文章编号：2095-4980(2022)11-1144-06

# 机动雷达地网接地电阻的预估算法

王　彭[1]，王　青[1]，赵腾飞[*1]，刘培杰[1,2]，冯　程[1]

(1.西安卫星测控中心，陕西 西安 710043；2.航天工程大学 电子与光学工程系，北京 101416)

**摘　要：**系统接地问题是制约机动雷达机动性能的关键因素之一。通过对垂直地网、水平地网、复合地网三种机动地网技术的理论研究与测试验证，提出了不同地网技术接地电阻的近似计算方法，并在理论推导的基础上，提出了机动地网接地电阻的预估算法。经实际测试证明本文所提算法简单可行，并且已经在某型号机动雷达上开展了实际应用，能够为后续机动雷达应急接地提供重要的技术保障。

**关键词：**机动式雷达；接地；垂直地网；水平地网；复合地网；电阻率

**中图分类号：**TN957　　**文献标志码：**A　　**doi：**10.11805/TKYDA2019557

# Estimated algorithm for electrical grounding resistance of mobile radar

WANG Peng[1]，WANG Qing[1]，ZHAO Tengfei[*1]，LIU Peijie[1,2]，FENG Cheng[1]

(1.Xi'an Satellite Control Center，Xi'an Shaanxi 710043，China；2.Department of Electronic and Optical Engineering，Space Engineering University，Beijing 101416，China)

**Abstract：**The key factor restricting the maneuverability of mobile radar is the system electrical grounding. By the theoretical research and actual verification of vertical grounding grid, horizontal grounding grid, and complex grounding grid, the approximate calculation method is proposed for electrical grounding resistance of different grounding grids. On the basis of theoretical derivation, the estimated algorithm for the mobile grounding network is proposed. The proposed algorithm is proved to be simple and feasible by the measurement results. The method has been applied to a certain type of mobile radar and provides important technical support for the fast deployment task of mobile radar.

**Keywords：**mobile radar；electrical grounding；vertical grounding grid；horizontal grounding grid；complex grounding grid；resistivity

现代战争已经变成系统与系统、体系与体系的对抗，单一探测手段已经无法满足作战需要，雷达装备作为对抗体系中不可或缺的一环，面临着复杂的电磁环境，如何在固定雷达站丧失功能时快速机动补网，对机动雷达的应急快速参试能力提出了更高要求[1-2]。为了使整个雷达系统在复杂的电磁环境中能够协调、可靠地工作，电磁兼容性非常重要，而雷达设备接地是保证雷达电子兼容性的重要环节[3]。

雷达系统无论是针对防电磁干扰、防静电还是其他电磁兼容性要求，雷达发射车、天线车及电子车等装备车辆都必须有良好的接地，接地电阻要求小于 4 Ω[4]。接地电阻过大时，设备机柜、机箱、外壳等部位的静电不能及时导出，各分系统、组合、板件及信号电位升高且未处于同一参考电平(地电位)，无法有效排泄受外部感应的能量，从而导致静电积累和放电现象，使设备电磁兼容性下降，工作不稳定，甚至直接造成设备损坏和人员受伤。良好的接地系统对维护系统安全运行非常重要，是保证人员和设备安全的根本措施[5]。

本文通过分析垂直地网技术、水平地网技术、复合地网技术等降低雷达接地电阻措施的基本原理，提出了不同地网技术下地网阻值的近似计算方法，并通过地阻测试试验进一步验证了理论分析的正确性，并推演了不同地网技术接地电阻值的预估算法，为后续机动雷达的快速机动提供技术保障。

**收稿日期：**2019-12-20；**修回日期：**2020-11-18

[*]**通信作者：**赵腾飞　email:key_ztf@126.com

## 1　地网接地电阻及其影响因素

地网接地电阻通常由4个部分构成，地网引线电阻、地网接地体电阻、接地体与土壤接触电阻以及土壤电阻。地网引线即是雷达设备接地点与地网的连接导线。接地体与土壤之间的接触电阻和土壤电阻之和常被称为流散电阻。由于金属引线及金属接地体的电阻很小，因此地网接地电阻实际上主要决定于流散电阻[6]。当工频电流$I$流过接地网时，地网电位升高$U$，此时定义$R=U/I$为该地网的接地电阻[7]。地网接地电阻表述如下[7]：

$$R=\rho\cdot f \tag{1}$$

式中：$R$为接地电阻值；$\rho$为土壤电阻率；$f$是由地网形状、尺寸及在土壤中的位置决定的函数。由此，地网接地电阻主要由所在土壤条件和地网的结构、位置决定。

## 2　垂直地网技术

垂直地网技术通过铜皮地线将若干深入地面的垂直接地体串接，以降低接地电阻。地表深处含有更多水分，其电阻率较低，垂直地网技术通过串接垂直接地体的方式增大地网与深层土壤的接触面积，达到降低接地电阻的目的。

### 2.1 接地电阻计算

垂直地网接地电阻的计算公式如下[8]：

$$R=\frac{\rho}{2\pi L_{\mathrm{c}}}(\ln\frac{8L_{\mathrm{c}}}{d}-1) \tag{2}$$

式中：$R$为地网接地电阻；$\rho$为土壤电阻率；$d$为垂直接地体等效直径；$L_{\mathrm{c}}$为垂直接地体长度。取$\rho=150\,\Omega\cdot\mathrm{m}$，$d=0.06\,\mathrm{m}$，则地网接地电阻$R$与垂直接地体长度$L_{\mathrm{c}}$的关系如图1所示。由图1可知，随着垂直接地体长度不断增加，其接地电阻呈单调下降趋势，且下降速度呈减小趋势。在机动雷达运输及地网布设过程中，增加垂直接地体长度意味着极大地增加地网携带及工程难度。

在实际应用中，本文提出采用串接多个长度为1 m的接地体，组成垂直地网的方式增加垂直接地体长度，通过类似并联多个流散电阻的方式降低地网接地电阻，其接地电阻值可近似采用下述公式计算：

$$\frac{1}{R}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\cdots+\frac{1}{R_n} \tag{3}$$

式中：$R_1,R_2,\cdots,R_n$分别为第$1,2,\cdots,n$个垂直接地体接地电阻值；$R$为$R_1,R_2,\cdots,R_n$直接并联后的电阻值。利用公式(2)和公式(3)所得地网接地电阻$R$与垂直接地体个数$n$关系如图2所示。由图2可见，本文所提的计算方法与文献[8]提到的计算方法结果基本吻合。

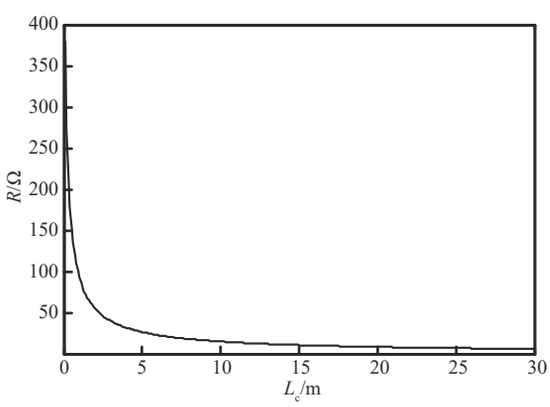


Fig.1 Relationship between $R$ and $L_{\mathrm{c}}$
图1　$R$与$L_{\mathrm{c}}$关系图

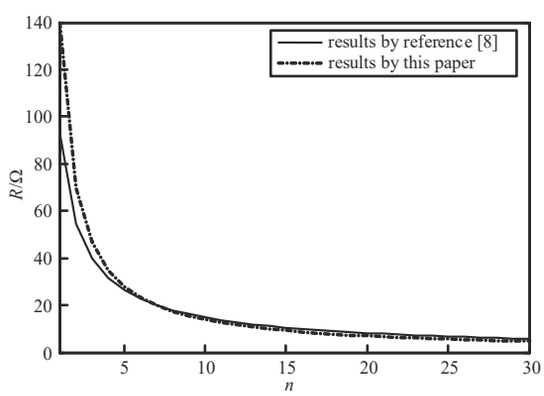


Fig.2 Relationship between $R$ and $n$
图2　$R$与$n$关系图

### 2.2 测试验证

采用垂直地网技术在河堤附近沙质土壤和草地土壤中进行地阻测试：沙质土壤电阻率$\rho=105\,\Omega\cdot\mathrm{m}$，垂直接地体长度$L_{\mathrm{c}}=1\,\mathrm{m}$，直径$d=0.06\,\mathrm{m}$，分别采用公式(2)所示的计算方法和公式(3)所示的计算方法计算垂直地网接地电

阻值，计算结果如图 3 所示；草地土壤电阻率 $\rho = 122\ \Omega\cdot\mathrm{m}$，分别采用式(2)所示的计算方法和式(3)所示的计算方法计算垂直地网接地电阻值，测试结果如图 4 所示。由图 3 和图 4 可见，本文所提的计算方法与文献[8]提到的计算方法结果基本吻合。

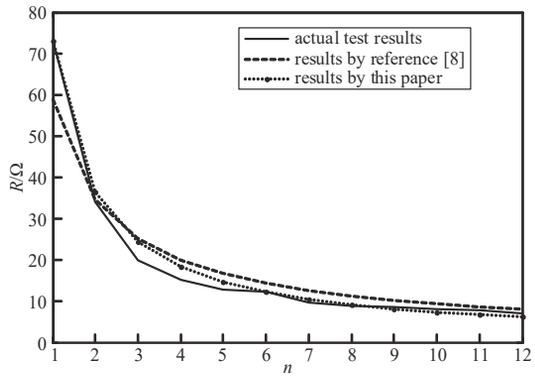


Fig.3 Results of theoretical value and measured value in sandy soil by vertical grounding network
图3 沙质土壤垂直地网实测及计算值

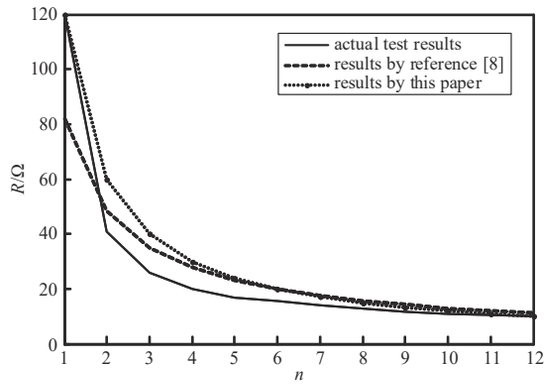


Fig.4 Results of theoretical value and measured value in grassland soil by vertical grounding network
图4 草地土壤垂直地网实测及计算值

## 3 水平地网技术

水平地网技术通过深埋预先制作好的简易地网以降低接地电阻。由于利用了深层土壤电阻率较低的优势，水平地网可有效改善接地电阻。影响水平地网接地电阻的最主要因素是土壤电阻率[9]，可以利用浇灌工业盐水等方式来降低土壤电阻率。

### 3.1 接地电阻计算

水平地网接地电阻的计算公式如下所示[8]：

$$R = \frac{\rho}{2\pi L_s}\left(\ln\frac{L_s^{\,2}}{dH} + A\right) \tag{4}$$

式中：$R$ 为地网接地电阻；$\rho$ 为土壤电阻率；$L_s$ 为水平接地体总长度；$d$ 为水平接地体等效直径；$H$ 为水平地网埋设深度；$A$ 为地网形状系数，当地网为矩形时，$A = 1$。

取 $\rho = 150\ \Omega\cdot\mathrm{m}$，$d = 0.06\ \mathrm{m}$，$A = 1$，$H = 1.5\ \mathrm{m}$，则地网接地电阻 $R$ 与水平接地体长度 $L_s$ 的关系如图 5 所示。由图 5 可知，随着水平接地体长度不断增加，其接地电阻呈单调下降趋势，且接地电阻下降速度呈减小趋势。因此，在土壤电阻率和水平接地体等效直径固定的情况下，增加水平接地体长度可以在一定范围内有效改善地网接地电阻。

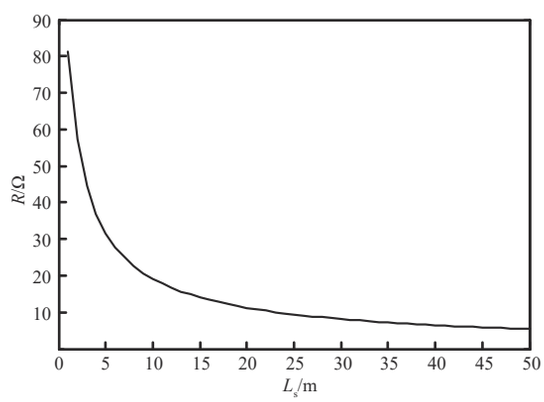


Fig.5 Relationship between $R$ and $L_s$
图5 $R$ 与 $L_s$ 关系图

在活动式雷达运输及地网布设过程中，增加水平接地体长度意味着极大地增加地网施工难度。在实际应用中，本文提出采用铜皮地线作为水平接地体，利用铜螺丝将其制作成串接矩阵状作为水平地网。

在实际工程中可利用式(2)通过垂直接地体接地电阻值反推土壤电阻率近似值，如式(5)所示：

$$\rho = R\cdot 2\pi L_c \Big/ \left(\ln\frac{8L_c}{d} - 1\right) \tag{5}$$

式中：$R$ 为地网接地电阻；$\rho$ 为土壤电阻率；$d$ 为垂直接地体等效直径；$L_c$ 为垂直接地体长度。利用式(4)估算水平地网接地电阻值。

为得到更精确的结果，取式(5)中 $R$ 为多个已布设垂直接地体单独接地时接地电阻的均值，假设已布设地网中垂直接地体个数为 $n$，接第 $i(1 \leqslant i \leqslant n)$ 个垂直接地体时地网接地电阻值为 $R(i)$，第 $i$ 个垂直接地体单独接地时接

地电阻值为$\bar{R}(i)$。则$\rho$值计算方法有两种：

$$\rho = R(i)\cdot 2\pi\cdot i\cdot L_c \Big/ (\ln\frac{8\cdot i\cdot L_c}{d} - 1) \tag{6}$$

$$\rho = \sum_{k=1}^{i}\bar{R}(k)\cdot 2\pi L_c \Big/ (i\cdot(\ln\frac{8L_c}{d} - 1)) \tag{7}$$

式中：$\bar{R}(k) = \dfrac{R(k-1)R(k)}{R(k-1)-R(k)}$，其余各参数同式(5)所示。

### 3.2 测试验证

采用水平地网技术在河堤附近沙质土壤中进行接地电阻测试，$d = 0.06$ m，$A = 1$，$H = 0.6$ m，水平接地体总长度$L_s = 32$ m。布设1个垂直接地体时其接地电阻为73 Ω，由式(5)可得，地网周围沙质土壤电阻率为$\rho = 118$ Ω·m，由式(4)可得：$R = 6.61$ Ω。经实际测量，水平地网接地电阻值为6.78 Ω，可得理论计算误差为0.17 Ω。

采用水平地网技术在草地土壤中进行接地电阻测试，$d = 0.06$ m，$A = 1$，$H = 1.2$ m，水平接地体总长度$L_s = 32$ m。布设1个垂直接地体时其接地电阻为119.2 Ω，理论计算水平地网接地电阻为$R = 10.11$ Ω。经实际测量，水平地网接地电阻值为10.98 Ω，可得理论计算误差为0.87 Ω。

## 4　复合地网技术

复合地网技术是将垂直地网与水平地网串接，以增大地网与各层土壤接触面积，充分利用土壤的导电性能。为增加地网与电阻率较小的深层土壤的接触面积，可在水平地网各顶点处设置垂直接地体。复合地网可以有效改善接地电阻。

### 4.1 接地电阻计算

复合地网的接地电阻计算方法如下所示[10]：

$$R = \alpha R_z \tag{8}$$

$$R_z = \frac{0.213\rho}{0.25L + \sqrt{S}}(1+B) + \frac{k\rho}{2\pi L}(\ln\frac{S}{9Hd} - 5B) \tag{9}$$

$$\alpha = (3\ln\frac{L_0}{\sqrt{S}} - 0.2)\frac{\sqrt{S}}{L_0} \tag{10}$$

$$B = \frac{1}{1+(4.6H/\sqrt{S})} \tag{11}$$

$$k = g(1 - \frac{L_c}{L_s}) \tag{12}$$

式中：$\rho$为土壤电阻率；$S$为水平地网面积；$H$为水平地网埋设深度；$d$为接地体等效直径；$L_0$为水平地网外边界长度；$L$为水平和垂直接地体的总长度，$L = L_s + L_c$，$L_s$为水平接地体的总长度，$L_c$为垂直接地体的总长度，$g$为定常数，按下列方法选用：

$$g = \begin{cases} 1, & L_c \leqslant L_s \\ 0.5, & L_c > L_s \end{cases} \tag{13}$$

复合地网技术通过类似并联垂直地网和水平地网的方式充分降低地网接地电阻，在实际应用中，本文提出采用下述并联电阻阻值计算公式来近似计算复合地网的接地电阻值$R$：

$$R = \frac{R_c\cdot R_s}{R_c + R_s} \tag{14}$$

式中：$R_c$表示单独布设垂直地网时地网接地电阻值；$R_s$表示单独布设水平地网时地网接地电阻值。

### 4.2 测试验证

采用复合地网技术在河堤附近沙质土壤中进行地阻测试，$\rho = 105$ Ω·m, $S = 1.8$ m$^2$, $H = 0.6$ m, $d = 0.06$ m,

$L_0=5.4\ \mathrm{m}, L_s=32\ \mathrm{m}, L_c=16\ \mathrm{m}$。由复合地网的精确计算公式(8)计算可得，复合地网接地电阻值为2.21 Ω。由公式(7)近似计算方法得到，水平地网接地电阻的近似值为6.78 Ω，由公式(3)近似计算方法得到，垂直地网接地电阻为6.91 Ω。由复合地网的近似计算公式(14)可得，复合地网接地电阻值为3.42 Ω。经实际测量，复合地网接地电阻值为3.75 Ω，可得精确计算方法所得接地电阻计算误差为1.54 Ω，近似计算方法所得接地电阻计算误差为0.33 Ω。

采用复合地网技术在草地土壤进行接地电阻测试，$\rho=190\ \Omega\cdot\mathrm{m}, S=1.8\ \mathrm{m}^2, H=0.6\ \mathrm{m}, d=0.06\ \mathrm{m}, L_0=5.4\ \mathrm{m}, L_s=32\ \mathrm{m}, L_c=16\ \mathrm{m}$。由复合地网的精确计算公式计算可得，复合地网接地电阻值为4.33 Ω。接入首个垂直接地体时地网接地电阻为85 Ω，类似前述在河堤附近沙质土壤接地电阻测试的计算过程可知，用近似计算方法得到复合地网接地电阻的近似值为3.61 Ω。经实际测量，复合地网接地电阻值为3.06 Ω，可得精确计算方法所得接地电阻计算误差为1.27 Ω，近似计算方法所得接地电阻计算误差为0.55 Ω。

## 5 机动地网接地电阻的预估算法

### 5.1 垂直地网接地电阻预估

由于垂直接地体工艺和材料相同，地网周围土壤在不同位置的导电能力相当，故假设每个垂直接地体单独布设时的接地电阻$R_1, R_2, \cdots, R_n$($n$为垂直接地体个数)相同，均为$R_1$。则当布设一个垂直接地体时，由式(3)可知连接所有垂直接地体时垂直地网的接地电阻为：

$$R_c=\frac{1}{1/R_1+1/R_2+\cdots+1/R_n}=\frac{R_1}{n} \tag{15}$$

为得到更精确的结果，可以取式(15)中$R_1$为前$i(1\leqslant i\leqslant n)$个已布设垂直接地体单独接地时接地电阻的均值$\bar{R}(i)$，则

$$\bar{R}(i)=\sum_{k=1}^{i}\bar{R}(k)\Big/i \tag{16}$$

式中$\bar{R}(k)=\dfrac{R(k-1)R(k)}{R(k-1)-R(k)}$。故连接所有垂直接地体时垂直地网的接地电阻为：

$$R_c=\frac{\bar{R}(i)}{n} \tag{17}$$

当$i=1$时，式(17)与式(15)相同。

### 5.2 水平地网接地电阻预估

对水平地网接地电阻的预估需要知道地网周围土壤电阻率。采用前$i$个垂直接地体单独接地时电阻的均值反推土壤电阻率，公式如下：

$$\rho=\bar{R}(i)\cdot 2\pi L_c\Big/(\ln\frac{8L_c}{d}-1) \tag{18}$$

由式(4)即可得到水平地网的接地电阻值为：

$$R_s=\frac{\rho}{2\pi L_s}(\ln\frac{L_s^{\ 2}}{dH}+1) \tag{19}$$

式中：$R$为地网接地电阻；$\rho$为土壤电阻率；$L_s$为水平接地体总长度；$d$为水平接地体等效直径；$H$为水平地网埋设深度。

### 5.3 复合地网接地电阻预估

复合地网采用垂直地网和水平地网结合的方式，其接地电阻预估如式(14)所示。将式(15)及式(19)代入式(14)，可得复合地网接地电阻值为(下式中所涉及变量具体含义见前文)：

$$R=\frac{R_c\cdot R_s}{R_c+R_s}=\frac{\rho\cdot R_1(\ln\frac{L_s^{\ 2}}{dH}+1)}{2\pi L_s R_1+n\rho(\ln\frac{L_s^{\ 2}}{dH}+1)} \tag{20}$$

## 6　结论

本文在分析地网接地电阻基本原理及其影响因素的基础上，引入了垂直地网、水平地网、复合地网3种机动地网技术，提出了不同地网技术接地电阻的预估算法，理论推导和实地测试结果均表明，3种地网技术均能有效改善地网接地电阻值。同时，本文针对不同地网技术提出的近似算法的计算结果在数值及变化趋势上与地网实测接地电阻值相吻合，计算精确度同现存地网接地电阻的精确计算方法相当甚至更优，且算法更加简单可行。最后，本文在理论推导及数据分析的基础上，提出了机动地网接地电阻的预估算法，用来为雷达机动地网布设的现场施工决策提供指导。本文所提出的方法已经在某型号活动式测量雷达上进行了应用，能够满足设备实际使用需求。

**参考文献：**


[1] 符淑芹,彭燕,薛原. 雷达装备复杂电磁环境适应性试验需求分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(5):868-870,874. (FU Shuqin,PENG Yan,XUE Yuan. Analysis on requirements of the complex electromagnetic environment adaption test for radar [J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(5):868-870,874.)

[2] 徐勇,刘文松,翟海涛,等. 多雷达组网检测系统技术[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018,16(4):619-624. (XU Yong, LIU Wensong, ZHAI Haitao, et al. Technology of multi-radar detection system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2018,16(4):619-624.)

[3] 李汉浸,张相梅,高志军,等. 防雷接地工程的优化设计[J]. 河南气象, 2006(1):61-64. (LI Hanjin,ZHANG Xiangmei,GAO Zhijun,et al. Optimum design of thunder defend and grounding[J]. Meteorology Journal of Henan, 2006(1):61-64.)

[4] 中华人民共和国工业和信息化部. 数据中心设计规范:GB50174-2017[S]. 北京:中国计划出版社, 2017. (Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Code for design of data centers: GB50174-2017[S]. Beijing: China Planning Press, 2017.)

[5] 狄玉姣. 复杂土壤结构下接地系统建模与降阻措施[D]. 中国矿业大学, 2017. (DI Yujiao. Modeling and reducing resistance measures of grounding system in complex soil[D]. China University of Mining and Technology, 2017.)

[6] 曹俊峰. 雷达系统中的接地设计[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2008,6(1):29-33. (CAO Junfeng. Grounding design of radar system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2008,6(1):29-33.)

[7] 潘文霞. 不均匀土壤地网接地电阻的降低及效果分析[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2001,25(5):504-508. (PAN Wenxia. Effect analysis on decreasing grounding grid resistance in non-uniform soils[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 2001,25(5):504-508.)

[8] 丛远新.接地设计与工程实践[M].北京:机械工业出版社,2014. (CONG Yuanxin. Grounding design and engineering practice[M]. Beijing:China Machine Press, 2014.)

[9] 李博,陈国龙,宁宁,等. 多层土壤水平接地网接地电阻计算分析[J]. 辽宁师专学报, 2019,21(1):71-75. (LI Bo,CHEN Guolong, NING Ning, et al. Analysis of grounding resistance calculation of multi-layer soil horizontal grounding grid[J]. Journal of Liaoning Teachers College, 2019,21(1):71-75.)

[10] 王洪泽. 复合接地网接地电阻的简化计算[J]. 电网技术, 2001,25(8):70-72. (WANG Hongze. A simplified calculation method for grounding resistance of compound grounding network[J]. Power System Techonlogy, 2001,25(8):70-72.)


**作者简介：**


**王　彭**(1987-)，男，硕士，工程师，主要研究方向为航天测控技术.email:xajdwangpeng@126.com.

**赵腾飞**(1989-)，男，硕士，工程师，主要研究方向为航天测控技术.

**冯　程**(1988-)，女，硕士，工程师，主要研究方向为航天测控软件系统测试.

**王　青**(1976-)，男，硕士，工程师，主要研究方向为航天测控技术.

**刘培杰**(1987-)，男，硕士，工程师，主要研究方向为航天测控总体技术.