

# Review of Electromagnetic Environment in High-Speed Electrified Railways

Taobin Jin<sup>1</sup>, Zhengwen Liu<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Huhehot Metro Rail Transit Construction Management Co., Ltd., Huhehot Inner Mongolia

<sup>2</sup>School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing

Email: liuzw@bipt.edu.cn

Received: Dec. 5<sup>th</sup>, 2018; accepted: Dec. 20<sup>th</sup>, 2018; published: Dec. 28<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

High-speed electrified railways have a great development in China, and it poses great negative effect on electromagnetic environment along electrified railways including low frequency interference and high frequency interference. In order to research the effect of low frequency interference, current distributions of autotransformer (AT) power supply type are accurately calculated, which is adopted in high-speed electrified railways. Inductance coupling and capacitance coupling are extremely small because of AT type having many wonderful features, and resistance coupling is needed to be calculated only when short-circuit fault happens. In order to research the effect of high frequency interference, the electric sparks and the passive scattering interference are analyzed thoroughly in this paper. The switch electric sparks model is in detail analyzed to be used to present approximately the electric sparks. The electric sparks are very complicated, and the precise description still remains to be further studied in a numerically exact way. The general analytical methods are given to calculate the passive scattering interference which is attributable to the architectures of high-speed electrified railways. These conclusions obtained in this paper about low frequency interference and high frequency interference can supply a foundation for further researches of electromagnetic environment along high-speed electrified railways.

## Keywords

High-Speed Electrified Railways, Electromagnetic Environment,  
The Electric Sparks between Arc and Contact Line, The Passive Scattering Interference

---

# 高速电气化铁路电磁环境问题

金涛斌<sup>1</sup>, 刘正文<sup>2</sup>

<sup>1</sup>呼和浩特市城市轨道交通建设管理有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特

<sup>2</sup>北京石油化工学院机械工程学院, 北京

Email: liuzw@bipt.edu.cn

文章引用: 金涛斌, 刘正文. 高速电气化铁路电磁环境问题[J]. 电气工程, 2018, 6(4): 371-379.

DOI: 10.12677/jee.2018.64044

## 摘要

高速电气化铁路在我国发展迅速, 给沿线的电磁环境带来很大负面影响, 这种影响包括低频干扰和高频干扰。为研究低频干扰的影响, 精确计算了高速铁路所采用的自耦变压器(AT)供电方式的电流分布。在分析AT方式工作特性的基础上, 通过计算可知, 感性耦合和容性耦合极小, 而阻性耦合也仅在发生短路故障时需要考虑。为研究高频干扰的影响, 深入分析了弓网电火花和无源散射干扰, 并详细论述了弓网电火花的开关模型和该模型存在的不足, 为进一步给出其精确的数学描述提供一定指导。对高速铁路的无源散射, 给出了一般的分析思路和处理方法。文中给出的关于低频干扰和高频干扰的这些结论, 能为高速铁路电磁环境问题的进一步深入研究, 打下一定基础。

## 关键词

高速电气化铁路, 电磁环境, 弓网电火花, 无源散射干扰

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近些年来, 我国高速电气化铁路(以下简称高速铁路)发展十分迅速, 到 2011 年, 我国投入运营的高速铁路达到 7431 km。我国高速铁路采用 50 Hz、27.5 kV 的工频单相交流制式, 供电方式为自耦变压器(AT)方式。这种高电压、大电流(高速动车正常工作时一般为 1200 A, 短路时高达 12,000 A), 以及列车高速运行时的弓网电火花等, 都会给高速铁路沿线的电磁环境带来很大的负面影响。

查询国内外文献, 关于高速铁路电磁环境的研究以我国居多。其主要原因是:

- 1) 我国人口密度在世界上属于高位, 各种用电设施和高速铁路接近的情况更加严重;
- 2) 近些年来, 我国经济发展迅速, 给高速铁路的设计和建设和提出了更高的要求。

高速铁路的主要干扰源是牵引设备和弓网电火花。高速铁路的高架桥、高速运行的列车车体也会对无线电信号产生遮挡、反射, 这会对各种无线电信号的传播产生不利影响。

本文基于前人的研究基础, 旨在对高速铁路电磁环境问题做一概述。本文按照频率高低, 将高速铁路对周围环境的电磁干扰分为低频干扰和高频干扰, 低频干扰的频率范围是在 1 KHz 以下, 高频干扰的频率范围是 10 KHz 以上, 各种干扰如图 1 所示。低频干扰分为感性耦合、容性耦合、阻性耦合和谐波干扰。高频干扰主要有弓网电火花和无源散射。

## 2. 高速铁路的供电方式

### 2.1. 电气化铁路供电方式

电气化铁路的牵引动力均是采用受电弓从接触网获取电流, 牵引供电系统采用工频单相交流制式, 采用的供电方式一般有: 直供(DF)方式、带回流线的直供(DN)方式、自耦变压器(AT)方式、吸流变压器一回流线(BT)方式。它们的吸流效果和入地电流如表 1 所示[1] [2] [3] [4] [5]。

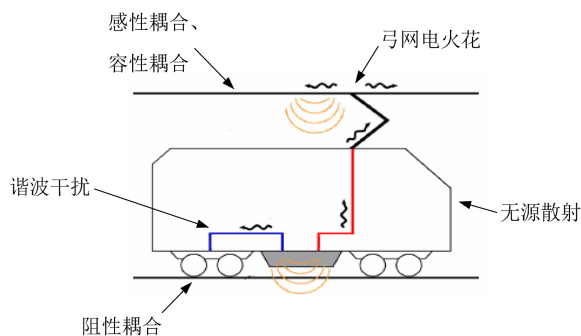


Figure 1. Interferences of high-speed electrified railways

图 1. 高速铁路的各种干扰

Table 1. System resulting data of standard experiment

表 1. 各种供电方式的吸流效果和入地电流

供电方式	吸流效果/%	入地电流/%
DF (单线)	50	50
DF (双线)	65	35
DN (单线)	60~70	40~30
DN (双线)	75~85	25~15
AT	90~95	10~5
BT	96~97	4~3

由表 1 可知, 入地电流最小的是 BT 方式, 为 3%~4%, 而 AT 方式的入地电流为 5%~10%。但是高速铁路采用了 AT 供电方式, 这是因为 BT 方式与 AT 方式相比, 存在较多的缺点: 牵引网阻抗增大 50%、牵引网电压损失增大 51%、牵引网电能损失增大。除此之外, BT 方式还存在一个致命的缺点, 根本限制了其在高速铁路中的应用: BT 的一次线圈接在接触网导线上, 故电力机车高速运行时, 更容易产生弓网电火花, 从而烧损受电弓滑板, 并形成更强的高频辐射干扰。

## 2.2. AT 供电方式

AT 供电方式, 发展于上世纪 70 年代, 因其能有效减轻牵引网对通信线路的干扰, 又能适应高速、重载的优点, 在我国高速铁路的建设中均推荐采用这种供电方式。

如图 2 所示, T 为接触网、R 为钢轨、F 为正馈线, AT 为自耦变压器。AT 方式由接触网、钢轨、正馈线和 AT 组成供电回路, 每隔 10 km 左右在接触网与正馈线之间并联接入 1 台自耦变压器, 绕组的中点与钢轨相连接。

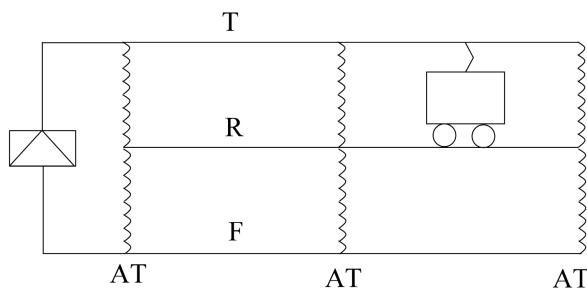


Figure 2. AT power supply type

图 2. AT 方式

### 2.3. AT 网络电流分布

假设 R 对地漏导为 0, 忽略 AT 漏抗, 并考虑到 AT 漏抗和 R 对地漏导对牵引网电气计算的影响在一定程度上能相互抵消, 故该假设条件不会对最终计算结果带来明显误差。这里仅以无保护线情况下的单线 AT 网络电流分布进行说明(图 3), 有保护线和双线等情况, 依然可以得到相同的结论, 详细的理论分析和其它情况的电流分布可以参见文献[1] [2] [3]。考虑接触网导线 T 与 F 导线截面相等, 且悬挂位置对称, 此时有,

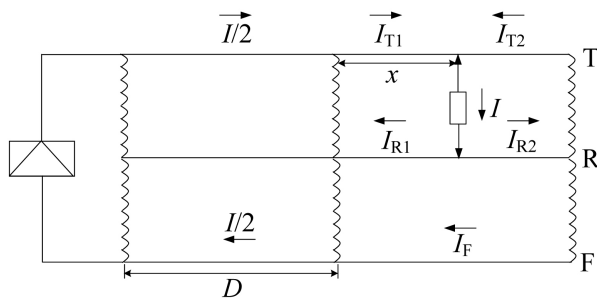


Figure 3. Current distributions of AT type  
图 3. AT 方式的电流分布

$$I_{T1} = \left(1 - \frac{x}{2D}\right) \cdot I \tag{1}$$

$$I_{T2} = \frac{x}{2D} \cdot I \tag{2}$$

$$I_F = \frac{x}{2D} \cdot I \tag{3}$$

$$I_{R1} = \left(1 - \frac{x}{D}\right) \cdot I \tag{4}$$

$$I_{R2} = \frac{x}{D} \cdot I \tag{5}$$

电力机车在 AT 段内运行时, 网络内电流分布与机车居于 AT 段中的位置系数  $x/D$  呈线性关系。例如, 当机车居于 AT 段的中点处, 即  $x/D = 1/2$ , 此时有,

$$I_{T1} = \frac{3}{4} I \tag{6}$$

$$I_{T2} = \frac{1}{4} I \tag{7}$$

$$I_F = \frac{1}{4} I \tag{8}$$

$$I_{R1} = \frac{1}{2} I \tag{9}$$

$$I_{R2} = \frac{1}{2} I \tag{10}$$

分析式(1)~式(5)可知, AT 方式的优点为: 供电电压提高一倍; T、F 的电流减少为 1/2; AT 能传输

大于自身容量一倍的功率; 提高牵引网供电能力, 大大减少电压损失和电能损失; 牵引变电所间隔增大, 节省资源; 提高牵引网供电能力, 大大减少电压损失和电能损失; 适合高速、重载铁路。AT 的缺点为: 结构比较复杂、工程投资大、相应的运行维修较复杂。

理想情况下, AT 方式中, 在机车运行的 AT 段之外, 钢轨电流为 0, 接触网导线和正馈线电流均为机车工作电流的一半, 且方向相反。在机车运行的 AT 段之内, 考虑图 4 中的情况可知,

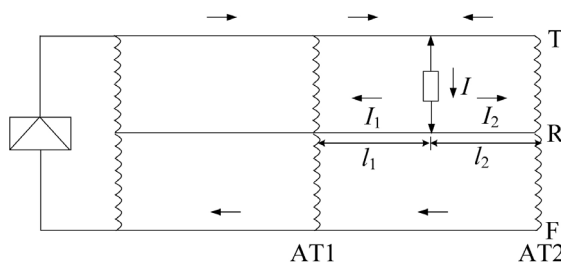


Figure 4. Interference analysis of AT type

图 4. AT 方式的干扰分析

$$I_1 = \frac{l_2}{l_1 + l_2} \cdot I \quad (11)$$

$$I_2 = \frac{l_1}{l_1 + l_2} \cdot I \quad (12)$$

由于电磁感应影响同电流与通信线平行长度的乘积成正比, 而

$$I_1 \cdot l_1 = \frac{l_2 l_1}{l_1 + l_2} \cdot I \quad (13)$$

$$I_2 \cdot l_2 = \frac{l_1 l_2}{l_1 + l_2} \cdot I \quad (14)$$

即  $I_1 \cdot l_1 = I_2 \cdot l_2$ , 所以在  $l_1$  和  $l_2$  两个长度内的电磁感应影响, 大小相等, 且方向相反。

经过上述分析可知, AT 方式具有优异的防干扰效果, 对邻近通信线路的干扰很小。

实际上, 由于 AT 存在着很小的阻抗, 这样在全供电臂内将有部分牵引电流流经轨道、大地返回牵引变电所。在全供电臂内都有电流沿着各个支路, 包括轨道、大地流行, 并进入所有的 AT。因此, AT 的实际防干扰效果并非与理想情况时一样。只是流经轨道、大地返回牵引变电所的电流极小, 对邻近通信线路的干扰也极小。

AT 方式在电磁影响方面表现十分优越, 其主要原因是: 正馈线的回流能抵消大部分接触网电流产生的磁影响; 正馈线电位与接触网电位大小接近, 极性相反, 从而减小了电影响。AT 方式的钢轨电流, 特别是由钢轨漏泄入地的漏泄电流大幅度减小, 且供电回路的对称性较好, 对周围环境的电磁影响大幅度减小。

### 3. 低频干扰

对于低频干扰的研究, 无论从理论认识上, 还是计算方法上, 都已经比较成熟。例如经常采用的一些方法, 镜像法、Carson 公式法等。

#### 3.1. 感性耦合

感性耦合是由接触网中交流电流的交变磁场的电磁感应引起的, 属于磁场影响, 也叫电磁感应影响。

如上所述, 高速铁路采用了 AT 方式进行供电, 由于 AT 网络电流分布的特征, 使得感性耦合极小[6] [7]。

### 3.2. 容性耦合

容性耦合是由接触网高压电场的静电感应引起的, 属于电场影响, 也叫静电感应影响。AT 方式每隔 10 km 左右在 T 与 F 之间并联接入 1 台 AT, 绕组的中点与 R 相连接。AT 两端分别与 T 和 F 并联, 其一、二次绕组匝数比为 2:1, AT 能将牵引网的供电电压提高一倍, 而供电电力机车的电压仍然为 27.5 kV。由于 R 接地, 所以 T 与 R 之间的电压、F 与 R 之间的电压, 大小相等, 极性相反。再考虑到 T 与 F 截面相等, 且悬挂位置对称, 可知 AT 方式的容性耦合极小[8] [9]。

### 3.3. 阻性耦合

阻性耦合是由流入大地的杂散电流, 致使入地点附近产生地电位升, 从而导致接地装置电位升高, 也叫杂散电流影响。由于高速铁路采用 AT 方式供电, 当接触网正常工作时, 漏泄入地的电流很小, 所产生的地电位升较小, 可以忽略不计。而当接触网发生短路故障时, 在短路点附近会引起较大的地电位升。

这里仅给出地电位升的一般计算公式, 其它可参见文献[10] [11] [12]。如图 5 所示, T 为接触网, R 为钢轨, N 为接触网故障点。设 M 点为接地装置, T 在 N 点发生短路故障, 这时 M 点相对于无限远处(零电位)出现了一个地电位升。工程上经常用来计算地电位升的公式为, 当  $u = 0$ , 且  $|v| \ll 1$  时,

$$u_M \approx \frac{\rho \gamma_p I_d \lambda}{2\pi} [v + 0.116 - \ln v] \quad (15)$$

其中,  $u = \gamma_p x$ ,  $v = \gamma_p y$ ,  $\rho$  是大地电阻率( $\Omega \cdot m$ );  $\gamma_p$  是“钢轨 - 大地”回路的传播常数(1/m);  $I_d$  是接触网短路电流(A);  $\lambda$  是钢轨屏蔽系数;  $x$  是 M 点正对轨道点到 N 点的距离(m);  $y$  是 M 点到轨道的最近距离(m)。

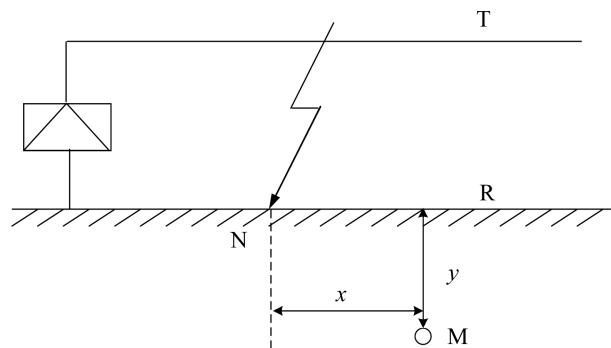


Figure 5. Resistance coupling  
图 5. 阻性耦合

### 3.4. 谐波干扰

电力机车上的整流电机, 在将交流转换成直流的过程中, 会出现大量的高次谐波, 从而对沿线的通信线造成噪声干扰。理论上, 产生的特征谐波电流为奇次谐波, 且各次谐波分量应该随着谐波次数的增高而减小, 但由于“牵引变电所、接触网、电力机车”组成了一个具有固有谐振频率的回路, 使奇次谐波主要分布在 13~27 次内, 即 650 Hz~1.35 kHz。工程上, 通常以 800 Hz 电流为基准, 进行等效计算[2]。

对于高速铁路的谐波干扰, 由于我国已经成功研制了“交 - 直 - 交”电力机车, 能使牵引电流波形接近于正弦波, 谐波电流含量极少, 因此等效杂音干扰极小。

## 4. 高频干扰

高速铁路的高频干扰, 主要有弓网电火花干扰和无源散射干扰。

### 4.1. 弓网电火花

弓网电火花是一种气体放电现象, 由于受电弓与接触网导线在相对高速滑动中的分离而产生, 具有很宽的频谱。干扰脉冲一旦产生, 会沿着接触网导线纵向传播, 并在纵向传播的过程中, 又向横向辐射。弓网电火花已经成为制约我国高速铁路发展的技术瓶颈, 其危害主要表现在: 对接触网导线和受电弓滑板的侵蚀; 产生过电压, 损坏电力机车内的电力电子设备; 产生高频噪声; 使供电质量下降[13]-[19]。

弓网电火花的研究涉及到气流场、热场、等离子体、电磁场等多个学科领域, 问题本身非常复杂。文献[13]对高速铁路弓网电火花研究进行了概述, 论述了弓网电火花对接触网导线、受电弓滑板、无线电信号、通讯信号和供电质量等的危害, 从弓网电火花产生的机理和特征、电火花模型、电火花侵蚀、电火花能量等方面概述了相关弓网电火花的国内外研究现状。虽然国内外研究人员对弓网电火花进行了各种模型的近似, 但总体来说, 截止到现在, 对弓网电火花的产生机理以及传播特性还没有精确的数学描述, 在实际工程中, 只能通过实测来获得其相关特性。文献[13]利用如图6所示的开关电火花模型, 对弓网电火花进行解释, 能在一定程度上解释弓网电火花的产生和熄灭过程。

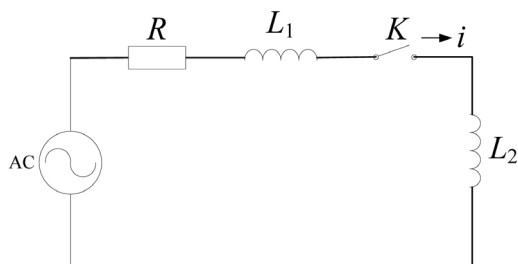


Figure 6. Equivalent circuit model of traction power supply system  
图6. 牵引供电结构等效电路图

$R$  是牵引回路总电阻( $\Omega$ );  $L_1$  是地面牵引变压器的等效电感、接触网导线电感、钢轨电感之和( $H$ );  $L_2$  是车载牵引变压器的等效电感( $H$ ); 用开关  $K$  的断开, 来等效弓网分离的状态。当回路有电流  $i$  时, 断开开关  $K$ , 则电流将由  $i$  变为 0。如果变化过程时间  $t \rightarrow 0$ , 那么开关电压将趋于无穷大:

$$(L_1 + L_2) \frac{di}{dt} \rightarrow \infty \quad (16)$$

这一电压足以击穿开关  $K$  之间的气隙, 从而产生电火花。当然在实际条件的制约下, 开关电压不会是无穷大, 但其值仍然很大, 足以击穿开关  $K$  之间的气隙, 产生电火花。弓网电火花一旦产生, 随着受电弓的滑动: 当电火花被拉长, 而电源电压又不足以维持电火花的拉长, 那么电火花就会熄灭; 如果在受电弓滑动过程中, 重新与接触网导线接触, 那么电火花也会熄灭。

虽然开关模型, 能在一定程度上解释弓网电火花的出现和熄灭过程, 但在高速列车运行过程中, 弓网间电火花还受到弓网相对高速滑移、空气吹力、及特殊天气环境等不肯定因素的影响, 因而高速铁路弓网电火花具有其自身的特殊性。弓网电火花的产生和熄灭机理、影响因素、时空分布规律、传输特性, 尤其是危害的抑制和消除方法, 还有待于进一步的深入研究。

### 4.2. 无源散射

无源散射是由于高速铁路的高架桥、高速运行的列车车体等的存在, 对无线电信号会产生遮挡、反



射。对高速铁路的无源散射干扰, 目前在国内外还没有见到相关的研究报道。

下面仅以车体散射为例, 给出一般的计算思路和处理过程。高速列车的外表一般都是金属, 假设有一个电磁波  $E^i$ 、 $H^i$ , 照射到一个边界为  $S$  的金属体上。在边界上应用等效原理, 并考虑到金属体表面的切向电场为 0, 则散射场能用边界上的等效电流源  $J = n \times H$ , 在均匀介质(空气)中产生的场来表示, 其中  $n$  是边界  $S$  的法向矢量。由此可知, 散射场为:  $E^S = ZL(J)$ ,  $H^S = K(J)$ , 其中  $L(X)$ 、 $K(X)$  是两个积分微分算子, 总场为:  $E = E^i + ZL(J)$ ,  $H = H^i + K(J)$ 。从而可得, 电场积分方程为  $[E^i + ZL(J)]|_t = 0$ , 磁场积分方程为  $J - n \times K(J) = n \times H^i$ 。利用矩量法去求解电场积分方程或磁场积分方程, 可得金属体表面上的等效电流源  $J$ , 进而算得散射场  $E^S$ 、 $H^S$ 。

当然, 在实际工程计算中, 需要考虑的因素较多, 但基本分析过程可以大致概括如上所述。

## 5. 高速铁路电磁环境的相关标准

高速铁路的电磁环境影响评价, 主要包括: 低频电磁场和高频电磁场对人体健康的潜在影响; 牵引供电设备对各种敏感设备的影响; 列车运行时产生的弓网电火花对各种敏感设备的影响; 铁路高架桥、列车车体的散射对通信质量的影响[20] [21] [22] [23] [24]。

### 5.1. 低频电磁场和高频电磁场的生物效应

高速铁路的高电压、大电流, 导致在接触网和变电所周围有很强的低频电磁场, 会对长期工作、生活在其中的人, 产生不利的健康影响。医学已经证实: 极低频(0.1~300 Hz)电磁场, 其生物学效应和健康效应, 尤其是与肿瘤等的发病率存在一定的关系[25]。

高速铁路周边会有较强的高频辐射, 主要是弓网电火花产生的高频电磁场, 会对铁路沿线的电磁环境产生很大的影响。大量实验证明: 人如果长期工作、生活在高频电磁场的环境下, 会引起神经功能紊乱和神经衰弱, 且伴有明显的临床症状[26]。

### 5.2. 有关环境噪声和电磁辐射的标准

针对环境噪声和电磁辐射, 我国制定了相关的标准。对各种条件下的环境噪声和电磁辐射的安全允许值、监测仪器、测量方法等, 都做了较为详细的明确规定。例如《电磁辐射防护规定》(GB8702-88)和《对空情报雷达站电磁环境防护要求》(GB13618-92)等。具体工程中, 可参见相关标准, 以获取相关数据。

在这里需要特别指出的是, 有专家对这些标准本身提出了异议。例如有的专家认为, 我国现行的有关防护标准, 脱离国际主流标准, 暴露限值过于严苛, 导致公众不必要的恐惧, 同时又增加了无谓的防护投入。在实际的工程中, 不应该生搬硬套国家推荐标准中的最小距离, 应当具体情况具体分析。

## 6. 结论

高速电气化铁路电磁环境本身非常复杂, 涉及的学科领域较多, 而兼顾低频干扰和高频干扰的研究更易于揭示高速铁路电磁环境的复杂性。

1) 对低频干扰, 由于高速铁路采用 AT 方式供电和新型的“交-直-交”电力机车, 使得感性耦合、容性耦合和谐波干扰极小; 而阻性耦合也仅在发生短路故障情况下, 才需要考虑。

2) 对高频干扰, 弓网电火花已经成为制约我国高速铁路发展的技术瓶颈。叙述了弓网电火花的研究现状, 弓网电火花的危害和开关模型, 为深入开展弓网电火花的研究打下一定基础。

3) 对高频干扰, 无源散射, 目前在国内外还没有见到相关的研究报道。对此文中给出了一般的分析思路和处理方法, 为下一步的深入研究打下一定基础。



当然, 高速铁路电磁环境的深入研究, 需要综合多个学科和多个部门。因此, 应该从系统工程的角度出发, 进行多方面、全方位的考虑, 只有这样才能使高速铁路得到健康发展。

## 参考文献

- [1] 马其祥. 强电路的电磁影响与防护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1989.
- [2] 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, 2007.
- [3] 王洪帅, 徐青山, 袁宇波. 电气化铁路 AT 牵引供电方式电流分布的理论计算及仿真[J]. 江苏电机工程, 2011, 30(4): 34-38.
- [4] Machczynski, W. (1982) Currents and Potentials in Earth-Return Circuits Exposed to Alternating Current Electric Railways. *IEE Proceedings B Electric Power Applications*, **129**, 279-288. <https://doi.org/10.1049/ip-b.1982.0040>
- [5] Mariscotti, A. (2003) Distribution of the Traction Return Current in AC and DC Electric Railway Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **18**, 1422-1432. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.817786>
- [6] Gao, Y.G. and Li, L. (2000) An Analysis of Magnetic Field Environment near High-Voltage Power Lines and Contact Wires of Electric Railways. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, **7**, 78-81.
- [7] 马双武, 高攸纲. 强电线交叉跨越时对通信线的磁耦合[J]. 北京邮电大学学报, 2000, 23(1): 21-25.
- [8] Mariscotti, A. and Pozzobon, P. (2000) Measurement of the Resistance and Internal Inductance of Traction Rails at 50 Hz. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **49**, 294-299. <https://doi.org/10.1109/19.843067>
- [9] 王邠, 王泉啸. 高速铁路牵引网感应电压的研究[J]. 铁道工程学报, 2011, 150(3): 77-80.
- [10] Nedelchev, N. (1997) Influence of Earth Connection on the Operation of Railway Track Circuits. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **14**, 215-219.
- [11] Menter, F.E. and Grcev, L.D. (1994) EMTP-Based Model for Grounding System Analysis. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **9**, 1838-1849. <https://doi.org/10.1109/61.329517>
- [12] Mellitt, B., Allan, J., Shao, Z.Y., et al. (1990) Computer-Based Methods for Induced-Voltage Calculations in AC Railways. *IEE Proceedings B (Electric Power Applications)*, **137**, 59-72. <https://doi.org/10.1049/ip-b.1990.0006>
- [13] 高宗宝, 吴广宁, 吕玮, 等. 高速电气化铁路中的弓网电弧现象研究综述[J]. 高压电器, 2009, 45(3): 104-108.
- [14] Cozza, A. and Demoulin, B. (2008) On the Modeling of Electric Railway Lines for the Assessment of Infrastructure Impact in Radiated Emission Tests of Rolling Stock. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **50**, 566-576. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2008.924387>
- [15] Ala, G. and Silvestre, M.L.D. (2002) A Simulation Model for Electromagnetic Transients in Lightning Protection Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **44**, 539-554. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2002.804773>
- [16] Grcev, L.D. and Dawalibi, F. (1990) An Electromagnetic Model for Transients in Grounding Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **5**, 1773-1781. <https://doi.org/10.1109/61.103673>
- [17] Kubo, S. and Kato, K. (1999) Effect of Arc Discharge on the Wear Rate and Wear Mode Transition of a Copper-Impregnated Metalized Carbon Contact Strip Sliding Against a Copper Disk. *Tribology International*, **32**, 367-378. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(99\)00062-6](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(99)00062-6)
- [18] 陈嵩, 沙斐, 王国栋. 电气化铁道脉冲电磁骚扰的 Simulink 模型[J]. 铁道学报, 2009, 31(1): 55-58.
- [19] 刘国福. 对我国发展高速电气化铁路接触网的思考和探讨[J]. 铁道工程学报, 2003, 77(1): 122-125.
- [20] 朱绍忠, 朱连标, 王起恩, 等. 电气化铁路工频电磁场对作业工人健康的影响[J]. 环境与职业医学, 2002, 19(2): 97-99.
- [21] 贺峰, 彭世蕤. 电气化铁路电磁干扰对情报雷达的影响分析[J]. 现代雷达, 2005, 27(1): 12-15.
- [22] 王邠. 交流电气化铁道通信电磁防护的研究[J]. 铁道工程学报, 2007, 102(3): 199-202.
- [23] 杨斌, 李明茂. 适用于高速电气化铁路的铜合金接触线[J]. 铁道机车车辆, 2005, 25(1): 68-70.
- [24] 尹坚. 电气化铁路及城市轨道交通建设项目电磁环境影响评价标准探讨[J]. 铁道标准设计, 2011(8): 101-104.
- [25] 包家立. 极低频电磁场的健康效应[J]. 高电压技术, 2015, 41(8):2550-2561.
- [26] 李刚, 杨英超, 林凌, 等. 电磁场的生物效应的研究现状与展望[J]. 生命科学仪器, 2008, 6(3): 3-7.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2333-5394，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[jee@hanspub.org](mailto:jee@hanspub.org)