

无人机软磁复合无线充电系统

Bumjin Park, Jaehyoung Park, Yujun Shin, Chanjun Park, Seungyoung Ahn, Song Han

韩国科学技术院

摘要：无人机（UAV）技术的需求和兴趣正在迅速增长。尽管重量很大且充电时间长，但大多数无人机都使用电池进行操作。无人机无线充电系统的需求日益增加，以避免电池的缺点。典型的无线充电系统利用铁氧体来提高功率传输效率，但铁氧体的脆特性阻碍了其应用于动态无人机操作。在本文中，我们提出了一种使用了软磁复合材料的无线充电系统。为了验证，这一所提出的无线充电系统是用典型的无线充电系统实现的。我们测量了功率传递效率和强度，并与传统的系统进行对比。

关键词：无线充电，无人机（UAV），软磁复合（SMC）

1 简介

最近，主要应用于军事应用的无人驾驶飞行器（UAV）技术由于其技术进步而开始将其应用领域扩展到公共或私营部门。由于可靠性、机动性和成本效益方面的操作优势，无人机具有无限的潜力。

摄影或摄像的应用为它带来快速增长的可行性，并且在交通监控、快递服务、森林火灾监视以及监测危险区域或生态系统等领域已经出现了新兴应用。但其中一个具有挑战性的问题仍有待解决，因为大多数无人机受限于电池的容量和重量限制。

无线电力传输（WPT）将是处理无人机所需电能问题的替代技术。它可以使无人机增加其飞行范围，操作时间，并将促进自主飞行。多年来，感应式 WPT 已成功应用于各种电动车辆，包括我们早期开发的无线电动公交车。感应式 WPT 系统通常由发射线圈（Tx 线圈）和接收线圈（Rx 线圈）组成，而我们的电动公交车的 Tx 线圈在整个公交线路的道路表面下被布置为分段回路。

感应式 WPT 的原理基于法拉第定律，其中 Tx 线圈中的交流电（AC）产生了时变磁场。来自 Tx 线圈的时变磁场通过空气耦合到 Rx 线圈，从而通过耦合磁场在 Rx 线圈中产生时变电流。然后在 Rx 线圈端子上产生输出电压，其中指定的 DC 电压可以从 Rx 线圈处的 AC 电压转换。

感应式 WPT 的原理很明确，并作为使用定制 Tx-Rx 结构的主要电源成功应用于我们的电动巴士。基于法拉第定律的相同原理，WPT 也可应用于无人机。感应式 WPT 系统的实际方案中使用了铁氧体以改善磁耦合。已知铁氧

体具有优异的导磁率高频特性和适合的导电性等电特性。

虽然总体而言铁氧体是用于传导所需效率的磁场的优化器件，但是铁氧体在无人机的 WPT 中不太实用。在无人机操作的极端动态环境下，铁氧体的脆特性阻碍了 WPT 的应用。有几项工作可以提高无人机的性能，但由于实际特性有限，无法将其作为 WPT 的高效铁氧体磁性材料。本文中的软磁复合材料可以替代铁氧体，目的是将感应式 WPT 系统集成到无人机中。

本文研究了不同的铁磁材料在无人机 WPT 系统磁芯中的应用。该比较研究是基于新开发的软磁复合材料（SMC）和用作 WPT 系统磁芯的常规铁氧体进行的。特别是，主要通过考虑恶劣环境来讨论如何为无人机 WPT 系统选择合适的铁磁芯材料。

2 无人机无线充电线圈的拓扑结构

用于无人机应用的典型 WPT 系统包括变换器、两个环形线圈、谐振匹配电容器、整流器、BMS 和电池，如图 1 所示。可以使用来自源线圈的磁场对电池充电。电源和负载线圈被用于为 DJI 产品充电。

如图 2 所示，磁性材料片和圆形磁芯被用于提高功率传输效率，并减小由 Tx 线圈磁场引起的电磁干扰。添加电容器以补偿线圈的漏感，并调节线圈系统的谐振频率。此外，匹配电容增强了 WPT 系统的磁通密度。

WPT 线圈分别使用了铁氧体和新开发的 SMC。铁氧体的磁导率为 3200 ($\mu_r=3200$)，新开发的 SMC 的磁导率为 200 ($\mu_r=200$)。与变压器不同，WPT 系统在 Tx 和

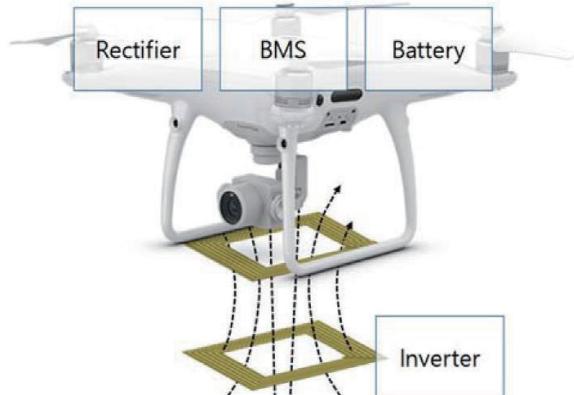


图 1 无线充电无人机的拓扑结构

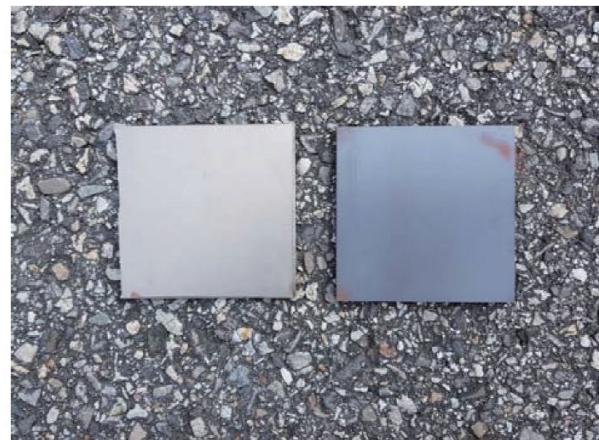


图 3 新开发的 SMC (左) 和传统铁氧体 (右)



图 2 发射 (左) 和接收 (右) 线圈。线圈制造中使用的
利兹线厚度为 0.12 毫米，有 300 股。两个线圈的
直径均为 9.7 厘米，匝数为 16 匝。传输侧磁体
采用传统的磁性铁氧体，而接收侧磁体交替
测试传统的铁氧体和我们所提出的 SMC

Rx 线圈之间具有大的气隙。因此，确定有效磁导率的主要因素是具有 $1 (\mu_r=1)$ 的空气磁导率。随着气隙增加，有效磁导率因此降低。在无人机应用中，由于气隙大，磁性材料的磁导率不是决定功率传递效率的主要因素。

3 实验和讨论

3.1 磁性材料的自由落体试验

进行自由落体试验以比较新开发的 SMC 与传统铁氧体的强度。图 3 为新开发的 SMC 和传统铁氧体。两个磁体的厚度均为 5mm，尺寸为 $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ 。在 1 米的高度进行自由落体试验，同时放下两个磁体，如图 4 所示。

自由落体试验结果如图 5 所示。根据实验结果，传统的铁氧体完全被破坏，而新开发的 SMC 仍处于其原始形



图 4 1 米高处的自由落体对比实验

态。在 3 米和 5 米高处的自由落体试验也没有破坏新开发的 SMC。另外，在锤击实验中，新开发的 SMC 没有被破坏，但它只是被弄皱了。在机动过程中，无人机很可能会在几米的高度下降。

尽管传统的铁氧体不能满足这一要求并且可能会被破坏，但无人机 WPT 系统的原型应尽可能保留。新开发的 SMC 从未损坏，即使从几米高处跌落，因此新的 SMC 可



图 5 两个磁体的跌落测试结果

用于无人机的感应式无线充电系统。

3.2 根据气隙比较互感的变化

值得注意的是，互感可以影响感应式 WPT 系统的效率。特别是，Rx 线圈中的感应电压与互感成比例，输出功率性能取决于感应电压。由于这个原因，考虑到不同的磁性材料，我们测量了互感的变化，如图 6 所示。传统的铁氧体和新的 SMC 交替作为 Rx 线圈的磁性材料，并根据气隙测量互感值。图 7 显示了互感的变化。根据测量结果，取决于变化的距离，两种磁性材料之间的互感几乎没有差异。

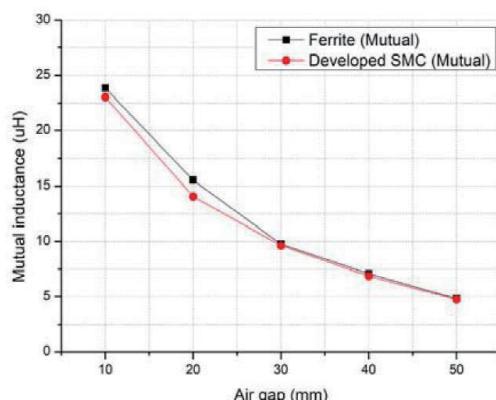


图 6 根据气隙的互感变化的比较

3.3 无线功率传输实验的磁特性比较

Tx 和 Rx 线圈被制造用于无线功率传输实验。Tx 和 Rx 线圈如图 2 所示。我们测量了为 WPT 系统制造的线圈的电感值。系统的工作频率设定为 19kHz，补偿电路的电容值尽可能接近计算。两个线圈之间的间隙为 2.5 厘米。测量参数如表 1 所示。

表 1、线圈和补偿电路的参数值

parameters	Rx side magnetic material	
	Conventional ferrite	Developed SMC
Input power	84.47 W	82.82 W
Output power	50.76 W	51.05 W
Efficiency	60.08 %	61.64 %

在相同的条件下进行实验，即通过电流变换器施加 19kHz 的正弦电流，以在负载侧接收 50 瓦的功率。负载直接连接到交流输出，没有整流器或稳压器，使用的负载是 5 欧姆电阻器。施加到无线电力传输系统的输入电压和电流的波形如图 8 所示。WPT 系统的输入等于变换器的

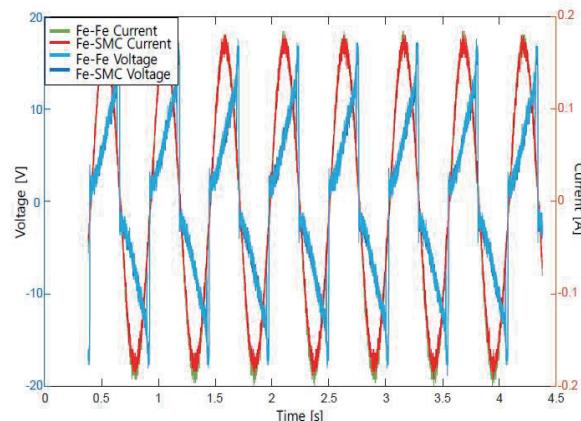


图 8 50 瓦功率输出到负载时变换器的输出电压和电流。

在 Fe-Fe 的情况下，传统的铁氧体用于 Tx 线圈和 Rx 线圈。对于 Fe-SMC，常规铁氧体用于 Tx 线圈，SMC 用于 Rx。两种情况的电流和电压几乎相同。

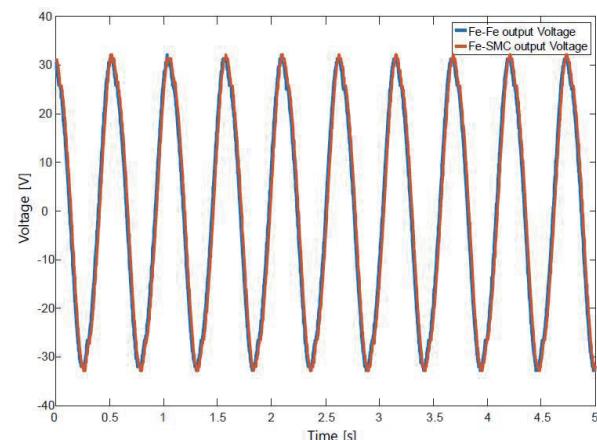


图 9 传送到负载的电压波形

下转页

输出。在每种情况下输送到负载的电压如图 9 所示。当向负载提供 50 瓦的功率时，两种情况下负载两端的电压几乎相同。表 2 显示了每种情况的输入功率、输出功率和效率。

表 2、线圈和补偿电路的参数值

parameters	<i>Rx side magnetic material</i>	
	<i>Conventional ferrite</i>	<i>Developed SMC</i>
System operating frequency	19kHz	19kHz
Tx coil inductance	44.9 μ H	44.9 μ H
Tx compensation capacitor	1.533 μ F	1.533 μ F
Tx resonance frequency	19.18 kHz	19.18 kHz
Rx coil inductance	42.84 μ H	41.5 μ H
Rx compensation capacitor	1.61 μ F	1.61 μ F
Rx resonance frequency	19.16 kHz	19.47 kHz
Mutual inductance	14.27 μ H	13.58 μ H
Coupling coefficient	0.325	0.315

结果表明，新开发的 SMC 和常规铁氧体在 WPT 特性上几乎没有差别。在几乎相同的传输电流下感应出相同的 Rx 线圈电压。同时，传输了相同的功率，系统的效率几乎相似。

4 结论

在本文中，我们确定了新开发的 SMC 在无人机 WPT 系统磁芯部分中的性能。从自由落体试验中发现，与传统铁氧体相比，新开发的 SMC 具有突出的机械特性。应该注意的是，包括无人机组件的磁芯材料需要良好的坚固机械性能。使用无人机的 WPT 系统，我们成功地评估了新开发的 SMC 作为磁芯与传统磁性材料的对比。结果表明，基于新开发的 SMC 的 WPT 系统的功率效率比传统的铁氧体高 1.02%。基于该实验结果，可以确定新开发的 SMC 是无人机无线充电系统中磁芯的合适磁性材料。

参考文献

- [1] PROFILE, Market Forecast: World Unmanned Aerial Vehicle Systems. Teal Group, 2014.
- [2] United states department of defense (2009) [Online]. <http://www.acq.osd.mil/sts/docs/UMSIntegratedRoadmap2009.pdf>
- [3] Jinyong, KIM et al. "San: Self-adaptive navigation for drone battery charging in wireless drone networks," IEEE Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 30th International Conference on., pp. 248–251, 2016.
- [4] Austin, Reg. Unmanned Aircraft System. UAVS Design, Development and Deployment, John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- [5] Kevin, DORLING, et al. "Vehicle routing problems for drone delivery," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 47.1: pp. 70–85.
- [6] P. Skorput, M. Sadko, V. Hrvoje, "The use of Unmanned Aerial Vehicles for forest fire monitoring," IEEE ELMAR, International Symposium., 2016, pp. 93–96, 2016.
- [7] T. M. Mostafa, M. Aam, H. Reiji, "Wireless battery charging system for drones via capacitive power transfer," Emerging Technologies: IEEE Wireless Power Transfer (WoW), PELS Workshop on. IEEE, pp. 1–6, 2017.
- [8] S. Aldhaher, et al, "Light-weight wireless power transfer for mid-air charging of drones," IEEE Antennas and Propagation (EUCAP), 11th European Conference on., pp. 336–340, 2017.
- [9] C. Song, et al, "Leakage magnetic field reduction method using high Q multiple resonant reactive loop shielding in three-phase resonant WPT charger for drone," IEEE Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific), Conference and Expo, pp. 913–918, 2016.
- [10] C. Song, et al, "Low EMI three phase wireless charger for drone with 150degree conduction mode of VSI," IEEE Wireless Information Technology and Systems (ICWITS) and Applied Computational Electromagnetics (ACES), IEEE/ACES International Conference on., pp. 1–2, 2016.