

所属类别	2021 年“华数杯”全国大学生数学建模竞赛	参赛编号

电动汽车无线电能优化匹配研究

摘要

为了对电动汽车进行安全、快速、便捷的电能，无线电能逐渐成为电动汽车发展的新方向。本文建立了在电动汽车无线充电过程中无线电能传输效率的数学模型，并给出了优化操作提升无线电能传输效率的可行建议，同时在 MATLAB/Simulink 仿真和 Ansoft 磁仿真中加以验证。

针对问题一，建立了串联-串联补偿结构（PSSS）无线电能传输系统的二端口等效数学模型。通过计算了电压与电流传输函数，从而得到电动汽车无线电能系统发射频率、匹配阻抗与无线电能传输效率的数学模型。之后，基于该模型计算 10 次实验无线充电的电能传输效率，同时通过 MATLAB/Simulink 仿真和 Ansoft 磁仿真验证了数学模型的准确性，并得到随着线圈距离的增加，线圈互感下降，无线电能传输效率降低的结论。

针对问题二，在 Neumann 公式分析了传输距离与线圈互感相互关系的基础上，基于支持向量机和粒子群算法建立了传输距离与线圈的互感之间的数学模型。进而通过问题一模型，获取了电动汽车无线电能系统发射频率、匹配阻抗和传输距离与无线电能传输效率的数学模型。基于改进后的数学模型，计算第 1 次实验中两线圈在不同距离的无线电能传输效率。改进后模型结果与问题一模型对比验证了问题二关于传输距离数学模型无线电能传输效率计算的准确性。

针对问题三，利用问题一的数学模型，针对一般遗传算法容易出现早熟的问题，采用改进的遗传退火算法，在要求约束下进行无线电能传输效率全局最大寻优。在发射频率、匹配阻抗的约束操作下，对样本 1 的无线电能传输效率进行全局最大寻优，记录样本在无线电能传输效率最大的情况下，各优化后操作变量的值。结果发现提高发射频率和匹配阻抗有利于无线电能传输效率增加。最终计算得到的无线电能效率最大值为 67.96%，相比于优化前效率提升约为 50%。

针对问题四，通过物理建模发现偏移距离与线圈互感线性相关，因此问题二中关于无线电能传输效率模型可以被转化为在无线电能传输效率约束下发射频率、匹配阻抗与线圈互感的数学模型。基于问题三中改进的遗传退火算法进行线圈互感全局最小寻优，即对偏移距离的全局最大寻优。此时线圈互感最小的值对应无线充电系统对偏移距离容许的最大值。计算得出，在满足所设效率要求下，互感最小需要大于 27.869 μ H，进一步可知最大偏离应小于 24cm。

关键词：串联-串联补偿结构（PSSS）；无线电能传输效率；支持向量机；粒子群算法；改进遗传退火算法

1 问题重述

1.1 问题背景

电动汽车相对传统汽车效率高，排放少，发展电动汽车产业已然成为我国汽车产业转型发展先机的战略选择，也成为应对日益严峻的能源和环境问题的必由之路。并且电动汽车存在着噪音小、维修方便等优势，也受到消费者的青睐。电动汽车的迅速发展也带来一系列问题，为了对电动汽车进行安全、快速、便捷的电能，无线电能成为发展的方向。但现阶段由于电动汽车厂家众多，无线电能设备与不同生产厂家的电动汽车并不能互联互通，“专车专用”的原则造成了电力资源的极大浪费。因此有必要建立线圈参数与无线电能传输效率的模型，从而对无线电能的非车载部分进行优化，使得无线电能设备与不同生产厂家的电动汽车之间互联互通。

1.2 问题提出

鉴于以上背景，本文需要建立数学模型解决以下问题

问题一：在发射与接收线圈完全谐振的条件下，建立电动汽车无线电能系统**发射频率、匹配阻抗与无线电能传输效率**的数学模型。同时结合附件的相关数据，计算 10 次实验无线电能的电能传输效率。

问题二：不同电动汽车因自身的设计不同，其无线电能车载部分与地面距离可以自主设计，导致两线圈之间的距离发生变化。基于问题一的数学模型，建立**发射频率、匹配阻抗、两线圈距离与无线电能传输效率**的数学模型。在第 1 次实验中两线圈的距离 100mm 变化为 150mm、200mm、250mm 时，比较分析问题一和问题二所建立模型所计算的计算无线电能的电能传输效率。

问题三：通过改变**发射频率、匹配阻抗**可以提升传输效率。需给出在第 1 次实验（两线圈距离固定为 100mm）情况下，通过调整**发射频率、匹配阻抗**使得传输效率达到最大，同时计算传输效率最大值。

问题四：当电动汽车停车进行无线电能时，很难保证发射线圈和接收线圈完全垂直射影重合，总会出现或多或少的偏离，其中线圈半径为 r ，接收线圈（距离发射线圈高 h ）圆心向 X 轴正方向偏离了 a (mm)。基于问题二模型，建立考虑两线圈偏移影响的无限电能传输效率模型。基于重新建立的模型，计算距地面垂直距离 h 为 100mm 时，在最高传输效率大于 80%前提下计算 a 的最大值。

2 问题分析

2.1 问题一分析

为了建立电动汽车无线电能系统无线电能传输效率的数学模型，我们需要计算无限电能过程中输入与输出功率。首先，计算在谐振条件下系统的输入阻抗，从而计算系统的输入功率。其次，计算在谐振条件下无线系统输出功率。基于以上的物理关系建立发射频率、匹配阻抗、两线圈距离与无线电能传输效率的数学模型，以此来评估附件中 10 次实验无线电能的电能传输效率。与此同时，建立相关的仿真模型验证无线电能传输效率的准确性。

2.2 问题二分析

因电动汽车的设计不同，导致无线电能系统两线圈距离发生变化，进而影响两线圈之前的传输效率。耦合线圈的物理机制揭示了两线圈距离将极大的影响耦合线圈之间的互感，而在问题一发现互感是影响传输效率的关键因素之一。因此需要建立两线圈距离

与耦合线圈互感之间的关系，从而在不需要互感条件下，建立发射频率、匹配阻抗、两线圈距离与无线电能传输效率的数学模型。

2.3 问题三分析

无线电能系统的电能传输效率可以通过改变发射频率和匹配阻抗而提升。基于问题 2 所建立的数学模型通过寻优算法探究在可控发射频率和匹配阻抗范围内最大的无线电能传输效率。

2.4 问题四分析

当发射线圈和接收线圈不重合将影响发射线圈和接收线圈之间的互感，从而影响无线电能传输效率。因此需要刻画两线圈偏移量与互感之间的数学模型，从而建立偏移量与无线电能传输效率之间的数学模型。基于此，探究在最低限度的传输效率的前提下，计算两线圈最大的偏移量。

3 模型假设

根据电动汽车无线电能实际情况，针对本题，做出如下假设：

- (1) 发射线圈和接收线圈线路阻抗相同；
- (2) 电源为大电网，电源内阻为 0；
- (3) 忽略整流电路所带来的损耗；

4 主要符号说明

符号	符号说明
k_{12}	电感耦合系数
ω_n	标么化发射频率
ω_o	谐振频率
L_1	发射端电感
L_2	接收端电感
η	无线电能传输效率
G	遗传算法的最大迭代数
p_c	交叉概率
p_m	变异概率
f	种群中个体适应度
P	概率
q	累计概率

5.模型建立与求解

5.1 问题一模型建立与求解

5.1.1 模型建立

(1) RLC 串联谐振电路分析

谐振系统是电动汽车无线电能的核心。由题干可知无线电能系统是由车载部分与非车载部分组成。车载部分由一个 RLC 电路与负载组成，非车载部分由电源和另一个 RLC

电路组成。根据题干无线电能系统结构等效图可以看出，所述 RLC 电路为 RLC 串联谐振电路。RLC 串联谐振电路如下图所示：

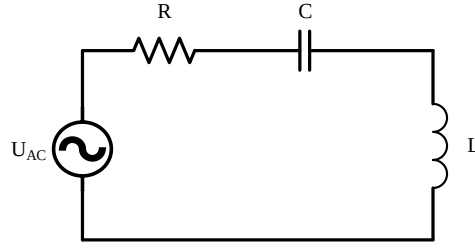


图 1 RCL 串联谐振电路

其中，电阻 R ，电容 C ，电感 L 串联在电路中，交流电源 U_{AC} 频率为 f ，对应角频率为 $\omega=2\pi f$ ，则可得电路阻抗、电流分别为

$$Z = R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (1)$$

$$I_s = \frac{U_{AC}}{R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)} \quad (2)$$

当交流电源频率 $\omega = 1/\sqrt{LC}$ 时，电路发生谐振，此时阻抗呈现纯电阻特性，电路感性无功与容性无功互相抵消。

(2) 谐振式无线电能传输系统分析

为分析无线电能传输系统的传输效率，可将负载的等效电路接于二端口网络的输出端^[1]，即将系统视为一有载二端口网络。二者电磁耦合特性可通过漏感等效模型表述，如图 2 所示。

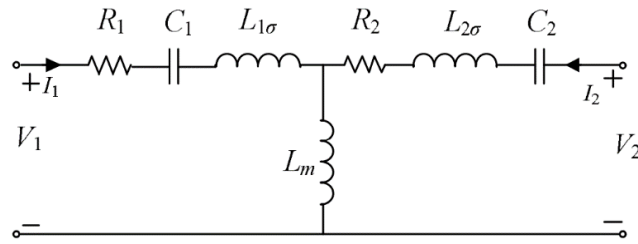


图 2 T 型二端口网络模型

定义有效匝数比，则系统漏感、互感、励磁电抗与电感 $L_{1,2}$ 、匝数比 $n=N_2/N_1$ 、耦合系数 k_{12} 的关系有：

$$\begin{cases} L_{1\sigma} = (1 - k_{12}) L_1 \\ L_m = k_{12} L_1 \\ L_{2\sigma} = (1 - k_{12}) L_2 / n^2 \approx (1 - k_{12}) L_2 / n_e^2 = L_{1\sigma} \end{cases} \quad (3)$$

为研究网络传输问题，可将二者视为一线性无源二端口网络。当选择电流的参考方向为流入二端口网络时，可通过 A 参数建立输出信号与输入信号之间的关系，其传输方程可表示为式(4)：

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ -I_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

为使问题简化,认为该二端口网络具有对称结构,且源、负载线圈与振荡器只通过相邻互感耦合。定义归一化角频率系数 $\omega_n = \omega / \omega_0$, 即实际工作角频率与自然谐振角频率之比, 并取自然谐振角频率 $\omega_0 = 1 / \sqrt{L_1 C_1}$, A 参数可表示为式(5):

$$\begin{cases} A_{11} = \frac{V_1}{V_2} \Big|_{i_2=0} = \frac{1}{k_{12}} \left(1 - \frac{1}{\omega_n^2} - \frac{j}{Q_1} \right) = A_{22} \\ A_{12} = \frac{V_1}{V_2} \Big|_{i_2=0} = \frac{-j\omega L_1}{k_{12}} \left[k_{12}^2 - \left(1 - \frac{1}{\omega_n^2} - \frac{j}{Q_1} \right)^2 \right] \\ A_{21} = \frac{V_1}{V_2} \Big|_{i_2=0} = \frac{1}{j\omega L_1 k_{12}} \end{cases} \quad (5)$$

除负载及振荡器 a_2 电感 L_2 外, 电路可表示为由电压源 V_{eq} 及等效阻抗 Z_{eq} 组成的戴维南等效电路。其中 I_{eq} 、 I_D 为网孔电流, 二者的等效电路折算方法如图 3 所示, 回路方程满足式, 化简后负载对振荡器的作用由反射阻抗 Z_D 体现。

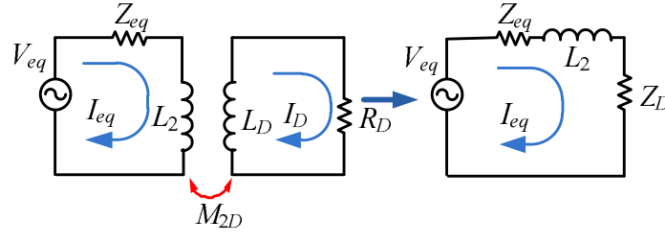


图 3 负载终端等效电路

$$\begin{cases} V_{eq} = (Z_{eq} + j\omega L_1)I_{eq} - j\omega M_{12D}I_D \\ 0 = (R_D + j\omega L_D)I_D - j\omega M_{12D}I_{eq} \end{cases} \quad (6)$$

对于 Z_D , 由于负载 Q 值远远小于线圈 Q 值, 因此有 $R_L \gg R_D + j\omega L_D$, 则 Z_D 可近似表示为:

$$Z_D \approx \omega M_{2D}^2 / R_D = k_{2D}^2 Q_D \omega L_1 \quad (7)$$

输出响应对输入激励信号的增益特性可通过电压传输函数 K_V 与电流传输函数 K_I 体现, 即:

$$K_V = \frac{V_2}{V_1} = \frac{V_2}{A_{11}V_2 + A_{12}(-I_2)} = \frac{1}{A_{11} + A_{12}/Z_D} \quad (8)$$

$$K_I = \frac{I_2}{I_1} = \frac{I_2}{A_{21}V_2 + A_{22}(-I_2)} = \frac{-1}{A_{21}Z_D + A_{22}} \quad (9)$$

引入谐振电路中功率因数的概念, 谐振电路的功率因数可表示为式(10), 它反映了电路中有功功率与视在功率的比值, 因此也可通过该参数反应系统传输效率。

$$\eta = \left| \frac{V_2 I_2}{V_1 I_1} \right| = \left| \frac{V_2}{V_1} \right| \cdot \left| \frac{I_2}{I_1} \right| = |K_V| \cdot |K_I| = \left(1 + \frac{2}{k_{12}^2 Q_1^2} + \frac{k_{2D}^2 Q_D}{k_{12}^2 Q_1} + \frac{k_{12}^2 + Q_1^{-2}}{k_{12}^2 Q_1 k_{2D}^2 Q_D} \right)^{-1} \quad (10)$$

式(10)可以化简为

$$\eta = \frac{k_{12}^2 L_1 L_2 R_L \omega_0^2 \omega_n^4}{R_1 R_L^2 \omega_n^2 + k_{12}^2 L_1 L_2 R_L \omega_0^2 \omega_n^4 + L_2^2 R_1 \omega_0^2 (-1 + \omega_n^2)^2} \quad (11)$$

由式(10)可以看出, 传输效率是关于 k_{12} 、 Q_1 、 k_{2D} 和 Q_D 的多元函数。当系统间距及结构固定时, k_{12} 与 Q_1 均为常数, 此时分母取最小时效率极大。根据高等数学均值不等式原则, 该条件可表示为:

$$\frac{k_{2D}^2 Q_D}{k_{12}^2 Q_1} + \frac{k_{12}^2 + Q_1^{-2}}{k_{12}^2 Q_1 k_{2D}^2 Q_D} \geq 2\sqrt{k_{12}^2 Q_1^2 + 1} (k_{12} Q_1)^{-2} \quad (12)$$

此时, 系统传输效率极大值可表示为式(12)。

$$\eta_{\max} \Big|_{k_{2D}^2 Q_D} = \sqrt{k_{12}^2 + Q_1^{-2}} = k_{12}^2 Q_1^2 \left(\sqrt{k_{12}^2 Q_1^2 + 1} + 1 \right)^{-2} \quad (13)$$

5.1.2 模型求解

将附件 1、附件 2 参数带入上述模型计算附件 1 中 10 次实验无线电能传输效率, 可得:

表 1 无线电能传输效率

实验序号	两线圈距离 (mm)	线圈互感 (μH)	传输效率 (%)
1	100	63.83	17.70
2	125	51.49	12.28
3	150	40.17	7.85
4	175	33.24	5.52
5	200	28.24	4.04
6	225	26.17	3.49
7	250	24.78	3.14
8	275	22.12	2.52
9	300	21.25	2.33
10	325	20.53	2.18

可以发现随着线圈距离的增加, 线圈互感下降, 无线电能传输效率降低。

5.1.3 模型验证

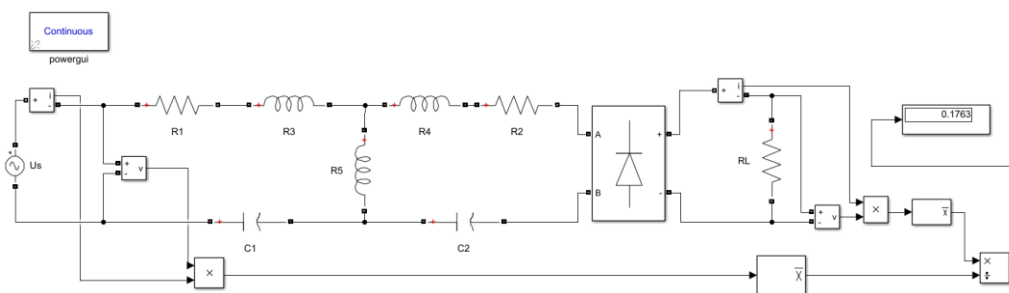


图 4 Simulink 模型图

利用 MATLAB/Simulink 工具箱对所建数学模型进行验证，Simulink 工具箱效率求解结果如下：

表 2 MATLAB Simulink 工具箱效率求解结果

实验序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
传输效率 (%)	17.63	12.24	7.81	5.47	4.02	3.46	3.11	2.50	2.30	2.16

将数据绘制曲线，如图 5：

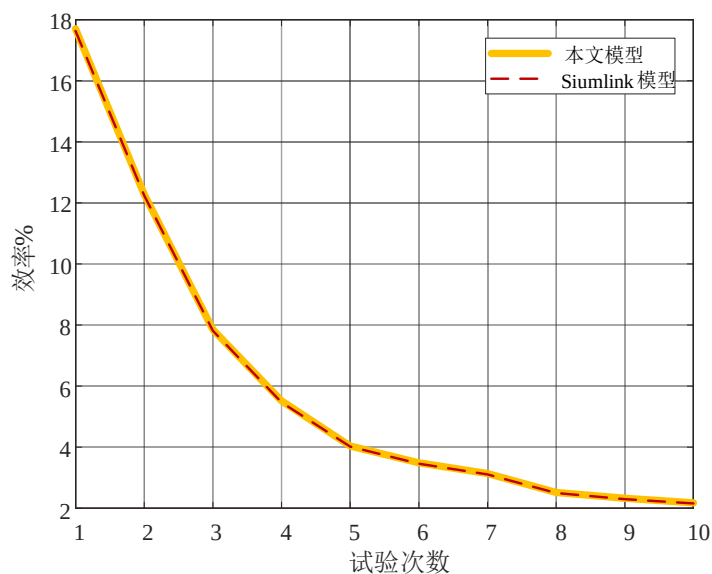


图 5 数学模型与 Simulink 求解结果对比

可以看出所建数学模型与 Simulink 工具箱求解结果基本一致，并且值得注意的是 Simulink 工具箱求解的效率要比本文所建模型偏低，这是因为本文模型忽略了整流电路损耗。

与此同时，在 Ansoft 软件建立的无线电能系统的分布帮助学习距离与互感之间的相互关系。

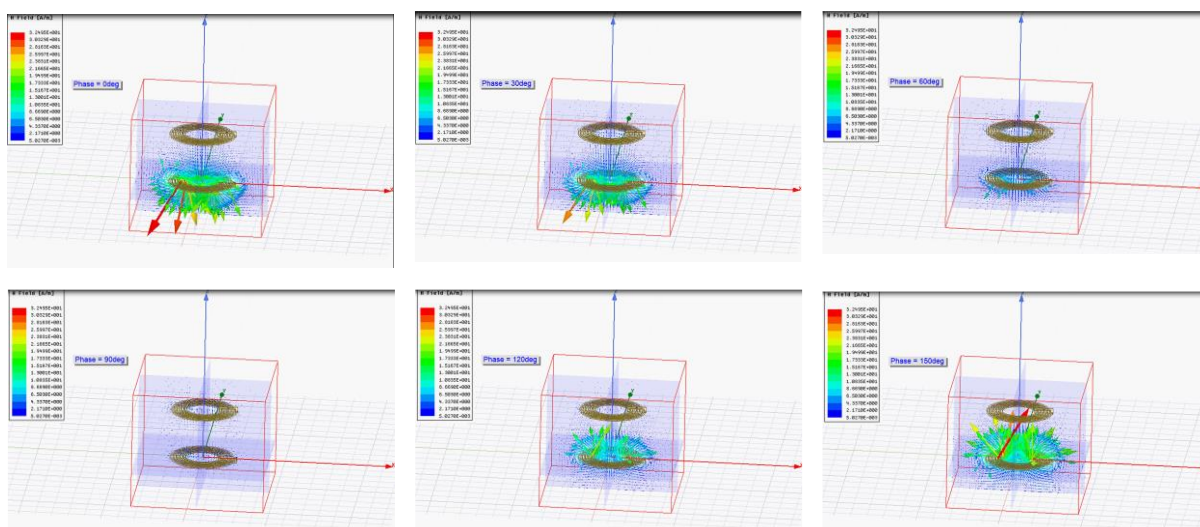


图 6 无线电能系统磁场向量在不同电流角度分布图

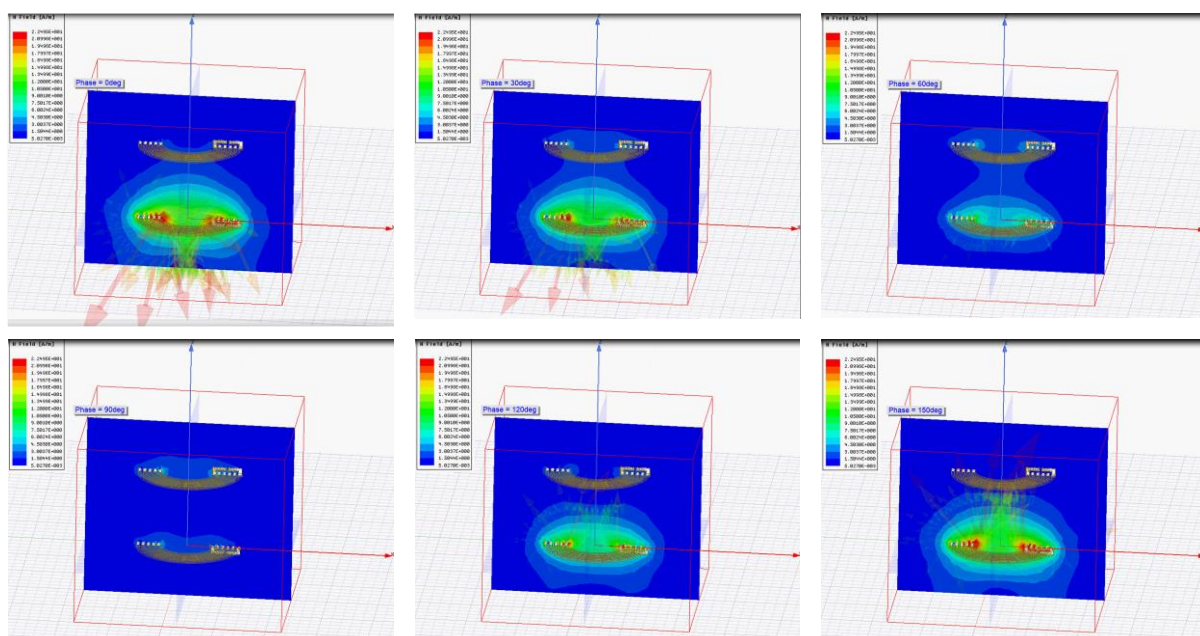


图 7 无线电能系统磁场在不同电流角度分布图

由磁力线疏密程度以及磁场云图颜色变化可以看出，发射线圈和接收线圈之间的磁场耦合区域，磁场强度最大。发射线圈产生的磁场，其中一部分不经过接收端再次返回到发射线圈，形成闭合磁路，这部分磁场没有形成两线圈之间的耦合，不向接收端传递能量，成为漏磁。另一部分磁场经过接收端线圈之后，才返回发射端，形成闭合磁路，发射端和接收端主要依靠这部分磁场实现两线圈之间的能量传递。

5.2 问题二模型建立与求解

要分析两线圈间距离对传输效率的影响，首先需要分析两线圈距离改变对系统的影响。考虑两线圈同轴且平行的情形^[2]，其结构如图 8 所示。

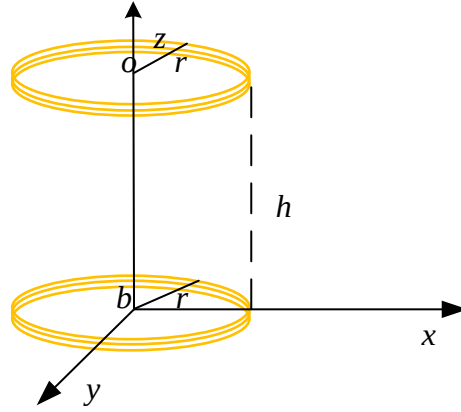


图 8 同轴平行线圈

两线圈圆心分别为 $(0,0,z_1)$ 、 $(0,0,z_2)$ ，轴向距离为 h ，流过两个线圈的电流分别为 I_1 、 I_2 ，在两线圈上分别取一点 P 和 Q，坐标分别为 $P(r,\theta,z_1)$ 、 $Q(r,\varphi,z_2)$ ，则 PQ 两点间的距离可以表示为：

$$d = |r_2 - r_1| = \left[2r^2 - 2r^2 \cos(\varphi - \theta) + h^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

将 PQ 两点间的距离代入纽曼公式即可得到两线圈的互感计算公式：

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{2\pi} \frac{r^2 \cos(\varphi - \theta) d\theta}{\sqrt{2r^2 - 2r^2 \cos(\varphi - \theta) + h^2}} \quad (15)$$

结果表明，两线圈距离的改变会影响线圈的互感 M ，从而间接改变无线电能系统的输出功率和传输效率。要建立发射频率、匹配阻抗、两线圈距离与无线电能传输效率的数学模型，需要以 10 次实验的离散数据为基础拟合两线圈距离 h 与线圈互感 M 的函数关系 $M = f(h)$ 。这一关系是非线性的，保证数学模型的精确性和可行性的关键是提高 $M = f(h)$ 曲线的拟合精度。

5.2.1 最小二乘支持向量机(LSSVM)算法

传统的曲线拟合方法操作简单，但是曲线拟合的精度不高，且需选取合适的拟合函数。基于神经网络学习^[3]的曲线拟合方法虽然具有较高的准确性，但仍以训练误差最小化为目标，当参数选取不当时会产生局部最优现象，且算法本身计算较为复杂，收敛速度慢。Vapnik^[4]于 20 世纪 90 年代提出了支持向量机(SVM)算法，以结构风险最小化为原则，得到的解具有全局唯一性，因而得到了广泛的研究。Suykens 在文献[5]中提出了改进的最小二乘支持向量机(Least Squares Support Vector Machine, LSSVM)算法，从而将非线性问题转变成了线性问题，进一步简化了计算，提高了曲线的拟合精度。

首先定义非线性有限样本集 $S = \{(x_i, y_i), i=1, 2, \dots, n\}$ ， x_i 为输入， y_i 为输出。LSSVM 算法采用一个非线性映射 φ 将样本数据集 S 映射到高维特征空间 $\varphi(x_i)$ ，在此空间中构建拟合函数 $y = w\varphi(x) + b$ (w 为权向量， b 为偏置常数)，根据结构风险最小化的原则，寻找最优的超平面，从而确定参数 w 和 b 的值。LSSVM 算法描述为：

$$\begin{cases} \min_{w,b,\xi} J(w, e_i) = \frac{1}{2} \|w\|^2 + \frac{1}{2} \gamma \sum_{i=1}^n e_i^2 \\ \text{s.t. } y_i = w^T \varphi(x_i) + b + e_i = 1, \dots, n \end{cases} \quad (16)$$

式中， γ 为正规化参数， e_i 为误差变量。引入拉格朗日方法求解该模型：

$$L(w, b, e, a) = J(w, e) - \sum_{i=1}^n a_i [w^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i] \quad (17)$$

式中 a_i 为拉格朗日乘子。根据 KKT 条件可以得到：

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial w} = 0 \Rightarrow w = \sum_{i=1}^n a_i \varphi(x_i) \\ \frac{\partial L}{\partial b} = 0 \Rightarrow \sum_{i=1}^n a_i = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial e_i} = 0 \Rightarrow a_i = \gamma e_i \\ \frac{\partial L}{\partial a_i} = 0 \Rightarrow w^T \varphi(x_i) + b + e_i - y_i = 0 \end{cases} \quad (18)$$

消除中间项 w, e_i ，则可将模型转化为线性方程组模型。

$$\begin{bmatrix} 0 & I_n^T \\ I_n & \Omega + \frac{1}{\gamma} I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ y \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中， $I_n = [1, 1, \dots, 1]^T$ ， $\Omega = \varphi(x_i)^T \varphi(x_j) = K(x_i, x_j)$ ， $a = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ ， $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 。 $K(x_i, x_j)$ 为核函数，一般选取径向基(RBF)函数作为核函数，表示为：

$$K(x, x_i) = \exp(-x - x_i^2 / 2\delta^2) \quad (20)$$

式中， δ 为核参数。由此得到非线性拟合函数为

$$f(x) = \sum_{i=1}^n a_i K(x, x_i) + b \quad (21)$$

LSSVM 算法具有小样本求解精度高，运算速度快等优点，但模型的准确度和运算速度依赖于对核参数 δ 和正规化参数 γ 的选取。核参数的改变会影响映射函数从而影响特征空间的复杂程度，而不同的特征空间中最优的 γ 也不同。

5.2.2 PSO-LSSVM 拟合模型的建立

LSSVM 模型的拟合效果取决于参数 δ 和 γ 的选取，我们考虑采用粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)优化 LSSVM 参数，进一步提高了模型的性能。

PSO 算法的原理是在随机解的基础上通过迭代进行寻优，利用适应度为评价条件进行搜索从而得到全局最优解。假设在 M 维搜索空间中， D 个粒子的初始坐标为 $U_i = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im})$ ，初始飞行速度为 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{im})$ ，($m = 1, 2, \dots, M, i = 1, 2, \dots, D$)， D 个粒子的最优位置为 $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im})$ 。PSO 算法的实现步骤如下：

- (1) 粒子群初始化：设定粒子群的规模、初始位置和速度以及迭代次数。
- (2) 计算粒子的适应度。
- (3) 通过迭代更新速度和位置。迭代公式表示为：

$$\begin{cases} v_{im}^{k+1} = \omega v_{im}^k + c_1 r_1 (P_{im} - u_{im}^k) + c_2 r_2 (P_{gm} - u_{im}^k) \\ u_{im}^{k+1} = u_{im}^k + v_{im}^{k+1} \end{cases} \quad (22)$$

式中： v_{im}^{k+1} 为目前代粒子的移动速度， v_{im}^k 为上一代粒子的移动速度， c_1 、 c_2 为学习因子，一般取 $c_1 = c_2 = 2$ ， r_1 、 r_2 为[0,1] 区间内的随机数， ω 为惯性权重。

(4) 构建样本均方根相对误差 e_M 作为适应度函数，其表达式为：

$$e_M = \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i - \hat{y}_i]^2 / y_i^2 \right\}^{1/2} \quad (23)$$

式中： y_i 为实际值， $\hat{y}_i$ 为拟合值， n 为样本数。根据式(8)计算更新后粒子的适应度，当适应度达到最小时即可得到粒子的最优位置，从而确定 δ 和 γ 的最优值。

5.2.3 模型求解

采用上述 PSO-LSSVM 拟合模型对 10 次实验的数据样本进行回归分析，得到结果如图 9 所示。为了对比该模型的优劣性，同时将多项式拟合的结果图 10 作为比较，分析两种拟合模型的拟合性能。

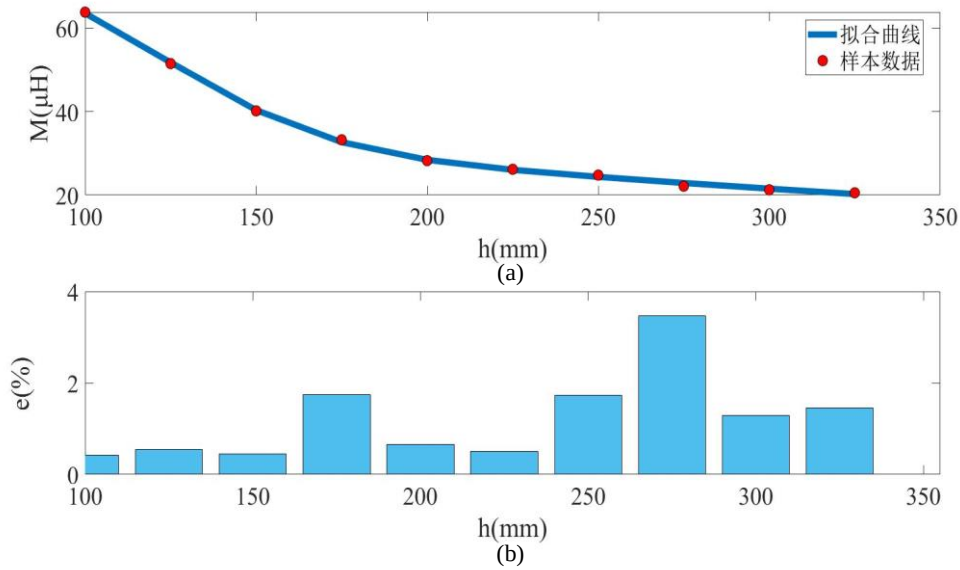


图 9 PSO-LSSVM 拟合模型结果 (a)拟合曲线与样本数据的对比 (b)拟合误差(e)分析

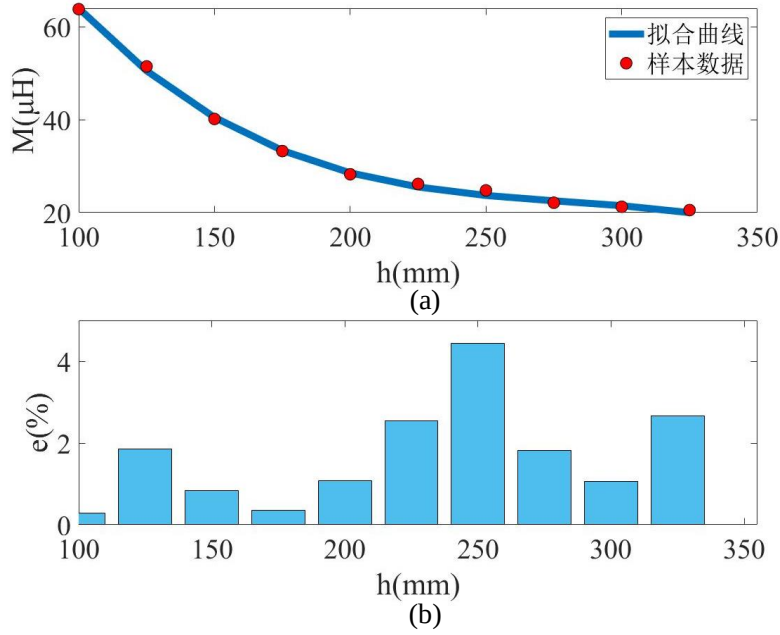


图 10 多项式拟合模型结果 (a)拟合曲线与样本数据的对比 (b)拟合误差(e)分析

结果表明, PSO-LSSVM 拟合模型的拟合精度比多项式拟合模型的拟合精度高, 证明了模型的可行性和有效性。根据 PSO-LSSVM 拟合模型得到的两线圈互感 M 与两线圈距离 h 的关系可以表示为

$$M = 5.286 \exp[-(h + 5.951)^2 / 17.17] + 0.523 \exp[-(h - 0.231)^2 / 0.0425] \quad (24)$$

基于式(11), 发射频率、匹配阻抗、两线圈距离与无线电能传输效率的数学模型可以表示为:

$$\eta = \frac{(27.94e^{-\frac{(h+5.951)^2}{8.585}} + 0.274e^{-\frac{(h-0.231)^2}{0.021}})R_L\omega_0^2\omega_n^4}{R_1R_L^2\omega_n^2 + (27.94e^{-\frac{(h+5.951)^2}{8.585}} + 0.274e^{-\frac{(h-0.231)^2}{0.021}})R_L\omega_0^2\omega_n^4 + L_2^2R_1\omega_0^2(-1 + \omega_n^2)^2} \quad (25)$$

计算两线圈距离分别为 100mm、150mm、200mm、250mm 时无线充电的电能传输效率得到表 3。

表 3 模型求解结果比较		
两线圈距离 (mm)	第 1 问模型传 输效率 (%)	第 2 问模型传 输效率(%)
100	17.70	17.57
150	7.85	7.91
200	4.04	4.09
250	3.14	3.04

可以看出, 第 1 问模型与第 2 问模型计算得出的传输效率基本相等, 进一步验证了模型的准确性。

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/605131121003011130>