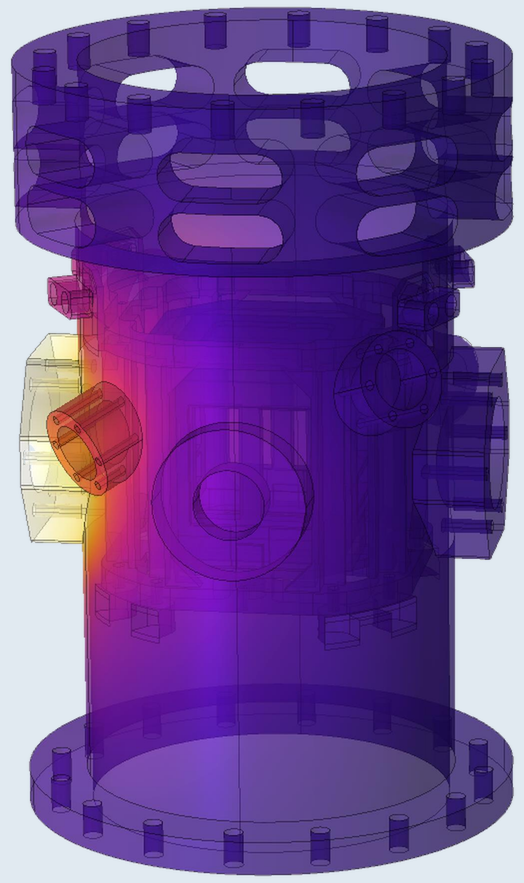
空间引力波探测载荷低频传热特性的 COMSOL/MATLAB 联合仿真与实验研究



李梦晓　魏福龙　孙语　屈少波

国家精密测量中心，基础物理量测量教育部重点实验室
华中科技大学物理学院，中国武汉 430074

研究背景

空间引力波探测核心科学载荷的关键部位需在毫赫兹频段保持微开尔文量级的温度稳定性。
传统瞬态计算需覆盖多个超长周期，计算成本较高；
本研究采用频域方法获取低频热响应，并通过真空热激励实验开展对比。

01 频域热模型

在 COMSOL 中以固体传热接口与频域研究建立三维热模型：源侧法兰施加简谐温度扰动、其余外边界绝热。一次扫频即得 10^{-4}–0.1 Hz 全频段复温度场；测点复温度取局部点云平均，以源侧参考温度归一化得到热扰动传递函数 $|H_i| = |T_i| / |T_{ref}|$。

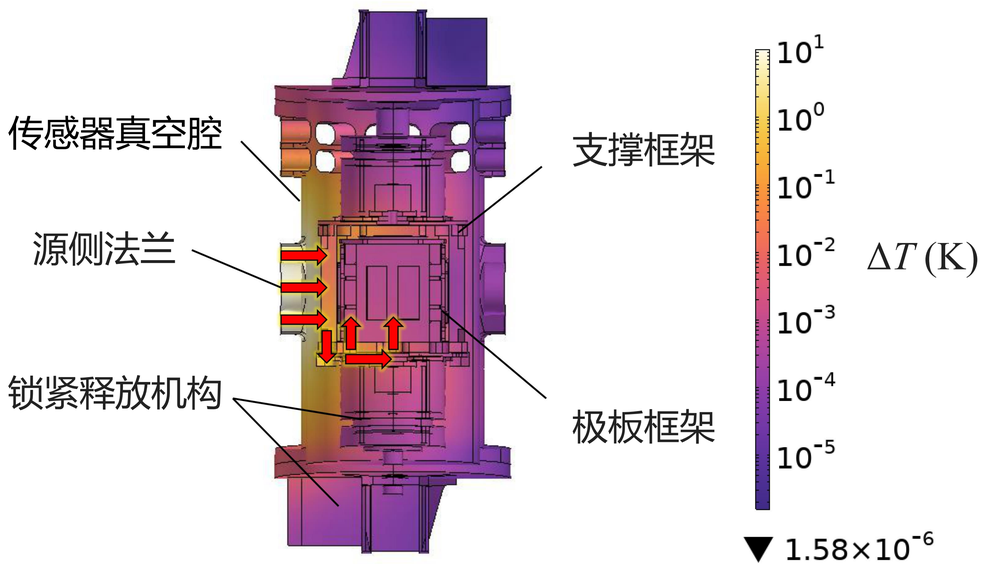


图 1　温度场与主导传热路径。

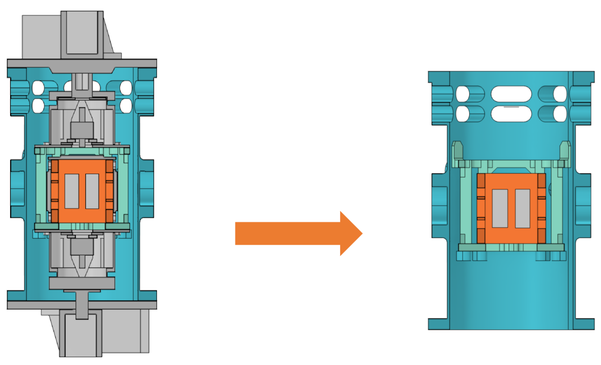


图 2　惯传模型简化

基于主导传热路径进行的结构简化。
仿真分析表明：热等效模型与完整模型在6mHz处的热扰动传递函数不超过14%

02 实验设置

热等效模型以钛丝悬挂于真空罐内的 PEEK 杆上，模型与线缆外包多层隔热材料（MLI），在高真空中模拟在轨热边界。稀薄气体换热、寄生辐射与悬挂导热的影响均通过 COMSOL 仿真分析，结果表明三者对目标传递函数的影响可以忽略。

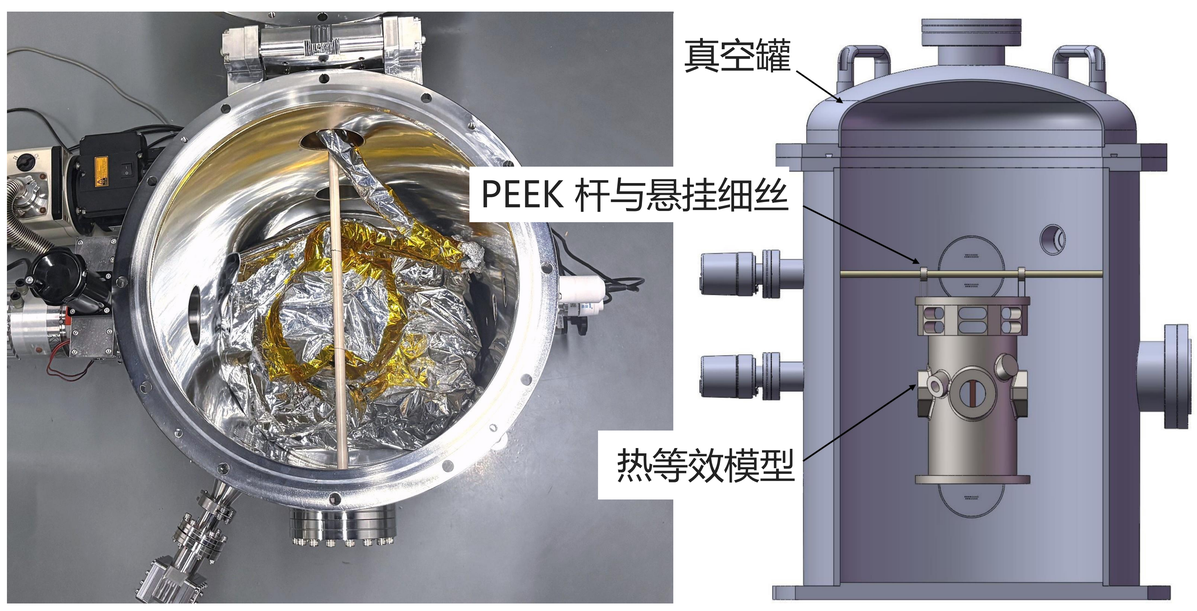


图 3　真空罐及悬挂的热等效模型

03 COMSOL–MATLAB 工作流

LiveLink™ for MATLAB® 批量调用与后处理

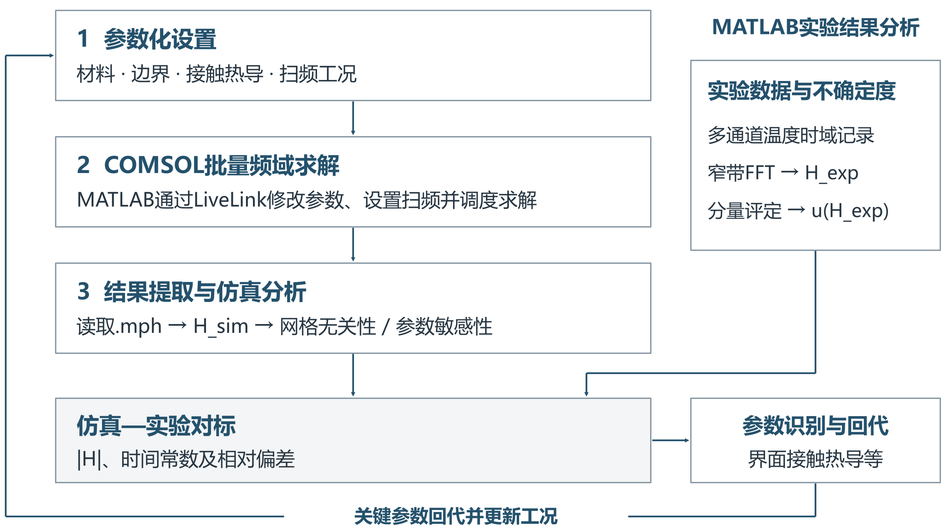
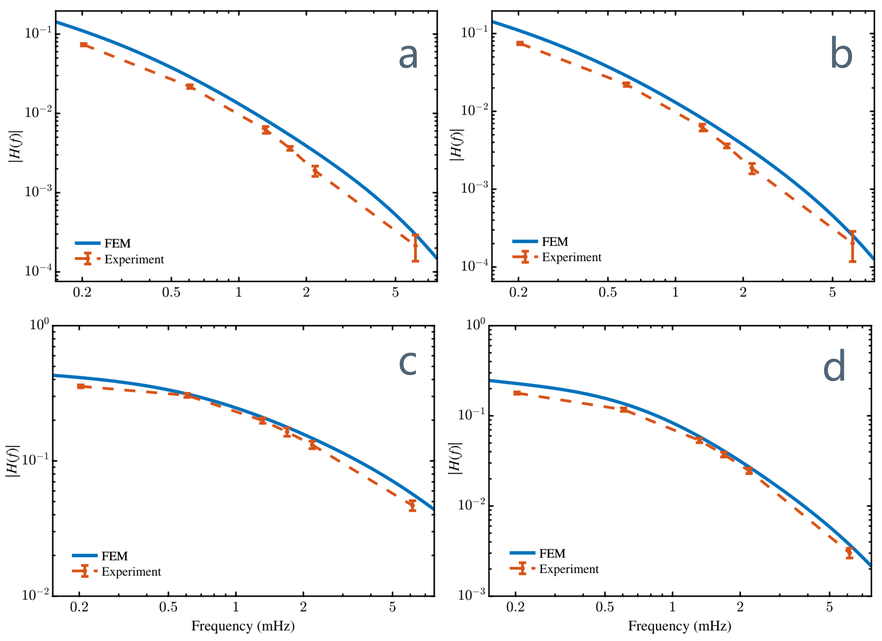


图 4　COMSOL/MATLAB联合仿真与实验结果对比流程

04 结果分析与结论



极板框架两测点的结果（图a、图b）
支撑框架两侧点的结果（图c、图d）

蓝线为仿真
橙色为实验，
误差棒为逐点合成的标准不确定度。

图 5　传递函数仿真与实验结果曲线

在 mHz 频段内，实测传递函数复现了仿真预测的随频率衰减趋势（图 5）。拟合得到的主导时间尺度区分出快慢响应，仿真与实验相差不超过 5.8%。为空间引力波探测核心科学载荷的高精度热控方案设计提供参考。

国家精密重力测量科学中心　華中科技大學 HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY