

分析大型强子对撞机的超导磁体失超

借助多物理场仿真，欧洲核子研究组织深入理解了大型强子对撞机中超导磁体和磁路的瞬态效应。

作者 SARAH FIELDS & LEXI CARVER

欧洲核子研究组织（European Organization for Nuclear Research，简称 CERN）位于瑞士日内瓦附近，该机构的物理学家和工程师们希望通过一系列实验来解答粒子物理学的基本问题，揭示宇宙的起源和本质。

在大型强子对撞机（Large Hadron Collider，简称 LHC）的内部，有一条埋于地下的环形粒子加速器，该加速器的范围横跨法国和瑞士边境（图 1），总长度约为 27 公里。在加速器中两束粒子流以接近光速的速度沿相反方向运动，并最终碰撞。实验中高能碰撞的结果有助于人类加深对力和物质最基本构成的认知。

大型强子对撞机中的粒子在强场偶极磁体（工作电流高达 12 kA，磁场强度接近 8.33 T）的驱动下保持圆周运行轨迹。将磁体（图 2）冷却至 1.9 K（低于外太空温度）时，磁体电缆（图 3）能够保持超导状态。理论上，电流在超低温下可以无电阻损耗地在磁体线圈中持续流动。但是在实际运行中，

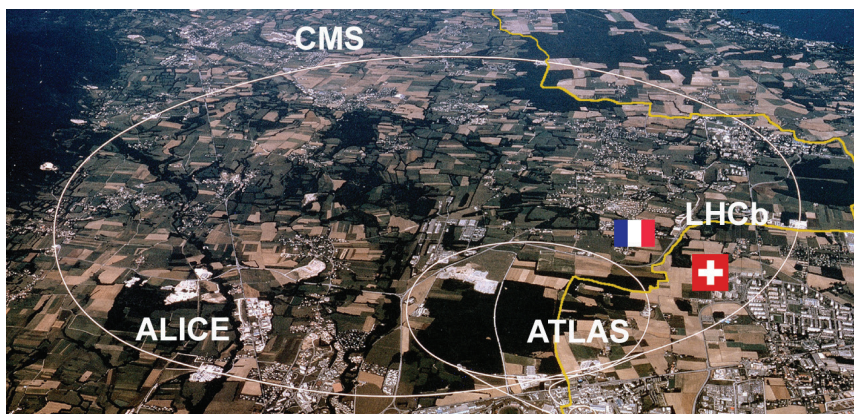


图 1. 地图展示了横跨法国和瑞士边境的大型强子对撞机隧道的位置。

部分磁体线圈有时会恢复到有电阻的状态。

这一现象可能源于下列几种原因：由机械运动交流损耗，或是环形运动的高能质子束所造成的损耗引起的局部温度升高。如果粒子偏离理想轨迹，然后撞击加速器四周的装置（例如磁体），那么高能质子束将沿机器圆周持续产生损耗。如果由撞击产生的能量沉积过大，就会导致局部线圈材料突然从超导状态恢复为正常导电状态，此现象称为失超。材料是否处于超导态可以用“临界面”来判断，取决于超导体所处的临界温度、电流密度和磁场（图 4）。上述任一参数超过“临界面”，超导体就会从超导状态变成有电阻状态，发生所谓的失超。

发生失超后，若不采取保护措施，电阻状态将导致储存在电磁线圈有限体积内的电磁能全部耗散掉。单个 LHC 偶极磁体储存了约 7 百万焦耳的能量，足以熔化超过 10 千克的铜。兆瓦级的能量可能耗散在线圈中，从而产生巨大的热量梯度。值得注意的是，储存在 1232 个 LHC 主偶极中的总能量高达 90 亿焦耳，相当于 1.5 吨

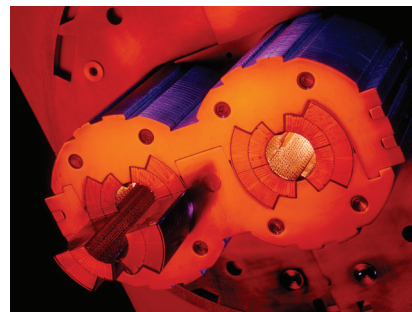


图 2. 主偶极孔的细节图。奥氏体钢轴环将超导线圈固定原位，可抵消额定场中每四分之一线圈 2 MN/m 的电磁力。

炸药中储存的能量。如果在额定能量下不幸发生失超且没有任何保护，强场加速器的磁体极有可能发生难以修复的损坏。更换报废磁体需要耗费长达数月的时间，由于期间粒子束无法工作，会严重影响加速器的正常使用。

Lorenzo Bortot 是 CERN 的电气工程师和研究员，从事超导磁体二维有限元电热模型的开发工作。他开发出了一种时域研究方法，可以对自动失超响应系统的最新技术方案进行性能评估。

» 失超检测

磁体在正常工作时处于稳定状态，产生的磁场（图 5）能引导粒子通

过大型粒子对撞机。由于线圈为超导材料，所以实际测得的磁体电压降等于零，几乎观察不到焦耳损耗。专用的电子系统可以监控磁体，实现对线圈中或相邻磁体间突然出现的电压降的快速响应。一旦信号超过给定电压阈值的时间长于最短有效时间，失超检测系统将立即启动保护预案。

保护系统不仅要具备合理的设计，适配于受监控的磁体，同时系统的电子装置还必须经过正确的配置与优化。一方面，检测系统必须具有足够的敏感性，不漏过任何一次失超事故的发生；另一方面，采用过于严格的标准可能会触发错误的警报。两种情况都有可能中断 LHC 的运行，造成长达数小时的故障停机，影响正常使用。

» 失超预防

磁体失超保护系统的原理十分简明有效：将失超扩展到整个磁体上，以此来最大限度地增加能够耗散能量的体积，避免储存的能量被一小块磁体全部吸收。

Bortot 解释说：“加热磁体的目的是扩大传导区域，使磁体储存的能量耗散到整个线圈中。这个方法乍看有悖直觉：常识告诉我们，当磁铁在正常工作时，应当尽量低温以维持超导态；然而，若单点发生故障，我们便需要尽快让整个磁体升温。温度均衡是关键。”

近来，CERN 开发了一种新颖的失超保护技术，极具应用前景。该技术被称为“耦合损耗诱导失超”（Coupling-Loss Induced Quench，简称 CLIQ）系统，其主要部件是与磁体线圈并联的带电电容组。该系统启动后可引入 LC 谐振，迫使磁体内的磁场发生振荡。

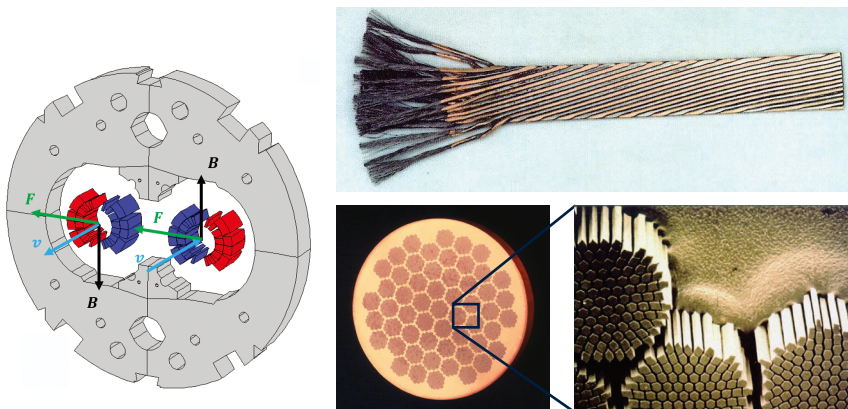


图 3. 左图：大型强子对撞机中主偶极的横截面。红色和蓝色域表示使粒子始终保持圆形轨迹的超导线圈，灰色域表示铁轭。右图：大型强子对撞机中强电流超导磁体的基础元件是由嵌入铜基体的微导电丝制成的电缆。

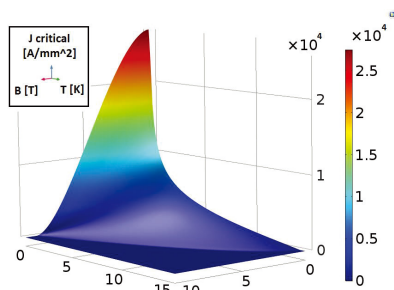


图 4. 磁体中 Nb-Ti 超导材料的临界面。

振荡磁场会在电缆（包括导电丝结构）中引起耦合电流和涡流。线圈会以一种极均匀的方式从内部开始升温，其升温过程类似于微波加热。CLIQ 系统拥有双重功能：最大限度地增加产生感应涡流的磁体体积，同时尽可能缩短超导电缆超过临界温度转变为正常状态所需的时间。在此过程中，能量耗散主要以焦耳热的形式发生。几乎整段线圈都会产生焦耳热，而非集中在单块区域，这保证了失超区域和电阻热能够尽可能均匀地扩散。

» 计算过程中的挑战

通过使用一系列商用仿真工

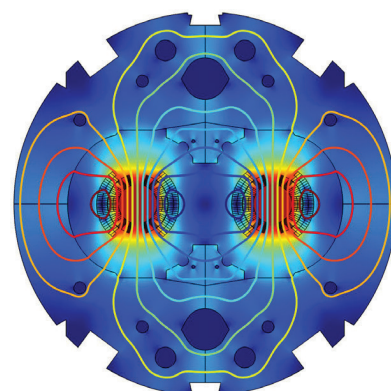


图 5. 模型显示了超导态下施加额定电流的磁体磁场。

具，CERN 的电气工程师团队模拟了加速器磁路中的瞬态效应，并据此开发了一个模块式框架。Bortot 精通 COMSOL Multiphysics® 软件和 Java® 代码，他创建了描述失超传播的电动力学和热量变化的数值模型。计算过程中的挑战需要依赖灵活的工具和精细的设置才能解决。

LHC 的偶极磁体横截面包含数百个子域，每个子域代表半匝绕组电缆，它们共同构成整个线圈（图 6 上）。这些半匝线圈不会全部同时失超，局部的

失超会沿横截面传播和扩散,其过程复杂、难以模拟。“解决此问题的关键是找到一种能以一致的方式对热和电动力学进行耦合的方法。”Bortot 解释说,“为了准确计算上述过程,使每半匝磁

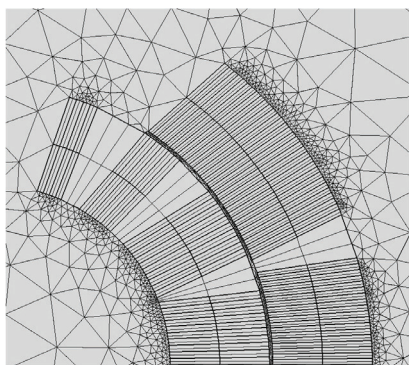
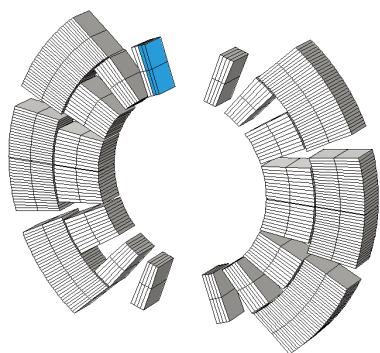


图 6. 上图:磁体的截面几何。下图:磁体截面的有限元模型网格。

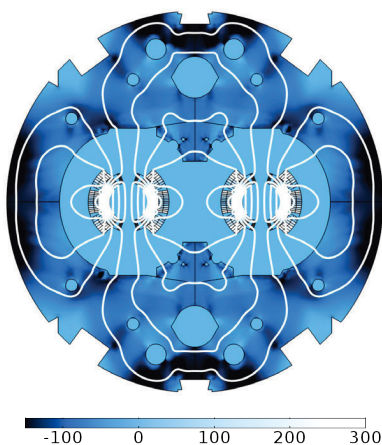


图 7. 涡流以 100 A/s 的速度线性上升至 8 kA 时的等效磁化强度。

体线圈能独立于其他线圈发生失超,每个子域都需要使用专门的方程组。”

要描述失超的电动力学和热变化,研究人员必须在两种尺度下对线圈行为进行模拟,即米(磁体的横截面尺寸)和微米(电缆内导电丝的横截面尺寸)。另外,失超只在几微秒内产生,然后以毫秒为单位进行传播,而磁体完全放电可能要经过 1 秒。也就是说,研究团队需要同时研究三个不同的时间尺度。

“这本质上是一个多物理场、多尺度和多重速率的问题,相互依赖的现象会在不同空间和时间尺度上各自变化发展。”Bortot 解释道。

绝大多数仿真软件不具备创建该模型所需的高效计算能力。使用此类软件时,网格需要跨越六个数量级,求解器时间步长只能采用最小的时间尺度,这会产生大量额外的数据,浪费时间进行不必要的计算。

为了解决这个问题,CERN 的研究团队在 COMSOL® 软件中引入了描述等效磁化强度的表达式对系统进行分析(图 7)。他们没有解析超导电缆中耦合电流的微米级路径,而是利用电流对磁场产生的等效影响来模拟这类寄生电流。Bortot 解释道:“我们以时间常数为系数建立了一个公式,并规定等效磁化强度与场的导数成比例。该公式结合了 Faraday-Neumann-Lenz 和 Ampère-Maxwell 定律。这种做法的前提是已知耦合电流在电缆中占用的路径,这样才能使用等效时间常数进行

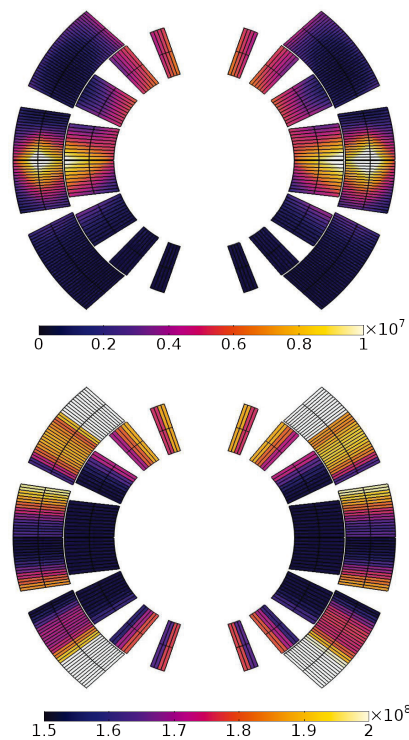


图 8. 线圈中不同的损耗机制,单位为 W/m^3 。上图: CLIQ 产生的感应涡流损耗。下图:由于失超扩散产生的欧姆损耗。

关联。”

COMSOL 软件的灵活性同样令人瞩目。Bortot 可以编辑标准的麦克斯韦方程组并修改变量。“COMSOL 软件支持编辑待求解的方程,我可以根据需要修改标准的磁矢势公式。另外,因为需要对磁场进行时间求导,我们须要能够访问上一个时间步长的解。”

“因为我们已经考虑了等效磁化强度的耦合电流,所以不希望有任何其他已经包含在系统中的电流环流。通过禁止线圈域产生感应电流,我们

“COMSOL 软件支持编辑待求解的方程,我可以根据需要修改标准的磁矢势公式。”

— LORENZO BORTOT, CERN 电气工程师

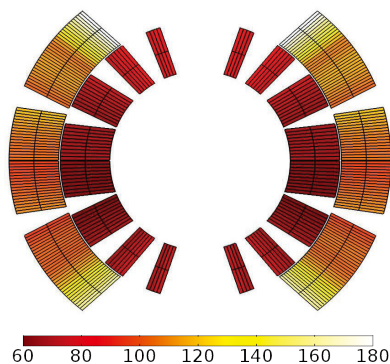


图 9. 失超发生 500 ms 后的线圈温度分布 (K)。

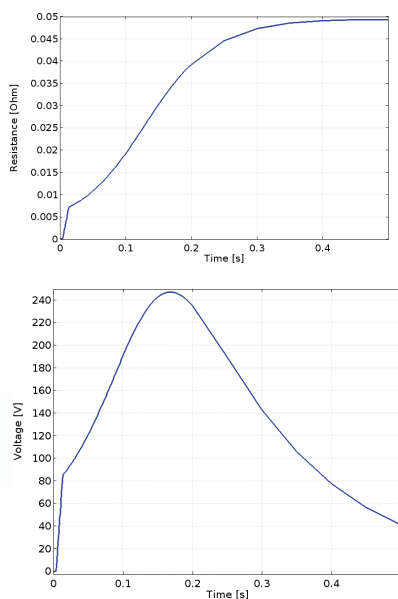


图 10. COMSOL® 软件模型对失超过程的模拟结果。上图:线圈中电阻的增加。下图:线圈终端提取的电压信号。

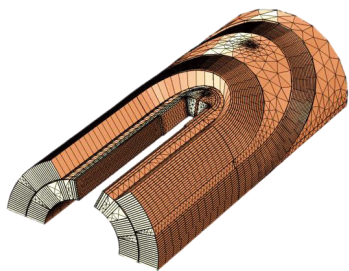


图 11. 三维模型几何和网格的未来方案。

减少了大量工作。可以说，这是整个架构的基石。”这种以间接方式模拟耦合电流的方法也有利于大幅简化网格（图 6 下）。

除了需要用一致的方式模拟系统物理场，研究人员还要面对由模型构建带来的难题。在低温下，高度非线性的材料属性会使数值表达式极为复杂。为了以高效的方式构建并控制数值表达式，研究人员调用了储存在共享公用库中的外部 C 语言函数。除此之外，每半匝线圈均需要使用一组相关变量和算子来表征，其中，线圈的微米级绝缘涂层也需要考虑在内。绝缘涂层对于准确捕捉失超的传播至关重要，为此，研究人员使用了软件自带的内置薄层功能避免了对薄层进行网格剖分降低了模型的复杂程度。

重复的子单元可由软件自动装配，这不仅节省了时间，同时还减少了出现人为误差的可能性。鉴于这一原因，研究人员使用 COMSOL 提供的应用程序编程接口 (API)，用 Java 程序生成了有限元模型中磁体的横截面，可将用户输入转换成分布式模型。这一方式确保了有限元法能够灵活地适应不同类型的磁体。

通过在模拟中使用等效磁化强度替代耦合电流，研究人员可以立即计算出损耗，并得到损耗与磁场变化的函数表达式。由此他们得出结论：磁场变化直接以等效耦合电流损耗的形式耗散。

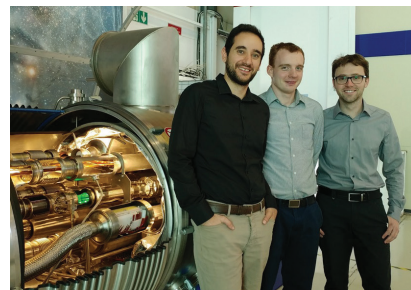
该团队取得的主要成果之一是创建了大型强子对撞机中主要偶极的失超行为仿真。仿真假设 CLIQ 保护系统可以迅速启动，以减轻失超后果。仿真分析考虑了随温度和磁场变化的非线性材料属性，研究了超导磁体中的磁场振荡及其产生的感应涡流和耦合电流损耗（图 8 上）；失超扩散及其

产生的电阻热（图 8 下）；以及由线圈中沉积的热损耗导致的最终温度分布（图 9）。另外，通过求解热平衡方程，研究人员对 CLIQ 组件的设计进行了交叉检查以确保得到正确的温度，从而能够在整个磁体中扩散失超，保证向线圈输入适当大小的功率。此外，模型还支持提取与失超相关的集总参数，例如随时间变化的线圈电阻和电压（图 10），在后续研究中，集总参数可用作模拟磁体外部电路网络的电路模型输入。

» 从 LHC 到未来的粒子加速器

Bortot 的仿真结果表明，重现突发能量耗散所涉及的相互耦合的物理现象是可以实现的，它为深入研究磁体失超问题提供了合适的分析工具。

现在，研究人员将模型扩展到了正在设计和建造的磁体，为建造大型强子对撞机的高亮度升级版和下一代加速器——未来环形对撞机做准备。他们还会探究将模型扩展到三维域的可行性（图 11）。在设计进程中，这些模型会一直为开发未来的失超检测和保护系统提供有力的支持和帮助。团队作出的出色贡献让当下和未来的加速器都免于承受失超造成的后果，研究人员也能继续研究物质的本质，而不必担心超导磁体发生损坏。☺



从左至右依次为:Lorenzo Bortot、Michal Maciejewski 和 Marco Prioli。