

电焊机焊接电缆电磁暴露安全评估

蔺敏¹ 逯迈¹ 魏孔炳² 孙军民¹ 杜庆中¹

¹(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)

²(中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司 兰州 730050)

摘要 采用ANSYS软件模拟焊接工作环境,加入人体模型来模拟焊接时人体所受的辐射情况。对同类型焊机工作时所产生的磁场实地测量。将磁感应强度的仿真结果与测量结果进行对比分析,得出二者误差在10%以内。再与国际非电离辐射防护委员会(ICNIRP)导则提出的该频率段职业暴露限值(100 μT)作对比,进行量化分析。结果表明:当焊接电源输出大电流(500 A)且焊接电缆非常贴近人体时,在人体内部产生的磁感应强度达到实验峰值;电缆在腰部、手腕等部位产生的最大磁感应强度为63.36 μT ,占ICNIRP标准的63.36%;焊接电缆产生的磁场不会对从业者产生健康风险。当焊接电缆的输出电流依次为400 A、200 A、100 A时,产生的磁感应强度逐渐减小,分别占ICNIRP标准的50%、21%、11%;而当焊接电缆与人的距离增大到0.1 m时,这几个值分别变为13%、5%、2.6%;说明在焊接过程中,输出电流的变化对焊接电缆所产生的磁场分布产生影响;磁感应强度与电流正相关,与距离呈负相关。

关键词 环境监测, 仿真, 现场测量, 职业暴露, 安全标准

中图分类号 X837, TL929

DOI: 10.11889/j.1000-3436.2020.rj.38.040601

Electromagnetic exposure safety assessment of welding cables during welding

LIN Min¹ LU Mai¹ WEI Kongbing² SUN Junmin¹ DU Qingzhong¹

¹(Key Laboratory of Opto-Electronic Technology and Intelligent Control of Ministry of Education,
Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

²(China Energy Construction Group Gansu Electric Power Design Institute Co., Ltd., Lanzhou 730050, China)

ABSTRACT In this study, we adopted the ANSYS software to simulate the work environment and used a model to simulate the influence of radiation on the human body during welding. We perform on-site measurement of the magnetic field generated by the welding machine of a similar one. By comparing the simulation results of the magnetic flux density with the measurement results, it is concluded that the error between them is less than 10%. Then, we compare the results with the occupational exposure limit of this frequency band proposed by the International Committee on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) — 100 μT for quantitative analysis. The results indicate that when the welding power source outputs a high current (500 A) and the welding cable is near the human body, the magnetic flux density generated inside the human body reaches the experimental peak.

基金资助: 国家自然科学基金(51567015、51867014)和甘肃省教育厅项目(2018D-08)资助

第一作者: 蔺敏,男,1993年出生,2015年毕业于天津城建大学,现为兰州交通大学硕士研究生

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 2020-03-09; 修回 2020-04-09

Supported by National Natural Science Foundation of China (51567015, 51867014), and Gansu Provincial Department of Education Project (2018D-08)

First author: LIN Min (male) was born in 1993, and graduated from Tianjin Chengjian University in 2015. Now he is a graduate student at Lanzhou Jiaotong University

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

Received 09 March 2020; accepted 09 April 2020

Consequently, the maximum magnetic flux density generated by the cable on the waist, wrist, and other body parts is 63.36 μT , accounting for the ICNIRP standard of 63.36%. Hence, the magnetic field generated by the welding cable does not pose a health risk to the practitioner. When the output current of the welding cable is reduced to 400 A, 200 A, and 100 A, respectively, the generated magnetic flux density accounts for 50%, 21%, and 11% of the ICNIRP standard. Additionally, when the distance between the welding cable and human body increased to 0.1 m, these values become 13%, 5%, and 2.6%. This demonstrates that during the welding process, the change of output current has an effect on the distribution of the magnetic field generated by the welding cable. Moreover, the magnetic flux density is directly proportional to the magnitude of the current, and the distance from the welding cable determines the magnitude of the magnetic field strength at that location when a similar output current is generated, which is inversely related to the distance.

KEYWORDS Environmental monitoring, Simulation, On-site measurement, Occupational exposure, Safety standard

CLC X837, TL929

20 世纪 70 年代, 苏联学者 Korobsova 提出低频电磁场可能对人的身体健康产生影响^[1]; 2003 年英国科学家 Attwell 通过研究低频磁场对视网膜神经系统造成的影响, 设定了神经组织安全暴露的感应电场的大小限值^[2]。近几十年来, 电磁暴露及其所产生的生物效应已成为生物电磁学的研究热点^[3-4], 如核磁共振梯度线圈电磁辐射^[5]、手机及手机基站的电磁辐射^[6]、特高压交流输电线路电磁暴露^[7]、地铁站台电磁暴露^[8]、纯电动汽车动力电缆电磁暴露^[9]等, 复杂电磁环境对从业人员的健康影响逐渐引起公众的重视。

2007 年, 世界卫生组织 (World Health Organization, WHO) 向各成员国推荐使用国际非电离辐射防护委员会 (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP) 的《限制时变电场、磁场和电磁场暴露导则》(ICNIRP1998)^[10]。2010 年, 根据“国际电磁场计划”的评估结果和新的科学进展, ICNIRP 修订了针对 100 kHz 以下频段的新标准 (ICNIRP2010)^[11]。美国电气与电子工程师协会 (Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE) 也在 2007 年推出了 0~3 kHz 频段内的人体电磁暴露相关标准^[12]。2014 年, 我国国家环保部与国家质量监督检验检疫总局发布了《GB8702-2014 电磁环境控制限值》, 这一标准替代了 1988 年颁布的《GB8702-1988 电磁辐射防护规定》, 确定了电磁辐射的国家标准^[13-14]。

焊接技术在各行业均有大量需求, 焊接操作通常伴随着大电流, 有的输出电流甚至要达到 3 000 A 以上, 当电流通过焊接线缆时, 根据电流

大小不同会在线缆周围产生强度不同的电磁场, 从而会对从业人员造成安全隐患, 这已引起社会和各专业领域的重视。各国科研单位针对焊接过程中所产生的电磁暴露问题的研究已有部分成果, Jorgen 等^[15]对一个造船厂的 50 名焊接工人电磁暴露情况进行长期观察测量, 实验结果表明: 焊工通常每日至少会受到 2 mT 以上的极低频 (Extremely low frequency, ELF) 磁场暴露; 欧洲对悬挂式手操作电阻焊枪操作者的某几种焊接姿势的电磁环境进行计算^[16]; 北京工业大学宋永伦教授团队^[17]对于焊接时空问场的电磁环境做了系统的测量分析。

近年来, 对焊接电磁暴露问题研究多借助测量手段进行分析, 这只能得到空间磁场的分布情况, 不能解决焊接时人体生物组织的电磁场分布问题。本文不单使用测量手段, 还运用电磁计量的方法, 建立实际的人体模型, 将仿真结果与测量结果进行对比, 量化分析了焊接时对从业者产生的身体影响, 评估了焊工操作时的健康安全问题的, 同时也可以为焊接操作规范提供一定的参考。

1 方法

1.1 基于 ANSYS 的有限元求解原理

虽然可以测量得到焊接设备产生的磁场情况, 但我们无法对直接暴露在焊接环境中的人体内部感应电磁场进行测量, 所以用有限元方法来计算低频磁场对人体的健康影响是一种经典有效的方法。ANSYS 软件以麦克斯韦方程组作为电磁场分

析的出发点。根据麦克斯韦方程组（式（1）~（4））。

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

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

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

式中： $\vec{H}$ 为磁场强度矢量； $\vec{J}$ 为电流密度矢量； $\vec{D}$ 为电通密度； $\vec{E}$ 为电场强度矢量； $\vec{B}$ 为磁感应强度矢量； ρ 为电荷体密度。由电磁理论的麦克斯韦方程组构成了3个本构方程（式（5）~（7））。

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (5)$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (7)$$

式中： μ 为磁导率； ϵ 为介电常数； σ 为电导率。求解低频磁场时，用ANSYS仿真软件计算出磁场强度 $\vec{H}$ ，根据式（5）即可求得焊接环境所产生的磁感应强度 $\vec{B}$ 。

ANSYS软件是美国ANSYS公司研制的大型通用有限元分析（Finite element analysis, FEA）软件，是世界范围增长最快的计算机辅助工程（Computer aided engineering, CAE）软件，ANSYS电磁场分析以Maxwell方程组作为电磁场分析的出发点。有限元方法计算的未知量（自由度）主要是磁位或通量，其他关心的物理量可以由这些自由度导出。根据用户所选择的单元类型和单元选项的不同，ANSYS计算的自由度可以是标量磁位、矢量磁位或边界通量^[18]。本文借助ANSYS的参数化设计语言（ANSYS parametric design language, APDL）模块进行分析。

1.2 焊接电缆周围空间磁场测量方法

为了精确测量焊接环境范围内磁感应强度的频谱分布，本文采用德国NARDA公司的EHP-50F低频探头进行实地测量，EHP-50F探头用于精确测量电场和磁场，测量范围为0.3 nT~100 μ T，测量频率为1 Hz~400 kHz。测试焊接电源型号是WS-500，电流输出范围为10~500 A，空载电压约为70 V，仅测量一条焊接电缆附近的磁感应强度。测量选用电缆长度为5 m，我们在距离地面1.1 m处的平面内，以EHP-50F探头测量架空的一条焊接电缆产生的磁感应强度，焊接电缆测量如图1所示。

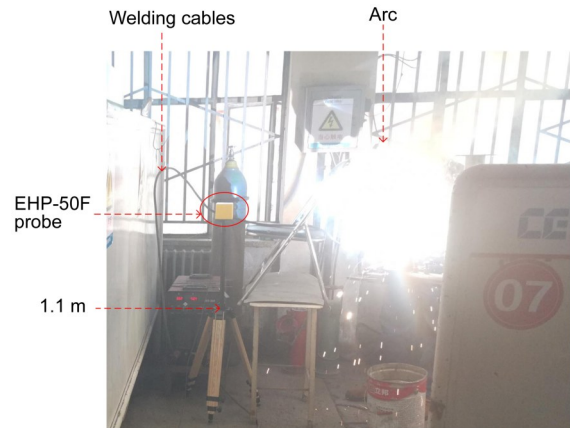


图1 EHP-50F低频探头焊接电缆低频测量
Fig.1 Measuring welding cables with EHP-50F low frequency measuring detector

1.3 ICNIRP职业暴露限值

20世纪90年代以来，ICNIRP通过与其他全球范围内的组织和国家机构等广泛合作和对相关科学文献的评估，制定了有关时变电场磁场的电磁暴露的ICNIRP导则^[11]，ICNIRP的职业暴露参考限值是频率映射的函数，如表1所示。

表1 ICNIRP的职业暴露标准限值
Table 1 Reference levels for occupational exposure to time-varying electric and magnetic fields

频段 Frequency range	磁感应强度 / μ T Magnetic flux density
1~8 Hz	$2.0 \times 10^5 / f^2$
8~25 Hz	$2.5 \times 10^4 / f$
25~300 Hz	1.0×10^3
300~3 kHz	$3.0 \times 10^5 / f$
3 kHz~10 MHz	100

注： f 代表频段列。

Note: f as indicated in the frequency range column.

焊接环境中,焊接电缆产生的是几万赫兹的低频磁场。由表1可以看出,在焊接电缆所产生的磁场频段,职业暴露限值应当为 $100\ \mu\text{T}$ 。

1.4 建立人体模型

首先在ANSYS软件中建立人体模型,三层球头模型由半径分别为 $0.085\ \text{m}$ 、 $0.090\ \text{m}$ 、 $0.100\ \text{m}$ 的3个球体构成,这3个球体分别组成了人体的头皮、颅骨、和大脑;颈部用高为 $0.200\ \text{m}$ 、半径为 $0.075\ \text{m}$ 的圆柱体组成,颈部与头部有重叠部分;上身长为 $0.450\ \text{m}$,由两个半圆柱体及一个长方体组成;手臂设置高为 $0.600\ \text{m}$,半径为 $0.0375\ \text{m}$ 的圆柱体;腿部长为 $0.900\ \text{m}$,由两段长为 $0.450\ \text{m}$ 的圆锥体分别代表大腿与小腿部分;脚的形状简化为两个圆柱体和一个长方体。人体身高参照笔者自身,总身高为 $1.710\ \text{m}$ 。在对人体进行有限元剖分时,先设置单元大小,再采用Smartsizes自动网格划分工具,生成形状合理的网格单元,人体模型和网格剖分见图2。

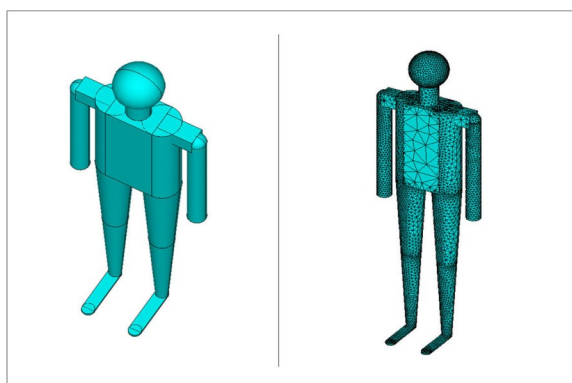


图2 人体模型和网格剖分
Fig.2 ANSYS finite element in human body

1.5 ANSYS实现过程

从焊接过程对人体的电磁暴露情况的仿真而言,由于焊接电机离人体较远,根据已有的测量结果,焊接电源周围 $0.2\ \text{m}$ 处磁感应强度约为 $5\ \mu\text{T}$,而焊接时操作人员距离电源远大于 $0.2\ \text{m}$ 。所以,仿真时主要考虑电缆与周围环境的几何模型的建立,以及焊接过程中焊接电缆周围的磁场分布。

首先,对电磁环境模型进行简化,将其假设为一个半径为 $2\ \text{m}$,高为 $6\ \text{m}$ 的圆柱体空气腔;取架空的一条焊接电缆,使其距地面高度与人体腰部等高,视为长直导线,导线长设置为 $5\ \text{m}$,半径

为 $0.005\ \text{m}$ 。实验模型包括人体、工件以及周围的介质(如空气)。根据实验方案设计,焊接电缆距离人体的位置是变化的,本文主要模拟了不同输出电流时分别距离焊接电缆 $0\ \text{m}$ 和 $0.1\ \text{m}$ 时的磁场情况。模型透视图如图3所示。

其次,利用ANSYS有限元软件的低频电磁场分析功能,对实验环境模型进行有限元网格划分,剖分后网格单元数量约270万个,施加电流载荷并设置边界条件,选择低频静态磁场分析功能对焊接电流谐波产生的磁场分量进行分析计算。由于网格数量较多,计算量较大,在进行求解时,计算机存储容量需在 $16\ \text{GB}$ 以上,计算时间需 $0.5\ \text{h}$ 以上,最后得到电极周围和人体内的磁感应强度值。

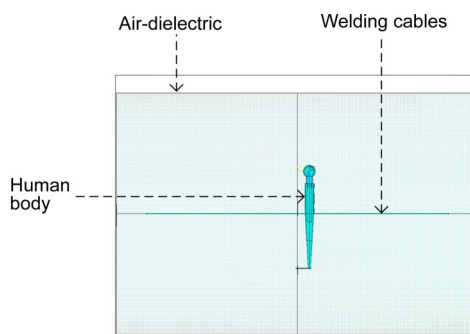


图3 ANSYS实验模型透视图
Fig.3 ANSYS experimental model perspective

2 焊接电缆空间场测量

测量焊接电缆时,我们考虑了多种电流时的磁场变化情况,其中以 $100\ \text{A}$ 、 $400\ \text{A}$ 与 $500\ \text{A}$ 得到相对有代表性的测量结果,因为测量现场焊接时最常用的焊接电流为 $100\ \text{A}$,而部分焊机额定输出电流为 $400\ \text{A}$,受测焊机额定电流为 $500\ \text{A}$ 。测量时我们发现频率在 $41.1\ \text{kHz}$ 时,焊接电缆产生的磁感应达到峰值。

贴近焊接电缆测量结果显示,焊接电缆产生的磁感应强度峰值在频率为 $41.1\ \text{kHz}$ 处,表2为贴近焊接电缆时的部分测量数据(以下数据均为6个记录点的平均值)。

由表2可以看出,当输出电流为 $500\ \text{A}$ 时,焊接电缆产生的磁感应强度占ICNIRP限值的 62.10% 。小于ICNIRP的磁感应强度标准限值,当输出电流更小时,测得的磁感应强度更小,因此焊接电缆贴近人体时不会产生健康风险。

表2 焊接电缆附近磁感应强度测量结果
Table 2 Measurement results near the welding cables

测量电流 / A	测量频率 / kHz	测量结果 / μT	占 ICNIRP 限值的比率 / %
Measurement currents	Measurement frequency	Measurement results	Account for ICNIRP
100	41.1	10.92	10.92
200	41.1	17.65	17.65
400	41.1	49.80	49.80
500	41.1	62.10	62.10

距离焊接电缆 0.1 m 时测量结果显示，焊接电缆产生的磁感应强度峰值频率亦在 41.1 kHz 处，表 3 为距焊接电缆 0.1 m 时的部分测量数据（以下数据均为 6 个记录点的平均值）。

表3 距焊接电缆 0.1 m 处磁感应强度测量结果
Table 3 Measurement results of magnetic flux density at a distance of 0.1 m from the welding cable

测量电流 / A	测量频率 / kHz	测量结果 / μT	占 ICNIRP 限值的比率 / %
Measurement currents	Measurement frequency	Measurement results	Account for ICNIRP
100	41.1	3.76	3.76
200	41.1	4.26	4.26
400	41.1	15.96	15.96
500	41.1	16.85	16.85

由表 3 可以看出，当测点在离焊接电缆 0.1 m 处，测得的磁感应强度最大为 16.85 μT ，占 ICNIRP 标准限值的 16.85%，不会对人体产生不良影响。

3 仿真结果分析

针对焊接电缆距人体的不同位置进行磁感应强度分析，考虑到实际操作，以贴近人体处和距人体 0.1 m 处为例，结果如图 4 所示。由图 4 可以

看出，焊接时输出电流所产生的磁场对人体的影响与距离有关，当输出电流为 500 A，电缆贴近人体腰部时，焊接电缆所产生的磁通量密度约为 63.36 μT ，小于 ICNIRP 限值 100 μT ，在 ICNIRP 标准范围内。当焊接电缆离人体手臂 0.1 m 时，焊接电缆产生的磁感应强度有明显下降，在距离焊接电缆为 0.1 m 的手腕处，磁感应强度为 15.73 μT ，占 ICNIRP 标准 100 μT 的 15.73%，不会对人体造成健康风险。

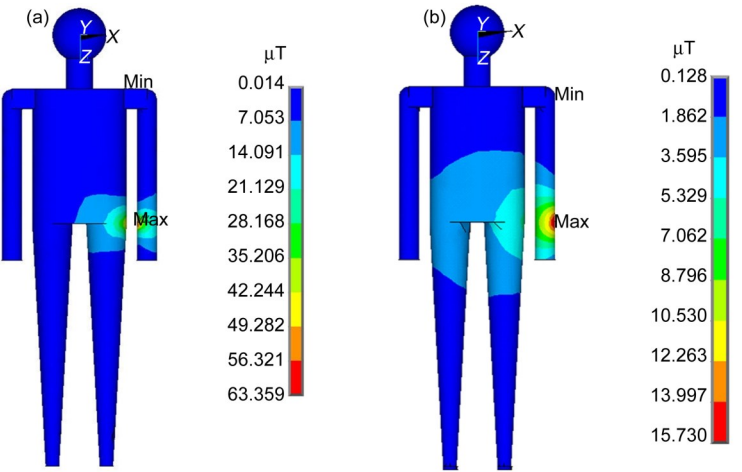


图4 输出电流为 500 A 时，焊接电缆贴近人体(a)与离人体 0.1 m (b)时的磁感应强度分布图
Fig.4 Distribution of magnetic flux density when the welding cable is close to the human body (a) and 0.1 m away from the human body (b) when the output current is 500 A

根据仿真结果显示,当电流载荷加为400 A时,得出磁感应强度为53.01 μT ,这占ICNIRP标准100 μT 的53.01%,相对于500 A时焊接电缆产生的磁感应强度有明显下降,不会对人体造成健

康风险。当焊接电缆离人体手臂0.1 m时,给焊接电缆施加400 A的焊接电流,仿真得出其磁感应强度为13.11 μT ,在ICNIRP限值范围内。仿真结果如图5所示。

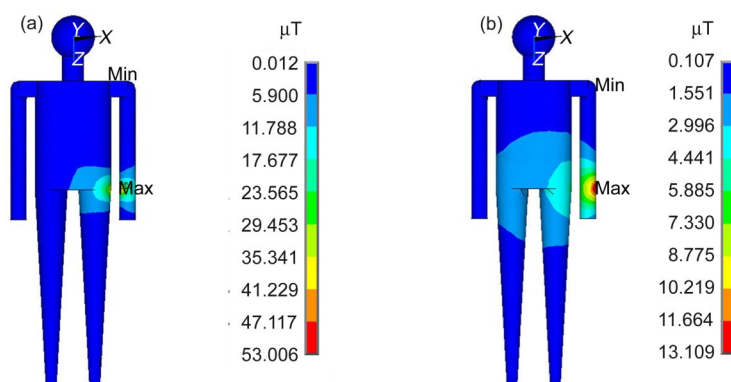


图5 输出电流为400 A时焊接电缆贴近人体(a)与离人体0.1 m(b)时人体内部磁感应强度分布图
Fig.5 Distribution of magnetic flux density inside the human body when the welding cable is close to the human body (a) and 0.1m away from the human body (b) when the output current is 400 A

除研究输出电流为500 A、400 A时人体内部的磁感应强度之外,我们再依次给焊接电缆模型施加200 A、100 A的电流,结果如表4和表5所

示。表4为焊接电缆紧贴人体时人体内部磁场仿真结果,表5记录了焊接电缆距人体0.1 m时人体内部磁场仿真结果。

表4 焊接电缆紧贴人体时人体内部磁场仿真结果
Table 4 Magnetic field simulation results of welding cable close to human body

施加电流 / A Applied current	磁场强度 / ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$) Magnetic field strength	磁感应强度 / μT Magnetic flux density	占ICNIRP限值的比率 / % Account for ICNIRP
100	8.97	11.31	11.31
200	16.94	21.35	21.35
400	41.77	53.01	53.01
500	50.64	63.36	63.36

表5 焊接电缆距人体0.1 m时人体内部磁场仿真结果
Table 5 Simulation results when the welding cable is 0.1m from the human body

施加电流 / A Applied current	磁场强度 / ($\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$) Magnetic field strength	磁感应强度 / μT Magnetic flux density	占ICNIRP限值的比率 / % Account for ICNIRP
100	2.02	2.55	2.55
200	4.16	5.24	5.24
400	10.39	13.11	13.11
500	12.52	15.73	15.73

4 结果讨论

4.1 实测数据与仿真数据比对

为了保证两组数据的有效性,我们将两种实

验的结果数据用折线图进行比较,见图6。由图6可以看出,仿真实验的结果是相对接近实测数据的,测量结果与仿真结果的误差在10%以内,证明实验数据是可靠的。

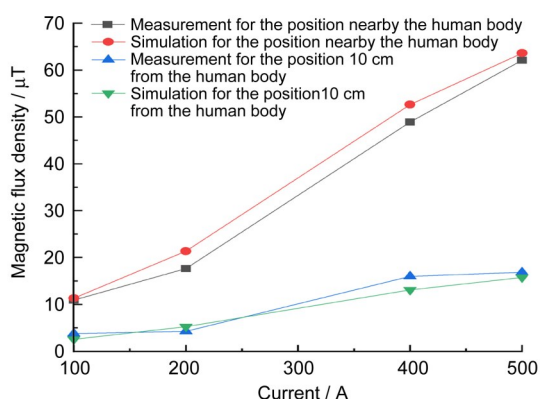


图6 实测与仿真实验数据对比折线图
Fig.6 Line charts of measured and simulated experimental data comparison

4.2 实验结果与 ICNIRP 标准比较分析

从实验结果看，焊接电缆产生的磁场频率比较高，为 41.1 kHz，ICNIRP 标准规定该频段的磁感应强度参考限值是 100 μT ，在 100 A 电流输出时，贴近电缆的位置磁感应强度在该频率点为 10.92 μT 左右，而当电流增大，达到 500 A 时，磁感应强度增大到 62.10 μT ，未超出 ICNIRP 的安全限值 100 μT ，这样的磁场环境，对人体不会产生健康影响。

4.3 存在的问题及意义

本文量化分析了焊接过程中焊接电缆的电磁场在人体内部产生的影响，较之国内外研究，利用 ANSYS 仿真实验更直观地体现了焊接电缆的磁场在人体内部的分布情况，且借助测量手段，验证了结果的可靠性。结果显示：小型直流焊机的辐射情况较为乐观，不会对焊接工作者产生健康风险。但我们只研究了直流焊机额定电流在 500 A 以内的情形，对于输出电流更高的焊机并未深入，对于其他种类焊机，如交流型焊机的情况，也没有进一步探究。

5 结论

(1) 既利用测量手段，又模拟人体内部受到的辐射情况，将两种实验数据进行对照分析，根据分析结果可以看出，ANSYS 仿真模拟是有效的实验方法，在条件有限的情况下，我们可以利用仿真软件分析实验。

(2) 从实验结果看，焊接时，焊接电缆产生的磁场频率较高，在 0~500 A 的额定范围内，根据

实验结果，在达到额定电流 500 A 时，焊接电缆产生的磁感应强度达到峰值。紧贴焊接电缆时，测得的磁感应强度为 62.10 μT ，占 ICNIRP 职业暴露安全限值的 62.10%，仿真结果显示焊接电缆贴近人体时人体内部所产生的磁感应强度为 63.36 μT ，占 ICNIRP 职业暴露安全限值的 63.36%，均小于 ICNIRP 参考限值 100 μT 。而随着电流减小，焊接电缆所产生的磁感应强度也随之减小，不会对从业者产生健康风险。

(3) 当测量点距焊接电缆 0.1 m 时，测得输出电流为 500 A 时，磁感应强度减小为 16.85 μT ，占 ICNIRP 职业暴露安全限值的 16.85%，此时仿真结果显示人体内部磁感应强度为 15.73 μT ，占 ICNIRP 职业暴露安全限值的 15.73%，小于 ICNIRP 参考限值 100 μT 。根据实验结果，随着焊接电缆距人体距离的增大，在人体内部产生的磁感应强度也在逐渐减小。

研究表明，焊接时焊接电缆在人体内部产生的磁感应强度小于 ICNIRP 职业暴露参考限值，说明焊接操作时，不会对从业者产生健康风险。本文研究了额定电流在 500 A 之内的直流焊机的电磁暴露情况，随着焊接技术的不断发展，更大输出电流焊机的电磁暴露情况需要进一步探究。

参考文献

- Korobsova V, Morozov Y, Stolorov M. Influence of the electric field in 500 and 750 kV switchyards on maintenance staff and means for its protection[C]// International Conference on High-tension Electric Systems. Paris: International Council on Large Electric systems, 1972: 23-26.
- Attwell D. Interaction of low frequency electric fields with the nervous system: the retina as a model system[J]. Radiation Protection Dosimetry, 2003, 106(4): 341-348. DOI: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a006370.
- 宋涛, 霍小林, 吴石增. 生物电磁特性及其应用[M]. 北京: 北京工业大学出版社. 2008.
SONG Tao, HUO Xiaolin, WU Shizeng. Bioelectromagnetic properties and its application[M]. Beijing: Beijing University of Technology Press. 2008.
- Kato M. Electromagnetics in biology[M]. Tokyo: Springer Japan, 2006. DOI: 10.1007/978-4-431-27914-3.
- Lu M, Ueno S. Dosimetry of exposure of patients to pulsed gradient magnetic fields in MRI[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(10): 3841-3844.

- DOI: 10.1109/tmag.2011.2157086.
- 6 Lu M, Ueno S. Comparison of specific absorption rate induced in brain tissues of a child and an adult using mobile phone[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, **111** (7): 07B311. DOI: 10.1063/1.3672854.
- 7 李林杰, 逯迈. 1 000 kV 特高压交流输电电磁暴露: 成年人与未成年人的对比研究[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2019, **37**(2): 020601. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2019.rrj.37.020601.
LI Linjie, LU Mai. Comparative study on electromagnetic exposure of adults and minors from 1 000 kV ultra-high voltage AC transmission power lines [J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2019, **37**(2): 020601. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2019.rrj.37.020601.
- 8 李瑾, 逯迈, 周文颖, 等. 基于实验测量的地铁站台电磁暴露安全评估[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2019, **37** (2): 020602. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2019. rrj. 37. 020602.
LI Jin, LU Mai, ZHOU Wenying, *et al.* Safety evaluation on electromagnetic exposure on the subway platform based on experimental measurements[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2019, **37** (2): 020602. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2019. rrj. 37. 020602.
- 9 董绪伟, 逯迈. 电动汽车动力电缆低频电磁场中人体的电磁暴露水平[J]. *辐射研究与辐射工艺学报*, 2019, **37** (5): 050601. DOI: 10.11889/j. 1000-3436.2019. rrj.37.050601.
DONG Xuwei, LU Mai. Electromagnetic exposure level in human body to low frequency electromagnetic fields from electric vehicle power cable[J]. *Journal of Radiation Research and Radiation Processing*, 2019, **37**(5): 050601. DOI: 10.11889/j.1000-3436.2019.rrj.37.050601.
- 10 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)[J]. *Health Physics*, 1998, **74**(4): 494-522.
- 11 International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)[J]. *Health Physics*, 2010, **99**(6): 818-836.
- 12 IEEE Standards Coordinating Committee. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0~3 kHz[S]. USA: IEEE International Committee on Electromagnetic Safety on Non-Ionizing Radiation, 2007.
- 13 国家环境保护局放射环境管理处. 电磁辐射防护规定: GB 8702-1988[S]. 北京: 中国标准出版社, 1988.
National Environmental Protection Agency. Electromagnetic radiation protection: GB 8702-1988[S]. Beijing: Standards Press of China.1988.
- 14 环境保护部科技标准司. 电磁环境控制限值: GB 8702-2014. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
National Environmental Protection Agency. Controlling limits for electromagnetic environment: GB 8702-2014 [S]. Beijing: China Environmental Press, 2014.
- 15 Skotte J H, Hjøllund H I. Exposure of welders and other metal workers to ELF magnetic fields[J]. *Bioelectromagnetics*, 1997, **18**(7): 470-477.
- 16 Zradzinski P. A comparison of ICNIRP and IEEE guidelines to evaluate low frequency magnetic field localised exposure[C]//17th International Conference Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE). Sandomierz, Poland: IEEE, 2016: 14-17. DOI: 10.1109/cpee.2016.7738764.
- 17 张军, 王世莹, 宋永伦. 逆变弧焊电源低频磁场辐射的分析[J]. *焊接学报*, 2010, **31**(4): 13-16.
ZHANG Jun, WANG Shiyong, SONG Yonglun. Investigation of low-frequency magnetic field radiation on inverter welding power source[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2010, **31**(4): 13-16.
- 18 Stolarski T, Nakasone Y, Yoshimoto S. Engineering analysis with ANSYS software[M]. 2 ed. Cambridge: Elsevier, 2018: 165-233. DOI: 10.1016/b978-0-08-102164-4.00004-2.