



龚天勇^{1,2}, 马光同¹
 1. 牵引动力国家重点实验室(西南交通大学), 四川省 成都市 610031
 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 610031
 展示人: 龚天勇
 E-mail: gongtianyong178@163.com



摘要

以 YBCO 线圈为次级的高温超导直线电机在电力领域具有潜在的应用优势, 本文利用有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics® 对处于行波磁场中载流高温超导磁体的电磁-热-力进行了动态研究, 考虑了铁芯非线性 B-H 及超导体非线性 E-J 本构关系, 采用均质化方法有效解决了 YBCO 带材的奇异宽厚比问题, 在 PDE 接口和 AC/DC 模块中分别采用基于棱边元磁场强度的 H 法和基于矢量磁位的 A 法来求解超导线圈内的电流分布、线圈周围的磁场分布及受到的电磁力大小等电磁特性, 同时在 PDE 接口中

引入温度场来考虑温度对超导线圈临界电流的影响, 移动网格与 AC/DC 模块中的 mf 结合快速求解动态特性。三个接口通过边界条件来实现多物理场的耦合, 从而实现高温超导直线电机的动态特性仿真。本文重点研究了在以涂层超导磁体为励磁线圈的直线牵引系统中超导线圈和定子之间的电磁力大小。基于仿真结果, 探讨高温超导内部电流密度、磁场分布及电磁力随时间的变化关系; 线圈周围的磁场分布及温度场对超导线圈临界电流的影响, 所得结果为高温超导直线电机的设计和应用提供了参考依据。

控制方程与建模

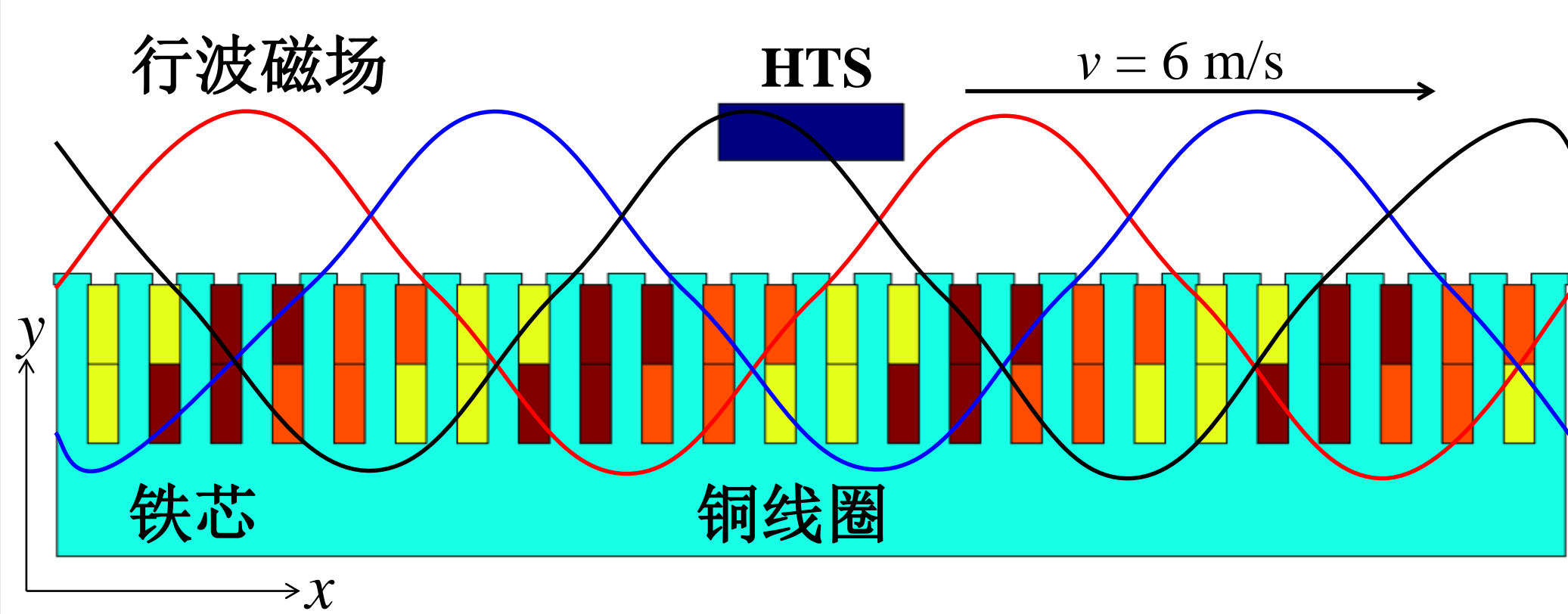


图1 以 YBCO 线圈为次级的高温超导直线电机有限元仿真模型。

电磁场的控制方程如下

$$\nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{H}) = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \quad \dots \dots \text{PDE}$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \mathbf{J}_e \quad \dots \dots \text{mf}$$

在超导线圈内 μ 为真空磁导率, 铁芯内磁导率为非线性 B-H 关系; mf 中的速度项 \mathbf{v} 来自于移动网格。

高温超导线圈的电阻率定义为

$$\rho_{HTS} = \frac{E_c}{J_c(B_x, B_y, T)} \left(\frac{|J|}{J_c(B_x, B_y, T)} \right)^{n-1}$$

这里高温超导线圈的临界电流密度为

$$J_c(B_x, B_y, T) = J_{c0} \cdot \frac{(T_c - T)/(T_c - T_0)}{(1 + \sqrt{B_x^2 + B_y^2}/B_0)}$$

温度场的控制方程及边界条件如下

$$k \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) - c \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) = -Q$$

$$k \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial n} \right) + h \cdot (T - T_0) = 0$$

Q 为电磁热, 计算出来的温度 T 作为电磁场接口变量的输入, 采用第三类温度边界条件。

模型中使用到的相关节点有:

1. PDE 接口逐点约束来施加电流;
2. PDE 和 AC/DC 模块中周期性边界简化几何;
3. PDE 接口中的 Dirichlet 边界条件实现耦合;
4. AC/DC 模块中广义拉伸耦合和完美磁导体;
5. Waveform 函数和 Ramp 函数来提高收敛性。

仿真结果

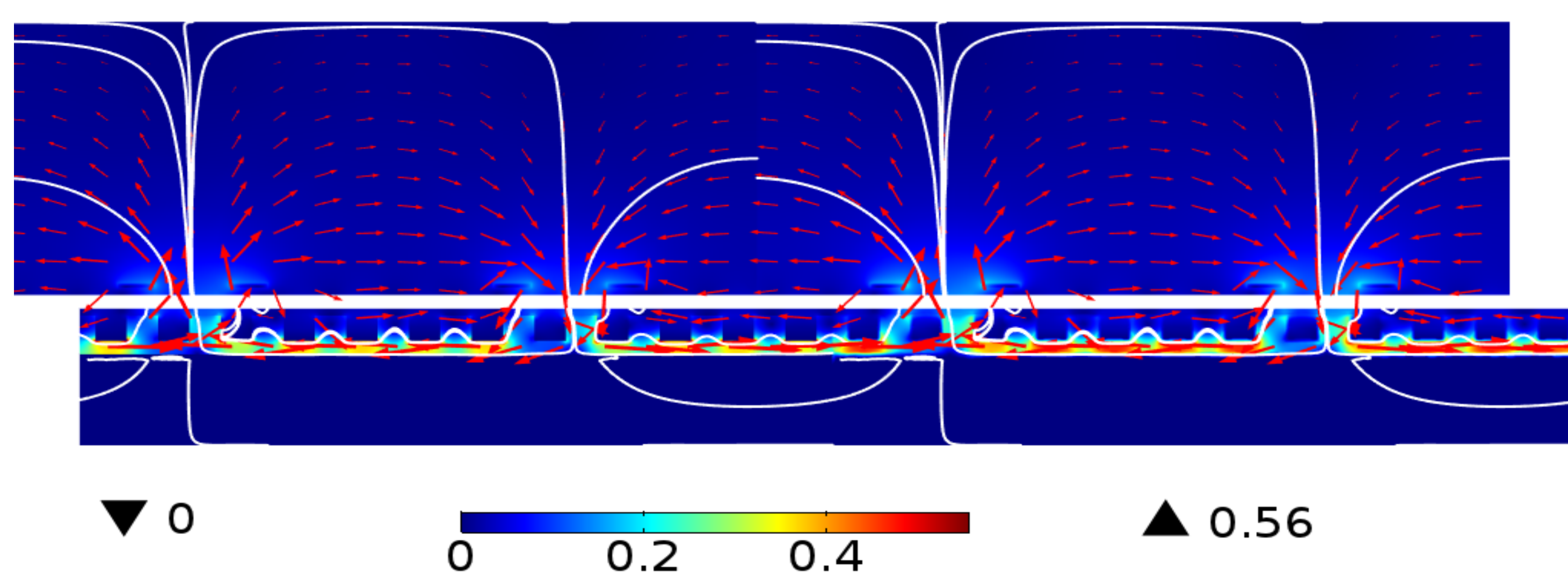


图2 铁芯及空气域的磁通密度分布 B [T]

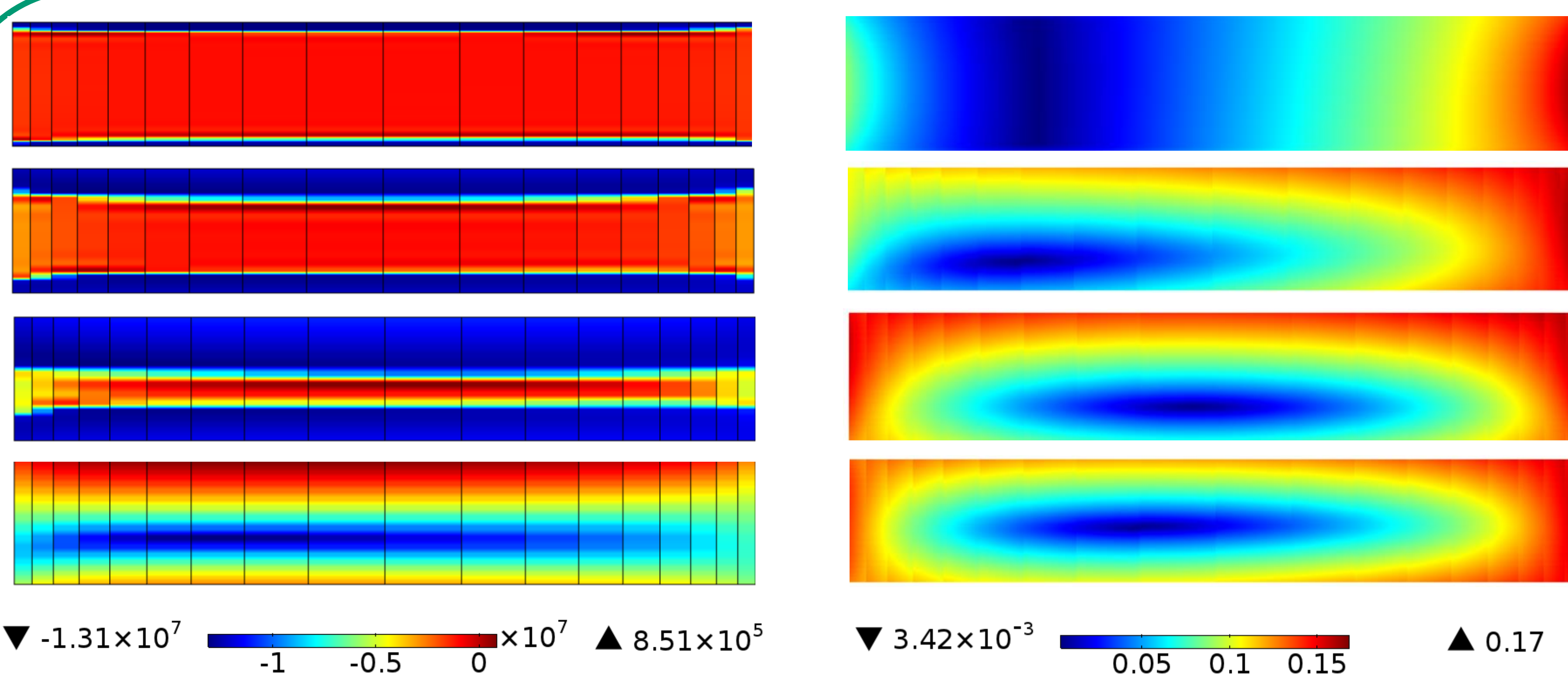


图3 超导线圈内的电流密度 J

图4 超导线圈内的磁通密度 B

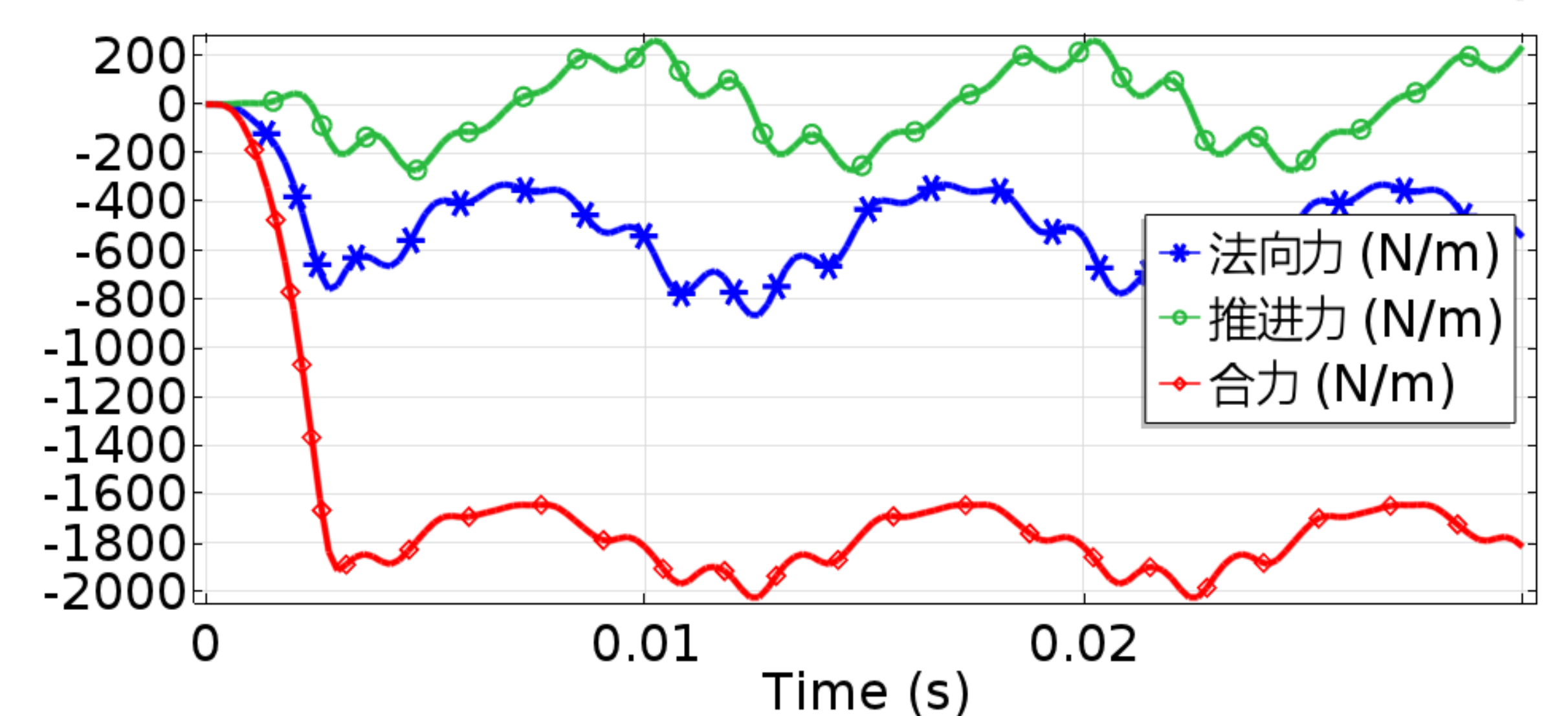


图5 高温超导直线电机的电磁力

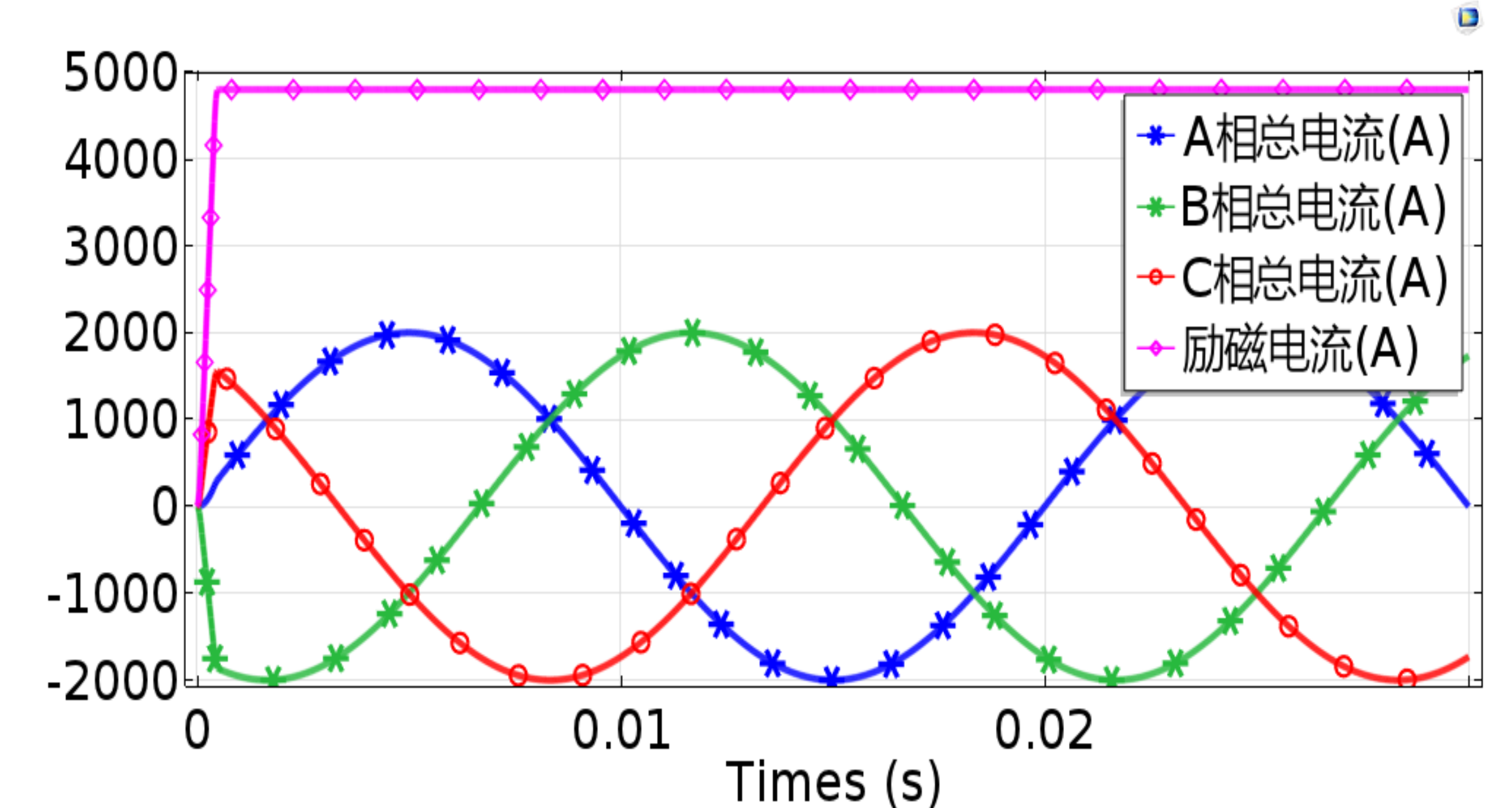


图6 高温超导直线电机的电流激励

结论

- ★ 利用商业有限元仿真软件 COMSOL Multiphysics® 可实现高温超导直线电机的快速准确求解, 解决了包括高温超导体的奇异宽厚比、强非线性 E-J 本构关系、温度对临界电流影响和几何运动对求解收敛性问题;
- ★ 高温超导线圈的电流密度分布和磁通密度分布均可通过 COMSOL 直观地展现;
- ★ 利用对超导线圈的体积分可以得到高温超导直线电机的电磁推力, 同时证明了高温超导直线电机具有的大推力特性
- ★ 因超导线圈的导热性好, 相对于超导块材温升不是很明显。

<http://www.asclab.cn>

参考文献

- [1] V M R Zermeño, et al., "3-D modeling and simulation of 2G HTS stacks and coils". Superconductor Science and Technology, 27, 044025(2014).
- [2] V M R Zermeño, et al., "Towards Faster FEM Simulation of Thin Film Superconductors: A Multiscale Approach". Applied Superconductivity IEEE Transactions on, 21, 3273-3276(2011).

<http://userweb.swjtu.edu.cn/Userweb/gtma/index.htm>