

车载大功率无线充电线圈耦合机构的有限元建模及仿真

熊萌¹, 魏学哲¹, 罗志超¹, 唐轩¹, 杜润本¹

1. 新能源工程中心, 同济大学, 上海市嘉定区

摘要

近几年, 出于能源危机与环境保护的考虑, 新能源电动汽车受到了世界各国的大力推广, 但由于电池容量与充电设施等充电问题成为主要技术瓶颈, 安全、方便、非接触式的无线充电技术成为了研究热点, 其原理上以耦合线圈作为能量传输的主要元件, 利用线圈间耦合谐振作用实现无线传能。但考虑到实际应用场景中, 相比传统插电式充电, 无线充电存在传输效率较低, 以及对于停车时充电位置对准程度要求较高等问题, 因此需要对线圈偶和机构的结构进行仿真优化设计。

在线圈耦合机构的仿真优化方面, COMSOL 多物理场仿真完美的解决了我们日常研究中很多繁琐的问题。线圈的基本结构类型可以通过几何部分进行设计实现, 物理场部分主要以 AC/DC 模块中的磁场模块为主, 通过调用物理场的域(线圈)实现几何部分线圈区域的选择, 由于线圈实际制作中采用密绕不带间距, 所以线圈匝数定义为均匀多匝。对于网格划分这块, 不是我们重点研究对象, 视计算精度进行网格精细度调整即可。整个研究基于 85Khz 频域进行。通过仿真结果的后处理, 我们可以获取到不同结构线圈在不同工作点的互感自感大小, 以及产生磁感应强度大小等参数, 从而为实际设计制作提供参考依据, 大大提高了研究效率。
关键词: 电动汽车, 无线充电, 耦合线圈, 设计优化

简介

随着社会对于能源问题的关注, 全世界都在大力研究和推广新能源电动车, 美国、中国、欧洲等国家已经将电动汽车作为大力发展的明确目标。电动汽车的续航使用离不开给动力电池充电。目前传统的充电方式采用的是金属导线点对点的有线充电方式, 然而这种方式存在诸多缺陷: 插电易产生火花, 存在安全隐患, 基础设施易磨损老化, 不易维护等问题。因而, 安全、方便、非接触式的无线充电技术成为了研究热点^{[1][2]}。

车载无线充电技术从原理上, 主要以耦合线圈作为能量传输的主要元件, 利用线圈间耦合谐振作

用实现高效率无线传能。但考虑到实际应用场景中, 相比传统插电式充电, 无线充电存在传输效率较低, 以及对于停车时上下线圈充电位置对准程度要求较高等问题, 因此需要对线圈耦合机构的结构和尺寸参数进行仿真优化设计。

本文详细介绍了应用 COMSOL 进行车载大功率无线充电线圈耦合机构的有限元建模实现过程, 利用对系统引入磁芯, 从仿真上说明了实际车载无线充电应用过程中磁芯对整个传输系统的提升作用。从三维几何模型的建立, 所涉及到的材料调用与定义, 物理场 AC/DC 电磁模块的引入, 以及背后涉及到的理论公式, 线圈耦合机构与空气域的网格划分科学设置, 到最后的线圈几何分析, 频域研究设定, 结果的后处理等进行了详细的说明展示。

理论 / 实验设置

基于电磁问题经典的麦克斯韦方程组, 我们可以解决 COMSOL 电磁场有限元仿真中的几乎所有问题。其微分形式方程如下 (1) (2) (3) (4) 所示。

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{D} = \rho \quad (4)$$

上述微分形式的麦克斯韦方程组是对场中每一点而言的。方程 (1) 为全电流定律的微分形式, 它说明磁场强度 \mathbf{H} 的旋度等于该点的全电流密度 (传导电流密度 \mathbf{J} 与位移电流密度 $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ 之和), 即磁场的涡旋源是全电流密度, 位移电流与传导电流一样都能产生磁场。方程 (2) 是法拉第电磁感应定律的微分形式, 说明电场强度 \mathbf{E} 的旋度等于该点磁通密度 \mathbf{B} 的时间变化率的负值, 即电场的涡旋源是磁通密度的时间变化率。方程 (3) 是磁通连续性原理的微分形式, 说明磁通密度 \mathbf{B} 的散度恒等于零, 即 \mathbf{B} 线

是无始无终的。也就是说不存在与电荷对应的磁荷。方程(4)是静电场高斯定律的推广,即在时变条件下,电位移D的散度仍等于该点的自由电荷体密度。

在车载大功率无线充电线圈仿真设计过程中,我们常常需要对设计的线圈几何结构进行发射端自感 L_p ,接收端自感 L_s 和两线圈间互感参数 M 的参数提取,以为我们提供线圈耦合机构设计的参考依据。线圈的自感参数往往可以直接通过后处理对其进行提取,而互感 M 则需要通过下述公式(5)获取, I_1 为发射端线圈激励电流, U_2 为接收端线圈开路电压, f 为激励电流 I_1 的频率,也即整个系统的工作频率,公式(6)的 k 为线圈间的耦合系数,它表示了线圈间磁耦合的松紧程度,当一个线圈产生的刺痛全部穿过另一个线圈,即漏磁通很小可忽略不计,定义此时的耦合系数最大 $k=1$ ^{[3][4][6]}。

$$M = \frac{U_2}{j2\pi f I_1} \quad (5)$$

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (6)$$

除此之外,由于磁芯具有非线性磁滞特性,我们需要利用下述公式(7)的简单能量法和平均能量法,将实验室所用MnZn软磁铁氧体磁芯的BH曲线,转化为等效HB/BH曲线的材料模型,这种有效材料模型可以用在频域仿真中近似模拟非线性磁性材料行为,以便材料使用的调用。

$$B_{SE} = \frac{H}{2} \int_0^H B(H) dH \quad (7)$$

$$B_{AE} = \frac{16}{TH} \int_0^{T/4} \left(\int_{H(0)}^{H(t)} B(H) dH \right) dt$$

控制方程 / 数值模型 / 仿真 / 方法 / 仿真 App 的使用

首先,我们需要建立三维模型的空白文件,添加我们仿真所需的物理场,选择AC/DC模块中的磁场模块。对于线圈耦合机构中涉及的相关边界参数,我们需要先进行全局参数定义,以便后面几何构建时调用,比如发射线圈的总体尺寸 $lp1 * lp2$ (长*宽),接收线圈总体尺寸 $ls1 * ls2$,线径 d_wire ,两线圈间垂直距离 z_gap ,线圈匝数 N_p, N_s ,两线圈水平位错距离 $long_mis, lat_mis$,发射端所用磁芯长宽 F_length, F_width 等。详细参数值见下图1。

名称	表达式	值	描述
lp1	640 [mm]	0.64m	发射线圈总长
lp2	460 [mm]	0.46m	发射线圈总宽
F_length	700 [mm]	0.7m	磁芯板长
F_width	250 [mm]	0.25m	磁芯板宽
ls1	340 [mm]	0.34m	接收线圈总长
ls2	260 [mm]	0.26m	接收线圈总宽
d_wire	4 [mm]	0.004m	线圈直径
z_gap	140 [mm]	0.14m	线圈间垂直距离
long_mis	0 [mm]	0m	线圈间长边方向位错
lat_mis	0 [mm]	0m	线圈间短边方向位错
Np	8	8	发射线圈匝数
Ns	7	7	接收线圈匝数

图1. 线圈模型相关几何边界参数

在几何构建部分,我们首先构建工作平面,选择xy工作平面,z坐标为0,进入该平面的平面几何,对发射线圈进行构建,通过构建两个大小不同的矩形,做差集,再进行对称镜像,即可获得发射侧线圈平面图,在三维下按线圈直径 d_wire 进行拉伸,即可获得发射线圈三维几何模型。同理,我们在距离发射线圈垂直距离 z_gap 的平面建立新的xy工作平面,以同样的方法,即可构建出我们的接收线圈。考虑到实际车载应用中位错问题对传输效率的影响,所以我们采用了一大一小的发射接收线圈形式,以及DD线圈的结构,从下图2我们可以看到构建后的线圈三维模型线框渲染图的效果。紧接着,在三维几何中,我们需要构建一个球体,作为我们研究的空气域将线圈模型包围起来,球体的大小决定了我们漏磁仿真的准确度,本文中我们将球体半径设置为2m,如图3所示。

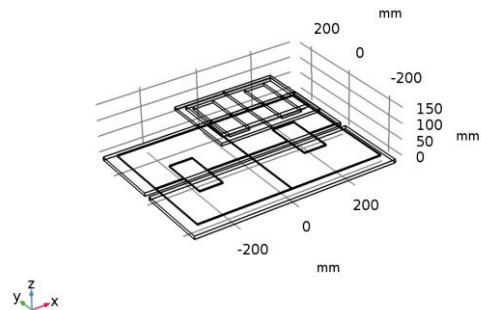


图2. 线圈三维模型线框渲染图

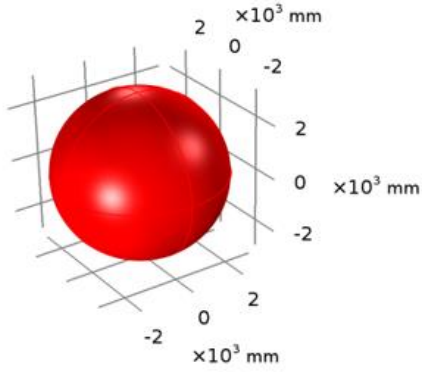


图3. 研究所定义空气球形域

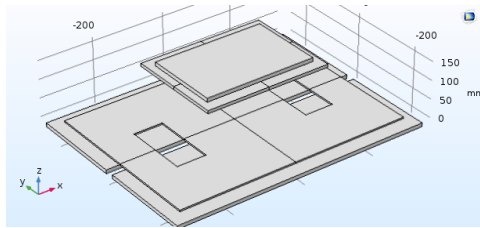


图4. 线圈耦合机构三维模型图 (含平板磁芯)



图5. 线圈耦合机构xz面二维模型图 (含平板磁芯)

磁芯由于具有较高的磁导率，能够起到聚磁与磁屏蔽的作用，而成为无线充电的重要组成部分，是提升传输效率与传输功率的核心手段^[5]。因此我们在线圈的两侧分别构建平板磁芯的几何模型，磁芯的大小除了参考图1所给定的参数值 F_length ， F_width 以外，也可以视不同的研究进行更改。磁芯的厚度也是如此，但磁芯厚度不宜设置得过薄，以防止磁芯磁饱和而失效。最终加入平板磁芯后，建立了图4. 所示的线圈耦合机构三维模型。图5是它的xz角度视图。

完成了以上几何构建后，接着进行材料库的调用，本研究涉及到的材料主要有空气，导线铜，用于磁芯的软磁铁氧体。前两者，只需添加COMSOL材料库自带的Air, Copper即可，材料各项属性参数值可直接使用。实际研究中，我们采用高磁导率，低损耗的软磁铁氧体材料作为我们研究的磁芯，仿真中通过将该材料的饱和磁通密度 B_r ，初始磁导率 μ_0 ，电阻率 ρ 等特性参数通过插值拟合的办法，绘制其BH曲线，最后通过案例库中的等效非线性磁曲线计算器，转化为线性化的等效BH曲线，然后将曲线数

据导出，再输入到磁芯材料的材料属性之中，即可使用，详细的线性化处理结果见下图6所示，最后定义该磁芯材料为Ferrite。完成以上三种材料的添加处理之后，我们只需要选择对应的域即可完成对本研究线圈模型的材料定义，将Air的域选择为球体，Copper的域选择为发射与接收线圈，Ferrite的域选择为线圈两侧的平板磁芯即可。

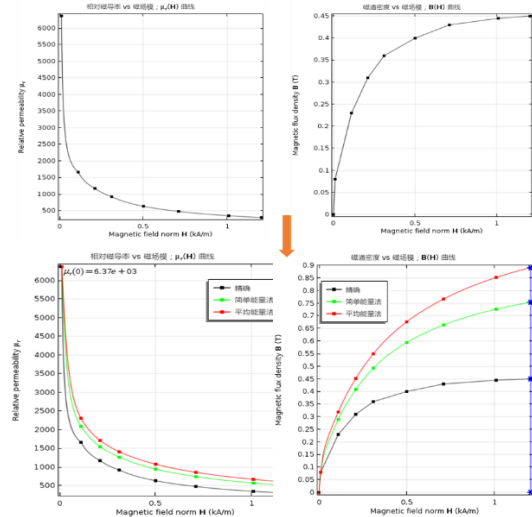


图6. 磁芯材料调用的线性化处理

关于物理场的定义，选择AC/DC模块的磁场模块，该模块的调用，自带了默认的安培定律，磁绝缘，初始值。除此之外，在物理场的域中，选择线圈域，分别为线圈1和线圈2，对线圈1的域手动选择为发射线圈部分，如图7所示。材料类型选择来自材料，导线模型设置为均匀多匝（即密绕不带间距），线圈类型为数值，线圈激励选择电流激励，线圈电流大小视实际传输功率而不同，本文为20A激励，由于为双D线圈（即双线圈），因此匝数为 $2 * N_p$ ，关于两线圈的输入，选择边界参考图8所示，发射接收输入方向同向。接收线圈的物理场定义同理。值得注意的是，由于磁芯采用了线性化材料处理，加上本身的非线性特性，所以此处对于磁芯部分需要分开建立基于等效BH曲线本构关系的安培定律。

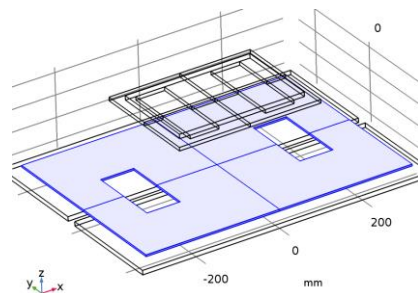


图7. 两线圈的线圈域物理场定义

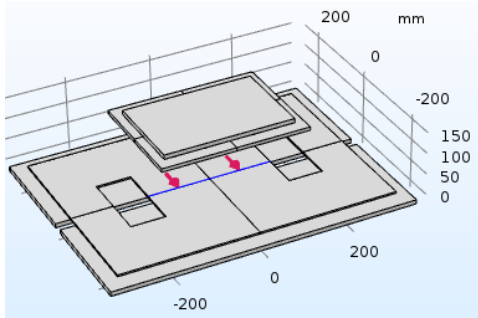


图8. 两线圈的输入方向定义

关于网格划分部分，对于线圈耦合机构整体，选择采用默认三角网格进行划分即可，对于剩余的部分，比如空气域，可采用自由四面体网格。网格的划分整体而言比较灵活，如果对于最终的仿真解析结果有较高的要求，可以将单元大小进一步细化调整，但同时也会使仿真运行时间变长。

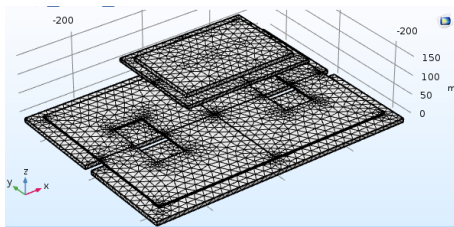


图9. 线圈耦合机构的网格划分结果

最后，设置好本文的研究。分为两步，步骤1为对整个模型进行线圈几何分析，步骤2为频域分析，并设定好我们的研究频率为85Khz。完成以上建模过程，即可开始计算。

实验结果 / 仿真结果 / 讨论

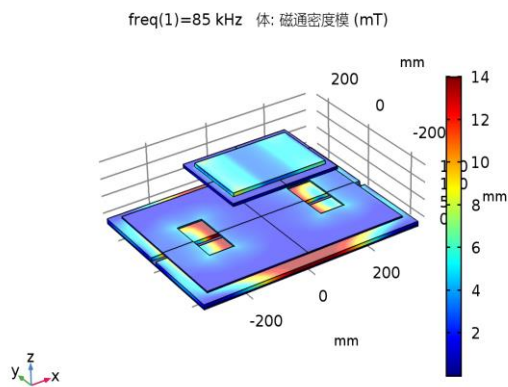


图10. 85Khz线圈耦合机构的三维磁通密度模分布

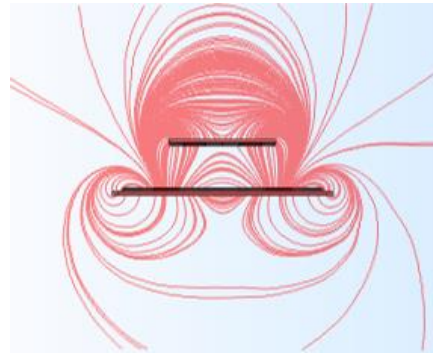


图11. 二维截面下线圈耦合机构的磁场耦合情况（含磁芯）

经过仿真计算，在结果三维绘图组的体图中添加磁通密度模表达式 $mf.normB$ 后，从上图10可以看到在发射线圈的电流激励下，整个线圈耦合模型的三维磁通密度模分布，从图上我们可以看到，由于平板磁芯具有较大的磁导率，且底部平板磁芯距离发射端更近，所以磁通密度模较大的区域主要集中在发射端平板磁芯的中部。图11展示了在选取的二维截面下，整个线圈的磁场耦合情况，该图采用流线图的形式即可实现，从图中我们可以看到发射端线圈发出的磁场，一部分与接收端线圈耦合，另一部分未耦合的磁场最终回到了发射端本体，图11为我们磁芯的结构设计提供了参考，后期研究中可以通过划分互耦合区与自耦合区，来确定磁芯的布置数量，尽可能在线圈互耦合的区域布置更多的磁芯，而减少自耦合区域的磁芯布置。

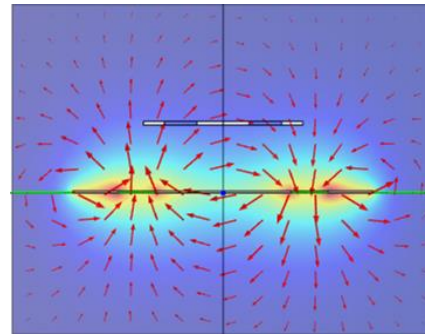


图12. 二维截面下线圈耦合机构的磁场分布（不含磁芯）

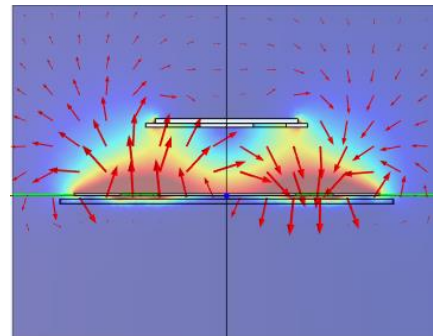


图13. 二维截面下线圈耦合机构的磁场分布（含磁芯）

要实现车载中距离的高效率无线传输，仅仅通过谐振耦合线圈仍然远远不够。因为空气磁导率极小，存在的杂散磁场使得发射线圈的一部分磁能不能够被接收线圈所接收利用，往往导致无线充电的传输效率仍然较低，所以磁芯的引入变得尤为重要。为了说明加入磁芯对于无线充电传输效果提升的重要作用，我们对系统有无磁芯进行了仿真对比，在相同的发射端线圈电流20A与85KHz激励下，通过截取磁通密度模的二维表面以及面箭头数据，可以看到图12与图13的传输效果比较，图12由于不含磁芯，发射线圈的磁场基本发散在了整个空间，只有很少的一部分磁场被接收线圈所接收利用。而图13引入磁芯之后，由于磁芯的聚磁作用，线圈间的耦合效果得到了显著提升，且由于磁芯的磁屏蔽作用，线圈两侧的杂散磁场也大大减少，漏磁得到改善。

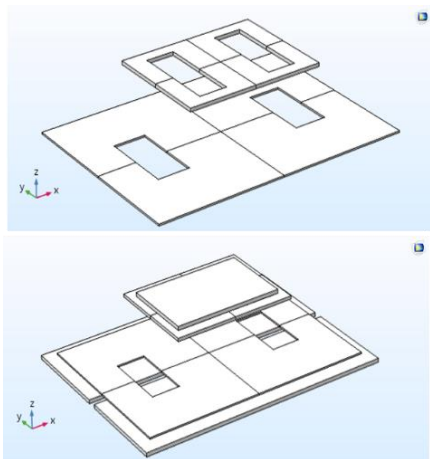


图14. 两线圈进行X方向位错下的三维模型图（上图不含平板磁芯，下图含平板磁芯）

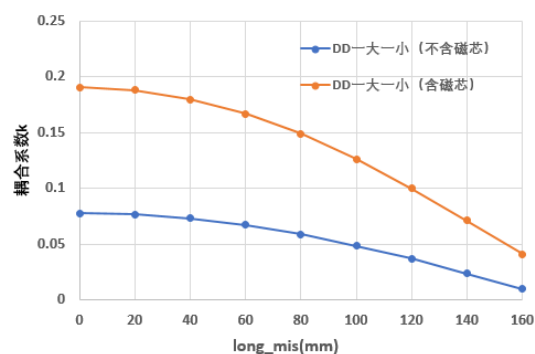


图15. 线圈耦合系数与x方向位错大小的关系（含磁芯与不含磁芯两种情况）

为了进一步观察磁芯对于传输效果的提升程度，本文进一步做了定量的分析比较。图14显示了不含平板磁芯与含平板磁芯的线圈位错模型图。对两线圈在长边方向进行0-160mm的位错，通过单独

对发射线圈通以激励电流20A，接收线圈定义电流为0（即此刻接收线圈开路），提取了每隔20mm的发射线圈参数（自感 L_p ，互感 M ），再对接收线圈施加20A电流激励同时保持发射端电流为0，提取了每隔20mm的接收线圈自感 L_s ，利用COMSOL软件强大的参数化扫描功能，完成了上述数据的扫描获取。最后利用公式（5）（6）对数据进行了处理。图15为含磁芯与不含磁芯两种情况下线圈间耦合系数 k 与位错大小的关系，可以看出当位错较小时，平板磁芯对于耦合系数的提升具有显著效果，但当位错继续增大时，二者间的差距逐渐缩小，最后耦合系数都接近于0，平板磁芯的提升作用逐渐减小。

结论

本文针对车载大功率应用下的无线充电线圈耦合机构的COMSOL模型建模与仿真，对每一部分有限元建模过程进行了详细的介绍，涉及到线圈的几何模型构建，线圈的物理场设置，磁芯材料的非线性处理与调用，研究的步骤介绍以及最后的后处理展示。最后，我们进行了磁芯对于无线充电传输效果提升的研究，通过定性定量的仿真结果对比，证明了磁芯在无线充电领域有着不可或缺的作用。但是本文的研究只是基于简单的平板磁芯，仍然存在不足，后期可以通过优化磁芯的结构与参数，提出新型的磁芯形状，对传输效果做进一步的改善。

参考文献

1. 王丽芳, 朱庆伟, 李均峰, 等. 电动汽车无线充电用磁耦合机构研究进展 [J]. 集成技术, 2015, 4 (1) : 1.
2. 曹玲玲, 陈乾宏, 任小永, 等. 电动汽车高效率无线充电技术的研究进展 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (8) : 1.
3. C. Hu, Y. Sun, X. Lv, Z. Wang and Q. Xiong, Magnetic coupler design procedure for IPT system and its application to EVs' wireless charging, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 47(3) (2015), 861–873, doi:10.3233/JAE-140146.
4. C. Hu, Y. Sun, Z. Wang, C. Tang and Q. Xiong, Design of magnetic coupler for EVs' wireless charging, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 43(3) (2013), 195–205, doi 10.3233/JAE-131693.

5. A.M. Leary, P.R. Ohodnicki and M.E. McHenry, Soft magnetic materials in high-frequency, high-power conversion applications, JOM 64(7) (2012), 772–781, doi 10.1007/s11837-012-0350-0.
6. M. Budhia, G.A. Covic and J.T. Boys, Design and optimization of circular magnetic structures for lumped inductive power transfer systems, IEEE Transactions on Power Electronics 26(11) (2011), 3096–3108, doi 10.1109/TPEL.2011.2143730.

致谢

首先，感谢 COMSOL 为我们广大研究人员的学术研究提供了一个很好的平台与技术支持，也感谢此次 COMSOL 为我们提供了年会的参与机会，让我们能有更多的契机聚在一起，与相关领域的研究人员一起探讨交流。

然后，我要感谢我的导师魏学哲教授在平时科研中的指导，以及感谢参与此次工作的罗志超博士，唐轩博士，杜润本博士的帮助与建议。

最后，希望 COMSOL 数模公司能够在仿真软件上越做越好，越走越远！