

[文章编号] 1003—4684(2022)04-0049-05

# 直供方式下影响钢轨电位分布的因素研究

周子梁<sup>1,2</sup>, 汪繁荣<sup>1</sup>

(1 湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068; 2 湖北水利水电职业技术学院, 湖北 武汉 430070)

**[摘 要]** 为了有效抑制钢轨电位升高,建立了铁路牵引供电系统仿真模型,利用铁路牵引供电系统仿真模型研究了影响钢轨电位分布的因素。结果表明:相同牵引电流作用下,最大钢轨电位随机车与牵引变电所距离的增大而增大;相邻吸上线间的间距增大,吸上线内的最大钢轨电位增大;在相邻两根吸上线的区间内,机车位于区间中心时钢轨电位最大。

**[关键词]** 铁路牵引供电系统; 钢轨电位; 仿真分析

**[中图分类号]** U223.1 **[文献标识码]** A

相较于普速铁路,电气化铁路在高速区段需要更大的牵引负荷,从而需要增大牵引电流来提供牵引能量<sup>[1-3]</sup>,牵引功率的提升增大了钢轨对地泄流,从而影响到信号系统的外部电磁环境,如更为严重的电磁干扰(EMI)等。功耗低、灵敏度高是基于微电子技术的信号系统具有的特征,其信号系统的信号电平以及工作电流均较小,因此抗电磁干扰能力相对较弱。当铁路牵引供电系统给机车供电时,牵引电流会通过机车流向钢轨,钢轨对地泄流时会产生钢轨对地电位差,一般将该电位差称为钢轨电位。因此,若增大牵引电流,钢轨对地泄流也会同时增大,从而使得钢轨电位升高,钢轨附近的信号设备甚至工作人员的生命安全均会在钢轨电位升高时受到威胁,尤其是与轨道存在连接的信号设备,在泄漏电流过大而造成的钢轨电位过高时极有可能出现功能不良或故障的情况,钢轨对地泄流增大同时会腐蚀钢轨与轨枕间绝缘垫板,使钢轨与轨枕间绝缘能力降低,钢轨泄漏电流进一步增大就会造成牵引回流发生异常<sup>[4-6]</sup>。钢轨是牵引电流回流牵引变电所的关键路径,但钢轨电流过大又会造成钢轨电位升高,若不能将钢轨电位值控制在安全范围内,将会影响行车安全。因此,为了抑制钢轨电位升高并保证钢轨电位在安全范围内,迫切需要科研工作者研究出有效的技术措施、合适的降电位方案,否则过高的钢轨电位会使机车的运行存在安全隐患。

## 1 铁路牵引供电系统仿真模型的建立

本文所探讨的牵引电流为工频 50 Hz 下的交流

电流,因此可利用 CDEGS 软件中的输入模块 HIFREQ 模块进行仿真建模以及设定参数,模型具体的建立方法将在下面进行详细叙述。

1)输入模块的选择 由于直供加回流线方式下的铁路牵引供电系统是采用工频激励,因此可采用 CDEGS 中的输入模块 HIFREQ 进行仿真建模。

2)参数的设置及模型的建立 HIFREQ 模块内设为 3 个部分:计算、土壤类型、系统设置。

系统的频率设置是通过 MALZ 以及 HIFREQ 模块内设置的计算模块完成的,由于铁路牵引供电系统是采用工频激励,因此需要将起始频率和基频均调为 50 Hz。MALZ 以及 HIFREQ 模块内设置的土壤类型模块可进行土壤电阻率分层设置,由于实际情况中土壤存在分层问题,不同厚度下土壤的电阻率存在差异,因此可通过土壤类型模块灵活设置土壤分层,选择好土壤分层类型后,只需在土壤特性网格内填入不同土壤层的相应参数,所需填写参数包括土壤电阻率、土壤层厚度、相对磁导率以及相对介电常数。构建铁路牵引供电系统的模型需要在 HIFREQ 模块内设置的系统设置模块进行设置。由于不同的导体类型具有不同的导体参数,因此在建模前首先需要确定模型中存在哪些不同类型的导体,并在导体类型中进行设置。

### 1.1 铁路牵引供电仿真模型的建立

根据上文介绍的建模方法及步骤,完成了在 CDEGS 仿真软件 HIFREQ 模块中对铁路牵引供电模型的建立:1)在仿真模型中共设有 2 根长度为



引变压器也可看做引流点或回流点。其中机车的位置是变化的,那么注流点与回流点的距离也在发生变化,为了探究铁路牵引供电系统中注流点和回流点的距离变化对钢轨电位分布的影响,仿真计算以牵引变电所位置设为坐标原点,总共设置了 6 种机车与牵引站的距离,为了避免吸上线造成的影响,机车位置设定在相邻两根吸上线的中心点处,分别为 3800 m、6300 m、9100 m、13 700 m、16 800 m、19 000 m 处,仿真模型见图 1。

仿真模型中的导体参数见表 3,土壤分层见表 2,地网接地电阻设为 0.44  $\Omega$ ,若无特殊说明,仿真所用参数以及土壤分层情况以表 2 和表 3 为准。6 组机车与牵引变电所不同位置时的钢轨电位分布如图 2 所示。其中,为了便于分析,钢轨在各个位置的电位均为有效值,并没有考虑参考方向。若无特殊说明,后续仿真所得钢轨电流分布曲线、钢轨电位分布曲线上的电流值以及电位值均代表有效值。

从图 3 图 4 可以看出,机车与牵引变电所的距离增大时,钢轨最大对地电位逐步升高,当机车与牵引变电所的距离增大到 6000~8000 m 时,最大钢轨电位达到最大值,随着机车与牵引变电所的距离继续增大,钢轨的最大电位却呈现出减小的趋势,当机车与牵引变电所的距离增大到 14 000 m 时,钢轨的最大电位又呈现出上升趋势。

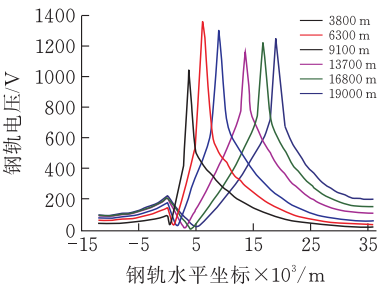


图 3 机车与牵引变电所在不同距离时的钢轨电位分布

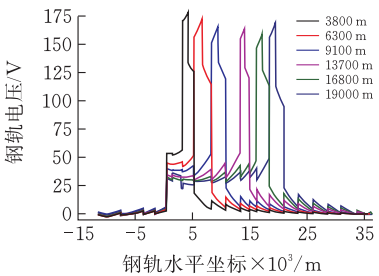


图 4 机车与牵引变电所在不同距离时的钢轨电流分布

牵引变电所附近最大钢轨电位随着机车与牵引变电所距离的增加而增大,但随着机车与牵引变电所的距离进一步增大,牵引变电所附近最大钢轨电位趋于饱和。

当机车与牵引变电所的距离为 4000~9000 m 时,钢轨最大电流随着机车与牵引变电所距离的增

大而减小,当机车与牵引变电所的距离为 15 000~20 000 m 时,钢轨最大电流又开始随着机车与牵引变电所距离的增大而增大。

2.2 吸上线间距对钢轨电位分布的影响

为了解释 2.1 节中,机车距牵引变电所 6300 m 以及 9100 m 时最大钢轨电位高于其它位置的原因,对吸上线间距对钢轨电位分布的影响进行探讨,由于仿真模型是参照 C 线建立的,因此每根吸上线的相对位置也是按照 C 线所给坐标建立的,由表 1 可知,机车距牵引变电所 6300 m 处是  $x$  坐标为 4817 m 与  $x$  坐标为 7892 m 的两根吸上线的中心位置,机车距牵引变电所 9100 m 处是  $x$  坐标为 7892 m 与  $x$  坐标为 10 333 m 两根吸上线的中心位置,可以发现,这 3 根吸上线之间的两段间距分别为 3075 m 和 2441 m,相比于其它吸上线之间的间距较大。

为了探究吸上线的距离是否会影响最大钢轨电位值,本节对距  $x$  坐标为 0 的牵引变电所 2000~10 000 m 处的吸上线位置进行了重新设定,将相邻两根吸上线的距离缩短到了约 1500 m,设定结果见表 4,其它吸上线的位置以及参数均不变,在新的吸上线位置下,分别将机车设置在 3200 m、4800 m、6300 m、7750 m、9300 m 处,机车位置均为相邻两根吸上线之间的中心,同时还将 2.1 节中机车设置在 3800 m、6300 m、9100 m 处的钢轨电位分布与吸上线位置改变后的模型进行比较,道床层电阻率设为 63 000  $\Omega \cdot \text{m}$ ,土壤电阻率设为 200  $\Omega \cdot \text{m}$ 。

表 4 更改吸上线坐标参数后的吸上线坐标

起点 $x$	起点 $y$	起点 $z$	终点 $x$	终点 $y$	终点 $z$
2501	-0.7175	0.013	2501	-2	-8
4017	-0.7175	0.013	4017	-2	-8
5692	-0.7175	0.013	5692	-2	-8
7092	-0.7175	0.013	7092	-2	-8
8592	-0.7175	0.013	8592	-2	-8
10333	-0.7175	0.013	10 333	-2	-8

表 5 原模型中的吸上线坐标

起点 $x$	起点 $y$	起点 $z$	终点 $x$	终点 $y$	终点 $z$
1006	-0.7175	0.013	1006	-2	-8
2801	-0.7175	0.013	2801	-2	-8
4917	-0.7175	0.013	4917	-2	-8
7892	-0.7175	0.013	7892	-2	-8
10333	-0.7175	0.013	10 333	-2	-8

由图 5 可知,当把吸上线之间的距离缩短以后,列车位于相邻两根吸上线中心处时,最大钢轨电位满足随机车与牵引变电所的距离增大而增大的规律。同时,在不改变原模型吸上线的位置的计算结果中,根据图 6 可以看出,在不改变吸上线位置的情

况下,机车在 3800 m 处的钢轨最大对地电位比吸上线位置变化后机车在 3200 m 以及 4800 m 时的钢轨最大对地电位均大;机车位置同为 6300 m 时,若相邻吸上线距离为1400 m,钢轨最大对地电位为 1049 V,而相邻吸上线的距离为 3075 m,钢轨最大对地电位为 1320 V,相比相邻吸上线距离为1400 m 时升高 20.5%;机车位置为 9300 m 时,相邻两根吸上线距离为 1741 m,钢轨最大对地电位为1180 V,机车位置在 9100 m 时,相邻两根吸上线的距离为 2441 m,钢轨最大对地电位为 1325 V,相比机车位置为 9300 m,相邻两根吸上线距离为 1741 m 时的最大钢轨电位升高 10.94%,由此可以看出,相邻两根吸上线的距离相差越大,机车通过相邻两根吸上线中心点时的钢轨对地电位越高。

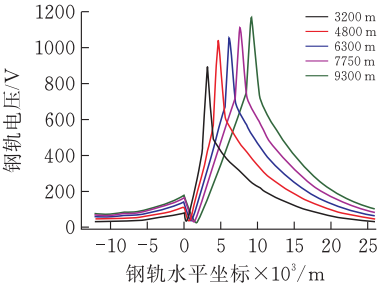


图 5 机车与牵引变电所在不同距离时的钢轨电位分布

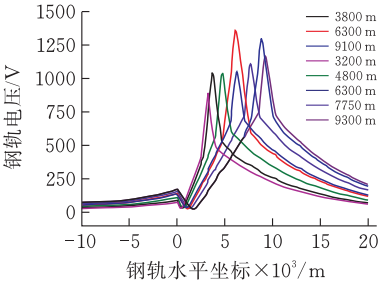


图 6 机车与牵引变电所在不同距离时的钢轨电位分布

2.3 机车在吸上线之间的不同位置时的钢轨电位分布

为了进一步探究机车位于吸上线之间各个位置时的钢轨电位分布情况,特取  $x$  坐标为17 928 m和 20 475 m 的两根吸上线,并将机车位置分别设置在 17 930 m、18 500 m、19 000 m、19 500 m、20 000 m、20 475 m 处。

由图 7 可以看出,在 17 928 m 和 20 475 m 的两根吸上线之间机车位置发生变化时,对牵引变电所附近的钢轨对地电位几乎不产生影响,但由图 8 可以看出,机车位于两根吸上线之间的中心位置时,钢轨的最大对地电位较机车靠近吸上线时较大,而机车在吸上线处时的钢轨最大对地电位最小,17 928~20 475 m 区间内最大钢轨对地电位的差值达到了 425 V,因此吸上线之间钢轨的位置对钢轨

对地电位升的影响不可忽略,这是由于机车在相邻吸上线的中心位置时,牵引电流不能直接通过吸上线分给回流线,会导致机车附近电流较大,从而导致钢轨电位差增大,而机车靠近吸上线处时,钢轨电流能够尽快通过吸上线传给回流线,因此机车附近电流在吸上线处会明显降低,从而保证了钢轨电位下降速度减慢,因此在实际工程设计中需要考虑机车在吸上线之间的位置发生变化时对最大钢轨电位的影响。

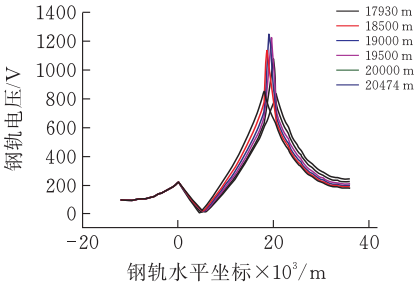


图 7 机车在相邻吸上线之间不同距离时的钢轨电位分布

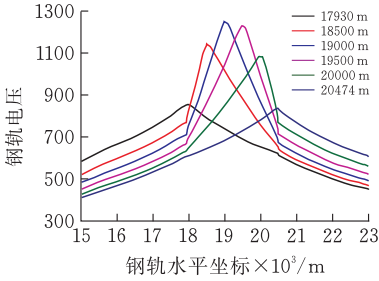


图 8 机车在相邻吸上线之间不同距离时的钢轨电位分布局部放大图

3 结论

经仿真分析,通过递进的方式得到了 3 种因素对钢轨电位的影响规律以及各因素之间的关系,并为抑制钢轨电位的方法提供了思考方向。

1)基于结论:机车在相邻两根吸上线中点处的钢轨电位最大的启发,通过在相邻吸上线中点的钢轨处接上接地电阻,可以在不影响且不改变吸上线位置的情况下,有效抑制钢轨电位。

2)下一阶段的重点工作之一就是在本文所建立的仿真模型基础上,进一步设计 1)中提到的抑制钢轨最大电位的仿真模型,并验证该方案的可行性以及得到相应的抑制效果。

[参 考 文 献]

[1] 雷栋. 高速电气化铁路牵引回流及钢轨电位特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
[2] 董安平. 高速重载电气化铁路钢轨电位产生机理与抑



制方法的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.

[3] 谭秀炳. 交流电气化铁道牵引供电系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2006.

[4] 何华武. 中国高速铁路创新与发展[J]. 中国铁路, 2010(12): 5-8.

[5] 何华武. 中国铁路发展与科技创新[J]. 铁道工程学报, 2007, 24(7): 1-11.

[6] 何华武. 快速发展的中国高速铁路[J]. 学术动态, 2006(3): 23-31.

# Research on the Factors Affecting the Rail Potential Distribution under the Direct Supply Mode

ZHOU Zishuo<sup>1,2</sup>, WANG Fanrong<sup>2</sup>

(School of Electrical and Electronic Engin., Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068,China ;  
2 Hubei Water Conservancy & Hydropower Polytechnic ,Wuhan 430070,China )

**Abstract:** If the traction current is increased, the rail-to-ground leakage will increase at the same time, which will increase the rail potential. Signal equipment near the rail and even the lives of workers will be threatened when the rail potential rises, especially It is a signal device connected to the track. When the potential of the rail is too high due to excessive leakage current, it is very likely to have malfunction or failure. The increase in the leakage of the rail to the ground will also corrode the insulating pad between the rail and the sleeper. , The insulation capacity between the rail and the sleeper is reduced, and the leakage current of the rail is further increased, which will cause abnormal traction return. The rail is the key path for the traction current to flow back to the traction substation. However, excessive rail current will cause the rail potential to rise. If the rail potential value cannot be controlled within a safe range, driving safety will be affected. Therefore, in order to restrain the rail potential from rising and ensure that the rail potential is within a safe range, it is urgent for researchers to develop effective technical measures and appropriate potential reduction schemes. Otherwise, the excessively high rail potential will cause safety hazards to the operation of the locomotive.

**Keywords:** railway traction power system; rail electric potential; simulation analysis

[责任编辑: 张岩芳]

(上接第 13 页)

# Schedule Risk Simulation of Surface Ship Dock Repair Project

LU Yin, SONG Tingxin

(School of Mechanical Engineering , Hubei Univ. of Tech.,Wuhan 430068, China )

**Abstract:** In order to solve the problems of schedule delay caused by risk factors in the process of surface ship maintenance, this paper first establishes risk identification table of each maintenance process based on the breakdown of shipyard repair project procedure, and then simulates the shipyard repair project by using multi-agent system, and establishes "procedure unit" and "working unit" respectively which constructs a project schedule risk assessment model based on multi-agent. Finally, through the simulation results, the sensitivity ranking of risk factors is obtained, and a risk control method can be used for reference is proposed. The reliability of the simulation model is verified by the comparative analysis before and after the control.

**Keywords:** failure mode and effect analysis; multi-agent simulation; schedule risk control; ships dock

[责任编辑: 张 众]