

基于霍尔效应测量手机表面的三维磁场分布

朱严超¹ 陆子聪¹ 王启帆¹ 张千已¹ 张薇薇²

(¹ 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院,湖北 武汉 430074;

² 中国地质大学(武汉)数学与物理学院,湖北 武汉 430074)

摘 要 在 21 世纪信息呈爆炸式增长的互联网时代,智能手机在现代人的日常生活中扮演着极为关键的角色。手机在待机及充电过程中会产生微弱的磁场,该磁场可能对周围环境以及人体健康造成一定的影响。本论文基于霍尔效应,结合三维平台定位及对称测量法,测量了待机及充电状态下两种品牌智能手机屏幕附近的磁感应强度分布。结果显示,两种不同品牌型号手机磁场的分布及强度均有明显区别,其分布与手机内部构造相关。在待机和充电状态下,华为手机的磁感应最大强度分别为 2.13mT 与 3.33mT,苹果手机则分别为 5.50mT 和 5.97mT。对比待机与充电两种状态,不同品牌手机充电时屏幕表面磁场均比待机时强度更大。另外,两种手机表面磁场的磁感应强度均随距离增加呈指数衰减。此结果对探究手机磁场与人体健康、充电感应电磁特性及电磁兼容设计等领域具有重要意义。

关键词 霍尔效应;对称测量法;手机屏幕;磁感应强度

MEASUREMENT OF MAGNETIC FIELD DISTRIBUTION NEAR SMARTPHONE SCREENS BASED ON THE HALL EFFECT

ZHU Yanchao¹ LU Zicong¹ WANG Qifan¹ ZHANG Qianyi¹ ZHANG Weiwei²

(¹ School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074;

² School of Mathematics and Physics, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074)

Abstract In the 21st century, in the internet age where information grows explosively, smartphones play a crucial role in modern people's daily lives. When smartphones are on standby or being charged, they generate a weak magnetic field, which may affect the surrounding environment and human health. This paper, based on the Hall effect and using 3D platform positioning as well as symmetric measurement methods, measured the magnetic flux density near the screens of two brands of smartphones in both standby and charging states. Results showed that both the distribution and intensity of the magnetic fields of the two different brands and models of phones differed significantly, and the distribution was related to the internal structure of the phones. For Huawei phones, the maximum magnetic flux density in standby and charging states was 2.13 mT and 3.33 mT, respectively, while for Apple phones, the corresponding values were 5.50 mT and 5.97 mT. Compared to standby mode, when being

收稿日期: 2025-03-26

基金项目: 国家自然科学基金(项目编号:22204151);中国地质大学(武汉)实验技术研究项目(SJ-202414)。

通信作者: 张薇薇, zhangweiwei@cug.edu.cn。

引文格式: 朱严超, 陆子聪, 王启帆, 等. 基于霍尔效应测量手机表面的三维磁场分布[J]. 物理与工程, 2025, 35(5): 221-227, 234.

Cite this article: ZHU Y C, LU Z C, WANG Q F, et al. Measurement of magnetic field distribution near smartphone screens based on the Hall effect[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(5): 221-227, 234. (in Chinese)

charged, the magnetic flux density on the screen surface of both brands of phones was higher. In addition, the magnetic flux density of the magnetic field on the surface of both types of phones decreased exponentially with increasing distance. The findings are significant for exploring the relationship between mobile phone magnetic fields and human health, charging induction electromagnetic characteristics, and electromagnetic compatibility design.

Key words Hall effect; symmetric measurement method; smartphone screen; magnetic induction intensity

随着科技的飞速发展,人们对智能手机的依赖性不断增强,许多人在充电时仍然使用手机。在国际上,电磁辐射对人体的影响通常以“比吸收率(SAR)”作为衡量标准^[1],磁感应强度影响电磁波的整体强度,从而间接影响生物组织中的能量吸收,即 SAS 值。电磁辐射在一定强度下可能对人体产生影响,包括潜在的神经系统损伤、心血管功能变化以及内分泌系统紊乱。此外,电磁辐射还可能导致 DNA 损伤、细胞损伤、肿瘤等疾病的发生^[2, 3]。因此,对手机辐射的相关研究有利于评估长期使用手机是否会导致肿瘤等健康问题。生活中手机常待机被置于贴身口袋中、接打电话时紧靠人们大脑,因此手机屏幕表面的磁感应强度,及其在待机和充电时的变化对电磁辐射与人体健康的研究有着重要的参考意义^[4-7]。

霍尔效应实验是大学物理实验中的一项经典实验,并被应用于测量线圈内磁感应强度的分布以及对地球微弱磁场的探测^[6, 8]。本论文基于霍尔效应原理,通过应用霍尔片传感器测量屏幕附近不同位置的霍尔电压,计算得到磁感应强度的大小;对不同品牌和型号的手机(华为 HUAWEI Nova 11, 苹果 iPhone 14)在待机与充电两种状态下进行测量,对比不同品牌型号手机的磁场分布区别及充电的影响;考虑到霍尔片中的副效应的影响,使用对称测量法来消除误差,进一步提高实验数据的准确性。

1 实验原理

霍尔效应本质上是由于运动中的带电粒子在磁场作用下受到洛伦兹力的作用而发生偏转。当这些带电粒子(如电子或空穴)被限制在固体材料内部时,这种偏转会导致在垂直于电流和磁场方向上产生电荷积累,形成正负电荷在不同侧面的

分离,进而产生一个额外的横向电场。这一现象可以通过以下示意图来说明^[9]

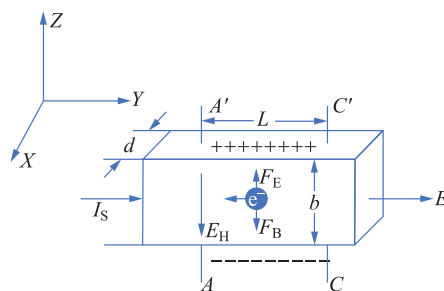


图1 霍尔效应原理实验图

磁场 B 的方向为 X 轴的正向,与之垂直的半导体薄片上沿 Y 轴正向通以电流 I_s (称为工作电流),假设载流子为电子(N 型半导体材料),它沿着与电流 I_s 相反的 Y 轴负向运动。

由于洛伦兹力 F_L 作用,电子即向图中 Z 轴负方向的底侧偏转,并使底面形成电子积累,而相对的上表面则形成正电荷积累。与此同时运动的电子还受到由于两种积累的异种电荷形成的反向电场力 F_E 的作用。随着电荷积累的增加, F_E 增大,当两力大小相等(方向相反)时, $F_L = F_E$ 则电子积累便达到动态平衡。这时在上下两端面之间建立电场称为霍尔电场 E_H ,相应的电势差称为霍尔电势 V_H 设电子按均一速度 v ,向图示的 Y 轴负方向运动,在磁场 B 作用下,所受洛伦兹力为

$$F_L = -evB \quad (1)$$

其中, e 为电子电量, v 为电子漂移平均速度, B 为磁感应强度。同时,电场作用于电子的力为其中, E_H 为霍尔电场强度, V_H 为霍尔电势, b 为霍尔元件宽度。

当达到动态平衡时

$$F_L = -F_E \quad (2)$$

$$vB = -\frac{V_H}{b} \quad (3)$$

设霍尔元件宽度为 b , 厚度为 d , 载流子浓度为 n , 则霍尔元件的工作电流为

$$I_s = nevbd \quad (4)$$

由式(3)、式(4)两式可得

$$V_H = E_H b = \frac{1}{ne} \frac{I_s B}{d} = R_H \frac{I_s B}{d} \quad (5)$$

即霍尔电压 V_H 与 I_s 、 B 的乘积成正比。

当霍尔元件的材料和厚度确定时, 设:

$$K_H = \frac{R_H}{d} = \frac{I}{ned} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中得

$$V_H = K_H I_s B \quad (7)$$

其中, K_H 称为元件的灵敏度, 它表示霍尔元件在单位磁感应强度和单位控制电流下的霍尔电势大小, 其单位是 $[\text{mV}/\text{mA} \cdot \text{T}]$ 。

$$B = \frac{V_H}{I_s K_H} \quad (8)$$

2 手机待机状态及电池充电过程

当手机处于待机状态时, 屏幕虽然未工作, 但其他部件仍处于工作状态中, 并且蓄电池处于放电状态, 故电路中存在微弱的电流, 因此手机附近仍有微弱的电磁场产生。手机内部不同的配件和构造, 例如无线充电线圈、摄像头自动对焦模块、无线通信天线等(如图2所示), 使得手机屏幕附近产生的磁场分布和强度均不同^[10,11]。



图2 iPhone 14 手机背面拆机图

当手机通过有线充电器充电时, 电源适配器将家用交流电(AC)转换为适合手机电池充电的直流电(DC), 并通过充电线将直流电传输到手机内部, 以化学能的形式储存起来(如图3所示), 手

机内部有一个充电电路, 通过电磁感应接口电路出来的直流电可以直接接入手机充电电路的电流输入端, 生成稳定的直流电, 其通过充电控制器对手机锂电池充电^[10]。

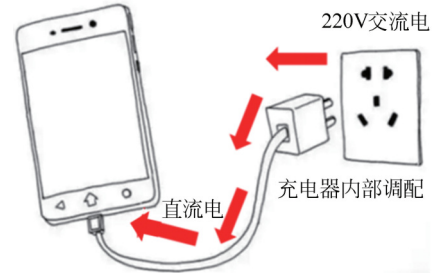


图3 手机充电时电流转化图

3 利用对称测量法减小副效应及误差

测量霍尔电势 V_H 时, 不可避免的会产生一些副效应, 由此而产生的附加电势叠加在霍尔电势上, 形成测量系统误差, 这些副效应有不等位电势、爱廷豪森效应、伦斯脱效应及里纪-勒杜克效应(如图4所示), 以及该实验装置测量方式所产生的霍尔片位置定位系统误差^[12]。

3.1 对称测量法减小副效应电势

为了减少效应的附加电势差, 利用这些附加电势差与霍尔元件工作电流 I_s 和磁场 B 的关系, 采用对称测量法进行测量^[13]。

当 $+I_s, +B$ 时

$$V_{AB1} = +V_H + V_O + V_E + V_N + V_R$$

当 $-I_s, +B$ 时

$$V_{AB2} = -V_H - V_O - V_E + V_N + V_R$$

当 $-I_s, -B$ 时

$$V_{AB3} = +V_H - V_O + V_E - V_N - V_R$$

当 $+I_s, -B$ 时

$$V_{AB4} = -V_H + V_O - V_E - V_N - V_R$$

对以上四式作如下运算则得

$$\frac{1}{4}(V_{AB1} - V_{AB2} + V_{AB3} - V_{AB4}) = V_H + V_E$$

可见, 除爱廷豪森效应以外的其他副效应产生的电势差会全部消除, 但在非大电流、非强磁场下, $V_H \gg V_E$, 因而 V_E 可以忽略不计, 由此可得

$$V_H \approx V_H + V_E = \frac{V_1 - V_2 + V_3 - V_4}{4}$$

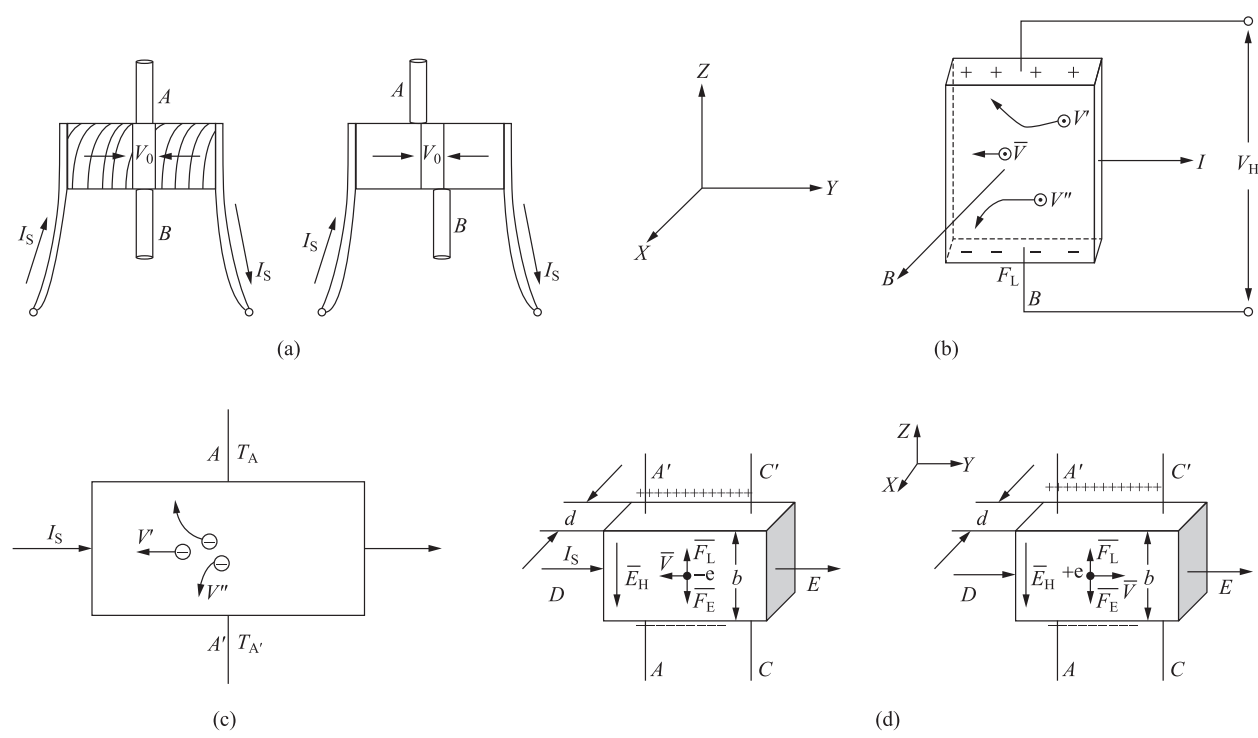


图 4 霍尔效应副效应示意图
(a) 不等位电势图；(b) 伦斯脱效应；(c) 爱廷豪森效应；(d) 里纪—勒杜克效应

3.2 定位系统误差

本实验采用对称测量法进行测量,需要改变霍尔片正反面放置来改变场强 B 的方向(霍尔片如图 5 所示)。本实验以手机屏幕表面处为 X 轴原点,由于霍尔片与电路板厚度的影响,霍尔片反面放置时距离手机表面的最小值为霍尔片的厚度 3.80mm(使用游标卡尺测量,如图 6(a)所示),因此测量点距离屏幕的最小距离为 3.80mm;另外当霍尔片正面放置时,将霍尔片调至紧贴手机表面后,再使读数增加 2.30mm,使得霍尔片的位置与其背面朝屏幕时与屏幕的距离一致,如图 6(b)所示。即可使其位于与霍尔片反面放置时相同的位置,从而减小三维平移台 X 轴方向的定位系统误差。

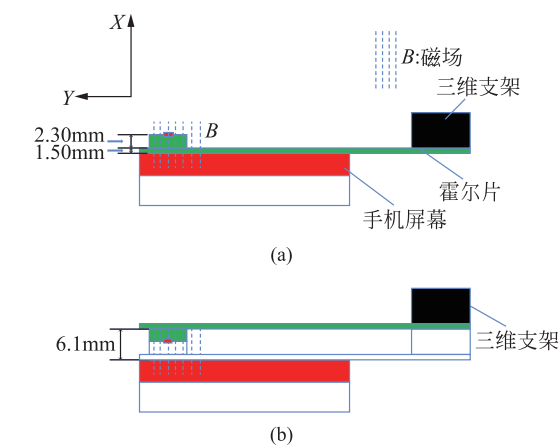


图 6 霍尔片定位系统误差
(a) 霍尔片背面朝向屏幕时设备；(b) 霍尔片正面朝向屏幕时设备

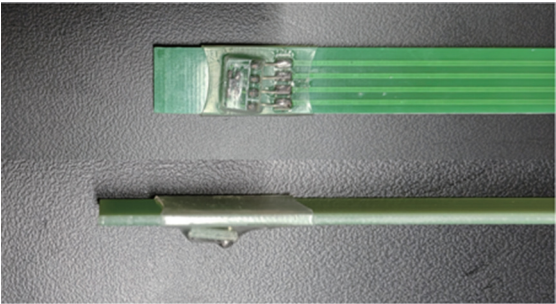


图 5 霍尔片示意图

4 实验内容

4.1 测量霍尔元件的灵敏度

实验使用的是杭州大华 DH4512 型霍尔效应测试仪(如图 7 所示),并在此基础上对其进行改装。增加了可移动的三维支架以确定测量点的空间位置(如图 8)。测量过程中分别将霍尔片正反面测量,并利用对称测量法来消除误差。

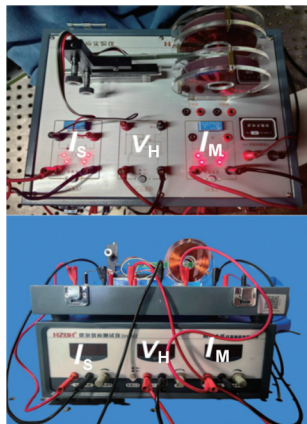


图7 霍尔效应实验装置

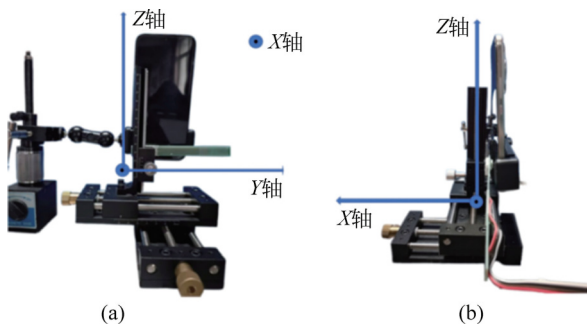


图8 三维支架平台(a)正视图、(b)侧视图

(1) 准备工作:将霍尔元件移至直螺线管中部,打开实验仪器开关切换至 V_H ,将 I_S 、 I_M 调零,打开电源,调节调零旋钮,使 V_H 显示为 0mV 。

(2) 测量 V_H 与 I_S 的线性关系。

① 调节 $I_M=500\text{mA}$

② 调节 I_S ,从 0 开始每次递增 0.50mA ,分别测量霍尔电压 V_H 值,并求平均值。

③ 绘出 V_H-I_S 曲线。

(3) 测量 V_H 与 I_M 的线性关系。

① 调节 $I_S=3.00\text{mA}$ 。

② 调节 I_M ,从 0 开始每次递增 50mA ,分别测量霍尔电压 V_H 值。

③ 绘出 V_H-I_M 曲线。

(4) 根据 V_H-I_S 与 V_H-I_M 曲线,由斜率求 R_H 的值及平均值,根据公式(6)计算霍尔灵敏度 K_H 。

4.2 测量不同型号手机屏幕附近的磁场三维分布

4.2.1 测量手机待机时的磁场

1) 霍尔片正面放置的测量

打开电源,将 I_S 调零,调节调零旋钮,使实验仪

中间的 V_H 显示为 0mV 。调零后设置 $I_S=1.00\text{mA}$ 不变。组装带有刻度的XYZ三维可移动支架与手机支架(图8)。将手机平行于三维支架YZ平面,并且长边与Z轴平行,短边与Y轴平行,固定于手机支架上。将霍尔片固定在三维可移动支架上,使其正面朝向手机并平行于手机屏幕放置,且保持其与手机屏幕的垂直距离为 2.3mm (如图8(b)所示),此时测量点的X轴位置坐标为 3.8mm 。

将霍尔片放置于距离手机平面 3.8mm 的位置,然后保持X轴坐标不变,从 $Z=0$ 位置开始,以 5.0mm 为间距右移霍尔片,测量在同一个Z轴上不同的Y轴坐标所对应的点的霍尔电压大小;更换Z轴坐标,以 5.0mm 为间距,重复上述步骤,直至测量了该X轴坐标下整个手机平面(YZ平面)上的点的电压为止,并记录下数据 V_1 , V_2 。调整X轴坐标,重复上述步骤,直至获得三维空间坐标下的霍尔电压(然后更换手机重复上述测量步骤)。

2) 霍尔片反面放置的测量

将霍尔片反面朝向并紧贴手机屏幕与其平行放置。具体测量方法及步骤同正面放置的测量一致,记录下数据 V_3 , V_4 ,然后根据公式计算出各个坐标点的磁场大小。

4.2.2 测量手机充电时的磁场

使用手机原装充电器对手机进行充电,测量手机充电过程中屏幕附近磁场的分布情况。操作步骤与上述方法一致。

5 数据处理与结果分析

5.1 测量霍尔灵敏度

图9(a)(b)经过直线拟合,得到 V_H-I_S 图的斜率 K_1 为 2.20 , V_H-I_M 图的斜率 K_2 为 1.32 ,可计算得 $K_H=174\text{mV}/\text{mA}\cdot\text{T}$ 。

5.2 手机屏幕上的磁场分布

首先本文探索了与手机屏幕平行的二维平面上的磁场强度分布情况。图10和图11分别为iPhone 14与HUAWEI Nova 11手机在充电和手机待机时,手机平面上距离最近为 3.8mm 处的磁场分布特征图,其中用颜色深浅表示磁感应强度的大小。

将两种手机的磁场磁感应强度的变化范围整理至表1。

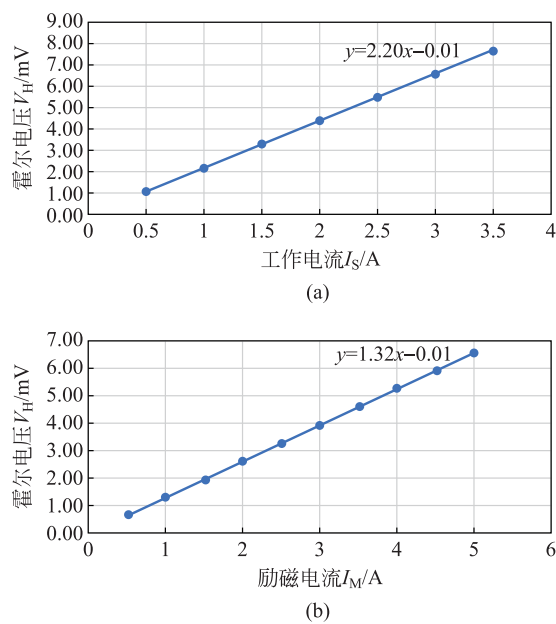


图 9 霍尔电压与(a)工作电流、(b)励磁电流的关系曲线

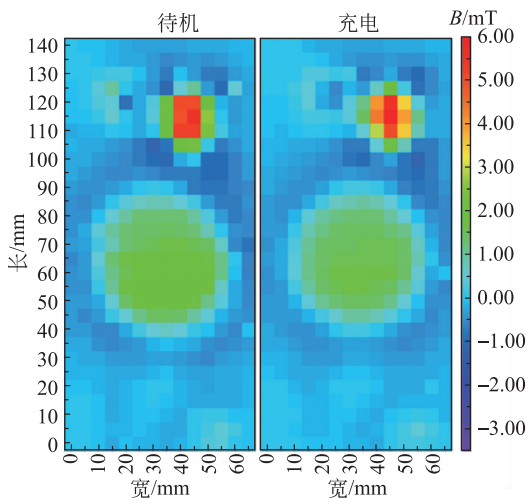


图 10 iPhone 14 待机(左)充电(右)磁感应强度分布图

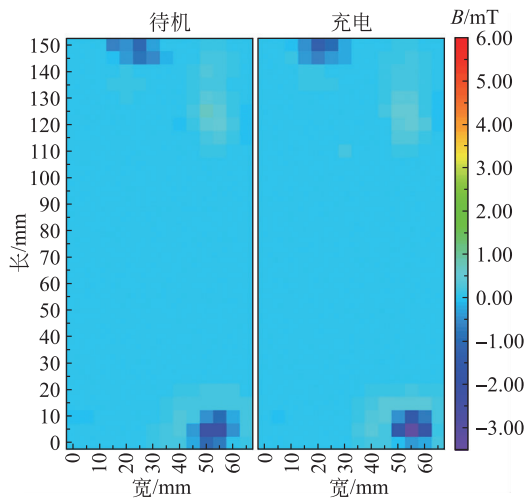


图 11 HUAWEI Nova 11 待机(左)充电(右)磁感应强度分布图

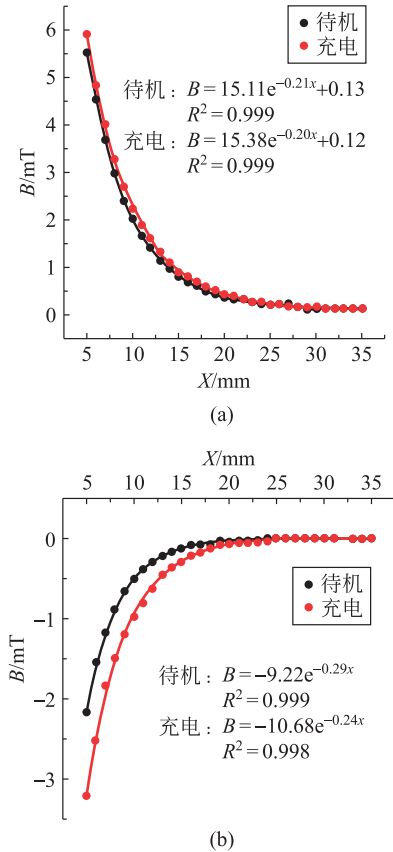


图 12

(a) iPhone 14 手机磁感应强度随与屏幕距离 X 的变化关系图; (b) HUAWEI Nova 11 手机磁场磁感应强度随与屏幕距离 X 的变化图

表 1 不同手机的磁场磁感应强度绝对值范围

手机型号	待机时手机磁场强度范围/mT	充电时手机磁场强度范围/mT
HUAWEI Nova 11	0~2.13	0~3.33
iPhone 14	0~5.50	0~5.97

从图 10 中可以看出 iPhone 14 手机在待机和充电时磁感应强度大小分布,最大强度的位置在右上角镜头配件附近,从 5.50mT 增强至 5.97mT。由于 iPhone 14 手机具备无线充电功能,因而手机中心部位具有明显的磁感应强度,约为 2.10mT。

图 11 为 HUAWEI Nova 11 手机在充电和待机时的手机平面磁场分布特征图。从图中可以看出手机磁感应强度较强的位置在手机扩音器位置,其次在摄像头位置附近。充电使得最大磁感应强度变化明显,从 2.13mT 增强至 3.33mT。

在整体对比之下, HUAWEI Nova 11 手机屏幕各处的磁感应强度大小明显小于 iPhone 14 手机, 并且整体上分布的更加分散。

接着我们对手机屏幕附近磁感应强度随距离的变化规律进行了研究, 取 YZ 二维平面内强度最大值位置为测量对象, 随 X 轴距离的变化, 该点的磁感应强度变化如图 12 所示。

从图中可以看出, 两部手机均呈现出磁感应强度随与手机屏幕的距离增加而指数减小的规律, 也就是距离手机屏幕越远的位置, 手机所产生的磁场越微弱。根据拟合公式, HUAWEI 手机表面磁感应强度衰减指数更大, 随距离的增加强度衰减更快。

6 结语

在手机使用极为频繁的现代生活中, 手机屏幕附近的电磁场强度和分布对人体健康、电磁环境等有着一定的影响或干扰。我们基于霍尔片、霍尔效应仪器及组装 3D 支架, 对苹果和华为两种型号的手机在待机和充电两种状态下的屏幕附近三维磁场的磁感应强度进行了测量, 得出以下结论:

(1) 手机屏幕附近存在着客观存在的, 影响无法被忽略的磁场。测得的待机时 iPhone 14 手机会在待机时产生最大值为 5.50mT 的磁场, 充电时产生最大值为 5.97mT 的磁场, 而 HUAWEI Nova 11 会在待机时产生最大值为 2.13mT 的磁场, 充电时产生最大值为 3.33mT 的磁场。

(2) 随着距屏幕距离的增加, 两部手机的磁感应强度均呈指数衰减趋势, HUAWEI Nova 11 衰减系数更大, 在距离屏幕约 20mm 时, 强度已衰减至接近为 0。

(3) 充电时, 会使手机的磁场变强, 长时间置身于磁场环境中, 可能对人体产生一定影响。因此, 在日常生活中, 为了减少电磁辐射对我们健康的潜在影响, 我们应当采取谨慎的态度, 保持适当的安全距离。

参 考 文 献

[1] 左胜, 白杨, 张玉, 等. 复杂环境中手机电磁辐射的比吸收率计算[J]. 西安电子科技大学学报, 2019, 46(2): 170-176.

ZUO S, BAI Y, ZHANG Y, et al. Calculation of specific absorption rate of electromagnetic radiation of mobile phones in complex environment[J]. Journal of Xidian University, 2019, 46(2): 170-176. (in Chinese)

[2] 阴云如, 李晨. 磁场、运动与人体健康的关系探析[J]. 中国科技信息, 2009(1): 172-173.

YIN Y R, LI S. Analysis on the relationship between magnetic field, exercise and human health[J]. China Science and Technology Information, 2009(1): 172-173. (in Chinese)

[3] 郝炳金. 磁场对人体的作用机理探析[J]. 中国科技信息, 2014(11): 52-53.

HAO B J. Analysis on the mechanism of magnetic field on human body[J]. China Science and Technology Information, 2014(11): 52-53. (in Chinese)

[4] 吴再丰. 电磁场影响人体健康[J]. 科学大众, 2002(4): 10-11.

WU Z F. Electromagnetic field affects human health[J]. Science of the Public, 2002(4): 10-11. (in Chinese)

[5] 张沈麒, 高红, 李华, 等. 基于霍尔效应测量电磁辐射的研究[J]. 物理与工程, 2018, 28(2): 118-122.

ZHANG S L, GAO H, LI H, et al. Research of measuring electromagnetic radiation based on hall effect[J]. Physics and Engineering, 2018, 28(2): 118-122. (in Chinese)

[6] 彭子龙, 张艺耀, 李一楠, 等. 基于霍尔效应弱磁场测量装置的研制与应用[J]. 现代电子技术, 2016, 39(7): 154-157.

PENG Z L, ZHANG Y Y, LI Y N, et al. The development and application of weak magnetic field measuring devices based on Hall effect[J]. Modern Electronic Techniques, 2016, 39(7): 154-157. (in Chinese)

[7] 罗宇飞. 手机电磁辐射对人体影响的分析计算[J]. 科技创新导报, 2011(12): 91.

LUO Y F. Analysis and calculation of the impact of mobile phone electromagnetic radiation on the human body[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2011(12): 91. (in Chinese)

[8] 许磊, 方立青, 肖杉, 等. 霍尔效应副效应研究及地磁场水平分量测量[J]. 大学物理, 2019, 38(8): 30-38.

XU L, FANG L Q, XIAO S, et al. Research on the side effects of the Hall effect and measurement of the horizontal component of the geomagnetic field[J]. College Physics, 2019, 38(8): 30-38. (in Chinese)

[9] 戴国平. 霍尔效应原理与应用分析[J]. 科协论坛(下半月), 2013(11): 34-35.

DAI G P. Analysis of the principle and application of Hall effect[J]. Science and Technology Association Forum (Second half of the month), 2013(11): 34-35. (in Chinese)

[10] 季莉莉, 李焯, 蒋兆林, 等. 锂电池智能充电器的设计[J]. 电子科技, 2016(2): 159-162.

- [26] MARTÍNEZ L. Measuring the conductivity of very dilute electrolyte solutions, drop by drop[J]. *Quimica Nova*, 2018, 41: 814-817.
- [27] CHOWDHURI S, CHANDRA A. Molecular dynamics simulations of aqueous NaCl and KCl solutions: Effects of ion concentration on the single-particle, pair, and collective dynamical properties of ions and water molecules[J]. *The Journal of Chemical Physics*, 2001, 115(8): 3732-3741.
- [28] SHI C, HE Y, HENDRIKS K, et al. A single NaK channel conformation is not enough for non-selective ion conduction[J]. *Nature communications*, 2018, 9(1): 717.
- [29] YANG Q, XING H, SU B, et al. Improved separation efficiency using ionic liquid-cosolvent mixtures as the extractant in liquid-liquid extraction: a multiple adjustment and synergistic effect[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2012, 181: 334-342.
- [30] 范宝路,周雷,刘阳. 基于静电学讨论蛋白质分子的聚沉现象[J]. *大学物理*, 2022, 41(6): 60-64.
FAN B L, ZHOU L, LIU Y. Discussion the aggregation phenomenon of protein molecules based on electrostatics [J]. *College Physics*, 2022, 41(6): 60-64. (in Chinese)
- [31] 朗道,栗弗席兹 E M. 力学[M]. 李俊峰,鞠国兴,译. 第五版. 北京:高等教育出版社, 2019.
- LANDAU L D, LIFSHITZ E M. *Mechanics*[M]. LI J F, JU G X. Trans. 5th ed. Beijing: Higher Education Press, 2019. (in Chinese)
- [32] CIOTTA F, TRUSLER J P M, VESOVIC V. Extended hard-sphere model for the viscosity of dense fluids[J]. *Fluid Phase Equilibria*, 2014, 363: 239-247.
- [33] KOSINSKI P, BALAKIN B V, KOSINSKA A. Extension of the hard-sphere model for particle-flow simulations[J]. *Physical Review E*, 2020, 102(2): 022909.
- [34] HAGELAAR G J M, DONKO Z, DYATKO N. Modification of the Coulomb logarithm due to electron-neutral collisions [J]. *Physical Review Letters*, 2019, 123 (2): 025004.
- [35] MARCUS Y. Ionic radii in aqueous solutions[J]. *Chemical Reviews*, 1988, 88(8): 1475-1498.
- [36] SCHULTZ S G, SOLOMON A K. Determination of the effective hydrodynamic radii of small molecules by viscometry[J]. *The Journal of general physiology*, 1961, 44(6): 1189-1199.

(上接第 227 页)

- JI L L, LI Y, JIANG Z L, et al. Design of lithium battery intelligent charger[J]. *Electronic Science and Technology*, 2016(2): 159-162. (in Chinese)
- [11] 郭光明,王秀华. USB 手机充电器的设计[J]. *电子科技*, 2008(9): 33-35.
GUO G M, WANG X H. Design of USB mobile phone charger[J]. *Electronic Science and Technology*, 2008(9): 33-35. (in Chinese)
- [12] 廖慧敏,张朝晖,孙可芊,等. 霍尔效应测量磁场实验中副效应的研究[J]. *物理实验*, 2016(11):36-40.
- LIAO H M, ZHANG Z H, SUN K Q, et al. Study on side effects in magnetic field measurement experiments of Hall effect[J]. *Physical Experiment*, 2016 (11): 36-40. (in Chinese)
- [13] 汪焱,金芳洲. 对霍尔效应实验中副效应的研究及其消除方法探讨[J]. *广西物理*, 2024, 45(4): 23-26.
WANG Y, JIN F Z. Research on side effects in Hall effect experiments and discussion on their elimination methods [J]. *Guangxi Physics*, 2024, 45(4): 23-26. (in Chinese)