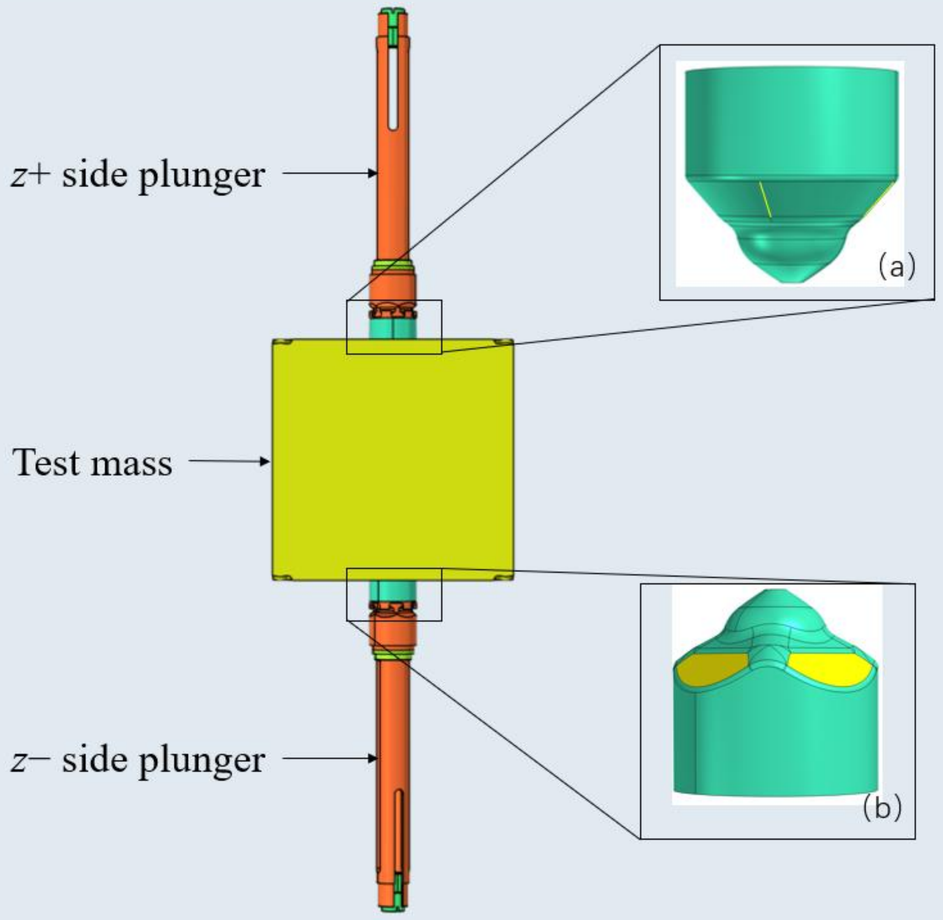


基于 COMSOL 的天琴检验质量释放阶段静电扰动有限元分析

杨恒旭[1], 薛超[1], 王玮[2]

1. 天琴中心, 物理与天文学院, 中山大学, 珠海, 中国.
2. 航空航天学院, 中山大学, 珠海, 中国.

研究目的

空间引力波探测利用自由悬浮检验质量作为激光干涉测量的惯性基准，其释放后的运动状态直接关系到后续科学测量质量[1]。在发射阶段，检验质量必须由锁紧释放机构承受振动和冲击；入轨后，机构又需在尽量减小残余线动量和角动量的条件下完成释放。然而，柱塞与释放顶针回退初期仍与检验质量保持微小间隙，表面带电和两侧结构差异可能形成非均匀电场，产生附加静电力和力矩，并影响后续捕获过程[2]。本研究旨在建立考虑复杂柱塞几何和浮置导体电荷—电势自洽关系的三维有限元模型，分析柱塞摆动、非同步回退、电势差及检验质量平移、转动等非理想状态，评估相关静电扰动是否满足释放和捕获要求，并为机构优化及释放后的非接触姿态预调整提供依据。

方法

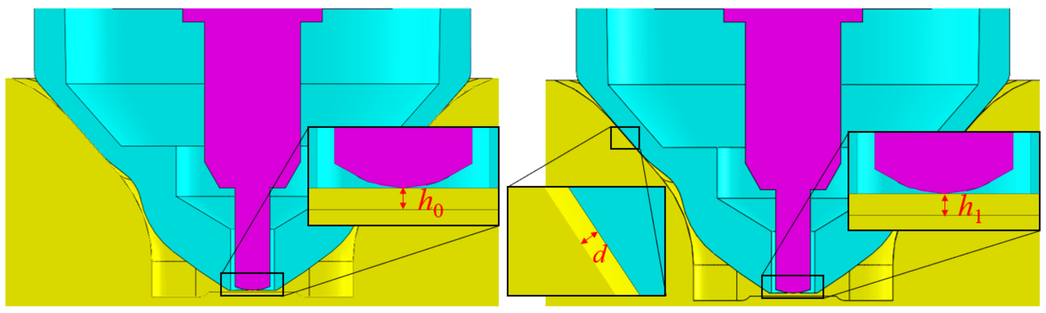


图1.检验质量锁紧与柱塞回退过程示意

本次建模利用 COMSOL Multiphysics 搭建检验质量释放过程的结构—静电虚拟样机，旨在逼近真实释放工况，为状态评估和后续控制设计提供准确的受力模型。首先在 SolidWorks 中完成检验质量、柱塞及释放顶针的结构设计并导入 COMSOL；随后建立三维静电有限元模型，将检验质量设为总电荷固定的浮置导体，通过 Maxwell 应力张量计算三向力和三向力矩；最后利用 LiveLink *for* MATLAB 开展参数调用、批量计算、结果导出和响应拟合。主要分三步：1）结构建模与导入；2）静电工况计算；3）数据导出与响应分析。

结果

当前，已完成检验质量释放阶段三维静电有限元模型的建立，以及典型非理想工况下静电力和力矩的计算。结果表明，受两侧柱塞结构差异影响，静电扰动主要集中在释放轴方向；随着柱塞逐渐回退，静电作用快速减弱。柱塞小幅摆动和检验质量姿态转动对释放过程的影响相对有限，而两侧回退不同步、检验质量横向偏移及电势差变化对轴向受力更加敏感。同时，典型非理想状态下的总体静电扰动仍处于释放要求范围内，所建立模型可用于释放状态评估，并为机构优化、工况约束及后续非接触姿态预调整提供依据。

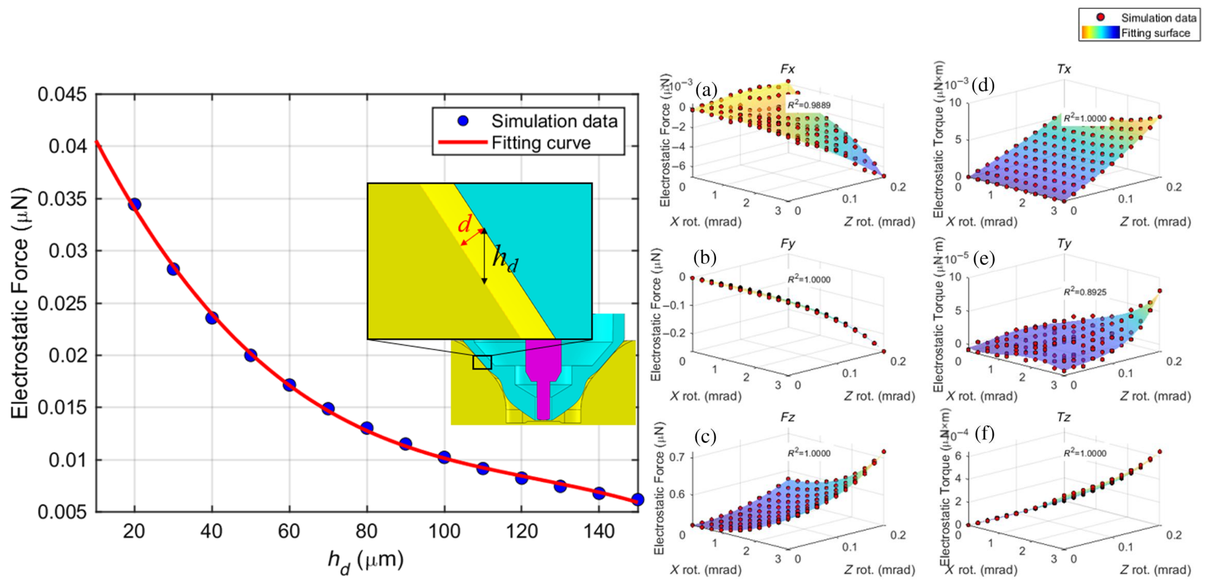


图2. 柱塞回退距离及检验质量转动对静电力和力矩的影响

参考文献

1. Luo J, Chen L S, Duan H Z, et al. TianQin: A space-borne gravitational wave detector[J]. Classical and Quantum Gravity, 2016, 33(3): 035010.
2. Zanoni C, Bortoluzzi D. Estimation of the electrostatic effects in the LISA-Pathfinder critical test mass dynamics via the method of moments[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(6): 3022-3030.

中山大學 天琴中心
TIANQIN CENTER FOR GRAVITATIONAL PHYSICS, SYSU