

文章编号:1008-1534(2025)02-0172-10

高空核爆电磁脉冲辐照下货运高铁内部 电场环境分析

张岩¹, 展滔¹, 王奕洋², 金梦哲³, 任泽瑄¹

(1. 河北科技大学电气工程学院, 河北石家庄 050018; 2. 河北科技大学环境科学与工程学院, 河北石家庄 050018; 3. 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)

摘要:为提升复杂电磁环境下货运高铁车厢内部电磁敏感设备的安全性,以高空核爆电磁脉冲(high-altitude electromagnetic pulse, HEMP)为激励源,使用场路耦合的方法对货运高铁车厢内含有直流-直流(direct current to direct current, DC/DC)转换器的电源机箱内部PCB的电场强度及感应电流进行分析。首先,在电磁仿真软件中建立货运高铁电场环境仿真模型;其次,将机箱放置于车厢内部不同位置,使用HEMP从上部和侧面2个方向对车厢进行辐照,采用有限积分法(FIT)预测HEMP辐照下车厢内部的电场分布并计算机箱内部感应电场强度;然后,使用法兰同轴装置法分析在30~300 MHz内机箱铝合金材质的屏蔽效能;最后,利用场路耦合的方法得到机箱内部PCB电路板的电场强度以及感应电流。结果表明:电场峰值为50 kV/m的HEMP,在距离核爆点水平距离30 km处侧面辐照车厢时,车厢中间靠近车窗位置的电场强度较大;3A21铝含量机箱可有效抑制电场干扰;机箱内部PCB电路板上感应电流峰值为1.9 mA,符合GB 17625.1—2022标准要求;机箱内部PCB电路板上电场强度峰值为270 V/m时,PCB电路工作正常,没有偏离规定的指标值,符合GJB 151B—2013标准中RS103电场辐射敏感度要求。研究结果可为HEMP辐照条件下高铁货物运输电的磁防护提供依据。

关键词:电磁学;货运高铁;高空核爆电磁脉冲;电场环境;屏蔽作用

中图分类号:TN972;X123 文献标识码:A DOI: 10.7535/hbgykj.2025yx02009

Analysis of the internal electric field environment of freight high-speed rail irradiated by high-altitude electromagnetic pulse

ZHANG Yan¹, ZHAN Tao¹, WANG Yifeng², JIN Mengzhe³, REN Zexuan¹

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3. Hebei Key Laboratory of Electromagnetic Environmental Effects and Information Processing, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

收稿日期:2024-05-18;修回日期:2025-01-18;责任编辑:丁军苗

基金项目:中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(L2023G011);河北省高等学校科学技术研究项目(ZD2021202);河北省大学创新创业训练计划项目(S202410082012)

第一作者简介:张岩(1983—),男,河北石家庄人,副教授,博士,主要从事电磁环境效应与电磁兼容方面的研究。

E-mail: yanyanfly163@163.com

张岩,展滔,王奕洋,等.高空核爆电磁脉冲辐照下货运高铁内部电场环境分析[J].河北工业科技,2025,42(2):172-181.

ZHANG Yan, ZHAN Tao, WANG Yifeng, et al. Analysis of the internal electric field environment of freight high-speed rail irradiated by high-altitude electromagnetic pulse[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2025, 42(2): 172-181.

Abstract: To improve the safety of electromagnetic sensitive equipment in the carriage in the complex electromagnetic environment, a high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) was used as the excitation source, and the electric field-circuit coupling method was used to analyze the electric field strength and induced current of the PCB inside the power supply chassis containing a DC/DC convert in the freight high-speed rail carriage. Firstly, the simulation model of the electric field environment of the freight high-speed rail was established in the electromagnetic simulation software; Secondly, the chassis was placed at different positions inside the carriages, and the HEMP was used to irradiate the carriages from both the upper and side directions. The finite integration method (FIT) was used to predict the electric field distribution inside the carriages under the irradiation of the HEMP and to calculate the strength of the induced electric field inside the computer chassis; Then, the shielding effectiveness of the aluminum alloy material of the chassis in the range of 30~300 MHz was analyzed using the flange coaxial device method. Finally, the electric field strength of the PCB circuit board inside the chassis and the induced current were obtained using the field-circuit coupling method. The results show that for HEMP with a peak electric field of 50 kV/m, the electric field intensity near the window in the middle of the compartment is higher when irradiated on the side of the compartment at a horizontal distance of 30 km from the nuclear explosion point; 3A21 aluminum alloy sample chassis can effectively inhibit the electric field interference; The peak induced current on the PCB circuit board inside the chassis is 1.9 mA, which is in line with the requirements of GB 17625.1—2022 standard; When the peak value of electric field intensity on the PCB circuit board inside the chassis is 270 V/m, the PCB circuit works normally without deviating from the specified index value, meeting the requirements of RS103 electric field radiation sensitivity of GJB 151B—2013 standard. The research results can provide a basis for the electromagnetic protection of high-speed rail freight transportation under HEMP irradiation conditions.

Keywords: electromagnetics; freight high-speed rail; high-altitude electromagnetic pulse; electric field environment; shielding effect

高铁货运列车在军事和民用领域的大宗物资运输方面起着重要的作用^[1-3]。在高铁运输过程中,列车上的货物会受到不同类型、不同程度的电磁干扰,其中高空核爆电磁脉冲(high-altitude electromagnetic pulse, HEMP)具有巨大的破坏力^[4]。金属机箱可屏蔽一定的电场干扰,但由于通风孔、观测窗等孔缝的存在会导致机箱电场屏蔽能力下降,使机箱内的敏感电子设备受到干扰^[5]。因此,HEMP辐照下敏感设备电场屏蔽防护问题一直是电磁兼容设计过程中重点关注的技术问题。

近年来,国内一些学者在 HEMP 电场防护领域进行了一系列的理论研究和实验分析。李志瑞等^[6]证实了使用有效的电场屏蔽措施可避免 HEMP 对无线通信设备产生损伤,通过试验表明了防护后的设备性能指标均在合格范围内,满足 HEMP 环境要求;陈书恒等^[7]提出了空域防护、频域防护、能域防护等 HEMP 电场屏蔽防护的建议和手段,抑制了 HEMP 对武器装备电子信息系统的影响,提高了武器装备在未来战场上的可靠性;王伟等^[8]研究了 HEMP 照射下车辆表面感应电流的变化情况,得出车辆表面的感应电流最大值与其结构复杂度呈正相关变化的结论;聂坤林等^[9]

分析了某型军用车辆在高空核爆炸环境下的电磁脉冲耦合特性,得出 HEMP 电场条件下电台能够正常工作,基本不影响通讯的结论;肖冬萍等^[10]分析了 HEMP 对便携式医用监护仪的辐射效应,表明了 HEMP 会对监护仪的工作造成严重影响,加强监护仪外壳的屏蔽能力对于提升监护仪的抗电磁脉冲能力具有重要的作用。上述研究多集中在智能化武器装备、军用车辆、医用监护仪等领域,有关高铁车厢这一典型运输工具在 HEMP 辐照下的电场分布规律研究相对较少,且缺少对电场分布规律的定量分析,对于电场防护的研究缺少屏蔽材料的屏蔽效果评估。

基于此,本文计算了典型 HEMP 在 CRH400BF 高铁列车二等车车厢内部的电场分布,并通过法兰同轴装置测量了铝合金材质机箱的电场屏蔽效能,探究了 HEMP 在含有直流-直流(direct current to direct current, DC/DC)转换器的电源机箱内部 PCB 电路中产生的电场干扰效应,为电磁防护研究提供参考。

1 HEMP 分析与高铁车厢建模

1.1 HEMP 特性

HEMP 是在高空核爆炸过程中由瞬发射线引起的瞬态电磁波传播,由于爆炸点处的电磁脉冲到

列车的距离较远(爆炸中心高度距离地面 30 km 以上),当球面波传递到地面附近时可视为平面波^[11-13]。迄今为止,HEMP 波形表达式已有很多不同的标准。根据 IEC 国际电工委员会颁布的 IEC61000-2-9 高空核爆电磁脉冲的标准^[14],HEMP 电场强度使用双指数解析函数近似表示为

$$E(t) = E_0 k (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}), \quad (1)$$

式中: $E(t)$ 为随时间变化的脉冲电场; E_0 为双指数函数的峰值电场强度,一般取 $E_0 = 50 \text{ kV/m}$; k 是电场强度的修正系数,取 $k = 1.3$; α 和 β 分别为波形的上升沿和下降沿的特征参数,取 $\alpha = 4 \times 10^7 / \text{s}$, $\beta = 6 \times 10^8 / \text{s}$, t 为 HEMP 持续的时间,一般为了保证电场脉冲的正极性,参数 α, β 和 t 应当满足 $\beta \geq \alpha \geq 0, t \geq 0$ 。在此参数下,HEMP 电场时域波形及参数指标如图 1 所示,脉冲上升沿为 $1.8 \sim 2.8 \text{ ns}$,半高宽为 $23 \pm 5 \text{ ns}$ 。

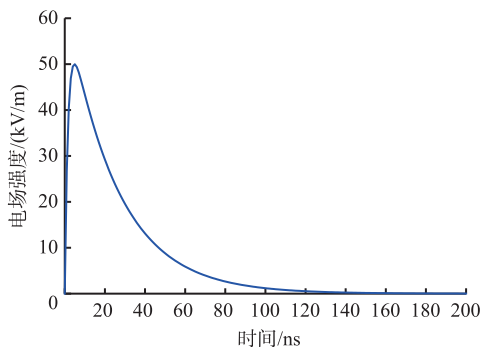


图 1 HEMP 电场时域波形

Fig. 1 Time-domain waveform of HEMP electric field

对 HEMP 时域波形进行傅里叶变化,得到电场强度频域 $E(\omega)$,如公式(2)所示。

$$E(\omega) = kE_0 \left(\frac{1}{\alpha + j\omega} - \frac{1}{\beta + j\omega} \right), \quad (2)$$

式中: $j\omega$ 为 HEMP 的负数频率。HEMP 电场频域波形如图 2 所示。

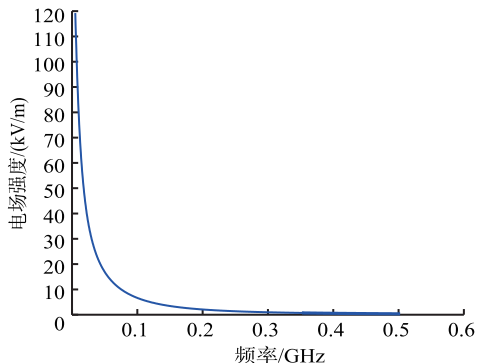


图 2 HEMP 电场频域波形

Fig. 2 Waveform of HEMP in the electric field frequency domain

根据频域和时域波形图可知,HEMP 上升时间短,为纳秒级,脉冲所携带的能量占比主要在 $0 \sim 100 \text{ MHz}$ 。这种高频超短波能通过天线、线缆和孔缝等耦合进车辆^[15-16]。快速变换的信号可能对车厢内部的电磁环境造成较大影响。

1.2 车厢模型建立

客运高铁改装为货运高铁时,会对车厢内部座椅进行拆卸以得到更大的货物运输空间,因此,建立复兴号 CRH400BF 高铁二等车车厢仿真模型需对车厢整体结构进行简化,将车厢内部座椅、设备架和行李架等部件删除,保留车厢整体外形,所建货运高铁二等车车厢仿真模型如图 3 所示,车厢仿真模型尺寸如图 4 所示。

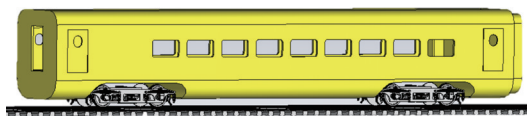
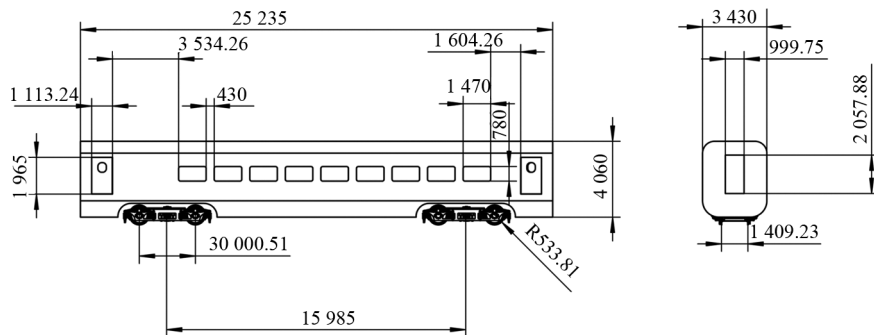


图 3 复兴号 CRH400BF 所改货运高铁二等车车厢仿真模型图

Fig. 3 Simulation model of second-class compartment of freight high-speed rail modified from Fuxing CRH400BF high-speed rail



单位: mm

图 4 车厢仿真模型尺寸图

Fig. 4 Size diagram of compartment model

本文研究的高铁二等车车厢尺寸:长度为 25 235 mm,高度为 4 060 mm,宽度为 3 430 mm。车厢整体材料为铝合金,电导率为 3.57×10^7 S/m,相对介电常数为 1。车厢两侧开有 9 对车窗,与实际高铁车窗数量保持一致。每个矩形车窗尺寸:长度为 1 470 mm,厚度为 50 mm,高度为 780 mm,车窗间距为 430 mm。前后车厢连接处车门和车窗材料为钢化白玻璃(内侧镀单向透视膜)、PVB 隔音层、氩气层、防爆膜、钢化灰玻璃。车轮的半径约为 533 mm,轮对左右车轮之间距离约为 1 409 mm,同一转向架前后车轮之间的距离为 3 000 mm,列车前后转向架之间的距离为 15 985 mm。车厢内部空间填充介质为空气,并将前后车门、车窗等玻璃材料定义为空气。

建立车厢模型后将模型导入到电磁仿真软件 CST 中进行 HEMP 电磁辐射下车厢内部电场环境仿真分析。

2 车厢内部电场环境仿真分析

2.1 不同辐照方向下车厢内部电场环境

根据“1.1”项下,核爆发生在距货运高铁 30 km 以上处,HEMP 以 50 kV/m 的最大电场强度到达地面并以平面波形式向四周传播。HEMP 从货运高铁前部辐照,电场穿过一等车厢到达二等车车厢

造成电场衰减。本文研究 HEMP 对货运高铁产生电场干扰的最恶劣场景,故选取 HEMP 从车厢上部、侧面对车厢进行辐照,电场极化方向为垂直极化。

为了测量车厢内部感应电场强度,在车厢内部设置电场观测点,观测点的坐标原点为靠近车头的左下端,所有观测点坐标单位为 mm,电场观察面如图 5 所示,车厢内部电场观测点如图 6 所示。观察面 1 上的观测点分布:下部位置观测点坐标从左至右分别为车厢前部 A 点(6 130,0,1 512.75);车厢中间 B 点(13 730,0,1 512.75);车厢后部 C 点(21 330,0,1 512.75)。中部位置观测点坐标从左至右分别为车厢前部 D 点(6 130,0,2 305);车厢中间 E 点(13 730,0,2 305);车厢后部 F 点(21 330,0,2 305)。上部位置观测点坐标从左至右分别为车厢前部 G 点(6 130,0,3 305);车厢中间 H 点(13 730,0,3 305);车厢后部 I 点(21 330,0,3 305)。观察面 2 上的观测点分布:左侧位置观测点坐标从左至右分别为车厢前部 A* 点(6 130,1 100,2 305);车厢中间 B* 点(13 730,1 100,2 305);车厢后部 C* 点(21 330,1 100,2 305)。中部位置观测点与观察面 1 上观测点一致。右侧位置观测点坐标从左至右分别为车厢前部 G* 点(6 130,-1 100,2 305);车厢中间 H* 点(13 730,-1 100,

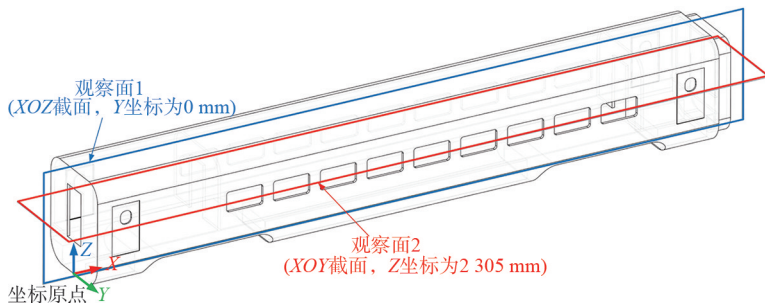


图 5 电场观察面示意图

Fig. 5 Schematic diagram of electric field observation surface

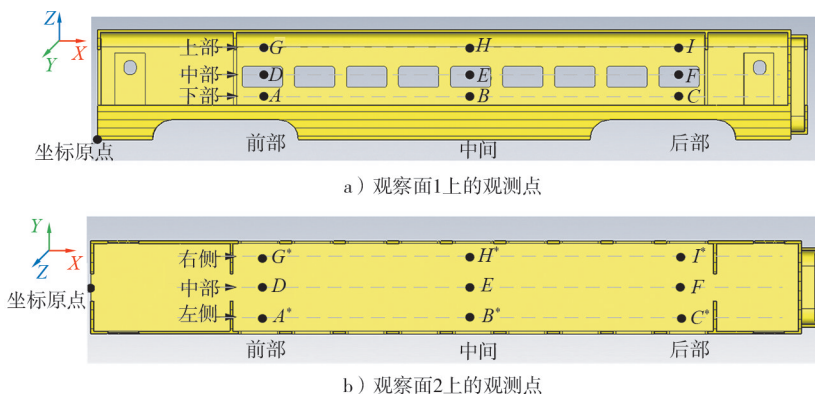


图 6 车厢内部电场观测点示意图

Fig. 6 Schematic diagram of electric field observation point inside the compartment

2 305); 车厢后部 I^* 点(21 330, -1 100, 2 305)。

本文假设核爆点距离车厢 30 km, HEMP 以平面波方式从 2 个方向辐照车厢, 经过 100 ns 传播到达车厢, 故选取 100 ns 时刻为起点对车厢内部电场环境进行分析。图 7 为 110 ns 时刻车厢内部观察面 1、2 上空间电场分布。

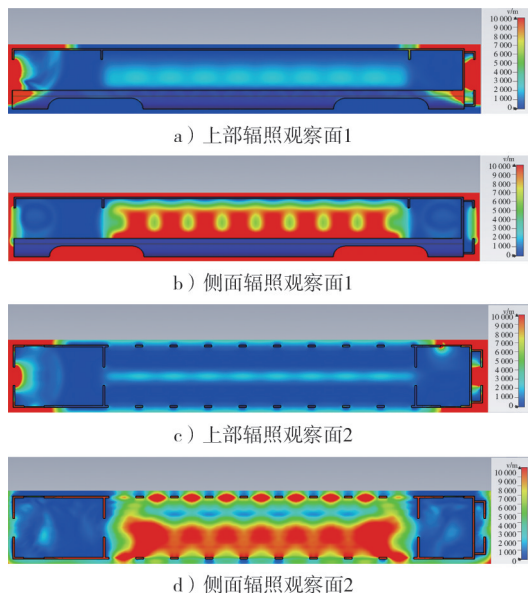


图 7 110 ns 时刻车厢内部观察面 1、2 上空间电场分布

Fig. 7 Spatial electric field distribution on the observation surface 1, 2 inside the compartment at 110 ns

从图 7 的电场云图可以看出, 车窗是电磁脉冲耦合进车厢的主要通道, HEMP 从侧面辐照时车厢

内部电场强度远大于 HEMP 从上部辐照时的电场强度, 侧面辐照比上部辐照条件下的车厢内部电场环境更为恶劣, 故对 HEMP 从侧面辐照时车厢内部观测点的电场时域波形做进一步分析。

选取图 6 中车厢内部 15 个观测点处的电场分别进行时域分析, HEMP 侧面辐照时各观测点处的电场时域波形如图 8 所示, 上部辐照与侧面辐照时各观测点处电场强度峰值如表 1 所示。

通过表 1 可以明显看出, HEMP 侧面辐照时车厢内电场强度峰值大于上部辐照时车厢内电场强度峰值。从图 8 以及表 1 中侧面辐照时的结果中可以得到以下结论。

1) 车厢中间位置观测点 (B 、 E 、 H 、 B^* 、 H^*) 处电场强度峰值分别大于车厢前部位置观测点 (A 、 D 、 G 、 A^* 、 G^*) 处电场强度峰值, 也分别大于车厢后部位置 (C 、 F 、 I 、 C^* 、 I^*) 观测点处电场强度峰值。车厢中间位置电场强度峰值最大点在观测点 B^* 处为 24.396 kV/m, 电场强度峰值最小点出现在车厢后部位置观测点 I 处为 7.298 kV/m。

2) 当观测点位于车厢前部、后部位置时, 下部位置观测点 (A 、 C) 处电场强度峰值分别大于中部位置观测点 (D 、 F) 处电场强度峰值, 也分别大于上部位置观测点 (G 、 I) 处电场强度峰值。左侧观测点 (A^* 、 C^*) 处电场强度峰值分别大于中部位置观测点 (D 、 F) 处电场强度峰值, 也分别大于右侧位置观测点 (G^* 、 I^*) 处电场强度峰值。

3) 当观测点位于车厢中间位置时, 上部位置观

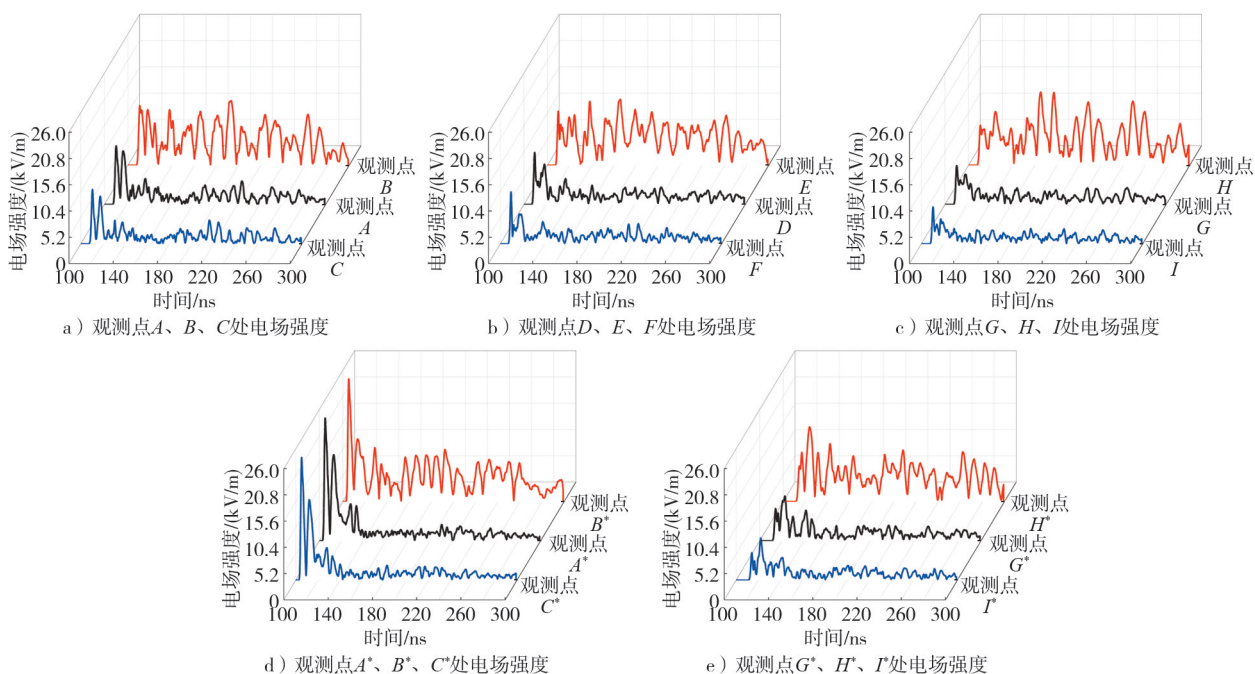


图 8 HEMP 侧面辐照车厢内部各观测点处电场强度时域波形

Fig. 8 Time-domain waveform of electric field intensity at each observation point inside the HEMP side radiation compartment

表 1 上部辐照与侧面辐照时各观测点处电场强度峰值

Tab.1 Peak value of electric field intensity at each observation point during upper radiation and side radiation

观测点	电场峰值/(kV/m)	
	侧面辐照	上部辐照
A	11.616	1.571
B	12.780	1.569
C	10.768	1.575
D	10.304	2.097
E	13.058	2.085
F	10.286	2.079
G	7.702	1.890
H	14.487	1.679
I	7.298	1.509
A*	24.304	3.289
B*	24.396	2.350
C*	24.289	3.652
G*	8.877	3.289
H*	14.786	2.350
I*	8.348	3.656

测点 H 处电场强度峰值大于下部位置观测点 B 处电场强度峰值,大于中部位置观测点 E 处电场强度峰值。左侧位置观测点 B* 处电场强度峰值大于右侧位置观测点 H* 处电场强度峰值,大于中部位置观测点 E 处电场强度峰值。

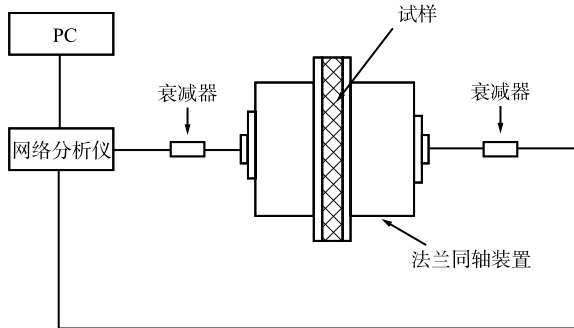
HEMP 主要通过车窗、车门进入车厢,HEMP 从侧面辐照相较于从上部辐照,车厢内的电场强度更大,对敏感设备的威胁也更大,敏感设备的摆放位置选取车厢内电场强度最小的位置,即车厢后部靠上的位置。为探究恶劣电磁环境下车厢内敏感设备机箱的屏蔽效能,将 HEMP 侧面辐照下车厢内部电场强度最大的观测点 B* 处的电场时域波形作为激励源,对敏感设备机箱的屏蔽效能进行计算。

2.2 敏感设备机箱材料屏蔽效能实验

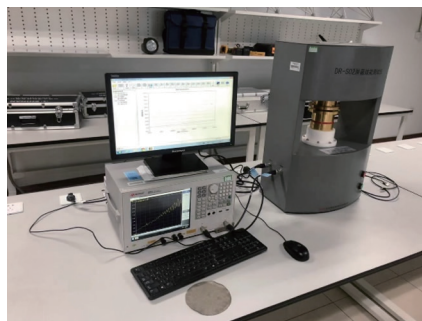
根据“2.1”项下的仿真分析,HEMP 从车厢侧面辐照相比上部辐照时,车厢内的电场环境更为恶劣,为保证机箱内敏感设备的电磁安全性,减少机箱内部电磁干扰,需对机箱外壳材料进行屏蔽效能实验分析,以确定其屏蔽效能。

机箱外壳选取表面平整的 3A21 铝合金试样进行屏蔽效能实验与仿真验证,试样尺寸为 195 mm×195 mm×2 mm,根据 GJB 8820—2015《电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法》^[17],在电磁屏蔽室中进行屏蔽效能实验测试,测试装置为网络分析仪(E5061B,是德科技(中国)有限公司)和屏蔽效能测试仪(DR-S02,北京鼎容实创科技有限公司),在电磁屏蔽室中搭建对应屏蔽效能测试系统实验台,

如图 9 所示。其中,图 9 a)为测试系统框图,图 9 b)为测试系统实物图。



a) 框图



b) 实物图

图 9 屏蔽效能测试系统实验台

Fig.9 Test bench of shielding efficiency test system

屏蔽效能按照 GJB 8820—2015《电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法》^[17]规定的屏蔽效能计算公式计算。

$$SE = 20 \log \left(\frac{E_1}{E_2} \right), \quad (3)$$

式中:SE 代表被试材料屏蔽效能,dB;E₁ 为无屏蔽材料时电场接收端接收的电场强度;E₂ 为有屏蔽材料时电场接收端接收的电场强度。对于平面型材料的屏蔽效能测试,试样面积应大于屏蔽效能测试仪测试窗尺寸并且确保试样表面平整,按图 10 摆放好测试仪器,在 30 MHz~1.5 GHz 频段下进行单点测试。首先,对法兰同轴装置进行校准;然后,放入 3A21 铝合金试样至屏蔽效能测试仪,进行加载测试。网络分析仪带宽设置为 1 kHz,输出功率为-10 dBm,3A21 铝合金试样屏蔽效能测试方法及步骤如下:

1)将参考试样加入测试装置中,调整网络分析仪输出电平,使信号动态范围大于试样的屏蔽效能估计值,记录网络分析仪无被测试样时的散射参数幅频曲线;

2)取出参考试样,将负载试样(3A21 铝合金)固定于装置中,使网络分析仪输出电平不变,因信号幅度大于噪声电平 6 dB 以上,可直接记录网络分析仪散射参数幅频曲线;

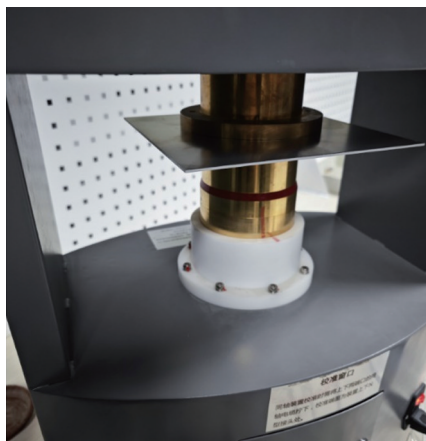


图 10 3A21 铝合金试样屏蔽效能测试

Fig. 10 Shielding efficiency test of 3A21 aluminum alloy Sample

3) 根据式(3)自动计算屏蔽效能, 绘制屏蔽效能值随频率变化曲线。3A21 铝合金试样屏蔽效能测试结果如图 11 所示。

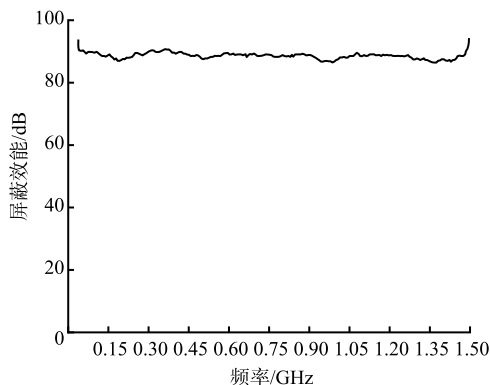


图 11 3A21 铝合金试样屏蔽效能测试结果
Fig. 11 Test results of shielding efficiency of 3A21 aluminum alloy sample

测试结果表明, 3A21 铝合金材料的屏蔽效能较高, 在 30 MHz~1.5 GHz 频段内屏蔽效能稳定在 85 dB 以上。在实验基础上对该尺寸铝板进行仿真验证, 使用电磁仿真软件 CST(达索系统提供)中的微波工作室(MWS)建立相同尺寸的铝板模型, 添加平面波激励, 沿 x 轴负方向对铝板进行扫频屏蔽效能测试, 根据 GJB 8820—2015《电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法》^[17] 设置频率范围为 30 MHz~1.5 GHz, 为了防止边界效应导致仿真结果偏小, 在仿真软件中模型的四周边界设置为电边界, 在此条件下经由铝板外周入射的电磁波将在电边界上完全吸收, 消除边界效应。入射方向边界设置为开放边界以模拟无限大自由空间, 优点是电磁波会几乎无反射地通过自由空间, 降低仿真误差, 具体设置如图 12。

在铝板一侧设置电场观测点, 平面波幅值设置为 1 V/m, 仿真软件计算 30 MHz~1.5 GHz 频率

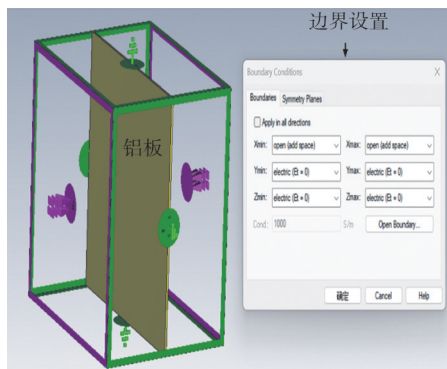


图 12 3A21 铝合金试样屏蔽效能仿真设置

Fig. 12 Simulation setting of shielding efficiency of 3A21 aluminum alloy sample

下观测点处的电场强度, 根据式(3)可计算铝板的屏蔽效能, 仿真结果和实验结果的对比如图 13 所示。

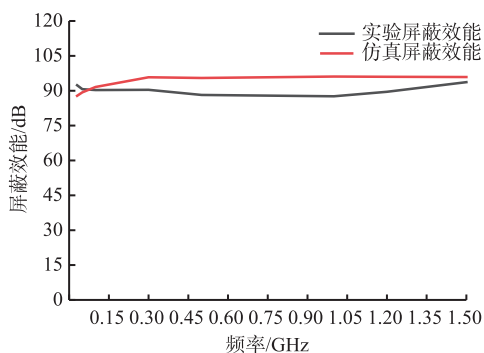


图 13 3A21 铝合金试样实验与仿真屏蔽效能对比
Fig. 13 Comparison between experimental and simulated shielding efficiency of 3A21 aluminum alloy sample

由图 13 可知, 仿真与实验结果误差较小, 平均误差为 4.6%。在中频部分, 仿真结果相较于实验结果屏蔽效能较大, 原因是仿真过程中设置的电边界完全吸收了从边界入射的电磁波, 使得观测点处的电场强度仿真值偏小, 屏蔽效能计算结果较大。仿真与实验结果表明, 3A21 铝合金的屏蔽效能较好, 在 30 MHz~1.5 GHz 频段内屏蔽效能大于 85 dB。

2.3 敏感设备机箱内部电场环境

由于机箱上通风孔、观察窗等缝隙的存在, 使得机箱的屏蔽效果下降, 因此在对机箱材料屏蔽效能测试基础上, 对放置于电场环境相对恶劣的车厢中间位置靠近车窗处的敏感设备机箱内部的电场环境进行仿真分析, 确定 HEMP 辐照条件下敏感设备机箱的电磁安全性。

从核爆中心辐射出的电磁脉冲经过空间传播衰减后, 得到货运高铁列车附近的电场, 该电场经过高铁车厢车体的屏蔽后, 耦合进车厢内部的电场再经过机箱外壳进一步衰减, 最终耦合到机箱内部 PCB 电路中, 高空核爆电磁脉冲传播、衰减、耦合过程见图 14。

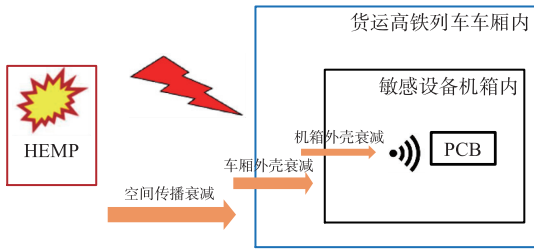


图 14 HEMP 传播、衰减、耦合过程

Fig. 14 HEMP propagation, decay and coupling processes

在达索系统公司电磁仿真软件 CST 线缆工作室中建立 HEMP 辐照下的敏感设备机箱场路耦合仿真电路模型,如图 15 所示。机箱外壳主要材料为 2 mm 厚的 3A21 铝合金,机箱正面屏幕部分为玻璃,机箱整体尺寸为 400 mm×400 mm×200 mm。为了减少网格数量提高计算速度,在不影响计算准

确度情况下,对敏感设备机箱内部结构进行简化处理,去除了机箱中起固定作用的螺栓、倒角和线束。由于机箱的外壁孔缝会影响电磁波在不同频率下的辐射特性,为了保证仿真的精度,机箱的外壳并未进行处理。PCB 为 DC/DC 开关电源电路,可将直流 110 V 转变为直流 24 V,额定功率 1 200 W。根据开关电源 PCB 电路图和原理图导入至 CST 线缆工作室中,并设置激励端口,按照实际位置将其放置在机箱内部,如图 16 所示。在 PCB 电磁敏感部位设置集总端口,并在该端口添加电流探头,端口上部添加电场探头如图 17。

仿真完成后根据机箱内电场探头和开关电源 PCB 上的电流探头分别得到 HEMP 辐照条件下敏感设备机箱内感应电场强度(如图 18 所示)、PCB 电路上感应电流大小(如图 19 所示)。

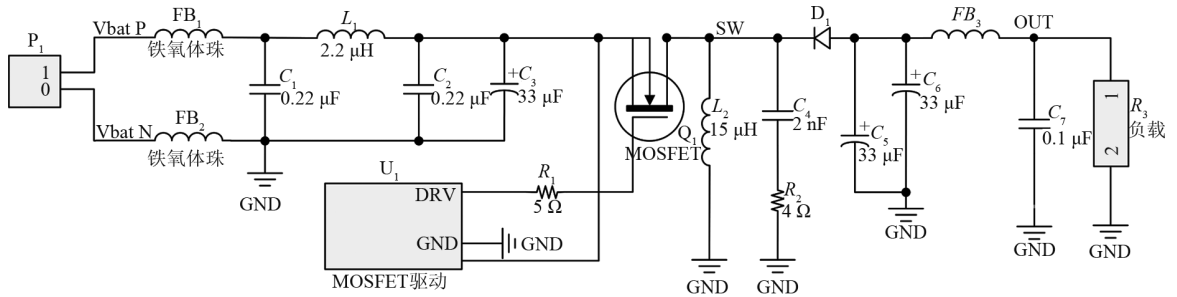


图 15 敏感设备机箱场路耦合仿真电路模型

Fig. 15 Field coupling simulation circuit model of sensitive equipment chassis

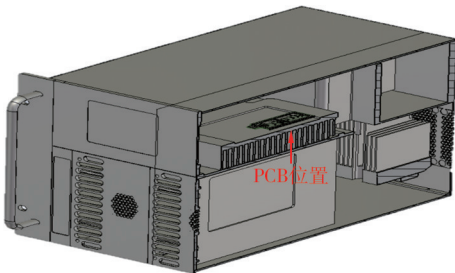


图 16 PCB 放置位置

Fig. 16 PCB placement position

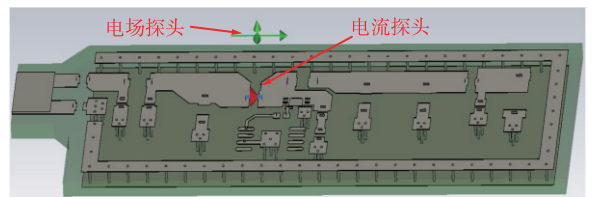


图 17 开关电源 PCB 版图

Fig. 17 PCB layout of switching power supply

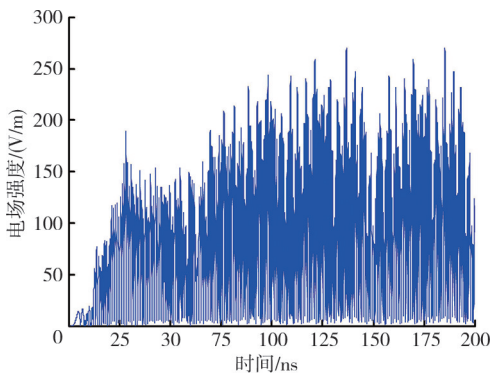


图 18 敏感机箱内感应电场波形

Fig. 18 Waveform of induced electric field in the sensitive case

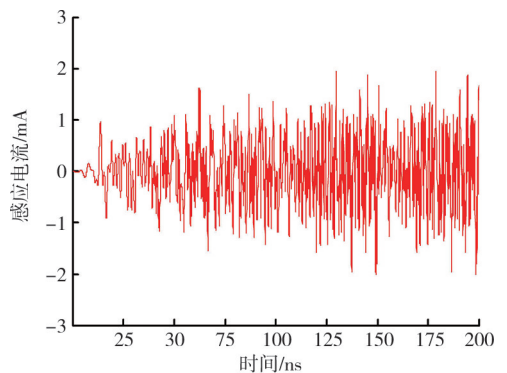


图 19 PCB 线路上感应电流波形

Fig. 19 Induced current waveform on PCB circuit

由图 18 可知,PCB 上的电场强度偏高,由于车窗不具备电磁屏蔽能力,电磁波主要从车窗位置耦合进机箱内部,加上电磁波在车厢内的反射叠加作用导致放置于观测点 B^* 处机箱内部 PCB 敏感部位电场强度峰值为 270 V/m。在该电场条件下敏感设备机箱没有出现任何故障、性能降低或者偏离规定的指标值。根据 GJB 151B—2013《军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量》^[18],按照 30~100 MHz 要求的 50 V/m 的辐射电场进行试验时,设备没有出现偏离规定的指标值,满足 PCB 电场辐射敏感度要求。由图 19 可知,PCB 感应电流峰值为 1.9 mA,根据 GB 17625.1—2022《电磁兼容限值 谐波电流发射限值(设备每相输入电流 ≤ 16 A)》^[19],A 类设备的各次谐波电流不应超过 2.3 A,显然 1.9 mA \ll 2.3 A,满足 PCB 工作安全限值。

3 结 语

本文针对 HEMP 辐照下货运高铁内部电场分布进行了研究,给出了敏感设备的放置建议,分析了电源机箱外壳材料的屏蔽效能,探究了 PCB 电路板上的电场强度和感应电流对 PCB 电路的影响,结果可为 HEMP 辐照条件下高铁货物运输电磁防护提供参考。主要结论如下。

1)HEMP 侧面辐照时,车厢内电场强度大于上部辐照时车厢内部电场强度。侧面辐照时,车厢中间位置的电场强度峰值相较于前部、后部位置的电场强度峰值要大,靠窗位置的电场强度峰值比中间位置的电场强度峰值要大,后部靠上位置电场强度峰值最小,故建议将敏感器件放置在车厢后部靠上的位置。

2)3A21 铝合金作为金属材料具有较高的电导率和磁导率,电场屏蔽效能较高,在 30 MHz~1.5 GHz 频段内屏蔽效能稳定在 85 dB 以上。

3)HEMP 辐照条件下,在车厢内部电场强度峰值最大位置,3A21 铝合金电源机箱电场辐射敏感度满足要求,机箱内 PCB 敏感部位处的感应电流满足要求。

本研究采用有限积分法(FIT)对货运高铁车厢内电场环境进行分析,考虑了 HEMP 经过 30 km 距离的衰减作用,可以为其他类型电磁脉冲经过衰减后对敏感设备影响分析提供参考。本文实验测试材料屏蔽效能采用法兰同轴装置法,虽然该方法仅适用于 30 MHz~1.5 GHz 频段,但该频谱范围包含了 HEMP E1(频率范围为 0.1~300 MHz)阶段

的主要频率成分,具有一定的适用性。本研究仅考虑了 30 km 处 HEMP 电场辐射对敏感机箱内部 PCB 上感应电流和附近电场强度的影响,并没有考虑 HEMP 磁场辐射的影响以及机箱内电缆的耦合,因此,在后续的研究中,需要对 HEMP 磁场环境进行研究,并考虑机箱内电缆的耦合影响。

参考文献/References:

- [1] 李锦,姜丽敏.基于高铁网络的物流运输模式研究与改进[J].物流科技,2024,47(16):125-128.
LI Jin,JIANG Limin. Research and improvement of logistics transportation model based on high-speed rail network[J]. Logistics Sci-tech,2024,47(16):125-128.
- [2] 姚恺,高欣宝,吴雪艳,等.高速铁路开展弹药快速运输研究的总体构想[J].军事交通学院学报,2016,18(3):15-18.
YAO Kai,GAO Xinbao,WU Xueyan,et al. Overall conception of ammunition rapid transportation with high-speed railway [J]. Journal of Academy of Military Transportation,2016,18(3):15-18.
- [3] 孙栋,申楠公,李敏堂,等.高速铁路军事运输保障技术体系设计[J].军事交通学院学报,2019,21(1):7-10.
SUN Dong, SHEN Nangong, LI Mintang, et al. Design of supporting technology system for military transportation by high-speed railway [J]. Journal of Academy of Military Transportation,2019,21(1):7-10.
- [4] 沈高稳,罗珊,王金全,等.光伏组件高空核电磁脉冲模拟试验研究[J].兵器装备工程学报,2022,43(2):280-284.
SHEN Gaowen,LUO Shan,WANG Jinquan,et al. Simulation test of HEMP on photovoltaic module[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2022,43(2):280-284.
- [5] 毋召锋,徐延林,刘培国.超宽带强电磁防护能量选择表面设计[J].国防科技大学学报,2023,45(3):179-185.
WU Zhao Feng,XU Yanlin,LIU Peiguo. Design of ultra-wide-band energy selective surface for protection of high intensity EM fields[J]. Journal of National University of Defense Technology,2023,45(3):179-185.
- [6] 李志瑞,孔新兵,潘宏德.某数据链设备高空核电磁脉冲防护设计[J].无线通信技术,2024,33(3):39-43.
LI Zhirui,KONG Xinbing,PAN Hongde. Design of HEMP protection for a data link equipment[J]. Wireless Communication Technology,2024,33(3):39-43.
- [7] 陈书恒,朱倪瑶.高空电磁脉冲对武器装备的影响及其防护综述[J].兵工自动化,2021,40(10):41-43.
CHEN Shuheng,ZHU Niyao. Survey of HEMP influence and protection on weaponry and equipment[J]. Ordnance Industry Automation,2021,40(10):41-43.
- [8] 王伟,解彤彤,胡宽,等.高空核电磁脉冲照射下车辆表面感应电流研究[J].电子科技,2020,33(1):19-22.
WANG Wei,XIE Xutong,HU Kuan,et al. Study on the surface induced current of vehicles irradiated by high-altitude nuclear electromagnetic pulse[J]. Electronic Science and Technology,2020,33(1):19-22.
- [9] 聂坤林,赵玮,李鹏,等.某型车辆在高空核爆炸环境下的电磁

- 脉冲耦合特性[J]. 兵工学报, 2022, 43(2): 372-382.
- NIE Kunlin, ZHAO Wei, LI Peng, et al. Electromagnetic pulse coupling characteristics of a vehicle in high altitude nuclear explosion environment[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(2): 372-382.
- [10] 肖冬萍, 袁军, 何为, 等. 高空核爆电磁脉冲对便携式监护仪的辐射效应[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1734-1739.
- XIAO Dongping, YUAN Jun, HE Wei, et al. Radiation effect of high-altitude electromagnetic pulse on portable monitor[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1734-1739.
- [11] 赵治国, 徐跃, 马谢, 等. 雷电电磁环境对高速列车影响分析方法研究[J]. 通信技术, 2019, 52(9): 2207-2211.
- ZHAO Zhiguo, XU Yue, MA Xie, et al. Analysis method of impact of lightning electromagnetic environment on high-speed trains [J]. Communications Technology, 2019, 52(9): 2207-2211.
- [12] 陈亚洲, 张冬晓, 田庆民, 等. 某型无人机数据链系统 HEMP 辐照效应[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 959-965.
- CHEN Yazhou, ZHANG Dongxiao, TIAN Qingmin, et al. HEMP radiation effects on unmanned aerial vehicle data link system[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 959-965.
- [13] 秦锋, 王旭桐, 陈伟, 等. 高空电磁脉冲作用下配电变压器瞬态响应与失效机理[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6924-6932.
- QIN Feng, WANG Xutong, CHEN Wei, et al. Transient response and failure mechanism of distribution transformer under high-altitude electromagnetic pulse[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6924-6932.
- [14] IEC61000-2-9, Electromagnetic Compatibility (EMC)-part 2: Environment-section 9: Description of HEMP Environment-Radiated Disturbance-Basic EMC Publication[S].
- [15] IEC61000-2-10, Electromagnetic Compatibility (EMC)-part 2: Environment-Section 10: Description of HEMP Environment-Conducted Disturbance-Basic EMC Publication[S].
- [16] HOAD R, RADASKY W A. Progress in high-altitude electromagnetic pulse (HEMP) standardization[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013, 55(3): 532-538.
- [17] GJB 8820—2015, 电磁屏蔽材料屏蔽效能测量方法[S].
- [18] GJB 151B—2013, 军用设备和分系统电磁发射和敏感度要求与测量[S].
- [19] GB 17625.1—2022, 电磁兼容 限值 谐波电流发射限值(设备每相输入电流 ≤ 16 A)[S].

(上接第 119 页)

- [21] 张永弟, 王浩楠, 王伟志, 等. 改进 PCA 方法的牙颌特征提取和数据集构建[J]. 河北工业科技, 2024, 41(3): 212-219.
- ZHANG Yongdi, WANG Haonan, WANG Weizhi, et al. Dental feature extraction and data set construction based on improved PCA method[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2024, 41(3): 212-219.
- [22] MAHENDRAN N, VINCENT R. Effective classification of major depressive disorder patients using machine learning techniques[J]. Recent Patents on Computer Science, 2019, 12(1): 41-48.
- [23] LIAO Hualong, ZHANG Xinyuan, ZHAO Can, et al. LightGBM: An efficient and accurate method for predicting pregnancy diseases[J]. Journal of Obstetrics and Gynaecology, 2022, 42(4): 620-629.
- [24] CHEN Tianqi, GUESTRIN C. XGBoost: A scalable tree boosting system [C]//Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. San Francisco: ACM, 2016: 785-794.
- [25] FAN Zongwen, GOU Jin, WENG Shaoyuan. A feature importance-based multi-layer CatBoost for student performance prediction [J]. IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 2024, 36(11): 5495-5507.
- [26] CUTLER D R, EDWARDS T C J, BEARD K H, et al. Random forests for classification in ecology[J]. Ecology, 2007, 88(11): 2783-2792.
- [27] GEURTS P, ERNST D, WEHENKEL L. Extremely randomized trees[J]. Machine Learning, 2006, 63(1): 3-42.
- [28] MOHAPATRA S, MANEESHA S, PATRA P K, et al. Heart diseases prediction based on stacking classifiers model [J]. Procedia Computer Science, 2023, 218: 1621-1630.
- [29] EBERHART C, DOBBINS W, HUTTON V. Performance metrics[M]//Neural Network PC Tools; A Practical Guide. USA: Academic Press Professional Inc, 1990: 161-176.