

# 面向防电磁辐射服装设计的生物电磁建模方法

马亮, 张欣\*, 应柏安, 吴龙

(西安工程大学 服装与艺术设计学院, 陕西 西安 710048)

**摘要:**为进一步优化防电磁辐射服装屏蔽效能的评价方法,建立人体与服装的简化模型,利用电磁场有限元技术,仿真模拟人体局部不同组织层面的电磁辐射值。采用比吸收率、电场强度、磁场强度3个指标,仿真分析0.4,1.2 GHz发射频率下人体接收的电磁辐射,及1.2 GHz发射频率下着装与不着装时电磁辐射对人体组织层面的影响。仿真结果表明,人体接受到的辐射值随发射频率的增加而增加;不同频率的辐射条件下,人体受辐射最大区域有所不同,表明该模型可以应用于电磁辐射服装的数字化评价及对人体生物组织防护的研究。

**关键词:**服装智能设计;防电磁辐射服装;生物电磁仿真模型;屏蔽效能

**中图分类号:**TS 941.26 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-1928(2018)06-0497-09

## Research on Bio-Electromagnetic Model for Electromagnetic Radiation Protective Clothing Design

MA Liang, ZHANG Xin\*, YING Bai'an, WU Long

(Apparel and Art Design College, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** In order to optimize the electromagnetic radiation protection property evaluation methods of clothing, this paper developed a simplified model of human body and clothing. Finite element method was used to build a bio-electromagnetic model. The bio-electromagnetic model included different tissues of human body. The specific absorption rate, electric field intensity and magnetic field intensity were adopted to simulate and analyze the electromagnetic radiation received by human body at 0.4 and 1.2 GHz emission frequencies, as well as the effect of electromagnetic radiation on human tissues at 1.2 GHz emission frequencies when dressed or not dressed. The simulation results showed that the received radiation of human body increased with the increase of radiation frequency. The largest radiation zone of human body was different under various radiation conditions. And it was shown that this model could be used to the study of digital evaluation of electromagnetic radiation protective clothing, and the protection of human body tissues.

**Key words:** garment smart design, electromagnetic radiation protective clothing, bio-electromagnetic model, shielding effectiveness

医学研究表明,电磁辐射对人体内器官组织的影响不容忽视,可导致脑萎缩、白内障、造血和淋巴器官发育不全、生殖系统障碍等<sup>[1-2]</sup>。目前较少采用计算机仿真的方法研究防电磁辐射服装对人体防护作用,研究主要集中在防电磁辐射服装对人体体表防护效能的机理分析和仿真研究上。

在防电磁辐射服装的机理分析方面,汪秀琛

等<sup>[3-4]</sup>结合人体特征和服装结构特点,研究了防电磁辐射服装结构及影响防电磁辐射效果的一些主要因素;汪秀琛等<sup>[5]</sup>通过测试4种防辐射样布,对影响防电磁辐射服屏蔽效能显著的因素进行了分析;史晓宁<sup>[6]</sup>应用基于屏蔽室法的材料电磁屏蔽效能简易测试方法,对影响因素进行了分析;肖红等<sup>[7]</sup>同样采用屏蔽室法对样品测试,发现电磁场的

收稿日期:2018-07-26; 修订日期:2018-09-18。

作者简介:马亮(1992—),男,硕士研究生。

\*通信作者:张欣(1956—),女,教授,硕士生导师。主要研究方向为服装设计与工程。Email:xianzhangxin@sina.com

方向性和样品的放置方向对测试结果影响显著,进而研究了金属纱线排列方式对屏蔽效能的影响。

在计算机仿真研究方面,陈家奎<sup>[8]</sup>采用 CST 软件对简易人体模型穿着服装情况下的屏蔽效能进行了仿真分析;刘畅<sup>[9]</sup>利用 Ansoft HFSS 软件建立简单的屏蔽服模型,并从远场和近场两个方面对服装的屏蔽效能进行仿真实验;苏镇涛等<sup>[10]</sup>采用国外解剖学人体模型,分析了电磁防护服的电磁参数对防护效能的具体影响,并将防护服设计为简单的立方体形状,用以模仿防护衣罩;蔡明娟<sup>[11]</sup>制作了人体模型,并仿真计算了模型穿着与其形状相同的防护服时电磁能量吸收的分布;张丽丽等<sup>[12]</sup>利用 Ansoft HFSS 软件建立测试仿真模型,分析了孕妇不同孕期体型变化对服装电磁防护性能的影响;张书轶<sup>[13]</sup>采用 CST 软件建立简易人体模型,服装模型与人体模型基本重合,并设置多个接收探头,仿真分析各接收点的电场强度。张伟伟<sup>[14]</sup>通过三维电磁仿真软件 CST,对市场上常见的 6 款防辐射孕妇服建立了仿真模型,但对于实际物理实验的测量方法与测量环境欠缺说明。孙丽芳<sup>[15]</sup>在真实人体解剖学模型的基础上,分析着装状态人体的电磁吸收及防护服开口大小对其电磁防护性能的影响。张永恒<sup>[16]</sup>利用 CATIA 软件建立了女性人体模型,仿真分析不同孔、缝对电磁屏蔽服装屏蔽效能的影响规律。对于低频电磁场而言,由于电磁感应辐射频率比较小、磁场强度比较强,为了更好地达到屏蔽电磁辐射的效果,常采用多层防电磁辐射服装进行屏蔽,但在这方面的仿真研究相对较少。

采用物理检测的方法测试电磁辐射对人体组织的影响较为复杂,实验成本较高,被测试人群也会产生健康方面的担忧。随着服装智能设计与制造技术的发展,用仿真技术解决基于人体的特种功能性服装设计问题将成为主要途径。文中应用电磁场有限元技术,建立了包含皮肤层、脂肪层、骨骼层、肌肉层、心脏层的局部简化人体电磁模型,以及服装模型、天线模型和环境模型。应用所建立的仿真模型,采用比吸收率、电场强度、磁场强度 3 个评价指标,分析 0.4,1.2 GHz 发射频率下对人体的电磁辐射,及近场环境中 1.2 GHz 发射频率下,着装与不着装时电磁辐射对人体组织层面的影响,旨在为数字化设计与评价防电磁辐射服装屏蔽效能提供参考。

## 1 电磁辐射对人体的影响

电磁辐射对人体的影响主要体现在热效应与

非热效应两个方面<sup>[17]</sup>。电磁辐射的热效应是指:人体在受到电磁波的辐射后,引发人体组织器官升温的现象。因为人体中含有大量的水分,交变电磁场导致水等极性分子发生电磁场感应下的极化及运动,从而产生摩擦进而发热<sup>[18-19]</sup>。非热效应是指:由作用时间长、能量电平低的电磁辐射所产生的一种生物电磁效应。基于这两种效应对人体的影响,根据流行病学的调查,电磁辐射对人体健康的影响比较广泛,能引起神经、生殖、心血管、免疫功能及眼睛等方面的改变,如神经衰弱、脱发、肌体免疫力下降、晶状体浑浊等。调查表明,使用移动电话可引起胸闷、恶心、食欲减退,对睡眠质量、神经行为及运动反应等方面均有不良影响<sup>[20-22]</sup>。因此需要建立一个包含皮肤层、脂肪层、骨骼层、心脏层的人体电磁模型,对服装的防电磁辐射屏蔽效果进行仿真分析。表 1 列出了常见辐射源的发射频率,文中主要针对表 1 所示的常见频段对人体辐射情况进行研究。

表 1 常见电子产品的主要辐射频率		
Tab. 1 Main radiation frequency of common electronic products		MHz
序 号	辐射源	主辐射频率
1	电视机	20
2	固定电话	200
3	GSM 移动通信基站	900,1 800
4	计算机	200 ~ 450
5	CDMA 通信	825 ~ 880
6	微波炉	2 450

## 2 防电磁辐射服装的屏蔽机理与屏蔽效能指标分析

### 2.1 防电磁辐射服装机理分析

穿着防电磁辐射服装是为了阻隔信号源经由天线辐射出的电磁波,使得电磁场的强度在防护服内大幅度衰减。防电磁服装屏蔽机理如图 1 所示。由图 1 可以看出,电磁波在到达防电磁服装表面后一部分电磁波发生反射未进入服装层、一部分电磁波被服装吸收、一部分电磁波在服装内部多次反射,只有一部分电磁波穿过防电磁辐射服装对人体造成损害。其中入射波到达服装表面的角度,防护服距离信号发射源的距离,防护服的厚度、结构、材料等都会对防电磁辐射服装的屏蔽效能产生一定影响。根据电磁波传播距离与发射信号的波长长短,电磁辐射分为近场辐射和远场辐射<sup>[23]</sup>。日常生活中人们所接触到的电磁辐射源往往离人体较近,如电脑、手机等,因此文中首先研究近场电磁

辐射对人体的影响。

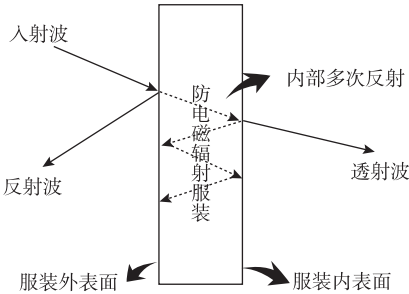


图1 防电磁服装屏蔽机理

Fig.1 Electromagnetic radiation shielding mechanism

2.2 防电磁辐射服屏蔽效能指标分析

防电磁辐射服装屏蔽效能 (shielding effectiveness, SE) 特指的是场屏蔽效能,定义为:未穿着屏蔽服装时的电磁辐射场值与经屏蔽后剩余的电磁辐射场值之比的分贝数。在近场分析过程中,电场和磁场的辐射情况不同,根据近场屏蔽原理将其分为电场屏蔽效能、磁场屏蔽效能两类。

2.2.1 防电磁辐射服装对电场屏蔽效能的指标

防电磁辐射服装电场屏蔽是指利用传导性能良好的防电磁辐射服装削弱或者消除电场耦合对人体各组织器官造成的不利影响,使得发射源发射的电场线无法全部到达人体。在电场屏蔽时,防电磁辐射服装的结构要尽量减少开口,拉链等部位尽量改为魔术贴的形式进行完整粘合,以防止电场泄露。以电场强度的形式表示屏蔽效能,其表达式为

SE(E)=20lg(E0/E1) (1)

式中:SE(E)为电场屏蔽效能,单位为 dB;E0,E1 分别为未穿着和穿着防电磁辐射服装时某一点的电场强度,单位为 V/m。

2.2.2 防电磁辐射服装对磁场屏蔽效能的指标

防电磁辐射服装磁场屏蔽是指利用传导性能良好的防电磁辐射服装,削弱(或消除)信号发射源(或干扰源)与被干扰回路间的磁场耦合对人体各组织器官造成的不利影响。磁场屏蔽的方法对应不同的频率会有所不同,但其原理都是通过穿着屏蔽服装使得磁场发射的信号无法全部到达人体。在磁场频率较低时,防电磁辐射服装多采用磁导率远小于空气的磁性材料,将磁力线约束在屏蔽材料内;在磁场频率较高时,会在含有良导体的防电磁辐射服装中形成涡电流,这种涡电流会产生与初始磁场方向相反的磁场,两者之间相抵消,从而实现防电磁辐射服装对磁场的屏蔽作用。用磁场强度的形式来表示屏蔽效能,其表达式为

SE(H)=20lg(H0/H1) (2)

式中:SE(H)为磁场屏蔽效能,单位为 dB;H0,H1 分别为未穿着和穿着防电磁辐射服装时某一点的磁场强度,单位为 A/m。

2.2.3 防电磁辐射服装对人体生物组织屏蔽效能的指标

在外电磁场作用下,人体内将产生感应电磁场,因为人体各器官均为有耗介质,所以体内电磁场将产生电流并吸收和耗散电磁能量,生物计量学中常用比吸收率(specific absorption rate, SAR)来表征这一物理过程[20]。比吸收率定义为:单位质量的人体组织所吸收的电磁波功率。比吸收率是一个单一量,场屏蔽效能是比值量,两者不适合直接比较。为了能够更直观、更明确地用比吸收率的观点表征出屏蔽服屏蔽性能的好坏,将场屏蔽效能式(1)的形式运用在比吸收率上,则基于比吸收率的屏蔽效能表示为

aSAR=10lg(SAR0/SAR1) (3)

式中:aSAR为比吸收率衰减系数,单位为 dB;SAR0,SAR1 分别为未穿着和穿着防电磁辐射服装时某点处的比吸收率,单位为 W/kg。

3 电磁仿真建模

电磁仿真建模是由 4 部分组成,包括人体生物电磁模型、服装模型、天线模型和环境模型。电磁仿真模型如图 2 所示。

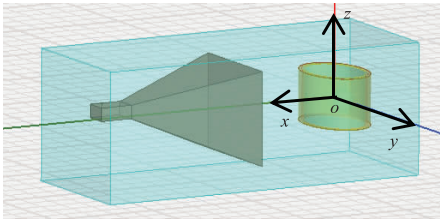


图2 整体仿真模型

Fig.2 Simulation model

3.1 人体生物电磁模型建立

由于人体结构复杂,在建立人体生物电磁模型时进行了简化,具体如图 3 所示。根据服装与人体的关系,将人体胸部水平基准面的形状简化成为椭圆形,并确定了心脏所在的位置,建立了一个由多层不同厚度的椭圆柱嵌套组成的简化模型。根据实体测量,男体胸围为 920 mm,设定模型最外层椭圆的长半径为 142 mm、长短半径之比为1.5、椭圆柱体高为 200 mm。由图 3 可以看出,模型共包含 5 层

几何结构,由外向内为:皮肤层(2 mm)、脂肪层(10 mm)、骨骼层(10 mm)、肌肉层(10 mm)和心脏层(半径为 5 mm),均为实体结构。在模型验证中,保持天线的主瓣方向与人体胸部的水平基准面平行。

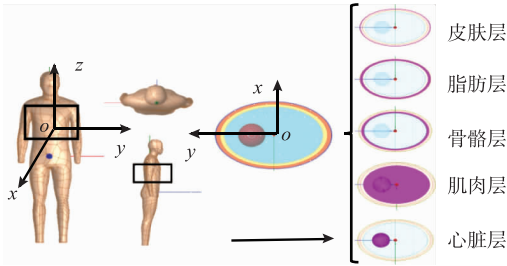


图 3 简化人体生物电磁模型

Fig.3 Simplified human body model

在几何模型基础上对模型赋予生物电磁属性,使之成为生物电磁模型。生物组织的电磁特性是生物组织作为一种物质对电磁场的响应特性<sup>[21]</sup>。生物组织的电磁特性分为电特性和磁特性两个方面,其中电特性包括电导率与介电常数两个部分,分别用  $\sigma$  和  $\varepsilon$  表示。模型不同组织电磁特性<sup>[24]</sup>设置见表 2。

表 2 人体各组织电磁特性

Tab.2 Electromagnetic properties of human tissues		
组织名称	$\varepsilon$	$\sigma/(S/m)$
皮肤	77	0.49
脂肪	14	0.04
骨骼	31	0.06
肌肉	72	0.69
心脏(采用肌肉参数)	72	0.69

3.2 服装模型建立

防电磁辐射服装模型是在模型皮肤层外增加厚度为 3mm 的服装层。参考市面上常见的防电磁辐射服装<sup>[25]</sup>,服装层采用实体几何模型,上下开口,银质材料。该服装模型的主要目的在于验证防电磁辐射服装在仿真分析中的可行性。通过在人体电磁模型基础上建立该服装模型,可以对比分析防电磁辐射服装的屏蔽效能,以及该服装对人体各个组织的保护效果,为防电磁辐射服装的开发提供参考依据,相对磁导率用  $\mu$  表示。服装电磁特性见表 3,服装模型如图 4 所示。

表 3 服装电磁特性

Tab.3 Electromagnetic properties of clothing		
$\varepsilon$	$\mu$	$\sigma/(S/m)$
1	$9.999\ 8\times 10^{-1}$	$6.1\times 10^7$

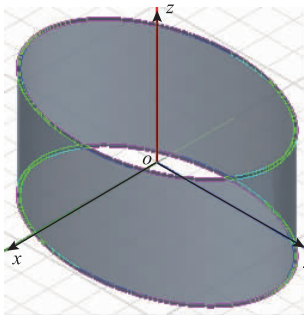


图 4 服装模型

Fig.4 Clothing model

3.3 天线模型建立

天线是辐射和接受电磁波的工具。文中采用矩形口径的喇叭天线进行仿真分析。喇叭天线是一种应用广泛的微波天线,其优点主要有:结构简单、频带宽、功率容量大、调整与使用方便,此外合适的喇叭天线可以获得良好的辐射特性、尖锐的主瓣、较小的副瓣以及较大的增益<sup>[26-27]</sup>。喇叭天线是由矩形波导 E 面和 H 面的两臂张开而形成的。几何模型主要由喇叭模型、波导模型和馈线模型 3 部分组成,具体如图 5 所示。电磁信号由馈线传入喇叭产生电磁波辐射。

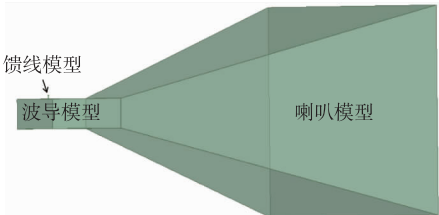
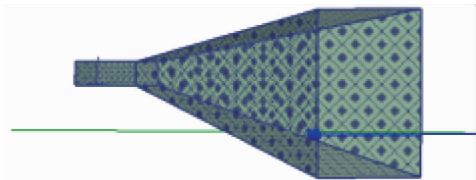


图 5 天线模型

Fig.5 Antenna model

3.4 环境模型建立

环境模型的建立是仿真实验进行的基础,为仿真的情景设定最合理的边界。空间边界设置为辐射边界,主要是为了仿真模拟真空无磁环境,并且保证外表面边界距其内部模型的距离不小于  $1/4\ \lambda$  ( $\lambda$  为波长)。天线模型除了将馈线的端口面、天线的端口面和天线的口径面设置为理想边界条件外,其余部分全部设置为辐射边界,以保证天线模型的正常工作状态。仿真环境设置如图 6 所示。



(a)天线辐射条件



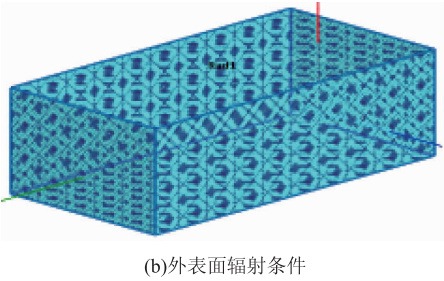


图6 仿真环境设置

Fig.6 Simulation environment conditions

4 电磁模型在仿真计算中的应用

应用建立的局部简化人体电磁模型、服装模型、天线模型和环境模型,采用比吸收率、电场强度、磁场强度 3 个评价指标,仿真分析 0.4、1.2 GHz 下人体接收的电磁辐射值,及在定位发射天线距人体 0.5 m 的近场环境中,1.2 GHz 发射频率下着装与不着装时电磁辐射对人体组织层面的影响。

4.1 两种发射频率的电磁辐射仿真分析

电场辐射以人体胸部水平基准面为例,随着辐射频率的增大,人体接受最大辐射的位置发生变化。通过对人体胸部水平基准面、人体胸部矢状切面仿真结果的分析,发现当发射频率在 0.4 GHz 时,胸部左右两侧位置受到的电场辐射强度要明显大于胸部中心;距离胸部中心上下各 8~9 cm 处接受到的电场辐射强度大于胸部中心位置;随着发射频率的增加,最强电场辐射区域逐渐向胸部靠近,这是由于不同频率的电磁波在真空中传播的波长不同,以及电磁波到达服装的入射角度不同所致。根据 $\lambda = v/f$ ,可知随着发射频率的增加,电磁波波长逐渐变短,辐射位置向中心靠近。通过胸部水平基准面和矢状切面仿真分析结果可以看出,由于人体各组织的电磁特性不同,电场辐射在不同人体组织层面的分布情况也有一定差异,电场辐射仿真结果如图 7 所示。

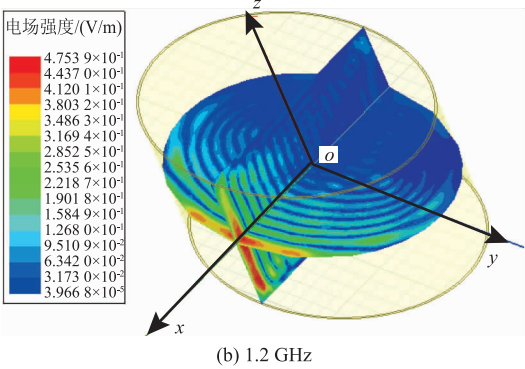
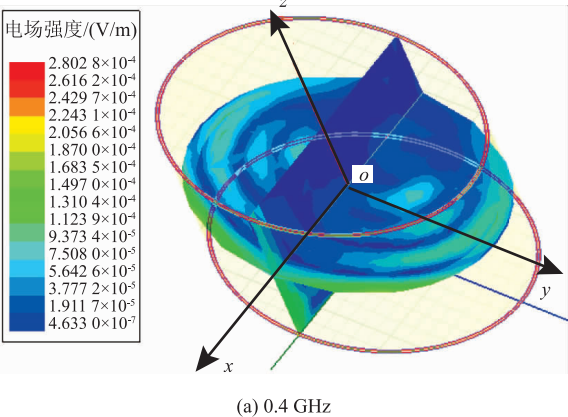


图7 电场辐射仿真结果

Fig.7 Simulation results of the electric radiation filed

磁场辐射仿真结果如图 8 所示。通过仿真结果发现整体的分布趋势和电场辐射相近。但是在 0.4 GHz 低频电磁辐射条件下,磁场对于皮肤层和脂肪层的影响非常小,骨骼层所受到的辐射强度最大;随着辐射频率的加强,电场辐射区域逐渐向脂肪层靠近,且靠近发射天线的一面受到较强磁场辐射。

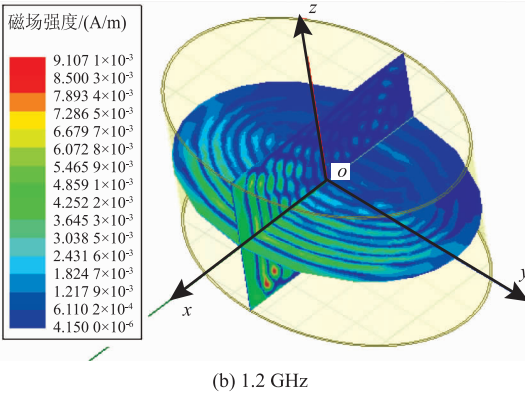
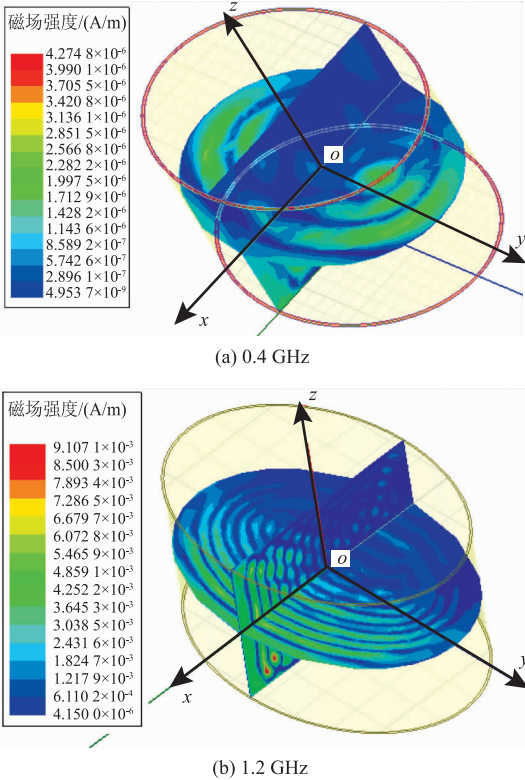


图8 磁场辐射仿真结果

Fig.8 Simulation results of the magnetic radiation filed

同样以 0.4 GHz 和 1.2 GHz 电磁辐射进行比吸收率仿真分析,将人体胸部水平基准面最前端(前侧皮肤层)作为起点,将人体胸部水平基准面的最后端(后侧皮肤层)作为终点,仿真分析胸部水平基准面从前向后的局部比吸收率和平均比吸收率。

0.4 GHz和1.2 GHz下局部比吸收率与平均比吸收率如图9、图10所示。0.4 GHz下胸部水平基准面上各个组织的比吸收率变化较小,从前端到后端整体呈下降趋势,在脂肪层比吸收率有明显的下降,

骨骼层有明显上升。在1.2 GHz下从前端到后端比吸收率整体成下降趋势,但在前侧脂肪层有明显的下降,骨骼层有明显的上升,并且其幅度都比0.4 GHz明显。

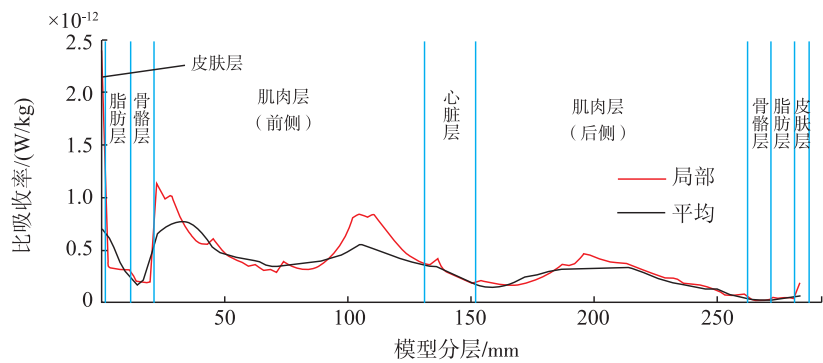


图9 0.4 GHz下局部SAR与平均SAR

Fig. 9 Local SAR and average SAR under 0.4 GHz conditions

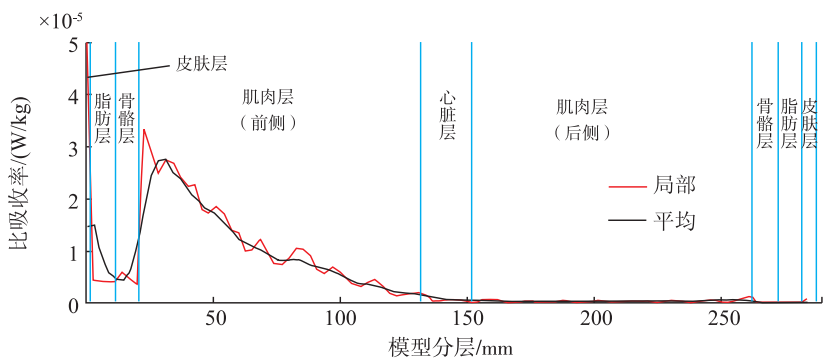


图10 1.2 GHz下局部比吸收率与平均比吸收率

Fig. 10 Local SAR and average SAR under 1.2 GHz conditions

4.2 发射频率1.2 GHz下的着装与不着装

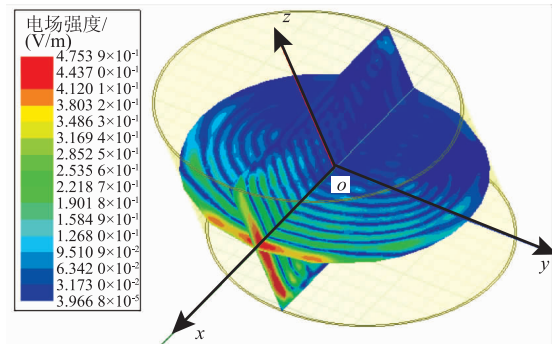
防电磁辐射服装加入银质服装层结构之后,对于电场、磁场有着很好地屏蔽效果,从而对人体各组织器官能够起到明显的保护作用。发射频率1.2 GHz下,服装对电场和磁场的屏蔽效能仿真分析结果如图11和图12所示。该材质的防电磁辐射服装屏蔽良好,在一定频段范围内有着良好的防护作用。

通过对比对应点的电场强度,利用式(1)、式(2)可以发现该材质服装的屏蔽效能满足对电磁防护的要求。与李庆国等<sup>[25]</sup>研究结果相近,但文中主要为了验证生物电磁模型的可行性,因此服装相对简单,在之后的数字化设计中将会重点讨论。

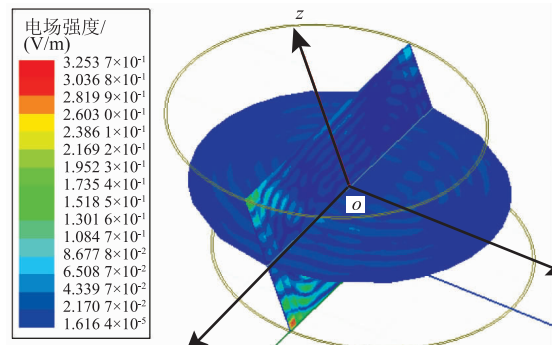
为了更加直观地表征银质防电磁辐射服装对于人体皮肤层、脂肪层、骨骼层、肌肉层的防护效能,将1.2 GHz辐射条件下各个实验的仿真结果采用曲线图进行了对比,具体如图13、图14所示。由图13和图14可以看出,1.2 GHz辐射下电场最大辐射区域在脂肪层,磁场最大辐射区域在肌肉层,

结果显示骨骼层对于电场和磁场有着很好的屏蔽作用。此外,人体各个组织层面电场辐射强度远大于磁场辐射强度。而当电磁波传递到肌肉层时,其电场辐射强度和磁场辐射强度均产生明显衰减。无防护服装和有防护服装人体组织各层比吸收率仿真结果如图15和图16所示。

基于比吸收率的防电磁辐射服装的屏蔽效能分析,基本原理是通过比较穿着防电磁辐射服装前后电磁辐射在人体各组织器官所引起的热效应。如果电磁强度增大,由人体感应外电场所引起的热效应会对人体的组织器官造成一定的伤害。仿真实验发现银质服装有着良好的隔离效果。以1.2 GHz辐射为例,通过分层查看的方法可以清晰地表示出电磁场对人体组织层面所引起的热分布状况。对穿着防电磁辐射服装后各层面的热分布情况的分析,也可以明显的看出银质防电磁辐射防护的屏蔽效能。



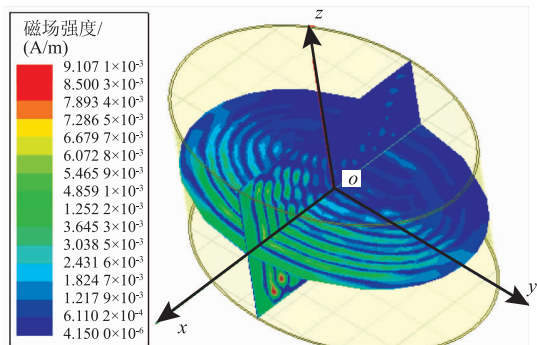
(a)无防护服装



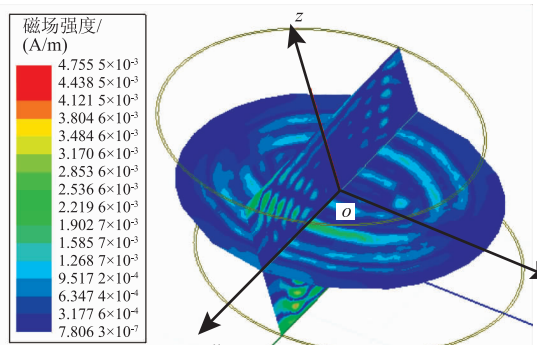
(b)有防护服装

图 11 服装对电场的屏蔽效能

Fig. 11 Electric field shielding effectiveness of clothing



(a)无防护服装



(b)有防护服装

图 12 服装对磁场的屏蔽效能

Fig. 12 Magnetic field shielding effectiveness of clothing

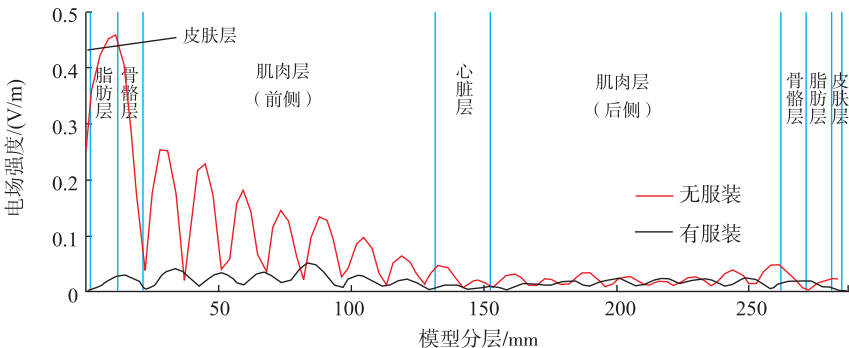


图 13 1.2 GHz 服装对电场的屏蔽效能

Fig. 13 Electric field shielding effectiveness of clothing under 1.2 GHz conditions

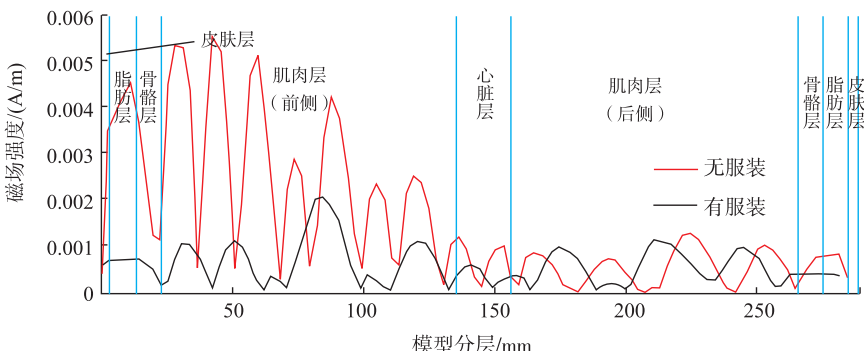


图 14 1.2 GHz 服装对磁场的屏蔽效能

Fig. 14 Magnetic field shielding effectiveness of clothing under 1.2 GHz conditions



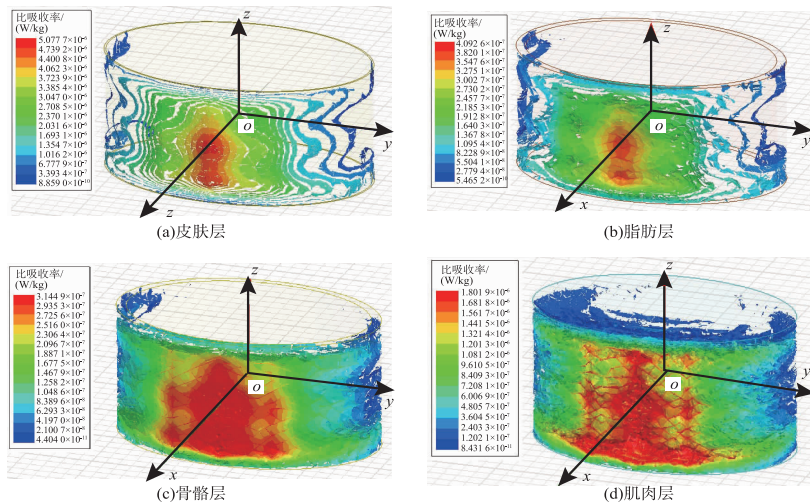


图 15 无防护服装人体组织各层 SAR 仿真结果

Fig. 15 SAR simulation results of tissue without protective clothing

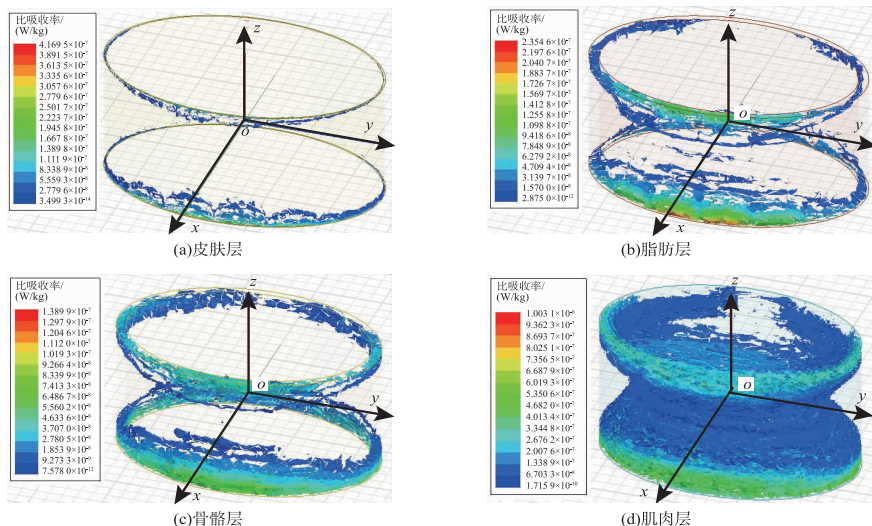


图 16 有防护服装人体组织各层 SAR 仿真结果

Fig. 16 SAR simulation results of tissue with protective clothing

## 5 结 语

通过仿真实验发现,当发射频率为 0.4 GHz 时胸部左右两侧部位受到的电场辐射强度要明显的大于胸部中心所受到的电场辐射强度。当发射频率为 1.2 GHz 时,随着发射频率的增加,最强电场辐射区域逐渐向胸部靠近。从不同的人体组织层面来看,骨骼层受到的电磁辐射强度高于其他组织层。加入服装层以后,不同组织层面所受到的电磁辐射均有所减弱。1.2 GHz 辐射下电场最大辐射区域在脂肪层,磁场最大辐射区域出现在肌肉层,结果显示服装对骨骼层受到的电场和磁场有着很好的屏蔽作用。从比吸收率来看,在 1.2 GHz 的发射频率下,加入服装层后脂肪层的比吸收率明显降低。仿真实验可以分析不同频率下的电磁辐射对人体各个组织层面的影响;加入服装层之后,可以

反映出服装的屏蔽效能,所建模型和仿真方法可以服务于防电磁辐射服装的数字化设计,同时可以进一步应用于数字化评价防电磁辐射服装对人体生物组织屏蔽效能的研究。

### 参考文献:

- [1] 舒行科. 电磁防护服屏蔽效能的测量方法探讨[J]. 科技创新与生产力, 2013(5): 95-96.
- SHU Xingke. Discussion on measuring methods of shielding effectiveness of electromagnetic protective clothing [J]. Sci-Tec Innovation and Productivity, 2013(5): 95-96. (in Chinese)
- [2] 吴雯. 防辐射服装的发展[J]. 进展与述评, 2012(2): 19-21.
- WU Wen. Development of anti-radiation garment [J]. Progress in Textile Science and Technology, 2012(2): 19-21. (in Chinese)
- [3] 汪秀琛, 刘哲. 防电磁辐射服装的屏蔽效能数学模型



- [J]. 纺织学报, 2008, 29(2): 73-75, 80.
- WANG Xiuchen, LIU Zhe. Shielding efficiency mathematics model on the electromagnetic shielding clothing [J]. Journal of Textile Research, 2008, 29(2): 73-75, 80. (in Chinese)
- [4] 汪秀琛, 张欣. 防电磁辐射服装的防护机理[J]. 纺织科技进展, 2005(5): 30-32, 42.
- WANG Xiuchen, ZHANG Xin. The protection mechanism of defending electromagnetism radiates clothing [J]. Progress in Textile Science and Technology, 2005(5): 30-32, 42. (in Chinese)
- [5] 汪秀琛, 张欣, 王素玲. 影响防电磁辐射服屏蔽效能的显著因素分析[J]. 西安工程科技学院学报, 2006(4): 397-401.
- WANG Xiuchen, ZHANG Xin, WANG Suling. Analysis of significant factors of influence shielding efficiency on electromagnetic shielding clothing [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2006(4): 397-401. (in Chinese)
- [6] 史晓宁. 基于屏蔽室法的材料电磁屏蔽效能的简易测试方法及影响因素分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2015: 32-35.
- [7] 肖红, 施楣梧, 钞杉. 金属纱线排列方式对屏蔽效能的影响[J]. 纺织学报, 2015, 36(12): 25-31.
- XIAO Hong, SHI Meiwu, CHAO Shan. Influence of metal yarns arrangement mode on shielding effectiveness [J]. Journal of Textile Research, 2015, 36(12): 25-31. (in Chinese)
- [8] 陈家奎. 防电磁辐射服装屏蔽效能测量方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2007: 17-19.
- [9] 刘畅. 防电磁辐射服装屏蔽效能测试方法研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2009: 25-27.
- [10] 苏镇涛, 周红梅, 胡向军, 等. 电磁辐射防护材料人体防护性能评价研究[J]. 辐射防护, 2009, 29(4): 232-236.
- SUN Zhentao, ZHOU Hongmei, HU Xiangjun, et al. Shielding effectiveness evaluation of EM shielding material [J]. Radiation Protection, 2009, 29(4): 232-236. (in Chinese)
- [11] 蔡明娟. 人体电磁防护服特性的电磁仿真研究[C]//中国电子学会微波分会. 2011年全国微波毫米波会议论文集: 下册. 北京: 电子工业出版社, 2011: 1740-1742.
- [12] 张丽丽, 陈雁. 防辐射孕妇服电磁防护性能的测试与仿真[J]. 纺织学报, 2011, 32(10): 108-122.
- ZHANG Lili, CHEN Yan. Testing and simulation of electromagnetic shielding effects of electromagnetic protective clothing for pregnant women [J]. Journal of Textile Research, 2011, 32(10): 108-122. (in Chinese)
- [13] 张书轶. 屏蔽服屏蔽效能测试方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2016: 20-28.
- [14] 张伟伟. 防辐射服电磁屏蔽效能评价研究[J]. 科技创新与科技生产力, 2017(6): 106-109, 113.
- ZHANG Weiwei. Shielding effectiveness evaluation of electromagnetic shielding clothing [J]. Sci-Tec Innovation and Productivity, 2017(6): 106-109, 113. (in Chinese)
- [15] 孙丽芳. 人体电磁防护服的仿真分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2017: 28-30.
- [16] 张永恒. 基于三维仿真模拟的电磁屏蔽服装屏蔽效能分布研究[D]. 郑州: 中原工学院, 2017: 60-66.
- [17] 冯健. 生物组织介电特性测量及模拟材料研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2012: 30-37.
- [18] 陈雪霞, 吴艳, 曾百科, 等. 微波炉电磁辐射防护研究[J]. 科技创新与应用, 2017(14): 36-38.
- CHEN Xuexia, WU Yan, ZENG Baikē, et al. Research on microwave radiation protection [J]. Technology Innovation and Application, 2017(14): 36-38. (in Chinese)
- [19] 王柳辉. 电磁辐射职业危害及防护对策[J]. 中国新技术新产品, 2017(5): 147-148.
- WANG Liuhui. Electromagnetic radiation occupational hazards and protective measures [J]. China New Technologies and New Products, 2017(5): 147-148. (in Chinese)
- [20] 姜槐, 许正平. 电磁辐射与人体健康[J]. 中华劳动卫生职业病杂志, 2002, 20(1): 241-242.
- JIANG Huai, XU Zhengping. Electromagnetic radiation and human health [J]. Chinese Journal of Industrial Hygiene and Occupational Diseases, 2002, 20(1): 241-242. (in Chinese)
- [21] 伏广伟, 湛权. 民用防电磁辐射服装的开发及屏蔽效能评价[J]. 纺织导报, 2010(8): 88-90.
- FU Guangwei, ZHAN Quan. Development of anti-electromagnetic radiation garments of daily use and its shielding effectiveness evaluation [J]. China Textile Leader, 2010(8): 88-90. (in Chinese)
- [22] 刘畅. 人体头部比吸收率(SAR)数值仿真分析研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2010: 28-42.
- [23] 马西奎. 电磁场有限元与解析结合解法[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 10-125.
- [24] 冯健, 邓宜华, 辛学刚. 模拟人体组织介电特性的介电材料研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 11(28): 24-29.
- FENG Jian, DENG Yihua, XIN Xuegang. Dielectric materials modeling human dielectric properties [J]. Science Technology and Engineering, 2015, 11(28): 24-29. (in Chinese)
- [25] 李国庆, 马文华, 武彤. 生物电磁效应研究[J]. 现代电信科技, 2012, 42(5): 39-44.
- LI Guoqing, MA Wenhua, WU Tong. Bio-electromagnetic effects [J]. Modern Science and Technology of Telecommunications, 2012, 42(5): 39-44. (in Chinese)
- [26] 李明洋, 刘敏, 杨放. HFSS 天线设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011: 280-320.
- [27] 谢处方, 饶克谨. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 10-45.
- (责任编辑: 卢杰, 邢宝妹)