

电动汽车直流充电桩输出电缆电磁暴露安全评估

董绍文 逯迈

(兰州交通大学 光电技术与智能控制教育部重点实验室 兰州 730070)

摘要 为了评估电动汽车直流充电桩输出电缆对不同人群的电磁暴露水平,基于电磁剂量学思想,在有限元仿真软件COMSOL Multiphysics中建立了电动汽车、直流充电桩、输出电缆等模型,研究计算了120 kW直流充电桩单根电缆输出250 A强电流时,成年人与儿童在充电桩前不同站位、车辆后排左侧(近充电口)乘坐及车门外站立状态下的体内电磁暴露水平,并与国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)的限值标准展开对比。结果表明,成年人和儿童站在距充电桩屏幕(正中间)200 mm处时,体内的磁通密度峰值分别为60.6 μT 、24.7 μT ;当成年人和儿童站在输出电缆旁边时,体内的磁通密度峰值分别为 $1.77\times 10^3 \mu\text{T}$ 、 $1.67\times 10^3 \mu\text{T}$;当成年人和儿童坐在汽车后排左侧时,体内的磁通密度峰值分别为3.56 μT 、3.93 μT ;当成年人和儿童站在后排左侧车门外时,体内的磁通密度峰值为66.5 μT 、350 μT ,均远低于ICNIRP公众暴露限值(400 mT),结果表明,充电桩输出电缆不会对人体健康构成风险。

关键词 电动汽车直流充电桩, 直流输出电缆, 电磁暴露, 真实人体模型, 静磁场

中图分类号 TL13

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0125

CSTR: 32195.14.j.JRRRP.1000-3436.2025-0125

引用该文:

董绍文, 逯迈. 电动汽车直流充电桩输出电缆电磁暴露安全评估[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, XXXX, XX(XX): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0125.

DONG Shaowen, LU Mai. Safety assessment of electromagnetic exposure from output cables of electric vehicle DC charging piles[J]. Journal of Radiation Research and Radiation Processing, XXXX, XX(XX): XXXXXX. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2025-0125.



Safety assessment of electromagnetic exposure from output cables of electric vehicle DC charging piles

DONG Shaowen LU Mai

(Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Intelligent Control of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

ABSTRACT To evaluate the electromagnetic exposure levels of different populations to the output cables of

基金资助: 国家自然科学基金(52467026), 中国工程院重点咨询项目(2025-XZ-21)和甘肃省教育厅项目(2024CXPT-11)
第一作者: 董绍文,男,1997年8月出生,2020年本科毕业于华北水利水电大学,兰州交通大学在读硕士,研究方向为电磁暴露
通信作者: 逯迈,博士,教授,博士生导师, E-mail: mai.lu@hotmail.com
收稿日期: 初稿 2025-12-23; 修回 2026-01-29

Supported by National Natural Science Foundation of China (52467026), Key Consulting Project of Chinese Academy of Engineering (2025-XZ-21), and Project of Gansu Provincial Department of Education (2024CXPT-11)

First author: DONG Shaowen (male) was born in August 1997, obtained a bachelor's degree from North China University of Water Resources and Electric Power in 2020. Now he is a postgraduate student at Lanzhou Jiaotong University, focusing on electromagnetic exposure from electric vehicle DC charging stations

Corresponding author: LU Mai, doctoral degree, professor, doctoral supervisor, E-mail: mai.lu@hotmail.com

Received 23 December 2025; accepted 29 January 2026

electric vehicle DC charging piles, based on electromagnetic dosimetry principles, models of the electric vehicle, DC charging pile, output cables, and other components were established in the finite element simulation software COMSOL Multiphysics. The internal electromagnetic exposure levels in adults and children were calculated and investigated under a 120 kW DC charging pile delivering a strong current of 250 A through a single output cable, considering various scenarios: standing at different positions in front of the charging pile, sitting in the left rear seat of the vehicle (near the charging port), and standing outside the vehicle door. These results were compared with the reference limits set by the International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). The results show that when adults and children stand 200 mm away from the center of the charging pile screen, the peak magnetic flux density in their bodies is 60.6 μT and 24.7 μT , respectively; when adults and children stand beside the output cable, the peak magnetic flux density in their bodies reaches $1.77 \times 10^3 \mu\text{T}$ and $1.67 \times 10^3 \mu\text{T}$, respectively; when adults and children sit in the left rear seat of the vehicle, the peak magnetic flux density in their bodies is 3.56 μT and 3.93 μT , respectively; and when adults and children stand outside the left rear door of the vehicle, the peak magnetic flux density is 66.5 μT and 350 μT , respectively. All values are far below the ICNIRP public exposure limit (400 mT). These results indicate that the output cables of the charging pile pose no risk to human health.

KEYWORDS Electric vehicle DC fast charging pile, DC charging cable, Electromagnetic exposure, Realistic human body model, Static magnetic field

CLC TL13

在我国“双碳”目标下，交通领域在控碳领域肩负着重要使命^[1]。据统计，交通领域的碳排放量约占全国碳排放总量的12%^[2]。随着电池技术提升与充电设施完善，电动汽车保有量快速增长，直流充电桩以其高效率、快速度的优势^[3]，广泛应用于公共充电场景^[4]，可在20~30 min内将电池电量充至80%，显著缓解用户里程焦虑，有力支撑电动汽车普及与行业发展。然而，直流充电桩在工作时，因内部电子元器件开关特性及输出电缆承载数百安大电流，会在空间产生电磁辐射^[5]。由于电缆结构不完全对称，正负电流无法完全抵消，会在电缆周围形成较强静磁场^[6-7]，该磁场可能会影响周围电子设备的正常运行，对私乘人员和工作人员的健康风险尚不明确。

随着电动汽车的普及和充电基础设施的建设，电缆和电动汽车充电设施的电磁环境问题受到相关领域学者的关注。王亮等^[8]分析了多台电动汽车充电时对电流谐波畸变率和功率因数的影响，发现随着充电台数的增加，交流充电桩的电流谐波畸变率增大、功率因数不变，直流充电桩的电流谐波畸变率不变、功率因数增大。严有祥等^[9]建立±320 kV直流电缆和220 kV交流电缆共沟敷设隧道电磁场仿真模型，计算隧道内的电磁场分布和交流电缆在直流电缆上产生的感应电压，并分析交直流电缆之间的距离与敷设方式以及单相交流电缆故障对电缆隧道电磁环境的影响。黄汇益

等^[10]研究了植被对特高压交流输电线路的电磁环境的影响，研究发现有、无植被两种特定环境下人体所受到的磁感应强度变化不大，但有植被环境下人体所受到的感应电场最大值是无植被环境下的48.3%。杜庆中等^[11]评估了特高压交流输电线路对于成年人的电磁暴露水平，最终计算结果远小于ICNIRP设定的限值。Hakuta等^[12]针对电缆产生的非均匀磁场引起的内部电场问题，提出了一种与指南对应频率和身体部位相关的耦合系数。计算结果表明耦合系数可能作为一种新的直接合规性评估方式，在车辆车厢中证明了有效性。Melo等^[13]模拟了电动汽车电缆中脉冲的感应，这种感应可能导致在200 MHz至800 MHz频率带内运行的设备或系统受到干扰。Yang等^[14]针对电动汽车和混合动力汽车中高压电缆与低压电缆之间的近场电磁干扰问题，提出了一种散射参数测量技术，并开发了电感耦合模型和电容耦合模型，分析了电磁干扰滤波器对抗扰度测试结果的影响。Tan等^[15]研究了电动汽车车舱内的低频磁场分布，对人体感应电磁场随电力电缆电流变化的规律进行分析，评估了人体低频磁场暴露的安全性。Kong等^[16]研究发现输入与输出动力电缆会在车内产生强烈的电磁辐射，电缆产生极低频与低频磁场已成为用户近场电磁暴露的最主要来源，以及电动汽车充电设施电磁兼容领域的核心关注点之一。Park等^[17]设计了一个用于电动车辆充电的无

线充电（WPT）系统，评估无屏蔽、有屏蔽、发射器与接收器对齐和未对齐情况等多种情况下人体在WPT系统前方的电磁暴露水平，研究了在不同发射功率下符合安全要求的最小可接近距离。Bae等^[5]测量并分析了六款充电器的电磁场，并将测量的电磁场暴露水平与国际非电离辐射防护委员会（ICNIRP）标准进行对比，测试值均在安全范围内研究结果。标准充电器测得的电磁场高于快速充电器。对于处于充电状态的快速充电器，磁场随着充电电流的增加而增强。所有六款充电器的电磁场暴露均未超过标准限值。Trentadu等^[7]对两种不同规格的大功率分体式直流充电系统产生的磁通密度进行了测量，测量结果显示某些点的暴露指数超过公众暴露限值，但随着距离的增加磁通密度迅速衰减，在距离充电设施31 cm处测量的电磁环境均符合标准。

生物电磁学^[18]是研究非电离电磁场与生物系统的相互作用及其生物效应。作为其重要分支，生物电磁剂量学^[19]通过求解Maxwell方程组与生物组织多层异质电磁参数模型的耦合问题，可精确计算活体内部磁感应强度等关键剂量学指标，有效弥补了传统流行病学调查法^[20]和直接测量法^[21]等无法无创获取组织深部电磁场分布的固有缺陷。静磁场生物电磁学相关研究表明^[22-24]，静磁场高场可引起眩晕、恶心等短暂的生理反应，国际组织ICNIRP和世界卫生组织（WHO）认为静磁场弱场也会对人体健康造成一定的风险，因此需通过暴露限值与职业防护措施加以控制。

现有研究多聚焦于电动汽车无线充电及直流充电桩本体电磁环境与兼容性^[7, 25-27]，针对直流充电桩输出电缆产生的电磁场及其对人体暴露安全的影响缺乏系统评估。本文旨在填补这一空白，基于电磁剂量学方法，利用COMSOL Multiphysics有限元仿真，以直流充电桩输出电缆为辐射源，分析成年人和儿童在多种典型场景下的人体及主要器官内磁场分布，并与国际非电离辐射防护委员会ICNIRP公众暴露限值进行对比，评估电动汽车直流充电桩输出电缆对不同人群的电磁暴露安全性。

1 模型与方法

1.1 人体模型

虚拟家庭全身解剖人体模型是一套为研究电

磁暴露评估而研发的高分辨率解剖模型，由多名志愿者的核磁共振图像数据构成。文中使用的模型是虚拟家庭项目的Duke模型和Thelonious模型^[28]。Duke是一名34岁的成年男性，站立高度1.77 m，体重72.4 kg；Thelonious是一名6岁的男孩，站立高度1.15 m，体重18.6 kg。根据原始解剖模型，从模型中提取了几种主要的器官和组织：头皮、头骨、大脑、心脏、肝脏、肾脏、肺部，其中大脑由脑白质和脑灰质合并而成，模型如图1所示。

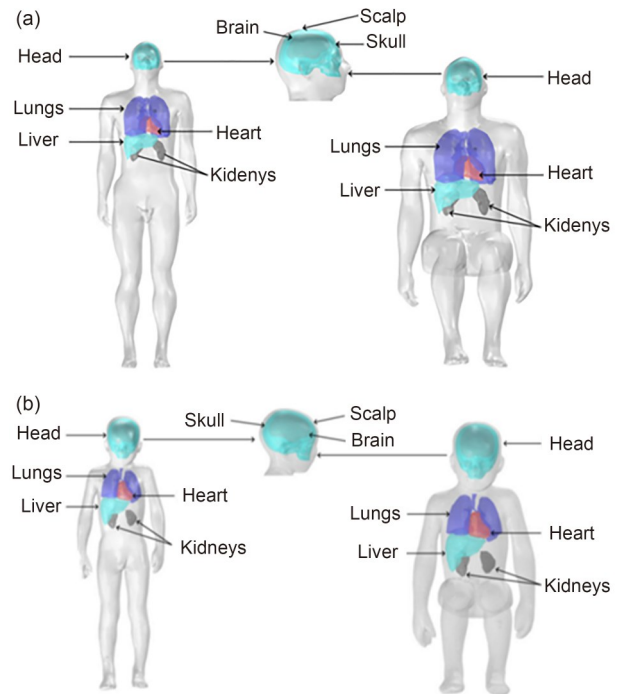


图1 站姿与坐姿模型：(a)成年人；(b)儿童
Fig. 1 Standing and sitting posture models: (a) adult; (b) child

1.2 充电桩模型及车体模型

本文依据市面上某品牌的一体式直流充电桩实际尺寸建立了直流充电桩模型。根据新能源汽车的实际尺寸建立了汽车模型，车身尺寸为：5 495 mm×2 200 mm×1 672 mm，车身材料为铝合金。电缆半径为23 mm（含护套厚度），输出电缆内通常有5根线芯，两根最粗的线芯用来传输电能，两根较细的线芯用来保持桩体和电动汽车之间的通信，另有一根细线芯为地线。其中流经电流最大的两根线芯为传输电能的线芯，线芯半径为7.6 mm（不含护套厚度）。为了提高计算效率将电缆内部简化为两根传输电能的线芯，两根线芯流经的电流方向相反。

充电桩单枪充电时，电缆流经电流为250 A。

本文以直流充电桩输出电缆为辐射源,分别计算研究了直流充电桩单枪充电时成年人和儿童站在充电桩正面 200 mm 处、成年人和儿童站在输出电缆旁、坐在汽车后排左侧及站在后排左侧车门外多种场景下体内的电磁暴露水平。图2为成年人站在充电桩前 200 mm 处的侧视图和俯视图,此时成年人距左侧输出电缆约 170 mm;图3为成年人站在电缆

旁边的俯视图。儿童坐在车内时距离车尾部约 1 550 mm,距离右侧车门约 720 mm 处;成年人坐在车内时距车尾部约 1 550 mm,距离右侧车门约 700 mm,如图4成年人在汽车内的相对位置。图5为成年人站在汽车后排左侧车门外的俯视图与侧视图,此时成年人距离前方电缆约 50 mm。

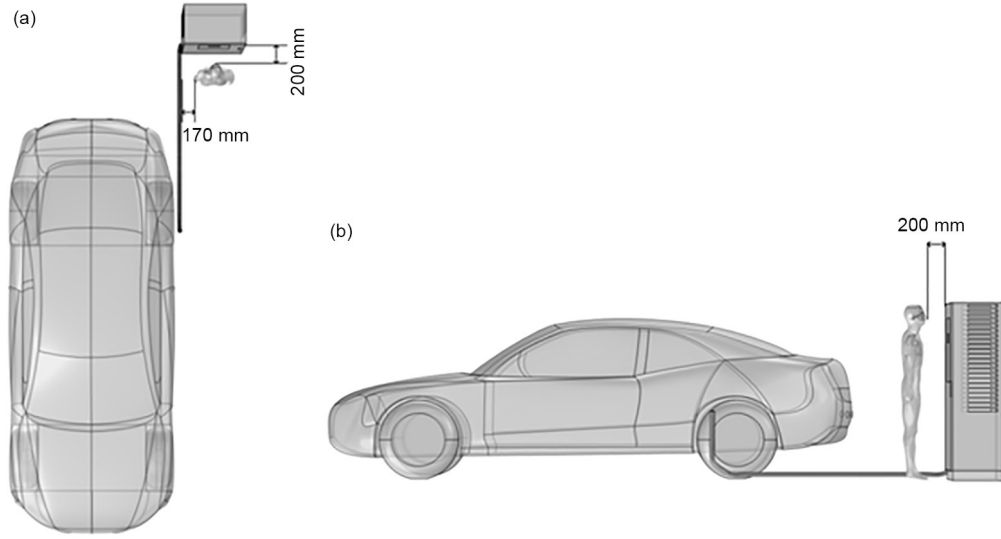


图2 成年人站在充电桩前 200 mm:(a)俯视图;(b)侧视图
Fig. 2 Adult standing 200mm in front of the charging pile: (a) top view, (b) side view

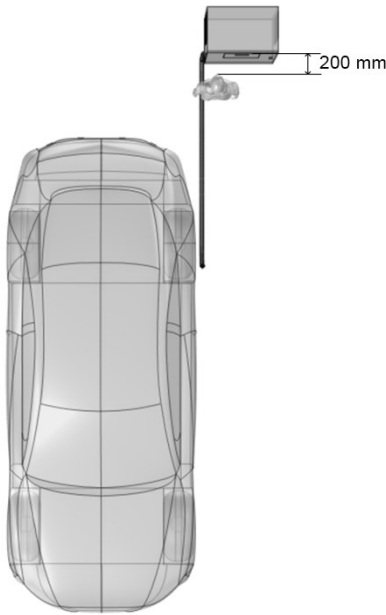


图3 成年人站在电缆旁边(俯视图)
Fig. 3 Adult standing next to the cable (top view)

1.3 有限元分析

由于直流充电桩输出电缆流过的电流为直流电,直流电缆周围产生的磁场为静磁场。静磁场的数值求解问题满足麦克斯韦方程组的微分形式,

式(1)~(4)。

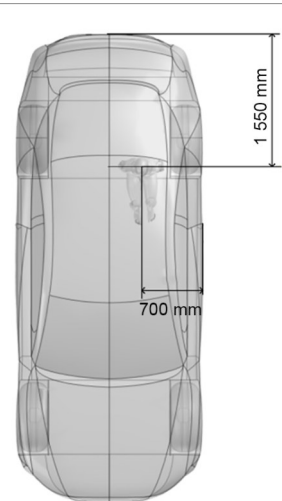


图4 成年人坐在车内
Fig. 4 Adult seated inside the vehicle

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

式中： H 为磁场强度，A/m； J 为感应电流密度，A/m²； E 为电场强度，V/m； D 为电通密度，C/m²； B 为

磁通密度，T； ρ 为电荷体密度，C/m³。为了方便计算磁通密度，引入了磁势 A ，满足式（5）。

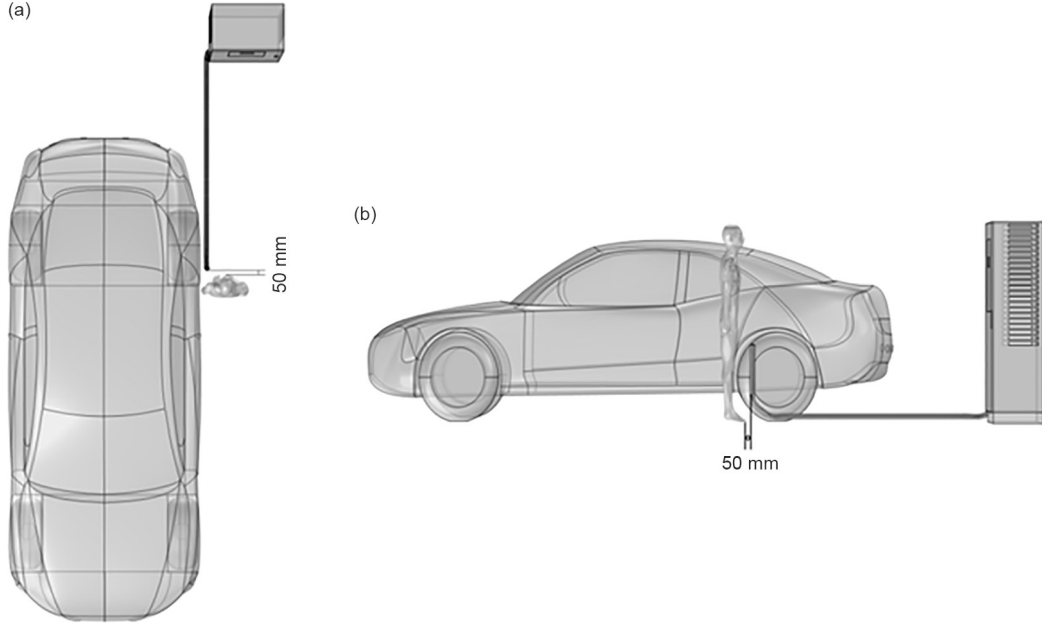


图5 成年人站在后排车门外：(a)俯视图，(b)侧视图
Fig. 5 Adult standing outside the rear door: (a) top view, (b) side view

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (5)$$

其中磁势 A 满足式（6）。

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu \mathbf{J} \quad (6)$$

式中： μ 为真空中的磁导率， ∇^2 为拉普拉斯算子（式（7））。

$$\nabla^2 = \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \quad (7)$$

本文在COMSOL Multiphysics软件AC/DC模块的磁场接口，对三维稳态磁场问题进行数值模拟。电缆外部为无界空间，其磁场随着与辐射源距离的增加持续衰减，并不会在有限距离内自然消散，因此严格的物理边界应位于无穷远处，对应的物理外边界条件可表示为式（8）。

$$\lim_{|r| \rightarrow \infty} \mathbf{B} = 0 \quad (8)$$

式中： r 表示空间中任意点的位置矢量。在仿真软件数值求解时将计算区域设定为有限空间的空气域，外边界本质上为人工截断边界而非实际物理界面。为贴近真实电磁环境，本文将外部边界设置在远大于辐射源尺寸的位置，使得边界处磁场强度相较辐射源近场区域降低数个数量级，确保边界条件对磁场分布的影响可忽略不计。在此条件下所施加的磁绝缘边界条件，边界处将磁势的

切向分量设置为零，即式（9）。

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (9)$$

式中： n 为边界的单位外法向量。将截断边界置于远离辐射源的计算域外缘，并设置无限元域将无界空间映射为有限计算区域，使磁场在吸收层内快速衰减，以满足磁场在无穷远处趋于零的条件。COMSOL中边界条件及无限元域的设置如图6（a）所示。

本文对直流充电桩单车充电时成年人和儿童站在充电桩前不同位置、坐在电动汽车后排左侧、站在车后排左侧车门外时体内的磁通密度进行了仿真研究。以充电桩输出电缆为辐射源，辐射源产生的场的问题可以看作是准静态场问题。数值计算在配置有Intel(R)Core(TM)i7处理器和64 GB RAM储存的PC机上进行计算，在COMSOL Multiphysics 6.2有限元分析软件的AC/DC模块对准静态场问题进行仿真研究。在数值计算中，采用四面体网格划分人体模型、车身模型和电缆模型^[29]，提高了人体的计算精度，计算模型的网格如图6（b）所示。

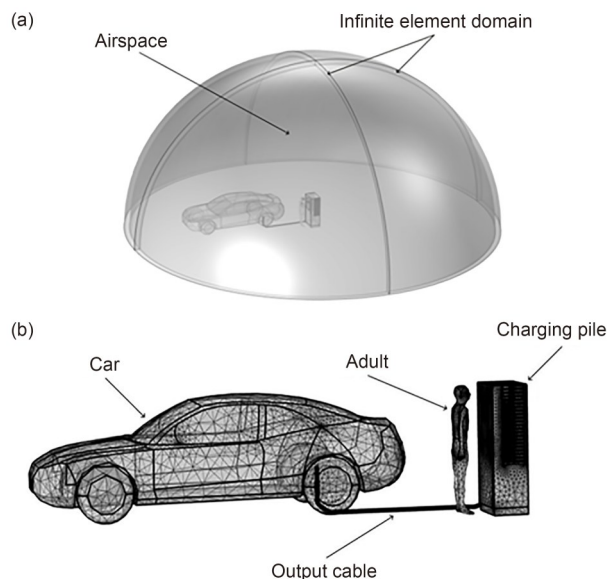


图6 仿真模型图:(a)边界条件;(b)网格划分
Fig. 6 Simulation model diagram: (a) boundary conditions; (b) mesh division

1.4 电磁暴露标准

为了科学评估人体电磁暴露限制,保护公共健康,ICNIRP定义了静磁场下人类电磁暴露限制^[30]。ICNIRP建立了静磁场职业暴露和公众暴露的限制,保护公众及职业人群免受电磁暴露引发的健康风险影响,其中静磁场公众暴露的限值为0.4 T。

2 仿真结果分析

2.1 电缆工作时人在不同位置处体内磁通密度分布

如图7所示为成年人站在充电桩前200 mm处操作充电桩时成年人和儿童体内磁通密度的分布。从图中可以看出,人体磁通密度峰值位于距输出电缆距离最近的右脚部,成年人脚部磁通密度峰值60.6 μT 为ICNIRP公众暴露限值的0.015%,儿童脚部磁通密度峰值24.7 μT 为ICNIRP公众暴露限值的0.006%。虽然两人都站立在直流充电桩的正对面,但成年人体型大于儿童,因此成年人的脚部距离电缆的距离更近,磁通密度更大。成年人和儿童脑部的磁通密度分别为0.711 μT 和0.936 μT ,均远低于ICNIRP公众暴露限值0.4 T。

图8为成年人和儿童站在电缆旁时体内的磁通密度分布,可以看出当成年人和儿童近距离接触电缆的时候体内的磁通密度峰值迅速变大,磁通

密度峰值依旧在靠近电缆的脚部,成年人脚部的磁通密度峰值 $1.77 \times 10^3 \mu\text{T}$ 为ICNIRP公众暴露限值的0.443%;儿童脚部的磁通密度峰值 $1.67 \times 10^3 \mu\text{T}$ 为ICNIRP公众暴露限值的0.418%。成年人和儿童头部的磁通密度分别为1.6 μT 和2.15 μT ,均远低于ICNIRP公众暴露限值0.4 T。

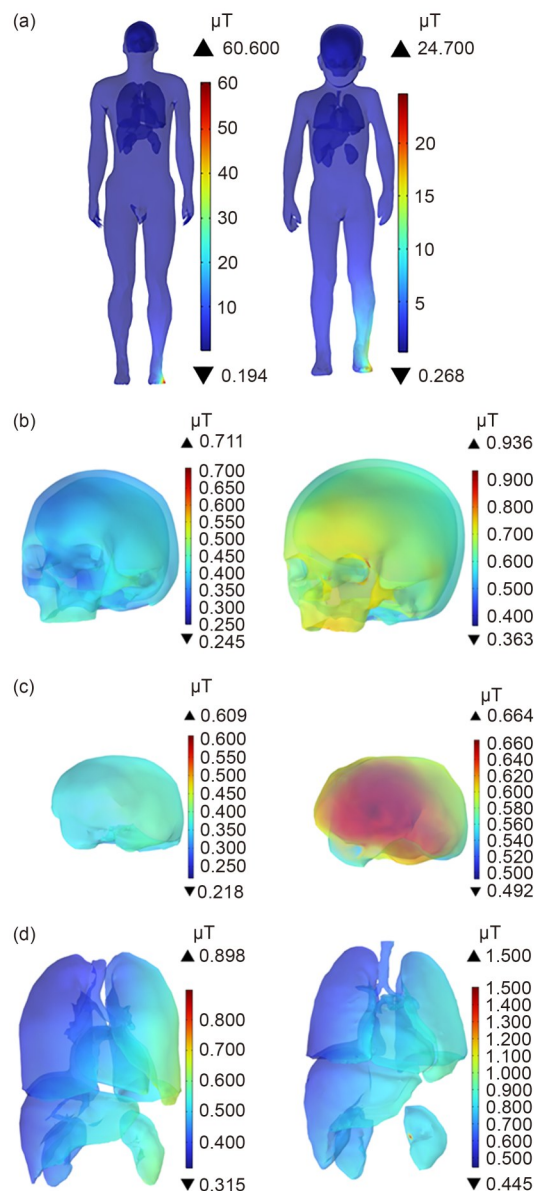


图7 成年和儿童在距离充电桩200 mm处磁通密度分布:
(a)全身;(b)头部;(c)脑部;(d)体内器官
Fig. 7 Distribution of magnetic flux density in adults and children at a distance of 200 mm from the charging pile:
(a) whole Body; (b) head; (c) brain; (d) internal organs

当成年人和儿童在站立状态下,躯干内各器官相较于头部各器官距离辐射源更近,因此躯干内各器官的磁通密度峰值大于脑部器官磁通密度峰值。由于成年人相较于儿童体型更大,因此在

该场景下成年人躯干和头部各器官相较于儿童距离辐射源更远，因此成年人体内各器官的磁通密度小于儿童体内各器官的磁通密度。

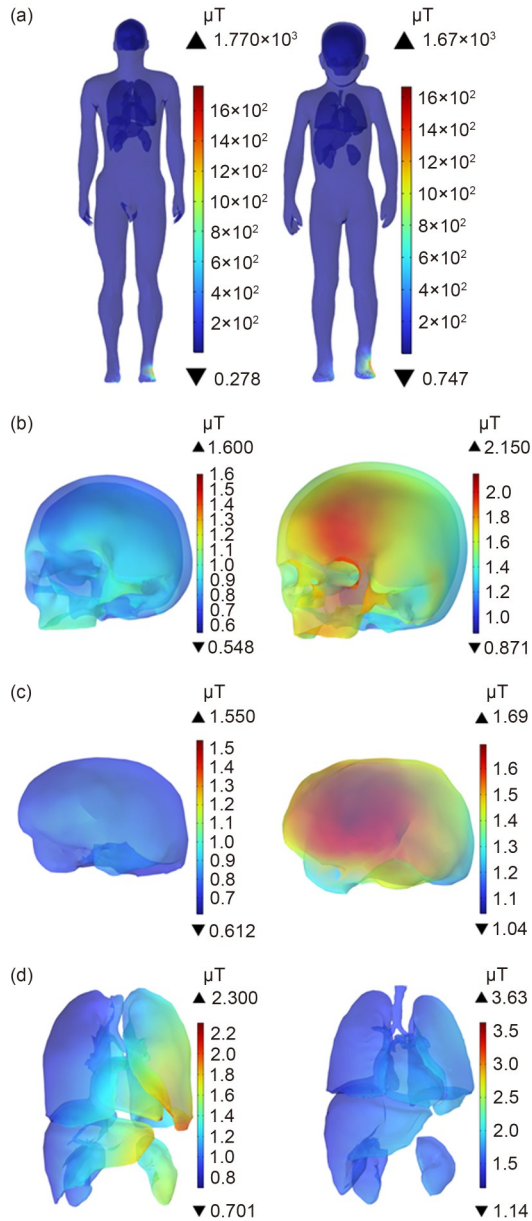


图8 成年人和儿童在输出电缆旁磁通密度分布：
(a)全身；(b)头部；(c)脑部；(d)体内器官

Fig. 8 Distribution of magnetic flux density in adults and children adjacent to the output cable: (a) whole body; (b) head; (c) brain; (d) internal organs

2.2 单根电缆工作时人坐在车后排体内磁通密度分布

如图9所示为成年人和儿童坐在汽车后排左侧（靠近充电口的一侧）时体内磁通密度的分布。从图中可以看出，人体磁通密度峰值位于距直流电缆距离最近的左手部位。由于所处位置接近，因

此成年人和儿童磁通密度峰值的区别较小，其中成年人和儿童体内磁通密度峰值分别为3.56 μT 、3.93 μT ，头部的磁通密度峰值分别为1.34 μT 、1.91 μT ，均远小于ICNIRP公众暴露限值。成年人和儿童坐在汽车后排左侧时成年人的体型略大于儿童，因此成年人躯干器官较于儿童距离辐射源更近，因此磁通密度峰值略大；成年人脑部器官相较于儿童距离辐射源较远，因此磁通密度峰值略小。

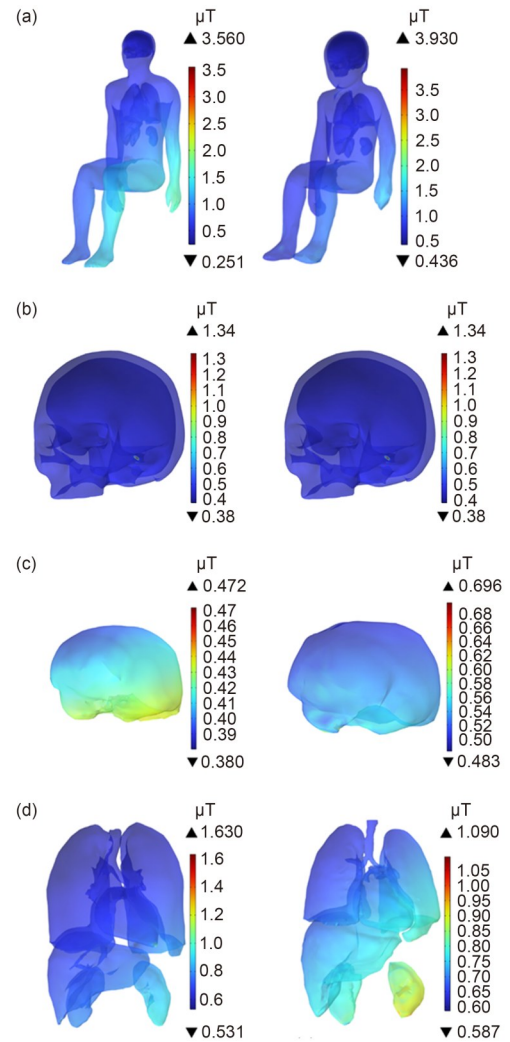


图9 成年人和儿童坐在汽车后排左侧磁通密度分布：
(a)全身；(b)头部；(c)脑部；(d)体内器官

Fig. 9 Distribution of magnetic flux density for adults and children sitting on the left rear seat of the vehicle: (a) whole body; (b) head; (c) brain; (d) internal organs

如图10所示成年人和儿童站在汽车后排左侧车门外时体内磁通密度的分布。从图10中可以看出，人体内磁通密度最大处在躯干中、下部分，因为此处距离直流充电电缆的距离最近，儿童因为形体原因距离辐射源距离较近，因此儿童体内

磁通密度峰值大于成年人体内磁通密度峰值。成年人体内磁通密度峰值 $66.5 \mu\text{T}$ ，儿童体内磁通密度峰值为 $350 \mu\text{T}$ ，分别为 ICNIRP 公众暴露限值的 0.017%、0.088%。儿童因为形体原因身高低于成年人，因此头部和体内器官的磁通密度分布均高于成年人，其中成年人和儿童头部的磁通密度峰值分别为 $1.6 \mu\text{T}$ 、 $4.11 \mu\text{T}$ ，均远低于 ICNIRP 公众暴露限值 0.4 T 。

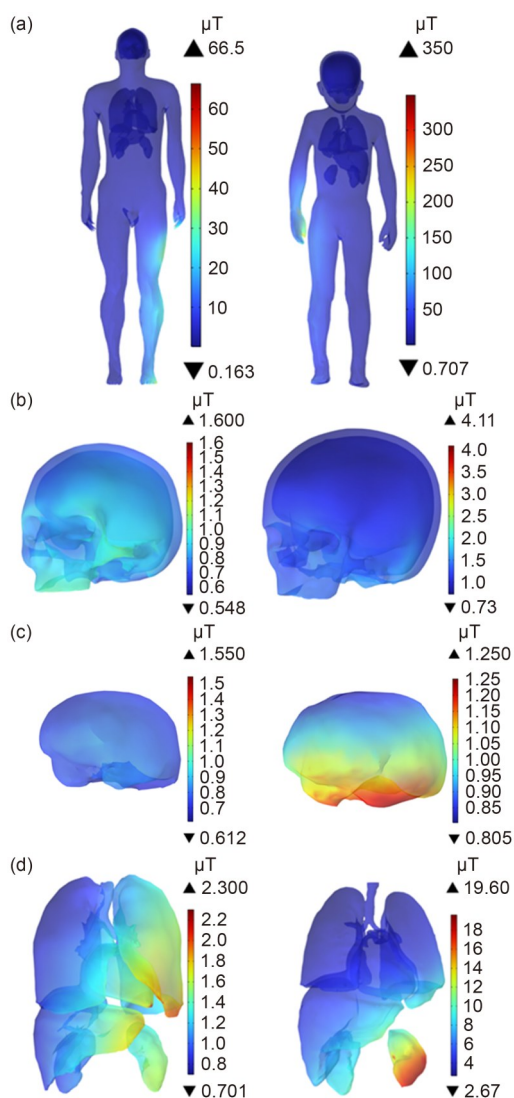


图10 成年人和儿童坐/站在后排左侧车门外磁通密度分布:(a)全身;(b)头部;(c)脑部;(d)体内器官

Fig.10 Distribution of magnetic flux density for adults and children in sitting and standing postures outside the left rear door of the vehicle: (a) whole body; (b) head; (c) brain; (d) internal organs

3 结论

本文在 COMSOL Multiphysics 有限元软件中，以直流充电桩的输出电缆为辐射源，研究了成年人和儿童在不同位置躯干及体内各个器官磁通密

度的分布。当单根电缆工作时电缆流经的电流为 250 A ，成年人和儿童站在距充电桩屏幕（正中间） 200 mm 处体内的磁通密度峰值在右脚部，磁通密度峰值分别为 $60.6 \mu\text{T}$ 、 $24.7 \mu\text{T}$ 为 ICNIRP 公众暴露限值的 0.015%、0.005%；成年人和儿童站在输出电缆旁边体内的磁通密度峰依旧在靠近电缆的右脚部，磁通密度峰值分别为 $1.77 \times 10^3 \mu\text{T}$ 、 $1.67 \times 10^3 \mu\text{T}$ ，分别为 ICNIRP 公众暴露限值的 0.443% 和 0.418%。成年人和儿童站在充电桩前 200 mm 处和站在电缆旁边时头部的磁通密度峰值分别为 $0.711 \mu\text{T}$ 、 $0.936 \mu\text{T}$ 和 $1.6 \mu\text{T}$ 、 $2.15 \mu\text{T}$ ，均远低于 ICNIRP 公众暴露限值。说明随着人和输出电缆距离的接近电磁暴露水平迅速上升，但仍在安全范围内。成年人和儿童坐在汽车后排左侧（靠近汽车充电口的一侧）时，体内的磁通密度峰值分别为 $3.56 \mu\text{T}$ 、 $3.93 \mu\text{T}$ ，头部的磁通密度峰值分别为 $1.34 \mu\text{T}$ 、 $1.91 \mu\text{T}$ ；成年人和儿童站在后排车门旁边时，体内的磁通密度峰值分别为 $66.5 \mu\text{T}$ 、 $350 \mu\text{T}$ ，分别为 ICNIRP 公众暴露限值的 0.017%、0.088%，头部的磁通密度峰值为 $1.6 \mu\text{T}$ 、 $4.11 \mu\text{T}$ ，均远低于 ICNIRP 公众暴露限值。

本研究计算了成人与儿童在多场景下受直流充电桩输出电缆辐照时体内电磁暴露水平，结果显示其峰值均远低于 ICNIRP 公众暴露限值，因此该类直流充电桩输出电缆对成人及儿童的潜在健康风险极低。

作者贡献声明 董绍文负责建模与计算、数据整理、文字撰写等工作；逯迈教授整体设计论文工作的基本思想、实施步骤、建模与数据处理、论文架构与文字处理、审定论文结论，获取项目经费等。全体作者均已阅读并同意最终的文本。

参考文献

- 李燕菲, 李程. 低碳交通与新质生产力发展耦合协调效应时空演变格局及影响因素: 以长江经济带为例[J/OL]. 环境科学, 2025. (2025-10-13)[2026-01-13]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202506115>.
LI Yanfei, LI Cheng. Spatiotemporal evolution pattern and influencing factors of coupling and coordination effect between low-carbon transportation and new quality productive forces development: A case study of the Yangtze River economic belt[J/OL]. Environmental Science, 2025. (2025-10-13)[2026-01-13]. <https://doi.org/10.13227/j.hjcx.202506115>.

- 2 王硕, 徐艺诺, 翁大维, 等. 中国道路交通碳排放驱动因素及碳达峰[J]. 生态学报, 2025, **45**(3): 1315-1327. DOI: 10.20103/j.stxb.202405151108.
WANG Shuo, XU Yinuo, WENG Dawei, *et al.* Driving factors and peak analysis of road traffic carbon emissions in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2025, **45**(3): 1315-1327. DOI: 10.20103/j.stxb.202405151108.
- 3 Qiao S Y. Technical analysis and research on DC charging pile of electric vehicle[C]//2021 International Conference on Smart City and Green Energy (ICSCGE). November 20-22, 2021. Hangzhou, China. IEEE, 2021: 89-93. DOI: 10.1109/icscge53744.2021.9654385.
- 4 Levinson R S, West T H. Impact of public electric vehicle charging infrastructure - ScienceDirect[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018, **64**: 158-177. DOI: 10.1016/j.trd.2017.10.006.
- 5 Bae H, Park S. Assessment of the electromagnetic radiation exposure at EV charging facilities[J]. *Sensors*, 2023, **23**(1): 162. DOI: 10.3390/s23010162.
- 6 Trentadue G, Pinto R, Zanni M, *et al.* Low frequency magnetic fields emitted by high-power charging systems [J]. *Energies*, 2020, **13**(7): 1594. DOI: 10.3390/en13071594.
- 7 Trentadue G, Pinto R, Salvetti M, *et al.* Assessment of low-frequency magnetic fields emitted by DC fast charging columns[J]. *Bioelectromagnetics*, 2020, **41**(4): 308-317. DOI: 10.1002/bem.22254.
- 8 王亮, 汤佩文, 颜伟, 等. 电动汽车充电桩对电能质量和电磁环境的影响[J]. 电源学报, 2017, **15**(3): 91-99. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2017.3.91.
WANG Liang, TANG Peiwen, YAN Wei, *et al.* Influence on power quality and electromagnetic environment to electric vehicle charging pile[J]. *Journal of Power Supply*, 2017, **15**(3): 91-99. DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2017.3.91.
- 9 严有祥, 朱婷, 张那明, 等. 交直流电缆共沟敷设电磁环境影响因素[J]. 电工技术学报, 2022, **37**(6): 1329-1337. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190547.
YAN Youxiang, ZHU Ting, ZHANG Naming, *et al.* The influence factors of electromagnetic environment in the tunnels with DC cables and AC cables[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, **37**(6): 1329-1337. DOI: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190547.
- 10 黄汇益, 逯迈. 植被对特高压交流输电线路电磁暴露的影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2022, **40**(3): 030601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0013.
- HUANG Huiyi, LU Mai. Effect of vegetation on electromagnetic exposure of 1 000 kV ultra high voltage AC transmission line[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2022, **40**(3): 030601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2022-0013.
- 11 杜庆中, 逯迈. 1000 kV/500 kV 同塔混压四回交流输电线路电磁暴露安全评估[J]. 辐射研究与辐射工艺学报, 2020, **38**(2): 020602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rrj.38.020602.
- DU Qingzhong, LU Mai. Safety assessment of electromagnetic exposure of quadruple-circuit AC transmission line with 1 000 kV/500 kV dual voltage on the same tower[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2020, **38**(2): 020602. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rrj.38.020602.
- 12 Hakuta Y, Watanabe T, Takenaka T, *et al.* Safety standard compliance of human exposure from vehicle cables using coupling factors in the frequency range of 0.3 - 400 kHz [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2021, **63**(1): 313-318. DOI: 10.1109/temc.2020.2983952.
- 13 de Melo P K P, Fontgalland G, D'Assuno A G, *et al.* Analysis of electromagnetic interference in electric vehicle cables[C]//2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. July 8-13, 2018. Boston, MA, USA. IEEE, 2018: 1393-1394. DOI: 10.1109/apusncursnrm.2018.8608552.
- 14 Yang L, Wang S, Zhi Y J. Near field coupling measurement and modeling between high voltage and low voltage cables in electric vehicles[C]//2020 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI). July 28-August 28, 2020. Reno, NV, USA. IEEE, 2020: 404-406. DOI: 10.1109/emcsi38923.2020.9191581.
- 15 Tan L G, Li G L, Xie Q L, *et al.* Study on the safety assessment and protection design of human exposure to low-frequency magnetic fields in electric vehicles[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 2023, **200**(1): 60-74. DOI: 10.1093/rpd/ncad269.
- 16 Kong F Y, Zhang G Y, Wang J Y, *et al.* Simulation of cable radiation field of electric vehicle[C]//2022 Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). September 1-4, 2022. Beijing, China. IEEE, 2022: 379-381. DOI: 10.1109/apemc53576.2022.9888552.
- 17 Park S. Evaluation of electromagnetic exposure during

- 85 kHz wireless power transfer for electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, **54**(1): 1-8. DOI: 10.1109/tmag.2017.2748498.
- 18 Christensen D A, Durney C H. Basic introduction to bioelectromagnetics[M]. Boca Raton: CRC press, 2000.
 - 19 Durney C H. Electromagnetic dosimetry for models of humans and animals: a review of theoretical and numerical techniques[J]. Proceedings of the IEEE, 1980, **68**(1): 33-40. DOI: 10.1109/proc.1980.11578.
 - 20 Saremi M, Rohmer O, Burgmeier A, *et al.* Combined effects of noise and shift work on fatigue as a function of age[J]. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 2008, **14**(4): 387-394. DOI: 10.1080/10803548.2008.11076779.
 - 21 Stroobandt B, Van Bladel H, Veludo A F, *et al.* Auto-induced uplink 4G and 5G RF-EMF exposure assessment using a network monitoring application in different microenvironments across seven European countries[J]. Environmental Research, 2025, **270**: 121029. DOI: 10.1016/j.envres.2025.121029.
 - 22 De V B. Environmental health criteria 232 static fields[J]. Acta Cryst, 2006: 64. DOI: 10.1107/S1600536808021405.
 - 23 Bongers S, Slottje P, Kromhout H. Development of hypertension after long-term exposure to static magnetic fields among workers from a magnetic resonance imaging device manufacturing facility[J]. Environmental Research, 2018, **164**: 565-573. DOI: 10.1016/j.envres.2018.03.008.
 - 24 Ghodbane S, Lahbib A, Sakly M, *et al.* Bioeffects of static magnetic fields: oxidative stress, genotoxic effects, and cancer studies[J]. BioMed Research International, 2013, **2013**: 602987. DOI: 10.1155/2013/602987.
 - 25 Wang Q D, Li W L, Kang J W, *et al.* Electromagnetic safety evaluation and protection methods for a wireless charging system in an electric vehicle[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, **61**(6): 1913-1925. DOI: 10.1109/temc.2018.2875903.
 - 26 Arduino A, Bottauscio O, Chiampi M, *et al.* Accuracy assessment of numerical dosimetry for the evaluation of human exposure to electric vehicle inductive charging systems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, **62**(5): 1939-1950. DOI: 10.1109/temc.2019.2954111.
 - 27 Chen Y Z, Yu Q Y, Zheng Y, *et al.* Electromagnetic exposure safety assessment of medical implants in the human body for EV-WPT considering uncertainty[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2025, **74**(2): 2105-2115. DOI: 10.1109/tvt.2024.3349429.
 - 28 Gosselin M C, Neufeld E, Moser H, *et al.* Development of a new generation of high-resolution anatomical models for medical device evaluation: the Virtual Population 3.0 [J]. Physics in Medicine and Biology, 2014, **59**(18): 5287-5303. DOI: 10.1088/0031-9155/59/18/5287.
 - 29 Cendes Z, Shenton D. Adaptive mesh refinement in the finite element computation of magnetic fields[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1985, **21**(5): 1811-1816. DOI: 10.1109/tmag.1985.1063929.
 - 30 ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields[J]. Health Physics, 2009, **96**(4): 504-514. DOI: 10.1097/01.hp.0000343164.27920.4a.