

案例研究 // 电气工程

使用基于MOP的帕累托优化开展多标准电机设计

Motor Design Ltd的专家展示了如何将Motor-CAD和optiSlang相结合，利用多物理场仿真技术对EV应用的电机设计空间进行数据驱动的探索。

简介

Motor Design Ltd. (MDL)的总部位于英国雷克瑟姆，其电机设计专家团队开发的Motor-CAD软件由高效的电机建模和仿真工具构成，能够全面展示电机的电磁属性、热属性以及机械属性。该软件的Motor-CAD Lab组件能从所有的多物理场子模型获取数据并以针对关键电机属性（如铁磁材料磁滞及磁饱和引起的损耗）生成的降阶模型(ROM)为基础，在几分钟内生成整个性能map图。

由创始人Dave Staton和开发总监James Goss领导的MDL团队，在学术界和业界积累了数十年的经验。优化设计工具Ansys optiSlang的引入如何得以从一开始就对电机设计的方法产生影响，是件值得思考的事情。一般情况下，我们首先会根据简单的初步计算做出一些基础的设置决定，如电机轴向长度、极数、槽数、绕组匝数。只有在确定了这个框架之后，算法优化才会在下游得到进一步应用。显然，在初步框架阶段采取的次优决策可能会使整个电机设计流程走上错误

的轨道。凭借其自动化功能和敏感度分析功能，Ansys optiSlang从整个电机设计流程的一开始就很大程度地实现了系统化和客观化。

本案例研究概述了当前用于插电式混合动力汽车的永磁同步电机的紧凑设计流程发展状况，并展示了如何运用自动化分步模型构建和基于MOP的帕累托优化来确保对可用设计空间进行真正的广角探索，即避免过早收窄框架选择范围。

电机模型

所选择的电机类型和拓扑是永磁同步电机。转子中嵌入的磁铁以V型排列形成磁极。这是一种著名的设计，它是由丰田为第一代普锐斯发明的。图1（参见下一页）展示了24槽16极电机的截面几何结构。事实上，槽数和极数是保持固定不变的，但绕组的匝数和电机的轴向长度被定义为变量，在整个优化过程中可变。

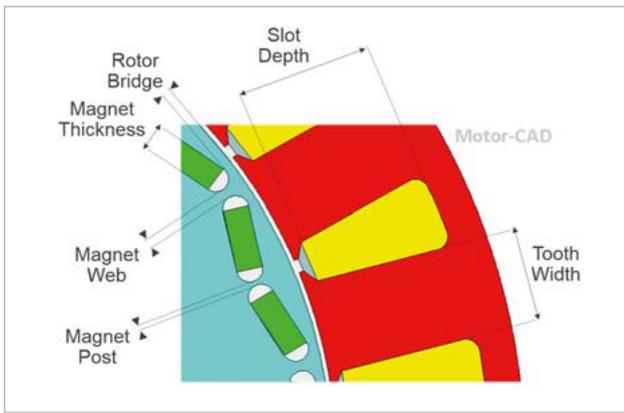


图1: 电机截面几何结构: 槽深比 = 槽深度 / (槽深度 + 定子轭部厚度) | 槽宽比 = 平均槽宽度 / (平均槽宽度 + 定子齿宽度) | 裂比 = 定子内径 / 定子外径

引入有关(1)槽宽度、(2)槽深度和(3)定子/转子大小的三个无量纲分割比率，有助于确保(a)没有在原理上不可行的几何结构和(b)通过在大范围内调整所有参数，实现十分不同的设计。所有灵活的截面几何结构参数加上可变的有效长度，构成9个维度的参数空间。

实际上，描述电路或者电气驱动条件的参数没有设置为变量。原因有两方面：一方面，电力电子的主要性能参数被视为给定的边界条件；另一方面，通过脚本实现的单个设计的预设评估方法加上Motor-CAD的内部例程，允许在评估流程中灵活地调节绕组设置，使之既能够以最佳方式符合电力电子设置的限制，又可以确保真实的槽满率、电流密度和冷却属性。

预设的Motor-CAD电机模型评估是什么样的？图2所示的是分析步骤的顺序原理图。有三个方面值得关注：(a)脚本避免对未满足峰值扭矩要求的电机设计方案进行完整评估；(b)根据绕组匝数缩放，规避了使用离散参数、组合规则或嵌套优化方法导致分析复杂化的情况；以及(c)在脚本的主要部分中，设计评估将范围从选定的工作点扩展到一个完整的周期。通过Motor-CAD的Lab组件可以做到这一点。

Lab模块使用Motor-CAD内的多物理场求解器，它将高效的电磁ROM构建方法与快速求解集总参数热模型和控制策略算法相结合，这样能在整个工作范围内快速实现电机特征化。

作为示例，图3和图4是针对下文讨论的优化设计之一开展基于Lab的电机分析的一些主要结果。图3展示了峰值运行和持续运行下的扭矩-速度范围曲线。在峰值性能下，电机内产生的热量远远超过冷却能力。峰值性能的特性线表明可以维持短时间的工作点，通常长达30秒。持续性能

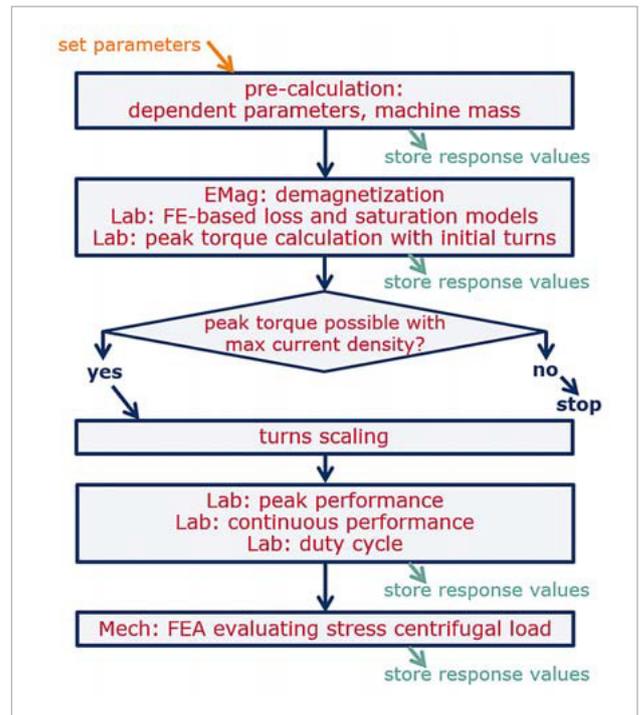


图2: 单个设计的预设Motor-CAD评估原理图

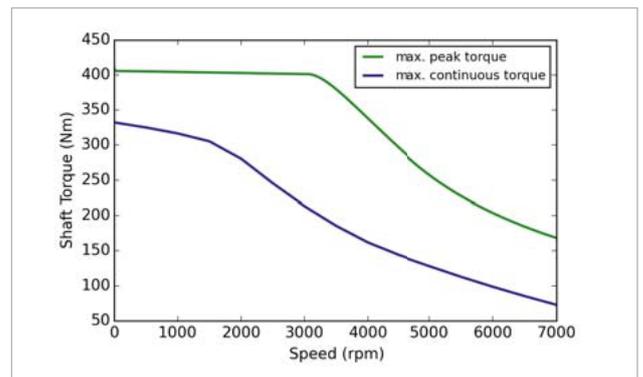


图3: 短时和持续性能范围曲线

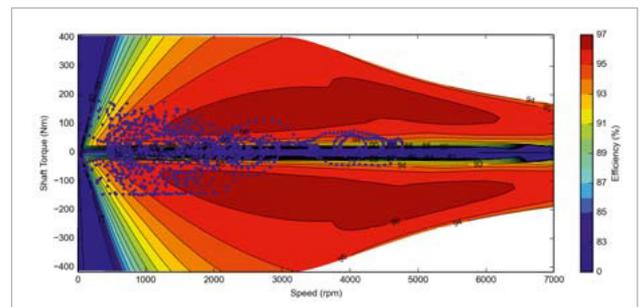


图4: 叠加WLTP-3工作周期后的效率图

曲线展示了电机热极限内所有工作点的分布范围，即所有可行的稳态工作点，其中耗散功率不超过冷却系统的容量。

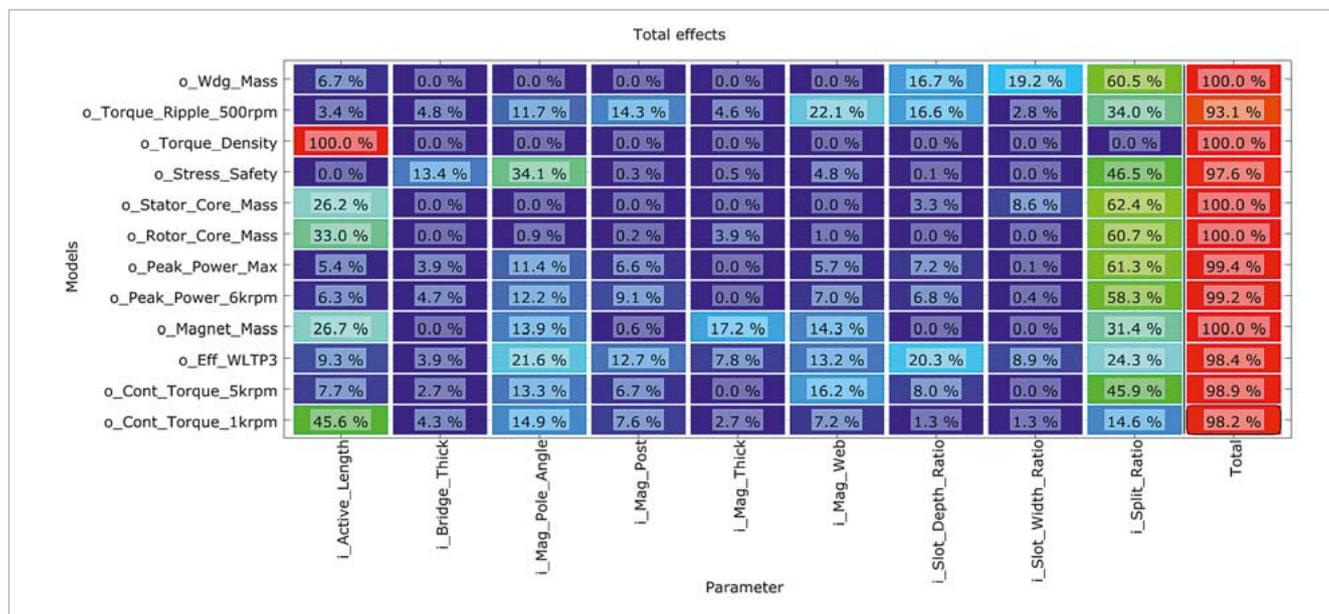


图5: CoP矩阵

图4所示的性能图的上半部分是电机效率，下半部分是发电机效率。它是根据“每安培最大扭矩”策略选择最佳工作点的。叠加的蓝点集代表WLTP-3循环工况。根据真实的循环工况来判断总体效率非常有价值，因为它并非局限于少数理想的高效率工作点，而这样的工作点在任何车辆的真实道路行驶中极少达到也极少用到。整个循环工况效率的计算方法是综合考虑电机的各个阶段和发电机的使用情况。

评估单个电机设计的最后一步是使用最新的Motor-CAD组件开展结构力学有限元分析(FEA)，用于计算转子中的材料应力，并推断结构完整性的安全系数（在120%超速时的离心载荷作用下）。

基于元模型的敏感度分析与优化

用上文简述的预设分析例程，使用Motor-CAD在几分钟内即可针对每个需要的设计变量建立完整的电机特性。在Ansys optiSlang中收集每个分析步骤的特征关键值，用于生成全面的响应面集，（如果CoP的分析足够好），这些关键值可以在单次运行中对单个MOP进行完整的设计空间探索和优化搜索。

在完成了400个点的高级拉丁超立方体抽样(LHS)设计变量研究后，14项设计被排查出不能满足基本扭矩要求，剩下386项可用设计进入数据库进行元建模。图5展示了针对所有

优化相关响应量与MOP关联的CoP矩阵。在该数据库中，设置上(1)不支持使用降维，(2)包含各向异性Kriging法和(3)提供零点CoP容差，从而能产生多个量。确定最佳MOP的方法不仅可以通过总CoP数，还可以通过在残差图中比较点分布来显示交叉验证误差。例如，如果要想让像扭矩这样的量实现最大化，则符合上方数据范围的模型显然比符合最低值的模型更有效。这种情况下，即使可用MOP的总CoP值非常接近，通过残差图也能分出优劣。

一般情况下，较高的总CoP值（通常高于97%）表明，对于大部分响应而言，只有很小一部分的方差仍然无法由它们的元模型解释，这为基于MOP的优化提供了理想的前提条件。只有对于描述扭矩脉动的量来说，93%的CoP值显著降低。这并不令人意外。扭矩脉动是由磁场的切向分量产生的，该磁场穿过转子和定子之间的气隙。扭矩效应由整个圆周的积分值决定。通常，当从流形空间模式导出积分量时，会丢失大量信息，并且响应行为很难与导致特定模式表达式的输入参数相关联。

利用MOP寻找最优的电机设计

由于较高的CoP值证明已捕获了大多数系统行为，因此MOP集合可通过优化目标和约束的组合来优化和回答假设问题。太严格的约束使问题解决方案变得不可能，但太弱的

Name	Type	Expression	Criterion	Limit	Evaluated expression
constr_Cont_Torque_1krpm	Constraint	o_Cont_Torque_1krpm	≥	315	349.671 ≥ 315
constr_Cont_Torque_5krpm	Constraint	o_Cont_Torque_5krpm	≥	124	158.852 ≥ 124
constr_Peak_Power_Max	Constraint	o_Peak_Power_Max	≥	120	146.288 ≥ 120
constr_Peak_Power_6krpm	Constraint	o_Peak_Power_6krpm	≥	100	136.27 ≥ 100
constr_Stress_Safety	Constraint	o_Stress_Safety	≥	1.5	1.9215 ≥ 1.5
obj_Efficiency_WLTP3	Objective	o_Eff_WLTP3	MAX		-93.4978
obj_Active_Volume	Objective	400/o_Torque_Density	MIN		17.8599
constr_Torque_Ripple_500rpm	Constraint	o_Torque_Ripple_500rpm	≤	10	10.8724 ≤ 10
obj_Material_Cost	Objective	$8*o_Wdg_Mass+80*o_Magnet_Mass+1.04*(o_Stator_Core_Mass+o_Rotor_Core_Mass)$	MIN		298.728

图6: 优化标准

约束将使算法无法完成具有竞争力的设计。由于无需进行仿真，因此这些用于设计空间定向的有价值的假设测试通常可以快速进行。在本案例研究中，在经历了几种设置备选方案后，发现图6中所示的具有三个目标函数的标准集具

这最终揭示了永磁电动机的众所周知的工程目标，即极高的扭矩和效率性能只有通过增加成本（稀土磁体）才能达到较小的电动机尺寸。

图8所示的帕累托前沿包含34到51项设计，每个前沿都

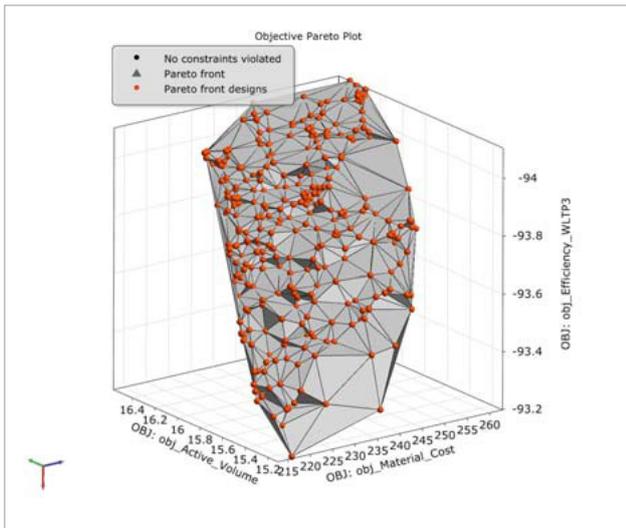


图7: 在MOP上运行进化算法得到的帕累托前沿结果

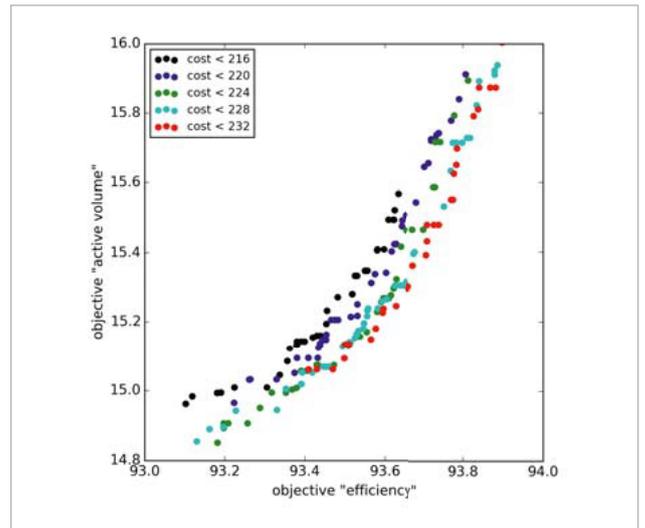


图8: 多个双重目标的帕累托前沿集合

有挑战性，而同时又产生了图7中所示的易于解释的高度竞争性设计的Pareto前沿。

虽然在3D空间中帕累托表面直接显示了电机效率与其体积之间的权衡关系，但对材料成本（体积乘以钢，铜和磁体的价格）的依赖性似乎很小，并且在那个方向上表面几乎平坦。通过将成本参数作为约束而不是目标，可以在2D目标空间中生成线性帕累托前沿结构。图8描绘了从独立进化算法(EA)运行中编译出五个这样的帕累托前沿的曲线图，

是进化算法调用约104次MOP函数的运行结果。显然，持续的进化优化能越来越精细地求解帕累托前沿，不断地对结构进行增量改进。在使用MOP求解器的情况下，该练习在计算量上没有很大的负担计算。然而，由于成本限制所引起的趋势已经变得很明显，而且大多数情况下倾向于选择少量明确界定的特征设计而非大量随机设计，该案例研究在最后阶段以运行单一目标优化(SOO)进行总结：正如将成本参数从目标改为限制后，从图7得到图8一样，将电机体积

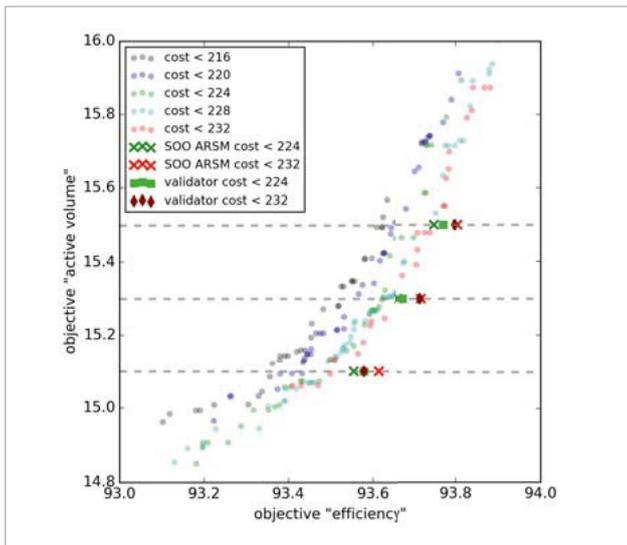


图9: 将验证器设计添加到帕累托前沿图

目标变为约束后，得到了单一目标标准集，它支持使用高效的确定性优化器，同时支持向图9的目标图中添加一系列最佳条件。以成本限制的两个选定步骤和体积限制（灰色虚线）的三个步骤为基础，并馈以满足约束的帕累托有效启动设计，Ansys optiSlang的ARSM算法运行6次，得到6个收敛解。这6个典型的参数组合通过进一步对设计开展完整的Motor-CAD评估得到最终验证。仿真结果表明，“效率”和“体积”这两个帕累托目标在图9中显示为“验证器”点。模拟正如越

向右越接近“体积”的极限（可见）一样，被优化器推向右边的点也接近“成本”的极限（未显示）。在“效率”方面，基于MOP的ARSM最优状态和“验证器”点之间存在可见的小幅偏差，这说明任何MOP只不过是近似模型。在“成本”和“体积”这两个方面，验证器的偏差显得非常小，这可以归结为进入这两个目标的量不复杂。在这6项设计中，成本<224且体积<15.3的设计被用于绘制图3和图4中的图形。

总结

该案例研究以参数化永磁电机模型为例，简要介绍了如何在Motor-CAD中对其开展电磁、热和性能图的预设评估。这种电机仿真的设置能一步完成敏感度分析和MOP生成，从而实现完整的最优设计流程。在Optimal Prognosis的元模型上，能以深入探知为目的，探索极广阔的设计空间并（或多或少）完成约束优化。此外，本文还简要介绍了如何有意识地锐化约束、生成帕累托前沿以及如何在权衡考虑后选择折衷解。本文旨在展示如何将高效的Motor-CAD建模方法与Ansys optiSlang算法和自动化功能等优势相结合，从一开始便推进电机设计的最佳实践，从而减少决策点并提高客观性。

作者：// Nicolas Rivière、James Goss (Motor Design Ltd.)、Markus Stokmaier (Dynardo GmbH)