

ABB

3 | 13

ABB 集团技术刊物

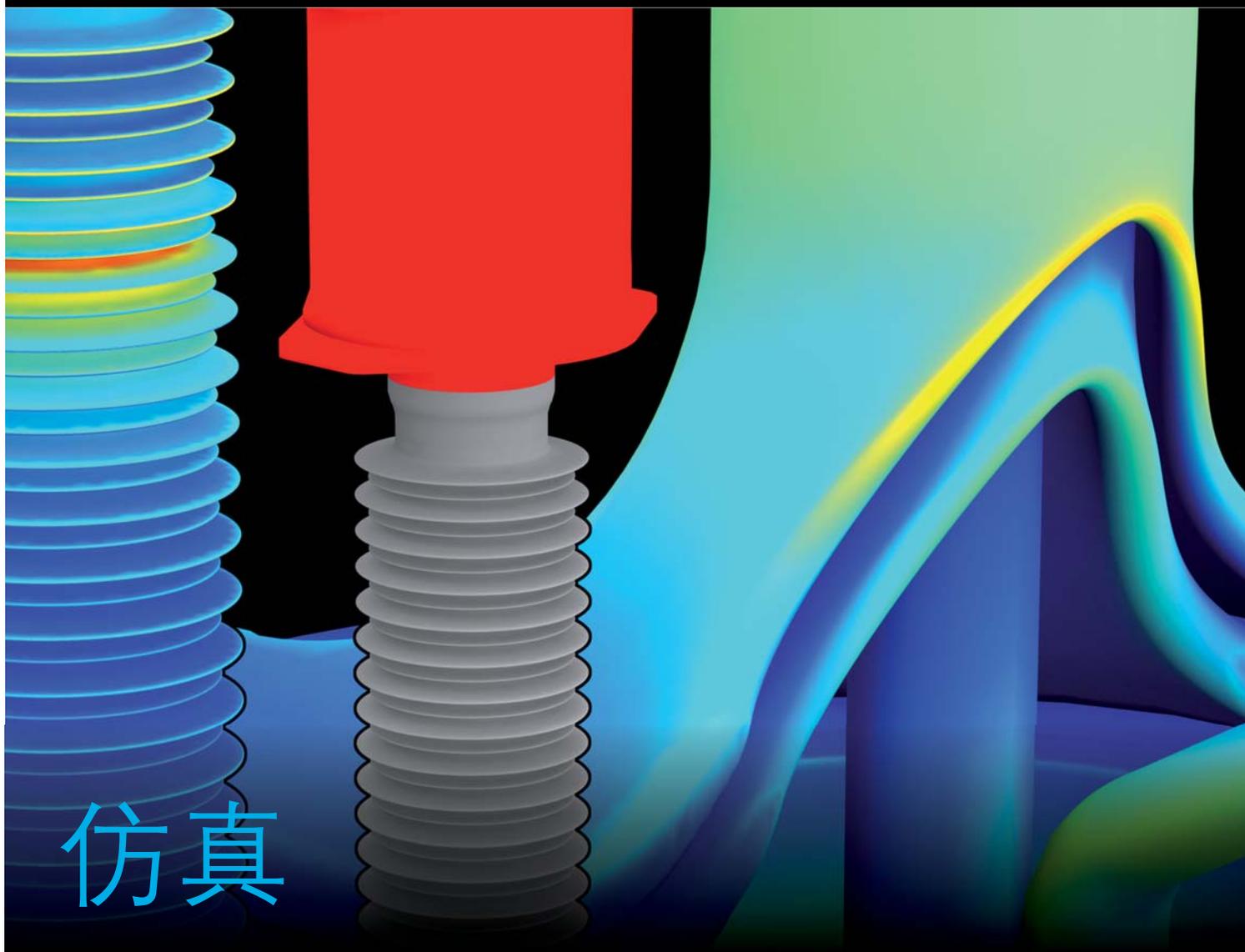
评论

应用数学梳理流程 11

超快速隔离开关 27

走在机器人的前面 61

在地震中幸存下来 77



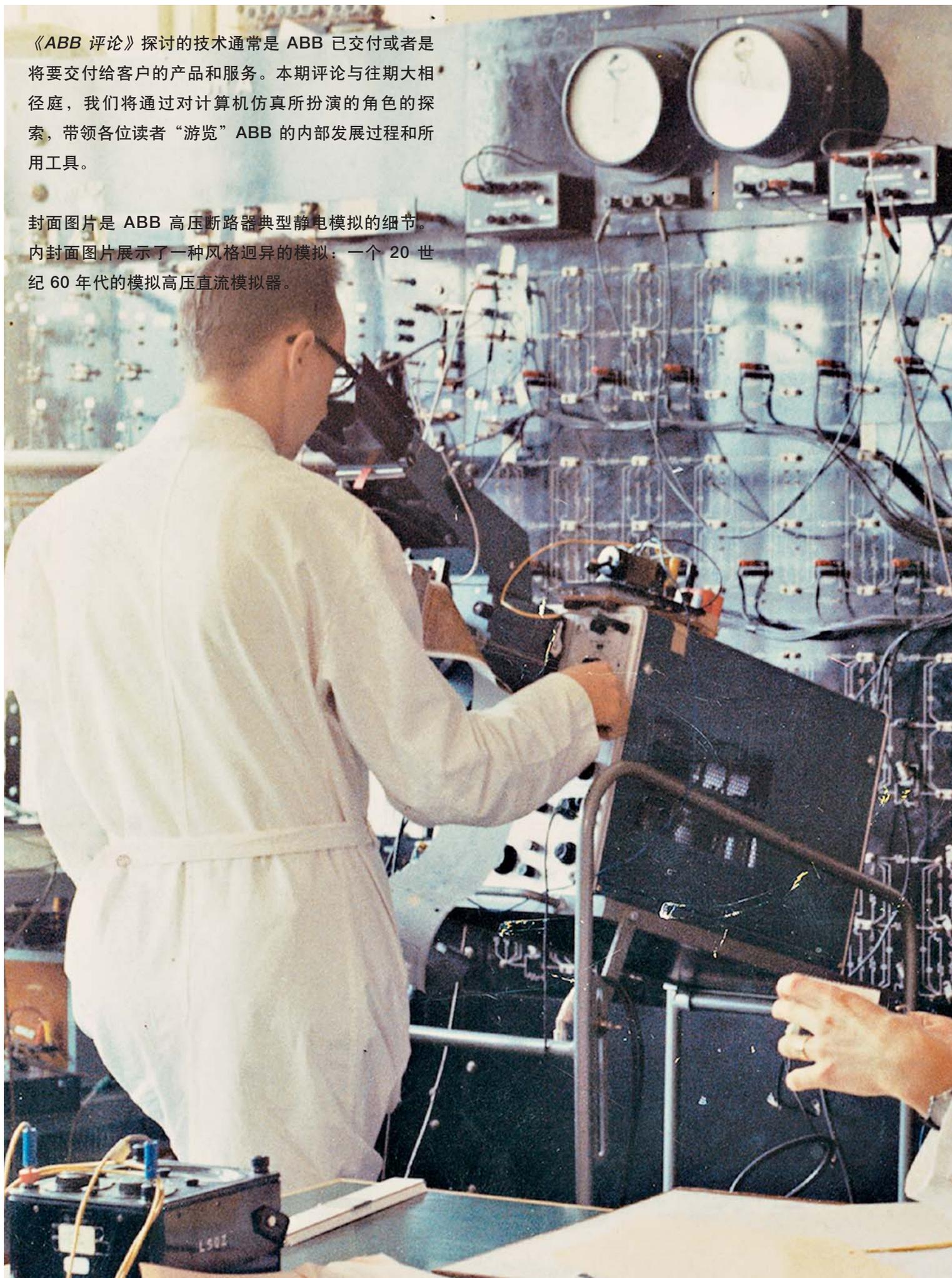
仿真

用电力与效率
创造美好世界™



《ABB 评论》探讨的技术通常是 ABB 已交付或者是要交付给客户的产品和服务。本期评论与往期大相径庭，我们将通过对计算机仿真所扮演的角色的探索，带领各位读者“游览” ABB 的内部发展过程和所用工具。

封面图片是 ABB 高压断路器典型静电模拟的细节。内封面图片展示了一种风格迥异的模拟：一个 20 世纪 60 年代的模拟高压直流模拟器。



仿真世界

- 6 预测现实
仿真技术开创美好世界
- 11 拨开混沌，直击关键
应用数学改进产品、工业过程与生产运营
- 16 仿真工具箱
电力产品的绝缘设计和散热设计
- 22 拒绝平庸，推陈出新
工程仿真的不断变化

能源模拟

- 27 突破之举
比眨一次眼快 30 倍 - 高压直流开关设备的仿真极限
- 34 开关分析
断路器电弧仿真技术
- 39 缔造完美
变压器的电磁仿真
- 44 智能领袖
实践试点合作，增强智能网络

运动、压力和控制

- 47 感受灵敏
利用系统及多物理场仿真技术设计更精确耐用的传感器
- 54 压力探秘
来自于开关柜安装室的仿真压力
- 61 机器人设计
虚拟样机和虚拟调试正在改善机器臂及自动化系统的发展
- 65 仿真助力电力电子技术高效融合
用于可靠的高度集成电力电子变频器成本效益设计的全新仿真算法
- 72 塑造未来
先进的计算机仿真技术改善聚合物的加工过程
- 77 振动与噪音
设计仿真有助于提高设备的抗震性能且降低噪音

仿真

亲爱的读者：



Claes Ryttoft

在产品开发过程中，计算机仿真起着极其关键而且越来越大的作用。每一代产品都会在复杂程度和优化度上超过上一代，对于工程师而言，更深刻地理解影响性能的物理效应已变得日益重要。只靠测试并不能得到细致的理解，这一点在市场所允许的时间和金钱限制范围内尤其是如此。此外，通过允许对不同版本的附加设计进行对比，以及对种种假设场景的探索，不仅能够增强对所选配置的信心，而且还能确保客户能够得到一个最优的解决方案。

如果信息接受器没有正确理解准确度的边界，那么即使是最精细复杂的模拟也是没有价值的（我们都曾因为过度信任过于乐观的天气预报而遭受挫折）。除了在广泛的科学领域大显身手外，仿真已演变为一门独立的学科。模拟工程师必须能够回答这些问题，例如：基础的模型是否恰当地描述了正在进行的模拟现象？网格和时间的分辨能力需要多精细，才能使结果足够精确？哪些简化是可以接受的，哪些不能？值得注意的是，仿真的可靠性已推动标准委员会（例如 IEC）将其纳入测试具体标准的备用方法。

仿真所受到的重要挑战之一是不同物理现象（模拟工程师将其称之为多物理）之间的相互作用。例如，在一个电流断路器中，

电磁、热力学、流体动力学，以及力学都会彼此影响。因此，仿真必须处理好这些物理现象之间的相互作用及其产生的相互影响。

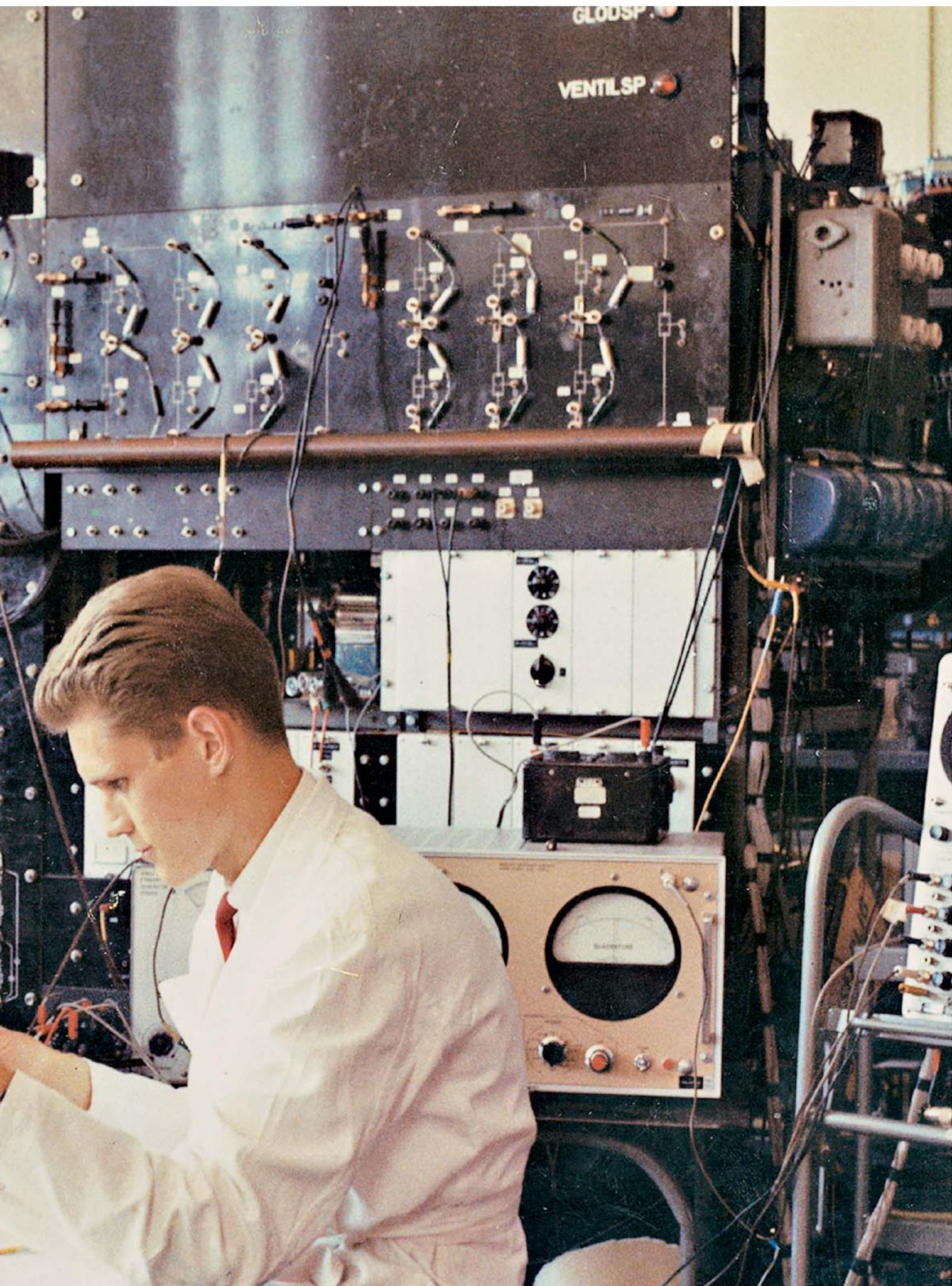
本期《ABB 评论》对广阔的仿真应用（从大型变压器到集成电子设备）进行了综述。杂志所探讨的仿真均与时间量程有关——从超快速开关动作，到使用期内发生的磨损，甚至包括在制造过程中材料的铸造和固化。

此外，对仿真的探讨也推动了《ABB 评论》杂志的数字化发展。在上一期杂志中，我们发布了新期刊的电邮提醒功能，以保证读者第一时间了解新内容。这次我们更进了一步，现在我们同时启用了平板电脑版本。有关这两条消息，请查阅第 83 页。

希望大家喜欢这本刊物，乐享畅读。

Claes Ryttoft

ABB 集团首席技术官兼执行副总裁



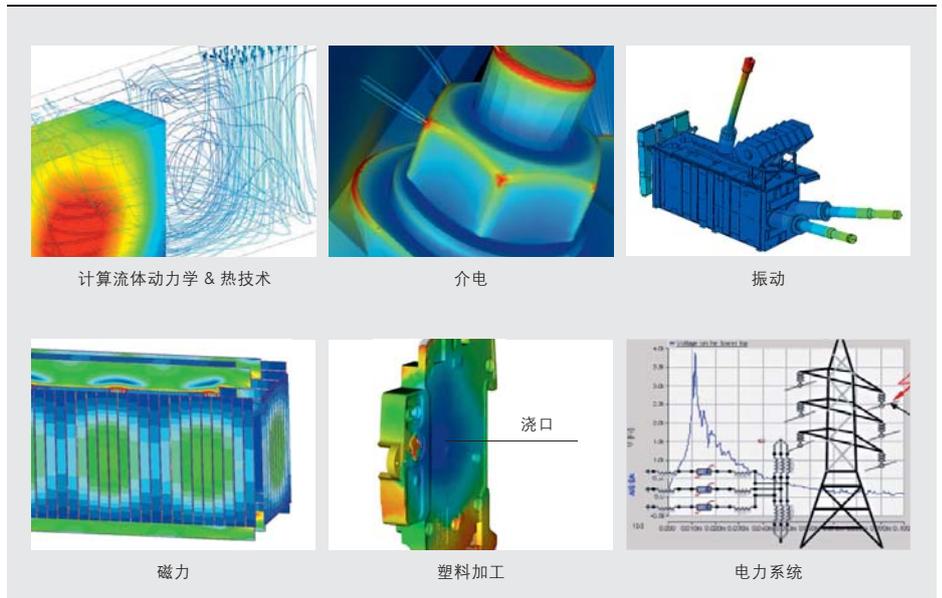


预测现实

仿真技术开创崭新世界

GEORG SCHETT、MAREK FLORKOWSKI、ARTHOUROS IORDANIDIS、
PETER LOFGREN、PIOTR SAJ

在当今的研究和工程工作中，仿真技术发挥着举足轻重的作用。计算机能力和计算技术的发展推动着仿真技术应用范畴不断扩大，精确度不断提高。从多物理场仿真、系统研究到制造生产过程，仿真技术的应用范围极为广泛。本期《ABB 评论》中的大部分实例都与计算物理量的空间和时间分布有关，如电磁场、流场和温度场。本文将针对其中所涉及的一些原理展开叙述。



在工程设计中，仿真的主要目的是了解现实物理对象或系统所发生的现象，以及优化设计过程 → 1。整个过程以现实对象的数字化为起点，最终达到利用数字信息增益实现设计变更的目的 → 2。

仿真方法

现在有许多不同的仿真方法：

- 基于网格（几何离散）
- 无网格
- 系统和网络研究
- 生产过程分析
- 其他

数学建模

数学建模是计算机仿真的第一步。这一阶段是以数学方程式来描述物理问题。在仿真过程中，只有以方程式描

述的物理现象可以被捕获。在现实系统的复杂性与产品设计中模型应用的工程合理需求之间找到平衡点是数学建模的难点所在。对物理现象进行正确的数学描述是理论（或数学）物理的一大课题——这是一个融合了物理和数学的科学领域。

前处理

前处理是为仿真过程创建几何体的步骤，是第二个理想化步骤。在这一步骤中，几何体将被简化到一定程度，使其既能保留相关的几何特征，又允许生成适当的网格。从这一点开始，现实中的几何体将被网格化的几何体取代。创建高质量网格是仿真技术工业应用的主要瓶颈之一。事实上，现实中的工业几何体通常极为复杂，计算网格很难对其进行充分覆盖。不仅如此，如果所创建的网格质量较差，还可能影响到仿真的收敛性，甚至得出错误的物理解。

求解

数学模型的方程式将在计算网络上进行数值求解，然后通过离散化方法将模型方程式从连续域转换到离散域。ABB 通常采用有限元 (FEM) 和边界元

(BEM) 方法进行机械计算和电磁计算，而有限体积法 (FVM) 则常用于计算流体动力学 (CFD)。这些都是 ABB 最常用的场算法，此外，还有其他离散化方法的商业软件和学术工具。另外，技术公司（如 ABB）还会根据自身具体的工程需求开发专用的计算方法和求解器，这种情况也十分普遍¹。

后处理

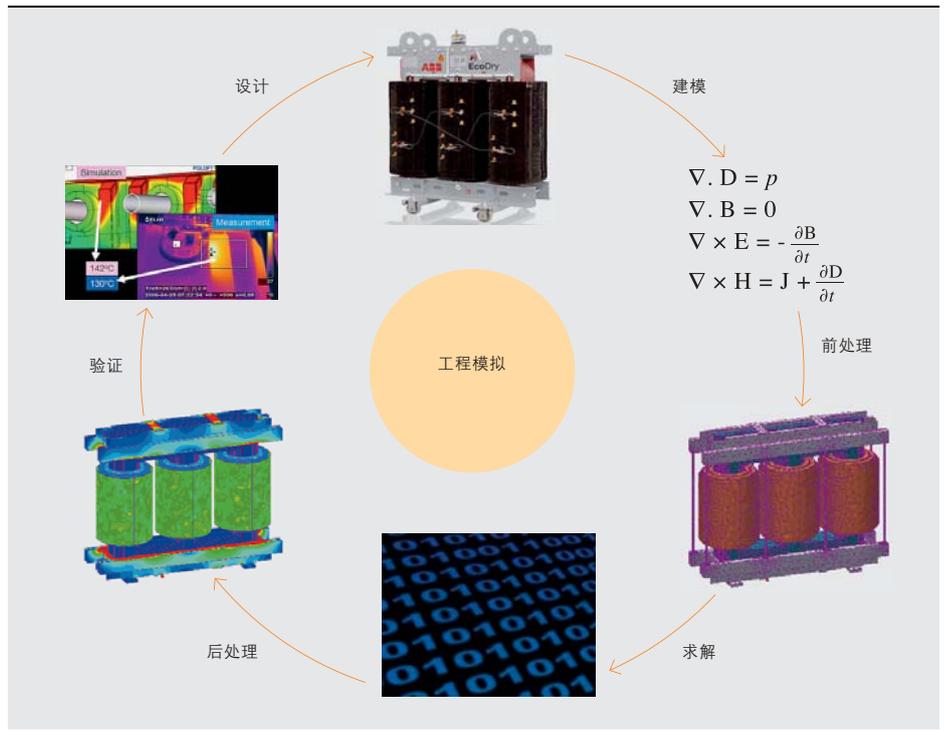
后处理是对所得结果进行可视化的阶段，是仿真过程必不可少的一部分。一般来说，后处理会涉及仿真结果的视觉呈现，通常以二维或三维图（等高线）的形式展示计算变量的分布情况。仿真对象或过程的动态行为可通过动画进行可视化。由于采用了这种时空演示法进行计算物理量的可视化，仿真技术特别适合于分析现实设备中复杂的物理现象。除了场可视化外，点线图和时间—空间平均量等演示形式也十分重要，因为这些量可以与测量值进行直接对比。另外，近年

标题图片

仿真技术在新产品的设计和研发中发挥着至关重要的作用。标题图片展示了在瑞典路德维卡的 ABB 高电压 (UHV) 试验室中进行的电晕屏蔽装配。

脚注

¹ 还可参阅本期《ABB 评论》第 16 页“仿真工具箱：功率器件的介电性能和热性能设计”以及第 34 页“开关分析：断路器中的电弧仿真”。



来三维数字成像技术的快速发展也为计算数据的可视化提供新技术。

验证

通过仿真技术全面了解复杂的物理现象相对简单，但存在一个主要缺陷：仿真过程可能返回与现实物理现象无关的错误结果，或带有不正确信息甚至误导性信息的所谓“颜色绚丽的图片”。仿真过程中任何一个步骤存在缺陷都可能导致这种虚假的结果，如错误的模型、过于简单的几何体、不准确的材料数据、不当的网格或求解器等。

为确保仿真结果与现实物理现象相符，必须对其进行验证。这一验证一般通过对比计算结果和实验结果实现。由于可以直接测得的参数数量有限，验证过程较为复杂。尽管如此，验证仍是必需的步骤，因为经过验证的仿真结果的预测能力更出色（相对于校准的仿真结果而言，校准范围外的结果的有效性始终存在争议）。

设计

最后，通过从仿真结果中提取信息，并根据数据进行设计变更，实现了仿真流程的闭环。在这一阶段，我们可以利用仿真技术的巨大潜力来推动产品开发。首先，仿真过程可以帮助设计师了解物理现象的详细信息，这对他们来说十分重要。其次，获取仿真结果的速度远超过样机构建和测试。仿真技术的优势在于其出色的参数研究能力，它取代了传统设计过程成本高昂的尝试错误法。

ABB 的仿真技术

作为一家领先的技术公司，ABB 已在研发活动中引进了多种仿真技术。

ABB 最大的升压变压器短路测试便是一个很好的例子。这种变压器能够承受高短路电流所产生的电磁力，这一点至关重要。由于所需能量极高，全球能够用于该类变压器测试的设施寥寥无几。不仅如此，因为这些变压器的尺寸很大，严重制约了运输，进一步增加了测

试难度。显然，这种测试需要耗费大量的成本和时间。值得一提的是，在仿真技术最新进展的推动下，国际标准已有改变，通过计算证明短路耐受能力是允许的 (IEC 60076-5)。

断路器电弧仿真是先进的耦合场仿真的另一实例。该仿真技术具有超强的解析能力，能够帮助我们更好地了解设备中的物理现象。断路器可以承受高达几十万安培的短路电流，并且能够在几十毫秒内切断短路电流。这些断路器的测试不但成本昂贵，耗时较长，而且可测量的参数数量也极为有限。ABB 可以通过电磁耦合 / 流体动力学 / 机械仿真来捕捉断路器在故障电流中断时的真实行为²。通过仿真，设计师们将能充分了解断路器的电流条件。他们可以测量断路器中任何一点的压力和电压，并且可以计算关键组件上的作用力。这项技术意义重大，它推动了具有更高可靠性的断路器设计的发展。

ABB 会定期对断路器、变压器、电机、变频器、机器人及电力系统中的多物理现象进行先进的复杂仿真。忙碌在世界各地的 ABB 专家们，为加快开发进程、减少高成本试验付出了艰苦卓绝的努力。

最后，几乎所有的 ABB 产品都与电压有关。尽管在最低电压电平下，介电绝缘可以通过简单的设计规则处理，但是在高电压条件下，设计工作几乎离不开电场计算。因此，在许多 ABB 产品开发中，二维和三维电场计算都是设计过程不可或缺的部分。

使用该类工具可以降低产品关键部件的介电应力，从而避免故障和损坏。

一直以来，该类计算研究都是通过运行一组仿真来实现，这组仿真通常较为有限，其目的是从中选取最佳参数。现在，优化方法和计算能力已经有了长足的发展，我们可以通过电场计算和自动优化相结合的方法找出最佳解决方案。这种先进的方法已经被 ABB 运用到 Simulation Toolbox 等设计工具中，在未来必将展示其巨大的潜力³。

考虑到仿真技术在 ABB 研发工作中的重要性及其快速发展，公司内部承办了全球内部仿真技术会议，以分享经验和最佳的实践活动。在这些活动中，汽车、飞机和消费等相关行业的龙头企业也带给 ABB 不少启示。

凭借获得的技能和经验，ABB 进一步优化了其仿真环境，具体措施包括：

- 提高核心仿真工具易用性，使所有工程师都能轻松驾驭
- 对于大型的，CPU 密集型仿真计算，实现仿真集群共享
- 举办虚拟论坛，分享最佳实践
- 为经验不足的研发团队提供仿真技术支持

现在，ABB 可以非常自信地断言，在仿真技术应用以及利用该技术为客户开发最佳产品方面，我们已经掌握了绝对优势。本期《ABB 评论》将针对先进的仿真技术展开报道，全面覆盖从变压器电磁效应到塑料加工的各种技术。

仿真技术之未来趋势

仿真过程通过软硬件的发展来实现，主要涉及处理器、存储和通信设备。过去，高度复杂的仿真只能依靠超级计算机或大型集群进行，如今，越来越多的高功率台式电脑都能够满足这一要求。超级计算机的计算能力将很快达到百亿亿次，而高性能笔记本电脑的计算能力现在已达到上万亿次的水平——仅在十年前，这一数字还只是个神话。与此同时，伴随全新图形处理器的出现，后处理和可视化领域也将得到巨大发展，包括了模拟结果的动画演示。该发展趋势必将持续下

去，这一点从当今移动设备令人难以置信的计算能力中可见一斑。尽管云计算仍处于萌芽阶段，但在不久的将来，复杂仿真将能够从台式或移动设备开始，然后由云计算完成。

未来仿真技术的应用领域不会局限于新的设计、系统研究和生产优化，其潜力不可限量。在不久的将来，现场仿真可以依托移动服务进行，完备的多物理参数优化将成为现实，甚至配备仿真和优化模块的 3D 打印机都能在进行打印前重新快速计算对象——这一切都已近在眼前。

Georg Schett

电力产品
中国北京
georg.schett@cn.abb.com

Marek Florkowski

Piotr Saj
ABB 研究院
波兰克拉科夫
marek.florkowski@pl.abb.com
piotr.saj@pl.abb.com

Arthouros Iordanidis

ABB 研究院
瑞士巴登-Dättwil
arthouros.iordanidis@ch.abb.com

Peter Lofgren

ABB 研究院
瑞典韦斯特罗斯
peter.lofgren@se.abb.com

脚注

2 还可参阅本期《ABB 评论》第 34 页“开关分析：断路器中的电弧仿真”。

3 还可参阅本期《ABB 评论》第 16 页“仿真工具箱：功率器件的介电性能和热性能设计”。





拨开混沌， 直击关键

应用数学改进产品、工业过程与生产运营

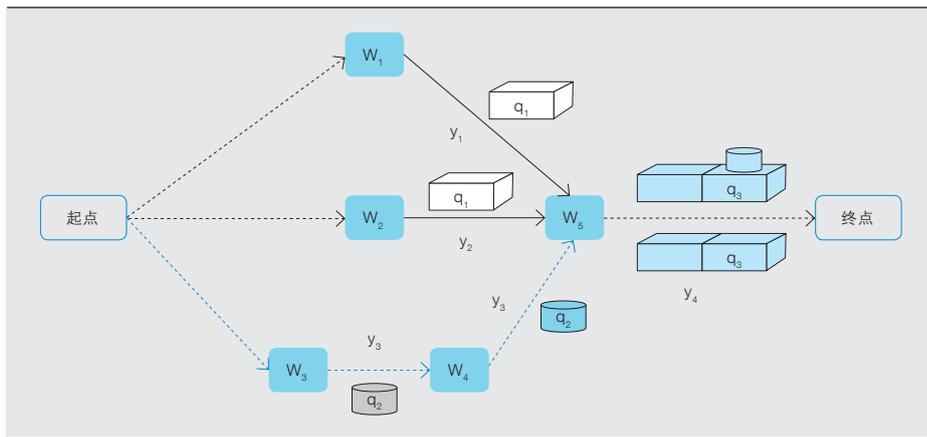
LUCA GHEZZI、ALDO SCIACCA

在资源有限、强制约束数量庞大的现实世界中，数学建模和仿真工具能够帮助我们优化复杂的系统。应用数学带来了理性思考、精确的问题定义和表达、定性和定量预测能力，使得对随机性或不可预知的外部力量影响系统性能的方式进行模拟成为可能。应用数学可以为工业过程、制造以及分销物流、生产计划和销售队伍等生产运营领域节省大量资源。

标题图片

70 多年来，人们一直使用数学方法为多变量问题寻找最佳解决方案。

在工厂中，这些技术还可以用于确定经济有效的生产策略。



争 往往会带来科学技术的飞跃发展。因此运筹学 (OR) 及其主要工具——数学规划 (MP) 这一学科在二战期间取得了空前的发展。当时，人们开始思考利用数学方法解决实际救生问题，例如在何处安装雷达装置——最初这种装置数量稀少且造价昂贵——以便有效地定位和反击来自欧洲大陆的空袭。鉴于物理、经济和整体性方面的制约因素——例如不能将一个雷达的四分之一置于多佛，另外四分之三置于福克斯通港，人们需要一种全新的方法来优化目标函数，使雷达覆盖区域最大化。人们还采用了相同的技术计算北大西洋补给车队的最佳规模和组成结构。

通过运筹学解决的课题数量日渐庞大——包括受等式和不等式约束的组合优化问题，通常这类函数中又包含有连续变量或者离散变量。在大型企业的工业过程、物流网络、销售机构、调度以及大部分其他方面，可以通过适当运用运筹学来优化的实例更是不胜枚举。

数学规划

利用数学方法解决组合复杂性问题的过程称为数学规划，其中，“规划”是指在满足等式和不等式约束条件 $g(x,z)=0$, $h(x,z)\leq 0$ [变量 x , z 均可为实数（连续）变量或者整数（离散）变量] 的前提下，使目标函数 $f(x,z)$ 最小化的问题。这些凸规划可以选择较为稳健的方法，即可以事先假设答案的存在和唯一性。

建模的巧妙之处在于可以在保留问题核心的前提下，将复杂问题拆解为尽可能简单的数学公式。

建模的巧妙之处在于可以在保留问题核心的前提下，将复杂问题拆解为尽可能简单的数学公式。例如，在一个简单的生产厂中，目标函数通常是利润。利润是产品销售数量和生产成本的一个线性函数，后者反过来又直接取决于生产量 $\rightarrow 1$ 。市场要求最小量的产品，从而要求最小量的副产品，以此类推一直延伸到原材料，每个环节向下一环节传递最小量约束。在工

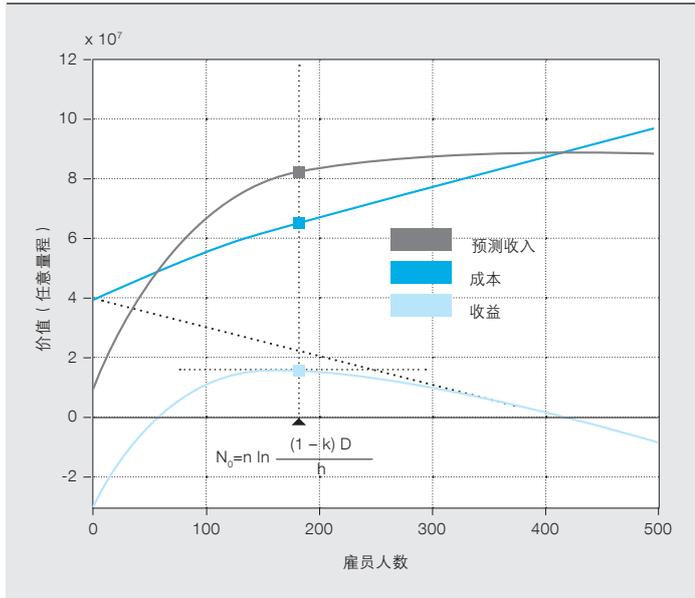
厂生产过程中，每个工作站所需的累积机时向上受制于可用机时，有些工作站需要从有限容量库中减去人工（带有竞争专业化约束），这又构成了进一步的不等式约束。中间缓冲库和仓库可构成动态项存储池，可以进行增减，带有下限（安全边际，用以防止库存不足）、上限（生产容量）和额外成本分摊。

所有这些都归入同一个凸规划，数学规划将为其得出最佳的管理策略。凭借庞大的构件集合与数以千计的变量和线性约束，我们可以对整个生产线、甚至整个工厂进行建模，包括外包环节。位于意大利 Vittuone 的 ABB 电机厂便充分发挥了这一方法的优势。

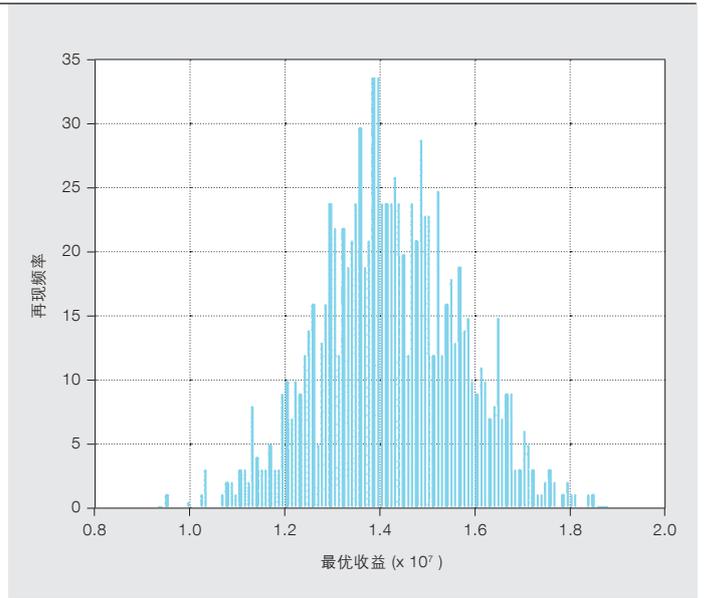
图论

从上文的例子可以看出，图形可以为待解决的问题提供清晰、有序、直观的视觉表达。事实上，图论是运筹学中的一项重要工具，主要用于求解和表达。

从图论的角度来看，以结点和连线表达的所有任意系统都可以采用相同方法处理。因此，分销物流网络或供应网络也可采用与生产厂相同的方法进行图形建模。接受服务的客户、中转站、物流枢纽、仓库和生产设备是图



2a 预测收入（灰色）、成本（蓝色）和收益（浅蓝色）vs. 最优规模的销售团队



2b 典型样本案例中的收益方差传播

形中的结点，而合理的路线则是连线。容量约束影响着运输、装卸作业和生产。市场需求构成发运货物的下限（其他货物将进入仓库库存），并且一切都被赋予了成本。

进行网络优化时，有许多典型的用公式表达的数学规划问题都等同于经典的图论问题，可以通过简单而强大的定理得出精确解——这种方法十分直接，并且没有过多的数字运算。

为了找出最佳的管理策略，ABB 采用这一方法对其在意大利的部分物流网络进行了模拟。

启发式方法

一般来说，计算精确解需要花费大量时间。此外，数据就其本质而言通常具有不确定性和易变性，并且在任何情况下都需要一个安全边界。因此，次优解往往可能是更合理的选择。

启发式方法可以通过运用改进规则序列或自然、人类或生物系统进化的仿真等不同方法，找出十分接近于最优

解的求解方法。有时，纯数学计算可以为成熟的启发式方法提供线索。

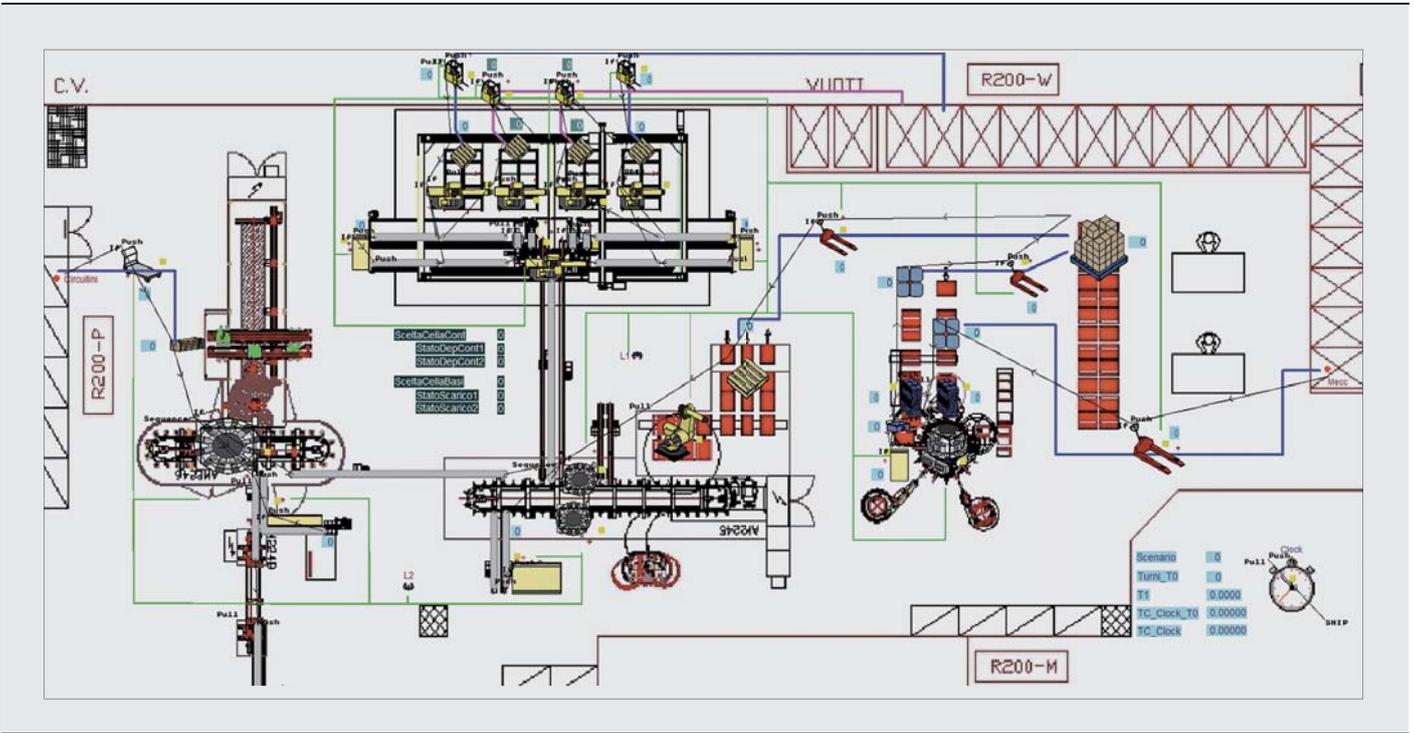
例如，我们可以通过启发式方法对一些给定族中不同项目的集合进行排序——其步骤与使用著名的欧几里得算法求整数的最大公约数完全相同，如生产计划中产品生产量，以使其散射最大化（有趣的是，这一方法的目的是探索更多混沌，而非减少混沌数量）。

ABB 位于意大利达尔明的真空断路器生产厂已经实践了这一方法，并将其与其他自适应方法、混合型生产方法、启发式方法以及从现场最佳实践中归纳总结出的实证研究方法共同纳入其短期（一周）生产线调度程序，作为一个重要的组成部分。在一个灵活的反应型系统中加入不同的方法，使其更轻松地与人工智能交互，这本身就是一种应对复杂性和混沌的启发式方法。

精确分析建模

问题简化法永远是首选的好方法。同时，对变量敏感性和数量级效果的认知也有助于问题的公式化。以销售

一般来说，计算精确解需要花费大量时间，因此次优解可能是更合理的选择。



问题简化法永远是首选的好方法。对变量敏感性和数量级效果的认知也有助于问题的公式化。

数字模拟为例，该方法能够为此模拟过程提供所需的条件——我们可以通过一个包含部分参数（来自可用的历史市场数据）的微分方程来描述饱和和收入曲线，以此模拟新兴市场和成熟市场的市场规制。随后，结合收入相关性的成本曲线，可生成一个微分分析模型。该模型十分简单，完全可以用闭环形式解决——从而可以确定收益及其最大值 → 2。

随机系统

许多过程的输入数据具有不确定性，因此常用概率密度函数 (PDF) 表示，用以描述每个输入值发生允许误差的可能性。由此可知，过程的输出数据也是不确定的。这种不可预知性可以采用多种方法进行描述。

以著名的蒙特卡洛 (MC) 法为例，该方法通过在 Black Box 确定性模拟器上运行大量（通常超过一百万个）随机选择的输入值，以构建输出概率密度函数。渐近收敛速度不受输入数据项

的数量影响（但这并不意味着无论随机变量的多寡，收敛时间都是相同的）。蒙特卡洛法易于理解，成本低廉，但往往耗时过长。

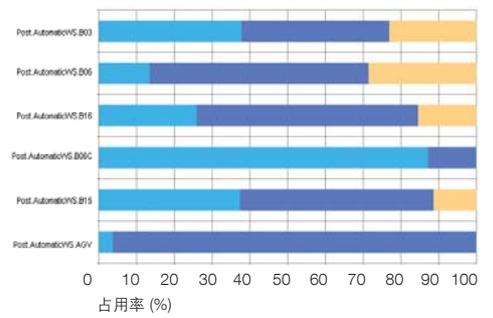
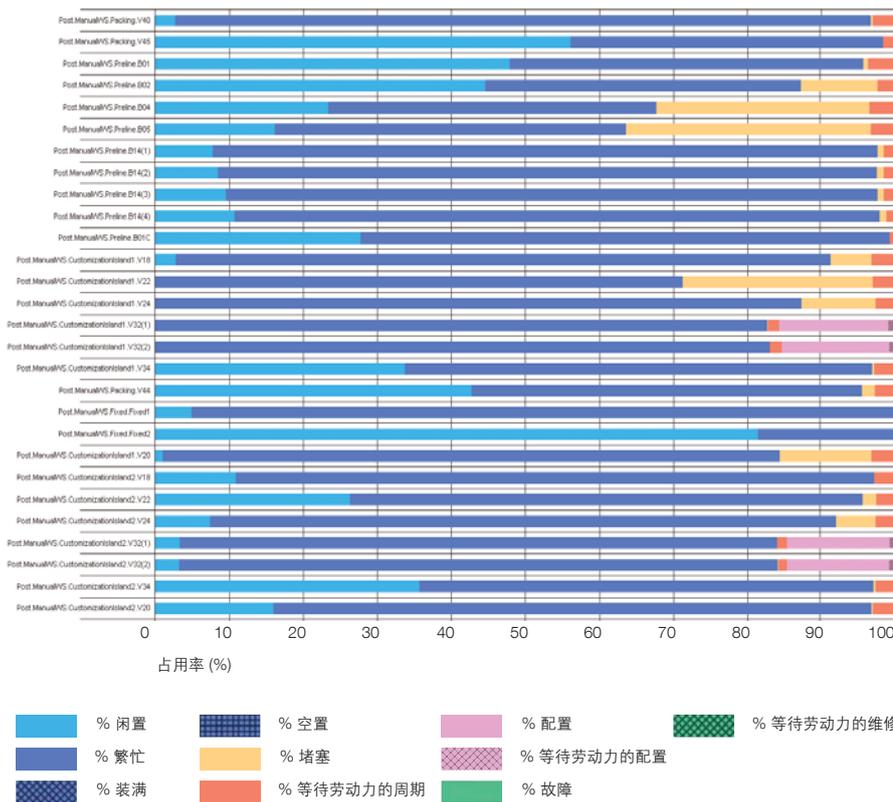
近期，一种名为多项式混沌方法 (PC) 的替代方法悄然而生。该方法的基本概念是将输出概率密度函数扩大到已知基本函数的截断级数中；例如，正交多项式（该方法由此得名）。正交多项式可以快速确定膨胀系数，一般只需要运行几次确定性模拟器便可完成。

离散事件模拟

数学规划等高层次的战略性定量方法虽然有所助益，但不足以精确地反映真实情况。此外，还必须考虑到典型生产运作中所伴随的部件延迟交货、机器故障和维护、人力调度以及其他的复杂因素。

离散事件模拟可以解决这些问题。该方法需要为工厂（或物流网络、仓库

4 离散事件模拟后的占用率。彩条指示繁忙、堵塞的上游或下游，等待劳动力或维修等。



4a 机器占用

等) 创建一个虚拟副本, 用以反映不同生产站中进出的产品, 及其对确定性干扰和随机干扰过程的影响。商业工具可以将真实系统重现到所需的详细程度, 并且可以运行不同的脚本, 以确定最优的人力资源配置、机器配置、调度策略等。

ABB 已采用离散事件模拟方法对旗下的多家工厂进行了分析。这些模拟生成了直观的视觉表达, 如 CAD 视图布局, 以动画形式展现往来于机器之间的工人、零部件和产品 → 3。该模拟可以生成一组表格, 用以列出工人和机器花费在工作上的实际时间, 或由于上下游堵塞或维修需求导致的空闲时间, 这是该方法的主要成果之一 → 4。该信息是实现合理资源配置的基础。

持续努力

在有些情况下, 一次模拟足以解决问题。但在另一些情况下, 模拟可以作为一项集成工具, 持续使用。不过, 无论哪种方式, 如果缺少了持续的实证检验, 进行有效的建模和模拟便只是一纸空谈。

要成功实施这项技术, 关键的先决条件在于坚定的承诺与完善的数据收集和管理方法。后者意味着投资范围要超越执行既定 IT 解决方案, 其投资回报是有形的, 也未进行模拟。

模拟技术可以在采取节约成本或授权行动之前对其进行定量评估, 从而确保短期、中期和长期经营工作更顺利地展开。因此, 深入明智地运用数学规划技术可以大大提高公司的盈利。

Luca Ghezzi
Aldo Sciacca
ABB LPED
意大利米兰
luca.ghezzi@it.abb.com
aldo.sciacca@it.abb.com



仿真工具箱

电力产品的绝缘设计与散热设计

ANDREAS BLASZCZYK、JÖRG OSTROWSKI、BOGUSLAW SAMUL、DANIEL SZARY

电力产品正在向降低成本和小型化的方向发展，为此，设备制造者们倾向于使用固 / 气混合绝缘，优化电极形状，以保证产品达到耐受电压等级。此外，电力产品较高的额定电流会带来散热问题，如果再加入复杂的冷却系统，会导致电力产品尺寸和成本随之增加。因此，巧妙的散热设计也是必不可少的。仿真软件可以帮助设计师们解决这些绝缘和散热方面的问题，但通常需要进行特定分析——这是通用商业仿真软件所不具备的，尤其是在评估放电和电磁场-流场耦合效应时尤为重要。仿真工具箱整合了一系列由 ABB 开发的专有仿真工具和程序，填补了这一领域的空白。

高性能是热网络方法的基本优势。



有时，产品设计师们要在没有仿真专家在场的情况下对电力产品中复杂的绝缘和散热情况进行仿真，这一需求在 20 世纪 90 年代趋于白热化，ABB 仿真工具箱应运而生。当时，仿真工具箱采用了易于使用的设计：

– 仿真程序直接集成到设计工具中，例如计算机辅助设计 (CAD) 或特定产品设计系统。用户交互的主要部分可以在本地设计系统中进行，无需专用的第三方工具。

标题图片

紧凑型电力产品的热行为和电磁行为仿真需要更高的仿真能力，目前市面上任何一款商业仿真软件都无法达到这一水平。ABB 仿真工具箱为其提供了超越其需求的仿真能力。

– 特定仿真过程只需学习数天或数周便可轻松上手。

现在，该平台在全球共有 100 多个用户，每年提交超过 10,000 项仿真工作。

– 在可行的情况下，仿真程序可以在合理时间内为典型的系统化问题提供答案。

– ABB 研究人员及其高校合作伙伴在不断改进和更新仿真程序。

– 高性能仿真所需的软硬件条件可以通过 ABB 的内部网获取。开发人员无需做任何现场投资。

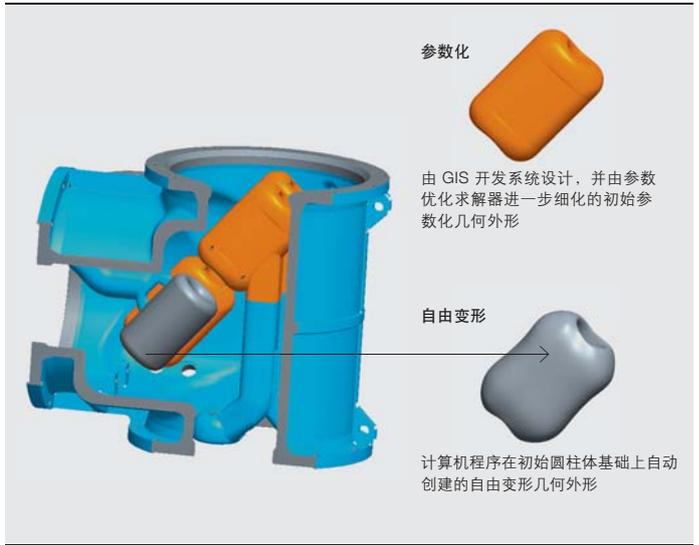
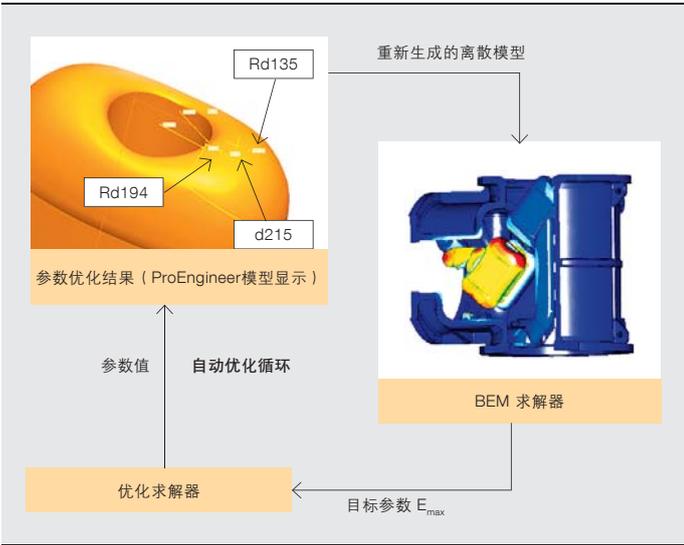
十多年前 [1]，第一代仿真工具箱诞生于一个大学项目中，该仿真工具箱基于

Beowulf Linux 计算机集群，受到 ABB 的青睐。现在，该平台在全球共有 100 多个用户，每年提交超过 10,000 项

仿真工作，并有专门的团队进行维护，提供支持和培训。

边界元法

一般来说，绝缘仿真的第一步要计算出复杂 3D 几何体的静电场。这种类型的计算基于拉普拉斯线性方程的解算，自 20 世纪 80 年代起，一直为众多商业电磁软件包所使用。然而，



近期，ABB 与欧洲的多所大学建立合作，共同探索另外一种优化方法：自由变形优化。

真正有效的仿真需要具备对 3D 几何体中微小细节进行模仿的能力，这一点往往决定着整体设计质量。20 世纪 90 年代，ABB 证实了边界元法 (BEM) 能够有效地解算高度复杂精细的模型。该技术被纳入第一代仿真工具箱，时至今日仍为 ABB 的工程师们广泛使用 [2]。

参数优化

仿真工具箱方法与 CAD 系统之间存在固有的紧密关联性，这是其根本优势所在，边界条件定义、材料属性设置和网格划分均在 CAD 系统中完成。与有限元工具不同的是，该方法无需对外部空间（所谓的空气盒子）进行网格划分。所有这些功能保障了离散（网格化）模型的完全自动创建，为先进绝缘设计开辟了一个全新领域：参数优化 → 1。参数优化程序由 ABB 与一家大学合作伙伴 [3] 联手开发，在任何计算情况下都能完全自动地进行数百个复杂 3D 计算。通常情况下，设计工程师要向仿真工具箱系统提交一个预先装配好的 CAD/ProEngineer 模型，随后，设计工程师在几个小时之内收到计算结果，通常为优化后的几何形状或一组计算结

果，这些结果对应于设计人员预先指定的几何参数。

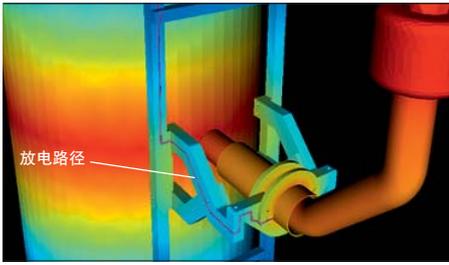
自由变形优化

近期，ABB 与欧洲的多所大学建立合作，共同探索另外一种优化方法：自由变形优化 [3]。这一数值计算程序基于伴随方法，为优化求解提供改变网格节点坐标时所使用的梯度信息。与参数优化方法不同的是，自由变形优化不需要详细的几何参数，只是通过计算机算法创建一个新的形状，从而大大减少了设计师准备初始几何体时的工作量。在 → 2 的示例中，一个简单的圆柱体被用作初始几何体。自由变形优化计算将圆柱体优化为一个新的形状，与参数优化程序的结果极为相似。这一新方法要纳入仿真工具箱仍有待进一步研究，但很快将可以直接为 ABB 工程师们所用——比类似的商业工具前进了一大步。

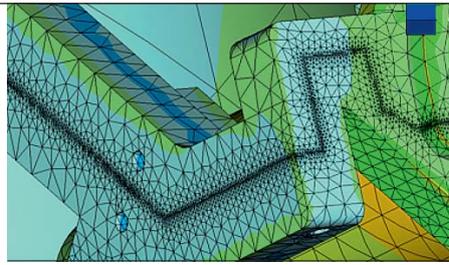
变压器和开关柜的绝缘设计

在电力产品设计中，预测耐受电压是难度最高的仿真任务之一。固体绝缘介质中内嵌电极和绝缘层的结构有着复杂的物理特性，要预测这种结构的绝缘效果，仅仅知道最大电场强度是不够的。

3 放电路径评估示例：为输出引线支架沿线电力变压器定义的表面放电路径



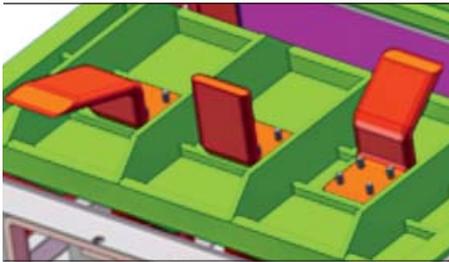
3a 电势分布



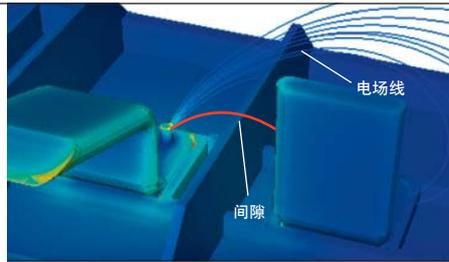
3b 电场强度分布

真正有效的仿真需要具备对 3D 几何体中微小细节进行模拟的能力，这一点往往决定了整体设计质量。

4 放电路径评估范例：采用混合绝缘的中压空气绝缘开关设备。



4a 端子外形图



4b 评估起始点和邻近相（红色路径）间隙上的起始电压和流注路径时所使用的电场线

还必须要对从临界点开始的放电特性（流注或先导）进行适当评估。设计合理的绝缘系统应该能够确保即使发生流注起始，传播型放电将在电极之间的传导途中被熄灭，击穿的概率极小，足够通过绝缘型式试验。

对变压器输出引线支架沿线表面放电路径上的电势分布可以进行仿真，设计师可以检查累积表面放电应力是否在 ABB 技术标准允许的范围内 → 3。同样，在中压开关设备元件中，端子的电场线也可以通过计算得出，用于评估雪崩机制所产生的电子数是否足够使流注起始电压产生自传播型流注头 → 4。如果发生流注起始，则必须根据起始点和相邻电极之间的间隙进行进一步的尺寸标注；设计师将检查间隙沿线的平均电场强度是否低于经验确定的空气正脉冲流注稳定场 [4]。

电热仿真

电力产品中的温升仿真是一项十分复杂的任务。导体随阻性电流和电感电

流的功率损耗升温，通过对流和热辐射冷却，热量通过传导分布。因此，仿真过程中必须顾及电磁现象、流体动力学现象以及辐射现象之间的耦合作用——即使对这些现象分别进行模拟尚且具有较高难度。

在电磁现象中，阻性电流占主导地位，但有时还必须考虑到趋肤效应和邻近效应等电感现象。湍流对流冷却在计算流体动力学 (CFD) 领域仍是一大难题，其中以自然对流尤甚。为此，一种用于电热仿真的分层计算方法得以开发。

电磁场与流体动力学耦合计算

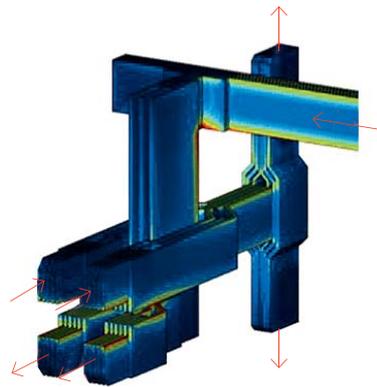
电热仿真问题的精确数学建模基于电磁场求解器与 CFD 求解器的弱双向耦合计算 → 5。为顾及上述所有物理效应，我们可以采用完善的有限元方法进行电磁场仿真 [5]，并采用有限体积法进行流体动力学仿真（例如在商业软件 Ansys/Fluent 中）。如果需要考虑电磁材料参数的温度依赖性，则必须采用双向

真正有效的仿真需要具备对 3D 几何体中微小细节进行模拟的能力，这一点往往决定了整体设计质量。

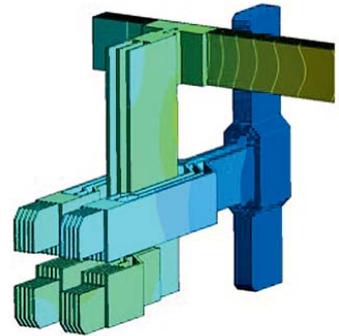
5 电热耦合：功率损耗分布由电磁求解器计算得出，并映射到 CFD 求解器，由其返回温度分布。



6 低压母线系统的电磁耦合 / 热计算



6a 电流分布（由内置电磁求解器计算 [5]）。进出电流用红色箭头标示



6b 温度分布（由 Ansys/Fluent 计算）

耦合。如果温度依赖性可以忽略不计，或预先已知近似温度，则可以预测材料参数，对功率损耗分布进行单向映射就足够了。

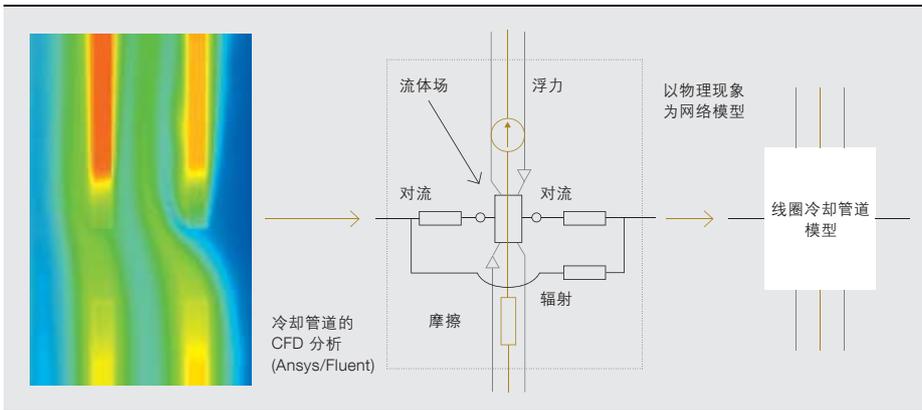
如果电感效应起着重要作用，或温度分布中有局部热点，那么这种计算方法是较为有效的。随后，损耗分布和温度分布的空间问题必须得到良好的解决。高电流母线系统（低压开关柜部分）便是一个很好的例子 → 6。母线中的趋肤效应和邻近效应会对功率损耗分布产生较大影响 → 6a。

尽管如此，这一严谨且局部精确的电热耦合计算仍然是一个较为复杂的过程，必须对几何体进行网格划分，并且要使用两个不同的耦合求解器进行计算，因此需要耗费大量工时。考虑

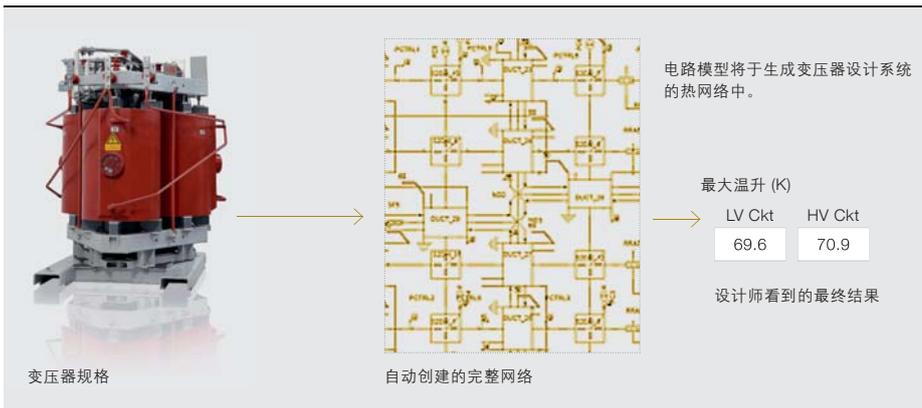
至此，为要求不高的设计案例开发简单的计算方法是我们最好的选择。

热网络与压力网络

网络方法为电热耦合分析的复杂性提供了极具吸引力的替代解决方法 [6]，基本概念是使用抽象网络模型替代几何组件，网络模型中包含适用于电力产品特定部分的热力学和电磁学公式。变压器线圈冷却管道的模型表达实例如 → 7 所示。该模型的内部拓扑结构仅包含极少量负责模拟管道内部物理现象的网络元素：边界层传热（对流换热）、流体流场、摩擦系数、浮力压头和辐射。初级模型采用先进的 CFD 方法进行验证，然后封装入准备就绪的网络组件。变压器设计系统开发者可以使用这些模型创建完整的变压器模型，以便计算绕组温升



7a 封装网络模型的开发，通过 CFD 仿真验证



7b 变压器设计系统运用封装热网络模型计算绕组温升

Andreas Blaszczyk
Jörg Ostrowski
 ABB 研究院
 瑞士巴登-Dättwil
 andreas.blaszczyk@ch.abb.com
 joerg.ostrowski@ch.abb.com

Boguslaw Samul
Daniel Szary
 ABB 研究院
 波兰克拉科夫
 boguslaw.samul@pl.abb.com
 daniel.szary@pl.abb.com

[7]。该类网络计算的精度在可接受范围内——误差仅为几开尔文，误差大多是由于输入数据的不确定性和制造 / 测量公差造成，而非网络模型的简化。高性能是网络方法的基本优势：计算速度快，只需几毫秒到几秒的时间，可以集成入交互式设计系统，并且还可以使用需要进行数百或数千次计算的优化算法来设计变压器。

前景展望

现在，ABB 仿真工具箱平台中所集成的绝缘仿真和热仿真技术已经在电力产品设计领域占据稳固地位。这一平台在产品开发人员、ABB 研究人员及其高校合作伙伴之间架起了一座桥梁，确保 ABB 的电力产品设计中不断加入仿真技术领域的最新成果。

参考文献

- [1] A. Blaszczyk, *et al.*, "Net value! Low cost, high-performance computing via the Intranet," ABB Review 1/2002, pp. 35–42.
- [2] N. De Kock, *et al.*, "Application of 3-D boundary element method in the design of EHV GIS components," IEEE Electrical Insulation Magazine, vol.14, no. 3, pp. 17–22, May/Jun. 1998.
- [3] EU FP7 Marie Curie IAPP Project CASOPT, Controlled Component- and Assembly-Level Optimization of Industrial Devices, ABB Corporate Research, TU Graz, TU München, University of Cambridge, 2009–2013.
- [4] A. Pedersen, *et al.*, "Streamer inception and propagation models for designing air-insulated power devices," IEEE Conf. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Virginia Beach, United States, October 2009.
- [5] R. Hiptmair, *et al.*, "A Robust Maxwell Formulation for All Frequencies," IEEE Trans. Magn, vol. 44, no. 6, pp. 682–685, Jun. 2008.
- [6] A. Blaszczyk, *et al.*, "Convergence behavior of coupled pressure and thermal networks," SCEE Conf. Zürich 2012, (accepted for publ. in COMPEL Journal 2014).
- [7] E. Morelli, *et al.*, "Network based cooling models for dry transformers," ARWtr Conf., Baiona, Spain, 2013.

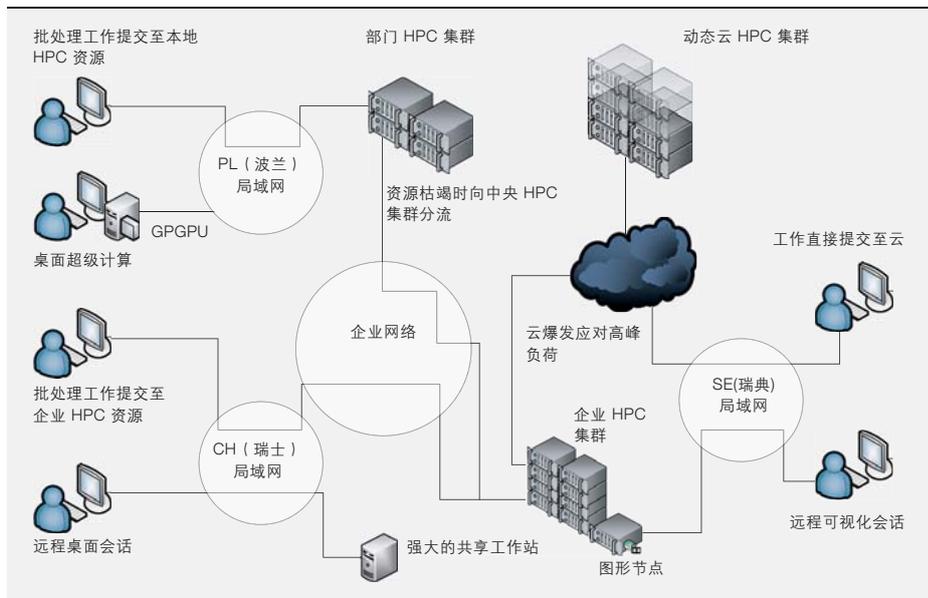


拒绝平庸，推陈出新

工程仿真的不断变化

BARTOSZ DOBRZELECKI、OLIVER FRITZ、PETER LOFGREN、JOERG OSTROWSKI、OLA WIDLUND

用快速以及相对较低的成本来解决复杂工业问题的能力是计算机仿真技术的众多优点之一。计算机仿真是一个不断发展的领域，与数值方法研究和计算机体系结构发展有着千丝万缕的联系，并使之确保计算机仿真技术的发展步伐。近期，信息处理技术的变革突显出与该领域越来越多的并行特征。现在的许多仿真工具都能使用数十个计算内核来解决更大、更复杂的问题，提高了实践中的精确性。除了商业仿真软件包和 ABB 内部开发的专有定制工具外，由开放源代码社区开发的仿真工具也在与日俱增。那么，到底有哪些因素影响着工程应用仿真技术的变革呢？



糅合现状与未来可能发展方向的基础设施图

仿真技术是 ABB 产品开发的一项重要内容——与制作物理样机相比，速度更快，成本更低，更为精细，而且能够更好地提供创新方法来解决复杂的工业问题。那么，仿真技术是如何实现这一切的呢？

集群、云和桌面超级计算

极致简单的高性能计算 (HPC) 是仿真的关键所在。鉴于此，ABB 多年来投入了大量资金发展自己的计算集群。时至今日，公司已拥有大批专用的 HPC 资源，供内部人员使用。虽然大型 HPC 系统可以对最复杂的产品进行仿真，但它并不是仿真专家使用的唯一计算资源。

高端计算技术的商品化以及多核革命赋予了台式计算机的并行可扩展性。许多仿真作业在本地的 FAT 工作站中进行（即由一台计算机完成所有计算）。随着专门用于数字运算的 GPU（图形处理器）加速器的兴起，台式计算机仿真方法——即将超级计算融入台式计算机——在短期内似乎将成

为大势所趋，但这一颠覆性技术尚未用于工程仿真前沿。

除此之外，还有一股新兴力量正在飞速发展——公共数据中心，这一新技术将有望重塑仿真基础设施，通过按次计费的收费模式，为人们提供所需的计算能力。这种全新的外包基础设施模式便是众所周知的云计算。

通用云不适合仿真的工作量，通常需要使用时以高带宽和低延迟为特征的专业网络互连解决方案。尽管如此，一

极致简单的高性能计算 (HPC) 是仿真的关键所在。鉴于此，ABB 多年来投入了大量资金发展自己的计算集群。

些云服务提供商在其数据中心的部分设计中还考虑到 HPC 要求。最初由 ABB 进行的云计算标杆实验结果表明，用分布式内存的并行应用程序进行适量消息交换能够达到令人满意的

性能。在 ABB 当前 HPC 系统中的历史使用数据基础上进行的仿真成本预测认为，将适当的工作量移到云中可以使支持基础设施的总体拥有成本降低一半。信息安全问题是企业使用云计算的最大障碍。要获取工程公司及其客户的信任，让他们愿意使用企业外部控制的基础设施存储和处理数据，我们还有很长的路要走。

短期内，集中的 HPC 资源可能将是最具成本效益的解决方案。这种资源可以通过规模较小的本地化部门集群得

到增强。仿真技术未来的计算基础设施蓝图如 →1 所示。未来，除了以 GPGPU（通用 GPU）为核心的工作站之外，还可能出现更活跃的配置，通过转移部分企业资源负荷，并在内

部资源枯竭时使用云爆发（即利用公共云）来应对活动高峰。

标题图片

随着信息处理能力的发展，用于新产品设计的仿真工具也有所进步。

一股新兴力量正在飞速发展——公共数据中心，这一新技术将有望重塑仿真基础设施。

基础设施准备就绪后，我们需要开发合适的程序，以确保有效地利用现有的软硬件资源。

确保有效的资源利用

HPC 硬件的投资购置和维护成本通常低于仿真软件的许可成本。为了标定并有效地利用这些有限资源，必须在多个因素之间寻找一个制衡点，包括：可用的 CPU 内核数量、硬件拓扑结构（共享式或分布式内存）、群集互连（通信速度）、可用的许可证数以及队列系统配置（例如，最大限度提高批量仿真的吞吐量，但保留一定数量的许可证供白天交互使用）。

这些因素的权衡受软件供应商所采用的许可模式影响。通常情况下，一个价格昂贵的单核许可证只能执行一项工作，每增加一个 CPU（中央处理器）内核就需要使用一个便宜的 HPC 许可证。大多数供应商都对 HPC 许可证实行递减定价，用户购买的许可证数量越多，HPC 许可证的单位成本越低。这一定价方法通常是为了尽可能增加运行每个仿真工作时所使用的内核数量，尽量缩短单次运行时间，从而使价格昂贵的单核许可证得到尽可能高效的利用。

为了协调和共享软硬件资源，在过去八年中，ABB 内部发展建立起了广泛的合作。最初只是与一些规模较大的仿真团队建立非正式合作，现在已经获得了全球 IS / IT 组织机构的支持。

资源共享的主要目的是节约成本，在其他方面也大有裨益。例如，那些使

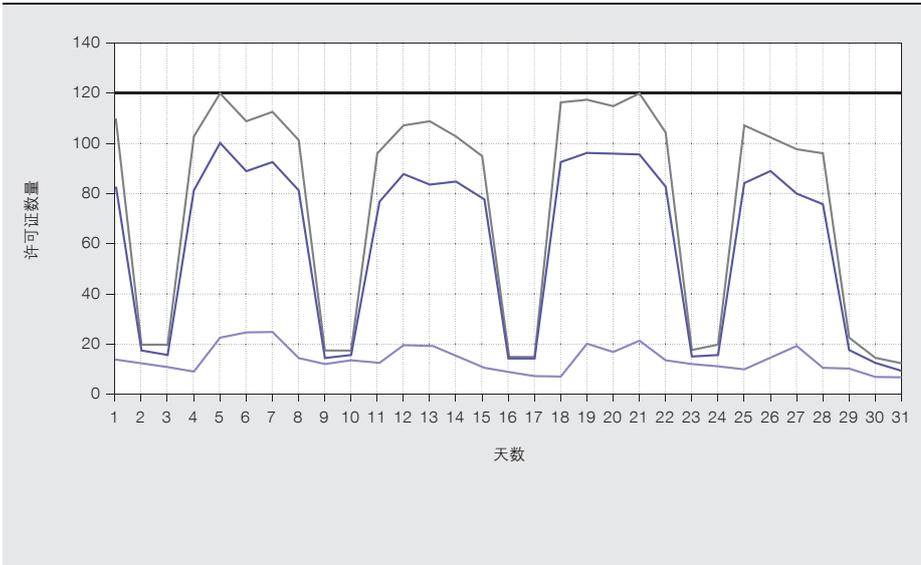
用数量较少的团队或新用户可以在有限时间内分享其他团队的资源，既简化了仿真工具的试验和评估，又减少了前期投资。资源共享在企业研究中心中的作用尤为突出——进行项目中的技术转让时，能够与业务单位合作伙伴共享硬件和许可证是十分重要的；业务单位用户可以及早获得并使用新开发工具和模型，整个过程方便快捷。大部分软件供应商也认可资源共享为其带来的好处，例如，新用户可以轻松访问他们的产品，他们也能更好地了解客户需求。

在不同单位和地理位置之间共享软件许可证通常需要与软件供应商签订特殊的全局协议。这使得 ABB 在众多客户中尤为出众。现在，ABB 已为多个大型仿真软件套件签订了全局协议，并建立了许可证库。

HPC 硬件共享的一个典型案例是全新 Linux 集群“leo”。该集群由 ABB 旗下的企业研究中心之一负责管理，主要用于复杂的流体力学仿真和分子动力学仿真。“leo”由两家企业研究中心共同出资，并为多个国家的多个团队所使用。另外一个集群“krak”由另一家企业研究中心出资并管理，出于实用原因，与“leo”位于一处。

“Krak”是一个分布式系统，用作 ABB 仿真工具箱的计算后端，为全球各地的业务单位合作伙伴提供透明的 HPC 资源访问。

当然，资源共享本身也存在一定的挑战，其中一些是技术性问题，通常容



这一工具可以通过在许可证购买过程中提供宝贵信息来达到最佳的许可证使用。

易解决，但还有许多高难度的“软
件”问题亟待解决，例如：

- 如何解决冲突
- 如何适应不同的使用模式
- 资源短缺时，由谁为新资源买单
- 如何解读许可证统计数据

关于软件许可证共享，对许可证库实行完善的管理流程是其成功的关键所在：即为资源使用制定统一的政策和规则，预测潜在问题并提出解决方案。这一过程需要与许可证库相关团队的代表和一小部分负责处理日常事务的人员召开电话会议。为确保公平、顺利地解决冲突问题，必要时收集 and 监控使用统计数据，并向所有用户公布这些信息，这一点是极为重要的。ABB 为此开发了一款基于 Web 的工具——eLicense，用于管理许可证库并监控许可证的使用情况 → 2。

物理模型与数值方法

数学模型是任何一款仿真工具的起点，用来描述过程中的物理现象。数学模型建立后，即可通过数值算法对模型进行计算。

数学模型和数值算法具有与计算机本身同等的重要性。例如，即使是最快的超级计算机，也无法通过选择一个原子模型来计算变压器中的电磁场。相反，我们可以通过平均计算原子和电子行为，由此推导出一批材料的属性，在此基础上创建一个模型。然后，将这一批量描述与电磁场基本方程（麦克斯韦方程组）相结合，可以得出一个适合变压器电磁场仿真的模型。

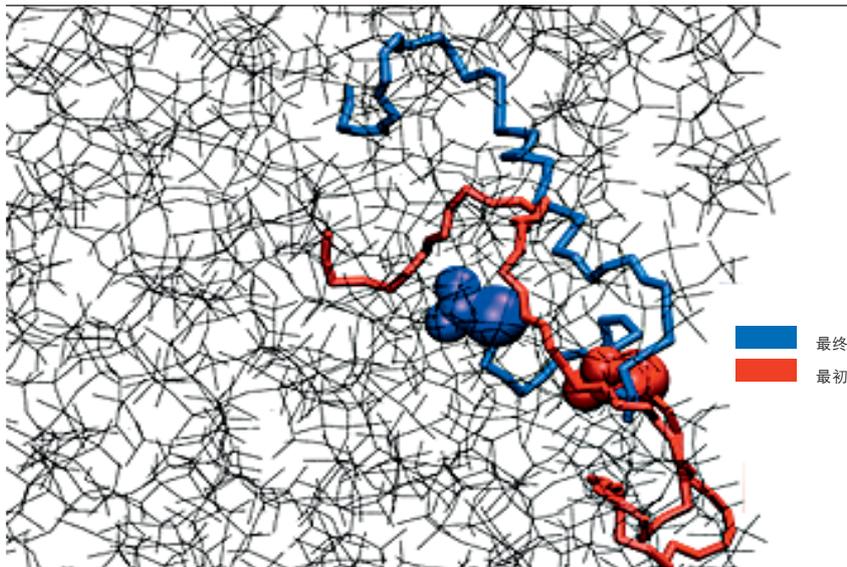
不过，只有这一个模型是不够的。在选定了经过适当简化的合适模型后，还必须向计算机下达模型计算指令，即必须在计算机上选择并运行一种算法，来解算物理模型中所包含的数学方程。这一过程被称为数值方法。有限元方法就是其中的一个例子。在该方法中，必须选择数值方法以确保计算的精确、快速和稳定。对物理模型、数值方法和硬件进行以问题为导向、协调良好的组合是一种很好的计算方法。

工程学中的典型仿真任务包括结构力学问题、流体动力学问题以及电磁场计算。这些标准任务通常可以通过商

为了协调和共享软硬件资源，在过去八年中，ABB 内部发展建立起了广泛的合作。

ABB 工程师们采用了最有效的工具与最强大的模型，尽最大努力为客户提供最好的产品。

3 分子动力学仿真



该图展示了硅橡胶 (PDMS) 绝缘子表面附近的一个带电分子的最初和最终方向。在最终配置下，带电基团将被埋在分子内部。

业或开放源代码软件产品获得良好的计算方法。非标准仿真则与此不同，需要针对建模、算法和硬件这三个层面开发定制的计算方法。

非标准的材料属性或特殊的几何设置会导致问题复杂化。非标准的仿真类型包括多物理场计算，在该计算中，必须对多个物理域进行耦合。人们对这些计算的关注日益增长，迫使商业供应商将这一耦合融入他们的产品中。尽管如此，但是有些物理现象组合并没有现成的解决方案，或者现有方法不足以解决问题。以电弧过程为例，该现象在 ABB 产品中十分重要，但现有工具无法给予良好的支持，必须结合流体动力学和电磁学方法。

典型域可以采用有限元工具等基于网格的方法进行处理。除此之外，还有更为精细的计算方法可以用于分子甚至原子过程，其中最著名的当属密度泛函理论 (DFT) 和分子动力学 (MD)。虽然对于 ABB 来说，这些高度先进的计算方法不会达到其在制药业中的重要性高度，但运用这些方法来解决重要材料科学问题的热情却日渐高涨。

例如，利用这些计算方法改进高压交直流输电系统绝缘领域的电子传输和其他动态过程的微观结构。在近期与 IBM Research 的合作过程中，诞生了一种分子动力学方法的具体应用。该应用是对硅橡胶聚合物 (PDMS) 中的轻质分子扩散进行计算，据此解释重要的表面疏水性恢复过程，这一过程对室外高压电缆绝缘的长期稳定性来说至关重要。如 → 3 所示，我们可以对表面上的带甲基分子净取向和极化进行仿真。其结果解释了氧化情况下表面疏水性的损失，以及通过环聚二甲基硅氧烷分子、氧化甲基和 Na^+ 离子之间特殊的相互作用来恢复疏水性的过程。

ABB 的变革之路

云计算和 GPU 技术要在数字仿真技术方面实现突破还有漫长的路要走，但多核计算机和集群的并行仿真已经成为不可或缺的技术。

通过共享软硬件资源，一个公司中的不同团队可以经济有效的方式轻松获取最新的仿真技术和硬件资源。对于 ABB 而言，这意味着可以在其研究中

心和业务单位之间实现有效的研发成果和最佳实践传递。

市场研究报告表明，最成功的工业企业是那些能够在其产品开发中充分利用现代数字仿真工具的企业。ABB 工程师们采用了最有效的工具与最强大的模型，尽最大努力为客户提供最好的产品。当先进的定制仿真工具已经有足够好时，人们往往会放弃改革，但 ABB 的科学家们绝不满足于现状，将继续在那些 ABB 已经处于领先地位的领域中进行新的突破。

Bartosz Dobrzelecki

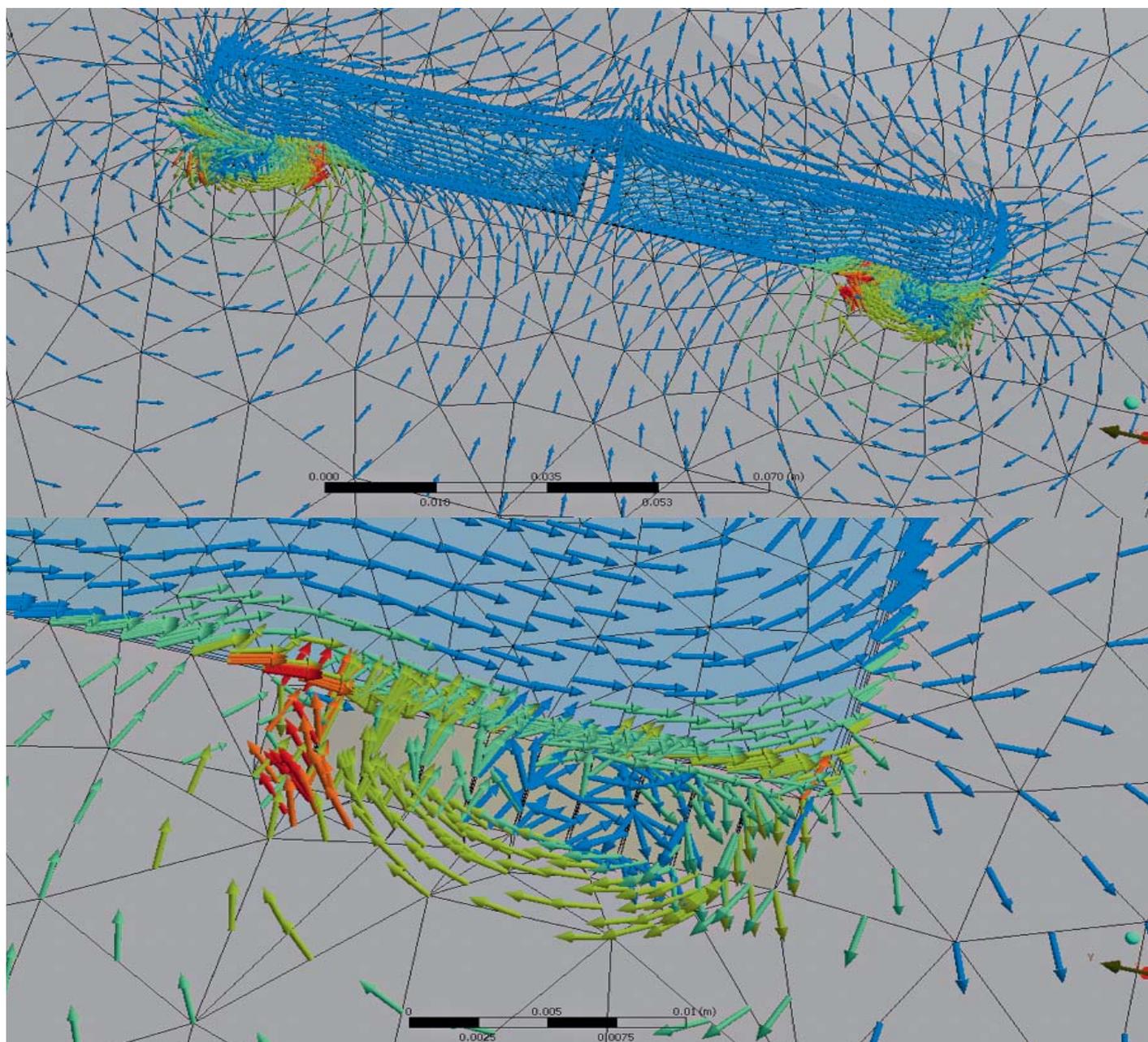
ABB 研究院
波兰克拉科夫
bartosz.dobrzelecki@pl.abb.com

Oliver Fritz

Joerg Ostrowski
ABB 研究院
瑞士巴登-Dättwil
oliver.fritz@ch.abb.com
joerg.ostrowski@ch.abb.com

Peter Lofgren

Ola Widlund
ABB 研究院
瑞典韦斯特罗斯
peter.lofgren@se.abb.com
ola.widlund@se.abb.com

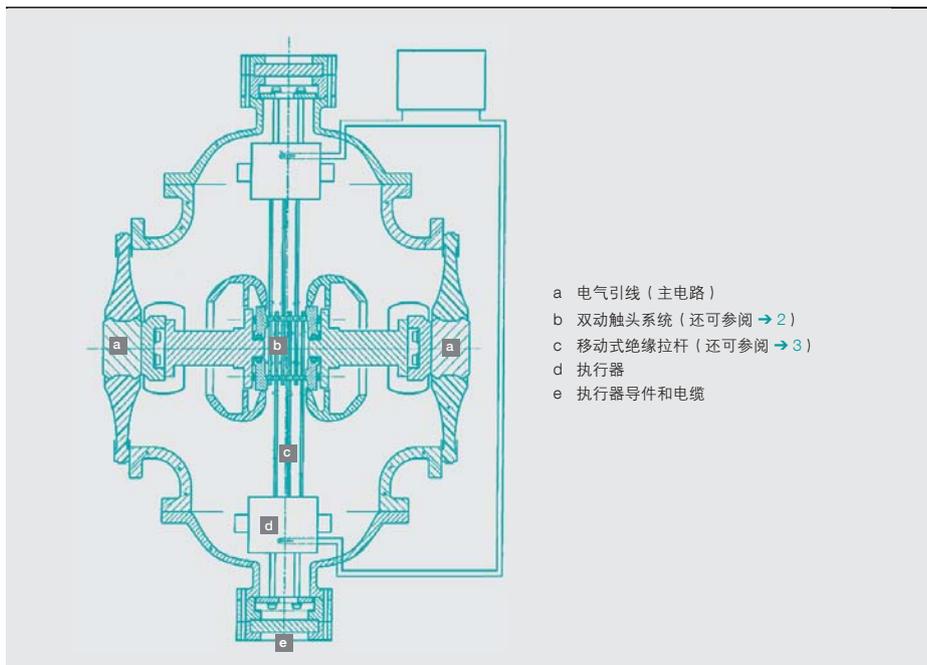


突破之举

比眨眼速度快 30 倍——
高压直流开关设备的仿真极限

DANIEL OHLSSON、JAKUB KORBEL、PER LINDHOLM、
UELI STEIGER、PER SKARBY、CHRISTIAN SIMONIDIS、
SAMI KOTILAINEN

近年来，混合式高压直流断路器的开发一直是ABB 最著名的创新成果之一。该断路器填补了高压直流电网发展道路上的最后一个主要空白，是提高可再生能源并网发电整合的重要一步。最近几期《ABB 评论》¹ 已经对该断路器本身及其重要性和相关技术进行了介绍。本文将对其中一核心组成部分进行详细剖析——即所谓的超高隔离开关，以及先进仿真技术在具有挑战性的此类重要部件的开发过程中的应用。



- a 电气引线（主电路）
- b 双动触头系统（还可参阅 → 2）
- c 移动式绝缘拉杆（还可参阅 → 3）
- d 执行器
- e 执行器导件和电缆

当今，高压直流技术主要用于远距离输电或海底输电。截至目前建设的所有输电线路均为点对点连接，在输电线路之间建立互连，最终形成

器的速度必须比同等交流断路器快约 10 倍。第二大挑战是没有交流断路器所利用的电流过零点。

为满足这一需求，ABB 开发了混合式直流断路器²，该断路器加入了半导体

技术，通过高速机械开关（UFD，超高速隔离开关）快速切断直流电流。

超高速隔离开关

超高速隔离开关（UFD）必须能够在几毫秒内从承载

由于网络阻抗低，高压直流输电中的故障电流上升速度极快。因此，高压直流断路器的速度必须比同等交流断路器快约 10 倍。

大面积覆盖的高压直流电网，它将使该技术得到进一步的提高。缺少适当的高压直流断路器一直是建立该等互连的主要障碍。

满负荷电流状态转变为承受高压绝缘状态。该开关作为高压开关，采用注入压缩绝缘气体的金属外壳封装 → 1。开关

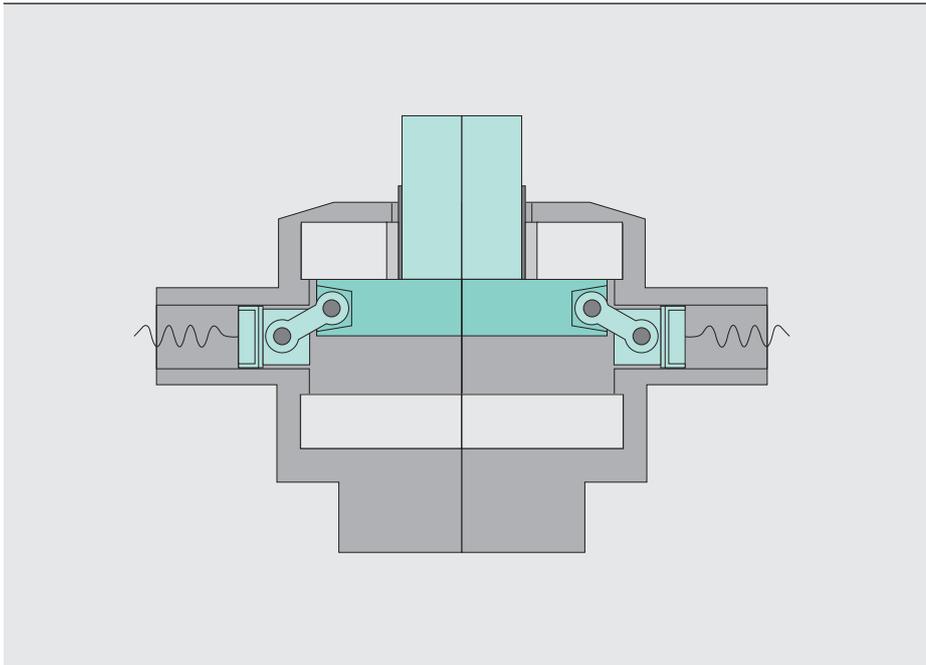
对该类断路器的要求极高。由于网络阻抗低，高压直流输电中的故障电流上升速度极快。因此，高压直流断路

标题图片

有限元仿真中线圈和柱塞交叉点的磁通密度分布。

脚注

- 1 还可参阅《ABB 评论》2013 年第二期第 6-13 页“突破之举！ABB 混合式高压直流断路器，实现可靠高压直流输电网的创新成果”，以及《ABB 评论》2013 年第一期第 6 页“解决爱迪生的难题”。
- 2 还可参阅 2011 年 9 月博洛尼亚研讨会 CIGRE 区域会议第 264 号文件第 1-9 页“主动混合式高压直流断路器——可靠高压直流电网的关键创新技术”（J. Hafner 和 B. Jacobson）。



超高速隔离开关 (UFD) 必须能够在几毫秒内从承载满负荷电流状态转变为承受高压绝缘状态。

的两条引线 → 1a 通过套管与外壳相连，由绝缘装置支撑的套管依次连接到内部电流回路。有源开关元件由一个高速双动触头系统构成 → 1b。

触头系统分为多个部分，内嵌于移动式绝缘拉杆中 → 1c。这些绝缘拉杆依次连接到运用汤姆森线圈原理的斥力式电磁-执行器或执行机构 → 1d 和 → 2。这一驱动原理能够使所连接的触点达到接近瞬间加速。执行器以垂直于电流路径的方向运行，开合闸线圈采取串联连接，以确保同步动作。执行器带有一个双向稳定弹簧布置，用以明确界定开合闸位置。这些执行器完全集成在外壳内，并通过气密导件和电缆连接至单独的储能单元 → 1e。

多物理场

断路器仿真需要对多个物理域进行建模。其中一些物理域可被当作解耦处理，即相互之间无重大影响（例如，电场应力和机械应力）。其他域之间则存在着强烈的相互作用（多物理场）。本文主要针对机械力学、气体物理学和电动力学之间的相互作用。

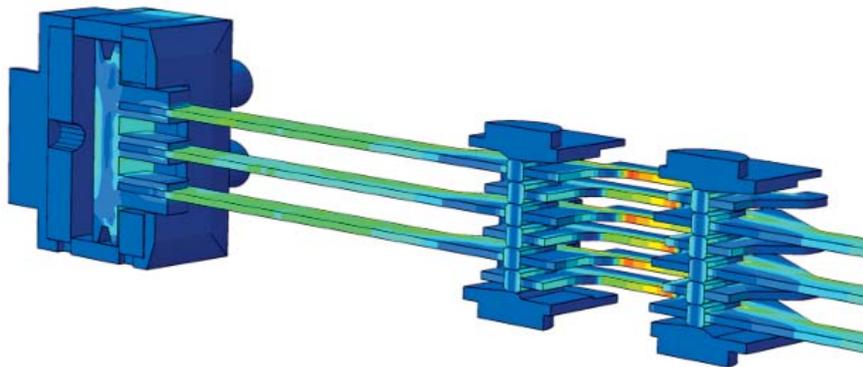
建模方法

不同的仿真方法大致可以分为两个主要领域——有限元 (FE) 模型和集总模型，其中有限元方法（可以捕捉到几何体的细节）最为准确。通常来说，集总模型（也称为整体模型）足以用于系统描述，而且仿真速度较快（只要几秒钟，无需耗费几小时甚至数天时间）。但是由于每个细节都需要进行相应的简化和调整，集总模型在开发阶段的工作量较大。另一方面，有限元方法需要进行元素公式化，重点在于模型的构建和网格划分。选择适当的方法时通常要权衡仿真时间、精确性和建模时间三个方面。

机械力学

超快隔离开关的机械仿真模型大致由 50 个部分构成，仿真过程根据各个部分的 CAD 几何体为其创建最佳和高效的网格。模型规模可以达到约 150,000 个元素，包含 200,000 个节点。接触面上的网格可以得到细化。由于高速运转和各部分之间复杂的相互作用，我们选择了一种显式时间积分方法，

仿真过程根据各个部分的 CAD 几何体为其创建最佳和高效的网格。模型规模可以达到约 150,000 个元素，包含 200,000 个节点。



并由此得出了时间序列为几小时的整体仿真时间。

仿真的第一步是将预张力弹簧和螺栓设置到初始状态。第二步是在朝向线圈的电枢面上施加汤姆森线圈负载，作为感应力。随后根据电枢的转速和位置，在朝向运动方向的电枢相对侧施加一个阻尼力。

这些仿真可以对应变、接触压力以及位移、速率和加速度等一系列物理量进行研究、评估和可视化。

这些仿真可以对应变、接触压力以及位移、速率和加速度等一系列物理量进行研究、评估和可视化 → 3。

气压阻尼器

触头系统在加速至较高速度后，必须在很短的距离内减速。

而使用气压阻尼器则是消耗动能的一种好办法。气压阻尼器的功率密度高，无移动部件，而且空间要求低。

UFD 驱动器包裹在加压的六氟化硫气体中，因此可以利用这一气体产生气体压力，由此获得阻尼力。这一过程中，如何在没有冲击或反弹的情况下停止运动是一大挑战 → 4。

正确的气压阻尼器选型需要一个反复的过程。在产品开发期间，各项要求可能发生变化，随之而来的是反复修

改。因此，我们选择了集总模型方法为气压阻尼器建模。

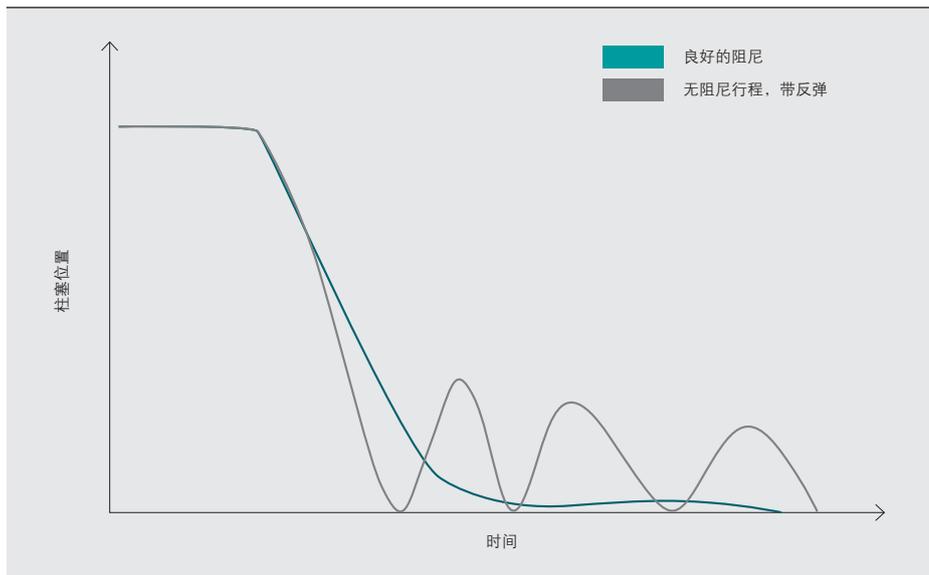
该设计遇到了一个很大的难题——如何在开关操作时获

得良好的阻尼，同时在加速过程中不消耗能量。

在阻尼器选型时，我们采用了多目标优化方法在帕累托最优设计之间作出取舍，随后，便可以根据要求选取最有利的折中方案。

汤姆森驱动器

汤姆森效应利用两个带电导体之间的互感来建立一个强大的时变磁场，在



该设计遇到了一个很大的难题——如何在开关操作时获得良好的阻尼，同时在加速过程中不消耗能量。

发生短时严重短路时，使导体之间产生排斥（洛伦兹）力 → 5。

合的普通微分方程，从而将偏微分方程问题简化为静态电磁场问题。

汤姆森线圈执行器的工作原理是通过电容器向电气线圈放电，线圈在铝板中感应出涡流，从而使线圈和铝板之间产生相互排斥的洛伦兹力，加快机械机构与铝板的连接速度。

协同仿真

为使整个问题同步得到解决，捕捉相互影响，我们在协同仿真中耦合了前文所述的多种仿真模型。耦合程序会交换软件包之间的状态变量 → 6。由于整个分析过程只需 10 毫秒，我们选择了 0.01 毫秒的耦合步长，以达到数值稳定性和较低的信息丢失率。

为了仿真电磁热机械耦合物理问题，我们采用了两种侧重点不同的方法。其一是使用电磁模型进行三维有限元分析，来捕捉详尽的暂态磁场和电场效应（包括热过程），其二是为移动板建立简化的集总模型，对磁场的扩

驱动

机电耦合中的接口变量包括电磁驱动力和柱塞位置。电磁集总模型用于计

算作用在柱塞上的驱动力，并在每次通信时将其发送给有限元模型。有限元模型

断路器仿真需要对多个物理域进行建模。

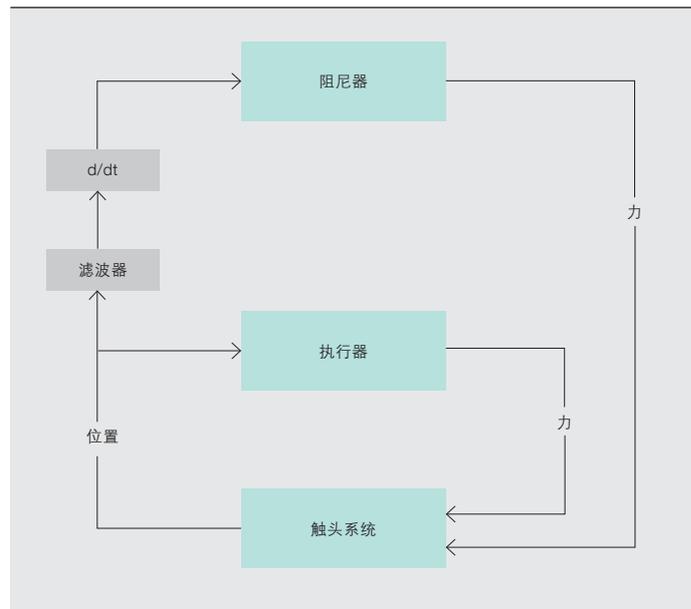
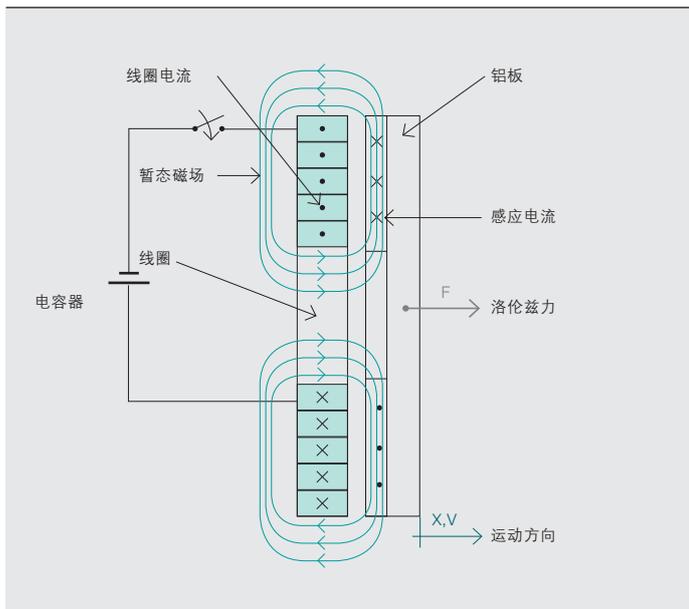
散过程、随时间变化的涡流以及相关损耗进行可视化。

用于计算柱塞的加速度以及柱塞和线圈之间的距离。同样，在每次通信时有限元模型也会将位置状态返回集总模型，确保准确的运动预测。

除了耗费计算量的有限元分析外，我们还为电热力学系统建立了一个简化的集总模型，以确保与更为复杂的结构机械力学模型协同仿真。这样可以将复杂的电磁方程拆分为通过互感耦

阻尼

流体机械耦合中的接口变量包括阻尼力和阻尼器位置。有限元模型可以在



汤姆森效应利用两个带电导体之间的互感来形成导体间强大的时变排斥（洛伦兹）力。

每次通信过程中提供阻尼器位置状态。流体动力学集总模型可以瞬时计算压力和体积关系，并将相关部分的阻尼负载返回有限元模型。

测量

激光多普勒测振仪 (LV) 是一种精密光学传感器，用于确定固定点的振动速率和位移。在测试中，LV 测量可用于机械直流断路器。该类实验在填充有六氟化硫气体的外壳中进行，激光直接穿过观察窗，获取高精度的位置和速率信息，甚至可以确定运动链中各个部分的构造运动。

采用 LV 测量的位置和速率实验记录如 → 7。所示。虽然未使用任何滤波

器，得到的曲线仍然平滑。速率曲线 → 7b 可用于确定较高频率范围的振荡，使结构振动可视化 → 8。→ 7b 中所示的极端速率变化举例说明了作用在系统上的巨大加速力。

结果 / 验证

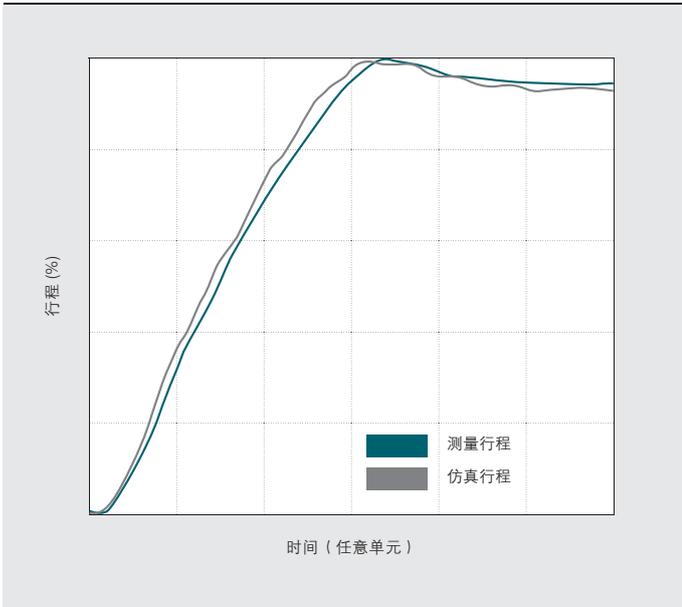
仿真中进行的大部分工作都是为了减少触头的冲击：仿真工具在冲击行为的可视化中起到了很大的帮助作用。

从机械角度来看，移动部件之间的连接至关重要。由于协同仿真覆盖了所有负载情况，我们找出了可能发生故障的位置，并对设计进行了相应改进，以防止该类问题的发生。

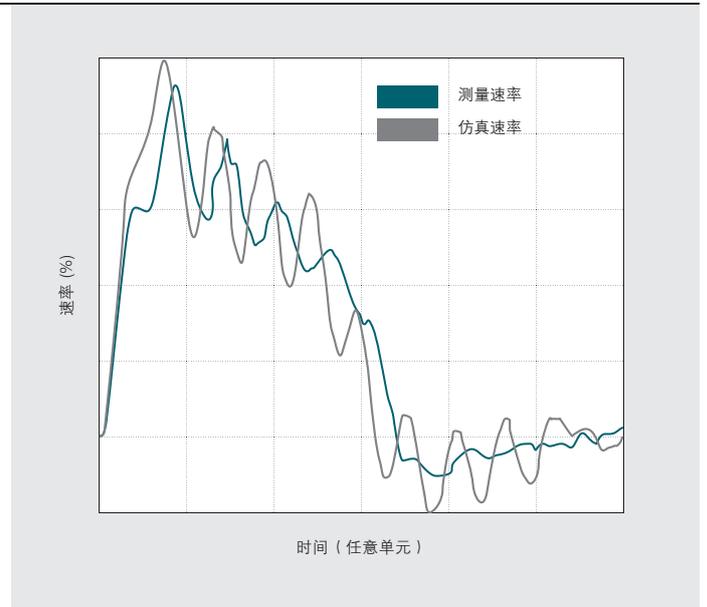
成功的仿真技术

在当今快节奏的产品开发中，综合了多个工程学科领域的先进仿真工具已成为不可或缺的产品。强大的计算资源的普及使仿真技术达到了前所未有的超高保真度。这些工具不仅可以作为物理样机实验工作的有力补充，还能够探索更为广阔的设计空间。明确模型保真度，并获得良好的实验测量

7 计算所得的行程曲线与试验结果对比图：

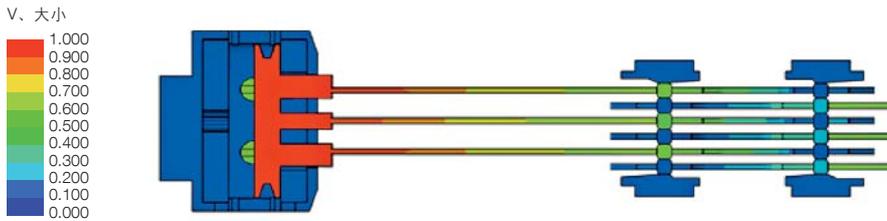


7a 行程



7b 速率

8 速率大小——演示系统中的波传播



可以将复杂的电磁方程拆分为通过互感耦合的普通微分方程。

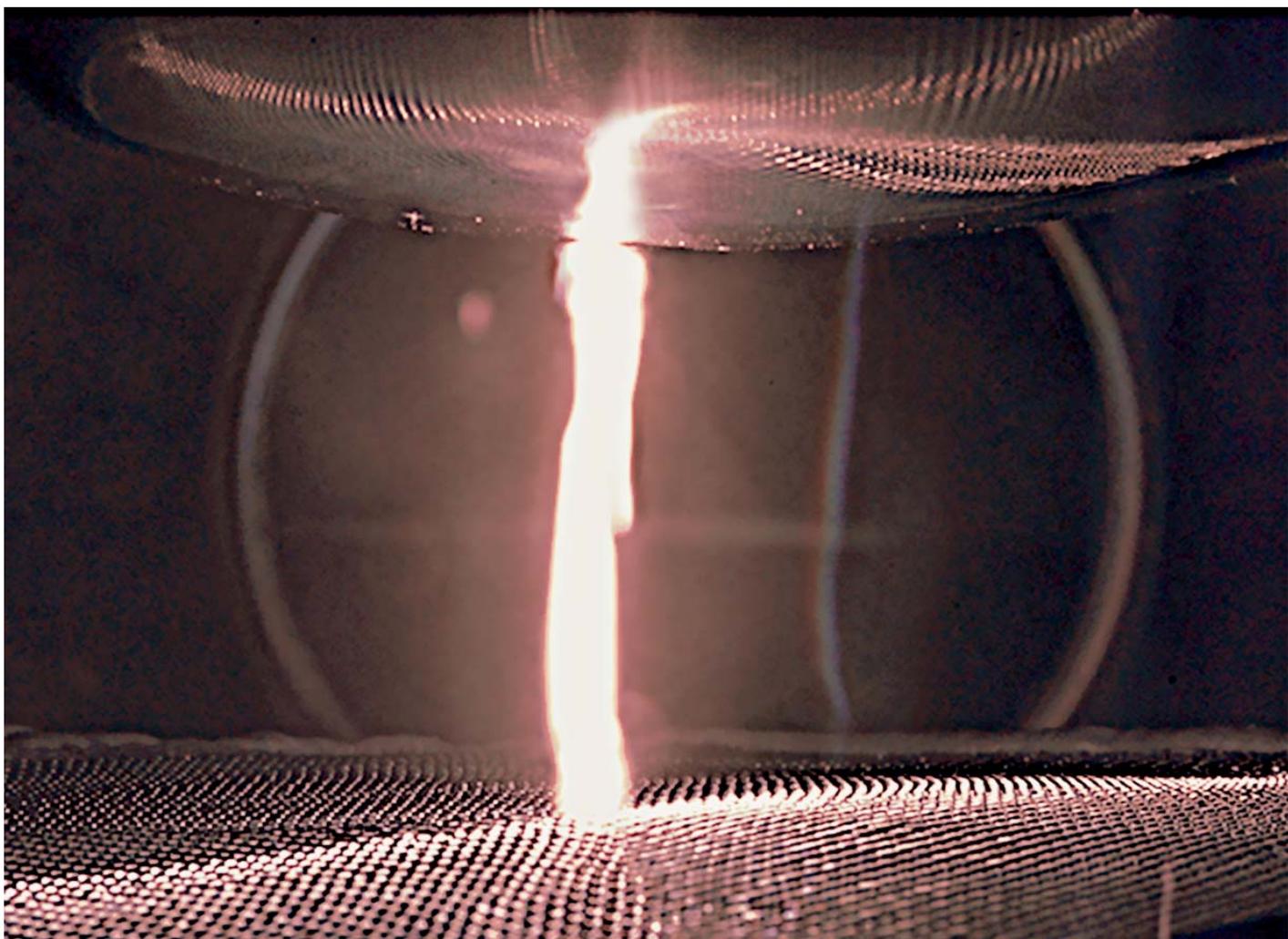
和仿真结果相关性后，便可以对仿真模型进行数值优化——在此过程中设计变量可以同时驱向多个目标。随着电气及自动化行业的产品多学科性的日益增多，结合了电气、机械和计算功能的，先进仿真工具在产品开发中的地位必将水涨船高。

Daniel Ohlsson
Jakub Korbek
Ueli Steiger
Sami Kotilainen
ABB 高压产品
瑞士巴登
daniel.ohlsson@ch.abb.com
jakub.korbek@ch.abb.com
ueli.steiger@ch.abb.com
sami.kotilainen@ch.abb.com

Per Lindholm
ABB 研究院
瑞典韦斯特罗斯
per.o.lindholm@se.abb.com

Per Skarby
ABB 高压产品
瑞士苏黎世
per.skarby@ch.abb.com

Christian Simonidis
ABB 研究院
德国拉登堡
christian.simonidis@de.abb.com



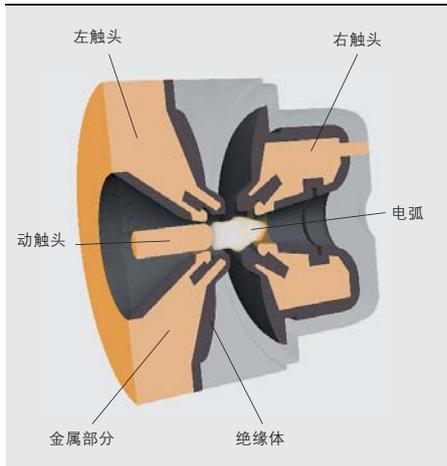
开关分析

断路器电弧仿真技术

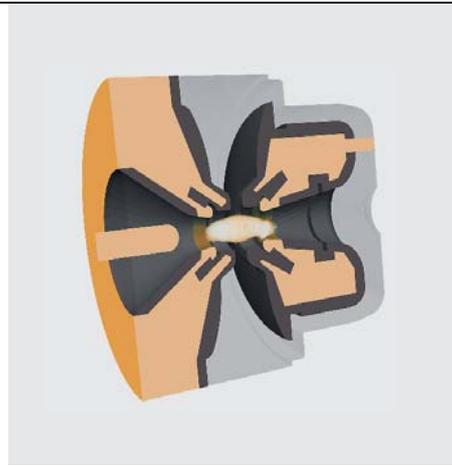
JÖRG OSTROWSKI, MAHESH DHOTRE, BERNARDO GALLETTI, RUDOLF GATI, LUCA GHEZZI, MICHAEL SCHWINNE, XIANGYANG YE

如今的社会时刻离不开电力，由发电设备和输配电设备组成的供电网络几乎覆盖世界各国的每个角落。电力基础设施中最关键的部件之一是那些切合巨大电流与电压的设备，它们是控制全社会巨大耗电量必不可少的电力产品。

这些设备的中央是一个隔室，这里是真正开断电流的地方，同时也是检验设计者才能的地方，因为这里的电弧会形成高温高压的极端条件，这种极端条件在任何一个标准设备中都会出现。如今，ABB 最具挑战性的仿真任务之一实际上是预测电弧中等离子体的运动。不久前 ABB 在这一领域取得重大突破，现已能够预测出电弧运动的很多方面以及对断路器产生的影响。



1a 动触头向左移动并使左电触头与右电触头断开。



1b 动触头向外移动，断路器处于完全开启位置，电弧在触头之间燃烧。

关于电弧，人们最为熟悉的例子莫过于雷雨时发生的闪电，剧烈的闪电把整个夜空照得如同白昼。当开启或关闭断路器时，断路器触头之间也产生电弧，它的规模要比闪电小得多，但物理原理和闪电是相同的：由于形成一条导电的高温离子气道，电流流过该气道，于是产生了电弧。断路器的任务之一就是熄灭电弧。

电弧与电弧周围的条件极端严峻。电弧温度很容易超过 2 万摄氏度。断路器灭弧室的压力有时达到 70 巴。在这样的环境下，人们只能进行极为有限的测量工作，这使产品设计工作困难重重。因此，在断路器的开发中，至关重要的工作就是对电弧和电弧对灭弧室的物理影响进行计算机仿真。

进行这类仿真时必须以不同尺度考虑各种物理过程。炙热的电弧通过电磁辐射

标题图片

断路器中电弧形成的极端物理条件给设计者带来严峻挑战。最近，对断路器电弧的认识和断路器电弧仿真都取得了巨大发展。电弧图片由高速摄像机拍摄。

释放能量，一部分电磁辐射通过周围气体传递给灭弧室外壳。壁材料受到加热并蒸发，蒸汽释放到灭弧室中。电弧中产生的离子还会加热金属触头的表面，并使其蒸发。之后这种金属蒸汽又与灭弧室内的气体成分相混合。

这种复杂的多物理及泛尺度过程仿真有着非同小可的作用，多年的物理和数字研究已获得合适的计算方法。计算机硬件的迅猛发展也让这一仿真技术取得巨大发展：如今的计算工作通常在多核工作站或高性能计算机集群上进行。得益于此，ABB 已成功地对多种断路器中的电弧进行仿真。

电弧与电弧周围的条件极端严峻。电弧温度很容易超过 2 万摄氏度。断路器灭弧室的压力有时达到 70 巴。

发电机断路器

世界上最大的 SF₆ 断路器是 ABB 的 HEC 9 发电机断路器。它能开断 250 千安的额定短路电流，可用在 1.8 吉瓦的发电厂中。操作时，巨大的能量

在一瞬间通过电弧释放到灭弧室。这产生出巨大的压力，该压力的大小不仅取决于电弧电流，还取决于电弧电压，而电弧电压反过来又取决于电弧形状和温度。由于所产生的压力可能是有破坏性的，因此人们有必要对流动状态以及对影响电弧形状的电磁力进行精确地仿真。此外，辐射是电弧主要的冷却机制，对所发出的辐射进行仿真也同样重要。

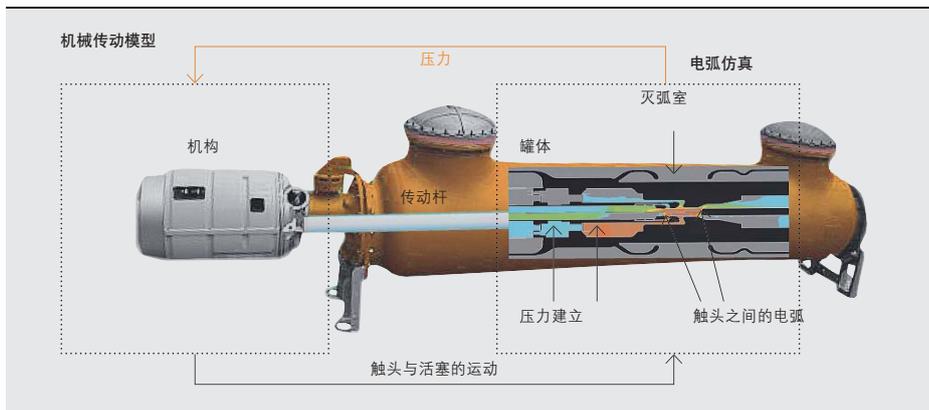
在 HEC 9 灭弧室里，当断路器在闭合位置 → 1 时，动触头把电触头连接在一起。当动触头移出并从右侧触头断开时，电弧在动触头与右侧触头之间点燃

→ 1a。当动触头从左侧触头断开时，电弧便从动触头转移到左侧触头。当动触头全部移出后，断路器处在完全打开位置。然后电

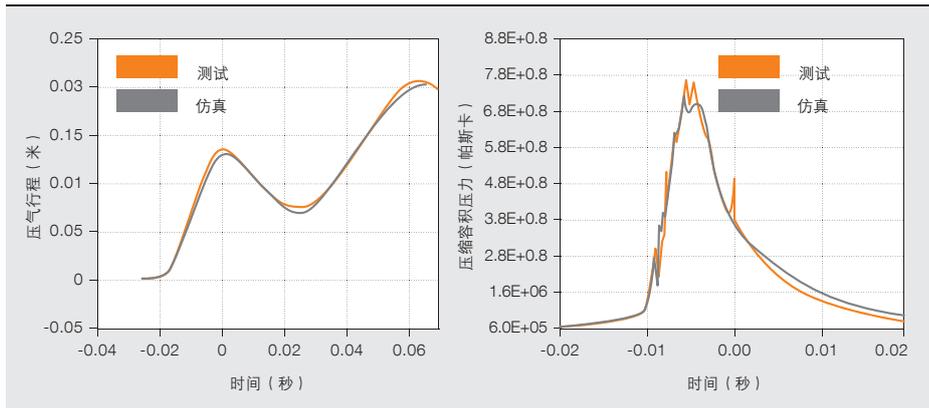
弧在两触头之间燃烧 → 1b。需注意的是电弧并非轴向对称，它产生波动并形成环，特别是在电流过零附近。随后电弧电压和灭弧室内压力也产生波动。

对于断路器开发而言，至关重要的工作就是对电弧以及电弧对灭弧室的物理影响进行计算机仿真。

2 高压气体断路器仿真



2a 电弧仿真与传动机械仿真相结合



2b 压缩容积内压力建立和压气活塞行程内压力建立的试验与仿真对比

这一情形仿真所得到的压力与测量值的误差在 10% 以内。

高压气体断路器的机械协同仿真

高压断路器 (HVCBs) 用于保护和控制高压输电网络。虽然其功率等级和短路电流不像发电机断路器那么巨大，但其开断电流后电场也会迅速达到极高数值。如果不想让电场出现问题，那么在介质恢复期间，燃弧触头之间炙热的气体就必须被强大的气流快速去除。

ABB 提供的高压断路器可达 1100 千伏，额定短路开断电流可达 90 千安。设计者必须对开断电流不久后的气体温度、气体密度以及电场进行仿真，预测出强电场引起的介质击穿。设计者应能够精确地预测电极位置，这一点至关重要。在预测电极位置时

需注意，电弧产生的压力与连接压气室的机构之间的相互作用决定了电极的运动。

为了开断此类电流，ABB 发明了自能原理 → 2。其思路是利用电弧本身的热能形成相对较冷的高压气体，来吹灭电弧。

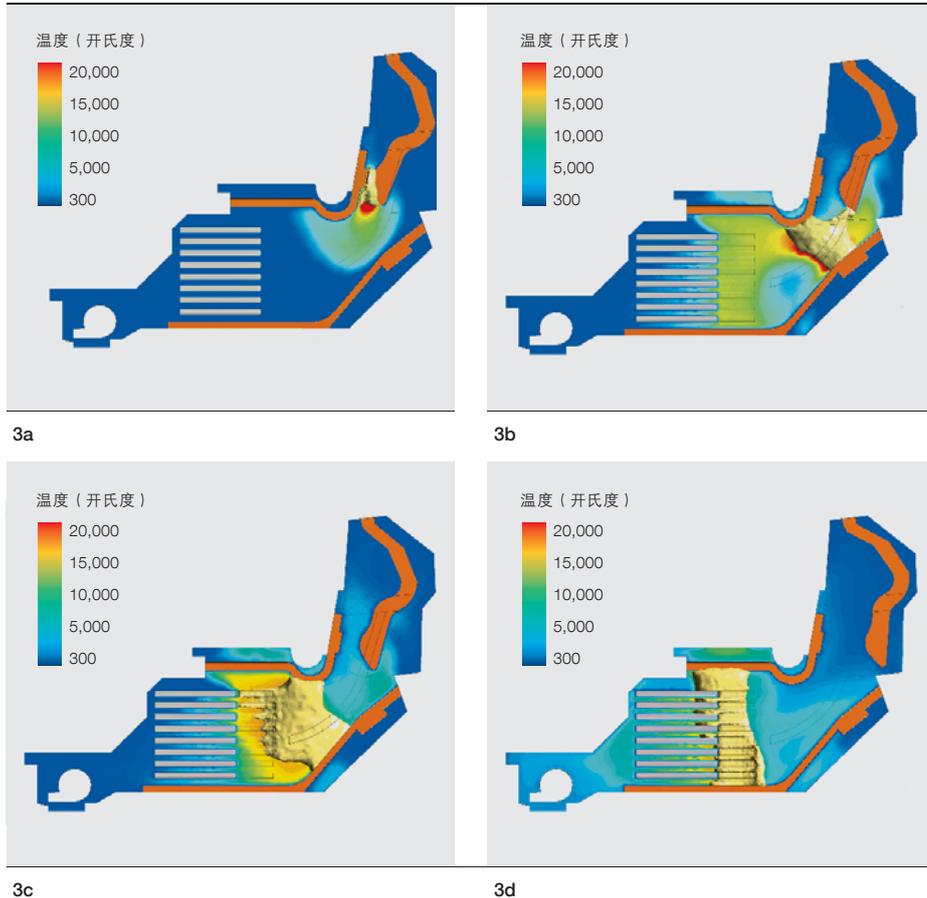
在开关操作期间，高压高温气体与压力室内的冷气体相混合，混合气体流回燃弧区，以确保成功开断电流和燃弧触头间的介质恢复。整个过程用时 10 至 40 毫秒。通过运用电弧物理和机械传动的全耦合仿真，设计者能精准地预测出压力建立、电弧电压，以及固定容积内的气体混合和整个设备内的流动模式。这些都是设计和开发断路器的关键信息。

此外，压气室内产生的压力可使触头减速或反向运动，触头运动通过液压或弹簧机构进行了加强。机械协同仿真能够让设计出来的机构既不超出指标，又能在分离速度方面满足所有客户和型式试验的要求。

低压断路器中电弧的运动

让人感到诧异的是：从某些方面来讲，低压断路器是最难仿真的。低压断路器必须考虑更多的现象，例如：电弧沿着导杆电极运动时，铁磁材料与电弧产生的磁场之间存在相互影响，电弧和外部电路之间存在相互作用等。因为低压断路器本身能够限制电流，所以最后一个现象尤为重要。其建立的电压能够与系统电压相比，因而能让电流始终保持在临界值以下，在电流自然过零前很好地开断电流。

3 低压短路测试的瞬态仿真。气体温度：蓝色至红色。电弧是电流密度的黄白等值面。



人们有必要对流动状态以及对影响电弧形状的电磁力进行精确地仿真。

提高电弧电压可以限制电流。而烧蚀外壳的聚合物材料或把电弧分割成数段短弧能提高电弧电压。烧蚀壁材料之后，等离子体中增加了冷气体，降低了其温度。电弧被分割成短弧之后，更大面积的金属表面吸收电弧释放的能量，进一步冷却电弧。当电弧从燃弧点转移到灭弧室时，分割电弧才能实现。利用电弧本身产生的磁场就能驱使电弧离开正常触点。使用铁磁材料（通常为钢板）可集中并大幅提高磁场，产生更大的力驱使电弧离开。

低压断路器仿真意味着要按照电弧自电触头分开被点燃开始的一个快速演变过程 → 3a，从正常触点转移到跑弧道 → 3b，沿着电磁力和压力梯度被迫运动 → 3c，直到在金属栅片中熄灭，在此，电弧等离子体被分割为若干短弧并冷却下来 → 3d。低压断路器是否

成功开断电流取决于几毫秒内发生的多个物理现象复杂的相互作用。这里显示的仿真来自 ABB 新近开发的带有过载保护的 DSN200 电子式剩余电流断路器。

前景展望

电弧仿真经常用来支持断路器的产品设计。同时，在许多情况下，电弧仿真也用来替代那些昂贵、费时或不可能进行的实验。但实验还不能完全被取代。要想达到完全取代实验的目标，还需要更为精密的物理模型、更快捷的计算方法以及对材料更深入的认识等。

电弧仿真除了支持产品设计外，还大大提高了对电弧过程的物理认知。这些深入理解将对未来开断电流新理念的创建大有裨益。

Jörg Ostrowski

Michael Schwinne

Bernardo Galletti

Rudolf Gati

ABB 研究院

瑞士巴登·Dättwil

joerg.ostrowski@ch.abb.com

michael.schwinne@ch.abb.com

bernardo.galletti@ch.abb.com

rudolf.gati@ch.abb.com

Xiangyang Ye

Mahesh Dhotre

ABB 电力产品，高压产品

瑞士巴登

xiangyang.ye@ch.abb.com

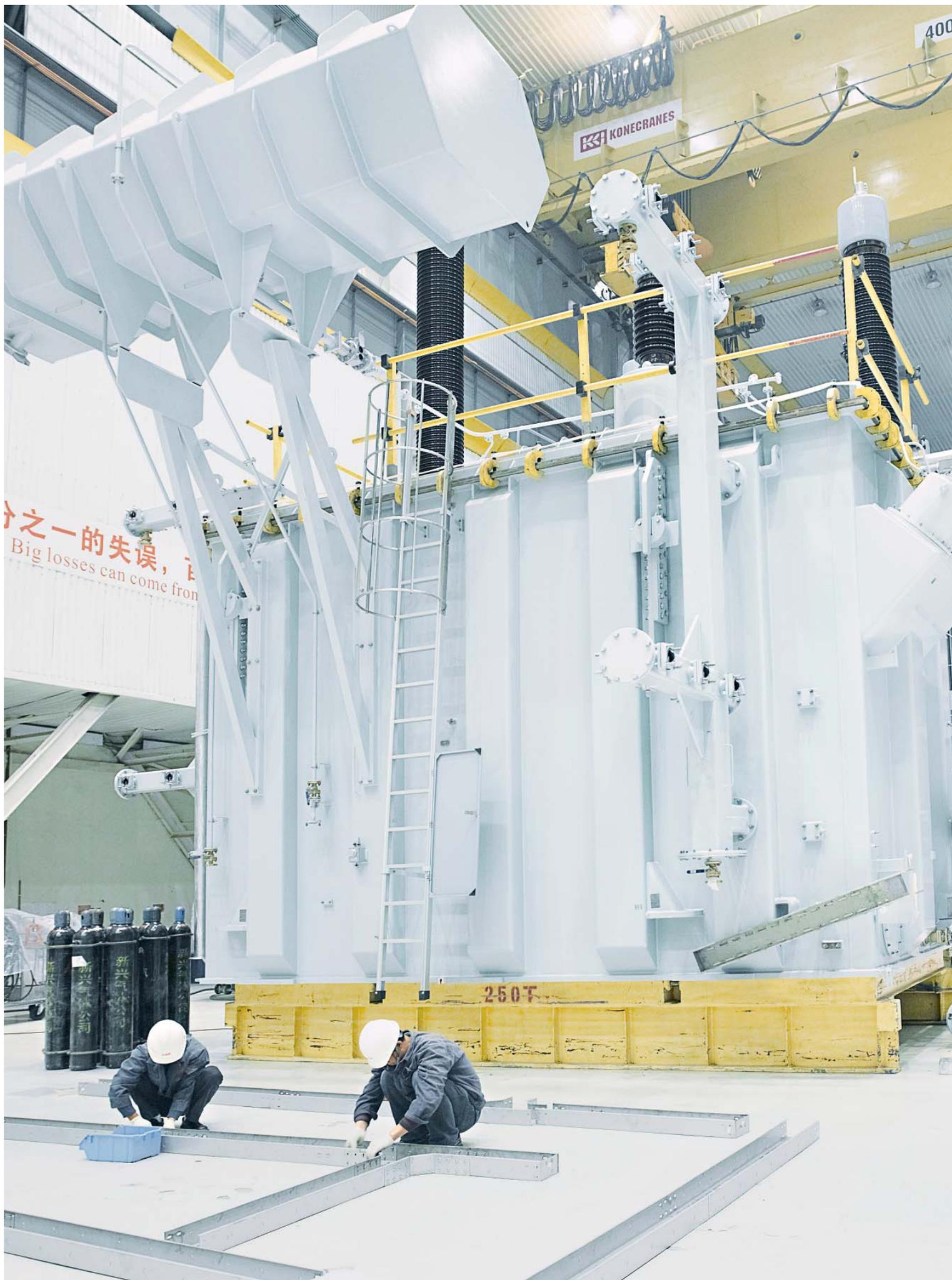
mahesh.dhotre@ch.abb.com

Luca Ghezzi

ABB LPED

意大利米兰

luca.ghezzi@it.abb.com





缔造完美

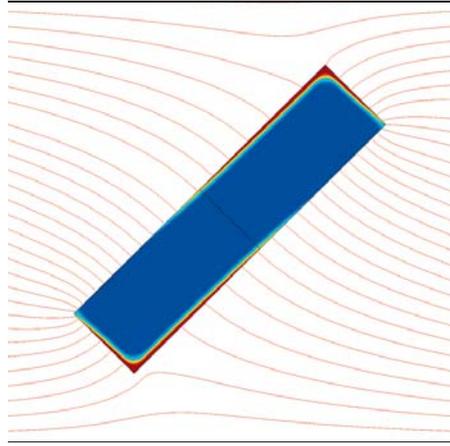
变压器的电磁仿真

DANIEL SZARY、JANUSZ DUC、BERTRAND POULIN、DIETRICH BONMANN、GÖRAN ERIKSSON、THORSTEN STEINMETZ、ABDOLHAMID SHOORY

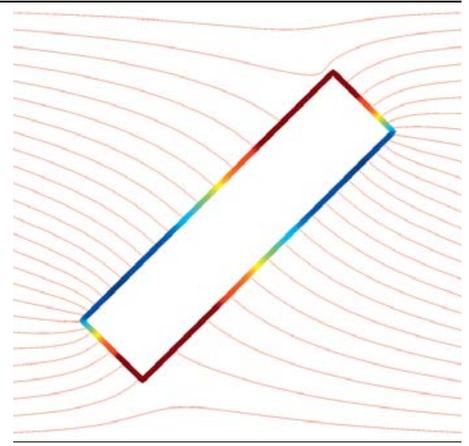
在整个供电网络中，电力变压器是最昂贵的设备。人们投入了大量精力，力图使变压器的设计趋于完美。有限元方法的仿真软件是实现这一目标的宝贵的工具。仿真软件不仅能够预测基本物理现象的影响，而且能够让您获得 ABB 在变压器设计领域中的百年经验和完美设计。在磁通损耗机理、复杂的非线性性能及实体设计的特质方面，不同类型的变压器呈现不同的挑战，因此这一技术至关重要。所有这些因素都必须得以兼顾，同时还要将计算量控制在合理范围内。

标题图片

详尽的变压器电磁性能仿真是优质产品设计的基础。



1a 采用全体积有限元计算



1b 采用 SIBC 技术进行计算

在油浸式和干式电力变压器软件仿真领域，非线性材料属性和设备复杂性是推动计算能力发展的两个重要因素。对电力变压器设计的深入认识使得我们在满足计算量限制的情况下进行极为精确的仿真。

建立满足结构材料自身损耗机理的数值模型以准确计算杂散损耗及其空间分布。

电力变压器肩负着一项重要任务：必须在发电厂到最终消费者的传输途中上下调节电压。在理想情况下，变压器的效率达到 100%，但在现实中，每台变压器都会产生损耗。一般情况下，变压器的负载损耗由三部分组成：电阻损耗和涡流损耗（出现在绕组和引线中）以及杂散损耗（暴露在漏磁场中金属部件的损耗），例如变压器油箱、铁芯夹紧件和变压器油箱屏蔽结构。这种不可避免的磁通泄漏不仅代表着能量损失，还会导致局部过热，从而缩短变压器的寿命。

虽然电阻损耗和涡流损耗可以通过二维仿真进行精确计算，但是绕组外部

的杂散损耗计算是一个复杂的三维问题，必须有合适的变压器模型才能解决。该模型可以通过基于有限元方法的仿真软件建立。有限元分析 (FEA) 是一种复杂的工具，广泛用于解决电磁场、热效应等引发的工程问题。在

有限元分析中，使用较小的网格可以得到更精确的结果，能够更好地解决问题，但同时也需要更高的计算能力。

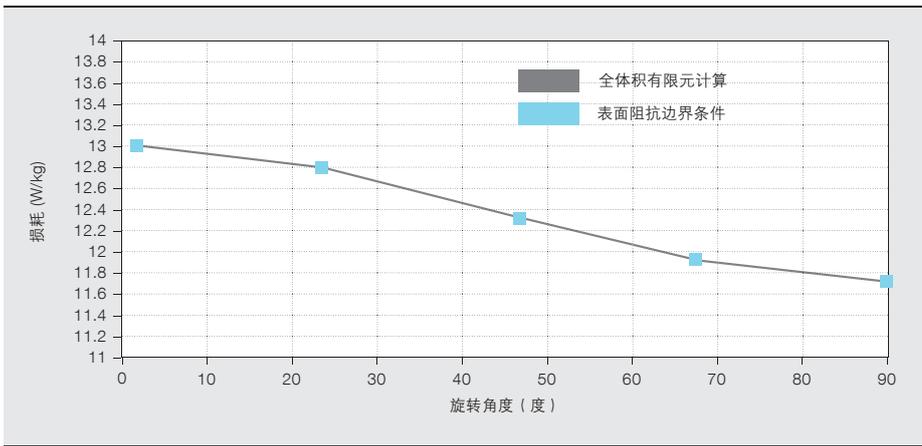
因此，必须在网格大小、模型详细程度、材料属性近似程度、计算时间以及结果精度之间找到一个平衡点。

在带有适当边界条件的有限空间区域中，仿真软件可以通过麦克斯韦方程组来解算基本的电磁场情况（激磁电流和模型边界条件）。仿真的其余部分取决于用户输入的数据。这正是 ABB 长期的变压器设计经验开花结果之处。

杂散损耗仿真

杂散损耗及其空间分布的精确计算需要为结构材料本身的损耗机理建立适当的数值模型。

2 作为旋转角度函数的钢板总损耗仿真。采用 SIBC 技术所得出的结果与全体积解析十分相近。



板体金属材料中的损耗明显，叠片式金属材料亦是如此，如硅钢片，其原因在于杂散漏磁场在叠片平面未被抑制。除涡流损耗之外，铁磁材料的磁滞损耗是因为交变磁场诱发材料微小能量消耗的结果。此外，为了精确计算总损耗分布，模型还必须考虑到磁化曲线的非线性。这一非线性不仅影响着磁场分布，还间接影响着涡流分布。硅钢片的高度各向异性还带来了其他的复杂因素，这一点也必须高度重视。

趋肤效应也会使问题进一步复杂化：金属物体表面附近感应生成的涡流具有屏蔽作用，导致磁场和导体内部电流呈指数衰减。随着导电性和磁导率的增加，趋肤效应越来越明显，这意味着在相关典型材料中，特有的衰减长度（“趋肤深度”）不超过 1 毫米。其结果是使损耗都集中在这薄薄的一层上。乍看下，似乎必须将趋肤深度分解为多个有限元以计算损耗——这一过程的三维仿真需要极高性能的计算机来完成。所幸，我们可以利用表面阻抗边界条件 (SIBC) 大幅减少计算量，降低对计算机性能的要求。此外，我们要将金属物体内部从计算域中删除，通过分析指定表面阻抗代替导体表面流动的涡流影响，——即表面电场和磁场的比率。

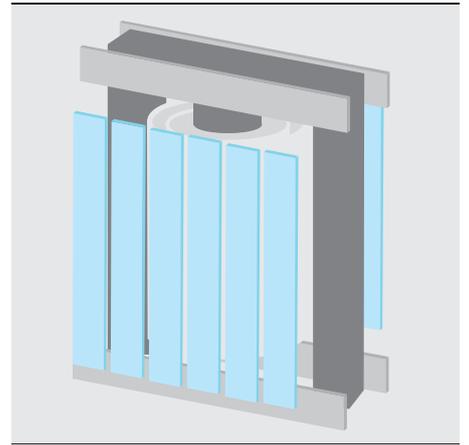
SIBC 方法的有效性可以通过举例证明。以一块无限长的钢板为例，其横截面为 12×50 毫米，50 赫兹下的趋肤深度为 1 毫米，可以在磁场中以不同的旋转角度进行仿真。总涡流损耗可以通过钢板全体积解析（整个计算域需要 4,220 个网格）→ 1a 和一个 SIBC 方案（需要 1,674 个网格）→ 1b 进行计算。SIBC 方案所得出的损耗值几乎与全体积解析完全一样 → 2。即使如此小的物体，SIBC 的相对好处明显，而当物体尺寸增加时，相对好处也将随之增加。

ABB 正在对计算变压器结构材料中损耗分布的各种数字技术进行评估和改进，目的是为三维仿真找出最精确的模型，同时保证合理的计算量。通过对测试对象的详细仿真计算，并结合精心控制的试验测量来实现这一目标。随后，在这些结果的基础上对非线性材料和/或叠片式金属材料的各种参考损耗的建模技术进行评估。

油浸式电力变压器的电磁仿真

自耦变压器的绕组（此处使用 ABB 243 MVA 512.5/230/13.8 千伏单相变压器举例说明），相较于自身物理尺寸会产生大量的杂散磁通。这意味着

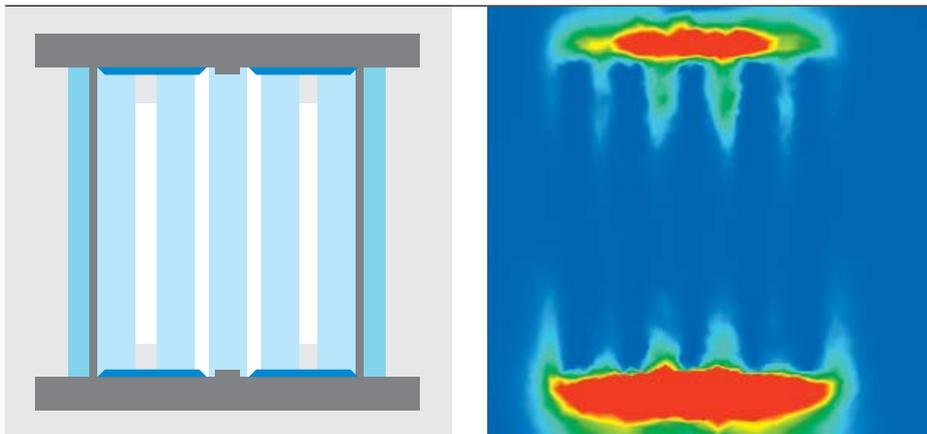
3 电力变压器仿真模型的几何形状（不包含电力变压器油箱）



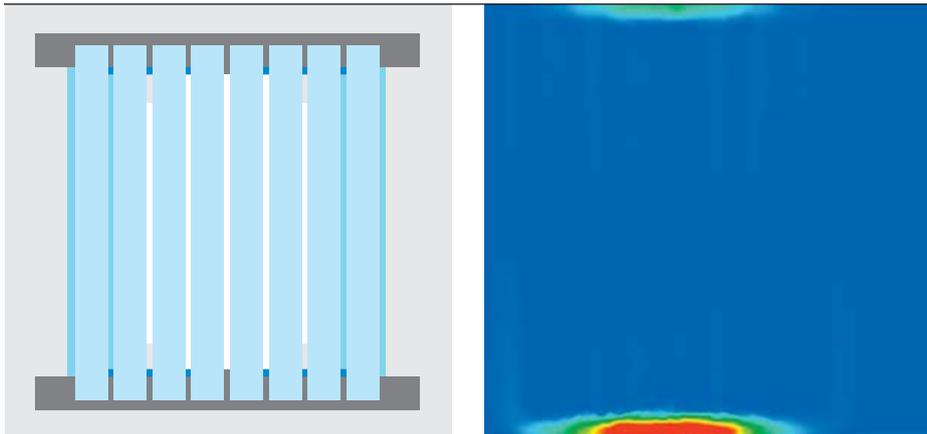
将基于有限元分析的不同类型先进数值仿真应用于干式变压器的技术改进和产品开发。

目的是为三维仿真找出计算量合理的最准确模型。

4 变压器油箱磁屏蔽布置对变压器油箱损耗分布的影响



4a 变压器油箱磁屏蔽较短且间隔较大时会产生高损耗（右图）



4b 变压器油箱磁屏蔽较长且间隔较小时损耗较低（右图）

潜在的高杂散损耗并且变压器油箱中可能存在过热点。不过，我们可以适当的借助仿真和设计来制造变压器油箱屏蔽结构，避免过热点。在该例中，安装在箱壁上的磁分路被用作屏蔽结构（磁屏蔽）。磁屏蔽为铁磁材料，用于引导来自变压器绕组两端的漏磁通。

三维有限元分析模型包含磁仿真和损耗计算所需的所有重要结构件 → 3。由于实际变压器的复杂性，我们引入了一些简化过程，使计算量更易于管理。

在初始设计中，变压器油箱磁屏蔽相隔太远，而且高度不够，与变压器油箱的其他区域相比，直接面对器身的损耗密度明显增高 → 4a。从图中我们可以清楚地看到受磁场影响的关键区域——主要位于磁屏蔽的上方和下

方。在多个设计迭代过程中，增加磁屏蔽的高度和数量、同时缩小了间距，使变压器油箱所产生的损耗减少近 40%。通过仿真，我们可以获得所需的性能，同时尽可能减少多余的材料，从而节省相关成本 → 4b。

干式变压器的电磁仿真

与油浸式电力变压器和配电变压器不同的是，干式变压器的器身（包括铁芯、绕组、结构部件和引线等）不浸泡在绝缘液体中。器身电气绝缘和冷却均依靠周围空气。干式变压器技术改进和产品开发过程采用了不同类型的先进数值仿真，这些仿真通常基于有限元分析。

TriDry——采用三角形卷铁芯的干式变压器与采用平面型铁芯的传统变压器不同，TriDry 的三个芯柱具有完全相同

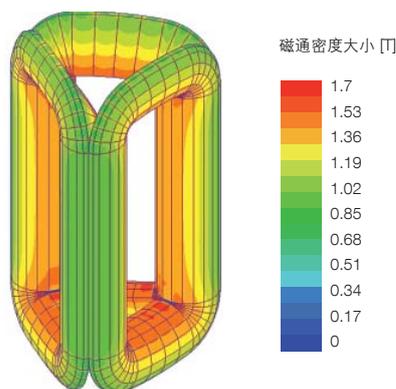
的磁场条件 → 5。铁芯内部磁场的数值仿真因模型中材料的各向异性而特别具有挑战，铁芯材料平行于叠片方向磁导率很高，而垂直于叠片方向磁导率很低 → 5。通过这些仿真，我们可以对 TriDry 变压器的磁性能有基本的了解。另外，还可以通过数值仿真对 TriDry 变压器的杂散漏磁场强度进行详细分析。这一切都是确保合规性所必不可少的——例如在瑞士，一些敏感地区安装的变压器实施 1 微斯特拉 RMS 限制。

干式变速驱动变压器

变速驱动变压器用于交流电机供电。这些与变压器相关的电力电子器件会产生电流谐波，导致绕组损耗增加，并且有可能导致过热点。因此，在构建仿真模型时必须考虑到这一问题。绕组损耗仿真的典型例子如 → 6 所示。



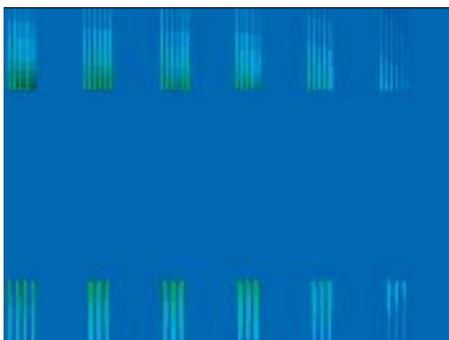
5a TriDry 变压器



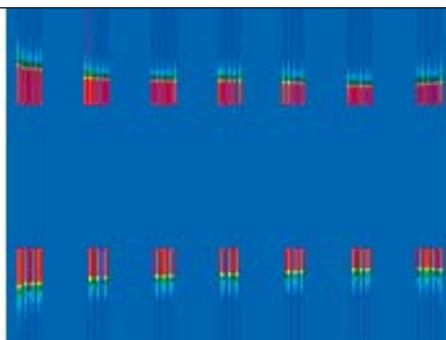
5b 磁通密度分布

表面阻抗边界条件 (SIBCs) 可以显著减少计算量和降低对计算机性能的要求。

6 12 脉冲变压器的电磁仿真：箔式绕组端部的损耗分布



6a 基波频率下



6b 五次谐波频率下

该图以一个带有两个次级绕组的 12 脉冲变压器为例，显示了两个轴向布置的低压箔式绕组端部的损耗分布。与五次谐波频率相比，在基波频率下，沿导体表面的绕组损耗分布更为均匀。这是因为两个次级绕组的电流相位均处于基波频率下，主要产生轴向磁通。在五次谐波频率下时，两个次级绕组电流相位相反，产生径向磁通，使损耗集中在上绕组下端和下绕组上端的区域内。这会导致过热，需要对设计进行相应修改。

仿真技术成就

实践证明，在当今变压器开发设计领域，电磁场数值仿真是十分强大的工具。适当的数值模型可应用于不同类型的变压器，例如，结构件的杂散损耗数值模型，绕组损耗数值模型和铁芯损耗数值模型。

ABB 将这些数值仿真用在产品研发和设计中，成就了 ABB 高品质的油浸式变压器和干式变压器。

Daniel Szary

Janusz Duc

ABB 研究院
波兰克拉科夫
daniel.szary@pl.abb.com
janusz.duc@pl.abb.com

Bertrand Poulin

ABB 电力产品部变压器业务单元
加拿大魁北克 VARENNES
bertrand.f.poulin@ca.abb.com

Dietrich Bonmann

ABB 电力产品部变压器业务单元
德国巴特洪内夫
dietrich.bonmann@de.abb.com

Göran Eriksson

ABB 研究院
瑞典韦斯特罗斯
goran.z.eriksson@se.abb.com

Thorsten Steinmetz

Abdolhamid Shoory

ABB 研究院
瑞士巴登-Dättwil
thorsten.steinmetz@ch.abb.com
abdolhamid.shoory@ch.abb.com

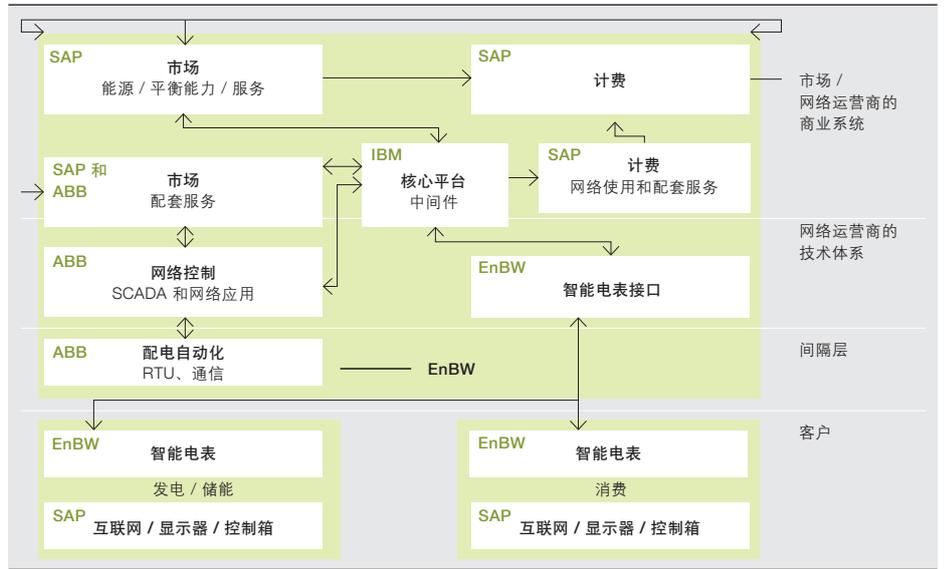


智能领袖

实践试点合作，增强智能网络

CARSTEN FRANKE、TATJANA KOSTIC、STEPHAN KAUTSCH、BRITTA BUCHHOLZ、ADAM SLUPINSKI

长期以来，ABB 一直专注于技术研发，为实现和优化智能电网源源不断地提供重要部件。为评估和进一步改进现有解决方案，ABB 参与了大量研究项目和设备试点工作。在这些极为成功的试点项目中，MEREGIO 项目备受瞩目。该项目由德国政府出资，是“E-ENERGY”计划的六大试点项目之一。在为智能电网开发全新信息通信技术的过程中，ABB 与众多项目合作伙伴进行了广泛合作，并从中获得了必要的支持。此次合作取得了丰硕的成果，使智能电网的能力和稳定性得到进一步提升。



2012 年，ABB 成功完成了其在 MeRegio（最小排放区）试点项目中的工作。该试点项目开始于 2008 年，是由德国联邦经济和技术部与联邦环境、自然保护与核安全部联合出资的一系列“E-energy（信息化能源）”项目之一 [1]。

与所有“E-energy”项目相同，MeRegio 项目的重点也是为管理未来能源系统开发、实施并测试信息和通信技术。MeRegio 项目联盟成员包括：

- ABB
- EnBW Energie Baden-Württemberg
- IBM Deutschland
- SAP
- Systemplan GmbH
- 卡尔斯鲁厄大学 (KIT)

各负责方及其主要组成部分如 → 1。ABB 主要负责网络控制和配电自动化。IBM 则以连接 MeRegio 各组成部分的信息交换中间件为核心工作。SAP 主要负责市场平台开发。EnBW 作为一家公共事业公司，负责开发智

能电表平台以及并网控制箱；除此之外，还负责整个项目组的领导工作。KIT 通过专项研究任务为项目组提供支持。Systemplan 的任务是协助设置安装工业客户专用分表。

面向智能电网的全新信息通信技术 (ICT)
在 MeRegio 项目中，ABB 开发新技术并安装了全新的智能测量设备。ABB

二次变电站的电压调节能力几乎可达电网中可再生能源发电量的两倍。

最重要的贡献是开发并部署了全新的信息通信技术，覆盖了智能电网中更多的网络控制应用和机械装置。ABB 围绕四个不同的侧重点展开工作。其中，第一、第三和第四个侧重点都已经通过大量仿真进行了评估。

第一：离线仿真

MeRegio 项目着重调查的第一个侧重点是中低压试点网络的离线仿真，目的是寻找进一步的优化机会。为此，

ABB 将不同的新技术解决方案纳入考量范围，如 $\cos(\varphi)$ 调节、电压调节单元及储能。这一工作的成果是使二次变电站中的电压调节几乎可以达到可再生能源发电量的两倍，可以集成到低压电网中，避免该类电网中的电压带违限，无需对网络拓扑结构进行任何修改。此外，所有这些离线仿真成果还可用于其他电网，这一点已经得到验证。因此在该项目中获得的技术便可以反复利用，并且可以帮助用户解决类似的问题。另外，这些成果还被用于寻找有必要安装额外的 ICT 设备，以进一步调查、监控和提高配电网供电可靠性。

第二：测量技术的发展

在此基础上，该项目的第二个侧重点是二次变电站测量技术的进一步发展。这需要使用远程终端设备 (RTU) 实现二次变电站的自动化操作。为实现这一目标，该项目采用了 ABB 的 RTU560 和 Multimeter 560CVD11，这样只需要使用低压侧的测量值便能

标题图片
德国 Freimat 的示范区。
摄影 © 2013 Luca Siermann。

确定变电站中压侧的电压。这种特殊的测量技术诞生在 MeRegio 试点项目中，也在现场网络中进行了集中测试。目前，用于确定中压侧电压的这一方法经证实效果良好，已被用于后续的 ABB 试点项目。

第三：测量整合

MeRegio 项目中的第三个侧重点聚焦在整合不同变电站的所有中低压测量上以及使用网络管理系统中现有的智能电表测量。通过这种方式，网络计算可以得到提高，网络运营商将获得更好的在线控制能力。虽然来自变电站的数据可以直接使用现有的通信协议进行整合，但是智能电表的数据导入需要开发一种全新机制。所需的数据交换已通过一个 Web 服务接口和 IBM 核心平台实施，实施过程中所使用的数据模型在很大程度上受现有标准影响。特别值得一提的是，ABB 开发的信息模型交换协议受到公共信息模型（DCIM，包括配电网公共信息模型扩展、IEC 61968-11 和 IEC 61970-301）影响。来自中低压侧的集成数据可以计算潮流，并实现网络瓶颈和电压违限的可视化。为此，该项目采用了彩色标记法来显示与已知问题相关的负载及发电影响。所有这些概念和方法均已通过大量系统仿真进行了验证。

第四：顺应市场的方法

MeRegio 试点项目的第四个侧重点是为中低压电网需求侧管理找出顺应市场的方法。针对这一点，ABB 对分布式光伏发电和风力发电进行了预测。除此之外，ABB 还为 IBM 核心平台增加了一个接口，用于接收专用“控制箱”发送的预测数据——这些控制箱安装在 EnBW 运营的指定配电网中。根据这些数据，平台可以实现预测功

率流，提前六个小时预测潜在的网络瓶颈。这些预测计算结果采用 XML 编码，被发送至分析工具。这一全新生成的瓶颈分析模块可以计算出所有负载并且测试出发电机对预期问题的灵敏度，随后根据这些灵敏度重新提出与本地发电和负载相关新的调度方

在现实中，我们很难对这类事件进行频繁观察，这正是网络瓶颈仿真的意义所在。

案。这些解决方案采用所谓的优先级信号编码，被发送至配电系统运营商市场去解决问题。作为标准 DCIM 的延伸，优先级信号编码交换模块已经开发完成，可以确保我们使用相同的信息有效载荷类型，通过类似方法解决配电网中的相似问题。整个问题由 ABB 的专家小组负责解决，以预测潮流为起点，过程包括瓶颈分析、敏感性信号生成和通信。

“优先级信号”过程用于主动解决预期网络瓶颈，其有效性评估主要基于配电网的在线仿真，反映出在现实系统中频繁观察该类瓶颈是很困难。为此，ABB 对一些负载和发电预测数据进行了修改，以便针对不同的提前期生成瓶颈预测。随后，他们还对各种算法和信息交换机制在识别解决预期网络问题过程中的效率进行了评估。

成果演示

试点评估本身不仅建立在现场测量的基础上，还涉及大量仿真。为了向更多人展示和传达 MeRegio 试点项目的成果，ABB 开发了一台综合示范系统——智能配电系统，该系统可以用于智能电网的综合介绍和演示，还可

进一步解释说明 MeRegio 项目中遇到的问题以及针对这些问题制定的解决方案。除此之外，该示范系统还可以针对特定的网络运营问题进行评估，评估智能电网解决方案对经济的影响。正如示范系统所示，仿真是解决方案开发的一个重要组成部分。尽管

如此，如果没有各方的通力合作，共享专业知识和想法，这一项目也是不可能成功的。此次协作为我们树立的一个成功典范，

让我们了解到不同的利益群体也可以携手同心，为造福全人类作出共同的努力。一言蔽之，众人之志无不任，众人之力无不胜。

Carsten Franke
Tatjana Kostic

ABB 研究院
瑞士巴登
carsten.franke@ch.abb.com
tatjana.kostic@ch.abb.com

Stephan Kautsch
Britta Buchholz

ABB 电力系统部、智能电网
德国曼海姆
stephan.kautsch@de.abb.com
britta.buchholz@de.abb.com

Adam Slupinski

ABB 电力系统咨询
德国曼海姆
adam.slupinski@de.abb.com

特别鸣谢

Klaus von Sengbusch
电力系统部原职员

参考文献

[1] E-energy project of the German Federal Ministry of Economics and Technology. Retrieved from <http://www.e-energy.de/en/> (2013, June 5).



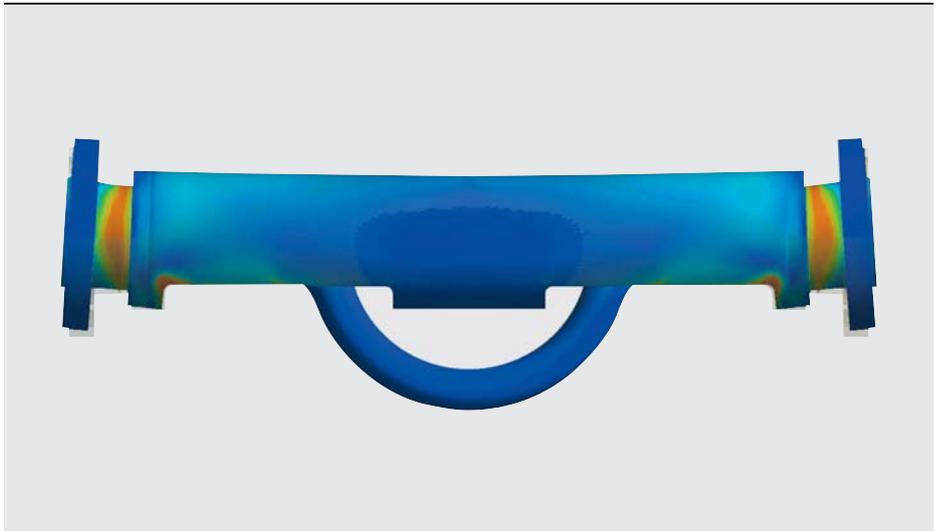
感受灵敏

利用系统及多物理场仿真技术设计更精确耐用的传感器

ROLF DISSELNKOETTER, JÖRG GEBHARDT, ROS-
TYSLAV TYKHONYUK, HOLGER NEUBERT

在 ABB 所涉及的很多业务里，仪表都是至关重要的关键元
件。为了满足市场迅速增长的需求，ABB 在传感器技术研

究领域一马当先，不仅寻求发展新传感技术，减小传感器
占地面积，而且力图满足新标准，开发新应用。在这些目
标的引领下，ABB 利用系统及多物理场仿真技术，成功地
开发了更为精确耐用的传感器。



放大 1000 倍的变形

传感器设计是依据仿真进行机电一体化开发的最好实例，正如 [1] 中所描述。接下来列举两个具体仿真实例。

通常，传感器的开发对精确度有很高要求。事实上，有些应用场合要求的精确度甚至高达测量值的 0.1% 至 0.05%。

传感器常常对整个系统产生重要影响，譬如，组件的设计细节和个数等会影响整个测量链。内部及外部影响因素（如：热动力、化学、电磁串扰等方面）不仅可引起增益、相位和失调的漂移，还会破坏测量信号的精确度和稳定性。

利用全系统及多物理场仿真技术可省去繁重的测试工作，获得可靠的、高精度的仪表性能预测结果。因此，传

科里奥利质量流量计

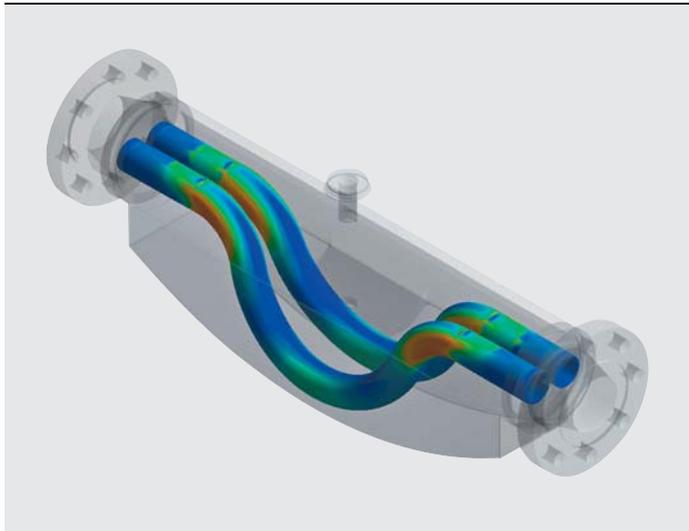
科里奥利传感器是一个带有很强的交互作用组件的系统。当驱动单元为流量管上的执行器供应交流电时，测量管将振动。由于科里奥利效应，管中通过的流体流量使测量管产生很小的相位漂移。这个相位漂移能通过振动

设计科里奥利质量流量计不仅需要具备深奥的理论知识，还需要有高效的研发方法。

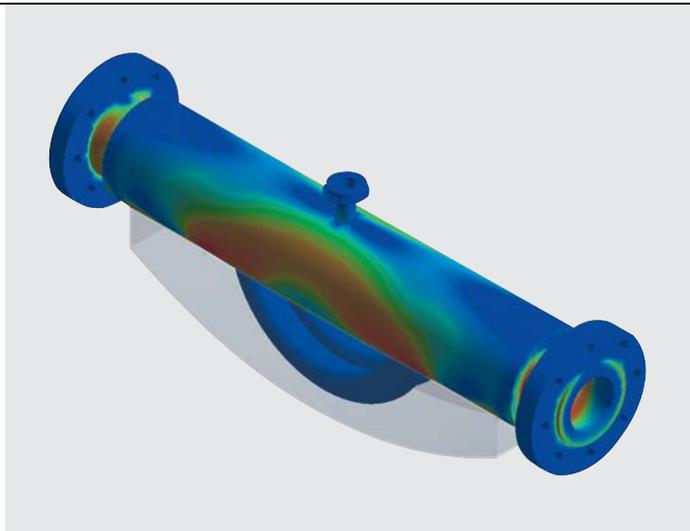
传感器检测出来。电子部件可评估两个传感器信号之间的相位漂移，并用其振幅控制驱动电流。

设计科里奥利质量流量计不仅需要具备深奥的理论知识，还需要有高效的研发方法，必须能设计全部的生产线以及客户指定的产品类型。虚拟和实验测试中所运用的定量设

标题图片
FCB 350 科里奥利质量流量计 (DN25)



2a 运行固有模式：变形和应力分布



2b 仪表外壳最低固有模式的应力分布

计标准，为开发优秀成果的获得打下了坚实的基础。

灵敏度和交叉灵敏度

数字预测流量的精确灵敏度具有两个重要意义：首先，它能依据测量过程的实际影响来分析外部影响，利用这一方式还能将不必要的交叉灵敏度降到最低并优化设计。其次，所有尺寸流量计的输出信号普遍在同一范围内，因此可优化信号处理算法。

机械强度和动态稳定性

尽管传感器可能会受到无法避免的环境因素影响，也可能受到潜在不稳定的环境因素影响，但是，传感器产生的所有测量信号必须稳定。

利用高效的仿真测试，在各种外部负载下进行密度测量，从而给出性能及装置稳定性的重要判定标准。计算的第一步，是给仪表施加典型的最坏情况下负载。→ 1 显示指定外部负载下流量计结构的非线性响应。该结果也将用在确定传感器的机械强度上。

第二步是计算系统的固有频率，如 → 2a。所显示。对于通过这一测试的

设计而言，负载引起的频移不可违反仪表的精确度要求，这一点非常重要。

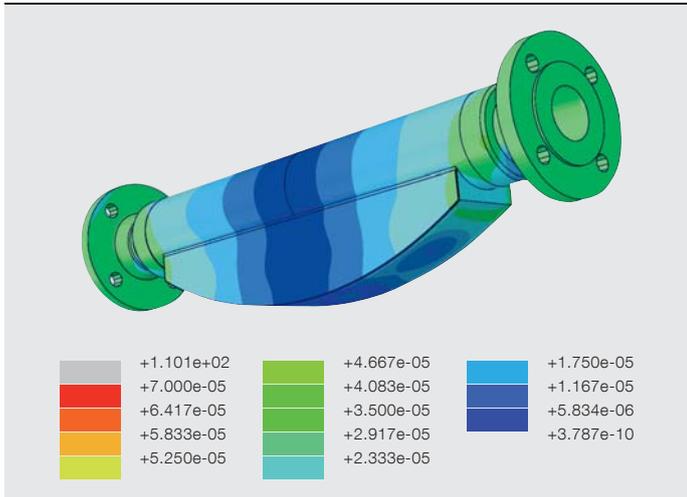
此外，仪表外壳的振动去耦也相当重要。通过选择专门的设计参数，运行模式将与外部表面模式很好地分离。后者的实例如 → 2b 所示。

耐用设计确保性能可靠

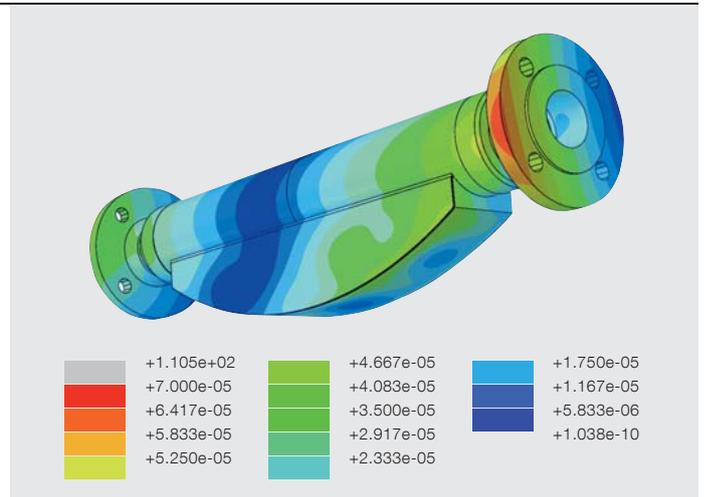
要获得高性能的流量测量，需控制好“零相位”这个主要变量，它是制造公差和不对称影响因素叠加后的积分方法，会导致在无流量时产生非零信号。尤为重要的一项挑战是在零相位上减少随时间变化的物理影响，因为这些物理影响可能导致测量结果中出现不可补偿的误差。外部阻尼因素可在外壳的任何位置上接触到传感器，因仪表的操作原理，外壳会发生振动。在这种情况下，能量在该位置释放，引起传感器行波结构的低振幅变化。科里奥利仪表的内部及外部机械部件，特别是那些关系到传感器测量管运动和信号采集的机械部件都必须经过精心挑选，以减小这一影响。

作为本地阻尼（即阻尼强度和阻尼位置）的函数，ABB 已经开发出能高

数字预测流量的精确灵敏度能依据测量过程的实际影响来分析外部影响，并优化信号处理算法。



3a 无预装负载（未施加外部静力）



3b 在很大的外部静负载下（轴向转矩）

效计算零相位的算法。这是一项特别的数字挑战，因为要计算的相位异常微小，在 10^{-5} 度范围内。

→ 3a 显示了零相位轮廓图，在特定的阻尼强度常数下，阻尼引起的零相

要获得高性能的流量测量，需控制好“零相位”这个主要变量，它是制造公差和不对称影响因素叠加后的积分方法。

位是阻尼位置的函数。计算结果可与特定流量计的零相位允许限值比较。→ 3b 显示当系统处于很大的轴向转矩负载下时情况相同。结果显示，这一设计即使受到很大的外部影响，零相位的数值依然很小。

最后为 ABB CoriolisMaster 产品设计选择出有代表性的判定标准，它能

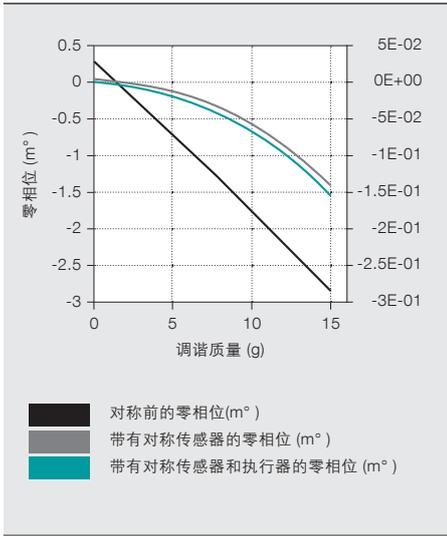
有效地使用并且能可靠地代表稳定的零相位行为。多款科里奥利质量流量计都通过显式时间积分的有限元计算，进行了虚拟的落锤冲击（即碰撞）试验。[2]

为了达到耐用、低成本的设计，ABB 对于不可避免的制造公差展开了灵敏度分析。流量计生产因此能定制，使之达到最高的客户价值。在一款耐用设计中，公差对性能的影响甚小 [3] → 4。

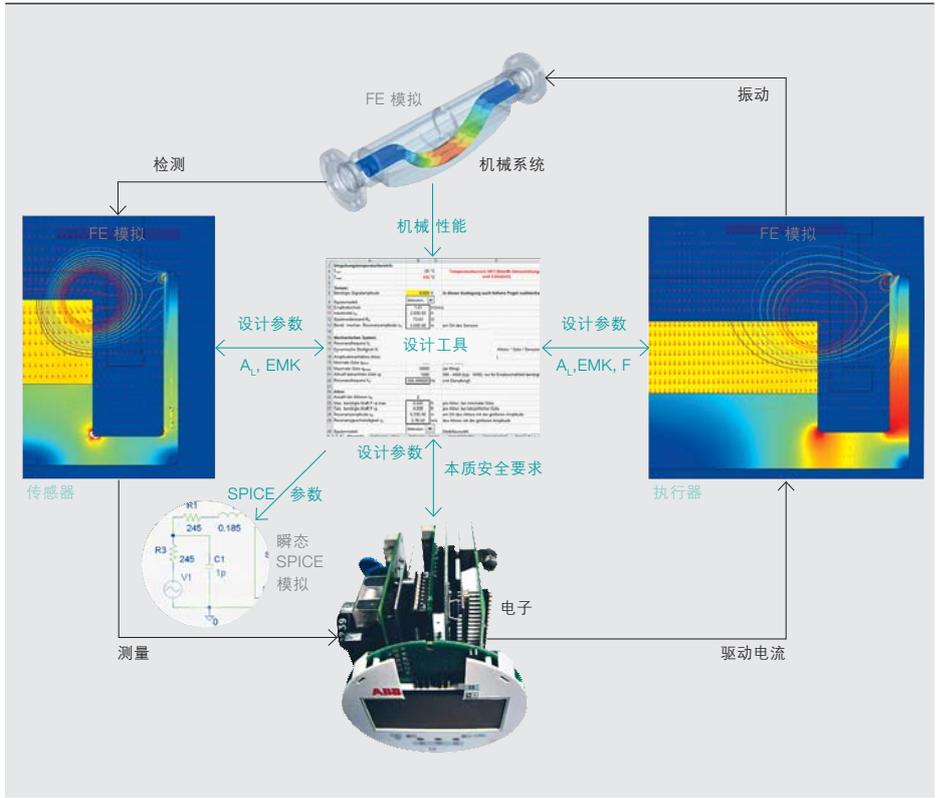
整个系统的磁路设计

科里奥利传感器中的耦合，即所谓有很强交互作用的部件，在 → 5。中用黑色箭头表示。所包含的执行器和振动传感器依据音圈原则，由永久磁铁、软磁通集中器，以及磁空气间隙中的可移动线圈构成。磁铁和执行器线圈之间的力产生振动，振动可通过传感器线圈中的感应电压测量出来。

在设计和优化磁铁组件时，必须考虑到整个交互作用的零件链。例如，执行器和传感器所要求的灵敏度不仅相互依赖而且取决于机械子系统和电子子系统的性能。此外，还必须充分考



对于灰色和绿色曲线而言，右侧 y 轴放大了 10 倍。对称设计具有一个零点，在两导管之间存在质量差异时能稳定得多。



考虑如磁铁零件的最大重量尺寸、来自本质安全要求的电阻抗、信号振幅限值这样的边界条件。

使用一个电子表格设计工具可确保达到以上要求，它能收集和匹配磁数据、电子数据和机械数据的要求。它通过交换设计参数和生成的电磁特性为磁性组件的 FE（有限元）模型提供接口。此外，它还收集机械仿真的结果并且包含有一个简化的驱动电路

瞬态模拟，该工具还能输出一个基本等效电路 SPICE（以集成电路为重点的模拟程序）模型的参数。ABB 已利用这一工具和设计过程，设计出多款新型的科里奥利传感器。

电磁传感器

普通的电磁传感器包括电流转换器 (CT)、位置传感器和接近传感器。尽管多个模拟工具都能用于研究这些系统，但通常要求专门的建模技术和求解器设置，以达到稳定高效的计算及精确的结果。此外，还需要合理折中模型的复杂性和精确度。

- 瞬态行为
- 串扰
- 作用在不同时标上的物理影响耦合（如：电气影响和热影响）

2009 年，ABB 开始携手德累斯顿工业大学，开发可用在不同开发项目中的电磁传感器 FE 建模技术。合作重点是带耦合参数的三维模型（多物理模型）。

样本系统

→6 显示了一个已运用在研究中的几何模型。虽然这并非是一个真实设计，但其具有某些种类电流传感器的典型性能。

该模型是带有一次母线和二次绕组的 CT 非对称三维模型，分为两个线圈。该磁芯具有两种不同的空气间隙。此参数模型的尺寸可修改，并且可用一个磁通传感器（位于其中一个间隙内）以及电路进行扩展，形成一个闭环电流传感器。

为了达到耐用而低成本的设计，ABB 对于不可避免的制造公差展开了灵敏度分析。

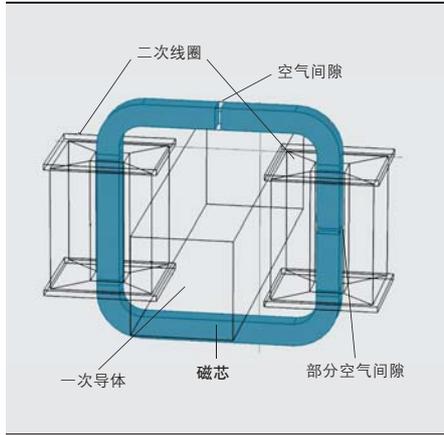
模型。在参数优化过程中，它通过指出偏离来监控是否符合设计目标和边界条件。借助该工具，磁性组件和驱动电路的设计便可在迭代过程中开发。对于驱动、执行器和机械系统的

的主要挑战包括：

- 包含有广泛尺寸范围细节的复杂三维几何
- 非线性影响
- 滞后

在设计和优化磁铁组件时，整个交互作用中的部件都必须加以考虑。

6 转换器模型的几何



基于这一设计，ABB 开发了各种模型版本来研究不同的物理现象。这些模型版本能为现象及性能单独建模或联合建模。

模型特点

→ 6 中模型代表几项挑战：三维、非对称（即不能用合适的边界条件降低为子几何），而且在很大的结构中包舍很小的细节（即空气间隙）。这些空气间隙大大影响了杂散磁场分布以及传感器性能。然而，如果没有优化的几何网格，它们将导致大量的有限元以及超长的计算用时。

该模型迄今为止的其它特点在 → 7 中重点显示。这个列表显示，在实际的传感器中，可能存在很多物理影响和耦合。这些都需要根据特别问题在分析中加以考虑。

结果

模型 [4, 5] 已经取得了很大进步。→ 8 显示了一个模型版本得到的结果，该模型带有大块铜母线和基于 FeSi 的核心材料，具有非线性磁性特点。它被假定为非导体。因此，不存在核心电损耗，而且能制作一个非分层的核心模型。FE 模型与 SPICE 电路模型耦

7 电磁传感器模型特点

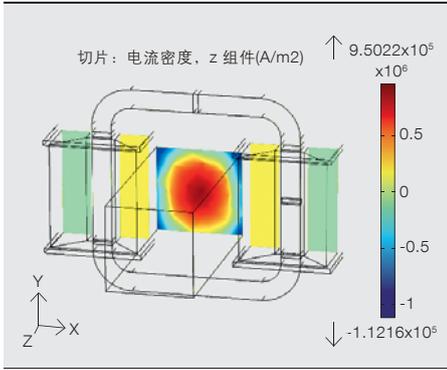
- 核心材料具有非线性，非对称的磁性特点 $H(B)$ 。已选了一个可达到最佳数字稳定性的分析公式。
- 在带有八个柱状体模型的线圈中，“导线约束”二次电流分布。铜电阻随温度而变化。
- 模型适用于瞬态模拟。
- 与积分 SPICE 电路模型耦合（例如，电流源、二次负载、与其它磁通传感器闭环运行）。
- 一次母线中的感应涡电流可导致额外损耗和因趋肤效应造成的不均匀电流密度分布。空气间隙将引起有关杂散磁场和电流分布的灵敏度。
- 计算一次绕组和二次绕组中的导体损耗密度。
- 分层（堆叠或带绕）核心的显式建模和分析建模。
- 因磁芯中涡电流形成的动态滞后和电气损耗分布。
- 积分热模型从绕组和磁芯中电气损耗来计算温度分布。电气导体的温度漂移被认为存在于闭环迭代过程中，可通过外部程序进行控制。

通常要求专门的建模技术和求解器设置，以达到稳定高效的计算及精确的结果。

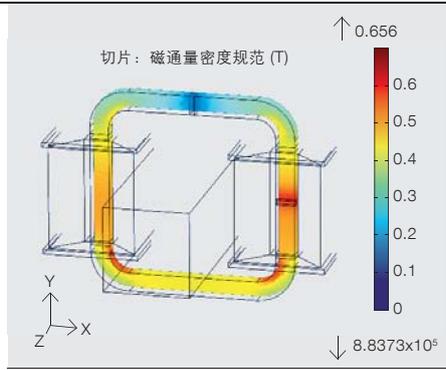
合，在一次侧有一个正弦电流源，在有 N_{sec} 环的二次绕组处有一个负载电阻。计算出损耗分布来并用于热模拟输入，之后得出温度分布。导电性传导随温度而变化。由于非线性核心特点以及电路模型耦合，因此需要进行瞬态模拟。

→ 8 显示了在特别时间点导体中产生的电流密度分布。从中可看到趋肤效应，

8 电流和磁通密度分布

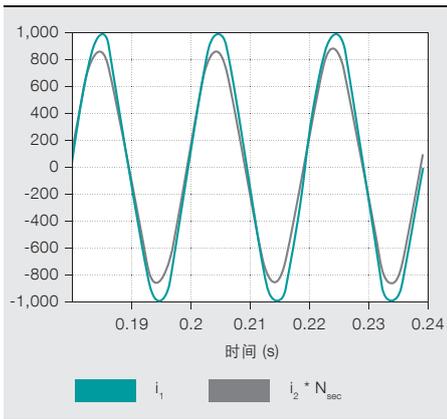


8a 一次导体中存在趋肤效应的瞬间电流密度分布 (z 组件)

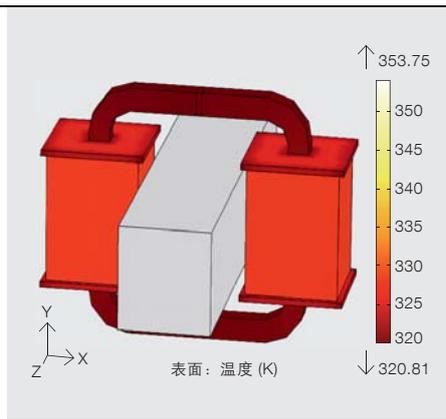


8b 转换器核心的中心平面中各个瞬间磁通密度分布 (绝对值)

9 电流信号和温度分布



9a 显示一个不完善转换器耦合的一次和标准化的二次电流



9b 固体表面产生的固定温度分布

并且可看到母线中心甚至存在反向电流。各个非对称核心磁通密度分布受到了电流分布和空气间隙的共同影响。

→ 9 显示了匹配不好的电流信号，因此指出了因空气间隙出现的一个不完善转换器耦合。此外，静态温度分布显示了电导损耗的影响。

研究仍在继续，ABB 和其学术伙伴将重点改善高频分层核心模型、非线性磁性特点的自动校验、不同线圈绕组形状的运用，进一步提高 SPICE 建模和实验模型验证。

惠及客户的转换技术

系统模拟和多物理模拟是深入理解传感器性能的根本技术。如科里奥利质量流量计这样的装置，除了通过标准

物理质量测试，还通过了一系列精心挑选的虚拟测试，其精确度及强度的提高以及优化材料的使用为客户提高了产品价值。

2009 年，ABB 开始携手德累斯顿工业大学，开发电磁传感器 FE 建模技术。

Rolf Disselnkötter

Jörg Gebhardt

ABB 企业研究所，传感器与信号处理

德国拉登堡

rolf.disselnkoetter@de.abb.com

joerg.gebhardt@de.abb.com

Rostyslav Tykhonyuk

ABB Automation Products GmbH

德国哥廷根

rostyslav.tykhonyuk@de.abb.com

Holger Neubert

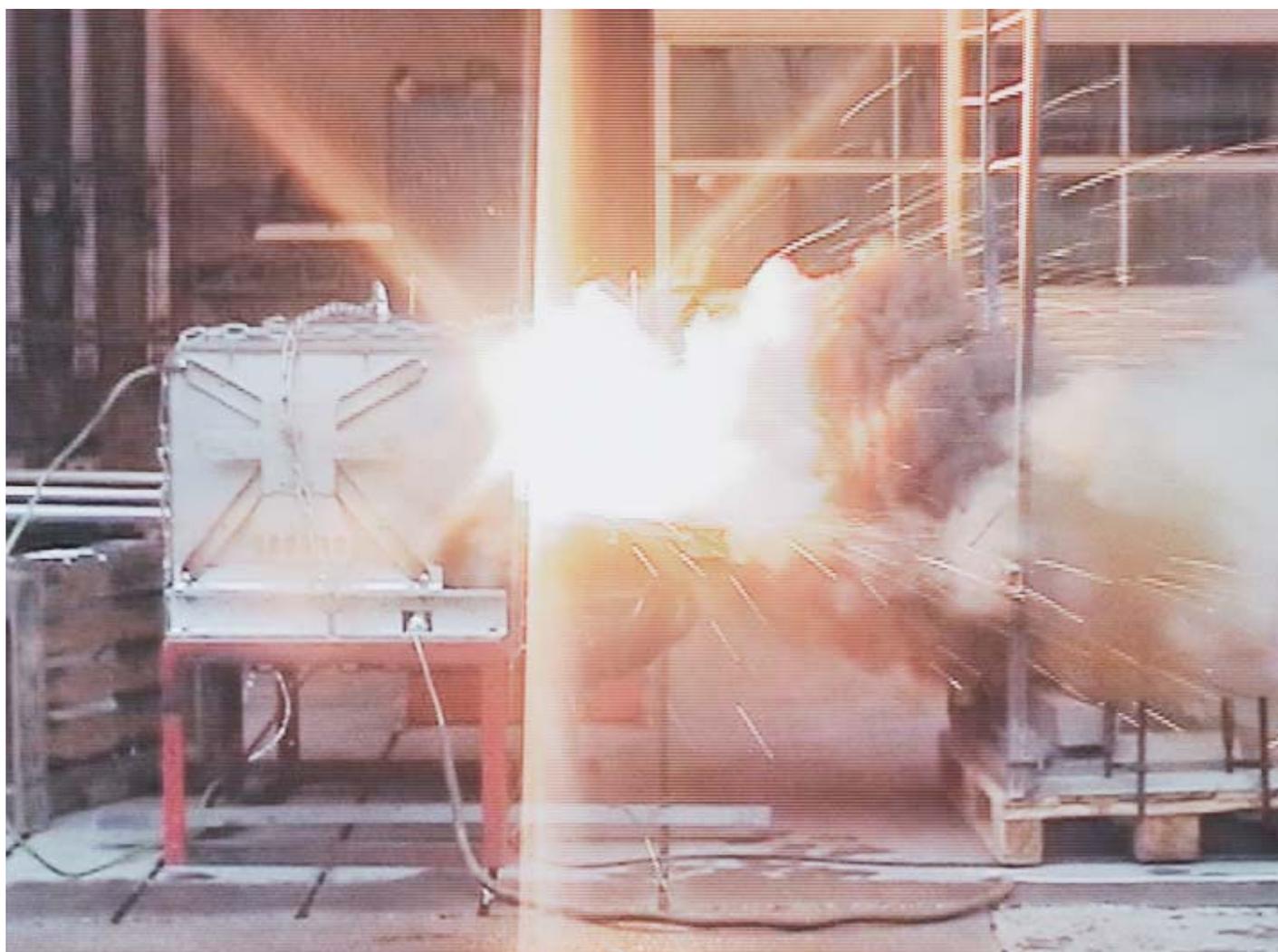
TU 德累斯顿，IFTE

德国德累斯顿

holger.neubert@tu-dresden.de

参考文献

- [1] J. Gebhardt and K. König, "Model-based development for an energy-autonomous temperature sensor," in VDI/VDE Mechatronik 2013, Aachen, Germany, 2013, pp. 177–181.
- [2] G. Juszkievicz and J. Gebhardt, "Virtual drop impact investigation for a mechanical sensor element," presented at the Deutsche Simulia Konferenz, Bamberg, Germany, 2011.
- [3] J. Gebhardt, "Absolute and relative phases in twin-tube structures and performance criteria for Coriolis meters," in Proceedings of the SIMULIA Community Conference, Vienna, 2013, pp. 421–432.
- [4] H. Neubert, *et al.*, "Transient Electromagnetic-Thermal FE- Model of a SPICE-Coupled Transformer Including Eddy Currents with COMSOL Multiphysics 4.2," in Proceedings of the 2011 COMSOL Conference, Stuttgart, Germany, 2011.
- [5] R. Disselnkötter, "Modeling of Inductive Components," in "ABB Research Center Germany, Annual Report 2011," Ladenburg, Germany, pp. 31–35.



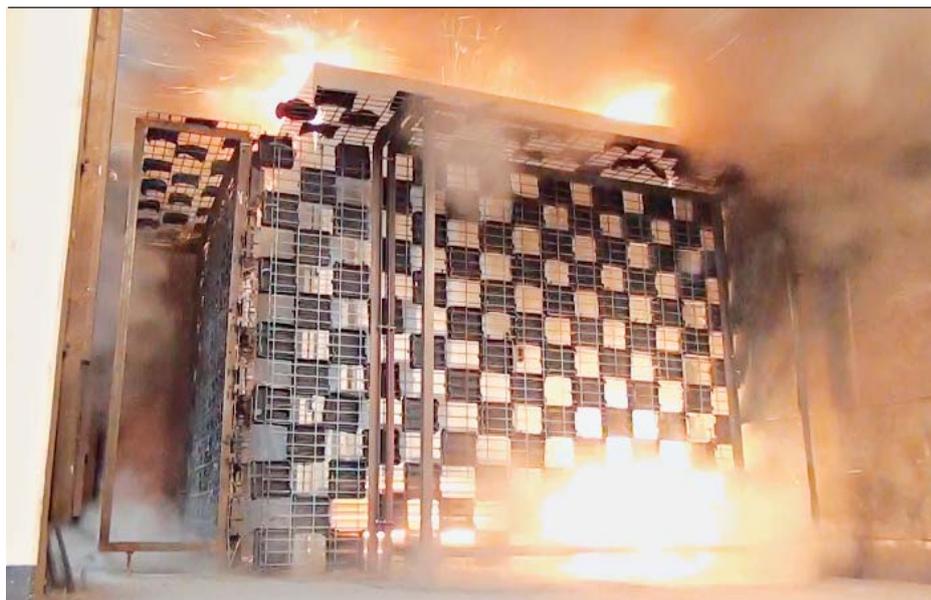
压力探秘

来自于开关柜安装室的仿真压力

EDGAR DULLNI、PAWEL WOJCIK、TOMASZ BLESZYNSKI

内部电弧故障指开关柜中电能的意外释放。故障期间，短路电流会在各相之间流动，并流向地面。电弧会加热开关柜外壳中的填充气体——无论六氟化硫还是空气，都会导致压力上升。这种故障的发生率极低，但是，一旦发生便会对电气设备和建筑造成严重损害，甚至危及人身安全。建筑内部的压力上升只能通过计算来评估。计算结果还是应该通过允许测量外部压力上升情况的专门试验予以证实。

ABB 专门开发了一款易于使用的计算程序，为开关柜开发商和土建工程师提供了一条便捷之路。



天花板，不构成密闭空间，无法进行室内压力测量。因此，我们只能通过计算来评估建筑内部的压力上升。计算程序的另一应用领域是不同填充气体的压力上升仿真，即六氟化硫和空气。为进行验证，亚琛工业大学与 TÜV Nord Systems GmbH 联手进行了大量试验。

压力上升会对开关柜外壳产生机械应力。为了避免外壳破裂，泄压装置会在达到定义压力时启动。故障电弧会产生热气体，必须用良好的控制方式将其排放到环境中。大多数情况下，排气通道置于开关柜顶部。这些通道端部通常带有排气口或吸收器，热气体通过其冷却后排出通道。

根据 IEC 62271-200 [1] 等标准规定，开关柜必须能够保证操作人员的安全，即使在发生内部电弧的情况下亦然 → 1。型式试验不仅可以验证开关柜外壳的承压能力，还可证实热气体排放是否远离了操作人员。IEC 61936-1[2] 规定，建筑设计应考虑到这些废气带来的压力上升情况。开关柜电弧故障试验不包含这方面测试，因为安装室的仿真采用两个互相垂直的墙壁和天

计算程序中的方程

根据理想气体定律，机柜中的气体压力取决于气体温度。质量平衡方程考虑到了从机柜中流出的气体质量。隔室以有效容积（减去组件）和隔室之间的泄压区表示。气体属性（如比热容）不受温度和整体均匀性的影响 [3]。

故障电弧功率的一些分数——称为热传递系数 k_p 会加热电弧室中的气体：

$$Q_f = k_p \cdot W_{el}$$

电弧功率根据测得的电流和相对地电压进行评估：

$$W_{el} = (u_R \cdot i_R + u_s \cdot i_s + u_T \cdot i_T) t$$

测得的电压与电弧电压并不一定相同，因为三相电弧在两相导体之间会发生燃烧，与接地外壳电压之间的关系也是如此。压力计算工具可以从格式化的数据文件中导入测得的相对地电压，也可以使用相对地电压的经验平均值。

在一个时间步长 Δt 前后要对内部电弧工具 (IAT) 中所有随时间变化的量进行考量。以下公式显示了从电弧室向废气室流动的质量：

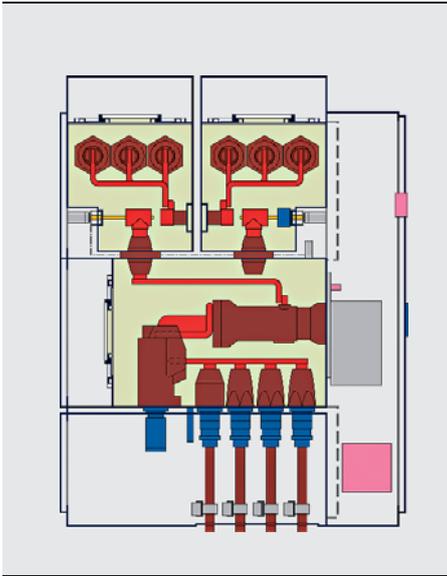
$$\Delta m_{12} = \alpha_{12} \cdot \rho_{12} \cdot w_{12} \cdot A_{12} \cdot \Delta t$$

其中， α_{12} 为泄压装置的效率，泄压装置的面积为 A_{12} ，同时还要考虑到气流经带有锋利边缘的开口（0.7 - 1.0）时的收缩，以及滤网或吸收器造成的流量下降。当泄压装置打开时，每个时间步长从体积内逸出的质量为 Δm_{12} 。根据伯努利定律 [3]， ρ_{12} 和 w_{12} 代表开口内的气体密度和气体速度。这种数学

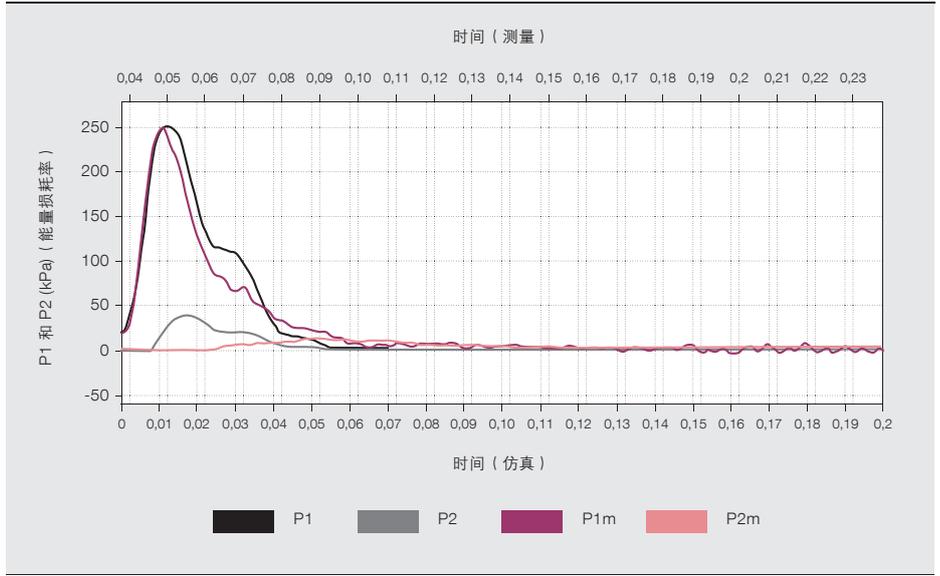
标题图片

这张通过高速视频拍摄的图片显示了内部电弧试验期间，中压开关柜中控制良好的热气体排放。ABB 软件可以计算出开关柜以及安装室内部所观察到的压力发展情况。

2 ABB ZX2 型开关柜的横截面、母线室中引发的电弧以及排气通道顶部的泄压

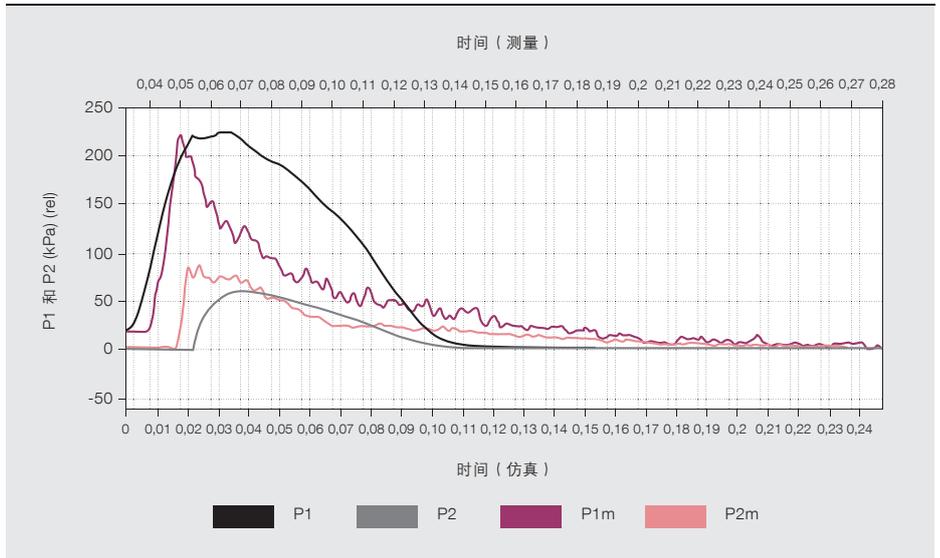


3 在以空气为填充气体的 ZX2 开关柜 (38 千安) 中，内部电弧导致的压力变化计算值和测量值对比



型式试验不仅可以验证开关柜外壳的承压能力，还可证实热气体排放是否远离操作人员。

4 在以六氟化硫为填充气体的 ZX2 开关柜 (35 千安) 中，内部电弧导致的压力变化计算值和测量值对比



方法可用于计算所有相关体积内的压力上升。

计算精度受限于所应用的简化方法。由于假设比热容是恒定的，因此不考虑气体分子解离成分子碎片的情况。在空气中，这一变化从 6,000 K 开始，而在六氟化硫中则从 2,000 K 开始。尽管如此，在较高气体温度下所获得的试验结果也与此吻合。

如果有大量气体从开关柜隔室中流出，隔室中的气体分子将越来越少。

如果电弧能量的加热分数 k_p 保持不变，会导致气体温度不断上升，超过迄今已知的电弧温度 (20,000 K)，这是不现实的，并且还会造成数值不稳定。为避免这种情况发生，我们将 k_p 视为密度相关 [4]。这一修改使计算能够覆盖故障更长的持续时间，并且可以计算安装室内的压力上升。

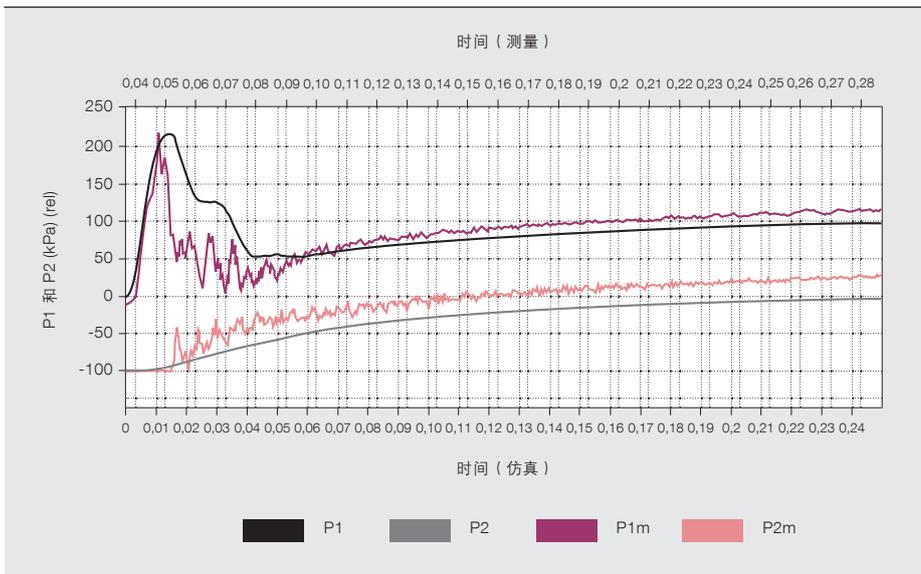
工具介绍

在 ABB 的仿真工具中心 (STC)，拟

脚注

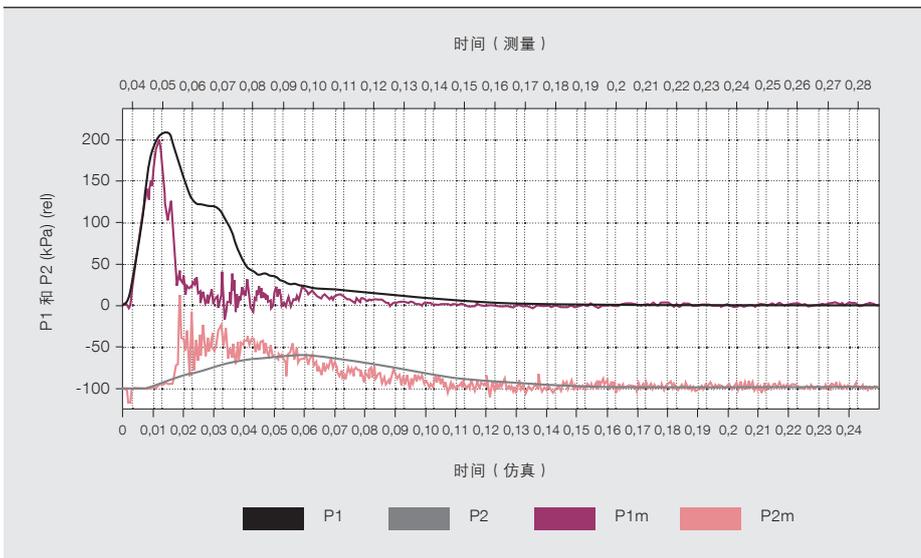
1 还可参阅第 71 页中的 → 7。

5 使用 8 m³ 封闭容器（20 千安）进行试验时，内部电弧导致的压力变化计算值和测量值对比



当最大电弧的持续时间为 1 s 时，笔记本电脑只需不到 10 s 即可完成仿真。

6 压力变化如 → 5 所示，泄压口面积为 0.3 m²（20 千安）



议的方法已经在 IAT 仿真软件中成功实施。¹

工具由两部分组成：图形用户界面 (GUI) 和求解器。求解器使用 Python 语言，而用户界面则使用 Java 语言开发。IAT GUI 的主要功能包括：

- 1) 设置模型参数
- 2) 运行求解器
- 3) 可视化结果
- 4) 创建报告

模型参数可以直接设置，也可以从下拉列表中选择并对每个参数进行验证。模型准备就绪后，用户便可以开始仿真。用户通过一个简单的向导进行仿真设置。当最大电弧的持续时间为 1 s 时，笔记本电脑只需不到 10 s 即可完成仿真。计算过程采用一个恒定的仿真时间步长进行，即 0.05 ms。为便于比较试验结果，我们还可以导入适当格式的测量数据。

对比图中包含以下特性：

- 1) 压力 vs. 时间

- 2) 相电流 vs. 时间
- 3) 相对地电压 vs. 时间
- 4) 整体电弧功率 vs. 时间

这些图可以随时修改，无需额外的可视化编辑器。范例如 → 3-9 所示。

另外，仿真过程还会生成包含仿真参数（选定的输入值和输出值）和结果数据的文本文件。

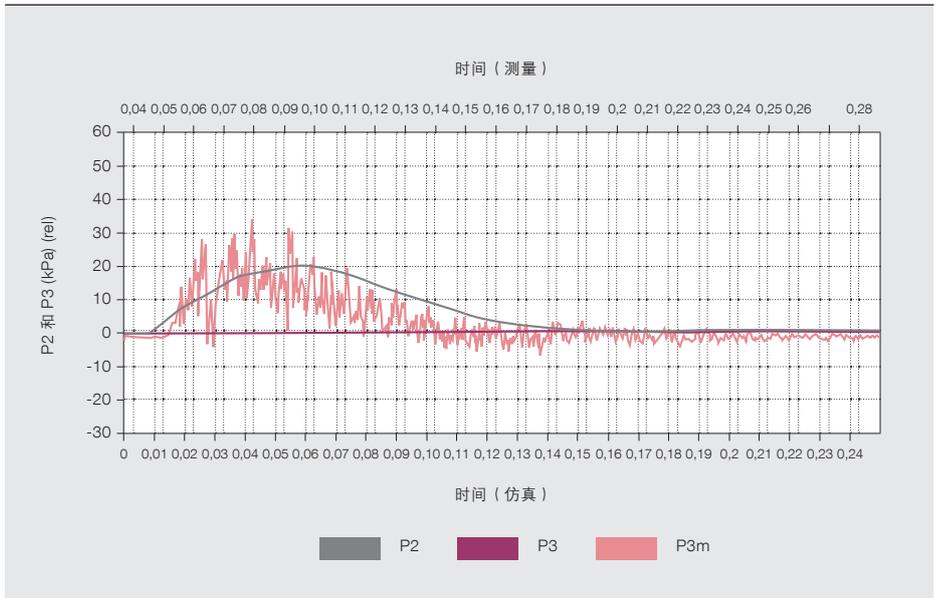
结果对比

我们对 IAT 结果和 ABB 开关设备试验结果及专门设计的实验结果进行了比较。

比较的第一项内容涉及气体绝缘开关 (GIS)，其中的绝缘气体六氟化硫可以换为空气。ABB 开关柜 ZX2 的横截面如 → 2 所示，电弧在该位置的母线室中点燃。泄压装置是一片薄薄的防爆膜片，带有一个面积为 0.049 m² 的开口，开口伸入通道顶部，超压为 220 千帕。故障电流值为 39 千安，持续 1 s。波形图显示了电弧室（波形图中的黑线部分）和排气通道（波形图中的灰线部分）中计算压力的时间发展及其电弧引

在 一 项 特 殊 实 验 中，我 们 对 热 气 体 排 放 和 封 闭 安 装 室 中 随 之 而 来 的 压 力 上 升 进 行 了 研 究。

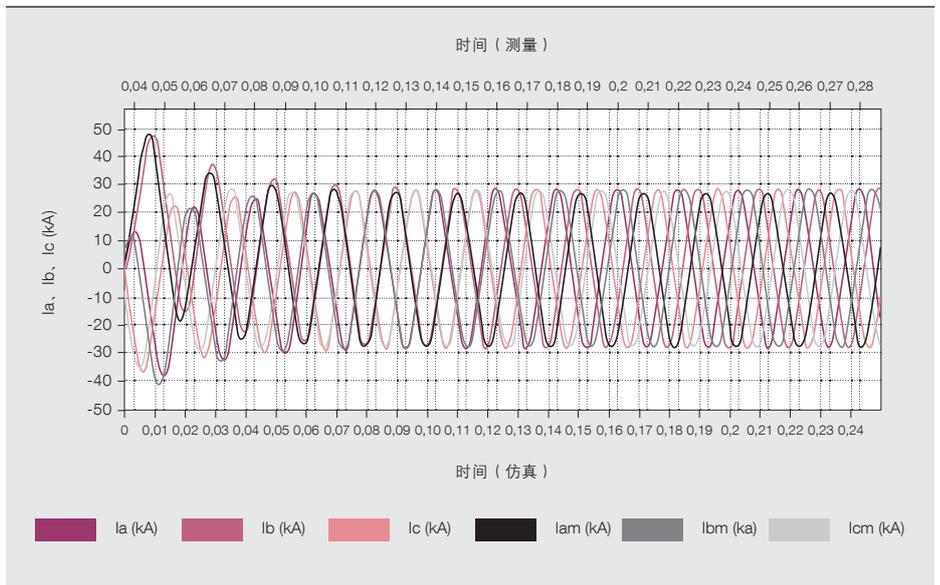
7 在另一位置上测得的容器内部压力 → 6



燃 后 250 ms 的 测 量 数 据 (紫 线 指 示 前 者，粉 色 线 指 示 后 者)。

如 → 3 所 示，在 填 充 空 气 的 电 弧 室 中，压 力 上 升、峰 值 和 下 降 的 测 量 和 计 算 结 果 较 为 一 致。根 据 已 公 布 的 数 据， k_p 被 设 为 0.5，而 300 V 的 电 弧 电 压 (相 对 地) 则 取 自 试 验 值。与 此 同 时，由 于 废 气 行 程 时 间 的 影 响，排 气 通 道 中 的 压 力 计 算 结 果 与 试 验 结 果 的 相 关 性 令 人 不 甚 满 意，这 一 影 响 不 可 在 IAT 进 行 仿 真。

8 测量所得的相电流和所施加的相电流最初表现出不对称性



填 充 六 氟 化 硫 时 (如 → 4 所 示)，峰 值 压 力 的 再 现 依 然 良 好，但 在 打 开 泄 压 盘 后，压 力 下 降 的 结 果 不 甚 理 想。与 试 验 观 察 结 果 相 比，计 算 所 得 的 气 体 停 留 时 间 更 长。 k_p 设 为 0.75，与 公 布 数 据 一 致，电 弧 电 压 为 400 V，与 试 验 所 采 用 的 数 值 一 致。

我 们 对 许 多 试 验 进 行 了 重 新 计 算。电 弧 室 中 的 峰 值 压 力 偏 差 范 围 为 $\pm 20\%$ ，主 要 取 决 于 泄 压 装 置 响 应 压 力 的 不 确 定 性。在 进 行 泄 压 后 的 压 力 下 降 仿 真 时，我 们 选 择 了 两 个 因 素 之 一 发 生 错 误 的 情 况。因 为 峰 值 压 力 是

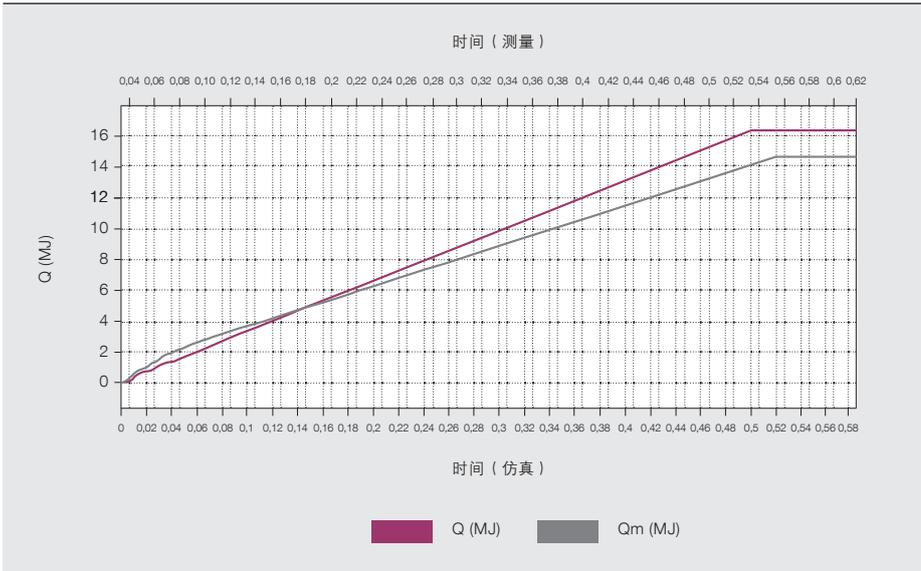
决 定 性 因 素，所 以 仿 真 过 程 未 考 虑 开 关 柜 的 承 压 评 估。

该 工 具 还 可 以 计 算 安 装 室 (泄 压 口 带 有 窗 口 或 排 气 口) 中 的 压 力 上 升。

排 气 通 道 中 的 峰 值 压 力 也 可 以 通 过 计 算 得 出。但 是，由 于 细 长 的 通 道 中 存 在 压 力 波 影 响，误 差 可 能 达 到 $\pm 40\%$ 。

为 此，我 们 进 行 了 一 项 特 殊 实 验，对 热 气 体 排 放 和 封 闭 安 装 室 中 随 之 而 来 的 压 力 上 升 进 行 了 研 究 [4]。我 们 使 用 一 个 8 m^3 的 密 闭 容 器 对 安 装 时 进 行 了 仿 真。→ 5 显 示 了 试 验 和 计 算 方 法 所 得 出 的 压 力 值。

泄 压 装 置 作 出 响 应 后，电 弧 室 中 的 压 力 下 降 偏 离 了 测 量 结 果，容 器 中 压 力 上 升 饱 和 度 的 仿 真 结 果 令 人 满 意。这 是 由 于 IAT 中 的 k_p 下 降 造 成 的，与 开



内部电弧仿真工具能够有效提高设计效率和安全性，尤其在无法进行真实实验或该类实验无实际意义时。

关柜封闭隔室中的气体密度下降无关。如果电弧能量一直对整个容器内部均匀加热，像自由燃烧电弧一样，气压会直线上升到 345 千帕，而非测量所得的 154 千帕 以及计算所得的 114 千帕。

根据下列公式 ($\rho(t) < \rho_0$)，计算工具对 k_p 的密度依赖进行了计算：

$$k_p(t) = k_p \cdot c_0 \cdot (\rho(t)/\rho_0)^{0.5}$$

其中， c_0 为初始 k_p 提供了连续过渡。在 100 千帕下，空气中的 ρ_0 等于正常气体密度 ρ_0 的 1%，而在六氟化硫中，该值为 20%。在相似背景下，使用空气和六氟化硫的试验得出了相应的结果 [4]。

该工具还可以计算安装室（泄压口带有窗口或排气口）中的压力上升。→ 6 显示了使用相同的 8 m³ 容器，且泄压区为 0.3 m² 时的试验结果。IAT 无法考虑到安装室的实际几何形状以及泄压口和传感器的位置，因此会与实际情况有所出入。→ 6 显示了由于传感器接触直接气流，导致初始压力偏高

的实例。旁边另一个传感器的结果与计算结果更为吻合 → 7。由此看出，只有计算流体动力学 (CFD) 才可以得出更准确的结果。

压力估算

只要在合理范围内，试验和仿真结果中的开关柜隔室和排气室峰值压力是相互吻合的。工具中引入的简化会导致误差（例如，理想气体假设和普通流的流动函数）IAT 可以用于仿真开关柜中故障电弧的压力影响。峰值压力预测的误差范围为 ±20%，受电弧室影响。这一过程需要根据相似开关柜的试验结果确定一个可靠的电弧电压。该工具还可用于估计排气室或安装室（无论是否带泄压口）中的压力上升，考虑适当的安全边际。内部电弧仿真工具能够有效提高设计效率和安全性，尤其在无法进行真实实验或该类实验无实际意义时。

Edgar Dullni

ABB 电力产品
德国拉廷根
edgar.dullni@de.abb.com

Pawel Wojcik

Tomasz Bleszynski
ABB 研究院
Kraków, Poland
pawel.wojcik@pl.abb.com
tomasz.bleszynski@pl.abb.com

参考文献

- [1] High-voltage switchgear and control gear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and control gear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV, IEC 62271-200, 2011.
- [2] Power installations exceeding 1 kV a.c. – Part 1: Common rules, IEC 61936-1, 2010.
- [3] WG A3.24, “Tools for the Simulation of Effects Due to Internal Arc in MV and HV Switchgear,” CIGRE Technical Brochure, to be issued 2013
- [4] E. Dullni *et al.*, “Pressure rise in a switchroom due to internal arc in a switchboard,” Proceedings of the 6th International Symposium on Short-Circuit Currents in Power Systems, pp. 4.5.1 – 4.5.7, 1994.
- [5] SOLVAY GmbH, “Schwefelhexafluorid,” company brochure.



机器人设计

虚拟样机和虚拟调试正在改善机械臂及自动化系统的发展

RAMON CASANELLES, XIAOLONG FENG, THOMAS REISINGER, DIEGO VILACOBIA, DANIEL WÄPPLING, PETER WEBER

一直以来，工业产品与应用设计堪称是一门艺术，多学科工程师团队将他们的知识、经验和创造力汇聚在一起，共同创造标新立异的解决方案。今天，为确保得到更优质的产品，这些解决方案或方法的评估方式已经开始发生变化。不同于以往简单地检验和寻找故障，现在 ABB 利用综合的虚拟样机和虚拟调试方法开发机械臂及自动化系统，以满足日益提高的性能需求。虚拟样机不仅对产品的设计提供了便利，也改善了工程和功能测试。至于机器人应用的测试，ABB 在实际安装调试开始前，利用虚拟调试技术来验证自动化系统的功能。其中，ABB 的 ROBOTSTUDIO 软件作为一款虚拟工具，可提供系统的准确仿真，从而能成功缩短调试时间。

标题图片

机器人依靠仿真技术满足了日益严格和复杂的要求，瑞典乌洛夫斯特伦的沃尔沃冲压车间里的这一款 ABB IRB 7600FX 机器人正是如此。

机械臂，以及使用机械臂的自动化系统，都面临着日益严格而复杂的要求。用户总在期望机器制造商和系统集成商在更短时间内完成调试并交付系统，并拥有更长的运行时间，更优的质量、性能以及成本。

而 ABB 已准备好解决这一难题，原因有两方面。一是 ABB 工程师采用机电一体化的方法，将机械工程、电子工程和软件工程同时加以考虑。另一方面则是他们运用最新的仿真技术，包括动态仿真、三维计算机辅助设计、有限元分析、基于概率的设计及优化等。

虚拟设计——产品开发

工业机器人是一个机电一体化系统，其机械结构通常指的是一个机械臂和一个控制器。机械臂由执行机构、减速齿轮箱、伺服电机和制动器组成。机器人控制器由用于轨迹规划的主控制器和控制电机的伺服传动组成。在自动化系统中，工业机器人依据特定的应用程序执行其运动轨迹并完成任务。

工业机械臂的设计是一项复杂工程。这一迭代过程主要包括以下几个步骤：

- 运动学设计：确定关节数量、臂长以及姿态
- 刚体动力学设计：设计能满足周期及寿命要求的执行机构和相伴的电机、制动器和齿轮（包括运动控制参数）
- 热设计：依据热设计标准评估电机绕组和电机轴温度
- 刚度设计：依据固有频率或路径精度分析机器人的控制性能

虚拟样机技术可同时考虑多个参数，精确评估机械臂的设计，从而利用仿真来准确地确定机器人规格，如重量、机器人速度和加速度、机器人精确度等。

例如，在冲压机器人对冲压车间的模具装载和卸载优化中，面临的挑战是

利用虚拟样机可同时考虑多个参数，精确评估机械臂的设计。

确定齿轮箱的技术参数以及传动链的控制参数，使工作周期最短且齿轮箱扭矩最小。工程师通过虚拟样机技术，采用多目标优化的方法分析出机器人的节拍周期和齿轮箱扭矩之间的最佳取舍。虚拟样机能让工程师运行数千次测试，从而确定最佳的取舍关系，用最低转矩获得最高性能。



通过虚拟调试系统 能实施无缝高效的 调试。

通过这些技术，ABB 开发了一个双机器人解决方案即 Twin Robot Xbar - TRX¹ → 1，被运用在冲压自动化的创新应用中。其冲压性能和齿轮箱总额定扭矩之间的取舍关系便是由多目标优化方法获得的 → 2。这使我们能定量地洞察机器人性能对传动链设计和成本的影响。例如，通过检查帕累托前沿的两

前，我们先开始概念设计，然后机械、电子和软件等工程团队加入进来。机械工程师创建出三维布局图，机器人工程师则以此作为虚拟原型，并利用 ABB 的机器人离线编程和仿真工具 RobotStudio 软件，在模型中放置虚拟机器人，示教机器人目标和路径，并检查其可达性。机器人应用的编程和调试可在同一环境中进行，并可通过虚拟机器人控制器立即应用到虚拟样机中，因此缩短了开发和测试周期。倘若（如经过可达性测试发现）需要重新建模，那所需修改也可以很容易地反馈给机械工程师。

在详细的系统工程设计阶段利用虚拟样机技术，不止限于机器人应用。这些仿真方法可扩展到更广的应用领域，如开发复杂的 PLC 或运动控制应用等，在开发和测试过程中都拥有着巨大的优势。

虚拟控制器只需在一台标准个人电脑上运行，就能精确模仿真实控制器的行为。

虚拟调试

虚拟调试是一种在实际调试工作开始前验证自动化系统功能的仿真方法。其过程

个解揭示出，若传动链成本能增加 7%，那么冲压性能可提高 5%。

包括在软件环境中复制硬件行为，以实现从虚拟到物理环境的无缝过渡。

系统工程

在成功完成工业机器人的设计后，紧接着下一步就是在自动化系统中成功地使用机器人。机器人与可编程控制器 (PLC)、伺服电机和传动、及所需的机械装置和软件一起组成了一套离散自动化系统。

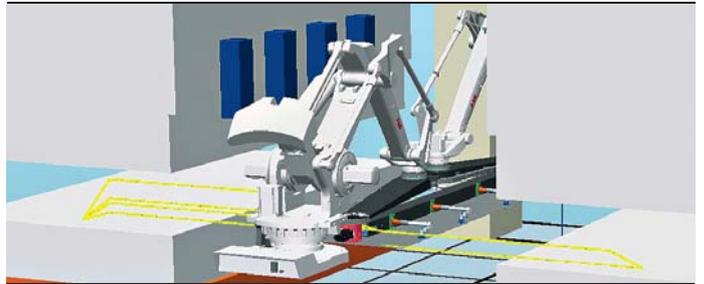
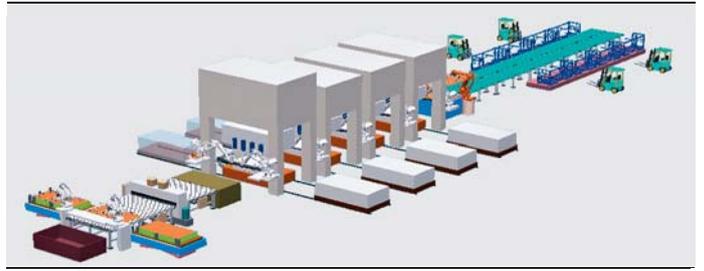
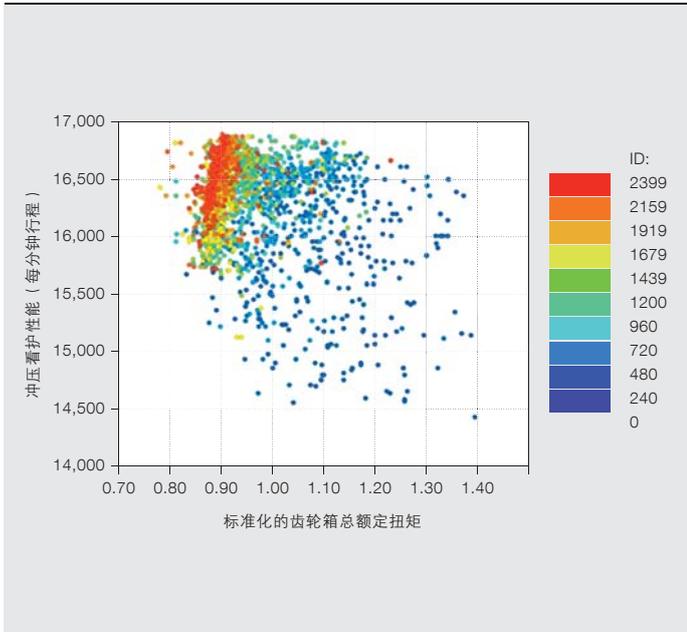
在测试和执行期间，虚拟调试方法，如硬件在环 (H-I-L)、软件在环 (S-I-L) 等，已被广泛地应用在了集成测试、系统测试，以及最终的验收测试中。

虚拟调试方案能基于所处的方案测试阶段，而适应不同工程需求。早期测

虚拟样机 [1]，[2] 还大幅改进了系统的详细工程设计以及提高功能测试性能。在自动化系统的详细作业开始之

脚注

1 TRX 机器人包括两个（四轴）机械臂，这两个机械臂之间用一根大梁相连。



试阶段往往运用 S-I-L 方法，而在后期测试阶段 H-I-L 方法则更为适用。S-I-L 意味着使用虚拟控制器，而 H-I-L 则表示将真实控制器包含在测试环境里，

该过程可实现从虚拟到物理环境的无缝过渡

并执行待验证的自动化应用程序。虚拟控制器运行在一台标准个人电脑上，并能精确模拟真实控制器行为。

H-I-L 是如今流行的测试方案，它将 PLC 通过现场总线连到一台个人电脑，该电脑则运行一个系统仿真模型。此方案可实时执行控制应用程序。当今的系统非常复杂，常常要求多个不同类型的互连控制器来执行自动化任务。因此，大型组件或完整系统的仿真会需要一些在项目后期阶段才能获得的硬件设施。

为了方便在早期项目阶段（理想情况

是应用程序开发的同时）进行高效测试，用一种简便方法在开发应用程序的同一台电脑上加载和传送程序是非常重要的。自动化系统的软件组件已逐渐增多并且在进一步增加，因此要尽早地检查出问题，并且相对轻易地修正过来是至关重要。

为了对物理系统或机器进行仿真，我们需要建立其虚拟模型；其中传感器和执行器都需要建模。ABB 的 RobotStudio 软件以智能组件方式模拟真实传感器和执行器，并提供一个过程信号界面，将其与真实或虚拟的控制器相连，从而可进行全面的系统仿真。智能组件可以在虚拟调试环境中把各种自动化组件的功能灵活地整合在一起。

串联冲压生产线

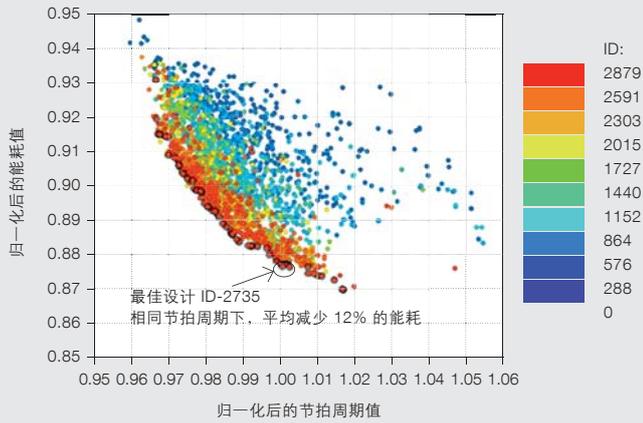
汽车冲压车间的冲压自动化彰显了虚拟调试技术的价值。冲压生产线上压机的大尺寸和大功率使其不可能在测试台上进行真实的系统测试，但通过虚拟调试系统，我们仍可以实施无缝高效的调试。

串联冲压生产线首先打造出型板，在此之后，这些型板被焊接在一起形成车身。冲压生产线由多台对齐的冲压机组成，坯料从中通过被制成型板。第一台冲压机（拉伸冲压机）执行修整成形的任务，其它台冲压机用来切割内部及外部轮廓。

在整个自动化系统中，串联冲压生产线的成本高昂，所以获得最大产量以优化投资回报率变得至关重要。为了实现最佳输出率，机器人与冲压机之间需要达到最佳协调以实现冲压机之间的板材转移。

在 ABB RobotStudio 软件中，组成该系统的所有元素 / 设备都被引入到一个虚拟模型中 → 3。智能组件对这些装置进行仿真，包括所有逻辑、运动和动态性能等，使模型行为准确反映真实现场的情况。进行仿真的主要装置有：

- 冲压机，及其控制系统、输入 / 输出信号、运动曲线
- 机器人和其它自动化设备



能效设计变得越来越重要，而它可通过虚拟样机技术进行评估。在此案例中，目的是选择传动链控制参数（如允许扭矩及速度），以将能耗降到最低，并达到节拍周期最短 [3]。这形成一个多目标优化问题，其中传动链控制参数为设计变量，同时有以下两个相互对立的目标：

- 最低能耗
- 最短周期

该分析运用了多目标优化的帕累托前沿（Pareto Front）法。在优化过程中，该方法将两个独立的目标函数（周期和能耗）最小化。由此获得的一系列帕累托优化方案包含着这两个相互对立目标之间的取舍关系。优化算法 MOGA-II [4] 运用了非梯度方法，特别适用于此类问题并已被应用到高效设计中。

优化本身是一个迭代过程。设计变量（此案例中为传动链控制参数）得到修正，继而应用于 ABB 机器人运动仿真软件中以计算能耗。仿真结果用于计算目标函数和约束值。当为 MOGA 定义的最大函数评估数达到限值时，优化过程终止。

否则，优化器将分析目标函数和约束值，并提出一组新的设计变量值以待检测。该优化过程一直持续到符合收敛准则为止。

上图显示了该多目标优化的解空间及帕累托前沿。其中在帕累托前沿里所选的一个设计方案，在完全不牺牲工业机器人性能的前提下大约改善了 10% 的能耗。

- 其它机械组件，如拆堆台、坯料清洗机、输送机和安全元件。

这些组件可直接从库中提取（若库里已存有），也可来自其它来源，甚至可根据客户的技术参数来创建。

一旦虚拟系统配置完成，一个准确的系统仿真环境便已准备就绪。它可对真实生产情况中的不同场景进行仿真。→ 4 显示了虚拟冲压车间模型的详细视图，并标注出了机器人的运动路径。生产线的性能优化过程会对机器人、冲压运动和逻辑等进行重新编程，或调整之前生成的参数。因为在真实系统中若达不到性能目标会付出昂贵代价，所以在实际安装前能预知系统性能便显得极其具有价值。

虚拟仿真的运用并不局限于设计和调试 → 5：比如引入新生产工艺时，虚拟仿真会让准备工作简单很多，还能在实际应用之前对最终的故障诊断或可能的生产改进量进行分析。

产品设计期间及自动化系统工程阶段所开发的虚拟样机还能用于支持预防性维护，指出哪些组件需要更换，在某些情况下还能优化机器人程序以降低磨损、节拍周期或能耗等。

此外，虚拟样机还能与真实的自动化系统平行运行，从而在实际应用之前测试优化设备或程序。

Diego Vilacoba

Ramon Casanelles

ABB 离散与自动化业务，机器人部
西班牙巴塞罗那
diego.vilacoba@es.abb.com
ramon.casanelles@es.abb.com

Xiaolong Feng

Daniel Wäppling

ABB 机电一体化研究中心
瑞典韦斯特罗斯
xiaolong.feng@se.abb.com
daniel.x.wappling@se.abb.com

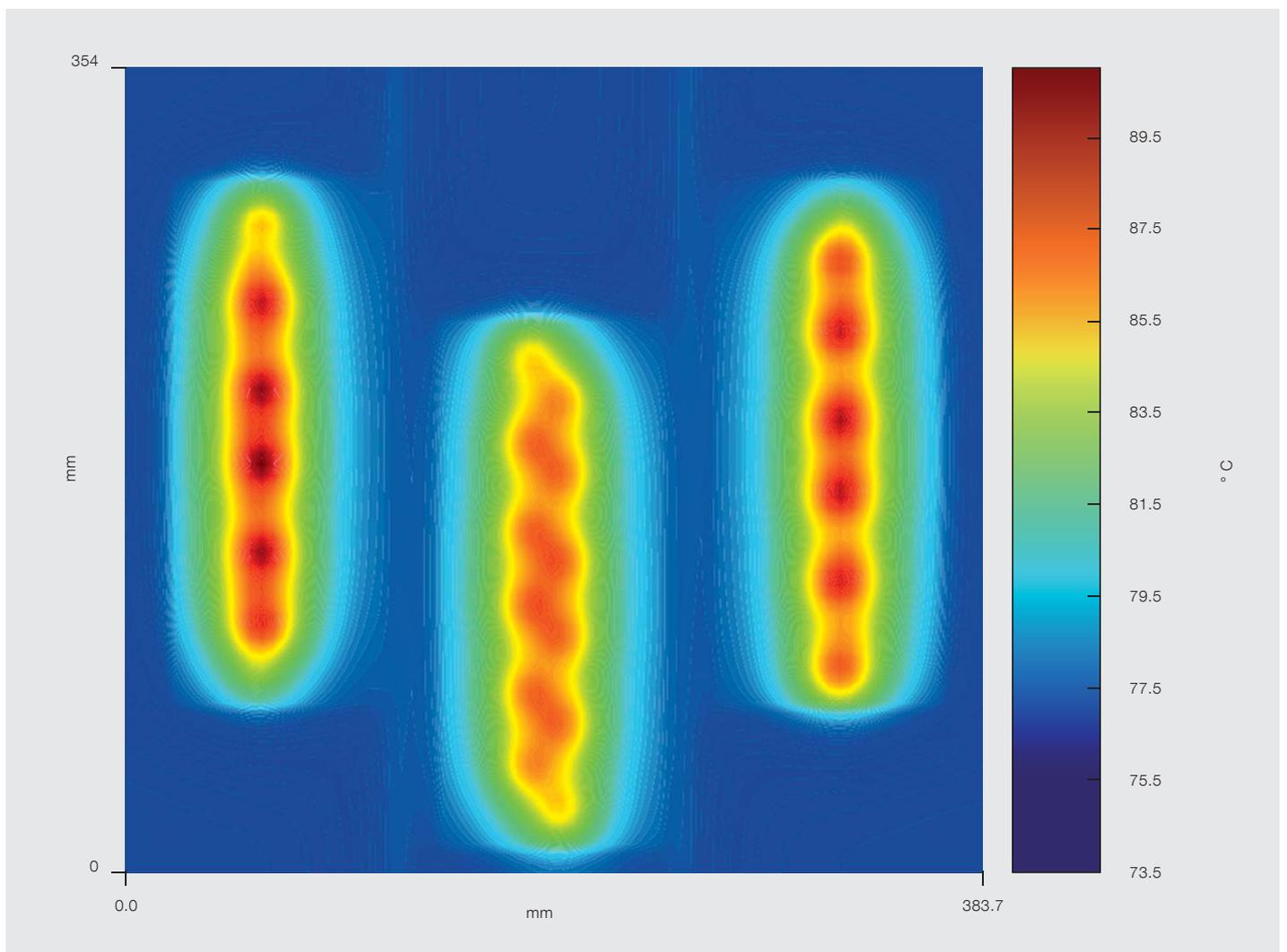
Peter Weber

Thomas Reisinger

ABB 机电一体化研究中心
德国拉登堡
peter.weber@ch.abb.com
thomas.reisinger@de.abb.com

参考文献

- [1] V. Miegel, C. Winterhalter, "Comprehensive Use of Simulation Techniques to Support New Innovative Robot Applications." International Symposium on Robotics/Robotik, Munich, Germany, 2006.
- [2] P.R. Moorea, et al., "Virtual Engineering: An Integrated Approach to Agile Manufacturing Machinery Design and Control." *Mechatronics*, Vol. 13, No. 10, pp. 1105-1121(17), December 2003.
- [3] X. Feng, et al., "Energy Efficient Design of Industrial Robots Using Multi-Objective Optimization." 43rd International Symposium on Robotics (ISR2012), Taipei, Taiwan, 2012.
- [4] A. Konak, et al., "Multi-Objective Optimization Using Genetic Algorithms: A Tutorial." *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 91, pp. 992-1007, 2006.



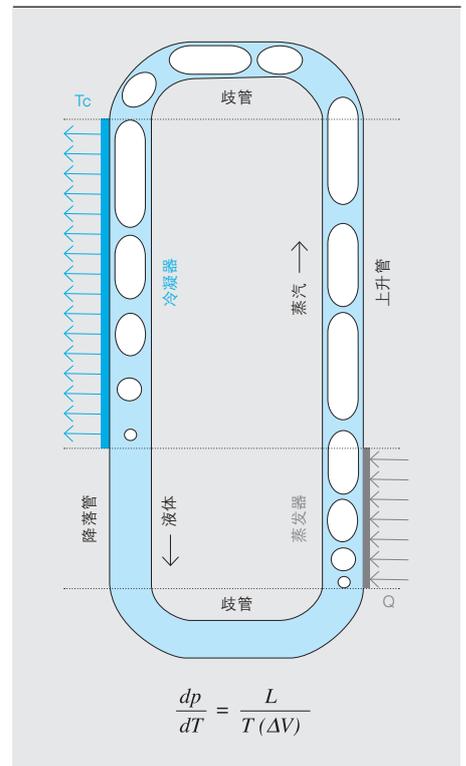
仿真助力电力电子技术高效融合

用于可靠的高度集成电力电子变频器成本效益设计的全新仿真算法

DIDIER COTTET、BRUNO AGOSTINI、STANISLAV SKIBIN、GERNOT RIEDEL、PAWEL WOJCIK

许多读者可能认为电力电子工程主要涉及电路拓扑结构和算法。事实上，除了这些方面，设计师们还要努力攻克其他领域日渐增多的难题。集成技术日益重要，冷却、互连和高压绝缘等领域随之得以突显，并且带动了功率密度、电磁兼容性 (EMC) 以及可靠性的提升。随着这些技术的不断复杂化，最佳设计越来越离不开一流的仿真。

新开发的半导体器件虽然能够在低损耗的前提下实现更快的开关操作，但会对集成技术提出全新挑战。



电力电子是主要使能技术之一，覆盖可再生能源发电、工业自动化中的高效电能利用、智能电网中的潮流控制、采用直流技术的低损耗输配电等多个领域。这些应用中相关的性能衡量指标包括转换效率、控制动态、可靠性（或可用性）、功率密度和成本。

转换器设计的区别在于集成技术的选择，例如外壳材料、冷却方法、互连和电气绝缘。集成方面的设计挑战包括：

- 热损失
- 高导电
- 高电压绝缘
- 电磁噪声
- 电、热、机械应力

现在，仿真已经成为这些领域的开发过程中最先进的组成部分。功率半导体的三维 (3-D) 有限元分析 (FEA) 有助于优化制造过程和开关特性。在系统层面，电流控制方案和过程控制算

法通过电路仿真器进行仿真，通常与多目标优化方法相结合。

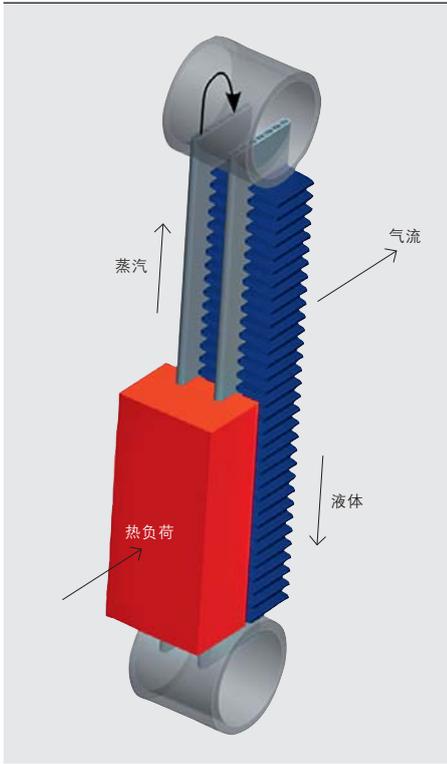
近年来，宽能带隙 (WBG) 功率半导体领域已经取得了巨大进展，第一批碳化硅 (SiC) 器件和氮化镓 (GaN) 器件先后面市。这些新器件可以进行更快速的开关操作，降低损耗，还可以在更高温度下运行。采用新器件为增效节能、功率密度和新应用带来众多好处的同时也对集成方面提出了新的挑战。本文将着眼于三个需要开发全新仿真方法的集成领域：

- 用于高功率密度和高可靠性的两相冷却
- 电磁兼容性 (EMC) 设计
- 用于可靠性和使用寿命预测的电热仿真

冷却

电子器件通常采用空气和水进行冷却，这两种介质都有精确的仿真工具（例如 ICEPAK、QFIN）可用。

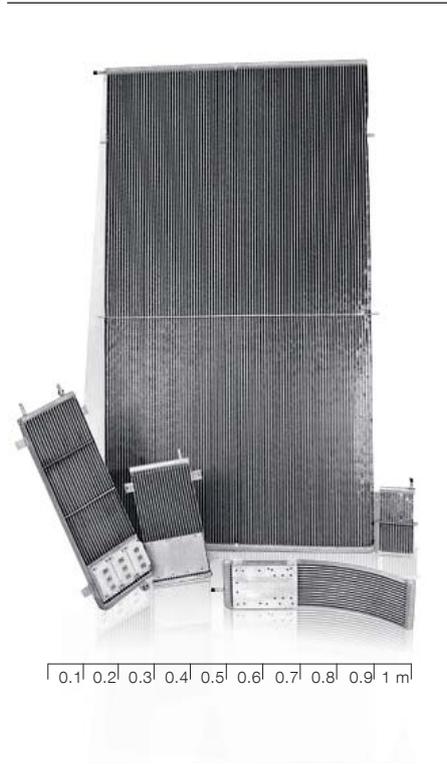
标题图片
COTHEX 底板的温度分布仿真结果



在电力电子器件中，两相冷却热管是主动冷却方法的一个十分有趣的替代选项 [1]。在热管中，由于液体和蒸汽之间存在密度差，流体在重力的作用下循环 → 1。对于功率密度较高的设备来说，介电液体的使用以及高沸点传热系数的无泵操作是一种非常吸引人的冷却组合。这种方法比采用水泵的方法更可

两相冷却热管是主动冷却方法的一个十分有趣的替代选项。

靠（无任何移动部件或电气绝缘问题）。ABB 开发了一种基于自动推进技术的紧凑型热管换热器。该换热器采用大量多端口挤压管以及平行排列的毛细管通道，通过钎焊焊接到加热底板上，达到所需的紧凑性 → 2-3。由于商业工具目前尚不能够覆盖到该领域，该技术亟需新的建模方法。两相热管的仿真不仅要预测从热源到散热片（例如环境空气）的热电阻，而且还应该能够

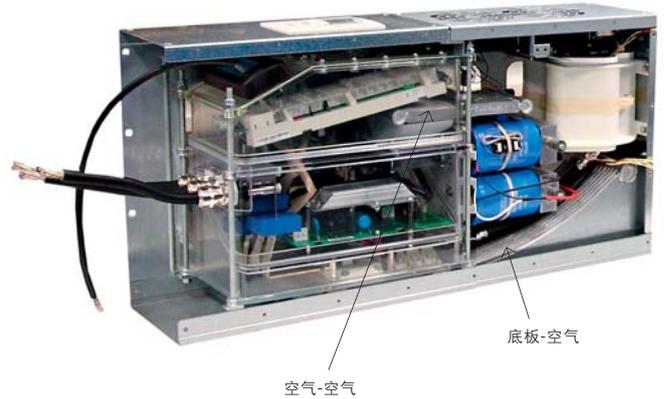


预测干燥（以确保温度均匀性）、临界热通量（以避免温度失控）、压力损失或优化流体加注等关键参数。ABB 的两相热管模型用于质量、动量和能量两相守恒方程的解算。ABB 通过文献记录或与大学合作找出了适当的相关性和模型，并将其用于热管连续分段中的压降、空隙率和传热系数计算。随后，采用适当的

最小化算法 (SIMPLEX) 对这些守恒方程的残差进行了评估和最小化。这一二相流模

型被耦合到一个有限体积偏微分方程 (PDE) 求解器中，用以确定整个底板的热分散 → 标题图片。由于热管中未使用任何泵来推动流体，因此流体的流速乃至冷却性能对一系列参数十分敏感，如管长度、直径、热通量分布、流体压力以及流体的性质及用量。这些仿真可以实现优化的产品设计，同时还可以避免制作样机的麻烦 → 4。

为了获取高功率密度，该类变流器采用紧凑式设计，进而增加了设备中不同部件之间的电磁耦合。



许多组件必须使用专门开发的高频建模方法。

EMC

现代电子变流器是一种非常复杂的器件，高电流和电压与扰动敏感型控制和通信信号在其内部并存。为了获取高功率密度，该类变流器采用紧凑式设计，从而增加了设备中不同部件之间的电磁 (EM) 耦合。要实现安全可靠的变流器操作，必须确保器件的电磁兼容性 (EMC)，因此电磁兼容性的三个方面不容忽视：

- 器件在特定电磁环境下的运行能力（抗扰性）
- 向周围环境发射的电磁噪声必须低于一定限值（排放）
- 同一器件中各部分之间的电磁干扰 (EMI)

前两项在发射和抗扰性规范中有明确规定，第三项则定义了器件的内部稳固性和可靠性。

紧凑式设计、高功率密度和快速开关功率半导体已成为大势所趋，这使得电力电子设备的电磁兼容性设计越来越具挑战性。一般来说，电力电子器件主要采用试错法来确定电磁兼容性。在这种情况下，需要对布局和组件已经固定的完整样机进行测量。进

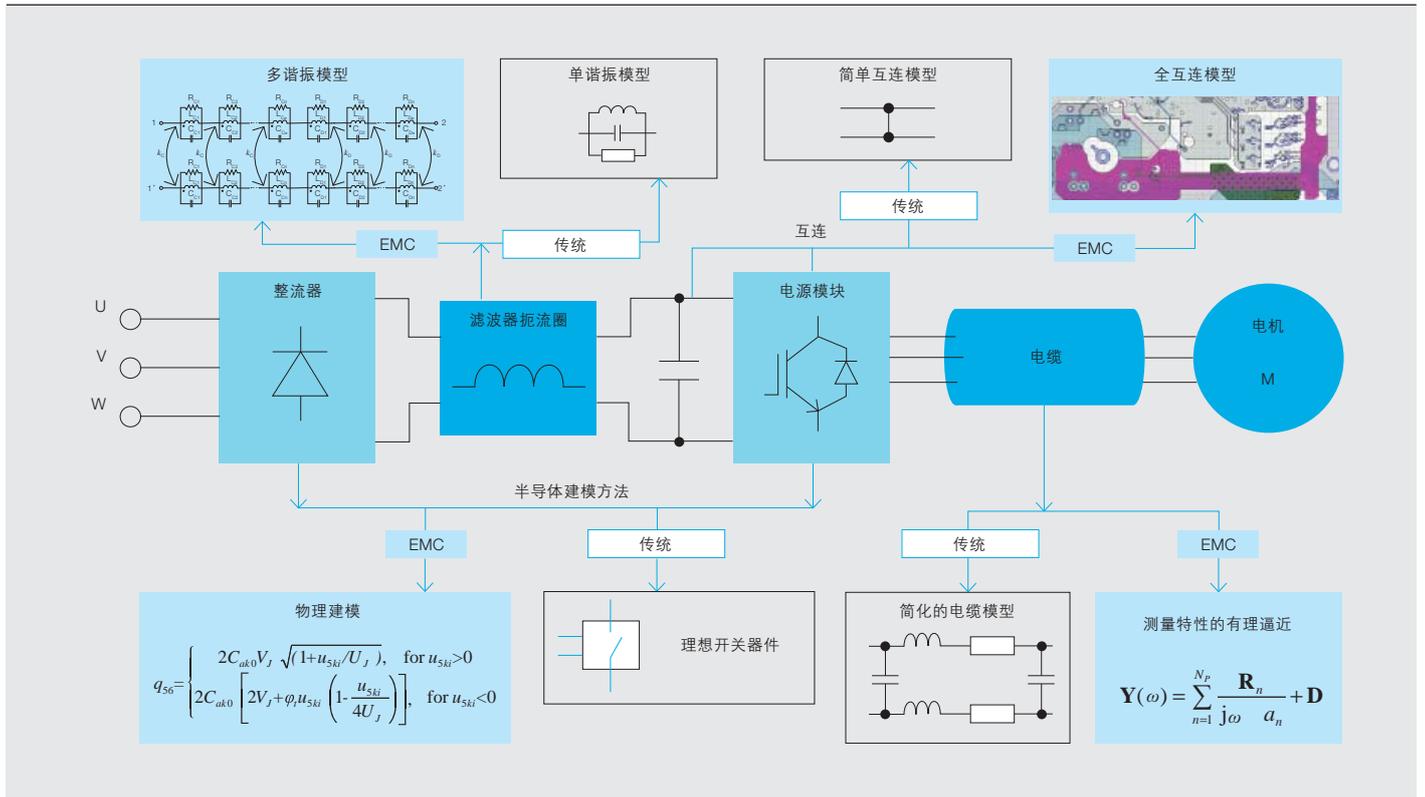
入这一阶段后便很难再进行修改，否则往往会导致延迟。

与此相反，更为智能的电磁兼容性设计方法以系统级电磁仿真为起点。这种方法的优点包括：

- 可以在早期设计阶段考虑到变流器及其组件中的电磁效应。
- 变流器整体的 HF 仿真有助于了解并防止可能发生的电磁干扰。
- 在电磁仿真基础上，我们可以利用数值优化算法来实现滤波器和布局的优化设计。

虽然仿真方法具有明显的优势，但准备充分的变流器模型却是一个复杂过程。为获得可用的仿真结果，我们必须对分立组件（例如电容器和半导体）以及机械结构和互连结构（例如散热片、PCB、电缆）进行精确建模。系统级电路模型中的组件总数很有可能超过 10 万个。

在变流器中，不同组件和互连类型需要采用不同的建模方法和工具 → 5。其中一些组件（PCB、散热片、电容器）可以采用商业工具，而另外一些组件（例如较长的三相电力电缆、共



偏远地区的电力变流器必须能够保证在未来几十年持续运行。

模扼流圈) 则必须使用专门开发的高频建模方法 [2、3]。因此, 电力电子应用的电磁兼容性仿真会逐渐发展成为复杂的 EMC 仿真框架, 包括开发使用新的组件建模技术和工具 (与 STC 合作 → 7)、周边技术选择、组件模型与系统级模型的组合以及仿真的后处理和分析。

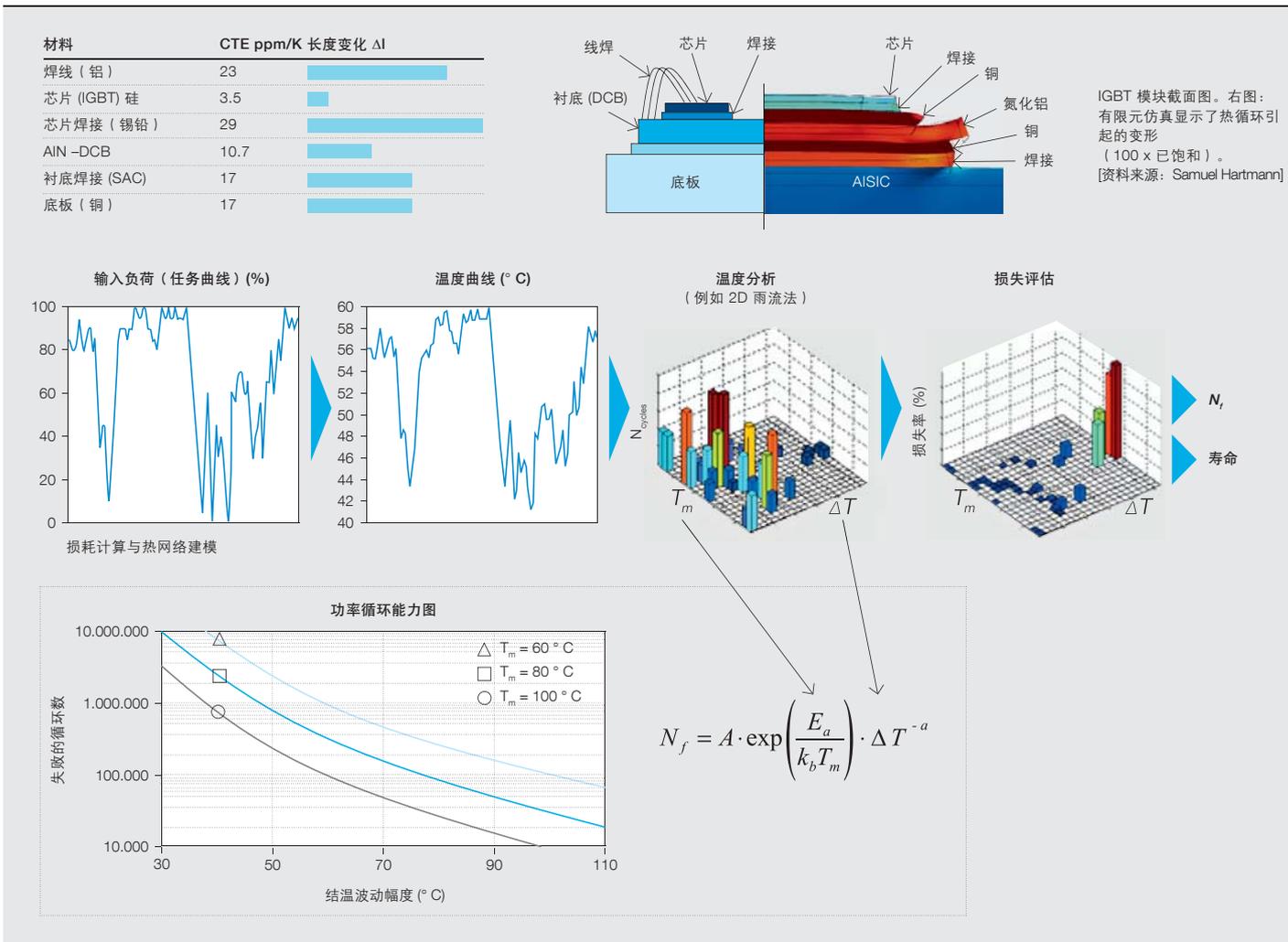
可靠性

偏远地区的电力变流器 (如海上风力发电装置) 必须能够保证在未来几十年持续运行。特定地理位置带来了一系列维护和服务干预挑战, 更加突显出可靠性的重要。

一般来说, 系统可靠性通常可以视为是各部件可靠性的综合体。每个部件都可能发生故障, 无论是由于磨损还是应力过大, 都会引发系统故障。各部件承受的应力越大, 出现故障的可能性就越高。这些应力可能包括 (但不限于) 施加的电场、湿度和温度。

半导体开关阵列是每个电力电子系统的核心, 通常置于电力模块中, 由其提供绝缘、内部电流分配和保护。这些模块采用不同材料制成, 每种材料的热膨胀系数 (CTE) 各不相同 → 6。当温度发生变化时 (例如由于负载变化), 不同的 CTE 值会在接触面上产生机械应力, 最终导致其磨损甚至毁坏。例如, IGBT (绝缘栅双极型晶体管) 模块的故障原因之一就是硅芯片和相连铝焊线之间连接断开。

鉴于对这种故障模式的充分了解, 制造商为其 IGBT 模块提供了循环能力图。



这些图可以用于使用寿命基本条件仿真，具体步骤如下。

- 定义可能的负荷 (任务) 曲线: 组件在使用过程中将面临哪些应力和环境?
- 损耗计算: 根据负荷曲线计算出半导体开关的损耗。
- 温度曲线计算: 结合热网络模型, 计算每个半导体开关的瞬态温度曲线。
- 分析温度曲线: 根据主要应力参数分析温度曲线, 即温度波动、 ΔT 和中温 T_m 。
- 损失评估: 根据循环能力曲线, 计算每个 ΔT 及其相应 T_m 的预期损失。
- 寿命估算: 半导体的寿命由累积临界损伤所需的时间决定。

其他所有可能发生的故障模式均可采用类似的程序。以电源模块为例, 该模块中的焊点会遭受热机械循环影

各部件承受的应力越大, 出现故障的可能性就越高。应力可能包括施加的电场、湿度和温度。

响。焊锡材料与铝焊线不同, 会出现明显的蠕变。因此, 需要采用有限元建模或其他数值仿真来计算由应用负荷曲线引起、最终决定着损伤程度和预期寿命 [4]。在计算得出的所有失效模式中, 最短寿命决定着组件 (在该例中为 IGBT 模块) 乃至其所在系统的寿命。

前景展望

在不断进步的计算技术推动下, 仿真的规模越来越大, 越来越复杂。与此

同时, 先进的软件接口和脚本工具将允许更多仿真耦合到不同的场中。这些成果为产品设计和性能预测带来了许多

优势, 但随之而来的工具、模型和结果处理越来越多, 导致复杂性增加, 而且往往还要涉及到分散各地的设计师。因此, 我们必须更加专注于建设必要的基础设施, 为各种商业和自主研发的工具和模型提供长期维护。在 ABB, 电力电子仿真工具中心 (STC) 就担负着这一重任 → 7。

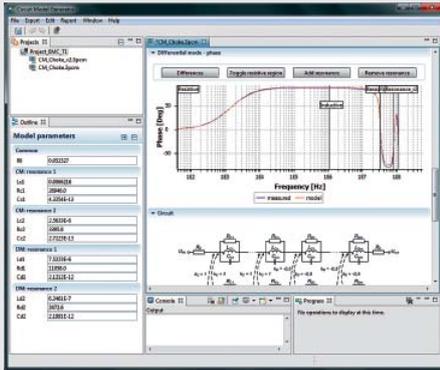
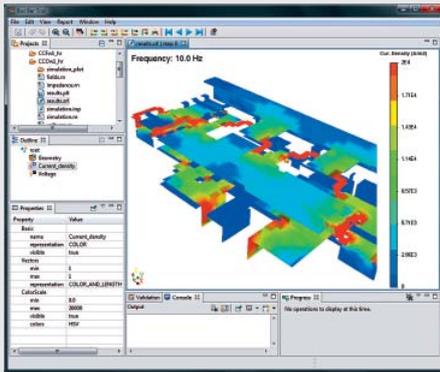


ABB 的仿真工具中心 (STC) 小组于 2009 年在波兰克拉科夫成立, 致力于为 ABB 提供专业的电力电子仿真软件。STC 的服务包括:

- 为各 ABB 公司研究中心在研究项目中开发的工具和算法开发易于使用的专用图形用户界面 (GUI)。
- 各种内部或商业仿真软件的数据接口编程, 以便使用耦合仿真。
- 为内部研发工具提供长期维护。
- 用户支持, 包括工具培训, 通常要与开发求解器的科学家们合作。

该中心开发的工具可以支持新开发的电力电子集成技术设计算法 (例如, 新冷却装置)。这些工具极大地加快了新技术从研发到产品生产的转移步伐。

其他工具还可以提供商业工具无法提供的新仿真和解算器, 由此填补了仿真领域的重大空白, 例如电磁兼容性 (EMC) 领域。

耦合仿真的一个重要方面是一项仿真 (或测量) 得出的结果可以转换为输入模型, 用于其他工具。“母线工具” (BBT) 软件便是其中的一个典型例子, 该软件是专门用于电源互连 (母线) 电磁设计的工具。BBT 不仅能够提供相关的阻抗、电流密度及场模式, 还可以进行机械力后处理, 并导出母线宏模型, 用于电路级的进一步仿真 (例如 SPICE 或 MATLAB Simulink)。

另外一个例子是“电路模型生成器” (CMG), 该软件用测量或仿真所得的电阻, 为电感器、共模扼流线圈和感应电机创建高频等效电路模型。

需要采用有限元建模或其他数值仿真来计算由应用负荷曲线引起、最终决定着预期寿命的损伤。

由于集中使用了一流的仿真, 集成技术将能够应对半导体器件不断提升的性能和挑战。未来, 电力电子应用将呈现出功率密度不断提高、产品可靠性提升以及电力单位成本降低的特点。

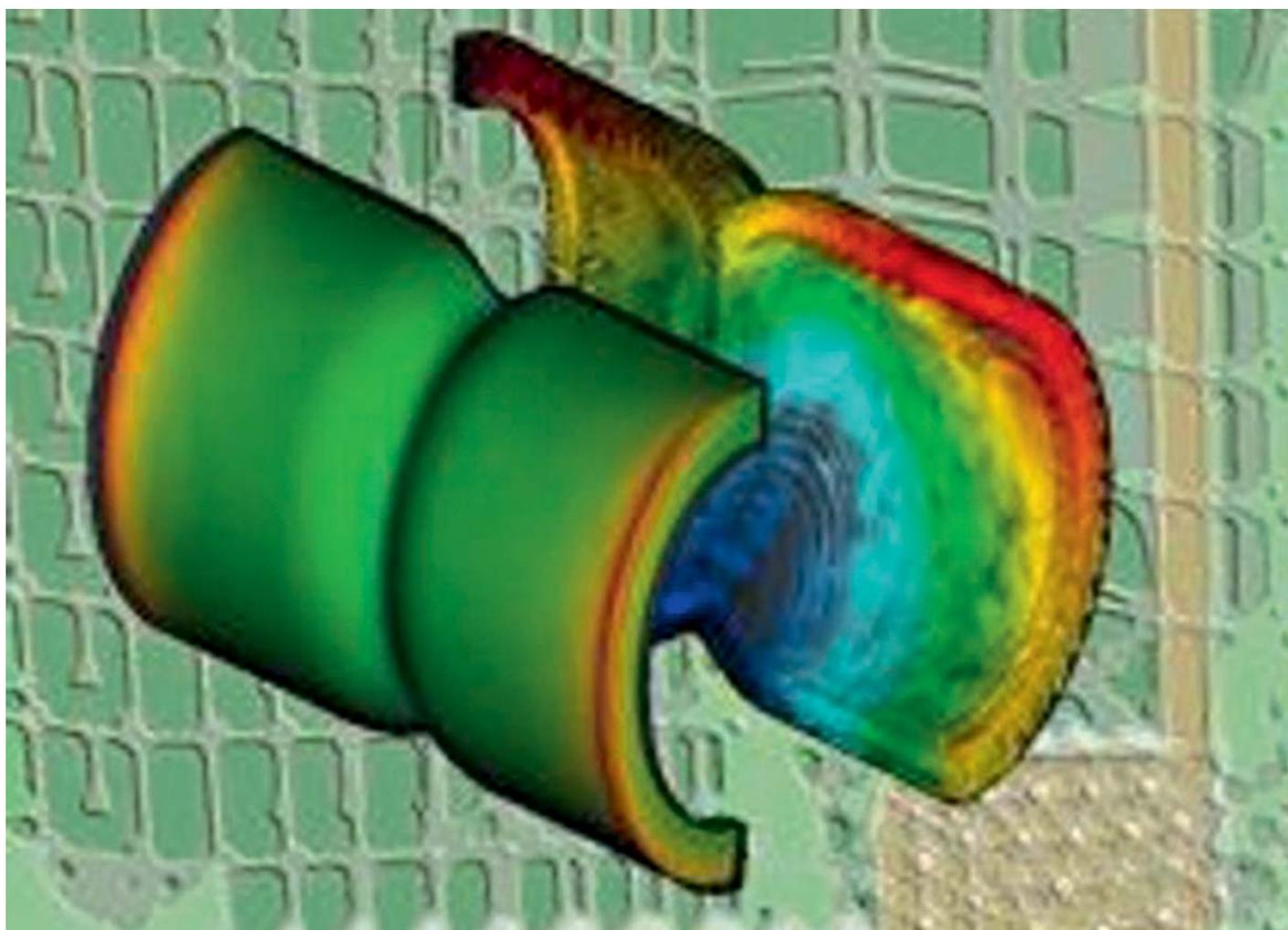
Didier Cottet
Bruno Agostini
Stanislav Skibin
Gernot Riedel

ABB 研究院
瑞士巴登-Dättwil
didier.cottet@ch.abb.com
bruno.agostini@ch.abb.com
stanislav.skibin@ch.abb.com
gernot.riedel@ch.abb.com

Pawel Wojcik
ABB 研究院
波兰克拉科夫
pawel.wojcik@pl.abb.com

参考文献

- [1] B. Agostini, M. Habert, *Measurement, observation and modeling of the performances of a transparent gravity driven two-phase loop*, in 11th International Conference on Advanced Computational Methods and Experimental Measurements in Heat Transfer, Tallinn, Estonia, 2010.
- [2] I. Stevanović, et al., *Multiconductor cable modeling for EMI simulations in power electronics*, in Proc. 38th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Montréal, Canada, October 25–28, 2012.
- [3] I. Stevanović, et al., *Behavioral modeling of chokes for EMI simulations in power electronics*, IEEE Transactions on Power electronics, vol. 28, no. 2, February 2013, pp. 625–705.
- [4] G. J. Riedel, et al., *Reliability of Large Area Solder Joints within IGBT Modules: Numerical Modeling and Experimental Results*, CIPS 2012, pp.1,6, 6–8 March 2012.



塑造未来

先进的计算机仿真技术改善聚合物的加工过程

ROBERT SEKULA, KRZYSZTOF KASZA, LUKASZ MATYSIAK, LUKASZ MALINOWSKI, DARIUSZ BEDNAROWSKI, MICHAL MLOT, GERHARD SALGE

用聚合材料做主要绝缘材料，是因为其出色的电气性能、热性能和机械性能，被广泛应用在 ABB 电力产品中。这些电力产品形状复杂而且在加工技术中运用了大量参数，因此在质量上会受到多种挑战。例如，绝缘体中可能出现气孔、不完全填充、过早凝结、不正确固化增长、局部过热、裂缝和变形等。但是通过先进的计算机（数字）仿真工具，ABB 始终保持了最佳的产品质量，同时把新产品的研发周期降到最短。这些仿真工具可以让工程师在极短的时间内探讨数以千计的设计方案，来提高产品性能和设计质量并缩短产品投放市场的时间。

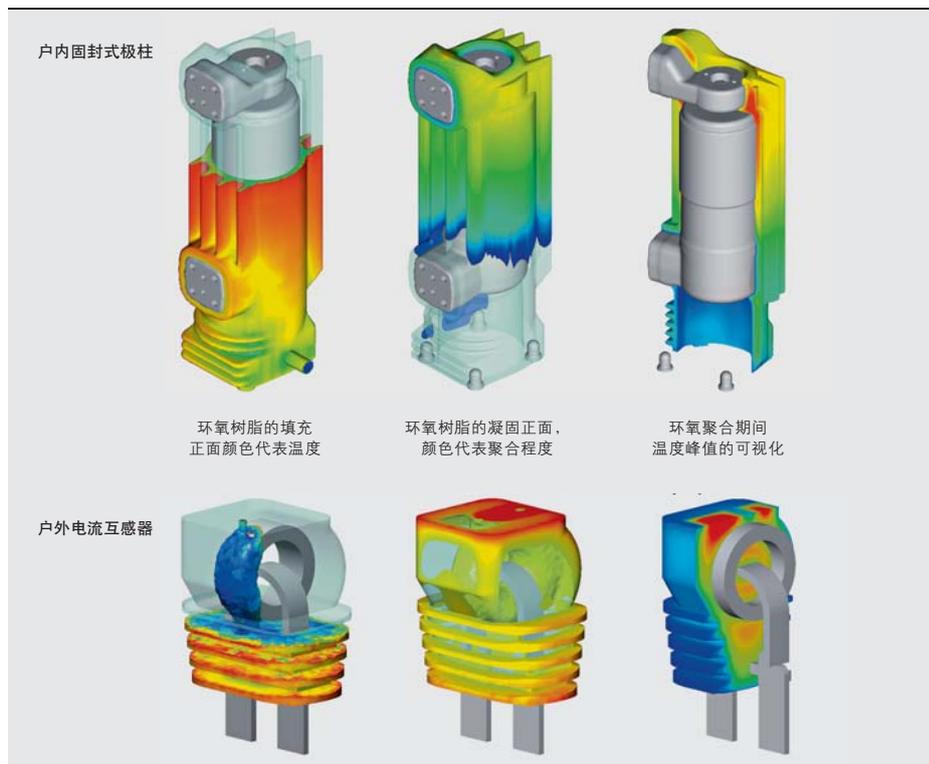


ABB 已将先进的计算机仿真运用到所有聚合物加工技术中，包括反应注塑成型、注射成型和硅胶成型等。

环氧浇注

环氧树脂是 ABB 用来制造中高压产品的主要绝缘材料。其复杂的制造过程被称为反应注塑成型，包括浇注、胶凝（固化）和冷却过程。通过将先进的流体流量、热传递、机械变形及应力等计算机仿真结合在一起的多物理学研究方法，工程师能更好地跟踪和控制制造过程并获得更精确的结果。

工程师能观察到各种情况：如环氧树脂的模型填充、材料从液态到固态的转变、温度分布、由放热化学反应引起的温度峰值、冷却变形以及相关的应力集中等 [1, 2] → 1。通过详细分析，得到的结果有助于选择最佳的工

艺参数。保持正确的加工温度，同时降低剩余应力，是决定最终产品质量和可靠性的关键所在。

ABB 还开发了一个基于网络的环氧浇注仿真工具，它能提供完全的自动计算 [3]。无数字建模背景的设计工程师或工

为了最大程度挖掘复合材料在热塑型组件中的发展潜力，ABB 运用了先进的仿真技术。

艺工程师可直接进行计算。它能根据模型几何、所选材料和加工参数等输入变量，自动完成网格生成、仿真建立、计算及其它工作。该工具会生成一份带总结结果的报告，方便工程师从质量和效率方面分析加工过程。

热塑性材料注射成型

热塑性聚合物主要用在 ABB 低压产品中。不同于环氧材料和热固性材料，热

塑性聚合物加热到一定温度时能熔化及塑造成型，冷却后又回到固体状态。注射成型是热塑性材料最常用的加工方法。把高温熔化的聚合物放在高压下（可达 2000 巴）以高速（可达每秒数百立方厘米）注射到冷模腔中；在聚合物冷却的同时，注射装置必需保持压力

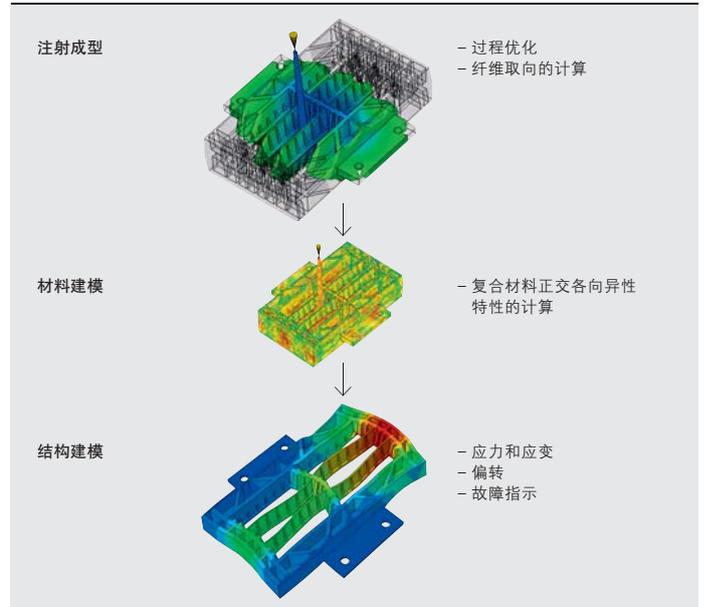
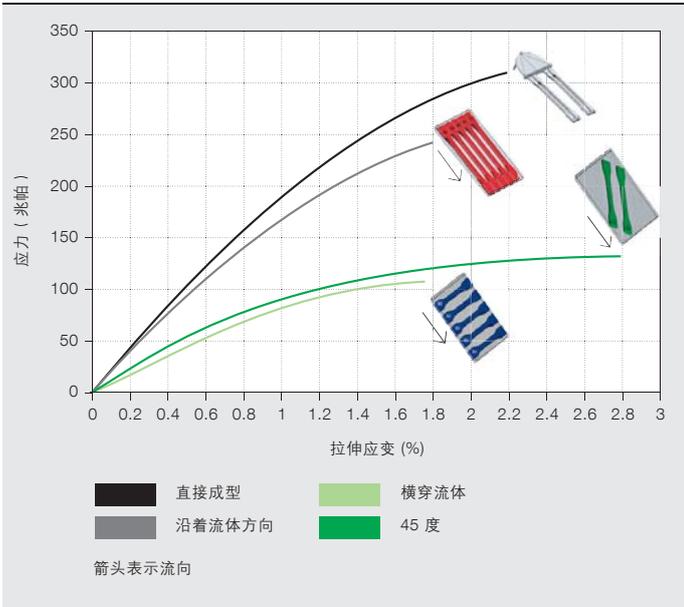
来补偿收缩。当温度低于固化温度 20 至 30 摄氏度时，聚合物获得了足够的机械强度，零件可脱模。生产周期取

决于壁厚（从 0.5 到 6 毫米），通常是几秒至 100 秒。因为热塑性材料加工期间会出现复杂的现象，如剪切、粘滞加热、结晶、定向、冷却和不希望的变形（翘曲）等，所以零件和模具设计极具挑战性。

为了在模具加工前优化每个零件和模具设计，工程师要进行先进的计算机仿真。计算机仿真工具能分析所有

标题图片

利用注射成型仿真完成了一个样品组件的优化工作。



为了在模具加工前优化每个零件和模具设计，工程师要进行先进的计算机仿真。

加工阶段，即填充、保压和冷却阶段（甚至要考虑脱模时间及其对注塑中热分布的影响）。仿真模型要考虑注射成型的所有基本组件，如零件腔、冷热流道系统、零件或模具装夹、冷却回路以及模具通风（如必要）等。计算机仿真对填充剖面、滞流、聚合物过早冻结、熔接线及气阱定位等方面评估注射阶段的质量很有帮助。在保压和冷却阶段，计算机仿真对收缩补偿效率进行评估，可以正确选择冷却门横截面。此外，最终的零件形状也进行了建模，在建模过程中，要考虑到聚合物收缩、不均匀的冷却及材料取向等引起的翘曲。

注射成型仿真用的软件包括一个带有 6000 多个预定义热塑性材料的数据库，数据库可用于确定材料的技术参数，如压力容积温度 (PVT)、作为温度和剪切率函数的粘度、热性能和机械性能等。该软件也可以处理诸如气体辅助注射、注射压缩、共注塑以及纤维增强材料等。

短玻纤增强热塑性复合材料具有出色的机械性能和热性能，也常常当做绝

缘材料使用。但是如何将该材料引入到产品中是一项挑战。因为聚合物基质中的短纤维在注射成型过程中会沿流动方向对齐，导致该材料的性能为各向异性。测量得出，在成型期材料流动方向，材料的硬度和强度最大，材料的横向性能仅为材料数据单数值的 35%（基于对 50% 玻纤增强聚丙烯酰胺的测量）→ 2。

为了大力挖掘复合材料在热塑型组件中的发展潜力，ABB 运用了先进的仿真技术 → 3。仿真过程的第一步是收集纤维分布信息。在材料建模软件中，分别定义聚合物矩阵和纤维的材料性能，即可计算出复合材料的机械性能。然后结构仿真包用这些数值计算出产品在实际机械负载下的反应。通过应力及应变的故障指示，使复合材料临界负载的估算工作变得切实可行 [4, 5]。

从环氧材料到热塑性材料

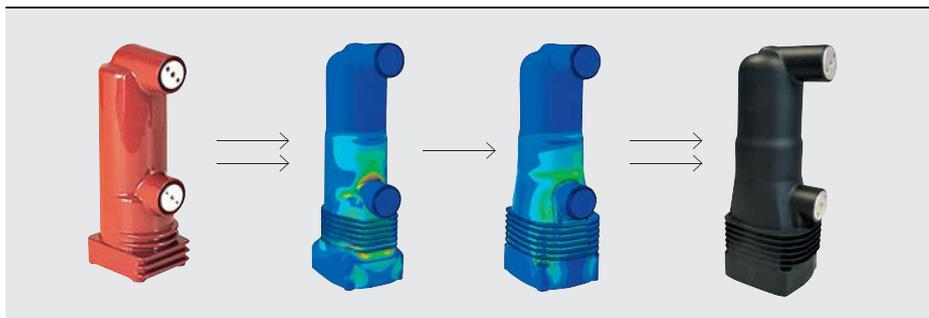
热塑性材料广泛应用在低压产品中。随着工程热塑性材料性能的不提高，业界正考虑将其作为热固性环氧绝缘材料的替代品应用到中高压产品

4 热塑性固封式极柱注射成型过程的仿真结果



产品的介电性能可利用电场分布仿真来检验。

5 热塑性固封式极柱结构的机械优化



中去。工程热塑性材料的机械性能大大优于环氧材料，具有极高的硬度和几倍于环氧材料的机械强度。它还具有优良的介电强度。这些优势使产品重量以及对环境的影响大幅降低。

ABB 的 PT1 嵌入式极柱正是 ABB 中压产品从环氧材料转向热塑性材料的

壁零件。当中高压产品的材料需要更换时，工程师就必须对产品进行全面的重新设计。重新设计的第一阶段是创建设计理念以及设计塑料零件草图，然后用仿真工具对这一理念进行评估和优化。

机械分析时，产品在运行过程中受到的所有负荷情况都要建模。同时，利用注射成型过程仿真验证零件的可制造性

→ 4。产品的介电性能可利用电场分布仿真来检验。依据仿真结果对设计进行修改，然后开始进入下一个仿真周

为重要。利用计算机仿真技术，热塑性嵌入式极柱的产品设计和生产过程都得到了优化。

液体硅橡胶加工

硅胶成型是另一项加工技术，生产的电力绝缘材料被广泛应用在中高压电力产品（如避雷器、套管、绝缘体和电缆终端）领域。硅橡胶性能卓越，有很高的化学稳定性与热稳定性，因此具有材料憎水性、UV 稳定性，以及优良的防闪络性及耐腐蚀性等特性 [7, 8]。

影响硅橡胶绝缘材料性能的另一因素是绝缘制造阶段的材料加工情况。影响硅胶成型的危险因素之一是加工过程中温度太高，高温可导致材料性能的下降。

硅胶硫化期间的放热（热生成）还可能导致出现局部过热点，最佳的控制温度显得尤为重要。过高的温度条件除了可能引起硅橡胶过早胶凝外，还

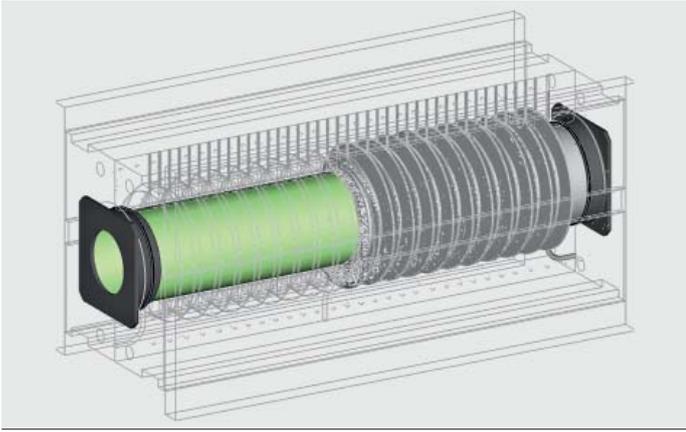
计算机仿真让工程师观察到注射模具的内部情况，全面掌握硅橡胶的加工过程。

实例。绝缘材料更换后，产品的重量不及以前的三分之一，同时又获得了优异的机械性能。整个产品生命周期内，二氧化碳排放量减少了 50% 以上 [6]。这些指标的改善都是利用先进的计算机仿真完成的。

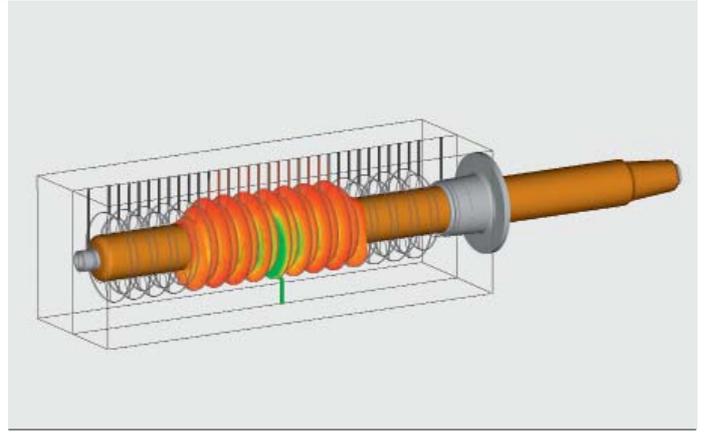
与适合加工大块结构组件的环氧材料相比，热塑性材料注射成型更适于生产薄

期。零件样件依据最终结果生产出来，并根据规定的制造标准对所有的样件进行测试。

ABB 热塑性嵌入式极柱让零件的最大应力减少 50% → 5。通过利用注射成型仿真，过程设定得到优化，模腔中的材料压力得以减少，这对于低压浇注产品设计的模压真空灭弧室来说极



6a 模具填充期间硅树脂的流动模式



6b 硅树脂固化过程的进程

会进一步导致模具的不完全填充。最后，注射和通风系统的错误设计可导致在模具填充期间产生空气间隙，以及在运行产品时出现局部放电。

计算机仿真让工程师观察到注射模具的内部情况，全面掌握硅橡胶的加工过程[9, 10]。例如，工程师能够观察到硅流模式、压力增长、温度范围和硅胶硫化程度等随时间的变化而变化的情况 → 6。这些结果可进一步用在识别与产品设计或制造过程相关的潜在问题上。计算机仿真可用来改善产品设计和生产过程，使时间周期更短、投资成本更低。

Dariusz Bednarowski

Krzysztof Kasza

Lukasz Malinowski

Lukasz Matysiak

Michal Mlot

Robert Sekula

ABB 研究院

波兰克拉科夫

dariusz.bednarowski@pl.abb.com

krzysztof.kasza@pl.abb.com

lukasz.malinowski@pl.abb.com

lukasz.matysiak@pl.abb.com

michal.mlot@pl.abb.com

robert.sekula@pl.abb.com

Gerhard Salge

ABB 集团中压产品部

德国拉廷根

gerhard.salge@de.abb.com

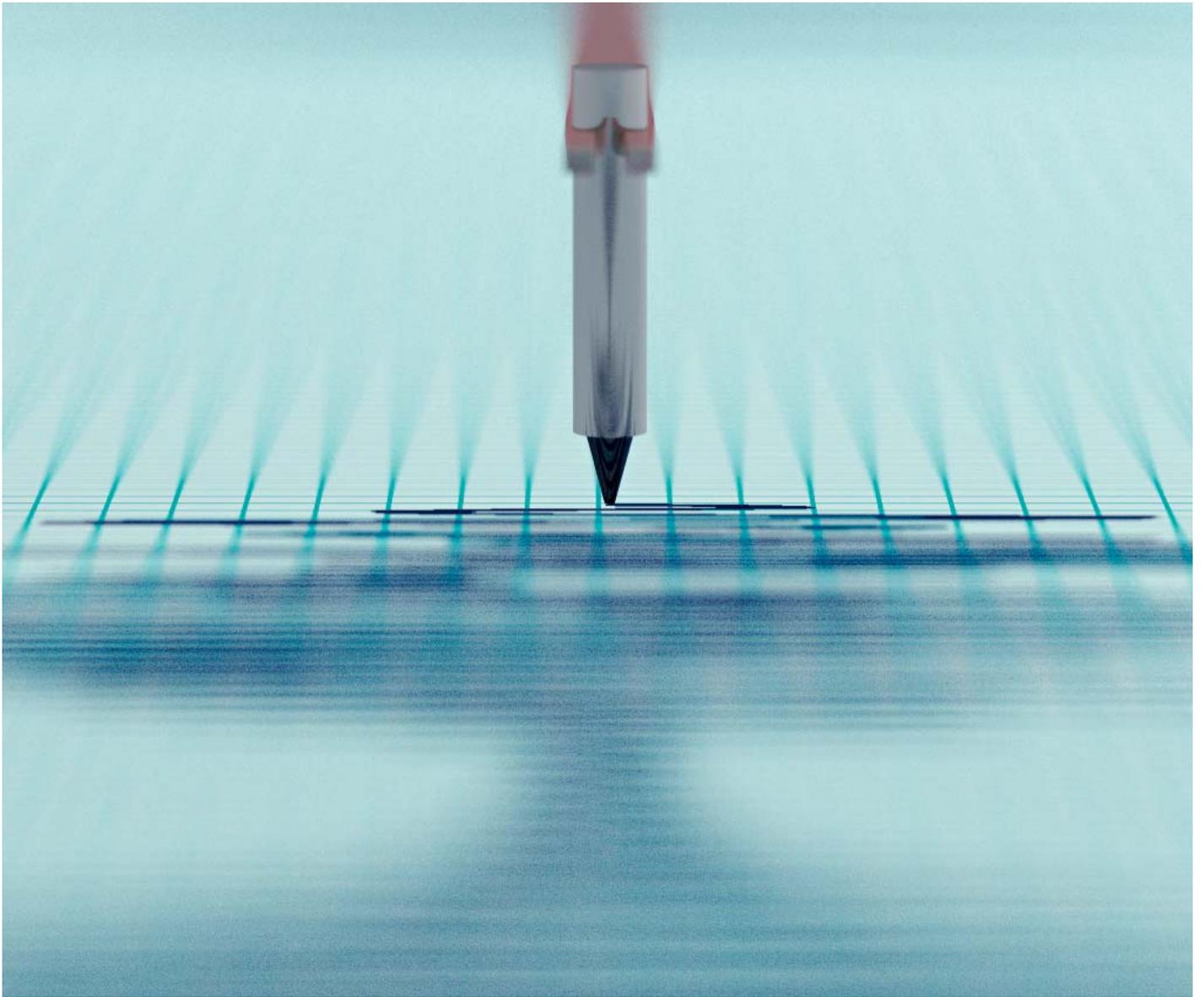
参考文献

- [1] R. Sekula, *et al.*, "3-D Modeling of Reactive Moulding Processes: From Tool Development to Industrial Application", *Advances in Polymer Technology*, vol. 22, no. 1, pp. 42–55, 2003.
- [2] R. Sekula, *et al.*, "Sequential fluid dynamics and structural mechanics simulations of a reactive molding process." *International Journal of Materials and Product Technology*, vol. 40, no. 3/4, pp. 250–263, 2011.
- [3] L. Matysiak, *et al.*, "eRAMZES – Novel Approach for Simulation of Reactive Molding Process;" *Proceedings of 26th European Conference on Modeling and Simulation*, pp. 128–135, Koblenz, Germany, 2012.
- [4] D. Bednarowski, *et al.*, "Modeling of short fiber composites strength with use of failure indicators." *10th International Conference on Flow Processes in Composite Materials*, 2010.
- [5] D. Bednarowski, *et al.*, "Modeling of reinforced thermoplastics' mechanical performance with use of failure indicator," *Digmat Users' Meeting*, 2010.
- [6] T. Fugel, *et al.*, "Breaking ahead of expectations." *ABB Review* 1/2010; pp. 57–62.
- [7] L. Stenstrom, *et al.*, "Optimized use of HV composite apparatus insulators: field experience from coastal and inland test stations." *Proceedings of 40th CIGRE Session*, 2004.
- [8] "Remote Plant Plays Key Role in ABB Insulator Business," *Insulator News & Market Report Quarterly Review*, vol. 13, pp. 54–61, 2005.
- [9] L. Matysiak, *et al.*, "First Industrial Application of the 3D silicone Molding Simulation Tool," *Proceedings of the 5th European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2010*, Lisbon, Portugal, June 2010.
- [10] L. Matysiak, *et al.*, "Analysis and Optimization of the Silicone Molding Process Based on Numerical Simulations and Experiments," *Advances in Polymer Technology.* vol. 32, no. S1, pp. E258–E273, 2013.

其他阅读材料

eRAMZES——先进计算机仿真的重大突破

ABB 评论 01/2013



振动与噪音

设计仿真有助于提高设备的抗震性能且降低噪音

ROBERT PŁATEK, GRZEGORZ JUSZKIEWICZ,
MICHAŁ KOZUPA, GRZEGORZ KMITA, PER LIND-
HOLM, ROMAIN HAETTEL, MUSTAFA KAVASOGLU,
ANDERS DANERYD, JOHAN EKH

如今，为了能完整评估复杂的电力系统，人们运用各种测试进行调整和优化设计，来获得最佳性能。产品和系统必

须在各种运行条件和环境条件下反复核实，确定限值之后才能交付使用。控制噪音及振动是电力产品设计的重要方面。ABB 的电力产品必须具备噪音低、抗震恢复力强的特点，既然如此，ABB 就有责任向客户证实产品的设计高效可靠，能满足客户的技术规范以及环境规定，这一点至关重要。

电力系统，特别是地震多发地区的电力系统，其可靠性和安全性取决于组件的抗震强度。

抗震标准与抗震测试

用来衡量抗震性能的两大大国际标准是 IEEE 693 [1] 和 IEC 61463 [2]。IEEE 693-2005 即“变电站抗震设计建议措施”，是新修正的文件，涉及变电站设备不同抗震等级的认证步骤。IEEE 693 强烈建议，对即将用于最终变电站的支撑结构的设备进行认证。套管的振动平台试验说明，根据 IEEE 693 标准，从综合响应来看，这些组件具有良好的性能 → 1。虽然强烈建议对关键部件的抗震情况进行振动平台试验，以认证抗震能力，但对于确定某些产品的抗震能力，数字分析仍然是非常有效的。当有些情况下设备质量巨大无法进行测试时，例如电力变压器，这时数字分析就是确定系统动态特征的唯一办法。

地震载荷是动态载荷，不仅影响建筑物而且还影响电力设备。里式震级作为一种衡量地震强度的方法，很少说明地面的运动情况。地面的运动情况取决于表面波的频率和地下土层的性质等。电力系统，特别是地震多发地区的电力系统，其可靠性和安全性取决于组件的抗震强度。破坏性地震可对电力行业产生直接影响，因此，在地震活跃地区运行的所有相关

抗震分析的建模方法

验证电气设备抗震能力时会采用不同的分析方法。这些方法通常涉及静态计算，估算给定的地面加速度的地震所产生的力，然后与设备抗震能力进行对比。对于最低固有频率高于 30 赫兹的刚性结构来说，其运动不比地面运动大，最大载荷等于地面加速度；因此可使用静态估算的方法。

当设备重量巨大无法进行震动平台测试时，数字分析是确定系统动态特征的唯一办法。

电力产品都应该经过抗震设计和抗震测试，确保具有良好的抗震性能。

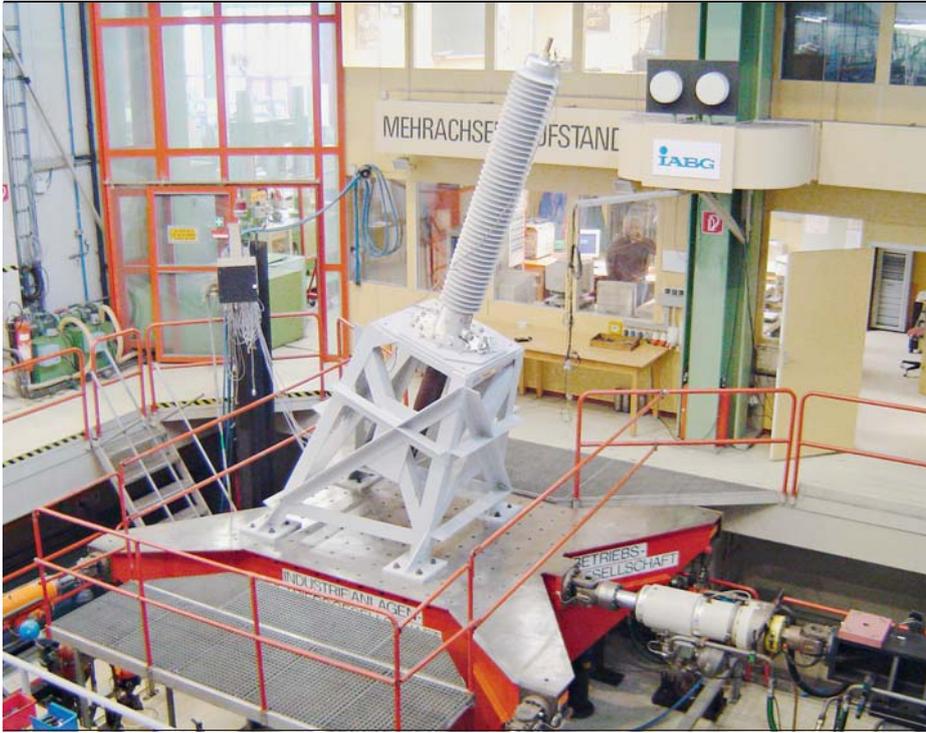
让电力产品防震并非易事。ABB 凭借在这一领域多年的经验，对抗震本质的深刻了解。在工业标准有效地分析地震载荷的基础上，进一步研究出了解决此类问题的创新方法。

然而，大型结构的固有频率通常小于 30 赫兹。计算抗震负载的最普通方法是响应谱分析，响应

谱分析将结构设计中不同固有振型的响应进行叠加。它根据对结构固有频率和固有振型的模态进行分析。另一个流行模式是“正弦拍”仿真，它把多个频率等于第一固有频率（低于 33 赫兹）的正弦波施加给结构。这个时间域方法的下一步是“时间历史”，根据频谱定义，此时结构受到

标题图片

数字分析正在改善抗震强度和环境噪音。



1a 抗震测试下的 RIP 230 千伏套管

至少 20 秒的随机加速度载荷。最后，分析变形、应变和应力，评估抗震能力。应用在抗震 RIP 型（树脂浸渍纸）套管的方法，具有高精度结果以满足抗震认证，显示了预测相对加速度和位移的潜力 [3]。除此之外，理解变电站设备和流体之间抗震相互作用也是至关重要。

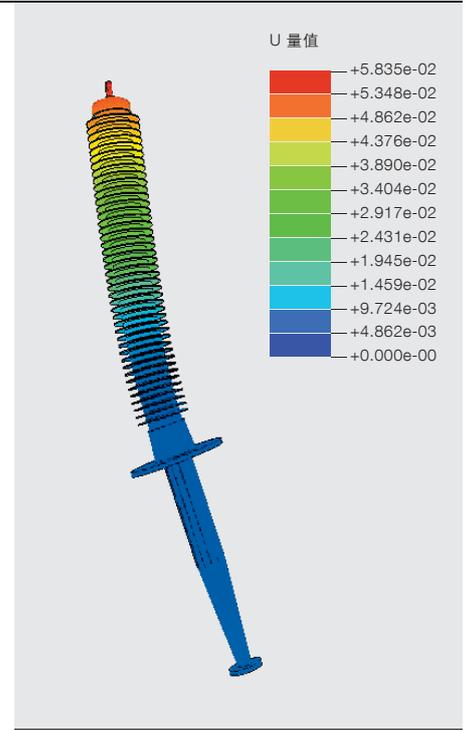
抗震建模面临的挑战

很多专家称变压器-套管系统的地震响应可能会由于相互连接的组件而复杂化 [4, 5]。另外，安装连接件（销子、铆钉、焊接件）还可能损坏所安装的设备。刚性框架上的抗震套管测试并未把所有危险情况考虑在内，因此还需要进一步研究。变压器油箱及组件仿真显示：整个变压器-套管系统都应加以考虑，以此全面分析抗震。→ 2。对于填充有液体（油）的电力产品，应验证液体对抗震载荷的影响。更佳的计算能力意味着能提高结构模型的复杂性，包含更为详细的

几何结构描述或多物理场。为了检验流体对动态特征的影响，ABB 运用了流固耦合 (FSI) 的研究方法。FSI

如今，世界各地越来越重视对噪音污染的限制。

方法依据的是流场模型与机械行为的仿真工具之间的数据交换。在计算流体动力 (CFD) 时，ABB 为填充有流体的油箱建立了模型，同时在计算时仅把结构考虑在内。CFD 代码负责计算流场。因此，结构壁上的受力发送给结构代码，把它作为载荷条件和边界条件使用。结构的新形状反馈给 CFD，准备为下一时间增量更新网格。结果是，把流体动力加以考虑后，工程师能够发现结构的应力、应变和变形。



1b 计算出的套管固有频率第一振型

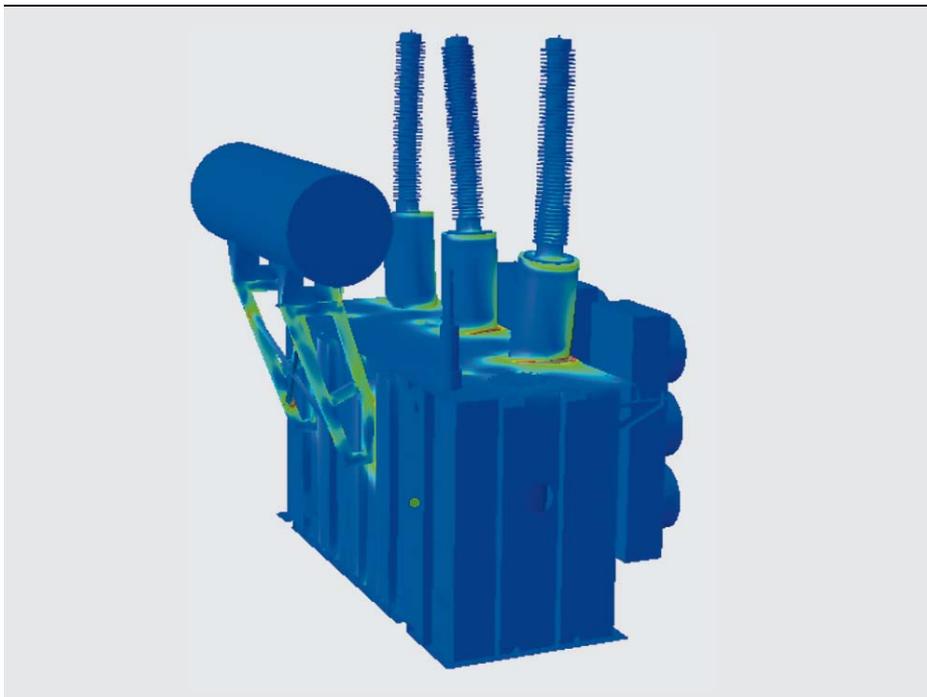
振动声学

如今，世界各地越来越重视限制噪音污染。在设计电力产品时，必须符合客户技术规范或环境规定，把声级和振动控制在低水平。这样一来，产品设计早期阶段，用足够的精度预测声级来选择最合适的控制噪音的方法就变得非常必要。

噪音的产生

对于很多 ABB 产品而言，产生声音和振动的具体结构可通过能量转换链来解释 → 3。能量转换过程是一种典型多物理现象，它由电磁、机械和声音组成。交流电和相关磁场之间的相互作用形成不同的力，产生结构上的振动，这种振动最终以声音形式辐射出去。这里描述的多物理结构在很多 ABB 产品中都能见到，如变压器或电容器。由于这些产品相对较复杂，一般需要用先进的预测工具才能精确描述各设计参数之间的相互作用以及多个物理场之间的耦合。数字分析是

这样一来，产品设计早期阶段用足够的精度预测声级以选择最合适的控制噪音策略就变得非常必要。



关键工具，它有助于理解噪音产生问题并开发有效的噪音消减解决方案。

振动声学仿真实例

在ABB 研究中心，工程师运用有限元和边界元方法对各种 ABB 产品的振动声学性能进行仿真。多物理和多尺度仿真的典型例子是油浸电力变

压器，它具有非线性各向异性的特性，也就是所谓的磁致伸缩。从根本上来讲，磁致伸缩就是磁畴的交变或旋转导致铁芯尺寸发生变化 [6]。这些取决于频率的磁致伸缩力引起铁芯振动并形成空载噪音。铁芯磁通密度、因不同等级磁通密度形成的磁致伸缩、变压器铁芯结构的典型变形形态以及最终的噪音功率级，与测量等级高度一致，如图 → 4 所示。

数字分析是关键工具，它有助于理解噪音产生问题以及开发有效的噪音消减解决方案。

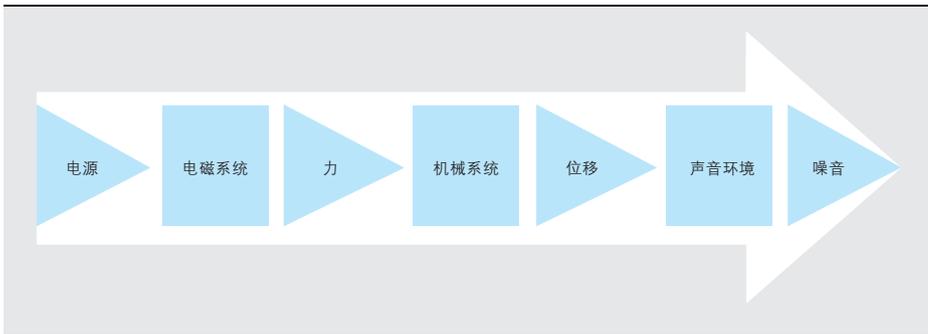
器中的噪音产生，通过仿真可分辨出产生噪音的两个特别来源：铁芯噪音（一般称为“空载噪音”）和绕组噪音（一般称为“负载噪音”）。

因漏磁场和绕组内电流之间存在相互作用故出现负载噪音，而绕组内电流会产生洛伦兹力，引起绕组振动 [7, 8]。

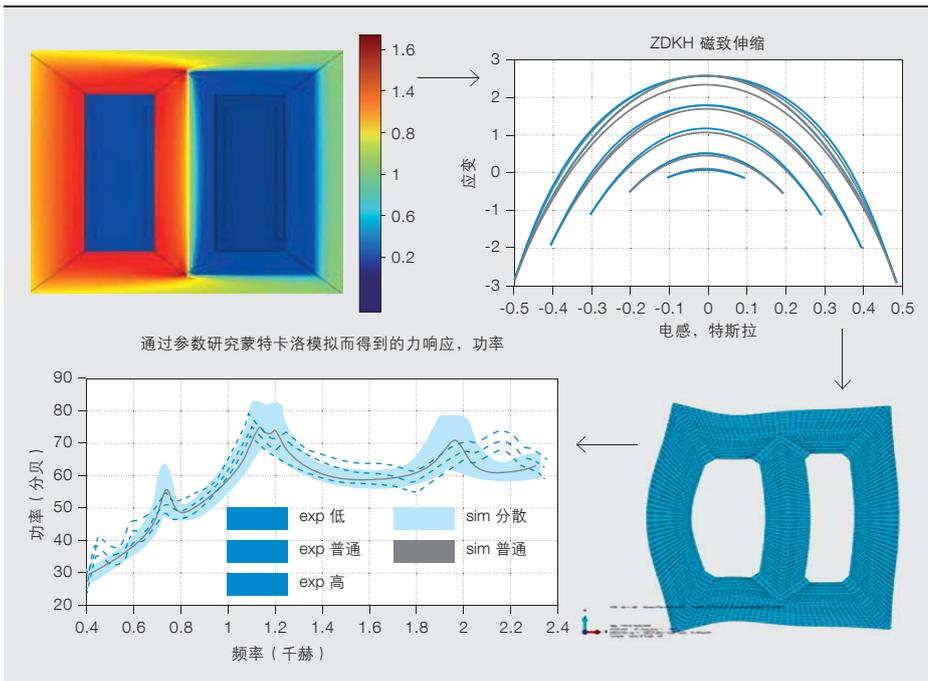
铁芯和绕组的振动通过绝缘油、铁芯支撑和夹紧结构传递给油箱壁，在那里，振动最终以噪音的形式辐射到周围空气中。通过计算表面声音强度发现，油箱的振动可能与发射的声音功率有关。

在施加电流到变压器绕组后，变压器铁芯中产生磁通。变压器铁芯的主要材料，即所谓的晶粒取向电工钢，具

→ 4 代表了对变压器之类产品的一种典型方法。首先进行电磁计算，计算



这个简单的模型将在建造所有组件之前，早早预算出电容器在现场发出的噪音，精度达 ±1.5 分贝。



出施加于结构上的机械力。油箱上产生正确振动图像的关键是结构-流体-结构路径，包括发生在油本身的界面和现象。正确定义的最外层表面振动模型不仅具有合理的声音辐射形态，

ABB 开发了一种预测工具用来估算电容器发出的声音。把电容器描述为受到交替库仑力的纵向摆动杆，分析计算出输入电压和声音功率之间的转换函数。这个简单的模型，结合计划

实测试数据，获得特征值。在受控环境中对设计良好的比例模型实施测量，施加真实励磁，这对于最初的详细验证很有必要。在深入了解和完成实验测试后，必须仔细在全尺寸产品中执行补充测量，完成验证过程。先进的测量技术如激光多普勒测振仪 (LDV) 对这一过程很有帮助。LDV 技术能提供变压器在负载条件和空载条件下的三维振动形态，建立所谓的工作振型 (ODSs) → 5 [9]。ODS 形态能直接与数字分析相比较，必要时还能介绍一些改善模型的办法。

正确定义的振动模型带来具有阻尼潜力的有关大振幅区域信息。

还将带来具有阻尼潜力的有关大振幅区域信息。

中电厂的估计运行电流范围，将在建造所有组件之前，早早预算出电容器在现场发出的噪音，精度达 ±1.5 分贝。

振动声学实验验证

用在 SVC (静态无功补偿器) 的高压电力电容器和 HVDC (高压直流) 设备成为噪音的主要来源。为此，

要全面分析一个以声音反应为输出的结构系统，首先必须对运行模型进行精确地分析，并且很好地结合系统真

地震之后

现代预测工具比如结合计算能力的多



物理场软件，能让用户的研究详细而高效，显示出设计参数之间复杂的相互作用，以及材料性能对噪声功率级的影响。正确的相关数字模型构成了“虚拟样机”的基础，这意味着能对产品和系统进行虚拟地测试和改进，不必生产“有形”样机。这种数字仿真并不常见，但从根本上讲，它是减少噪音污染和确保供电连续性措施的一部分，让客户在即使发生地震的情况下也能安心地工作和睡眠。

Robert Platek

Grzegorz Juskiewicz

Michał Kozupa

Grzegorz Kmita

ABB 研究院

波兰克拉科夫

robert.platek@pl.abb.com

grzegorz.juskiewicz@pl.abb.com

michal.kozupa@pl.abb.com

grzegorz.kmita@pl.abb.com

Per Lindholm

Romain Haettel

Mustafa Kavasoglu

Anders Daneryd

Johan Ekh

ABB 研究院

瑞典韦斯特罗斯

per.o.lindholm@se.abb.com

romain.haettel@se.abb.com

mustafa.kavasoglu@se.abb.com

anders.daneryd@se.abb.com

johan.ekh@se.abb.com

Frank Cornelius

ABB 干式变压器开发中心

德国布里隆

frank.cornelius@de.abb.com

参考文献

- [1] IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations, IEEE Standard 693-2005, 2005.
- [2] “Bushings – seismic qualifications,” IEC 61463 Technical Report II, Luglio, 1996.
- [3] J. Rocks et al., “Seismic response of RIP-transformer bushing,” in Insulator News & Market Report (INMR) World Congress on Insulators, Arresters and Bushings, Brazil, 2007.
- [4] A. Filiatrault et al., “Experimental seismic response of high-voltage transformer-bushing systems,” *Earthquake Spectra*, vol. 21, pp. 1009-1025, Nov. 2005.
- [5] S. Ersoy and M. A. Saadeghvaziri, “Seismic response of transformer-bushing systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, pp. 131-137, 2004.
- [6] P. L. Timar, *Noise and Vibration of Electrical Machines*. New York, NY: Elsevier, 1989.
- [7] M. Kavasoglu et al., “Prediction of transformer load noise,” *Proceedings of the COMSOL Conference*, Paris, 2010.
- [8] R. S. Girgis et al., “Comprehensive analysis of load noise of power transformers,” *IEEE Power Energy Society General Meeting*, 2009, pp. 1-7.
- [9] M. Hrkac et al., “Vibroacoustic behavior of SPT transformer,” *International Colloquium Transformer Research and Asset Management CIGRE*, 2012.

《ABB 评论》编委会

Prith Banerjee

首席技术官兼执行副总裁

Clarissa Haller

ABB 集团企业传播负责人

Ron Popper

ABB 集团可持续发展事务负责人

Eero Jaaskela

ABB 集团战略客户负责人

Andreas Moglestue

《ABB 评论》主编

出版人

《ABB 评论》由 ABB 集团研发和技术部门出版。

ABB 技术有限公司

《ABB 评论》

Affolternstrasse 44

瑞士苏黎世 CH-8050

abb.review@ch.abb.com

《ABB 评论》每年出版四期，以英文、法文、德文、西班牙文、中文和俄文出版，免费提供给对 ABB 技术及其目标感兴趣的人士。欲免费订阅《ABB 评论》，请与您最近的 ABB 办事处联系，或者上网订阅：

www.abb.com/abbreview

部分印刷或复印需经认可。再版需经出版人书面同意。

出版人和版权 ©2013

ABB 技术有限公司

瑞士苏黎世

《ABB 评论》中文版

主编

毛旭之

本期责任编辑

康薇

审校（按姓名笔画排列）

王军、谷帅、李春、叶莺、王景、江万里、卢超、王红艳、王宁超、陈军波、龚雪、杨晓丽、杨晓波、林治家、项英桐、程峥嵘

联系方式

editorial.cnabb@cn.abb.com

声明

所载资料只反映了作者的看法，仅供参考。读者不应该在未征得专业意见的前提下照搬行事。在此我们声明，作者不提供任何技术方面的咨询和建议，也不就具体的事实或问题承担任何责任。对文中有关内容的准确性以及所表达的观点，ABB 公司不做任何担保、保证以及承诺。本刊已翻译成中文，如有疑问，所有表述以英文版本为准。

ISSN: 1013-3119

www.abb.com/abbreview



下期预览 4|13

数据中心

计算机和互联网不仅改变了人类工作和互动的方式，而且还将以惊人的速度继续发展壮大，同时通过寻找全新应用彻底改变现状。计算技术方面的发展曾经一度只围绕着摩尔定律等纯统计学方法，当今随着在线服务的快速发展，从社交媒体到网上银行再到电子商务，计算技术已经向高度形象化迈进。用户关注的仅仅是这些在线服务的界面和可用性，然而这只不过是冰山一角。世界各地的数据中心正在不断地进行着信息处理和交换，满足人们日益增长的需求。

《ABB 评论》2013 年第四期将以数据中心为主题，向读者们展示 ABB 在这一发展过程中的贡献。

在平板电脑上阅读《ABB 评论》

《ABB 评论》现已支持平板电脑阅读。您可登陆以下方式进行访问：<http://www.abb.com/abbreview>

了解最新资讯...

您是否曾因故错过最新的《ABB 评论》？为了避免这种情况，我们现在为您提供了一种简便的方法，使您在每期《ABB 评论》（或专题报告）出版时都能收到提醒通知。您可以通过 <http://www.abb.com/abbreview> 网站注册使用《ABB 评论》提醒功能





将能源效率提高25%?

ABB 的电力与自动化解决方案成功帮助欧洲最大的电解铝厂将能源使用效率提高了25%，同时大幅提升了生产率。我们的研发紧紧围绕着改善业绩和节能，以持续地帮助客户节省资源和费用。欲了解更多，请登录 www.abb.com.cn

当然能实现。

用电力与效率
创造美好世界™

