



多物理场仿真 助力超导磁悬浮列车研究

为了验证超导磁浮列车悬浮系统设计的合理性，中车长春轨道客车股份有限公司使用COMSOL多物理场仿真对高温超导磁浮列车的磁悬浮系统和磁屏蔽设计进行了优化。

文/本刊记者 朱金凤

中国的轨道交通在过去的40年里取得了长足的发展，现有高铁长度居全球第一，占全球高铁总长的2/3。然而，即便是现在最先进的高速动车组，其运行速度也难以超过400 km/h。为了进一步缩短人们交通出行的时间，工程人员正在寻找新的交通方式。磁浮技术的发展引起了越来越多人的关注，磁悬浮列车也就成为了近些年的研究热点。磁悬浮列车有望填补高铁和航空运输之间的速度空白，形成航空、高铁、高速磁浮和城市交通之间更加高效、便捷的多维交通网络。

磁悬浮列车是一种新型轨道交通技术，列车的磁悬浮系统和导向系统通过磁铁“同性相斥，

异性相吸”的原理，使列车悬浮在轨道上运行。常见的磁悬浮系统有两种，即常导磁悬浮和超导磁悬浮。常导磁悬浮系统在静止和运动过程中都能实现悬浮，但悬浮间隙较小，且运行速度较低；超导磁悬浮系统需要车体在运动时通过切割磁力线产生悬浮力，可以产生较大的悬浮间隙，从而高速、稳定运行。

中国中车集团是全球领先的高端装备系统解决方案供应商，其子公司中车长春轨道客车股份有限公司（简称“中车长客”）是中国轨道交通装备研发、制造和服务的龙头企业。近年来，中车长客致力于开发基于超导磁浮技术的高温超导

磁悬浮列车。

高温超导磁悬浮系统

高温超导磁悬浮是一种独特的无源自稳定系统，即无须任何额外的运行控制系统就可以实现车体的稳定悬浮。高温超导磁悬浮列车主要由悬浮系统、推进系统和导向系统三部分组成。中车长客设计的车辆左右两侧安装有超导磁体，轨道上对应位置安装牵引线圈和悬浮线圈。当直线驱动系统中的牵引线圈通入三相交流电后，通过牵引线圈产生的行波磁场与车体上的超导磁体相互作用，从而驱动车体行驶。列车的悬浮系统由悬浮线圈（即“8”字线圈）和超导磁体组成。车体在运动时，轨道中的悬浮线圈会切割位于车体上的超导磁体产生的磁场，在悬浮线圈中产生感应电流，进而在悬浮线圈和超导磁体间产生向上的悬浮力和横向（相对于车体）的导向力。当车速达到一定的速度时，车身就可以悬浮。

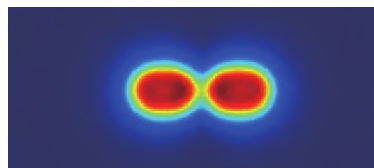
针对磁悬浮列车的开发，工程师需要对悬浮系统进行设计、优化与测试，其中一些试验由于技术复杂，在实际中难以开展。仿真技术的出现为悬浮列车的设计和优化提供了有力支撑。中车长客的工程师们希望通过仿真的方法对超导磁体的悬浮系统和电磁屏蔽设计进行研究，为磁悬浮列车的制造和实际运行提供指导。由于磁悬浮系统的研究涉及电学、力学、传热以及流体等多种物理现象，工程师最终选择了COMSOL Multiphysics®多物理场仿真软件对高温超导磁浮列车的悬浮系统进行设计优化。

磁悬浮系统的设计优化

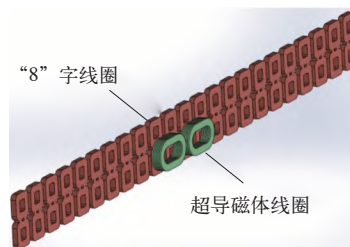
超导磁体的空间磁场分布是磁悬浮系统设计的基础，也是磁悬浮列车设计的基础。悬浮系统设计主要涉及超导磁体设计和悬浮力验证，即工程师需要了解超导磁体在不运动情况下的空间磁场分布（即静态磁场分布），以及超导磁体与悬浮线圈之间的作用力是否满足列车悬浮的需求。

基于实际超导磁体参数，中车长客的工程师使用COMSOL®软件建立了超导磁体的几何结构，并对超导磁体的电磁场进行了数值模拟。当系统通电后，超导磁体电阻为零并产生电磁场，其在悬浮线圈处的空间磁场分布如图1a所示。接着，根据列车的实际运行情况，工程师对超导磁体与

悬浮线圈之间的动态耦合特性进行了分析。为了简化分析，团队建立了超导磁体和悬浮线圈的部分三维几何模型如图1b所示。通过仿真分析并结合其他计算，工程师最终验证了中车长客的设计能够满足列车悬浮所需的磁场力，为悬浮系统的设计提供了依据。



a) 超导磁体线圈在悬浮线圈处的静态磁场分布



b) 超导磁体和悬浮线圈（即“8”字线圈）的部分三维几何模型

图1 超导磁体及磁悬浮系统设计，COMSOL®多物理场仿真可以准确地分析超导磁体的空间磁场分布

电磁屏蔽设计

位于列车上的超导磁体在运行过程中会产生强磁场，列车在运行状态下，磁体表面的磁场强度超过3 T。然而电磁环境控制的国家标准要求对人体不产生伤害的磁场强度应不大于0.04 T。如果不加以防护，过强的电磁场将会对列车和站台上的乘客及物品造成伤害。中车长客的工程师希望通过增加安全防护装置使磁悬浮系统产生的电磁场强度在指定区域内降至安全范围，这些区域包括车厢内、廊桥以及候车室等，如图2所示。

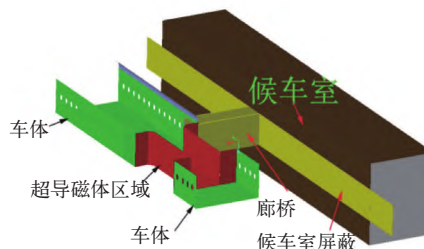


图2 电磁屏蔽区域示意图

在进行电磁屏蔽设计时，工程师使用COMSOL多物理场仿真软件对超导磁体所产生的磁场分布进行了模拟，并在模型中对不同的屏蔽

材料进行分析，用于寻找合适的屏蔽材料和结构设计。“COMSOL软件内置了多种不同的材料，通过调节屏蔽层厚度和材料属性等设计的关键参数，我们可以了解屏蔽层和材料对屏蔽效果的影响，快速筛选不同的设计方案。”中车长客的工程师解释道。经过筛选，团队最终确定了Q235钢为屏蔽材料。为了验证电磁屏蔽设计能够满足电磁环境控制的国家标准要求，工程师对车体周围

及超导磁体的磁感应强度分布进行了模拟，并在指定区域内添加了屏蔽板进行仿真分析，评估屏蔽板对超导体产生磁场的屏蔽作用。添加了屏蔽钢板后，车厢内的磁场强度大幅减弱，如图3所示。当钢板的厚度达到20 mm时，列车客室内磁场强度满足国家磁场安全标准，另外，不同区域采用不同厚度的钢板进行屏蔽可以有效满足车辆减重的要求。

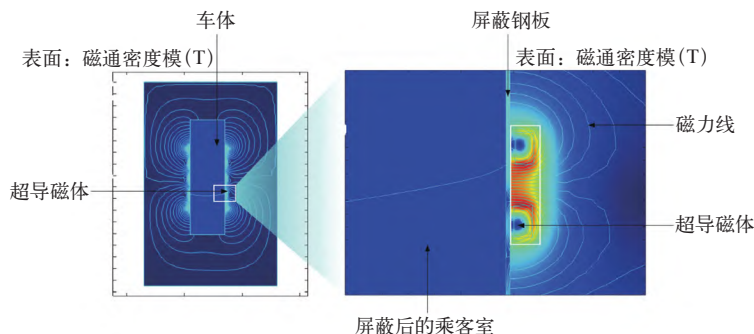


图3 磁浮列车及车体周围的磁感应强度分布。仿真结果显示，进行电磁屏蔽后，乘客室内平均磁场强度显著减弱（右侧放大图）

虽然加装20 mm钢板可以使电磁场在乘客区域满足国家标准，但是增加的重量会同时增加列车的运行能耗。中车长客的工程师希望通过仿真的方法，寻找在能够保证电磁屏蔽效果的前提下减轻防护钢板重量的设计方案。基于超导磁体励磁产生的空间磁场分布，团队通过仿真分析发现，虽然在悬浮架区域（乘客区域）需要使

用20 mm厚度的屏蔽钢板，但是在其毗邻区域车内（侧墙、端墙、底板和贯通道等区域）使用15 mm厚度的钢板就可以达到电磁屏蔽的国家标准。因此，他们对超导磁悬浮列车的磁屏蔽结构设计进行了优化，如图4所示。通过这样的设计，有效减少了防护装置的重量，进而提升了列车的运行效率。

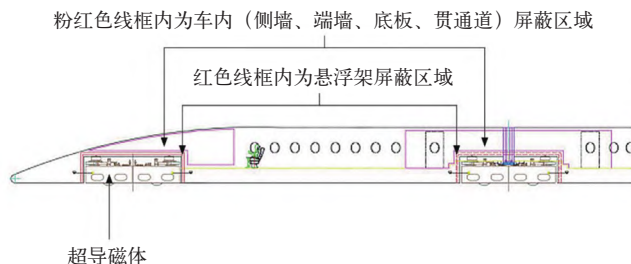


图4 超导磁悬浮列车及周边区域磁屏蔽结构设计简图

基于仿真分析结果，团队还对廊桥和候车室进行了电磁防护装置的设计优化，包括廊桥通道的屏蔽钢厚度、候车室距离轨道区域的距离和墙体中预埋入屏蔽钢的厚度等，帮助工程人员快速筛选设计方案，优化材料配置，实现列车的轻量化设计。“COMSOL®多物理场仿真软件功能强大，可以便捷、准确地模拟超导磁体的空间磁场分布，合理设置磁屏蔽钢板，优化悬浮架结构和电磁屏蔽设计，节省了磁浮列车研制的时间和成本。”中车长客的崔黎辉博士总结道。

未来计划

通过仿真分析与优化，中车长客设计的高温超导磁悬浮系统及其核心部件的关键性能得到了初步验证，为后续工程化样车的研制奠定了基础，更为企业研发取得重要突破提供了技术支撑。未来，中车长客还希望借助仿真攻克多项技术难关（如高温超导磁体的工作温度），继续开发更多基于高温超导技术的交通工具。该项目的负责人邵南博士相信，COMSOL多物理场仿真与磁浮技术的完美结合，有助于实现轨道交通发展的前瞻性和颠覆性变革。EA

（该项目的成员还包括：李凯、刘帅、杨晶、邵晴）