

文章编号: 1009- 444X(2011) 02- 0125- 05

S-bond 型轨道电路传输特性分析

陆鑫源¹, 钱剑敏², 梁鉴如³

(1. 上海轨道交通维护保障中心通号分公司, 上海 200002; 2. 东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620;
3. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 上海城市轨道交通地铁 2 号线采用美国联合道岔与信号国际公司 (USSI) 提供的数字轨道电路 AF 904. 通过分解电气绝缘中的钢轨、信号环线、阻抗连接器 (S-bond) 各部分元素, 对轨道电路的传输特性进行了演算和分析. 分析表明, 阻抗连接器对于轨道电路具有较强的方向性. 根据传输特性, 提出了日常维护建议.

关键词: 音频轨道电路; S 型阻抗连接器 (S-bond); 钢轨波阻; 感生电流

中图分类号: U 284. 23 **文献标志码:** A

Analysis of Transmission Characteristics of S bond Track Circuit

LU Xir yuan¹, QIAN Jiar min², LIANG Jiar ru³

(1. Shanghai Rail Transit Maintenance Support Center, Telecom & Signaling Branch, Shanghai 200002, China;
2. College of Information Sciences and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China;
3. College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The digital track circuit AF904 supplied by USSI (America) is used in Shanghai Metro Line 2. Important components in the electrical insulation system such as electric insulating rail, signal loop and impedance connector (S-bond) were decomposed, then the calculation and analysis were conducted for track circuits transmission characteristics. The analysis shows that track circuit S-bond has a strong directionality. According to the transmission characteristics, proposals for daily maintenance are given.

Key words: AF track circuit; S-parameter impedance connector; wave impedance of rail; induced current

1 轨道电路组成

数字编码制式的音频轨道电路, 以线路的两根钢轨作为导体, 并用引接线连接信号电源和接收设备, 构成了电气回路. 整个回路由钢轨、阻抗连接器 (S-bond)、信号环线、送电设备及受电设备等主要

元件所组成, 如图 1 所示.

由图 1 可见, 接收与发送端的信号环线处于 S-bond 和钢轨的闭合回路中. 当信号环线 T_x 有电流变化时, 整个闭合回路中的磁通量发生变化, 使钢轨中产生轨道电流发送给接收端 R_x , 表明该区段处于未分路状态, 或使车载线圈感应到速度、距离等信息, 实施列车检测或发送机车信号.

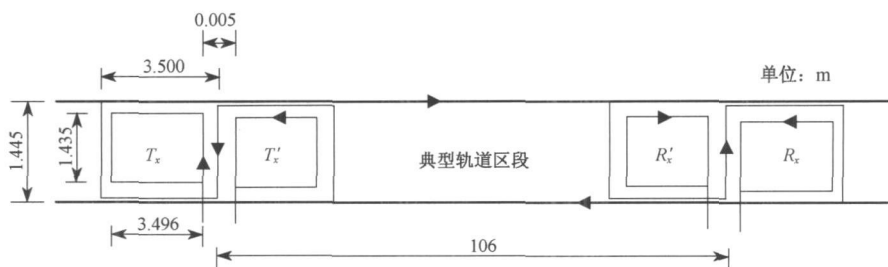


图 1 典型的轨道电路组成元件

Fig. 1 Components of typical track circuit

2 各部分元素定量分析

轨道电路室内发送板通过耦合单元连接信号环线 T_x ，闭合回路中环线 T_x 电磁周期性变化产生了感应电动势，通过钢轨波阻等因素形成轨道电流，接收端的 S-bond 和钢轨组成了矩形结构，流经的轨道电流对接收信号环线 R_x 也产生感应电流，环线 R_x 获得能量送回室内。

2.1 钢轨波阻

首先得出轨道区段的 4 个参量：钢轨有效电阻 R 、钢轨电感 L 、道渣电导 G 和道渣电容 C ，并得出该区段的波阻抗 Z_c 。当轨道频率为 10.5 kHz 时，碎石道床的道床导纳和漏容分别为

$$G = 1.0504 \times 10^{-3} \text{ s}$$

$$C = 5.443 \times 10^{-8} \text{ F}$$

$$\text{钢轨有效电阻 } R = 2(r + nr_c)$$

式中： r 为单轨条有效电阻， Ω/km ； r_c 为每个钢轨接头处的有效电阻， Ω ； n 为接头的数量。

$$r = \frac{2.91}{u} \sqrt{\mu \rho f}$$

式中： u 为钢轨横截面周长，近似为 0.67 m； ρ 为钢轨电阻率， $0.21 \times 10^{-6} \Omega/\text{m}$ ； μ 为钢轨磁导率，近似为 100 H/m； f 为信号频率。

轨道电路总电感 L 由钢轨内部电感 L_i ，外部电感 L_e 和钢轨接头处电感 L_c 组成。

$$L = L_e + 2(L_i + nL_c)$$

钢轨内部电感 L_i 为

$$L_i = \frac{268}{u} \sqrt{\frac{\mu \rho}{f}}$$

钢轨外部电感 L_e 为

$$L_e = 0.4 \ln \frac{d-a}{a}$$

式中： d 为钢轨中轴线间距，m； a 为等效钢轨横截

面周长的圆导线半径，m。

铜质焊接式接续线的 $r_c = 0.3 \times 10^{-3} \Omega$ ；

$$L_c = 1.27 \times 10^{-3} \text{ mH}$$

由表达式可知

$$\left. \begin{aligned} R &= 2 \left[\frac{2.91}{u} \sqrt{\mu \rho f} + nr_c \right] \\ L &= 0.4 \ln \frac{d-a}{a} + 2 \left[\frac{268}{u} \sqrt{\frac{\mu \rho}{f}} + nL_c \right] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

G1363 区段长度为 106 m，使用信号频率为 10.5 kHz，单轨条回流线为 3 根，将已知条件代入式(1)得到：

$$R = 0.4177 \Omega$$

$$L = 1.11522 \times 10^{-4} \text{ H}$$

最终得到该区段波阻抗的模值为

$$|Z_c| = 44.3766 \Omega$$

2.2 感生电流分析

根据法拉第定律可知，沿闭合钢轨产生的电动势 E_{rail} 与穿越这个闭合回路所包围的信号环线总磁通量的时间变化率有关：

$$E_{\text{rail}} = \frac{\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}}{dt}$$

只要得出信号环线的磁通量便可知道电动势 E_{rail} 和钢轨电流 I_{rail} 。

2.2.1 发送端信号环线 T_x

根据毕奥—萨伐尔定律，导线所产生的磁场可看成许多电流元产生的磁场的叠加，即

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu I e dl}{4\pi R^2}$$

式中： $\mathbf{B}$ 为真空点磁感应强度， Wb/m^2 ； μ 为真空磁导率， $4\pi \times 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$ ； I 为电流，A； l 为导线长度，m； R 为点源到场点的距离，m； e 为 R 方向的单位矢量。信号环线在空间任意一点的磁感应强度的计算再使用叠加原理，即考虑在空间中信号环线 4 条边（有一

定长度的带电导线) 的叠加效果, 从而可得到在垂直地面方向(Z) 上的磁感应强度的矢量和为

$$B_z = B_{1z} + B_{2z} + B_{3z} + B_{4z}$$

分别为环线 4 条边对空间点 P 产生的 Z 方向上的磁感应强度. 设环线为边长为 $2a$ 和 $2b$ 的矩形线圈, 载流为 I , 在其中心建立直角坐标系, P 为空间点坐标 (x, y) , 如图 2 所示.

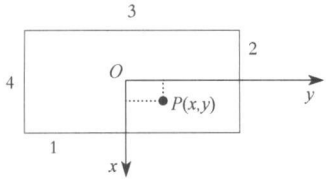


图 2 载流为 I 的信号环线磁感应
Fig. 2 Magnetic induction of I current carrying signal loop

$$B_z = B_{1z} + B_{2z} + B_{3z} + B_{4z} = \frac{1}{4\pi} \left\{ \frac{\mu_i}{b-x} \left[\frac{a+y}{\sqrt{(a+y)^2 + (b-x)^2}} + \frac{a-y}{\sqrt{(a-y)^2 + (b-x)^2}} \right] + \frac{\mu_i}{a-y} \left[\frac{b+x}{\sqrt{(a-y)^2 + (b+x)^2}} + \frac{b-x}{\sqrt{(a-y)^2 + (b-x)^2}} \right] + \right.$$

$$\left. \frac{\mu_i}{b+x} \left[\frac{a+y}{\sqrt{(a+y)^2 + (b+x)^2}} + \frac{a-y}{\sqrt{(a-y)^2 + (b+x)^2}} \right] + \frac{\mu_i}{a+y} \left[\frac{b+x}{\sqrt{(a+y)^2 + (b+x)^2}} + \frac{b-x}{\sqrt{(a+y)^2 + (b-x)^2}} \right] \right\}$$

2.2.2 信号环线总磁通量积分计算

$$\Phi = \oint B ds$$

在 x 处取宽为 dx , 在 y 处取长为 dy , 则磁通量为

$$\Phi = \int_{-b}^b \int_{-a}^a \frac{1}{4\pi} \times \left\{ \frac{\mu_i}{b-x} \left[\frac{a+y}{\sqrt{(a+y)^2 + (b-x)^2}} + \frac{a-y}{\sqrt{(a-y)^2 + (b-x)^2}} \right] + \frac{\mu_i}{a-y} \left[\frac{b+x}{\sqrt{(a-y)^2 + (b+x)^2}} + \frac{b-x}{\sqrt{(a-y)^2 + (b-x)^2}} \right] + \frac{\mu_i}{b+x} \left[\frac{a+y}{\sqrt{(a+y)^2 + (b+x)^2}} + \frac{a-y}{\sqrt{(a-y)^2 + (b+x)^2}} \right] + \frac{\mu_i}{a+y} \left[\frac{b+x}{\sqrt{(a+y)^2 + (b+x)^2}} + \frac{b-x}{\sqrt{(a+y)^2 + (b-x)^2}} \right] \right\} dx dy$$

实际 P 点坐标极限接近于环线, 积分上下限取近似值, 并且假设信号环线 I 为恒定电流, 电流为 2.42 A, 则

$$\Phi = \int_{-1.747\,999\,9}^{1.747\,999\,9} \int_{-0.722\,499\,9}^{0.722\,499\,9} \frac{1}{4} \frac{1}{\pi} \left\{ \frac{\mu_i}{b-x} \left[\frac{a+y}{\sqrt{a^2 + 2ay + y^2 + b^2 - 2bx + x^2}} + \frac{a-y}{\sqrt{a^2 - 2ay + y^2 + b^2 - 2bx + x^2}} \right] + \frac{\mu_i}{a-y} \left[\frac{b+x}{\sqrt{a^2 - 2ay + y^2 + b^2 + 2bx + x^2}} + \frac{b-x}{\sqrt{a^2 - 2ay + y^2 + b^2 - 2bx + x^2}} \right] + \frac{\mu_i}{b+x} \left[\frac{a+y}{\sqrt{a^2 + 2ay + y^2 + b^2 + 2bx + x^2}} + \frac{a-y}{\sqrt{a^2 - 2ay + y^2 + b^2 + 2bx + x^2}} \right] + \frac{\mu_i}{a+y} \left[\frac{b+x}{\sqrt{a^2 + 2ay + y^2 + b^2 + 2bx + x^2}} + \frac{b-x}{\sqrt{a^2 + 2ay + y^2 + b^2 - 2bx + x^2}} \right] \right\} dx dy \quad (2)$$

经计算得 $\Phi = 7.688 \times 10^{-5} \text{ Wb}$

由环线平面与磁通相互垂直, 即

$$E_{\text{rail}} = \frac{d\Phi}{dt}$$

经推导得

$$E_{\text{rail}} = \Phi \cdot \omega \cos \theta = \Phi \cdot 2\pi f = 5.069\,4 \text{ V}$$

即可得到钢轨电流

$$I_{\text{rail}} = \frac{E_{\text{rail}}}{Z_c} = 0.104\,562\,2 \text{ A}$$

2.3 接收端信号环线 R_x

接收端信号环线外围由 S-bond 三边和钢轨一边组成, 式 (2) 同样适用. 频率为 10.5 kHz 的区段, 波长 $\lambda = \frac{c}{f} = 28\,571 \text{ m}$, 远远大于闭合回路长度. 所以, 回路中的电流分布近似均匀, 即钢轨与 S-bond 中每一点电流都认为是相同的值 I_{rail} .

同样, 根据毕奥—萨伐尔定律的矢量叠加式, 接收端信号环线 R_x 磁通量的积分式为

$$\Phi = \int_{-1.745}^{1.745} \int_{-0.7222}^{0.7222} \left\{ \frac{9.499\,999\,999 \times 10^{-9} \left[\frac{1.75+y}{\sqrt{(1.75+y)^2 + (0.7235-x)^2}} + \frac{1.75-y}{\sqrt{(1.75-y)^2 + (0.7235-x)^2}} \right]}{0.7235-x} + \right. \\ \left. \frac{9.499\,999\,999 \times 10^{-9} \left[\frac{0.7235+x}{\sqrt{(1.75-y)^2 + (0.7235+x)^2}} + \frac{0.7235-x}{\sqrt{(1.75-y)^2 + (0.7235-x)^2}} \right]}{0.7235-y} + \right. \\ \left. \frac{9.499\,999\,999 \times 10^{-9} \left[\frac{1.75+y}{\sqrt{(1.75+y)^2 + (0.7235+x)^2}} + \frac{1.75-y}{\sqrt{(1.75-y)^2 + (0.7235+x)^2}} \right]}{0.7235+x} + \right. \\ \left. \frac{9.499\,999\,999 \times 10^{-9} \left[\frac{0.7235+x}{\sqrt{(1.75+y)^2 + (0.7235+x)^2}} + \frac{0.7235-x}{\sqrt{(1.75+y)^2 + (0.7235-x)^2}} \right]}{1.75+y} \right\} dx dy$$

得 $\Phi = 1.165\,4 \times 10^{-6} \text{ Wb}$

接收端电动势

$$E_{\text{rail}} = \Phi \cdot 2\pi f = 0.076\,84 \text{ V}.$$

2.4 相邻环线 R_x' 的电磁感应

根据楞次定律和右手螺旋法则, 在图 1 中, 设在 $\left[0, \frac{T}{4}\right]$ 周期内, 发送端环线电流沿箭头方向增大, 其他各箭头则是该周期内感生电流方向. 由图 3 可以看出相邻区段环线 R_x' 两条长边都没有磁通产生: 长边 1 为外钢轨没有电流通过; 长边 3 为 S-bond 与钢轨电流反向近似抵消; 只有宽边 2 和 4 对磁通有贡献.

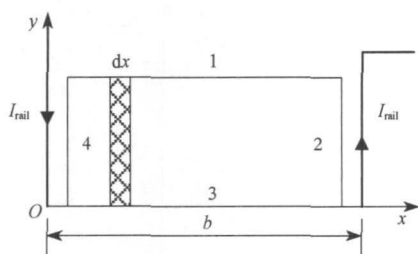


图 3 信号环线的感应磁通

Fig. 3 Signaling loop induction magnetic flux

建立直角坐标系, 使 x 轴与环线长边重合, 使 y 轴与 S-bond 线重合. 环线磁场由两个反向平行的 S-bond 电缆上的电流产生, 并且磁场轴对称, 利用安培环路定律可求得在 x 处磁场分别为

$$B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}, \quad B_4 = \frac{\mu_0 I}{2\pi(b-x)}$$

利用叠加原理得

$$B = B_2 + B_4$$

然后在 x 处取长为 dx , 宽为 1.445 m 的矩形平面, 通过积分得出总磁通量为

$$\Phi = \int_{0.002}^{0.496} 1.445 \left[\frac{\mu_0 I}{2\pi x} + \frac{\mu_0 I}{2\pi(b-x)} \right] dx$$

相邻环线 R_x' 的磁通和感应电动势分别为

$$\Phi = 3.909\,5 \times 10^{-7} \text{ Wb}$$

$$E = \Phi \omega \cos \theta = \Phi \cdot 2\pi f = 0.025\,77 \text{ V}$$

2.5 相邻环线 T_x' 的电磁感应

在发送端相邻环线 T_x' 受到两个场强影响, 一个来自 S-bond, 标量同环线 R_x' ; 另一个来自发送信号环线 T_x 宽边. 由电流方向可知两个场强反向. 同样, 利用安培环路定律得出环线 T_x 宽边在 x 处磁场为 $B_{cl} = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$. 在 x 处取长为 dx , 宽为 1.445 m 的矩形平面通过积分得出总磁通量为

$$\Phi = \int_{0.005}^{0.496} \frac{\mu_0 I \times 1.445}{2\pi x} dx$$

$$\Phi_0 = 1.798 \times 10^{-6} \text{ Wb}$$

$$E_{cl} = \Phi_0 \omega \cos \theta = \Phi_0 \cdot 2\pi f = 0.106\,3 \text{ V}$$

S-bond 产生的磁通量与接收端侧环线 R_x' 相同,

$$\Phi_{\text{S-bond}} = 3.909\,5 \times 10^{-7} \text{ Wb},$$

$$E_{\text{S-bond}} = \Phi_{\text{S-bond}} \omega \cos \theta =$$

$$\Phi_{\text{S-bond}} \cdot 2\pi f = 0.025\,77 \text{ V}$$

令图中环线 T_x' 箭头方向为正方向, 相邻环线 T_x' 的电磁感应电动势为 $E = E_{cl} - E_{\text{S-bond}} = 0.092\,779 \text{ V}$.

2.6 S-bond 长度与磁通

由于钢轨间距固定, 即 S-bond 的宽度同样固定. 图 4 为 S-bond 长度(信号环线面积)与磁通量的关系. 图中: 从上到下依次为发送端相邻环线 T_x' 收到磁通; 中间线段为本区段 R_x 接收磁通; 底部线段为接收端相邻环线 R_x' 收到磁通; 竖直的虚线为 S-bond 的实际长度 3.5 m .

一个接收环线的平面同时受到两个磁通作用: 一个是本区段钢轨电流产生的正常磁通, 另一个是

相邻区段发送环线产生的相邻磁通. 图 4 可见, 加大 S-bond 长度可增加接收端工作磁通, 但相邻磁通增长率更大. 通常工作磁通小于相邻磁通, 当耦合单元谐振不佳时, 本区段各参数会受到相邻区段严重影响.

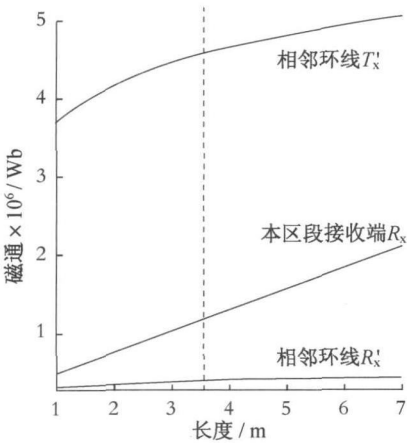


图 4 不同 S bond 长度情况下各磁通的比较
Fig.4 Comparison of magnetic fluxes with different S bond lengths

3 结 语

音频轨道电路的电气绝缘 S-bond 具有方向性. 接收端 S-bond 包围信号环线的前后比为 $\frac{E}{B} = 20 \lg \frac{\text{前区最大场值}}{\text{后区最大场值}} = 20 \lg \frac{\Phi R_x}{\Phi R_x'} = 9.435 \text{ dB}$ 时, 对于相邻轨道产生的磁场抑制能力一般. 在现场维

护中, 如果轨道电路受到相邻区段干扰, 绝大部分干扰源是来自相邻信号环线. 所以, 可适当降低相邻区段发送电平, 或使 S-bond 中心两根信号环线保持一定距离. 根据接收端信号环线获得能量的情况, 接收端阻抗匹配度和品质因素大小对这个区段的 AF904 CPU 板内显示参数有很大影响, 在调谐耦合单元时, 必须首先调整电路的接收端.

参考文献:

[1] 林昌禄. 天线工程手册 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.
[2] 王增和, 卢春兰, 钱祖平, 等. 天线与电波传播 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
[3] 秦曾煌. 电工学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
[4] 汤毓骏. 大学物理新编 [M]. 上海: 中国纺织大学出版社, 2001.
[5] 杨奎芳, 李德垂, 马际华. 混凝土枕轨道电路参数与信号频率关系的研究 [J]. 铁道学报, 1993, 15 (1): 45- 55.
[6] 王云庆, 吴严. 浅谈非均匀磁场对平面载流线圈的作用 [J]. 大学物理, 1987 (3): 3- 5.
[7] 张焕明. 各向异性磁介质中载流矩形线圈空间磁场 [J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 1996, 17 (4): 415- 419.
[8] 冯玮, 涂伟霞. 由浅入深学 Maple [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
[9] 邹雷滨, 李晓月, 王厉珩. 数字编码制式无绝缘轨道电路调谐单元探析 [J]. 城市轨道交通研究, 2006, 9 (5): 43- 45.