

电磁继电器电磁辐射特性的试验研究

胡云枫, 杨芷宁, 李超, 夏竹青, 吴细秀

(武汉理工大学自动化学院, 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 电磁继电器触点的闭合与分断会在被控电路中产生具有丰富高频谐波的电磁干扰,影响汽车控制系统的正常工作。为研究电磁继电器在分合过程中产生的电磁辐射特性,搭建直流模拟触点装置平台进行试验研究,在分析总结电磁继电器电磁辐射干扰产生机理的基础上,重点考察了负载电气参量和气氛环境对电磁继电器电磁辐射特性的影响。研究表明,负载电流对电磁辐射特性的影响占主要地位,而氮气环境中产生的辐射电场频带范围广,幅值高。

**关键词:** 电磁继电器; 电磁辐射特性; 直流模拟触点装置; 电气参量; 气氛环境

**DOI:** 10.12067/ATEEE1811029      **文章编号:** 1003-3076(2020)03-0049-06      **中图分类号:** TM572.6

1 引言

在汽车继电器中,直流电磁继电器是应用最为广泛的一种继电器<sup>[1]</sup>。继电器触点的闭合与分断会在被控电路中产生陡峭的电流或电压的上升沿和下降沿。若继电器外部有类似天线的结构,一方面突变的电压、电流会以暂态电磁场的形式向周围空间辐射能量<sup>[2]</sup>;另一方面还会通过电容或电感耦合到原控制回路或操作回路中去,从而对控制回路产生电磁干扰。这些干扰电磁波包含很高的频率成分,具有很宽的频带,且具有任意类型的极化波状态<sup>[3]</sup>。已有研究表明,电磁继电器的电磁干扰主要来自线圈中突变磁场和触头分合过程中产生的电弧,它与电磁继电器的结构类型、材料、正常工作的负载、电压电流的大小以及电磁继电器本身的磨损和老化等因素有关<sup>[4]</sup>。

为研究直流电磁继电器在触点分合过程中产生的电磁辐射特性,搭建直流模拟触点装置试验平台,开展直流继电器操作电磁干扰试验。试验重点考察继电器负载电气参量(负载电压、电流)和气氛环境(真空、空气、氮气、氩气)对辐射电磁特性的影响。

2 继电器电磁干扰形成机理

通常一个继电器由供电控制电路和开关组成,

其等效电路如图1所示<sup>[5]</sup>。其中, $L$ 、 $C$ 、 $R$ 分别为继电器线圈的电感、层间分布电容和电阻; $L_0$ 、 $C_0$ 、 $R_0$ 分别为导线分布电感、分布电容和电阻。

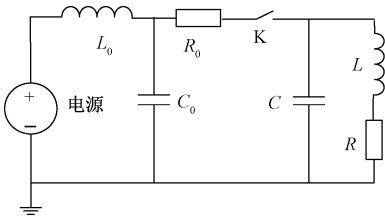


图1 电磁继电器等效电路

Fig.1 Equivalent circuit of electromagnetic relay

当继电器触点分断时,由于电感中的电流不能突变,此电流流向电容 $C$ ,对其反向充电,电容 $C$ 两端出现暂态过电压,此过电压与电源电压叠加后加在开关触头两端,当触头间隙电压高于介质击穿电压时,触头间产生电弧,使电路重新导通, $C$ 上电压迅速向电源放电,形成高频电流,当电流过零时电弧熄灭,两端又出现过电压。上述过程重复发生,直至电容上的电压不能使触头间隙击穿为止。

试验研究指出,辐射干扰是继电器电磁干扰的主要形式。通过分析,电磁继电器在触点分合过程中的辐射干扰源主要有<sup>[6]</sup>:

(1)继电器线圈是感性负载,在电源通断瞬间会产生具有陡波前的浪涌过电压,即存在不为零的

收稿日期: 2018-11-16  
基金项目: 国家自然科学基金项目(51107093)  
作者简介: 胡云枫(1996-),男,湖北籍,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术;  
吴细秀(1976-),女,湖北籍,副教授,博士,研究方向为高电压与绝缘技术(通讯作者)。

$du/dt$ 、 $di/dt$ , 就会产生变化的电场和磁场向周围空间辐射能量。

(2) 在继电器接触系统中, 当触点闭合或断开瞬间, 触点间将会产生电弧, 形成陡峭的浪涌冲击电压, 激励其线圈回路、磁路的振荡, 这些振荡形成辐射干扰传导到系统别的回路中, 成为辐射干扰源。

(3) 继电器接触簧片在触头接通或断开瞬间, 因机械反力特性而产生回弹跳, 造成触头间反复吸合和断开, 在触头间隙燃弧、熄灭、再燃弧, 反复进行, 最终形成快速瞬变脉冲群而产生电磁辐射干扰。

(4) 继电器电弧具有金属相电弧和气相电弧两个发展过程, 考虑到这两种电弧在燃烧运动过程中是一种热等离子体, 是一种导电的连续电介质, 带电粒子会产生暂态电磁场, 因此继电器电弧本身也是一种辐射干扰源。

3 继电器电磁辐射干扰的现场测量

3.1 试验原理

触点模拟装置试验原理如图 2 所示。由于继电器分断阻性负载时产生的电磁干扰最严重<sup>[7]</sup>, 因此试验重点考察阻性负载下的电磁辐射干扰情况。

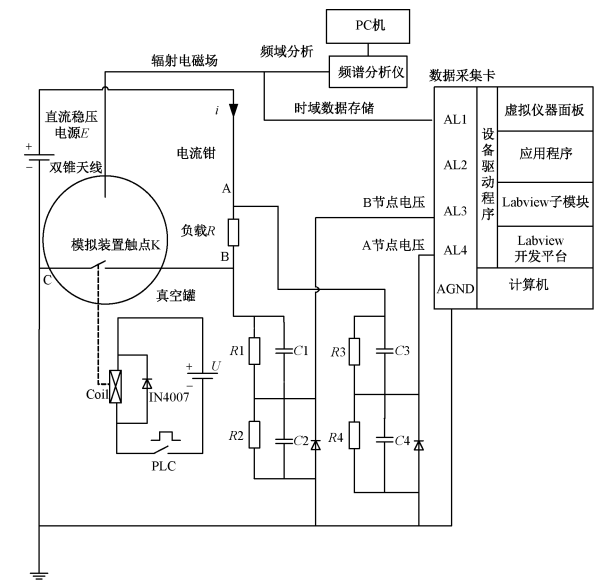


图 2 直流模拟触点装置试验原理图  
Fig.2 Diagram of DC electromagnetic relay experimental device for contact operation

试验回路采用直流稳压电源  $E$  供电, 使用可调电阻箱作为回路的阻性负载  $R$ , 通过调节电阻值来改变回路电流, 主回路的开断和导通由直流模拟触点装置  $K$  控制。直流模拟触点装置在触点分合过程中产生的电磁辐射干扰信号由双锥天线进行采

集, 并送入频谱分析仪进行频域分析, 同时由数据采集卡记录其时域波形。试验采用分压器测量触点两端电压, 其中  $B$  点测量电压是继电器触头间隙电弧电压, 并由  $A$ 、 $B$  两点电压差得到负载电阻两端电压, 由此计算回路电流, 获得电弧电流。

3.1.1 直流模拟触点装置

图 3 为直流模拟触点装置。直流模拟触点装置为常闭触点, 触头分断与闭合动作由 PLC 程序控制, 当电磁线圈两端加上电压时, 电磁线圈有电流流过, 从而产生电磁效应, 该电磁力使触点模拟装置的触头分开以模拟继电器触头的分断; 当线圈断电后, 电磁铁的吸力随之消失, 动触头在弹簧的反作用力下与模拟触点装置的静触头吸合, 以模拟继电器触头的闭合。

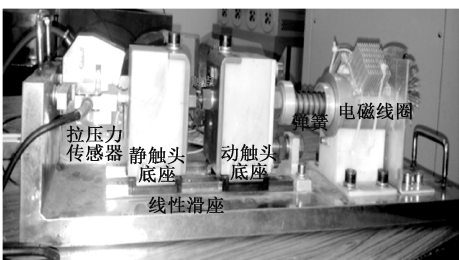


图 3 直流模拟触点装置实物图  
Fig.3 Picture of DC contact experimental device

该直流模拟触点装置可方便地改变触头两端负载电压、电流的大小, 触头间的开距, 触头分断速度, 同时可外加激光位移传感器、方便更换触头等。

3.1.2 辐射电场的测量

已有研究结果表明<sup>[8]</sup>, 电磁继电器的电磁干扰频带范围很宽, 约为  $0.1 \sim 1000\text{MHz}$ 。为此, 试验中选用测量频带范围为  $30 \sim 1000\text{MHz}$  双锥天线对直流模拟触点装置的辐射电场进行测量<sup>[9]</sup>。在测量时, 双锥天线将空间电场信号转换成电压信号或者功率信号, 为了将在频谱仪输入端测得的电压信号转化成实际的场强, 必须在每个测量读数上加上天线因子, 如式(1)所示<sup>[10]</sup>。如果测得是功率信号, 则需要先将功率信号转化成电压信号, 再进行计算。

$$E_{fs} = E_{ant} + AF + CL \tag{1}$$

式中,  $E_{fs}$  为信号的实际电场强度 (dB);  $E_{ant}$  为由天线接收的电压信号 (dB);  $AF$  为天线因子 (dB/m);  $CL$  为缆线损耗 (同轴线的衰减值) (dB)。

真空罐中直流模拟触点装置和双锥天线如图 4 所示。现场测量时, 受空间约束, 双锥天线与触点间的距离约为  $35\text{cm}$ 。在电磁波  $30 \sim 10000\text{MHz}$  频段范围属于近场测量。

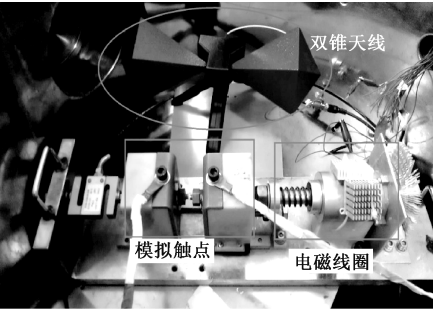


图4 真空罐中直流模拟触点装置和双锥天线

Fig.4 DC contact experimental device in vacuum tank and double cone antenna

3.2 试验条件

为了满足未来汽车发展对功率的要求,汽车电气系统的电压将由 14V 提高到 42V。继电器作为汽车电气系统的主要开关设备,开发 42V 汽车继电器是必然的发展趋势。因此试验选择 14V、28V 及 42V 电压作为模拟触点装置负载电压,每种电压下提供 5A、10A、15A、20A、25A、30A 负载电流。

试验时,需要将直流模拟触点装置放入真空罐中,以考察不同气氛环境下,触点分合过程中产生的电磁辐射特性。选择的气氛环境有空气、真空、氮气及氩气,气氛填充气压为 1 个大气压 (101.325kPa)。装置触点采用铆钉状 AgNi 触点 (如图 5 所示),尺寸为  $\Phi 6.0\text{mm}\times 1.5\text{mm}$ ,触头开距 2mm。触头通断周期为 1s 通、2s 断。

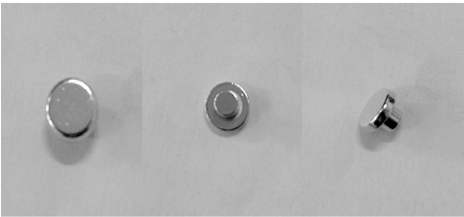


图5 实验用 AgNi 触点实物图

Fig.5 Picture of AgNi contact for experiment

为了考虑环境噪声的影响,需要在进行模拟触点装置电磁辐射测量之前对装置断开负载、电磁线圈不带电时的环境噪声进行测量。正式测量时,选择某一种气氛条件,按照负载电压等级从小到大、电流从小到大的顺序进行。在每一个电压、电流等级下,触头带电通断 50 次,若触点发生熔焊、拒合等故障则立即结束试验。由于触点模拟装置分合频率较高,目前频谱仪还不能够将触点分断和闭合时电磁辐射分开进行测量,试验时频谱仪采集每种试验条件下 50 次操作 (分断和闭合) 中的辐射最大值。

4 电磁辐射特性分析

直流模拟触点装置电磁辐射特性分析主要从负载电气参量和气氛环境对触点开合过程中产生的电磁辐射特性的影响进行。

4.1 负载电气参量对电磁辐射特性的影响

4.1.1 负载电压对电磁辐射特性的影响

在空气气氛条件下,保证某一负载电流不变,考察不同的负载电压 14V、28V、42V 对电磁辐射特性的影响。其中,负载电流为 20A 下辐射电场的频域波形如图 6 所示。由图 6 可知,在相同负载电流,14V、28V、42V 负载电压下,由模拟触点装置产生的辐射电场主频主要分布在 30~500MHz 范围内,其中在 30~100MHz 辐射最为强烈,波形基本遵循频率越高,电场强度越低的规律。另外,这三种电压等级下辐射电场在 900MHz 和 950MHz 频点上均具有较强分布。从辐射电场频率分布范围分析,14V 电压等级下,辐射电场频率范围最广,其次为 42V 电压等级,28V 电压等级下的辐射电场频率最为单一。这三种电压等级下,辐射电场强度最大值如表 1 所示。从最大辐射电场强度分析 14V>28V>42V。从整个波形综合考虑,这三种电压等级下,辐射干扰强烈程度依次为 14V>42V>28V。

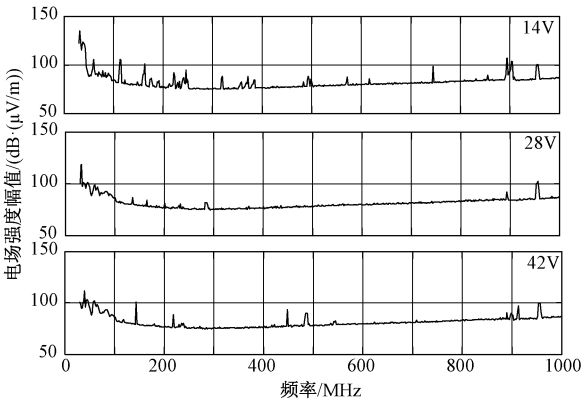


图6 电流不变时不同电压下辐射电场强度频谱分析

Fig.6 Spectrum analysis of radiation electric field intensity at different voltage level with unchanged current

表 1 负载电流为 20A 时不同电压等级下辐射电场强度最大值			
Tab.1 Maximum intensity of DC relay EMI at different voltage levels with load current 20A			
负载电压/V	14	28	42
频率/MHz	31.67	33.33	40.00
幅值/(dB·(μV/m))	135.0	118.5	111.3



5A、10A、15A、25A、30A 负载电流下,电压对辐射电场强度的影响亦遵循上述规律。但不能得到负载电压大小对电磁辐射频率范围规律性的影响。

4.1.2 负载电流对电磁辐射特性的影响

在空气气氛条件下,保证某一负载电压不变,考察不同的负载电流 5A、10A、15A、20A、25A、30A 对电磁辐射特性的影响。其中,负载电压为 14V 时辐射电场的频域波形如图 7 所示。由图 7 可知,在相同负载电压,5A、10A、15A、20A、25A、30A 负载电流下,辐射电场主频同样主要分布在 30~500MHz 范围内,在 500~1000MHz 频段分布较弱。波形也基本遵循频率越高,电场强度越低的规律。从辐射电场频率分布范围分析,5A 负载电流下的辐射电场频率范围最广,25A 负载电流下的频率范围最小,但是不能得到负载电流大小对电磁辐射频率范围规律性的影响。在不同负载电流下,辐射电场强度最大值如表 2 所示。由表 2 可知,20A 时辐射电场强度的最大幅值最大,15A 时最小,同样不能得到负载电流大小对辐射电场强度规律性的影响。

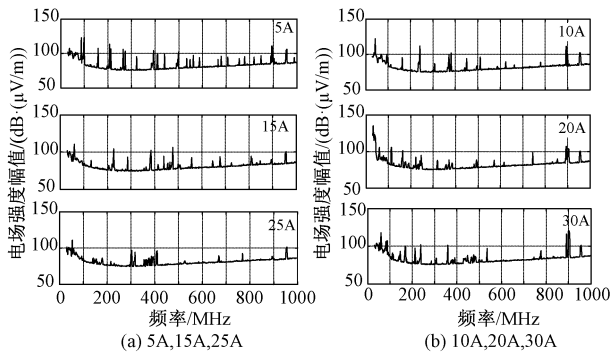


图 7 电压不变时不同电流下辐射电场强度频谱分析  
Fig.7 Spectrum analysis of radiation electric field intensity at different current level with unchanged voltage

表 2 负载电压为 14V 时不同负载电流下  
辐射电场强度最大值

Tab.2 Maximum value of radiation electric field intensity under different load current at load voltage of 14V						
负载电流/A	5	10	15	20	25	30
频率/MHz	88.33	43.33	60.00	31.67	55.00	60.00
幅值/(dB·(μV/m))	122.7	122.1	110.5	135.0	110.7	117.9

4.1.3 恒定负载功率时电磁辐射特性分析

在空气气氛下,恒定功率选取  $P=420\text{W}$ ,对应各种电压等级下的电压及电流值分别为:14V/30A、28V/15A、42V/10A,其辐射电场的频域波形如图 8 所示。由图 8 可知,从辐射电场频率分布范围分析,

14V/30A 的辐射电场的频率范围最广,其次为 42V/10A,最小为 28V/15A。辐射电场强度最大值具有如下特性:14V/30A>42V/10A>28V/15A。由此可得,直流模拟触点装置在触点分合过程中产生的辐射电场由负载电压和负载电流共同决定。

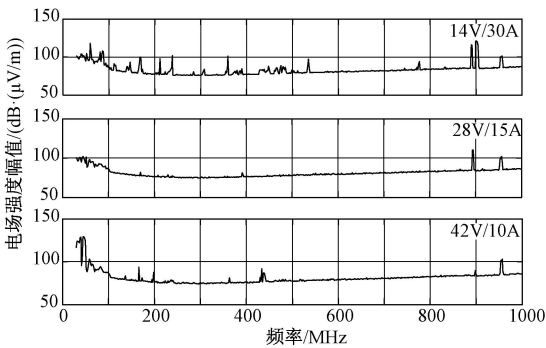


图 8 负载功率不变时辐射电场强度频谱分析  
Fig.8 Spectrum analysis of radiation electric field intensity at constant load power

由电磁辐射原理可知,电流激励源是辐射产生的必要条件。相对而言,负载电流对辐射电场强度及频率范围的影响更大,负载电流较大时,其辐射电场强度较大,频率范围较广。

4.2 气氛环境对电磁辐射特性的影响

考察气氛环境对直流模拟触点装置电磁辐射特性的影响时,选用空气、真空、氮气和氩气四种气氛环境<sup>[11]</sup>,空气、氮气和氩气填充气压为 1 个大气压,真空气氛下气压为  $1\times10^{-5}\text{Pa}$ 。直流模拟触点装置负载电压、负载电流为 14V、10A。空气、真空、氮气、氩气四种气氛环境下的辐射电场频域分析波形如图 9 所示。由图 9 可知,在其他条件相同的情况下,氮气环境下辐射电场频率范围最广,其次为真空环境和空气环境,而氩气气氛下的辐射电场在整个频带范围内几乎没有分布。氮气环境下,辐射电场在 30~600MHz 频带范围内,空气和真空环境下主要分布在 30~500MHz 频带范围内。在每种气氛环境下,其主要频率点上的电场幅值如表 3 所示。辐射电场强度具有如下顺序:空气>真空>氮气>氩气。

4.3 电磁辐射特性

直流模拟触点装置在触点分合过程中产生的辐射电场具有如下特性:

(1)在空气和真空环境下,辐射电场主频主要分布在 30~500MHz 范围内,在氮气环境下,主要分布在 30~600MHz 范围内。这三种环境中,辐射电场在 30~100MHz 频段内最为强烈。

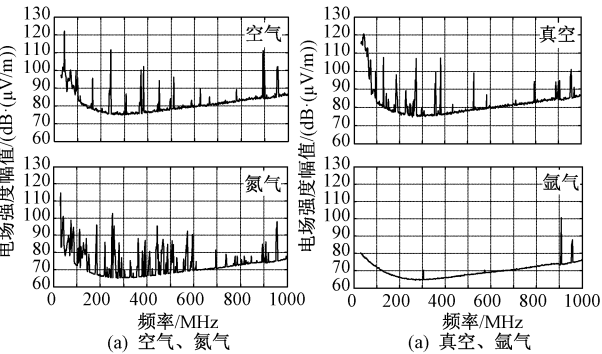


图9 不同气氛环境下辐射电场强度频谱分析

Fig.9 Spectrum analysis of radiation electric field intensity in different atmosphere environment

表3 负载电压14V时不同气氛下辐射电场强度最大值

Tab.3 Maximum value of radiation electric field intensity under different atmosphere environment at load voltage of 14V

介质	辐射电场	5A	15A	20A	25A	30A	35A
空气	频率/MHz	43.33	241.7	381.7	511.7	893.0	956.7
	幅值/(dB·(μV/m))	122.1	101.9	102	96.14	110.9	101.9
真空	频率/MHz	41.67	128.3	273.3	381.7	526.7	956.7
	幅值/(dB·(μV/m))	120.6	107.6	107.1	107.3	99.02	101.0
氮气	频率/MHz	31.67	75.00	185.0	253.3	445.0	-
	幅值/(dB·(μV/m))	114.8	98.84	96.06	102.8	95.46	97.81
氩气	频率/MHz	30.00	305	908	956.7	-	-
	幅值/(dB·(μV/m))	80.35	70.48	100.4	87.73	-	-

(2)所有气氛环境下,辐射电场基本遵循频率越高,电场强度越低的规律。

(3)负载功率相同时,触点分合过程中产生的辐射电场由负载电压和负载电流共同决定。相对而言,负载电流对辐射电场强度及频率范围的影响更大,负载电流较大时,其辐射电场强度较大,频率范围较广。

(4)气氛环境对直流模拟触点装置电磁辐射特性影响十分显著。相对而言,氮气环境下,触点分合过程中产生的辐射电场频带范围广,幅值较高,其次

为真空环境和空气环境。氩气环境下,在整个频带范围内几乎没有显著分布,可以认为氩气对辐射电场具有较强的吸收作用。

5 结论

直流电磁继电器在触点分合过程中产生的电磁辐射有着频率分布广、幅值大(最大幅值可达122.7dB·(μV/m))的特征。实验测得的辐射频率范围为30~1000MHz,而汽车电子控制单元ECU的工作频率正好在此范围内,故继电器开合产生的辐射极有可能干扰ECU的正常工作,进而影响汽车的安全运行。本文研究主要结论如下:

- (1)继电器操作过程中产生的辐射电场频率分布很广,在不同气氛条件下其频率分布在30MHz~1GHz范围内变化。
- (2)环境介质对继电器电场辐射特性影响显著,辐射电场强度具有如下顺序:空气>真空>氮气>氩气。
- (3)辐射电场的大小由继电器功率决定,并且相同条件下,继电器辐射特性受电流影响更大;辐射电场场强变化基本遵循辐射频率越高,场强越小的变化规律。

致谢:感谢华中科技大学李震彪教授课题组在试验过程中给予的帮助!感谢中兴通讯股份有限公司闫格工程师在数据分析中所做的工作!

参考文献 (References):

[1] 魏梅芳,吴细秀,阳靖,等. (Wei Meifang, Wu Xixiu, Yang Jing, et al.). 基于Matlab的继电器电磁干扰数学模型研究 [J] (Research of mathematical model of DC relay's electromagnetic interference based on MATLAB) [J]. 低压电器 (Low Voltage Apparatus), 2011, (21): 5-9.

[2] 吴细秀,肖旻,袁佑新 (Wu Xixiu, Xiao Yang, Yuan Youxin). 直流继电器电弧电磁辐射模型初探 (A preliminary study on mathematic model of electromagnetic radiation caused by relay arc) [J]. 低压电器 (Low Voltage Apparatus), 2010, (14): 10-14, 44.

[3] 李岐新,刘青 (Li Qixin, Liu Qing). 电磁继电器的电磁干扰现象与抑制方法 (Electromagnetic disturbance of electromagnetic relay and its restraint method) [J]. 继电器 (Relay), 1998, 26 (1): 51-57.

[4] 梁飞 (Liang Fei). 电磁继电器电磁干扰的负载特性 (Loading characteristics of electromagnetic relay's EMI) [C]. 第15届全国电磁兼容学术会议论文集 (CIC

- EMC). 2005. 217-219.
- [5] 陈曦, 陆俭国, 许浩 (Chen Xi, Lu Jianguo, Xu Hao). 继电器引起的电快速瞬变脉冲群强扰及抗扰度措施 (Disturbance rejection degree and countermeasures to the disturbance of electric fast transient pulse caused by relays) [J]. 继电器 (Relay), 2001, 29 (10): 70-73.
- [6] 赵青, 刘述章, 童洪辉 (Zhao Qing, Liu Shuzhang, Tong Honghui). 等离子体技术及应用 (Plasma and its application) [M]. 北京: 国防工业出版社 (Beijing: National Defense Industry Press), 2009.
- [7] 冯晓丽, 王智勇, 杨紫明, 等 (Feng Xiaoli, Wang Zhiyong, Yang Ziming, et al.). 基于 HHT 的单个电弧辐射电磁噪声时频分析 (Time-frequency analysis of electromagnetic noise produced by single arc based on HHT) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy). 2018, 37 (4): 57-63.
- [8] 闰荣格, 郜玉香, 贲彤, 等 (Yan Rongge, Gao Yuxiang, Ben Tong, et al.). 直流偏磁下磁饱和电抗器铁心电磁振动分析 (Analysis on electromagnetic vibration of magnetic saturation reactor iron-core under DC magnetic bias) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (8): 27-33.
- [9] 闫格, 吴细秀, 田芸, 等 (Yan Ge, Wu Xixiu, Tian Yun, et al.). 开关电弧放电电磁暂态干扰研究综述 (Review on the research of electromagnetic transient interference caused by arc discharge due to switchgear operation) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2014, 50 (2): 119-130.
- [10] 和军平, 纪科健, 付琦, 等 (He Junping, Ji Kejian, Fu Qi, et al.). 开关电源远场共模电磁辐射模型及其特性研究 (Common mode far field radiation model & its characteristics of a flyback power supply) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2012, 31 (3): 25-30.
- [11] 李晓辉 (Li Xiaohui). 继电器电磁干扰的诊断和抑制措施 (Diagnosis and suppression methods of EMI caused by relay) [J]. 航天器工程 (Spacecraft Engineering), 2006, 15 (4): 60-63.

## Study on electromagnetic radiation characteristics of electromagnetic relay

HU Yun-feng, YANG Zhi-ning, LI Chao, XIA Zhu-qing, WU Xi-xiu  
(School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** High frequency electromagnetic interference is occurring during the automotive DC relay operation, which will result in vehicle control system malfunction. To research the characteristics of electromagnetic interference caused by DC relay operation arc, a contact experimental platform to simulate DC relay making and breaking is built. Then the electromagnetic interference experiment is carried out with different load current, different load voltage and different atmosphere environment (air, vacuum, nitrogen and argon). The bi-conical antenna is applied to capture the corresponding radiation field of the electromagnetic interference experiment. The measurement results show that the frequency of DC relay operation radiation is changing at the range of 30~600MHz and the most dramatically variation of radiation field is occurring at 30~100MHz region. It can be easily found that the amplitude of the radiation field is dependent on the power of the relay, which means the load current and load voltage are working together to determine the characteristics of the radiation field caused by relay arc discharge. However, compared with load voltage, the load current has more significant influence on the radiation intensity and frequency. The study results of gas medium influence on the radiation characteristics of relay arc discharge indicate that for the four gas medium, air, vacuum, nitrogen and argon, the broadest frequency and highest radiation field is occurring in the nitrogen gas.

**Key words:** electromagnetic relay; electromagnetic radiation characteristics; DC contact experimental device; electrical parameter; atmosphere environment