

# 基于双联合定位法的500 kV 变压器内部 放电诊断分析

郭加媛,李承振,赵廷志,张明兴

(国网山东省电力公司超高压公司,山东 济南 250118)

**摘要:**单一使用常规的超高频法、超声波法以及高频电流法进行带电检测变压器局部放电存在局限性。同时,变电站电磁环境干扰大、变压器运行中持续振动干扰以及其金属封闭结构导致变压器内部局部放电检测与定位成功率低。提出了双联合定位法,即高频电流与特高频联合定位以及声电联合定位法,利用该方法准确判断一起500 kV 变压器内部放电的故障,返厂解体检查情况与现场定位结果完全一致,验证了该方法的有效性。

**关键词:**双联合定位; 变压器; 内部放电

中图分类号:TM 407 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2024)01-0105-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240116

## Diagnosis and Analysis of Internal Discharge in 500 kV Transformer Based on Joint Positioning Method

GUO Jiayuan, LI Chengzhen, ZHAO Tingzhi, ZHANG Mingxing

(State Grid Shandong Extra High Voltage Company, Jinan 250118, Shandong, China)

**Abstract:** There are limitations in using common ultra high frequency method, ultrasonic method and high frequency current method individually to detect internal discharge in transformer. At the same time, the large electromagnetic environment interference of substation, continuous vibration interference during the operation of transformer, and its metal closed structure cause the low success rate of detection and location of internal partial discharge. A joint positioning method is proposed, that is, acoustic and electrical joint positioning method with high frequency current and ultra high frequency joint positioning, which can accurately judge the failure of internal discharge in 500 kV transformers. The disassembly inspection of the transformer after returning to the factory is completely consistent with the results of on-site positioning, which verifies the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** joint positioning; transformer; internal discharge

## 0 引言

变压器作为电网主设备,其运行可靠性某种程度上代表着电网的运行可靠性。局部放电是变压器内部发生放电故障初期的重要特征。因此加强运行中变压器带电检测工作尤为重要<sup>[1-4]</sup>。

目前变压器广泛开展定期的带电检测工作,通常使用特高频法、超声波法、高频电流法等检测手段<sup>[5]</sup>。各检测方法都有明显的局限性,例如:特高

频法虽然检测范围大,检测灵敏度高,但在现场抗低电磁干扰能力不足,容易受到环境中特高频电磁干扰的影响;超声波法易受机械振动干扰影响;高频法仅适用于具备接地引下线电力设备的局部放电检测<sup>[6-8]</sup>。变压器局部放电检测和定位仅靠单一的检测手段,无法做到准确检测和定位,多数情况下测到的都为外部干扰信号。

同时,变压器局部放电定位成功率低,故障定位困难,还有以下3个原因:1)变电站存在大量电磁环境干扰,包括输电架空引线电晕放电、金属性接触不良导致的干扰以及各类电子元器件运行过程中产生的白噪声。这导致特高频法局部放电定位存在困

难,无法做到单独定位。2)变压器运行过程中振动干扰持续存在,超声波法检测无法有效区分振动和放电,导致放电故障漏判或者误判。3)变压器为金属封闭结构,没有预留专用的特高频检测口,因此内部放电产生的电磁波信号无法传出。这也是变压器局部放电定位难的一个重要方面。

为此,下面采用双联合定位法,即高频电流与特高频联合定位以及声电联合定位法,运用多种检测方法和手段进行联合检测定位,相互补充、验证,从而达到精准定位的目的。

## 1 双联合定位法

变压器内部发生放电时,会产生冲击的机械波、高频的脉冲电流以及超过 1 GHz 的电磁波<sup>[9-11]</sup>。以此为检测原理,分别对应常规的超声波法、高频脉冲电流法、特高频法等检测定位局部放电。变压器运行环境中存在大量干扰,仅靠单一检测手段,无法区分内、外部干扰,更无法进行局部放电定位。下面提出采用多类型传感器联合定位,先利用高频电流与特高频联合进行粗略定位,确定放电故障的大致区域,再在大致区域内进行声电联合精确定位,最终确定故障位置。图 1 为双联合定位法诊断策略示意图。

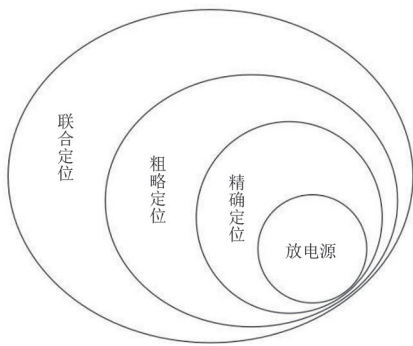


图 1 双联合定位法诊断策略

### 1.1 高频电流与特高频联合定位

高频电流与特高频联合定位包括干扰识别排除和粗略定位两部分,基本原理是以变压器铁芯、夹件引下线处检测到的高频电流信号为基础,作为联合定位的触发信号和基准信号,据此找到与高频电流信号相对应、同步出现的特高频信号,说明两者为同源信号。

干扰识别排除是在此基础上,利用特高频时差领先关系排除外部干扰。传感器布置如图 2 所示,

即在变压器检测部位放置特高频传感器 1,沿变压器四周及上部放置特高频传感器 2。若特高频传感器 1 所检测信号始终领先特高频传感器 2,则说明该信号为变压器内部放电产生;反之,应为外部干扰信号。信号波形识别如图 3 所示。综合高频电流信号的基础性作用和特高频时差领先关系,可以很大程度上解决变电站严重电磁干扰的难题。

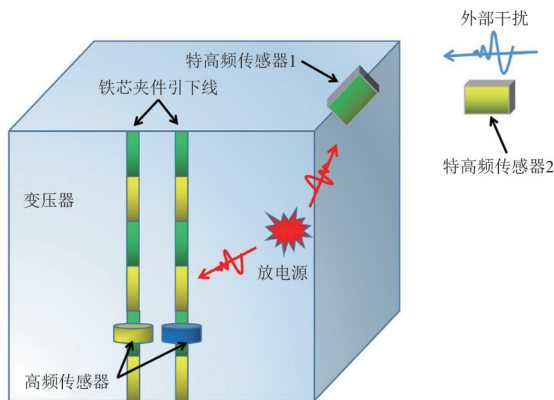


图 2 高频电流与特高频联合排除干扰

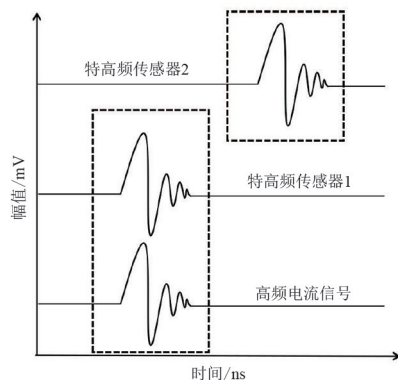


图 3 外部干扰信号波形识别图谱

粗略定位是在排除干扰的基础上,利用特高频法检测的灵活性和极强的穿透性,解决检测部位受限的难题。变压器内部常发生金属性接触不良导致的悬浮放电故障。该类型放电具有放电能量大、频率高、持续时间长等特点,通常能够在距离悬浮放电源不远的变压器箱体缝隙、法兰连接处、油阀门等部位检测到放电产生的特高频信号,据此可进行局部放电检测和定位<sup>[12-14]</sup>。根据特高频传感器检测到的放电信号时间领先关系以及各传感器实际位置参数,完成放电源粗略定位。特高频传感器布置如图 4 所示,当特高频传感器 1 和特高频传感器 2 所测信号在示波器上起始沿一致时,放电源在两者连线垂直平面上。水平和垂直两方向定位的焦点处即为粗略定位位置。

## 1.2 声电联合定位

声电联合定位,即利用电磁波与超声波速度差来实现精确定位。电磁波传播速度远大于超声波的传播速度,可将放电产生的电信号认为是超声波信号的起始时刻<sup>[15]</sup>。在变压器局部放电检测过程中,以变压器内部放电产生的高频电流或者特高频信号为基础,检测与电信号相对应和同步出现的超声波信号,可排除变压器持续振动导致的干扰并精确定位。

经过高频电流法与特高频法联合定位,确定了放电源的大致位置后,在粗略定位的区域内,进行声电联合定位。可将高频电流或特高频信号作为参考时间基准,即起始放电时刻,不断移动超声波传感器的位置,使得超声波信号距电信号时差最短,此时放电源离超声波传感器最近<sup>[16-18]</sup>。根据超声波信号距特高频信号时差 $t$ 和超声波传播速度 $v$ ,可计算出放电源到传感器的距离 $s$ ,即 $s=vt$ 。声电联合定位和定位信号图谱如图4、图5所示。

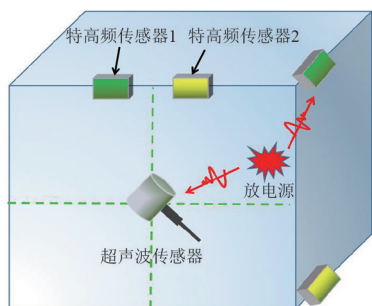


图4 声电联合定位

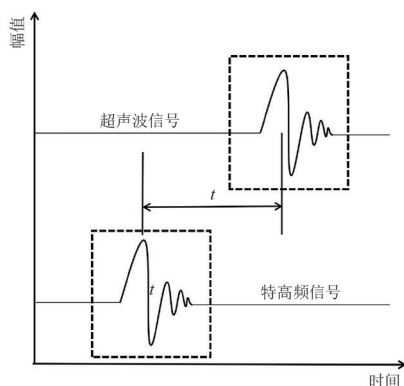


图5 声电联合定位信号图谱

## 2 典型案例诊断分析

### 2.1 故障情况

2022年3月,某500 kV变电站3号主变压器A

相油色谱数据异常,其中乙炔含量由约 $0.6 \mu\text{L/L}$ 陡增长至约 $2.3 \mu\text{L/L}$ ,已超过注意值 $1.0 \mu\text{L/L}$ ,其他两相未见明显变化,怀疑变压器内部发生放电故障。

为进一步查明故障情况,对该台变压器进行了局部放电带电检测和定位。经检测,发现3号主变压器A相铁芯、夹件处存在高频电流局部放电信号。在主变压器检修人孔、取油阀及箱体上顶盖缝隙处可检测到特高频信号。

### 2.2 高频电流局部放电检测

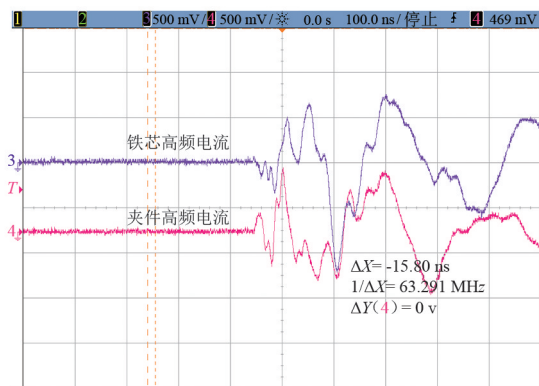
在3号主变压器A相铁芯、夹件处存在的高频电流局部放电信号峰峰值达到4 V左右,频率约5 MHz,且铁芯夹件极性相反,确认变压器内部发生放电故障。

进行高频电流相位及聚类分析,可知放电出现在电压周期的第一象限、第三象限,正负半周均有放电,放电脉冲密集且对称分布,具有典型的内部放电特征,疑似存在悬浮放电。

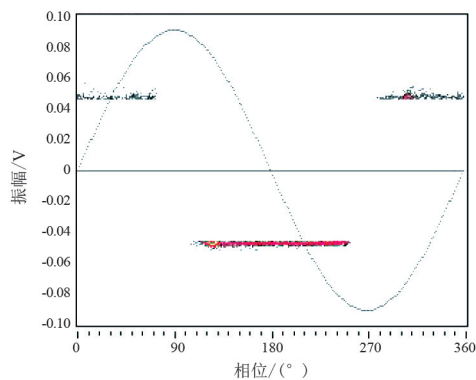
高频电流信号对应工频信号无跳变。高频电流极性关系如图6(a)所示,相位及聚类分析如图6(b)所示,高频电流与同步工频关系如图6(c)所示。

### 2.3 高频电流与特高频联合定位

特高频传感器2、特高频传感器3布置在主变

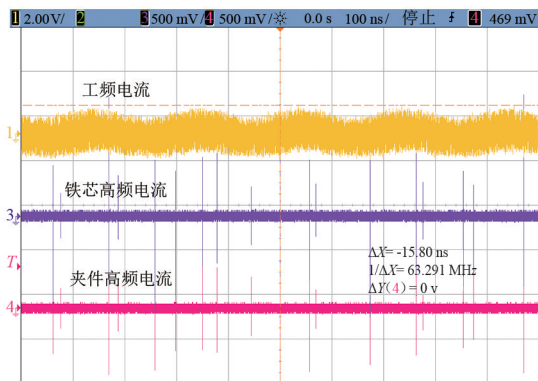


(a) 高频电流极性关系



(b) 高频电流相位及聚类分析





(c) 高频电流与同步工频关系

图 6 高频电流图谱

压器上部箱体顶盖缝隙处,特高频传感器 1 布置在主变压器下部排油阀处,如图 7 所示。经特高频法、高频电流法检测并分析信号对应关系,发现特高频信号与高频电流信号有较好的对应性,各部位传出特高频信号与铁芯及夹件的高频电流信号为同一信号源,时差稳定,判断该主变压器内有一处放电,对应关系如图 8 所示。

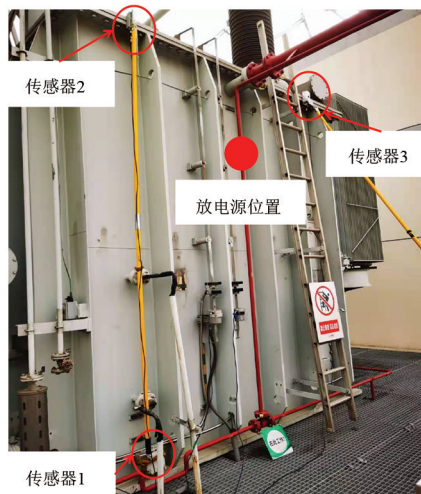


图 7 特高频传感器布置位置

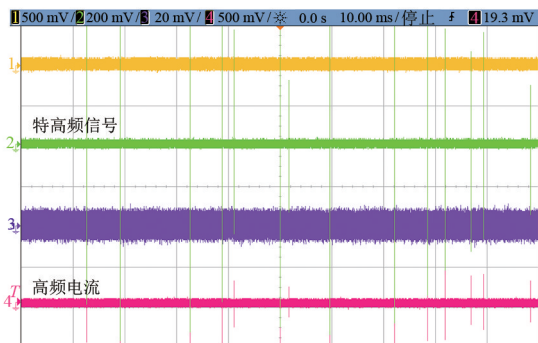


图 8 特高频、高频电流信号对应关系

将时基调整到 10 ns,对各部位特高频信号进行时差分析,检测发现:

1) 移动特高频传感器 2 和传感器 3 到图 2 中位置,使得传感器 2 测到的特高频信号与传感器 3 测到的特高频信号基本同步且无时延,特高频波形如图 9 所示。说明放电源在传感器 2 和传感器 3 中间的垂直平面上,大约在主变压器铁芯、夹件引出线处。

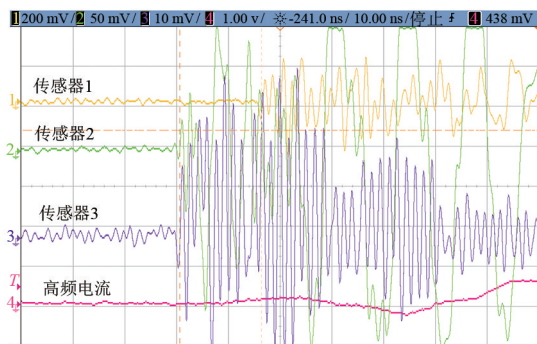


图 9 第一次特高频定位检测图谱

2) 传感器 2 测到的特高频信号始终领先于传感器 1,领先时间约 10 ns,两传感器上下垂直布置,测量两传感器间实际距离约为 3.6 m。据此估算,局部放电信号源距主变压器上顶盖向下约 0.3 m,特高频波形如图 10 所示。

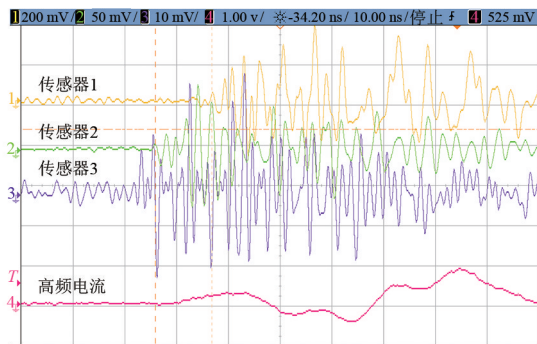


图 10 第二次特高频定位检测图谱

鉴于局部放电信号源传播路径较复杂,特高频信号可能存在绕射、反射现象,另外信号波头衰减较快,时差选取有一定误差<sup>[19-20]</sup>。综上分析,初步判断放电源在垂直方向上距离主变压器上部油箱盖约 0.2~0.5 m,在水平方向上大约在主变压器铁芯、夹件引出线处,如图 4 红色标记所示。

## 2.4 声电联合定位

采用声电联合方法在特高频定位信号区域对放电位置进行详细检测,可测到明显超声波信号,声电之间时差最小约 1 ms,波形见图 11,其中黄色通道为超声波信号,紫色通道为高频电流信号。

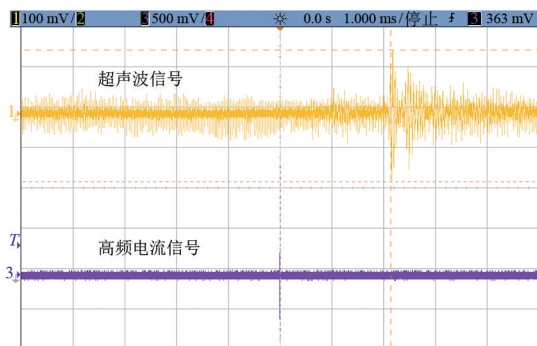


图 11 声电联合定位图谱

据此判断放电源在垂直方向上距离主变压器上部油箱盖约 0.35 m,在水平方向上大约在箱体短边中间部位向内约 1.0~1.5 m 附近。

经查阅主变压器内部结构,放电源可能位于上铁轭接地屏蔽处,如图 12 中红色圆圈标记处。

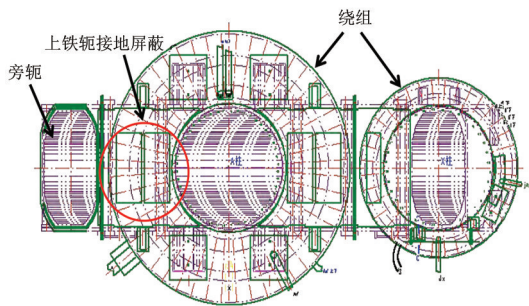


图 12 放电源可能位置

## 2.5 返厂解体情况

将故障变压器返厂解体检查,结合现场局部放电定位结果,重点检查主变压器身上夹件、上铁轭、上铁轭接地屏蔽等所有金属连接点。

在平行移出上铁轭接地屏蔽时,发现屏蔽铜带与等电位带的十字交叉焊接位置存在脱焊现象,如图 13 所示。解体检查发现放电故障位置与现场局部放电定位结果完全吻合。



图 13 屏蔽带脱焊放电痕迹

出铜带脱焊的原因是该处焊接点焊接不牢靠或者焊接面积偏小,在变压器运行过程中,接地屏蔽受长期铁轭振动或者长期油温变化热胀冷缩效应的影响,导致该焊点脱焊。

## 3.2 改进措施

按照现行最新工艺和材料,重新制作铁轭接地屏蔽。新接地屏蔽选用 0.1 mm 铜带作为屏蔽带,使用铜编织带作为等电位带进行整体搭接焊接,将点焊改为接触面整体焊接,确保焊接面和焊接强度足够大,同时选用的铜带更薄,可有效地弱化接地屏蔽在弯折或围圆过程中对焊接点可能引起的受力或损伤,改进后的接地屏蔽如图 14 所示。



图 14 改进后的铁轭接地屏蔽

## 3 故障原因分析及改进

### 3.1 故障原因分析

结合现场局部放电定位以及返厂解体检查情况,判定该主变压器内部上铁轭接地屏蔽存在脱焊现象。该主变压器的接地屏蔽生产时间距今已 15 年,当时整个行业接地屏蔽生产工艺相对比较落后,屏蔽带与等电位带通过一点或两点焊接。

分析认为,上铁轭接地屏蔽的铜带与等电位引

## 4 结 论

上面提出采用双联合定位法,即高频电流与特高频联合定位以及声电联合定位法,来克服各单一检测手段存在的局限性、变电站电磁干扰大、变压器振动干扰以及检测条件受限等难题。

通过双联合定位法,准确判断了一起 500 kV 变

压器内部放电故障,并对故障进行了精确定位,确认上铁轨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)