

引用格式:雷霆,钟力强,王柯,等.带电作业机器人控制机箱电磁防护仿真研究[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):131-140.

Citation: LEI Ting, ZHONG Liqiang, WANG Ke, et al. Simulation analysis of electromagnetic protection for control box of live working robot[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 131-140.

# 带电作业机器人控制机箱电磁防护仿真研究

雷霆<sup>1,2</sup>, 钟力强<sup>1,2</sup>, 王柯<sup>1,2</sup>, 文艺<sup>3</sup>, 樊绍胜<sup>3</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 南方电网电力科技股份有限公司, 广东 广州 510080;  
3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙, 410114)

**摘要:**带电作业机器人的控制系统极易受高压输电线路的强电磁环境影响,为保障机器人在恶劣电磁环境下作业的可靠性,对输电线路带电作业机器人控制机箱电磁防护进行了仿真研究,设计具有一定屏蔽效能的电磁防护控制机箱,考虑机箱孔缝形状、大小、数量、间隔等因素对屏蔽效能的影响。通过孔缝电磁耦合模型的 ANSYS 仿真,验证本设计具有较高的准确性和屏蔽效率,并且仿真结果证明,设计的机箱内电磁环境远低于国内外标准,带电机器人在该环境中能够完成各种工作需求,具有良好的工程实用性。

**关键词:**带电作业机器人;控制机箱;电磁防护;屏蔽效率

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.014 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2024)06-0131-10

## Simulation analysis of electromagnetic protection for control box of live working robot

LEI Ting<sup>1,2</sup>, ZHONG Liqiang<sup>1,2</sup>, WANG Ke<sup>1,2</sup>, WEN Yi<sup>3</sup>, FAN Shaosheng<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid., Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 2. China Southern Power Grid Technology Co., Ltd., Guangzhou 510080, China; 3. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The control system of the live working robot is highly susceptible to the strong electromagnetic environment of high-voltage transmission lines. In order to ensure the reliability of the robot's operation in harsh electromagnetic environments, a simulation study is conducted on the electromagnetic protection for the control box of the live working robot for transmission lines. An electromagnetic protection control box with certain shielding efficiency is designed, which considers the influence of factors such as the shape, size, number, and spacing of the box's holes and seams on the shielding efficiency. Through the ANSYS simulation of the electromagnetic coupling model of the holes and seams, it is verified that the design has high accuracy and shielding efficiency. The simulation results also prove that the electromagnetic environment inside the designed box is far below Chinese and international standards, and the live working robot can complete various work in this environment, which has good engineering practicability.

**Key words:** live working robot; control box; electromagnetic protection; shielding efficiency

高压输电线路作为中国电网骨干网络,保障其安全稳定运行是电网供电可靠性的前提,而带电作业机器人是实现带电作业检修运维的有力手段<sup>[1-2]</sup>。高压输电线路的高电压、大电流产生的强电磁场,容易对带电作业机器人产生干扰,具体表现为通信

中断、采集数据失真等<sup>[3]</sup>,机器人将不能正常工作。因此,对带电作业机器人进行电磁防护设计具有重要意义。

随着带电作业机器人的快速发展,近年来其电磁防护技术成为了研究热点。文献[4]针对 10 kV

收稿日期: 2022-03-24; 修回日期: 2023-10-09

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20192272)

通信作者: 雷霆(1989—),男,博士,主要从事电力机器人方面的研究;E-mail: 461111973@qq.com

配电系统的高压带电作业机器人进行了防护设计,该机器人的防护设计主要采用绝缘材料进行防护,采用绝缘层进行电气隔离,虽然该防护设计能够基本保证机器人正常工作,但是这仅适用于10 kV的作业环境,对于超高压等电磁场环境并不适用。文献[5]研制了一款110 kV输电线路带电作业机器人,并进行了电磁分析和防护设计,屏蔽机箱采用双层屏蔽材料,外层为铁,内层为坡莫合金,该文献分析了孔缝对屏蔽效能的影响,最后从硬件的电路兼容方向进行了电磁兼容设计,保证机器人的抗干扰能力。文献[6]提出了智能变电站带电作业机器人的关键技术,对机器人等电位作业平台、屏蔽机箱进行了电磁防护设计,通过比较电磁屏蔽的屏蔽效能,确定了屏蔽机箱的入孔深度与开孔尺寸,虽然该机器人实现了电磁防护的基本设计,能够实现机器人带电作业任务,但是所得到屏蔽机箱的最优解在屏蔽材料、孔缝厚度、间隔等方面均未进行充分考虑。文献[7]对输电线路带电作业机器人交流电弧放电电流特性进行了研究,研究了机器人等电位时的电弧转移电流特性机理,但是该实验的实验环境是基于5.77~40.00 kV的电场环境,对于超高压输电线路并不一定适用。在国家大力促进带电作业的背景下,目前带电作业的研究已取得了一定的成就<sup>[8-9]</sup>,对电力系统的带电作业机器人的研制也已具备了一定的基础<sup>[10-13]</sup>。110 kV等级以下的带电作业机器人已经能够基本完成带电作业任务,巡检、维修具有安全稳定性,其抗电磁干扰能力基本满足要求<sup>[14-15]</sup>。但是,对于110 kV等级及以上的超高压电磁环境仍然会出现通信中断、控制系统死机、信号延迟等情况,严重影响机器人的安全可靠。

针对以上问题,本文以110 kV电压输电线路为背景,对带电作业机器人的控制机箱进行电磁防护设计,通过仿真分析给出屏蔽机箱的材料结构、孔缝大小、尺寸、形状、间隔距离设计,使机器人满足带电作业的要求。

## 1 机箱的电磁防护

### 1.1 机箱电磁防护标准

目前,针对带电作业机器人在强电磁环境中如何进行电磁防护设计研究还不够全面,国内外还未有带电作业机器人的电磁防护标准。文献[16]列出不同国家以及相关国际组织建立的工频电磁场公众暴露限值,如表1所示。

表1 不同国家以及相关国际组织建立的工频电磁场公众暴露限值

Table 1 Public exposure limits for power frequency electromagnetic fields established by different countries and related international organizations

国家以及国际组织	频率/ Hz	电场限值/ (kV·m <sup>-1</sup> )	磁场限值/ μT
INCIRP	50	5.0	100
	60	4.2	83
欧盟	50	5.0	100
美国	60	5.0	904
英国	50	12.0	1 600
德国	50	5.0	100
澳大利亚	50	5.0	100

中国规定工频电磁场公众暴露电场强度限值为4 kV/m,磁感应强度限值为0.1 mT。与表1对比可知,中国标准高于其他不同国家以及相关国际组织标准。因此,本文以电场强度4 kV/m作为电场限值,以磁感应强度0.1 mT作为磁场限值。

### 1.2 机箱的电场屏蔽

中国的电力系统供电频率为50 Hz的交流电,在110 kV输电线路路上,电场分布类似于静电场,可以用电荷模拟法(charge simulation method, CSM)或有限元法(finite element method, FEM)对电场分布进行大致计算。由于机器人结构差异较大,电荷模拟法的计算难度较大,因此,本文通过有限元法对110 kV线路电场变化情况进行仿真计算。在三维电场求解中,以标量电位 $\Phi$ 作为待求量,三维电场边界条件满足:

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \nabla \Phi) = -\rho_v \quad (1)$$

式中, $\Phi(x, y, z)$ 为3个方向矢量上的相对介电常数; $\epsilon_r(x, y, z)$ 为三维标量电位; $\epsilon_0$ 为真空介电常数; $\rho_v(x, y, z)$ 为体电荷密度。

求解得到标量电位 $\Phi$ 后,通过麦克斯韦微分方程组得到电场强度 $E$ 和电位移矢量 $D$ ,计算公式为

$$\begin{cases} E = -\nabla \Phi \\ D = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot (-\nabla \Phi) \end{cases} \quad (2)$$

机器人的控制机箱为矩形薄壁空腔,尺寸为 $a \times b \times c$ 的金属控制机箱模型结构如图1所示,机箱的厚度为 $d$ 。控制机箱在电场强度为 $E_0$ 的均匀电场中。

由于机箱对电场的屏蔽效应,机箱内电场强度会明显比机箱外电场强度小。以控制机箱内某点的电场强度 $E_i$ 作为评价机箱电场屏蔽效能(shielding

effectiveness, SE) 的测试点。根据电场屏蔽效能公式计算出控制机箱对电场的屏蔽效能:

$$S_E = 20 \lg \frac{E_0}{E_i} \quad (3)$$

对于 110 kV 线路带电作业机器人,机器人表面最大场强处为 520 kV/m,为保证机器人控制系统内的电场强度低于 4 kV/m,由式(3)计算可知,机器人机箱的电场屏蔽效能必须在 42.3 dB 以上。

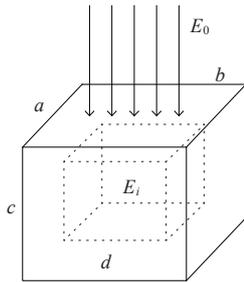


图 1 矩形薄壁空腔

Figure 1 A rectangular thin-walled cavity

### 1.3 机箱的磁场屏蔽

尺寸为  $a \times b \times c$  的金属材料控制机箱模型结构如图 2 所示,机箱的厚度为  $d$ 。控制机箱在磁场强度为  $H_x$  的均匀电场中。

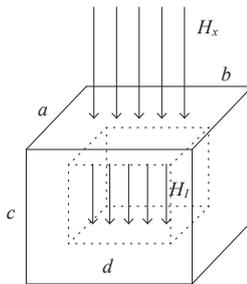


图 2 薄壁空腔矩形屏蔽体

Figure 2 Rectangular shield of thin-walled cavity

由于机箱对磁场的衰减作用,机箱内磁场强度会明显比机箱外磁场强度小。以控制机箱内某点的磁场强度  $H_i$  作为评判机箱磁场屏蔽效能的测试点。根据磁场屏蔽效能公式可以计算出控制机箱对磁场的屏蔽效能:

$$S_H = 20 \lg \left( \frac{H_x}{H_i} \right) \quad (4)$$

对于 110 kV 输电线路,当机器人正常巡检且机箱不采取任何电磁屏蔽材料时,通过仿真机箱内部的最大磁场强度为 13.64 mT,为保证带电作业机器人控制系统内的磁感应强度低于 0.1 mT,由式(4)计算可知带电作业机器人控制机箱的磁场屏蔽效能必须在 42.7 dB 以上。

## 2 孔缝对机箱屏蔽效能的影响分析

### 2.1 机器人机箱结构

输电线路带电作业机器人结构非常复杂,如果将机器人整个结构进行仿真分析,探究孔缝对机器人控制机箱屏蔽效能的影响,分析起来会非常困难。因此,对机器人控制机箱进行单独仿真分析,如图 3 所示。选取机箱尺寸为  $300 \text{ mm} \times 500 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ ,箱体壁厚为 2.5 mm。机箱材料采用铝合金。

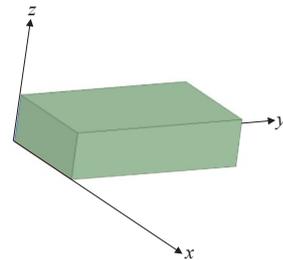


图 3 机器人机箱结构

Figure 3 Robot's box structure

在机箱外设置激励源,机箱本身的屏蔽能力是其本身属性,不会随平面波场强的变化而变化,因此可以通过某一个场强的平面波来计算机箱的屏蔽能力,本文选用 30 V/m 的平面波。当机箱未开孔缝时,机箱对任意方向的平面波的屏蔽能力相同。当机箱带有孔缝时,沿孔缝水平方向入射平面波与带有入射角的方向入射平面波相比,进入机箱的平面波波束会更多,机箱内场强会更大。因此在最恶劣情况下研究机箱的屏蔽能力,从控制机箱  $xz$  平面前方正中心 50 mm 处沿  $y$  轴正半轴方向垂直入射。干扰源的扫频频率为 0.8~2.0 GHz,选取控制机箱  $y=200 \text{ mm}$  处的箱体  $xz$  平面中心位置作为控制机箱内的屏蔽效能测试点,控制机箱仿真如图 4 所示。对未开孔缝控制机箱进行仿真,仿真如图 5 示。

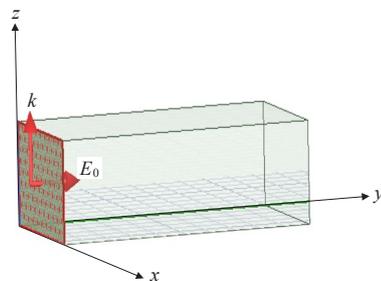


图 4 机箱仿真

Figure 4 Box simulation

图 5(a)为未开孔缝控制机箱在该频段内电场仿真结果;图 5(b)为未开孔缝控制机箱在该频段内磁场仿真结果。对于箱体内部的不同点,其屏蔽效能也会不同,由于  $y=200\text{ mm}$  位置控制模块较集中并且该位置的电磁干扰较强,因此选取坐标  $y=200\text{ mm}$  处的箱体  $xz$  平面进行分析。

图 5(c)为  $y=200\text{ mm}$  处的箱体  $xz$  平面电场仿真结果;图 5(d)为  $y=200\text{ mm}$  处的箱体  $xz$  平面磁场仿真结果。可知,当控制机箱未开孔缝时,控制机箱中间位置电场强度为  $1.16\text{ V/m}$ ,控制机箱中间位置磁感应强度为  $0.001\text{ mT}$ ,机箱对电磁场屏蔽效果良好。

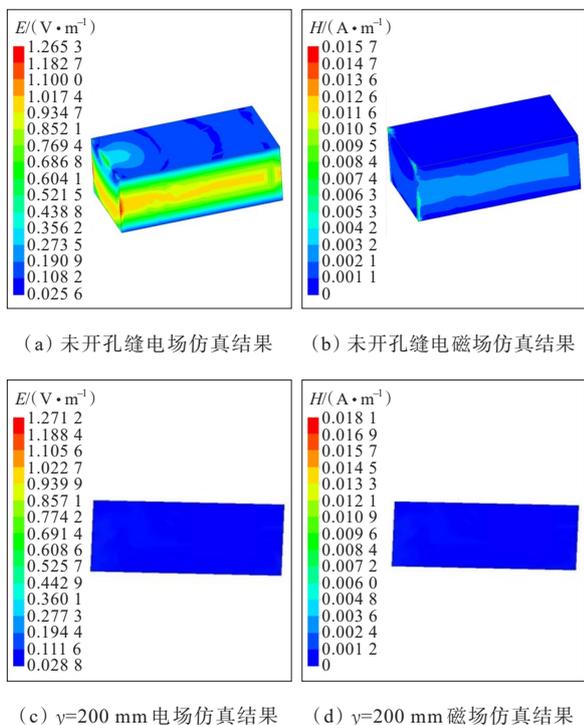


图 5 未开孔缝机箱仿真结果  
Figure 5 Simulation results of boxes without holes and seams

### 2.2 孔缝形状对屏蔽效能的影响

为了探究不同孔缝形状对控制机箱屏蔽效能的影响,如图 6 所示,在控制机箱的  $x=0\text{ mm}$  一侧中心分别开尺寸为  $23\text{ mm}\times 80\text{ mm}$  的矩形孔缝,半径为  $24.2\text{ mm}$  的圆形孔缝,尺寸为  $42.9\text{ mm}\times 42.9\text{ mm}$  的正方形孔缝。3 种形状的孔缝大小相等。

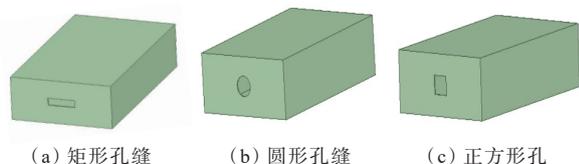


图 6 3 种不同开孔机箱

Figure 6 Boxes with three different holes

分别对矩形孔机箱、圆形孔机箱、正方形孔机箱进行仿真分析。图 7 为矩形孔缝控制机箱在该频段内电磁场仿真结果,图 8 为圆形孔缝控制机箱在该频段内电磁场仿真结果,图 9 为正方形孔缝控制机箱在该频段内电磁场仿真结果。

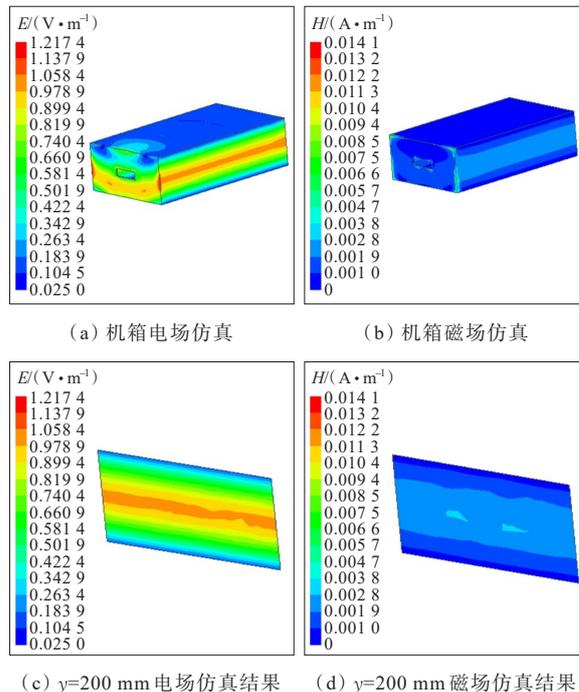


图 7 矩形孔缝控制机箱仿真结果  
Figure 7 Simulation results of control box with rectangular holes and seams

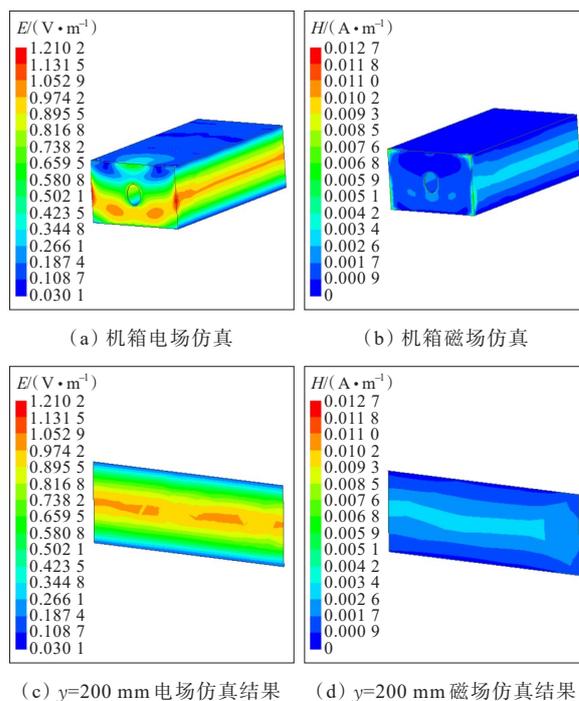


图 8 圆形孔缝控制机箱仿真结果  
Figure 8 Simulation results of control box with circular holes and seams

由图 7~9 可知,不同形状开孔在不同频段中表现出不同的屏蔽效能特性,用控制机箱外电磁场强度和  $y=200\text{ mm}$  处的箱体  $xz$  平面中心位置电磁场仿真结果代入式 (3)、(4) 计算出控制机箱在  $0.8\sim 2.0\text{ GHz}$  的频段范围内的屏蔽效能。根据计算结果作出在不同频段范围内不同长宽比矩形开孔孔缝屏蔽曲线图,如图 10 所示。

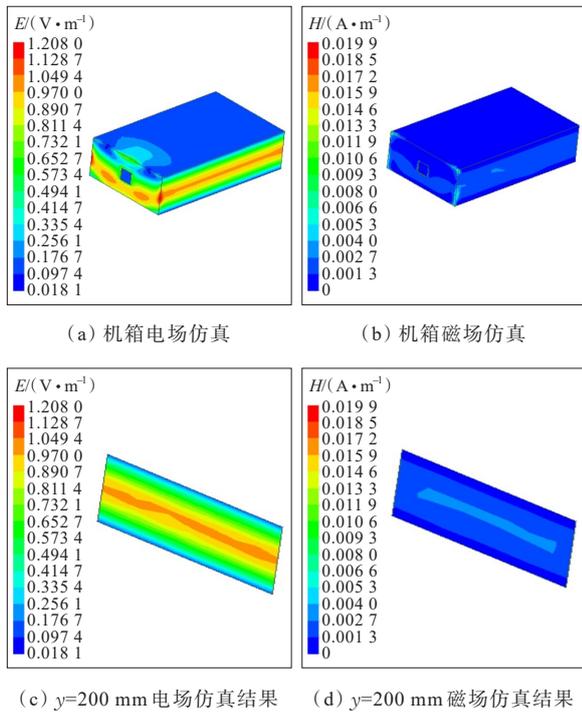


图 9 正方形孔缝控制机箱仿真结果

Figure 9 Simulation results of control box with square holes and seams

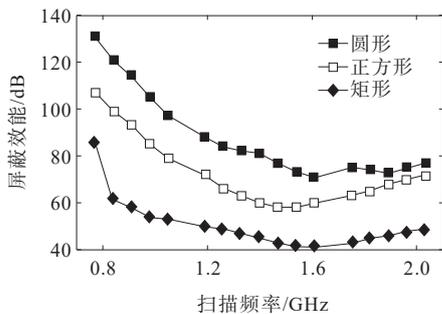


图 10 不同频段、不同形状孔缝屏蔽曲线图

Figure 10 Shielding curves at different frequency bands and with different holes and seams

由图 10 不同频段、不同形状孔缝屏蔽曲线图可知,在  $0.8\sim 1.6\text{ GHz}$  频段,不同形状孔缝控制机箱屏蔽效能随着扫描频率的增大而减小;在  $1.6\sim 2.0\text{ GHz}$  频段,不同形状孔缝控制机箱屏蔽效能随着扫描频率的增大略有增加,随着扫描频率增大控制机箱屏蔽效能改变的幅度越小。在相同面积情况下,不同

形状的孔缝控制机箱的屏蔽效能相差较大。在同一扫描频率下,圆形孔缝的屏蔽效果好于相同面积的正方形孔缝的屏蔽效果,矩形孔缝的屏蔽效果最差。因此,在对控制机箱孔缝进行设计时尽量使用圆形孔缝。

### 2.3 矩形孔缝的长宽比对屏蔽效能的影响

由文 2.2 可知,在设计孔缝形状时最好设计成圆形孔缝,但在实际控制机箱设计当中,机箱的散热孔往往采用矩形散热槽。因此,研究矩形孔缝的长宽比大小对控制机箱屏蔽效能的影响非常有必要。

为了探究不同长宽比对控制机箱屏蔽效能的影响,如图 11 所示,在控制机箱的  $x=0\text{ mm}$  一侧中心设置长宽比  $L_e/W_i$  分别为 2.5、5、7.5 的矩形孔缝,对应的矩形大小尺寸为  $21.9\text{ mm}\times 54.8\text{ mm}$ 、 $15.5\text{ mm}\times 77.5\text{ mm}$ 、 $12.6\text{ mm}\times 94.5\text{ mm}$ 。3 种不同长宽比矩形孔缝面积相等。

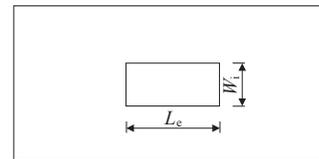


图 11 开孔尺寸大小示意

Figure 11 Hole size

分别对长宽比  $L_e/W_i$  为 2.5、5、7.5 的矩形孔缝机箱进行仿真分析,仿真结果分别如图 12~14 所示。

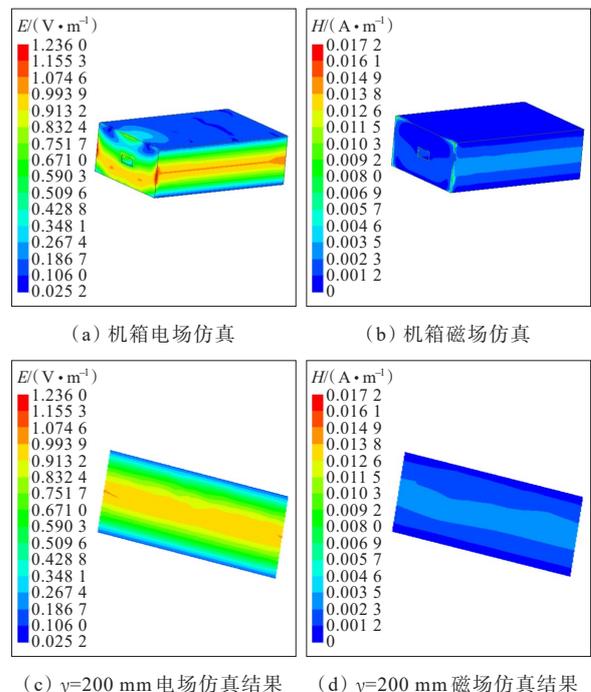


图 12 长宽比为 2.5 控制机箱仿真结果

Figure 12 Simulation results of box with an aspect ratio of 2.5

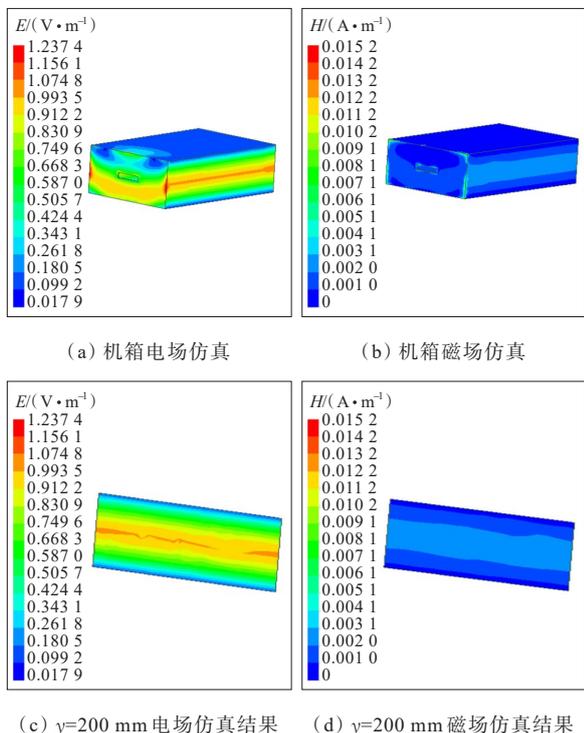


图 13 长宽比为5控制机箱仿真结果

Figure 13 Simulation results of box with an aspect ratio of 5

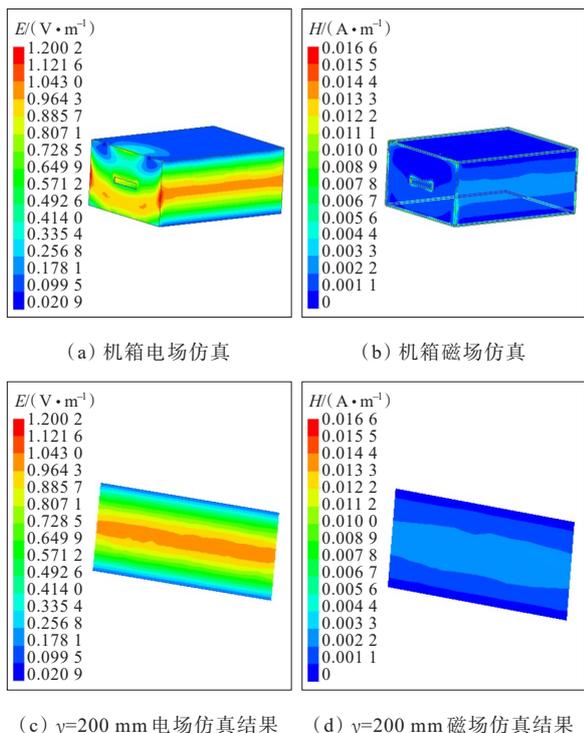


图 14 长宽比为7.5控制机箱仿真结果

Figure 14 Simulation results of box with an aspect ratio of 7.5

由图12~14可知,不同长宽比矩形开孔在不同频段中表现出不同的屏蔽效能特性,用控制机箱外电磁场强度和 $y=200$  mm处的箱体 $xz$ 平面中心位置电磁场仿真结果代入代入式(3)、(4)计算出控制

机箱在0.8~2.0 GHz的频段范围内的屏蔽效能,根据计算结果作出在不同频段范围内不同长宽比开孔孔缝屏蔽曲线如图15所示。

由图15可知,不同长宽比孔缝控制机箱屏蔽效能随着扫描频率的增大而减小。在相同面积情况下,不同长宽比孔缝控制机箱的屏蔽效能相差较大。在同一扫描频率下,长宽比为2.5矩形孔缝的屏蔽效果好于长宽比为5相同面积的矩形孔缝的屏蔽效果,长宽比为7.5矩形孔缝的屏蔽效果最差。因此,在对控制机箱孔缝进行设计时尽可能将矩形孔缝的长宽比设计得比较小。

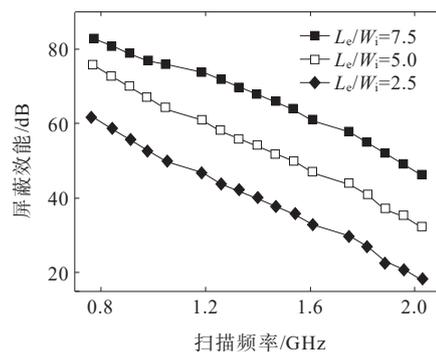


图 15 不同频段不同长宽比屏蔽效能曲线

Figure 15 Shielding efficiency curves at different frequency bands and with different aspect ratios

### 2.4 孔阵数量对屏蔽效能的影响

在实际设计机箱的散热孔时,机箱的散热孔设计得过大,控制机箱内容易积灰,严重影响控制系统的工作性能。因此,通常将散热孔设计成多孔缝,以平衡散热与防尘的需求。接下来,研究不同孔缝孔阵数量对控制机箱屏蔽效能的影响具有重要意义。

为了探究孔阵数量对控制机箱屏蔽效能的影响,在同一大小控制机箱的 $x=0$  mm一侧中心设计孔阵数量分别为 $1\times 1$ 、 $2\times 2$ 、 $4\times 4$ 孔缝,对应的矩形大小尺寸的 $32\text{ mm}\times 32\text{ mm}$ 、 $16\text{ mm}\times 16\text{ mm}$ 、 $8\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 。这3种不同孔阵数量孔缝大小相等。分别对孔阵数量分别为 $1\times 1$ 、 $2\times 2$ 、 $4\times 4$ 孔缝的矩形孔缝机箱进行仿真分析。图16为 $1\times 1$ 孔阵控制机箱在该频段内电磁场仿真结果,图17为 $2\times 2$ 孔阵控制机箱在该频段内电磁场仿真结果,图18为 $4\times 4$ 孔阵控制机箱在该频段内电磁场仿真结果。

由图16~18可知,不同数量孔阵开孔在不同频段中表现出不同的屏蔽效能特性,用控制机箱外电磁场强度和 $y=200$  mm处的箱体 $xz$ 平面中心位置

电磁场仿真结果代入式(3)、(4)计算出控制机箱在 0.8~2.0 GHz 的频段范围内的屏蔽效能。根据计算结果作出在不同频段范围内不同孔阵数量开孔屏蔽曲线,如图 19 所示。

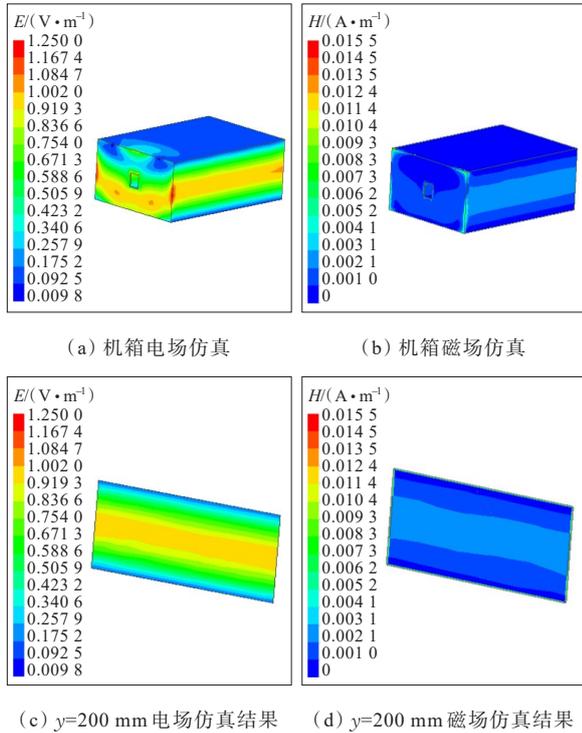


图 16 1×1 孔阵控制机箱仿真结果

Figure 16 Simulation results of control box with 1×1 hole array

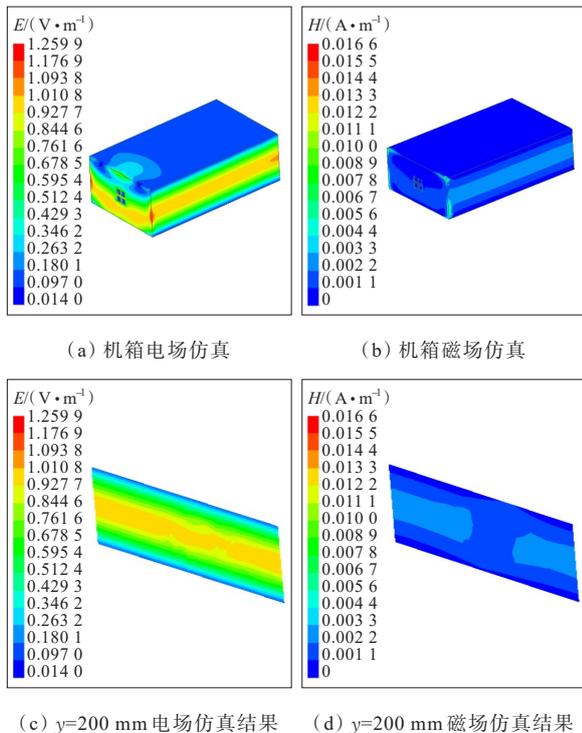


图 17 2×2 孔阵控制机箱仿真结果

Figure 17 Simulation results of control box with 2×2 hole array

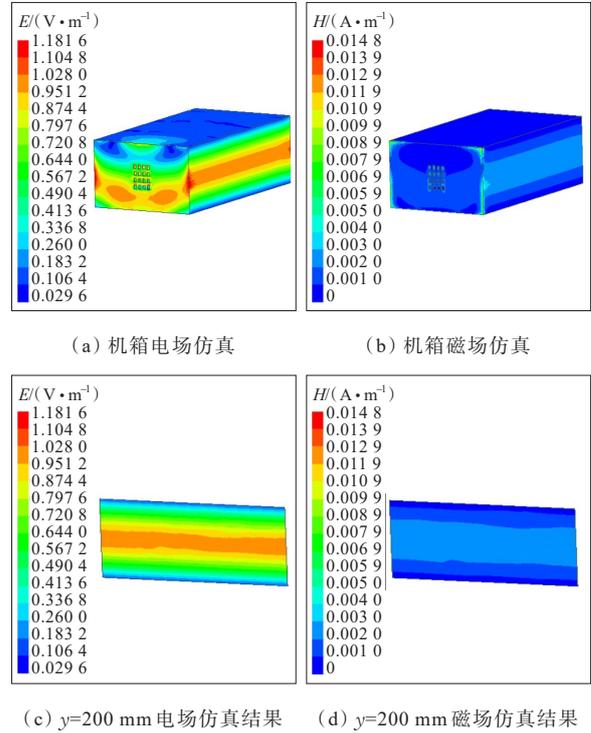


图 18 4×4 孔阵控制机箱仿真结果

Figure 18 Simulation results of control box with 4×4 hole array

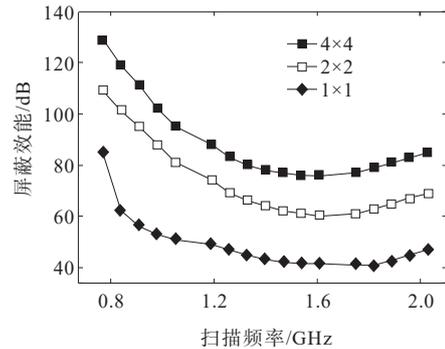


图 19 不同频段不同孔阵数量屏蔽效能曲线

Figure 19 Shielding efficiency curves at different frequency bands and with different hole array quantities

在同一扫描频率下,孔阵数量为 4×4 孔缝的屏蔽效果好于相同面积的孔阵数量为 2×2 孔缝的屏蔽效果,孔阵数量为 1×1 孔缝的屏蔽效果最差。在 0.8~1.6 GHz 频段,孔缝屏蔽效能随着扫描频率的增大逐渐减小,在 1.6~2.0 GHz 频段,孔缝屏蔽效能随着扫描频率的增大略有减小,但随着扫描频率增大,控制机箱屏蔽效能改变的幅度越小。孔阵数量为 1×1 孔缝与孔阵数量为 2×2 孔缝屏蔽效能减小程度大于孔阵数量为 2×2 孔缝与孔阵数量为 4×4 孔缝屏蔽效能减小程度。可以推测,相同开孔面积下,随着孔缝孔阵越来越多,孔缝的屏蔽效能上升的幅度会越来越小。因此,在对控制机箱孔缝孔阵数量进行设计应该根据机箱具体大小设计合适的

孔阵数量。

### 2.5 孔阵间隔对屏蔽效能的影响

机箱的散热孔一般设计为多孔阵的孔缝,孔阵之间间隔也会影响控制机箱屏蔽效能。为了探究孔阵间隔对控制机箱屏蔽效能的影响,图20为孔阵间隔示意图,在同一大小控制机箱的 $x=0\text{ mm}$ 一侧中心设计了 $1\ 024\text{ mm}^2$ 的孔阵数量为 $2\times 2$ 的孔缝,孔阵均匀分布,3个孔缝孔阵间隔分别为 $d_h=d_v=8、14、18\text{ mm}$ 。

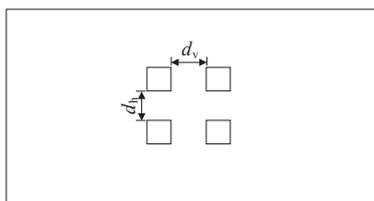
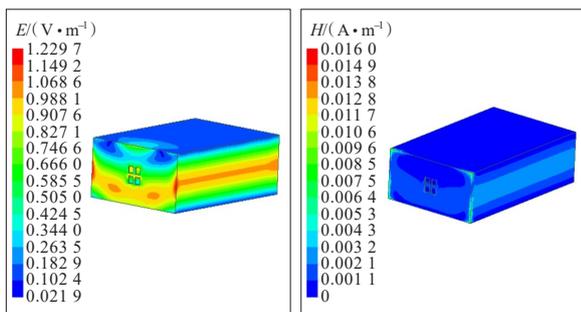


图20 孔阵间隔示意

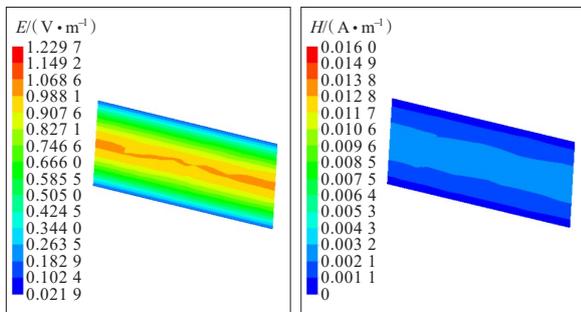
Figure 20 Hole array spacing

对3个孔缝孔阵间隔分别为 $d_h=d_v=8、14、18\text{ mm}$ 的孔缝机箱进行仿真分析。图21为 $d_h=d_v=10\text{ mm}$ 孔阵控制机箱在该频段内电磁场仿真结果。图22为 $d_h=d_v=15\text{ mm}$ 孔阵控制机箱在该频段内电磁场仿真结果。图23为 $d_h=d_v=20\text{ mm}$ 孔阵控制机箱在该频段内电磁场仿真结果。



(a) 机箱电场仿真

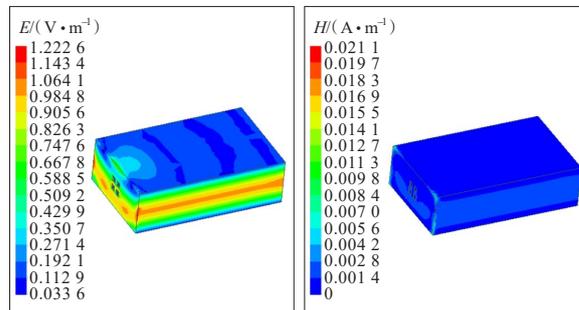
(b) 机箱磁场仿真



(c)  $y=200\text{ mm}$  电场仿真结果 (d)  $y=200\text{ mm}$  磁场仿真结果

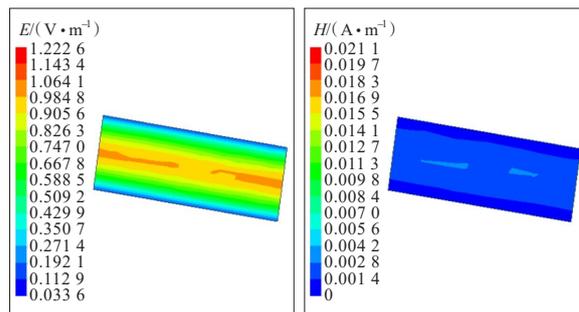
图21  $d_h=d_v=10\text{ mm}$  孔阵控制机箱仿真结果

Figure 21 Simulation results of control box with  $d_h=d_v=10\text{ mm}$  hole array



(a) 机箱电场仿真

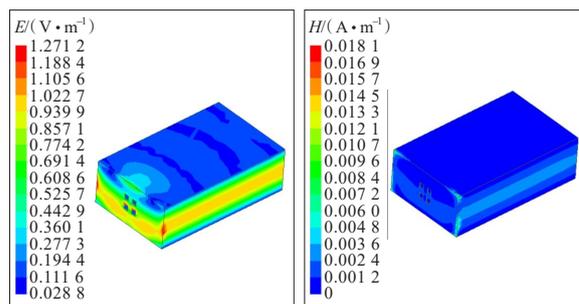
(b) 机箱磁场仿真



(c)  $y=200\text{ mm}$  电场仿真结果 (d)  $y=200\text{ mm}$  磁场仿真结果

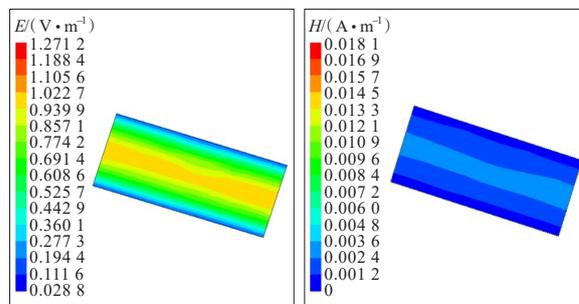
图22  $d_h=d_v=15\text{ mm}$  孔阵控制机箱仿真结果

Figure 22 Simulation results of control box with  $d_h=d_v=15\text{ mm}$  hole array



(a) 机箱电场仿真

(b) 机箱磁场仿真



(c)  $y=200\text{ mm}$  电场仿真结果 (d)  $y=200\text{ mm}$  磁场仿真结果

图23  $d_h=d_v=20\text{ mm}$  孔阵控制机箱仿真结果

Figure 23 Simulation results of control box with  $d_h=d_v=20\text{ mm}$  hole array

由图21~23可知,不同孔缝间隔的开孔在不同频段中表现出不同的屏蔽效能特性。将控制机箱外电磁场强度和 $y=200\text{ mm}$ 处的箱体 $xz$ 平面中心位置电磁场仿真结果代入式(3)、(4),计算出控制

机箱在 0.8~2.0 GHz 的频段范围内的屏蔽效能。根据计算结果作出的不同频段范围内不同数量孔阵开孔孔缝的屏蔽曲线如图 24 所示。可知,不同间隔孔缝的控制机箱屏蔽效能随着扫描频率的增大而减小。在同一扫描频率下,孔缝间隔为 10 mm 孔缝的屏蔽效果与孔缝间隔为 15、20 mm 孔缝的屏蔽效果基本没有差别,这说明改变孔缝间隔对控制机箱的屏蔽效能没有大的帮助。因此,在设计控制机箱孔缝时,基本不用考虑孔缝间隔的影响。

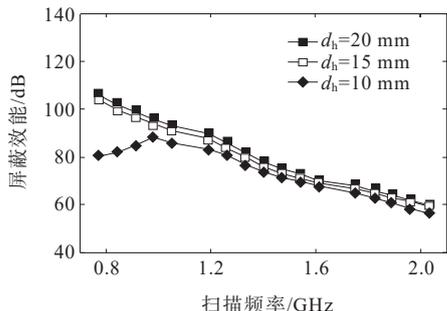
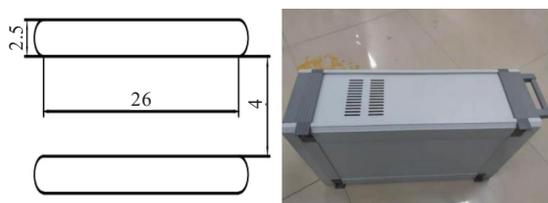


图 24 不同频段不同间隔孔缝屏蔽效能曲线

Figure 24 Shielding efficiency curves at different frequency bands and with different hole spacing

### 3 控制机箱设计

根据孔缝对机箱屏蔽效能的影响分析结果,并结合实际设计需要,对 110 kV 带电作业机器人控制机箱做出如下设计:机箱材料使用铝合金,机箱尺寸为 300 mm×500 mm×140 mm,箱体壁厚为 2.5 mm。孔缝分为两排,每排单个孔缝由矩形与 2 个半圆平滑相接。矩形长为 26 mm,宽为 2.5 mm,半圆半径为 1.25 mm。单个孔缝之间间隔为 4 mm,两排孔缝间相距 16 mm,孔缝与控制机箱距离为 80 mm。机箱设计如图 25 所示。

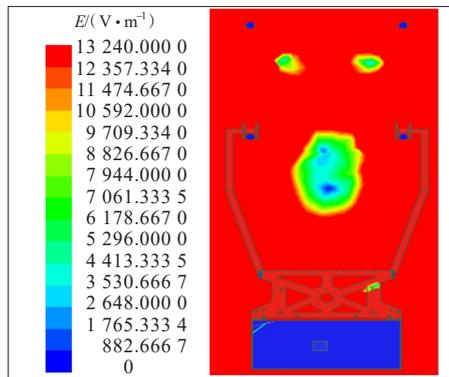


(a) 孔缝示意 (b) 控制机箱实物

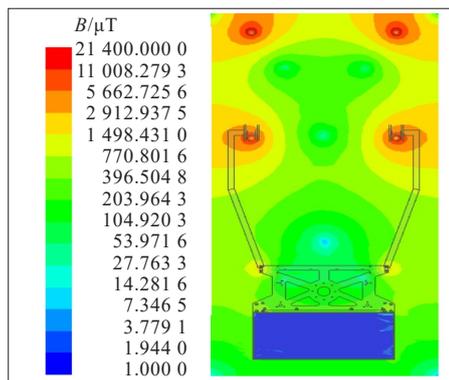
图 25 机箱设计

Figure 25 Box design

将设计好的控制机箱安装在带电作业机器人中,对带电作业机器人进行仿真。带电作业机器人在 110 kV 线路正常工作时,电磁仿真结果如图 26 所示,图 26(a)为机器人电场仿真结果,图 26(b)为机器人磁场仿真结果。



(a) 机器人电场仿真结果



(b) 机器人磁场仿真结果

图 26 机器人电磁仿真结果

Figure 26 Electromagnetic simulation results of robot

由图 26 可得,控制机箱内部最大场强值为 1 732 V/m,远低于 4 kV/m 的空气击穿场强,可以保证机器人机箱内部电子器件不受电场影响。磁场主要分布在导线周围,机器人表面尖端会出现较大磁场,机箱内部磁场最小,但是由于机箱孔缝会与磁场发生耦合,机箱孔缝两侧出现较大磁场,机箱内部磁场较为均匀,最大磁场为 21 μT,远低于 0.1 mT 的标准。根据仿真结果可知,设计的带电作业机器人控制机箱在 110 kV 输电线路环境中,机箱内部电磁环境远低于国内外标准,满足防护需求。

### 4 结语

本文根据带电作业机器人控制机箱电磁防护标准,对控制机箱的电磁场屏蔽要求进行计算分析,得到以下结论:

- 1) 当屏蔽箱体上的孔缝面积相同时,虽然圆形孔缝的屏蔽效能要优于矩形孔缝和正方形孔缝,但从散热角度考虑,选用矩形更佳;
- 2) 在矩形孔缝面积相同条件下,矩形孔缝的长宽比越小,机箱屏蔽效能越好;
- 3) 相同开孔面积下,随着孔缝孔阵越多,孔缝

的屏蔽效能越好;

4) 孔缝间隔对设计控制机箱孔缝没有太大影响。

在以上研究结论的基础上,设计出合理的机箱孔缝,仿真结果证明了所设计的控制机箱满足防护要求,能够运用于复杂的电磁环境,对带电作业机器人的工作具有重要的指导意义。

#### 参考文献:

- [1] 贺家慧,张丹丹,张露,等.变电站工频电磁场对避雷器在线监测装置测量稳定性影响试验研究[J].高压电器,2022,58(12):117-122.  
HE Jiahui, ZHANG Dandan, ZHANG Lu, et al. Experimental study on measurement stability of online monitoring device for surge arrester under power frequency interference of electric field and magnetic field in the substations[J].High Voltage Apparatus, 2022, 58(12):117-122.
- [2] 张志猛,贾伯岩,刘杰,等.导线表面缺陷下的电场强度仿真及测试[J].科学技术与工程,2019,19(15):163-169.  
ZHANG Zhimeng, JIA Boyan, LIU Jie, et al. Electric field simulation and testing on surface defect of the wire[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(15):163-169.
- [3] 陈震平,林凌.典型110 kV变电站站界电磁环境现状分析[J].高压电器,2011,47(7):94-98.  
CHEN Zhenping, LIN Ling. Analysis of the electromagnetic environments around the typical 110 kV transformer substations[J].High Voltage Apparatus, 2011, 47(7):94-98.
- [4] 鲁守银,史向东,苏建军.10 kV配电带电作业机器人绝缘防护设计[J].高压电器,2006,42(1):8-10.  
LU Shouyin, SHI Xiangdong, SU Jianjun. Insulation protection design of live working robot for 10 kV distribution power systems[J].High Voltage Apparatus, 2006, 42(1):8-10.
- [5] 高文翔.输电线路带电作业机器人的电磁分析与防护设计[D].长沙:长沙理工大学,2018.  
GAO Wenxiang. Electromagnetic analysis and protection design of live working robot for transmission lines[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2018.
- [6] 汤明东.智能变电站隔离断路器带电作业机器人关键技术[D].上海:上海交通大学,2019.  
TANG Mingdong. Hot-line working robot for the maintaining of disconnecting circuit breaker in intelligent substations[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [7] 刘兴发,刘华钢,刘庭,等.带电作业机器人交流电弧放电电流特性研究[J].高电压技术,2022,48(6):2410-2417.  
LIU Xingfa, LIU Huagang, LIU Ting, et al. Research on characteristics of AC arc discharge current of live working robot[J].High Voltage Engineering, 2022, 48(6): 2410-2417.
- [8] 刘召,李聪利,耿美晓,等.基于激光光斑的带电作业机器人线缆定位方法[J].应用激光,2020,40(1):140-146.  
LIU Zhao, LI Congli, GENG Meixiao, et al. Cable location method of live working robot based on laser spot[J]. Applied Laser, 2020, 40(1):140-146.
- [9] 胡子琦,苑晶,公岩松,等.面向配网带电作业机器人的输电线引线重建[J].控制工程,2021,28(11):2123-2130.  
HU Ziqi, YUAN Jing, GONG Yansong, et al. Reconstruction of lead wires of power lines for live-line working robots in distribution networks[J]. Control Engineering of China, 2021, 28(11):2123-2130.
- [10] 张静,黄国方,刘晓铭,等.配网带电作业机器人精准作业定位方法[J].电网技术,2022,46(2):812-819.  
ZHANG Jing, HUANG Guofang, LIU Xiaoming, et al. Precise positioning for live working on distribution line [J].Power System Technology, 2022, 46(2):812-819.
- [11] 蔡晓斌,刘荣海,杨发,等.基于机器人视觉识别的防震锤智能运维研究[J].云南电力技术,2020,48(4):2-6.  
CAI Xiaobin, LIU Ronghai, YANG Fa, et al. Research on vibration damper maintenance technology based on robot visual recognition[J].Yunnan Electric Power, 2020, 48(4):2-6.
- [12] LI W H, FAN Y B, JIANG A F, et al. Intelligent control method of live working robot based on cloud and edge computing terminal[C]//2020 10th International Conference on Power and Energy Systems (ICPES). Chengdu, China. IEEE, 2020:321-325.
- [13] JIA J, ZHANG F, GUO R, et al. Research on Live working Robot technology for 500 kV Overhead transmission line [C]//2021 IEEE 5th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Xi'an, China. IEEE, 2021:474-478.
- [14] 王岩,胡聪,党世轩,等.110 kV输电线路绝缘子带电清扫机器人电磁兼容性能分析[J].电力学报,2020,35(5):424-431.  
WANG Yan, HU Cong, DANG Shixuan, et al. Performance analysis of electromagnetic compatibility of insulator live-line cleaning robot for 110 kV transmission lines[J]. Journal of Electric Power, 2020, 35(5):424-431.
- [15] 冯健,罗日成,王凤,等.110 kV输电线路巡检无人机电磁环境效应分析[J].电力学报,2021,36(6):498-504.  
FENG Jian, LUO Richeng, WANG Feng, et al. Electromagnetic environment effect analysis of 110 kV transmission line patrol UAV[J]. Journal of Electric Power, 2021, 36(6):498-504.
- [16] 李妮,邬雄.国际工频电磁场暴露限值现状[J].中华劳动卫生职业病杂志,2009,27(9):565-568.  
LI Ni, WU Xiong. Status quo of international power frequency electromagnetic field exposure limit[J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases, 2009, 27(9):565-568.