

# 电动汽车的新型电动机设计

法拉第未来公司为电动汽车设计专用的电动机。

作者 GEMMA CHURCH

电动汽车从小众变成了主流，推动着汽车工业发生巨大变革。

然而，改进电动汽车的电动机设计仍然面临重重挑战。一种可能的解决方案是采用功率磁性器件（power magnetic device，简称 PMD），这类器件包括电动机、发电机、变压器和电感器。简而言之，它们能利用电磁场将电能转换为机械能，或者进行逆向转换。

在电力工程领域，尤其是对于 PMD 的设计而言，现代技术的发展始终以减少系统损耗、重量、体积和成本为目标导向，同时致力于提高功率容量、可靠性，以及大规模量产能力。

## » 将模拟、优化、协作合为一体

企业若想在现代产品竞争中保持领先地位，须采用先进的方法来优化各类 PMD（例如电动机）的设计。其中的一种方法是将设备的高效计算模型与最尖端的优化技术相结合。此外，电动机设计的瓶颈从原理上来说，是一个涉及了力学、电气和热力学的复杂多物理场问题。

法拉第未来（Faraday Future）是一家专注于智能电动车开发的新兴技术公司。他们正在使用专业的多物理场有限元分析工具——COMSOL Multiphysics® 软件设计及制造具有高功率密度的先进电动机。

法拉第未来公司采取了创新的模块化策略来推进电动汽车的设计。该公司电磁领域的首席工程师 Omar Laldin 解释说：“我们公司正在设计可供一系列车型使用的电动机。这种电动机首先需要能适用于我们的可调节平台架构，这样就可以使汽车动力总成实现模块化开发。我们可以在此架构中

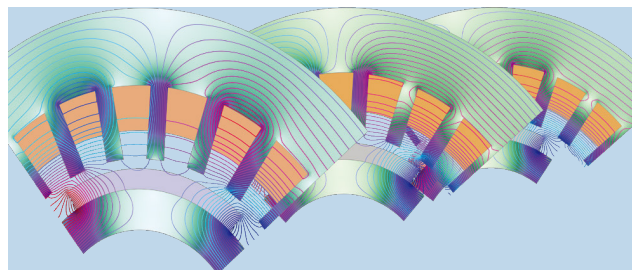


图 1. 非线性的表面式永磁同步电动机 (permanent magnet synchronous motor, 简称 PMSM) 的有限元分析 (FEA)。

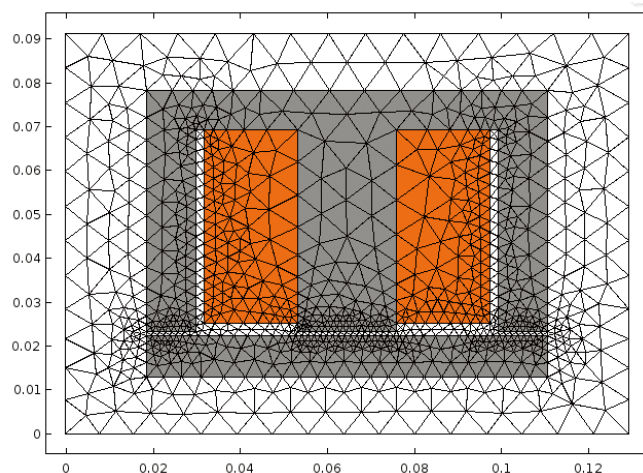


图 2. EI 芯执行器的网格。

添加或移除电动机、调整电池数量和底盘尺寸。”

“为了实现这一点，电动机设计不能只考虑电磁元件方面的问题，还必须考虑到各种工作条件，例如力学、热性能等多方面因素。” Laldin 补充说。图 1 展示了设计小组完成的电磁分析示例。

这涉及了一系列高级优化算法，用于快速模拟每项设计的性能。计算速度至关重要，这是因为优化算法须执行大量迭代来保证不同的设计经过全面的检验。为

此，模型的某些方面需要进行简化。

Laldin 解释道：“在预测热性能时，运行一次完整的 CFD 分析有可能耗时数周。我们常常面对多达数千种设计方案，每个设计方案都有几百个操作要点，所以要进行详细的多物理场分析，计算效率低的工具根本无法胜任。COMSOL® 软件这样的工具可以帮助我们执行全面周密电磁分析、力学分析以及简化的热分析。它不仅运行稳定，而且在设计进程中能够即时提供各个方面的

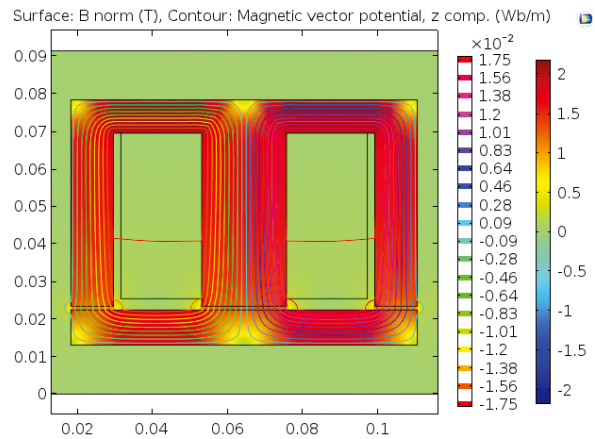
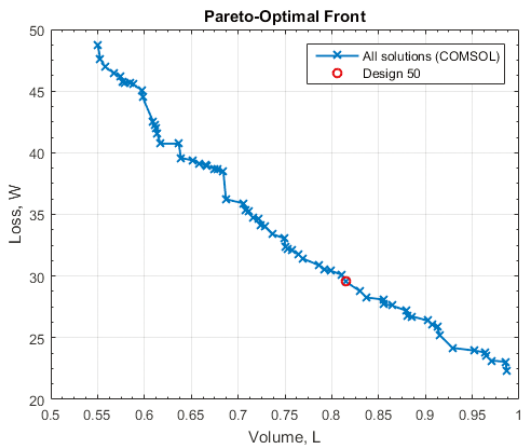


图 3. 左图: Pareto 最优解给出了质量与损耗之间的折衷方案。右图: EI 芯执行器中的磁通分布。

反馈。”

在功能全面的 COMSOL 软件的帮助下，法拉第未来的电磁电动机设计团队能够与其他团队紧密配合，其中包括电动机机械、逆变器、电动机控制、动力总成控制、系统工程等团队，他们共同组成了动力总成团队。

“在把数据发送给其他团队之前，我们会预先完成所有的前期分析，保证数据基本正确。这让我们大幅减少了与其他团队合作需要执行的迭代次数。我认为这是 COMSOL 软件最突出的优势。”他补充说。

## » 设计执行器

EM (electromagnetic motor, 电磁马达) 团队专门设计了一个 EI 芯执行器来满足特定的限制要求，他们力求在缩小体积和降低功率损耗这两个矛盾的目标之间找到平衡点。功率损耗必须要尽量降低，但设计人员不希望因此增加组件的尺寸，封装尺寸也是大多数车辆系统中的关键指标。执行器由缠绕在固定 E 型磁芯上的导线线圈以及可移动的 I 型磁芯构成 (图 2)。

他们在 COMSOL® 中执行了二维电磁场分析，并耦合了

“我们从事前沿技术开发，并且崇尚速度和效率，因此 COMSOL 是我们的必然选择。”

— OMAR LALDIN, 法拉第未来电磁领域的首席工程师

在 MATLAB® 软件中建立的遗传算法。该模型将不同种类钢材的高度非线性特性纳入了考虑范畴，而遗传算法则提供了全局优化和多目标的 Pareto 最优解，实现了缩减体积和降低功耗之间的平衡 (图 3)。

他们使用了执行器的几何参数作为算法的输入，并根据线圈电阻计算出损耗。通过此方法，他们对可产生 2500 牛顿力的电磁执行器的各类设计进行了快速分析。

## » 探究损耗

研究团队分析了电动机所有钢材的非线性特征，此特征会改变槽内高频导体损耗的性质。当电动机高速运转时，导体的趋肤和邻近效应不断增强，损耗会随之增加。同时，损耗也会受温度的影响。另外，电动机的几何形状可能导致部分绕组结

构及其导体相对更容易冷却。举例来说，导体的间距和尺寸可以影响槽内的传热状况。

Laldin 和同事进一步执行了更深入的多物理场分析：他们耦合了电磁元件与热性能，借此识别电动机中可能导致灾难性故障的局部热点。他们发现导体内的电流密度会随着槽内通量密度的变化而大幅变化。他们计算了每个导体内的损耗密度，然后获得了温度分布，从温度分布可以看出电动机中不同区域的最高温度 (图 4)。

Laldin 说：“即使电流相同，损耗也会因导体的不同而产生差异。我们在 COMSOL 中模拟了这些变化，对其进行了一些近似的快速热分析，用于研究温度的分布。

通过识别局部最高温

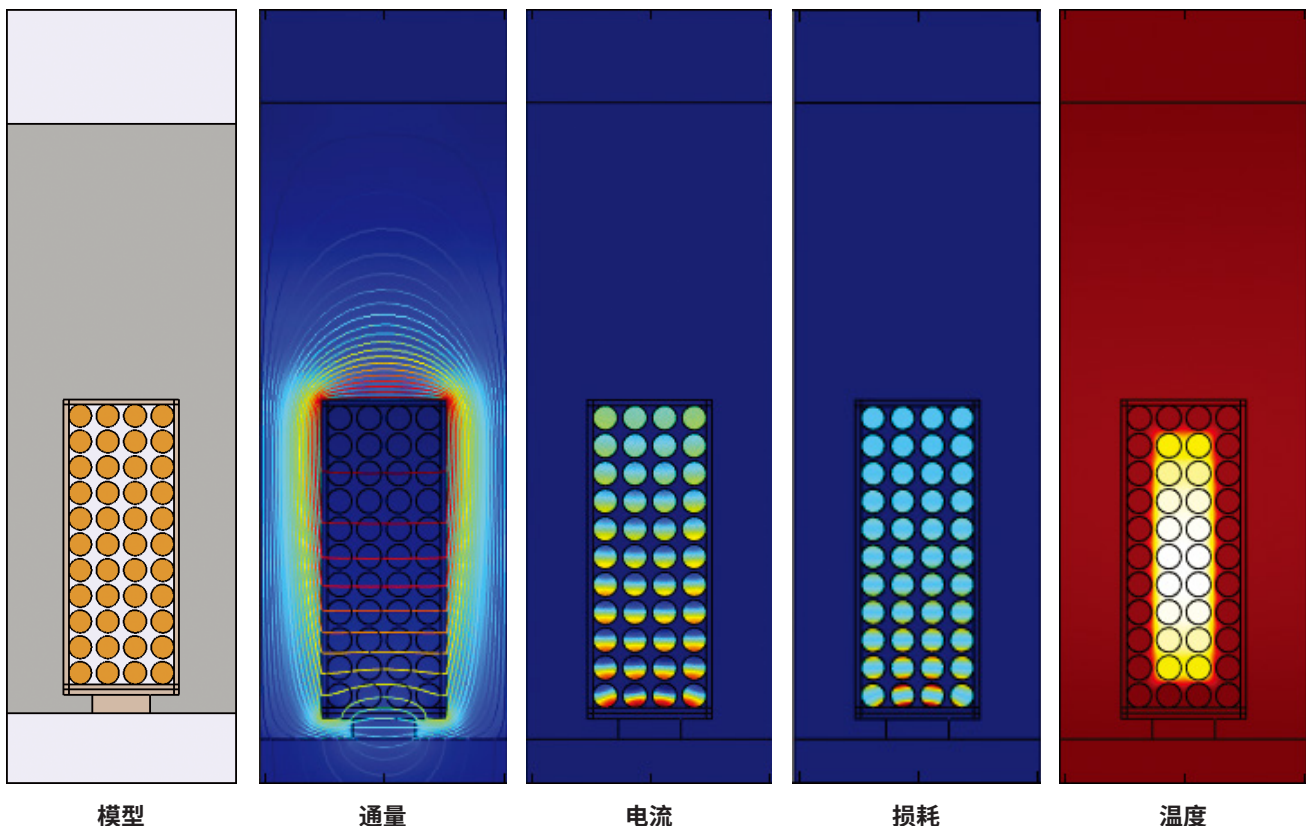


图 4. 从左到右: 定子槽模型中的模型几何形状、磁通量、电流密度、功率损耗和温度分布。

度，制造商可以判断设计的可靠性，预防具有破坏性的电动机故障。

这种多物理场分析方法让法拉第未来的工作人员能够兼顾电动机及其组件的设计和分析工作，节省了大量的研发时间。Laldin 说：“借助 COMSOL，我们无需再像以前那样与不同的团队一起进行十余次的迭代设计，现在仅需 1~2 次便可以完成整个设计。减少在不同部门之间的迭代次数是使用多物理场分析工具的优势之一。先由一个人进行优化设计，再由不同团队进行细微改进，其效率远高于每个团队都独立地分析物理场的各个方面。”

### » 仿真 App 交互未来

法拉第未来虽然是一家年轻的公司，但它已经在电动汽车行业取得了斐然的成绩。他们在两年的时间里设计、开发并制造了首辆电动汽车。他们还加入了 COMSOL 的“案例交流”在线社区，在这里用户可以上传并分享他们的模型，并与其他用户讨论技术和研究发现，以此推动自身发

展。Laldin 说：“成就这样的创新，借助我们供应商的能力是唯一切实可行的方法。在用户社区中，我们能够更加方便快捷地找到各领域问题的解决方案。”

Laldin 补充道，“我们从从事前沿技术开发，并且崇尚速度和效率，因此 COMSOL 是我们的必然选择。举例来说，如果我们需要在软件中实现一项新的功能，COMSOL 公司会立即响应我们的需求，并在下一个版本中加入该项功能。”

富有活力、开放包容

的“案例交流”论坛能够帮助法拉第未来保持市场的领先地位，Laldin 继续说道，“最重要的是，在线社区与创业精神十分契合，因为在这里，你会非常愿意分享非机密的数据和专业知识，所有参与交流的人都能从中受益。我一直认为，在用户社区进行知识交流的过程中，收获永远多于付出，尤其是当你能得到顶尖工业合作伙伴的指导意见的时候。这种交流合作的方式对于我们这样的创业公司而言大有裨益。” ☺