

# COMSOL NEWS

中国用户特辑

国网电力科学研究院  
使用仿真 App  
维护电网正常运行

P 4

中科电声设计研发  
高性能扬声器

P 21

爱邦电磁优化  
飞机的雷电防护

P 10

# 多物理场仿真助力中国用户技术创新

多物理场仿真工具的出现,使产品研发和设计工作不再受限于物理原型的束缚,工程人员因此获得了前所未有的自由,大幅提升了产品的研发效率和产品可靠性。

本期《COMSOL News》汇集了中国地区众多知名企业和研究机构的成功案例,从太阳能热发电、飞机的雷电防护、石油勘探等工业领域,到电子器件设计和半导体纳米光刻工艺等高新技术领域,COMSOL 正在为中国的工业发展和技术创新提供助力。

过去的几年中,我们很高兴地见证了 COMSOL 产品发展的又一次重大突破。COMSOL 5 系列版本中提供的 App 开发器和 COMSOL Server™ 产品,为定制化仿真分析工具的开发和部署提供了全面的解决方案。在这本杂志中,您将了解到国网电力研究院的工程师们如何利用这些工具,协助一线工程人员分析电缆故障,以及清华大学的研究人员如何通过仿真改进半导体光刻工艺,并使用仿真 App 来促进团队内部的协作。

希望通过我们的努力,能使更多中国用户受益于多物理场仿真的强大力量。在此,我们衷心感谢与我们分享宝贵仿真经验的 COMSOL 用户,感谢他们对本刊作出的贡献,以及对卓越的不懈追求!

祝您阅读愉快!



陈蕾 博士  
总经理  
COMSOL 中国

## 参与 COMSOL 社区互动



COMSOL-China



COMSOL 中国

**COMSOL 博客** [cn.comsol.com/blogs](http://cn.comsol.com/blogs)  
**用户论坛** [cn.comsol.com/community/forums](http://cn.comsol.com/community/forums)

期待您对《COMSOL News》的意见和建议,欢迎通过 [info.cn@comsol.com](mailto:info.cn@comsol.com) 与我们联系。

# COMSOL NEWS

2017

© 2017 COMSOL. COMSOL, COMSOL Multiphysics, Capture the Concept, COMSOL Desktop, COMSOL Server 和 LiveLink 为 COMSOL AB 的注册商标或商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产,COMSOL AB 及其子公司和产品不与上述商标所有者相关联,亦不为其正式认可、赞助或支持。相关商标所有者的列表请参见 [cn.comsol.com/trademarks](http://cn.comsol.com/trademarks)。

微信微博版权所有:腾讯 Copyright © 2012-2017 Tencent. All Rights Reserved.  
微博版权所有:新浪 Copyright © 1996-2017 SINA. All Rights Reserved.

中国用户特辑

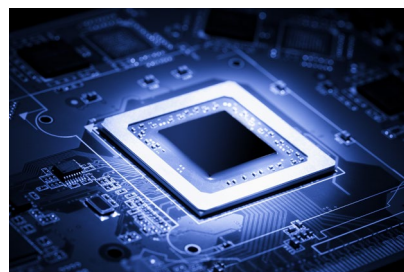
# 目录

## 电力系统维护

4 | 仿真 App 助力电网的运行与维护

## 半导体光刻

7 | 仿真研究推进纳米光刻工艺的升级



## 雷电防护

10 | 多物理场仿真提升飞机的雷电防护性能

## 电池热管理

13 | 构建更安全的锂离子电池热管理系统



## 封面图片

上海外滩上空的雷电现象。雷电防护对于飞机的安全飞行至关重要。

图片来源:站酷海洛

# 专题文章

## 清洁能源

16 | 太阳能热发电中的仿真应用

## 石油勘探

19 | 水平井测井技术的多物理场仿真研究



## 声学产品开发

21 | 仿真让扬声器的设计有了思想



## 特约评论

24 | 多物理场仿真推动电磁成像领域的发展

**国家电网 STATE GRID**

**电缆各层属性列表**

参数描述	厚度(mm)	电导率(S/m)	相对介电常数 $\epsilon_0$
导体芯	7.5	5.4e5	10000
半绝缘	0.7	1	10
绝缘层	7.75	1e-13	2.4
外导体	0.5	1	10
外绝缘层	0.5	1e-12	10
金属屏蔽层	1.5	5.4e5	10000
外保护层	2.5	1e-13	3.5

**位置 and 大小**

杂质x坐标: 0 mm 杂质电导率: 0 S/m  
 杂质y坐标: 10 mm 杂质相对介电常数: 1  
 杂质z坐标: 50 mm  
 杂质半径: 1 mm

**电缆杂质缺陷模型**

**电缆水树枝缺陷模型**

水树枝厚: 1 mm 水树枝电导率: 20 水树枝相对介电常数: 16

施加电压: 64000 V

标准网络  软网络  特细网络

计算

图形: 多切片图: 电势 (V) 等值线, 电场模 (V/m)

▲  $1.32 \times 10^4$  ▲  $6.68 \times 10^4$   
 1.32 1.23 1.14 1.05 0.96 0.86 0.77 0.68 0.59 0.5 0.41 0.32 0.23 0.14 0.05  
 ▼  $4.55 \times 10^0$  ▼ 0

国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司  
 WUHAN NANRUI ELECTRICITY COMPANY OF STATE GRID ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE



16

# 仿真 App 助力电网的运行与维护

武汉南瑞的工程师们使用多物理场仿真技术优化电网的运行与维护, 开发了用于评估电缆运行状态的仿真模型, 并定制开发出电缆线路状态分析专家系统 App, 从而提升了对电缆故障的预判能力以及故障检修速度。

作者 章琪琦

日常生活中不可缺少的电力资源, 主要通过电力电缆进行传输和分配。电线电缆被喻为国民经济的“血管”与“神经”, 是电力基础设施建设、新型智能电网、新能源产业中必不可少的基础产品。

随着经济的发展, 电缆线路的需求日益增加, 新增负载会导致电网参数波动或瞬间干扰, 从而导致电力品质下降, 引起电网设备的运行故障, 极端情况下还会引发火灾等严重事故。为保证

居民生活和工业生产的正常运行, 电缆系统设备的日常维护是保证顺利供电的重要手段; 而电缆出现故障后如何及时修复, 也成为亟待解决的问题。

## ⇒ 电网的运行维护

电力设备的运行情况就像人体的健康状况一样, 需要定期进行状态评估, 以防止突然断电的情况发生。对电缆的健康评估通常需要借助检测设备(比如红外、紫外和局部放电等), 通过检测

的结果判断电缆设备的状态。然而, 仅依靠单一的检测设备往往难以全面地反映电缆的状态或判断电缆设备的故障类型; 而且, 电缆的架设环境各异, 例如埋于地下或隧道里, 或是架设在空中, 都会增加设备和人力检测的难度。同时, 线缆的运行环境、服役年限以及本身质量的不同也导致了很难有一个完整的体系对其进行统一的评估。

为了有效分析电缆的健康状况, 维护电网的正常运转, 除了使用传统的检测设

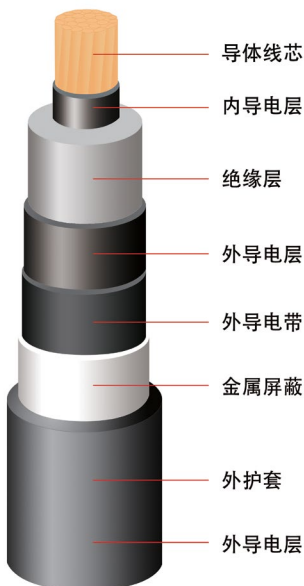


图 1. 典型的电缆结构示意图, 主要包含导体线芯、导电层、绝缘层以及金属屏蔽层等。

图 2. 左图: 褐色斑纹为电缆绝缘层在水分和电场同时作用下而产生的水树现象; 右图: 水分在电场作用下不断聚集在水树的缺陷部位, 导致绝缘层产生机械损伤, 从而影响电缆的正常运行。

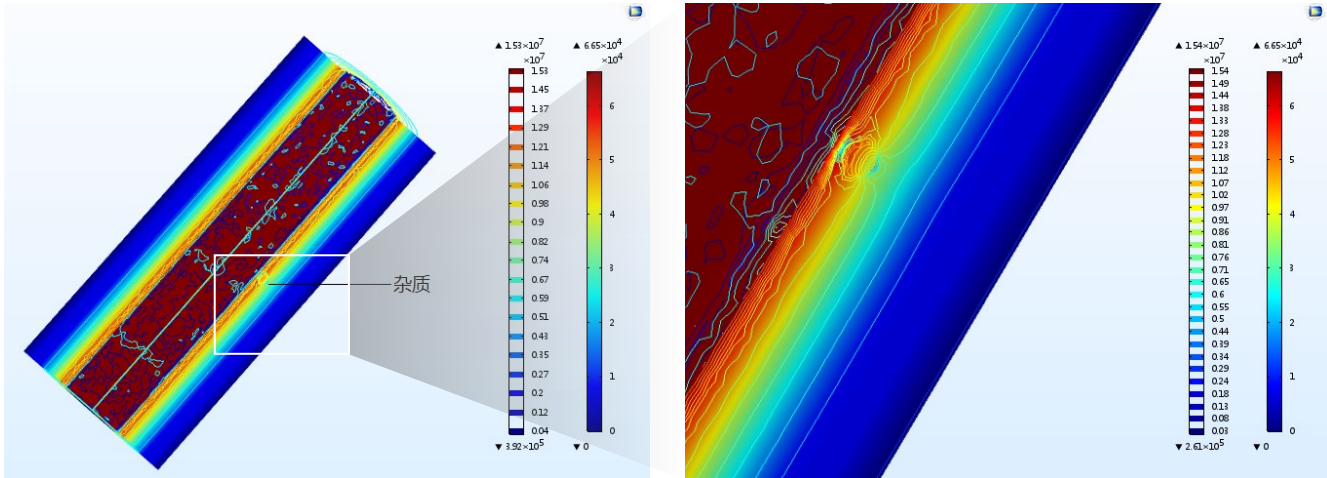


图 3. 内含杂质的电缆仿真模型，其中显示电势分布图及电场模等值线。左图：电缆轴向截面的电场模拟结果，杂质位于电缆的导电层与绝缘层交界位置；右图：杂质位置处电场的局部放大图，显示了该处的电场异常。

备进行测试以外，工程师还需要考虑影响线缆健康的不同因素，如线缆本身的结构和材料、线缆中的杂质、电压波动及运行环境等，从而对线缆进行全面的分析。

国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司（以下简称“武汉南瑞”）是中国国家电网总公司下属的一所研究机构。该机构主要从事智能电网输变电相关产品的研发、设计、制造和工程服务，其职责之一是为地方电力公司提供电力设备运行维护以及故障分析服务。武汉南瑞的工程师张静及其团队希望通过仿真模拟，可以有效地分析不同因素引起的电场变化，更好地反映电缆的健康状况，以及准确地分析故障原因。

⇒ 仿真提升电缆健康评估

电缆结构复杂，包含多层结构，其中线芯通常由几根或几组导线绞合而成，每组导线之间相互绝缘，线芯外包有高度绝缘的覆盖层（图 1）。当电缆的绝缘层中存在水分以及其他诱发因素（如杂质、突起或者空间电荷）时，绝缘材料在水分和电场的作用下就会形成一些微型通道，这些微通道多呈树状结构，所以被称为“水树”。在电缆正常工作时，水分子在电场的作用下会不断

聚集在缺陷部位，导致绝缘层的机械损伤，从而扩大绝缘体的损伤。在电力输送中，水树是诱发高压电缆损坏的主要因素（图 2）。

为了观察和理解上述因素对电缆健康状况的影响，武汉南瑞的工程师使用 COMSOL Multiphysics® 软件对电缆进

“仿真 App 在电缆维护工作中起到了关键的作用，不仅极大地提高了工作的效率，也给一线同事在电缆故障的判断上带来更多自信。”

——张静，国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司工程师

行模拟。“COMSOL Multiphysics 界面友好，软件内的预置接口使建模仿真过程变得十分简单。”张静说道。张静和她的仿真团队使用了软件中的“AC/DC 模块”和模块中预置的“电流”接口对电缆在工作状态下的电场情况进行了模

拟。电缆的故障模拟分两步完成：首先设置电缆各层材料的结构参数（半径）和电学属性（介电常数和导电率），计算电缆在通入高压电后的正常电场结果；然后分别加入杂质参数和水树层参数，通过计算就可以得到分别存在杂质或水树层，或者同时存在杂质和水树时的电场结果。“在评估电缆健康状况时，电缆各层的材料属性、水树和电缆中的杂质等因素都需要被考虑在内，而这些在 COMSOL 软件中都很容易实现。”张静解释道。

将正常情况下的电场结果与存在杂质或水树这两种缺陷的电场结果进行对比，工程师可以评估杂质和水树对电缆的影响。正常电缆的电场只有沿导线半径指向屏蔽层的电力线，此时的电场分布才是均匀的。当存在杂质时，如图 3 所示，电场的均匀性受到破坏。当局部的电势差高于绝缘层可承受的电压时，电缆绝缘层将会在短时间内被击穿。

“借助仿真来预测电缆在高压情况下的健康状况非常高效便捷。”张静说道，“通过对不同工况下的电缆电场进行模拟，我们可以快速评估由线缆中的缺陷引发的潜在风险，预测杂质和水树对线缆安全性能的影响。我们甚至可以

通过设置改变杂质的种类及其在电缆中的位置、水树的大小以及电学性能等，对线缆的各种情况进行全面分析。”

## ⇒ 开发电缆状态分析仿真 App

对于武汉南瑞的仿真工程师而言，使用 COMSOL Multiphysics 软件来模拟电缆在不同情况下的电场性能，以及预估电缆的健康状况变得十分简单和便捷。如果前线的故障检修人员也能使用仿真进行电缆的运行状态预测，无疑会简化故障检修的工作流程，提高工作效率。但是当电缆出现问题时，由于一线的故障检修人员缺少仿真专业技能的培训，通常难以基于实际情况使用仿真模型分析故障原因。当故障发生在较为偏远的地区时，调用电力专家进行现场勘查排除故障则需要花费几天甚至数周的时间。为使仿真模型能够为一线人员服务，降低使用要求，增加灵活性，张静工程师基于多物理场仿真模型，使用 COMSOL 软件自带的“App 开发器”，定制开发了专家系统仿真 App（图 4），从根本上解决了这一难题。使用此 App，一线的检修人员也能方便地使用仿真模拟帮助他们分析故障原因，只需修改几个参数，就能运行仿真分析，而无需预先了解底层模型设置。

“电缆线路状态分析专家系统”仿真 App（图 4）的用户界面友好简洁，用户可以直接输入不同的电缆参数，选择故障类型，即时调整仿真模型，直接计算并显示所需的结果。由于电缆设备的结构比较固定，一线故障检修人员只需针对故障的电缆线路先进行故障分类，然后在仿真 App 中选择已知的缺陷类型，输入实际数据，就可以很快得到电势和电场的报告，预估线缆的健康状况，从而判断是否需要对该电缆进行更换或维修。“仿真 App 在电缆维护工作中起到了关键的作用，不仅极大地提高了工作效率，也给一线同事在电缆故障的判断上带来更多自信。”张静说道。

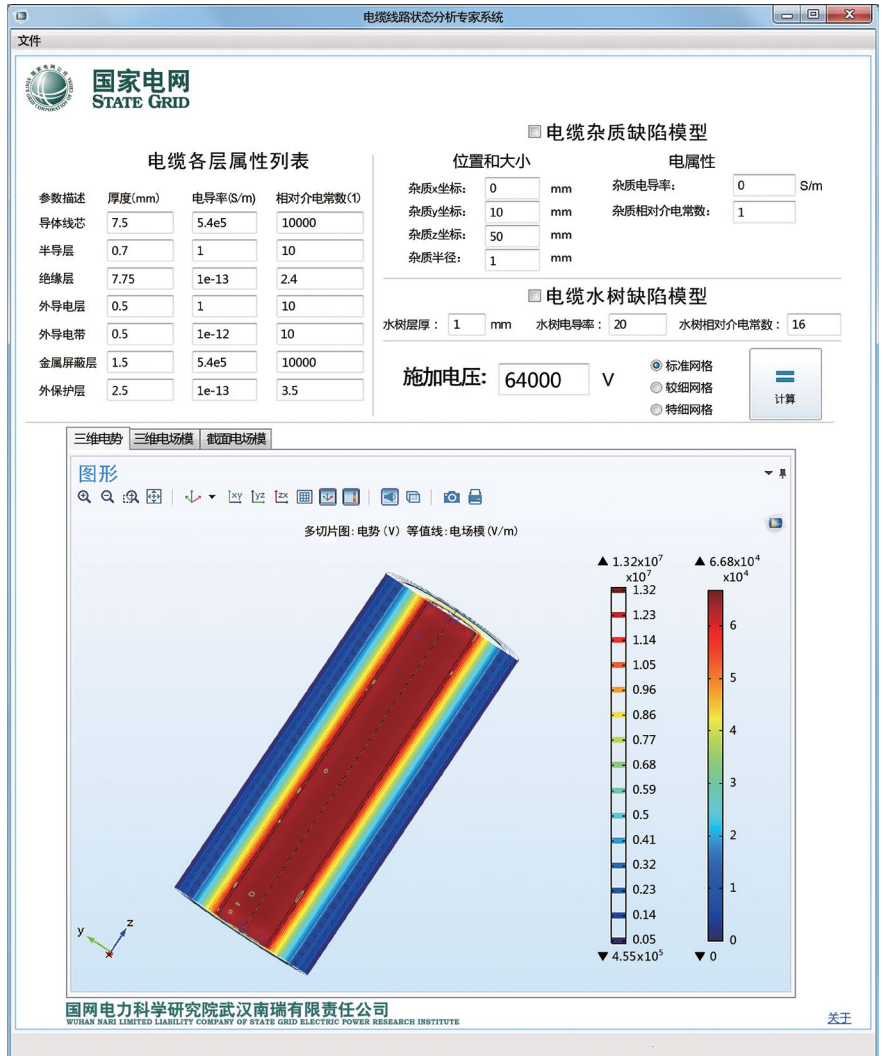
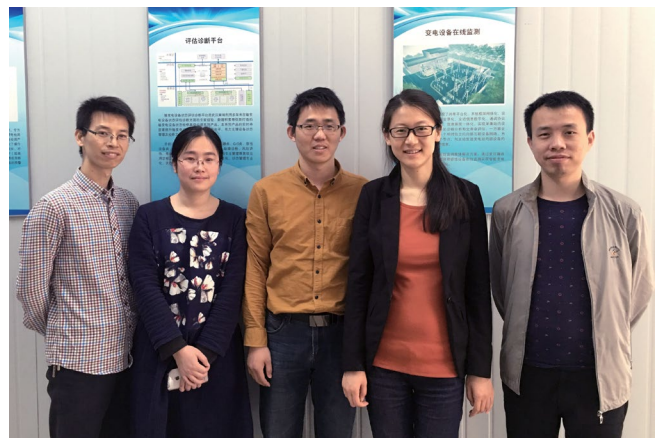


图 4. “电缆线路状态分析专家系统”仿真 App，用户可以修改电缆各层属性参数、杂质和水树参数，以及网格的尺寸等参数，从而评估电缆的性能。

目前，由武汉南瑞开发的“电缆线路状态分析专家系统”仿真 App 正服务于广西电网有限责任公司某下属单位，帮助电缆检修人员预判电缆故障，维护中国西南地区电网系统的正常运行。❖



武汉南瑞运检服务事业部的仿真研究团队(从左到右):陈钊、胡婷、房体友、张静、汪浩。

# 仿真研究推进纳米光刻工艺的升级

清华大学摩擦学国家重点实验室正使用数值仿真探索一种新型半导体光刻工艺——旋转式近场光刻技术。研究人员借助 COMSOL Multiphysics® 模拟了新型光刻技术中等离子飞行头的飞行过程, 并对其飞行的稳定性展开了研究, 最终设计出一款高性能的飞行头, 用于实现精准的纳米级加工。

作者 孟永钢, 胡跃强

**纳**米技术是指在纳米尺度（通常指 1~100 纳米）范围内, 对材料的性质和应用进行研究的新技术。此项技术的出现, 使人类对自然的认识和改造进入到了一个新的层次, 不仅对工业领域产生了革命性的影响, 同时也是科学技术发展水平的重要标志。如今, 纳米技术的应用已经深入人们的日常生活, 我们平时使用的计算机芯片以及各种电子产品的制造都离不开纳米技术。

## ⇒ 纳米光刻技术

纳米光刻技术是一种利用光刻手段在物体上制作纳米量级图形的加工方法, 目前是集成电路制造领域的主流纳米加工技术。虽然传统的光刻工艺可以满足一定的生产需求, 但它却存在着诸多局限性: 首先, 光学衍射效应会降低分辨率, 在一定程度上影响产品的质量; 其次, 较低的生产效率和高昂的生产成本也是制约相关产业发展的重要因素。

清华大学摩擦学国家重点实验室（以下简称“摩擦实验室”）是清华大学首批建成的国家重点实验室之一, 主要从事摩擦学理论与技术、机械表面科学与性能控制、生物摩擦学与生物机械、微纳制造理论与技术等方面的研究。目前, 摩擦实验室的研究人员正在借助仿真手段探索一种低成本、高效率的新型纳米光刻工艺。

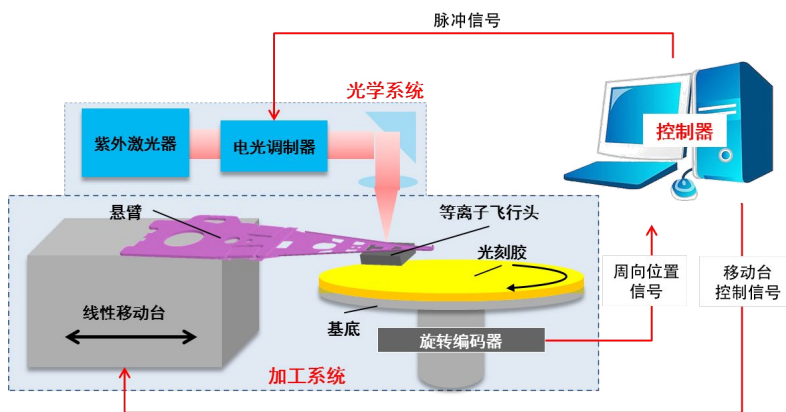


图 1. 旋转式近场光刻技术原理图。在主轴高速运转的条件下, 光刻头可以在光刻胶表面稳定飞行。

## ⇒ 旋转式近场光刻技术

在光学领域, 由于衍射现象的存在, 传统的光学系统很难突破半波长的成像分辨率。近年来, 为突破这一限制, 研究人员利用表面等离子共振能够产生场强热点 (hotspot) 的现象, 研发出了等离子体透镜, 以实现超高分辨率聚焦。然而, 这种超高分辨率成像和聚焦方法的工作距离很短, 仅适用于介质表面, 因此在实际应用中很难控制。为了能够稳定控制透镜及聚焦点, 摩擦实验室的研究人员基于硬盘驱动器的飞行原理和近场光学理论, 提出了一种名为旋转式近场光刻技术的新型光刻工艺。

硬盘在运行时, 磁头滑块会在盘片表面稳定飞行, 其飞行高度的高低取决

于盘片的旋转速度和磁头滑块的形状。通过将表面等离子体透镜集成在磁头滑块表面、并将超高分辨率的光刻胶涂于盘片表面, 当磁头在盘片表面稳定飞行时, 表面等离子体透镜即可对光刻胶进行曝光。由于表面等离子体透镜具有优异的聚光效应, 因此能够形成突破衍射极限的近场光斑, 进而实现超高分辨率、快速、无掩膜的纳米光刻加工。

图 1 为旋转式近场光刻技术的工作原理图。整个光刻系统由控制器、光学系统和加工系统三部分组成。控制器发出的脉冲信号可以控制光学系统中的各类光刻参数, 并通过加工系统中的线性移动台接收来自控制器的控制信号, 对等离子飞行头的位置进行精确控制。在

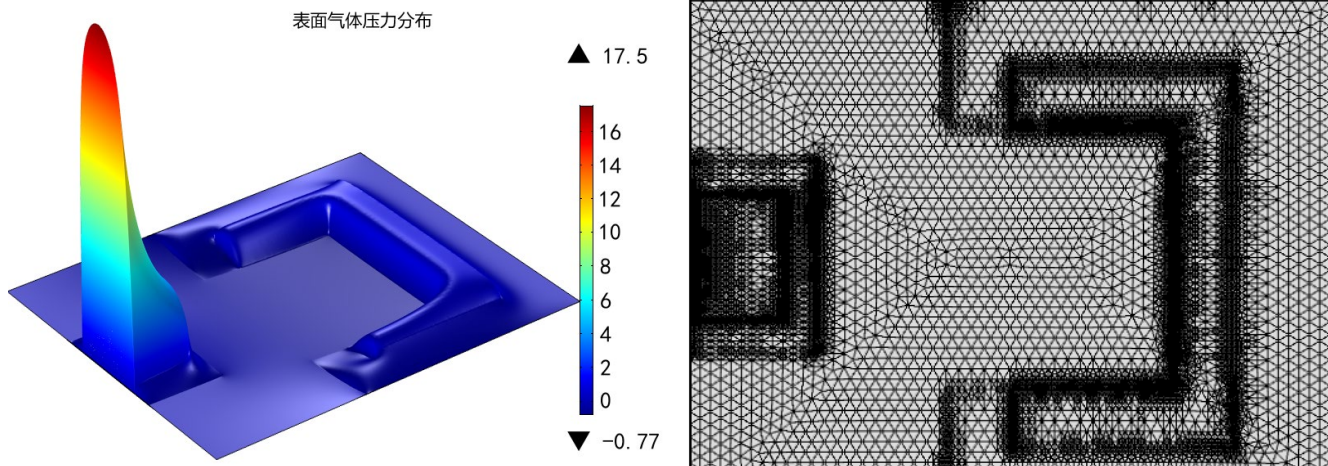


图 2. 左图:飞行头表面气体压力分布;右图:基于气体压力梯度计算出的自适应网格,可大幅节省模型的计算时间。

控制器的协调控制下,等离子飞行头可以在光刻胶表面稳定飞行。通过光学系统和加工系统完美的配合,从而实现高精度的纳米光刻加工。

在旋转式近场光刻技术的研发过程中,研究团队所面对的主要设计难点是如何实现等离子飞行头在 5~50 纳米的高度范围内稳定飞行。传统的方法是先制作出物理样机,然后通过反复的迭代测试对飞行头的设计进行修改。这种物理试验不仅需要制作大量成本高昂的样机,而且也很难直观地在纳米量级对飞行过程进行研究。因此,研究人员采用了 COMSOL Multiphysics® 软件来模拟等离子飞行头的飞行过程。

### ⇒ 在 COMSOL 软件中模拟飞行头的飞行过程

COMSOL Multiphysics® 强大的数值模拟功能在近场光刻系统的设计过程中发挥着重要的作用。软件的自定义方程功能,使计算过程和软件结果处理具有高度的灵活性,为等离子飞行头飞行过程的研究工作提供了极大的便利。

影响飞行头稳定性的因素有很多,其中重要的参数包括飞行头表面的气体

压力、与盘片间的接触力以及范德华力(又称分子间作用力)。由于飞行头与盘面的距离仅有几纳米到几十纳米,飞行头周边的气体也十分稀薄,因此需要研究人员建立一个飞行头在稀薄气体中飞行的物理模型,用于研究气体对飞行头的润滑作用,以及不同飞行参数对飞行平稳性的影响。为了在模型的求解过程中,实现求解精度和求解规模的良好平衡,模型采用了 COMSOL 软件的自适应网格剖分功能(图 2)。自适应网格剖分功能可以基于飞行头表面的气体压力分布自动调节不同区域的网格密度,帮助我们在保证求解精度的前提下,节省大量的计算时间。

为了计算在飞行过程中飞行头表面的压力分布,研究人员使用三个自由度的运动微分方程描述了飞行头的动态飞

行过程,并通过 COMSOL 软件的自定义方程功能建立了飞行头的瞬态计算模型,瞬态模型可以描述飞行头的起飞和受外界冲击等动态过程,因此可以准确地预测飞行头在实际飞行过程中的受力情况,从而提升飞行的稳定性。

### ⇒ 等离子飞行头的仿真设计

在提升飞行头飞行稳定性的设计过程中,所有设计步骤都是在 COMSOL Multiphysics 软件中完成的。由于无需针对每一个设计方案制作物理样机,从而大幅缩短了设计周期,同时节约了制作样机的费用。通过调整模型的参数,研究人员设计了一款具有良好静态和动态性能的飞行头,实现在 10 nm 的高度能够稳定飞行。研究人员依据优化结果对飞行头进行了加工,飞行头设计图和

“拥有强大计算能力的 COMSOL Multiphysics® 已成为摩擦实验室成员在研究工作中不可或缺的工具。而仿真 App 则进一步帮助实验室的全体研究人员在探索新型纳米加工技术的道路上披荆斩棘。”

——孟永钢,清华大学摩擦学国家重点实验室主任



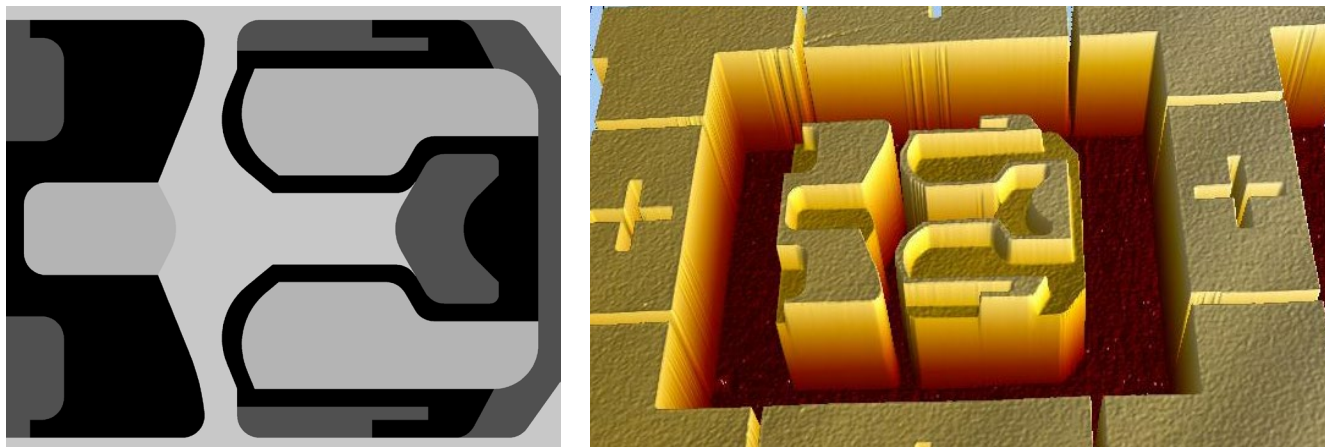


图 3. 飞行头的设计图和加工图对比。

加工图见图 3。

### ⇒ 仿真 App 让整个实验室受益于仿真研究

在项目的推进过程中，摩擦实验室的研究人员分工不同，只有少数成员从事仿真方面的工作。面对产品参数的每一次修改，设计人员都需要通过仿真人

员对模型进行修改，因此样机的设计速度受限于仿真人员的时间安排及工作负荷。为解决上述问题，研究团队使用软件中的“App 开发器”尝试开发了“稳定飞行姿态求解”仿真 App (图 4)。在操作界面直接输入飞行头形貌、空气压力等各类参数，仿真 App 就可以快速对飞行头的飞行稳定性进行评估。

仿真 App 让摩擦实验室所有的研究人员无需了解仿真模型的具体设置，也可以自行修改设计参数并运行仿真分析，从而评估不同飞行头设计的有效性。这极大地提高了研究工作的灵活性，同时增强了实验室各团队间的合作，从而大幅加快了飞行头的设计进程。

仿真 App 的另一个优势在于，新进入实验室的研究人员在参与研究工作时，无需先期学习大量的设计和仿真理论，便能够快速参与到研究项目中，从而大幅度降低了新成员的学习成本。

拥有强大计算能力的 COMSOL Multiphysics 已成为摩擦实验室研究工作中不可或缺的工具。而仿真 App 则进一步帮助实验室的全体研究人员在探索新型纳米加工技术的道路上披荆斩棘。❖

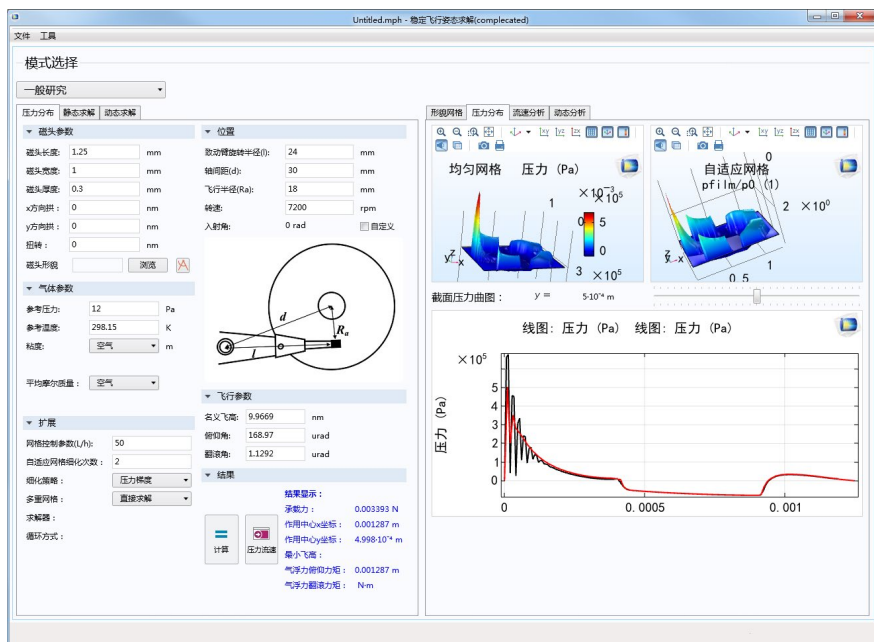
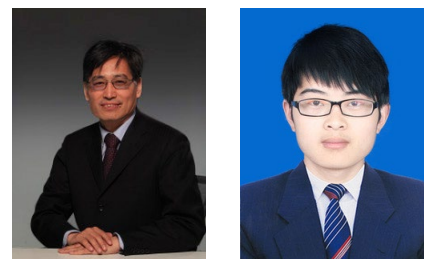


图 4. “稳定飞行姿态求解”仿真 App。用户可在界面中输入各类设计参数，快速评估飞行头的飞行稳定性。



左图：孟永钢教授，清华大学摩擦学国家重点实验室主任；右图：胡跃强，清华大学摩擦学国家重点实验室博士研究生。

# 多物理场仿真提升 飞机的雷电防护性能

飞机遭受雷击时, 其内部的机载设备中会产生感应电流或感应电压, 进而可能导致机载设备因过高的电流而损坏。西安爱邦雷电与电磁环境实验室的研发人员借助多物理场仿真, 准确模拟及预测了雷电对飞机的影响, 并且开发出了多款雷电防护产品, 有效提升了飞机的雷电防护性能。

作者 秦宇航

雷电, 是一种雄伟壮丽却又令人敬畏的自然现象, 它在带来视觉震撼的同时, 也会造成巨大的危害。中西方古代神话中均有大量篇幅描述雷电这一神秘的自然现象。直到 1752 年, 富兰克林证实了雷电是一种由带电云层产生的放电现象。此后, 围绕雷电防护的科学研究便从未间断。

雷电的产生主要有云内放电、云间放电、云地放电这三种形式。其中超过 50% 的雷电由云内放电形成。飞机在飞行过程中遭受到的雷击, 大部分由云内放电造成 (图 1 左图)。虽然飞机遭受云地放电的几率较小, 但由于云地放电 (图 1 右图) 的强度大于其他放电形式, 所以云地放电的数据通常被作为雷电防护的设计依据。

西安爱邦电磁技术有限责任公司 (以下简称“爱邦电磁”) 是中国领先的雷电防护系统解决方案提供商。其雷电与电磁环境实验室 (以下简称“雷电实验室”) 作为独立的检测机构, 可为航空、航天、船舶、风电等领域的客户提供雷电防护检测和产品设计等服务。目前, 爱邦电磁的研究人员将物理试验与多物理场仿真分析相结合, 用于提升飞机雷电防护问题的分析及预测能力。

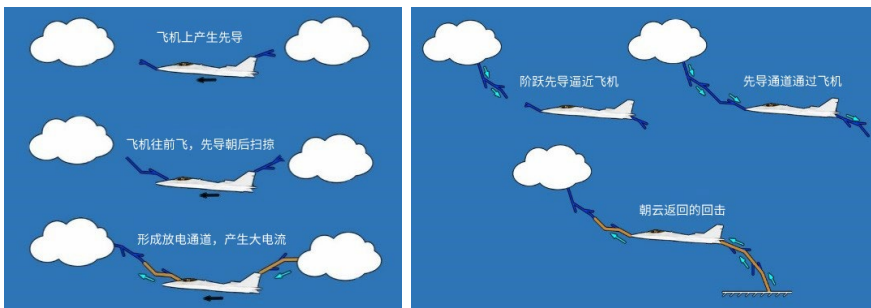


图 1. 飞机遭受雷击过程的示意图。左图: 云内放电 (飞机诱发雷电); 右图: 云地放电 (飞机拦截雷电)。

## ⇒ 飞机的雷电初始附着区域

雷击可能对飞机造成多种伤害。首先, 雷电可以直接对飞机的结构产生破坏。当雷击发生在飞机的非导电材料上时, 因能量无法释放而造成炸裂。此外, 雷电产生的空间电磁场会在飞机内部的电缆、电子器件内产生感应电流, 从而导致电子设备的损坏。当飞机遭受雷击时, 会因时变电流的集肤效应而引起缝隙打火现象, 若打火发生在油箱和燃油系统中, 就很可能造成难以想象的后果。因此, 一套可靠的雷电防护系统, 对于飞机来说, 是不可或缺的安全保障。

当飞机遭遇雷击时, 初始雷击放电

“COMSOL Multiphysics® 在试验、研发和方案设计等方面帮助我们解决了很多问题, 不仅有效减少了试验次数、缩短了研发周期, 还让我们可以更深入地理解和优化防雷方案的设计。”

——段雁超, 西安爱邦电磁技术有限责任公司工程师

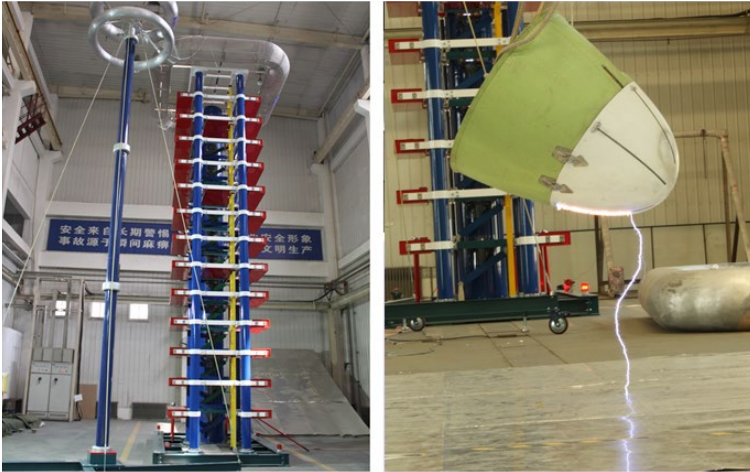


图 2. 左图:爱邦电磁雷电实验室 2600 kV 冲击电压发生器;右图:机头雷达罩模型的雷击实验。

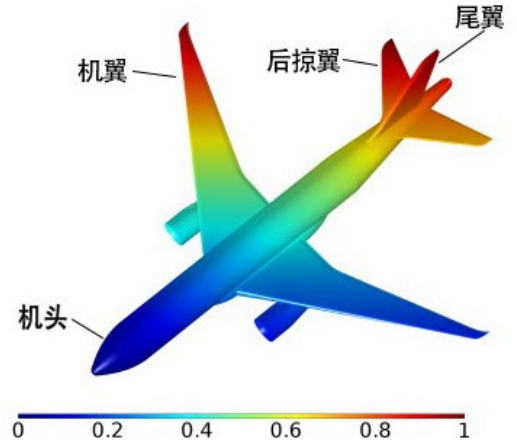


图 4. 飞机雷电的初始附着点仿真结果。

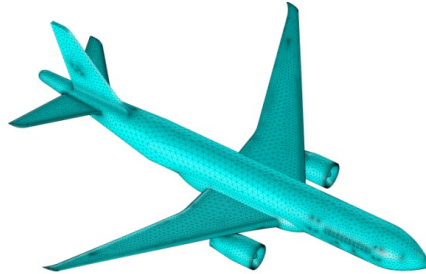
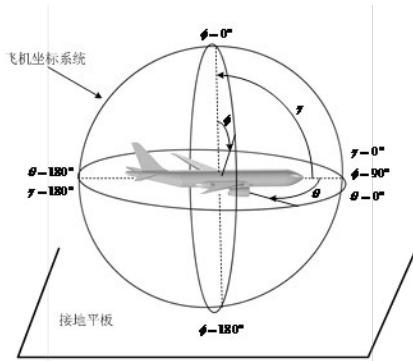


图 3. 左图:飞机仿真坐标系;右图:飞机网格设计。

非常容易附着在雷电的流入和流出部位,这种部位被称为雷电初始附着区域。由于雷电会在此区域附着,并对飞机外壳和机载设备产生严重损害,因此找到雷电的初始附着区域,并采取有效的防护措施是飞机雷电防护的重点。通常的判断飞机雷电初始附着情况的方法是制作等比例缩小的飞机模型,然后采用物理实验的方法来完成雷击测试,进而根据测试数据考察雷电的初始附着情况。

例如,机头雷达罩多数为雷电初始附着区域,需要重点防护,防护后的机头雷达罩也需要做相应的实验,进行性能测试。图 2 中左图为爱邦电磁雷电实

验室的雷电测试设备,右图显示对机头雷达罩模型进行雷击实验的过程。

### ⇒ 使用仿真探究机身电流分布

物理雷击测试的方式虽然直观,但成本却十分高昂。在为客户提供雷电测试服务前,首先需要客户制作价格昂贵的飞机模型,而模型往往因为在测试后受损而无法重复使用。针对此问题,爱邦雷电实验室的研究人员希望通过仿真分析来完成对飞机雷电初始附着点的考察。

研究人员在 COMSOL Multiphysics® 软件中建立了飞机的几何模型,并创建

了飞机的仿真计算坐标系,用于考察飞机不同的飞行姿态(图 3 左图)。研究人员随后对飞机模型的整体进行了网格剖分,选用了稳定性较好的自由四面体为基本网格单元对模型进行网格剖分。飞机模型的网格见图 3 右图。

在完成了模型创建和网格剖分后,研究人员对飞机遭受雷击后表面的电势分布情况进行了仿真分析。图 4 显示了当飞机处于左旋下降时飞机表面的归一化电势分布情况,1 表示电势最高,0 表示电势最低。在飞机的飞行过程中,雷电将从飞机表面上高电势的部位流入,并从电势较低的部位流出。当飞机处于左旋下降时,电势在尾翼尖、后掠翼尖或右翼尖较高,最低电势位于飞机头部及左翼。因此尾翼尖、后掠翼尖和机翼尖均可能成为雷电的流入点,而机头部位则成为雷电的流出点。因此,尾翼和机头部位便是左旋下降时雷电的初始附着区域。

“飞机遭受雷击的过程是一个典型的多物理场问题,涉及电场、磁场、传热、力学等多种物理现象。”段雁超工程师说道,“COMSOL Multiphysics 软件强大的多物理场建模分析能力,以及后

处理功能，让我们可以非常方便地研究雷电对飞机性能的影响。”

在找到了飞机在不同飞行姿态下的雷电初始附着区域后，爱邦电磁的工程师便开始着手针对此区域进行雷电防护方案设计。飞机的机头布置有雷达、天线等重要的机载设备，极易受到雷电的影响，因此机头是飞机雷电防护中最为重要的部位。

### ⇒ 针对初始附着区域的雷电防护

机头布置有雷达等通讯设备，当此区域附着雷电时，雷电造成的电磁感应、热效应会对飞机造成巨大的危害，严重时甚至可能影响飞机的安全飞行。

为防止雷电影响雷达和天线等通讯设备，需要及时将雷电流引走，通常采用的方式是布置雷电导流条（图 5 左图）。导流条会形成一条低阻通道，因此电荷可沿导流条导走，从而避免下方的设备因飞机表面的过量电荷而损坏。

导流条的位置会影响雷电电流的导出效率，为了找到合理的布局，研究人员为布置了导流条的雷达罩建立了仿真模型，模拟了雷电环境下的电势分布（图 5 右图），找到了导流条排布的最佳位置。

由于目前飞机的表面材料通常采用复合材料，当飞机遭受雷击时，非常容易产生热损伤，因此雷电的热效应是另一个需要重点考察的因素。爱邦电磁的研究人员研发了高精度延性雷电防护金属网，将其布置在雷击部位。通过物理实验和仿真分析可以看出，金属网具有非常优秀的热损伤防护性能，可以极大地提升雷击区域的安全性（图 6）。

### ⇒ 拓展多物理场仿真在雷电防护领域的应用

借助多物理场仿真的强大分析能力，爱邦电磁不仅可以快速为客户提供雷电测试服务，同时开发出了一系列雷电防护产品，例如新型雷电导流条、雷

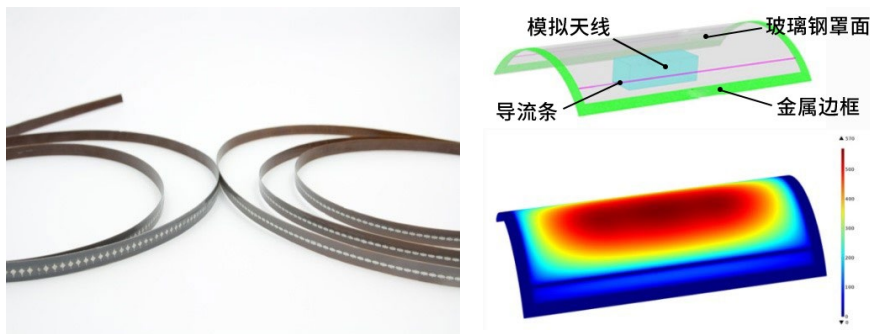


图 5. 左图:爱邦电磁研发的雷电导流条;右图:带有导流条的雷达罩及电势分布的仿真结果。

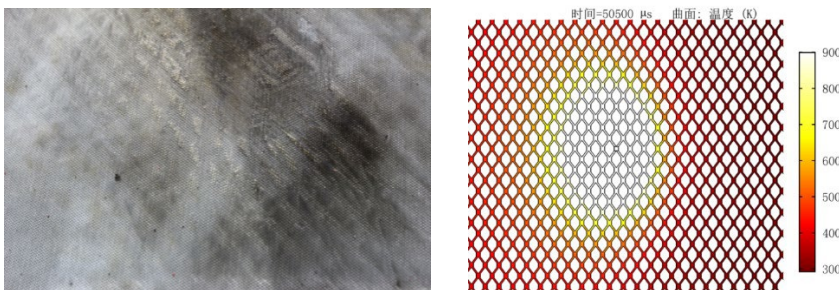


图 6. 左图:高精度延性雷电防护金属网热损伤实验测试;右图:仿真测试。

电防护金属网、雷电抑制器等。其中新型片段式雷电导流条以其重量轻、对雷达天线信号影响小等优点受到用户的好评。爱邦电磁还将多物理场仿真技术应用到了风力发电机等更多领域，用于提升不同设备的雷电防护性能。

“界面友好、结果准确、功能强大”是西安爱邦电磁的段雁超工程师对 COMSOL Multiphysics 的评价，“COMSOL Multiphysics 在试验、研发和方案设计等

方面帮助我们解决了很多问题，不仅有效减少了试验次数、缩短了研发周期，还让我们可以更深入地理解和优化防雷方案的设计。”爱邦电磁希望在未来，可以开发出性能更加完善的雷电防护系统，为客户抵御雷电带来的危害。❖



西安爱邦电磁技术有限责任公司雷电与电磁环境实验室研发团队。从左到右依次为熊秀（技术总监）、郝娜娜、周家东、杜鸣心、何征、段雁超。

# 构建更安全的锂离子电池热管理系统

为应对锂离子电池的安全性问题, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室的研究人员使用 COMSOL 软件构建了锂离子电池热管理系统, 提升了锂离子电池的安全性。

作者 贾茹



图 1. 手机电池发生燃烧。

**锂**离子电池因其重量轻、能量密度高、无污染等特点, 成为了电子产品、交通运输、航空航天等各领域中最广泛的电池类型。然而锂离子电池在充放电过程中若使用不当, 可能会引发发热失控, 进而发生燃烧、爆炸等严重的安全事故 (图 1)。因此, 锂离子电池热安全成为了电池行业的研究热点。

作为中国唯一的火灾科学基础和應用基础研究的国家级重点研究机构, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室 (以下简称“火灾实验室”) 使用 COMSOL® 软件创建了锂离子电池的电化学-热耦合模型, 并根据仿真结果研发出了一种用于锂离子电池系统散热及防止热失控传播的复合板, 大幅提升了锂离子电池的热安全性能。

## ⇒ 锂离子电池产热规律的仿真及实验分析

许多电池安全事故都是由电池短路引起的。当电池短路时, 过大的电流会在电池内部产生大量的热量, 导致电池的温度急剧上升。过高的温度会引发电池内部严重的热失控, 造成电池燃烧, 甚至爆炸。因此, 对电池内部热量产生过程的分析是锂电池安全性研究中十分重要的部分。为了能够对电池 (组) 进行有效的热管理, 提高电池的安全性, 火灾实验室的研究人员选取了商用的钛酸锂软包电池作为实验对象, 通过实验和仿真两种方法对锂离子电池循环充放电的产热过程和热量分布进行了研究。

研究人员首先使用 COMSOL 多物理场仿真软件建立了电池的三维电化学模

型, 模型耦合了电场和温度场, 可用于探究电池内部及表面的温度变化。为了验证模型的准确性, 研究人员对电池表面的温度进行了实际测量。研究人员将锂电池放置到绝热加量量热仪 (ARC) 中, 然后利用充放电循环仪对电池进行循环充放电, 并用热电偶记录电池表面的温度变化。通过比较仿真和测量得到的电池表面温度数据, 研究人员可以深入了解模型参数设置的合理性。

图 2 显示了使用仿真及实验方法得出的锂离子电池温升曲线, 实线为绝热条件下的实验测试结果, 虚线为无冷却条件下的仿真结果。在隔绝热量交换的条件下, 当电池以 1.0 C (C 为充放电倍率, 用于描述相对于电池额定容量的充放电速率) 进行充放电循环时, 电池温升的仿

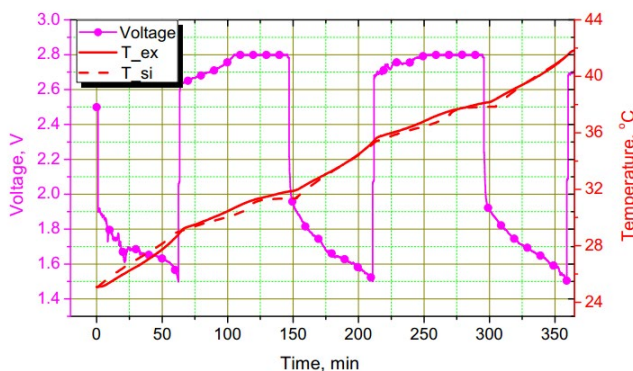


图 2. 绝热 1.0 C 充放电循环条件下锂离子电池温升的实验值与模拟值对比图。<sup>1</sup>

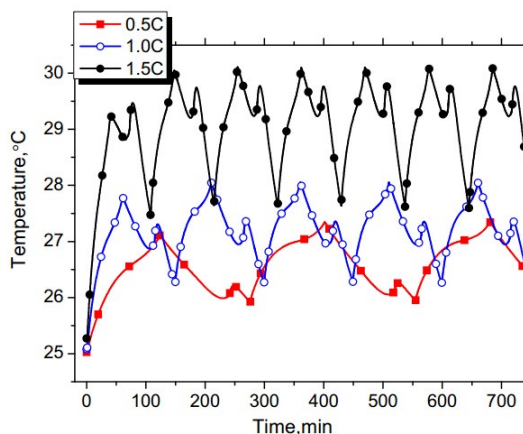


图 3. 自然对流条件下不同充放电倍率时电池温升的对比。<sup>1</sup>

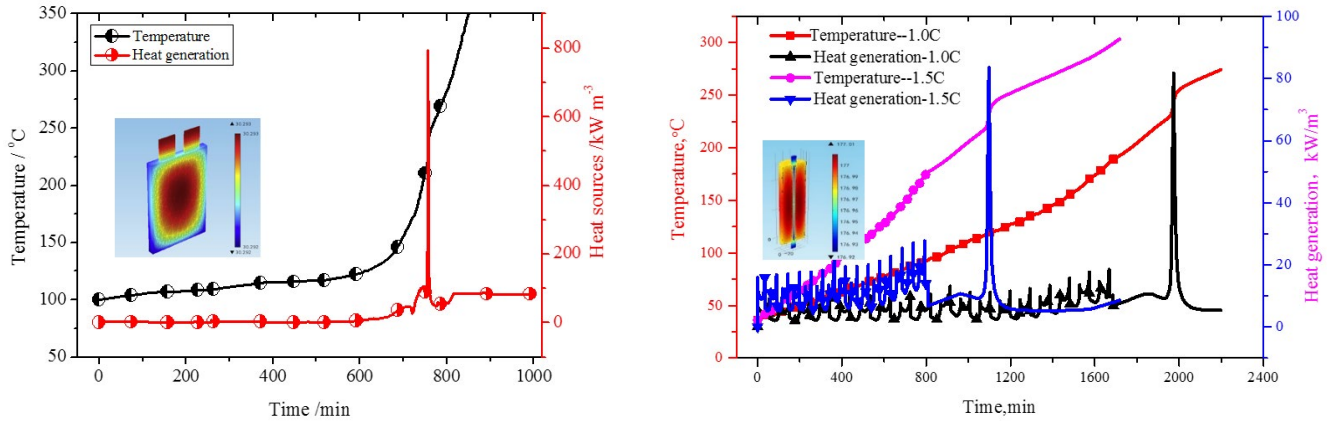


图 4. 左图:1 Ah 钛酸锂软包电池的热失控过程; 右图:50 Ah 钛酸锂电池在不同充放电倍率下的热失控过程。<sup>2-3</sup>

真结果与实验数据完美契合,很好地模拟了电池的产热过程,为后续电池热失控的研究提供了基础。

研究人员接着对自然对流条件下不同充放电倍率时电池的温升进行了研究,自然对流条件下不同充放电倍率时电池温升的对比见图 3。可以看出,随着电池充放电倍率的增加,电池的温升明显增大。这主要是因为电化学反应产热与焦耳热呈正比,并与电流的平方呈正比。研究人员同时对充放电循环中产生热量最高的阶段进行了分析。从温度变化曲线可以看出,电池出现了两个温度峰:一个温度峰对应的是放电过程和充电过程之间的转换阶段,主要是因为放电阶段产热速率大于充电阶段;另一个温度峰对应的是

恒压充电末期,由于负极嵌锂接近饱和,内阻增大,产热更多。

### ⇒ 锂离子电池热失控分析

电池在实际热失控过程中,由于温度过高会产生很多副反应,而这些副反应的产热是热失控过程后期的主要热源,但现有的很多热失控模型并未考虑到这部分化学反应产热。研究团队综合考虑了不同荷电状态 (state of charge, 简称 SOC) 下电池系统可能的反应特性和产热特性,将其耦合到电池的热平衡方程中,并对一维电化学模型和三维热模型进行联合,建立了耦合化学反应热的热失控模型。

研究人员在 COMSOL 软件中模拟

了电池发生热失控的过程,得到了电池内部温度变化历程、电池发生热失控的时刻等参数。图 4 中的左图和右图分别为 1 Ah 和 50 Ah 钛酸锂电池的热失控过程。对比两个具有不同容量的电池,可以发现两者之间的相似之处在于,当电池内的温度上升至隔膜熔断温度 170 °C 左右时,电池发生内短路,内部的材料发生了化学反应,短时间内突然释放出大量的热从而引发热失控。在绝热工况下,电池温度随着充放电循环次数的增加而升高。热失控发生时,电池内部的中间部位温度最高。随着充放电电流的增加,电池产热速率增大。相比于没有考虑化学反应产热的模型,考虑反应产热的模型引发热失控的时刻明显提前,热失控的危

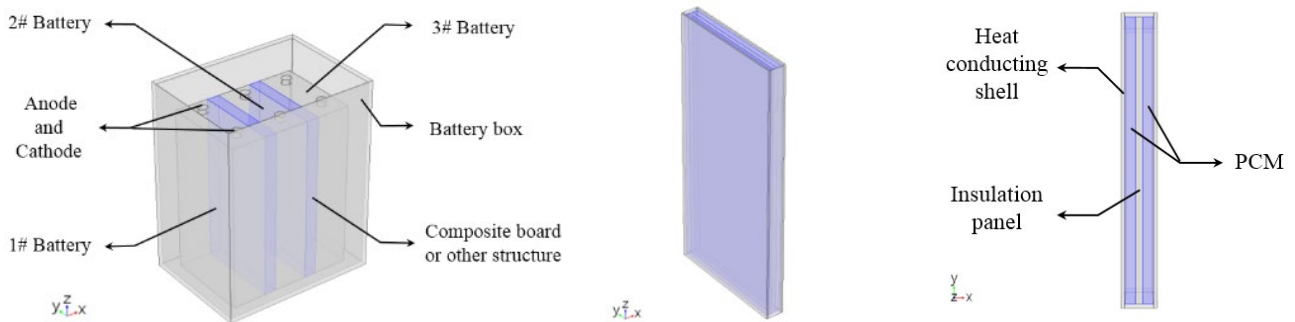


图 5. 左图:基于复合板的电池热管理系统结构图; 中图:复合板结构立体图; 右图:复合板结构俯视图。<sup>4</sup> 图注: battery: 电池; anode and cathode: 正极和负极; battery box: 电池箱; composite board or other structure: 复合板或其他结构; heat conducting shell: 导热壳; insulation panel: 隔热板; PCM: 相变材料

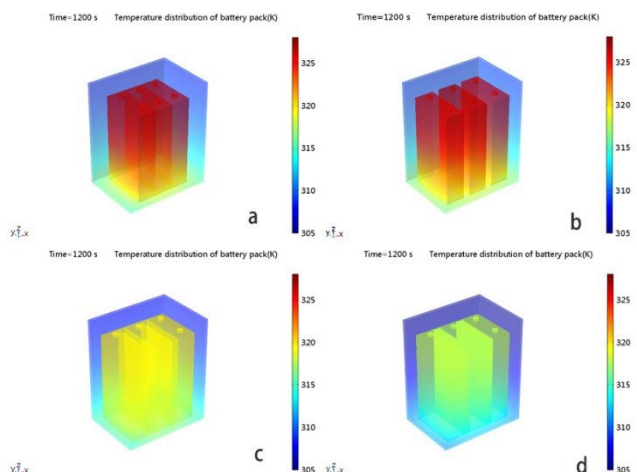


图 6. 3.0 C 放电完成后电池组的温度分布图。a: 电池间紧密贴合; b: 电池间空气间隔; c: 电池间有散热板; d: 电池间有复合板。<sup>4</sup>

险也更大。

### ⇒ 锂离子电池热管理系统

电池在使用过程中产生的热量如果不能及时移除, 将会导致严重的后果。因此, 设计人员需要使用热管理系统来控制电池组的温度。锂离子电池热管理系统的主要目的是保证电池处于最佳的工作温度范围以及保证电池组中各部位的温度均匀。设计人员通常用两个参数来衡量热管理系统是否有效, 一个是电池组的最高温度, 另一个是电池组内的最大温差。电池组中包含失控阻隔, 用于防止连锁热失控。增加阻隔措施, 会导致系统散热效率降低, 引起电池温度分布不均; 而降低隔离措施可增强电池间的散热效率, 但会增强热失控的传播。因此, 设计新型的热管理系统需要解决电池热失控阻隔与系统散热之间的矛盾, 使两者能够协同作用, 兼顾电池组的散热能力和热失控的阻隔能力。

针对此问题, 火灾实验室的研究团队提出了一种基于复合板结构的电池热管理系统。复合板由导热壳、隔热板、相变材料组成, 呈现三明治结构, 如图 5 所示。外面的导热壳能将单体电池产生的热

量转移到相变材料和环境中, 提高了电池组的散热能力; 内部填充的相变材料能吸收大量热量, 保证电池在正常温度范围之内工作, 并极大地提高了电池组温度的均一性; 中间的隔离板能阻止热量直接穿过复合板, 可以有效隔离热失控单体电池产生的热量, 使得电池的热失控局限在单一电池内, 从而防止电池组发生连锁热失控。

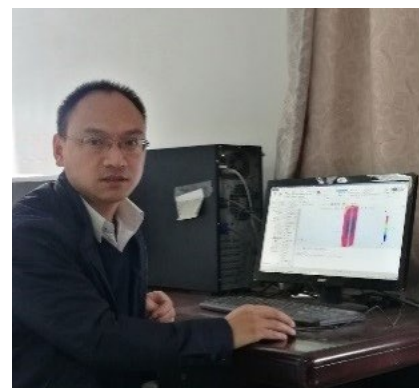
研究团队随后对电池间不同阻隔材料的影响进行了研究, 模拟了正常工况下电池组间无阻隔, 及不同阻隔方式(空气、散热板、复合板)下的温度分布(图 6)。可以看出, 使用了复合板热管理系统的电池的最高温度有了显著降低(9 °C 左右), 温度均一性也有了明显提高。通过进一步仿真分析, 研究人员发现该结构还能够延长热失控的扩散时间, 从而降低热失控的风险。

由仿真分析结果可以看出, 火灾实验室提出的复合板热管理系统能够提高电池组的散热能力及电池组温度的均一性, 同时还能够有效阻隔热失控传播, 从而提高电池组的安全性。目前该研究成果已获得中国国家专利。

火灾实验室锂离子电池热管理研究团队负责人王青松表示: “COMSOL 软件为我们的研究带来了极大的便利, 当有新的想法时, 可以直接进行建模仿真, 通过模拟结果初步对设计进行分析, 不断进行调整优化, 待设计想法较为成熟后, 可以通过实验进行进一步验证进而推广使用。这种方式不仅大幅加快了研究进度, 同时由于无需购买材料或者搭建实验台, 还节省了大量的科研经费。COMSOL 软件已经成了我们研究中不可或缺的工具, 帮助我们获得了丰硕的研究成果。” ❖

### 参考文献

1. Qingsong Wang\*, Qiujuan Sun, Ping Ping, Jinhua Sun, Zijing Lin. Heat Transfer in the Dynamic Cycling of Lithium-titanate Batteries, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 93 (2016) 896–905.
2. Man Chen, Qiujuan Sun, Yongqi Li, Ke Wu, Bangjin Liu, Peng Peng, Qingsong Wang\*. A Thermal Runaway Simulation on a Lithium Titanate Battery and the Battery Module, *Energies* 8(1) (2015) 490–500.
3. Qiujuan Sun, Qingsong Wang\*, Xuejuan Zhao, Jinhua Sun, Zijing Lin. Numerical study on lithium titanate battery thermal response under adiabatic condition, *Energy Conversion and Management* 92 (2015) 184–193.
4. Jiajia Yan, Qingsong Wang\*, Ke Li, Jinhua Sun. Numerical study on the thermal performance of a composite board in battery thermal management system. *Applied Thermal Engineering* 106 (2016) 131–140.



中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室负责人王青松副教授。

# 太阳能热发电中的仿真应用

北京有色金属研究总院使用多物理场仿真技术优化太阳能热发电中的真空集热管设计,不仅提高了集热管的太阳光吸收率,同时延长了其使用寿命。仿真技术的应用缩短了产品的研发周期并降低了成本,从而加快了新产品投入市场的速度。

作者 郑永生

太阳能热的使用是一种新兴的可再生能源利用技术,这项技术由于其转换效率高、价格低廉而被广泛应用,也是迄今为止太阳能使用中最为成熟的技术之一。尤其是太阳能热发电技术,具有兼容性强、对电网冲击小、性价比高、发电成本低、可存储和可调度等优点,在近年来发展迅速。

## ⇒ 聚焦型太阳能热发电

太阳能热发电也叫聚焦型太阳能热发电。与传统发电站不一样,它们通过聚集太阳辐射的方式来获得热能,并将热能转化成高温蒸汽驱动蒸汽轮机来发电。当前的太阳能热发电按照太阳能采集方式可划分为太阳能槽式发电、太阳能塔式热发电、太阳能碟式热发电等。

槽式发电是最早实现商业化的太阳能热发电系统。抛物面槽式热发电系统(见图1)利用抛物柱面槽式反射镜将阳光聚焦到管状的接收器上,并将管内的传热工质加热产生蒸汽,推动常规汽轮机发电。该类系统采用线聚焦方式,利用抛物面型反射镜将光线汇聚到管状集热器——真空集热管上,加热集热管内循环流动的导热工质(通常为水、油或熔盐)。导热工质自吸收管一端流

入,接收汇聚太阳光辐射能量,从吸收管另一端流出,在流入到流出的过程中,导热工质被加热。系统内集成的光线追踪器可以探测太阳的方向,从而使反射镜和集热管在光线追踪系统的控制下,实时转动跟踪太阳东升西落,以实现最大的太阳光接收率。

太阳能热发电技术虽然拥有良好的商业化发展前景,然而目前太阳能热发电设备的结构设计和研发完全依赖于物理实验,不仅成本高、实验周期长,同时不利于快速占据市场先机和提升附加效益。为在降低试验成本的同时加快产品的研发速度,北京有色金属研究总院(以下简称“有研总院”)的太阳能光热技术团队对聚光集热系统进行了仿真优化。

有研总院的太阳能光热技术团队专注于热发电高温真空集热系统的研究,不仅利用多物理场仿真方法辅助进行系统结构设计、选材校核、可靠性评估、使用性能预测,还关注新产品研发所涉及的关键基础问题的原始创新,使产品的改进、更新更具可持续性。随着技术集约要求的日益提高和真空集热系统的不断增大,系统的传热优化设计越来越困难,这已成为制约热发电技术突破的关键因素。

## ⇒ 模拟太阳能聚光过程

由于太阳能热发电系统槽面汇聚的太阳光主要集中于集热管的下半面,上半面接收的会聚太阳光较少,因此集热管上的光辐照强度沿管轴向呈非对称性分布。如何有效地将反射镜接收的太阳光能传递到导热介质中,就成了提升太阳光热发电系统效率的重要因素。有研

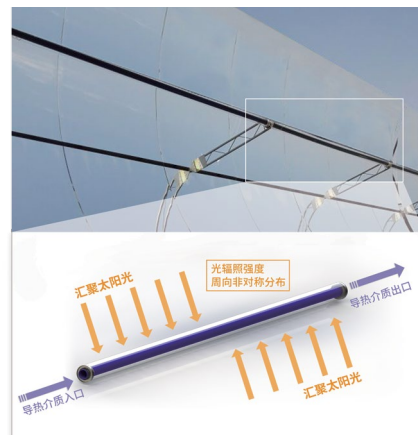


图1. 上图:槽式太阳能聚光集热系统,包括抛物面型反光镜、接收装置真空集热管和光线追踪机构;下图:聚光集热系统关键元器件——真空集热管,抛物面型反光镜将太阳光汇聚至真空集热管,导热介质从真空集热管的一端流入,吸收太阳辐射产生的热能,然后从另一端流出,从而将热能传递到导热介质。



总院的太阳能光热技术团队致力于太阳能热发电技术中高温集热器件与系统的建设,工程师们希望基于实际工况,对槽式光热系统进行光线聚焦分析,通过优化聚光器槽面的几何结构设计,实现太阳能利用的最大化。

有研总院的工程师赵旭山博士借助 COMSOL Multiphysics® 软件,研究槽面几何参数对能流聚光比和光能密度周向不均匀分布的影响规律。同时,考虑太阳光入射角、非平行光到达地球的张角、反射镜表面粗糙度造成的漫反射、临边昏暗等,设定不同的几何结构(镜面开口宽度、高度、开口半角)、材料属性、太阳辐照强度以及其他边界条件,进行了模拟计算。模拟所得的槽式聚光器的聚光能量和能流密度结果如图 2 所示,通过对聚光器结构的优化,可以将太阳光能量集中于集热管,从而提高集热管的能量吸收率。

通过 COMSOL 软件的“射线追踪”模块进行射线追踪仿真,可以很直观地得到集热管接收到的光能密度,其与太阳辐照强度的比值即为此槽式系统的聚光比。根据所需的聚光比,可以方便地进行聚光器槽面几何结构的设计,以实

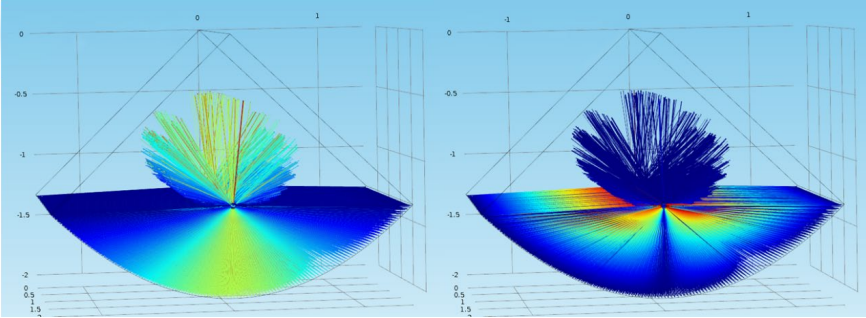


图 2. 左图: 槽式聚光器既定光程后各局部接收到的太阳光能量分布,太阳光通过槽面的反射汇聚至集热管上;右图: 聚光器光能密度分布,在集热管及其两侧位置能流密度较大。

现聚光效率的最大化。此外,还可以获得集热管周向光能密度的非对称分布和轴向聚焦光斑的不均匀分布,这些结果可为集热管的结构优化提供基础数据。

COMSOL Multiphysics 软件内置了功能强大、简便易用、丰富灵活的参数交互接口,用户可以很方便地进行入射线方向、非平行太阳入射角、镜表面粗糙度、射线密度等设定,从而充分评估不同物理效应间的相干性。“从各方面来看,它都不愧是一款功能全面、简单易用的有限元分析工具。”有研总院高级工程师赵旭山博士说道。

⇒ 优化真空集热管结构

面槽式太阳能热发电系统的集热管两端支持固定于聚光器上。当集热管接收会聚太阳光辐照能量后,内部温度最高可达 550 °C,由于集热管本身自重和热应力,会产生一定的形变。同时,在这个过程中,集热管外表面与外部环境通过热辐射和对流两种方式进行热交换。为了对集热管在服役时的高温状况下的温度和应力进行准确的预测,设计出最佳的真空集热管结构,赵旭山博士借助 COMSOL Multiphysics 的“传热模块”和“CFD 模块”模拟了集热管工作过程中的传热、传质。在模拟过程中,赵旭山博士同时考虑到了射线追踪模拟所得的集热管周向能流密度不均匀分布,计算出集

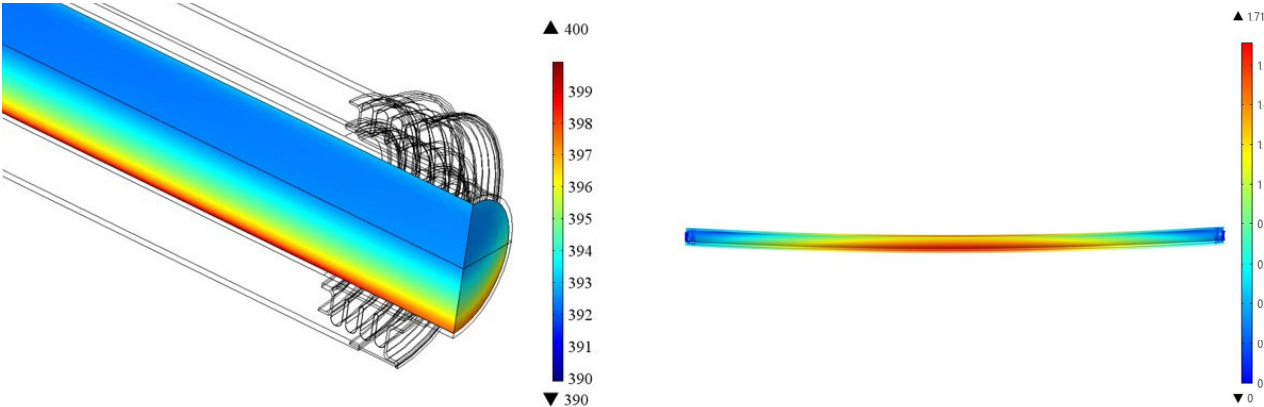


图 3. 真空集热管实际工况条件下的动态特性分析。左图:集热管内部导热流体的温度分布,由于会聚光线集中在下半面,呈现温度分层;右图:集热管应力应变分布情况,应力主要集中在集热管的中段底部。

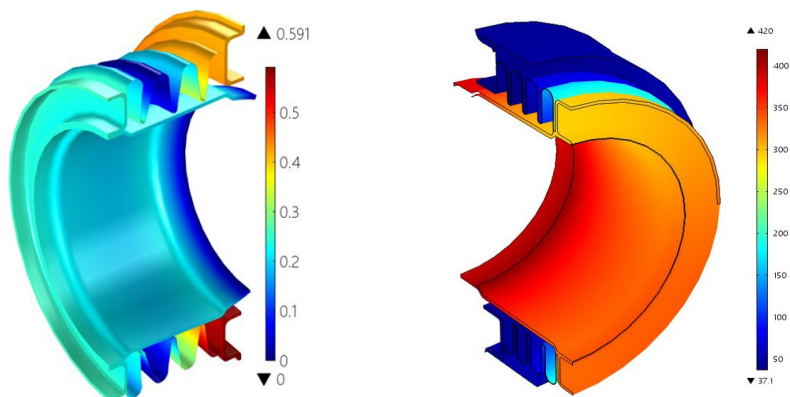


图 4. 真空集热管热膨胀补偿组件——波纹管的变形和温度分布仿真结果。左图为波纹管的应力应变计算结果，波纹管不同位置的应变情况不同，顶端应变最大；右图为波纹管的温度分布结果，波纹管的内壁温度较高，更容易产生热疲劳。

热管内的温度分布、导热工质的流速，以及集热管的应力分布。

有研总院的技术团队利用仿真计算发现集热管的底部温度较高，这与他们的测量结果一致；而集热管的中间段底部位置由于自重和热应力作用而成为应力应变最大的区域，如图 3 所示。“基于仿真计算结果，通过优化集热管的材料特性，我们确定了性能最佳的真空集热管结构，减少集热管在实际使用时在高温情况下产生的变形。”赵旭山博士解释道。

太阳能热发电系统的集热过程复杂，涉及的物理场较多，因此基于试错式的传统结构设计方法在真空集热管结构优化和新产品开发中并不适用。传统设计方法不仅研发成本过高、市场响应速度过慢，而且一些关键的性能参数无法通过实验手段获得。“COMSOL Multiphysics 软件提供的多物理场仿真平台，可以很好地解决这个问题。”赵旭山博士说道，“利用 COMSOL 软件，任意局部的多物理特性影响下的温度、速度分布及相应的应力应变分布都得以细致快速地呈现，为新型结构集热管的开发提供了强大准确的评估依据。”

### ⇒ 延长集热管的使用寿命

真空集热管内层为不锈钢吸热管，外层为高透率玻璃罩管，中间形成环形密闭高真空保温区域。但是由于玻璃和不锈钢的热膨胀系数不匹配，从低温到高温、再到低温的热循环运行工况必然会造成玻璃罩管的破坏，降低集热管的使用寿命。于是必须在玻璃管和不锈钢管之间增加补偿机构——波纹管，以抵消玻璃罩管和不锈钢内管由于热膨胀系数的差异造成的变形异步。

有研总院的工程师首先对波距、波高和波纹数不同的波纹管在指定应变下的工作状况进行了分析，对不同参数的波纹管的补偿量进行了初步评估，确定了波纹管的波距、波高和波数的合理范围，能够有效抵消玻璃罩管和不锈钢内管间由于热膨胀系数的不同，在温度变化时造成的变形差异。工程师们同时考虑到了在波纹管温度变化的工况下会由于材料的热膨胀引起应力的集中和应变的累积，从而导致波纹管的热疲劳破坏。因此，他们对初步评估的合理范围内不同结构参数的波纹管发生破坏的循环次数进行了预测，进一步优化波纹管的结构，最终设计出循环次数高达 4800

万次的波纹管结构，从而有效地提高了整个集热管的使用寿命。

通过真空集热管集热过程中的多物理场分析，可以得到波纹管实际工况条件下每一局部的热变形情况（图 4 左图）和温度分布情况（图 4 右图），即使厚度仅为 0.1 mm 的波节部分对各个物理过程的反馈，也能得到很好的预测。此外，为对波纹管进行全面的可靠性评估，借助 COMSOL Multiphysics 的参数扫描功能，通过设定一系列补偿量，可以考察不同补偿量条件下的应力-变形情况，为波纹管的选材、结构设计、寿命预测等提供依据。

“借助多物理场仿真，我们深入理解了聚光集热系统及其关键元器件真空集热管在实际运行工况下的各个物理过程，提升了我们的新产品设计能力，减少了许多不必要的加工和测试，有效降低了设计和加工成本。”赵旭山博士说道。

目前，有研总院已建成年产 2 万根的 4 米高温真空集热管的中试线，中试产品已在 3 个光热电站中实现示范应用。在进行高温真空集热管开发的同时，研发团队也时刻关注槽式太阳能聚光集热系统的发展，并进行了大量的调研，于 2014 年形成了槽式聚光集热示范系统开发方案，2016 年初在北京怀柔建成了太阳能光热发电系统示范工程。❖



北京有色金属研究总院太阳能光热系统设计高级工程师赵旭山博士在中高温太阳能集热管生产车间。

# 水平井测井技术的多物理场仿真研究

西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室的仵杰教授研究团队, 借助多物理场仿真及三维数值计算对水平井中的阵列感应测井响应特性进行了研究, 并对电磁场和空间涡流特性进行了后处理分析, 揭示了感应测井在水平井中的响应机理, 满足了水平井测井油气评价的要求。目前, 其研究成果已成功应用于包括大庆油田在内的多个国内知名油田。

作者 秦宇航

人类对石油的开采历史, 可追溯至公元 4 世纪, 当时的人们利用绑有钻头的竹竿进行人工开采。直至 1859 年, 宾夕法尼亚石油公司才钻出了第一口现代工业油井, 这标志着近代石油工业的开端。20 世纪中期, 石油逐渐取代了煤, 成为了全球最主要的燃料。随着石油工业的发展以及对石油需求的上升, 石油探测技术也不断进步, 各种先进理论和技术先后应用在了石油探测技术中。

## ⇒ 水平井测井技术

水平井测井技术诞生于二十世纪八十年代, 是指在水平井或大斜度井中进行测井的仪器设备、方法理论和解释技术。相比于常规测井更为复杂, 解释难度也更大。图 1 展示的是某油田在垂直井内通过侧钻方式钻成的水平井井眼轨迹。图中红色区域表示砂岩油层, 绿色区域表示非储层泥岩, 蓝色线条为井眼轨迹。可以看出, 在水平井中, 井眼与地层面不再垂直, 而是出现任意夹角, 水平段与层界面近似平行。

相比于石油工业最常用的垂直井, 水平井对于一些特殊油藏(如碳酸盐岩裂缝油藏、低渗透油藏、高含水人工注水油藏等)的开发, 勘探开发成本低, 可大幅度提高油气单井产能和采收率。在诸多石油探测技术中, 水平井技术被认为将会成为未来石油钻井领域最主要的钻井类型。

水平井虽然有着众多优点, 但其测井技术的难度也更高。在垂直井中, 一般情况下地层模型可以假定为各向同性的均质体, 测井仪器轴垂直或近似垂直于地层水平面, 无论是地层、井眼还是泥浆侵入形状均认为是绕仪器轴旋转对称。然而对于水平井来说, 其仪器轴不再垂直于地层面, 井眼和泥浆侵入形状等的对称性也不再存在, 因此无法将垂直井测井技术直接应用于水平井的油气评价中, 这便需要详细研究水平井测井技术, 单独建立针对水平井的油气评价标准。

## ⇒ 水平井测井响应的三维电磁场数值仿真

基于地层电阻率的油气评价, 是测井技术中最常用的方

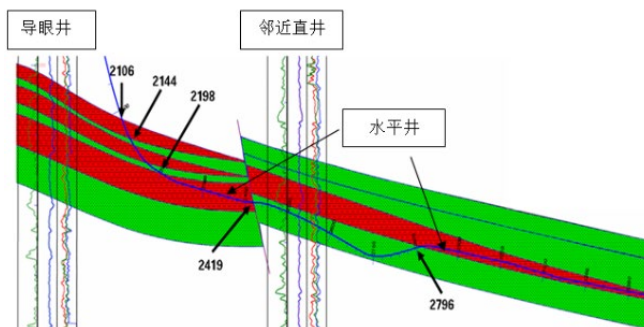


图 1. 中国某油田直井侧钻水平井钻穿油层示意图。

法。阵列感应测井仪器是目前测量地层电阻率的一种高效、可靠的测量仪器, 其核心元件为线圈型传感器。在水平井中, 线圈在井眼周围地层中形成的涡流从近到远、以不同角度穿过地层, 形成复杂的空间分布。基于均匀地层的理论不再适用, 必须进行三维电磁场数值计算才能准确获取测井响应。

三维电磁场的数值计算是一个极其复杂的数学物理问题。如果研究人员自己编写计算程序, 需要解决很多方面的问题: 如线圈源产生电磁场公式推导、三维有限元网格剖分、建立关于网格节点的大型线性代数方程、准确求解维数超过百万甚至千万的大型代数方程、代码正确性分析, 以及优化计算方法等。要获得准确的计算结果, 几乎是难以完成的任务。

针对研究中的三维数值计算问题, 仵杰教授的研究团队借助 COMSOL Multiphysics® 软件实现了水平井三维建模、网格合理剖分, 利用软件中的“AC/DC 模块”开发完成了斜井和水平井中的阵列感应响应三维数值计算和响应机理分析。

“COMSOL 中的‘AC/DC 模块’对电磁场三维数值计算非常有效, 其强大的建模功能可适应各种边界的网格剖分。软件提供了多种方法, 以确保求解大型代数方程, 同时还具

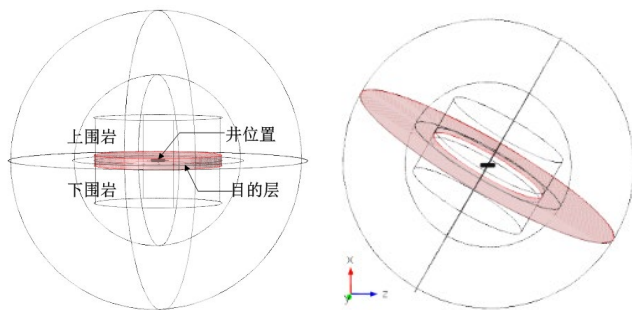


图2. 水平井几何建模(左图)及地层旋转后的模型(右图)。

有丰富的后处理功能。”作杰教授说道。“正是 COMSOL 软件在求解大型代数方程上提供的帮助,使我们的工作量大幅缩减,为我们的研究工作提供了极大的便利。”

随后,研究团队对数值计算结果进行了深入分析,并与垂直井的相关数据进行对比,详尽分析了水平井中的阵列感应测井响应特性。

### ⇒ 水平井中的阵列感应响应分析

作杰教授的研究团队通过三维数值模型,详细分析了水平井的井位置、目的层厚、目的层电导率、围岩电导率以及目的层与围岩电导率对比度对阵列感应测井响应的影响。由于实际地层并非平整三层地层,而是十分复杂地交叠在一起,所以在建模时,采用了围岩包住有限大目的层的形式进行仿真(如图2所示)。

测井响应是测井仪器沿井眼移动时不同位置的测量结果。数值模拟时,可以像实际测井一样,地层不动,让仪器移动,计算每一个位置的测井响应。但是,仪器中包含多个线圈系探头,几何参数多,为了获得精确的结果,需进行密集的网格剖分。如果让仪器移动,每移动一步均要改变几何参数,若重新进行网格剖分,会导致计算精度不稳定。另一方面,地层几何参数较少,网格剖分较粗。根据这一特点,我们选择仪器不动地层运动的

方法来对测井响应进行数值计算。计算结果与实际结果一致,同时还提高了数值计算稳定性。

具体实现时,仪器模型固定,控制仪器的网格数及地层模型运动,通过旋转地层来实现不同的地层倾角,改变地层几何参数进而模拟测井,如图2中右图所示:在工作面上创建一个环形圆面,用于分割作为无限元域的上下围岩。研究团队对模型进行了网格剖分及优化处理,以保证通过较小的网格数量得到准确的计算结果。研究人员随后进一步利用软件丰富的后处理功能,绘制了一维、二维和三维图形,并分析了仪器倾角与涡流的关系以及水平井和垂直井的响应机理。

如图3分析结果显示,在水平井中,当层厚大于仪器分层厚度时,水平井响应与直井响应接近(左图);当层厚小于仪器分层厚度时,水平井响应与垂直井明显不同(中图);在水平井进出界面时,响应出现明显尖峰(右图)。同时,研究团队还详尽分析了电导率对比度、趋肤效应和界面电荷堆积对水平井响应的影响。

研究团队基于上述研究结果揭示了水平井中阵列感应测井的响应机理:水平井中的阵列感应测井响应特性不但与目的层层厚、目的层和围岩电导率对比度有关,而且还与目的层和围岩电导率大小以及子阵列间距有关,其中对响应特性影响最大的因素是水平井在地层中的位置。同时,由于涡流在层界面处会受到反射、折射和趋肤效应等因素的影响,因此会产生反向电流,进而导致接收信号减弱,并出现尖峰现象,这一现象说明主接收从高阻进入了低阻。研究团队利用上述仿真结果,最终将垂直井中地层电阻率测井技术成功应用在了水平井测井中。

目前,研究团队已经基于 COMSOL 电测井数值模拟方法,建立了用于实际测井数据处理的井眼校正数据库,并以此建立了水平井油气评价标准。团队的相关研究成果已成功应用于中国石油集团测井有限公司及国内众多油田的开发项目,为我国水平井测井技术的创新型研究作出了重要贡献。❖

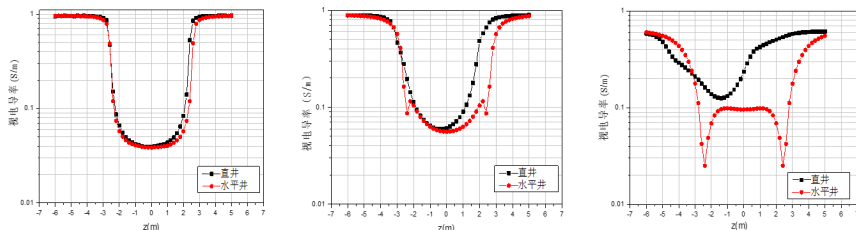
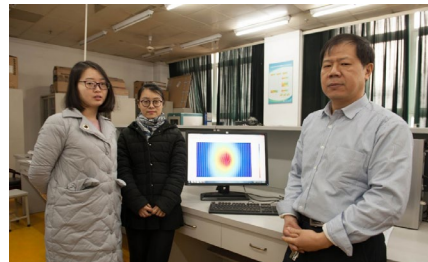


图3. 水平井中的阵列感应响应特性与垂直井比较。左图:层厚大于仪器分层厚度;中图:层厚小于仪器分层厚度;右图:水平井进(出)界面。



西安石油大学光电油气测井与检测教育部重点实验室的作杰教授(右)和他的学生。

# 仿真让扬声器的设计有了思想

浙江中科电声研发中心的研究人员利用多物理场仿真分析方法,使电声工程师在扬声器样品制作出来之前就能预测其主要特性,从而帮助他们更高效、更经济地设计出高性能、高品质的扬声器。

作者 **章琪琦**

**当**我们在驾车旅行中享受车载音乐带来的美好时光时,当我们通过手机与家人朋友愉快地聊天时,也许我们不会意识到,电声技术已经和我们的生活息息相关,并带给了我们极大的便利和无尽的享受。扬声器、音箱、传声器、耳机等电声器件具有对声音的接收、转换、传输、重放和测量等功能,使人们通过声音的方式传递信息和传播文化艺术。

电声器件自发明以来,已经走过了百年的历程。人们对产品的质量,尤其是声音品质的要求在不断提升,对电声器件的要求也愈来愈高。作为世界第一的电声器件生产国和出口国,中国电声器件的研发设计主要还是依靠人工经验、采用反复试样和不断调整产品性能的方法。这种传统的研发设计方法不但消耗人力和物力,而且即使花费很长的开发周期,也时常难以设计制作出理想的高品质产品。

浙江中科电声研发中心(以下简称“中科电声”)是一家致力于电声器件创新设计的研发机构,在电声产品数值仿真分析及辅助设计领域扮演着重要的角色,承担着技术研究、应用、咨询和培训等多项工作,帮助工程师和研发人员更加深入地理解电声器件。

## ⇒ 典型的多物理场问题

扬声器的结构看似简单(图1),其工作原理却涉及力学、电磁学、振动、声学及传热学等多个紧密结合的物理领域以及复杂的物理问题。例如,在电磁场分析中,由于扬声器磁路包含硬磁和软磁材料,因而需要考虑显著的电涡流问题,以及在高功率输入时的线圈移动问题;在振动系统分析中,需要考虑扬声器的几何非线性和粘弹性等问题。图2显示了扬声器涉及的多物理场间的相互关系。

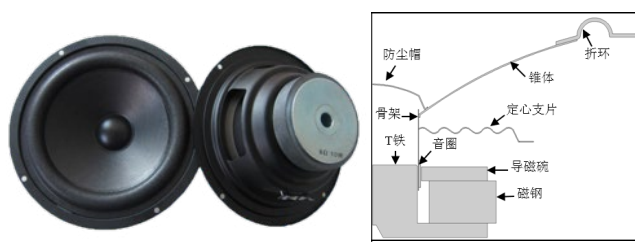


图1. 左图:动圈式扬声器图片。右图:典型扬声器的二维轴对称图,显示了其中的主要零件。

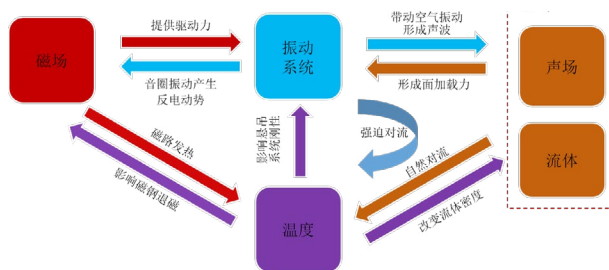


图2. 完整和准确地模拟扬声器涉及的准静磁场、结构力学、压力声学、粘热声学、流体、温度等多物理场,它们之间又是相互耦合的,且在大功率工作时还存在较强的非线性现象。这是一个复杂的多物理场耦合分析问题。

由于扬声器非线性特性的强弱与扬声器发出的声音是否“好听”直接相关,因此仿真分析和改进扬声器非线性特性是电声企业在高品质扬声器设计制造中特别重视和需要解决的难题。在扬声器工作过程中,从磁路到振动系统,再到声场,各个环节都存在着非线性现象,外在体现的扬声器非

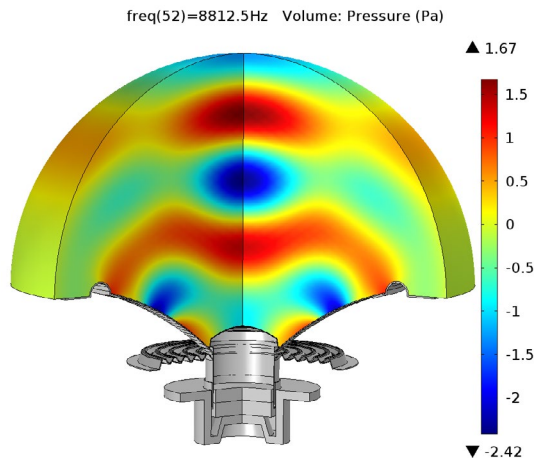


图 3. 通过仿真计算可直观地看到扬声器工作时所产生的声场, 图中显示的是某个时刻的声压分布。

线性失真特性不应仅看这些非线性现象的叠加, 而应归结为它们相互之间耦合作用的结果。因此, 扬声器非线性失真特性的仿真计算是扬声器仿真领域的关键性难题。

中科电声的研发团队利用多物理场仿真软件在扬声器的非线性仿真领域取得了突破性进展。“扬声器非线性特性的仿真分析是一个典型的多物理场耦合分析问题。由于多环节中的较强非线性特性, 所以需要采用实时移动网格技术, 并在必要时重划网格, 而且在时域分析时又涉及到频域分析。对于这样复杂的问题, COMSOL Multiphysics® 是我们的最佳选择。” 中科电声主任温周斌博士如是说。温博士和他的团队综合运用 COMSOL Multiphysics 的 AC/DC、结构力学、声学等模块, 建立了包含扬声器的各种非线性特性在内的完整有限元模型,

在移动网格和重划网格等功能支持下, 利用瞬态分析方法分析得到了扬声器工作中的一系列非线性特性。

### ⇒ 提升仿真分析精度

影响扬声器特性的仿真分析精度的因素有很多, 除了仿真分析模型和方法之外, 输入准确的扬声器振动部件的几何模型(图纸)和获得正确的扬声器材料参数也非常重要。与此同时, 扬声器的设计图纸与实际产品往往会存在较大差异, 扬声器制造商及其部件供应商的生产制作工艺和流程对扬声器产品的质量和一致性都会有很大影响。无论是微型扬声器的振膜, 还是汽车扬声器的纸盆和定芯支片, 采用的材料不同, 加工制作流程不同, 做出来的部件都会有所不同; 即使是同一批产品, 由于扬声器制造商的生产设备、工艺流程以及所采用的部件等的差异, 产品的特性也会有所差别。过去对扬声器产品及其部件的质量管理主要依靠工程师的经验及感官来判断, 因此难以量化。这种方式既无法获得扬声器部件的几何模型的准确尺寸, 也无法得知材料的物理特性参数, 更无法将材料的性质与扬声器成品的特性建立定量的关系。

温博士带领他的团队, 从多个方向入手, 研究确实有效的扬声器仿真分析方法。一方面, 基于 COMSOL Multiphysics, 充分发挥该软件平台的强大功能; 另一方面, 从电声企业的研发设计到生产制造的各个环节查找问题, 寻找解决方案。他们用扫描仪精确测量扬声器部件的几何结构, 并对设计模型进行修正, 获得了很好的仿真效果。图 3 为 COMSOL 软件计算所得的扬声器在某时刻的声压分布。“纸盆等部件的材料特性很难用现有仪器设备来测量, 但我们可以通过仿真模拟的方式来反推材料参数。” 温博士说道, “仿真不是简单地使用软件工具。在工程实践中不能完全基于理想条件, 必须要

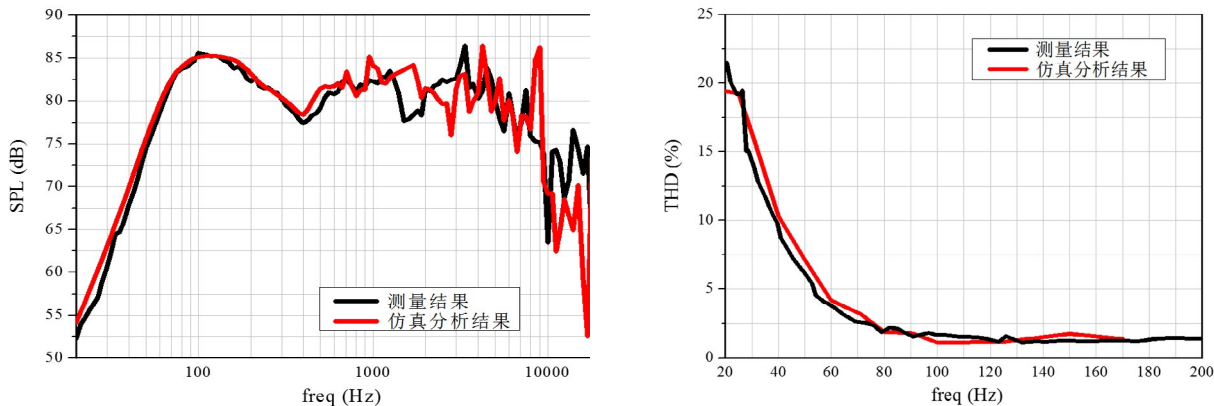


图 4. 左图: 声压级 (SPL) 的仿真分析结果和测量结果。右图: 总谐波失真 (THD) 的仿真分析结果和测量结果。通过仿真可准确预测扬声器的各种重要特性和主要问题, 并从中发现产生这些问题的关键因素, 从而改进和完善设计。

与电声企业的生产工艺相结合。”现在，中科电声采用仿真分析方法，可以准确预测扬声器工作过程中的各个主要物理量。图 4 显示利用 COMSOL 的多物理场仿真，温周斌博士发现声压级（SPL）和总谐波失真（THD）的仿真结果与测量结果都能够很好地吻合。工程师通过将仿真设计与自身经验相结合，使电声企业的研发及生产方式逐渐发生改变，这样不仅能缩短设计周期，还能大幅提升产品质量。

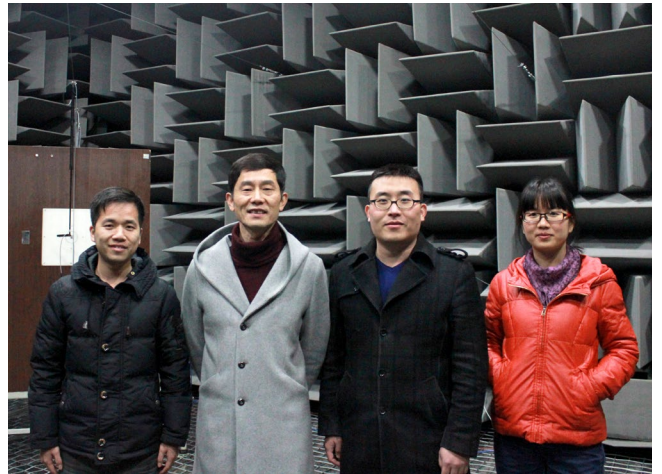
## ⇒ 电声企业从仿真中受益

中科电声为多家电声行业的领先企业提供技术服务。苏州上声电子有限公司（以下简称“苏州上声”）是中科电声的重要客户和合作伙伴之一。苏州上声主要从事中高端汽车扬声器的设计和制造，并为德国大众、美国福特和日本丰田等国际知名汽车企业提供车用扬声器。在与中科电声合作的几年间，苏州上声从仿真设计中受益匪浅。借助仿真的预判与验证功能，通过预案分析和评审环节，不仅提升了公司自身产品的设计水平，而且通过建立对供应商的管理流程，对供应商提供的产品部件质量进行了严格控制。

“与中科电声合作开展仿真设计三年来，整个团队对扬声器的理解不断加深，”苏州上声副总经理柴国强说道，“仿真让扬声器的设计有了思想。”从基础知识、物理概念、有限元方法的学习，到操作流程的确立，再到具体产品的仿真和测量验证，苏州上声快速、系统、全面地掌握了仿真设计新技术，提高了应用技术研发能力。

随着仿真分析方法的系统化、流程化，以及分析精度的

进一步提升，中科电声的仿真设计团队也在不断完善整个仿真流程，提高仿真技能，以满足不同客户的需求。“我们了解客户的产品，根据产品再不断调整模型。”温周斌博士说道。通过不断修正和验证仿真分析方法，中科电声的研究人员不断总结经验，已经逐步建立起针对整个扬声器系统特性的仿真分析方法，并将其应用于不同规格、不同结构、不同材质的扬声器仿真分析和辅助设计工程项目中。目前，中科电声的研发成果已经被应用于十多家电声企业，数家扬声器制造企业都受益于它的研究成果。❖



温周斌博士及中科电声的核心仿真设计团队在他们的全消声实验室中。高规格的全消声实验室及测量设备是团队开展仿真设计及其他电声技术研究的重要基础。图中人物从左到右依次为：岳磊、温周斌、徐楚林和陆晓。

## 产品库

- › COMSOL Multiphysics®
- › COMSOL Server™

### 电磁

- › AC/DC 模块
- › RF 模块
- › 波动光学模块
- › 射线光学模块
- › 等离子体模块
- › 半导体模块
- › MEMS 模块

### 结构 & 声学

- › 结构力学模块
- › 非线性结构材料模块
- › 岩土力学模块
- › 疲劳模块
- › 多体动力学模块
- › 转子动力学模块
- › 声学模块

### 流体 & 传热

- › CFD 模块
- › 搅拌器模块
- › 地下水流模块
- › 管道流模块
- › 微流体模块
- › 分子流模块
- › 传热模块

### 化工

- › 化学反应工程模块
- › 电池与燃料电池模块
- › 电镀模块
- › 腐蚀模块
- › 电化学模块

### 多功能

- › 优化模块
- › 材料库
- › 粒子追踪模块

### 接口

- › LiveLink™ for MATLAB®
- › LiveLink™ for Excel®
- › CAD 导入模块
- › 设计模块
- › ECAD 导入模块
- › LiveLink™ for SOLIDWORKS®
- › LiveLink™ for Inventor®
- › LiveLink™ for AutoCAD®
- › LiveLink™ for Revit®
- › LiveLink™ for PTC® Creo® Parametric™
- › LiveLink™ for PTC® Pro/ENGINEER®
- › LiveLink™ for Solid Edge®
- › File Import for CATIA® V5

# 多物理场仿真推动电磁成像领域的发展

作者 刘国强

对于学术以及工业界的许多研发工作者来说，实验是一种直观的研究方式。然而以 COMSOL® 为代表的多物理场仿真软件的出现，为研发工作带来了巨大的变革。在一些领域，甚至完全无需进行物理实验，也可以对研究的问题进行准确的模拟和预测。这种研究方式的革新让科研人员摆脱了对物理原型的依赖，不仅能够大幅缩短冗长的物理实验周期，同时能节省大量制作物理样机的费用。多物理场仿真软件已经成为科研工作中不可或缺的可靠工具。

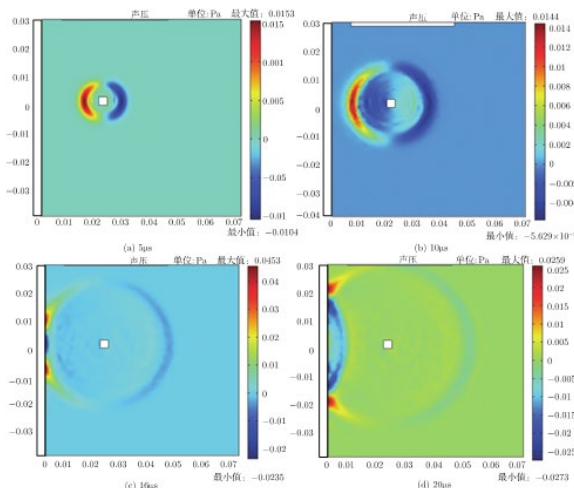
自从 2005 年接触 COMSOL Multiphysics® 软件以来，我使用 COMSOL 多物理场仿真软件进行了多项研究。十多年里，COMSOL 软件对我的研究提供了大量的帮助。无论是对于电磁场正反问题的研究，还是针对能源与电力技术的研发工作，或是医疗成像的科研项目，COMSOL 软件均都发挥了传统物理实验无法触及的优势。

近些年我正致力于磁声成像技术在医疗领域的应用。磁声成像是一种融合了电磁和超声的新型成像方法。磁成像具有对比度好、灵敏度高和探测深度大等特点；而超声成像则具有分辨率高、电磁干扰小和信噪比高等优点。结合这两种方法，就可以得到信息量丰富并且能够克服传统电磁成像求解逆问题不定性的成像技术。磁声成像在生物医学领域拥有广泛的应用前景。该技术能够在肿瘤形成初期检测出人体组织电特性的变化，从而有望成为一种低成本、易操作的肿瘤早期检测方法。

对人体组织进行磁声成像是一个非常复杂的多物理场问题，涉及了声学和电磁学在成像领域的交叉、电磁场和声场的正逆问题，以及媒质和人体组织的导电特性和场耦合特性。声场和电磁场为弱耦合，媒质的流体属性和导电特性分别决定了声场传播特性和电磁场分布特性。超声检测式磁声成像，可获取高分辨率的病变组织电导率图像，实现疾病的早期诊断。电磁检测式磁声成像，可与超声弹性成像联合，形成同时获取生物组织粘弹性系数和电导率参数的双模成像方法。

对于低电导率的人体组织材料而言，若直接采用三维瞬态涡流场求解，需要占用大量的计算资源。为了提升计算效率，我们需要基于常规方程推导新的方程和边界条件。在磁声成像的研究过程中通过使用 COMSOL 软件，我们针对磁声成像执行了仿真分析。从右图中超声检测式磁声成像的仿真分析结果可以清晰地看到随着时间的推移，声波逐渐向外传

播的过程。在磁声成像的研究过程中，我们可以非常方便地在 COMSOL 中定制不同问题的求解方案，从而快速获得合理的计算结果，并大幅加快项目的进展速度。



超声检测式磁声成像的仿真分析

COMSOL 软件目前已经成为我们科研项目中不可或缺的工具，得益于软件出色的灵活性和准确性，我们可以自由地对诸多电磁现象进行模拟分析，而无需再进行耗时冗长的物理实验测试，这帮助我们大幅提升了对电磁问题的分析效率，并减少了对物理实验的投入。

我非常高兴地看到，经过多年的发展，COMSOL 已经成为一件功能完善、应用领域广阔的工程仿真工具。无论是在电磁领域，还是其他领域，越来越多的工程师和研究人员开始使用 COMSOL 软件为其从事的项目服务。相信在未来，会有更多的工程技术人员从 COMSOL 多物理场仿真分析中受益。



## 作者简介

刘国强，工学博士。现任中国科学院电工研究所研究员，中国科学院大学电子电气与通信工程学院岗位教授。完成多项国家 863 项目、国家自然科学基金和国际合作项目。承担国家自然科学基金重点项目“基于洛伦兹力声源的磁声电导率成像研究”、仪器项目“基于声辐射力-洛伦兹力的超声-电磁双模成像方法与仪器研制”，出版学术论著 4 部，发表论文 80 余篇，申报发明专利 50 余项。