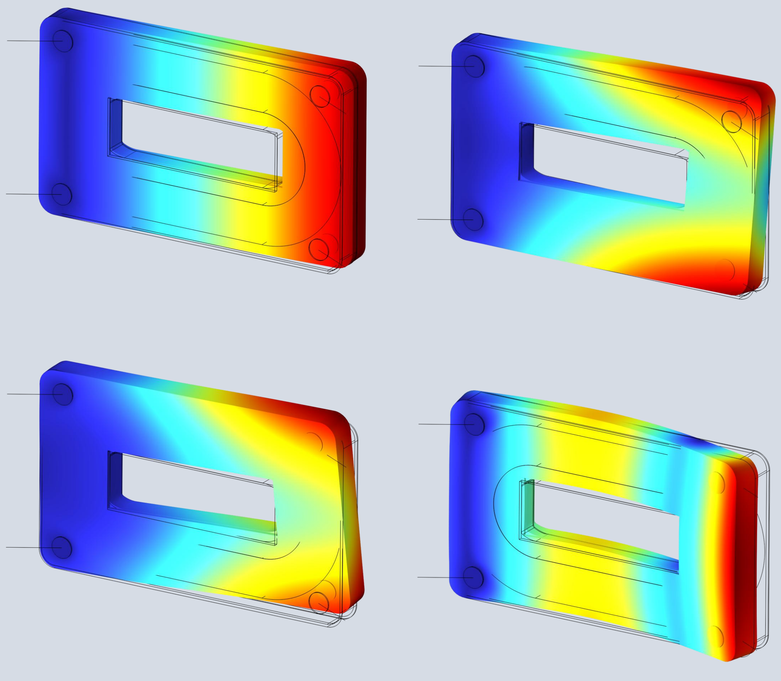


超低温环境下的超导磁极振动特性仿真分析

基于 COMSOL 多物理场耦合的 1–367Hz 频域振动分析

丁文超；邵晴

中车长春轨道客车股份有限公司 磁浮研究所；吉林省 长春市 130062

简介

超导磁浮列车没有传统车轮，车体靠地面线圈与车载超导磁体之间的电磁作用实现悬浮和驱动，地面线圈分两类：牵引线圈通入三相交变电流产生行波磁场，与车载超导磁体作用驱动前进；悬浮线圈感应电流产生磁场，与车载超导磁体作用产生悬浮导向力，使车稳定对中。列车运行时，地面线圈电流不断切换，磁极受到的电磁力也周期性变化；如果这个力的频率接近磁极的固有频率，就可能发生共振。超低温服役环境和装配预紧又会改变结构刚度与应力状态，使振动问题更复杂。以 600 km/h 运行工况为参考，此时悬浮线圈和牵引线圈对磁极的激励频率分别为367Hz和183 Hz。
因此，本次仿真关注在1-367Hz内，超导磁极在牵引线圈和悬浮导向线圈的激励下的振动特性，可为低温超导磁极的抗振设计提供仿真参考。

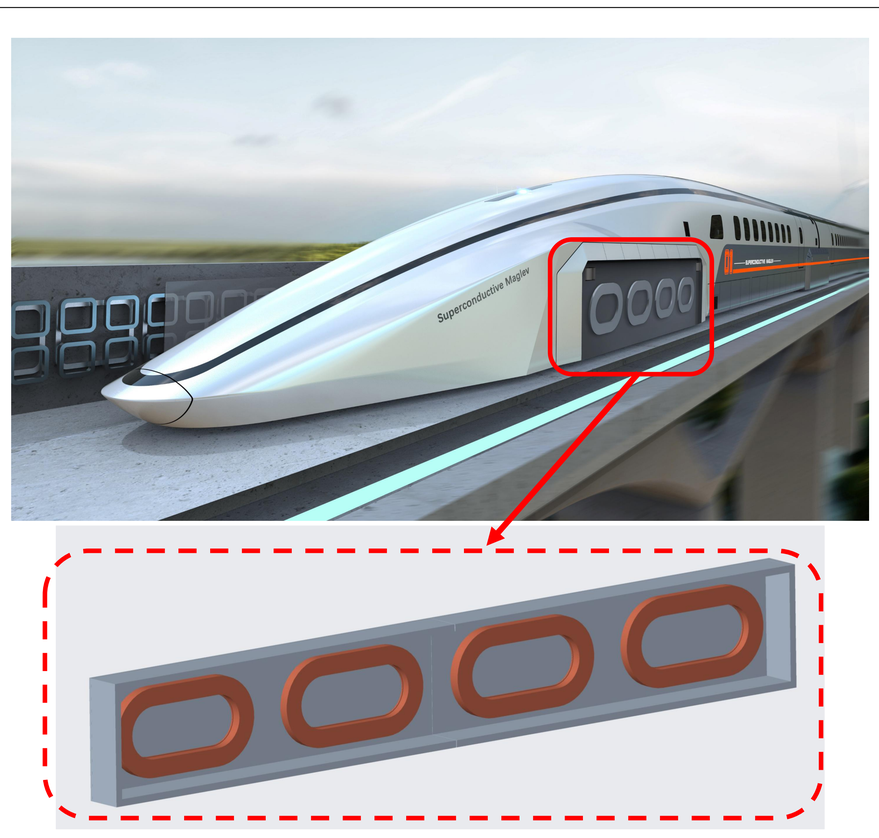


图1. 地面线圈-超导磁体-列车示意图

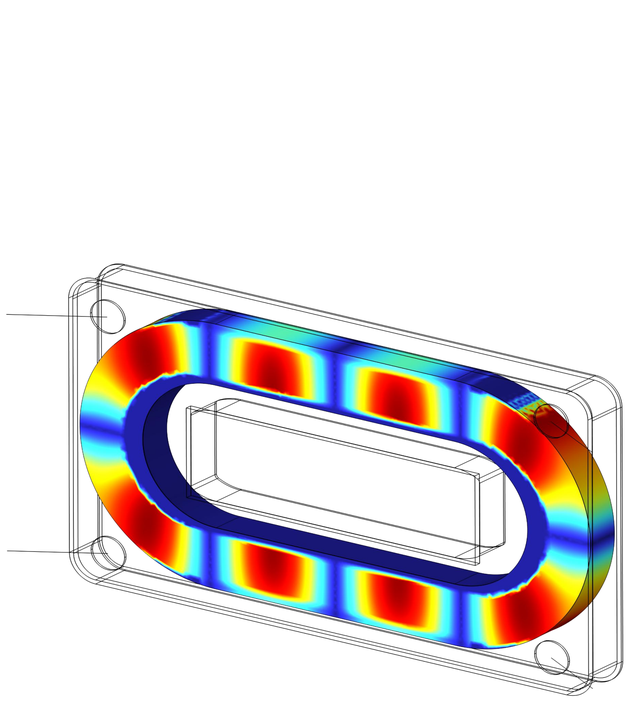


图2. 超导磁极简化模型

分析方法

基于 COMSOL 建立简化超导磁极模型，耦合固体传热、固体力学与梁建模。地面线圈对磁极的电磁力不直接做实时电磁耦合，而是按地面线圈与磁极的空间位置、磁场强度理论计算磁极所受电磁力的分布，然后在 COMSOL 中作为体分布载荷施加到超导磁极主体，等效悬浮/牵引交变激励。

同时考虑超低温与装配预紧，采用稳态—特征频率—频域模态分析步骤进行分析。识别超导磁极约束状态下的特征频率及对应的模态振型；并在 1–367Hz 内分析超导磁极的频域响应振型。

结论

通过在 1–367 Hz 内对简易磁极开展的模态与频域响应分析可以得出：悬浮线圈产生的交变电磁力更容易激发出超导磁极的扭转模态；牵引线圈产生的交变电磁力更容易激发出超导磁极的弯曲模态。

本次仿真得到了不同种类地面线圈对超导磁极的激振趋势，为磁极的减振和优化提供了参考。由于模型和参数简化较多，下一步需细化优化仿真模型、并通过试验对比确定阻尼等参数。并给出定量的仿真分析结果。

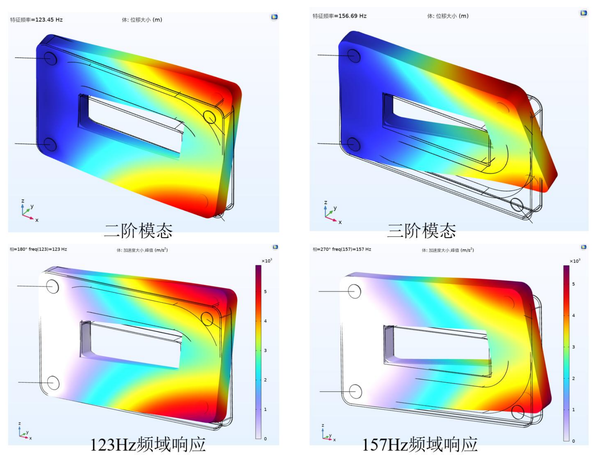
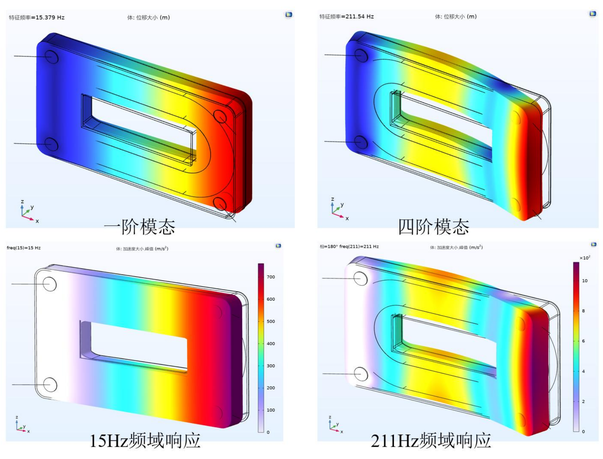


图3. (a) 振型对比—悬浮线圈作用



(b) 振型对比—推进线圈作用

参考文献

[1] Shao Q, Yu Q, Li K, et al. Traction System Capacity and Operational Quality of the EDS Transportation System Based on the Real-Time Simulation Platform[J]. Journal of Railway Science and Technology, 2026.
[2] Mizuno K, Tanaka M, Ogata M. Mechanical vibration tests on real-scale REBCO coil[J]. Quarterly Report of RTRI, 2018, 59(4): 287-292.