

doi:10.11835/j.issn.1000.582X.2023.09.011

强抗偏移轻量化无人机无线传能耦合机构研究

郑红星¹, 左非¹, 孙雪戈²

(1. 西安现代控制技术研究所, 陕西 西安 710065; 2. 重庆大学 自动化学院, 重庆 400044)

摘要: 无线电能传输技术在无人机领域应用中, 无人机降落时由于定位精度以及停靠时的控制精度存在误差, 会导致停靠位置不准确而产生偏移, 由于无人机本身体型较小, 耦合机构的尺寸也会较小, 此时存在的偏移会导致耦合机构的耦合程度降低, 进而导致无线电能传输系统工作效率降低, 影响系统正常工作。为提高系统的抗偏移特性, 需要对无人机无线充电系统的耦合机构进行合理的设计及优化。笔者通过结合无人机结构特性, 在用线量一致的约束条件下分析对比不同耦合机构的耦合特性, 设计适用于无人机的最佳耦合机构; 对耦合机构参数进行以 M/l 为优化目标的轻量化优化; 最后通过仿真和实验验证了该耦合机构优化方法的可行性。

关键词: 无线电能传输; 耦合机构; 轻量化; 抗偏移

中图分类号: TM724

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2023)09-110-10

Coupling mechanism of wireless power transfer of UAV with strong anti-offset and lightweight

ZHENG Hongxing¹, ZUO Fei¹, SUN Xuege²

(1. Xi'an Institute of Modern Control Technology, Xi'an 710065, P. R. China; 2. School of Automation, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China.)

Abstract: In the practical application of wireless power transmission technology for unmanned aerial vehicles (UAVs), inaccuracies in positioning and docking control during UAV landing can lead to errors in docking position and displacement. Due to the small size of the UAV, the coupling mechanism's size is also limited, and any offset at this time can reduce the coupling efficiency of coupling mechanism, which in turn leads to the reduction of the efficiency of the wireless power transmission system, affecting its normal operation. Therefore, to improve the system's anti-offset characteristics, it is necessary to design and optimize the coupling mechanism of the UAV wireless charging system. This study analyzes and compares the coupling characteristics of different coupling mechanisms with considering consistent line usage and the structural characteristics of UAVs. A suitable coupling mechanism for UAVs is then designed and the parameters of the coupling mechanism are optimized for lightweight, using M/l as the optimization goal. Finally, the feasibility of optimization method for the coupling mechanism is verified by simulation and experiment.

Keywords: wireless power transfer; coupling mechanism; lightweight; anti-offset

收稿日期: 2022-03-22

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(52007012)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (52007012).

作者简介: 郑红星, (1978—), 男, 硕士, 主要从事无线电能传输技术和电气系统设计方向研究, (E-mail) zhx203@126.com。

通信作者: 孙雪戈, (1995—), 男, 硕士, 主要从事无线电能传输技术和电力电子建模控制技术方向研究, (E-mail) 707313135@qq.com。

无线电能传输(wireless power transfer, WPT)是一种将电能转换为其他形式的中继能量(如电磁场能、激光、微波及机械波等),隔空传输一段距离后,再通过接收装置将中继能量转换为电能,实现电能非接触传输的技术^[1-3]。将无线电能传输技术应用于无人机边境巡防中,可以有效解决无人机在无人区域的充电问题,此时需要在一些固定的据点设置无人机无线充电平台,当无人机电量不足时,降落至附近平台充电;当电量充足时,无人机继续执行巡防计划。此外,对于一些人迹罕至、通电困难的区域,可以搭建车载无线充电平台,在执勤路线上停靠汽车,执行无人机飞行任务。这种模式提高了巡防效率,在一些特殊地形地貌,无人机的作用更加凸显^[4-6]。

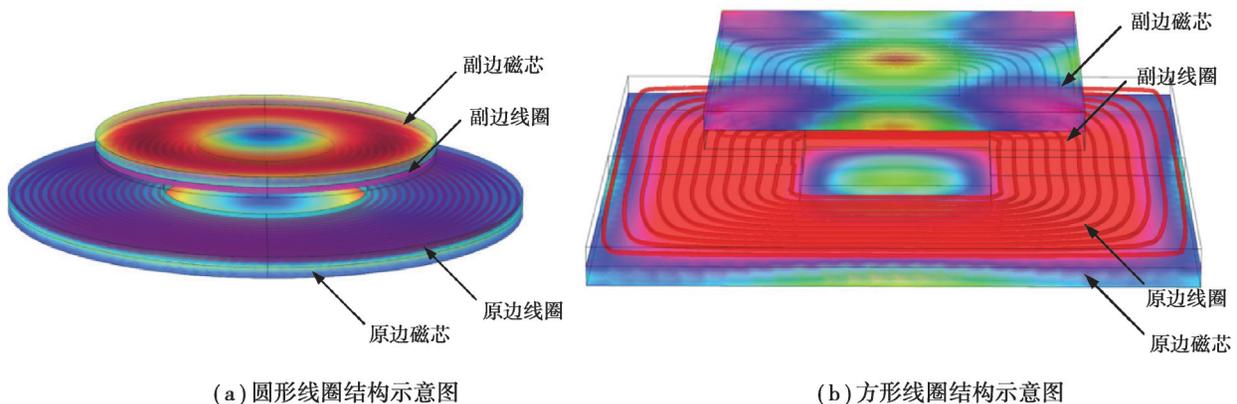
无人机无线充电技术有很多优势,但由于发展时间较短以及技术特征^[7-12],依然存在着一系列亟需解决的问题。磁耦合无线充电技术对系统参数的变化十分敏感,当耦合机构发生偏移、传输距离改变时,系统的传输功率和传输效率都会受到相当大的影响。磁耦合无线充电技术中的耦合机构对系统整体传输性能的影响十分明显,而耦合机构的尺寸、大小、有无磁芯又受到系统应用场景限制,对于耦合机构的优化问题一直是众多学者们的研究方向。来自拉奎拉大学的无线电能传输研究团队为解决阵列切换时耦合机构互感跌落导致副边输出电压降低的问题,设计出一种原边线圈互相重叠的矩形线圈阵列^[13]。韩国高级科学技术学院(KAIST)的研究团队设计了基于螺线管绕组的三相耦合绕组,原边线圈和副边线圈都设计成对称的三相螺线管绕组^[14],通过对比分析与单相绕组系统的电流失真,得出可以降低绕组中的电流,提升系统整体的传输功率。哈尔滨工业大学的研究团队也对磁场耦合技术中的耦合机构进行了多年研究,主要针对传输性能和传输特性以及中继线圈进行了多种分析^[15-16],对变负载以及动态充电等动态变化过程进行研究^[17],提出一种基于端口网络阻抗分析来设计耦合机构线圈参数的方法^[18]。笔者用线量一致的约束条件下分析对比不同耦合机构的耦合特性,设计具备较强抗偏移特性的轻量无人机无线电能传输系统,提出以 λ 为优化目标对耦合机构进行轻量化优化,通过做出 λ 变化曲线得到性能最优的耦合机构参数。

1 抗偏移轻量化耦合机构分析

1.1 耦合机构结构分析

无人机无线充电系统耦合机构一般为圆形线圈、方形线圈、螺线管绕线线圈。研究以耦合机构线圈的用线量一致为约束条件,利用COMSOL建立耦合机构模型,然后对耦合机构耦合性能进行分析。建立圆形线圈、方形线圈、圆形螺线管、方形螺线管模型如图1所示,其各项参数如表1所示。

以用线量一致与磁芯用量一致为约束条件得到上面几种耦合机构,然后利用COMSOL对耦合机构耦合特性进行仿真分析得到系统抗偏移特性(如图2所示)。从图2中可以看到,在用线量一致及匝间距相等的情况下,螺线管型线圈的耦合能力和抗偏移能力都强于平面型线圈。而圆形螺线管的抗偏移能力在 x 轴和 y 轴方向上偏差较大,在相同约束条件下,方形螺线管线圈在 x 轴和 y 轴的抗偏移能力强于圆形螺线管型线圈。综上分析可得,方形螺线管耦合机构耦合能力最强。但螺线管型线圈也存在弊端,它在 x 、 y 2个方向轴上的抗偏移能力存在差距,为了减少在2个方向上的耦合特性差距,设计一种新型螺线管型线圈。在方形螺线管的基础上,在 x 轴进行线圈绕制之后,在 y 轴也进行线圈的绕制,图3是十字复合线圈的示意图,以此增加螺线管形式的线圈在 y 轴方向上的抗偏移能力,接下来对十字型复合线圈的耦合特性进行研究。



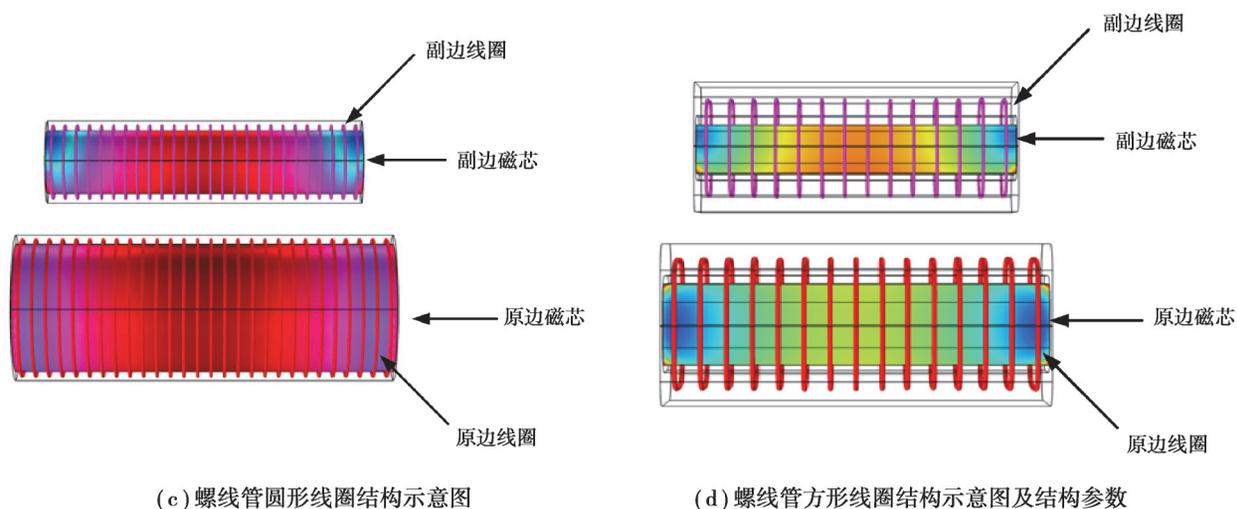


图 1 耦合机构模型

Fig. 1 Coupling mechanism mode

表 1 各线圈结构参数

Table 1 Structural parameters of each coil

线圈形状		Rin/Lin/线圈半径/线圈边长/mm	Rout/Lout/线圈长度/mm	匝数	用线量/mm	磁芯尺寸/mm
圆形线圈	原边线圈	30	75.5	22	2400	$R=75.5*3$
	副边线圈	20	50	15	1000	$R=50*3$
方形线圈	原边线圈	30	92	31	2400	$92*92*5$
	副边线圈	20	59.5	19	1000	$59.5*59.5*5$
圆形螺线管	原边线圈	20	120	60	2400	$R=20*120$
	副边线圈	10	100	60	1000	$R=10*100$
方形螺线管	原边线圈	31	120	60	2400	$31*31*120$
	副边线圈	15	100	50	1000	$15*15*100$

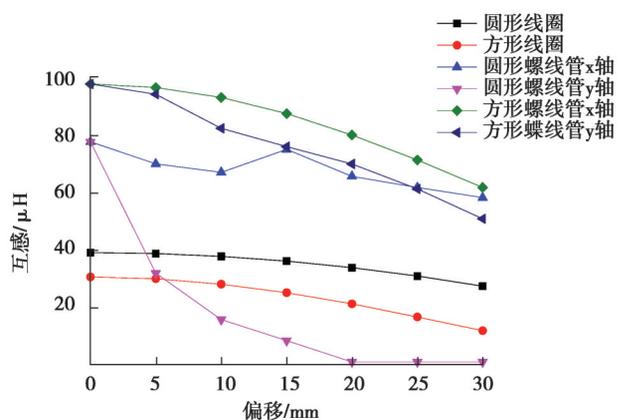


图 2 4种耦合机构抗偏移特性对比

Fig. 2 Comparison of anti deflection characteristics of four coupling mechanisms

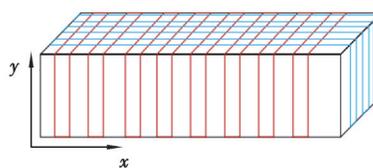


图 3 十字复合线圈示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cross composite coil

以用线量一致为约束条件,进行建模分析时,复合耦合机构可以看成是由2组线圈串联而成的,那么在约束条件下,这2组线圈参数的优化对耦合机构的性能以及整体线圈的抗偏移特性等都会产生影响。在

COMSOL 中建立十字复合耦合机构模型,通过参数化扫描保持约束条件不变,更改线圈匝数之间的关系,仿真计算出不同情况的耦合机构抗偏移特性,然后进行对比分析,得出一组整体耦合性能最优的耦合机构参数,如表 2 所示,其中,原边线圈 1(平行于 y 轴)为 40 匝,原边线圈 2(平行于 x 轴)为 8 匝,副边线圈 1(平行于 y 轴)为 40 匝,副边线圈 2(平行于 x 轴)为 4 匝(如图 4 所示)。然后以耦合性能最优的线圈与优化前的方形螺旋管耦合特性进行对比分析。

表 2 十字复合线圈参数表
Table 2 Parameter table of cross composite coil

参数	原边线圈 1	原边线圈 2	副边线圈 1	副边线圈 2
长度/mm	120	120	100	100
匝数	40	8	40	4
用线量/mm	4960	2592	2400	740
磁芯	长条形磁芯	长条形磁芯	长条形磁芯	长条形磁芯

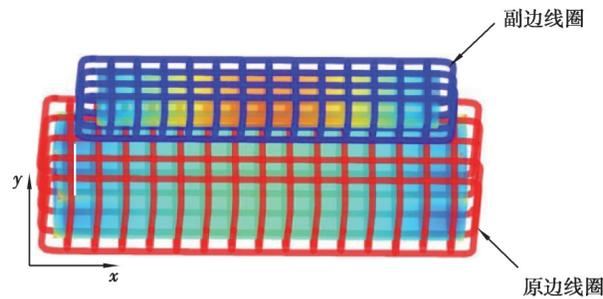


图 4 十字复合线圈模型图
Fig. 4 Cross composite coil model

为了更好地分析 2 种耦合机构的抗偏移特性,将方形螺旋管和十字螺旋管随着 x 轴偏移增加,其互感变化的差值作图如图 5 所示,其中互感差指示无偏移的互感减去有偏移时的互感。

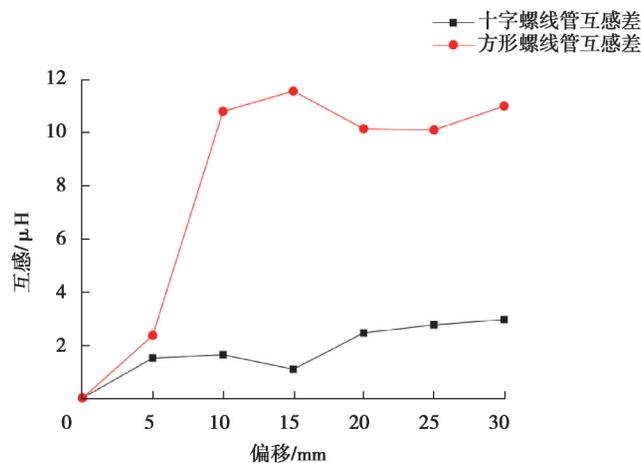


图 5 优化前后互感差值图
Fig. 5 Mutual inductance difference diagram before and after optimization

由图 5 可以看出,偏移从 0~30 mm,十字螺旋管的互感差值要小于方形螺旋管。由此说明,在用线量一致以及磁芯一致的约束条件下,十字螺旋管的耦合性能要强于方形螺旋管。

1.2 轻量化耦合机构优化

磁感应无线电能传输系统是利用一个线圈电流发生变化所产生的磁场对另一个线圈产生感应电流的原理进行电能传输的,两者之间的磁场是通过磁通联系起来的,这里设互感耦合的2个线圈分别为线圈1、2, Ψ_{12} 表示为线圈1中电流 I_1 产生的磁场对线圈2提供的磁通链匝数。令 $\Psi_{12}=N_2\psi_{12}$,式中: N_2 为线圈2的匝数; ψ_{12} 为 I_1 产生的磁场对线圈2中每一匝提供的磁通匝链数。同理, Ψ_{21} 为线圈2中电流 I_2 产生的磁场对线圈1提供的磁通匝链数, $\Psi_{21}=N_1\psi_{21}$ 。理论表明 Ψ_{12} 与 I_1 成正比, Ψ_{21} 与 I_2 成正比,其比例系数成为2个线圈间的互感系统,简称为互感。可表示为

$$M = M_{12} = M_{21} = \frac{\phi_{12}}{I_1} = \frac{\phi_{21}}{I_2} \quad (1)$$

而磁通 ψ 是磁感应强度 B 与面积的乘积,即

$$\psi = BS \quad (2)$$

磁链 Ψ 是导电线圈所通过的总磁通量,满足

$$\Phi = N\psi = MI \quad (3)$$

代入式(2)得

$$B = \frac{\psi}{S} = \frac{MI}{N} \quad (4)$$

对于导磁介质来说,存在磁饱和特性。当外界磁场强度慢慢加强时,铁磁材料内部的磁通密度也会慢慢加强。当磁场强度达到一定程度,再加强时,铁磁材料的磁通密度增强的速度越来越慢。根据磁通的关系可以知道互感 M 与线圈形状、相对位置以及周围介质有关。在耦合线圈周围含有导磁能力弱的空气以及导磁能力强的铁氧体磁芯。磁饱和曲线如图6所示。

结合上述分析可得:随着电流增大,匝数 N 、面积 S 保持不变,磁感应强度 B 达到磁饱和后保持不变,那么 M 就会减小,导致耦合机构传输效率降低,并且随着磁饱和现象发生,磁感应产生的能量会消耗在磁芯发热上,进一步对系统性能产生影响。

为了对耦合机构参数优化做具体分析,笔者提出 $\lambda=M/l_2$ 作为衡量耦合机构轻量化的指标, M 为耦合机构之间的互感值, l_2 为耦合机构长度, λ 表示为单位长度下耦合机构的互感值,对于耦合机构轻量化分析而言,通过分析单位长度下互感值的变化情况来确定耦合机构的最优轻量化参数,在对耦合机构进行参数化扫描时可知,随着耦合机构的长度增加,耦合机构之间的互感也会随着增加,但在耦合机构变化的过程中,互感的变化率会改变,因此,可以认为在变化率达到最大值时,即此时对应长度的耦合机构,每单位长度提供的互感值最大,此时耦合机构轻量化优化效果最好,接下来通过对耦合机构 λ 参数的分析来衡量耦合机构的优化效果。

对于使用了磁芯增强耦合能力的耦合机构而言,分析其耦合性能采取公式分析的方法无法进行较为精确的计算,因此,采用COMSOL软件对其建立模型,仿真计算耦合机构性能。采用基于COMSOL参数化扫描的算法对副边耦合机构的长度 l_2 以及 x 轴绕线线圈长度 l_4 进行仿真运算,直至计算出 λ 性能最优的副边耦合机构。首先针对耦合机构的磁芯进行优化,得到适当的磁芯长度;其次针对线圈长度进行优化,优化流程如图7所示。

由于副边耦合机构磁芯长度 l_4 与线圈长度 l_2 存在一定的关系,但关系并不呈线性变化,因此,在改变磁芯长度的同时,线圈长度变化也会对耦合机构的耦合性能产生影响;假设耦合模型副边线圈长度为 l_4 ,副边磁芯长度为 l_2 ,且满足线圈长度与磁芯长度保持一致的约束条件。通过参数化扫描的方式改变 l_2 和 l_4 的值,得到耦合机构的耦合性能优化参数 M/l 。优化过程采用COMSOL仿真软件,对耦合机构长度 l_2 作线性化参数扫描得到对应的耦合机构性能如图8所示。

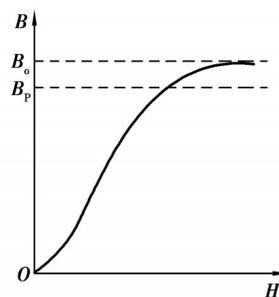


图6 磁饱和曲线

Fig. 6 Magnetic saturation curve

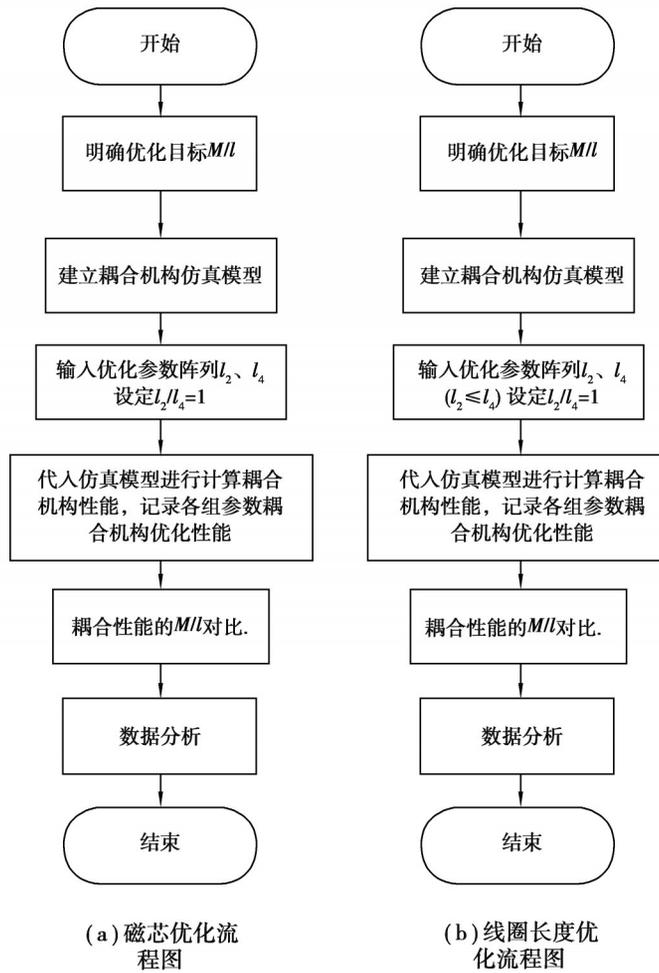


图 7 耦合机构优化流程图

Fig. 7 Optimization flow chart of coupling mechanism

由图可知,在一定范围内,随着耦合机构长度 l_2 增加,互感在逐渐增大,但是随着副边耦合机构长度 l_2 变化, M/I_2 的变化率在发生变化,于是通过对上图进行优化,得到优化目标 λ 的变化图,如图9所示。

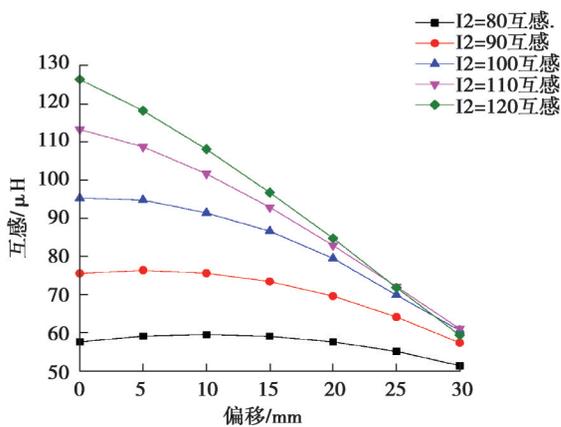


图 8 不同耦合机构长度互感偏移变化图

Fig. 8 Variation diagram of mutual inductance offset of different coupling mechanisms

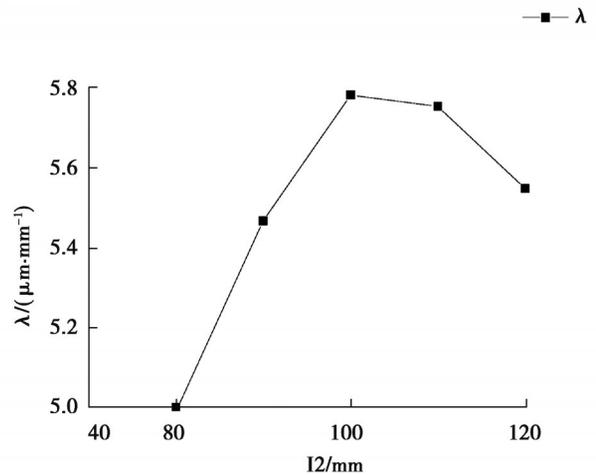


图 9 轻量化优化目标 λ 变化曲线

Fig. 9 Lightweight optimization objective λ Change curve

从上图 λ 的变化曲线可以直观看出轻量化优化的效果,当磁芯长度 l_2 小于100 mm时,互感随耦合机构单位长度变化率在不断增加,当 l_2 大于100 mm后,互感随耦合机构单位长度变化率在逐渐降低,于是可以得出:对于无线充电系统设计而言,当耦合机构可偏移容忍度以及耦合机构形状等参数确定后,可以通过改变耦合机构长度来实现对耦合机构的轻量化优化,以达到在所用耦合机构最小的情况下,无线充电系统的单位抗偏移性能最好,研究对耦合机构磁芯的轻量化优化结果为耦合机构长度 l_2 设置为100 mm。

2 实验验证

2.1 耦合机构抗偏移特性实验

按照表2所示参数对耦合机构进行了绕制,实物如图10所示。

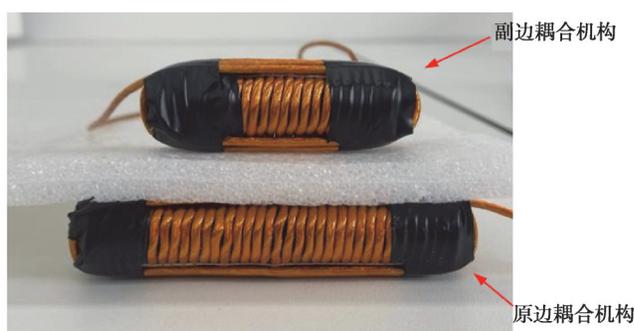


图10 十字螺线管耦合机构实物

Fig. 10 Design of cross solenoid coupling mechanism

对耦合机构进行抗偏移特性实验,得到的互感与耦合机构特性仿真数据进行对比,互感抗偏移特性图如图11所示,实验结果与仿真数据变化率趋于一致,可以说明耦合机构优化的可信度。

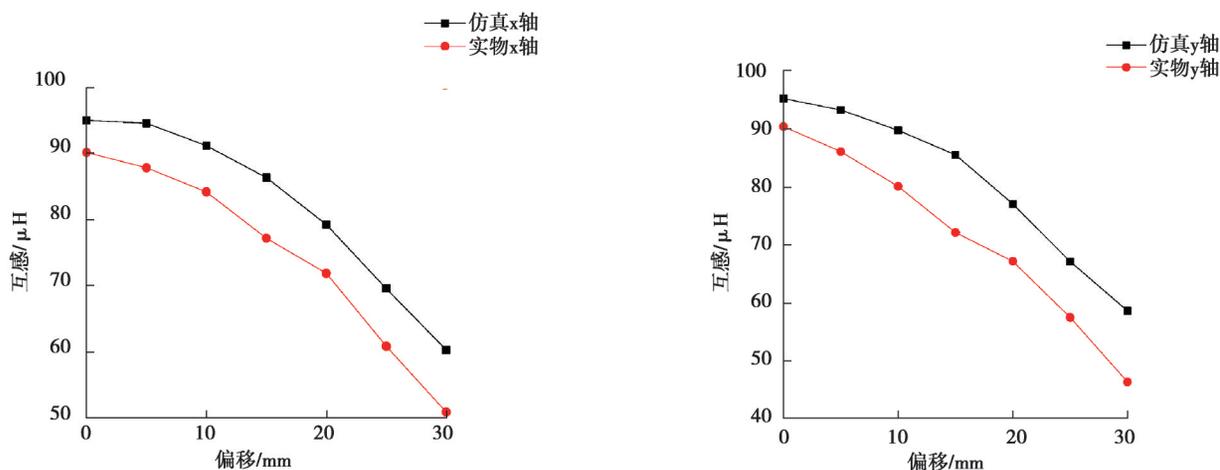


图11 互感抗偏移特性变化图

Fig. 11 Variation diagram of mutual inductance offset characteristic

通过实验验证十字线圈与方形螺线管线圈的抗偏移特性。将十字螺线管与方形螺线管在x轴的抗偏移特性进行对比,结果如图12所示。可以看出,十字螺线管的互感变化值要小于方形螺线管。由此说明,在用线量一致以及磁芯一致的约束条件下,十字螺线管的耦合性能要强于方形螺线管,证实了提出的耦合机构的特性。

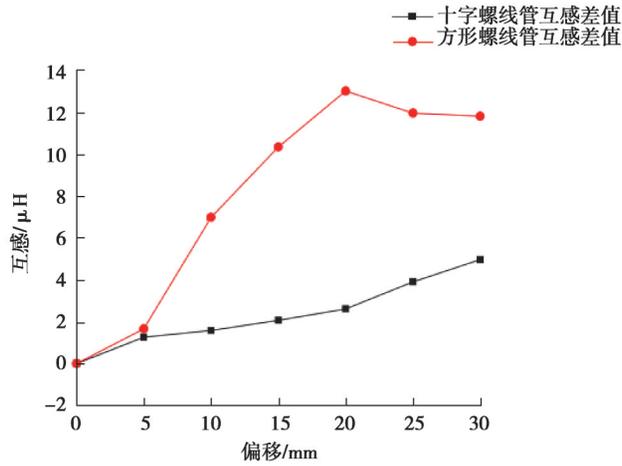


图 12 互感差值变化图

Fig. 12 Variation diagram of mutual inductance difference

2.2 硬件实验

接下来以大疆 M210 无人机为例进行无人机无线充电系统设计,该无人机无线充电系统的设计指标如表 3 所示。

表 3 系统设计参数

Table 3 System design parameters

系统指标	系统参数
传输距离	10 mm
传输功率	180 W
可容忍偏移度	30 mm
充电电压	22.6 V

搭建了如图 13 所示的实验平台对系统进行耦合机构参数实验验证,对实际绕制的耦合机构进行重量测量,测得其耦合机构重量仅为 82 g,相对于无人机整体的 3 840 g 而言,耦合机构其重量仅占比 2%,耦合机构对负重影响很小。



图 13 无人机无线电能传输系统装置

Fig. 13 Device of UAV radio power transmission system

逆变输出电压、电流以及负载输出电压、电流波形如图 14 所示。可以看出逆变输出电流轻微滞后于电压,说明系统实现了 ZVS,其传输效率得到提升。测得的系统输出电压为 22.9 V,系统输出功率为 206.1 W,系统工作效率为 90.17%。

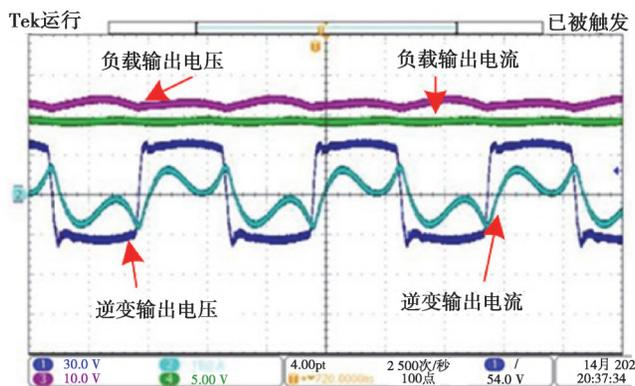


图 14 逆变电压电流、负载输出电压电流波形

Fig. 14 Waveform of inverter voltage and current, load output voltage and current

在偏移情况下,系统功率变化的仿真与实验波形如图 15 所示,可以看出系统特性与仿真变化趋势相同,实验效果略低于仿真结果。

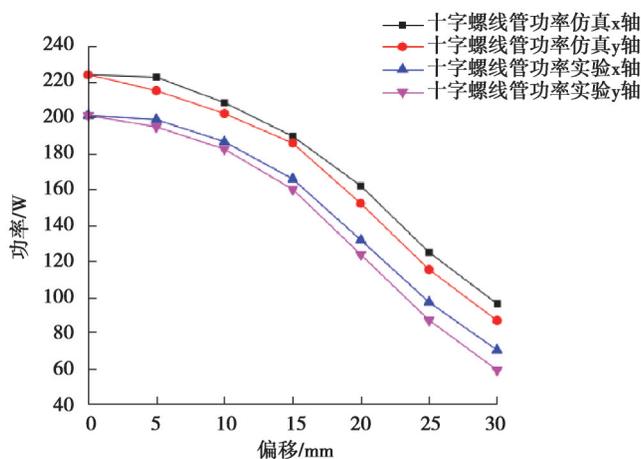


图 15 功率仿真实验对比图

Fig. 15 Comparison chart of power simulation experiment

3 结论

针对无人机无线充电系统耦合机构的性能优化,通过对几种可用的耦合机构进行条件约束,得到耦合机构的耦合性能,对比分析得到性能最优的耦合机构。笔者提出以 λ 为优化目标对耦合机构进行轻量化优化,通过做出 λ 变化曲线得到性能最优的耦合机构参数,对所提出的结构及参数进行实验证实了可行性。

参考文献

- [1] Tesla N.Apparatus for transmitting electrical energy:US1119732,[P].1914-12-01.
- [2] Kurs A, Karalis A, Moffatt R, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007, 317(5834): 83-86.
- [3] Wu H H, Gilchrist A, Sealy K D, et al. A high efficiency 5 kW inductive charger for EVs using dual side control[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(3): 585-595.
- [4] 朱春波,姜金海,宋凯,等.电动汽车动态无线充电关键技术研究进展[J].电力系统自动化,2017,41(2):60-65,72.
Zhu C B, Jiang J H, Song K, et al. Research progress of key technologies for dynamic wireless charging of electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(2): 60-65, 72.(in Chinese)
- [5] 鲁杰.架空输电线路无人机自主巡检技术探究[J].中国科技投资,2020(5):137-139.
Lu J. Research on UAV autonomous inspection technology of overhead transmission line[J]. China Venture Capital, 2020(5):

- 137-139. (in Chinese)
- [6] Fu M F, Zhang T, Zhu X N, et al. Compensation of cross coupling in multiple-receiver wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(2): 474-482.
- [7] Moon S, Kim B C, Cho S Y, et al. Analysis and design of a wireless power transfer system with an intermediate coil for high efficiency[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 5861-5870.
- [8] 金昭,夏国华,王澜,等. 无人机用无线充电技术研究[J]. 现代制造技术与装备, 2020(1): 46-47.
Jin Z, Xia G H, Wang L, et al. Research on wireless charging technology for UAV[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2020(1): 46-47.(in Chinese)
- [9] Marincic A, Budimir D. Tesla's contribution to radiowave propagation[C]//5th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Service. TELSIKS 2001. Proceedings of Papers (Cat. No.01EX517). September 19-21, 2001, Nis, Yugoslavia. IEEE, 2002: 327-331.
- [10] Boys J T, Hu A P, Covic G A. Critical Q analysis of a current-fed resonant converter for ICPT applications[J]. Electronics Letters, 2000, 36(17): 1440.
- [11] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
Feng C Z, Ma X K. An introduction to engineering electromagnetic fields[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [12] 杨晓博,李阳,肖朝霞,等. 改进粒子群算法的自动阻抗匹配技术[J]. 重庆大学学报, 2016, 39(6): 41-48.
Yang X B, Li Y, Xiao Z X, et al. Automatic impedance matching based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Chongqing University, 2016, 39(6): 41-48.(in Chinese)
- [13] Campi T, Cruciani S, Feliziani M. Wireless power transfer technology applied to an autonomous electric UAV with a small secondary coil[J]. Energies, 2018, 11(2): 352.
- [14] Song C, Kim H, Jung D H, et al. Three-phase magnetic field design for low EMI and EMF automated resonant wireless power transfer charger for UAV[C]//2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC). May 13-15, 2015, Boulder, CO, USA. IEEE, 2015: 1-4.
- [15] 李振杰,逯仁贵,朱春波,等. 远距离小功率无线电能传输系统性能优化研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 209-214.
Li Z J, Lu R G, Zhu C B, et al. Study on the performance optimization of long range and low power wireless power transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 209-214.(in Chinese)
- [16] 张剑韬,朱春波,雷阳,等. 无线电能传输感性系统特性分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S1): 303-307.
Zhang J T, Zhu C B, Lei Y, et al. Study on the character of wireless power transfer inductive system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 303-307.(in Chinese)
- [17] 毛世通,朱春波,宋凯,等. 基于端口阻抗的磁耦合谐振式无线电能传输特征参数仿真方法研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(19): 95-102.
Mao S T, Zhu C B, Song K, et al. Characteristic parameter simulation method for magnetic coupling resonance wireless power transfer based on port impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(19): 95-102.(in Chinese)
- [18] 吴晓康,杨庆新,张献,等. 电动汽车动态充电中耦合结构研究及其效率分析[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(9): 8-13.
Wu X K, Yang Q X, Zhang X, et al. Coil structure study and efficiency analysis for the driving wireless charging system of electric car[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(9): 8-13.(in Chinese)

(编辑 侯 湘)