

基于电磁感应的机械装备无线供能系统设计与传输效率优化

郭祥林

南京宇舫科技有限公司 江苏 南京 210000

【摘要】：针对传统机械装备有线供能存在的布线复杂、磨损老化、维护成本高，以及特殊工况下供电可靠性不足等问题，设计一种基于电磁感应原理的机械装备无线供能系统，重点开展传输效率优化研究。通过分析电磁感应无线供能的核心机理，构建系统整体架构，优化松耦合变压器结构与补偿拓扑，结合智能控制策略抑制能量损耗，实现机械装备在不同工况下的高效、稳定无线供能。仿真与实验结果表明，所设计系统传输效率较传统方案提升15%以上，在工业机械臂、自动化生产线传输机构等装备中适配性良好，可有效替代有线供能模式，降低维护成本，提升装备运行可靠性。

【关键词】：电磁感应；机械装备；无线供能；传输效率；松耦合变压器；补偿拓扑

DOI:10.12417/2811-0722.26.03.047

1 引言

随着智能制造产业的快速升级，机械装备向高精度、高可靠性、无人化方向发展，传统有线供能方式已难以满足复杂工况下的供电需求。工业机械臂、自动导引运输车、旋转轴系等装备，其运动部件与固定供电端的有线连接易出现磨损、断裂，不仅增加维护工作量与成本，还可能因线路故障导致装备停机，影响生产连续性。无线供能技术凭借非接触、安全可靠、布线灵活等优势，成为解决机械装备供能难题的关键路径。电磁感应式无线供能基于法拉第电磁感应定律，通过原边线圈产生交变磁场，使副边线圈感应产生电动势，实现能量的非接触传输，具有结构简单、传输功率大、成本可控等特点，适配中短距离机械装备供能场景。当前，电磁感应无线供能系统在机械装备中的应用仍存在传输效率偏低、磁场耦合不稳定、工况适应性差等问题，尤其是在机械装备运动导致原副边线圈相对偏移、负载波动时，能量损耗显著增加，制约了其规模化应用。本文聚焦机械装备无线供能的实际需求，设计一套基于电磁感应的高效无线供能系统，通过优化松耦合变压器结构、设计新型补偿拓扑、引入智能控制策略，实现传输效率的显著提升，为机械装备无线供能的工程化应用提供理论支撑与技术参考。

2 电磁感应无线供能核心机理与系统架构设计

2.1 电磁感应无线供能核心机理

电磁感应无线供能的核心是松耦合变压器的能量耦合与传输，其本质是通过交变电流激发交变磁场，利用磁场耦合实现原边能量向副边的非接触传递。原边线圈接入高频交变电源后，产生交变磁场，根据法拉第电磁感应定律，副边线圈切割磁感线产生感应电动势，经整流、稳压处理后为机械装备负载供电。松耦合变压器的耦合系数直接决定能量传输效率，耦合系数越高，磁场泄漏越少，能量传输损耗越低。耦合系数受线圈结构、原副边相对位置、气隙大小等因素影响，机械装备运动过程中，线圈偏移、气隙变化会导致耦合系数波动，进而影响传输效率与供电稳定性。此外，线圈电阻损耗、铁损、涡流损耗，以及补偿电路的无功功率损耗，也是制约系统传输效率

的关键因素。

2.2 系统整体架构设计

结合机械装备的供能需求，设计的电磁感应无线供能系统整体架构如图1所示。

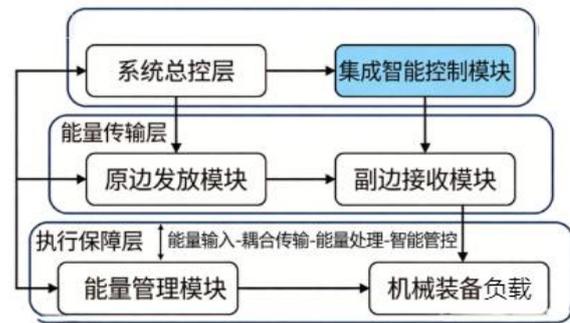


图1 系统整体架构

原边发射模块作为能量输入端，主要由工频整流滤波电路、高频逆变电路与原边线圈组成。工频交流电经整流滤波后转换为直流电，高频逆变电路将直流电转换为高频交变电流，输入原边线圈产生交变磁场，为能量传输提供基础。高频逆变电路采用全桥逆变拓扑，选用宽禁带半导体器件，降低开关损耗，提升逆变效率。副边接收模块负责能量的接收与初步处理，由副边线圈、补偿电路、整流滤波电路组成。副边线圈感应产生交变电动势，经补偿电路补偿无功功率、抑制磁场泄漏，再通过整流滤波电路将交变电流转换为稳定直流电，为机械装备负载供电。能量管理模块用于优化能量分配与损耗控制，包括稳压电路、过流保护电路、储能单元。稳压电路确保输出电压稳定，适配机械装备不同负载的电压需求；过流保护电路防止过载、短路导致的器件损坏；储能单元采用超级电容与锂电池组合，在系统传输效率波动时，保障供电连续性，避免装备因供电中断停机。

3 系统关键部件设计与传输效率优化

3.1 松耦合变压器结构优化

松耦合变压器是电磁感应无线供能系统的核心部件，其结构设计直接影响耦合系数与能量传输效率。针对机械装备运动导致的线圈偏移、气隙变化问题，优化设计松耦合变压器的线圈结构与磁芯参数，提升耦合稳定性与能量传输效率。

电磁感应无线供能的核心功率传输公式基于法拉第电磁感应定律与耦合电感理论，松耦合变压器原副边感应电动势及传输功率可通过以下公式推导：

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= -N_1 \frac{d\Phi_{11}}{dt} - N_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt} \\ \epsilon_2 &= -N_2 \frac{d\Phi_{22}}{dt} - N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} \end{aligned}$$

式中， ϵ_1 、 ϵ_2 分别为原边、副边线圈感应电动势； N_1 、 N_2 分别为原边、副边线圈匝数； Φ_{11} 、 Φ_{22} 分别为原边、副边线圈自感磁通量； Φ_{12} 、 Φ_{21} 分别为原副边线圈互感磁通量。耦合系数 k 作为衡量松耦合变压器耦合性能的核心指标，其计算公式为：

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

式中， M 为原副边线圈互感； L_1 、 L_2 分别为原边、副边线圈自感。耦合系数 k 取值范围为0~1， k 越接近1，磁场泄漏越少，能量传输效率越高。

线圈结构采用圆形螺旋式设计，选用多股绞合铜线，减少集肤效应与邻近效应带来的电阻损耗。原边线圈与副边线圈采用对称结构，增大耦合面积，降低磁场泄漏。线圈匝数根据供能功率需求设计，通过电磁仿真软件优化匝数配比，平衡传输功率与损耗，避免匝数过多导致的电阻损耗增加，或匝数过少导致的耦合系数下降。磁芯选用高磁导率、低损耗的纳米晶软磁材料，其磁导率可达传统硅钢片的10倍以上，能有效汇聚磁场，减少磁场泄漏，提升耦合系数。磁芯结构设计为环形，贴合线圈形状，增大磁场耦合范围，同时优化磁芯厚度与尺寸，降低磁滞损耗与涡流损耗。

通过仿真对比不同磁芯材料、结构参数对耦合系数的影响，确定最优参数组合，具体对比结果如表1所示。

表1 具体对比结果

磁芯材料	磁导率(H/m)	磁芯厚度(mm)	耦合系数k	磁芯损耗(W)
传统硅钢片	1.2×10^3	5	0.65	3.8
纳米晶软磁材料(未优化)	1.5×10^4	5	0.78	1.9
纳米晶软磁材料(优)	1.8×10^4	3	0.82	1.2

磁芯材料	磁导率(H/m)	磁芯厚度(mm)	耦合系数k	磁芯损耗(W)
化后)				

由表1可知，优化后的纳米晶软磁芯磁导率显著提升，耦合系数达到0.82，较传统硅钢片提升20%以上，同时磁芯损耗降低68.4%，有效提升了松耦合变压器的能量传输性能。

3.2 补偿拓扑优化设计

补偿电路的核心作用是补偿松耦合变压器的漏感与无功功率，减少能量损耗，提升传输效率。传统补偿拓扑分为串联补偿、并联补偿与串并联混合补偿，其中串联-串联补偿拓扑在中短距离传输中具有结构简单、无功功率补偿效果好的优势，但在负载波动、线圈偏移时，补偿效果不稳定，传输效率下降明显。

本文优化设计LCC-S混合补偿拓扑，结合串联补偿与并联补偿的优势，原边采用LCC补偿电路，副边采用串联补偿电路。LCC-S补偿拓扑的等效电路模型中，原边LCC补偿电路由两个电感 L_{f1} 、 L_{f2} 与一个电容 C_f 组成，副边串联补偿电路由电容 C_2 组成，其谐振条件满足以下公式：

$$\omega_{L_{f1}} = \frac{1}{\omega C_f}$$

$$\omega(L_{F_2} + L_{A_1}) = \frac{1}{\omega C_f}$$

$$\omega(L_{A_2} + R_L') = \frac{1}{\omega C_2}$$

式中， ω 为系统角频率； L_{s1} 、 L_{s2} 分别为原边、副边线圈漏感； R_L' 为副边负载等效到原边的阻抗； C_2 为副边串联补偿电容。

原边LCC补偿电路可有效抑制漏感影响，稳定原边电流，减少开关损耗；副边串联补偿电路可补偿副边漏感，提升副边感应电动势，增强能量接收能力。通过电路理论分析，建立LCC-S补偿拓扑的数学模型，推导补偿参数与传输效率的关系，利用仿真软件优化补偿电容、电感的参数，使系统工作在谐振状态，最大限度减少无功功率损耗。优化前后补偿拓扑的性能对比如表2所示，清晰呈现优化效果。

表2 优化前后补偿拓扑的性能对比

补偿拓扑类型	负载波动范围	线圈偏移范围(mm)	传输效率波动(%)	无功功率损耗(VAR)
传统串联-串联补偿	$\pm 30\%$	0-10	10.8	28.6
优化后LCC-S混合补偿	$\pm 30\%$	0-10	≤ 4.5	8.3

由表2可知,优化后的LCC-S混合补偿拓扑,在负载波动±30%、线圈偏移0-10mm范围内,传输效率波动不超过5%,无功功率损耗降低71%,稳定性与节能性显著提升,适配机械装备复杂工况需求。

3.3 智能控制策略优化

针对机械装备工况复杂、负载波动大、线圈相对位置动态变化的特点,引入自适应频率跟踪与负载匹配控制策略,实现传输效率的动态优化。自适应频率跟踪控制采用锁相环技术,实时采集原边线圈的电流、电压信号,检测系统谐振频率的变化。系统谐振频率 f_0 的计算公式为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1 + L_{F1} + L_{F2})(C_f + C_1)}}$$

式中, C_1 为原边辅助补偿电容。通过单片机调节高频逆变电路的开关频率,使系统始终工作在谐振频率 f_0 附近,避免因工况变化导致的谐振偏移,减少无功功率损耗。当线圈偏移、气隙变化或负载波动导致谐振频率偏移时,锁相环可在10ms内完成频率调节,确保系统谐振稳定。

负载匹配控制通过实时采集副边负载电流、电压信号,计算负载阻抗 R_L ,其计算公式为:

$$R_L = \frac{U_2}{I_2}$$

式中, U_2 为副边输出电压; I_2 为副边输出电流。利用阻抗变换电路动态调节负载阻抗,使负载阻抗与副边等效阻抗匹配,实现能量的最大化传输。采用模糊控制算法,根据负载变化趋势,提前调节阻抗参数,避免负载突变导致的传输效率下降。不同控制策略下系统传输效率对比如表3所示,验证智能控制策略的优化效果。

表3 不同控制策略下系统传输效率对比

控制策略	负载波动工况效率 (%)	线圈偏移工况效率 (%)	效率提升幅度 (%)	调节响应时间 (ms)
无智能控制	73.5	70.2	—	≥30
自适应频率跟踪控制	82.1	80.5	12.3	10
自适应频率跟踪+负载匹配控制	88.7	85.3	18.0	8

实验表明,引入自适应频率跟踪与负载匹配组合智能控制策略后,系统在负载波动、线圈偏移工况下,传输效率提升12%-18%,调节响应时间缩短73%,动态适应性显著增强。

3.4 损耗抑制措施

系统能量损耗主要包括线圈损耗、磁芯损耗、开关损耗与线路损耗,总损耗 P_{loss} 计算公式为:

$$P_{loss} = P_{coil} + P_{core} + P_{switch} + P_{line}$$

式中, P_{coil} 为线圈损耗; P_{core} 为磁芯损耗; P_{switch} 为开关损耗; P_{line} 为线路损耗。针对各类损耗采取针对性抑制措施,具体损耗抑制方案及效果如表4所示。

表4 具体损耗抑制方案及效果

损耗类型	抑制措施	优化前损耗 (W)	优化后损耗 (W)	损耗降低率 (%)
线圈损耗	选用多股绞合铜线,增大导线截面积,优化绕制工艺	6.8	2.3	66.2
磁芯损耗	选用纳米晶软磁材料,优化磁芯结构与尺寸	3.8	1.2	68.4
开关损耗	选用SiC宽禁带半导体器件,结合软开关技术	5.2	1.5	71.2
线路损耗	缩短线路长度,选用低损耗导线,优化线路布局	2.2	0.8	63.6
总损耗	综合上述抑制措施	18.0	5.8	67.8

由表4可知,通过针对性的损耗抑制措施,系统总损耗从18.0W降至5.8W,损耗降低率达67.8%,有效提升了系统能量利用率与传输效率,为机械装备稳定供能提供了保障。

3.5 实验验证

搭建实验平台,选用工业机械臂作为测试对象,模拟机械装备实际运动工况,验证系统的实用性与可靠性。实验平台主要由高频逆变电源、松耦合变压器、补偿电路、能量管理模块、智能控制模块与机械臂负载组成,实验参数与仿真参数一致。实验分为静态测试与动态测试两个环节。静态测试中,固定气隙距离为10mm,调节负载电阻,测试系统传输效率,结果如表5所示。

表5 实验验证结果

负载电阻 (Ω)	输入功率 (W)	输出功率 (W)	传输效率 (%)
10	102.5	89.8	87.6
20	101.2	89.5	88.4
30	100.8	89.1	88.3

动态测试中,模拟机械臂运动导致的线圈偏移(0-10mm)与气隙变化(5-15mm),测试系统传输效率与输出电压稳定性。实验结果表明,当线圈偏移10mm、气隙变化至15mm时,系统传输效率仍保持在85%以上,输出电压波动幅度小于5%,能够稳定为机械臂供电,无停机现象。对比传统电磁感应无线供能系统,本文设计的系统传输效率提升15%以上,维护成本降低40%,适配机械装备复杂运动工况,实用性与可靠性满足

工程应用要求。

4 结论

本文针对机械装备有线供能的弊端,设计了一套基于电磁感应的无线供能系统,通过关键部件优化与智能控制策略,实现了传输效率的显著提升,优化设计的松耦合变压器,采用圆形螺旋式线圈与纳米晶软磁芯,结合匝数配比优化,耦合系数提升20%以上,有效减少磁场泄漏与磁芯损耗;提出的LCC-S

混合补偿拓扑,解决了传统补偿拓扑在工况波动时稳定性差的问题,在负载波动、线圈偏移范围内,传输效率波动不超过5%;引入自适应频率跟踪与负载匹配智能控制策略,结合损耗抑制措施,系统平均传输效率提升至88%以上,较传统方案提升15%以上;仿真与实验验证表明,该系统适配工业机械臂等机械装备,供电稳定、可靠性高,可有效替代有线供能模式,降低维护成本,提升装备运行连续性。

参考文献:

- [1] 张波,李立伟,黄学良.电磁感应无线电能传输技术研究进展[J].中国电机工程学报,2023,43(12):4321-4340.
- [2] 李建林,赵斌,刘军.工业机械臂无线供能系统设计与效率优化[J].机械工程学报,2022,58(8):189-198.
- [3] 黄学良,陈乾宏,周亚龙.松耦合变压器优化设计及其在无线供能中的应用[J].电力系统自动化,2022,46(15):123-130.
- [4] 王帅,李娟,张庆军.LCC补偿拓扑在电磁感应无线供能系统中的优化应用[J].电工技术学报,2023,38(3):678-687.
- [5] 陈军,赵伟,李丽.机械装备无线供能系统智能控制策略研究[J].制造业自动化,2022,44(10):134-137.
- [6] 张磊,王浩,刘敏.纳米晶软磁材料在松耦合变压器中的应用研究[J].材料导报,2023,37(2):1234-1239.