

# 一种基于 QFD/TRIZ 的高压铁塔微桩成型装备设计

谢伟<sup>1</sup>, 范荣全<sup>2</sup>, 周睿晗<sup>3</sup>, 郑晓波<sup>4</sup>, 郭鑫<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041; 3. 四川大学机械工程学院, 四川 成都 610065; 4. 国网四川省电力公司天府新区供电公司, 四川 成都 610218)

**摘要:** 高压输电线路铁塔常位于地形条件苛刻、地质条件复杂、气象状况多变的地区, 这使得大型钻孔设备难以到达施工现场, 基坑开挖大多只能采用人工挖掘, 但人工挖掘难以挖出变直径桩孔。为了减轻人工强度和施工风险并提高施工效率, 提出了一种成孔设备设计方案。首先, 分析了对当前桩孔钻进施工的现状以及其中存在的问题与用户需求; 然后, 通过质量功能展开方法从得到的用户需求中发掘出产品设计要求; 最后利用发明问题解决理论求解设计要求的冲突, 得到组合式变径成孔设备方案。该方案将实现成孔设备的可便捷拆卸装配以及连续变径成孔等功能, 可有效地提高变径桩成孔施工的效率 and 安全性, 相对于人工桩孔挖掘具有明显优势。

**关键词:** 高压输电; 微型桩; 创新设计; 装备设计

中图分类号: TM 754 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)01-0072-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240111

## Design of Micro-pile Forming Equipment for HV Steel Tower Based on QFD and TRIZ

XIE Wei<sup>1</sup>, FAN Rongquan<sup>2</sup>, ZHOU Ruihan<sup>3</sup>, ZHENG Xiaobo<sup>4</sup>, GUO Xin<sup>3</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 4. State Grid Tianfu New Area Electric Power Supply Company, Chengdu 610218, Sichuan, China)

**Abstract:** Steel towers of HV transmission line are often located in areas with harsh topographic conditions, complex geological conditions and changing meteorological conditions, which makes it difficult for large-scale drilling equipment to reach the construction site, and most of the pit excavation can only be done by manual digging, but it is difficult to dig variable-diameter pile holes by manual digging. In order to reduce the labor intensity and construction risk and improve the construction efficiency, a design scheme of hole-making equipment is proposed. Firstly, the current situation of pile hole drilling construction is analyzed as well as the existing problems and user requirements. And then, the product design requirements are discovered from the user requirements by the quality function expansion method. Finally, the invention problem solving theory is utilized to solve the conflict of design requirements, and the combined variable-diameter hole-making equipment scheme is obtained. The solution will realize the functions of convenient disassembly and assembly of hole-making equipment and continuous variable-diameter hole-making, which can effectively improve the efficiency and safety of variable-diameter pile hole-making construction, and has obvious advantages compared with manual pile hole excavation.

**Key words:** HV transmission; micro-pile; innovative design; equipment design

## 0 引言

中国西部地区电力资源丰富,但电站多位于山区,需要高压输电线路将电力输送至人口聚集区。输电线路铁塔高度可达到 100 m 以上,档距可达到 1000 m 以上。该山区的地质条件和气象条件复杂,输电线路常需要跨越高山河谷及重覆冰区。因此铁塔基桩的安全可靠对线路安全运行非常重要,普通的微桩不能满足铁塔受力的要求,需要铁塔基桩直径达到 600 mm,深度达到 10 m,并且桩孔直径需要连续变化以提高抗拔性能。此外,山地峡谷地形恶劣,交通不便,设备运输能力低下,现有的大型施工设备很难到达<sup>[1]</sup>,人工施工安全隐患突出,而为大型设备开辟施工通道还需毁山毁林,造成环境破坏。因此需要开发便于运输的铁塔基桩成孔设备来满足施工需求以及减小环境破坏。

模块化设计可以降低设备的拆卸和安装难度,为设备的组装和搬运提供便利。目前,国内已经有了一些关于山地模块化钻机的研究,这些钻机能够基本解决在山地地区安装、运输不便的问题,为山地施工带来更多便利<sup>[2-3]</sup>。但是这些钻机没有考虑到特高压输电线路铁塔的实际条件,即跨距较大、受力复杂,特别是基桩会受到更大的来自垂直方向的力,这对铁塔基桩的力学性能提出了更多要求。普通圆柱桩孔垂直方向力学性能较差,需要改变桩孔形状,而这些设备无法满足这样的需求。因此,需要在现有模块化钻机的基础上做出一些改进,更好地满足各电压等级输电工程实际施工需要。

针对上述的问题,下面基于质量功能展开和发明问题解决理论提出了一种可实现连续变径的微桩成型装置设计方案。该方案是一个模块化设计的钻头,安装在钻机上使用,可以实现在桩成型过程中的连续直径变化,也可以实现对已成型桩孔的再次扩径施工。此外,该装置还可实现损坏钻齿的快速更换,以提高效率。

## 1 装备的创新设计流程

### 1.1 QFD 和 TRIZ 简介

质量功能展开方法(quality function deployment, QFD)是在 20 世纪 60 年代由日本专家水野滋和赤

尾洋二所提出的,这种方法主要用于将收集到的用户需求转化成为产品需求,然后基于得到的结果对目标进行改进。质量屋作为一种将用户需求转化为设计要求的工具,是该方法的核心要素,使用这种方法可以帮助选择更优的方案、更好地把握需求以及使产品开发更加高效。

发明问题解决理论(теории решения изобретательских задач, TRIZ)是前苏联发明家根里奇·阿奇舒勒在 1946 年创立的。该理论利用归纳总结出的规律和发明原理进行技术矛盾的解决。该理论的核心方法是技术冲突解决原理,使用 40 条发明原理对物理矛盾和技术矛盾给出理想解,每条发明原理有对应的编号。运用该方法可以为开发者提供解决问题的思路,提高问题解决的效率。

将 QFD 与 TRIZ 结合在一起使用,可以弥补单一设计方法的局限性,可以帮助设计者更好地让产品满足用户的需求,因而近年来很多设计者在产品方案设计中运用了 QFD 和 TRIZ 集成的方法。基于这种方法,文献[4]进行了帕金森患者助行器的优化设计;文献[5]设计了木浆纸杯端送装置;文献[6]设计了一种菠萝去皮机。这些研究利用 QFD 和 TRIZ 结合的方法辅助设计人员将用户需求转化为产品设计需求,帮助解决产品设计过程中存在的技术矛盾,使最终得到的设计方案满足用户需要。因此,下面也将 QFD 和 TRIZ 集成的方法用在装备方案的设计中。

### 1.2 基于 QFD 和 TRIZ 的装置设计流程

使用 QFD 和 TRIZ 集成的方法进行高压铁塔微桩成型装备的设计<sup>[7-8]</sup>,运用的设计流程主要包括以下几个阶段:首先,需要分析挖掘当前高压输电铁塔基桩施工过程中存在的问题和诉求,从中得到用户需求;然后,将各项用户需求进行重要度评价,分析需求和技术特征之间的相关性,构建出产品的质量屋,分析其中存在的矛盾冲突;最后,对这些矛盾冲突进行表述,利用 TRIZ 理论寻找对应的解决方法,从而得到最终设计方案。整个设计流程如图 1 所示。

## 2 微桩成型装备功能需求确定

### 2.1 当前施工手段的问题分析

为了使设计出的产品能够满足高压铁塔基桩的实际施工需求,首先需要对实际施工条件和现有施

工手段进行分析,图 2 展示了一些实际的山区施工环境。

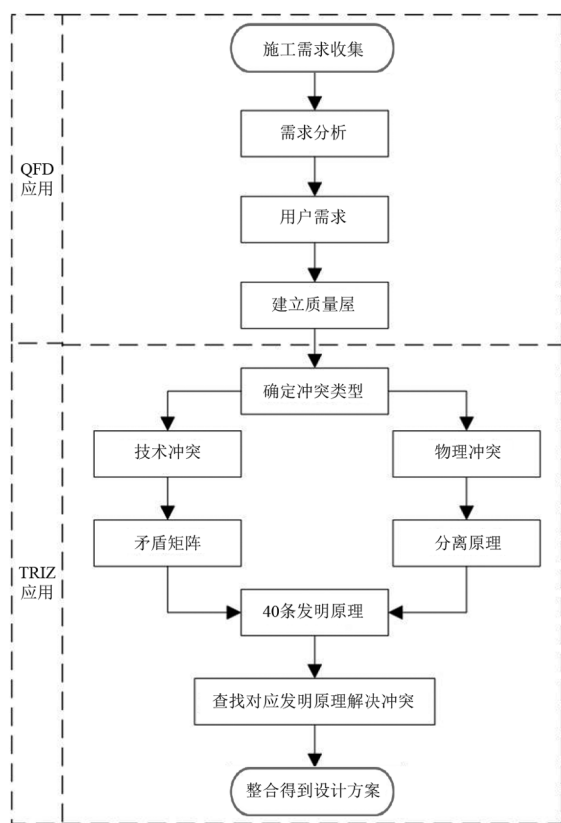


图 1 QFD 和 TRIZ 集成应用的设计流程

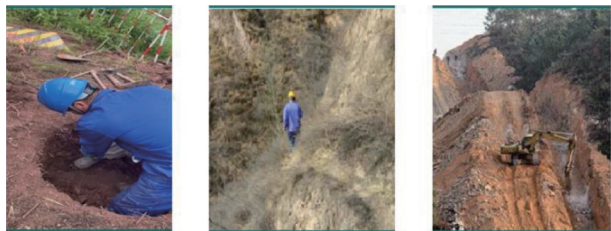


图 2 山区铁塔施工状况

通过对施工条件和环境进行分析可以发现以下几个问题:1)电压等级高的输电线路,相较于普通输电线路需要与地面保持更大的安全距离,这就使得铁塔更加高大,其要求基桩直径也相应增大;2)电压等级高的输电线路跨距大,且线路途经地区气象条件多变,常有大风,这导致铁塔受力情况多变,需具备更高的抗拔性能;3)输电线路途经山区,生态环境较为原始,道路崎岖难行,施工设备运输困难,强行开辟施工道路易造成环境破坏;4)西部山区地质情况复杂,地下常有不同种类的岩石,需要装置能够适应不同硬度的岩层。

为了使高压铁塔拥有更强的承受垂直负载的能力,需要对微桩形态做出适应的改变。已有的研究

显示<sup>[9-10]</sup>,通过让桩孔直径在不同深度有不同的数值,改变原普通圆柱形的桩孔形状,比如呈现串珠型、楔形等,可以让建筑基桩能够在垂直方向上承受更大负载,提高其受力性能,让高压铁塔基桩更加稳固可靠。因此让装备具有连续变径功能,可以满足电压等级高的输电铁塔的施工需求。目前已经有一些工程用设备<sup>[11]</sup>,通过对钻头结构进行改进,可以在桩孔的向下掘进过程中同时实现直径的变化,因此进行可变径功能的设计是可行的。

现有的铁塔桩孔成型手段主要包括旋挖钻成孔、冲击钻成孔和人工开挖等。对已有的桩孔成型技术进行分析<sup>[12-14]</sup>,当前市面上存在数量较多的大型基桩成型设备,包括各种旋挖钻机、冲击钻机以及扩底钻机。这些现有装备经过多年的应用改进,技术已经相对成熟,但是它们通常体积较大、重量较重,需要大型运输车辆进行转运。为了将这些设备运输到施工地点需要毁山开路,有些地方甚至根本无法运输。同时这些设备对不同地质条件的适应性差,需携带多种钻头以适应不同地层。然而,现实施工条件则要求装备重量尽量轻,尽量可拆分成多个部分携带。人工开挖则劳动强度大,施工效率低,且存在挖掘过程中石块飞落砸伤施工人员甚至孔壁坍塌发生掩埋的安全隐患。

图 3 展示的是一种模块化钻机平台<sup>[3]</sup>,该平台可以实现钻机的拆分与折叠运输,可将各组件运抵施工现场后再行组装,进行铁塔基桩的成型施工。但是该设备不具备成孔过程中的变径功能,因而需要重新设计钻机的钻头,以满足施工中的实际需求。

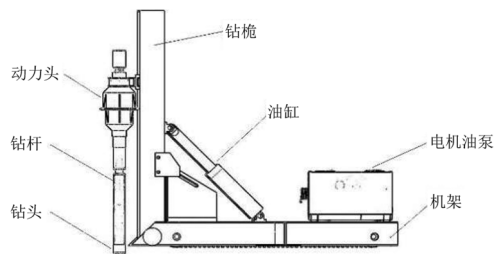


图 3 一种模块化钻机平台

除以上所述外,装备的可靠性、维护的便利性、是否便于加工以及成本等也应该纳入需求考虑范围。将前述的问题进行整理分类,得到装备的功能需求指标,如图 4 所示。

将得到的各项需求进行整理,转化成为尺寸质量、稳定性、多用性、可置换、快速维护、结构、制造性和运输性共 8 项技术特征。

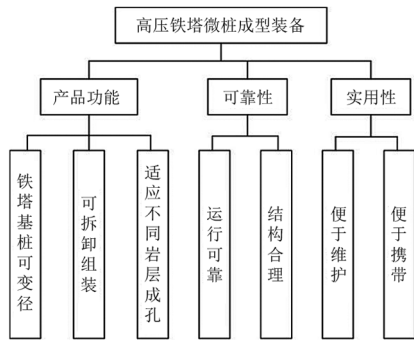


图 4 高压铁塔微桩成型装备的功能需求分解

### 2.2 微桩成型装备的质量屋建立

基于各项需求本身的重要程度、需求与技术特征的关联程度以及各项技术特征之间的相互关系,构建高压铁塔微桩成型装备的质量屋,用户需求和特征之间的关联度使用 0、1、3、5 进行计分,分数越高代表二者关联性越大,使用“+”“-”分别表示技术特征之间的正负相关性。例如,稳定性这一技术特征和运行可靠这一用户需求存在强相关计分为 5,与结构合理这一需求中等相关计分为 3,与可拆卸组装弱相关计分为 1,与其余的用户需求则没有正向联系。技术特征重要度的计算方法为:记第  $j$  个技术特征与第  $i$  个用户需求之间的关联程度为  $R_{ij}$ ,记第  $i$  个用户需求的重要度打分为  $K_i$ ,则技术特征重要度的计算方法为

$$I_j = \sum_{i=1}^m K_i R_{ij}$$

式中: $I_j$ 为第  $j$  个技术特征的重要度; $m$  为用户需求总数。例如稳定性特征的重要度应为可拆卸组装、运行可靠和结构合理三项用户需求的重要度与相应关联程度计分的乘积之和,为 39。构建的质量屋如图 5 所示。

从图 5 中可以得出,多用性、运输性、可置换、稳定性和快速维护这 5 个技术特征在微桩成型装备设计中更为重要,而尺寸质量、结构和制造性这 3 个技术特征则相对次要。稳定性和可置换、结构与可置换、结构和多用性、快速维护和制造性共 4 对技术特征呈现负相关,即存在 4 对冲突;尺寸重量和稳定性、多用性和可置换、稳定性和结构则呈正相关。

## 3 微桩成型装备的需求解决方案

### 3.1 微桩成型装备的冲突分析

对于稳定性和可置换、结构与可置换这两对冲突,

0-不相关 1-弱相关 3-中等相关 5-强相关

图 5 高压铁塔微桩成型装备的质量屋

突,由于高压铁塔在野外山地施工受到地形条件限制,现今大多依靠牲畜或滑索运输到施工现场。这就要求各组件需要控制体积和质量以确保这些设备能够被运输,也就是说微桩成型装置需要设计为可拆装的结构便于分开进行运输;但是这会导致装备的结构变得复杂,各种接口增多,运行的稳定性会略有降低。对于结构和多用性这对冲突,同样出于减轻携带难度的考虑,希望能用更少的装备来实现尽量多的功能,通过简单地组装不同功能模块就能对不同硬度岩层的基桩成型施工;但这同样会使结构变得更加复杂。对于快速维护和制造性这对冲突,在山区野外施工条件不如平原地区,设备发生故障后可以用于维修的工具有限,希望设备可以带有快速维护功能,这就需要在装备中增加用于快拆快装的结构;但是这类结构通常会会对加工精度存在一定要求,从而会增加生产加工的复杂程度以及成本。

### 3.2 获得冲突的解决方案

使用阿奇舒勒矛盾矩阵来解决技术冲突<sup>[16]</sup>,首先需要对照 39 项标准工程参数将 4 对技术特征进行转化,然后从矛盾矩阵表中选择合适的发明原理来解决冲突。39 项标准工程参数是 TRIZ 理论对大量工程特征的归纳总结,每一项标准工程参数有对应的编号,例如 No.1 为运动物体的质量, No.2 为静止物体的质量等,一共 39 项。在 39 项工程技术参数中选择恰当的条目描述技术特征,表 1 列出了上述冲突问题的转化结果。

表 1 冲突的 TRIZ 问题转化

冲突序号	负相关特征	39 条标准工程技术参数	矛盾类型
1	稳定性 可置换	No.27 可靠性 No.36 系统的复杂性	技术矛盾
2	结构 可置换	No.12 形状 No.36 系统的复杂性	技术矛盾
3	结构 多用性	No.12 形状 No.35 适应性,通用性	技术矛盾
4	快速维护 制造性	No.34 可维修性 No.32 可制造性	技术矛盾

然后需要确定要改善和恶化的参数。例如在第 1 对冲突中,想要实现装备的可拆装置换,则需要改善的工程参数为“No.36 系统的复杂性”,需恶化的工程参数为“No.27 可靠性”。最终确定改善的工程技术参数为“No.36 系统的复杂性”“No.35 适应性,通用性”和“No.34 可维修性”,恶化的工程技术参数为“No.27 可靠性”“No.12 形状”和“No.32 可制造性”。在确定好需要改善和恶化的参数之后,就在矛盾矩阵中找出对应的发明原理序号,利用这些发明原理实现冲突的解决。矛盾矩阵表中给出了可以解决对应冲突的若干条发明原理编号,表 2 仅列出了需要用到的部分矛盾矩阵,表格中的数字代表的是对应发明原理的编号。

表 2 部分矛盾矩阵对应的发明原理

改善参数	恶化参数		
	No.27 可靠性	No.12 形状	No.32 可制造性
No.36 系统的复杂性	13, 35, 1	29, 13, 28, 15	27, 26, 1, 13
No.35 适应性,通用性	25, 13, 8, 24	15, 37, 1, 8	1, 13, 31
No.34 可维修性	11, 10, 1, 16	1, 13, 2, 4	1, 35, 11, 10

根据表 2 中给出的结果查找 40 条发明原理,第 1 对冲突在矛盾矩阵中所对应的发明原理为“13 反向作用”“35 物理或化学参数改变”“1 分割”,这对冲突选择发明原理 1 比较适合,考虑到高压铁塔的施工环境,将一个整体部件分开成为几个容易装卸的部分,使野外山地运输更加便利。

第 2 对冲突在矛盾矩阵中所对应的发明原理为“29 气压和液压结构”“13 反向作用”“28 机械系统的替代”“15 动态特性”。这对冲突可选用发明原理 29 利用液压系统驱动变径装置,也可以选择发明原理 28 利用电磁装置替代机械装置施加力。考虑到施工过程中有大量碎渣且扩径过程中存在较大阻力,电磁装置所需功率较大,但山区缺少大功率电源,使用液压系统可以更好满足需求。

第 3 对冲突在矛盾矩阵中所对应的发明原理为“15 动态特性”“37 热膨胀”“1 分割”“8 重量补偿”。这对冲突可以选择发明原理 1 将不同的功能拆分为不同的模块,也可以利用发明原理 15 将装置设为可动连接,在执行不同功能时进行切换。考虑到后一种方法会让机构变得更多更庞大,增加故障率同时也不利于运输,因此选用前一种方法。

第 4 对冲突在矛盾矩阵中所对应的发明原理为“1 分割”“35 物理或化学参数改变”“11 事先防范”“10 预先作用”。在这对冲突中综合运用发明原理 1 和原理 10 进行解决,将钻齿的安装部位与装备主体进行分离,并事先预备好备用钻齿,以便在钻齿发生断裂损坏时不使用额外的工具设备即可进行快速更换。

## 4 微桩成型装备设计方案

根据所述需求分析、基于 QFD 的需求转化以及基于 TRIZ 的冲突求解的有关内容,设计了一种高压铁塔的微桩成型装备,该装备采用组装式设计,通过拼装的方式实现装备的不同用途。装备总体分为上下两个部分,上半部分用于实现变径功能以及与钻杆之间的连接,下半部分用于实现向下钻进功能,两个部分之间可以拆开连接以便于分开携带。变径装置主要由液压缸、扩张臂以及连接二者的连杆组成,使用液压系统驱动是为了降低发生机械故障的概率,液压杆向下推出即扩张臂向外伸出,向上缩回即向内收回,以此实现桩孔成型过程中的直径变化,如图 6 所示。其液压控制回路如图 7 所示,该回路为液压增压回路,1YA 通电时工作油缸 4 推出进行扩径,同时通过增压油缸 7 增大推出过程中的压力防止无法顺利扩径,2YA 通电时工作油缸 4 缩回,停止扩径,换向阀 3 位于中位时保持直径不变。

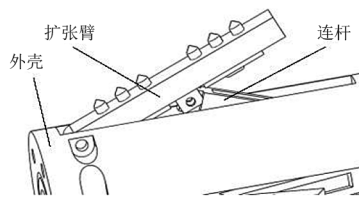


图 6 变径装置

此外,考虑到成孔过程中钻齿由于磨损常常会发生损坏,设计了快装结构,使其在野外施工时方便

更换,如图 8 所示。更换钻齿时卸下钻齿的安装板,换上预先准备好的备用钻齿,然后重新装好安装板即可完成更换。

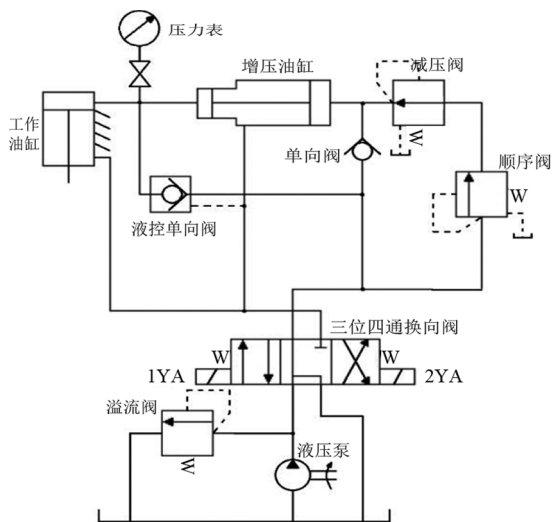


图 7 变径装置液压控制回路

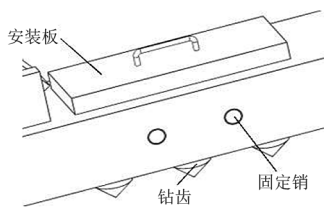


图 8 拆换钻齿结构

钻进部分设计有两种模块,分别为用于在普通岩层钻进的旋挖模块以及用于破碎坚硬岩层的冲击模块,以适应高原山区复杂多样的地质状况。普通岩层成孔时使用旋挖模块即可,在遇到坚硬的岩层时,拆卸下旋挖模块,安装上冲击模块即可继续施工,若经过先期勘测已经知晓施工地区岩层硬度较高,可直接安装冲击模块进行施工,节省时间。安装冲击模块时如图 9 所示。

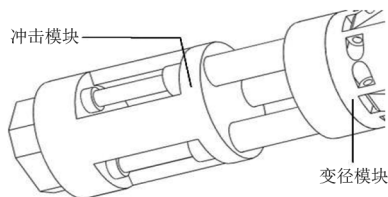


图 9 加装冲击模块

使用时先组装钻头,将变径装置安装完成后将钻进模块安装至壳体下方,连接液压管路,然后将组装好的钻头固定至钻杆下端,更换钻进模块时将钻头升起,安装冲击模块后再继续施工。加装钻进模

块完成后如图 10 所示。

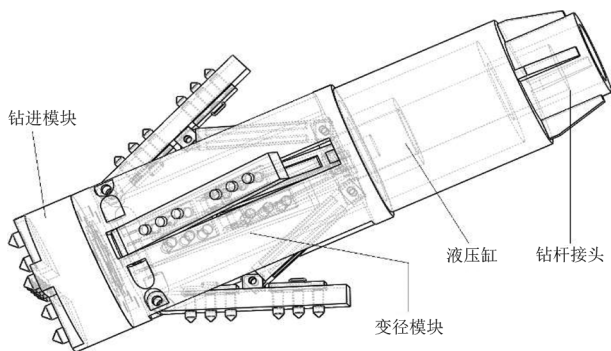


图 10 装备整体结构

## 5 结论

上面通过对山区高压铁塔微桩施工中存在的问题进行研究,利用 QFD 方法和 TRIZ 理论进行了矛盾冲突分析和解决,设计了一种高压铁塔微桩成型装备的方案。该设计方案可以实现在微桩成型过程中的连续变直径,并且可以适应不同硬度地层的工作需求,可拆携携带满足高原山地施工过程中的运输需求。

下一步将针对微桩成型后孔内仍会残留较多废渣的问题,探究设计新的模块或结构以提高成型过程中的排渣效率。结合有限元分析等方法进一步优化结构,在保证可靠性的前提下减轻重量。

## 参考文献

- [1] 陈路,裴燕,胡蓉,等.山区输电线路机械化施工的现状 & 对策[J].电力勘测设计,2018(11):63-66.
- [2] 黄志强,喻洪梅,马亚超,等.山地物探电动钻机模块化设计及安全性分析[J].工程设计学报,2022,29(2):153-160.
- [3] 董杰,范荣全,贺前,等.山区输电线路微型桩模块化钻机的研制[J].四川电力技术,2022,45(5):26-30.
- [4] 韦艳丽,冀源,王超凡,等.基于 QFD&TRIZ 的帕金森患者助行器优化设计研究[J].包装工程,2023,44(2):158-166.
- [5] 陆武慧,赵哲.基于 QFD 和 TRIZ 的木浆纸杯端送装置设计[J].包装与食品机械,2021,39(4):69-73.
- [6] 任工昌,张博文,张膺之.QFD 与 TRIZ 在菠萝去皮机设计中的应用[J].包装工程,2020,41(7):157-163.

(下转第 110 页)

压器内部放电故障,并对故障进行了精确定位,确认上铁轭接地屏蔽铜带与等电位引出铜带脱焊导致变压器内部放电。解体检查验证了局部放电定位的准确性,同时提出了改进措施,杜绝类似事故再次发生。

#### 参考文献

- [1] 秦松,李彬,张大伟,等.220 kV 变压器内部放电缺陷的检测与处理[J].山东电力技术,2018,45(11):27-31.
- [2] 张凯,张成飞,董宏林,等.220 kV 变压器局部放电故障实例分析与处理[J].变压器,2019,56(10):48-51.
- [3] 赵心玥,王清昊,程硕.220 kV 主变围屏放电的原因及整改措施[J].变压器,2015,52(5):64-67.
- [4] 王江伟,李杰,师伟,等.500 kV 变电站主变压器跳闸故障分析[J].山东电力技术,2021,48(1):22-26.
- [5] 伊锋,梁健,许伟,等.500 kV 变压器现场局部放电异常分析[J].山东电力技术,2020,47(8):10-13.
- [6] 钟理鹏,汲胜昌,崔彦捷,等.变压器典型缺陷局放特性及其带电检测技术研究[J].高压电器,2015,51(3):15-21.
- [7] 王新,苏欢欢,高树国,等.变压器内典型油纸绝缘缺陷的高频局部放电传播特性研究[J].高压电器,2018,54(11):206-212.
- [8] 刘嘉林,董明,安珊,等.电力变压器局部放电带电检测及定位技术综述[J].绝缘材料,2015,48(8):1-7.
- [9] 齐伟强,李俭,陈柏超,等.基于 COMSOL 的变压器中超声波传播特性[J].电工技术学报,2015,30(S2):195-200.
- [10] 罗艳,周秀,唐长应,等.基于声电联合定位法在换流变局部放电检测中的应用[J].变压器,2020,57(1):73-78.

- [11] 王超,许本茂,冯藩,等.基于声电联合及振动的变压器类设备局部放电现场综合诊断方法[J].四川电力技术,2020,43(4):33-37.
- [12] 周加斌,陈玉峰,井雨刚,等.特高压变压器磁屏蔽接地线断裂引起局部放电异常的检测与分析[J].电力系统保护与控制,2018,46(3):110-115.
- [13] 李鹏,李飒,杨海超,等.一起 500 kV 变压器局部放电试验异常的分析处理[J].变压器,2020,57(6):85-87.
- [14] 束畅,章茜,高燃,等.一起 1000 kV 特高压并联电抗器内部故障分析[J].东北电力技术,2018,39(6):19-22.
- [15] 孟令明,刘宏亮,高树国,等.一起特高压大型充油设备油色谱异常情况分析处理[J].变压器,2021,58(10):73-77.
- [16] 孙帆,张勇,徐路强,等.一台 750 kV 高压电抗器局部放电故障分析[J].高压电器,2015,51(3):135-139.
- [17] 秘立鹏,段子靖,赵影,等.1000 kV 高压并联电抗器故障原因分析[J].内蒙古电力技术,2018,36(2):79-81.
- [18] 赵阳德,孙健,部俊锋.变压器拉带屏蔽罩引发的故障分析处理[J].山东电力技术,2021,48(1):32-34.
- [19] 牛勃,马飞越,周秀,等.基于 PSO 的局部放电源声电联合法定位的研究[J].高压电器,2019,55(8):108-115.
- [20] 张彦,陆笑天,黄佳骏,等.联合检测法在开关柜局放检测定位中的实际应用分析[J].高压电器,2019,55(2):245-250.

#### 作者简介:

郭加媛(1991),女,工程师,从事高压试验和电网状态检测工作。

(收稿日期:2023-05-25)

(上接第 77 页)

- [7] 曾曦,易梦迪.基于 QFD/TRIZ 集成模型的老年人轮椅设计[J].机械设计,2021,38(4):134-138.
- [8] 王晨,赵武,王杰,等.基于需求和解决冲突的创新设计策略[J].四川大学学报(工程科学版),2015,47(4):168-174.
- [9] 张萍,白晓红,郭磊,等.钢筋混凝土旋扩变径桩现场原体试验及分析[J].建筑科学,2008,136(11):20-24.
- [10] 马广,袁宇,张雷.砂土地层钉形变径桩变截面处端阻计算方法研究[J/OL].铁道标准设计:1-6[2023-02-21]. <https://DOI.ORG/10.13238/J.ISSN.1004-2954.202203150003>.
- [11] 张志敏,杨卫.全自动可变径挖坑机机械结构设计[J].机械工程与自动化,2018(3):91-93.

- [12] 常延沛.旋挖钻机:107420030B[P].2019-10-18.

- [13] 秦广琦,甄芹芹,秦广菊,等.一种超硬岩气动旋挖冲击钻机:112983262B[P].2022-09-09.
- [14] 龚秀刚,刘玉霞,叶凯,等.一种扩孔钻机:107060649B[P].2019-08-23.
- [15] 王欢,孙涛,吴周鑫,等.TRIZ 理论在粮食收集机设计中的应用[J].机械设计与制造,2021(1):6-9.

#### 作者简介:

谢伟(1977),男,硕士,高级工程师,研究方向为输变电工程管理;

范荣全(1966),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为智能电网与电网新基建;

周睿晗(1999),男,硕士研究生,研究方向为智能制造技术。

(收稿日期:2023-05-13)