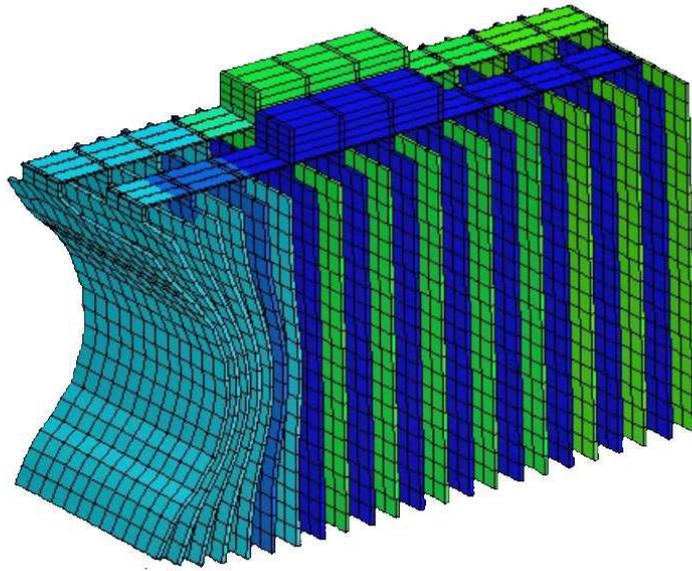


# LS-DYNA<sup>®</sup> 电磁 (EM) 白皮书



2019 年 6 月

第一版

上海仿坤软件科技有限公司

(**LS-DYNA China**)

## 目录

LS-DYNA 电磁 (EM) 求解器.....	3
一、  LS-DYNA EM 模块基本功能.....	3
1. 涡流求解器.....	3
2. 感应加热求解器.....	4
3. 电阻加热求解器.....	4
4. 导体中的均匀电流.....	5
5. 结构和热耦合.....	5
6. 轴对称能力.....	6
7. 电磁接触.....	6
8. 外部磁场.....	7
9. 状态方程.....	7
二、  典型应用:.....	8
1. TEAM 3 标准测试案例.....	8
2. TEAM 4 标准测试案例.....	9
3. TEAM 7 标准测试案例.....	9
4. TEAM 10 标准测试案例.....	9
5. TEAM 12 标准测试案例.....	10
6. TEAM 28 标准测试案例.....	10
三、  应用案例.....	11
1. 电磁成型.....	11
2. 电磁转动.....	12
3. 电磁焊接.....	12
4. 电磁感应加热.....	13
5. 电动悬浮.....	13
6. 电磁炮.....	14
7. 接触电阻加热.....	14
8. 电子加热管水冷分析.....	15
9. 电池挤压多物理场分析.....	16

## LS-DYNA 电磁 (EM) 求解器

电磁求解器解决了涡流（感应扩散）近似的麦克斯韦方程。这适用于可以将空气（或真空）中的瞬态电磁波传播的情况。因此，波传播无需求解。主要应用是磁性金属成型或焊接，感应加热等。EM 模块将允许电流源引入实心导体并计算相关的磁场，电场以及感应电流。EM 求解器与结构力学求解器耦合（洛伦兹力被添加到力学运动方程），并与结构热求解器（欧姆加热作为额外的热源添加到热求解器）。使用导体的有限元法（FEM）和周围空气/绝缘体的边界元法（BEM）来求解电磁（EM）场，因此，不需要空气网格。

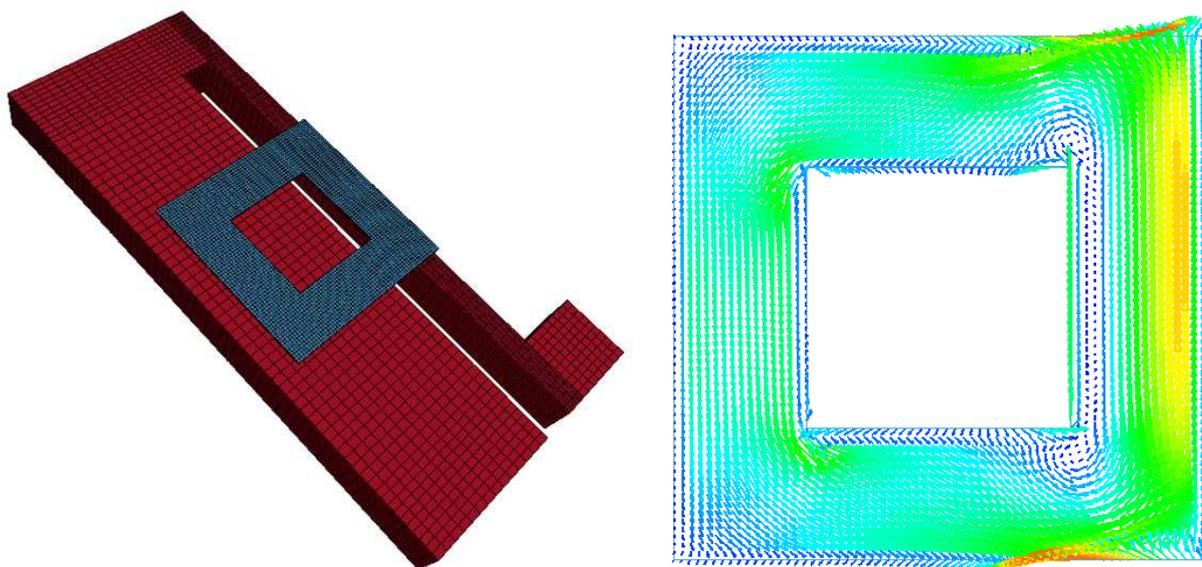
### 一、LS-DYNA EM 模块基本功能

#### 1. 涡流求解器

当导体由于场源和导体的相对运动而暴露于变化的磁场或由于磁场随时间的变化时，涡流（也称为傅科电流）是在导体中感应的电流；这导致导体主体内的电子或电流的循环流动。然后，这些循环的电流涡流引起磁场。这些场产生一种叫做洛伦兹力的力，可以产生排斥，吸引力，推进力和阻力效应。施加的磁场越强，或者磁场变化越快，则产生的电流越大，产生的磁场越大。

电磁求解器中可用的涡流求解器允许解决所谓的“涡流”近似的问题，这对于具有低频变化场中良导体是有效的，使得与电流密度相比可以忽略位移电流。该近似意味着无自发电流密度并且没有自由电荷累积（参见麦克斯韦方程）。一些工业应用涉及电金属成形，金属切削，金属焊接或高磁压产生。对于与 LS-DYNA 热求解器的耦合，还考虑了焦耳加热。

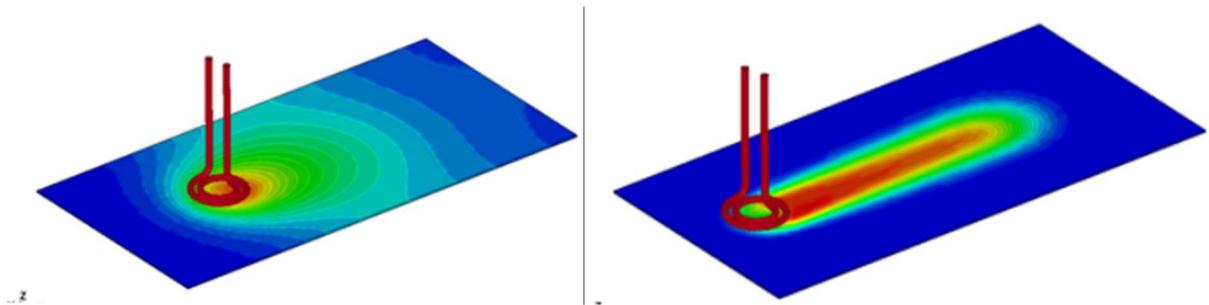
麦克斯韦方程使用有限元方法（FEM）求解，固体导体与边界元法（BEM）相结合，边界元（BEM）用于周围空气（或绝缘体），因此，不需要空气网格。



## 2. 感应加热求解器

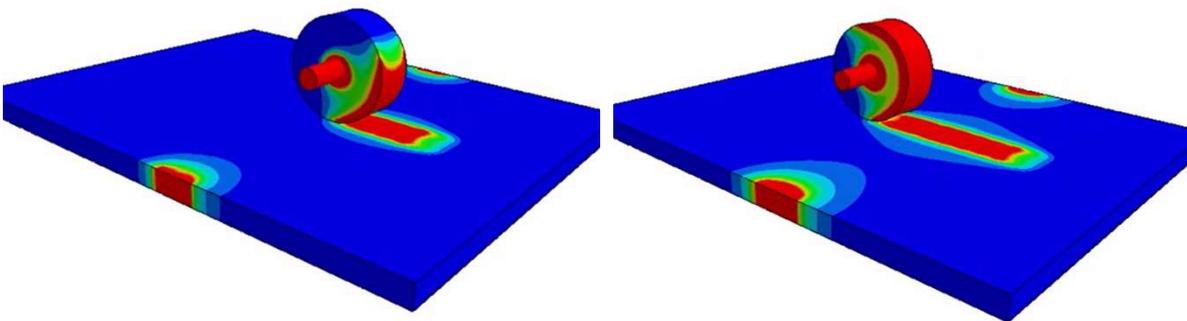
感应加热是通过电磁感应（通常具有移动或非移动线圈）加热导电物体（通常是金属）的过程，其中在金属内产生涡电流并且电阻导致金属的焦耳加热。在数值上，为了解决涡流问题，需要与频率兼容的电磁（EM）时间步长（即，在电流的四分之一周期中存在至少几十步的时间步长）。例如，频率为 1MHz 时，需要大约  $1.e-8$  秒的时间步长，因此需要  $1.e8$  时间步长来解决持续 1s 的完整问题。因此，使用经典的涡流求解器进行感应加热分析将非常耗时。

感应加热求解器的工作方式如下：它假定电流与过程的总时间相比非常快速地振荡（通常，频率范围从 kHz 到 MHz 的电流和过程的总时间大约几秒）。完成以下假设：在具有“微”电磁（EM）时间步长的半周期上解决完整的涡流问题。计算在该半周期期间的 EM 场的平均值以及焦耳加热。然后假设材料的性质（以及主要是驱动电流和焦耳加热的电导率）在下一个电流周期内不会改变。这些特性主要取决于温度，因此只要温度变化不太大，就可以认为该假设是准确的。在这些时段期间，不进行 EM 计算，仅将平均焦耳加热添加到热求解器。但是，随着温度变化，从而导致电导率，需要相应地更新电磁（EM）场，因此，通过计算前半周期内另一个完整的涡流分析，给出新的平均电磁（EM）场的电流。因此，求解器可以有效地解决涉及用于移动或非移动线圈的感应加热的问题。



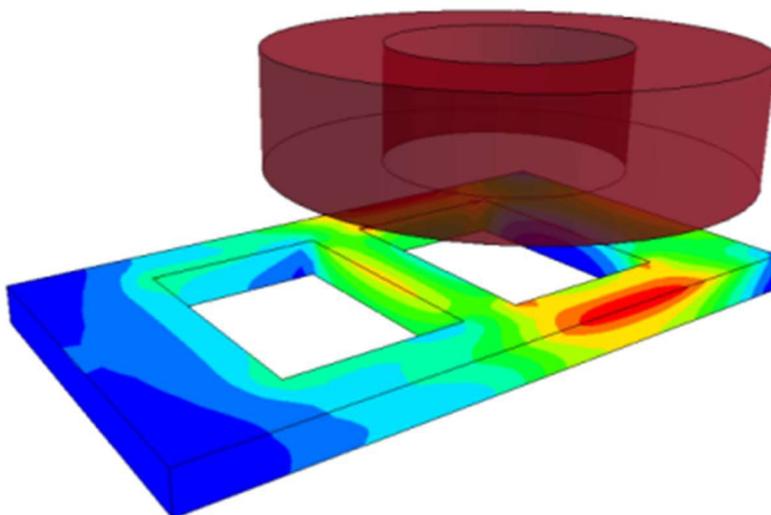
## 3. 电阻加热求解器

电阻加热求解器是涡流模型的简化版本，其中仅计算电阻效应和无电感效应。矢量电位  $\mathbf{A}$  全部等于零，仅保持标量电位  $\phi$ 。这样，无需计算电磁（EM）场的扩散。电流密度与标量电位的梯度成比例，其对应于均匀电流。由于  $\mathbf{A} = 0$ ，因此没有感应效应，因此线圈与工件之间没有耦合。该模型适用于连接到发电机的部件中非常缓慢的电流增加，其中扩散和电感效应可被视为无限快速。由于电流引起的焦耳加热被考虑在内，因此可以使用非常大的时间步长，并且由于  $\mathbf{A} = 0$  且不需要计算边界元（BEM），这使得该求解器比全涡流模型快得多。



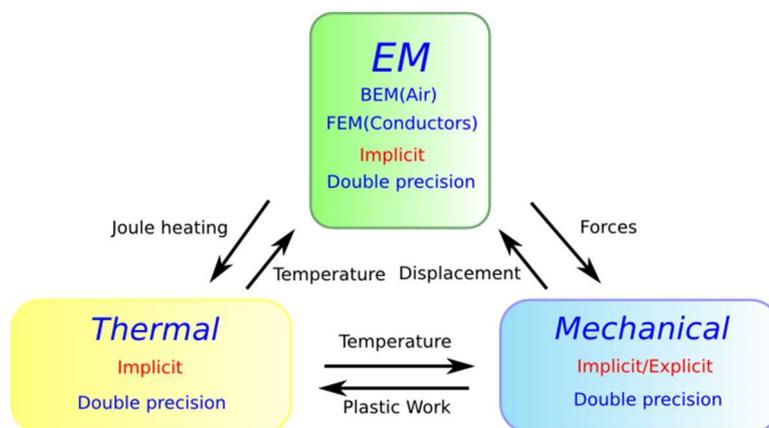
## 4. 导体中的均匀电流

求解器可以在某些特定导体中定义均匀电流。在这些导体中无需求解扩散方程，因此在它们的表面上不需要使用边界元（BEM）。这可以节省计算时间和内存。这些导体仍然可以与其他导电部件耦合，其中求解了完整的涡流方程（电流通过厚度扩散，洛伦兹力，焦耳加热等）。例如，通过将线圈建模为简单的单体而不是多圈，可以大大简化线圈的几何形状。当线圈的电流以低频（50 Hz）振荡时，这种建模引起的近似更为真实，这使得电磁（EM）场的扩散非常快速。毕奥-萨伐尔定律（Biot Savart Law）用于计算由这些部件的电流产生的磁场。



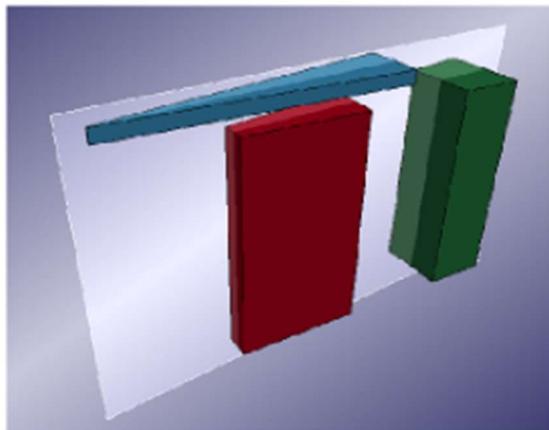
## 5. 结构和热耦合

求解器的求解能力不仅可以解决涡流近似中的麦克斯韦方程，还可以与 LS-DYNA 的热力学和固体力学求解器相结合，以充分利用它们的能力。因此，LS-DYNA 中可用的所有材料均可独立于其电磁特性使用。具有应变率依赖性的材料（例如 Johnson-Cook）特别适用于非常快速的变形应用，例如磁性成形或焊接。



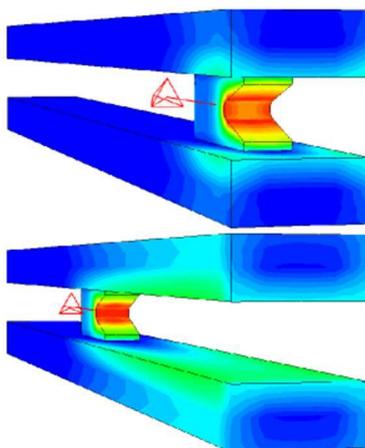
## 6. 轴对称能力

电磁 (EM) 求解器开发出轴对称特征以简化某些情况并节省一些计算时间。电磁 2D 轴对称特征可以与 3D 热和结构求解器耦合。电磁力和焦耳加热是沿轴对称部分中的平面二维模型计算的 (参见图), 并通过简单的旋转生成结果数据, 以便与三维结构和热耦合。未来的目标是将 2D 轴对称零件与经典 3D 电磁零件耦合。



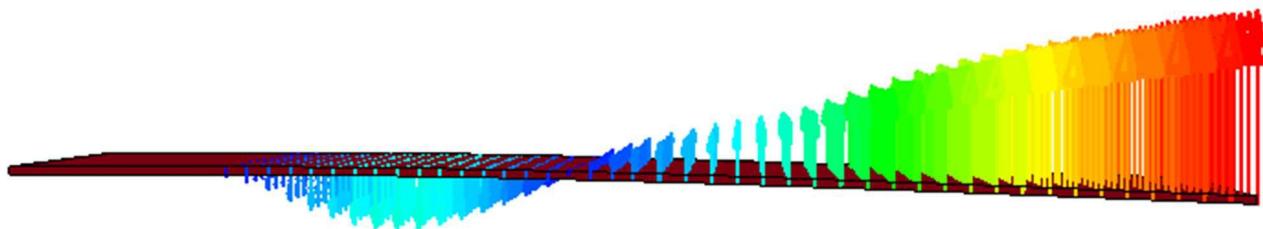
## 7. 电磁接触

电磁 (EM) 求解器可以触发电磁接触算法以检查导体之间的接触, 并允许电磁场在检测到从一个导体流到另一个导体。当形成闭合电路的导体相互移动或滑动时, 应使用该特征。对于涡流求解器, 在每个电磁时间步长, 求解器将重新计算新的边界元 (BEM) 网格。对于电阻求解器, 不计算边界元 (BEM), 并在接触区的位置添加约束。典型的应用可以模拟轨道炮模型。



## 8. 外部磁场

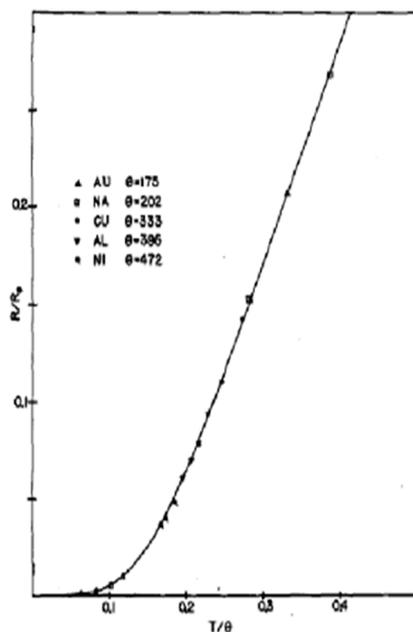
电磁 (EM) 求解器可以建立均匀的外部磁场。可以通过负载曲线设置三个时间相关的组件。然后将该外部磁场施加在产生感应电流的导体部件上,并解决经典的涡流问题。例如,在用户知道该特征或很好地了解由工件上的线圈产生的磁场的情况下,可以使用本功能,这样就不必建造整个线圈,这可以节省大量的计算时间。



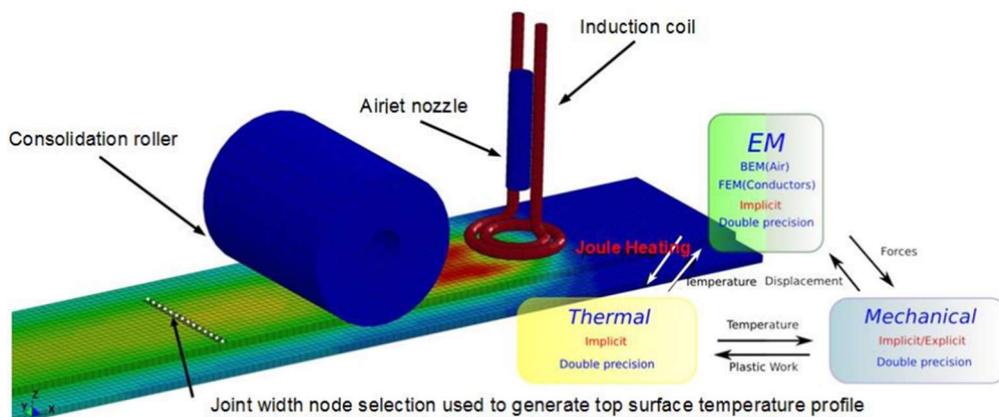
## 9. 状态方程

为了更准确模拟,在某些情况下可能需要更好地定义材料的某些电磁特性。求解器提供了几个状态方程:

1. **Burgess** 模型,其导电率是温度和密度的函数。**Burgess** 模型给出了固相,液相和气相的电阻率与温度和密度的关系。目前,仅可以施加于固相和液相。
2. **Meadon** 模型给出导电率作为温度和密度的函数。**Meadon** 模型是简化的 **Burgess** 模型,仅具有固相方程。
3. 列表模型,允许用户输入自己的负载曲线,定义温度的电导率函数。
4. 表格模型允许用户输入他自己的负载曲线,定义磁通量强度的磁通密度函数(反之亦然)。



## 二、 典型应用：



TEAM（测试电磁分析方法）代表一个开放的国际工作组，旨在比较电磁分析计算代码。

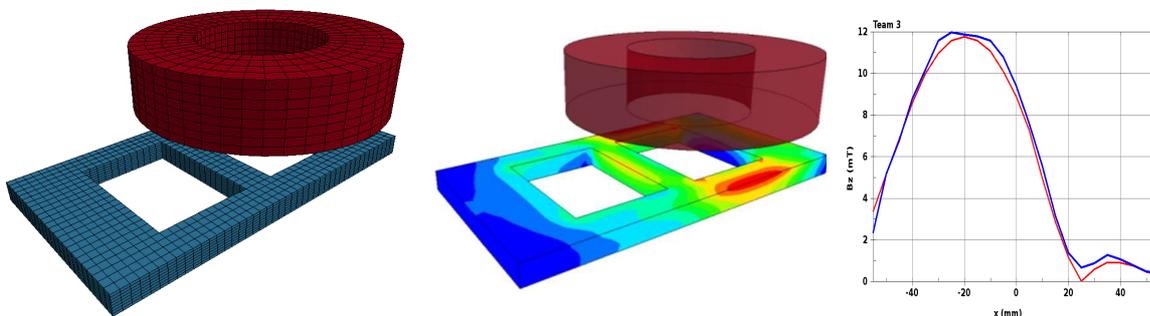
TEAM 研讨会是该小组的会议。一系列 TEAM 研讨会于 1986 年开始，现在每两年组织一次，每个研讨会都包括一系列“区域”研讨会和“最终”研讨会，作为 COMPUMAG 会议的子活动。

TEAM 问题包含一系列测试考题，具有精确定义的尺寸，材料的本构定律，激励等，并且每个都由真实的实验室设备支持，有明确的实验数据。TEAM 问题的范围涉及广泛的应用和特征，例如移动或不移动导体部件，磁性元件，均匀磁场等。

本节的目的是介绍一些 TEAM 测试用例，以突出本求解器的一些特性和功能，并有助于用户了解其全局验证过程。

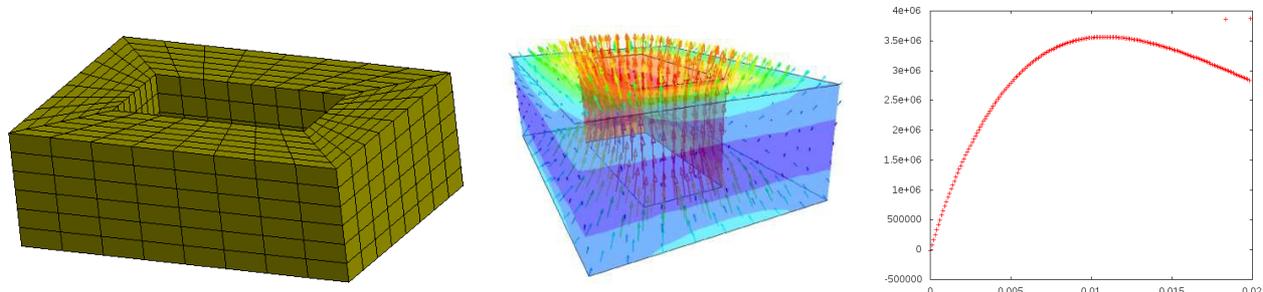
### 1. TEAM 3 标准测试案例

验证测试案例包括一个具有均匀正弦电流的线圈，该线圈产生磁场并在具有两个孔的薄矩形板上感应电流



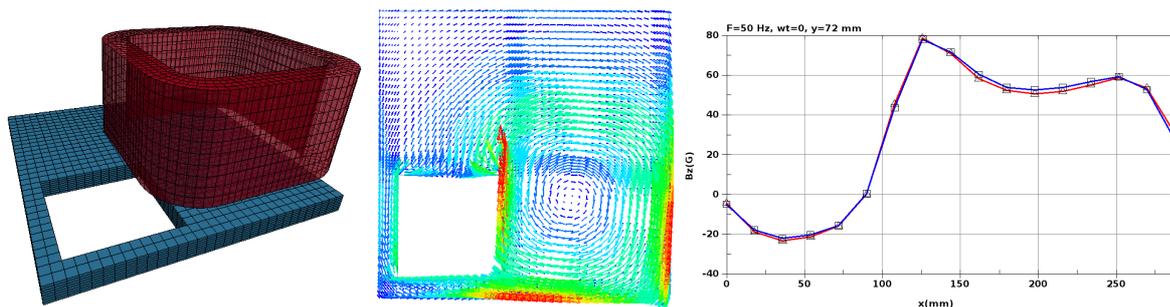
## 2. TEAM 4 标准测试案例

测试由矩形铝砖组成，矩形孔放置在均匀磁场中，随着时间垂直于带孔的面呈指数衰减。



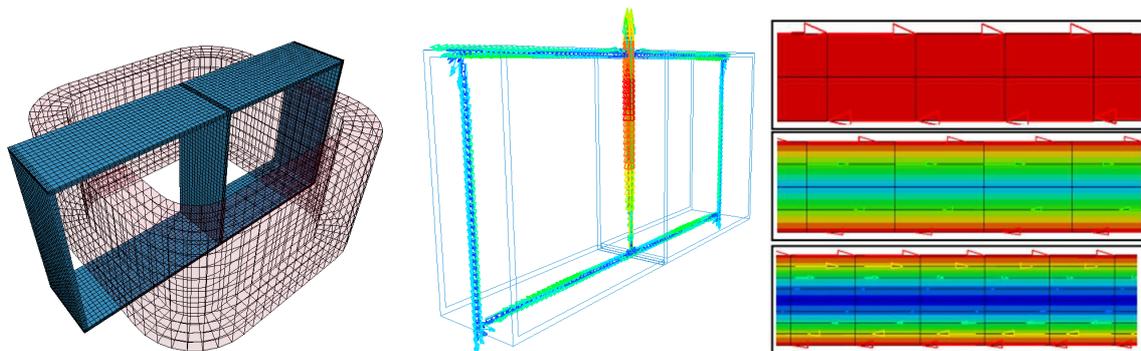
## 3. TEAM 7 标准测试案例

测试案例包括一个带有孔的厚铝板，它是偏心放置的（不对称问题）。该场由具有均匀电流的线圈产生，该线圈随时间正弦变化。



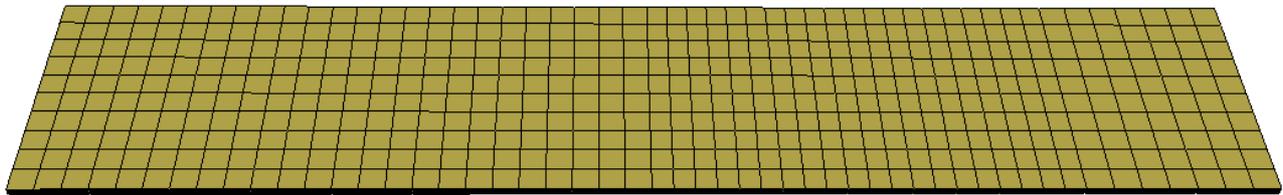
## 4. TEAM 10 标准测试案例

测试案例包括涉及磁化的复杂非线性瞬态涡流。激励线圈设置在两个细钢通道之间，钢板插入通道之间。渗透率遵循非线性磁化曲线的模式。

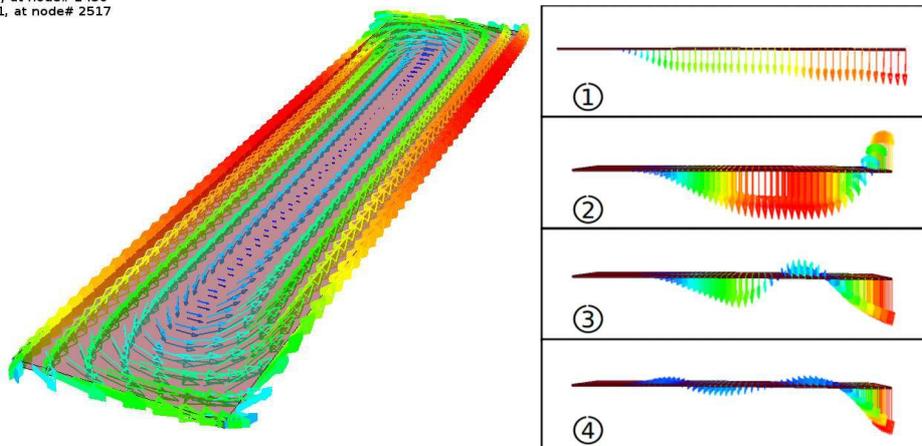


## 5. TEAM 12 标准测试案例

测试案例包括研究在垂直于梁厚度的两个方向上设置的外部均匀磁场的影响下涡流与悬臂梁偏转之间的耦合。

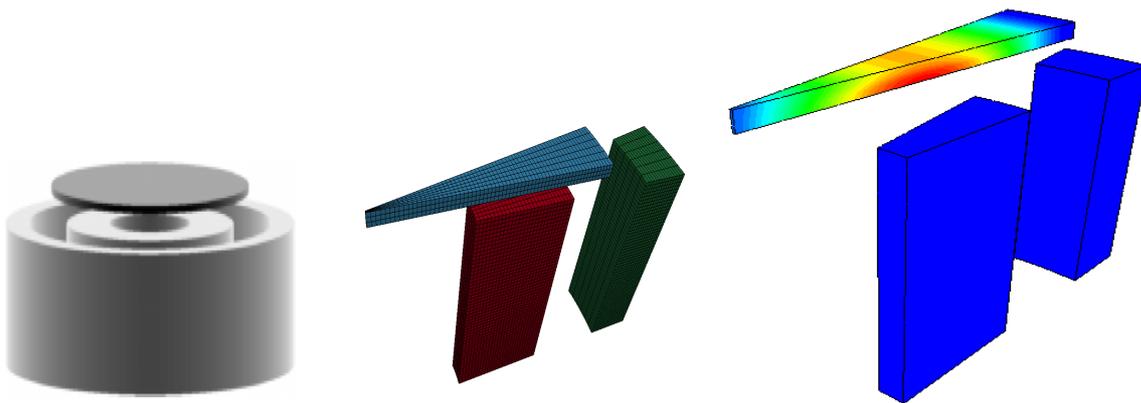


1/, at node# 243b  
91, at node# 2517



## 6. TEAM 28 标准测试案例

验证问题提出了一种电动悬浮装置，其由两个励磁线圈上的导电板组成。目的是确定悬浮板的动态特性。

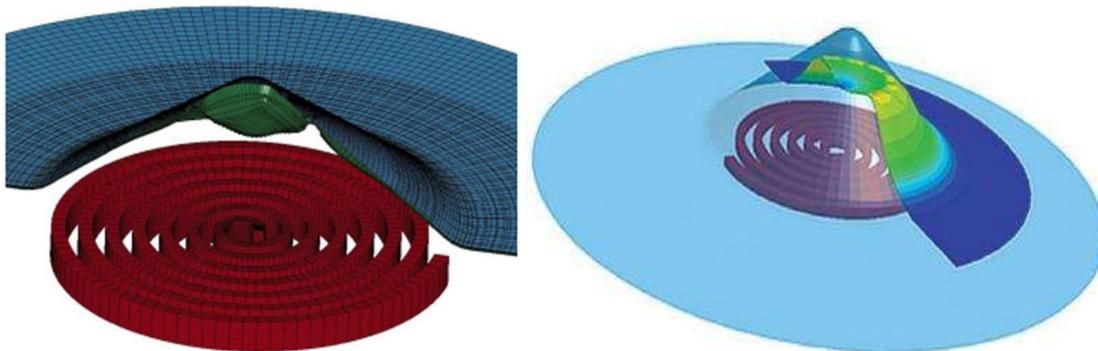


### 三、 应用案例

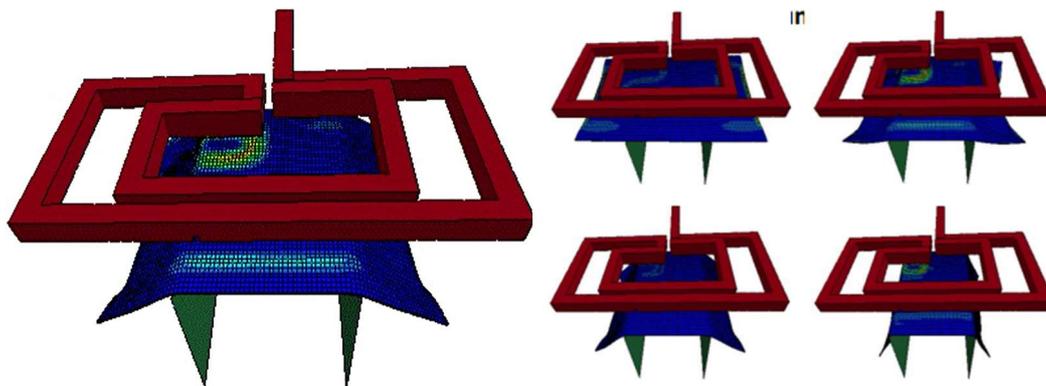
电磁（EM）求解器的一些重要应用包括磁性金属成形或焊接，感应加热以及涉及移动导体或工件的任何类型的问题。以下视频摘自使用 EM 求解器进行的一些研究。

#### 1. 电磁成型

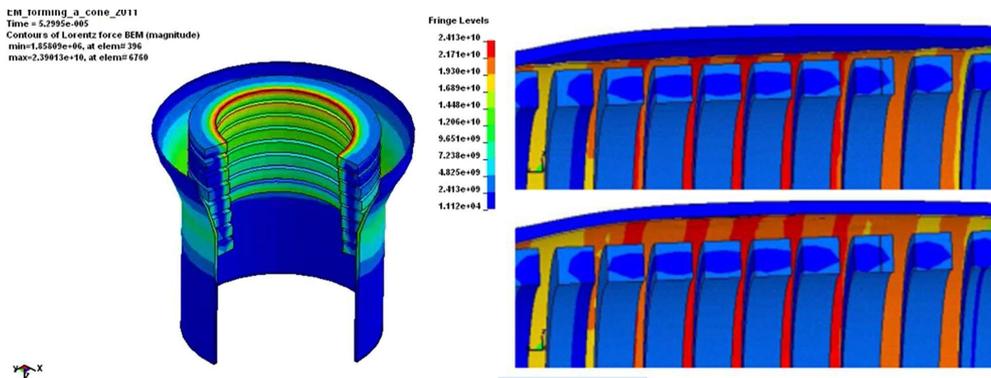
描述：这项研究是与加拿大安大略省滑铁卢大学的 M. Worswick 和 J. Imbert 合作进行的，其特点是在锥形模具上形成金属板（只有模具的 1/2 和工件表示）。这项研究的主要目的是预测金属板的最终形状。



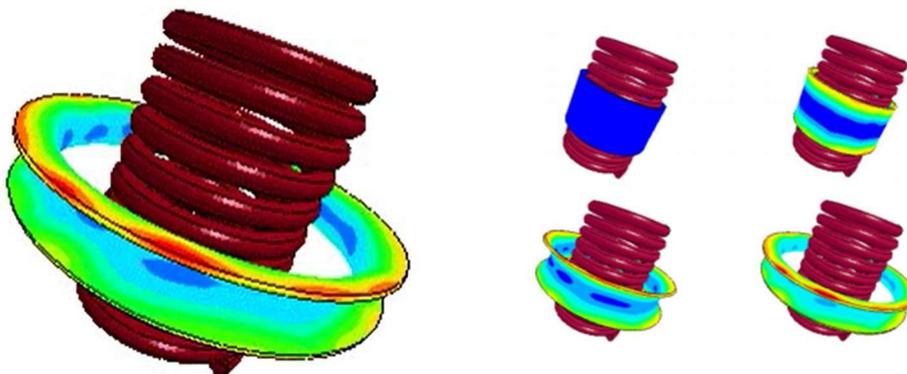
描述：这项研究是与巴斯克地区吉普斯夸蒙德拉贡大学的 Ibai Ulacia 合作进行的，其特点是用金属板进行弯曲实验的数值模拟工件被线圈产生的洛伦兹力强制在矩形模具上。



描述：与俄罗斯萨马拉国立航空航天大学的 Dmitry Chernikov 和研究实验室“塑性变形的渐进技术过程”合作，该模拟显示了铝管与锥形模具的 EM 成形。该分析的主要目的是比较外边缘位移与实验结果的模拟结果。

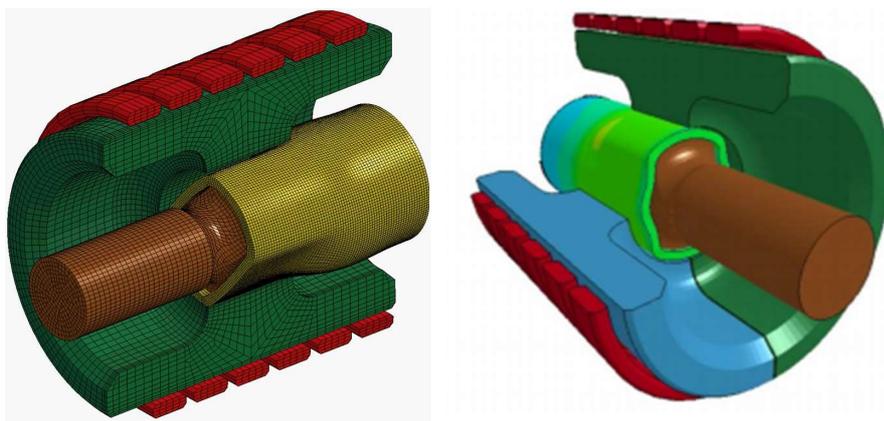


描述：通过 10 匝线圈扩展铝制圆柱体的变形，在 30 毫秒内上升电流为 75 kA。与俄亥俄州立大学材料科学与工程系 Glenn Daehn 合作实现的测试用例。



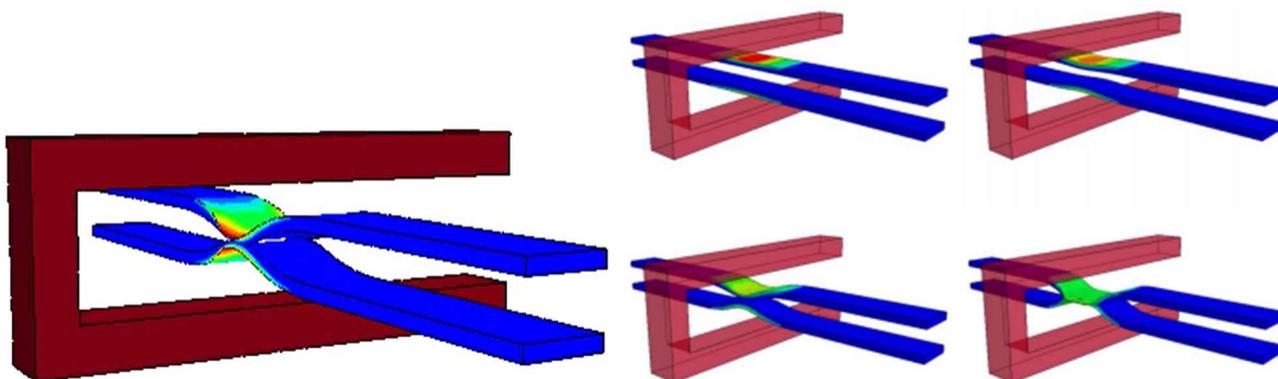
## 2. 电磁转动

描述：该模拟与 Fraunhofer 仿真模型研究所和 Poynting for Coil + Shaper 设计合作，形成了一个管轴接头（汽车动力传动系部件）

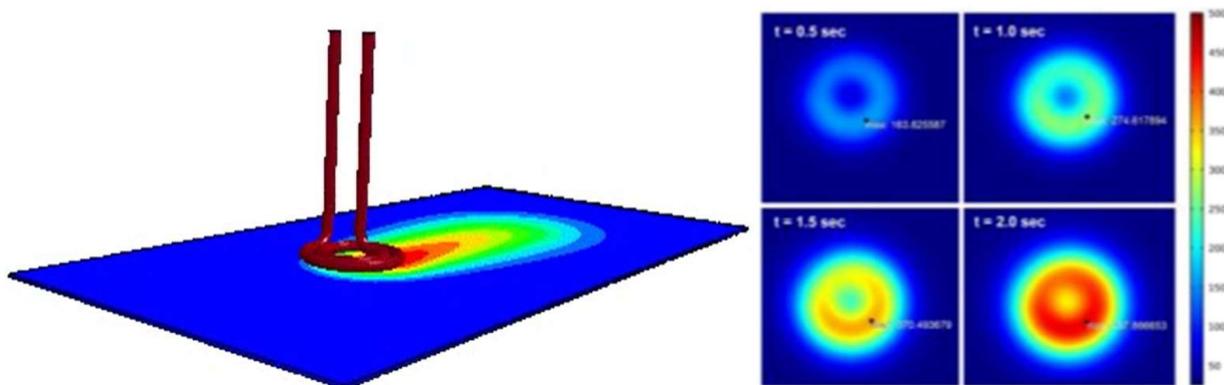


## 3. 电磁焊接

描述：该测试案例与滑铁卢大学合作进行，其特点是两个金属件相互焊接。

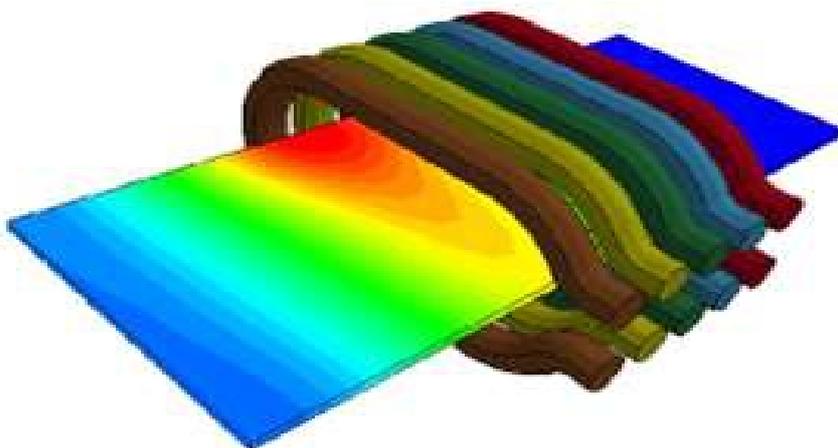


描述：该测试案例与德国凯泽斯劳滕 Institut für Verbundwerkstoffe 的 Miro Duhovic 合作，采用“薄饼”型螺旋感应线圈在金属或复合板上移动。该测试案例的主要目的是更好地了解不同材料的热成型能力。



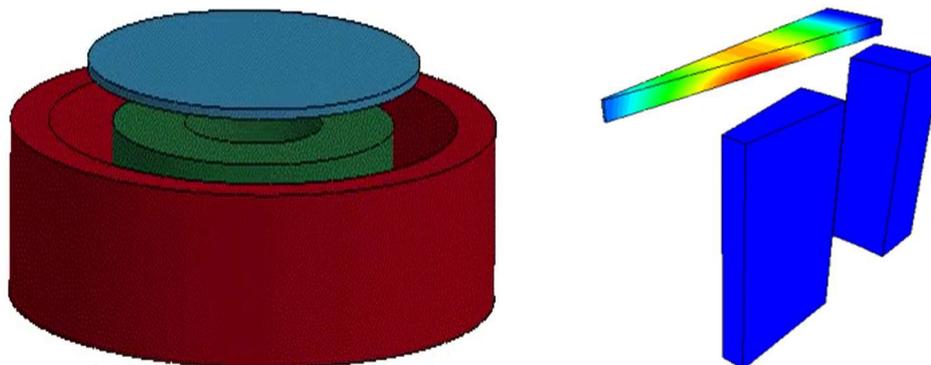
#### 4. 电磁感应加热

描述：感应加热测试案例，其中以恒定速度移动的斑块被一组线圈加热。



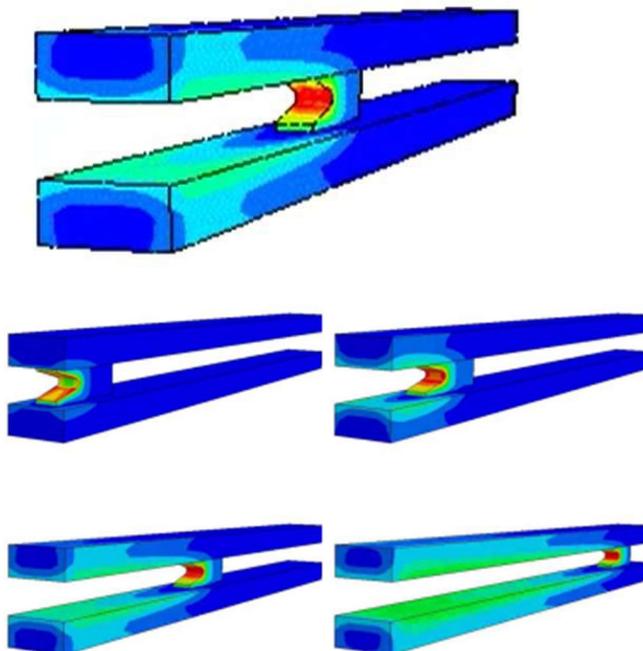
#### 5. 电动悬浮

描述：TEAM 28 问题提出了一种电动悬浮装置，它由两个励磁线圈上的导电板组成。目的是确定悬浮板的动态特性（在一些阻尼振荡之后，该板达到固定的悬浮高度）。因此需要电磁和机械问题的耦合解决方案。



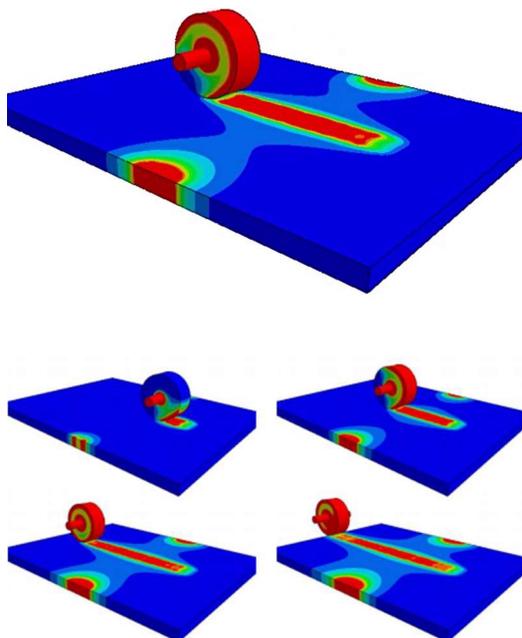
## 6. 电磁炮

描述：轨道炮是一种电子枪，可以沿着一对金属轨加速导电弹。射弹与两个导轨接触，并且电流穿过射弹。该电流与轨道产生的强磁场相互作用，从而加速了射弹。该仿真具有 EM 滑动接触功能，允许两个导电部件相互滑动，同时一些电流流过它们。



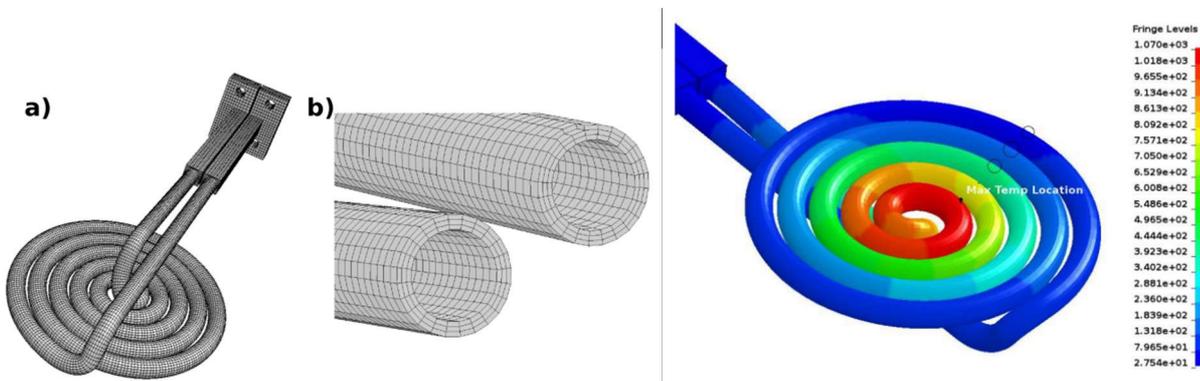
## 7. 接触电阻加热

描述：该示例具有电阻加热示例，其中导电轮使用 EM 接触部件在导电板上滚动。这允许电流从车轮轴上的电极流到平面上的电极。这种情况与 LS-DYNA 的隐式机械和热解算器相结合，此处显示了温度条纹。



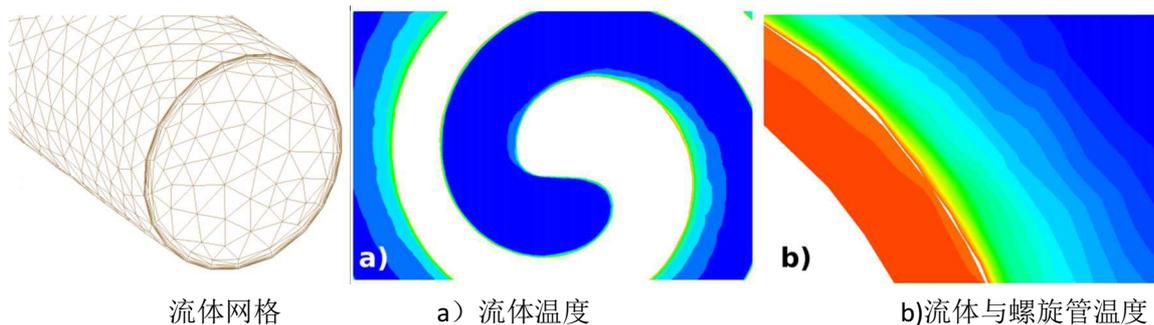
## 8. 电子加热管水冷分析

电磁 (EM) 求解器, 可以通过统一软件代码架构, 方便快捷模拟电磁-热-流三场耦合分析, 通电螺旋管生热, 并在螺旋管内通过冷却液进行降温, 模拟电-热-流三场耦合问题。



螺旋管结构及网格

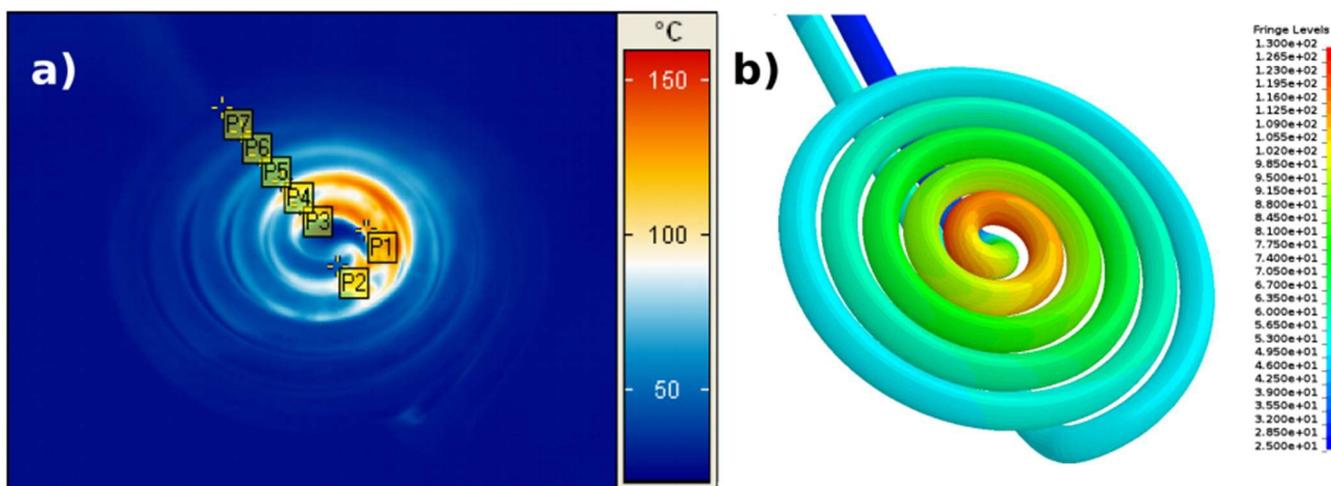
焦耳热分布



流体网格

a) 流体温度

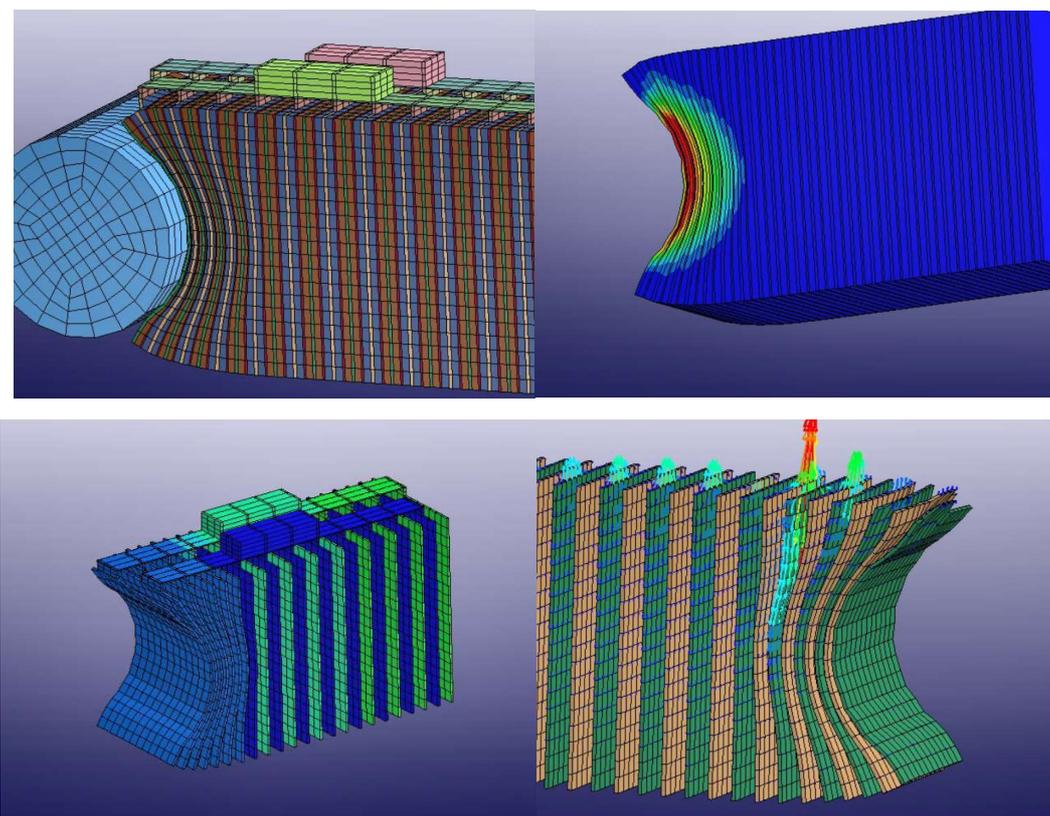
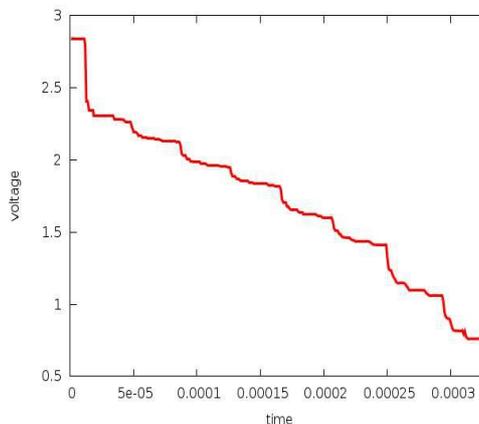
b) 流体与螺旋管温度



温度场分布与实验结果比对

## 9. 电池挤压多物理场分析

电磁 (EM) 求解器能够通过引入“分布式 Randles 电路”模型来模拟锂离子电池层中发生的复杂电化学反应，以模拟电流和局部加热。



锂电池组块在受外界冲击作用下结构、温度、电压、电流密度的变化