

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2312256

基于容性耦合的钢轨压力传感器电磁干扰分析*

杨阳^{1,2}, 朱峰¹

(1. 西南交通大学电气工程学院 成都 611756; 2. 四川建筑职业技术学院机电与信息工程系 德阳 618000)

摘要:目前随着弱电装置在铁路通信、传感测量等方面的普及,电磁干扰问题越来越引起人们的重视,但是关于电磁干扰机理的耦合分析等方面的工作开展较少。本文针对一则典型的钢轨压力传感器电磁干扰问题,从干扰源排查入手,建立了电源线与信号线的容性耦合物理模型,提取线缆间分布电容参数,定量分析了耦合电场大小;同时找出干扰源,确定为电源线容性耦合导致的串扰电压干扰,给出了相应抑制干扰的措施,该分析与实测相符合。研究表明,接地装置对电源线地线的电磁干扰影响很大,从而进一步影响了信号线的信号电压。当接地电阻的埋入深度从0.1 m增加到0.6 m时,电源线的干扰电压得到了抑制;信号线的连接端头是容易耦合到外界电磁干扰的薄弱环节,是改善屏蔽效能的关键点。本文所提出的关于容性耦合的机理分析、计算方法、以及传感器信号的电磁干扰抑制措施,能够为今后电气设备的电磁干扰分析抑制提供普遍的借鉴意义。

关键词:容性耦合;电磁干扰;压力传感器;串扰电压

中图分类号: TH865 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4

The electromagnetic interference analysis of rail pressure sensor based on capacitive coupling

Yang Yang^{1,2}, Zhu Feng¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Department of Mechanical and Information Engineering, Sichuan College of Architectural Technology, Deyang 618000, China)

Abstract: Nowadays, with the popularization of low current device in railway communications, sensors and other aspects, electromagnetic interference has attracted more and more attention, however, the work about the coupling analysis of electromagnetic interference mechanism is rare. This study focuses on a typical electromagnetic interference problem of rail pressure sensors. First a physical model of capacitive coupling between power and signal lines is established based on the investigation of interference sources. Then the distributed capacitance parameters between cables are extracted, and the value of coupling electric field is quantitatively analyzed. At the same time, the interference source is identified and the capacitive coupling voltage interference caused by power line crosstalk is determined. Corresponding measurements of suppressing interference are provided, which verifies the analysis. The results show that the grounding device has a great influence on the electromagnetic interference of signal voltage. When the buried depth of the grounding resistance increases from 0.1 m to 0.6 m, the electromagnetic interference voltage of the power line is suppressed. Furthermore it's found that the connecting end of signal line is a weak link valuable to the electromagnetic interference, which is the key to improve the shielding efficiency. The mechanism analysis and calculation method of capacitive coupling proposed in this paper and the suppression measures of electromagnetic interference of sensors can provide a general reference for suppressing the electromagnetic interference of electrical equipment in engineering.

Keywords: capacitive coupling; electromagnetic interference; pressure sensor; crosstalk voltage

0 引言

随着我国铁路运输事业的发展,各类弱电检测装置的不断普及,铁路中的电磁干扰问题日益引起人们的重视^[1-2]。一般而言,电磁干扰耦合途径的分析以及干扰源的排查是抑制电磁干扰问题的重要环节^[3]。尽管电磁干扰耦合分为容性、阻性与感性耦合,但在遇到实际问题分析时,往往具有混合模式。文献[4]针对交流电气化铁路对于附近设备的阻性耦合干扰展开研究,但是由于被干扰的设备结构单一,并没有考虑容性耦合的影响。在铁路屏蔽电缆的文献[5-6]中,作者考虑铁路信号线缆串扰引起的电磁干扰问题,采用容性耦合的思路,但是对于接地技术的研究,并没有考虑阻性耦合的影响。文献[7-8]对于电磁干扰中的接地技术进行了研究,但是缺乏对铁路环境的应用分析,文献[9-12]对于国内外铁路环境中存在的电磁干扰问题着重在解决手段,但是对于干扰机理的分析缺乏理论依据。综上所述,目前对铁路线缆耦合以及接地方式等因素对电磁干扰影响的研究较少,暂时还处于起步阶段,由于实际铁路现场中设备周边电磁环境复杂,对这些电磁干扰问题的分析具有重要研究意义。

本文针对一则钢轨压力检测系统的电磁干扰问题,从干扰源排查入手,进行了电磁干扰现场的测试,在研究压力传感器结构及工作原理的基础上,对电磁干扰的耦合机理进行分析,给出了抑制干扰的措施。同时,建立了电源线多导体容性耦合模型、串扰电压电场辐射模型,基于 ANSYS 有限元软件提取了多导体系统的分布电容参数,并通过阻性耦合计算定量分析了耦合电场大小。结果表明,接地装置故障以及线缆之间、线缆与机箱的容性、阻性耦合是造成电磁干扰的主要原因。提出的增加接地体埋入深度、改善土壤湿度等措施,有效解决了电磁干扰问题,并且定量分析出的耦合场大小,与现场的实测值前后对比一致,验证了理论与措施的正确性,对电磁干扰问题的分析解决具有很大的参考价值。

1 压力传感器结构及工作原理

某地在研的钢轨压力检测系统设置于国家牵引动力实验室外侧,系统的实物布局如图1所示,图1中室外轨道上的是黄色承载器,用于承载车辆及货物,其上附有压力传感器,如图1(a)所示,信号线与电源线通连接到室内信号滤波器、工控机与显示器部分,如图1(b)所示。实验发现,室外传感器在无压力情况下,室内显示器仍显示有最大幅度为 350 mV 的干扰电压信号,如图1(b)、图4(a)所示,这严重影响了传感器的测试结果,设备的电磁干扰情况严重。

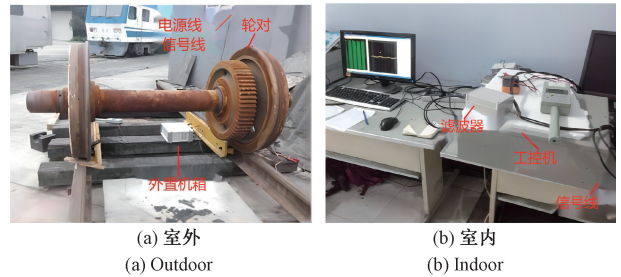


图1 钢轨压力检测装置布局

Fig. 1 Layout of rail pressure detection device

压力传感器是钢轨上重物检测的重要元器件,其电路及原理使用广泛^[13-15]。压力检测系统的电路原理如图2所示,压力传感器主要是由4个电阻应变片R组成惠斯通电桥,它将轨道上部压力转化为电信号,在外置机箱的信号处理器中进行信号采集与放大。系统的外置机箱内部结构如图3所示,所采集数据通过CH0、CH1、CH2和CH3四个通道传输到放大器,被放大数百倍的信号通过信号线与室内滤波器、工控机相连,同时这些设备也通过电源线相互连接。

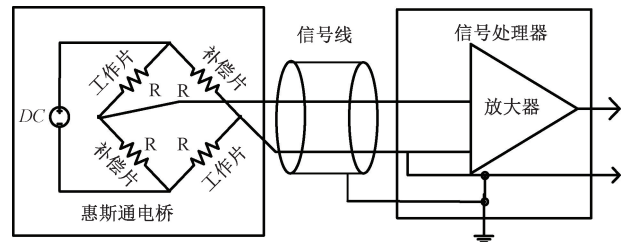


图2 压力传感器电路原理

Fig. 2 Circuit principle of pressure sensor

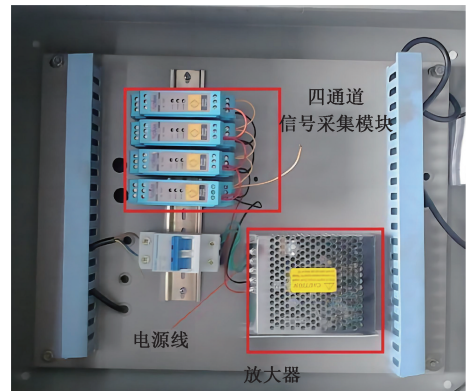


图3 外置机箱内部结构

Fig. 3 Internal structure of the external chassis

从传感器的工作原理可以看出,一旦信号线上产生过大的干扰电压,放大器会将这些干扰信号进行放大处理,超过一定阈值后室内滤波器无法滤除,严重影响了测试系统对钢轨承载压力的精准测量。

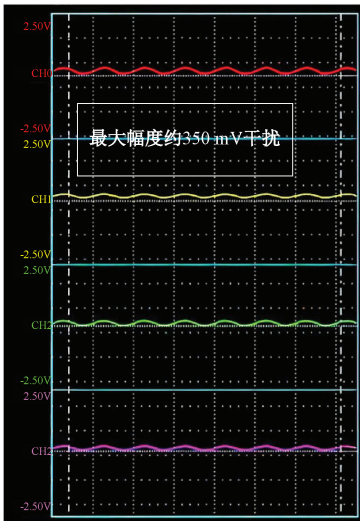
2 干扰源的测试与排查

为了查找干扰源,笔者采取了如下测试:采用的工频电场场强仪为 RJ-5,其具体参数如表 1 所示,对室内外信号线、电源线多处测试点以及轨道衡外置机箱 5 个外表面(前、后、左、右、上)测试干扰电场强度,测试空气温度 27.8℃,相对湿度 41.5%。测试发现,即便传感器上没有压力,不仅显示器显示信号线上存在 350 mV 的干扰电压信号,如图 4(a)所示,在电源线、信号线、外置机箱表面均有约 410 V/m 左右的干扰电场辐射,如图 4(b)、表 2 所示,并且用万用表测量出电源线火线电压 220 V,地线电压约 105 V,地线上存在很大干扰电压,如图 4(c)所示。

表 1 RJ-5 工频电场测试仪参数

Table 1 Parameters of RJ-5 power frequency electric field tester

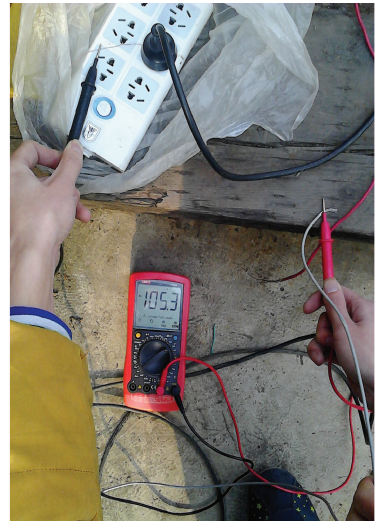
项目	参数
频率范围/Hz	30 Hz~2 000
量程/V/m	1~20 000
误差/%	±20
工作温度/℃	-10~40
相对湿度	80% 以下
电源	6F22~9 V 叠层电池、8.4 V 充电电池



(a) 干扰电压信号
(a) Interference voltage signal



(b) 干扰电场
(b) Electric interfering field



(c) 地线电压
(c) Voltage of grounding wire

图 4 钢轨压力传感器系统的电磁干扰测试图

Fig. 4 Photos of electromagnetic interference in the rail pressure sensor system

3 电磁干扰耦合机理分析

针对此类电磁干扰,可以从理论上对于电磁干扰的产生原因以及电磁干扰耦合机理进行分析计算。为了分析干扰耦合途径以及定量计算出干扰电压和干扰电场,结合地线测得 105 V 的电压值,建立电源线容性耦合模型以及地线的电压辐射场强模型加以分析。

3.1 电源线容性耦合模型

电源线是由火线、地线、零线组成,可以看成多导体传输线模型^[16-21],其容性耦合如图 5 所示。导体 a 、 b 、 c 分别代表火线、地线和零线,其电压为 U_1 、 U_2 、 U_3 ,它们之间的互有部分电容为 C_{12} 、 C_{13} 、 C_{23} ,各自与大地之间部分电容为 C_{10} 、 C_{20} 、 C_{30} 。

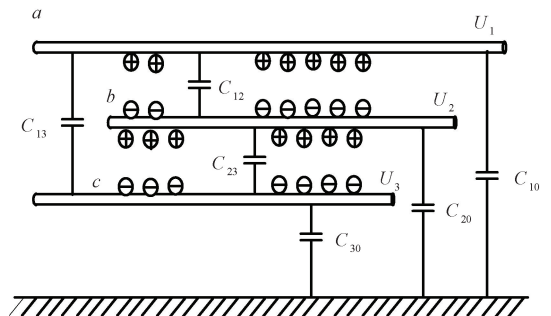


图 5 多导体容性耦合模型

Fig. 5 Capacitive coupling model of multi-conductor

以上多导体之间经过容性耦合,会产生耦合电压。考虑导体的接地电阻分别是 R_1 、 R_2 、 R_3 ,则等效电路如

图6所示。

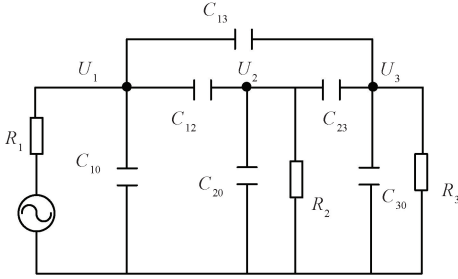


图6 多导体容性耦合等效电路

Fig. 6 Equivalent circuit of capacitive coupling among multi-conductor

根据图6电路,得出导体 b 即地线上的耦合电压 U_2 可表示为:

$$U_2 = U_1 \frac{j\omega(C_{12} + C_{23})R_2}{1 + j\omega(C_{20} + C_{12} + C_{23})R_2} \quad (1)$$

式中: U_1 为火线电压, R_2 为地线的接地电阻。由此可见,地线上的电压与火线电压,地线与火线、零线、大地之间的分布电容、地线的接地电阻有直接关系。分布电容取决于导线的固有属性,火线电压是固定的220 V市电,故地线的接地电阻 R_2 直接决定了地线上的耦合电压值。

将式(1)变型,可以将接地电阻 R_2 表示为:

$$R_2 = \frac{U_2}{[U_1(C_{12} + C_{23}) - U_2(C_{20} + C_{12} + C_{23})]j\omega} \quad (2)$$

一般地,接地电阻 R_2 的阻值和接地点的土壤电导率、温度、湿度、接地线布线措施有关^[20-22],接地电阻阻值必须符合不大于10 Ω 的国家标准^[23-24]。通过以上模型的建立与分析得出,电源线地线的干扰电压应该从接地电阻 R_2 的排查入手。

3.2 串扰电压的电场辐射模型

针对测试中线缆及机箱附近的干扰电场,以及地线电压又是如何引起信号线的干扰电压等问题,建立地线电压的电场辐射模型。对地线进行分析,假设其是一段线电荷密度为 τ 带电导线,其电势及场强模型如图7所示,图中导线长度为 $2l$,选择导线中点作为原点建立直角坐标系。

在带电导线上任选一点 q ,单位长度 dz 针对导线外任一点 P 所产生的电势 ϕ 为:

$$d\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\tau dz}{D} \quad (3)$$

式中: ϵ_0 为真空电容率, D 为 P 点到 q 点的直线距离。令 r 和 z 分别为 P 点到坐标抽的水平距离和垂直距离, D 与 Z 轴夹角为 θ , Z 轴与导线两端的夹角分别为 θ_1 、 θ_2 。则整条带电导线对 P 点的电势可以表示为:

$$\phi = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{d\theta}{\sin\theta} = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{\sin\theta_1(1 - \cos\theta_2)}{\sin\theta_2(1 - \cos\theta_1)} \right] \quad (4)$$

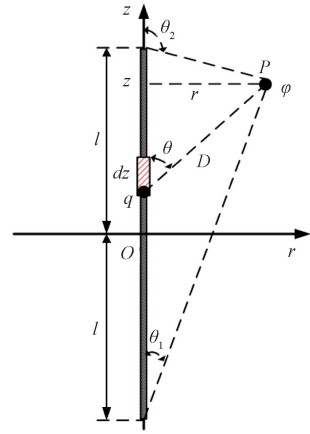


图7 带电导线的电场辐射场强计算模型

Fig. 6 Calculation model of electric field radiation emitted by the electric wire

其中,

$$\sin\theta_1 = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (z+l)^2}} \quad (5)$$

$$\cos\theta_1 = \frac{z+l}{\sqrt{r^2 + (z+l)^2}} \quad (6)$$

$$\sin\theta_2 = \frac{r}{\sqrt{r^2 + (z-l)^2}} \quad (7)$$

$$\cos\theta_2 = \frac{z-l}{\sqrt{r^2 + (z-l)^2}} \quad (8)$$

将式(5)~(8)代入式(4),可推导出:

$$\phi = \frac{\tau}{4\pi\epsilon_0} \ln \left[\frac{\sqrt{r^2 + (z-l)^2} - (z-l)}{\sqrt{r^2 + (z+l)^2} - (z+l)} \right] \quad (9)$$

在实际测试情况中,地线导线直径为 d ,场强仪测试点 P 接近导线表面,与 Z 轴的距离 $r=d/2$,且 $d \ll l, z \ll l$,则根据式(9),导线表面电势可以化简为:

$$\phi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{4l}{d} \quad (10)$$

采用高攸钢学者关于阻性耦合描述中^[25]中平均电位求解公式,导线表面电势还可以更精确的表示为:

$$\phi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln \left(\frac{8l}{d} - 1 \right) \quad (11)$$

再根据高斯定律,距离导线外一点 P 点的电场强度 E 可表示为:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{D} \quad (12)$$

以上模型中导线电势 ϕ 以及附近电场强度 E 的推导过程,可以在分析本次电源线附近的干扰电场中应用。

4 实验验证与分析

利用 ANSYS 软件建立电源线的模型提取其分布电容参数:地线与火线、零线、大地之间的耦合电容 C_{12} 、 C_{23} 、 C_{20} 分别为 27.83、27.62、6.29 pF。取:火线电压 $U_1 = 220$ V,地线电压 $U_2 = 105$ V,代入前文所提式(2),可以求得接地电阻 R_2 的阻值:

$$R_2 = 18.37 \text{ k}\Omega \quad (13)$$

这显然从理论上验证了系统的接地装置出现了故障,远远超过了国家标准接地电阻值不大于 10Ω 的规定。为此,对接轨道交通实验室的接地装置进行检查,经过排查发现:位于实验室外的接地装置出现故障,接地体附近土壤干燥疏松,土壤相对湿度只有 35.5%,长期雨水冲刷等气候环境因素导致接地体虚埋入土,部分接地体已经暴露在外,不规范的接地装置导致系统的接地电阻过大,是造成电磁干扰的主要原因。

为此,根据接地体相关标准^[23-24]执行,将接地导体从埋入深度 0.1 m 增加到 0.6 m,使得接地体更加牢固,并增加土壤相对湿度至 88.4%,利用阻性耦合方法^[25]可计算得知接地电阻大大降低,并且经过测量,改良前后显示器上的传感器 4 个通道信号电压波形的对比如图 8(a)~(d)所示,在传感器上无压力的情况下,虚线代表改良前的电压信号,实线代表改良后的电压信号。可以看到,接地装置未改良前,4 个通道的传感器信号线中存在幅值约为 350 mV 的干扰电压,经过接地装置地改良,干扰电压均趋近于零,电磁干扰现象消失,理论的分析计算与工程实践相符合。证明了此次电磁干扰的主要原因是接地装置故障,导致电源线火线电压以容性耦合的方式在地线产生过大的干扰电压。

对于地线以及外置机箱表面的干扰电场的辐射场强,可根据前文式(11)、(12)进行计算。根据实际情况,取测得干扰场强 E 为 410 V/m,测试点距电源线芯线距离 D 为 0.025 m,导线直径 d 为 1.5 mm,实际电源线长度 $2l$ 为 10 m,则由式(12)以及测试电场可得:

$$E = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \frac{1}{D} = 410 \text{ V/m} \quad (14)$$

进而推出:

$$\frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} = 10.25 \quad (15)$$

将式(15)代入(11),得到带电导线电压:

$$\phi = \frac{\tau}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{8l}{d} - 1\right) = 104.46 \text{ V} \quad (16)$$

此结果接近地线上的干扰电压,由此可见,信号线缆附近的干扰电场,来自于地线上的 105 V 的干扰电压,而由于外置机箱等设备金属外壳与地线相连,机箱周围也

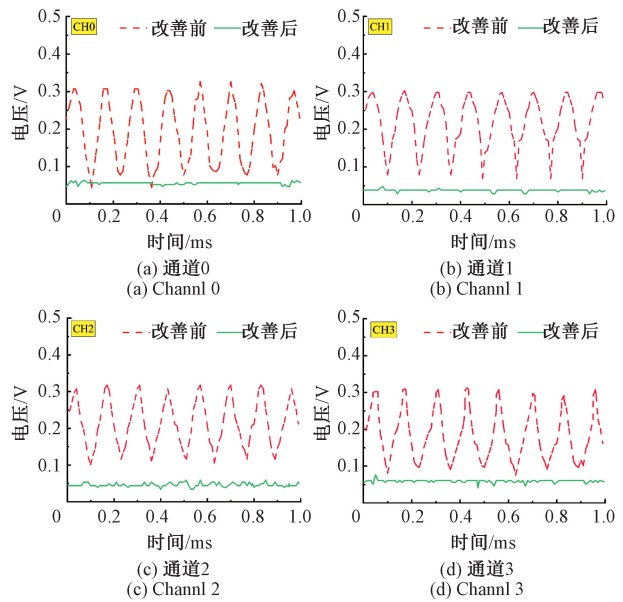


图 8 4 个信号通道的干扰电压改良前后对比图

Fig. 8 Interference voltages of 4 signal channels before and after the improvement

存在约同样大小的干扰电场。那么地线上的干扰电压,以及周围的干扰电场又是如何引起信号线上的干扰信号呢?在图 3 中可以看到,外置机箱内部信号线与信号采集模块、放大器连接处会不可避免地露出一段连接芯线,这导致信号芯线屏蔽不彻底^[26]。当地线及机箱机壳存在干扰电压,对外发射干扰电场,信号线的芯线处在很大的干扰电场中时,其芯线上会通过容性耦合出较大的干扰电压^[27],这是本次电磁干扰耦合的主要途径。

利用 ANSYS 软件进行仿真,根据实际情况,当信号线距地 10 cm,非屏蔽芯线部分长度 0.5 cm 时,求得芯线对地耦合电容 11.72 pF,此时屏蔽信号线周围电势分布仿真如图 9 所示,可以证实,外部干扰电场会通过屏蔽不彻底的信号线连接处,容性耦合耦合到芯线上,从而产生干扰信号电压。

由于信号线与地线并行排列,可以看成两线平行,根据电位函数公式:

$$U = \int_i E d_i \quad (17)$$

式中: U 是电场耦合电压, E 是辐射电场场强, d_i 是耦合距离。化简得出信号线的芯线上耦合的干扰信号电压 U :

$$U = E\rho \quad (18)$$

式中: ρ 为信号线芯线与地线的距离,根据实际情况,两线并行排列,芯线距离约为屏蔽层厚度,实测为 0.85 mm,再将干扰电场场强 E 为 410 V/m 代入式(18),可以计算出信号线芯线上的干扰电压信号 U 为

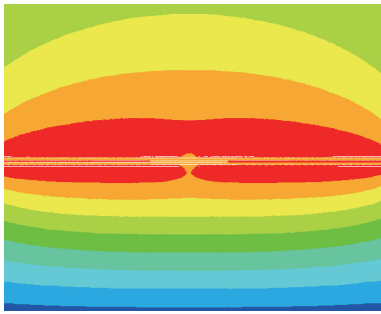


图9 屏蔽不彻底时信号线的电势分布图

Fig. 9 Potential distribution diagram of signal line when the shielding is incomplete

348.5 mV。这与实际情况中,显示器约350 mV干扰信号相符合。

当接地体进行了前述方法进行深埋改良后,随着接地线上的干扰电压消失,信号线缆及外置机箱附近的干扰电场也几乎降为0。改良前后分别在室内、外信号线附近选择了6个测试点,对外置机箱前后、左右、上下五个外表面进行电场强度测量,测试点的干扰电场强度对比数据如表2所示,可以看到,接地体改良前线缆及外置机箱周围普遍存在约410 V/m左右的干扰电场,在接地体进行改良后,干扰电场强度均达到个位数值,趋近于零,电磁干扰得到了很好地消除。

表2 改良前后各测试点场强测试结果

Table 2 Test results of field strength at each test point before and after improvement V/m

测试点场强	1	2	3	4	5	6	
改良前	信号线	398	412	424	415	405	423
	外置机箱	390	409	421	413	411	
改良后	信号线	5	4	5	4	6	5
	外置机箱	6	4	8	5	7	

5 结 论

接地装置对信号电压的电磁干扰影响很大,自然环境中的雨水冲刷、土壤干燥稀松等因素都会对接地体埋入深度产生影响,因此需要及时检查和维护。当接地体埋入深度不够或土壤电阻率过大时,会导致接地阻抗过大,钢轨压力传感器的电源线通过容性耦合作用,会使地线产生严重的干扰电压,从而使设备周围存在干扰电场,信号线也因此产生干扰电压信号,这是本次电磁干扰的干扰源。通过将土壤深度从0.1 m增加到0.6 m,同时将

土壤的相对湿度从35.5%改善到88.4%后,电磁干扰基本消失。

信号线与设备的连接端头影响了其屏蔽效能,若周围电磁环境复杂,存在干扰电磁场,容易在芯线上耦合出干扰信号,这是本次电磁干扰的主要耦合途径;可以通过更换线缆头、增加屏蔽层等方式改善连接线端头屏蔽效能,以降低电磁干扰的耦合发生。

此外,本文针对电磁干扰的耦合机理分析,从理论上建模与推导,定量分析出耦合场的大小,与工程实际测试相吻合。基于容性耦合的电磁干扰问题在工程中较为常见,但本文所提理论模型及计算方法可以准确判断电磁干扰电压的来源,定量计算出干扰电压的数值,使电磁干扰问题得以顺利解决,这对于此类传感器等弱电设备的电磁干扰问题的分析解决具有很大的参考价值。

参考文献

- [1] 白文林, 邹喜华, 蒋灵明, 等. 面向铁路电磁干扰检测的光子学技术集成系统与现场应用[J]. 铁道学报, 2021, 43(10): 60-68.
BAI W L, ZOU X H, JIANG L M, et al. Photonics-enabled integrated system and field applications for electromagnetic interference detection along in-service railways [J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(10): 60-68.
- [2] 李时博, 李平, 文玉梅, 等. 多芯电缆微弱磁场能量采集器的高效管理电路[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(6): 284-292.
LI SH B, LI P, WEN Y M, et al. Efficient and low power consumption management circuit of energy harvester for weak magnetic field around multi-core cables [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 284-292.
- [3] 杨世武, 张旭, 梁伊模, 等. 路信号电缆接地方式研究和纵向电动势测试[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 254-259.
YANG SH W, ZHANG X, LIANG Y M, et al. Study on grounding of railway signal cable and test of longitudinal electromotive force [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 254-259.
- [4] 解绍锋, 孙镜堤, 骆冰祥, 等. 高速铁路对邻近普速铁路电力电缆的干扰机理[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(1): 206-213.
XIE SH F, SUN J D, LUO B X, et al. Mechanism of high-speed railway interference on power cables of adjacent normal-speed railway [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(1): 206-213.

- [5] 崔勇,杨世武,刘志明,等. 铁路信号电缆屏蔽及接地方式的研究[J]. 铁道学报, 2017, 39(17): 77-82.
CUI Y, YANG SH W, LIU ZH M, et al. Research on shielding and grounding mode of railway signal cable[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(17): 77-82.
- [6] 马云双, 闻映红, 张丹, 等. 动车组屏蔽线缆间串扰特性及其试验验证研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 5(5): 1188-1194.
MA Y SH, WEN Y H, ZHANG D, et al. Research and experiment verification on the crosstalk characteristics of shielded cables in EMU[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 5(5): 1188-1194.
- [7] 汉泽西, 李彪, 郭正虹. 接地抗干扰技术的探讨[J]. 测控技术, 2007, 12(23): 74-77.
HAN Z X, LI B, GUO ZH H. Discussion on earthing anti-jamming technology[J]. Measurement and Control Technology, 2007, 12(23): 74-77.
- [8] VIJAYARAGHAVAN G, BROWN M, BARNES M. Practical grounding, bonding, shielding and surge protection[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2004.
- [9] NISKA S, SCHUNNESSON H, KUMAR U. Measurements and analysis of electromagnetic interference in a railway signal box — a case study[J]. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, 2011, 18(3): 285-303.
- [10] 闻映红. 高速铁路信号系统的抗电磁干扰技术[J]. 北京交通大学学报, 2016, 40(4): 70-74.
WEN Y H. Anti-electromagnetic interference technology for high-speed railway signaling system[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2016, 40(4): 70-74.
- [11] 常媛媛, 吴命利, 韦继肖. 津秦客运专线信号电缆受电磁影响测试与分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 204(9): 92-96.
CHANG Y Y, WU M L, WEI J X. Test and analysis of the electromagnetic influence of signal cable on tianjin-qinhuangdao passenger dedicated railway line [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 204(9): 92-96.
- [12] STEPHEN D, VIRGINIE D, RICARDO A, et al. Study of the susceptibility of the GSM-R communications face to the electromagnetic interferences of the rail environment[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(3): 667-676.
- [13] 周用贵, 姜会增, 李世林, 等. 轨道衡计量技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
ZHOU Y G, JIANG H Z, LI SH L, et al. Metering technology of track scale[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [14] 闫文吉, 陈红亮, 陈洪敏, 等. 硅压阻式压力传感器测量误差在线补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(6): 59-65.
YAN W J, CHEN H L, CHEN H M, et al. Research on on-line compensation method for the measurement error of silicon piezoresistive pressure sensor [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(6): 59-65.
- [15] 沈意平, 吴迪, 张博南, 等. 钢轨裂纹导波检测的柔性压电复合材料传感技术研究[J]. 仪器报, 2021, 42(11): 62-70.
SHEN Y P, WU D, ZHANG B N, et al. Research on flexible piezoelectric composite sensing technology for guided wave detection of rail crackss [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(11): 62-70.
- [16] PAUL C. R. Solution of the transmission-line equation for three-conductor lines in homogeneous media [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1978, 20(1): 216-222.
- [17] 李莉, 李卫兵, 王学刚, 等. 二平行传输线间的串扰分析[J]. 电波科学学报, 2001, 16(2): 271-274.
LI L, LI W B, WANG X G, et al. Crosstalk analysis between two parallel transmission lines [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2001, 16(2): 271-274.
- [18] TAYLOR C, SATTERWHITE R, HARRISON C. The response of a terminated two-wire transmission line excited by a nonuniform electromagnetic field[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 1965, 13(6): 987-989.
- [19] ANTONIJER D, TAPAN K S. Analysis of time response of lossy multiconductor transmission line networks[J]. IEEE Transactions on MTT, 1987, 35(10): 898-908.
- [20] 黄玮, 梁伟, 文习山. 降低阳江核电厂接地阻抗的方法[J]. 高电压技术, 2010, 36: 365-370.
HUANG W, LIANG W, WEN X SH. Method of reducing the grounding impedance of Yangjiang nuclear power plant[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36: 365-370.
- [21] BLUME S. High voltage protection for telecommunications[M]. Wiley IEEE Press, 2011.
- [22] MA J X, DAWALIBI P F. Analysis of grounding systems in soils with finite volumes of different resistivities[J].

IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2): 596-601.

- [23] 中华人民共和国建设部. JGJ16-2008,《民用建筑电气设计规范》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
Ministry of Construction of the People's Republic of China. JGJ16-2008, Code for Electrical Design of Civil Buildings [S]. Beijing: China Building and Building Press, 2008.
- [24] 国家铁路局. TB10621-2014 高速铁路设计规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.
National Railway Administration. TB10641-2014 code for design of high-speed railway [S]. Beijing: China Railway Press, 2015.
- [25] 高攸刚. 感性耦合与阻性耦合[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1979.
GAO Y G. Inductive Coupling and Resistive Coupling[M]. Beijing: Posts and Telecom Press, 1979.
- [26] NIU B, SONG Z, GENG Y, et al. Electromagnetic topology analysis on relation between electromagnetic interference inside equipment and external electrostatic discharge[C]. Proceeding of Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEC) and 19th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), New York: IEEE, 2008: 815-818.
- [27] 衣斌, 王泽忠. 屏蔽电缆参数计算及屏蔽层与芯线间的串扰[J]. 高电压技术, 2008(4): 804-808.
YI B, WANG Z ZH. Parameters calculation of shield cable and crosstalk between shielding layer and core wires[J]. High Voltage Engineering, 2008(4): 804-808.

作者简介



杨阳, 2011 年于陕西科技大学获得学士学位, 2014 年于西北工业大学获得硕士学位, 现于西南交通大学攻读博士学位, 同时为四川建筑职业技术学院副教授, 主要研究方向为轨道交通领域的电磁环境测评、电磁兼容理论的分析与研究。

E-mail: 280899254@qq.com

Yang Yang received her B. Sc. degree in 2011 from Shaanxi University of Science and Technology, received the M. Sc. degree from Northwestern Polytechnical University in 2014. She is currently working toward the Ph. D. degree in electrical engineering at Southwest Jiaotong University, Chengdu, China. At the same time she is also an associate professor at Sichuan College of Architectural Technology. Her research interests include electromagnetic environment test and evaluation, electromagnetic compatibility analysis and design in the areas of rail transit.



朱峰 (通信作者), 1984 年于淮北师范大学获得学士学位, 1987 年于四川大学获得硕士学位, 1997 年于西南交通大学获得博士学位, 现为西南交通大学教授, 主要研究方向为电磁场的理论与研究、电磁兼容分析与设计。

E-mail: zhufeng@swjtu.cn

Zhu Feng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Huaibei Normal University in 1984, M. Sc. degree from Sichuan University in 1987, Ph. D. degree from the Southwest Jiaotong University, Sichuan in 1997. He is currently a full professor with the School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University. His current research interests include electromagnetic theory and numerical analysis of electromagnetic field and electromagnetic compatibility analysis and design.