

利用虚拟样机改进电子液压助力转向系统

FZB 科技公司利用多物理场仿真技术指导电子液压助力转向系统的设计改进。

作者 **LEXI CARVER**

如果您曾经驾驶过没有配备助力转向系统的汽车，一定有过费力转动方向盘来带动轮胎以控制汽车行驶方向的糟糕驾驶体验。幸运的是，助力转向系统的诞生让那些苦日子一去不复返。助力转向系统通过转向齿轮让驾驶员能够轻松地掌控方向。多年来，助力转向系统经历了多次产品更迭，其性能随着设计的改进变得越来越强大。

直至上世纪九十年代，液压和电动助力转向一直是应用最为广泛的两种助力转向系统。随着技术的发展，在这两项技术的基础上发展出了一种更为节能的解决方案——电子液压助力转向 (electrohydraulic power steering, 简称 EHPS)。EHPS 系统保留了传统的液压装置，并使用电动机为液压泵提供动力 (图 1)，而不是汽车的发动机。由于电机的输出可以根据方向盘的角度和车速进行调整，因此大幅降低了能量损耗。

当驾驶员转动方向盘时，液压泵将液体从储液罐输送到转向齿轮，转向齿轮会施加额外的扭矩来带动轮胎。除此之外，电子液压助力转向系统部件还包括电子控制单元 (electronic control unit, 简称 ECU)、扭矩传感器、流体压力控制阀和管路。

⇒ EHPS 的复杂之处

助力转向系统内相互关联的部件非常多，一个零件的响应往往依赖于另一个零件，因此设计工作十分复杂。任何一个看似微小的调整都可能对正常的功能、效率和可靠性带来重大影响。

“多物理场仿真可以加速设计的优化过程，” Steven Qi 解释道。Qi 是美国密歇根州普利茅斯市的 FZB 科技公司的项目经理，并从事机械工程方面的研究。FZB 公司的主营业务是为汽车市场提供研发服务，领域涵盖电机、传感器、基于 RFID 技术的无钥匙点火系统以及 EHPS 系统。

FZB 的工程师经常使用 CAD 工具和 COMSOL Multiphysics® 软件对 EHPS 部件进行模拟 (图 2)。这种分析方式可以帮助他们更好地了解系统内部的运行特性，从而在进行实际的物理测试之前，使虚拟设计尽可能地接近最终成品。

“仿真能够帮助我们清晰、全面地理解问题，进而让我们在制作产品的物理样机前就能满足汽车的各项设计需

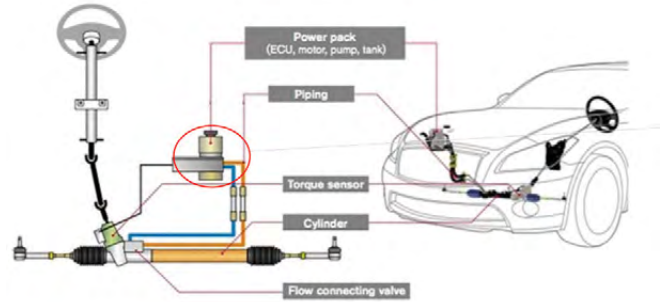


图 1. 电子液压助力转向 (EHPS) 系统示意图。图注: Power pack - 动力单元; ECU - 电子控制单元; motor - 电机; pump - 泵; tank - 油箱; Piping - 管路; Torque sensor - 扭矩传感器; Cylinder - 油缸; Flow connecting valve - 流体连接阀

求。” Qi 解释道，“在对系统的改进过程中，我们需要了解系统在力学、热力学、流体、声学 and 电磁等各方面的性能表现。”

物理测试和验证既昂贵又耗时，所需时间甚至可能长达六个月。然而，即使物理样机成功通过了测试，其设计仍需进一步优化。“冗长的测试过程会大幅延长设计周期，所以我们特意引入了仿真分析来加速设计进程。我们在和克莱斯勒 (Chrysler) 公司合作时，会定期地与他们的工程师进行沟通，确保每次进行物理验证之前都能够在

COMSOL 软件中对设计进行改进。否则我们将很难满足用户提出的需求。”

为了深入研究引擎盖下各部件的性能表现，Qi 带领 FZB 公司的研发团队对新型 EHPS 设计的主要部件进行了模拟，其中包括 ECU、隔离安装支架、永磁电机、储液罐和斜齿轮泵。团队不仅模拟了每个零件，而且还针对不同车型设计，对整个复杂的装配体进行了多物理场分析。

这些热、力、流体和电磁现象的分析数据为研发团队提供了可靠的依据，帮助他们快速解决了与热性能、动态

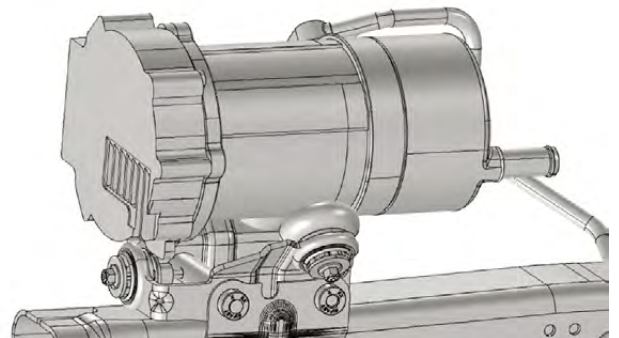


图 2. 用于 EHPS 设计分析的多物理场几何模型。其中包含可向周围空气传热的翅片、安装部件以及流体端口。

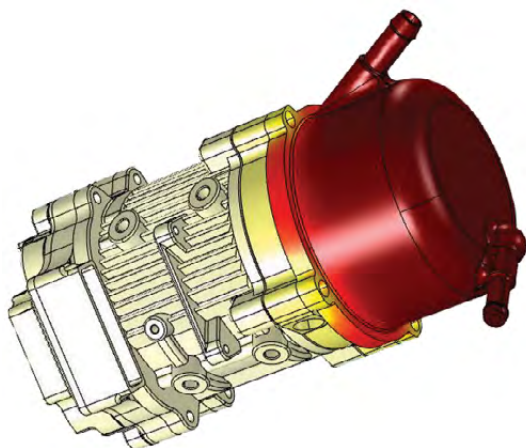


图 3. 研发人员执行了稳态仿真和瞬态仿真, 在不同车辆载荷下的泵测试中, 对不同零件的温度分布进行了测量。仿真结果显示了局部几何结构、电机设计参数、ECU 通孔尺寸和数量以及其他导热特性的理想范围。

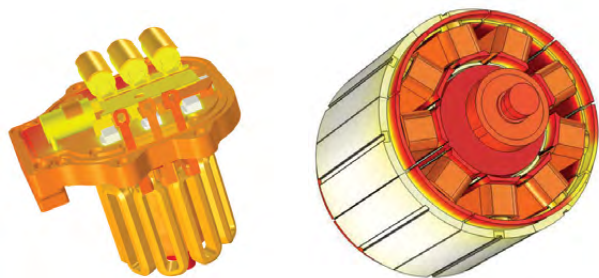


图 4. ECU 和转子总成(左图), 以及定子和转子组件(右图)的温度。此模型预测了当产品安装在车辆上时的系统热性能。

运动控制、泵内液体输送, 以及噪声、振动和声振粗糙度 (noise, vibration, and harshness, 简称 NVH) 相关的问题 (图 3)。

⇒ 引擎盖下的发热问题

能够在安全的温度范围内正常运行是助力转向系统设计中的一个重要因素。Qi 创建了一个可以分析泵内传热和转向齿轮润滑油发热的模型。研究团队使用流体温度作为可变的边界条件, 从而可以对不同运行环境下系统的温度分布进行预测。

Qi 解释说, 当车轮被路沿卡住, 而驾驶员试图转动轮胎时, 泵承受的应变将达到最大。如果在现实中发生此类情况, 即使车轮被卡住, 汽车的电池仍然会向泵输送电能, 这会导致 ECU 和电机磁体发热。

研发团队基于汽车制造商提供的运行条件, 对动力转向液在上述情景下的性能表现进行了模拟。此外, 他们还研究了在车轮被锁定的情况下, 转向系统内产生的热量对 ECU 组件温度的影

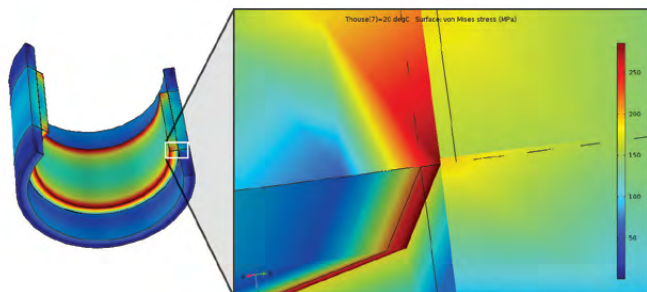


图 5. 仿真分析了外壳和定子过盈配合的应力水平。

响, 这些 ECU 组件包括金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOS-FET) 和线束等。他们采用了多尺度建模的方法, 首先对单个组件进行仿真, 之后将各个仿真集成为完整的系统, 并将仿真结果与实际的测试数据进行了相关性分析。在分析中, 他们可以通过调整边界条件和材料属性对各类配置的优缺点进行探究。

温度分布也会对电机的外壳、定子、转子和杆等结构部件产生影响 (图 4)。金属的热膨胀现象会影响电机的效率, 因此需要更大的扭矩和转速来满足泵功率输出的需求。动力粘度和密度等流体属性也会随温度而变化, 因此需要不断调节齿轮, 才能保持平稳、连贯的操作。

“当车辆停止不动时会迫使泵做大量额外功, 这种情况是我们面临的巨大挑战。” Qi 说道, “我们不希望零件因为工作温度过高或过低而出现故障, 因此对现实中可能出现的各种极端状况进行了模拟, 以确保系统在极端情况下依然能够稳定运行。”

Qi 对热膨胀引起的电机、定子和泵等部件的壁厚变化进行了模拟, 目的是确认零件中的应力水平不会超过其屈服应力 (图 5)。

电机的定子给研发团队提出了一个特别的挑战: 热膨胀问题可能会致其失效。幸运的是, 研发团队在初期阶段便从 COMSOL 仿真结果中推断出了这一问题, 他们在设计中增加了一个凹槽, 从而避免在定子形状改变时出现问题。

当需要考虑电机外壳和定子的过盈配合及过盈量时, 上述的几何因素便至关重要。这是因为外壳和定子具有不同的热膨胀系数 (将导致受热时变形的不同), 因此研发人员需要仔细选择过盈量和几何厚度, 确保外壳和定子都不会在工作温度范围内失效。

⇒ 流体、噪声和电子设备: 一个因素都不能少

FZB 的研发团队还建立了一个电磁模型, 用于分析螺旋磁体

“一款车型从概念设计到成功面市, 涉及了多方面的因素, 整个设计周期的时间安排非常紧张, 能够实现跨学科团队合作的多物理场工具正是我们需要的。”

— STEVEN QI, FZB 科技公司
项目经理

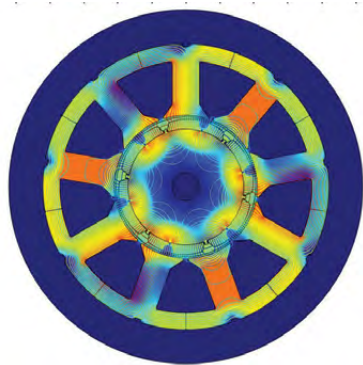


图 6. 仿真显示了 EHPS 电机性能瞬态研究中的磁通密度和磁矢势。

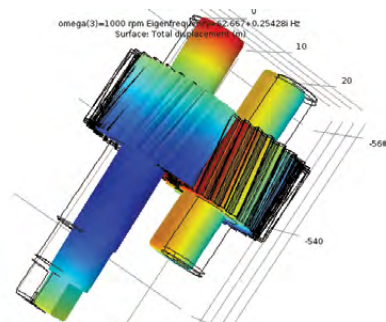


图 7. COMSOL 仿真结果显示了当转速为 1000 RPM 且特征频率为 2718.2 Hz 时斜齿轮的位移, 上述结果是在导入 PumpLinx® 软件中的流体分析数据后得出的。

WORKS® 软件对几何模型进行更新。接着, 他创建了一个声学仿真来研究泵在输送过程中的振动情况(图 7~8)。此外, 他使用转子动力学仿真确定了泵的临界速度。当泵的转速达到临界速度时, 振动会急剧增加, 致使传动装置失效, 并发出异响、降低系统效率。

“我们不仅需要了解系统的噪声会有多大, 还要知道它对电磁和流体特性的影响。” Qi 解释道, “这些现象是相互关联的。我们模拟了流体的压力脉动, 随后在 COMSOL 中分析了脉动对空传噪声的影响。根据模拟结果, 我们有信心能对轴承、传动轴, 以及斜齿轮和斜齿轮泵衬套内流体压力释放槽的形状进行优化。”

⇒ 为 EHPS 的优化工作铺平道路

最终, FZB 团队基于 COMSOL 的计算结果, 对泵的几何结构设计提出了大量有效的改进方案。他们还根据仿真结果生成了一个关于功耗限制的报告, 可帮助工程师优化设计方案, 以满足汽车各方面的设计要求。此外, 他们还研究了不同的边界条件对能量消耗和泵功率输出的影响, 并将不同场景的模拟结果和

和斜齿轮泵在泵送过程中不同时间步长下的性能(图 6)。仿真结果向他们展示了电机随着时间变化的性能表现, 不仅如此, 模型还准确计算出了线圈和铁芯上的热损失。基于这些信息, 研发团队对几何结构进行了调整, 使零部件中的温度分布更加均匀。

为了能够更加准确地了解电磁对流体输送和泵效率带来的影响, 研发团队结合了电磁仿真与 CFD 分析。团队在研究中使用了专门用于泵建模的 PumpLinx® 软件, 用于获得流体效率、流量和压力脉动等数据。

Qi 将流体数据导入自己的 COMSOL Multiphysics® 模型中, 并通过 SOLID-

实际驾驶测试数据进行了对比验证。

Qi 总结道: “之所以会选择 COMSOL 软件, 是因为我们需要对所有耦合的物理现象进行分析。一款车型从概念设计到成功面市涉及多方面的因素, 整个设计周期的时间安排非常紧凑。一款真正能够实现跨学科团队合作的多物理场工具正是我们需要的。COMSOL 软件的强大之处在于能将带有

不同边界条件的多个物理场耦合在一起, 帮助我们准确地预测了 EHPS 设计的性能表现。” ❖

参考文献

1. Qi, F., Dhar, S., Nichani, V., Srinivasan, C. et al., "A CFD study of an Electronic Hydraulic Power Steering Helical External Gear Pump: Model Development, Validation and Application," SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.

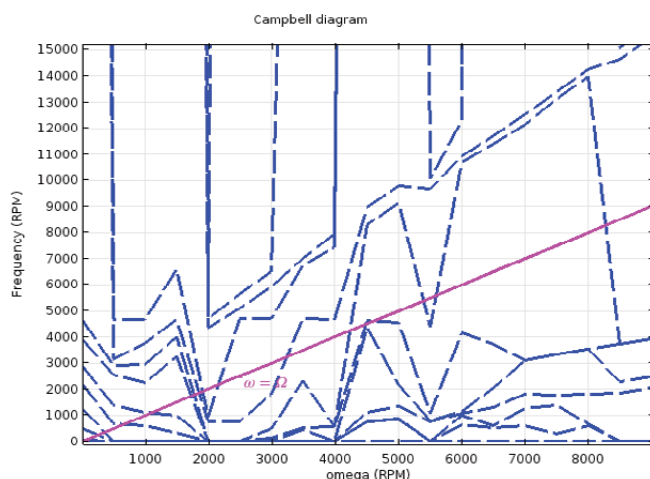


图 8. COMSOL 软件生成的坎贝尔图显示了特征频率随斜齿轮角速度的变化情况。



上排从左到右依次为: FZB 公司 CEO Jinming Yang, 总监 Zhonghui Bing, 项目经理 Steven Qi。

下排从左到右依次为: FZB 公司经理 Liang Yang; 中国阜新德尔汽车部件股份有限公司执行总监 Dahong Yu, 经理 Ying Xie。