

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200222

# 牵引变电所主接地网设计研究

魏光

(轨道交通工程信息化国家重点实验室(中铁一院), 陕西 西安 710043)

**摘要:** 电气化铁路外电源短路容量日益增大, 牵引供电系统的回流具有特殊性。在高土壤电阻率地区, 牵引变电所主接地网的设计成为难题。提出衡量接地水平的指标主要为接触电势、跨步电势、接地电阻、地电位升。针对典型土壤结构, 分析对比中心扩网、延伸扩网、射线扩网、深井等主流降阻措施。通过大量的 CDEGS 平台仿真数据分析, 总结出每一种降阻措施对接地指标的具体影响因素。通过对比措施的优劣, 找出接地网降阻的规律, 推荐最佳的方案。所用仿真参数为牵引变电所主接地网工程设计提供基础, 验证了方案的正确性与可行性。

**关键词:** 牵引变电所; 主接地网; 工程设计; 降阻措施; 接触电势

## Study on the design of a main grounding grid in a traction substation

WEI Guang

(State Key Laboratory of Rail Transit Engineering Informatization (FSDI), Xi'an 710043, China)

**Abstract:** The power supply source short-circuit capacity of electrified railway is increasing day by day, and the return current of the traction power supply system is important. In an area of high soil resistivity, the design of the main grounding grid of a traction substation becomes difficult. This paper proposes that the main indices for measuring the grounding level are contact potential, step potential, ground resistance and ground potential rise. Given a typical soil structure, the main resistance reduction measures such as central grounding grid expansion, extended grounding grid expansion, radial grounding grid expansion and deep well are analyzed and compared. Through a large amount of simulation data analysis of a CDEGS platform, the specific influencing factors of each resistance reduction measure to the ground index are summarized. By comparing the advantages and disadvantages of the measures, the law of resistance reduction of grounding grid is determined. The best scheme is recommended. The simulation parameters in this paper provide the basis for the design of the main grounding grid of the traction substation, and verify the correctness and feasibility of the scheme.

This work is supported by Science and Technology R & D Program of China Railway International Co., Ltd. (No. 2017J005-C).

**Key words:** traction substation; main grounding grid; project design; reduction measures; contact potential

## 0 引言

中国电气化铁路牵引供电系统从公网引入电源电压等级由 110 kV 升级为 220 kV(西北地区为 330 kV)。日益增长的电源短路容量对牵引变电所主接地网的工程设计带来了挑战。

国际对接地系统的衡量标准侧重于人身及设备安全, 不再刻意强调接地电阻<sup>[1]</sup>。国内标准以接地电阻为主要衡量参数, 在高土壤电阻率地区放宽接地电阻条件后, 附加考虑电势的影响<sup>[2-3]</sup>。行业内从戈壁沙漠、秦岭山区、高寒冻土等不同地貌分析了接地系统的特点及措施建议<sup>[4-10]</sup>。

本文提出衡量接地系统的参数主要为接触电势及跨步电势(人身安全)、地电位升(设备安全)、接地电阻(回流系统重要参数)(以下简称接地指标)。其中地电位升由接地电阻直接计算可得, 不再赘列。系统研究主接地网的特性以及不同工程措施的效

**基金项目:** 中国铁路总公司科技研究开发计划课题资助(2017J005-C); 中国铁建股份有限公司科技研究开发计划课题资助(2018-B12); 川藏铁路科研课题资助(院科(川藏)19-26); 中铁一院青年创新科研课题资助(院科19-84)

果,考虑技术经济性,本文总结了主流降阻措施的作用<sup>[11-18]</sup>;针对典型土壤特征,推荐最优的方案组合。

### 1 主接地网假设

主接地网由水平接地体和垂直接地体复合组成。土壤结构差异性很大,为了对工程设计具有指导意义,本文重点研究四种典型的土壤结构,如图1所示。因为现场土壤通过 Resap 模块,均可等效为水平分层模型。基于加拿大 SES 公司的 CDEGS 仿真平台,建立主接地网模型,对各种措施的具体实施细节进行大量的仿真。

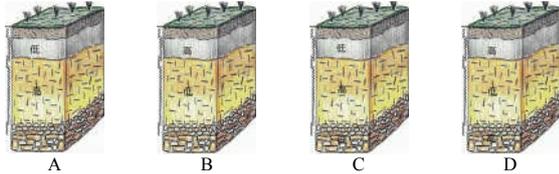


图1 典型土壤结构

Fig. 1 Typical soil structure

仿真条件:主接地网为正方形;低土壤电阻率为  $100 \Omega \cdot m$ ,高土壤电阻率为  $1\ 000 \Omega \cdot m$ ;水平接地体采用  $150\ mm^2$  铜绞线(埋深  $0.8\ m$ ),垂直接地体采用  $\phi 20$  纯铜棒;流经接地装置的短路电流为  $10\ kA$ ,短路电流允许时间为  $0.7\ s$ ;地表采用砾石(电阻率为  $5\ 000 \Omega \cdot m$ )。

### 2 接地措施

#### 2.1 中心扩网

研究不同土壤电阻率( $10\ \Omega \cdot m$ 、 $20\ \Omega \cdot m$ 、 $50\ \Omega \cdot m$ 、 $100\ \Omega \cdot m$ 、 $200\ \Omega \cdot m$ 、 $500\ \Omega \cdot m$ 、 $1\ 000\ \Omega \cdot m$ )及主接地网边长( $50\ m$ 、 $100\ m$ 、 $150\ m$ 、 $200\ m$ 、 $250\ m$ 、 $300\ m$ 、 $350\ m$ 、 $400\ m$ )对接地指标的影响。

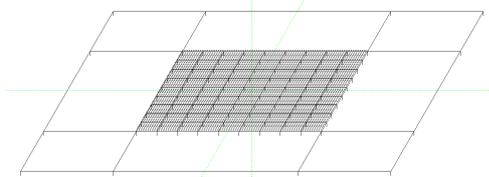
如图2所示,接地指标呈现以下特征:

- (1) 主接地网尺寸小于  $200\ m \times 200\ m$  时,接地指标降低较快;大于  $200\ m \times 200\ m$  时,较低缓慢。
- (2) 随着土壤电阻率的升高,相同主接地网尺寸下,斜率越高。

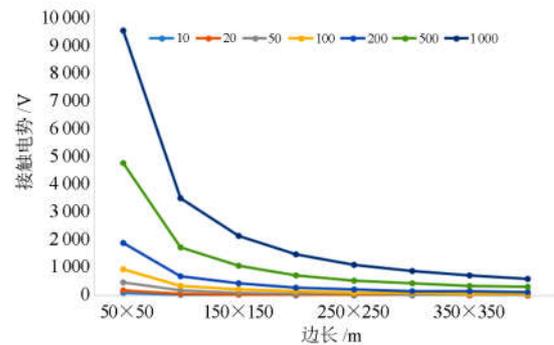
规律:(1)以变电所为中心,扩大主接地网,边长  $200\ m$  为最佳技术经济性尺寸;(2)对于高土壤电阻率地区,采取中心扩网的方式,效果更明显。

#### 2.2 延伸扩网

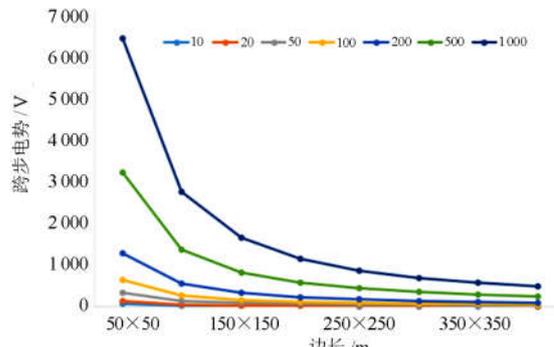
针对四种典型土壤结构,在主接地网的一侧延



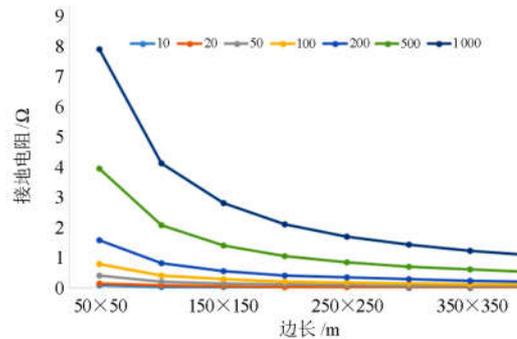
(a) 地网结构



(b) 接触电势



(c) 跨步电势



(d) 接地电阻

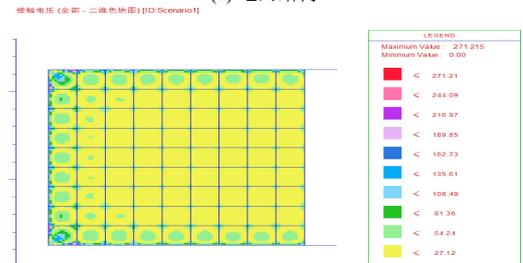
图2 中心扩网影响

Fig. 2 Influence of central grounding grid expansion

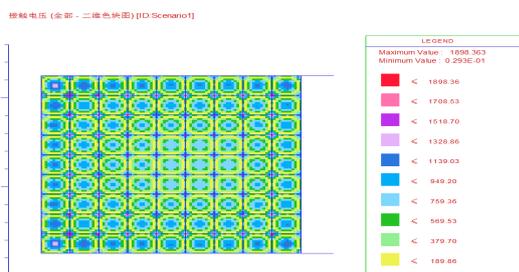
伸扩网,如图3所示。研究延伸扩网长度(向一侧延伸超出主接地网部分的长度)对接地指标的影响。



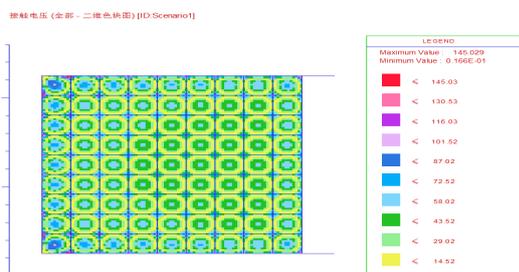
(a) 地网结构



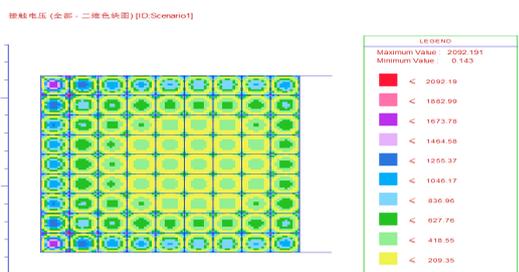
(b) A 模型接触电势



(c) B 模型接触电势



(d) C 模型接触电势



(e) D 模型接触电势

图 3 延伸扩网结构

Fig. 3 Extended grounding grid

如表 1—表 3 仿真结果所示，接地指标呈现以下特征。

表 1 接触电势

Table 1 Contact potential

延伸长度/m	A	B	C	D
50	276.414	2 319.888	190.438	2 591.410
100	343.109	2 389.348	193.32	2 689.299
150	302.480	2 116.726	165.306	2 349.562
200	271.209	1 898.363	145.028	2 092.189

表 2 跨步电势

Table 2 Step potential

延伸长度/m	A	B	C	D
50	292.739	850.034	150.178	1 272.508
100	230.568	713.888	115.099	1 043.859
150	201.196	632.869	98.663	915.591
200	180.462	567.852	86.359	816.686

表 3 接地电阻

Table 3 Grounding resistance

延伸长度/m	A	B	C	D
50	2.210 2	0.655 2	0.498 9	2.582 7
100	1.959 4	0.567 2	0.423 4	2.278 9
150	1.770 1	0.509 6	0.371 1	2.041 3
200	1.620 8	0.462 4	0.330 7	1.872 2

(1) 随延伸地网的长度增加，接地指标基本呈线性下降。

(2) 接地电阻主要取决于底层的土壤电阻率(越低越好)；其次，水平接地体周围的土壤电阻率也对接地电阻有一定的影响力。

(3) 接触电势与跨步电势主要取决于顶层的土壤电阻率(越低越好)；其次，底层的土壤电阻率也有轻度的影响力。

规律：(1) 在外界条件允许的情况下，延伸扩网具有一定的效果，但不会大幅度提升指标。投入与回报基本呈比例；(2) 对于底层土壤电阻率较好的地区，用于降阻的措施减少，仍能保证接地电阻维持在较好的水平；(3) 除去地表电阻率，接触电势与跨步电势优化的重点在于顶层土壤电阻率。本身牵引变电所建设时比原地面高出约 1.2 m(一个电缆沟的高度，用于排水)，填方建议采用低土壤电阻率的材料即可实现。

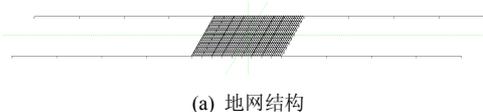
### 2.3 射线扩网

分别从变电所四个角向远处以射线形式敷设水平接地体，如图 4 所示。

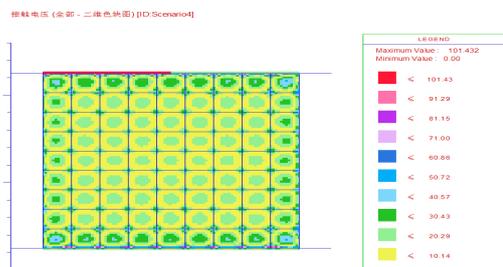
针对 abcd 四个不同的方向以及射线长度(50 m、100 m、150 m、200 m)，对 A 土壤模型进行研究。

如表 4—表 6 仿真结果所示，接地指标呈现以下特征：

(1) 采用 abcd 与 a 方案对比，随着延伸长度的增加，接触电势与跨步电势的改善效果优势大幅度提升；接地电阻获得小幅度提升。



(a) 地网结构



(b) A 模型接触电势

图 4 射线扩网结构

Fig. 4 Radial grounding grid

表 4 接触电势

Table 4 Contact potential

延伸长度/m	a	ab	ad	abcd
50	537.65	502.215	490.131	270.758
100	483.654	402.422	418.904	167.344
150	419.938	330.086	367.057	125.144
200	399.516	363.987	442.789	101.432

表 5 跨步电势

Table 5 Step potential

延伸长度/m	a	ab	ad	abcd
50	449.834	414.939	424.854	172.086
100	408.303	337.074	365.609	113.93
150	371.318	278.43	320.863	86.905
200	339.402	223.147	271.846	70.323

表 6 接地电阻

Table 6 Grounding resistance

延伸长度/m	a	ab	ad	abcd
50	2.414 7	2.316 7	2.325 2	2.160 7
100	2.235 7	2.034 5	2.075 1	1.791
150	2.071	1.798 7	1.874 9	1.535
200	1.924 8	1.609 4	1.715	1.350 1

(2) 随着延伸长度的增加, 各种方案的改善效果呈线性。

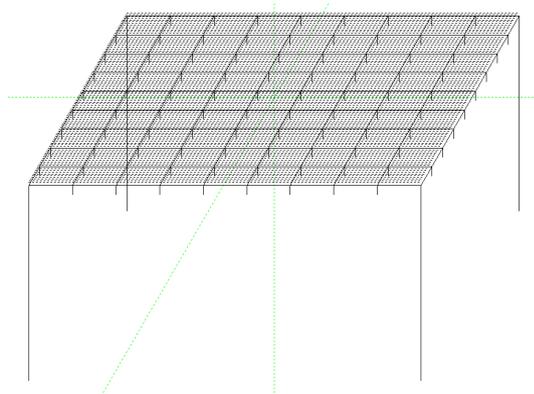
规律: (1) 在变电所周围条件允许的情况下, 优先考虑 abcd 方案的射线扩网。(2) 尽可能长地采用射线延伸长度, 因为付出的接地材料成本小。

### 2.4 深井

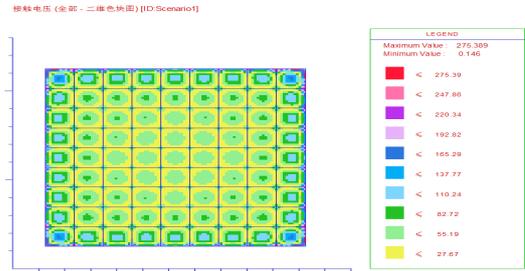
在变电所四角设置深井接地极, 研究各种深度对接地指标的影响, 如图 5 所示。

如表 7—表 9 所示, 接地指标呈现以下特征:

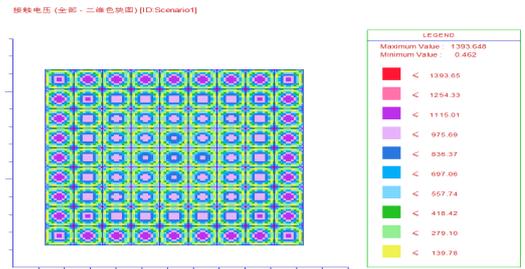
(1) 无论何种土壤, 垂直接地体在深入各层土壤 4 m 以内时, 均不能有效降低接地指标。当垂直接地体深入的长度与主接地网半径相当时(如 50 m), 接地指标才有显著的变化。



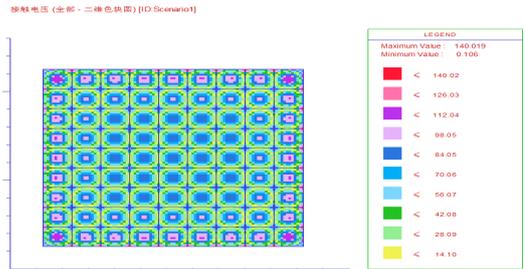
(a) 地网结构



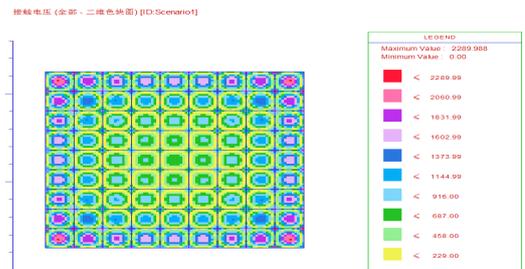
(b) A 模型接触电势



(c) B 模型接触电势



(d) C 模型接触电势



(e) D 模型接触电势

图 5 深井结构

Fig. 5 Deep well structure

表 7 接触电势

Table 7 Contact potential

延伸长度/m	A	B	C	D
2.5	339.699	2 706.726	235.347	3 103.875
3.5	322.891	2 678.613	235.075	3 042.057
7	315.656	2 505.071	234.126	2 709.562
7.5	—	—	231.97	2 692.076
10.8	—	—	219.934	2 662.92
50	275.389	1 393.648	140.019	2 289.988

表 8 跨步电势

Table 8 Step potential

延伸长度/m	A	B	C	D
2.5	358.239	989.905	190.378	1 516.441
3.5	346.353	962.488	183.475	1 447.983
7	343.27	845.178	181.707	1 170.936
7.5	—	—	180.183	1 158.914
10.8	—	—	170.74	1 140.662
50	304.466	471.003	111.491	980.311

表 9 接地电阻

Table 9 Grounding resistance

延伸长度/m	A	B	C	D
2.5	2.562 4	0.746 81	0.608 86	2.918 8
3.5	2.561 7	0.742 9	0.608 62	2.908
7	2.560 6	0.718 55	0.607 94	2.850 1
7.5	—	—	0.605 99	2.847 2
10.8	—	—	0.593 29	2.841 5
50	2.464 6	0.513 95	0.469 95	2.692 1

(2) 当底层土壤电阻率较低时,接触电势与跨步电势下降至 50%左右,接地电阻下降至 70%左右;当底层土壤电阻率较高时,接触电势与跨步电势下降至 80%左右,接地电阻下降至 96%左右,效果减低。

规律:(1)深井对于降低接触电势与跨步电势效果明显;(2)尤其是对于底层土壤电阻率较低的土壤结构,接地指标均能较大幅度地降低。

## 2.5 措施对比

对中心扩网、延伸扩网、射线扩网、深井四种主流降阻措施进行横向对比。其中,水平接地体扩网均使用 800 m 的 150 mm<sup>2</sup> 铜绞线,深井采用 200 m φ20 铜棒。

如图 6 所示,接地指标呈现以下特征:

(1) 接触电势:对于 ACD 型土壤,中心扩网的效果最佳,最低可以降至 20%;对于 B 型土壤,中心扩网也能降至 59%,仅次于深井的 51%,但深井

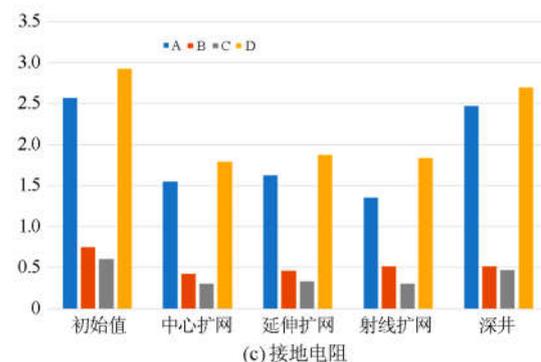
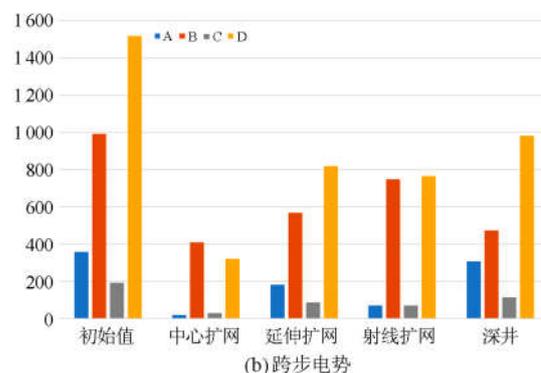
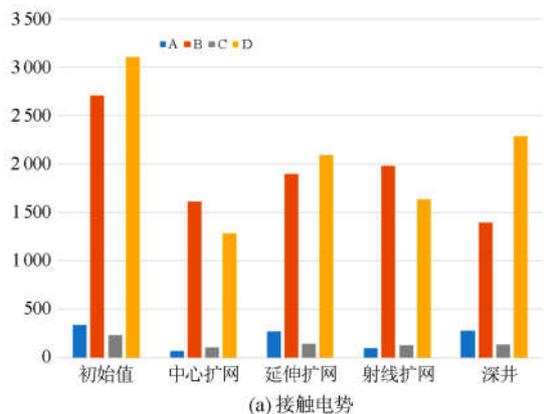


图 6 措施对比

Fig. 6 Comparison of measures

的成本相对过高。

(2) 跨步电势:对于四种土壤,中心扩网的效果最佳,最低可以降至 4.7%。

(3) 接地电阻:对于 BCD 型土壤,中心扩网的效果最佳,最低可以降至 57%;对于 A 型土壤,中心扩网也能降至 60%,仅次于射线扩网的 53%。

规律:(1)综合对比,中心扩网的性能最佳,成本较低,施工可行性较强,是提高接地指标的首选,作为主措施。(2)延伸扩网、射线扩网对接地指标的改善效果稳定且适中,但受周边地表附着物的限制较大,可作为补充措施。(3)深井仅在底层土壤电阻率较低的模型中,改善接地指标效果明显,工程实施成本高,可作为特殊情况下的后备措施。

## 3 主接地网设计

以上研究结果为工程设计提供了大量的数据基础。为此,总结出牵引变电所主接地网设计的指引<sup>[19-22]</sup>。

首先,通过四极温纳法对牵引变电所所在区域及其周边进行测量。测量结果如表 10 所示。

将测量结果通过 Resap 模块进行土壤模型分析,形成等效的水平分层土壤模型。根据前文 abcd 典型土壤结构进行归类<sup>[23-29]</sup>,并在对应类别中,优

先考虑对接地指标改善明显的措施。在高土壤电阻率地区，首选中心扩网；若周边条件允许，配合一些延伸扩网或射线扩网；若底层土壤电阻率较低，附加深井。

表 10 测量结果示例

Table 10 Example of measurement results

序号	探针间的 距离/m	电流探针的 深度/m	电压探针的 深度/m	视在电阻率/ (Ω·m)
1	1.4	0.30	0.25	119
2	2.0	0.30	0.25	110
3	2.8	0.30	0.25	96
4	4.0	0.30	0.25	82
5	5.5	0.30	0.25	72
6	7.5	0.30	0.25	65

在接地安全评估中，要注意：(1) 入地最大短路电流充分考虑电源端的分流系数。运用 FCDIST 模块，根据外电的接入系统报告提供的数据，可以仿真出分流系数，入地短路电流一般为 10%~50% 的故障短路电流；(2) 短路电流允许时间的选择，计及高压侧短路跳闸最大时限，一般为 0.7 s。

### 4 结论

高土壤电阻率地区的牵引变电所主接地网工程设计，存在以下几点主要规律：

1) 底层的土壤电阻率决定了接地电阻值的水平。接地电阻值对牵引变电所地回流影响较大，同时其决定了地电位升(GPR)，直接影响设备的安全。

2) 顶层的土壤电阻率决定了接触电势和跨步电势的水平。其关系到人身安全，是衡量接地系统最重要的指标。

3) 对应四种典型土壤模型，所采用的降阻措施效果各异，但综合评价中心扩网技术经济性最佳。根据实际情况组合配置多种降阻措施，可以收获进一步的改善效果。

4) 分流系数和短路电流允许时间对接触电势的影响很大，在整个系统工程设计时应给予足够的重视。

### 参考文献

[1] IEEE Standards. IEEE Std 80-2000 IEEE guide for safety in AC substation grounding[S]. IEEE-SA Standards Board, 2013.

[2] 交流电气装置的接地设计规范: GB/T 50065—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2011.  
Code for design of AC electrical installations earthing: GB/T 50065—2011[S]. Beijing: China Planning Press,

2011.

[3] 铁路电力牵引供电设计规范: TB 10009—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2016.  
Code for design of railway traction power supply: TB 10009—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2016.

[4] 丁峰. 高寒冻土地区牵引变电所接地系统设计探讨[J]. 铁道标准设计, 2012(11): 95-98.  
DING Feng. Discussion on grounding system design of traction substation in severe cold and frozen soil area[J]. Railway Standard Design, 2012(11): 95-98.

[5] 吴波. 复杂艰险山区铁路牵引变电所接地网设计研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(12): 150-160.  
WU Bo. Research on grounding grid design of traction substation on complex and dangerous mountainous railway[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(12): 150-160.

[6] 罗欣. 季节性冻土地区牵引变电所接地方案研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(4): 161-167.  
LUO Xin. Study on grounding scheme of traction substation in seasonal frozen soil area[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(4): 161-167.

[7] 李佳枫. 牵引变电所接地网仿真计算及性能分析研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.  
LI Jiafeng. Research on simulation calculation and performance analysis of grounding network of traction substation[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

[8] YAMAMOTO K, YOSHIOKA K, SUMI S, et al. Mutual influence of a deeply buried grounding electrode and the surrounding grounding mesh[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 4900-4906.

[9] HE Zhengyou, HU Haitao, HUANG Wen, et al. A method of defect diagnosis for integrated grounding system in high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5139-5148.

[10] MARTINEZ G H, REBOLLAR V V. Design and simulation of a grounding grid for GIS substation[J]. IEEE Latin America Transactions, 2008, 6(2): 137-143.

[11] COLOMINAS I, PARÍS J, GUIZÁN R, et al. Numerical modeling of grounding systems for aboveground and underground substations[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5107-5115.

[12] ALYAMI S. Grid grounding calculations for a 132 kV substation using soil backfilling[J]. IEEE Access, 2019, 7: 104933-104940.

[13] CHOU C J, HSIAO Y T, WANG J L, et al. Distribution of earth leakage currents in railway systems with drain auto-transformers[J]. IEEE Transactions on Power

- Delivery, 2001, 16(2): 271-275.
- [14] NATARAJAN R, IMECE A F, POPOFF J, et al. Analysis of grounding systems for electric traction[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(3): 389-393.
- [15] QI Lei, CUI Xiang, ZHAO Zhibin, et al. Grounding performance analysis of the substation grounding grids by finite element method in frequency domain[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4): 1181-1184.
- [16] LESCHERT D, IWASYKIW G, DERWORIZ R. Substation grounding transfer of potential case studies[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(1): 661-667.
- [17] HE Jinliang, WU Jimpeng, ZHANG Bo, et al. Fault current-division factor of substation grounding grid in seasonal frozen soil[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 855-865.
- [18] MURTY V V S N, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(5): 1-20. DOI: 10.1186/s41601-019-0147-z.
- [19] HE Jinliang, ZHANG Bo, ZENG Rong. Maximum limit of allowable ground potential rise of substation grounding system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5010-5016.
- [20] KAZEROONI M, ZHU Hao, OVERBYE T J. Improved modeling of geomagnetically induced currents utilizing derivation techniques for substation grounding resistance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(5): 2320-2328.
- [21] TONG Xuefang, DONG Xiaohui, TAN Bo. High current field test of impulse transient characteristics of substation grounding grid[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 2018-2021.
- [22] YANG Shuai, ZHOU Wenjun, HUANG Jiarui, et al. Investigation on impulse characteristic of full-scale grounding grid in substation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(6): 1993-2001.
- [23] 陈伟伟, 吕盼, 纪凤坤, 等. 基于多维度检测与Petri网的变电站接地故障风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 152-159.
- CHEN Weiwei, LÜ Pan, JI Fengkun, et al. Risk assessment of substation grounding fault based on multidimensional detection and Petri net[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 152-159.
- [24] 郭名文, 樊艳芳, 耿山, 等. 特高压直流接地极周边断裂结构对地表电位分布的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 73-79.
- GUO Mingwen, FAN Yanfang, GENG Shan, et al. Study on the effect of fracture structure adjacent to ground electrodes of UHVDC power transmission lines on earth surface potential distribution[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 73-79.
- [25] 刘文军, 仇彦军, 孙立臣. 500 kV 输电线路杆塔接地网不同环境下优化降阻方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(13): 98-106.
- LIU Wenjun, QIU Yanjun, SUN Lichen. Research on resistance reducing scheme optimization of 500 kV transmission line tower grounding grid in different environments[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(13): 98-106.
- [26] 王勇, 许莉, 何华林, 等. 基于土壤腐蚀性等级的接地材料使用寿命评价[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 8-12.
- WANG Yong, XU Li, HE Hualin, et al. Evaluation of grounding material life based on soil corrosivity classification[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 8-12.
- [27] 佟继春, 田峻, 郭艳军, 等. 山区输电杆塔接地电阻特性分析[J]. 智慧电力, 2018, 46(1): 71-76.
- TONG Jichun, TIAN Jun, GUO Yanjun, et al. Grounding resistance characteristics analysis of transmission line tower in mountainous regions[J]. Smart Power, 2018, 46(1): 71-76.
- [28] 杨新民. 智能控制技术在火电厂应用研究现状与展望[J]. 热力发电, 2018, 47(7): 1-9.
- YANG Xinmin. Application status and prospect of intelligent control technology in thermal power plants[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(7): 1-9.
- [29] 安宗武, 张亚夫, 伍刚, 等. 辅机统调动力源变频汽轮发电机组节能分析[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 136-140.
- AN Zongwu, ZHANG Yafu, WU Gang, et al. Energy-saving analysis of variable frequency turbine generator units of auxiliary tracking power system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 136-140.

收稿日期: 2020-01-06; 修回日期: 2020-02-02

作者简介:

魏光(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高速铁路牵引供电系统研究及工程设计。E-mail: 184613852@qq.com

(编辑 周金梅)