

DOI: 10.3969/j.issn.1671-024x.2024.05.010

单向单线电能传输系统的电磁安全性

李阳^{1,2}, 胡涛成¹, 翟宇洁², 汪学亮¹, 黄文鑫¹, 娄志刚¹

(1. 天津工业大学 电气工程学院, 天津 300387; 2. 天津理工大学 天津市新能源电力变换传输与智能控制重点实验室, 天津 300384)

摘要: 为解决单向单线电能传输系统的电磁安全性问题, 首先搭建了单向单线电能传输系统和含有重要器官的人体模型; 其次根据国内电磁场限值标准仿真研究了系统周围电磁场强度的限值范围, 并探究了系统不同位置处的电磁场对体内重要器官的电场强度、磁场强度、电流密度和比吸收率(SAR值)最大值的影响程度; 最后通过三维电磁场测量装置探测了单向单线电能传输实验系统周围的电磁场分布, 得出了系统的限值距离, 并与仿真限值距离进行了对比分析。结果表明: 发射端和接收端的电磁场强度高于单导线周围的电磁场强度, 右肾在发射端、接收端、单线处的的磁场强度分别为 0.86、0.81 和 0.18 A/m; 发射端和接收端对体内重要器官的影响程度明显大于单导线。实验与仿真所得的电磁场强度限值距离具有良好的一致性, 证明了系统电磁安全性研究的正确性。

关键词: 单向单线电能传输; 电磁安全; 限值距离

中图分类号: TM15

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2024)05-0066-09

Electromagnetic safety of one-way single-wire power transfer system

LI Yang^{1,2}, HU Taocheng¹, ZHAI Yujie², WANG Xueliang¹, HUANG Wenxin¹, LOU Zhigang¹

(1. School of Electrical Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Key Laboratory of New Energy Power Conversion, Transmission and Intelligent Control, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: To solve the problem of electromagnetic safety of one-way single-wire power transfer system, firstly, a one-way single-wire power transfer system and a human body model with critical organs were built. Secondly, the limit range of electromagnetic field strength around the system was studied according to the domestic electromagnetic field limit standard simulation, and the degree of influence of electromagnetic field at different locations of the system on the maximum value of electric field strength, magnetic field strength, current density and specific absorption ratio (SAR) of vital organs in the body was investigated. Finally, the electromagnetic field distribution around the one-way single-wire power transfer experimental system was detected by a three-dimensional electromagnetic field measurement device, and the limit distance of the system was derived and compared with the simulated limit distance for analysis. The results show that the electromagnetic field strength at the transmitter and receiver are higher than the electromagnetic field strength around the single conductor. The electromagnetic field intensity of the right kidney on the transmitter, receiver and single conductor are 0.86, 0.81, and 0.18 A/m, respectively, and the degree of influence of the transmitter and receiver on the vital organs in the body are obviously higher than that of the single conductor. The electromagnetic field strength limit distances obtained from the experiments and simulations has excellent agreement, which proves the correctness of the system electromagnetic safety of the study.

Key words: one-way single-wire power transfer; electromagnetic safety; limit distance

无线电能传输摆脱了线缆的制约和束缚, 是一种灵活、便捷的电能传输方式, 因而得到快速发展并广

泛应用于体内植入器件、轨道交通、便携式电子设备等领域^[1-3]。其中激光和微波辐射式无线电能传输可以

收稿日期: 2023-01-02

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51877151); 天津市应用基础及前沿技术研究计划(自然科学基金)面上项目(23JCYBJC00400)

通信作者: 李阳(1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为无线电能传输理论与应用。E-mail: liyang@tiangong.edu.cn

实现远距离传输,但是还存在传输效率低下、线圈尺寸庞大、对生物体安全性影响较大等诸多问题^[4-5]。近场耦合式无线电能传输技术(谐振式、感应式、电场式等)虽能实现较大功率和较高效率的电能传输,但是存在无法实现远距离传输的问题^[6-11]。到目前为止,现存的几种无线电能传输方法在保证生物体电磁安全和实现高效率传输的同时无法实现远距离的电能传输。因此,为了消除安全性、远距离和高效率间的矛盾,提出了一种利用单根导线实现远距离电能传输的技术,即单线电能传输(single-wire power transfer, SWPT)技术^[12]。该技术通过单根导线连接发射端和接收端实现电能的传输,既可以减少金属资源的使用,又可以提高电能传输的灵活性和安全性,当单导线被周围导体(暖气管、海水、人体、潮湿的土壤等)进行替代时,就可以实现真正的无线电能传输。目前,SWPT技术还停留在初步研究的阶段,通过深入研究有望在远距离的情况下以高效率的状态实现无线电能传输,满足人类在特殊场景下的用电需求。该技术的研究和发展有望运用于海上孤岛输电、偏远山区供电、封闭金属物体供电等领域。20世纪初,特斯拉首次提出仅利用单导线来传输电能的技术和用地球代替单导线实现全球无线电能传输的设想;并提出通过合理布置发射器和接收器的位置,使能量通过大地传输至任何位置^[13-14]。然而,他宏伟的“全球无线电能传输”计划由于缺乏资金而落幕。2001年,全俄农业电气化研究所研制了适用于两个电压等级的单线传能线路,并使用单导线和大地形成传输线结构^[15]。2008年,美国内华达雷电实验室基于特斯拉电能传输系统,研究了两个谐振变压器之间的电场耦合关系,在5 m距离处传输800 W功率,效率可达22%。2009年,美国田纳西理工大学研究团队设计了一种非对称单线电能传输系统,用海水代替单线为25 m外的25 W白炽灯供电,证明了单线电能传输系统能够以海水为介质进行传能。2017年,大连理工大学研究团队建立了基于特斯拉线圈的集总参数电路模型,并对传输特性进行了仿真与实验研究^[16]。2020年,天津工业大学研究团队对多负载SWPT系统进行了研究,制作了实验样机,并通过建筑物固有地线替代单导线实现了电能传输,大大提高了单线电能传输系统的灵活性,为单线被现有建筑结构替代的设想提供了实例^[17-19]。

上述研究的核心思想是依靠空间电场和单根导线共同作用形成回路,并成功实现了对电能的传输,对单线电能传输技术的发展起到了积极的作用,但是空间电场的存在使系统的安全性降低,传输距离也无法实现无限扩大。为了实现远距离、安全的单线电能

传输,提出了一种不依靠空间电场,仅利用单根导线实现无闭合回路的新单线电能传输方法,本文称其为单向单线电能传输(one-way single-wire power transfer)技术。本文首先通过理论分析了电磁环境对生物体的影响和单向单线电能传输系统的实现方法;其次建立了单向单线电能传输系统模型和带有重要器官的人体模型;接下来通过仿真分析了电磁场限值范围,并分别研究了系统不同位置处体内关键器官的电场强度、磁场强度、电流密度以及比吸收率(SAR值)的最大值;最后利用实验方法证明了仿真中电磁场限值范围的正确性,为单线电能传输技术的广泛应用奠定了基础。

1 理论分析

1.1 电磁环境对生物体的影响

辐射是一种能量向外传播的现象,辐射分为电离辐射和非电离辐射。像原子弹、日本核泄漏、切尔诺贝利产生的辐射,就叫做电离辐射,一般称为射线,比如:阿尔法射线、贝塔射线、X光-伦琴射线等,也就是人们平时谈之色变的真凶。它会破坏生物体的细胞结构,是诱发癌症的原因之一。日常生活中的电视、手机、电脑、电磁炉、微波炉、高压电线、变电站和通信基站等属于非电离辐射的范围,相比电离辐射要安全得多。电磁辐射对生物体的影响主要体现在3个方面,分别为热效应、非热效应和累积效应。热效应是指人体内的水分子受到电磁辐射后相互摩擦,引起身体温度升高;非热效应是指电磁辐射会打乱和干扰人体器官和组织中存在的微弱电磁场,如被X射线过多照射后,虽然身体不会发热但会影响身体健康;累积效应是指热效应和非热效应久而久之产生的累积性的影响。

近年来,世卫组织多次组织多个国家和国际组织开展“国际电磁场计划”,致力于研究低频电磁辐射环境对健康的影响,并建立暴露于电磁场中健康风险评估、预测和预防的有效机制。单向单线电能传输系统电磁安全性的研究既有助于该技术的进一步研究和广泛应用,又可以反向约束系统的参数,促进系统的标准化和统一化,利于系统的加快应用。因此系统的电磁场限值范围及其对人体的影响研究是该技术走向实际应用的过程中必须要解决的问题。

1.2 单向单线电能传输系统

同轴线内的电场线总是从内导体垂直指向外导体或从外导体垂直指向内导体,磁场线环绕内导体,同时垂直于内外导体;同轴线内的电场和磁场只存在垂直于传播方向的横向分量,不存在平行于传播方向

的纵向分量,故同轴线中传递的电磁波为横电磁波,简称 TEM 波。单导线在单线电能传输系统中起引导和束缚电磁波的作用,通过分析单导线上的电磁场可知,电场线始于单导线的表面又终于其表面,电场既存在横向分量也存在纵向分量,磁场线始终环绕单导线并垂直于电场线,仅存在横向分量,故单线上传输的电磁波为横磁波,简称 TM 波。从同轴线的 TEM 波到单导线的 TM 波,存在电磁波模式转换的过程,故称该过渡结构为模式转换装置。单向单线电能传输系统

整体的电磁场分布如图 1 所示。

根据上述传输原理及分析,本文设计使用了一种含有模式转换装置的新型单向单线电能传输系统,结构模型如图 2 所示。系统发射端由电源、阻抗匹配装置、同轴线和模式转换装置(螺旋线圈)构成;系统接收端由模式转换装置(螺旋线圈)、同轴线、整流装置和负载构成。系统发射端和接收端中的模式转换装置一端连接同轴线外导体,另一端悬空处于开路状态。

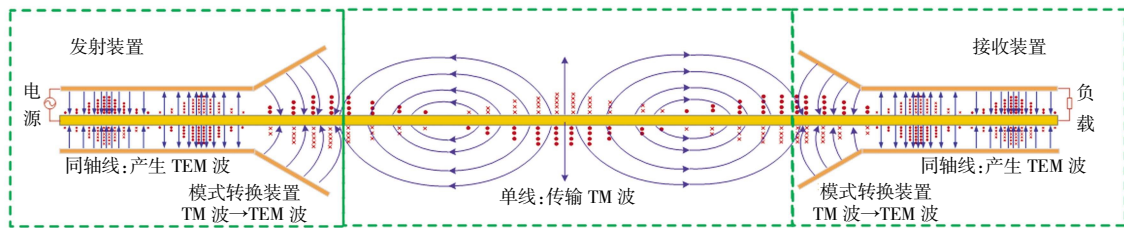


图 1 单向单线电能传输系统电磁场分布

Fig.1 Distribution of electromagnetic field of one-way SWPT system

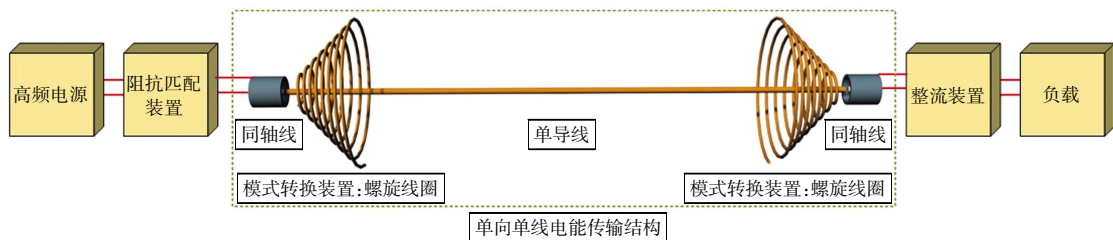


图 2 本文使用的单向单线电能传输系统

Fig.2 One-way SWPT system used in this thesis

2 模型建立

2.1 单线电能传输系统模型

本研究搭建的单向单线电能传输系统结构模型

如图 3 所示。主要包括发射端(同轴线、模式转换装置、电源、完美电导体、阻抗匹配装置)、单导线、接收端(模式转换装置、同轴线、负载、完美电导体)、空气域、完美匹配层等。

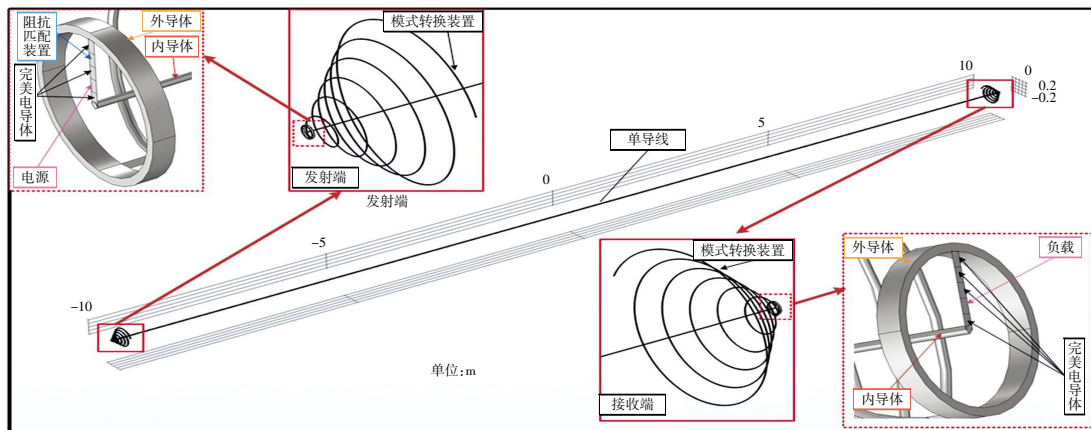


图 3 单向单线电能传输系统仿真模型

Fig.3 Simulation model of one-way SWPT system

2.2 人体模型

通过有限元仿真软件搭建单向单线电能传输系统,选择线圈线长为 10 m 的模式转换装置,模式转换装置的匝间距设置为 10 mm,线圈线径设置为 1 mm,距离设置为 5 m,传输功率设置为 100 W,系统的工作频率设置为 12.69 MHz。人体表面及体内主要器官建模通过 Mimics 软件完成,该软件可将实际人体的 CT 图像转换为仿真中的三维模型,通过格式转换后就可以导入 COMSOL 中。构建的 1.75 m 站立双手上举的男性人体模型如图 4 所示。图 4(a)为人的正面、背面和侧面模型,图 4(b)为人体内的主要器官,分别为大脑、心脏、肝脏、胃部、左肺、右肺、左肾和右肾。

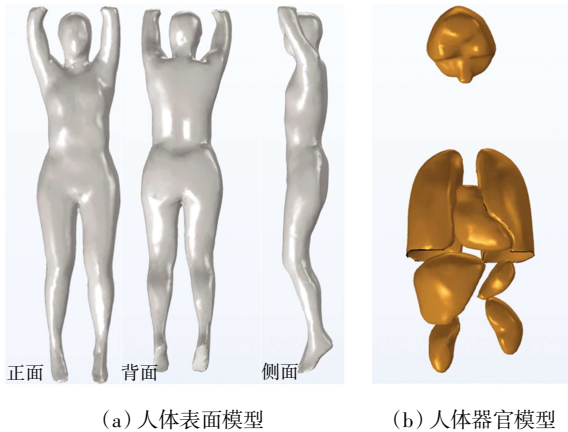


图 4 人体模型搭建

Fig.4 Construction of mannequin

3 仿真分析

3.1 电磁场限值范围

本小节将对系统周围的电场线、磁场线、电场强度、磁场强度进行研究,通过分析电磁场线的疏密程度判断系统发射端、接收端和单导线的电磁场分布情况。研究系统周围的电磁场强度大小,并与国内外标准进行对比,给出系统的电磁场限值范围。根据设置的结构参数,可以得到系统的电场线和磁场线如图 5 所示。

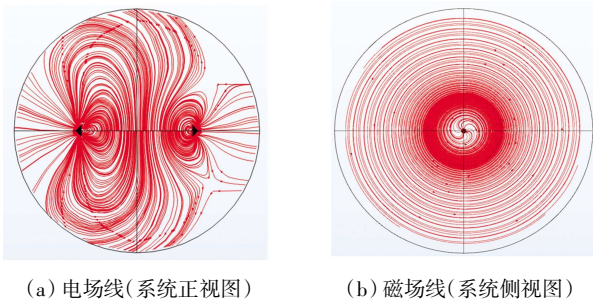


图 5 系统周围电磁场线分布

Fig.5 Electromagnetic field wire distribution around system

由图 5(a)可知:整个空间中,均有电场线的分布;不同位置处的电场线疏密程度不同,在发射端和接收端周围的电场线较为稠密,单导线附近比较零落;远离系统时,电场线由密集逐渐变得稀疏。由图 5(b)可知:空间中都分布着磁场线;不同位置处的磁场线疏密程度不同,与电场线分布情况类似,磁场线在单向单线电能传输系统周围较为密集;距离系统越远,系统的磁场线越稀疏。根据设置的系统结构参数,可以获得系统电磁场强度的分布如图 6 所示。

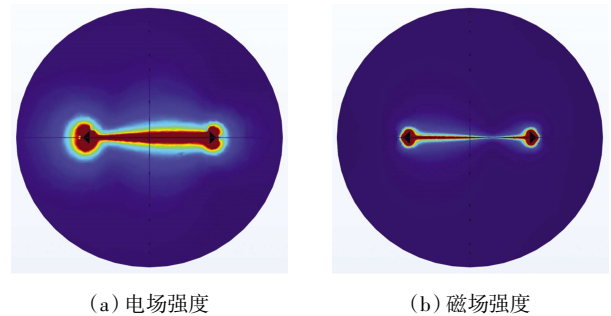


图 6 系统周围电磁场强度分布

Fig.6 Distribution of electromagnetic field intensity around system

由图 6 分析可得,系统的发射端、单线和接收端的电磁场强度不同,发射端和接收端的电磁场强度相对来说较强,单导线周围的电磁场强度相对来说较弱;距离系统越远,系统的电磁场强度越弱,逐渐趋于零。本文根据国内外的电磁场强度限值标准,对比本系统的电磁场强度,给出建议的限值范围。截至目前,国内有关的标准主要有 GB8702-2014,国外有关的标准有 ICNIRP1998^[20]、ICNIRP2010^[21]、IEEE C95.1,考虑到本系统中使用的频率范围,则对应各标准下的电场、磁场强度限值如表 1 所示。

表 1 国内国际标准中的电场、磁场强度限值

Tab.1 Electric field and magnetic field intensity limits in domestic and international standards

导则名称	电场强度 $E/(V \cdot m^{-1})$		磁场强度 $H/(A \cdot m^{-1})$	
	职业	公众	职业	公众
GB8702-2014(3~30 MHz)	$67/f^{1/2}$	$67/f^{1/2}$	$0.17/f^{1/2}$	$0.17/f^{1/2}$
ICNIRP1998(10~30 MHz)	61	28	0.16	0.07
ICNIRP2010(10~23 MHz)	170	83	80	21
IEEE C95.1(3~30 MHz)	$1842/f$	$823.8/f$	$16.3/f$	$16.3/f$

考虑到本系统中使用的频率为 12.69 MHz,则电场、磁场强度具体的数值如表 2 所示。综合对比国内外 4 种不同的标准,可以发现国内标准规定的电场强度和磁场强度限值远低于国外标准,同时也表明国内标准比国外标准更为严格。因此,本文采用国内标准

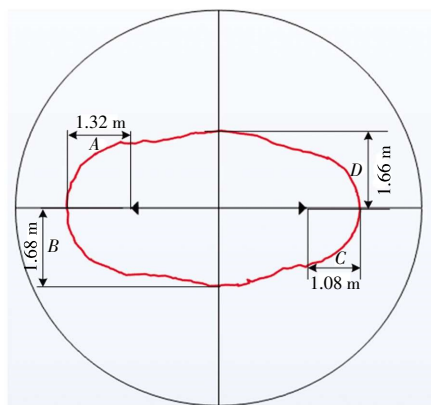
GB8702-2014 下要求的 18.81 V/m 作为电场强度的限值,采用 0.048 A/m 作为磁场强度的限值进行研究。

表 2 电场、磁场强度具体数值

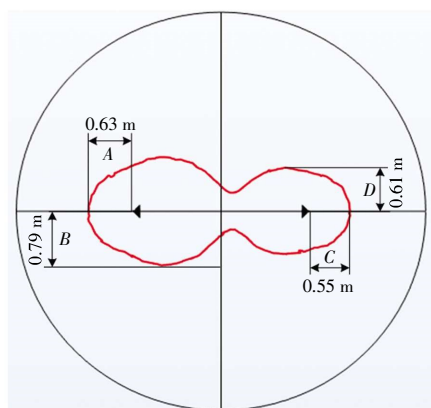
Tab.2 Specific values of electric and magnetic field intensity

导则名称	电场强度 $E/(V \cdot m^{-1})$		磁场强度 $H/(A \cdot m^{-1})$	
	职业	公众	职业	公众
GB8702-2014	18.81	18.81	0.048	0.048
ICNIRP1998	61	28	0.16	0.073
ICNIRP2010	170	83	80	21
IEEE C95.1	145.15	64.917	1.28	1.28

根据电场强度 18.81 V/m、磁场强度 0.048 A/m 的参考值,在有限元仿真软件结果后处理中选择二维绘图组下的等值线选项,得到单向单线电能传输系统的电场强度限值范围和磁场强度限值范围如图 7 所示。



(a) 电场强度限值范围



(b) 磁场强度限值范围

图 7 电磁场强度限值范围

Fig.7 Limit range of electromagnetic field intensity

设置发射端垂直于单线方向的限值距离为 A ,发射端平行于单线方向的限值距离为 B ,接收端垂直于单线方向的限值距离为 C ,接收端平行于单线方向的限值距离为 D 。由图 7 可知,单向单线电能传输系统的电场强度限值距离 A 、 B 、 C 、 D 分别为 1.32、1.68、1.08、1.66 m,磁场强度限值距离 A 、 B 、 C 、 D 分别为 0.63、0.79、

0.55、0.61 m。可见,电场强度的限值距离整体上大于磁场强度的限值距离,电场强度和磁场强度的限值距离都出现了 A 略大于 C 的情况,说明发射端的电磁能量更大,相比于接收端,发射端的电磁场强度更需要警惕。

3.2 体内电场、磁场强度分析

将构建的人体模型导入单向单线电能传输系统,人体以双手上举站立姿势背对于系统。考虑到单线电能传输系统可分为 3 个部分,分别为发射端、单线和接收端;考虑到人体处于不同位置时,所处的电磁环境不同,电磁场强度也会不同。故本文研究人体分别处于 3 个不同位置时,人体内重要器官的电场强度最大值和磁场强度最大值。人体分别处于系统的发射端、单线和接收端的模型如图 8 所示。



图 8 人体处于系统不同位置处的模型

Fig.8 Models of human body at different locations in system

不同的频率下,人体内关键器官的电磁参数不同,本系统使用的频率为 12.69 MHz,由计算所得该频率下器官的电导率、相对介电常数和密度如表 3 所示。

表 3 体内各器官的电磁参数

Tab.3 Electromagnetic parameters of organs in body

器官	电导率/ $(S \cdot m^{-1})$	相对介电常数	相对磁导率	密度/ $(kg \cdot m^{-3})$
大脑	0.245 50	216.56	1	1 030
心脏	0.520 66	249.71	1	1 059
肝脏	0.331 44	189.41	1	1 151
胃部	0.798 70	199.92	1	1 126
肺部	0.448 59	154.83	1	563
肾脏	0.534 51	311.54	1	1 147
全身	1.190 50	105.977	1	1 033.3

将表 3 所示的人体内各个器官的电磁参数代入仿真软件中,进行仿真计算,得到人体内关键器官的电场强度最大值的仿真结果如图 9 所示。

由图 9 可知,在发射端、单线和接收端 3 个位置处,大脑的电场强度分别为 3.05、2.24、2.22 V/m;心脏的电场强度分别为 5.46、2.03、3.47 V/m;肝脏的电场强度分别为 10.61、2.61、5.18 V/m;胃部的电场强度分别为 4.35、1.47、2.38 V/m;左肺的电场强度分别为 8.86、2.29、6.33 V/m;右肺的电场强度分别为 10.51、4.11、7.62 V/m;左肾的电场强度分别为 7.09、1.39、7.24 V/m;右肾的电场强度分别为 7.33、1.67、4.30 V/m。综合对比来看,体内

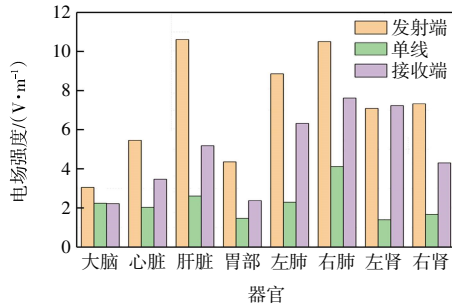


图 9 人体内各器官电场强度最大值

Fig.9 The maximum electric field intensity of each organ in human body

各器官在发射端处承受的电场强度最大,接收端次之,单线处最小。肺部和肝脏处的电场强度明显高于其他器官,脑部的电场强度整体低于其他器官,分析原因,是因为各器官相距系统的直线距离不同而导致该现象的产生。器官表面的电场强度分布如图 10 所示。

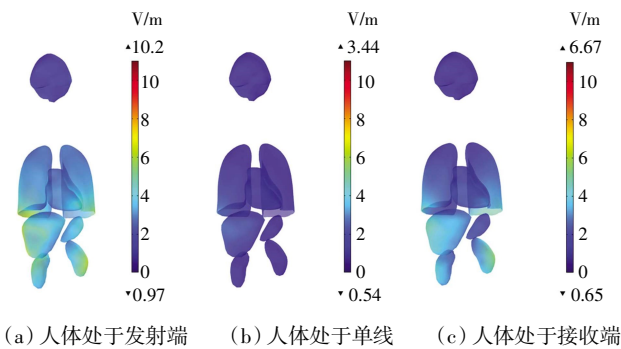


图 10 人体内各器官的电场强度分布

Fig.10 Distribution of electric field intensity of organs in human body

图 10 中颜色代表体内各器官受到系统电场强度的影响程度,蓝色到红色分别表示受到电场强度的影响程度由低到高。由图 10 可知,当人体处于发射端时,系统受到电场强度的影响最大;当人体处于接收端时,系统受到电场强度的影响次之;当人体处于单导线时,系统受到电场强度的影响最小。脑部和肺部的上方区域受到电场强度的影响整体上小于其他器官,产生该现象的原因是系统设置在人体的中心位置,导致各器官距离系统的直线距离不同。因此,该结论对于单向单线电能传输系统的放置位置有一定的指导意义。通过对人体内关键器官的磁场强度最大值进行仿真计算,结果如图 11 所示。

由图 11 可知,在发射端、单线和接收端 3 个位置处,大脑的磁场强度分别为 0.21、0.09、0.15 A/m;心脏的磁场强度分别为 0.42、0.13、0.76 A/m;肝脏的磁场强度分别为 0.84、0.13、0.53 A/m;胃部的磁场强度分别为

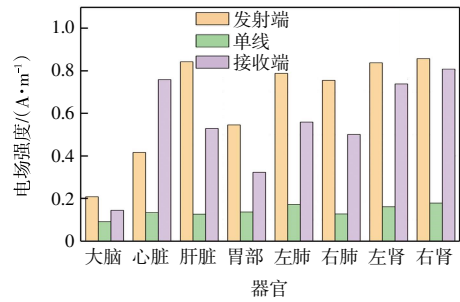


图 11 人体内各器官磁场强度最大值

Fig.11 The maximum magnetic field intensity of each organ in the human body

0.55、0.14、0.32 A/m;左肺的磁场强度分别为 0.79、0.17、0.56 A/m;右肺的磁场强度分别为 0.76、0.13、0.50 A/m;左肾的磁场强度分别为 0.84、0.16、0.74 A/m;右肾的磁场强度分别为 0.86、0.18、0.81 A/m。综合对比来看,体内各器官在发射端处承受的磁场强度最大,接收端次之,单线处最小。肺部和肾部处的磁场强度明显高于其他器官,脑部的磁场强度整体低于其他器官,分析原因,主要是因为各器官距离系统的直线距离不同导致该现象的产生。

3.3 体内电流密度和比吸收率(SAR)值分析

上小节通过对体内电场强度和磁场强度的最大值进行分析,得出了系统不同的位置(发射端、单线和接收端)和不同的直线距离(器官与系统)对人体内关键器官电磁场强度的影响程度不同的结论。体内电流密度和 SAR 值的大小也是电磁场限值标准中的重要指标。人体分别处于 3 个不同位置时,人体内重要器官的电流密度最大值的仿真结果如图 12 所示。

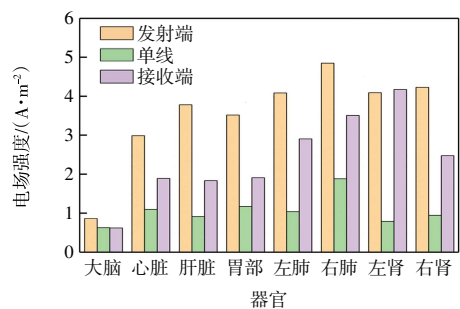


图 12 人体内各器官电流密度最大值

Fig.12 The maximum current density of each organ in human body

由图 12 可知,在发射端、单线和接收端 3 个位置处,大脑的电流密度分别为 0.88、0.65、0.64 A/m²;心脏的电流密度分别为 3.0、1.11、1.91 A/m²;肝脏的电流密度分别为 3.79、0.93、1.85 A/m²;胃部的电流密度分别为 3.53、1.19、1.93 A/m²;左肺的电流密度分别为 4.09、1.06、

2.92 A/m²;右肺的电流密度分别为 4.85、1.90、3.52 A/m²;左肾的电流密度分别为 4.10、0.81、4.18 A/m²;右肾的电流密度分别为 4.23、0.97、2.49 A/m²。分析上述数据可得,当人体处于发射端时,右肺的电流密度最大,大脑的电流密度最小;当人体处于单线时,右肺的电流密度最大,大脑的电流密度最小;当人体处于接收端时,左肾的电流密度最大,右肺的电流密度次之,大脑的电流密度最小。综合对比来看,与系统对人体的电场强度和磁场强度影响的结论类似,即系统的不同位置(发射端、单线和接收端)和不同的直线距离(器官与系统),对体内关键器官的电流密度影响程度不同;体内各器官在发射端处承受的电流密度最大,接收端次之,单线处最小。

通过对人体内关键器官的 SAR 值最大值进行计算,得到的仿真结果如图 13 所示。

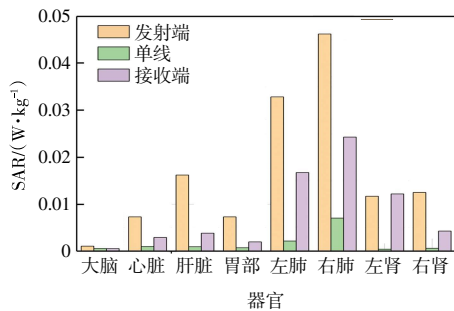


图 13 人体内各器官 SAR 值最大值

Fig.13 The maximum value of SAR for each organ in human body

由图 13 可知,在发射端、单线和接收端 3 个位置处,大脑的 SAR 值分别为 0.001 11、0.000 60、0.000 59 W/kg;心脏的 SAR 值分别为 0.007 33、0.001 01、0.002 96 W/kg;肝脏的 SAR 值分别为 0.016 22、0.000 98、0.003 86 W/kg;胃部的 SAR 值分别为 0.007 33、0.000 76、0.002 00

W/kg;左肺的 SAR 值分别为 0.032 84、0.002 20、0.016 75 W/kg;右肺的 SAR 值分别为 0.046 22、0.007 07、0.024 31 W/kg;左肾的 SAR 值分别为 0.011 71、0.000 45、0.012 20 W/kg;右肾的 SAR 值分别为 0.012 52、0.000 65、0.004 31 W/kg。综合分析上述的数据可得,与系统对体内的电场强度、磁场强度和电流密度影响的结论类似,即系统的不同位置(发射端、单线和接收端)和不同的直线距离(器官与系统),对体内关键器官的电流密度影响程度不同;体内各器官在发射端处的 SAR 值最大,接收端次之,单线处最小。

4 实验验证

本文构建的单向单线电能传输系统如图 14 所示。该系统主要由 3 个部分组成,分别为发射装置、单导线、接收装置。发射装置由信号发生器(Agilent 33522A 30 MHz)、功率放大器(AR 500A250C 10 kHz~250 MHz 500 W)、高精度功率计(Bird 4421 1.5~32 MHz 3 W~10 kW)、阻抗匹配装置(PSGK-II 500 W 2~30 MHz)、同轴线(RG316)、模式转换装置(聚氨酯漆包铜线绕制的螺旋线圈)构成;单导线由聚氨酯漆包铜线构成;接收装置由模式转换装置、同轴线、高精度功率计、衰减器(Bird 8890-300 2 500 W 50 Ω)构成。信号发生器和功率放大器构成的电源端可以为整个系统提供所需的频率和功率,通过调节它们的电压幅值和增益可以实现对系统输出功率的控制。阻抗匹配装置由两个陶瓷真空可调电容器(CKTB1000/3.5/60)和可调电感构成,主要调节系统阻抗;同轴线和螺旋线圈构成的模式转换装置分别起到传递 TEM 波和电磁波模式转换的作用;单导线起到束缚和引导电磁波的作用;功率计用作测量系统的传输功率;衰减器用于消耗系统的能量。

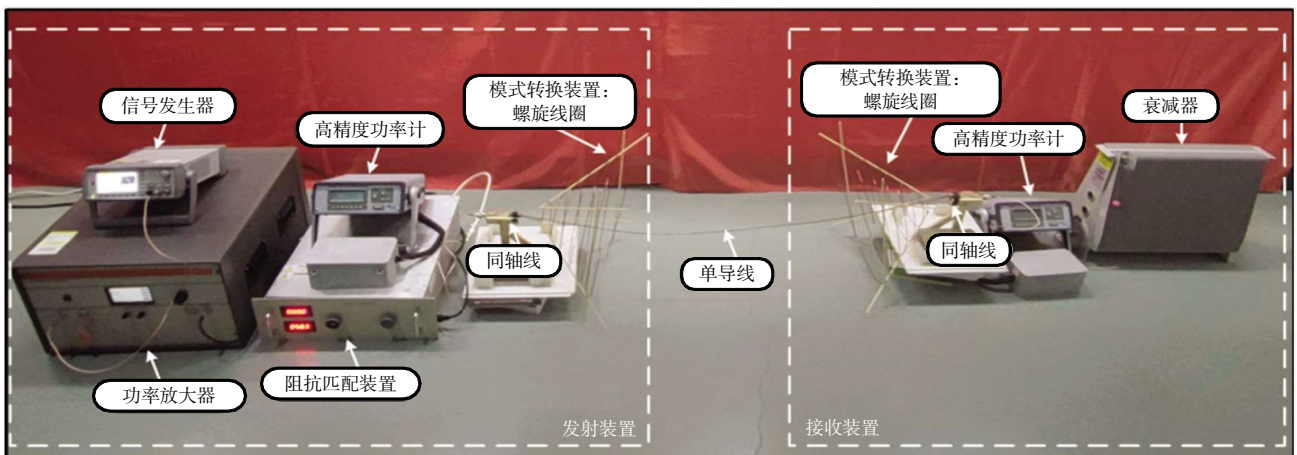


图 14 单向单线电能传输实验系统

Fig.14 Experimental system of one-way SWPT

本文通过实验测量系统周围的电场强度和磁场强度,和国内电磁场限值标准进行对比,给出电磁场强度限值范围,验证仿真的正确性。电磁场强度测试系统图如图15所示。考虑到本系统中使用的频率为12.69 MHz,依据国标下电场强度18.81 V/m、磁场强度0.048 A/m,测量到的系统限值距离如表4所示。

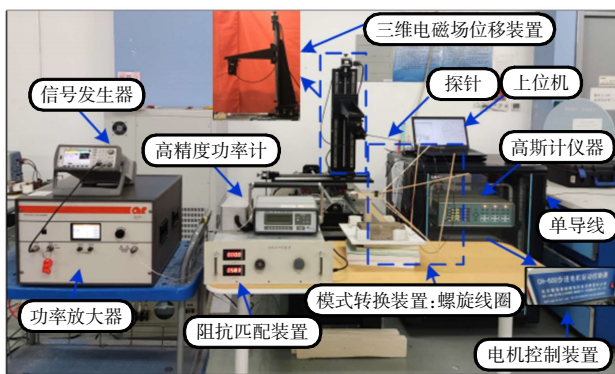


图15 电磁场强度测试现场

Fig.15 Text-site of electromagnetic field intensity

表4 电磁场强度限值距离仿真与实验对比结果

Tab.4 Comparison results between simulation and experiment of electromagnetic field intensity limit distance

距离	电场限值距离/m		磁场限值距离/m	
	仿真	实验	仿真	实验
A	1.32	1.23	0.63	0.58
B	1.68	1.54	0.79	0.73
C	1.08	1.03	0.55	0.51
D	1.66	1.53	0.61	0.55

由表4可知,实验中的电磁场限值距离和仿真结果较为吻合,但整体低于仿真结果。原因可能是相较于仿真环境,实验环境中存在周围金属物品、墙体、人体等的干扰,使得系统周围的电磁环境较为复杂,因此实际应用时,还需预留一定的空间,以保证系统的高效运行和周围生物体的安全。

5 结论

本文针对单向单线电能传输系统的电磁安全性进行了研究,得到的结论如下:

(1) 仿真得到发射端垂直和平行于单线方向的限值距离分别为1.32 m和1.68 m,接收端垂直、平行于单线方向的限值距离分别为1.08 m和1.66 m;实验所得的发射端垂直和平行于单线方向的限值距离分别为1.23 m和1.54 m,接收端垂直、平行于单线方向的限值距离分别为1.03 m和1.54 m。从空间电磁场强度的角度分析可得,不同位置处的电磁场强度不同,发

射端的电磁场强度最大,接收端次之,单线处最小。

(2) 在发射端、单线和接收端3个位置处,右肾的磁场强度最大分别为0.86、0.18、0.81;右肺的电流密度最大分别为4.85、1.90、3.52 A/m²;右肺的SAR值最大分别为0.046 22、0.007 07、0.024 31 W/kg。器官与系统的直线距离不同时,系统对体内关键器官的电磁场强度、电流密度、SAR值最大值影响程度不同。

(3) 仿真与实验所得的电磁场限值距离较为吻合,实验中的电磁场限值距离整体低于仿真结果,分析其原因,可能是相较于仿真环境,实验系统周围复杂的电磁环境对实验产生了一定的影响。

综上,相比于系统的单线处和接收端,系统发射端的电磁安全更需要警惕。通过对单向单线电能传输系统电磁安全性的研究,为该系统的实际应用奠定了基础,并对单向单线电能传输系统的设计提供了指导。

参考文献:

- [1] 陈凯楠,蒋焯,檀添,等. 轨道交通350 kW大功率无线电能传输系统研究[J]. 电工技术学报,2022,37(10): 2411-2421,2445.
CHEN K N, JIANG Y, TAN T, et al. Research on 350 kW high power wireless power transfer system for rail transportation[J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2022, 37(10): 2411-2421, 2445 (in Chinese).
- [2] 周玮,蓝嘉豪,麦瑞坤,等. 无线充电电动汽车V2G模式下光储直流微电网能量管理策略[J]. 电工技术学报,2022,37(1): 82-91.
ZHOU W, LAN J H, MAI R K, et al. Energy management strategy of optical storage DC microgrid in V2G mode for wireless charging electric vehicles[J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2022, 37(1): 82-91 (in Chinese).
- [3] 宫飞翔,魏志强,丛艳平,等. 植入式医疗设备电磁共振无线能量传输系统天线对人体电磁辐射安全影响的研究[J]. 中国生物医学工程学报,2016,35(4): 497-501.
GONG F X, WEI Z Q, CONG Y P, et al. Study on the effect of antenna of electromagnetic resonance wireless power transmission system for implantable medical devices on human electromagnetic radiation safety [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2016, 35(4): 497-501 (in Chinese).
- [4] 周玮阳. 激光无线电能传输系统关键技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018.
ZHOU W Y. Laser wireless power transfer system key technology research [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018 (in Chinese).
- [5] 范兴明,高琳琳,莫小勇,等. 无线电能传输技术的研究现状与应用综述[J]. 电工技术学报,2019,34(7): 1353-1380.
FAN X M, GAO L L, MO X Y, et al. A review of the research status and application of wireless power transfer technology [J].

- Journal of Electrical Engineering Technology, 2019, 34(7): 1353-1380(in Chinese).
- [6] 陈伟华, 宋邑玮, 闫孝姮. 心脏起搏器谐振式无线供能 LCL-LCL 的集成[J]. 电工技术学报, 2022, 37(12): 2924-2935.
CHEN W H, SONG Y W, YAN X H. Integration of resonant wireless power supply LCL-LCL for cardiac pacemakers[J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2022, 37(12): 2924-2935(in Chinese).
- [7] 陈阳, 杨斌, 彭云尔, 等. 感应式无线电能传输系统抗偏移技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023(14): 1-22.
CHEN Y, YANG B, PENG Y E, et al. A review of anti-deflection techniques for inductive wireless power transfer systems[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2023(14): 1-22(in Chinese).
- [8] 麦建伟, 曾宪瑞, 刘治钢, 等. 基于 S/SP 补偿拓扑的强抗偏移感应式无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报, 2023(4): 1525-1536.
MAI J W, ZENG X R, LIU Z G, et al. S/SP compensation topology-based strong offset-resistant inductive wireless power transfer system[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2023(4): 1525-1536(in Chinese).
- [9] 王兆延, 丘东元, 张波, 等. 具有恒功率恒效率输出特性的三线圈 WPT 系统[J]. 中国电机工程学报, 2022(20): 7332-7342.
WANG Z Y, QIU D Y, ZHANG B, et al. Three-coil WPT system with constant power and constant efficiency output characteristics[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2022(20): 7332-7342(in Chinese).
- [10] 杨锐, 孙岩洲, 余江华, 等. 电场耦合式无线电能传输频率分裂特性分析[J]. 电子科技, 2022, 35(6): 48-53.
YANG R, SUN Y Z, YU J H, et al. Analysis of frequency splitting characteristics of electric field coupled wireless power transfer[J]. Electronic Technology, 2022, 35(6): 48-53(in Chinese).
- [11] 于宙, 肖文勋, 张波, 等. 电场耦合式无线电能传输技术的发展现状[J]. 电工技术学报, 2022, 37(5): 1051-1069.
YU Z, XIAO W X, ZHANG B, et al. Current status of development of electric field coupled wireless power transfer technology[J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2022, 37(5): 1051-1069(in Chinese).
- [12] 陈希有, 韩守鹏, 齐琛, 等. 用准静态谐振腔实现自由空间无线电能传输[J]. 电机与控制学报, 2023(3): 69-78.
CHEN X Y, HAN S P, QI C, et al. Freedom spatial wireless power transmission using quasi-static resonant cavity[J]. Electric Machines and Control, 2023(3): 69-78(in Chinese).
- [13] 张泽然, 陈希有, 周宇翔, 等. 单线电能传输的实验研究[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(10): 69-74.
ZHANG Z R, CHEN X Y, ZHOU Y X, et al. Experimental research of single line power transmission[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(10): 69-74.
- [14] JIN X, CHEN X, QI C, et al. Modeling and construction of single-wire power transmission based on multilayer tesla coil[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(5): 6682-6695.
- [15] Д.С. 斯特列勃科夫, 王晓玲. 农村地区单导线输电系统[J]. 农村电气化, 2001(6): 49-51.
Д.С. Strebkov, WANG X L. Single conductor power transfer system in rural areas[J]. Rural Electrification, 2001(6): 49-51(in Chinese).
- [16] 陈希有, 陈建辉, 牟宪民, 等. 空间电场耦合单线电力传输: 仿真、理解与构建[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5749-5758.
CHEN X Y, CHEN J H, MOU X M, et al. Spatial electric field coupled single-wire power transfer: Simulation, understanding and construction[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 37(19): 5749-5758(in Chinese).
- [17] LI Y, WANG R, ZHAI Y J, et al. A novel single-wire power transfer method for wireless sensor networks[J]. Energies, 2020, 13(19): 5182.
- [18] LI Y, ZHAI Y J, LI Y, et al. Single-wire power transfer method and verification[J]. Journal of Power Electronics, 2022, 22(4): 685-693.
- [19] 李阳, 李垚, 王瑞, 等. 无线传感器网络单线电能传输系统的电磁安全性分析[J]. 电工技术学报, 2022, 37(4): 808-815.
LI Y, LI Y, WANG R, et al. Electromagnetic safety analysis of single-wire power transmission system of wireless sensor network[J]. Journal of Electrical Engineering Technology, 2022, 37(4): 808-815(in Chinese).
- [20] HERBERTZ J. Comment on the ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)[J]. Health Physics, 1998, 75(5): 535.
- [21] PROTECION N I R. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)[J]. Health Physics, 2010, 99(6): 818-836.

本文引文格式:

李阳, 胡涛成, 翟宇洁, 等. 单向单线电能传输系统的电磁安全性[J]. 天津工业大学学报, 2024, 43(5): 66-74.

LI Y, HU T C, ZHAI Y J, et al. Electromagnetic safety of one-way single-wire power transfer system[J]. Journal of Tian-gong University, 2024, 43(5): 66-74(in Chinese).