

子母弹线圈间耦合对无线传输效率的影响

杨刚¹, 王利¹, 屈玉堂²

(1. 中北大学 机电工程学院, 太原 030051; 2. 四川华川工业股份有限公司, 成都 610100)

摘要: 在子母弹无线能量传输系统中, 各个线圈间交叉耦合, 使系统传输效率受到影响; 通过建立并联谐振无线能量传输系统模型, 在子弹线圈组间耦合很小的情况下, 分析各个线圈间耦合对系统传输效率的影响, 得到在最大传输效率时子弹线圈的频率条件; 最后通过实验对推导公式呈现出的子弹线圈频率偏移方向, 以及线圈间耦合对系统传输效率的影响进行了验证; 结果表明, 在对多个子弹线圈进行无线能量传输时, 达到最大传输效率时子弹线圈的频率高于初始谐振频率; 当子弹线圈与母弹线圈间距较大时, 应采用多个母弹线圈对其传输能量; 并且减小子弹和母弹线圈间距, 可以提高系统最大传输效率。

关键词: 一对多; 无线能量传输; 并联谐振; 传输效率; 电磁耦合

Effect of Intercoil Coupling of Submunitions on Wireless Transmission Efficiency

YANG Gang¹, WANG Li¹, QU Yutang²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Sichuan Huachuan Industrial Co., Ltd., Chengdu 610100, China)

Abstract: In the wireless energy transmission system of submunitions, there is the influence of coupling between coils on the transmission efficiency of the system. By establishing a parallel resonant wireless energy transmission system model, the coupling influence between bullet coils on the transmission efficiency of the system is analyzed with the minimal coupling between bullet coils, and the frequency condition of bullet coils is obtained at the maximum transmission efficiency. Finally, the influence of the bullet coil frequency offset direction and coil coupling on the transmission efficiency of the system is verified by the experiments. The results show that when the maximum transmission efficiency is reached, the frequency of the bullet coils is higher than the initial resonant frequency. With the large distance between the bullet coil and the mother round coil, the multiple mother round coils is used to transmit the energy. And the maximum transmission efficiency of the system can be improved by reducing the coil distance between the bullet and the mother round coils.

Keywords: one-to-many; wireless energy transmission; parallel resonance; transfer efficiency; electromagnetic coupling

0 引言

随着科技的进步, 当前的武器技术已经取得重大突破, 过去的子母弹是在母弹中装有数个小型子弹, 母弹到达指定位置时将子弹抛撒, 这些子弹便可自动散布, 实现快速、强力的打击。现在的子母弹更智能化, 它可以通过 GPS 定位、激光定位、精确制导等技术, 实现更快更准的打击, 从而更有效地摧毁敌人。

目前, 为使子母弹更加符合现代军事的实际需求, 子母弹子弹引信从机械引信转变为电子引信。子弹电子引信通过母弹无线能量发射装置对其无线充电或通过引信内置电源供电获得能量。但在子母弹发射前, 从引信安全性方面考虑, 采用无线能量传输的方式获得电能要更加安全。

国内方面, 李立江^[1]将 4 个接收线圈放置在同一平面, 发射线圈在接收线圈垂直距离 4 cm 处, 当系统满载工

作时, 4 个接收端以 72% 的效率接收发射线圈传递的能量。张鸣^[2]采用接力式一对多无线能量传输系统, 发现随着线圈间距的增加两接收线圈间的电流不断降低。马少杰等人通过 ANSYS 软件模拟, 对影响感应装定的因素进行了分析, 得出电压频率为谐振频率时, 传输效率最好, 发射线圈与接收线圈之间空气间隙越小, 传输效率越好^[3]。在文献 [4] 中, 蔡位焜提出在单能量发射线圈对多能量接收线圈的无线电能传输系统中, 接收端数量较多时, 能量接收线圈间的距离很小, 因此多个能量接收线圈产生的磁场在线圈周围相互耦合, 影响系统的电磁场分布。能量接收线圈上除了与发射线圈相互耦合产生的感应电压外, 还叠加了其他接收线圈交叉耦合产生的感应电压, 导致能量接收线圈的谐振频率发生偏移, 使系统的能量传输效率下降。张旺^[5]提出可以通过增加接收线圈的间距或者采用高导磁物质对子弹线圈进行隔离, 以此来提高系统传输

收稿日期: 2023-09-12; 修回日期: 2023-09-21。

作者简介: 杨刚(1999-), 男, 硕士。

通讯作者: 王利(1967-), 男, 博士, 教授。

引用格式: 杨刚, 王利, 屈玉堂. 子母弹线圈间耦合对无线传输效率的影响[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(4): 257-263.

效率。

国外方面, Kim 等人^[6]建立发射线圈电路与阻抗匹配网络分析模型, 考虑了线圈间的交叉耦合效应, 调节匹配的阻抗, 从而达到更好的效果。Cui 等人^[7]对两个接收线圈间的交叉耦合进行了深入的探讨, 并与没有交叉耦合效应的两接收线圈无线能量传输系统比较, 提出了一种可以有效抵抗耦合效应的系统模型。Dukju 等人^[8]对具有多能量发射装置或多能量接收装置的系统进行研究后得出, 在有限空间内有多个能量发射装置或接收装置时, 能量发射装置或接收装置的谐振频率会由于它们之间的耦合发生变化。日本东京大学 Yoichi Hori 教授带领的研究小组^[9]主要针对次级侧直流/直流变换器产生的系统影响, 提出了次级侧最大效率控制方式。该方法通过初级侧的等效阻抗推算线圈间的耦合系数, 通过耦合系数改变对应的占空比从而实现整体系统的最大效率传输。并且通过对无线能量传输系统等效电路以及其中纽曼公式的探究, 讨论了圆形线圈的电感传输相关规律, 分析了传输距离变化时线圈的对应耦合特性, 以此归纳了通过传输距离改变而改善整体系统效率的设计方法。

因此本文对子母弹无线能量发射装置对子弹引信的能量传输进行研究, 分析线圈间耦合对能量传输效率的影响, 并提出改进方案来提高母弹与子弹间无线能量传输效率。

1 多子弹无线能量传输系统

在子母弹无线能量传输系统中, 并不是单母弹能量发射装置对单子弹能量接收装置的能量传输, 而是单母弹发射装置对多个子弹接收装置的能量传输。所以将单母弹能量发射装置对多子弹能量接收装置的无线电能传输系统应用到子母弹引信上, 实现母弹对多个子弹的能量传输。

无线能量传输方式有磁感应耦合式、电场耦合式、谐振耦合式、微波辐射式和激光式。磁感应耦合式无线能量传输需要发射端和接收端间距很小, 能量收发线圈间的耦合系数较高, 并且对能量收发线圈位置的偏移对传输效率的影响明显; 而电场耦合式无线能量传输因其电场泄露远比磁场泄露对人体危害大, 所以电场耦合式并没有磁场耦合式使用范围广泛; 磁谐振耦合式无线能量传输可以高功率、高效率的传输, 并且该方式中能量转化只在能量发射端和接收端之间进行^[10-11]; 微波辐射式的无线能量传输由于其传输功率小, 微波辐射危害较大, 因此其应用场景较小; 而激光式的无线能量传输方式由于其方向性强、能量密度高、频率高, 因此在能量传输过程中的衰减也更大^[12-13]。

在子母弹中, 子母弹内部排列方式有子弹沿母弹轴向排列和子弹沿母弹径向方向排列两种排列方式, 子母弹内部排列方式如图 1 所示。在母弹发射之前, 由于子弹在母弹内部数量较多且排列复杂, 子弹能量接收线圈与母弹能量发射线圈之间不能达到高耦合状态, 因此基于上述磁谐振耦合式无线能量传输的优势, 选择磁谐振耦合式无线能

量传输的方式来完成母弹对子弹的能量传输。在子母弹发射后, 母弹到达预定的开舱位置, 中心药管被引燃, 随后将子弹推出母弹弹体^[14]。

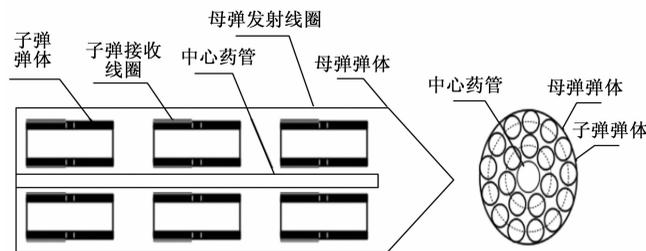


图 1 子母弹结构

磁耦合谐振式作为无线能量传输技术的一种, 它的工作机理是在两个同一谐振频率的振荡器, 相距一定距离, 通过场的耦合来激起谐振, 从而实现能量之间的传输, 其中能量是以中高频磁场为介质进行传递。磁耦合谐振的中心思想就是相同谐振频率的两个物体, 它们之间通过耦合产生谐振并将能量快速进行交换, 不同谐振频率的两物体之间的耦合效应较差。磁谐振耦合无线能量传输模型基本工作原理: 用逆变电路将直流电源提供的直流电转换为系统所需频率的交流电, 然后经过谐振电路提供给能量发射线圈, 能量发射线圈将电能转换为磁能来进行传输, 在线圈磁谐振耦合的影响下, 能量接收线圈将能量发射线圈所产生的磁能再一次转换成电能, 通过谐振电路和滤波整流电路, 进而将电能提供给负载^[15-16]。

2 多子弹无线传输系统建模分析

多子弹无线能量传输系统可以看成母弹的能量发射装置将能量传输到子弹能量接收装置, 对该系统进行互感电路理论分析, 建立能量收发系统等效电路模型, 将能量收发线圈间的能量传输与互感结合起来, 利用基尔霍夫定律, 求解系统电路模型。目前, LC 谐振电路是最常见的谐振电路, 该系统由线圈 L 与谐振电容 C 构成^[17-18], 如图 2 所示, 按照电容与电感的连接方式, 可以将其分成两种类型, 分别是串联谐振电路和并联谐振电路, 图中 R 为线圈内阻。

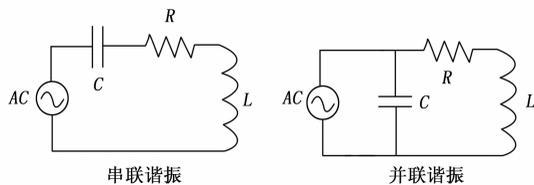


图 2 LC 谐振电路

串联谐振时电感线圈与谐振电容上是高电压, 并联谐振时流过电感线圈与谐振电容的电流是大电流。根据电磁感应原理和安培环路定律, 能量发射线圈中流过的电流越大, 产生的磁场越强, 接收线圈内磁通量的变化越大, 接收线圈的感生电动势越大, 所以在发射端采用并联谐振。对于接收端电路, 当接收端负载阻值较大时选择并联谐振

电路, 负载阻值较小时选择串联谐振电路^[19-20]。实验时接收端负载阻值较高, 因此接收端采用并联谐振电路。

由图 1 可以看出, 在子弹内部径向方向子弹以同心圆方式排列多圈, 沿母弹轴向方向可以放置多层子弹, 因此先对单子弹线圈对单子弹线圈能量传输的情况进行分析, 进而分析单子弹线圈对两层子弹线圈的能量传输, 最后研究在子弹的无线能量传输中线圈间耦合对系统传输效率的影响。

2.1 单子弹线圈对单子弹接收线圈的能量传输

图 3 显示了单子弹线圈对单子弹线圈并联谐振能量传输的理论模型, 子弹线圈在母弹线圈内部放置, 两线圈在同一水平面上, 并且间距很小。从图 3 所示的理论模型出发, 分析影响系统传输效率的因素, 推导出系统传输效率最大时子弹线圈的频率条件。

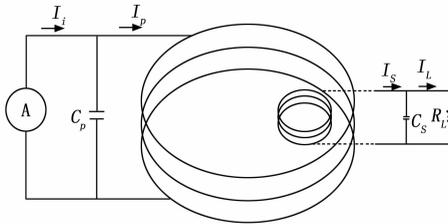


图 3 单子弹线圈对单子弹线圈能量传输

在该理论模型中, 激励电流源频率为 ω , 母弹线圈谐振频率为 ω_p , 且最大传输效率下的子弹线圈频率为 ω_s 。k 为母弹和子弹线圈之间的耦合系数。

接收端负载消耗的功率与电源提供的总功率之间的比率定义为能量传输效率 η :

$$\eta = \frac{|U_2|^2/R_L}{\left(\frac{1}{R_{sp}} + \frac{1}{R_s}\right)|U_1|^2 + \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_{rp}}\right)|U_2|^2} = \frac{1/R_L}{\frac{1}{R_{sp}} + \frac{1}{R_s} + \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_{rp}}\right)|U_2/U_1|^2} \quad (1)$$

式中, R_s 和 R_L 分别为电源内阻和负载电阻, R_{sp} 和 R_{rp} 为母弹和子弹线圈的内阻, U_1 和 U_2 是母弹线圈和子弹线圈的均方根电压相量, $|U_2|^2/R_L$ 是在负载中消耗的功率, $\left(\frac{1}{R_{sp}} + \frac{1}{R_s}\right)|U_1|^2$ 是母弹发射端电流源和线圈内阻中消耗的功率, $\left(\frac{1}{R_{rp}} + \frac{1}{R_L}\right)|U_2|^2$ 是子弹接收端负载和线圈内阻中消耗的功率。由式 (1) 可以看出, 要提高系统传输效率, 需使 $|U_2/U_1|$ 值最大, 进而找到最大传输效率的频率条件。理论研究时不考虑电流源内阻以及线圈内阻的影响。

根据图 3 中的并联谐振磁耦合无线能量传输模型, 接收端流经线圈的电流为:

$$I_s = \frac{j\omega MI_p}{Z_s} \quad (2)$$

接收端总阻抗为:

$$Z_s = j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{R_L}} \quad (3)$$

根据基尔霍夫定律, 图 3 中母弹和子弹的线圈两端电压为:

$$U_1 = j\omega L_p I_p - j\omega M I_s \quad (4)$$

$$U_2 = j\omega M I_p - j\omega L_s I_s \quad (5)$$

其中: $M = k \sqrt{L_p L_s}$, M 为线圈互感, 通过式 (4) 和 (5) 可得:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{MR_L}{\frac{\omega_s^2}{\omega^2}(k^2 L_p R_L - L_p R_L) + R_L L_p + j\omega L_p L_s - j\omega M^2} \quad (6)$$

对式 (6) 求模, 再求其极值, 可得传输效率最大时电流源频率 ω 与子弹线圈频率 ω_s 的关系为:

$$\omega = \frac{\omega_s}{\sqrt{1-k^2}} \quad (7)$$

由式 (1) 可以看出, 当 $|U_2/U_1|$ 值增大时, 系统总传输效率 η 增大, 因此将式 (7) 代入式 (6) 中, 再取其模值, 得到 $|U_2/U_1|$ 与线圈间耦合系数 k 的关系为:

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{R_L \sqrt{L_p L_s}}{1 - k^2 \omega L_p L_s} \quad (8)$$

由式 (7) 可得, 在最大传输效率的条件下, 子弹线圈频率发生偏移, 由于线圈间耦合系数大于 0 小于 1, 因此子弹线圈频率往高偏移, 偏移量的大小与线圈间耦合系数 k 有关。在式 (8) 中, 当线圈间耦合系数 k 增大时, $|U_2/U_1|$ 值增大, 进而系统最大传输效率提高。

2.2 单子弹线圈对多层子弹线圈的能量传输

在子弹中, 由于沿母弹轴向有多层子弹, 因此先对单子弹线圈对两层子弹线圈的能量传输情况进行分析。理论分析模型如图 4 所示, 子弹线圈在母弹线圈内部紧密放置, 并且与母弹线圈距离很近。

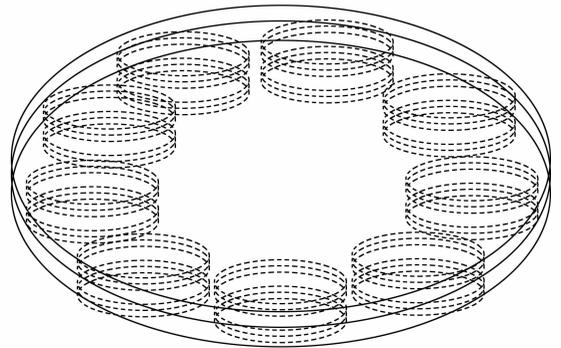


图 4 单子弹线圈对两层子弹线圈模型

2.2.1 单子弹线圈对一组子弹线圈的能量传输

为研究沿母弹轴向两层子弹的无线充电, 先取出一组同轴线排列的两个子弹线圈进行分析, 如图 5 所示。只考虑该组内两个子弹线圈间耦合和子弹与母弹线圈间耦合, 分析影响系统传输效率的因素, 推导出系统传输效率最大

时子弹线圈的频率条件。

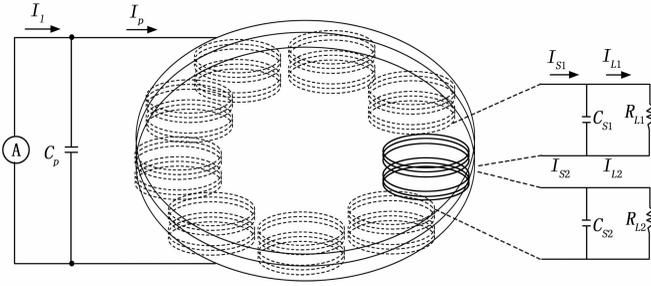


图 5 单子弹线圈对一组子弹线圈模型

在图 5 所示的理论模型中，激励电流源频率为 ω ，母子弹线圈谐振频率为 ω_p ，且最大传输效率时子弹线圈频率为 ω_{s1} 和 ω_{s2} 。设两个子弹接收端性能参数完全相同，此时 $L_{s1} = L_{s2}$ ， $C_{s1} = C_{s2}$ ， $R_{l1} = R_{l2}$ ， $Z_{s1} = Z_{s2}$ ， $I_{s1} = I_{s2}$ ， $\omega_{s1} = \omega_{s2}$ 。两个子弹线圈之间耦合系数为 k_1 ，母弹和子弹线圈之间的耦合系数为 k ， M_1 为两个子弹线圈间的互感系数， M 为母弹和子弹线圈间的互感系数。设 U_1 和 U_2 是母子弹线圈和子弹线圈的均方根电压相量， R_s 和 R_L 分别为电源内阻和负载电阻， R_{sp} 和 R_{rp} 为母弹和子弹线圈的内阻。该系统总传输效率 η 可表示为：

$$\eta = \frac{2 |U_2|^2 / R_{l1}}{\left(\frac{1}{R_{sp}} + \frac{1}{R_s}\right) |U_1|^2 + 2\left(\frac{1}{R_{l1}} + \frac{1}{R_{rp1}}\right) |U_2|^2} = \frac{2/R_{l1}}{\frac{1}{R_{sp}} + \frac{1}{R_s} + \frac{2}{|U_2/U_1|^2} + 2\left(\frac{1}{R_{l1}} + \frac{1}{R_{rp1}}\right)} \quad (9)$$

在图 5 所示的并联谐振磁耦合无线能量传输理论模型中，子弹接收端流经线圈的电流为：

$$I_{s1} = \frac{j\omega M I_p - j\omega M_1 I_{s1}}{Z_{s1}} \quad (10)$$

单个子弹接收端的总阻抗为：

$$Z_{s1} = j\omega L_{s1} + \frac{1}{j\omega C_{s1} + \frac{1}{R_{l1}}} \quad (11)$$

根据基尔霍夫定律，图 5 中母弹和子弹线圈两端电压为：

$$U_1 = j\omega L_p I_p - j\omega M I_{s1} - j\omega M I_{s1} \quad (12)$$

$$U_2 = j\omega M I_p - j\omega L_{s1} I_{s1} - j\omega M_1 I_{s1} \quad (13)$$

由式 (12) 和 (13) 的比值可得：

$$\frac{U_2}{U_1} = (kR_L \sqrt{L_p L_{s1}}) / [2 \frac{\omega^2}{\omega_{s1}^2} k^2 R_L L_p - (1+k_1) \frac{\omega^2}{\omega_{s1}^2} R_L L_p + R_L L_p + j\omega(1+k_1)L_p L_{s1} - 2j\omega k^2 L_p L_{s1}] \quad (14)$$

对式 (14) 求模，再求其模的极值，可得传输效率最大时 ω_{s1} 与 ω 的关系为：

$$\omega = \frac{\omega_{s1}}{\sqrt{1-2k^2+k_1}} \quad (15)$$

与单子弹线圈对单子弹线圈的能量传输一样，在上述能量传输系统中，当 $|U_2/U_1|$ 值增大时，系统总接收效率

η 增大，将式 (15) 代入式 (14) 中，再取其模值，可以得到 $|U_2/U_1|$ 值与母弹和子弹线圈间耦合系数 k 和子弹线圈间耦合系数 k_1 的关系：

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{R_{l1}}{k} \frac{1}{\sqrt{1+k_1-2k^2}} \omega \sqrt{L_p L_{s1}} \quad (16)$$

由式 (16) 可以看出，当 k_1 值不变，减小 k 值时，系统最大传输效率降低。

2.2.2 单子弹线圈对多组子弹线圈的能量传输

当选择图 6 中的两组子弹线圈进行分析时，设 4 个子弹接收端性能参数完全相同，并且两组线圈间距离相对较远，组间线圈耦合很小。

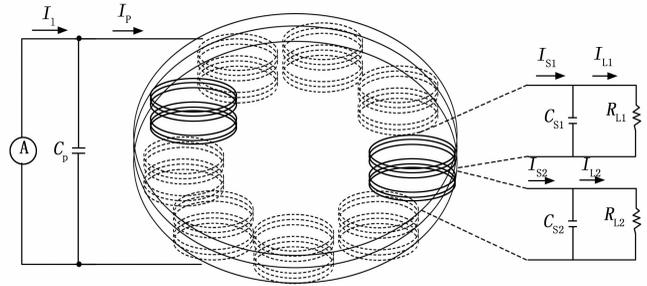


图 6 单子弹线圈对两组子弹线圈模型

此时图 6 中系统总传输效率 η 为：

$$\eta = \frac{4 |U_2|^2 / R_{l1}}{\left(\frac{1}{R_{sp}} + \frac{1}{R_s}\right) |U_1|^2 + 4\left(\frac{1}{R_{l1}} + \frac{1}{R_{rp1}}\right) |U_2|^2} = \frac{4/R_{l1}}{\frac{1}{R_{sp}} + \frac{1}{R_s} + \frac{4}{|U_2/U_1|^2} + 4\left(\frac{1}{R_{l1}} + \frac{1}{R_{rp1}}\right)} \quad (17)$$

在两组子弹线圈中每个接收端流经线圈的电流和单个接收端的总阻抗的表达式与式 (10) 和式 (11) 相同。但根据基尔霍夫定理，母弹和子弹线圈两端电压变为：

$$U_1 = j\omega L_p I_p - 4j\omega M I_{s1} \quad (18)$$

$$U_2 = j\omega M I_p - j\omega L_{s1} I_{s1} - j\omega M_1 I_{s1} \quad (19)$$

此时，在传输效率最大时单个子弹线圈频率 ω_{s1} 与母子弹线圈驱动频率 ω 的关系为：

$$\omega = \frac{\omega_{s1}}{\sqrt{1-4k^2+k_1}} \quad (20)$$

因此，当对 n 组间耦合很小的子弹线圈进行能量传输时，最大传输效率时子弹线圈频率 ω_{s1} 与母子弹线圈驱动频率 ω 的关系为：

$$\omega = \frac{\omega_{s1}}{\sqrt{1-2nk^2+k_1}} \quad (21)$$

此时， $|U_2/U_1|$ 与母弹和子弹线圈间耦合系数 k 和子弹线圈间耦合系数 k_1 的关系为：

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| = \frac{R_{l1}}{k} \frac{1}{\sqrt{1+k_1-2nk^2}} \omega \sqrt{L_p L_{s1}} \quad (22)$$

由式 (21) 可知, 在子弹线圈组间耦合影响很小的条件下, 当单子弹线圈对多组同轴放置的子弹线圈进行能量传输时, 在最大传输效率时子弹线圈的频率发生偏移, 偏移的大小和方向与同一组内两个子弹线圈之间的耦合系数 k_1 、母弹和子弹线圈之间的耦合系数 k 有关。由式 (22) 可以看出当 k 与 k_1 值不变, 并且 $n < \frac{1+k_1}{2k^2}$ 时, 增加线圈组数 n , 系统最大传输效率增加。

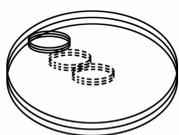
3 实验验证

在上述理论研究的基础上, 设计了一套原理样机, 母弹线圈缠绕在直径 254 mm 的 PVB 管外壁, 模拟母弹发射装置, 母弹发射端驱动频率为 120 kHz; 子弹线圈缠绕在直径 63 mm 的 PVB 管外壁, 模拟子弹接收装置。子弹模拟装置紧贴母弹模拟装置内壁放置, 原理样机如图 7 所示。



图 7 原理样机实物图

1) 线圈间距对耦合系数的影响实验。实验先将子弹线圈紧贴母弹模拟装置内壁放置, 并与母弹线圈在同一水平面, 如图 8 (a) 所示。实验中将子弹线圈逐渐向母弹中心轴移动, 在紧贴母弹内壁时、子弹线圈在母弹 1/2 半径时和子弹线圈在母弹线圈中心时线圈间耦合系数如表 1 所示。其次, 实验将两同轴放置的子弹线圈紧贴母弹模拟装置内壁, 如图 8 (b) 所示。实验中沿子弹线圈轴线方向拉大线圈间距, 不同距离下子弹线圈间耦合系数 k_1 和子弹与母弹线圈间耦合系数 k 如表 2 所示。



(a) 母弹和子弹线圈间耦合系数测量模型



(b) 同轴放置的子弹线圈间耦合系数测量模型

图 8 线圈摆放位置

表 1 子弹线圈向母弹中心轴移动时线圈间耦合系数

线圈间距离/mm	线圈间耦合系数
3	0.110 5
63.5	0.064 7
127	0.052 1

表 2 增加同轴放置的子弹线圈间距时线圈间耦合系数

线圈间距离/mm	子弹线圈间耦合系数	子弹与母弹线圈间耦合系数
10.00	0.251	0.085 7
13.32	0.211	0.081 0
16.64	0.175	0.076 2
19.96	0.147	0.071 5

由表 1 可知, 当子弹线圈逐渐向母弹中心轴移动时, 线圈间耦合系数逐渐降低。由表 2 可知, 当逐渐拉大两子弹线圈间距时, 子弹线圈间耦合系数 k_1 和子弹与母弹线圈间耦合系数 k 都逐渐降低。

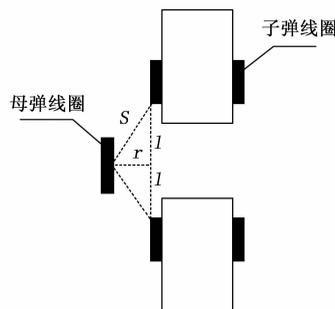


图 9 线圈间位置关系图

为探究子弹线圈与母弹线圈间水平距离对系统最大传输效率的影响, 建立如图 9 所示的同轴放置的子弹线圈与母弹线圈间位置关系模型。设同轴放置的两子弹线圈间距为 $2l$, 母弹和子弹线圈间距离为 s , 子弹与母弹线圈的径向距离为 r , 则有:

$$k \propto \frac{a}{s}, k_1 \propto \frac{b}{2l}, s^2 = r^2 + l^2$$

其中: a, b 为常数, 将其代入式 (16), 可得:

$$\left| \frac{U_2}{U_1} \right| \propto \frac{1}{\frac{\sqrt{r^2+l^2}}{a} + \frac{b}{2a} \sqrt{\frac{r^2}{l^2} + 1} - 2 \frac{a}{\sqrt{r^2+l^2}}}$$

将 l 值与 r 值代入上式, 可得当 l 增加时, k_1 值减小, 值降低, 进而系统最大传输效率降低。

2) 单子弹线圈最大传输效率时频率的偏移实验。原理样机如图 10 所示, 子弹线圈紧贴母弹内壁放置。根据谐振频率公式 $f = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$, 实验中通过改变子弹线圈谐振电容值来调整子弹线圈频率, 频率调整区间为 115~123 kHz, 母弹线圈驱动频率不变, 最后测量并计算系统总传输效率。实验测量数据如表 3 所示, 频率偏移如图 11 所示。



图 10 母弹线圈对单子弹线圈能量传输

表 3 单母弹线圈对子弹线圈能量传输实验数据表

子弹线圈频率/kHz	总接收效率/%	子弹线圈频率/kHz	总接收效率/%
115.272	15.84	119.212	16.73
115.811	15.27	119.808	16.18
116.358	14.84	120.413	15.52
116.912	14.15	121.028	14.65
117.475	12.94	121.652	13.86
118.045	12.34	122.286	13.27
118.624	11.78	122.930	12.63

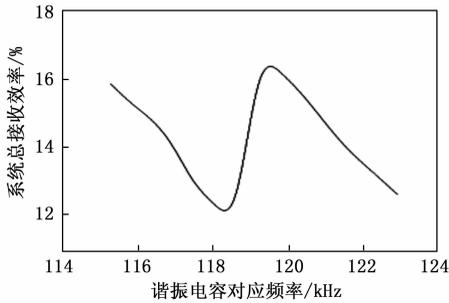


图 11 子弹线圈频率偏移图

可以看出当母弹线圈驱动频率不变时，最大传输效率时子弹线圈的频率为 119.212 kHz，该频率低于系统谐振频率 120 kHz，即最大传输效率时子弹线圈的频率往低偏移，结果和公式 (7) 的偏移方向一致。

3) 两同轴放置的子弹线圈最大传输效率时频率的偏移实验。原理样机如图 12 所示，将两子弹线圈同轴放置，并紧贴母弹模拟装置内壁。实验时母弹线圈驱动频率不变，通过调整子弹线圈谐振电容容值将子弹线圈频率在 117~133 kHz 区间内进行调整，测量并计算子弹线圈在不同频率时的系统总传输效率。实验测量数据如表 4 所示。



图 12 单母弹线圈对一组同轴放置的子弹线圈能量传输

表 4 不同子弹线圈频率时系统总传输效率

子弹线圈频率/kHz	117.873	120	124.721	126.099
系统传输效率/%	0.48	2.13	3.30	5.03
子弹线圈频率/kHz	127.524	128.998	131.309	132.920
系统传输效率/%	6.34	7.06	11.76	16.48

由表 4 可知：同轴放置的两个子弹线圈，当母弹线圈驱动频率不变，最大传输效率时子弹线圈频率往高偏移，与式 (15) 的偏移方向一致。

4) 线圈间耦合 k 和 k_1 对两同轴放置的子弹线圈最大传输效率的影响实验。在实验 3 对子弹线圈频率调整后的基础上，先将该组线圈逐渐向母弹线圈中心轴移动，此时子弹和母弹线圈间耦合系数 k 减小，子弹线圈间耦合系数 k_1 不变，测量并计算总传输效率如表 5 所示；其次将该组线圈紧贴母弹内壁放置，随后将两子弹线圈沿子弹轴线方向逐渐拉大线圈间距，此时线圈间耦合系数 k 和 k_1 都逐渐减小，测量并计算总接收效率如表 6 所示。

表 5 子弹线圈向母弹线圈中心轴移动时的传输效率

子弹线圈位置	紧贴母弹装置内壁	距离母弹线圈 1/4 直径	母弹线圈中心
总传输效率/%	18.17	15.12	10.12

表 6 拉大子弹线圈间距时的传输效率

子弹线圈间距/mm	10	13.2	16.4	19.6	80
总传输效率/%	13.65	13.67	13.31	9.61	0.99

可以看出，当母弹线圈驱动频率不变，减小 k 值而 k_1 值不变时，系统最大传输效率降低；减小 k_1 的值时， k 值缓慢减小，系统最大传输效率降低。该变化趋势与式 (16) 中 k 和 k_1 对系统最大传输效率的影响一致。

5) 多组同轴放置的子弹线圈在最大传输效率时频率的偏移实验。原理样机如图 13 所示，在实验中子弹线圈组数分别为二组、三组、四组、五组和六组，子弹线圈组紧贴母弹装置内壁放置，并且相邻的线圈组间距相同。通过改变子弹线圈谐振电容容值将每个子弹线圈的频率在 119~137 kHz 区间内调整，每个子弹线圈调整的频率相同。测量并计算在不同频率下系统总传输效率，绘制总传输效率与子弹线圈不同频率的关系曲线，观察在最大传输效率时子弹线圈频率的偏移大小和方向。实验测量数据如表 7 所示，关系曲线如图 14 所示。

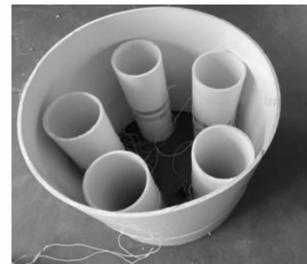


图 13 多组子弹线圈实物图

当母弹线圈驱动频率不变时，由表 12 和图 13 可以看出子弹线圈在最大传输效率时频率往高偏移。当子弹线圈组数为二和三时，组间线圈耦合很小，此时二组和三组总传输效率在 131.309 kHz 附近出现峰值，由实验 3 可知，0—1 组子弹线圈的总传输效率在 132.920 kHz 出现峰值，因此二组和三组子弹线圈总传输效率的峰值频率低于一组子弹线圈总传输效率的峰值频率，该趋势与公式 (21) 中的频

率偏移方向一致。

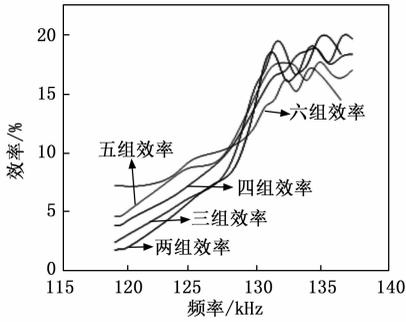


图 14 总传输效率与子弹线圈不同频率关系曲线

表 7 多组子弹线圈不同频率时系统总传输效率

子弹线圈 频率/kHz	2 组传输 效率/%	3 组传输 效率/%	4 组传输 效率/%	5 组传输 效率/%	6 组传输 效率/%
119.034	1.8	2.4	3.84	4.59	7.25
119.628	1.83	2.78	3.83	4.62	7.27
120.000	1.87	3.04	4.36	5.05	7.05
123.387	4.49	5.16	6.11	7.75	7.51
124.721	5.85	6.28	7.28	9.01	9.61
126.806	7.65	7.11	8.96	8.74	9.98
128.259	8.02	9.29	10.69	11.12	10.62
130.525	18.37	16.47	15.49	16.71	14.37
131.309	18.98	20.16	16.8	17.68	14.04
132.107	15.31	18.89	16.69	17.63	17.27
132.920	16.88	15.39	18.52	17.63	14.10
133.748	16.96	19.45	18.53	15.24	17.67
134.592	20.19	18.91	19.31	18.47	16.86
135.452	20.01	17.00	16.64	16.69	15.76
136.329	18.35	18.37	20.56	16.1	14.46

4 结束语

根据理论和实验结果,在子弹中,当子弹线圈对两层子弹线圈进行能量传输时,系统总传输效率为 14%~21%,同实验室之前对单层子弹线圈传输能量的结果相比,对两层子弹线圈的能量传输效率是对单层子弹线圈能量传输效率的 2 倍。当子弹线圈对两层子弹线圈传输能量时,由于同轴放置的子弹线圈相互耦合,使达到最大传输效率时子弹接收线圈频率高于初始谐振频率。由实验可知,当同轴放置的子弹线圈间距为 80 mm 时,系统总传输效率很低,因此在实际子弹装配中,当同轴放置的子弹线圈间距大于 80 mm 时,应在子弹上设置多个发射线圈来为子弹线圈传输能量。在子弹内部,子弹线圈要尽可能紧贴子弹线圈,并且靠近子弹线圈的外圈子弹接收效率要高于内圈子弹接收效率,因此可以通过提高子弹线圈输入功率使内外圈子弹线圈接收到足够的能量。以上实验对电路参数没有进一步优化,下一阶段通过对电路进一步优化,可以提升系统总传输效率。

参考文献:

- [1] 李立江. 基于磁谐振耦合的多中继多接收端无线能量传输技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2019.
- [2] 张 鸣. 基于磁谐振耦合的一对多无线能量传输方案研究 [D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- [3] 马少杰, 张 合, 李长生, 等. 火箭弹引信电磁感应装定仿真分析 [J]. 探测与控制学报, 2008 (2): 68-72.
- [4] 蔡位焜. 多线圈无线电能传输系统关键问题研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [5] 张 旺. 基于感应装定技术的子弹阵型研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [6] KIM J, SON H C, KIM D H, et al. Impedance matching considering cross coupling for wireless power transfer to multiple receivers [C] //2013 IEEE Wireless Power Transfer, Perugia, Italy, 2013: 226-229.
- [7] CUI D, IMURA T, HORI Y. Cross coupling cancellation for all frequencies in multiple-receiver wireless power transfer systems [C] //2016 International Symposium on Antennas and Propagation, Okinawa, Japan, 2016: 48-49.
- [8] AHN D, HONG S. Effect of coupling between multiple transmitters or multiple receivers on wireless power transfer [J]. IEEE Trans. Industrial Electronics, 2013, 60 (7): 2602-2613.
- [9] 李锐杰. 磁耦合谐振式无线电能传输特性研究及优化 [D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [10] 缪远杰. 水下磁耦合谐振式无线能量高效传输技术研究 [D]. 天津: 国家海洋技术中心, 2022.
- [11] 曾昭途. 磁耦合谐振无线电力输送系统评价优化 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2021.
- [12] 屈玉堂. 子弹无线能量传输技术研究 [D]. 太原: 中北大学, 2023.
- [13] 原旭晟. 激光无线能量传输研究及应用 [D]. 天津: 河北工业大学, 2021.
- [14] 孙晓雄. 子弹开舱抛撒机理数值仿真研究 [D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [15] WANG C S, STIELAU O H, COVIC G A. Design considerations for a contactless electric vehicle battery charger [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52 (5): 1308-1314.
- [16] PIIPPONEN K V T, SEPPONEN R, ESKELINEN P. A bio-signal instrumentation system using capacitive coupling for power and signal isolation [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2007, 54 (10): 1822-1828.
- [17] 高 冉. 无线电能传输系统动态分析与特性研究 [D]. 天津: 天津理工大学, 2022.
- [18] 王 磊. 磁耦合谐振式无线能量传输技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [19] 罗昌胜. 磁耦合谐振无线电能传输系统的能效特性分析 [D]. 株洲: 湖南工业大学, 2018.
- [20] 赵文俊. 小型磁耦合无线电能传输关键技术的研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.