

人体自适应弹力底盘的结构设计与舒适性评价研究

喻卫刚

杭州杨氏实业有限公司

DOI: 10.32629/jpm.v7i2.8750

[摘要] 为解决传统办公椅转椅托盘自适应调节滞后、舒适性与支撑性失衡的行业痛点,企业以人体工程学原理为核心,设计新型自适应弹力转椅托盘结构。该结构整合多级弹性支撑模块与智能压力感知单元,通过优化弹性体材料配比及传力路径,实现办公场景下人体动态载荷的实时适配。基于30组人体试验数据,采用主观评价与客观测试相结合的方法,从压力分布均匀性、振动衰减效率及姿态适配精度三方面开展舒适性评价。结果表明,所设计转椅托盘的压力集中系数降低42.3%,1-8Hz振动衰减率达78.6%,主观舒适度评分较传统结构提升2.1分(5分制),为高端办公椅、人体工学椅等产品的转椅托盘升级提供技术支撑。

[关键词] 自适应弹力转椅托盘; 转椅底盘; 结构设计; 舒适性评价

Research on Structural Design and Comfort Evaluation of Human-Adaptive Elastic Chair Pads

Yu Weigang

Hangzhou Yangshi Industrial Co., Ltd.

[Abstract] To address industry pain points such as lagging adaptive adjustment and imbalance between comfort and support in traditional office chair swivel bases, the company designed a novel human-engineered adaptive elastic chair pad structure. This structure integrates multi-level elastic support modules and intelligent pressure sensing units, achieving real-time adaptation to dynamic human loads in office environments through optimized elastic material ratios and force transmission pathways. Based on 30 sets of human test data, a combined method of subjective evaluation and objective testing was employed to assess comfort from three aspects: pressure distribution uniformity, vibration attenuation efficiency, and posture adaptation accuracy. Results showed that the designed chair pad reduced pressure concentration coefficients by 42.3%, achieved 78.6% vibration attenuation efficiency at 1-8Hz, and improved subjective comfort scores by 2.1 points (out of 5) compared to traditional structures. This provides technical support for upgrading chair pads in high-end office chairs and ergonomic chairs.

[Key words] adaptive elastic swivel chair base; swivel chair chassis; structural design; comfort evaluation

在消费升级与健康办公需求双重驱动下,办公椅作为职场人群高频使用的家具,其核心配件转椅托盘(转椅底盘)的舒适性与适配性成为企业核心竞争力的关键指标。传统转椅托盘多采用固定弹性结构或单一调节模式,难以应对不同体型用户久坐办公、姿态切换的动态需求,长期使用易引发臀部、腰部局部压力集中、姿态失衡等问题,制约办公椅产品的市场拓展。企业作为办公家具配件领域技术革新的主体,亟需突破现有设计瓶颈,开发兼具自适应调节能力与高舒适性的新型转椅托盘结构。

当前行业内的转椅托盘自适应技术多聚焦于手动机械调节或单一弹性参数优化,存在响应速度慢、适配范围窄等缺陷,

且舒适性评价多依赖主观反馈,缺乏量化指标体系。基于此,企业以办公场景下人体动态载荷特性为切入点,开展自适应弹力转椅托盘的结构创新设计,构建多维度舒适性评价模型,通过试验验证结构合理性与性能优越性,为办公椅转椅托盘的技术升级提供实践参考,同时强化企业在办公家具人体工程学应用领域的技术话语权。

1 办公椅自适应弹力转椅托盘的结构设计

1.1 设计理念与核心目标

企业以“动态适配、精准支撑、高效缓冲”为设计理念,核心目标是实现转椅托盘对人体体重、办公姿态(坐姿、前倾办公、后仰休息)变化的实时响应,在满足办公椅支撑稳定性、

旋转灵活性的前提下最大化提升久坐舒适性。基于人体解剖学数据，成年人办公坐姿状态下的体重分布呈现臀部 65%、大腿 25%、腰部 10% 的特征，动态切换姿态时载荷波动幅度可达静态值的 1.8 倍。据此，企业确定转椅托盘设计需满足三个核心指标：压力分布不均匀度 ≤ 0.15 ，动态载荷响应时间 $\leq 0.3s$ ，弹性回复率 $\geq 95\%$ ，确保不同体型用户（体重 45-100kg）在静态久坐与动态办公场景下均能获得适配支撑，同时兼容办公椅 360° 旋转、后仰角度调节等基础功能。

1.2 结构组成与技术参数

所设计的自适应弹力转椅托盘由三级弹性支撑层、压力感知阵列、自适应调节机构及承载框架四部分构成，整体适配主流中高端办公椅的安装尺寸，可直接替代传统固定型转椅托盘。一级支撑层采用邵氏硬度 35° 的改性聚氨酯弹性体，厚度 12mm，设置蜂窝状透气孔结构，孔径 8mm，孔距 15mm，既实现初始压力缓冲，又解决久坐闷热问题，适配办公椅座面软垫贴合需求；二级支撑层为弧形钛合金弹性片阵列，片厚 1.2mm，曲率半径 250mm，按人体臀部与大腿轮廓分布式布置，通过弹性形变实现中等载荷下的姿态适配，同时不影响转椅托盘的旋转灵活性；三级支撑层采用记忆合金弹簧组，弹簧丝直径 2.5mm，圈数 8 圈，自由高度 30mm，根据办公场景载荷需求设定差异化刚度，腰部对应区域弹簧刚度为 1.2N/mm（适配后仰休息姿态），臀部区域为 1.8N/mm（适配久坐办公姿态）。

压力感知阵列采用柔性电容式传感器，布置密度为 15 个/dm²，量程 0-200kPa，测量精度 $\pm 1kPa$ ，实时采集人体与办公椅座面、转椅托盘间的接触压力数据；自适应调节机构由微型伺服电机与齿轮传动组构成，电机额定功率 15W，转速 300r/min，传动比 1:20，根据压力数据动态调整三级支撑层的弹性预紧力，同时与办公椅后仰阻尼调节功能联动^[1]。承载框架采用高强度铝合金材质，壁厚 3mm，通过有限元分析优化结构拓扑，在保证支撑强度、兼容旋转轴组件的前提下实现减重 18%，框架尺寸为 450mm×400mm，预留标准螺丝安装孔位，适配主流办公椅座架与椅脚的装配需求，可直接应用于人体工学转椅、高管办公椅等产品。

2 舒适性评价试验设计

2.1 试验对象与设备

试验选取 30 名健康受试者开展试验，其中男性 18 名，女性 12 名，年龄 22-45 岁，身高 155-190cm，体重 45-100kg，均无腰部、臀部疾病史，且日常有 8 小时以上办公椅使用习惯，符合目标用户群体特征。该人群覆盖了成年男女主流体型区间，涵盖正常体重、超重等不同体重类型，可充分验证转椅托盘在多样化人体条件下的适配性能，试验前所有受试者均签署知情同意书，确保试验流程符合伦理规范。

试验设备包括：所设计的自适应弹力转椅托盘原型件（装配于标准人体工学办公椅座架）、传统固定弹力转椅托盘（装

配同一款办公椅座架，作为对照组）、压力分布测试系统（精度 $\pm 0.5kPa$ ，采样频率 50Hz）、振动测试分析仪（量程 0-50Hz，分辨率 0.1Hz）、人体姿态捕捉系统（定位精度 $\pm 1mm$ ）及主观评价量表。所有测试设备均提前完成校准，压力分布测试系统通过多点标定保障数据准确性，振动测试分析仪经标准振动源校验，人体姿态捕捉系统完成空间定位精度验证，主观评价量表则经过信效度检验，确保试验数据的可靠性与科学性。

2.2 试验方案设计

试验模拟日常办公场景，分为静态久坐舒适性测试与动态姿态切换舒适性测试两部分。静态测试中，受试者保持标准办公坐姿（腰椎自然弯曲，大腿与小腿夹角 90°，双臂自然放置于桌面），分别在两种转椅托盘装配的办公椅上静坐 8 小时（模拟全天办公时长），每小时记录一次压力分布数据，每 2 小时填写一次主观舒适度量表（从压力感受、支撑稳定性、久坐疲劳度三方面评分，每项 0-5 分）^[2]。

动态测试中，模拟办公场景常见姿态变化（前倾办公、后仰休息、左右扭转调整坐姿），频率 0.5Hz，持续 10min，同步记录振动衰减数据与姿态适配误差；同时模拟办公环境轻微振动（如地面轻微晃动、办公设备振动，1-8Hz 正弦波，振幅 5mm），测试转椅托盘的振动传递特性。每组测试重复 3 次，取平均值作为试验结果，测试环境温度控制在 25 \pm 2℃，湿度 50 \pm 5%，模拟常规办公环境条件。

2.3 评价指标体系

企业构建适配办公椅转椅托盘的多维度舒适性评价指标体系，包括客观指标与主观指标两类。客观指标涵盖：压力分布均匀性（以压力分布不均匀度表示，计算方法为最大压力与平均压力的比值，数值越低代表压力分布越均匀，缓解久坐局部压迫）、振动衰减率（1-8Hz 频段内，转椅托盘输出振动加速度与输入振动加速度的比值，该频段覆盖办公环境常见振动频率，比值越低减振效果越佳，提升久坐稳定性）、姿态适配精度（转椅托盘支撑面与人体接触面积的变化率，理想状态下变化率 $\leq 5\%$ ，变化率小意味着托盘可随办公姿态动态贴合，保障支撑连续性）；

主观指标包括压力舒适度、支撑舒适度、久坐疲劳度三项，采用 5 分制评分，分数越高表示舒适性越好，评分前会对受试者进行统一培训，明确办公场景下的评分标准（如前倾办公时腰部支撑、后仰时臀部压力等），确保评分标准理解一致，减少主观偏差。

3 试验结果与分析

3.1 静态舒适性测试结果

静态测试中，两组转椅托盘的压力分布与主观评价结果如表 1 所示。由表 1 可知，所设计的自适应弹力转椅托盘的平均压力为 32.6kPa，压力分布不均匀度为 0.12，显著低于对照组的 41.8kPa 与 0.21，表明其压力分布更均匀，有效降低久坐时

臀部、腰部的局部压力集中。主观评价方面，自适应弹力转椅托盘的压力舒适度评分为4.2分，支撑舒适度评分为4.3分，整体舒适度评分为4.1分，分别较对照组提升1.9分、1.7分、2.1分，受试者反馈装配自适应托盘的办公椅能有效缓解8小时久坐后的臀部、腰部疲劳感，后仰休息时支撑稳定性更优，无明显塌陷或支撑不足问题。

表1 静态舒适性测试结果对比

指标	自适应弹力	传统固定弹力	提升幅度
	转椅托盘	转椅托盘	
平均压力 (kPa)	32.6	41.8	-22.0%
压力分布不均匀度	0.12	0.21	-42.9%
压力舒适度评分 (分)	4.2	2.3	+82.6%
支撑舒适度评分 (分)	4.3	2.6	+65.4%
整体舒适度评分 (分)	4.1	2.0	+105.0%

3.2 动态舒适性测试结果

动态测试中两组转椅托盘振动衰减和姿态适配结果如表2所示。1-8Hz 振动测试中自适应弹力转椅托盘的平均振动衰减率为78.6%，3-5Hz 频段（人体敏感频段，对应办公环境轻微振动）的衰减率为82.3%，比对照组的56.4%和61.2%要高，说明自适应弹力转椅托盘能有效阻隔办公环境振动，提升坐姿稳定性。姿态适配精度上，自适应托盘在动态姿态变化中接触面积变化率为3.2%，低于对照组的8.7%，说明其能更好地贴合前倾、后仰等办公姿态变化，保持稳定支撑，避免姿态切换时出现支撑断层。

试验过程中自适应调节机构平均响应时间0.28s，满足设计要求，没有出现调节滞后或者过度调节的现象，且调节过程不影响转椅的旋转灵活性。由于三级弹性支撑结构的共同作用，加上高频压力感知和闭环调节逻辑，在应对办公场景下各种姿态变化和轻微振动时，转椅托盘可快速给出匹配支撑，大幅度提高动态办公场景下的舒适性与稳定性。

表2 动态舒适性测试结果对比

指标	自适应弹力	传统固定弹力	提升幅度
	转椅托盘	转椅托盘	
平均振动衰减率 (%)	78.6	56.4	+39.4%
3-5Hz 振动衰减率 (%)	82.3	61.2	+34.5%
姿态适配变化率 (%)	3.2	8.7	-63.2%
调节机构响应时间 (s)	0.28	-	-

3.3 讨论

试验结果表明，企业设计的自适应弹力转椅托盘在静态久坐与动态办公场景下的舒适性均显著优于传统结构，核心原因在于三级弹性支撑结构与闭环控制逻辑的协同作用，且适配办公椅的旋转、后仰等核心功能需求。三级渐进式支撑结构将人

体载荷分层传递和缓冲，防止单一弹性元件在高载荷下刚度突然变化，有效缓解久坐局部压力集中，契合办公场景8小时久坐的需求。压力感知和调节闭环控制可使转椅托盘实时匹配人体办公姿态变化，避免前倾办公时腰部悬空、后仰休息时支撑不足等问题，提高动态场景下的支撑稳定性。

弹性体材料的改性处理、结构拓扑优化，在保证支撑强度、兼容转椅旋转组件的基础上，提升了舒适性与耐用性，试验中自适应转椅托盘经过10000次动态载荷循环（模拟1年办公使用频次）后，弹性回复率仍保持在94.7%，满足办公椅配件的使用寿命要求（行业标准 ≥ 5000 次循环）。

从办公家具配件制造与应用角度分析，该转椅托盘的设计参数可根据不同办公椅类型（人体工学椅、高管椅、普通办公椅）需求灵活调整，适配多种办公椅产品的装配标准，拓宽企业产品线的技术覆盖范围。舒适性评价体系的构建为转椅托盘生产制造提供了量化的性能评估标准，有助于生产过程中对弹性元件、调节机构的精准管控，提升产品一致性与市场竞争力。但试验中也发现，托盘在极轻体重用户（ $\leq 50\text{kg}$ ）的适配精度方面仍有提升空间，后续企业将进一步优化弹性元件的刚度梯度设计，扩大适配体重范围，同时优化结构以降低制造成本，适配中低端办公椅市场需求。

4 结论

本研究以人体工程学与办公椅配件设计原理为基础，成功开发办公椅自适应弹力转椅托盘（转椅底盘）结构，通过三级弹性支撑模块与智能调节机构的整合，在保障办公椅旋转、后仰等基础功能的前提下，实现办公场景动态载荷下的实时适配。试验结果验证了该结构在压力分布均匀性、振动衰减效率及姿态适配精度方面的优越性，主观舒适度评分较传统转椅托盘提升显著，技术指标达到行业先进水平。

该设计不仅解决了传统转椅托盘自适应滞后、久坐舒适性差的行业痛点，还为办公椅配件制造企业提供了标准化的结构设计方法与量化的舒适性评价方法，助力企业在高端办公椅配件市场中建立技术优势，推动办公椅产品向健康化、智能化方向升级。

[参考文献]

- [1] 墨现科技自适应座椅 [J]. 汽车观察, 2025, 20 (03): 115.
- [2] 李伟, 姜菁珍, 陆伟. 考虑人体动力学模型的座椅自适应控制 [J]. 华侨大学学报 (自然科学版), 2019, 40 (05): 580-586.

作者简介：喻卫刚，出生年月：1979年12月14日，男，汉族，籍贯：杭州市萧山区，学历：大专，职称：助理工程师，研究方向：从事转椅托盘的产品开发和设计。