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 上海，中国

摘要

随着扩展现实（XR）技术的快速发展，XR 眼镜作为可穿戴设备的重要形态，其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。夹持力作为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，将人头简化为鼻梁处支撑、耳朵侧面支撑和耳朵平面支撑，镜腿、镜框和镜片简化为可变形结构，通过接触对定义镜腿与头部的边界。参考 COMSOL 案例库中弹性卡扣过盈装配模型和山地车前叉结构分析模型，本文尝试了两种建模思路：三步法和过盈装配法。两种方法得到的应力水平同量级，变形趋势一致，互相印证了模型的合理性。在此基础上，系统分析了镜腿材料弹性模量、摩擦系数、镜腿倾角及整机重心位置四个参数对夹持力的影响规律。结果表明：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；摩擦系数在常用范围内影响有限；镜腿倾角在 ±4 °内对夹持力总量影响不到 2%，但显著改变接触分布；重心位置呈 U 形曲线，在镜框—镜腿交界处附近夹持力最小。

关键词：XR 眼镜；夹持力；结构力学；佩戴舒适性；过盈装配

1 简介

近年来，扩展现实（Extended Reality, XR）技术快速发展，XR 眼镜作为连接虚拟世界与现实世界的重要可穿戴终端，正在消费电子和工业领域获得越来越广泛的应用。与普通眼镜相比，XR 眼镜集成了光学显示模组、计算芯片、电池等电子元器件，整机重量和体积显著增加，这对佩戴舒适性提出了更高的要求。

夹持力是镜腿弹性变形后对头部两侧产生的挤压力，是决定佩戴舒适性的核心力学指标之一。夹持力过大，用户在短时间内即可感到颞部压迫感，长时间佩戴更可能引发疲劳甚至压疮；夹持力过小，则眼镜容易在运动或低头时滑落，影响光学定位的准确性和使用安全性。因此，在产品设计阶段准确预测和优化夹持力，具有重要的工程价值。

国内外学者已在眼镜夹持力测量与建模方面开展了若干研究。Zhang 等[1]系统研究了眼镜镜腿夹持力的测量与建模方法；Du 等[2]探讨了 AR 眼镜长时间佩戴时物理载荷和夹持力对人体的影响；Ju 等[3]绘制了中国成年人头部区域的压力敏感分布图；Yang 等[4]建立了基于颅面软组织厚度的有限元模型；Smulders 等[5]绘制了人头、面部和颈部的三维压力不适阈值图谱；Zhang 等[6]建立了 VR/AR 设备颈部肌肉收缩的预测模型；Tian 等[7]进行了定制化眼镜框的参数化设计；Grigatti 等[8]研究了水凝胶敷料在预防面部医疗器械相关压疮中的生物力学效果。

然而当前研究多聚焦于测量和人体组织相关，针对 XR 眼镜结构自身的夹持力仿真建模方法及多因素参数分析仍相对较少。本文基于 COMSOL Multiphysics 结构力学模块，探索 XR 眼镜夹持力仿真的可行建模方案，并初步分析关键设计参数对夹持力的影响规律，为 XR 眼镜的舒适化结构设计提供参考。

2 模型建立与方法

2.1 几何模型

眼镜几何模型尺寸为长 150 mm × 宽 145 mm × 高 50 mm，保留主体镜腿、镜框和镜片结构。人头模型做简化处理：提取鼻梁处支撑、耳朵侧面支撑和耳朵平面支撑三处关键接触位置，以刚性面对表示。镜腿与头部之间通过接触对定义边界，摩擦系数可参数化调整。

2.2 材料与边界条件

仿真采用 COMSOL Multiphysics 的固体力学接口（Solid Mechanics Interface），材料参数包括弹性模量、泊松比和密度。镜腿材料为各向同性线弹性材料，人头支撑面视为刚性边界。接触类型为标准接触（Standard Contact），考虑法向接触压力和切向摩擦。重力场沿竖直方向施加。

法向满足不可穿透条件 $g_n \le 0$、接触压力 $p_n \ge 0$ 及互补条件 $p_n \cdot g_n = 0$，其中 g_n为接触间隙；切向满足库仑摩擦条件 $|\tau_t| \le \mu \cdot p_n$，$\mu$ 为摩擦系数，τ_t为切向剪应力。

单侧镜腿对头部的总夹持力由接触压力沿整个接触面 A 积分得到：

$$F_clamp = \int_a p_n \, dA, \qquad (1)$$

本文各因素分析中的夹持力 F_clamp 即按上式对镜腿—头部接触区域积分提取。

2.3 两种建模方法

方法一：三步法。按照真实佩戴过程分三个载荷步加载：第一步，施加外力将镜腿撑开至佩戴位置；第二步，释放外力，镜腿回弹夹持头部，建立接触压力；第三步，施加重力场，整个力学系统达到稳态，夹持力微调。该方法物理过程直观，但接触收敛性较差，材料参数稍作调整即可能导致不收敛。

方法二：过盈装配法。参考 COMSOL 案例库中山地车前叉过盈装配模型[10]，用过盈量直接替代外力施加与释放过程，省去分步加载。眼镜装配状态即等效于镜腿被撑开后回弹夹持的最终状态，模型更简化，收敛性显著改善。使用该方法并参考弹簧扣的接触分析[9]和官方接触分析进行收敛性调试。后续因素分析均基于此方法开展。

3 仿真结果与讨论

3.1 两种方法对比

图 1 和图 2 分别为方法一（三步法）得到的 von Mises 应力云图和接触状态云图，最大应力约为 4.1 MPa。图 3 和图 4 分别为方法二（过盈装配法）得到的 von Mises 应力云图和位移云图，最大应力约为 6.31 MPa，最大位移约为 6.34 mm（出现在镜腿末端）。

两种方法得到的应力水平同量级，变形趋势一致，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。过盈装配法收敛更稳定、参数调整效率更高，适合批量因素分析。

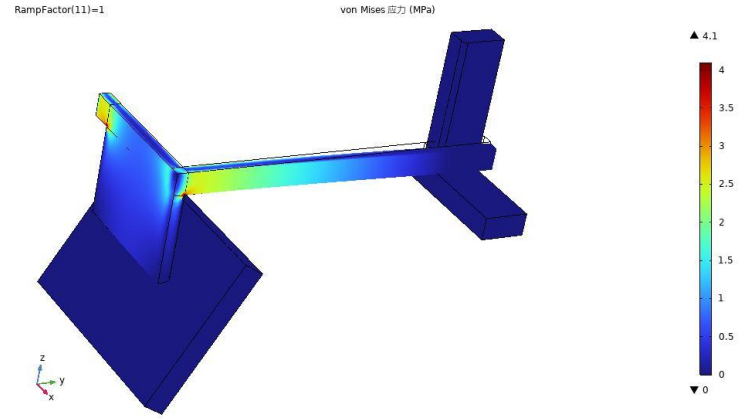


图 1　三步法 von Mises 应力（最大值≈4.1 MPa）

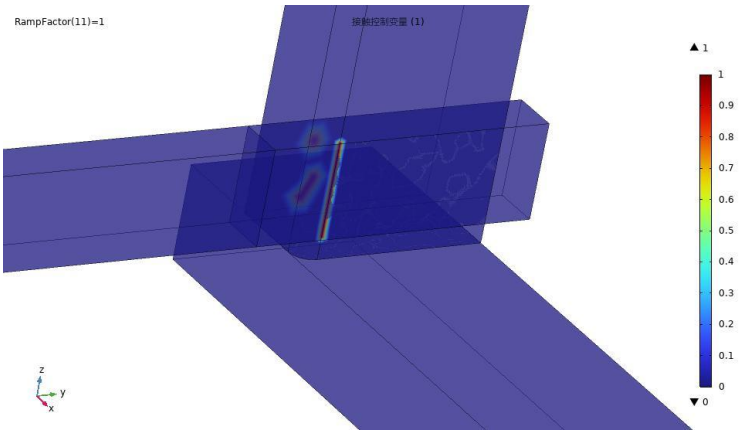


图 2　三步法接触控制变量（红色表示接触状态）

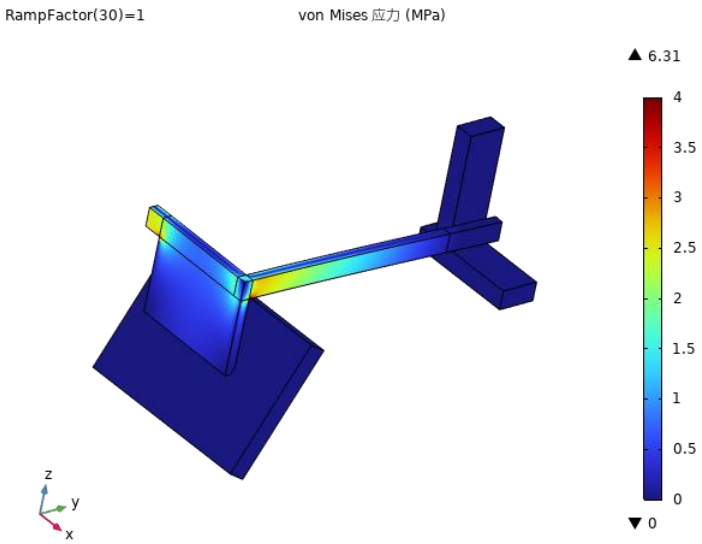


图 3　过盈装配法 von Mises 应力（最大值≈6.31 MPa）

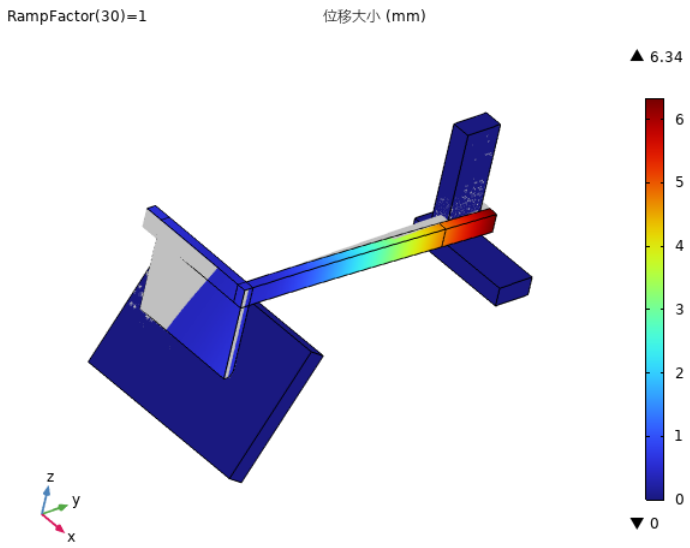


图 4 过盈装配法位移（最大值≈6.34 mm，位于镜腿末端，灰色为未撑开状态）

3.2 因素分析

基于过盈装配模型，分别研究镜腿材料弹性模量、摩擦系数、镜腿倾角和整机重心位置四个因素对夹持力的影响。各因素的变化范围和结果如下。

3.2.1 材料弹性模量

图 5 为夹持力随镜腿材料弹性模量的变化曲线。弹性模量从 1 GPa 增至 10 GPa 时，夹持力由约 0.5 N 升至约 5.9 N，近似线性增长。模量越大，镜腿回弹越硬，夹持越紧。在四个因素中，材料弹性模量对夹持力的影响最为显著，是结构设计时应优先控制的参数，实际项目中往往选材优先考虑项目，且材料模量的差异性相对较小。

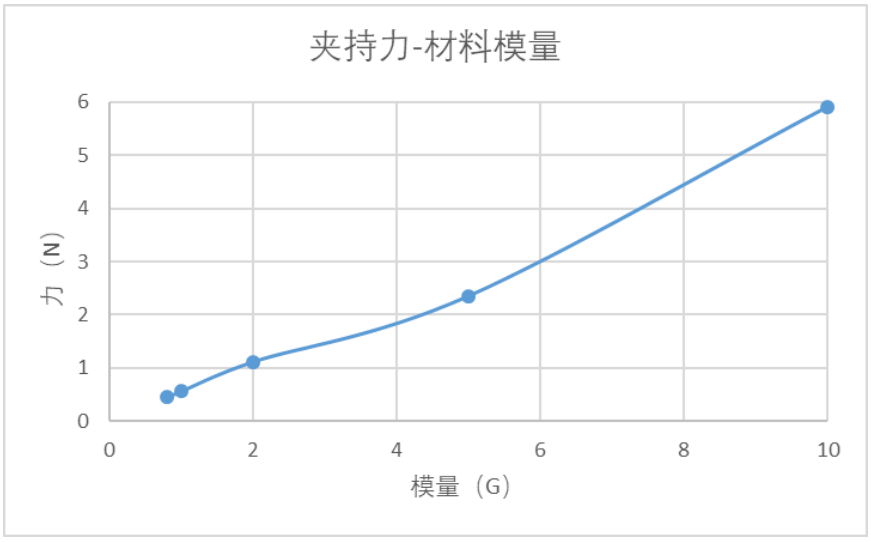


图 5 夹持力随材料弹性模量的变化

3.2.2 摩擦系数

图 6 为夹持力随摩擦系数的变化曲线。摩擦系数从 0.15 增至 0.5 时，夹持力仅由约 1.08 N 升至约 1.38 N。在常用材料摩擦系数范围内，摩擦系数对夹持力总量的影响较小，但会改变接触界面的应力分布状态。

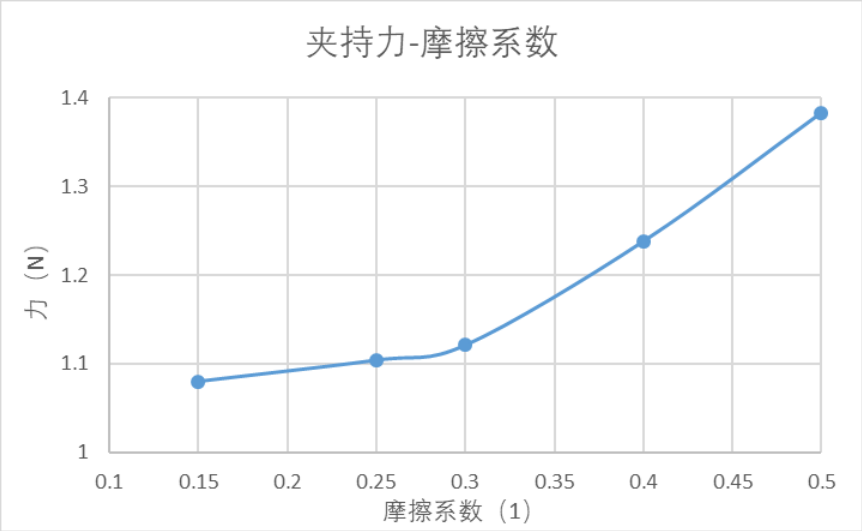


图 6 夹持力随摩擦系数的变化

3.2.3 镜腿倾角

图 7 为夹持力随镜腿倾角的变化曲线。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）。在 ±4 °范围内，夹持力变化不到 2%，说明倾角对夹持力总量影响有限。但倾角会显著改变接触分布区域：负倾角可能增大镜腿尾部的拽力，正倾角则使前框对鼻梁的压力增大。因此，倾角设计虽不显著改变夹持力大小，但可用于优化佩戴压感的位置分布。

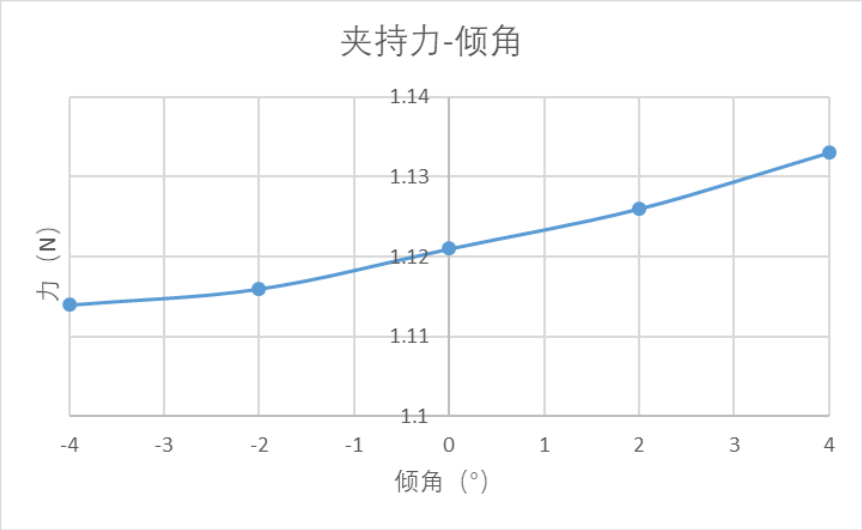


图 7 夹持力随镜腿倾角的变化（负值=前低后高，正值=前高后低）

3.2.4 重心位置

图 8 为夹持力随整机重心位置的变化曲线。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。在产品配重设计时，应尽量将整机重心靠近镜框—镜腿交界处，以获得最小的夹持力和最佳的佩戴舒适性。

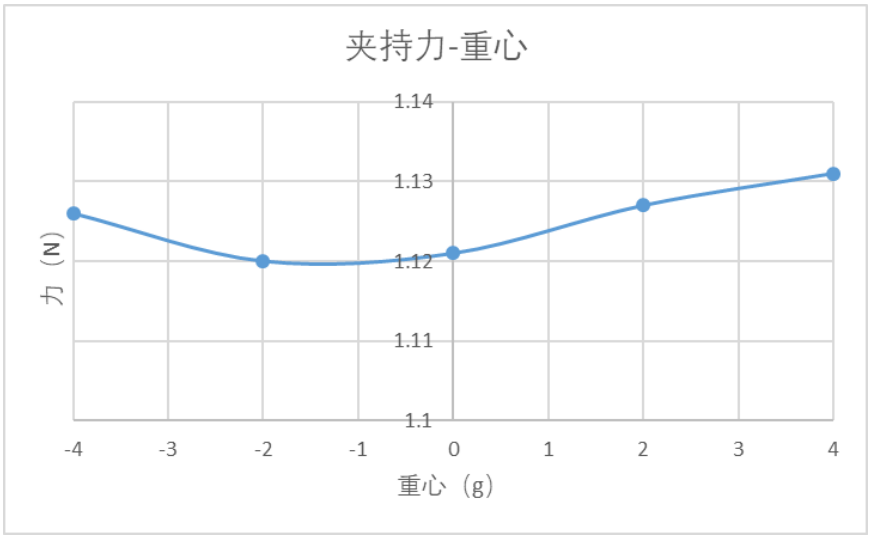


图 8 夹持力随重心位置的变化（负值=重心前移，正值=重心后移）

4 结论

本文建立了简化人头—XR 眼镜耦合有限元模型，探索了夹持力仿真的可行建模方案，并初步分析了四个关键参数对夹持力的影响。主要结论如下：

（1）三步法和过盈装配法均可用于 XR 眼镜夹持力仿真，两种方法得到的应力和变形结果同量级，互相印证了模型的合理性。过盈装配法收敛性更好，更适合进行参数敏感性分析。

（2）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。

（3）摩擦系数在常用范围内对夹持力影响有限，但会改变接触界面应力分布，往往跟用户体验相关。

（4）镜腿倾角在±4 °内对夹持力总量影响不到 2%，可用于优化人头和镜腿接触压力的位置微调。

（5）重心位置对夹持力呈 U 形影响，在镜框—镜腿交界处附近夹持力最小，配重设计或许应尽量使重心靠近该位置。

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。

致谢

感谢 COMSOL 技术支持团队在模型建立过程中提供的帮助和建议。

参考文献

[1] Zhang J, et al. A comprehensive study on temple clamping force for eyeglasses design: from measuring to modelling[J]. 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[J]. Ergonomics in Design, 2022, 47(1): 105–112.

[3] Ju Y, et al. Pressure sensitivity mapping of the head region for Chinese adults for AR glasses design[C]. Springer Conference Proceedings, 2022.

[4] Yang W, et al. Establishment of a finite element model based on craniofacial soft tissue thickness measurements and stress analysis of medical goggles[J]. Ergonomics, 2022, 65(2): 305-326.

[5] Smulders M, et al. Dense 3D pressure discomfort threshold (PDT) map of the human head, face and neck: a new method for mapping human sensitivity[J]. Applied ergonomics, 2023, 107: 103919.

[6] Zhang Y, et al. Toward optimized VR/AR ergonomics: Modeling and predicting user neck muscle contraction[C]//ACM SIGGRAPH 2023 conference proceedings. 2023: 1-12.

[7] Tian Y, et al. Parametric design for custom-fit eyewear frames[J]. Heliyon, 2023, 9(9).

[8] Grigatti A, et al. The biomechanical efficacy of a hydrogel‐based dressing in preventing facial medical device‐related pressure ulcers[J]. International Wound Journal, 2022, 19(5): 1051-1063.

[9] COMSOL Multiphysics Application Library. Snap Hook Elastic. COMSOL, Inc.

[10] COMSOL Multiphysics Application Library. Mountain Bike Fork. COMSOL, Inc.