

三维高温超导磁悬浮动态磁-热-力行为仿真研究

黄志川¹, 黄欢¹, 邓自刚¹, 郑珺^{1*}

1. 牵引动力国家重点实验室高温超导磁悬浮课题组, 西南交通大学, 四川省, 成都市

*jzheng@swjtu.edu.cn



简介: 具有无源自稳定特性的高温超导磁悬浮在近些年来备受关注。而基于永磁轨道实体建模的仿真还未推进到三维研究。此研究借助COMSOL软件平台, 耦合AC/DC模块及固体传热模块, 对三维悬浮系统悬浮力及温升效应进行了仿真求解。

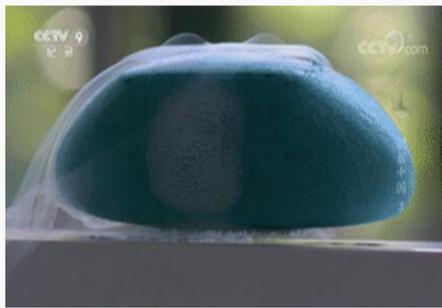


图 1. 高温超导磁悬浮

计算方法: 耦合AC/DC模块以及固体传热模块。基于Maxwell方程组和H法, 选用E-J幂指数电磁本构关系。建立了三维高温超导磁悬浮动态磁-热-力耦合基础理论模型, 分析了在磁轨不平顺下, 高温超导块材在动态运行工况下内部温度变化及其交流损耗。

H法控制方程:

$$\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{H}) = 0 \quad \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

热传导方程:

$$c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (\lambda \nabla T) = Q \quad Q = EJ$$

E-J本构关系:
$$\mathbf{E} = E_c \left(\frac{|\mathbf{J}|}{J_c} \right)^n \frac{\mathbf{J}}{|\mathbf{J}|}$$

几何模型:

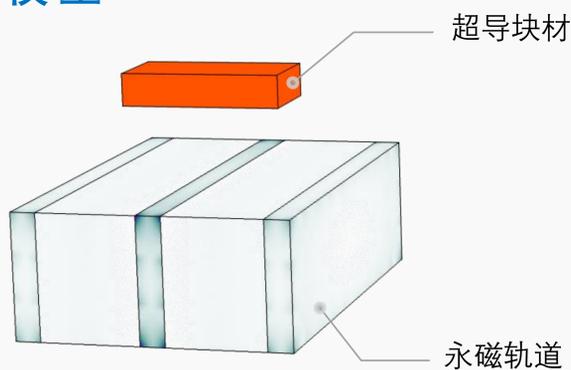


图 2. 高温超导磁悬浮仿真模型

计算结果:

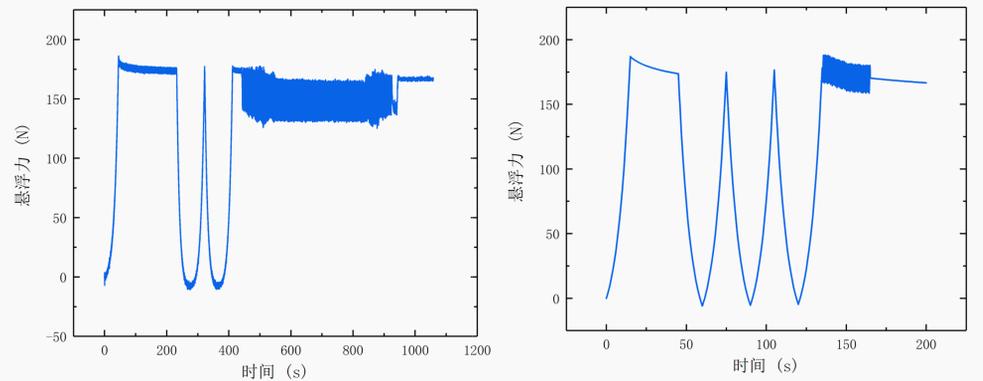


图 3. 实验 (左) 及仿真 (右) 悬浮力对比

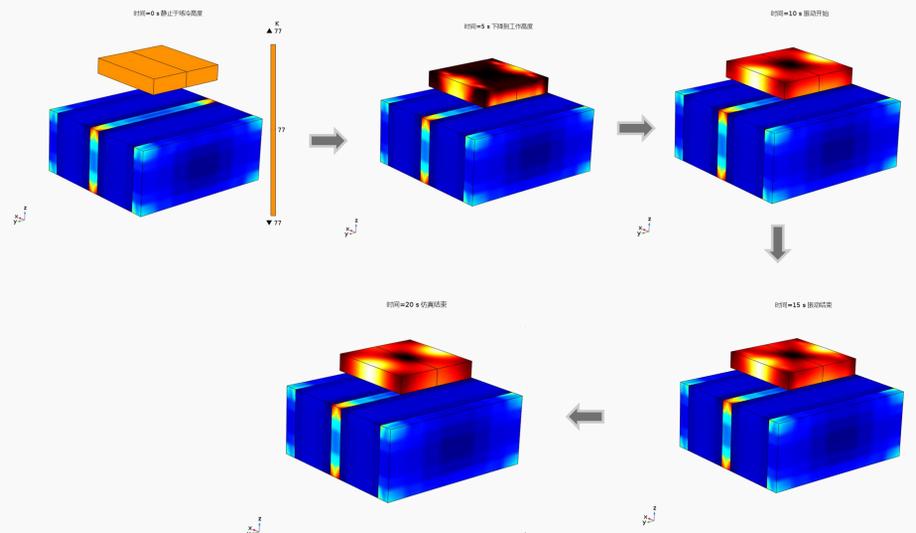


图 4. 超导块材体内温度变化

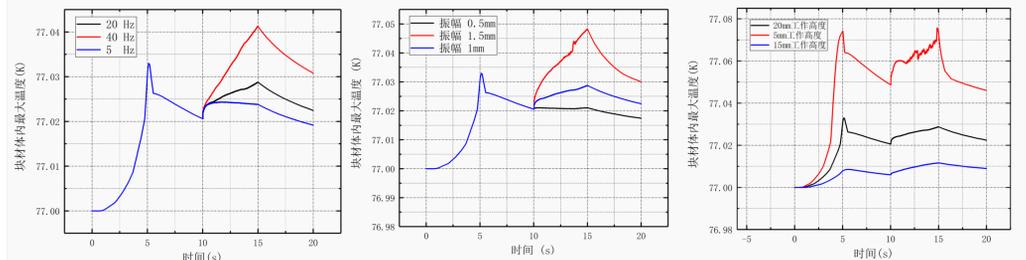


图 5. 块材体内最大温度变化

结论: 高温超导块材动态下实验与仿真的结合, 验证了三维仿真模型的可行性, 为高温超导磁悬浮系统建模及其热效应、能量损耗等问题的研究提供了一定的参考依据。

参考文献:

- [1] Numerical study of the relation between the thermal effect and the stability of the levitation system excited by an external source[J]. Physica C: Superconductivity, 487:1-10 (2013).
- [2] Zheng J, Huang H, Zhang S, et al. A general method to simulate the electromagnetic characteristics of HTS maglev systems by finite element software[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018:1-1.

