XR 眼镜夹持力仿真的可行性研究和因素分析

马建, 张哲 | 上海龙旗科技股份有限公司

COMSOL Conference 2026 Shenzhen

1 研究背景

随着 XR 技术快速发展，XR 眼镜作为可穿戴设备的重要形态，佩戴舒适性日益成为影响用户体验和产品竞争力的关键因素。夹持力是镜腿与头部相互挤压产生的作用力，直接关系到佩戴的稳定性与舒适性：数值过大易引起头部压迫感和长时间佩戴疲劳，过小则可能导致眼镜滑落和定位偏移。

本文采用 COMSOL Multiphysics 结构力学模块，建立简化人头—眼镜耦合模型，探索夹持力仿真的可行性，并定性分析镜腿材料弹性模量、整机重心位置、镜腿倾角及摩擦系数四个关键参数对夹持力的影响规律。

2 建模方法

考虑到眼镜真实模型的复杂性和结构保密性，研究前期把人头与眼镜的接触面简化为三处支撑：鼻梁处支撑、耳朵侧面支撑和耳朵平面支撑；镜腿与头部之间以接触对定义边界。几何建模保留主体镜腿、镜框和镜片； 眼镜几何尺寸：长 150 mm × 宽 145 mm × 高 50 mm，贴近当前市场主流眼镜的配置。

边界设定参考P50标准，镜腿接触位置位移6mm。

参考 COMSOL 案例库 ID 31001 和 ID 78101，我们尝试了两种建模思路如下：

方法一：三步法（撑开 → 释放 → 重力微调）

夹持力的产生根据佩戴过程可以分为三部分仿真来实现，步骤1，手（外力）把镜腿撑开；步骤2，手（外力）释放，镜腿缓慢夹住人头，从而产生接触压力；步骤3，眼镜在重力作用下整个力学系统达到稳定，夹持力微调；

困难：收敛性较差，材料参数等容易不收敛；

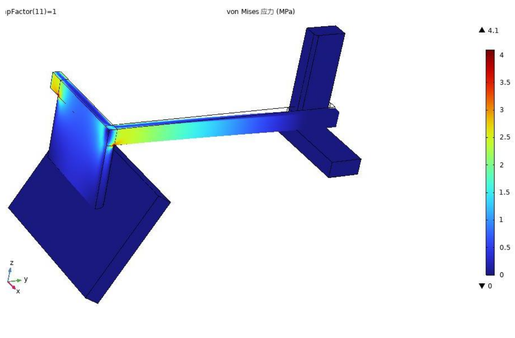


图 1：von Mises 应力云图（max ≈ 4.1 MPa）

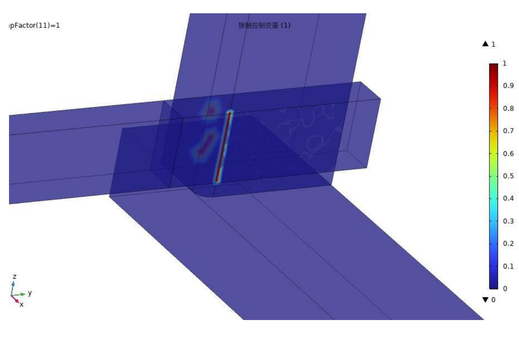


图 2：接触控制变量（红色 = 接触状态）

方法二：过盈装配法

使用过盈装配来重建仿真模型，避免外力施加和释放的过程，模型更加简化；收敛性显著改善。后续因素分析均基于此方法。模型方法主要参考 COMSOL 官方案例库 ID 31001，两种方法的调试参考 ID 78101。

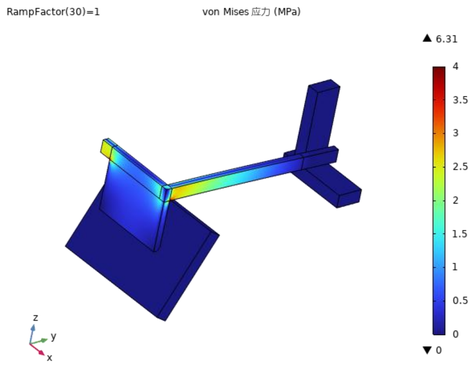


图 3：von Mises 应力云图（max ≈ 6.31 MPa）

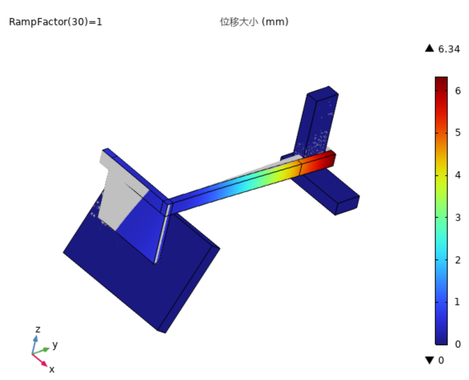
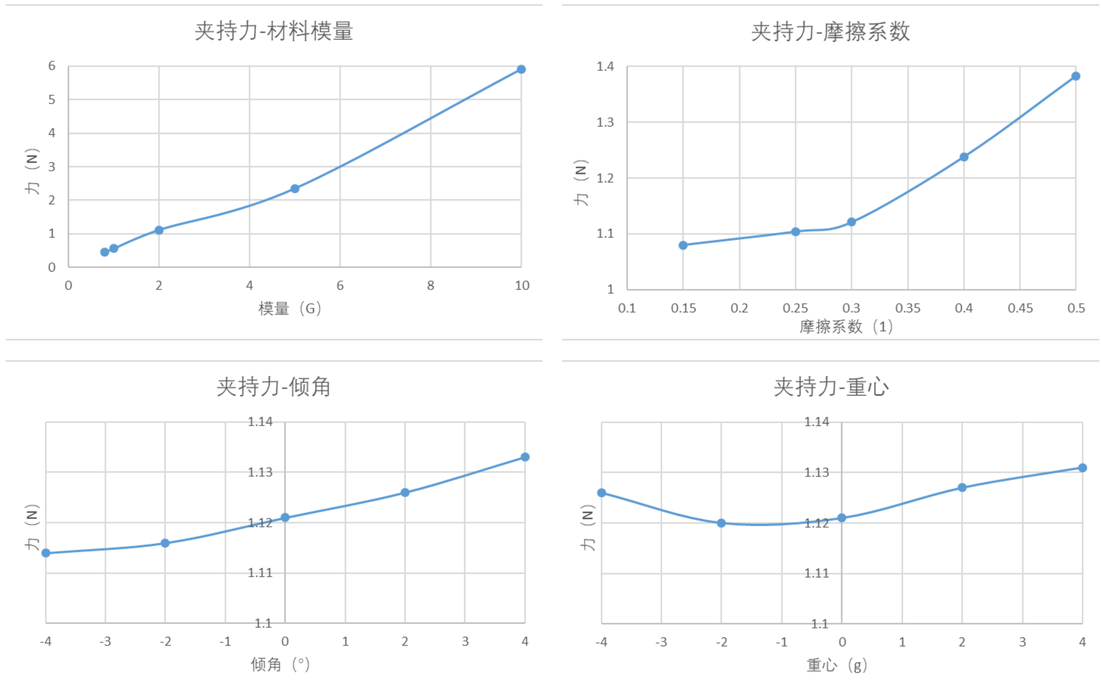


图 4：位移云图（max ≈ 6.34 mm，镜腿末端）

3 两种方法对比

- 两种方法得到的应力水平同量级（4.1 vs 6.3 MPa），变形趋势一致，互相印证模型合理性。
- 过盈装配法收敛更稳、参数调整效率更高，适合批量因素分析。
- 应力集中均出现在镜腿拐角区域，与实际佩戴压感位置吻合。

4 因素分析



材料模量：横轴为镜腿材料弹性模量（GPa）。从 1 GPa 增至 10 GPa，夹持力由约 0.5 N 升至 5.9 N，近似线性增长。模量越大，镜腿回弹越硬，夹持越紧，符合理论预期，是影响夹持力最显著的因素。

摩擦系数：横轴为镜腿与头部之间的摩擦系数。从 0.15 增至 0.5，夹持力仅由 1.08 N 升至 1.38 N，在常用范围内对夹持力总量影响较小，但会影响接触界面的应力分布。

镜腿倾角：横轴正值表示眼镜前方抬高（前高后低），负值表示前方降低（前低后高）。±4° 范围内夹持力变化不到 2%，但会显著改变接触分布区域：负倾角可能增大镜腿尾部拽力，正倾角则使前框对鼻梁的压力增大。

重心位置：横轴负值表示重心前移（在镜框区域增加质量），正值表示重心后移（在镜腿尾部增加质量）。夹持力呈 U 形曲线，重心在镜框—镜腿交界处附近时夹持力最小；无论前移还是后移，夹持力均回升。重心前移会增大前框对鼻梁的压力，同时改变镜腿夹持的力矩平衡。

5 结论

- 简化人头—眼镜耦合模型可有效复现 XR 眼镜夹持力的分布与大小趋势，两种建模方法结果互相印证，使用 COMSOL 进行夹持力仿真计算具备可行性。
- 材料弹性模量是影响夹持力最显著的因素，呈近似线性正相关，设计时应优先控制镜腿材料选择。重心前移增大前框对鼻梁压力；镜腿倾角主要改变夹持力分布区域而非总量，可用于优化佩戴压感位置。摩擦系数在常用范围内对夹持力影响有限，主要影响用户佩戴感受。需要说明的是，当前的研究结果都是在简化模型的基础上得出的，材料和摩擦是有理论预期的，镜腿倾角和重心前后的结果可能会存在偏差。
- 后续将引入包含耳朵特征的不同尺寸的人头模型和真实产品的完整的眼镜结构，开展定量研究，从而深入进行佩戴舒适性验证。

马建 2279

参考文献

[1] Zhang J, et. al., A comprehensive study on temple clamping force for eyeglasses design: from measuring to modelling, Measurement Science and Technology, 2024, 35(10): 105903.

[2] Du Y, et. al., The effects of physical load and clamping force on prolonged wearing of AR glasses, Ergonomics In Design, 2022, 47(1): 105-112.

[3] https://cn.comsol.com/models?q=31001

[4] https://cn.comsol.com/models?q=78101