

高温超导块材的交流损耗及温升特性研究与分析

陈洋¹, 金李炜², 陈楠², 郑珺^{2*}

1. 电气工程学院, 西南交通大学, 四川省, 成都市

2. 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

* Corresponding author: jzheng@swjtu.edu.cn (Jun Zheng)

简介: 高温超导磁悬浮系统在运行过程中, 由于非理想永磁轨道表面的不平顺, 超导块材YBCO内将会产生交流损耗, 这直接影响到高温超导磁悬浮系统的稳定性。本文在不同频率和幅值的交变外场激励下, 计算了超导块材的交流损耗特性和温升特性。

计算方法: 本文结合COMSOL Multiphysics软件中的PDE模块和传热模块, 建立超导块材YBCO及交变外磁场的磁-热耦合模型。

E-J关系: 幂指数模型 $E = E_0 \left(\frac{J_z}{J_c}\right)^n$

热传导方程: $c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda \nabla T) = E \cdot J$

H法控制方程: $\nabla \times (\rho \nabla \times H) = -\mu_0 \frac{\partial H}{\partial t}$

温升特性方程: $J_c(T) = J_0 \cdot (1 - (T - T_c)^2)^{\frac{3}{2}}$

Maxwell方程组: $J = \nabla \times H \quad \nabla \times E = -\mu_0 \mu_r \frac{\partial H}{\partial t}$

偏微分控制方程:
$$\begin{cases} \mu_0 \mu_r \frac{\partial H_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(E_0 \left(\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) / J_c \right)^n \right) = 0 \\ \mu_0 \mu_r \frac{\partial H_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(E_0 \left(\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \right) / J_c \right)^n \right) = 0 \end{cases}$$

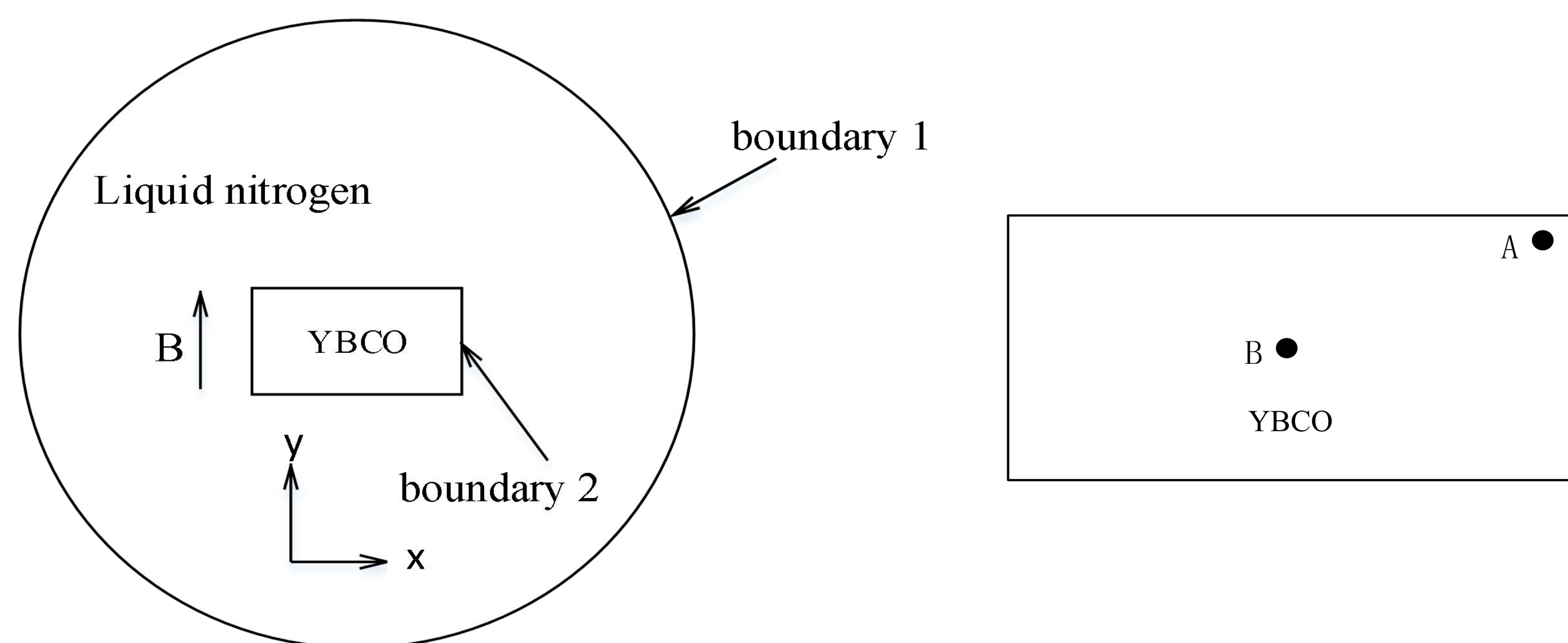


图1. 仿真建模的二维图 (左) 超导体内部探针位置 (右)

表1. 液氮及超导块材相关参数

对象	参数	热导率(W/m·K)	密度(kg/m ³)	热容(J/K)
液氮		0.028	980	874
YBCO		17/4.5	6300	132

结果: 仿真数据结果如下所示

表2. 不同幅值、不同频率外磁场激励下的超导体内部最高温度

		B(T)			
		0.25	0.5	1.0	1.75
f(Hz)	T(K)				
10		77.9	80.6	81.6	83.0
20		78.0	81.1	82.3	84.1
30		78.1	81.4	82.8	84.8
50		78.1	81.8	83.3	97.6

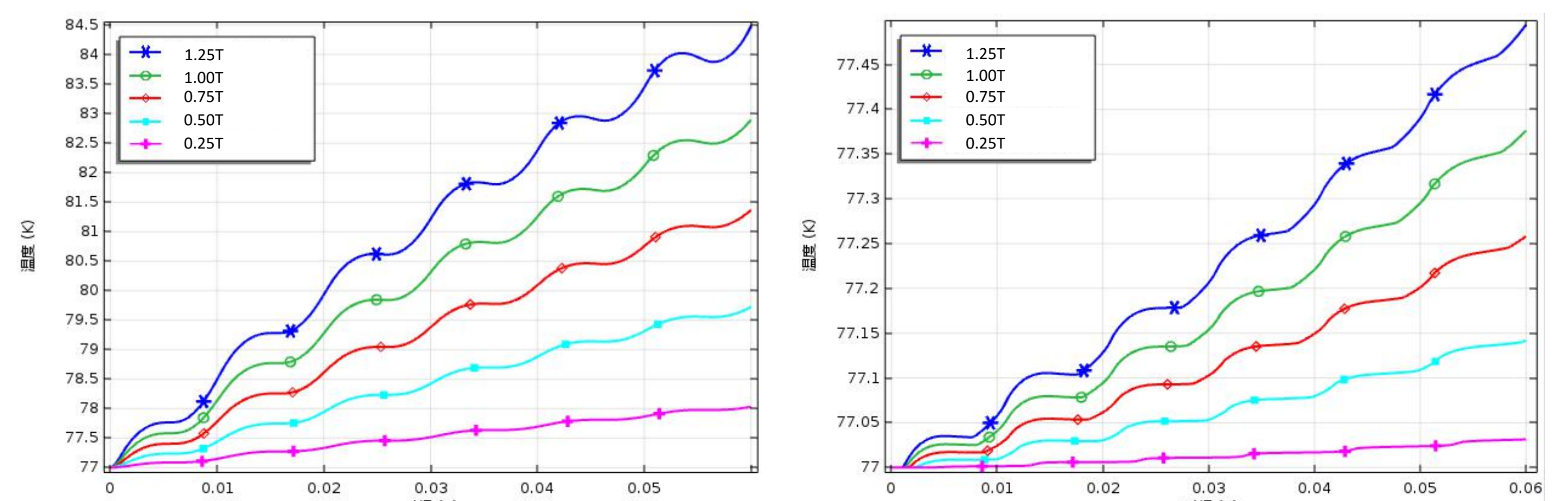


图2. 频率为50 Hz, 不同外磁场幅值A点 (左) 和B点 (右) 的温升特性曲线

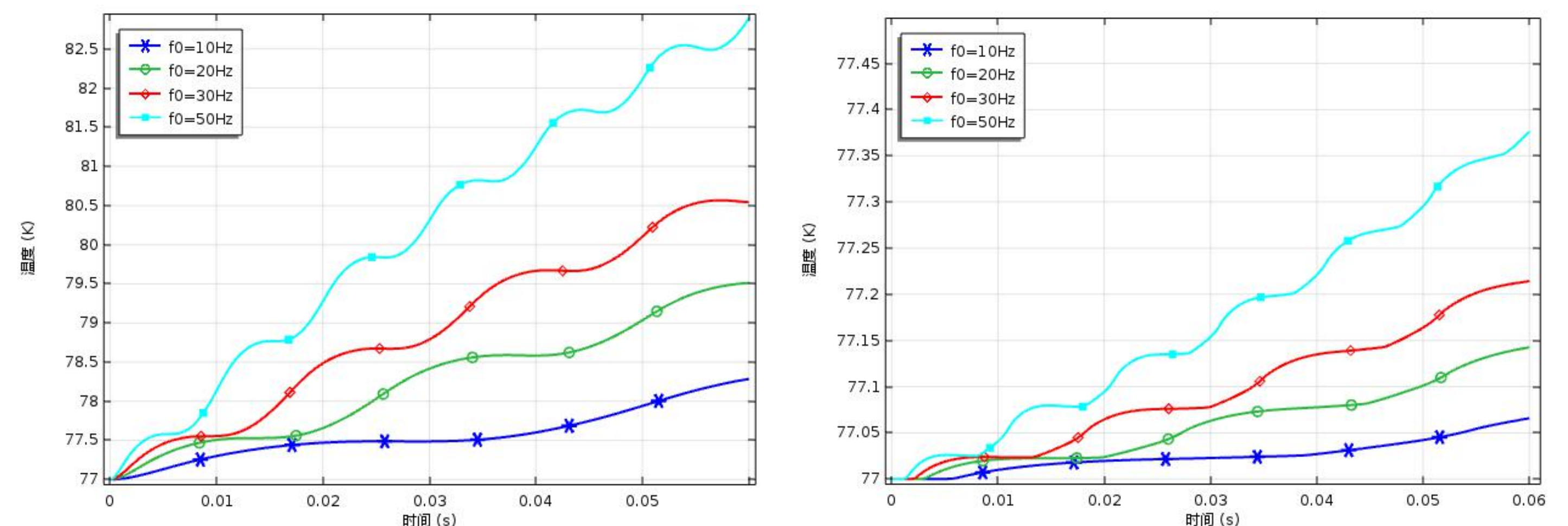


图3. 幅值为1.25T, 不同外磁场频率A点 (左) 和B点 (右) 的温升曲线

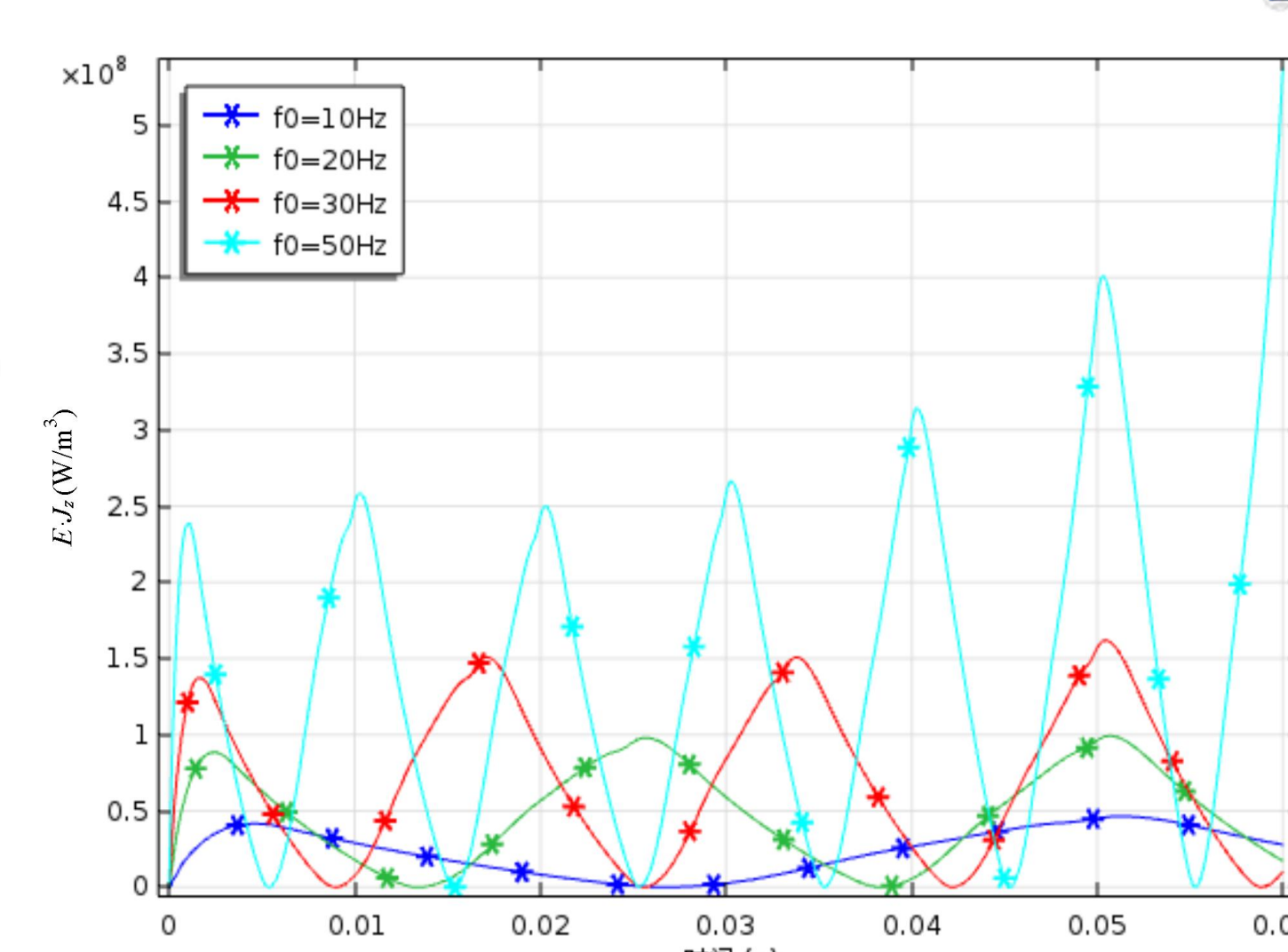


图4. 外磁场幅值1.25T时积分变量 E·Jz 在不同频率下随时间的变化曲线

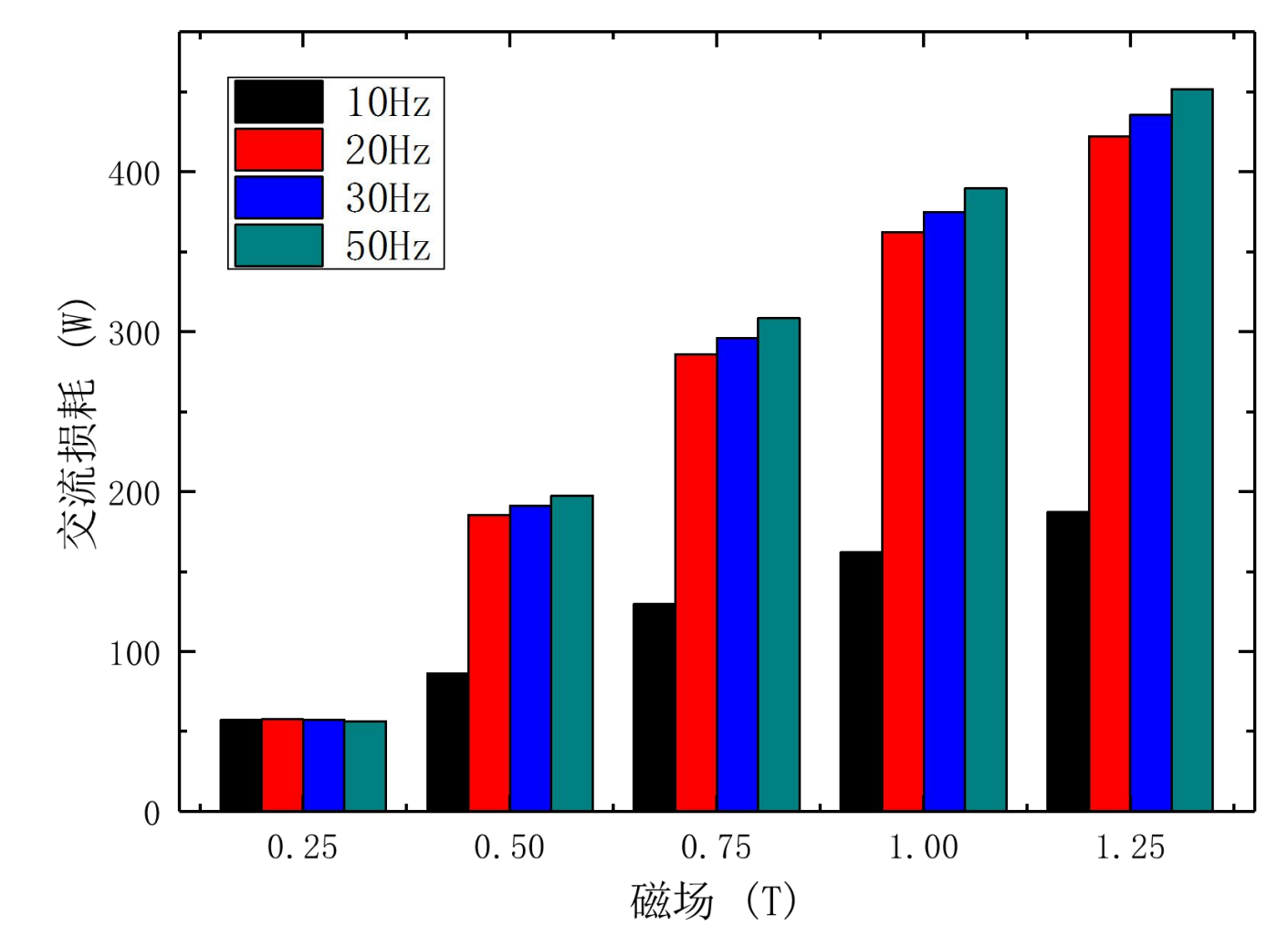


图5. 不同外磁场环境下的交流损耗功率对比图

结论: 高温超导磁悬浮系统在运行过程中, 由于非理想永磁轨道几何表面的不平顺, 超导块材YBCO内将会产生交流损耗。本文通过改变外磁场频率和幅值的方式来模拟研究不平顺轨道磁场下, 超导块材YBCO所受的温升特性和交流损耗值的影响。根据临界态模型可知, 磁通线是从超导体表面逐渐向内部渗透的, 呈稳定的不均匀分布, 距表面越远, 磁通线密度越小, 所以越往内部渗透越困难, 所以当外磁场幅值等值增加时, 对应温升增加值不是均匀增加的, 而是增加值越来越小。

随着外磁场频率和幅值的增加, 超导块材YBCO内部温度不断升高, 交流损耗值也在增大, 但频率和幅值的影响程度各有不同。当外磁场增大到一定程度时, 甚至会出现失超现象。块材缺陷中心位置的温升却几乎无影响, 而在边缘位置处则有非常明显的影。综合考虑频率和幅值对其温升和交流损耗的影响从而为高温超导磁悬浮系统稳定性研究提供了一定的依据。

参考文献:

1. K. Yamafuji, T. Wakoda, T. Kiss. Generalized critical state model in high-Tc superconductors[J]. Cryogenics, 1997, 37(8): 421.
2. Tixador P, David G, Chevalier T, et al. Thermal-electromagnetic modeling of superconductors[J]. Cryogenics, 2007, 47(11): 539-545.
3. J. Paasi, M. Lahtinen. AC losses in high-temperature superconductors: revisiting the fundamentals of the loss modelling[J]. Physica C, 1998, 310:57-61.