一种小型全断面竖井掘进机。该竖井掘进机可实现掘进、出渣、支护同步进行, 全过程机械化高效无人下井施工, 一次施工即可成井。针对小型全断面竖井掘进机进行了施工工艺、工作原理及结构、力学特性、静力学强度、运动学方面的研究。结果表明: 该全断面竖井掘进机结构设计合理、力学特性分析合理、有限元法分析及运动学分析合理, 在竖井掘进机结构设计方面有一定参考价值。

[关键词]桩基础; 竖井; 全断面; 掘进机

DOI: 10.33142/ect.v2i2.11351

中图分类号: TH113.1

文献标识码: A

Structural Design and Analysis of Vertical Shaft Excavation Machine Based on Full Section Operation of Pile Foundation

LEI Teng¹, LI Shuanghui², JIANG Qiang²

1 Construction Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing, 401120, China

2 College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing, 400054, China

Abstract: In order to solve the problems of low mechanization, low efficiency, high labor intensity, and easy occurrence of safety accidents in traditional pile foundation construction, a small full face vertical shaft boring machine has been developed. This vertical shaft boring machine can achieve synchronous excavation, slag discharge, and support, and the entire process is mechanized and efficient for unmanned construction. The well can be completed in one construction. A study was conducted on the construction technology, working principle and structure, mechanical characteristics, static strength, and kinematics of a small full face vertical shaft boring machine. The results indicate that the structural design of the full section vertical shaft boring machine is reasonable, the mechanical characteristics analysis is reasonable, the finite element method analysis and kinematic analysis are reasonable, and it has certain reference value for the structural design of the vertical shaft boring machine.

Keywords: pile foundation; vertical shaft; full section; tunneling machine

引言

在国家大力支持下, 每年特高压线路实施工程不断增加, 为保障工程顺利进行, 就必须研发先进的掘进设备保障电线路杆塔桩基础掘进工作快速高效完成^[1]。目前桩基础主要施工方式有人工挖掘、旋挖机挖掘、钻爆法、岩石锚杆钻机掘进^[2], 但机械化程度低、施工效率低。竖井掘进机作为一种先进的竖井施工装置, 其结构紧凑、机械化程度高、施工效率高、安全性高^[3], 因此将竖井掘进机技术用于桩基础挖掘。

在竖井掘进机的发展进程中, 已有学者对其施工工艺、装配、结构、未来发展方向进行了探索研究。丁张飞^[4]介绍了一种竖井掘进机并总结出其施工工艺。马明刚^[5]等提出了全断面竖井掘进机井下装配工艺。杨仁树^[6]等总结了竖井掘进机研究关键问题。康庆阳^[7]等提出了一种撑靴式竖向硬岩掘进机并对其实际应用进行了分析。吕旦^[8]等依托宁海抽水蓄能排风竖井工程对全面竖井掘进上排渣技术的应用进行了分析。本文基于项目要求研发了一种适用于桩基础施工的全断面竖井掘进机, 介绍了竖井掘进机钻井工艺、

结构组成与工作原理; 分析了设备工作过程的力学特性; 基于有限元分析方法对装备关键零部件强度进行了分析; 通过运动学对掘进机在竖井空间下的基本运动进行了分析^[9]。

1 竖井掘进机钻井工艺

本项目研发的小型全断面竖井掘进机通过参考应用成熟的隧道掘进机和反井钻机, 采用独特的全断面刀盘设计。结合工程条件设计真空泵吸渣装置、喷涂支护装置, 实现竖井机械化一次成井、全过程无人下井。其整体施工过程如图 1。

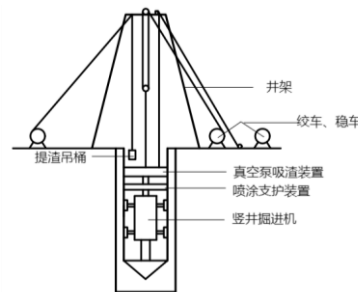


图 1 竖井掘进机工艺简图

2 全断面竖井掘进机工作原理及结构

2.1 工作原理

如图 2 所示,在竖井掘进机开始工作前,需先挖掘出能够容纳竖井掘进机的空间,将掘进机按要求放置好,就开始钻进过程。首先通过液压油缸将 8 个支撑靴板推出并与井壁接触,提供钻进所需支撑力,驱动液压马达提供刀盘旋转所需扭矩,然后推进油缸启动提供刀盘所需破岩压力和推进刀盘缓缓向下运动,当推进油缸至最大行程时,也就完成了第一次钻进,此时掘进机通过刀盘支撑在井壁上,8 个支撑靴板通过液压油缸收回,推进油缸开始收缩至初始位,8 个支撑靴板再次与井壁接触且达到所需破岩支撑力后,就开始下一次钻进,如此往复循环至所需钻井深度^[10]。

2.2 参数与结构方案

装置设计主要参数:开挖直径 1.2~1.4m,掘进深度为 30m 左右,适用岩层强度为 120MPa 以下;刀盘转速为 0~20r/min,刀盘工作扭矩为 50kN·m,总推力为 600kN,总支撑力为 1000kN。

竖井掘进机由带合金齿的靴板通过液压油缸提供推力支撑在井壁上,采用双层十字支撑结构承受破岩过程中的反扭矩和反推力。该装备采用镶齿滚刀作为刀具按一定规律分布在特定锥度刀盘上进行钻进破岩,由推进液压油缸和液压马达分别为刀盘提供破岩所需压力和转动扭矩。该装备驱动力矩由液压马达提供,经行星减速器和齿轮箱减速达到所需破岩力矩。该装备采用真空泵将破碎的岩渣由刀盘底部空间抽至外部空间^[11]。根据钻井工艺和工程条件对竖井掘进机整体结构进行设计和方案选择,考虑到装备重量、功率负荷、高度限制、运输等因素最终完成掘进机的总体设计。竖井掘进机结构主要由破岩刀盘、驱动装置、支撑装置、推进装置、控制平台构成,如图 3 所示。

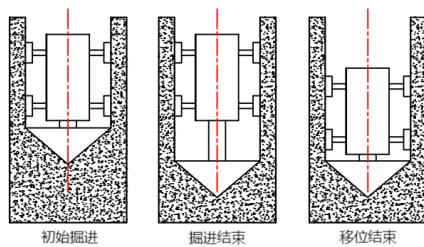


图 2 全断面竖井掘进机钻进过程

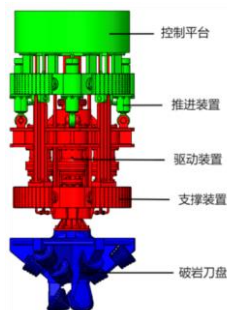


图 3 全断面竖井掘进机三维设计图

2.3 竖井掘进机部件设计与分析

2.3.1 破岩刀盘结构

破岩刀盘为镶齿滚刀提供合适的安装位置,将多把刀具按一定规律排列组合达到钻井直径要求。破岩刀盘在驱动系统作用下发生旋转,推进装置将刀盘上的滚刀压入岩层,此时刀盘上的滚刀发生旋转运动,岩层也逐渐解体形成岩渣。为了让岩渣顺利聚集在底部便于真空泵吸取,就必须找到合适的刀盘锥度,经大量分析最终确定刀盘锥度为 50°。为了掘进机能够高效破岩,采用六翼刀盘体结构,经过计算得出镶齿滚刀数量为 9 把。其中 3 翼为单把滚刀,3 翼为两把滚刀,以对称形式布置,使刀盘滚刀与岩面均匀接触,提高了破岩效率和保证了滚刀磨损情况一致。刀盘中间部位需留出空间便于排渣,因此刀盘中间部位是由三个单支点镶齿滚刀构成的中心钻头,还起着先导钻进作用。破岩刀盘主要由中心滚刀、破岩滚刀、六翼刀盘体、加强筋、连接法兰构成,如图 4 所示。

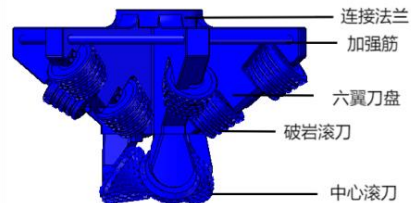


图 4 破岩刀盘结构

2.3.2 驱动系统结构

破岩刀盘所需驱动力矩由驱动系统提供,带动刀盘上的滚刀对岩石进行破碎。驱动系统力矩由 4 台低速大转矩液压马达提供,经二级行星减速器减速,带动 4 个小齿轮旋转,再经齿轮箱一级减速,达到所需破岩扭矩和输出转速,满足高效破岩需要。驱动系统结构主要由液压马达、行星减速器、齿轮箱、旋转轴、刀盘连接法兰等构成,如图 5 所示。

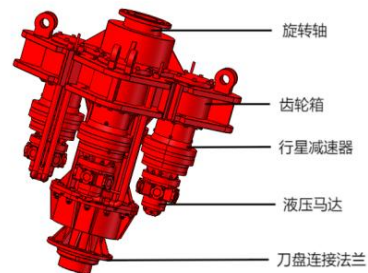


图 5 驱动系统三维结构图

2.3.3 支撑推进装置结构

支撑推进装置的作用主要是承受刀盘破岩时产生的反推力和反扭矩,并通过支撑靴板将这些力和力矩传递至井壁的岩层上。将支撑推进装置设计为分块式结构以便于运输和拆装,主要由上支撑架、下支撑架、支撑柱、支撑

靴板等构成,如图6所示。支撑装置采用双层十字支撑结构,在每层支撑架装四个支撑液压油缸,每个油缸都连接有支撑靴板,支撑靴板两边都设有辅助支撑杆,保证装置能够承受破岩带来的反推力和反扭矩,每层的液压油缸可单独运动和联合运动,可以通过液压油缸的伸缩起到一定的调向作用,这种结构有利于掘进机在不稳定地层工作。在上支撑架上安装四个液压油缸同步推进为刀盘提供所需破岩压力,在支撑柱上设有滑轨便于破岩刀盘在液压油缸作用时垂直向下运动。

2.3.4 出渣结构

竖井掘进机采用上排渣方式,通过锥形刀盘作用将岩渣聚集在底部,刀盘整体采用密封设计,再通过外置真空泵经刀盘中心空间和空心旋转轴将岩渣吸至外部集渣桶。

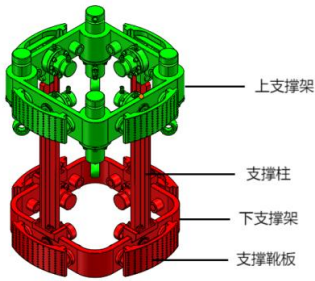


图6 支撑推进结构三维图

3 竖井掘进机力学特性分析

竖井掘进机在掘进时主要与岩石相互作用,分为刀盘破碎岩石和支撑靴板挤压井壁岩层。破岩刀盘上的镶齿滚刀在破碎岩石时,岩石会对竖井掘进机产生阻力,还会对刀具产生磨损作用,直接影响竖井掘进机的破岩效率。支撑靴板在液压油缸作用下为破岩提供支撑力,承受破岩带来的反推力和反力矩,保证竖井掘进机在破岩时的稳定。竖井掘进机在破岩时的受到的作用力主要有岩层对刀盘的反向推力 F_{dt} 、岩层对刀盘转动的反扭矩 M_d 、井壁对8个支撑靴板的反压力 F_{ni} 、自身重力 G_g 、井壁对8个支撑靴板的摩擦力 F_r (在推进力和驱动力矩作用下分解为轴向摩擦力 F_{ai} 和切向摩擦力 F_{ri}),如图7所示。

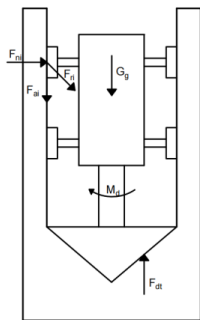


图7 竖井掘进机工作受力图

根据竖井掘进机工作受力图可知,8个支撑装置将承受掘进机工作时的所有载荷,因此必须保证井壁对支撑靴

板的摩擦力足够大,在摩擦系数一定的情况下,就必须保证支撑油缸的推力足够大。竖井掘进机在正常工作状态下,其轴向和切向受力处于平衡状态,得到8个支撑靴板的轴向摩擦力 F_{ai} 、自身重力 G_g 、岩层对刀盘的反向推力 F_{dt} 的关系式为:

$$\sum_{i=1}^8 F_{ai} = F_{dt} - G_g = F_d - m_1 g \quad (1)$$

当8个支撑靴板所受的轴向摩擦力相等时,可得到轴向摩擦力 F_{ai} 的关系式为:

$$F_{ai} = (F_t - m_1 g) / 8 \quad (2)$$

得到8个支撑靴板的切向摩擦力 F_{ri} 与岩层对刀盘转动的反扭矩 M_d 的关系式为:

$$\sum_{i=1}^8 F_{ri} = \frac{2M_d}{D} \quad (3)$$

当8个支撑靴板所受的切向摩擦力相等时,可得到切向摩擦力 F_{ri} 的表达式为:

$$F_{ri} = \frac{M_d}{4D} \quad (4)$$

得到推进装置4个液压油缸的推进力 F_t 与岩层对刀盘的反向推力 F_{dt} 的关系式为:

$$F_{dt} = F_t + m_2 g \quad (5)$$

每个支撑液压油缸提供的支撑力与 F_{ni} 相等,则岩石对掘进机的作用力可表示为:

$$F_d = F_t + m_2 g + F_n \quad (6)$$

式(1)-(6)中: m_1 为竖井掘进机整体框架重量; D 为两对称支撑靴板间的外接圆直径; m_2 为竖井掘进机在推进油缸作用下移动部分的总质量。

4 装备关键部件有限元分析

4.1 支撑靴板有限元分析

支撑靴板结构是掘进机在井壁的主要支撑部件,在掘进机工作过程中支撑靴板的受力情况直接影响掘进机性能,因此必须对支撑靴板做强度分析。

4.1.1 支撑靴板有限元模型建立

在不影响计算结果的前提下应尽量简化模型结构,以此提高求解速度。以有限元法对支撑靴板结构进行网格划分,如图8所示。网格为四面体结构,划分网格单元数量为51732、节点数量为158863。在网格划分前选取材料为高强度结构钢,材料屈服强度为 250×10^3 MPa,泊松比为0.3。

4.1.2 载荷与边界条件

根据掘进机工作时支撑靴板的受力情况,在支撑面添加固定约束,在垂直支撑面向外施油缸支撑力100kN,两辅助支撑杆共同施加竖直向下推力75kN,并添加重力加速度。支撑靴板施加边界条件如图9所示。

4.1.3 应力分析

由图 10 支撑靴板应力云图分析可知, 支撑靴板在工作时的应力都在 150MPa 以下, 三维模型局部的尖角会引起应力集中导致应力过大现象, 可利用圆角进行处理。因此支撑靴板受力情况良好, 满足掘进机工作要求。

4.2 齿轮箱有限元分析

齿轮箱在掘进机工作时直接受到推进装置的推力和破岩刀盘自身重量, 其受力情况会影响破岩刀盘的推进运动和旋转运动, 因此必须对此轮箱进行强度分析。

4.2.1 有限元模型建立

以有限元法对齿轮箱进行网格划分, 如图 11 所示。网格为四面体结构, 划分网格单元数量为 51732、节点数量为 158863。在网格划分前选取材料为高强度结构钢, 材料屈服强度为 $250 \times 10^3 \text{Mpa}$, 泊松比为 0.3。

4.2.2 载荷与边界条件

根据掘进机工作时支撑靴板的受力情况, 在齿轮箱底部添加固定约束, 在垂直箱体平面向下施加 150kN 推力, 在此轮箱底部施加 $50 \text{kN} \cdot \text{m}$ 力矩, 并添加重力加速度。齿轮箱施加边界条件如图 12 所示。

4.2.3 应力分析

由图 13 齿轮箱应力云图分析可知, 齿轮箱在工作时的应力都在 150MPa 以下, 三维模型局部的尖角会引起应力集中导致应力过大现象, 可利用圆角进行处理。因此齿轮箱受力情况良好, 满足掘进机工作要求。

5 竖井掘进机运动学分析

竖井掘进机主要的运动有支撑油缸的伸缩、推进油缸的伸缩、刀盘的旋转, 其在井中的位置主要受到 8 个支撑装置的影响, 要对竖井掘进机做准确的运动描述, 就需要掘进机某点的坐标值和姿态角, 因此在竖井掘进机上下支撑架各建立一个坐标系, 如图 14 所示。

设坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 为参考坐标系, 其坐标原点 O_1 在上支撑架中心点, X_1 和 Y_1 分别为大地的北向和东向, Z_1 为垂直竖井中心轴线向下。设坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 为竖井掘进机刚体坐标系, 其坐标原点 O_2 在下支撑架中心点, X_2 和 Y_2 分别为垂直和平行支撑靴板方向, Z_2 重合破岩刀盘的中心轴向向下。因此掘进机在机构运动下姿态的情况可用向量 $n=[x_2 \ y_2 \ z_2 \ \alpha \ \beta \ \theta]^T$ 来描述, 刚体坐标系到参考坐标系的变换关系用矩阵 C 表示。

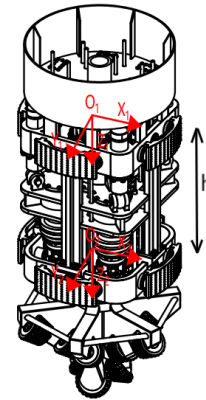


图 14 机构运动三维坐标系

竖井掘进机在初始状态, 即支撑油缸伸长量和竖井掘进机姿态角都为 0 时, 知两坐标系之间的距离为固定值, 则刚体坐标系原点 O_2 在参考坐标系下可表示为 ${}^1O_2=[0 \ 0 \ h \ 0 \ 0 \ 0]^T$, 在参考坐标系中刚体坐标系的任意一点可表示为:

$${}^1n = {}^1O_2 + C^1n \quad (7)$$

其中矩阵 C 表示刚体坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 先以 X_1 轴为参考变换角度 α , 再以 Y_1 轴为参考变换角度 β , 最后以 Z_1 轴为参考变换角度 θ , 与参考坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 重合, 刚体坐标系到参考坐标系的变换关系矩阵 C 可表示为:

$$C = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \theta & \cos \beta \sin \theta & -\sin \beta \\ \sin \alpha \sin \beta \cos \theta - \cos \alpha \sin \theta & \sin \alpha \sin \beta \sin \theta + \cos \alpha \cos \theta & \sin \alpha \cos \beta \\ \cos \alpha \sin \beta \cos \theta + \sin \alpha \sin \theta & \cos \alpha \sin \beta \sin \theta - \sin \alpha \cos \theta & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

在竖井掘进机的刚体坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 中旋转角速度可表示为:

$${}^2\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin \beta \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \cos \beta \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = {}^1\Omega \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = {}^1J_{\omega}^2 \dot{n} \quad (9)$$

其中 ${}^1J_{\omega}^2$ 为雅可比矩阵, 可表示为: ${}^1J_{\omega}^2 = [0_{3 \times 3}, {}^1\Omega]$ 。

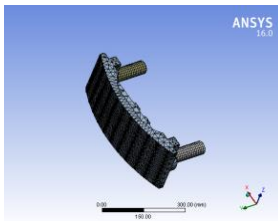


图 8 支撑靴板网格图

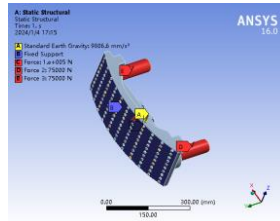


图 9 支撑靴板边界条件

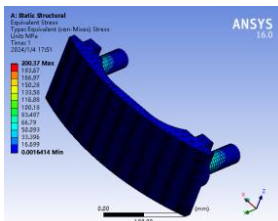


图 10 支撑靴板应力云图

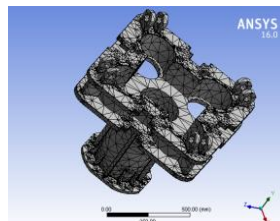


图 11 齿轮箱网格图

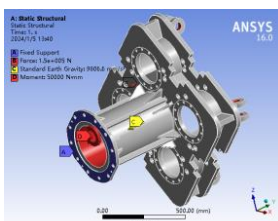


图 12 齿轮箱边界条件

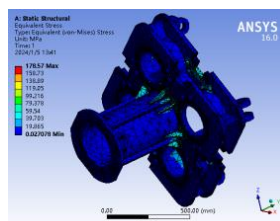


图 13 齿轮箱应力云图

则推进油缸和支撑油缸的线性速度 ${}^1\dot{L}_i$ 可用雅可比矩阵与矢量 \dot{n} 乘积来表示:

$${}^1\dot{L}_i = {}^1J_{L_i}\dot{n} \quad (10)$$

推进油缸和支撑油缸的角速度 ${}^1\dot{\omega}_i$ 可用雅可比矩阵与矢量 \dot{n} 乘积来表示:

$${}^1\dot{\omega}_i = {}^1J_{\omega_i}\dot{n} \quad (11)$$

6 结论与展望

本文对竖井掘进机的施工工艺、结构设计进行了介绍,分析了竖井掘进机在工作时的受力特性,基于受力特性对竖井掘进机的支撑靴板和齿轮箱进行了静力学分析,证明了结构设计的强度和刚度合理性。通过 Denavit-Hartenberg 法对竖井掘进机进行运动学分析,验证了竖井掘进机在井下施工的基本运动。

在全断面竖井掘进机的施工过程中合理的刀盘设计、刀具布置和出渣方式可提高施工效率,装备的轻量化设计和成体系作业流程也可提高作业效率,从而降低制造成本和施工成本。因此先进刀盘刀具设计、装备轻量化、出渣方式和结构自动化设计将作为后面的研究方向。

[参考文献]

- [1]任玉会,李鑫.输电线路杆塔基础设计探索[J].农村电气化,2022(9):24-26.
 [2]刘刚.输电线路杆塔基础设计施工技术分析[J].建材与装饰,2018(45):222-223.

- [3]刘志强.竖井掘进机[M].北京:煤炭工业出版社,2019.
 [4]丁张飞.全断面竖井掘进机关键技术[J].建筑机械化,2022,43(11):11-15.
 [5]马明刚,潘月梁,兰宝杰,等.全断面竖井掘进机装配工艺及始发关键技术研究[J].建井技术,2023,44(1):36-42.
 [6]杨仁树,康一强,杨立云,等.千米竖井硬岩全断面掘进机装备关键技术研用及展望[J].中国矿业大学学报,2023,52(6):1162-1172.
 [7]康庆阳,吴海祥.撑靴式竖向硬岩掘进机关键技术研究与应用[J].工程机械,2023,54(11):96-100.
 [8]吕旦,贾连辉.上排渣式全断面竖井掘进机凿井技术与应用[J].隧道建设(中英文),2023,43(1):151-160.
 [9]王新亮.全断面竖井掘进机载荷辨识与姿态控制关键技术研究[D].北京:中国矿业大学(北京),2022.
 [10]刘志强.竖井掘进机凿井技术及装备研究[J].中国矿业,2017,26(5):137-141.
 [11]徐光亿,肖威,赵飞等.一种沉井潜入式竖井掘进机结构设计与研究[J].隧道建设(中英文),2022,42(1):145-153.
- 作者简介:雷腾(1991.1—),硕士研究生,工程师,电网建设,成果:作为主要人员参与的金山500千伏变电站新建工程获“中国建筑工程鲁班奖”,明月山500千伏变电站新建工程获“国网公司输变电优质工程金奖”。