高压电缆中铠装损耗的三维模拟

文/ BRIANNE CHRISTOPHER
COMSOL 公司

位于瑞典卡尔斯克鲁纳的 NKT 公司使用数值模型来研究电磁场，并计算了三维电缆设计中的铠装损耗。他们通过实验测量，对仿真结果的准确性进行了验证。

全球线缆行业的市场价值高达数千亿美元。据 Infinium Global Research 报道，截至 2025 年，电缆市场规模有望达到 2 200 亿美元[1]。快速增长的电缆行业的主要收入来自电缆的安装、维护和开发。例如，连接挪威和荷兰电网的 NorNed 电缆项目，在 2008年的安装成本约为 6 亿欧元（约 45 亿人民币）[2]。如果对这种规模的电缆进行维修或更换，费用将非常高昂。据 2010 年 SubOptic 海底电缆会议的一份报告估计，海底电缆的维修费用将超过每天 12 000 美元，每个项目的维修费用将高达 100 万美元以上[3]。电缆成本如此之高，需要很多年才能获 得投资回报。

除了作为主要的投资项目，电缆还必须进行实验测试（如图 1 所示）。事实上，全球电缆供应商 NKT 公司对其所研究的电缆已经进行了多年的实验测试，这项工作既费时又昂贵。“电缆损耗的测量是一件复杂的事情。”NKT 的资深分析工程师 Ola Thyrvin 说。

是否有解决这一问题的有效方法呢？位于瑞典卡尔斯克鲁纳（Karlskrona， Sweden）的 NKT 团队通过电磁场建模，对电缆设计进行了虚拟测试，将不同的电缆参数如何影响铠装损耗的过程可视

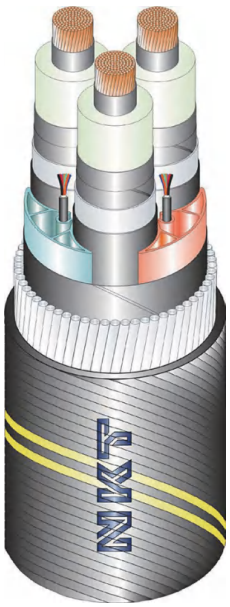

图 1 高压电缆连接了世界，但其维护成本昂贵并且难以分析（图片由 NKT 提供）

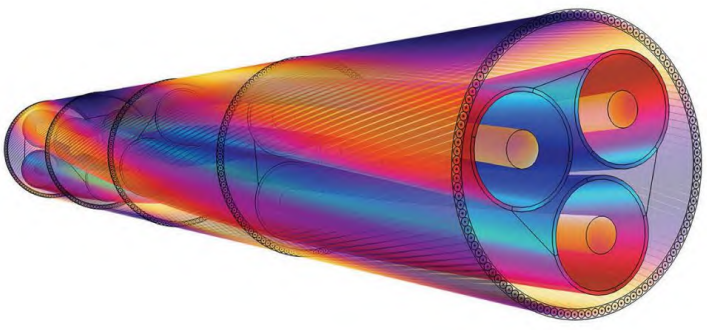

图 2 在 COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件中建立的三维电缆模型

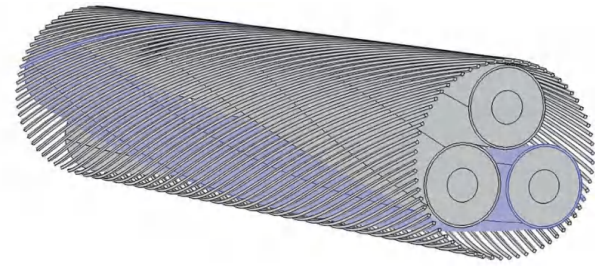

图 3　三维电缆模型的几何结构，包含铠装海底电缆的基本特征：导体、屏蔽层和铠装。

化，并预测了不同安装条件下的电缆性能（如图 2 所示）。由于电缆成本非常高，设计人员可以通过仿真方法分析电缆损耗， 减少所需导体的尺寸，从而降低电缆成本。然而，他们需要完全确信所使用的仿真工具能够满足他们的分析需求，并能获得准确的结果，因为电缆在被制造出来之前都无法进行测试。

克服电缆建模中的局限性

目前，测试电缆设计时遇到的一个问题是标准有些过时。事实上，电气与电子工程师协会（IEEE）和国际电工委员会（IEC）的一些电缆标准仍然使用的是基于 80 ～ 100 年前推导出的解析表达式，并对其进行了简化以便于手工计算。过去 10 年里，一些出版物中公布的测量结果表明，这些标准中的公式高估了电缆的铠装损耗。在某些情况下，实际的铠装损耗约为使用 IEC 标准计算的 50%。 由于电缆的最大载流量受导线允许的最大温度限制，因此减少损耗就有可能减少导体的尺寸。导体尺寸的减小意味着使用更少的铜或铝，这些铜和铝都较为昂贵，因此可以节省电缆项目的成本。

使用 10 年前开发的方法可以做到准确测量铠装损耗，但前提是电缆已经制造完成。几乎所有的高压海缆都是定制的，因此无法在产品出售和开始制造之前进行测试，需要在投标阶段就已经完成电缆设计。随着数值分析的应用，对电缆和铠装线的研究变得更加容易，但仍有许多不足之处。从第一个三维电缆模型的创建到现在还不到 10 年。直到最近，在超级计算机上运行这类模型仍需要几天到几周的时间。但计算机硬件和建模技术的发展已经使电缆的设计和分析较之前变得更加快速、容易和可靠。过去需要使用超级计算机计算的电缆模型，现在在普通笔记本电脑上就可以运行，并且只需几分钟时间，而无需等待几天。这些技术的提升为 NKT 的研究带来了新的可能。

建立三维铠装电缆模型

NKT 公司的部分工作涉及电缆的电气仿真以及温度分布和相应损耗的计算。在铠装电缆中，很难计算磁钢铠装中的损耗，这是因为有源和无源导体之间存在复杂的相互作用，以及非线性材料具有磁滞特性和温度依赖性。此外，铠装电缆模型的几何形状（如图 3 所示）包括一些非常细小的结构特征，例如铠装线之间的狭窄间隙。这会导致在建模中产生大量的网格单元、较长的计算时间和更大的 内存需求。为了应对这些挑战，NKT 着手研究他们是否可以在电缆模型中使用粗网格（如图4所示），同时仍能准确描述钢材料（一种具有高磁导率和高磁滞损耗的强磁性软钢）的非线性磁性行为。团队选择了 COMSOL Multiphysics® 多物理场仿真软件，以及其附加的特别适合电缆分析的 AC/DC 模块产品进行仿真研究。COMSOL® 软件支持对铠装电缆进行三维建模，用于分析磁场并计算铠装损耗（如图 5 所示）。Ola Thyrvin 发现，COMSOL® 软件中的周期性边界条件对减少电缆模型的计算特别有用，它允许研究团队只对一小段电缆进行建模，并使模型尺寸尽可能小。减小模型尺

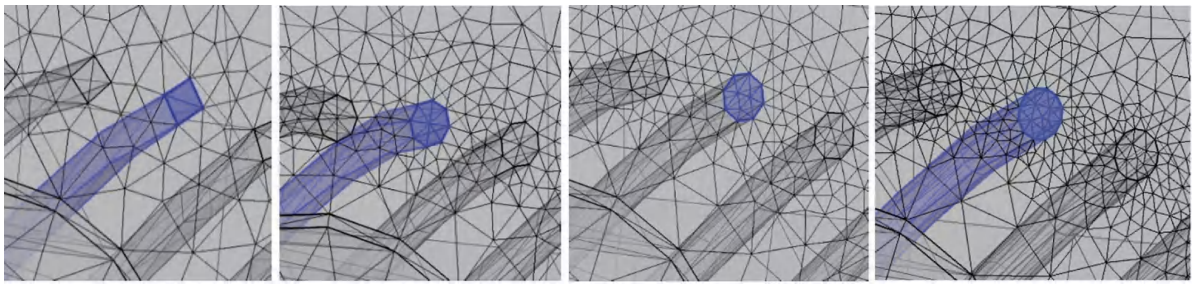

图 4　电缆模型的不同精度的网格划分，从左到右每根铠装线截面内包含 1～4 层网格单元

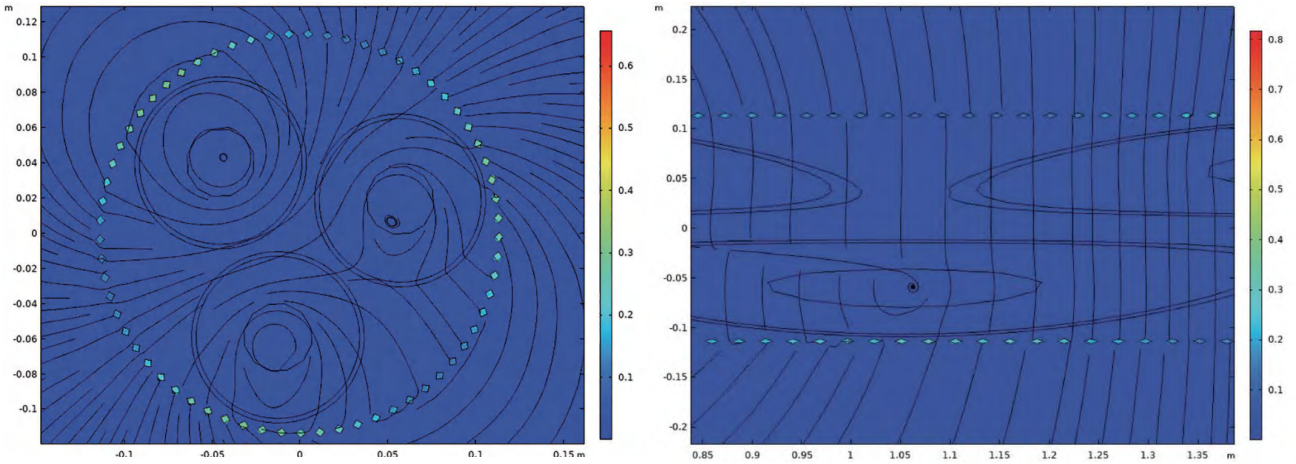

图 5　三维磁通量的可视化结果显示了在两种不同视图下磁场线如何通过电缆结构：截面图（左）和侧视图（右）。

寸有助于减少计算时间和所需的内存，同时还能确保对所有相关物理场的正确捕获。“内层导线与外层铠装线的扭转角度不同，需要对内层导线与外层铠装线两次扭转重合之间的一段电缆（二者周期的最小公倍数）进行建模。”Thyrvin 说。另一种节省内存的建模方法是使用无限单元，它可以在模型中的电缆周围包含足够大的空气域，从而减少使用的网格和内存。

提升性能，精准计算

NKT 团队的仿真方法涉及三个主要阶段。首先，他们建立了一个预设温度的电流驱动模型，其中电流不受电缆阻抗或温度变化的影响，而是由系统负载控制。接着，该团队计算了涡流损失，即在预设温度下由铠装线中流动的局部电流引起的损失。他们发现，在相导体附近的线段中，损耗主要是由靠近相线附近的铠装线周围的屏蔽电流引起的。最后，他们通过对铠装线的磁通密度进行体积分，计算出了磁滞损耗（如图 6 所示）。

在 2019 年第十届绝缘电力电缆国际会议上发表的论文中[4]，NKT 介绍了在不显著降低准确性的前提下提高电缆性能的其他方法。首先，他们发现，即使没有考虑铠装中的集肤深度，通过适当的几何校正因子和拟合的材料参数，仍然可以计算出真实的损耗值。这通常比使用 IEC 标准计算得到的结果更接近实际情况，并且大多情况下，计算值都在测量精度范围内。

此外，在使用粗网格运行模型时，他们使用了均匀的、真实的相对磁导率值。当只考虑铠装线中的平均磁场而非局部磁场时，该数值与实验数据相匹配。因此，磁导率不是非线性的或虚构的。在给定电缆的特定工作条件下，磁导率被设定为铠装线平均磁场下的真实值，基于此即可在后处理步骤中计算损耗。这是因为从实验测量中他们能准确得知特定场强下的损耗。因此，在他们的模型中，磁滞损耗不需要再考虑电缆的电压或电流等电学特性的影响。

为了获得准确的相对磁导率，该团队在不同工

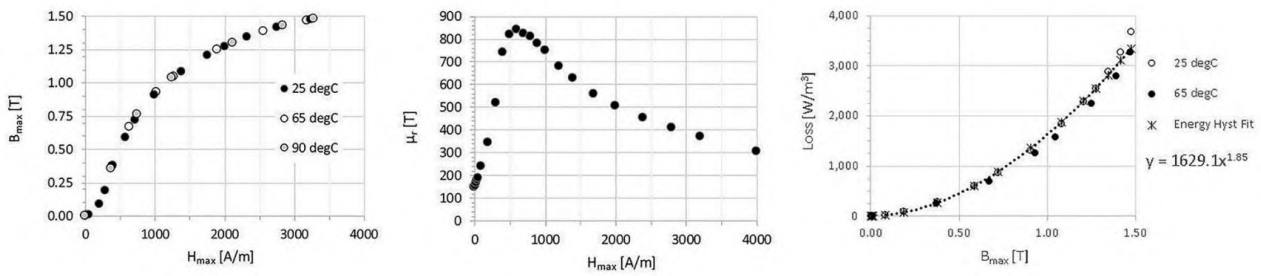

图 6　根据磁滞曲线计算的电缆磁特性。

作电流下选取不同磁导率值（μ）进行了三维仿真。当使用粗网格时，他们计算出每个解的平均磁场（H）值，同时在计算中也考虑了铠装线横截面的减少。然后，将 μ 值和 H 值绘制在测量的 $\mu_r(H)$ 曲线上。研究团队发现，较高的 μ 值意味着铠装线的平均 H 值较低，反之亦然。最后，电缆工作点的准确有效磁导率值出现在模拟曲线与测量曲线的交点处（如图 7所示）。

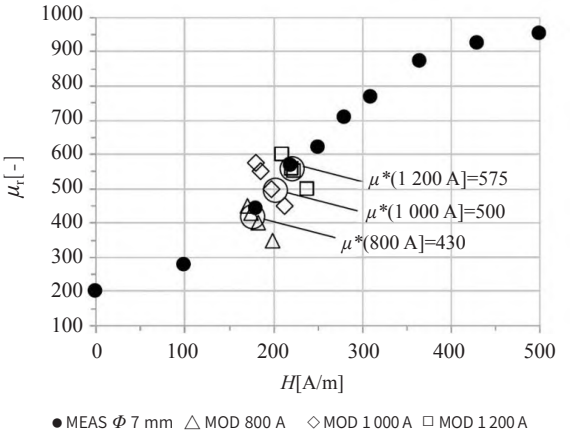

图 7　电缆设计中三种不同电流下的磁导率模拟值 $\mu(H_{ave})$，以及实际测量的铠装线 μ-H 曲线

电缆模型的结果验证

如果模型的结果不能准确地反映设备的真实物理特性，那么世界上所有的仿真工作都没有意义。为确保电缆分析的模拟结果的准确，Thyrvin 和他的团队使用现有的电缆数据对其进行了验证。在计算电缆铠装损耗时，他们发现模拟结果与实验测量的电缆损耗误差小于 3%（如图 8 所示）。这个误差已经足够小了，比使用 IEC 标准计算的结果更准确。通常使用 IEC 标准计算的总损耗与测量值相差 10%～30%。

值得信赖的电缆分析

经过验证的三维电缆模型，使 NKT 相信仿真是进行电缆设计的一种可靠和可信的方法。这一认知对企业产生了深远的影响。基于之前的验证结果他们已经证实了数值模拟的准确性，因此，他们能够十分自信的对电缆设计进行研究，而不必每次都与测量值进行对比。Thyrvin 说：“我们现在可以

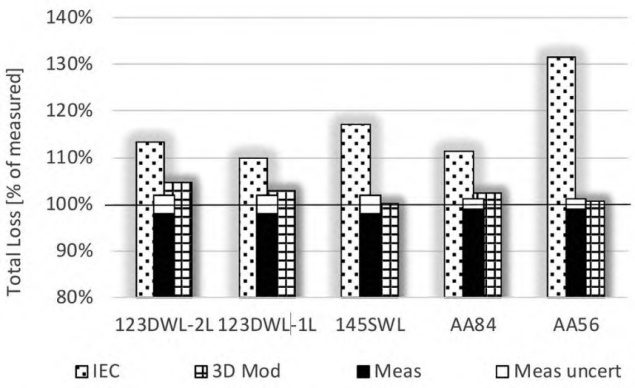

图 8 IEC 的验证结果，五种电缆设计中损耗的测量值和模拟值

使用仿真代替测量，因为你可以在制作物理原型之前进行模拟，但不能在制造电缆之前进行测量。”现在，借助 COMSOL 多物理场仿真软件，NKT 可以基于仿真结果在制造电缆之前评估其损耗。**EA**

参考文献

[1] “Wire and Cable Market (Type – Wire, and Cable ; Voltage Type - Low Voltage, Medium Voltage, and High and Extra High Voltage; Applications - Power Transmission and Distribution, Transport, Data Transmission, Infra- structure) : Global Industry Analysis, Trends, Size, Share and Forecasts to 2024”, Infinium Global Research, 2020.

[2] M. Ardelean and P. Minnebo, “HVDC submarine power cables in the world”, Institute for Energy and Transport, pp. 50–51, 2017.

[3] G. White, “Insurance and Risks in the Underground Cable World”, SubOptic, 2013.

[4] D. Willen, C. Thidemann, et al., “Fast Modelling of Armour Losses in 3D Validated by Measurements”, 10th International Conference on Insulated Power Cables, C7-4, 2019.