

高速铁路弓网离线电弧电磁辐射特性的试验研究

金梦哲¹,刘尚合^{1,2},邢 彤³,杨才智³,刘卫东¹,方庆园¹,胡 曼¹

(1. 石家庄铁道大学 河北省电磁环境效应与信息处理重点实验室,河北 石家庄 050043;

2. 陆军工程大学 电磁环境效应国家级重点实验室,河北 石家庄 050005;

3. 中国铁道科学研究院集团有限公司 标准计量研究所,北京 100015)

摘要:高速铁路系统电磁环境十分复杂,其中弓网离线电弧产生的电磁辐射是高速铁路系统最重要的电磁干扰源之一。利用高速弓网关系试验台开展了大电流、高速条件下的弓网离线放电模拟试验,测量了不同牵引电流及不同行车速度下放电辐射场的时域波形,经快速傅里叶变换后得到了离线放电电磁辐射的主要分布频段、分布疏密程度、典型频率值等特征,探讨了放电辐射特性随牵引电流和行车速度的变化规律及原因。研究表明:在大电流、高速条件下,弓网放电电磁辐射能量主要分布于0~100 MHz的频率范围,其中分布最密集频段为45~55 MHz,起弧电磁辐射强度大于熄弧电磁辐射强度;在100~700 A的牵引电流区间内,放电辐射场的幅值随电流增大而增大;相同牵引电流下,频域峰值对应的频率值随车速增大而逐渐变小。该研究结果为弓网电弧电磁辐射干扰的机理研究以及防护提供了试验数据和参考依据。

关键词:电磁辐射;高速铁路;电磁干扰;电磁环境效应;弓网离线电弧;试验

中图分类号:TM 501

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204085

0 引言

高速铁路列车通过受电弓和接触网(即弓网系统)的滑动电接触来获取牵引电流^[1]。在高铁动车组运行时,弓网应保持良好的接触状态才能保证这种高速受流的稳定性^[2-3]。然而实际运行过程中,由于车体振动、接触线不平顺、过电中性区^[4]等多种原因会导致弓网的瞬间脱离,即“弓网离线”。弓网离线会产生受电弓与接触线之间的电弧放电现象,伴随着强烈的弧光和高温烧蚀,还会发出幅度高、频带宽的瞬态电磁辐射,将对列车控制系统和通信信号系统产生不可忽视的瞬态电磁干扰。弓网离线电磁干扰是影响高速铁路系统电磁安全性的最主要因素之一,严重时甚至影响系统的正常运行及高铁动车组的行车安全^[5-6]。

针对高速铁路系统弓网电弧辐射干扰问题,国内外学者从现场测试、仿真计算和试验模拟3个方面开展了大量的研究工作^[7-13]。文献[7]对意大利当地15 kV直流供电列车车厢内的电磁辐射进行了测量与分析,指出了弓网放电产生的辐射干扰能量分布在较宽的频带,而这种宽频辐射会影响列车通信系统的正常工作。文献[8]通过在轨旁路桥上架设天线的方式,接收列车驶过时的电磁场信号,分析得到在低频范围(10 kHz~1 MHz)内磁场能量分布较为

集中,而在甚高频段(30~300 MHz)内弓网电弧放电的主要能量集中在50 MHz,因此建议以50 MHz的幅值特征作为弓网系统运行状态的判断依据。文献[9]利用在动车组车顶安装的天线和电流探头,测量了弓网电弧辐射场强及传导耦合电流,并应用统计分析方法研究了瞬态干扰脉冲的上升时间、脉冲宽度等时域参数的分布特征。文献[10]结合国内武广线的现场测试与实验室半实物仿真试验,分析得到了弓网离线电弧频谱以30~300 MHz之间最为丰富,还指出高铁电磁环境的长期暴露可能影响人体健康。文献[11]通过仿真方法计算了弓网电弧和通信设备之间的耦合系数,并在混响室中测量了弓网电弧的总辐射功率,而后计算得到了弓网电弧到通信设备的辐射耦合功率。

弓网电弧辐射的现场实测研究中,存在测试条件不可控、环境噪声大等不足,而仿真研究方法也面临模型精确度不足和电弧源近似等效不够真实的问题,因此,一些研究团队通过试验方法研究弓网放电的辐射特性^[12-13]。文献[12]通过采集实验室模拟的弓网电弧辐射发射信号,建立了弓网放电辐射电磁场的时域波形模型,并以此开展了不同接触电流(5~40 A)条件下辐射发射的对比,得到了增大测量距离或增大接触电流会减小辐射场脉冲幅值的结论。文献[13]搭建了弓网电磁辐射信号测量放电试验装置,并利用自制的四阶Hilbert分形天线开展了不同试验电流(8~16 A)和不同放电间隙(0~2 mm)下的弓网电弧辐射电磁场测试研究,结果显示弓网电弧电磁辐射频段主要分布在0~160 MHz。

现有试验方法的研究结论具有一定参考性,然

收稿日期:2021-10-12;修回日期:2021-12-11

在线出版日期:2022-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807123,61801309)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51807123,61801309)

而所采用的试验条件与我国高速铁路牵引电流高达上千安培、行驶车速 350 km/h 的实际情况相差较大,得到的结论并不能直接作为高速铁路系统弓网放电辐射干扰研究的参考依据。本试验研究的开展依托于中国铁道科学研究院的高速弓网关系试验台^[14]。该试验台是目前世界上唯一试验速度超过 500 km/h 的高速弓网关系试验台,并且可提供最高 1 000 A 的单相交流电流。基于此试验平台,本研究真实模拟了高速铁路实际工况下弓网离线电弧的产生,开展了不同牵引电流及不同行车速度下的弓网离线放电试验,利用自研的宽带天线测量了放电辐射场的时域变化,并经过快速傅里叶变换 FFT (Fast Fourier Transform) 得到了弓网放电辐射的频谱信息,分析了牵引电流和车速对主要能量分布、最大振幅及其对应频率坐标等辐射特性的影响规律,相关方法及结论可作为研究弓网放电辐射干扰形成机理及抑制措施的重要参考和试验依据。

1 试验装置与环境

1.1 试验装置

高速弓网关系试验台的整体外观以及受电弓碳滑板与接触铜线细节见附录 A 图 A1。试验台由旋转轮盘、受电弓、电源、负载等部分组成。转盘由直径为 4 m 的高强度铝合金主盘、旋转驱动电机和水平作动台构成。铝制主盘的圆周安装铜制接触线,由转速可调的电机驱动主盘旋转,带动接触线运动产生线速度,用以模拟机车运行时弓网之间的高速相对运动。水平作动台位于转盘转轴的正下方,能够带动转盘在水平方向进行整体往复运动,可模拟弓网接触点的横向“之”字形运动。

转盘圆周边缘下方安装真实受电弓,受电弓上碳滑板为浸铜碳材质,接触线材质为铜银合金,型号为 CTA120,碳滑板和接触线的相关物理属性见附录 A 表 A1。

试验供电电流从电源流出经转盘、接触线、弓网接触点,再通过受电弓流回负载和电源模块,如附录 A 图 A2 所示。当转盘高速转动时,原本接触良好的弓网两极由于高速接触碰撞、“之”字形运动、受电弓自然振动等引起离线,产生电弧离线放电,引起空间辐射发射。试验台配有控制室,能够实时控制电源输出的牵引电流、弓网相对速度等参数。试验台电流路径、牵引电流有效值、弓网相对速度与实际列车运行工况基本一致。

弓网放电产生的电磁辐射脉冲由于其快时变、宽频带的特性,不适合直接进行频域测量。而时域测试不仅可以清晰地区分放电和环境噪声,采集时域波形后应用 FFT 还可得到辐射的频域特性。时域测试所用传感器包括钳式电流环、差分电压探头和

螺旋天线,其中电流环和电压探头相关技术参数见附录 A 表 A2。试验采用是德科技 MSOS404A 型高速数字示波器来记录和存储弓网放电瞬态干扰的时域信号,该示波器模拟带宽为 4 GHz,最大采样率为 20 GSa/s。

辐射场测试利用本课题组为研究弓网放电辐射场自制的阿基米德螺旋天线^[15],该天线具备小型化、超宽带的特点,适合动车组车体内部、车底等狭小空间架设测试,天线仿真模型图及实物图见附录 A 图 A3。该天线在 0~1 GHz 频率范围内的驻波比 VSWR (Voltage Standing Wave Ratio) 变化曲线如附录 A 图 A4 所示,在 20 MHz~1 GHz 的频段内,天线的 VSWR 值小于 4.3 dB。

相关传感器安装位置见附录 A 图 A5。大孔径的钳式电流环安装于受电弓底座下方,同时套住受电弓底座伸出的 4 根回流线;差分电压探头一端接转轴下方水银滑环引出的金属体,另一端连接受电弓碳滑板下端金属支架,由于金属导体电阻相比电弧电阻较低,可近似认为该电压探头测试结果就是电弧电压;螺旋天线放置距离弓网接触点约 2.8 m 处,并保持与接触线处于同一水平面。传感器通过 50 Ω 同轴电缆与示波器相连,示波器同时记录和存储放电电流、电压及辐射场变化。

1.2 试验环境

由于试验现场环境比较复杂,空间辐射、转盘电机、电源等辐射干扰源都会影响测量结果,因此试验开始前进行了以下 3 轮背景辐射噪声的测试,以确定测试环境中的辐射噪声对测量结果的影响。

1) 空间辐射噪声的测试:关闭轮盘驱动电机等用电设备,控制弓网处于分离状态,接收天线测得空间辐射噪声的时域波形和经 FFT 后的频谱见附录 A 图 A6(a)。可以看到,测试现场存在未知的不同幅值的空间瞬态脉冲信号,最大幅值超过 50 mV。

2) 转盘驱动电机工作产生辐射噪声的测试:开启轮盘并调整至 450 km/h 的转速,控制弓网以 50 N 压力保持接触,此时主回路不加电,测量电机负载工作时释放的辐射信号,见附录 A 图 A6(b)。对比图 A6(a) 可知,当轮盘负载转动时,驱动电机释放的电磁脉冲幅值明显增大,达到约 210 mV,但与弓网放电时比较,不到放电辐射幅值(约 700~1 200 mV)的 30%。另外从频谱上看,电机负载工作时,只在 10 MHz 附近频率范围有抬升。因此,可以判断转盘驱动电机工作对弓网放电辐射噪声的测试结果影响不大。

3) 主电路通电产生辐射噪声的测试:控制转盘不转,操作控制台保持弓网接触良好,将主电路牵引电流调节至 700 A,此时无电弧放电现象,辐射场波形见附录 A 图 A6(c),测试结果与图 A6(a) 十分相似,说明主电路通过稳态 50 Hz 交流电流时对空间

辐射影响不大。

通过以上分析,试验环境空间辐射噪声的幅值相对待测弓网放电电磁辐射较小,在弓网放电电磁辐射的测量中背景噪声的影响基本可以忽略。

1.3 试验条件

为研究不同牵引电流和行车速度下弓网离线电弧的辐射特性,在附录 A 表 A3 所示的试验条件下采用单因素试验法开展了 16 组弓网电弧电磁辐射试验,其中牵引电流为有效值,变化范围为 100~700 A,行车速度即弓网相对速度,变化范围为 150~450 km/h。所有试验均在弓网接触压力为 50 N 的设置条件下完成。由于受电磁力作用和周围气压变化影响,电弧的形状和位置在起弧、燃弧过程会存在一定的随机性。因此,本研究在相同试验条件下进行了 5 组重复试验,并计算了同一条件下测试结果的平均值。

2 测试结果与分析

2.1 起弧熄弧过程

示波器 3 个通道同步采集回路电流、电弧电压和空间辐射场的时域波形,设置采样频率为 1 GSa/s,采用电弧电压的上升沿进行采样触发。试验条件设置为牵引电流 500 A、行车速度 350 km/h 时,一次弓网分离起弧而后接触熄弧的完整过程中回路电流、电弧电压和空间辐射场的典型时域波形如图 1 所示。图中: t_1 为弓网分离起弧时刻; t_2 为电弧的熄弧时刻; t_1-t_2 对应于电弧的燃弧阶段,该时间间隔主要受弓网振动运动和分离时刻电源电压相位等外部条件影响,对测试结果影响较小。

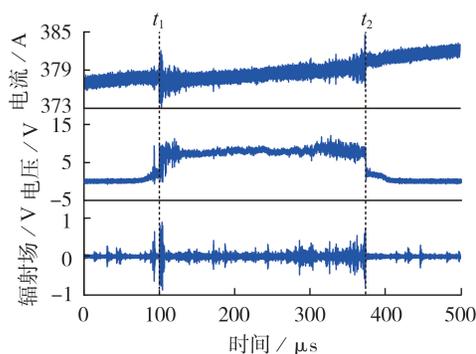


图 1 回路电流、电弧电压和空间辐射场的时域波形

Fig.1 Time-domain waveforms of loop current, arc voltage and space radiation field

在 t_1 时刻之前,弓网之间以单个或者多个接触点维持电连接,接触电阻相比负载电阻低很多,弓网两端的电压保持为 0,且不存在回路电流的瞬变,因此,在 t_1 时刻之前测得的辐射场仅为空间噪声,幅值约为 0.2 V。此时接触点承受了所有牵引电流,焦耳热导致接触局部温度急剧升高。

在 t_1 时刻,接触线与受电弓的碳滑板分离,接触电阻瞬间增大,更多焦耳热产生的高温使接触点金属颗粒熔化、汽化,金属蒸汽维持回路电流的导通。与此同时,在极短的弓网间隙下产生较强的电场,弓网间隙中的空气分子在高温热电子发射和强电场场致发射的综合作用下发生电离,形成电弧等离子体的电流通路,瞬变电流引起电磁波的向外发射。由于放电产生了导通电流,而电弧电阻的存在导致在 t_1 时刻放电两极的电压上升。同时,回路总电阻的变大使得回路电流在 t_1 时刻有一定幅度的下降。 t_1 时刻因回路电流瞬变产生的弓网放电电磁辐射幅值约为 0.9 V,明显区别于空间辐射噪声(幅值小于 50 mV)。

t_1-t_2 时段内,电压维持在一定水平,电弧稳定燃烧,很少出现电弧电压和回路电流的瞬态变化,因此也几乎没有明显的电磁辐射脉冲;接近 t_2 时刻,电压的振荡幅值变大,辐射场天线可以接收到一系列幅值逐渐变大的辐射脉冲;直到弓网接触的 t_2 时刻,电弧瞬间熄灭,回路电流和电弧电压再次瞬变,此时出现幅值约为 0.75 V 的辐射脉冲信号。

2.2 弓网放电辐射特性

为展示辐射幅值在起弧时刻的瞬态变化,截取了 t_1 时刻附近持续时间为 10 μs 的放电脉冲电流和辐射场变化波形,如图 2 所示。可以看出,放电脉冲电流在 102~109 μs 期间呈现双极性振荡形式。脉冲电流的振荡持续时间、振荡主频与电磁辐射脉冲基本接近,一般认为该振荡持续时间和主频由弓网之间的电容、电弧电阻和电感确定^[16]。

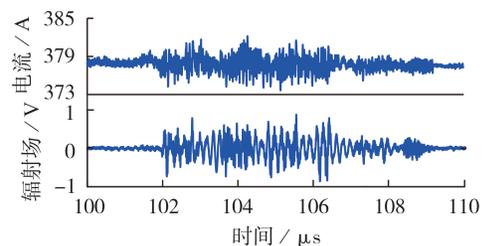


图 2 弓网放电起弧阶段脉冲电流和辐射场的时域波形

Fig.2 Time-domain waveforms of pulse current and radiation field during pantograph-catenary arc initiation stage

结合图 1 可观察得到,弓网电弧电磁辐射脉冲伴随着放电电流的瞬态变化而产生,两者在时域上具有较强的同步性。由电磁感应定律,电磁辐射由瞬变电流产生,电弧放电辐射的幅值 E_{arc} 与电流的变化率 dI_{arc}/dt 成正比^[17],即:

$$E_{arc} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2} \frac{dI_{arc}}{dt} \quad (1)$$

式中: c 为传播速度; ϵ_0 为空气介电常数。

熄弧阶段 t_2 时刻附近的脉冲电流、辐射场时域

波形与起弧阶段波形相似。为获取弓网电弧的电磁辐射特性,对截取的起弧阶段(102~109 μs)和熄弧阶段(376~383 μs)时域脉冲辐射信号分别进行FFT,除去空间背景噪声的频谱分量,得到如图3所示的弓网起弧和熄弧对应的辐射频谱,用以讨论弓网离线电弧电磁辐射频谱峰值、对应频率值和主要能量分布的频率范围。

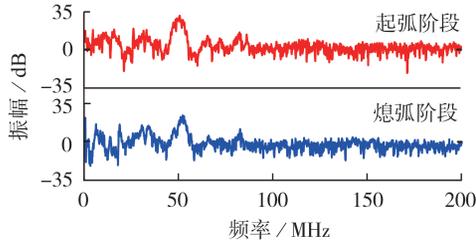


图3 弓网放电辐射频谱

Fig.3 Radiation spectrum of pantograph-catenary discharge

从图3中起弧阶段的辐射频谱可以看出,辐射能量主要分布在0~85 MHz范围内,频域峰值为32.4 dB,对应的频率为50.3 MHz,频谱上其他振幅高于环境辐射噪声10 dB的频率位于0~15 MHz、25~38 MHz频段和82 MHz频点附近。对比熄弧阶段的辐射频谱可知,熄弧阶段的辐射强度低于起弧阶段的辐射强度,熄弧阶段辐射的频域峰值为29.8 dB(低于起弧阶段的2.6 dB),对应的频率为51.4 MHz,主要干扰能量仍分布在0~85 MHz频率范围之内,熄弧阶段频谱上振幅高于环境噪声10 dB的频率集中在5~10 MHz、28~40 MHz频段和82 MHz频点附近。

为更准确地描述弓网电弧辐射的频率分布,本研究统计了主要能量分布频段内电磁辐射的振幅高于环境噪声10 dB的频点个数 N_{fs} 。表1给出了牵引电流为500 A、行车速度为350 km/h条件下各个频率区间的频点概率 P_{fs} ($P_{fs} = N_{fs} / N_{total} \times 100\%$,其中 N_{total} 为该频段内频点总数)。频点概率 P_{fs} 越大表示弓网电弧辐射能量在该频段内的分布越密集。

表1 辐射振幅高于10 dB的频点个数统计

Table 1 Counts of frequency points with radiation amplitude over 10 dB

频率范围 / MHz	N_{fs}	N_{total}	$P_{fs} / \%$
0~15	133	210	43.3
15~45	87	420	20.7
45~55	121	140	86.4
55~75	23	280	8.2
75~85	40	140	28.5
85~200	103	1610	6.4

起弧和熄弧阶段电磁辐射的频点分布柱状图见附表A图A7。由图可知:起弧和熄弧阶段的电磁辐射均在45~55 MHz频段分布最为密集;对比熄弧阶

段,起弧阶段的电磁辐射在0~15 MHz的较低频段更为密集,且起弧阶段的电磁辐射在各个频段的分布密度均高于熄弧阶段。在起弧阶段,弓网间隙存在较大浓度的带电粒子(自由电子和金属离子),而随着弓网间隙的逐渐变大,由于等离子体复合作用,带电粒子浓度会有所下降,所发出的电磁辐射也会减弱,因此熄弧阶段的辐射分布密度在各个频段均有所降低。

2.3 不同牵引电流下弓网放电辐射特性

2.3.1 牵引电流对辐射时域特性的影响

控制试验台保持模拟速度为350 km/h,并调整牵引电流为100、300、500、700 A,分别记录起弧、熄弧阶段的辐射脉冲幅值变化情况,见表2。试验中随着牵引电流的增大,辐射脉冲幅值有增大的趋势,这与文献[13]在8~16 A电流变化范围内所得规律相似。但是相比牵引电流试验条件的变化,放电电磁辐射幅值的变化幅度不是十分明显,即牵引电流从100 A变化为700 A(增大600%)时,起弧阶段的辐射脉冲幅值仅增大了约30%,这也说明了牵引电流对弓网辐射发射的影响是有限的。

表2 不同牵引电流下起弧和熄弧阶段的辐射脉冲幅值

Table 2 Amplitude of radiation pulses during arc initiation and arc extinction stages under different traction currents

牵引电流 / A	辐射脉冲幅值 / V	
	起弧阶段	熄弧阶段
100	0.85	0.73
300	0.91	0.73
500	0.93	0.85
700	1.11	1.08

对比表2中相同牵引电流下起弧和熄弧阶段的幅值可知,起弧阶段的辐射脉冲幅值均大于熄弧阶段的辐射脉冲幅值。这可能是由于燃弧过程释放的大量热能导致放电通路温度增高,因此相比起弧阶段,电弧等离子体在熄弧阶段的电阻更小。当弓网接触时,回路中阻抗主要为负载电阻 R_L 、电极电阻 R_e 和接触电阻 R_c ,则电极分离前瞬间电流 I_0 的计算公式为:

$$I_0 = \frac{U}{R_L + R_e + R_c} \quad (2)$$

式中: U 为电极两端电压。

电极分离之后, R_c 变为0,但是起弧产生了电弧电阻 R_{arc} ,此时回路电流 I_1 的计算公式为:

$$I_1 = \frac{U}{R_L + R_e + R_{arc}} \quad (3)$$

由图1弓网电极分离后电流下降的实际情况可知, $R_{arc} > R_c$,若电流瞬时变化值记为 dI ,将式(2)与式(3)相减可得:

$$dI = \frac{U}{R_L + R_e + R_c} - \frac{U}{R_L + R_e + R_{arc}} \quad (4)$$

因此,当 R_{arc} 变小时,电流瞬时变化值也变小。将式(4)代入式(1),并假设弓网电弧在起弧和熄弧阶段的持续时间相同,即 dt 不变,可知起弧阶段的辐射脉冲幅值大于熄弧阶段的辐射脉冲幅值,与试验结果一致。

2.3.2 牵引电流对辐射频域特性的影响

由前文分析已知,在 0~15 MHz、45~55 MHz 和 75~85 MHz 频段内起弧阶段的电磁辐射分布较为密集,所以选用起弧阶段的这 3 个典型频段来分析弓网放电的电磁辐射频点分布情况。不同牵引电流下辐射幅值高于 10 dB 的频点在典型频段的分布情况见附录 A 图 A8,随着牵引电流从 100 A 增大至 700 A,典型区间内辐射的频点概率呈现不同的变化趋势。其中,0~15 MHz 和 45~55 MHz 的低频段辐射分布随牵引电流的增大而变得更加密集,而在 75~85 MHz 的较高频段电磁辐射频点分布疏密程度变化较小,说明随着牵引电流的增大,弓网放电的电磁辐射强度整体是增大的,而增大趋势集中体现低频段辐射分布区域。这是由于实际电弧存在一定的电感,在电感作用下瞬变的电流在时域上逐渐放缓,随着电流的增大,更多的辐射能量分布在低频区域,而高频段的辐射能量分布变化不大。另外,在 100~700 A 的电流变化范围内,弓网放电的电磁辐射频点主要分布在 0~100 MHz 区间,其中最密集的分布频段始终保持在 45~55 MHz。

弓网放电辐射频谱上的峰值及其对应频率随牵引电流的变化规律如图 4 所示。由图可知:牵引电流增大后,辐射频谱峰值有增大趋势,但是仅增大了约 5 dB,变化仍然不显著;而峰值对应的频率保持在 49.8~50.7 MHz 的窄带范围内,基本不随牵引电流变化。频谱峰值对应的频率取决于电弧电阻和空气介电常数,而介电常数不随电流大小而改变,并且在暂态阶段,电弧电阻率与电流大小相关性较小^[17]。因此,弓网离线电磁辐射的频域峰值对应频率在较大区间内与牵引电流无关,基本维持在 50 MHz 附近。这与文献[13]中不同试验电流下电弧辐射频域峰值保持在相同频率的规律相符。

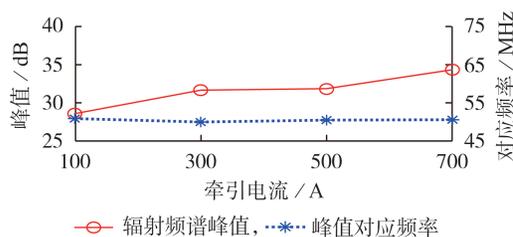


图 4 频谱峰值及对应频率随牵引电流的变化

Fig.4 Variations of peak amplitude of spectrum and corresponding frequency with traction current

2.4 不同行车速度下弓网放电辐射特性

2.4.1 行车速度对辐射时域特性的影响

为研究行车速度对弓网放电辐射时域特征的影响,试验中保持牵引电流为 500 A,调整行车速度分别为 150、250、350、450 km/h,测量并记录了起弧和熄弧阶段电磁辐射的时域变化情况,如表 3 所示。可以看出,行车速度增加后,弓网放电起弧和熄弧阶段的电磁辐射幅值均没有显著变化,这与文献[12]中辐射脉冲幅值与行车速度相关性较小的结论一致,而起弧阶段电磁辐射幅值高于熄弧阶段的规律仍较为明显。

表 3 不同行车速度下起弧和熄弧阶段的辐射脉冲幅值

Table 3 Amplitude of radiation pulses during arc initiation and arc extinction stages under different driving speeds

行车速度 / (km·h ⁻¹)	辐射脉冲幅值 / V	
	起弧阶段	熄弧阶段
150	0.83	0.76
250	0.90	0.62
350	0.81	0.81
450	0.93	0.80

2.4.2 行车速度对辐射频域特性的影响

辐射频谱峰值及其对应的频率随行车速度的变化如图 5 所示。可以看出,当行车速度从 150 km/h 增大至 450 km/h 时,弓网电弧辐射脉冲的最大幅值变化幅度不大,即放电辐射的频谱峰值随行车速度变化不明显。而频谱峰值对应的频率从 53 MHz 降低至 41 MHz,呈现随行车速度增大而减小的趋势。

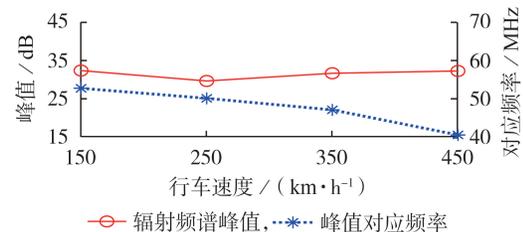


图 5 频谱峰值及对应频率随行车速度的变化

Fig.5 Variations of peak amplitude of spectrum and corresponding frequency with driving speed

根据文献[18]提出的电极分离放电模型,离线瞬间弓网两极等效于一个带电电容 C_0 ,电弧产生时自身电阻、电感分别为 R_{arc} 和 L_{arc} ,则相当于在电弧产生时刻, C_0 对 R_{arc} 和 L_{arc} 回路放电,模型见图 6。

考虑到电弧电感很小,忽略 L_{arc} ,则 RC 振荡电路引起的辐射频率 f_0 为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi R_{arc} C_0} \quad (5)$$

设 ρ 为电弧电阻率, l 为弓网放电间隙, A 为弧柱平均横截面积,则电弧电阻为:

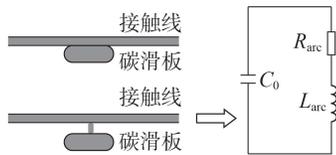


图6 弓网放电的电极分离放电模型

Fig.6 Electrode separation discharge model of pantograph-catenary discharge

$$R_{\text{arc}} = \frac{\rho l}{A} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),有:

$$f_0 = \frac{A}{2\pi \rho l C_0} \quad (7)$$

考虑行车速度对弓网离线距离的影响^[19],若行车速度记为 v ,单位为 km/h ,放电间隙 l 单位为 mm ,则有:

$$l = 0.257v - 2.8 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7),有:

$$f_0 = \frac{A}{2\pi \rho C_0} \frac{1}{0.257v - 2.8} \quad (9)$$

根据式(9)可知,当 v 增加时, f_0 逐渐变小。高铁列车通过车载BTM系统发送27 MHz信号来激活置于线路上的无源应答器。随着行车速度的提高,弓网放电最大辐射对应频率将逐渐靠近BTM工作频率,因此在高速行车条件下应答器-车载BTM设备的信号传输更易受到弓网放电电磁辐射干扰的影响。

3 结论

通过大电流、高速条件下弓网离线电弧电磁辐射特性的试验研究,得到结论如下。

1)弓网放电期间在起弧和熄弧阶段回路电流的瞬间突变会产生电磁辐射脉冲。单个辐射脉冲呈现短暂的振荡衰减现象,持续时间约为 $200 \mu\text{s}$,起弧阶段产生的电磁脉冲强于熄弧阶段。电弧放电产生的电磁辐射能量主要分布于 $0\sim 100 \text{ MHz}$ 频率范围内,其中起弧阶段的电磁辐射主要集中在 $0\sim 15 \text{ MHz}$ 、 $45\sim 55 \text{ MHz}$ 、 $75\sim 85 \text{ MHz}$ 频段,而熄弧阶段的电磁辐射主要集中在 $45\sim 55 \text{ MHz}$ 频段。

2)在 $100\sim 700 \text{ A}$ 牵引电流区间内,随着牵引电流增大,电磁辐射幅值呈现增大趋势。而最密集频段始终保持在 $45\sim 55 \text{ MHz}$,频域峰值对应的频率始终保持在较为固定的窄带范围内,不随牵引电流发生变化。

3)在 $150\sim 450 \text{ km/h}$ 行车速度变化范围内,弓网电弧辐射脉冲峰值基本保持不变,而频域峰值对应的频率从 53 MHz 降低至 41 MHz ,呈现随行车速度增大而减小的趋势。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张恒,王辉,李群湛,等. 采用自耦变压器供电的重载铁路牵引电缆贯通供电系统供电方案[J]. 电力自动化设备,2021,41(1):204-210.
ZHANG Heng, WANG Hui, LI Qunzhan, et al. Power supply scheme of traction cable co-phase connected power supply system for heavy-haul railway powered by AT [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(1): 204-210.
- [2] 熊进飞,周福林,陈志远,等. 车网耦合作用下励磁涌流对机车变流器电流频谱的影响[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):177-183.
XIONG Jinfei, ZHOU Fulin, CHEN Zhiyuan, et al. Effect of inrush current on locomotive converter output current spectrum under coupling of train and network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 177-183.
- [3] 刘方平,葛兴来,余思儒,等. 一种高速列车-牵引网阻抗测量方法及其稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):154-159,178.
LIU Fangping, GE Xinglai, YU Siru, et al. Impedance measurement method and stability analysis of high-speed train-traction network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(8): 154-159, 178.
- [4] 张丽艳,韩笃硕,王辉,等. 牵引变电所群贯通供电系统负序补偿模型及控制策略[J]. 电力系统自动化,2021,45(22):146-156.
ZHANG Liyan, HAN Dushuo, WANG Hui, et al. Negative sequence compensation model and control strategy for interconnected power supply system of traction substation group [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 146-156.
- [5] 宋小翠,刘志刚. 计及弓网二次燃弧的高铁车-网建模与电磁暂态影响研究[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):118-125.
SONG Xiaocui, LIU Zhigang. EMU-traction network modeling of high speed railway and electromagnetic transient influence considering secondary arcing of pantograph catenary [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 118-125.
- [6] 高国强,颜馨,魏文赋,等. 基于Hilbert分形天线的弓网电弧电磁辐射研究[J]. 高电压技术,2019,45(1):324-329.
GAO Guoqiang, YAN Xin, WEI Wenfu, et al. Electromagnetic radiation of pantograph-catenary arc based on Hilbert fractal antenna [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 324-329.
- [7] MARISCOTTI A, MARRESE A, PASQUINO N, et al. Time and frequency characterization of radiated disturbance in telecommunication bands due to pantograph arcing [J]. Measurement, 2013, 46(10): 4342-4352.
- [8] HEDDEBAUT M, DENIAU V, RIOULT J. Wideband analysis of railway catenary line radiation and new applications of its unintentional emitted signals [J]. Measurement Science and Technology, 2018, 29(6): 1-14.
- [9] 杨志超,单秦,武鹏,等. 大功率弓网系统瞬态扰动的统计特性分析[J]. 高电压技术(英文版),2013,39(10):2465-2470.
YANG Zhichao, SHAN Qin, WU Peng, et al. Statistical analysis of transient disturbances in high-power pantograph-network systems [J]. High Voltage Engineering (English Edition), 2013, 39(10): 2465-2470.
- [10] 牛大鹏,朱峰,邱日强,等. 高铁离线电弧射频和车内低频电磁暴露的特性研究[J]. 高电压技术,2016,42(8):2587-2595.
NIU Dapeng, ZHU Feng, QIU Riqiang, et al. Study on the characteristics of off-line arc's radio-frequency and low-frequency electromagnetic exposure inside the high speed rail train [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(8): 2587-2595.
- [11] MA L, WEN Y, MARVIN A, et al. A novel method for

- calculating the radiated disturbance from pantograph arcing in high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(10): 8734-8745.
- [12] GUO F, FENG X, WANG Z, et al. Research on time domain characteristics and mathematical model of electromagnetic radiation noise produced by single arc[J]. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology, 2017, 7(12): 2008-2017.
- [13] GAO G, YAN X, YANG Z, et al. Pantograph-catenary arcing detection based on electromagnetic radiation[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, 61(4): 983-989.
- [14] 王亚春, 陈立明, 杨才智. 高速铁路弓网关系模拟试验研究[J]. 中国铁道科学, 2018, 39(3): 79-85.
WANG Yachun, CHEN Liming, YANG Caizhi. Simulation test study on pantograph-catenary relation of high speed railway[J]. China Railway Science, 2018, 39(3): 79-85.
- [15] FANG Q, JIN M, LIU W. Single-arm Archimedean spiral antenna with broadband circular polarization[J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2021, 2021(6): 1-15.
- [16] 熊庆, 肖戎, 汲胜昌, 等. 基于电磁辐射特性的直流电弧检测方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(9): 2967-2975.
XIONG Qing, XIAO Rong, JI Shengchang, et al. DC arc detection method based on electromagnetic radiation characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(9): 2967-2975.
- [17] XIONG Q, JI S. A novel DC arc fault detection method based on electromagnetic radiation signal[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(3): 472-478.
- [18] BONDIOU A, LABAUNE G, MARQUE J P. Electromagnetic radiation associated with the formation of an electric breakdown in air at atmospheric pressure[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61(2): 503-509.
- [19] 马云双, 刘志刚, 闻映红, 等. 高速动车组车速对弓网离线电弧放电的影响[J]. 北京交通大学学报, 2013, 37(2): 99-103.
MA Yunshuang, LIU Zhigang, WEN Yinghong, et al. Effect of the speed of high-speed EMUs on the pantograph-catenary off-line arc discharge[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2013, 37(2): 99-103.

作者简介:



金梦哲

金梦哲(1990—),男,博士研究生,主要研究方向为轨道交通电磁兼容(E-mail: anatman_jin@foxmail.com);

刘尚合(1937—),男,中国工程院院士,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为电磁兼容与电磁防护(E-mail: liushh@cae.cn)。

(编辑 李莉)

Experimental study of electromagnetic radiation characteristics of pantograph-catenary off-line arcs in high-speed railway

JIN Mengzhe¹, LIU Shanghe^{1,2}, XING Tong³, YANG Caizhi³, LIU Weidong¹, FANG Qingyuan¹, HU Man¹

(1. Hebei Key Laboratory for Electromagnetic Environmental Effects and Information Processing,

Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. National Key Laboratory on Electromagnetic Environment Effects, Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050005, China;

3. Standards and Metrology Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100015, China)

Abstract: The electromagnetic environment of the high-speed railway system is very complicated, and the electromagnetic radiation generated by the pantograph-catenary off-line arcs is one of the most important sources of electromagnetic interference in the high-speed railway system. The high-speed pantograph-catenary relationship experimental bench is used for the simulation experiment of pantograph-catenary off-line discharge under the condition of high current and high speed. The time-domain waveforms of discharge radiation field under different arc currents and vehicle speeds are both measured, and the characteristics of off-line discharge electromagnetic radiation, including the main frequency band, distribution density and typical frequency values, are obtained after applying FFT (Fast Fourier Transform). The variation laws and causes of discharge radiation characteristics along with traction current and driving speed are carried out. The study results show that, under the condition of high current and high speed, the electromagnetic radiation energy of pantograph-catenary discharge is mainly distributed in the frequency range of 0~100 MHz, of which the most densely distributed frequency band is 45~55 MHz, and the electromagnetic radiation intensity of arc initiation is greater than that of arc extinction. In the traction current range of 100~700 A, the amplitude of the discharge radiation field increases with the increase of the traction current. Under the same traction current, the frequency value corresponding to the frequency-domain peak value gradually decreases with the increase of the driving speed. The study results provide experimental data and reference basis for the mechanism research and protection of the electromagnetic radiation interference caused by the pantograph-catenary arc.

Key words: electromagnetic radiation; high-speed railway; electromagnetic interference; electromagnetic environment effect; pantograph-catenary off-line arcs; experiment

附录 A

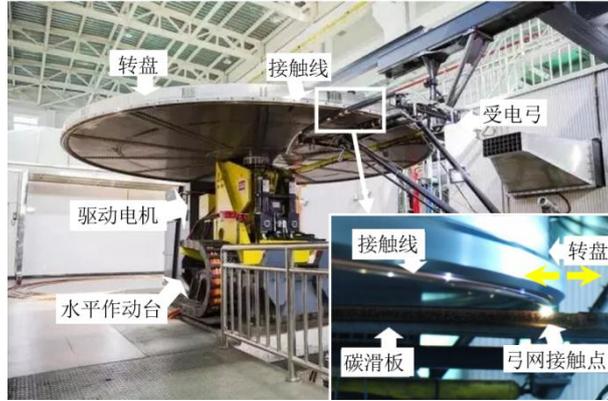


图 A1 高速弓网关系试验台外观及弓网接触细节

Fig.A1 Photo of high-speed pantograph-catenary relationship experimental bench and detail of contact of pantograph and catenary

表 A1 试验材料相关属性

Table A1 Properties of experimental materials

物理属性	试验材料	
	浸铜碳滑板	铜银合金接触线
电阻率 $\lambda/(\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1})$	11.83	0.0177
密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	2.38	8.94
横截面积 S/mm^2	700	120

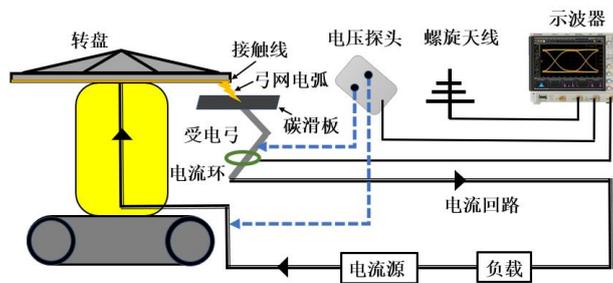


图 A2 试验系统示意图

Fig.A2 Schematic figure of experimental system

表 A2 传感器主要指标

Table A2 Main properties of measuring sensors

测试传感器	品牌	型号	频率范围	量程
钳式电流环	A.H.systems	BCP-619	100 Hz~100 MHz	800 A
差分电压探头	Pintech	N1008B	DC~100 MHz	800 V



图 A3 阿基米德螺旋天线仿真模型及实物图

Fig.A3 Simulation model and actual picture of single-arm Archimedean spiral antenna

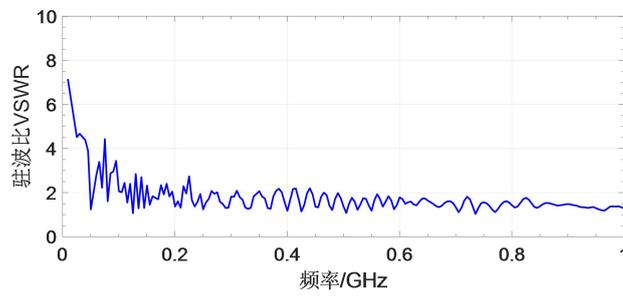
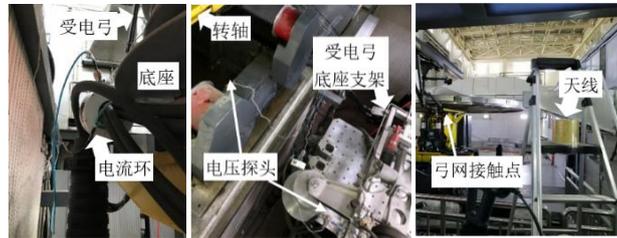


图 A4 阿基米德螺旋天线的驻波比曲线

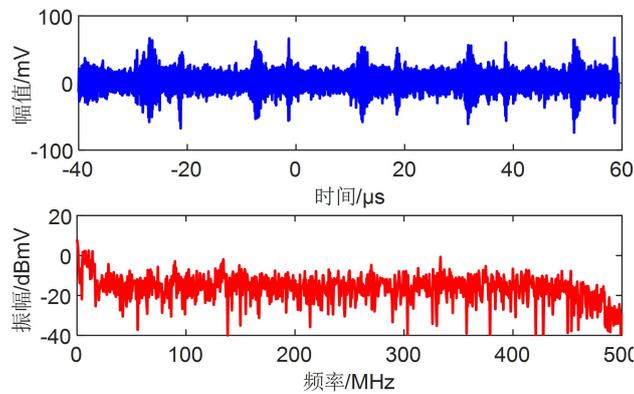
Fig.A4 VSWR curve of single-arm Archimedean spiral antenna



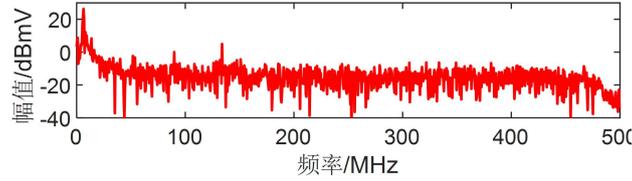
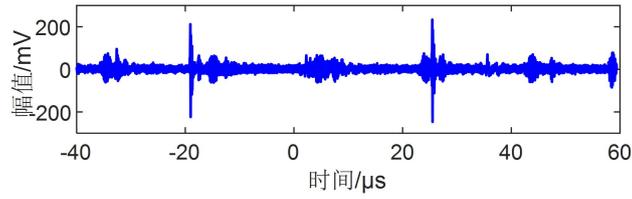
(a) 电流环 (b) 电压探头 (c) 螺旋天线

图 A5 传感器摆放位置

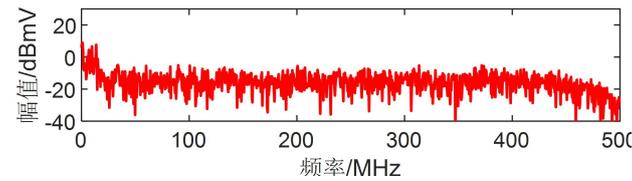
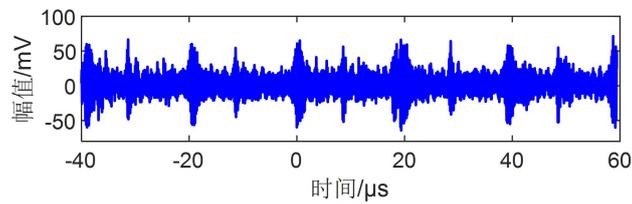
Fig.A5 Placement of sensors



(a) 轮盘静止时空间辐射噪声测试结果



(b) 转盘转速为 450 km/h 时辐射噪声测试结果



(c) 轮盘静止、牵引电流为 700 A 时辐射噪声测试结果

图 A6 不同工况下辐射噪声测试结果

Fig.A6 Test results of radiated noise under different conditions

表 A3 弓网离线放电试验条件

Table A3 Experimental conditions of pantograph-catenary off-linedischarge

可控试验条件	变化值			
牵引电流/A	100	300	500	700
行车速度/(km·h ⁻¹)	150	250	350	450

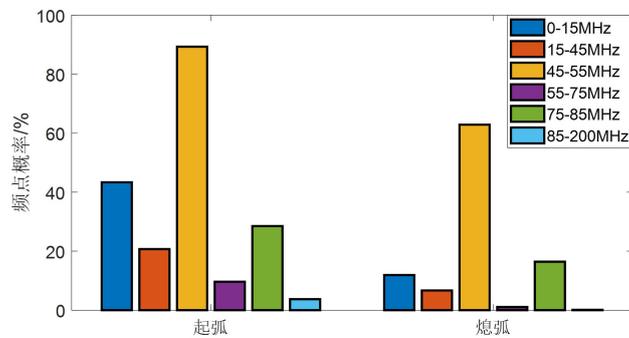


图 A7 辐射振幅高于 10 dB 的频点概率分布

Fig.A7 Distribution of frequency points with radiation amplitude over 10 dB

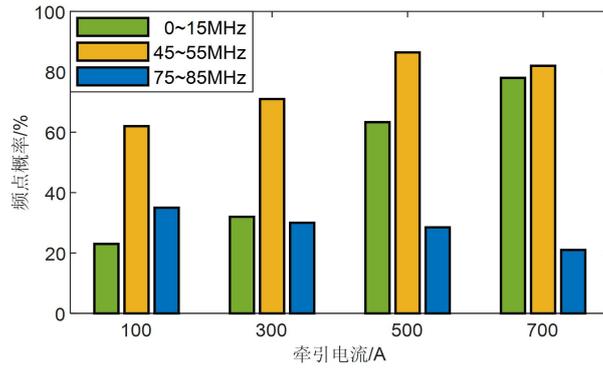


图 A8 不同牵引电流下起弧阶段辐射幅值高于 10 dB 的频点分布情况

Fig.A8 Distribution of frequency points with amplitude over 10 dB during arc initiation stage under different current conditions