

# 通过磁标势和磁场强度耦合的方法求解高温超导磁悬浮轴承数值模型

关翔<sup>1,2</sup>, 李青<sup>1,2</sup>

1. 航天低温推进剂国家重点实验室 (中国科学院低温工程重点实验室), 北京, 100190, 中国  
2. 中国科学院大学, 北京, 100190, 中国

**简介:** 高温超导磁悬浮轴承是超导磁悬浮系统的重要应用之一。在高温超导悬浮系统的数值计算过程中, 描述超导体和永磁体的相对运动是一个相对复杂的问题。针对这一问题, 我们利用 COMSOL Multiphysics® 软件, 对永磁域和超导域分别求解磁标势和磁场强度, 然后再耦合处理。求解磁标势的区域可以方便地使用非连续性网格来保证物理场的连续性, 从而有效解决超导体和永磁体相对运动的问题, 并且针对复杂的结构也能够方便建模, 快速求解。本文针对某径向型高温超导磁悬浮轴承进行了计算, 能够得到与实验较为吻合的数值结果, 验证了方法的有效性, 这对超导磁悬浮轴承的设计、优化及特性研究具有一定的工程意义。

**主要求解方程:**

$$\nabla \times (\rho \nabla \times H) + \mu_0 \mu_r \frac{\partial H}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

其中, 在超导域求解如下 E-J 关系:

$$\rho_{sc} = \frac{E_c}{J_c} \left| \frac{J}{J_c} \right|^{n-1} \quad (2)$$

**结果:** 求解了永磁转子从中心位置以 1mm/s 的速度先向上运动 10mm, 再向下运动 10mm 过程中的悬浮力, 如图 3 所示。同时, 也可以得到超导体表面屏蔽电流的分布, 如图 4 所示。

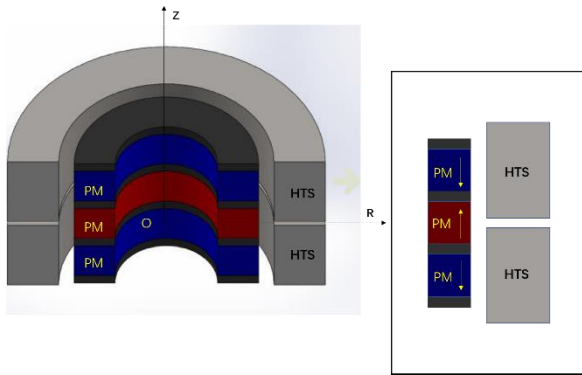


图 1. 某径向型超导轴承模型示意图 [1]

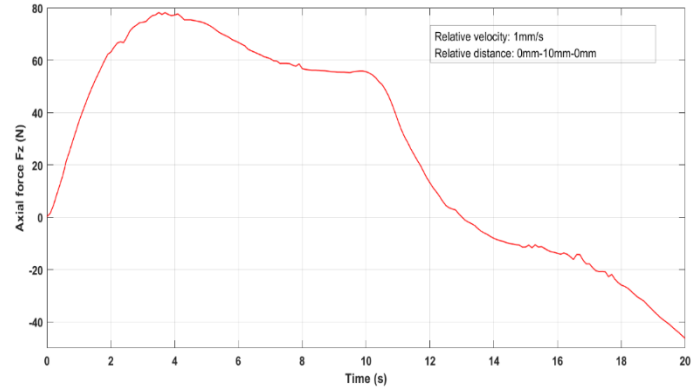


图 3. 悬浮力随时间的变化

**计算方法:** 通常, 将总的求解域可以分为永磁域, 超导域, 以及除此之外的空气域三部分。其中, 对于永磁体的建模是在磁场无电流接口来实现的。超导体的建模在磁场公式接口实现。通过移动网格来描述超导体的运动 [2]。设置“一致对”来保证物理场的连续。通过这样的方法, 我们既可以精确地描述永磁体的磁场, 也可以轻易地实现动态建模, 且求解方便, 速度较快。如图 2 所示。

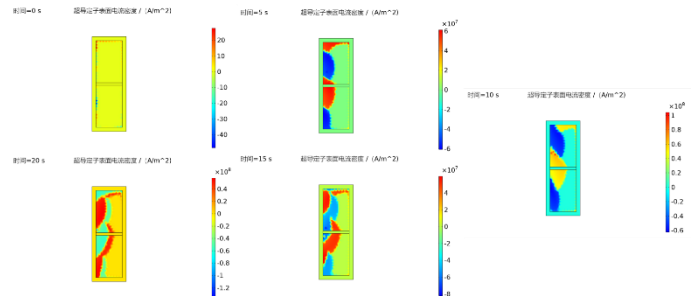


图 4. 超导体表面屏蔽电流的变化

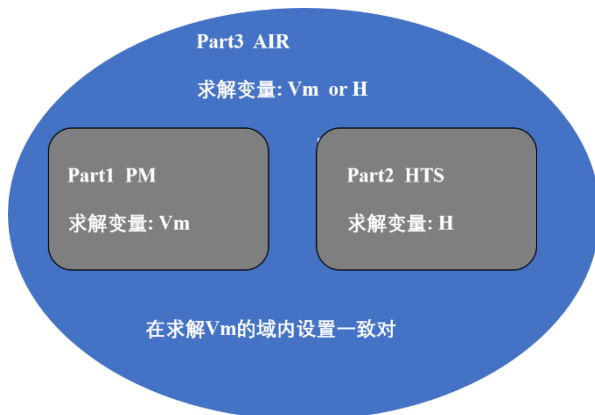


图 2. 求解方法示意图

**结论:** 在可接受的工程误差范围内, 本文的建模计算能够对系统进行较好地定量描述 [1, 3], 因此可以用来对超导磁悬浮轴承进行设计、优化及特性研究。

**参考文献:**

1. Ai L, Zhang G, Li W, Liu G, Liu Q. Optimization of radial-type superconducting magnetic bearing using the Taguchi method. *Physica C: Superconductivity and its Applications*. 2018;55057-64.
2. Grilli F, Morandi A, Silvestri FD, Brambilla R. Dynamic modeling of levitation of a superconductor bulk by coupled H-magnetic field and arbitrary Lagrangian-Eulerian formulations. *Superconductor Science and Technology*. 2018;31(12):125003.
3. Yu Z, Zhang G, Qiu Q, Hu L, Zhuang B, Qiu M. Analyses and Tests of HTS Bearing For Flywheel Energy System. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on*. 2014;241-5.