

文章编号:1005-0523(2020)05-0009-06

大地分层环境下隧道牵引网阻抗研究

邢光兵,陈剑云

(华东交通大学电气与自动化工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:为保证隧道内牵引网阻抗值计算的准确性和精确度,有必要对隧道中牵引网的阻抗特性计算理论和计算方法予以足够的重视。提出隧道中大地水平分层模型,推导了大地水平分层情况下隧道架空导线自阻抗和互阻抗计算表达式,考虑隧道内两根导线系统,计算导线阻抗,分析变化规律。算例分析表明:该方法计算隧道架空导线阻抗的电阻部分受第1层土壤电阻率影响较大,电抗部分几乎不受影响;第1层土壤在一定厚度内变化时,对隧道架空导线阻抗的电阻部分影响较大,而电抗部分与第1层土壤的厚度几乎无关,为大地水平分层情况下隧道架空导线阻抗计算提供理论依据。

关键词:电气化铁路;隧道;牵引网;阻抗;土壤电阻率

中图分类号:U223.2

文献标志码:A

本文引用格式:邢光兵,陈剑云.大地分层环境下隧道牵引网阻抗研究[J].华东交通大学学报,2020,37(5):9-14.

Citation format:XING G B,CHEN J Y. Calculation and analysis of the impedance value of tunnel traction network in layered soil structure[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2020,37(5):9-14.

DOI:10.16749/j.cnki.jecjtu.2020.05.002

随着我国高速电气化铁路的大量建设,长距离穿越隧道情形越来越普遍,比如川藏铁路隧道长度竟然占到总线路里程的80%;因此对于在隧道中牵引网的阻抗特性计算理论和计算方法必须予以重视,以保证隧道内牵引网阻抗值计算的准确性和精确度。

牵引网实际上可以归结为一个平行多导体的传输线系统^[1-2],其阻抗值的计算包括各导线的自阻抗和导线间的互阻抗。在系统中,大地表征的内阻抗值以及导线与大地之间的互阻抗是阻抗值的重要组成部分,它们与大地自然环境状况密切相关,其计算是一个复杂的电磁场求解问题。在大地为半无限平面假设的情况下,Carson给出了一个架空导线阻抗值的级数解,这就是工程中常用的Carson公式^[3]。但是对于导线架设在隧道环境下,相当于大地不再是平面,Tylavsky^[4]给出了均匀大地结构下隧道架空导线-地回路阻抗表达式,即Tylavsky公式。该式以大地作为回流回路用于计算隧道架空导线阻抗值,其大小主要受隧道地面复数深度影响。张桂南等^[5]采用Tylavsky公式计算隧道内牵引网阻抗矩阵。邓云川等^[6]考虑传输导线实际的回流回路,提出一种基于多导体系统的计算方法。但上述研究都没有考虑隧道中大地存在水平分层的情况,而实际隧道环境复杂,比如隧道四周土壤是不均匀的,多为分层结构^[7-8],且每层土壤的介电常数、土壤导电率和磁导率等电气参数都不同。

目前隧道架空导线-地回路阻抗计算都将大地视为均匀不分层结构,本文拟研究大地土壤分多层的情况下隧道中架空导线-地回路之阻抗的计算方法,为更为复杂的隧道环境下阻抗计算提供理论依据。首先建立分层的大地模型,计算电磁波穿透深度,并以此为依据推导隧道中土壤水平分2层时架空导线-地回路阻抗计算表达式,然后以2根架空导线为实例,计算阻抗曲线,分析其变化规律。

收稿日期:2020-03-31

基金项目:国家自然科学基金项目(51467004)

作者简介:邢光兵(1993—),男,硕士研究生,研究方向为牵引供电计算。E-mail:941649458@qq.com。

通信作者:陈剑云(1962—),男,教授,博士,研究方向为牵引供电系统计算及电力系统监控与自动化。E-mail:tiger984@163.com。

1 隧道架空导线阻抗计算基本公式

1987年,美国学者 Tylavsky 等人提出四周无限大地圆形隧道模型,从磁矢量势的波动方程出发,推导矿井环境中以大地为回流回路的导线阻抗计算表达式,即 Tylavsky 公式。该表达式适用于导体在任意导电率的均匀大地围绕的圆柱形电介质中偏心位置的阻抗计算,是目前隧道架空导线阻抗计算的基本公式。

如图 1 所示,隧道截面被等效为圆形,等效半径为 R ,导线 i 和导线 j 平行于隧道内壁,两根导线之间的距离为 d_{ij} ,与圆心夹角为 θ ,阴影部分为隧道四周大地,土壤导电率 σ 是土壤电阻率 ρ

的倒数,即 $\sigma = \frac{1}{\rho}$ 。

Tylavsky 公式的自阻抗是由导线表面的电场值产生的,导线在隧道截面的位置为 $(b+r_i, 0)$,自阻抗用 Z_s 表示

$$Z_s = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{R}{r_i} \right] + \mu_r \left(\frac{P}{R} \right) \frac{K_0 \left(\frac{P}{R} \right)}{K_1 \left(\frac{P}{R} \right)} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{b^2 + br_i}{R^2} \right) \frac{\cos n\theta}{n} \cdot \frac{K'_n \left(\frac{R}{P} \right) + \mu_r \left(\frac{P}{R} \right) nk_n \left(\frac{R}{P} \right)}{\mu_r \left(\frac{P}{R} \right) nk_n \left(\frac{R}{P} \right) - K'_n \left(\frac{R}{P} \right)} \right] \quad (1)$$

在求隧道中两根导线之间互阻抗时,假设两根导线的位置为 $(b, 0)$ 和 (ρ, θ) ,互阻抗用 Z_m 表示

$$Z_m = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \left[\ln \left[\frac{R^2}{\rho^2 + b^2 - 2b\rho\cos\theta} \right]^{1/2} + \mu_r \left(\frac{P}{R} \right) \frac{K_0 \left(\frac{R}{P} \right)}{K_1 \left(\frac{R}{P} \right)} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{b\rho}{R^2} \right) \frac{\cos n\theta}{n} \frac{K'_n \left(\frac{R}{P} \right) + \mu_r \left(\frac{P}{R} \right) nk_n \left(\frac{R}{P} \right)}{\mu_r \left(\frac{P}{R} \right) nk_n \left(\frac{R}{P} \right) - K'_n \left(\frac{R}{P} \right)} \right] \quad (2)$$

式中: r_i 为导线的等效半径; $m; \mu_r$ 为相对磁导率,在地球上一般取 1; b 为导线到圆心的水平距离, m, K_n 为第二类贝塞尔函数。

为了简化计算,在 $\mu_r=1$ 的条件下,将式(1)和(2)化简,得到 Tylavsky 近似表达式,如式(3),式(4)所示

$$Z_s = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{R+P}{r} \right] \quad (3)$$

$$Z_m = \frac{j\omega\mu_0}{2\pi} \ln \left[\frac{R+P}{d_{ij}} \right] \quad (4)$$

式(3),式(4)分别为隧道中架空导线自阻抗和互阻抗表达式。其中参数 P 的表达式为

$$P = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma}} \quad (5)$$

该复数深度表达式是将大地视为均匀导体时推导的,而隧道环境可能存在土壤水平分层的情况,不能一概而论。基于此建立大地水平分层模型,并推导一种考虑大地水平分层情况下隧道架空导线阻抗计算方法。

2 大地水平分层时隧道架空导线阻抗表达式

大地存在水平分层的情况,而 Tylavsky 公式主要适用于大地为均匀的不分层结构,显然无法满足环境更为复杂的隧道架空导线阻抗计算。本文假设隧道中大地为水平分层结构,计算电磁波在土壤中的穿透深度,进而推导大地水平分层情况下隧道架空导线阻抗计算表达式。

根据现场可能遇到的情况,假设将大地水平分为 n 层,如图 2 所示。以隧道中土壤分为 2 层为例,假定

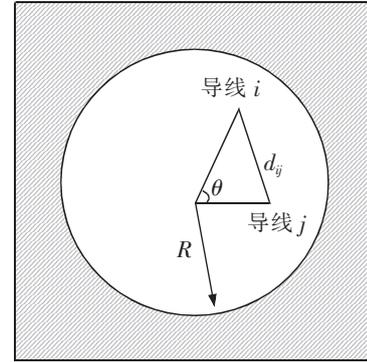


图 1 四周无限大地圆形隧道中的导线
Fig.1 Conductors in a circular tunnel

第 1 层土壤和第 2 层土壤的电率分别为 σ_0 和 σ_1 ,磁导率都为 μ_0 ,信号角频率为 $\omega=2\pi f$,忽略位移电流的影响,以此建立更加准确的大地模型。

从麦克斯韦方程出发,得到以下关于电磁波在隧道地面的穿透深度,第 n 层土壤电磁波的穿透深度可用相同方法推导。第 1 层土壤和第 2 层土壤的波阻抗 ξ_k 、复数深度 P_k 、反射系数 ρ 分别为

$$\xi_k = \sqrt{\frac{j\omega\mu_0}{\sigma_k}}, k=1, 2, 3 \tag{6}$$

$$P_k = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_0\sigma_k}}, k=1, 2, 3 \tag{7}$$

$$\rho = \frac{(\xi_2 - \xi_1)}{(\xi_2 + \xi_1)} \tag{8}$$

电磁波在隧道地面穿透深度 L 的表达式为

$$L = \frac{(e^{2d/p_1} + \rho)P_1}{(e^{2d/p_1} - \rho)} \tag{9}$$

隧道架空导线阻抗计算 Tylavsky 公式采用视大地为均匀结构的复数深度 P 显然不符合本文的假设情况,因此将式(9)土壤分为 2 层时电磁波在土壤中的穿透深度 L 表达式替换式(3),式(4)隧道架空导线自阻抗和导线间互阻抗中的复数深度 P ,即可得到假设土壤水平分 2 层时隧道中架空导线-地回路阻抗计算表达式,下文将对该表达式作详细的计算分析,对于大地水平多层的情况,可以根据这种方法作相同的推导。

3 算例分析

3.1 实例原始参数

以隧道地面土壤分为 2 层为例,考虑一个隧道内 2 根导线系统,计算导线的自阻抗和互阻抗随导线中电流频率、大地电阻率及第 1 层土壤厚度变化的曲线,以便分析所提出的考虑大地分层情况隧道架空导线阻抗的变化规律。

根据隧道牵引网布置^[9],接触线:型号 TCG-100,等效半径 8.75 mm,导线对地高度 5 380 mm;钢轨:型号 p60,等效半径 49.65mm,对地高度 300 mm,2 条导线水平距离 544 mm,大地相对磁导率取 1,并且考虑到 Tylavsky 公式适用于截面为圆形的隧道,而实际的隧道截面不是圆形,因此采用等周长法将隧道截面等效为圆形^[10],以便获取隧道的等效半径 R ,隧道等效圆半径取 3 240 mm。

3.2 电流频率对隧道架空导线阻抗的影响

牵引网导线的阻抗大小具有频变特性^[11-12],它会根据电流频率大小的改变而改变,当牵引供电系统发生谐波谐振时,牵引网电流频率可能达到数万赫兹,有必要研究导线中电流频率对隧道架空导线阻抗值大小的影响。表 1 给出了第 1 层土壤厚度为 20 m,大地电阻率为 $100 \Omega \cdot m$,第 2 层土壤电阻率为 $1\ 000 \Omega \cdot m$ 时,电流频率取不同数值时导线的自阻抗值和互阻抗值,基本符合架空导线阻抗值大小随着电流频率的升高而升高,为实际隧道中牵引网的工程设计提供依据。

表 1 取不同电流频率时导线阻抗值

Tab.1 Impedance of a conductor at different current frequencies

| 电流频率/Hz | 自阻抗 $Z_s/(\Omega \cdot km)$ | 互阻抗 $Z_m/(\Omega \cdot km)$ |
|---------|-----------------------------|-----------------------------|
| 50 | 0.049+0.713j | 0.049+0.279j |
| 500 | 0.472+6.428j | 0.472+2.083j |
| 1 000 | 0.93+12.44j | 0.93+3.749j |
| 5 000 | 4.416+57.521j | 4.416+14.067j |

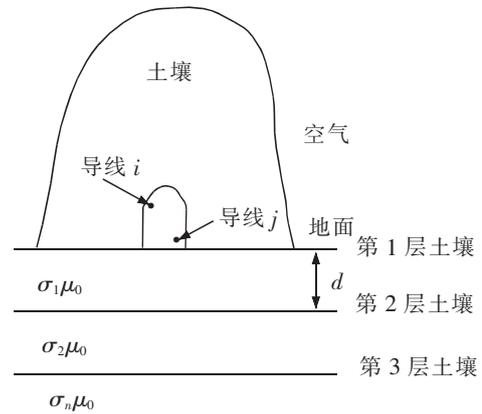


图 2 隧道中土壤水平分层情况
Fig.2 Horizontal stratification of soil in tunnel

3.3 土壤电阻率对隧道架空导线阻抗的影响

隧道地面每层土壤的电阻率是架空导线阻抗值的重要影响因素,分析每层土壤电阻率对导线阻抗的影响有多大,假设第1层土壤厚度为20 m,表2给出了第1层和第2层土壤取不同土壤电阻率时接触线自阻抗值和接触线与钢轨之间互阻抗值。

表2 不同土壤电阻率导线阻抗值
Tab.2 Impedance of the conductor at different soil resistivity

| 第1层土壤电阻率/($\Omega \cdot m$) | 第2层土壤电阻率/($\Omega \cdot m$) | 自阻抗 $Z/(\Omega \cdot km)$ | 互阻抗 $Z_m/(\Omega \cdot km)$ |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 100 | 100 | 0.049 0+0.720j | 0.049 0+0.285 8j |
| | 2 000 | 0.048 5+0.711 3j | 0.048 5+0.276 8j |
| | 4 000 | 0.048 7+0.709 4j | 0.048 4+0.274 8j |
| | 6 000 | 0.048 3+0.702 8j | 0.048 3+0.273 7j |
| 500 | 100 | 0.049 3+0.755 6j | 0.049 3+0.341 1j |
| | 2 000 | 0.049 1+0.766 3j | 0.049 1+0.331 8j |
| | 4 000 | 0.049 0+0.764 3j | 0.049 0+0.329 7j |
| | 6 000 | 0.049 0+0.763 1j | 0.049 0+0.328 5j |
| 1 000 | 100 | 0.049 4+0.799 5j | 0.049 3+0.365 0j |
| | 2 000 | 0.049 2+0.790 2j | 0.049 2+0.355 6j |
| | 4 000 | 0.049 2+0.788 1j | 0.049 2+0.353 6j |
| | 6 000 | 0.049 1+0.786 9j | 0.049 1+0.352 3j |
| 5 000 | 100 | 0.049 4+0.855 1j | 0.049 4+0.420 6j |
| | 2 000 | 0.049 3+0.845 7j | 0.049 3+0.411 1j |
| | 4 000 | 0.049 3+0.843 6j | 0.049 3+0.409 0j |
| | 6 000 | 0.049 3+0.842 3j | 0.049 3+0.407 8j |

为了便于观察,图3给出考虑隧道中土壤水平分2层时架空导线阻抗关于2层土壤电阻率的三维变化曲线。

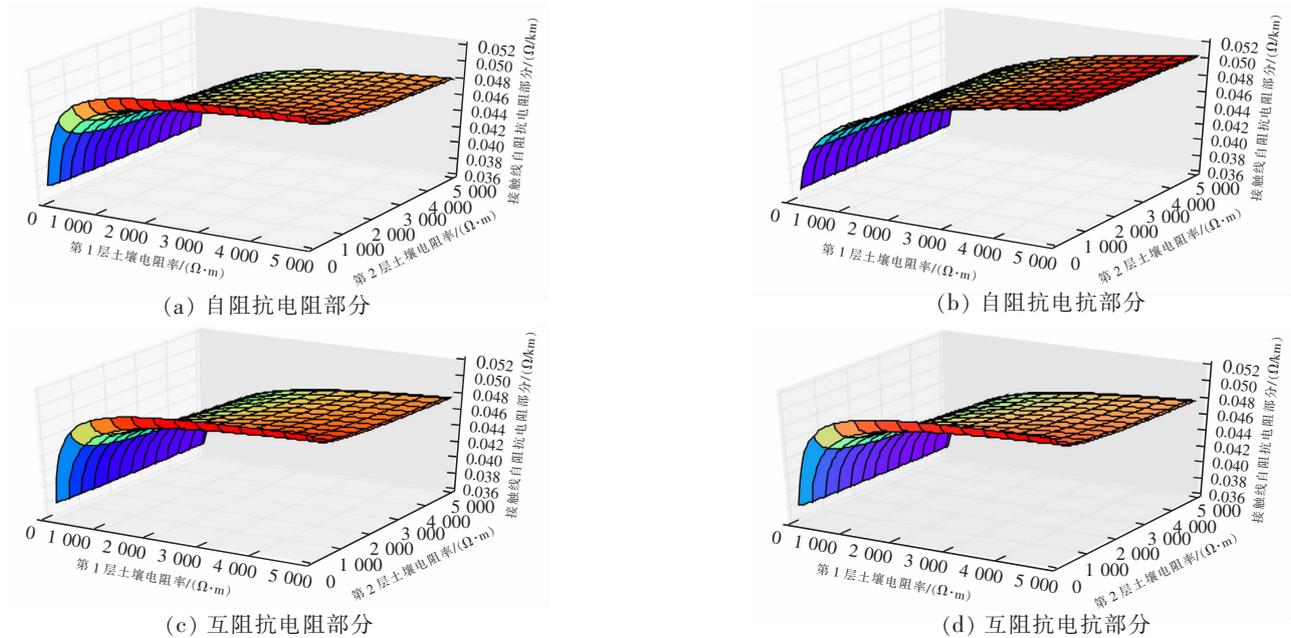


图3 自阻抗和互阻抗随土壤电阻率的变化曲线

Fig.3 Curves of self-impedance and mutual impedance with soil resistivity

图 3 中(a)(b)分别是接触线自阻抗的电阻部分、电抗部分关于隧道大地第 1 层土壤和第 2 层土壤电阻率的三维图,(c)(d)分别是接触线与钢轨之间互阻抗的电阻部分、电抗部分关于隧道大地第 1 层土壤和第 2 层土壤电阻率的三维图。可以看出,隧道中土壤电阻率对隧道中接触线自阻抗和接触线与钢轨之间互阻抗的电阻部分影响较大,对电抗部分影响较小。当第 1 层土壤电阻率不变时,接触线自阻抗和接触线与钢轨之间互阻抗均随着第 2 层土壤电阻率增加而增加,但增加幅度较小,且其变化曲线基本为一水平直线;当第 2 层土壤电阻率不变时,接触线自阻抗和接触线与钢轨之间互阻抗均随第 1 层土壤电阻率增大而迅速增大,且增大幅度较大。

3.4 第 1 层土壤厚度对隧道架空导线阻抗的影响

电磁波在每层土壤中的穿透深度会影响架空导线阻抗值的大小,而第 1 层土壤在表层,距离隧道中架空导线更近,有必要研究第 1 层土壤厚度对隧道架空导线阻抗的影响。表 3 给出第 1 层土壤取不同厚度时,接触线自阻抗和接触线及钢轨互阻抗的大小。计算时,导线中电流频率取高频 400 000 Hz,第 1 层土壤电阻率取 $100 \Omega \cdot m$,第 2 层土壤电阻率取 $1\ 000 \Omega \cdot m$ 。

表 3 第 1 层土壤取不同厚度时导线阻抗值
Tab.3 Impedance values of the wire under the first layer of soil with different thickness

| 第 1 层土壤厚度/m | 自阻抗 $Z_s/(\Omega \cdot km)$ | 互阻抗 $Z_m/(\Omega \cdot km)$ |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 10 | 0.245+3.71j | 0.245+0.234j |
| 20 | 0.246+3.71j | 0.246+0.231j |
| 50 | 0.246+3.71j | 0.246+0.231j |
| 100 | 0.246+3.71j | 0.246+0.231j |
| 200 | 0.246+3.71j | 0.246+0.231j |

图 4 给出隧道中架空导线-地回路阻抗关于地面第 1 层土壤厚度的变化曲线。

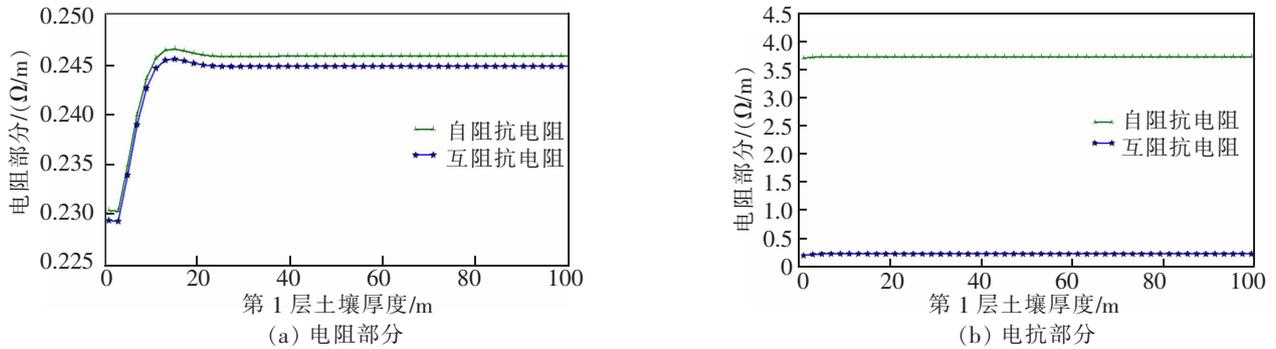


图 4 隧道架空导线阻抗随 d 变化曲线

Fig.4 Impedance curve of tunnel overhead traverse-ground loop with d

观察图 4 可知,大地在水平分层情况下,隧道中接触线自阻抗和接触线与钢轨之间互阻抗的电阻部分、电抗部分呈现几乎一致的变化趋势,且当隧道中地面第 1 层土壤厚度在 $(0.5, 16) m$ 增加时,接触线自阻抗和接触线与钢轨之间互阻抗的电阻部分迅速上升,土壤厚度继续增大,电阻部分趋于平缓,而接触线自阻抗和接触线与钢轨之间互阻抗的电抗部分除第 1 层土壤厚度刚开始增加时略微上升,后面基本保持平缓,而且自阻抗的电抗部分始终大于互阻抗的电抗部分。

4 结论

考虑大地存在水平分层的情况,建立水平分层的大地模型,推导出大地在分层情况下的隧道架空导线

阻抗计算方法,考虑隧道中2根实际的导线系统,假设大地水平分为2层,计算隧道架空导线地回路阻抗,得到以下结论:

- 1) 隧道中第1层土壤的电阻率对导线电阻部分影响较大,对电抗部分影响较小;
- 2) 第1层土壤在一定厚度内,对导线阻抗的电阻影响较大,而电抗部分受到第1层土壤厚度的影响一直极小。

参考文献:

- [1] 吴命利. 电气化铁道牵引网的统一链式电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 52-58.
- [2] 魏巍, 刘炜, 叶小雯. 高速铁路牵引回流系统建模分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018(1): 31-38.
- [3] CARSON J R. Wave propagation in overhead wires with ground return[J]. Bell System Technical Journal, 1926, 5: 339-359.
- [4] TYLAVSKY D J. Conductor impedance approximations for deep-underground mines[J]. IEEE Trans Ind APP, 1987, 4(4): 723-730.
- [5] 张桂南, 刘志刚, 郭晓旭, 等. 高速铁路隧道及高架桥路段牵引网建模与分析[J]. 铁道学报, 2015, 37(11): 16-24.
- [6] 邓云川, 刘志刚, 黄可, 等. 基于多导体回路系统的带回流线直接供电方式隧道牵引网阻抗计算和应用[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6846-6854.
- [7] 齐磊, 卢铁兵, 张重远, 等. 考虑多层土壤时架空线的瞬态分析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 66-69.
- [8] 文刚, 齐世举, 姜勤波, 等. 大地水平分层电导率对架空线缆 HEMP 响应的影响[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 91-95.
- [9] 王祖峰, 董昭德. 接触网[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1983: 35-39.
- [10] 邓云川, 高宏, 陈建君. 基于拓展 Carson 理论的单线隧道内牵引网电气参数计算研究[J]. 大功率变流技术, 2016(3): 6-11.
- [11] 刘思然, 陈剑云, 乐果. 考虑钢轨铁磁特性的牵引网阻抗频变参数矩阵计算[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(4): 97-105.
- [12] 乐果, 林知明, 陈剑云, 等. 考虑牵引网线路参数频变的相模变换矩阵计算[J]. 华东交通大学学报, 2018, 35(5): 104-110.

Calculation and Analysis of the Impedance Value of Tunnel Traction Network in Layered Soil Structure

Xing Guangbing, Chen Jianyun

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The impedance of traction network is the basis of analysis and calculation of traction power supply system. In this paper, the penetration depth of electromagnetic wave in soil is calculated for the possibility of horizontal stratification of earth in the tunnel, and the impedance expression of overhead traverse and earth loop in the case of horizontal stratification of earth are derived. Combined with the two traverse systems in the tunnel, the conductor impedance is calculated and the variation rule is analyzed. The results show that the resistance of the calculation of the impedance of the traverse-ground loop is greatly affected by the first layer soil resistivity. When the thickness of the first layer of soil is less than 16 m, the resistance part of the impedance of the wire-ground loop is greatly affected, while the reactance part is hardly affected. It can be used as a reference to calculate the impedance of overhead traverse-ground loop when the ground is stratified.

Key words: electrified railways; tunnel; traction network; impedance; soil conductivity