

doi: 10.11720/wtyht.2020.1338

张来福,李士强,刘国强,等.输电杆塔下采空区电法探测电极系统设计[J].物探与化探,2020,44(1):220-225.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1338

Zhang L F, Li S Q, Liu G Q, et al. The design of electrode system for electrical detection of goaf under transmission tower[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(1): 220-225. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1338

输电杆塔下采空区电法探测电极系统设计

张来福¹, 李士强², 刘国强², 杨虹¹, 田赞¹, 李国栋¹

(1. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001; 2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190)

摘要: 采空区极易造成地面沉降威胁电网运行安全, 检测地下采空区分布意义重大。传统采空区电法检测技术系统控制复杂, 布线方式繁琐, 所需传感器和电缆数量较多, 测量数据量大, 排布和移动测量效率低下, 并不适合电力领域防控地下采空区危害使用。文中针对电力杆塔下采空区分布的特点, 设计了采空区电法检测的电极系统, 采用集中—分布式检测方式, 可有效减少电力杆塔下采空区检测的传感器和线缆数量, 优化系统控制, 精简有效检测数据量, 提高采空区检测的效率。

关键词: 采空区检测; 电法探测; 电极控制; 测线排布

中图分类号: TM933

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)01-0220-06

0 引言

地下采空区极易造成地面沉降, 严重威胁地面电力设施的完全运行, 特别是对于穿行于采矿地区的输电杆塔, 地面的沉降会造成杆塔倾斜、折断, 影响电力的安全输送, 造成极大的经济损失^[1-2]。对于地下采空区的检测可以防止地面沉降对电力设施的危害, 有效降低事故发生的可能性^[3-4]。

目前针对采空区的探测方法以物探为主, 其中高密度电法在采空区探测中应用较多^[5-7]。它采用向地下注入直流或超低频电流, 通过测量电极间电位差, 利用地下介质间导电性的差异计算出视电阻率, 根据不同反演手段反演出地下电阻率断面图, 判断地下地质结构。传统高密度电法在测量时需要排布测线, 三维测线一般排布呈矩形, 对于地下地质的反演同一深度的分辨率相同, 这种测量方式需要的测量数据很多, 反演计算繁杂, 且测量系统传感器和线缆较多, 控制麻烦, 排布和移动测量效率较低, 并不适合电力领域防控地下采空区危害使用^[8-9]。

本文针对电力杆塔下采空区分布的特点, 设计了采空区电法检测的电极系统, 采用集中—分布式检测方式, 可有效减少电力杆塔下采空区检测的传感器和线缆数量, 优化系统控制, 精简有效检测数据量, 提高采空区检测的效率。

1 杆塔下采空区检测原理

1.1 电法检测原理

采空区电法检测基本上都是基于电阻率法的原理^[10], 以四电极电法检测为例, 如图 1 所示, 激励电流信号 I 通过 A 、 B 电极注入到地下, 检测电压信号 U 通过 M 、 N 电极接收, 利用 I 、 U 以及激励检测电极之间的距离关系就可以得到 MN 之间地下一定深度介质的视电阻率 ρ_s 。计算公式如下^[11]:

$$\rho_s = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \cdot \frac{U}{I}, \quad (1)$$

式中, 代表了电极 A 和 M 之间的距离, 同样, BM 、 AN 、 BN 分别代表了电极 B 和 M 、电极 A 和 N 、电极 B

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-11-17

基金项目: 国家电网公司科学技术项目(52053016000X); 国家自然科学基金项目(51677181)

作者简介: 张来福(1967-), 男, 工学博士, 正高级工程师, 研究方向为电力设备检测与成像。Email: zhanglaifu479@163.com

通讯作者: 李士强(1983-), 男, 工学博士, 副研究员, 研究方向为多物理场智能探测与成像技术。Email: lsq07@mail.iece.ac.cn

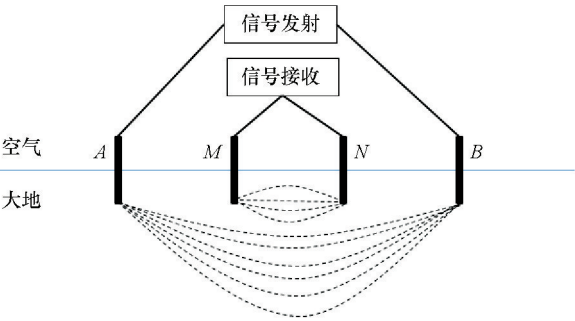


图 1 四电极电法检测原理

Fig.1 Principle of four-electrode electrical method

和 N 之间的距离。根据静电场理论可知,激励电流在地下的分布主要集中在浅表地层,电流流入深度与激励电极之间的位置以及地质分布的电学参数相关。考虑到地质异常体的存在,一般地质异常体可分辨的地层深度要小于 $AB/2$, AB 为激励电极 A 和 B 之间的距离^[12,13]。

在高密度电法检测中,需要排布具有很多电极的测线,与四电极法相同,检测时电极需要轮换激励检测,其对地质异常体的分辨率与检测电极对之间的距离直接相关,检测电极对越近,检测分辨率越高。

1.2 输电杆塔下采空区检测特点

输电杆塔下采空区具有隐蔽性强,规整性差的特点^[14],其引起的地面塌陷会使电力杆塔出现倾斜与沉降,进而产生的非荷载应力极有可能导致杆塔构件破坏、断裂、变形等事故发生,对输电线路安全运行构成严重威胁^[15]。

有研究资料表明^[16-17],地下采空区引起的地面塌陷区域的大小与地质条件、采空区的深度和体积密切相关。松软的地层容易引起塌陷,采空区距离地面越近引起的塌陷面积越大,采空区的体积越大造成的危害也越大。针对杆塔下采空区危害问题,考虑其特殊的空间环境,我们重点关注的是杆塔塔基正下方的倒三角区域内的采空区分布问题,如图 2 所示。在这个关注区域中,越靠近杆塔塔基,采空区可能造成的危害越大,对采空区检测的分辨率要求越高,相反,越远离塔基,对采空区检测的分辨率要求越低。

综上所述,依据输电杆塔下采空区检测的特点,可以将地面上的检测电极设置成中间密集,四周粗放的分布形式,如图 3 所示,既可以满足杆塔下采空区检测的需求,又可以减少不必要的电极和线缆,优化检测电极系统,提高检测效率,契合电力杆塔采空区检测轻便、快捷的要求。

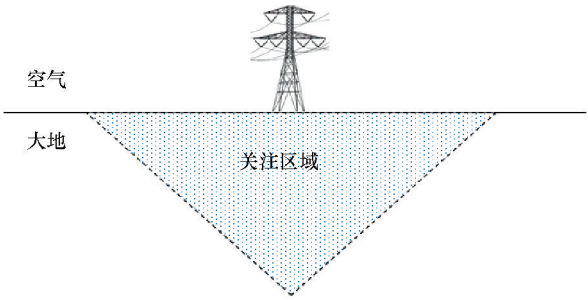


图 2 输电杆塔下采空区检测问题

Fig.2 Detection of goaf under transmission tower

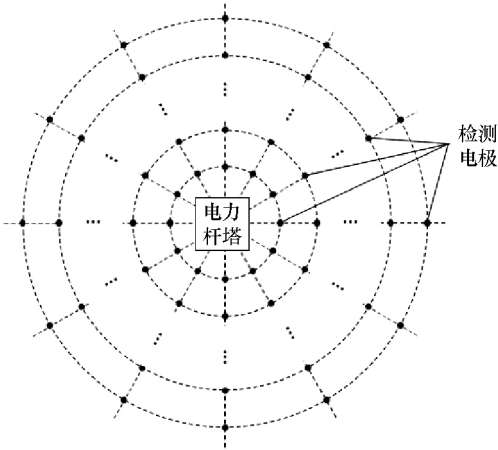


图 3 检测电极布置示意

Fig.3 The arrangement of detection electrode

2 电极系统设计

电极系统的设计基于实验室自行研制的电法探测系统。在设计时,选用图 3 所示的电极布置方式,测线选用 16 芯电缆,每条测线电极数量为 32 个,电极间距 10 m,最大电极距为 320 m,电极排列选用常规的对称四电极排列,采集系统选用原仪器设计的数据采集系统,采集及处理软件采用 Labview 软件设计,数据反演解释软件选用 Matlab 软件编写。

设计的电法探测电极系统主要包括:控制单元、测线选择单元、测线电极轮换单元以及测线电极,如图 4 所示。

在图 4 中,首先控制单元通过 485 通讯对测线选择单元进行控制,选择当前进行测量的测线;激励电流信号则通过 A、B 由测线选择单元输送给当前测量测线,并在测线电极轮换单元的控制下由测线电极注入待检测大地;同样,在测线电极轮换单元的控制下,测线中电极探测的地面电压信号经测线选择单元后由 M、N 输出。

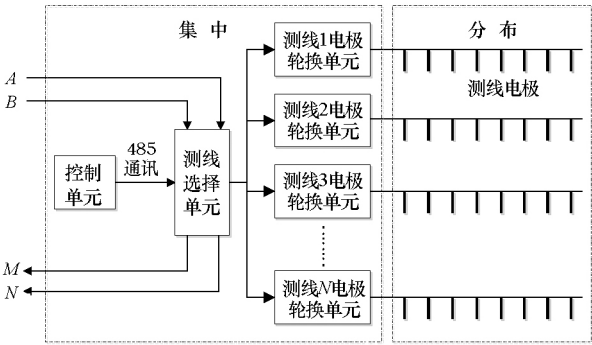


图 4 电极系统原理框图

Fig.4 Principle block diagram of electrode system

2.1 控制单元设计

电法探测电极系统的控制主要由上位机来实现,采用 Labview 语言设计。控制单元主要实现的功能包括控制当前测线的选择、激励电流信号在特定电极上的输出和探测电压信号在特定电极上的检测,所设计控制单元的工作流程如图 5 所示。

控制单元在正式开始工作前,需要设置系统工

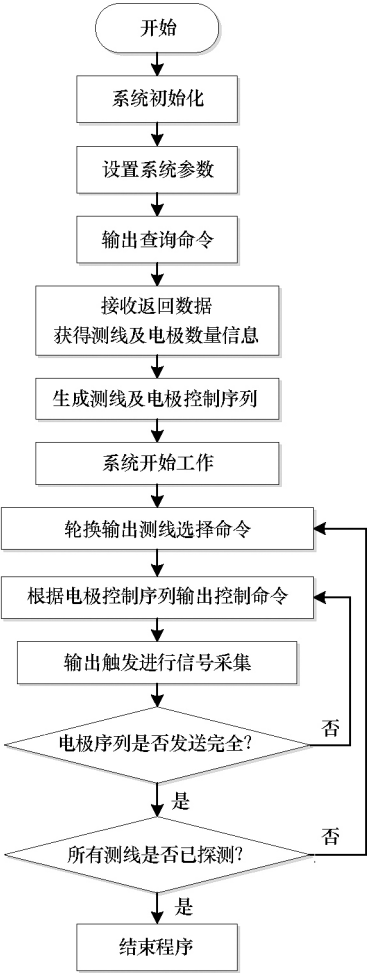


图 5 控制单元工作流程

万方数据 the workflow of control unit

作参数,包括程序电极间距、电极轮换间隔、采集信号时长等。同时,控制单元会对每条测线以及电极进行查询,确保测线以及电极的正常工作状态,并根据测线及电极的数量生成相应的测线和电极轮换控制序列。在系统正式工作时,控制单元将根据测线和电极轮换控制序列输出控制命令,保证电极控制系统的正常工作,在探测完成后结束系统工作状态。

2.2 测线选择单元设计

测线选择单元主要通过控制单元输送的控制命令控制继电器开关的通断来实现不同测线之间的切换。测线选择单元与控制单元之间通过 485 通讯线实现信号和控制命令的传输,其核心为 stm32 系统。测线选择单元的工作流程如图 6 所示。

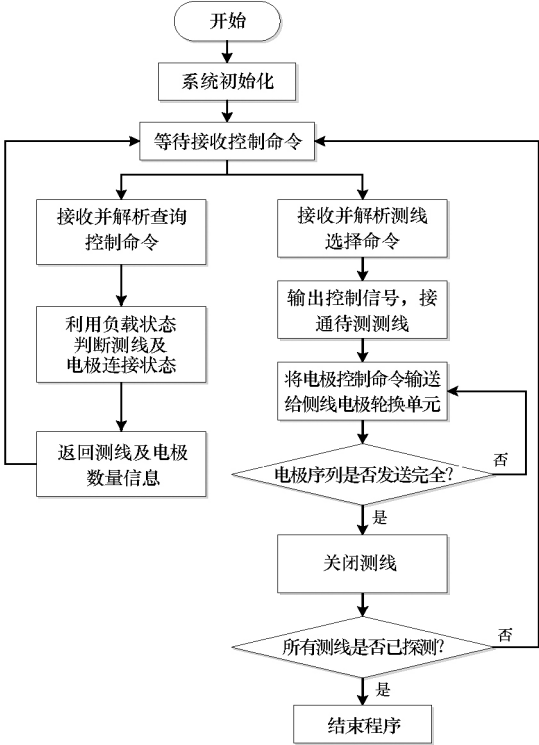


图 6 测线选择单元的工作流程

Fig.6 Workflow of line selection unit

测线选择单元在系统初始化以后开始工作,等待接收控制命令,当接到查询命令后,根据命令利用负载状态判断测线及电极连接状态,并将信息汇总后与地址信息一起输送给控制单元。控制单元根据这些信息生成测线选择及电极轮换控制命令,并将这些命令依据系统探测需要顺序输送给测线选择单元。测线选择单元接收控制命令,根据命令执行相应操作,当电极序列控制命令发送完毕以后关闭测线,并等待接收控制单元的命令;当所有测线探测完毕,结束工作。

测线选择单元中电极轮换命令的实现主要通过

继电器来实现。继电器在驱动电路的作用下,根据控制命令选择接通或关断相应的测线连接。所设计的继电器开关电路原理图如图 7 所示。

2.3 测线电极轮换单元设计

测线电极轮换单元需要根据控制单元输出的命令控制继电器的开合,使 A、B 激励电流端注入的信号和 M、N 电压检测端分别与测线上的电极连接,确

保激励电流信号按照要求注入大地和检测电压信号采集。考虑到电极数量较多,控制复杂,在设计时可以采用锁存器结合译码器实现信号控制的扩展。由锁存器结合译码器可以很方便地将输入的 4 路控制信号扩展成 16 路,同时由于锁存器的存在可以简化系统的控制设计,优化系统结构。设计的锁存器结合译码器电路如图 8 所示。

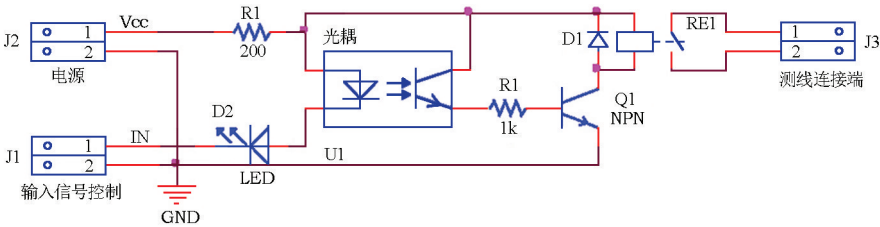


图 7 继电器开关电路原理

Fig.7 Schematic diagram of relay switching circuit

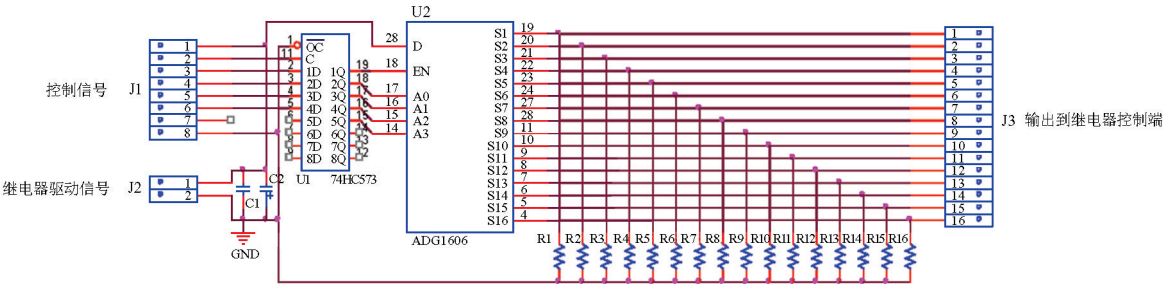


图 8 锁存器结合译码器电路

Fig.8 Latch combined decoder circuit

3 系统实验

3.1 电阻网络实验

设计的测线选择单元和电极轮换单元集成在一个电极控制箱中,如图 9 所示。采用设计的电法探测电极系统结合实验室已有的电法发射和接收系统进行实验,通过检测电阻网络可以验证电极系统的工作状态,利用电法计算软件可以对检测结果进行验证。

按照图 10 所示电阻网络进行测试,得到如图 11 所示的测试曲线,对采集的数据进行初步处理,利用计算软件可以得到测线梯形图。图 11 的梯形图中阻值较高部分为中部的红色区域,以其为中心,测量计算数据左右对称,与电阻网络的分布情况一致。从测量计算结果来看,设计的电法探测电极系统可以根据电极数量生成测量序列,并在系统的控制下实现电法测量。

3.2 野外电极系统考察实验

为考察电极系统的实用性,用实验室研制的电



图 9 电极控制箱

Fig.9 Electrode control box

法仪器对北京市某地下管道进行了探测实验。管道位于立交桥地下 15 m 左右,距离立交桥头约 250 m。受场地空间限制,布置了两条平行测线,每条测线长 320 m,电极距 10 m,测线起始在立交桥中,测线尾距离立交桥头约 20 m,采用常规四电极法测量。图 12 为野外实验现场仪器,图 13 为两条测线的探测结果。

由图 13 可以看到,2 条剖面都清晰显示出检测地面下约 17 m 处存在一个高阻区域,距离测线尾约



图 10 实验电阻网络
Fig.10 Experimental resistance network



图 11 电阻网络测试结果示意
Fig.11 Result of resistance network test

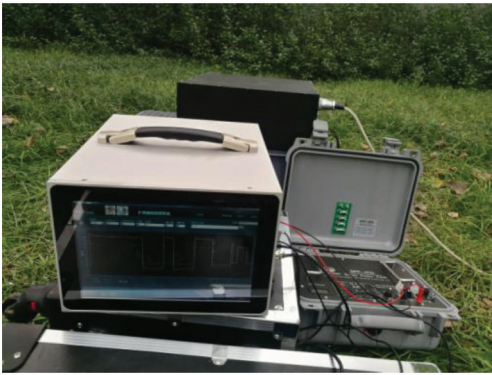


图 12 野外实验仪器
Fig.12 Photo of field experiment equipment

220 m,可判断为地下管道;地表区域存在的两个高阻区为地表构造所致。
从野外实验结果可知,本文所设计的电极系统,可以实现对地下空洞位置的检测。

4 结论

输电杆塔下采空区因其特殊的空间环境造成其检测有异于常规的特点,在检测过程中,充分考虑重点关注区域的检测,简化相关性较小区域的检测工作,可以有效地提高塔基下采空区检测的效率,贴合实际检测工作的需要。
本文利用输电杆塔下采空区检测重点关注区域的特点,设计了集中—分布式的电法探测电极系统,采用较少检测数据即可完成塔基下采空区检测,可有效减少检测系统的传感器和线缆数量,优化系统控制,兼顾重点区域精细检测、非重点区域粗放考察

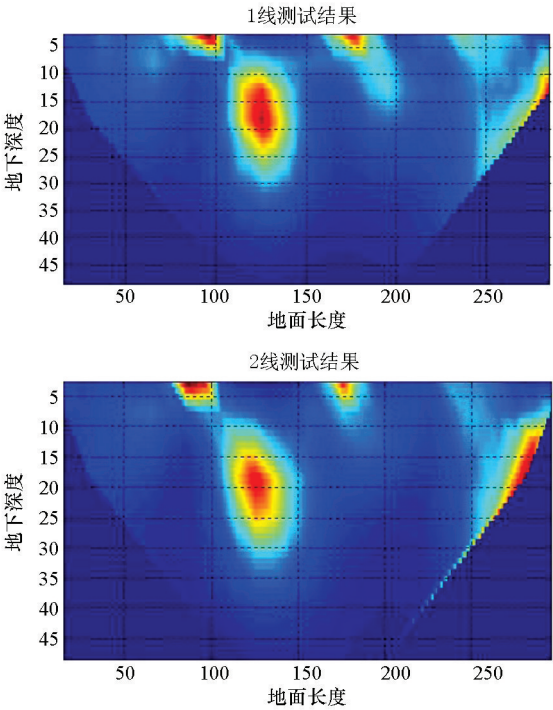


图 13 地下管道分布的二维剖面
Fig.13 2-D section of underground pipeline distribution

的需求。根据电阻网络实验以及野外地下管道检测的结果可以看出,设计的电极系统可以实现电法测量。本研究仅对设计的电法系统的可行性以及野外工作性能进行了验证,下一步还需对系统进行进一步的优化,满足实际工作的需要。本工作可以为电力领域输电杆塔下采空区的检测工作提供参考。

参考文献 (References) :

[1] 张建强,杨昆,王予东,等. 煤矿采空区地段高压输电线路铁塔地基处理的研究[J]. 电网技术, 2006, 30(2):30-34.
Zhang J Q, Yang K, Wang Y D, et al. Research on foundation treatment of high voltage transmission towers erected above goaf of coal mine[J]. Power System Technology, 2006, 30(2):30-34.
[2] 陈志梅,袁广林,宋康,等. 煤矿采空区高压输电线路交全性评估[J]. 中国电力, 2015, 48(10):101-106.
Chen Z M, Yuan G L, Song K, et al. Safety evaluation of high voltage transmission lines in coal mining areas[J]. China Electric Power, 2015, 48(10):101-106.
[3] 任堂正,杨俊杰,楼志斌,等. 基于 ZigBee 的覆冰区杆塔倾斜在线监测系统设计[J]. 电测与仪表, 2016(23):127-133.
Ren T Z, Yang J J, Lou Z B, et al. Design of online monitoring system of icing region tower tilt based on ZigBee[J]. Electrical

Measurement and Instrument, 2016(23):127-133.

[4] 贾雷亮. 采空区对架空输电线路的影响分析及其综合治理研究[D]. 北京:华北电力大学, 2012.

Jia L L. Analysis of the influence of goaf on overhead transmission line and its comprehensive treatment[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2012.

[5] 薛国强, 潘冬明, 于景邗. 煤矿采空区地球物理探测应用综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(05):427-432.

Xue G Q, Pan D M, Yu J C. Review the applications of geophysical methods for mapping coal-mine voids[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(05):427-432.

[6] 杨镜明, 魏周政, 高晓伟. 高密度电阻率法和瞬变电磁法在煤田采空区勘查及注浆检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2014, 29(1):362-369.

Yang J M, Wei Z Z, Gao X W, et al. The application of the methods of high density resistivity method and transient electromagnetic to detecting coal mining goaf and to inspect grouting effect [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29(1):362-369.

[7] 陈龙, 任龙. 基于瞬变电磁法的采空区探测[J]. 露天采矿技术, 2017, 32(3):15-18.

Chen L, Ren L. Goaf detect based on transient electromagnetic method [J]. Opencast Mining Technology, 2017, 32(3):15-18.

[8] 刘爱华, 郑鹏. 影响采空区精确探测关键因素的分析研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2008(2):132-138.

Liu A H, Zheng P. Analysis of key factors affecting the precision of goaf detection [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008(2):132-138.

[9] 王爱国, 马巍, 王大雁. 高密度电法不同电极排列方式的探测效果对比[J]. 工程勘察, 2007(1):72-75.

Wang A G, Ma W, Wang D Y. Comparison of detection effect of different electrode arrangements in high density electricity method [J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2007(1):72-75.

[10] 刘海飞. 高密度电阻率法数据处理方法研究[D]. 长沙:中南大学, 2004.

Liu H F. Research on data processing method of high density resistivity method[D]. Changsha:Central South University, 2004.

[11] 张丽华, 潘保芝, 单刚义, 等. 水槽模型设计及视电阻率曲线测量[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(3):63-65.

Zhang L H, Pan B Z, Shan G Y, et al. Design of sink model and measurement of apparent resistivity curve[J]. Experimental Technology and Management, 2019, 36(3):63-65.

[12] 郭秀军, 王兴泰. 用高密度电阻率法进行空洞探测的几个问题[J]. 物探与化探, 2001, 25(4):306-311.

Guo X J, Wang X T. Some problems in the application of high density resistivity method to cavity exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2001, 25(4):306-311.

[13] 王士党, 杨冲, 钟声. 采空区探测方法的选择[J]. 煤炭技术, 2015, 34(9):225-228.

Wang S D, Yang C, Zhong S. Selection of detection methods in goaf[J]. Coal Technology, 2015, 34(9):225-228.

[14] 张来福, 李士强, 刘国强, 等. 基于扩频编码的电磁探测系统研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S2):263-269.

Zhang L F, Li S Q, Liu G Q, et al. Research on electromagnetic detection system for spread spectrum code[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S2):263-269.

[15] 房俊龙, 吕洪圣, 赵朝阳, 等. 基于物联网技术的输电杆塔倾斜监测系统设计[J]. 电测与仪表, 2015, 52(1):111-114.

Fang J L, Lv H S, Zhao C Y, et al. Tilt monitoring system of transmission line towers based on the internet of things technology [J]. Electrical Measurement and Instrument, 2015, 52(1):111-114.

[16] 巫永忠. 地面沉降地质灾害的原因与防治方法[J]. 西部资源, 2018, 86(5):108-109.

Wu Y Z. Causes and prevention methods of geological hazards caused by land subsidence [J]. Western Resources, 2018, 86(5):108-109.

[17] 白晋锋. 采煤地面塌陷的影响因素的分析[J]. 山西煤炭, 2018, 38(1):9-12.

Bai J F. Influencing factors of ground collapse induced by coal mining [J]. Shanxi Coal, 2018, 38(1):9-12.

The design of electrode system for electrical detection of goaf under transmission tower

ZHANG Lai-Fu¹, LI Shi-Qiang², LIU Guo-Qiang², YANG Hong¹, TIAN Yun¹, LI Guo-Dong¹
(1. Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan 030001, China; 2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Goaf tends to cause land subsidence and threaten the safety of power grid operation. It is of great significance to detect the distribution of underground goaf. Traditional goaf electrical detection technology has complex control system and complicated survey line arrangement, needs many sensors and cables as well as large amounts of measurement data, and is characterized by inefficient layout and mobile measurement, and hence it is not suitable for the use of electric power field to prevent and control the hazards of underground goaf. In view of the distribution characteristics of goaf under power pole and tower, the authors designed an electrode system for goaf electrical detection. The centralized-istributed detection method can effectively reduce the number of sensors and cables for goaf detection under power pole and tower, optimize the system control, simplify the effective detection data and improve the efficiency of goaf detection.

Key words: goaf detection; electrical detection technology; electrode system; survey line