

电力机车弓网离线电弧电磁辐射特性分析

何成功 邓联文 贺君

(中南大学物理与电子学院 长沙 410083)

摘要: 在电气化铁路系统中,由电力机车顶部受电弓与供电牵引网之间不正常接触产生的离线电弧成为电力机车电磁干扰的主要来源。对电力牵引系统中电力机车弓网离线电弧高频电磁辐射的产生机理进行了探讨,分析了常压下气体放电物理过程,基于流注理论,将交流电弧的近阴极效应产生的电子堆振荡作为弓网离线电弧的辐射源,并将电子堆振荡等效为对称振子,借助高频电磁仿真软件模块 HFSS15 对远场方向图进行了仿真分析,相关结果与有关文献报导的实测结果基本相符。

关键词: 弓网离线;电磁干扰;电子堆振荡;对称振子

中图分类号: U228.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

Analysis on the electromagnetic radiation properties of the offline bow net arc from the electric locomotive

He Chenggong Deng Lianwen He Jun

(School of Physics and Electronics, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In the electrified railway sections, the offline bow net arc caused by pantograph-catenary detachment is a main EMI noise to electrified railways. The paper discussed the mechanism of EMI noise production through the theoretical analysis of the basic form of the gas discharge at atmospheric pressure. Then the dissertation further elaborated that electron swarm oscillate, caused by near cathode effect of AC arc is the radiation source based on streamer theory. According to the electron swarm oscillate, a dipole antennas model was presented in the paper. Moreover, HFSS15 was used to simulate radiation characteristics of pantograph contact loss electric arc. The results are consistent with the experimental results reported in the literature.

Keywords: offline bow net arc; EMI; electron swarm oscillate; dipole antennas model

1 引言

电气化铁路系统中,电能通过接触网与受电弓系统传输到电力机车而产生牵引动力。列车正常运行过程中要求理想状态的弓网系统是:可靠接触、无离线、无火花、受电弓平稳受电。实际上由于高速动车组的行驶速度越来越快,在高速运行过程中因接触网与受电弓在垂直方向上振动的不一致和接触网导线不平顺等原因,会导致受电弓与接触网时常分离。在分离瞬间,弓网间的电压急剧增加,且因边缘效应导致场的不均匀性,使得弓网间的空气被“击穿”,因此而产生的电弧不仅会在弓网间形成能通过传导方式馈入列车内部的脉冲过电压,影响电力机车的受流质量,而且会向空间辐射高频电磁干扰噪声,其频谱分布从几十 kHz~GHz 的范围,将可能严重影响铁路通信系统及沿线区域的

正常通信^[1-2]。动车组安装了大量无线电通讯设备和电力电子设备,其电磁兼容和抗电磁干扰问题突出^[3]。另一方面,随着城市轨道交通的发展,电力牵引机车距离工作和生活场所越来越远,给人们带来便利的同时,其产生的电磁干扰而引发的问题也越来越引起广泛关注^[4]。2015年9月《明尼苏达州报》报道称,美国轻轨对昂贵的实验室设备形成了电磁干扰。

目前大多数电弧模型是在假定其内部特性与参数情况下提出的,如 Ide 等人^[5]和 Liu 等人^[6]以 Mayr 电弧模型为基础,研究了电弧在过零前后的电压、电流动态特性。Tellini 通过线性回归分析对数据进行了处理,优化了电磁干扰测试方法。而关于弓网离线电弧产生高频电磁干扰机理方面的研究较少,相关工作主要是运用“黑盒模型”对弓网离线电弧的电学特性进行分析。如兰州交通大学的黄金

磊^[7]利用 MATLAB/Simulink 软件,建立 Mayr 电弧模型,仿真了弓网离线电弧的电压特性,并指出离线电弧电压呈高频振荡特性,电弧电流值可达 200 A 以上,这种振荡特性必然会对外产生电磁辐射^[7];通过对仿真得到的电弧电压进行快速傅里叶变换分析发现,脉冲过电压包含丰富的谐波分量,最高频率约 10 kHz^[8]。而实际测量结果表明弓网离线电弧产生高频电磁信号的频谱可达 GHz,根据电磁波辐射理论,辐射场应与辐射源具有相同的振荡频率,上述模型的仿真分析结果与实际测试结果有明显差异。因此“黑盒模型”不适合用于研究离线电弧产生的辐射电磁噪声。本文基于常压下气体放电过程中带电粒子运动特征,提出等效天线模型,研究分析弓网离线而产生的辐射场特性。

2 弓网离线电弧等效对称振子模型

在低气压时,汤森放电理论能较好地描述气体的电击穿,但在近大气压条件($Pl > 70 \text{ Pa} \cdot \text{m}$, P 为气体压强, l 为电弧弧长)下,基于汤森放电理论的放电过程及击穿电压均与实验结果有较大差异。为进一步研究气压较高条件下的气体放电过程,Meek 和 Leob 等提出了放电发展的流注理论,发现空间电荷畸变电场的作用。流注理论指出,形成电弧,将在阴、阳极之间形成等离子体通道,自由电子与阳离子分别向阳极与阴极运动,示意图如图 1 所示。

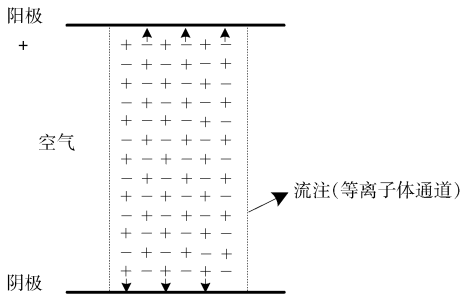


图 1 大气压条件下的放电电弧等离子通道

在高速列车电力牵引系统中,加载在接触网与受电弓之间的是单相工频(50 Hz)交流电压,由弓网离线产生的离线电弧为交流电弧。在交流电弧电流过零时,由于近阴极效应导致等离子体通道中自由电子与阳离子的浓度不均匀,在自由电子与阳离子之间产生库仑力,进而这种静电回复力将促使自由电子向阳离子运动,在阴、阳极间的电弧内形成一种自由电子群的集体运动,从而产生极间振荡电流(图 2)。

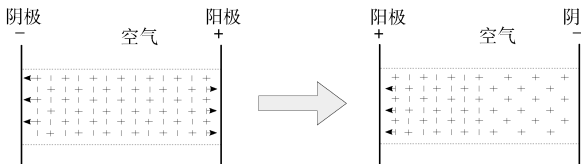


图 2 交流电弧近阴极效应

由于阳离子质量远大于自由电子的质量,在振荡过程中可以忽略阳离子的运动,认为阳离子相对静止。假设弓网离线电弧只存在于两极间的一维方向上,故可将电弧弧柱看作直导线,于是弓网离线电弧可等效为对称振子辐射源。由等离子体中正负电荷的不平衡产生的自由电子振荡理论分析,可得极间振荡电流频率为^[9]:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{e^2 n_0}{\epsilon_0 m}} \quad (1)$$

式中: e 为自由电子电荷量, n_0 为平衡时自由电子浓度, m 为自由电子质量。常压下气体放电过程中的气体电离度除受两极电压大小影响之外,还受温度、湿度等复杂环境因素影响,电子浓度最高可达 10^{15} cm^{-3} 。正柱区等离子体通道中自由电子浓度可达 $10^8 \sim 10^{10}$ 数量级,由此激发的极间振荡电流频率分布广。例如,当等离子体通道中自由电子浓度为 10^{10} cm^{-3} 时,可得振荡电流频率 $f = 897 \text{ MHz}$; 当 $n_0 = 4 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 时, $f = 18 \text{ MHz}$ 。上述理论预测的宽频特性与实际测量结果较符合。故可将弓网离线电弧等效为对称振子,其结构如图 3 所示,设弓网离线电弧弧柱长为 l , 弧柱直径相比于波长可忽略不计,中心馈电,该电弧的远区场只存在 E_θ 和 H_φ 两个分量^[10], 辐射电场磁场分别为:

$$E_\theta = j \frac{60 I_m e^{-jkD}}{D} \frac{\cos(kh \cos\theta) - \cos(kh)}{\sin\theta} \quad (2)$$

$$H_\varphi = \frac{j}{\eta_0} \frac{60 I_m e^{-jkD}}{D} \frac{\cos(kh \cos\theta) - \cos(kh)}{\sin\theta} \quad (3)$$

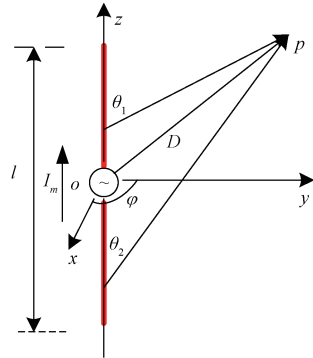


图 3 对称振子结构

由上式可见,辐射场强度与距离 D 成反比,与 I_m (电弧内振荡电流最大值) 成正比,且与 θ 有关,辐射场具有方向性。

3 弓网离线电弧辐射场仿真与分析

借助高频电磁仿真软件 HFSS15, 构建如图 4 所示对称振子模型。

为简化分析,设列车沿 y 轴方向运行,离线电弧沿 z 轴方向,仿真模型中原点为电弧正柱区中点处。当辐射频率为 0.9 GHz, 对称振子长度分别为 5、20、30、40 cm 时对模型进行三维电磁场仿真,得到远区场方向如图 5 所示。

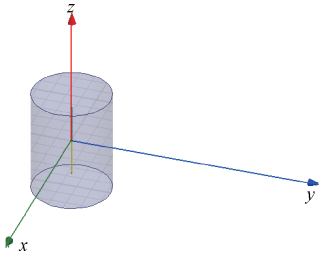


图4 HFSS的对称振子模型

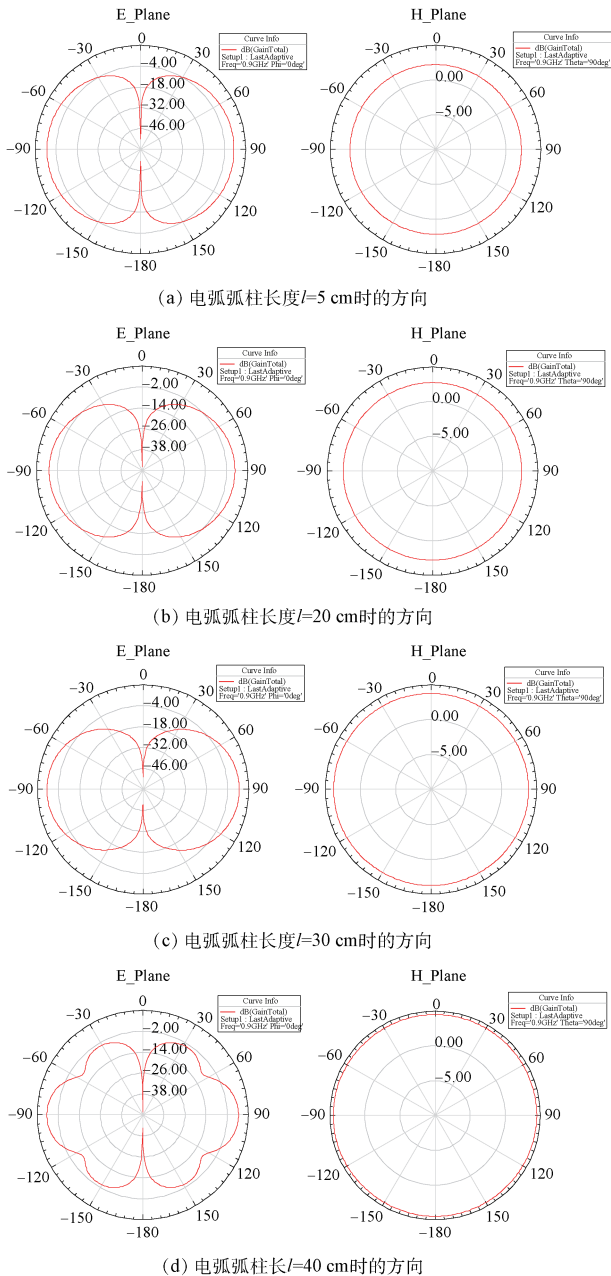


图5 辐射方向与弧柱长度的变化关系

图5为辐射方向与弧柱长度的变化关系,由电场 E 面和磁场 H 面可见,等效对称振子的辐射磁场在 H 面不具

有方向性,辐射电场在 E 面具有很强的方向性,一定范围内随着长度的增加,主瓣宽度越来越小(3D方向图越来越扁平),辐射电场方向性越来越强;当振子的长度增加到一定值时,方向图出现副瓣。这是因为对称振子的方向图函数除与 θ 有关外还与电长度 l/λ 有关,而 $\lambda=c/f$ 与频率成反比。当 $l/\lambda \leq 1$ 时,方向图上只存在两个主瓣;当 $l/\lambda > 1$ 时,方向图上出现副瓣,而主瓣逐渐减弱。现场频谱仪实际测量的结果表明电力牵引高速列车的电磁噪声频谱范围一般集中在GHz以下^[1],主频覆盖200~800 MHz,其辐射波长大于30 cm。

因此由仿真方向图分析得到,当离线电弧在 z 轴方向时,垂直于 z 轴的 $x-O-y$ 平面具有最大电场强度,且场强随距离列车的距离增加而逐渐减弱,这与实际测试经验符合^[11]。

4 结 论

由交流电弧近阴极效应产生的电子堆振荡是离线电弧微波段辐射干扰源,其频谱覆盖范围广,辐射频率与气体电离度成正比,可达GHz频段。

离线电弧的辐射电磁信号强度随距离 D 增加而减弱,且与电弧内振荡电流最大值 I_m 成正比;弓网离线电弧产生的辐射电磁信号在垂直于弧柱方向的平面具有最大电场强度。

受电弓与接触网通常在列车高速行驶时发生离线,产生的电弧会出现拉弧现象,气体电离度受湿度、温度等环境因素影响,流注形成过程中会出现分枝现象。

参考文献

- [1] 桂煌. 电气化铁道无线电噪声对高速移动信道特性的影响研究[D]. 北京:北京交通大学, 2010.
- [2] 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.
- [3] 唐正明, 章三妹, 朱峰. 动车组数字设备的弓网电弧电磁干扰分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(9): 980-985.
- [4] 孙剑光, 李可, 刘志廉, 等. 城市轨道交通工程电磁兼容与电磁干扰问题的分析与探讨[J]. 现代建筑电气, 2014(S1):8-12.
- [5] IDE C K, OLARU S, RODRIGUEZ-AYERBE P, et al. A nonlinear state feedback control approach for a Pantograph-Catenary system[C]. 17th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC), 2013:268-273.
- [6] LIU Y J, CHANG G W, HUANG H M. Mayr's equation-based model for pantograph arc of high-speed railway traction system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3):2025-2027.

(下转第50页)