

电场耦合式无线电能传输技术在 航天领域应用前景展望

张剑韬^{1,2}, 姚舜禹^{1,2}, 潘靓逸¹, 别致^{1,2}, 高瞻¹, 刘滢¹, 朱春波¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001; 2. 哈尔滨工业大学 郑州研究院, 郑州 450003)

摘要:将无线电能传输技术引入航天器的旋转供电中是推动航天器进一步发展的的重要手段。而现有应用最广的磁耦合式无线电能传输技术(inductive power transfer, IPT)因成本高、重量大、存在涡流损耗等缺陷而难以在航天领域中得到大规模应用。而电场耦合式无线电能传输技术(capacitive power transfer, CPT)以其成本低、重量轻等优点,近年来受到广泛关注,在航天领域具有巨大潜力。从传统IPT技术在航天领域应用的缺陷入手,分析将CPT技术引入航天领域无线供电场景的重要性。进而介绍了CPT技术的发展历程与基本原理,并对CPT技术在轻量化、大功率、旋转型三个领域的研究现状进行综述来论证其在航天领域应用的潜力。最后总结了CPT技术在航天领域应用存在的问题并分析了解决这些问题可行的技术手段。

关键词:电场耦合;无线电能传输;旋转供电;轻量化设计

中图分类号:V443;TN253

文献标志码:A

文章编号:1674-7135(2024)03-0001-10

Prospects of capacitive power transfer technology in aerospace applications

ZHANG Jiantao^{1,2}, YAO Shunyu^{1,2}, PAN Liangyi¹, BIE Zhi^{1,2}, GAO Zhan¹, LIU Ying¹, ZHU Chunbo¹

(1. School of Electric Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Zhengzhou Research Institute, Harbin Institute of Technology, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The application of wireless power transfer technology to the rotating power transfer of spacecraft is an important technique to promote the further development of spacecraft. The most widely used conventional inductive power transfer (IPT) technology is challenging to apply in spacecraft on a large scale due to its high cost, high weight, eddy current loss, and other shortcomings. The capacitive power transfer (CPT) technology, with its advantages of low cost and lightweight, has received wide attention in recent years and has excellent potential in the aerospace field. This paper begins with the shortcomings of conventional IPT technology in aerospace applications and analyzes the importance of applying CPT technology to wireless power transfer scenarios in the aerospace field. Then, the development history and basic principles of CPT technology are introduced, and the current research status of CPT technology in lightweight, high power, and rotating types are reviewed to demonstrate its potential application in the aerospace field. Finally, this paper summarizes the problems in applying CPT technology in aerospace and analyzes the possible technical means to solve these problems.

Key words: electric field coupling; wireless power transfer; rotary power supply; lightweight design

收稿日期:2023-12-01; 修回日期:2024-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:52107002);民用航天技术预先研究项目(编号:JZKJ20200009);国家资助博士后研究人员计划(编号:GZC20233438)

引用格式:张剑韬,姚舜禹,潘靓逸,等. 电场耦合式无线电能传输技术在航天领域应用前景展望[J]. 空间电子技术, 2024, 21(3): 1-10. ZHANG J T, YAO S Y, PAN L Y, et al. Prospects of capacitive power transfer technology in aerospace applications[J]. Space Electronic Technology, 2024, 21(3): 1-10.

0 引言

发展载人航天、月球与深空探测、应用卫星和空间科学是我国航天强国的国家级战略政策,航天器的安全可靠是最为重要的指标要求^[1-2]。

目前,绝大多数航天器均采用太阳能电池阵和蓄电池组电源系统。由于卫星在轨道上位置的变化和卫星自旋等原因,太阳能电池阵无法始终正对太阳,为了最大效率的利用太阳能,需要一种对日跟踪驱动装置控制太阳能电池阵的转动,使其始终正对太阳照射的方向,这种驱动装置叫做太阳能电池阵驱动装置(solar array drive assembly, SADA)。SADA 的另一个作用是将太阳能电池阵收集的能量通过滑环传到航天器内。目前,机械传导式滑环是航天器供电能量传导系统应用最广泛的一种旋转型机械式电能传导关键部件^[3-4]。

在实际在轨运行过程中,SADA 需要承受空间环境高低温($-100^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$)、高真空以及周期性振动($20\text{ mG} \sim 30\text{ mG}$, 100 Hz)、冲击等环境影响。同时,导电环工作中存在磨屑,该磨屑在无重力的情况下到处飞散,容易导致电气部件间的绝缘性能下降甚至引起短路等问题。如图 1 所示为 SADA 发生磨损、腐蚀情况^[5-7]。

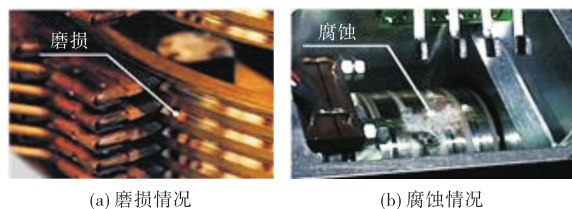


图 1 SADA 发生磨损、腐蚀情况

Fig. 1 SADA is subject to attrition and corrosion

因此,研究具有更高可靠性的能量传输方式,对未来卫星在轨寿命延长具有十分重要的意义。

无线电能传输技术凭借其非接触供电的优势,得以从根本上解决滑环供电方式中存在的环间短路、静电放电等问题,进而提高设备供电单元的可靠性^[8-9]。同时有效降低供电单元总体重量,实现轻量化设计。随着该技术的发展与在电动汽车和家电等领域的广泛应用,近年得到航天领域的高度重视。

近年来,各国学者针对卫星太阳能供电滑环问题,进行了磁耦合式(inductive power transfer, IPT)无线供电技术的研究,获得一些成果^[10-12]。但也发现,在航天应用领域 IPT 系统在功率密度和电磁干

扰(electromagnetic interference, EMI)等问题上受到制约,如变化的磁场感应涡流,导致功率损失;传能磁场易辐射到无线电能传输(wireless power transmission, WPT)系统外部,增加了 EMI 问题;IPT 通常需要绞合线来减少趋肤效应,并需要铁氧体来引导磁场,增加了系统的重量与成本。

而同样作为近场无线电能传输技术的电场耦合式无线电能传输技术(capacitive power transfer, CPT)具有抗电磁干扰性强、体积小、重量轻、利于小型化和散热设计的优点。随着新一代宽禁带半导体技术的发展,MHz 级驱动技术已成功在 CPT 领域得到应用。伴随着 CPT 技术在谐振补偿网络、能量传输机理等领域研究的深入,CPT 技术的功率等级已经提升至 $3\text{ kW} \sim 5\text{ kW}$,其效率也提升至 90% 以上。对于航天领域所要求的大功率、高效率、低重量、高可靠性、高安全性等需求,CPT 技术存在着巨大潜力^[13-14]。

本文系统分析了基于 IPT 技术的无线供电滑环在航天领域应用中存在的缺点,并介绍了 CPT 技术的发展历程与基本原理。针对航天场景对无线供电系统所需求的轻量化、大功率特性以及旋转供电要求,文章介绍了在这些领域下 CPT 技术的研究现状,因而论证了 CPT 技术在航天领域存在着巨大的应用潜力。值得一提的是,目前尚无 CPT 技术在航天领域应用的实例。为此,本文分析了当前 CPT 技术存在的挑战,并提出了应对这些挑战现存的可行技术手段。

1 传统 IPT 技术在航天无线供电滑环领域应用的缺陷

将无线电能传输技术应用于航天器领域尚属于起步阶段,自 2007 年美国针对分离模块航天器开展 F6 计划,开启在航天领域将无线电能传输应用于航天器方向的研究。目前国外研究机构包括美国 NASA、英国 SEA 公司等,国内研究机构包括重庆大学、南京航空航天大学 and 哈尔滨工业大学等。

尽管基于 IPT 技术的无线供电滑环在一定程度上克服了传统有线滑环的缺陷。但受制于 IPT 技术自身特性,在实际应用中,基于 IPT 技术的无线滑环存在着成本高、重量大、电磁干扰强等缺陷。而 CPT 技术凭借自身优势可有效克服 IPT 技术存在的缺

陷。CPT 技术相比于 IPT 技术的优势对比如表 1 所列。

表 1 CPT 技术与 IPT 技术的优势对比

Tab.1 Comparison of advantages of CPT technology over IPT technology

比较内容	IPT 技术	CPT 技术
耦合机构自身成本问题 ^[15]	为降低高频损耗,IPT 系统耦合机构线圈主要材料为利兹线,增加了系统成本与重量	耦合机构可采用重量轻薄、成本低廉的金属箔片制成。耦合机构的成本远低于 IPT 系统的耦合机构
耦合机构自身重量问题 ^[16]	IPT 系统往往需要铁氧体来引导,铁氧体成本高、重量大、易碎。同时,铁氧体的巨大高频损耗致使 IPT 系统无法工作在兆赫兹级高频场景。	CPT 系统无需磁芯,可进一步降低系统的重量。且 CPT 系统可工作在高频电源下。系统电路频率的升高也可降低系统元器件的体积。
金属环境问题 ^[17]	IPT 系统不具备穿越金属的特性,且存在漏磁场问题。而航天器的外表面存在着较多的金属结构,漏磁场会在周围环境中的金属中产生较大的涡流损耗,致使其发热诱发火灾等风险。	CPT 系统不存在漏磁场,且电场具备一定的穿透金属的性能,可在金属环境中进行相对稳定的能量传输。
耦合机构产热问题	IPT 系统在长期工作状态下,耦合线圈会因高频损耗而产生热量。而航天器实际工作的外太空环境中,由于缺少空气对流,因此耦合机构需要额外的散热机构才能进行有效散热,增加了系统成本与复杂性	低间隙下 CPT 系统耦合机构寄生电阻小,由于 CPT 谐振补偿网络的电压泵升的作用,耦合机构处的电压应力大,在同等条件下(相同功率下),流过耦合机构的电流较小,致使产生的热量损耗降低。

2 CPT 技术发展历程与原理

2.1 CPT 技术发展历程

该技术最早源于美国科学家尼古拉特斯拉的早期理论与实验,但受电子器件发展水平的限制,CPT 技术在当时并未引起关注^[18-19]。在此后的一百多年时间里,多国科学家纷纷针对 CPT 技术做出了相关研究,但受整体科技水平的限制,这些研究也仅仅停留在理论验证与实验阶段,并未最终大规模应用。直至 2008 年,奥克兰大学的呼爱国教授成功将 CPT 技术应用在了小型足球机器人的无线充电上^[20],使 CPT 技术得到了正式的实际应用。但此时 CPT 的应用仅集中在小功率领域。直至 2015 年,美国威斯康星大学麦迪逊分校的研究团队成功的将 CPT 技术应用到了大功率电动汽车充电领域,证实了 CPT 技术可应用在大功率领域^[21-22]。此后,CPT 技术被重新拉回大众视野,并在多个领域取得巨大发展^[23-25]。

2.2 CPT 技术基本原理

CPT 技术利用高频电场来传递能量的非接触式传递。与传统 IPT 技术利用磁场这一闭合场不同,CPT 技术能量传输过程中所利用的电场为非闭合场。典型 CPT 系统结构如图 2 所示,系统工作时,直流电源经过逆变器转换为高频交流电,并通过原边谐振补偿网络流入耦合机构,在高频高压交流电的作用下,耦合机构的原副边的耦合极板等效成一

组平板电容,同时两者之间形成交互的电场,从而产生“位移电流”,使能量从耦合机构原边极板传输到耦合机构的副边极板,从而使能量实现非接触的传输^[26-28]。在传输至能量接收端后,高频的交流电流经副边谐振补偿网络与整流电路,变换为直流电从而供给负载使用。

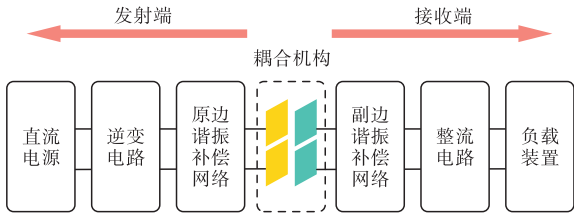


图 2 CPT 系统结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of CPT system structure

典型 CPT 系统能量传输拓扑简化图如图 3 所示^[29],其中 U_{in} 与 U_o 分别是输入输出电压, U_1 与 U_2 分别是耦合机构原副边电压, C_s 为耦合机构等效耦合电容, I_s 为流过耦合机构的电流。

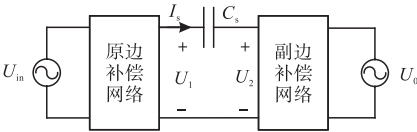


图 3 CPT 系统功率传输简化图

Fig.3 Simplified power transmission diagram of CPT system

令 φ_{21} 为原副边电压 U_1 、 U_2 的相位差,则耦合机

构的传输功率如式(1)所列。

$$P = \omega C_s U_1 U_2 \sin \varphi_{21} \quad (1)$$

因此,在 CPT 系统中,能量传输功率与耦合机构等效耦合电容值成正比。即在相同条件下,耦合机构电容值越大,CPT 系统所传输的功率越高^[29]。

在忽略电场边缘效应时,CPT 系统耦合机构等效电容值 C_s ,与耦合机构正对面积 S 、耦合机构极板间介质相对介电常数 ε_r 成正比,与耦合机构极板间距离 d 成反比,如式(2)所列。

$$C_s = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{d} \quad (2)$$

式(2)中 ε_0 为真空的介电常数。

3 CPT 技术研究现状及其在航天领域应用潜力

3.1 CPT 技术在满足航天领域实际需求的相关技术研究现状

尽管目前尚无 CPT 技术在航天领域应用的实例,但随着 CPT 技术在多个领域的发展,针对航天领域所需求的轻量化、大功率、旋转型等特性,CPT 已在这些领域取得了丰富的研究成果。

3.1.1 轻量化研究

为节省运载成本,航天滑环的设计需力求轻量化。由于 CPT 系统耦合机构的厚度对能量传输的影响较小,因此 CPT 系统的耦合机构可以用轻质的铜箔替代,进而使系统耦合机构的整体重量降低,便于进行轻量化设计。较为突出的实例是 CPT 技术已在

植入式医疗与无人机的无线供电场景中取得了应用。

在无人机无线供电领域,2020 年韩国科学院研究团队对无人机的耦合机构进行轻量化处理,发射端采用外半径 236 mm、内半径 190 mm 的圆环,接收端采用半径 140 mm 的圆盘,发射端与接收端的厚度仅 1 mm,极大降低了系统的重量^[30];2023 年哈尔滨工业大学研究团队提出一种轻量化特性的电场耦合式无人机无线电能传输系统。该系统发射极板采用 0.5 mm 厚的铜板制成,接收极板采用 0.1 mm 厚的铜箔制成,两只接收极板共重 26.6 g,重量几乎可以忽略^[31]。

在植入式医疗领域,2013 年新加坡国立大学研究团队提出一种应用于经皮电动医疗植入设备的无线供电系统,该系统耦合机构尺寸仅 20 mm × 19 mm^[32];2015 年西安理工大学研究团队提出一种应用于心脏起搏器的 CPT 植入式医疗装置,该装置的每个耦合极板面积仅为 18 mm²^[33];2018 年凯斯西储大学研究团队提出一种可集成于 PCB 板中的耦合机构,该耦合机构包括两种尺寸,分别为直径 25.4 mm 的圆形极板和长度 27.6 mm 的方形极板^[34]。

3.1.2 大功率设计

现有的部分航天器接触式导电滑环的功率等级大都在千瓦级。而随着 CPT 技术理论研究的深入以及功率变换器件的蓬勃发展,不同技术路线的千瓦级的大功率 CPT 技术也相继问世。关于千瓦级大功率 CPT 技术的研究可分为增加耦合电容、采用高性能谐振补偿网络、并联输入与零无功功率循环几种技术路线,如表 2 所列。

表 2 大功率 CPT 技术研究现状与技术路线

Tab. 2 Research status and technical route of high-power CPT technology

时间	机构	功率	效率	技术路线	参考文献
2015	威斯康星大学麦迪逊分校	100 W	83%	提高耦合电容值	[21 - 22]
2015	圣地亚哥州立大学	2.4 kW	90.8%	采用高性能谐振补偿网络	[35]
2019	西南交通大学	1.47 kW	90.63%	并联输入	[36]
2023	德雷塞尔大学	3.55 kW	94.2%	零无功功率循环	[37]

3.1.3 旋转供电场景应用

(1) 旋转型耦合机构构型

针对航天器供电滑环的旋转供电场景,世界各国学者纷纷针对旋转 CPT 供电开展了一系列研究。

在旋转型耦合机构构型领域,目前主要的旋转耦合机构可分为圆盘式耦合机构、平行式圆筒式耦合机构与嵌入式圆筒耦合机构三大类。其形态与优缺点比较如表 3 所列。

(2) 具备特殊性能的改进型旋转耦合机构

在具备特殊性能的旋转 CPT 领域,现具有特殊性能的旋转 CPT 耦合机构主要围绕高功率密度、集成化与强抗偏移性能等热点进行研究。

2014 年,美国威斯康星大学麦迪逊分校 Ludois 教授研究团队^[42]针对传统圆盘式耦合机构功率密度低的问题,提出一种叠层圆盘结构,如图 4 所示。该结构通过将不同的发射-接收组合进行连接,从而可以在有限空间内,充分利用圆盘间的气隙来形成电容通路,在同等体积下可产生更大的耦合电容。

表 3 旋转型 CPT 耦合机构优缺点比较

名称	示意图	优点	缺点	参考文献
圆盘式耦合机构		系统体积小、重量轻、便于集成设计	电场耗散大、极板利用率低	[38-39]
圆筒式耦合机构		机械强度大、电场耗散低	体积大、重量大,不便于集成	[38,40]
重叠式圆筒耦合机构		电场耗散低、系统体积小	对绝缘提出了更高的要求,系统结构复杂	[41]

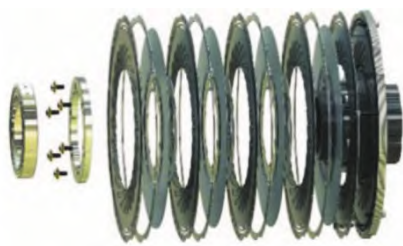


图 4 并联式夹心圆盘结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of stacked circular disk structure

2019 年,美国威斯康星大学麦迪逊分校 Ludois 教授研究团队针对 CPT 系统集成化的问题,提出一种 PCB 式耦合机构,将系统的耦合极板与整流装置集成到一片印刷电路板中,以 93% 的效率将 600W 功率传输至 55kW 绕励磁同步电机的转子磁场,如图 5 所示。集成后的装置体积小、重量轻、成本低,同时电场耗散也被大幅度减小^[43]。

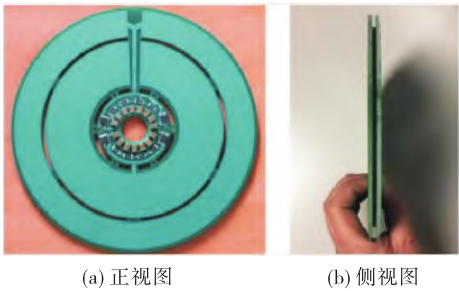


图 5 PCB 式圆盘结构图

Fig.5 Structure of PCB type circular disk

2022 年,上海科技大学傅旻帆教授研究团队针对传统的圆盘式耦合机构存在的抗偏移性差的问题,提出了一种叠层式新型圆盘式耦合机构,通过对圆盘尺寸的重新设计,使耦合机构在一定程度的偏移下可以保持耦合电容的恒定不变,从而具备了一定的抗偏移性^[44],如图 6 所示。

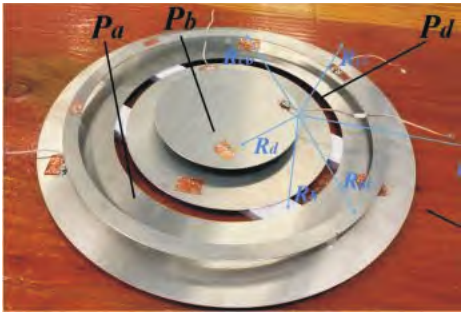


图 6 具有抗偏移性能的圆盘耦合机构

Fig.6 Circular disk coupling mechanism with anti-offset performance

3.2 CPT 技术在航天领域潜力分析

由上文可知,CPT 技术凭借自身特性,在轻量化、大功率与旋转供电这三个领域存在一定的优势,基本符合航天场景旋转供电的需求。传统的接触式滑环供电与 IPT 式无线滑环供电相比,CPT 式滑环供电技术的优劣如表 4 所列。

总体而言,在成本方面 CPT 技术的耦合机构可采用成本低廉的铜筒或铝筒组成。而传统接触式

滑环的摩擦接触点通常采用贵金属与稀有元素制成,造价高昂,工艺复杂^[45]。而 IPT 无线供电技术耦合线圈采用成本较高的利兹线构成,成本也高于 CPT 技术;在重量方面,CPT 技术的耦合机构可采用质地轻薄的圆筒。而传统接触式滑环采用了大量贵金属致使其重量大。而 IPT 技术的耦合线圈中往往需要安装重量较大的磁芯,因此其重量也高于 CPT 技术;在可靠性方面,由于 CPT 与 IPT 技术均为非接触式供电,因此不存在机械磨损问题,可靠性相对较高。而传统的接触式滑环由于接触点的摩擦,存在机械磨损问题,因磨损产生的金属磨屑漂浮也会对设备造成二次伤害,因此其可靠性相对较低。

表 4 不同供电方式特性对比

Tab. 4 Comparison of characteristics of different power transfer modes

比较内容	接触式滑环	IPT 式滑环	CPT 式滑环
成本	高	较高	低
重量	大	较大	轻
可靠性	存在磨损、腐蚀、电压击穿等风险	非接触式,可靠性高	非接触式,可靠性高

综上,基于 CPT 技术的旋转供电滑环与传统的旋转供电方式相比,在成本、重量、可靠性方面有着突出优势,在航天领域的旋转供电场景中存在着巨大的潜力。

3.3 基于 CPT 技术的航天场景旋转供电滑环设计

基于 CPT 技术的航天场景旋转供电滑环设计方案,如图 7 所示。其中,旋转轴连接旋转工作的航天器太阳能帆板与成静止状态的航天器本体。航天器太阳能帆板产生电能,通过旋转轴内部的导线传输至能量发射极板。能量发射极板与能量接收极板均通过连接装置与航天器旋转轴相连。在能量传输过程中,旋转状态的能量发射极板 P1 将电能以非接触的方式传输至能量接收极板 P3,流经负载后,再通过能量接收极板 P4 将能量回流至能量发射极板 P2,从而完成能量传输过程。

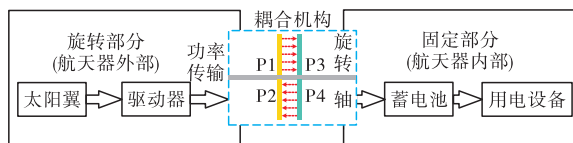


图 7 基于 CPT 技术的航天场景旋转供电滑环设计方案

Fig. 7 Design scheme of rotating power supply slip ring in space scene based on CPT technology

旋转型耦合机构可大致分为圆盘式耦合机构与圆筒式耦合机构两大类。

在尺寸特性角度,圆筒式耦合机构具有较高的轴向尺寸,而径向尺寸较小;反之,圆盘式耦合机构具有较高的径向尺寸而轴向尺寸较小。两种耦合机构的尺寸特性比较如图 8 所示。

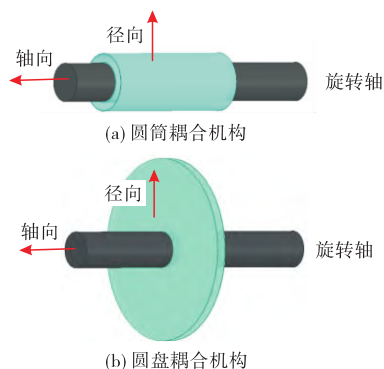


图 8 两种耦合机构的尺寸特性比较

Fig. 8 Comparison of dimensional characteristics of two coupling mechanisms

在机械强度角度,由于圆筒式耦合机构外径自身形成了拱形结构,因此同等条件下机械强度强于圆盘式耦合机构。在施加外力时,圆筒式耦合机构更能保持自身结构的稳定性。两种耦合机构的受力方向如图 9 所示。

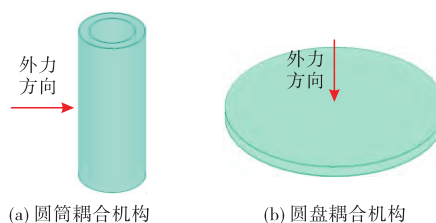


图 9 两种耦合机构受力方向示意图

Fig. 9 Schematic diagram of stress direction of two coupling mechanisms

在电场耗散角度,图 10 所示为两种耦合机构的电场沿面分布图,图 10(c)(d)为两种耦合机构的电场强度沿线分布图,由于圆筒式耦合机构外围客观上形成了一定程度的包围,因此对电场存在一定程度的屏蔽,由图 10(c)所示圆筒式耦合机构的电场沿线分布图中,耦合机构外围电场远远低于耦合机构内部电场,证明电场被耦合机构自身所屏蔽。故圆筒式耦合机构的电场耗散小于圆盘式耦合机构。

在实际使用的过程中,需要针对不同的使用场景,合理选择相应的耦合机构,从而进行基于 CPT

技术的可用于航天场景的旋转供电滑环设计。

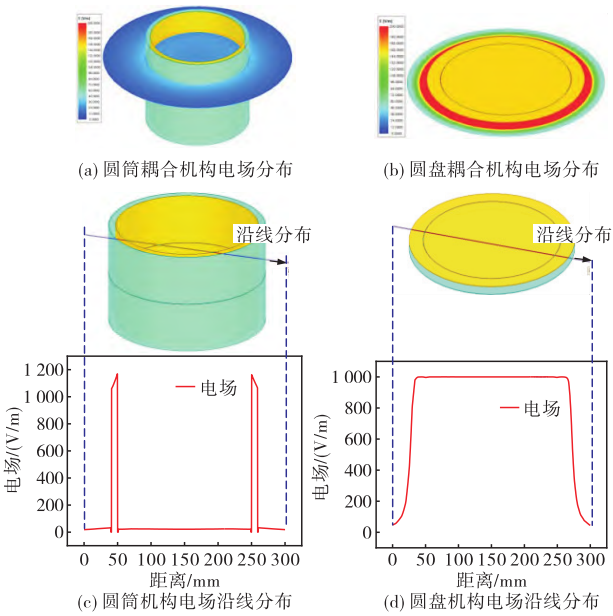


图 10 两种耦合机构电场分布对比

Fig. 10 Comparison of electric field distribution of two coupling mechanisms

4 CPT 技术在航天领域实际应用现存的问题

尽管 CPT 技术在航天环境中存在着巨大的应用潜力,但就实际应用而言,其仍存在着诸多问题。其中较为突出的为高电压问题以及电场耗散问题。

4.1 高电压问题

由于 CPT 系统谐振拓扑对极板电压的泵升作用,导致 CPT 耦合极板间的电压以及部分谐振补偿元器件电压常常存在着极高的电压应力^[46-47]。

高电压带来的危害主要包括三个层面,其一是耦合极板处的高电压会在载人航天器航天员出舱任务时带来高电压击穿事故风险;其二是耦合机构与谐振元件处的高电压会对周围金属部件产生感应高电压,造成航天器的金属器件的损坏;其三是系统中元器件过高的电压将严重降低元器件的使用寿命甚至直接造成元器件的击穿。由于外太空环境难以对元器件进行及时更换,因此谐振元件的高压问题将直接影响供电系统的可靠性能。

针对极板与元件自身的高电压应力问题,最常用的是采用绝缘层的方案,在耦合极板与高压谐振原件周围附加绝缘层,常见的绝缘材料如表 5 所列。

表 5 常见的绝缘材料及其参数

Tab. 5 The common insulation materials and their parameters

材料	ρ_v 体积电阻率/ ($\Omega \cdot m$)	击穿强度/ (MV/m)
高密度聚乙烯	10^{14}	26 ~ 28
聚丙烯	$> 10^{14}$	30
聚苯乙烯	10^{14}	24
聚氯乙烯	$10^{12} \sim 10^{15}$	15 ~ 25
尼龙 6	$10^{12} \sim 10^{15}$	22
尼龙 66	10^{12}	15 ~ 19
聚碳酸酯	10^{14}	17 ~ 22
聚四氟乙烯	10^{16}	25 ~ 40
聚砒	10^{14}	16 ~ 20
丁苯橡胶	10^{13}	20

针对感应高电压问题,西南交通大学麦瑞坤团队^[48]提出了一种针对电动汽车车壳电压的电压优化方法。将大地、车壳、耦合机构之间的电容关系简化为三电容模型,并分析频率与车壳安全电压的关系,对谐振元件参数进行优化设计。在保持输出功率 1.3 kW 的条件下,将耦合机构外围的车壳电压降至 3.88 V。

针对谐振元件高电压问题,为了避免谐振元件产生电击穿事故,延长谐振元件使用寿命,西南交通大学麦瑞坤团队提出一种无源谐振元件电压优化方法。通过分析各谐振元件电压应力与元件参数的关系,进而合理配置无源谐振元件参数,降低谐振元件所承受的最大电压。在输出电压等级不变的条件下,将补偿电容电压降低了 17%,将谐振电感电压降低了 15%^[49]。

4.2 电场耗散问题

CPT 系统在能量传输的过程中,能量发射端的电场能量除了流向能量接收端外,还有一部分将泄漏到外界环境中,形成电场耗散。这部分耗散至外界环境中的电场将对周围环境中的电子设备或执行出舱任务的航天员造成损伤。

降低电场耗散可采用低间隙充电方案、增加屏蔽层、调节耦合极板面积三种方案。

采用低间隙充电方案指尽最大限度降低能量传输的距离,如图 11 所示。随着能量传输距离降低,能量传输过程中电场的耗散程度也会随之降低^[50-52]。该方案的优点为无需外界任何附加装置即可降低电场耗散,但在实际使用中,能量传输距

离往往受多方因素限制,往往不能对其距离进行缩小,因此该方案的实际使用场景有限。

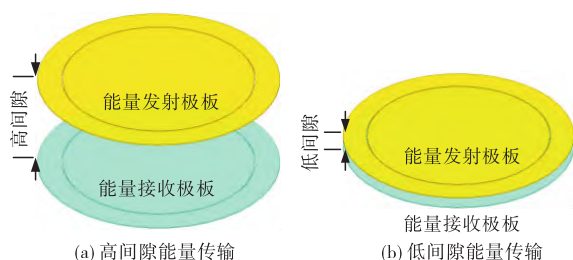


图 11 低间隙充电方案示意图

Fig. 11 Schematic diagram of low-gap charging scheme

增加屏蔽层方案指在耦合机构能量耗散侧增加金属屏蔽层以屏蔽掉耗散到外界环境中的能量,进而形成六极板结构^[46],如图 12 所示。对于屏蔽层材料,美国国际大学孟加拉国研究团队比较了相同厚度下单一金属材料 and 复合金属材料屏蔽性能,在 1.5 mm 厚度下,铜-铝-铜复合材料极板屏蔽作用下的最高电场强度仅为纯铝极板屏蔽作用下最高电场强度的 54%^[53]。增加屏蔽层方案的优点为布置简单,对使用条件要求较为宽松。但需要附加额外金属板作为屏蔽层,增加了系统成本与厚度;此外,屏蔽极板的引入带来了寄生电容问题,需要对其进行解耦分析。

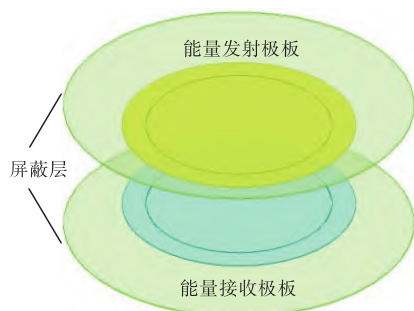


图 12 屏蔽层方案示意图

Fig. 12 Schematic diagram of shielding scheme

调节耦合极板面积指通过降一端面积,使另一端极板外侧形成电场屏蔽的效果,进而降低电场耗散^[54],如图 13 所示。这种方案使用条件简单,无需增加额外设备。但由于降低了极板耦合面积,等效耦合电容会进一步降低,给大功率能量传输带来挑战。

综上所述,在今后的基于 CPT 技术的航天场景旋转供电滑环设计过程中,需要在现有的 CPT 技术的基础上通过不同的技术手段,克服现有的 CPT 技术在安全性与对外辐射等领域存在的缺陷,进而使 CPT 技术更好的应用于航天场景。

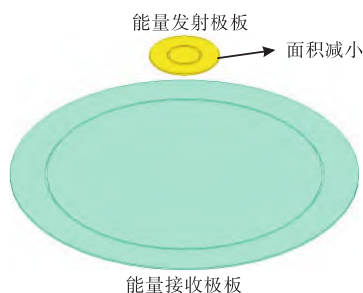


图 13 调整极板面积方案示意图

Fig. 13 Schematic diagram of adjusting the polar plate area scheme

5 结论

本文系统分析了现有的接触式航天供电滑环的缺陷以及基于 IPT 技术的无线供电滑环的不足。并通过介绍 CPT 技术的特性来论证 CPT 技术在航天领域的应用潜力。最后,列举了当前 CPT 技术所面临的困难以及解决这些困难可采用的技术手段。主要结论如下。

- 1) 现有的接触式供电滑环存在着磨损、腐蚀等问题,而基于 IPT 技术的无线供电滑环又存在着重量大、成本高、产热大等问题;
- 2) CPT 技术凭借自身特性,在轻量化、大功率与旋转场景已取得一定的研究成果,基于 CPT 技术的旋转供电滑环可有效解决航天器的旋转供电难题;

- 3) 现有的 CPT 技术在高电压以及电场耗散方面仍存在缺陷,需要结合多重技术手段进行攻克。

总体而言,CPT 技术是当前航天器无线供电的重要解决手段,将基于 CPT 技术的旋转供电滑环应用于航天场景中,对提升航天器寿命与可靠性有着重要意义。需要针对 CPT 技术现存的高电压问题以及电场耗散问题进行针对性攻关,使 CPT 技术早日在航天器中实现应用。

参考文献:

- [1] 马季军,何小斌,涂淳. 我国载人航天电源系统的技术发展成就及趋势[J]. 上海航天(中英文),2021,38(3):207-218.
- [2] 许薇,鄢婉娟,黄洪昌. 商业航天电源系统发展现状和展望[J]. 国际太空,2023(6):58-61.
- [3] 龚浙安. 卫星太阳翼驱动机构可靠性建模与分析[D]. 成都:电子科技大学,2013:1-5.
- [4] 李彦锋,黄洪钟,黄意贤. 太阳翼驱动机构的故障模式影响分析与时变可靠性研究[J]. 机械工程学报,2020,56(5):108-115.

- [5] 石磊. 太阳翼驱动机构的可靠性分析[D]. 成都:电子科技大学,2011:1-5.
- [6] 黄洪钟,李彦锋,孙健,等. 太阳翼驱动机构的模糊动态故障树分析[J]. 机械工程学报,2013,49(19):70-76.
- [7] 黄意贤. 航天器太阳翼驱动机构的时变可靠性研究[D]. 成都:电子科技大学,2018:1-6.
- [8] 马冰卿. 应用于旋转设备的无线供电技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2018:1-9.
- [9] 乔永康. 高功率密度旋转型无线电能传输关键技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022:1-5.
- [10] ZHENG L R, ZHANG J T, BIE Z, et al. A bidirectional wireless power transfer system for spacecraft docking mechanism[C]//2022 IEEE 2nd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI). [S. l.]:IEEE,2022:275-280.
- [11] WANG D A, CUI S M, BIE Z, et al. A redundancy design of wireless power transfer system for satellite slip ring with high reliability[C]//2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). [S. l.]:IEEE,2021:1-6.
- [12] RAMOS G V, YUAN J S. Radiated emissions testing of space wireless electric power transfer systems[C]//2012 Proceedings of IEEE Southeastcon. [S. l.]:IEEE,2012:1-4.
- [13] ZHANG J T, YAO S Y, PAN L Y, et al. A review of capacitive power transfer technology for electric vehicle applications[J]. Electronics,2023,12(16):3534.
- [14] LECLUYSE C, MINNAERT B, KLEEMANN M. A review of the current state of technology of capacitive wireless power transfer[J]. Energies,2021,14(18):1-22.
- [15] ATIYAH N Q, ATILLA D C, AYDIN C, et al. The analysis of variation in plate geometry for capacitive power transfer pads utilized in electric vehicles[C]//2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS). Turkey:IEEE,2018:291-294.
- [16] MAJI S, SINHA S, REGENSBURGER B, et al. A large air-gap multi-MHz capacitive wireless power transfer system using compact charging pads[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). [S. l.]:IEEE,2021:444-450.
- [17] KIM J, BIEN F. Electric field coupling technique of wireless power transfer for electric vehicles[C]//Tencon Spring Conference. Sydney:IEEE,2013:267-271.
- [18] TESLA N. Experiments with alternate currents of very high frequency and their application to methods of artificial illumination[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers,1891,VIII(1):266-319.
- [19] GRAY A. Inventions, researches, and writings of nikola tesla[J]. Nature,1895,52:314-315.
- [20] HU A P, LIU C, LI H L. A novel contactless battery charging system for soccer playing robot[C]//2008 15th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice. Auckland:IEEE,2008:646-650.
- [21] DAI J J, LUDOIS D C. Wireless electric vehicle charging via capacitive power transfer through a conformal bumper[C]//2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). USA:IEEE,2015:3307-3313.
- [22] DAI J J, LUDOIS D C. Capacitive power transfer through a conformal bumper for electric vehicle charging[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2016,4(3):1015-1025.
- [23] SEDEHI R, BUDGETT D, JIANG J C, et al. A wireless power method for deeply implanted biomedical devices via capacitively coupled conductive power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2021,36(2):1870-1882.
- [24] NESTE C W, PHANI A, HULL R, et al. Quasi-wireless capacitive energy transfer for the dynamic charging of personal mobility vehicles[C]//IEEE PELS Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power. [S. l.]:IEEE,2016:196-199.
- [25] TAMURA M, NAKA Y, MURAI K, et al. Design of a capacitive wireless power transfer system for operation in fresh water[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2018,66(12):5873-5884.
- [26] 卿晓东,苏玉刚. 电场耦合无线电能传输技术综述[J]. 电工技术学报,2021,36(17):3649-3663.
- [27] 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.
- [28] EREL M Z, BAYINDIR K C, AYDEMIR M T, et al. A comprehensive review on wireless capacitive power transfer technology: Fundamentals and applications[J]. IEEE Access,2021,10:3116-3143.
- [29] 陈阳琦. 电场耦合式无线电能传输系统元件电压优化策略研究[D]. 成都:西南交通大学,2018:12-15.
- [30] PARK C, PARK J, SHIN Y, et al. Separated circular capacitive coupler for reducing cross-coupling capacitance in drone wireless power transfer system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2020,68(9):3978-3985.
- [31] 武帅,陈星维,孟祥尧,等. 具有强抗偏移及轻量化特性的电场耦合式无人机无线电能传输系统[J]. 中国电机工程学报,2023,43(6):2404-2413.
- [32] JEGADEESAN R, GUO Y X, JE M. Electric near-field coupling for wireless power transfer in biomedical applications[C]//2013 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO). Sin-

- gapore:IEEE,2013:1-3.
- [33] 辛文辉,曹忠鲁,辛亚娟,等. 植入式医学装置电场耦合式电能传输新方法[J]. 仪器仪表学报,2015,36(8):1816-1821.
- [34] ERFANI R,MAREFAT F,SODAGAR A M,et al. Modeling and characterization of capacitive elements with tissue as dielectric material for wireless powering of neural implants[J]. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering: A Publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society,2018,26(5):1093-1099.
- [35] LU F,ZHANG H,HOFMANN H,et al. A double-sided LCLC-compensated capacitive power transfer system for electric vehicle charging[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2015,30(11):6011-6014.
- [36] 胡杰,陈丽华,罗博,等. 基于全耦合电容模型的双发射电场耦合式无线电能传输系统[J]. 电工技术学报,2019,34(17):3542-3551.
- [37] WANG Y,ZHANG H,LU F. 3.5-kW 94.2% DC-DC efficiency capacitive power transfer with zero reactive power circulating[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2023,38(2):1479-1484.
- [38] LIU C,HU A P,NAIR N K C. Coupling study of a rotary capacitive power transfer system[C]//Industrial Technology,2009,ICIT 2009. Churchill:IEEE,2009:1-6.
- [39] LIU Z,SU Y G,ZHAO Y M,et al. Capacitive power transfer system with double T-type resonant network for mobile devices charging/supply[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2022,37(2):2394-2403.
- [40] 苏玉刚,钱林俊,刘哲,等. 水下具有旋转耦合机构的电场耦合无线电能传输系统及参数优化方法[J]. 电工技术学报,2022,37(10):2399-2410.
- [41] WU X Y,SU Y G,HU A P,et al. A sleeve-type capacitive power transfer system with different coupling arrangements for rotary application [J]. IEEE Access,2020,8:69148-69159.
- [42] LUDOIS D C,REED J K. Brushless mitigation of bearing currents via capacitively coupled shunting[C]//2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM). Berlin:IEEE,2014:2336-2342.
- [43] HAGEN S,TISLER M,DAI J J,et al. Use of the rotating rectifier board as a capacitive power coupler for brushless wound field synchronous machines[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2022,10(1):170-183.
- [44] LI H Y,LIU Y P,FU M F. Circular capacitive coupler with multilayer interleaving for stable output[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques,2023,71(2):719-726.
- [45] 辛平平. 适于非接触滑环的 CPT 技术的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2018:1-7.
- [46] ZHANG H,LU F,HOFMANN H,et al. A four-plate compact capacitive coupler design and LCL-compensated topology for capacitive power transfer in electric vehicle charging application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2016,31(12):8541-8551.
- [47] ZHANG H,LU F,HOFMANN H,et al. Six-plate capacitive coupler to reduce electric field emission in large air-gap capacitive power transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2018,33(1):665-675.
- [48] 郭历谋,罗博,麦瑞坤. 基于电场耦合式的电动汽车无线充电技术电压优化方法[J]. 电工技术学报,2020,35(S1):19-27.
- [49] 陈阳琦,陈丽华,罗博,等. 一种电场耦合式无线电能传输系统无源谐振元件电压优化方法[J]. 电工技术学报,2018,33(10):2237-2244.
- [50] OTAKI D,FUNATO H,HARUNA J. Proposal of capacitive power transfer system through automotive body paintings[C]//2021 IEEE 30th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). [S.l.]:IEEE,2021:1-6.
- [51] YOU Y S,KANG H Y. Capacitive coupling wireless power transfer with glass dielectric layers for electric vehicles [C]//2016 IEEE 6th International Conference on Consumer Electronics-Berlin (ICCE-Berlin). Berlin:IEEE,2016:90-91.
- [52] HANAZAWA M,OHIRA T. Power transfer for a running automobile[C]//2011 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications. Kyoto:IEEE,2011:77-80.
- [53] RAHMAN M,AHMED K,NUHIN M,et al. Analysis of layered shielding for capacitive wireless power transfer application[C]//2023 3rd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST). Dhaka:IEEE,2023:170-174.
- [54] CHEN X,YU S B,ZHANG Z. A strip-coupler for dynamic capacitive wireless power transfer [C]//IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Lisbon:IEEE,2019:4887-4892.

作者简介:张剑韬(1986—),黑龙江哈尔滨人,博士,副教授。主要研究方向为特种环境下无线电能传输技术。

E-mail:jiantaoz@hit.edu.cn

通讯作者:朱春波(1964—),黑龙江哈尔滨人,博士,教授。主要研究方向为无线电能传输技术。E-mail:zhuchunbo@hit.edu.cn