



SIEMENS

Ingenuity for life

Siemens PLM Software

解决混合动力和 电动汽车的声学行为问 题

使用仿真技术避免噪声、振动与声振粗糙度问
题

高层摘要

如今，电动汽车设计过程主要关注的是节能。然而，汽车制造商并不应该因此降低对于声学行为的关注。尽管电动汽车的总体噪声水平理应低于内燃发动机 (ICE) 的噪声水平，但这并不是万无一失的，问题有时候仍会出现，尤其是存在结构共振时。在设计早期执行声振仿真和分析是必不可少的，这样才能防止问题发生并提供高质量的产品。Simcenter 解决方案帮助工程师提前解决设计中的结构共振问题并准确预测相关噪声、振动与声振粗糙度 (NVH) 行为。

简介

一方面要响应汽车减排的法规要求[1]，另一方面要赢得消费者对于节能、环保型个人交通工具的喜爱[2]，越来越多的汽车动力系统已经转变为电力发动。图 1 显示的混合动力和纯电动汽车销售市场预测，清晰地表明未来汽车将不断增加此项技术的应用[3]。

为混合动力和电动汽车开发电动引擎困难重重。用电动引擎替代传统的内燃发动机，无疑是车辆驾驶中的重大变革。同时它也会影响车辆的噪声、振动与声振粗糙度 (NVH)。尽管电动引擎的总体噪声水平通常比 ICE 噪声水平低，但谐波成分决定了音调。因此，其噪声特征往往令人讨厌[4]。此外，降低背景噪声的需求也提高了相关次要噪声来源的重要性，譬如马路上的噪声、风声以及风扇和电动辅助设备发出的噪声。

电动引擎设计团体往往仅通过降低转矩脉动（切向力）解决 NVH 问题[5]。但是，本白皮书还会着重探讨噪声特征上径向力的其他作用。在设计早期采用详细的声振仿真方法，电动机/电动车工程师可以更好地理解所有相关物理现象。这样，他们就可以尽可能减少甚至避免太多的振动和不良的噪声感觉。

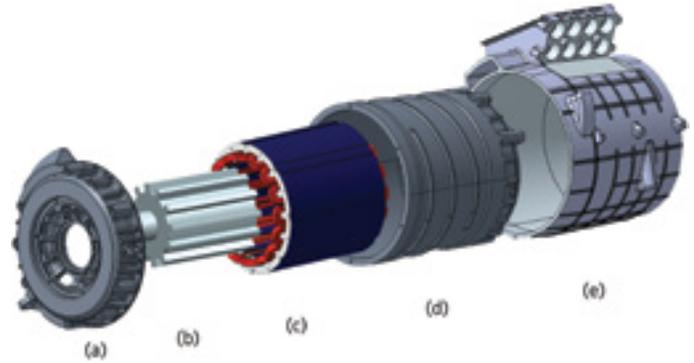


图 2：电机的主要部件包括：(a) 座罩；(b) 转子和轴承；(c) 定子和绕组；(d) 冷却套和 (e) 机壳。

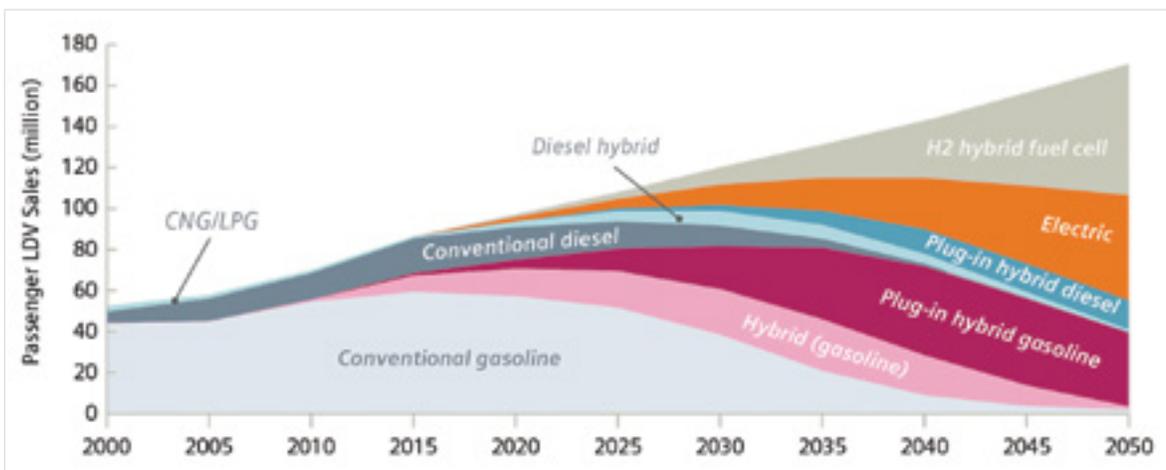


图 1：轻型汽车 BLUE Map 2000-2050 年的销售额（数据来源：IEA [3]）。

结构共振是产生绝大部分噪声的原因

电机有很多共同部件，正如图 2 所示。这些部件和其他部件或多或少都会产生噪声。其中一些常见的噪声源包括：结构的电磁 (EM) 激励、空气动力（由转子和定子之间的运动产生）、轴承（绝大部分与轴承和设计缺陷有关）、偏差和不平衡（装配原因）。结构 EM 激励产生的噪声问题需要在设计阶段解决。

参考文献研究表明，降低转矩脉动来减少电机噪声辐射是业内普遍惯例 [5、6、7、8 和 9]。这种单方面的方法广泛应用于多种不同电机类型，包括无刷永磁电动机 (PMM) [4]、永磁同步电动机 (PMSM) [6]、无刷直流电动机 [7] 和开关磁阻电机 (SRM) [9]。这些研究在很大程度上表明，转矩脉动产生了施加于转子的切向力变动。因此，它在评估电机运行性能方面起着至关重要的作用。但转矩脉动并非 NVH 问题的唯一根源。此白皮书阐述了结构共振，尤其是径向激励的平面模态在电机噪声研究中的重要影响。遗憾的是，结构共振并不能简单地关联至转矩脉动。但是本研究意欲深入探讨噪声生成原理，让设计师和工程师在设计过程早期解决 NVH 问题。

与旋转机械相关的声学 and 结构响应通常由前期试验评估。产生的物理量在瀑布图之类绘图中可以表示为线性增长转速度的函数。图 3 显示了 SRM 此类试验的一个示例。

此图中可以观察到两种主要现象（图 3 下面一幅图中以黄色梯度线和红色竖线高亮显示）：

- 梯度线代表电机阶次线。在所有固定旋转速度中，所有响应谱都可以在基本频率上显示离散峰值，与此对应的是电机运行的谐波和次谐波。这些峰值频率随着变化的旋转速度线性改变时，会在瀑布图中以梯度直线显示。图 3 显示此特定电机的基本（最低）阶次为 6 阶。这与电极数完全匹配
- 竖线与旋转速度无关，而是对应于结构共振。这些可以通过模态分析进行研究。此特定电机结构的试验在 1,390 赫兹 (Hz) 左右显示出椭圆形模态，这与图 3 中竖线的频率完全吻合

声学响应在两种现象重合时达到最高值。这正是阶次线和共振线相交的地方。在这两种工况下，由于这些频率中结构的机械阻抗较低，谐波电磁力产生的能量大幅增强。换言之，声源和能量传递都达到最大值。准确预测这种交互作用需要多物理场仿真。捕获整个系统行为的仿真策略可以帮助解释噪声特征测量值的大小。

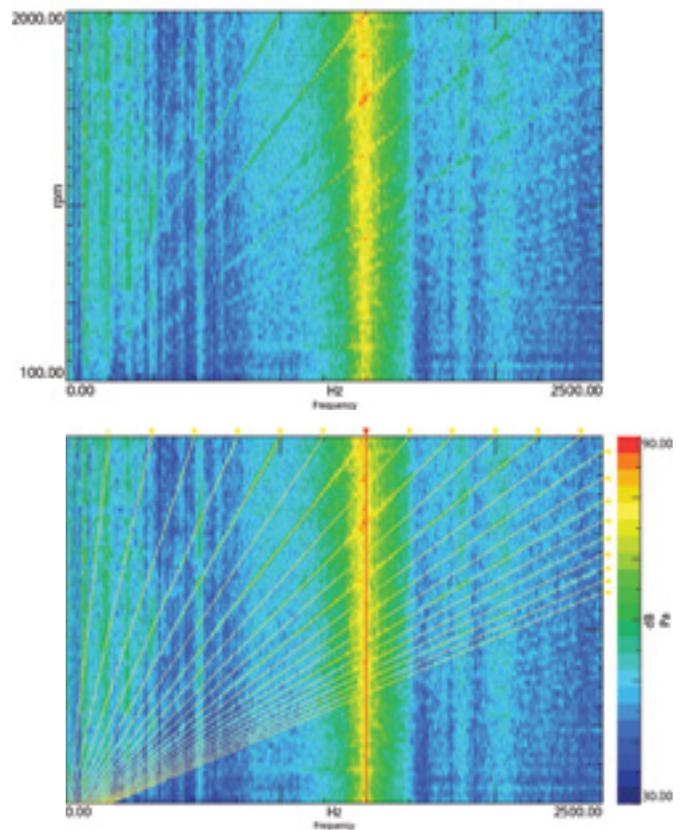


图 3：SRM 电机噪声特征的测量。

电动引擎或电动车中的噪声源

转子和定子不对齐时，会产生电磁力。这些电磁力存在径向和切向分量，如图 4 所示。从运行角度而言，切向分量最有趣，因为它产生了能量。径向分量被转子和定子吸收并在弹性形变中发生转换。

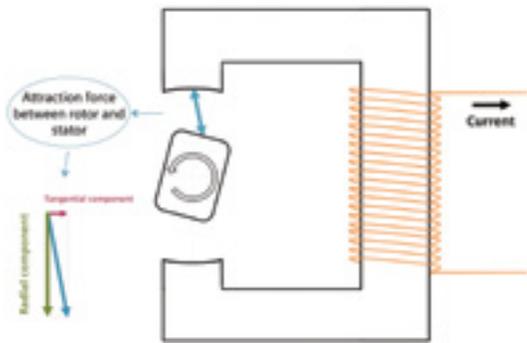


图 4：SRM 中产生的电磁力。

如图 4 所示，一个定子齿部上的吸引力可以分成切向分量（红色）和径向分量（绿色）。对单极对称的电机机械角度函数进行绘图时，我们发现径向力比切向力幅值高出很多（图 5）。因此，径向力很有可能成为产生振动和相关噪声的主要来源。

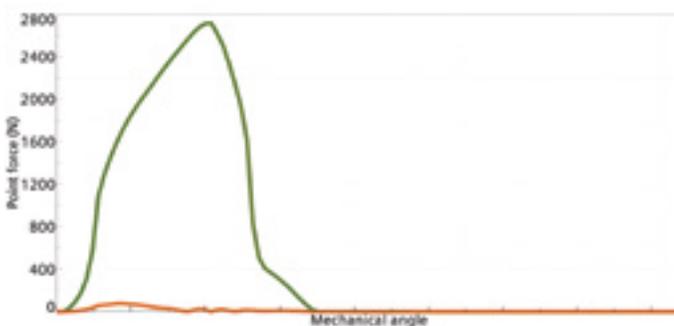


图 5：单极对称电机定子齿部径向和切向力的变化。

在此基础之上，工程师可以研究结构是如何动态响应力输入的。通过考虑每个力分量对于外表面加速度的作用，工程师可以计算相应的传递函数。图 6 显示平面模态支配结构响应，径向力分量在这些模态激励中起着最为重要的作用。

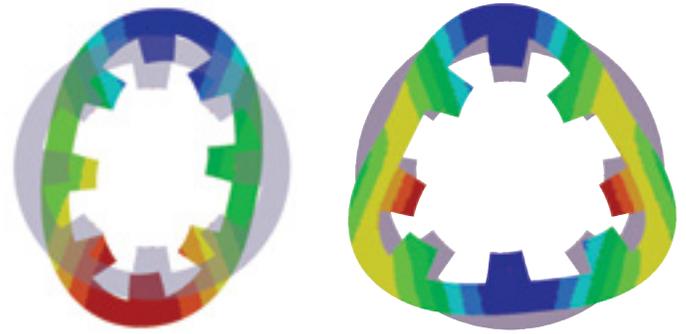


图 6a：椭圆形和三角形模态形状。

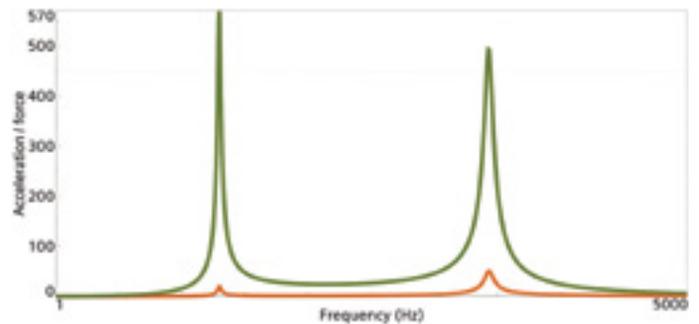


图 6b：切向（红色）和径向（绿色）力分量之间的传递函数和外表面加速度。

将这两点结合起来观察，不难发现，电机的噪声特征主要由径向力而非切向力的变化决定。解决电动系统中的 NVH 问题时，工程师需要考虑这一方面，同时也不能忽略切向力和转矩脉动可能产生的效应，因为它们会让变速器产生连续短促的噪声。

声振仿真过程

根据定义，电机产生的噪声涉及多物理场仿真，因为谐波电磁力会激励结构振动，随后会产生外表面的噪声辐射。在这些仿真过程中，难点往往在于以数量形式表示不同域之间的耦合。譬如，在强耦合工况中，不同域需要同时求解，因为它们相互作用。然而，这一特定工况却显示了所有域之间的弱耦合。因此，不能过于指望定子变形影响电磁力，或是声压影响表面振动 [10]。正因如此，可以采用简单的级联仿真过程；这样，一个域的结果就可以作为边界条件轻松地传递到下一个域。

NVH 分析从电磁计算开始，旨在找到定子上的力。这些力的计算正如图 7 下半部分所示。生成的力被传递到结构有限元 (FE) 模型中。此时，需使用 Simcenter 3D™ 软件。首先计算定子的振动模态，随后按照图 7 上半部分指定，进行基于模态的结构力响应仿真。接下来，定子产生的位移被映射到声学网格并用作声振辐射问题的边界条件。

图 7 显示特定设计在解决电磁和 NVH 问题时所遵循的不同步骤或迭代。当最终电磁设计出现问题时，可以通过改变 EM 属性（选择不同的材料、不同的控制策略等）或是重新定义/更改电机的几何体和拓扑结构来解决问题。此外，可以比较最终仿真声学特征和特定目标、对结构属性和电机几何体进行修正，或是重新定义施加于结构的力特性，从而改进 NVH 性能。

此过程的核心在于强大的电磁和声振预测仿真工具，譬如 JMAG® 仿真软件和 Simcenter 3D。对于声振分析，Simcenter 3D 软件提供充分的预测功能，可以与多物理场过程无缝集成。使用 Simcenter 3D 软件可以实现仿真

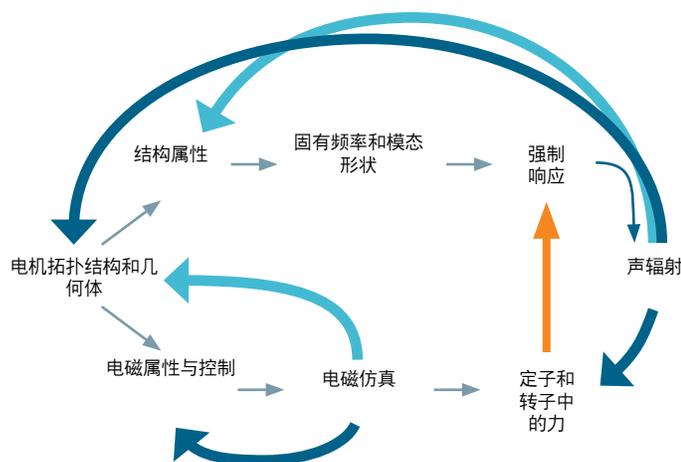


图 7：电机完整多物理场 NVH 分析设计图。

和试验测试之间的强大关联，正如论文“Multiphysics NVH Modeling: Simulation of a Switched Reluctance Motor for an Electric Vehicle, IEEE Transactions on Industrial Electronics” [10] 所述。

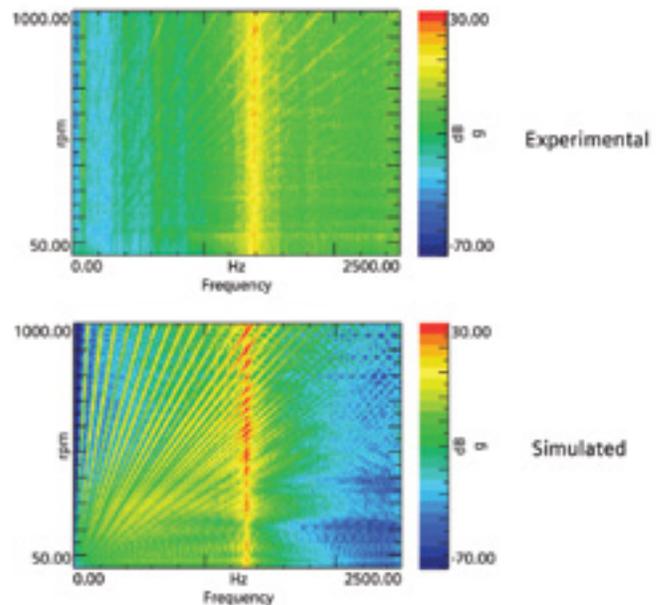


图 8：从 0 到 1,000 转/分的前期试验和仿真

结论

此白皮书展示了采用新型方式进行电机设计的价值所在。为成功解决电动汽车中的声学问题并满足消费者对于高质量追求，汽车设计师需要在车辆开发设计早期采用先进的综合 NVH 分析。此白皮书推荐大家转移注意力，因为径向分量比转矩脉动对于电动汽车的噪声影响更多。要完全理解这些原理和电机声学特征的主要作用因素，建议进行高级声振分析。

参考信息

1. 欧共体委员会向理事会和欧洲议会提出的建议概括了委员会有关减少客车和轻型商用车 CO₂ 排放的战略结果（2007 年 2 月 7 日；相关网址为：http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/documentation_en.htm
2. 公众咨询 2006 年 6 月到 8 月的报道“Review of the EU strategy to reduce CO₂ emissions and improve fuel efficiency from cars”
3. 国际能源署 2009 年的出版物“Technology road map: Electric and plug-in hybrid electric vehicles,”2011 年 6 月更新
4. M.-A. Pallas、M. Berengier、J. Kennedy、P. Morgan、S. Gasparoni 和 R. Wehr 共同编写的“Noise emission levels for electric and hybrid vehicles — First results of the FOREVER project,” Transport research arena, 2014
5. H.M.Soliman 和 S.M.Hakim 共同编写的“Torque ripple minimization, suppress harmonics, and noise of brushless Pm synchronous motors derived by field oriented control,” International journal of research and reviews in applied sciences, 12 (3), 2012
6. K. Gulez、A.A.Adam 和 H. Pastaci 共同编写的“Torque ripple and EMI noise minimization in PMSM using active filter topology and field-oriented control,” IEEE transactions on industrial electronics, volume 55, number 1, 2008
7. D.-K. Kim、K.-W. Lee 和 B.-I. Kwon 共同编写的“Commutation torque ripple reduction in a position sensorless brushless DC motor drive,” IEEE transactions on power electronics, volume 21, number 6, 2006
8. S.-M. Hwang、J.-B. Eom、G.-B. Hwang、W.-B. Jeong 和 Y.-H. Jung 共同编写的“Cogging torque and acoustic noise reduction in permanent magnet motors by teeth pairing,” IEEE transactions on magnetics, volume.36, number 5, 2000
9. Raul Rabinovici 编著的“Torque ripple, vibrations, and acoustic noise in switched reluctance motors,” HAIT journal of science and engineering B, volume 2, issues 5-6, pp. 776-786, 2005
10. F.L.M.Dos Santos、J. Anthonis、F. Naclerio、J.J.C.Gyselinck、H. Van der Auweraer 和 L.C.S.Goes 共同编写的“Multiphysics NVH modeling: Simulation of a switched reluctance motor for an electric vehicle, IEEE transactions on industrial electronics,” 61-1(2014), 469–76

Siemens PLM Software

总部

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 972 987 3000

美洲

Granite Park One
5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
+1 314 264 8499

欧洲

Stephenson House
Sir William Siemens Square
Frimley, Camberley
Surrey, GU16 8QD
+44 (0) 1276 413200

亚太地区

Suites 4301-4302, 43/F
AIA Kowloon Tower,
Landmark East
100 How Ming Street
Kwun Tong, Kowloon
Hong Kong
+852 2230 3333

关于 Siemens PLM Software

Siemens 数字化工厂事业部旗下业务部 Siemens PLM Software 是全球领先的软件解决方案提供商，致力于推动行业数字化转型，为制造商创造新的机会并实现创新。Siemens PLM Software 的总部位于美国得克萨斯州普莱诺市，在全球拥有超过 140,000 个客户，并与所有规模的企业协同工作，帮助他们转变将想法变成现实的方式、产品实现方式以及使用 and 了解运行中产品和资产的方式。要了解有关 Siemens PLM Software 产品和服务的更多信息，请访问 www.siemens.com/plm。

www.siemens.com/plm

© 2018 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. Siemens 和 Siemens 徽标是 Siemens AG 的注册商标。Femap、HEEDS、Simcenter 3D 和 Teamcenter 均为 Siemens Product Lifecycle Management Software Inc. 或其附属公司在美国及其他国家/地区的商标或注册商标。Simcenter、Simcenter Amesim、LMS Samtech Samcef、LMS Samcef Caesam、Simcenter SCADA5、Simcenter Testxpress、Simcenter Soundbrush、Simcenter Sound Camera、Simcenter Testlab 和 LMS Virtual.Lab 是 Siemens Industry Software NV 或其任何附属公司的商标或注册商标。Simcenter STAR-CCM+ 和 STAR-CD 是 Siemens Industry Software Computational Dynamics Ltd. 的商标或注册商标。所有其他商标、注册商标或服务商标均属于其各自持有方。

54810-A11-ZH 8/19 LOC