

电缆隧道中盾构接地系统接地电阻计算及测量

杜学龙¹, 仇天骄², 张晓颖², 卞 斌², 张 斌², 邹 军¹, 朱占巍³

(1. 清华大学电机系, 北京 100084; 2. 北京电力经济技术研究院, 北京 100055;

3. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

摘要: 接地电阻是接地系统安全运行的重要参数之一。本文提出了考虑钢筋水泥层电阻率时, 盾构接地系统(基于盾构结构的接地系统)接地电阻的计算方法。基于半球形接地极, 给出计算双层土壤介质时等效电阻率的方法, 并将该方法推广到盾构接地系统, 计算钢筋水泥层和土壤双层介质的等效电阻率, 从而采用已经被提出的简化计算公式求解盾构接地系统的接地电阻。同时采用三极法测量北京市岳各庄 220kV 电缆隧道盾构接地系统的接地电阻。测量结果表明, 本文方法计算值偏小, 与测量值相对误差在 10% ~ 32% 之间, 可用于计算盾构接地系统接地电阻。

关键词: 电缆隧道; 接地系统; 接地电阻; 接地电阻测量

DOI: 10.12067/ATEEE1612043

文章编号: 1003-3076(2017)07-0084-05

中图分类号: TM152

1 引言

接地电阻是电缆接地系统安全运行的重要参数之一, 其计算对接地系统设计有重要意义^[1-3]。

近年来, 随着城市供电容量增大, 500kV 和 220kV 电缆系统广泛敷设在地下隧道中, 出于结构安全考虑, 地下隧道墙体均采用钢筋混凝土结构, 利用混凝土中钢筋作为接地体, 可简化电缆系统接地装置。为方便计, 称其为盾构接地系统(Grounding System using the Tunnel Foundation, GSTF)。

接地电阻计算主要有两种方法, 即解析计算方法和数值算法^[4-6]。对于本文讨论的盾构接地问题, 由于盾构接地系统周围媒质多样性及钢筋网络结构复杂性, 通过解析公式求解盾构接地系统接地电阻有一定的困难。文献[7]通过数值计算方法分析了盾构接地系统接地电阻的影响因素, 并给出简化计算公式计算其接地电阻, 但该公式需要土壤电导率小于 3 倍的水泥层电导率为前提。

在实际工况中, 为保证电缆隧道结构的安全可靠性, 其水泥层强度一般在 C60 以上, 该强度下水泥层吸水性差, 同时为了防止地下水渗入隧道内, 隧道水泥层中加入防水层, 预制的混凝土管片之间也

加入了防水橡胶垫。在该情况下, 隧道水泥层和土壤的电阻率相差较大, 不能满足文献[7]中简化公式的适用条件。

针对该问题, 本文以半球形接地极为例, 给出计算双层土壤等效电阻率的方法, 并将该方法推广到盾构接地系统中, 计算水泥层和土壤双层介质时的等效电阻率, 再采用简化计算公式计算盾构接地系统的接地电阻。为验证该方法可行性, 采用三极法测量北京市岳各庄 220kV 电缆隧道盾构接地系统的接地电阻。计算值与测量值对比表明, 本文方法满足工程计算要求。同时, 本文方法无需复杂的数值计算过程, 便于在工程中的应用。

2 求解盾构接地系统接地电阻

2.1 盾构接地系统接地电阻求解问题

以北京市岳各庄 220kV 变电站工程为例, 其盾构隧道由钢筋混凝土管片衬砌, 预制拼装, 圆形断面, 内径 3.5m, 外径 4.0m。正常情况下, 不同钢筋混凝土管片中的钢筋无电气连接, 为形成盾构接地系统, 将钢筋混凝土管片中的钢筋通过铁片引出, 如图 1 中 A 点所示, 不同管片上的铁片通过环向钢条和纵向钢条相互连接, 如图 1 中 B 点和 D 点所示,

收稿日期: 2016-12-14

作者简介: 杜学龙 (1988-), 男, 山东籍, 博士研究生, 研究方向为接地系统的研究分析;

仇天骄 (1985-), 女, 北京籍, 工程师, 硕士, 研究方向为电力电缆设计及相关技术研究。

从而实现整个盾构钢筋网络的电气连接。图 1 中 C 点为螺栓, 固定相邻混凝土管片。

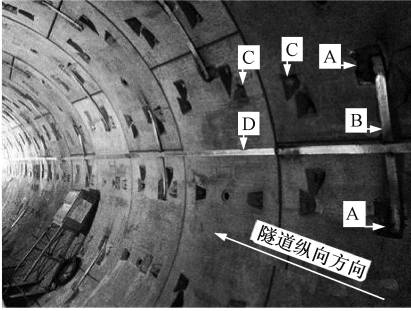


图 1 岳各庄盾构接地系统

Fig. 1 GSTF of YueGe village

当该盾构接地系统满足一定条件^[7], 即当隧道钢筋层中钢筋个数大于 60, 土壤电导率小于 3 倍水泥层电导率, 隧道长度远大于 2 倍的隧道埋地深度且隧道深度远大于隧道半径时, 可采用式(1)近似求解其接地电阻:

$$R \approx \frac{\rho}{\pi} \frac{1}{L} \left(\ln \frac{2L}{\sqrt{2}r_{\text{钢}}d} - 1 \right) \quad (1)$$

式中, ρ 为土壤电阻率; L 为电缆隧道长度; $r_{\text{钢}}$ 为钢筋层半径; d 为电缆隧道深度。

电缆隧道水泥层电阻率与土壤电阻率相差较大, 不能忽略水泥层电阻率对接地电阻的影响, 应获得水泥层和土壤层的等效电阻率, 再通过式(1)求解其接地电阻。

2.2 水泥层和土壤层等效电阻率求解

通过解析方法求解圆柱形双层介质的等效电阻率是比较困难的, 而通过数值方法求解其等效电阻率又不便于工程应用。同时考虑到盾构接地系统较长, 可以近似忽略其散流的端部效应, 认为均匀散流, 该情况与半球形接地极散流效果类似, 因此本文通过解析方法求解半球形接地极双层土壤的等效电阻率, 并用该方法近似求解盾构接地系统水泥层和土壤层的等效电阻率。

假设一个半球形接地极如图 2 所示, 其半径为 R_0 , 有两层土壤, 电阻率分别为 ρ_1, ρ_2 , 假设第一层土壤同样为半球形, 其半径为 R_1 , 有电流 I 通入该接地极。

根据镜像法, 土壤中距球心距离为 r 处的电流密度为^[8]:

$$J = \frac{I}{2\pi r^2} \quad (2)$$

可得半球形接地极上的电位为:

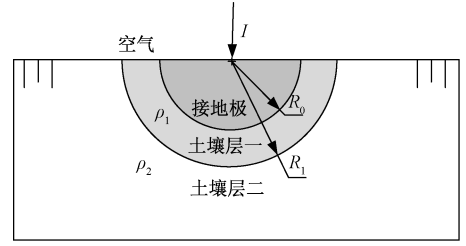


图 2 半球形接地极

Fig. 2 Hemispherical grounding electrode

$$\begin{aligned} U &= \int_{R_0}^{R_1} \frac{\rho_1 I}{2\pi r^2} dr + \int_{R_1}^{\infty} \frac{\rho_2 I}{2\pi r^2} dr \\ &= \frac{I}{2\pi} \left[\rho_1 \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_1} \right) + \frac{\rho_2}{R_1} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

若假设两层土壤的等效电阻率为 ρ , 可得半球电极电位为:

$$U = \int_{R_0}^{\infty} \frac{\rho I}{2\pi r^2} dr = \frac{I\rho}{2\pi R_0} \quad (4)$$

对比式(3)和式(4)可得等效电阻率为:

$$\rho = R_0 \left[\rho_1 \left(\frac{1}{R_0} - \frac{1}{R_1} \right) + \frac{\rho_2}{R_1} \right] \quad (5)$$

基于等面积原则, 采用该方法近似求解盾构接地系统中水泥层和土壤层的等效电阻率, 由于半球面积与半径平方成正比关系, 而圆柱侧面积与半径成正比关系, 则式(5)应变为:

$$\rho = \sqrt{r_0} \left[\rho_3 \left(\frac{1}{\sqrt{r_0}} - \frac{1}{\sqrt{r_1}} \right) + \frac{\rho_4}{\sqrt{r_1}} \right] \quad (6)$$

式中, r_0 为水泥层内半径; r_1 为水泥层外半径; ρ_3 为水泥层电阻率; ρ_4 为土壤电阻率。

根据以上分析可知, 首先通过式(6)求出水泥层与土壤层的等效电阻率, 然后再通过式(1)计算盾构接地系统的接地电阻。

应注意, 式(1)与半球形接地极并不存在结构等效性, 本节只是选用半球形接地极情况近似推导盾构接地系统中水泥层和土壤层等效电阻率。

3 岳各庄盾构接地系统接地电阻的测量

为验证本文方法的可行性, 以北京市岳各庄盾构接地系统为例, 测量其接地电阻, 并与本文理论计算结果对比。

根据现场工况, 采用四极法测量土壤电阻率, 采用三极法测量盾构接地系统的接地电阻。测量工具包括: 型号为 DER2571B 的接地电阻测量仪、4 根长度为 20cm 的垂直接地极、若干条长度为 20 ~ 100m 不等的导线、8 节电池以及其他辅助工具等。

3.1 土壤电阻率测量原理及结果

四极法是一种用两个电极使土壤中流过电流,再用另两个电极测出其附近某两点间土壤的电位差,从而计算出土壤电阻率的方法。若这四个电极置于一一条线上,埋地深度和相邻间距相等,即为等距四极法^[9],如图 3 所示。其中 h 为接地极埋地深度, a 为相邻接地极间距, I 为接地极流出电流, ρ_4 为土壤电阻率。

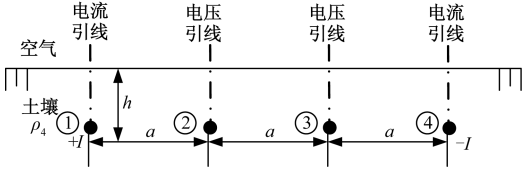


图 3 四极法原理图
Fig. 3 Four-electrode method

当 $a \geq 10h$ 时,可获得土壤电阻率为^[9]:

$$\rho_4 = 2\pi aR \tag{7}$$

式中, R 为接地电阻测量仪测量的电阻值。

实施土壤电阻率测量时, h 为垂直接地极长度,为 20cm; a 为两个接地极之间的距离,在此选择 4m,满足条件 $a \geq 10h$ 。根据图 3 进行连线,测量结果如图 4 所示。



图 4 土壤电阻率测量结果
Fig. 4 Measurement result of soil resistivity

根据式(7)可得土壤电阻率为:

$$\rho_4 = 2\pi aR = 57.27(\Omega \cdot \text{m}) \tag{8}$$

3.2 盾构接地系统接地电阻测量原理及结果

三极法测量原理为对接地极施加电流,测量相应电压,进而计算接地电阻值,其测量原理接线图如 5 所示^[10]。其中,1 为测量接地极,2 为测量电压极,3 为测量电流极, ρ_4 为土壤电阻率, R_3 为接地极 1 的半径。将接地极 1、3 近似为半球接地极,当电流 I 和 $-I$ 分别从接地极 1、3 流出,且选择 $d_{12} = 0.618d_{13}$, $d_{23} = (1 - 0.618)d_{13}$ 时,可获得接地极 1

和 2 之间的电压为^[8]:

$$V_{12} = \frac{\rho_4 I}{2\pi R_3} \tag{9}$$

半球形接地极 1 的电阻为:

$$R = \frac{\rho_4}{2\pi R_0} = \frac{V_{12}}{I} \tag{10}$$

根据以上分析可知,采用三极法时,应选择 $d_{12} = 0.618d_{13}$,同时为了减少误差,应满足 $d_{13} = (4 \sim 5)R_0$ 。

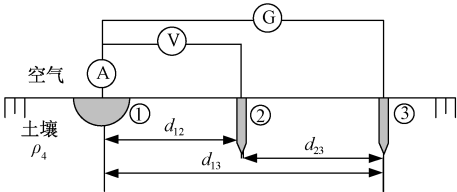


图 5 三极法原理图
Fig. 5 Three-electrode method

实施测量时,选取盾构接地系统长度为 20m 和 40m 两种情况, $d_{13} = 162\text{m}$, $d_{12} = 100\text{m}$,测量距离一方面满足测量精度要求,另一方面可以在该距离处寻找到合适的土壤。测量盾构接地系统接地电阻时的连接线如图 6 所示。

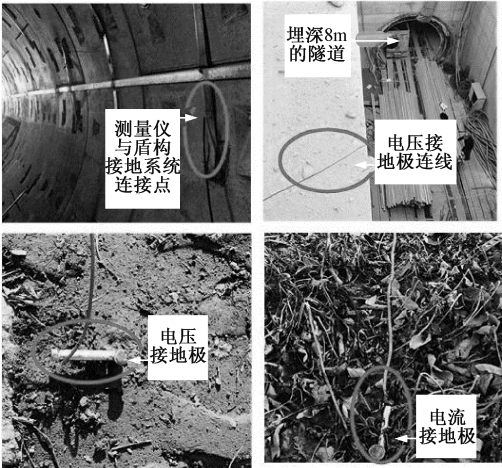


图 6 三极法连线图
Fig. 6 Connecting line of three-electrode method

根据以上连线,测量盾构接地系统为 20m 和 40m 两种情况时的接地电阻,在每种情况下,又选择不同的测量点,即测量仪与盾构接地系统不同的连接点,测试结果如图 7、图 8 所示。可以看出,20m 和 40m 的岳各庄盾构接地系统接地电阻分别为 2.745 Ω 和 2.235 Ω 。

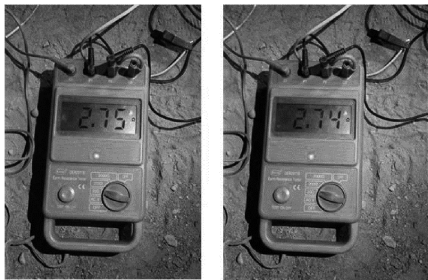


图7 20m 盾构接地系统接地电阻测量结果

Fig. 7 Measurement result of grounding resistance of GSTF with length of 20m

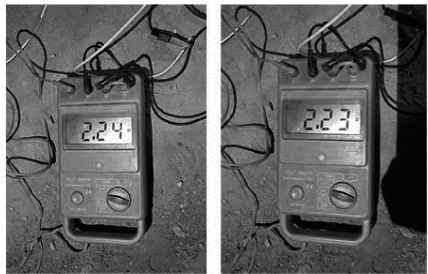


图8 40m 盾构接地系统接地电阻测量结果

Fig. 8 Measurement result of grounding resistance of GSTF with length of 40m

4 盾构接地系统接地电阻理论计算结果与测量结果对比

考虑到电缆隧道水泥层强度较大,吸水性差且具有防水层,在此选择水泥层电阻率范围为: $\rho_3 = 1000 \sim 1500 \Omega \cdot m$;岳各庄电缆隧道内外半径分别为: $r_0 = 1.75m$; $r_1 = 2m$;测量的土壤电阻率为: $\rho_4 = 57.7 \Omega \cdot m$;根据式(6)计算水泥层与土壤层的等效电阻率范围为: $\rho = 118 \sim 150.2 \Omega \cdot m$ 。选择钢筋层的半径为 $r_{\text{钢}} = (r_0 + r_1)/2$,根据式(1)计算 20m 和 40m 盾构接地系统的接地电阻,与测试结果对比,如图 9、图 10 所示。可以看出,理论计算结果比测量结果小,其相对误差在 10% ~ 32% 之间,满足工程计算要求。

盾构接地系统接地电阻理论计算值与测量值的相对误差来源于多方面因素,主要包括将钢筋网络近似等效为圆柱形钢壳;土壤电阻率的杂散性;水泥层与土壤等效电阻率的近似等效计算等。同时可以看出,文献[7]中的简化公式给出了盾构接地系统接地电阻的最小值,而本文方法给出了满足工程需要的计算值。

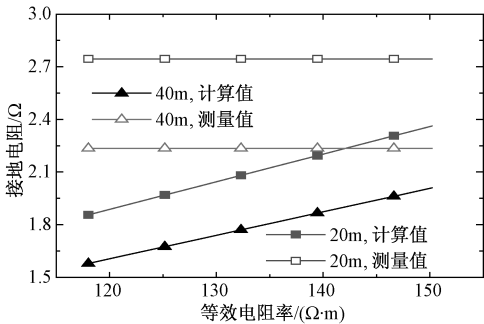


图9 盾构接地系统接地电阻计算值与测量值

Fig. 9 Calculation result and measurement result of grounding resistance of GSTF

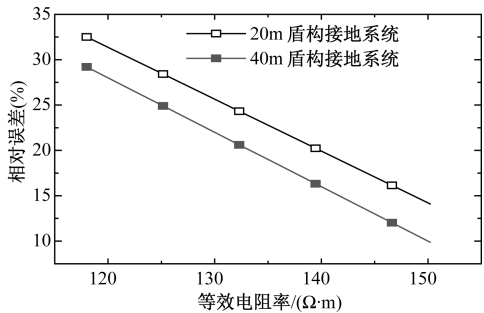


图10 盾构接地系统接地电阻计算值与测量值相对误差

Fig. 10 Relative error between calculation result and measurement result of grounding resistance of GSTF

5 结论

本文提出计算电缆隧道水泥层和土壤电阻率有较大差异时盾构接地系统接地电阻的方法,并测量了北京市岳各庄盾构接地系统的接地电阻。测量结果表明,本文提出的理论计算值偏小,与测量值相对误差在 10% ~ 32% 之间,可用于工程计算。同时,本文方法计算简单,便于工程应用。

参考文献 (References):

[1] 王斌, 张宇, 贲飞, 等 (Wang Bin, Zhang Yu, Ben Fei, et al.). 基于虚拟现实技术的 $\phi 5.5m$ 电力电缆隧道内部布置方案研究 (Research on internal layout scheme of $\phi 5.5m$ power cable tunnel based on virtual reality technology) [J]. 华东电力 (East China Electric Power), 2010, 38 (4): 540-541.

[2] 王晓彤, 林集明, 陈葛松, 等 (Wang Xiaotong, Lin Jiming, Chen Gesong, et al.). 广东-海南 500kV 海底电缆输电系统电磁暂态研究 (Electromagnetic transient

- analysis of 500kV submarine cable transmission system from Guangdong to Hainan) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2008, 32 (12): 6-10.
- [3] 李景禄, 郑瑞臣 (Li Jinglu, Zheng Ruichen). 关于接地工程中若干问题的分析和探讨 (Discussion on relative parameters in grounding technology) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2006, 32 (6): 122-124.
- [4] 费万民, 张艳莉, 吕征宇, 等 (Fei Wanmin, Zhang Yanli, Lv Zhengyu, et al.). 电力系统中直流接地电阻检测和接地故障点探测的方法研究 (Study on methods of measuring insulation resistance between ground and DC power supply and detecting fault grounded point) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2001, 20 (3): 60-63.
- [5] 卢中山, 张小青, 李建修 (Lu Zhongshan, Zhang Xiaoqing, Li Jianxiu). 一种有效的接地电阻测量方法 (Method to efficiently measure grounding resistances) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2010, 29 (4): 44-47.
- [6] 李增, 吴广宇, 付龙海, 等 (Li Zeng, Wu Guangning, Fu Longhai, et al.). 双层结构土壤模型地网接地电阻的简化计算 (Simplified calculation of grounding resistance of substation grounding system in the two-layer soil) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2008, 34 (1): 45-48.
- [7] 杜学龙, 仇天骄, 张晓颖, 等 (Du Xuelong, Qiu Tianjiao, Zhang Xiaoying, et al.). 电缆隧道中盾构接地系统接地电阻简化计算公式 (Simplified formula for calculating grounding resistance of grounding system using tunnel foundation in cable tunnel) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2014, 33 (11): 44-49.
- [8] 马信山, 张济世, 王平 (Ma Xinshan, Zhang Jishi, Wang Ping). 电磁场基础 (Fundamentals of electromagnetic fields) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2008.
- [9] 解广润 (Xie Guangrun). 电力系统接地技术 (Power system grounding technology) [M]. 北京: 中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1999.
- [10] 徐程, 庞亮. (Xu Cheng, Pang Liang). 直线三极法接地电阻测试原理与方法 [J]. 科技创业月刊 (Pioneering with Science & Technology Monthly), 2010, (10): 177-178.

Calculation and measurement of grounding resistance of grounding system using tunnel foundation in cable tunnel

DU Xue-long¹, QIU Tian-jiao², ZHANG Xiao-ying², BIAN Bin², ZHANG Bin², ZOU Jun¹, ZHU Zhan-wei³

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Electric Power ECO INST, Beijing 100055, China; 3. State Grid Beijing

Electric Power Company, Beijing 100031, China)

Abstract: The grounding resistance is one of the important parameters for the safe operation of the grounding system. The method for calculating the grounding resistance of grounding system using the tunnel foundation (GSTF) and considering the cement layer resistivity is provided in this paper. Based on the hemispherical electrode, the method for calculating the equivalent soil resistivity of the two-layer soil is described. And it is used to solve the equivalent resistivity of cement layer and soil in GSTF. Then, the simplified formula has been provided which can be used to calculate grounding resistance of GSTF. At the same time, the three-electrode method is chosen to measure the grounding resistance of GSTF in YueGe village. The results show that the value of calculation using the method provided in the paper is less than that of the measurement. The relative error between these results is from 10% to 32%. And the method described in the paper can be used to calculate the grounding resistance of GSTF.

Key words: cable tunnel; grounding system; grounding resistance; measurement of grounding resistance