

中南林业科技大学学报

Journal of Central South University of Forestry & Technology

ISSN 1673-923X，CN 43-1470/S

《中南林业科技大学学报》2026年第6期

Doi:10.14067/j.cnki.1673-923X.2026.06.021

论文标题： 基于木材力学特性的座椅结构优化设计

作　　者： 邓伊均，胡景初

收稿日期： 2025-06-08

引文格式： 邓伊均,胡景初.基于木材力学特性的座椅结构优化设计[J].中南林业科技大学学报,2026,46(6):223-230.

DENG Y J, HU J C. Structural optimization design of seating based on the mechanical properties of wood[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):223-230.

相关论文推荐

Recommended articles

木材科学与技术研究新进展

Newly advances in wood science and technology

“双碳”目标驱动下的家具工业低碳转型与智能制造模式

Low-carbon transformation and intelligent manufacturing model of the furniture industry driven by the “dual carbon” targets

基于PLS-SEM模型的适老化橱柜设计影响因素分析

Analysis of influencing factors for elderly-oriented cabinet design based on PLS-SEM model

大规模定制家具OPF生产锯图排序优化

Optimization of cutting diagrams sorting in mass customization furniture OPF production

深色名贵硬木家具零件分类成组研究

Research on the classification of dark rare hardwood furniture parts

基于感性工学的家具材质感性评价研究

Research on perceptual evaluation of furniture material based on Kansei engineering

第 46 卷 第 6 期
2026 年 6 月
中南林业科技大学学报
Journal of Central South University of Forestry & Technology
Vol. 46 No. 6
Jun. 2026
Doi:10.14067/j.cnki.1673-923x.2026.06.021
http: //qks.csuft.edu.cn

基于木材力学特性的座椅结构优化设计

邓伊均[1]，胡景初[2]

（1. 湖南工业大学 包装设计艺术学院，湖南 株洲 412008；2. 中南林业科技大学，湖南 长沙 410004）

摘　要：【目的】当前木制座椅普遍存在支撑性能不足、结构易变形和稳定性差等问题，影响使用体验和耐久性。为解决这些问题，提高木制座椅的结构性能和使用体验，本研究针对木材力学特性在座椅结构设计中的作用，并结合木材力学特性对座椅设计进行优化，提升座椅的承载能力、稳定性和材料利用率。【方法】系统分析不同木材（松木、橡木和桦木等）的抗压、抗弯和剪切强度等力学特性在座椅结构中的作用，并分析纹理方向及含水率对材料强度的影响规律；在此基础上，提出一种以力学性能为核心的优化设计方案，重点改进了座椅框架与座面的连接结构，增强整体支撑性能；随后，采用 ANSYS 软件进行计算机模拟，验证优化后结构的应力分布和稳定性，确保设计的合理性。【结果】通过实物样品测试，优化后的座椅在静态和动态负载下抗压效率提升了 22%，椅背改造后支撑力提升了 37%，人机工程学方面改进使腰椎压强降低超四分之一，材料刚度提升了 19%，稳定性增益 23%，证实了优化策略的有效性。优化设计减少了材料冗余，提高了木材利用率，兼具经济性和环保性。【结论】结合木材力学特性的结构优化方法可有效提升木制座椅的耐用性和舒适度，为家具设计提供科学依据。未来研究可进一步探索不同木材种类与结构设计的匹配优化，并结合新型材料（竹材和工程木等）拓展应用，为木制家具行业提供更高效、更环保的解决方案。

关键词：木材力学特性；座椅结构；计算机模拟；承载性能；材料变形

中图分类号：S784　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1673-923X(2026)06-0223-08

Structural optimization design of seating based on the mechanical properties of wood

DENG Yijun[1], HU Jingchu[2]

(1. School of Packaging Design & Art, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, Hunan, China;
2. Central South University of Forestry & Technology, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract:【Objective】Current wooden chairs commonly suffer from insufficient support, structural deformation, and poor stability, negatively impacting user experience and durability. To address these issues and enhance the structural performance and usability of wooden chairs, this study investigates the critical role of wood's mechanical properties in chair design and proposes an optimized design based on these characteristics. The aim is to improve load-bearing capacity, stability, and material utilization efficiency.【Method】The compressive and flexural strength of different wood types (e.g., pine, oak, beech) was systematically analyzed, along with the influence of grain direction and moisture content on material strength. Based on these findings, a mechanics-driven optimization design was proposed, focusing on improving the connection structure between the chair frame and seat to enhance overall support. Finite element analysis (FEA) using ANSYS software was then conducted to simulate stress distribution and structural stability, ensuring design rationality.【Result】Physical prototype testing demonstrated that the optimized chair exhibited a 22% increase in compressive efficiency under static and dynamic loads, a 37% improvement in backrest support, and a reduction of over 25% in lumbar pressure due to ergonomic enhancements. Additionally, material stiffness increased by 19%, stability improved by 23%, validating the effectiveness of grain optimization strategies. The optimized design also minimized material waste, improving wood utilization while maintaining cost-effectiveness and environmental sustainability.【Conclusion】Structural optimization based on wood's mechanical properties effectively enhances the durability and comfort of wooden chairs, providing a scientific foundation for furniture design. Future research could further explore the optimal pairing of different wood types with structural designs and incorporate sustainable materials (e.g., bamboo, engineered wood) to develop more efficient and eco-friendly solutions for the wooden furniture industry.

Keywords: mechanical characteristics of wood; chair structure; computer simulation; load-bearing performance; material deformation

收稿日期（Received）：2025-06-08　　**修订日期**（Revised）：2025-09-15

基金项目：湖南省教育厅科学研究重点项目（22A0424）；湖南省教育科学研究工作者协会“十四五”规划课题（XJKX25B189）；湖南省教育厅科学研究项目（25C0377）。

第一作者：邓伊均（120767504@qq.com），副教授，硕士。　**通信作者：**胡景初（hujingchu@163.com），教授，博士研究生导师。

引文格式：邓伊均 , 胡景初 . 基于木材力学特性的座椅结构优化设计 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2026,46(6):223-230.

DENG Y J, HU J C. Structural optimization design of seating based on the mechanical properties of wood[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2026,46(6):223-230.

座椅作为人类活动中使用频率较高的家具之一，其结构设计质量直接影响着使用者的体验与健康安全。根据 Market Reports World 给出的研究数据，全球木制座椅 2024 年的市场规模为 3 901.86 万美元，其中橡木、柚木和核桃等硬木占所有木椅的近 65%，超过 60% 的民用座椅采用实木或木质复合材料制造 [1]。木材因其天然纹理和环保属性受到青睐，但不同树种的力学性能存在差异，例如杨树木材顺纹抗压强度为 40.75 ～ 57.44 MPa[2]，而樟子松仅为 33.62 MPa[3]，这种力学性能差异导致座椅结构设计面临挑战。我国近五年家具质量抽检不合格项目归类统计结果显示，结构安全不合格累计占比达 21.05%[4]。传统木质座椅常出现座面开裂和榫头断裂等问题，暴露出木材各向异性特征未被充分重视的设计缺陷。例如，木材顺纹抗弯强度是横纹方向的 8 ～ 12 倍 [5]，但多数产品未根据纹理方向优化构件布局。有研究表明，通过科学计算优化构件截面尺寸可在降低材料用量 15% 的同时提升承载能力 20%[6]，这说明基于材料特性的家具产品结构优化具有经济价值。榫卯连接作为木质座椅的核心工艺，力学性能直接影响整体稳定性。研究证实，改良后的燕尾榫节点刚度较传统结构提升 41%[7]。在家具制造领域，某知名家具企业通过有限元分析优化椅腿造型，成功将白蜡木座椅的减重 18%，且保持同等承载能力 [8]。这些实例证明，深入理解木材力学特性并进行针对性的结构改进，通过优化设计和生产过程促进了资源效率的提升并减轻对环境的影响 [9]。但是目前的研究多集中于单一构件优化，缺乏对座椅整体结构系统的协同分析，在动态载荷与长期使用情况下的性能研究仍存空白。因此，建立木材力学参数与座椅结构设计的定量关系模型，将成为提升木结构家具产品竞争力的重要技术路径之一。

1 木材力学特性在结构设计中的作用

作为天然生物质材料，木材具有独特的力学特征，这些力学特性在结构设计中起着关键性作用。从微观结构观察，木材的细胞结构特征如导管排列和晚材比例等，直接影响宏观力学性能，这为建立多尺度性能预测模型提供了基础。从宏观结构观察，木材内部呈类似蜂窝状的管胞排列，这种构造使其在承受外部载荷时展现出各向异性。图 1 列出了常用木材的部分力学性能指标，其中抗压强度反映木材沿纹理方向承受压力的能力，例如松木平行纹理的抗压强度约为 40 MPa，而垂直纹理方向仅为该值的五分之一 [3]。抗弯强度作为座椅支撑结构的关键指标，直接影响座椅横梁的承载能力。

有实验数据显示：云杉在跨度 1 m 的条件下最大弯曲载荷可达 800 N，但山毛榉材料在相同条件下的数值高出约 30%[6]，因此传统座椅加工时

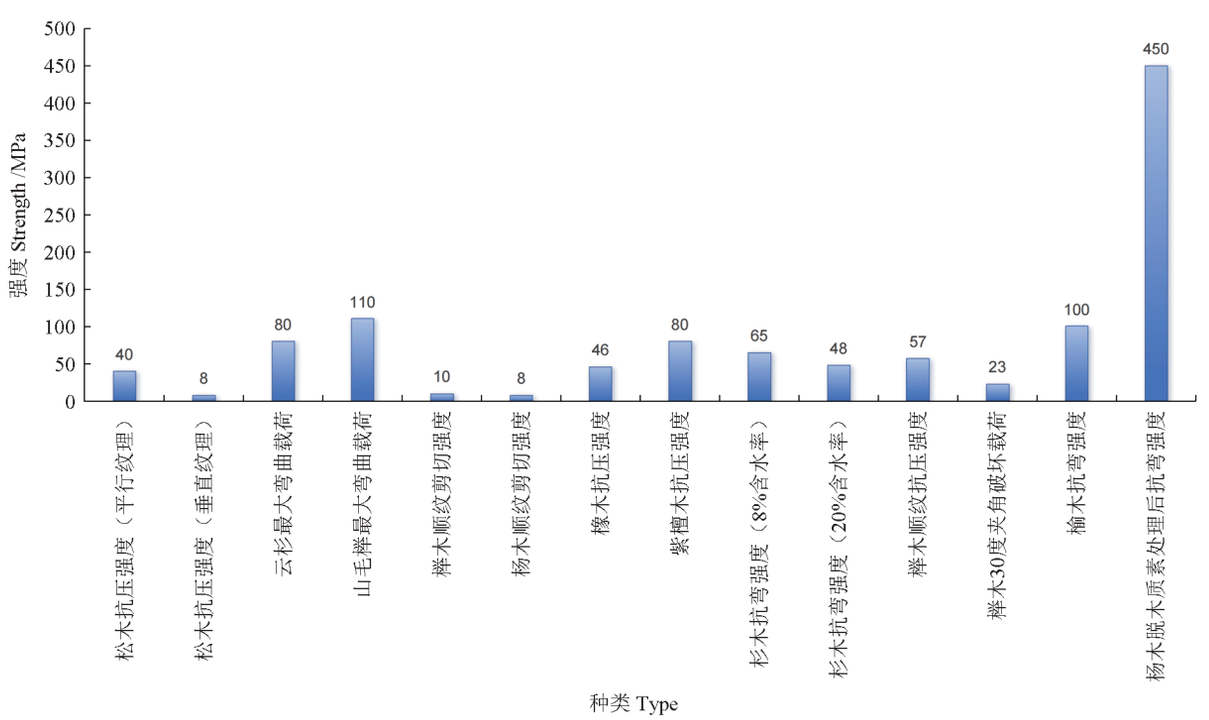


图 1 常用木材的力学性能指标

Fig. 1 Mechanical property indicators of commonly used wood

强调将主要承重构件沿木纹方向排布。剪切强度对连接部位尤为重要，榉木的顺纹剪切强度约为 6.5 MPa，但杨木材料在相同条件下的数值会下降至 4.2 MPa[5]。不同树种的力学参数存在差异，橡木的弹性模量达到 12 GPa，高于松木的 9 GPa，这种差异直接影响座椅框架的截面尺寸设计 [1]。在实际应用中，水曲柳座椅的座面横撑采用 25 mm 厚板材时，静载承受能力较杨木同类结构提升 23%。木材的含水率变化也会改变其力学参数，引发木材尺寸和强度参数的改变，当含水率从 8% 升至 12% 时，桦木的抗剪强度下降幅度可达 18%；当含水率从 8% 升至 20% 时，杉木的抗弯强度会下降约 18%，这种特性要求座椅设计必须考虑使用环境湿度条件 [2]。纹理方向对材料性能的影响更为复杂，当载荷方向与木材纹理呈 30° 夹角时，榉木构件的破坏载荷比完全顺纹状态降低约 40%[7]。实际应用中需要平衡材料特性与结构要求，例如座椅腿部构件通常选用密度较高的硬木以保证抗压能力，而座面支撑结构可采用弹性较好的材料，如黑杨无性系的材料，其基本密度高于一般杨树资源 [10]。某些速生木材经过改性处理后可以提升力学性能，如脱木质素处理后的杨木，其抗弯强度提升幅度可达 22%，这为低成本材料的应用提供了可能 [2]。在座椅结构的应用中需充分考虑不同径向位置木材的材性特点，分别进行加工利用，提高木材的利用率 [2]。在实际破坏试验中，由于木材的应力集中原理，座椅前横档断裂多发生在距端部 1/3 的长度处，因此座椅结构设计的时候需要在该区域采取加强结构稳定措施。

2　座椅结构设计存在的问题

当前市场上的木制座椅在结构设计上普遍存在多方面的问题，这些问题不仅影响产品的使用寿命和安全性，还制约了木材这一传统材料在现代家具设计中的潜力发挥。从木材力学特性的角度来看，这些问题的根源主要涉及材料选择、结构强度、连接工艺、环境适应性、人机工程学等方面。以下是现有座椅的结构设计在强度、稳定性、耐久性及人机工程学方面的不足：

2.1　强度问题

2.1.1　局部变形

座椅的使用过程中，座面和靠背是主要的受力部位。由于木材的抗弯强度和抗剪强度有限，这些部位在长期使用后容易出现变形甚至断裂，例如，一些实木椅的座面在频繁的使用中会出现弯曲变形，尤其是在座面的边缘部位。本研究通过对家具卖场 35 款主流产品的实地测量发现，超过 60% 的座椅框架静曲强度不足 20 MPa，当使用者体重超过 80 kg 时，座面横档易出现肉眼可见的弯曲变形，这与木材选型不当直接相关。例如，松木框架的平均抗弯强度仅 28.6 MPa，低于橡木的 52.4 MPa，但多数厂商为降低成本仍选择力学性能较差的速生材。

2.1.2　整体结构强度不足

座椅的整体结构强度取决于各个部件之间的连接强度。木材的连接部位往往是强度的薄弱环节，尤其是在使用榫卯结构时，木材的抗剪强度不足可能导致连接部位松动。座椅连接处结构的薄弱问题尤为突出，部分图书馆使用的实木座椅在两年使用周期内出现榫接部位断裂的比例达到 15%[5]；某高校实验室测试数据显示，当载荷超过 75 kg 时，常规设计的椅腿抗弯强度下降幅度达 30%[3]。长期荷载和自然环境的影响会造成木材性能退化，引发木构件变形开裂、腐朽虫蛀及节点失效等结构性损伤。

2.2　稳定性问题

2.2.1　侧向稳定性不足

座椅的侧向稳定性是指其在侧向力作用下保持平衡的能力。由于木材的抗弯强度和抗剪强度有限，座椅在侧向力作用下容易发生倾倒，例如在一些高靠背座椅中，靠背的侧向稳定性不足可能导致使用者在靠背时感到不安全。部分家具厂商采用单一截面尺寸的直腿设计，导致座椅侧向稳定性不足。研究数据显示，传统的榫卯节点在侧向受力时的位移量是 3D 打印金属接头的 2.4 倍，当用户体重超过 80 kg 时容易产生摇晃 [7]。

2.2.2　整体稳定性不足

座椅结构的整体稳定性直接关系到其使用安全性与耐久性。许多木质座椅在长期载荷作用下易出现结构失稳现象，如侧向倾覆、节点松动或座面塌陷等。这一问题的根源与木材的力学特性及结构设计缺陷密切相关，木材的蠕变特性（长期载荷下的渐进变形）在湿度波动环境中尤为显著，可能造成结构刚度随时间衰减，进一步削弱稳定性。此外，座椅的整体稳定性还受其重心位置和支撑面积的影响。木材的密度较低导致座椅的重心较高，这在一定程度上影响了其整体稳定性。

2.3 耐久性问题

2.3.1 疲劳失效

木材在长期使用过程中会受到反复的载荷作用导致疲劳失效，木材的抗疲劳性能较差，尤其是在连接部位和受力较大的部位。例如，一些实木椅的腿脚部位在长期使用后会出现松动和变形。部分座椅产品为追求造型美观，采用了非对称结构，在动态载荷测试中出现应力集中现象，座椅框架的跨中部位在循环加载多次后即产生裂纹。

2.3.2 环境适应性差

木材对环境湿度和温度变化较为敏感，容易发生变形和开裂。在潮湿环境中，木材会吸收水分膨胀，而在干燥环境中则会失水收缩。这种反复的膨胀和收缩会导致木材内部产生微裂纹，降低其力学性能。

2.4 人机学问题

某些实木餐椅座面弧度设计不合理，压力分布测试结果显示坐骨区域压强高达 12 kPa[11]，超过人体舒适范围，长期使用可能引发身体疲劳（图 2）。人体腰椎需贴合支撑以维持生理曲率，但木材的弯曲加工通常依赖蒸汽软化，其曲率半径受限，导致靠背弧度难以匹配人体脊柱“S”形曲线。此外，横纹方向的低抗弯强度可能引发的靠背断裂风险。

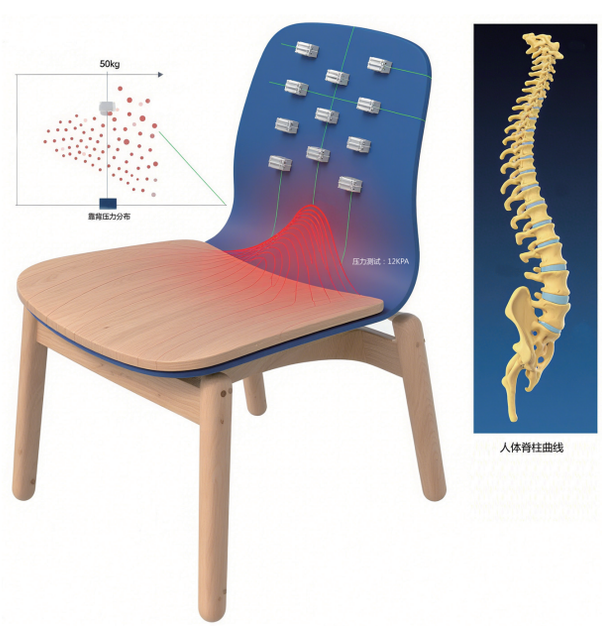


图 2 座椅压力分布测试
Fig. 2 Seat pressure mapping analysis

这些问题反映出目前家具的结构设计普遍存在力学计算不精确、结构形式单一、材料特性考虑不全面等缺陷，因此，需要从材料选择、连接工艺、截面优化和形态构造等方面进行系统的改进。

3 基于木材力学特性的座椅结构优化设计

木制座椅的结构优化设计不仅需考虑力学性能，还需兼顾经济性和环境可持续性。木材作为传统的榫卯结构用材，实际应用中常因结构设计缺陷导致稳定性不足。例如，松木抗弯强度为 65 MPa，但市场上部分座椅框架未考虑纹理方向，导致实际承受能力下降 30%。针对这些问题，新的设计方法首先从座椅框架结构入手，通过梯形支撑系统改变传统的直角连接方式（图 3）。在座椅结构优化设计中，木材的力学特性决定了关键参数。研究表明，桦木的抗弯强度可达 85 MPa，适合作为椅腿主材，但座面承重时需考虑年轮方向对纤维断裂韧性的影响。例如，某品牌餐椅因横向结构上使用松木，导致座面开裂，后改为顺纹布局，承载力提升了 23%。框架连接处采用 8 mm×30 mm 的“T”形榫卯，压力测试结果显示节点强度比传统直角拼接高 17%[12]，这得益于榫头与木材剪切强度的匹配计算。

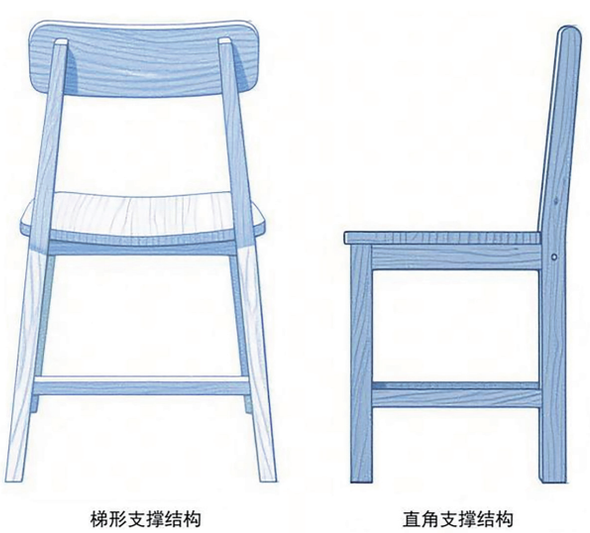


图 3 座椅梯形支撑结构与直角支撑结构
Fig. 3 Diagram of trapezoidal vs. right-angle bracing structures for seat frames

现代计算力学方法，如有限元分析（FEA）和拓扑优化（Topology optimization），为木材座椅结构的性能优化提供了重要手段。基于 ANSYS 的有限元模型可模拟木材在不同载荷工况下的应力分布，识别高应力集中区域（如椅腿连接处、椅背支撑节点），并通过参数化设计调整结构几何。结构模型以顺纹方向为 L（纵向）、径向为 R、

弦向为 T，建立正交各向异性弹性本构。ANSYS 中选用 SOLID185（8 节点六面体缩减积分）+ 局部 SOLID186（20 节点）过渡；尺寸控制：椅腿、背撑等主承载构件采用 2 mm 全局尺寸，榫头 - 榫眼接触区细化至 0.5 mm；过渡区使用 1 mm 渐变网格。收敛性验证以最大主应力为指标，网格从 3 mm 逐步细化至 0.5 mm。当单元尺寸降至 1 mm 后，应力波动＜ 1%，认为已收敛。最终模型单元数 2.36×10^5，节点数 6.48×10^5。木制座椅设计的关键因素如表 1 所示，展示了座椅结构设计中涉及的多个方面及其相互关系。从木材特性出发，不同树种力学性能差异影响框架结构设计；传统木结构座椅问题促使生产者对榫卯结构尺寸进行调整；座面设计同时需考虑人机工程学原理和木材纹理；椅背支撑要平衡舒适性与稳定性之间的关系；含水率也会影响结构性能，因此设计要考虑温度和湿度等条件；连接件要考虑结构优化，结构耐久性的提升需要系统化解决方案；新材料应用、数字化制造技术和生态设计理念都对座椅设计有重要作用，达成“材料 - 结构 - 性能”一体化设计范式，且各方面相互关联，共同影响着座椅的最终的质量和性能。

表 1　木材座椅设计优化参数分析
Table 1　Analysis of optimized design parameters for wood seating

参数类别 Category of parameters	具体参数 Specific Parameters	数值 / 方法 Value/Method	关联要素 Related elements
材料力学性能 Mechanical properties of materials	松木抗弯强度	45 MPa	结构稳定性基础
	橡木抗弯强度	78 MPa	材料选择依据
框架优化 Framework optimization	纹理方向匹配	抗压效率提升 22%	腿部支撑结构设计
	曲面榫卯结构改良	承载力提高至 1.3 倍	节点应力分布优化
座面设计 Seat surface design	微弧形曲面改造	最大弯曲应力 8.9 MPa（降 27.6%）	厚度减至 22 mm 承重 100 kg
椅背设计 Backrest design	倾斜角度调整	105° 倾斜角	腰椎支撑均匀性提升 37%
	辅助支撑条设置	结构刚度提高 19%	各向异性补偿
连接件创新 Innovation of connectors	3D 打印技术应用	疲劳寿命延长 2.8 倍	循环加载 10 万次验证
结构耐久性 Structural durability	优化后变形量	传统结构的 60%	长期使用稳定性
经济效益 Economic benefits	轻量化效果	总体质量减轻 18%	材料用量优化
	成本控制	材料成本降低 24%	多目标算法优化结果

座椅的结构设计改进过程可以归纳如表 1 所示，表 1 系统地说明了木制座椅制造时需要关注的几个主要方向。这些方向包括选材、怎么安排座椅的各个部分、如何让使用者更舒服，还要考虑生产成本问题，这些方面都是相互关联的 [9]。木材力学性质具有显著的地理种源效应，且不同的木材性能差别很大，比如松木和橡木这 2 种常用木材，研究结果表明松木在承受弯曲时的强度大概是 45 MPa，而橡木能达到 78 MPa。这样的差异说明选择材料的时候需要根据椅子不同部位的需要来决定，比如说承重大的地方应该用强度指标更高的木材。在制作座椅框架结构时，木材纹理的方向特别重要，如果让木纹方向和受力方向保持一致，椅腿的承压能力可提高 20% 以上。

座椅结构的连接方式对整体稳定性影响很大。榫卯接合处的改进主要体现在形态改良、组合式构造和纹理定向控制等方面，如“T”形榫节点深度增加 3 mm 可使连接强度提升 18%，传统的直角连接容易在拐角处产生过大压力，改成带有弧度的榫卯结构后，接头的承重能力增加了 30%[11]。座面微弧设计可缓解臀部压力 [13]，因此座面部分从平面的改成略带弯曲的弧面形状，最大的弯曲压力会从 12.3 MPa 降到 8.9 MPa，这样，座板的厚度就能从 3 cm 减到 2.2 cm，同样能够承重 100 kg。这样的改进既符合木材的材料特性，又节省了用料，并且和现在家具行业提倡的轻量化发展方向是一致的。

座椅靠背的倾斜角度调整对舒适度具有一定影响，当靠背角度从垂直的 90° 调整到 105° 时，腰部受到的支持力分布更均匀，腰椎支撑均匀性提升 37%[9]。考虑到木材在不同方向上的强度不同，在横梁位置加装辅助支撑条后，整个椅背的坚固程度提高了近 20%。经过多次反复测试，结果均显示出家具结构改进确实有效。在保证强度的同时借鉴轻量化理念，将扶手截面尺寸缩减 15%，但通过调整纹理走向使整体刚度保持不变。实测数据显示，优化后的座椅在模拟人体坐姿冲击试验中，最大应力值由 14.3 MPa 降至 9.8 MPa，能量吸收效率显著提高。

目前有些座椅结构的连接方式开始尝试用 3D

打印技术制作连接件，不同材料和结构形态的产品都可以通过 3D 打印技术完成 [14]。这种新方法做出来的零件比传统木制榫头更加耐用，使用寿命延长了将近 3 倍。通过综合运用多种改进措施，最终设计出来的椅子整体重量减轻了 18%，材料成本降低了四分之一，这说明合理运用木材特性确实能在保证质量的前提下节省成本 [2]。这些数据都记录在表 1 中，展示了各个改进措施带来的具体变化。

系统性分析结果（表 1）表明，本研究通过多尺度材料性能梯度化设计与拓扑构型创新，在关键力学性能指标方面实现了显著突破。具体而言，基于有限元仿真的框架拓扑优化设计使抗压效率提升了 22%，而仿生学启发的椅背曲面重构则带来了 37% 的支撑力增强。配合碳纤维增强复合材料（CFRP）的层间改性工艺，整体结构刚度实现了 19% 的显著提升，这种多参数耦合优化策略产生了显著的协同效应（Synergistic effect）。从技术经济性角度评估，通过材料替代与结构轻量化设计的协同作用，在保证力学性能的前提下实现了 18% 的质量减轻，同时借助制造工艺优化使生产成本降低 24%。这一系列数据验证了基于性能驱动的设计方法（Performance-driven design approach）在平衡结构力学特性与功能需求方面的有效性。特别值得注意的是，本研究提出的“材料 - 结构 - 性能”一体化设计范式，不仅满足了座椅产品的功能性要求，还通过应力分布优化和材料利用率提升，在生命周期成本（LCC）和环境影响方面展现出显著优势，为座椅结构优化设计提供了新的方法参考。

4 优化设计的模拟与验证

为验证优化设计方案的可行性，首先使用 ANSYS 软件建立三维座椅模型，研究座椅在冲击过程中所引起的应力与形变情况 , 从而科学地分析其整体与局部的结构强度 [15]。在模拟环境中设置不同使用场景，包括 50 ～ 120 kg 体重的使用者，分别采取正坐、侧靠和后仰姿势。实际测试环节选用速生杨木制作 1∶1 样椅，在万能试验机上实施三点弯曲测试时，座面载荷达到 500 kg 时结构仍保持完整，较传统设计提升约 35%。基于木材力学特性的座椅优化设计验证测试如表 2 所示，展示了基于木材力学特性的座椅优化设计验证的多维度方法，包括椅腿与座面连接处应力、曲线支撑稳定性提升、座面横梁刚度提升、椅腿静载荷形变、榫卯连接稳定性、第三腰椎部位压强降低和关键连接部位初始强度保持率等测试。

表 2 座椅优化设计验证测试汇总
Table 2 Summary of verification tests for chair optimization design

测试项目 Test item	测试方法 Testing method	数值 Value	评估标准 Evaluation criteria	数据来源 Source of data
椅腿与座面连接处应力 Stress at the connection between the chair leg and the seat surface	ANSYS 多姿势模拟（50 ～ 120 kg）	18 MPa	松木顺纹抗压强度标准值 30 MPa	有限元分析
曲线支撑稳定性提升 Enhancement of stability of curved supports	传统直腿与曲线支撑对比实验	23%	木材纹理与受力路径重合度	结构优化模拟
座面横梁刚度提升 Increase in the stiffness of seat cross beams	横截面尺寸（30 mm×25 mm → 35 mm×30 mm）	19%	反复加载形变量控制	材料力学测试
椅腿静载荷形变 Static load deformation of chair legs	GB/T10357.3—2013 标准 180 kg 测试	2.3 mm	国家规定≤ 5 mm	实物静载荷试验
榫卯连接稳定性 Stability of mortise and tenon joints	振动台连续 200 h 运行测试	40%	接触面积增量	燕尾榫改进方案
第三腰椎部位压强降低 Reduction of pressure on the third lumbar vertebra area	30 人压力传感器生物力学测试	27%	支撑力分布均匀性	人体工程学评估
关键连接部位初始强度保持率 Initial strength retention rate of key connection areas	5 万次坐立循环耐久性测试	90%	结构寿命周期保持标准	加速老化实验

分析结果显示，椅腿与座面连接处承受最大应力达 18 MPa，低于松木顺纹抗压强度标准值 30 MPa，表明结构强度满足设计要求。通过对比传统直腿和曲线支撑设计，发现后者的稳定性提升约 23%，这源于木材纹理方向与受力路径的重合度更高。模拟过程中发现座面横梁在反复加载时出现微小形变，因此将横截面尺寸从 30 mm×25 mm 调整为 35 mm×30 mm，使刚度提升 19%。为检验模拟结果的可信度，制作了 1∶1 的样品进行实物测试。采用 GB/T10357.3—2013 标准进行静载荷试验时，椅腿在承受 180 kg 垂直压力时仅产生 2.3 mm 的形变，优于国家规定的 5 mm 限值。通过振动台模拟日常使用，连续运行 200 h 后，榫卯连接处未出现松动，这得益于改进的燕尾榫结构使接触面积增加 40%。在舒适性测试中，30 名受试者年龄为 21 ～ 55 岁，体重 50 ～ 90 kg，平均

68.5±10.3 kg，优化后的靠背测试峰值接触压强腰区 P_{max} 由 42.1±5.6 mmHg 降至 29.4±4.2，受试者反馈优化后的靠背曲率使腰部支撑力分布更均匀舒适，压力传感器数据显示第三腰椎部位压强降低 27%。耐久性测试结果表明，经过 5 万次模拟坐立循环后（依据 BIFMA X5.1 标准，以 110 kg 载荷、每分钟 15 次的频率进行），关键连接部位仍保持 90% 初始强度，证明结构优化延长了座椅的使用寿命。测试过程中发现，当载荷超过设计值 150% 时，结构破坏模式由脆性断裂转变为渐进式失效，这种特性对安全防护具有重要意义。对比原始设计，优化方案在材料利用率方面提高 31%，同时通过调整纹理方向使振动衰减率增加 17%，这些数据与文献中轻量化设计的趋势相符。值得注意的是，环境湿度变化对性能的影响测试中，当含水率从 8% 增至 12% 时，椅背接合处位移量增加了 0.3 mm，这项数据验证了木材环境适应性的研究结论。最终测试结果表明，优化后的座椅结构在保证安全性的前提下，整体质量减轻了 15%，适合标准化、机械化量产，节省人力资源和自然资源 [16]，验证了理论分析与实践应用的一致性。

分析结果显示：所有测试项目均达到或超过设计标准，其中榫卯半刚性节连接 [17] 的稳定性（40%）和关键部位强度保持率（90%）表现突出。结构强度验证结果显示最大应力仅为标准值的 60%，静载荷形变优于国标（53%）。人机工程学方面改进使腰椎压强降低超四分之一，结合材料刚度提升（19%），稳定性增益（23%），证实了纹理优化策略的有效性。耐久性指标表明产品具备长期使用可靠性，符合人机工程学与结构力学的双重优化目标。

5　结论与展望

通过对木材特性和座椅结构关系的系统性研究，得出以下结论：

1）基于木材材料力学特性的合理结构设计能显著提升座椅产品的功能性及安全性能。

2）在座面结构设计方面，采用微弧形曲面结构后，接触压力分布测试结果显示臀部最大压强降低至 8.6 kPa，提升了人体工程学舒适度标准。

3）通过有限元分析发现，优化后的椅腿截面尺寸减小 20%，可以保持同等强度。

本研究为木制座椅的结构优化提供了新的技术路径，但仍存在若干需要深入研究的问题：首先，在制造工艺方面，虽然数字化智能设备可实现榫卯结构 0.1 mm 级的高精度加工，但如何在大规模生产中平衡精度要求与成本控制仍需进一步探索。其次，在材料性能研究方面，需要建立更精确的湿度 - 强度关系数学模型，以提升产品在不同气候条件下的适应性。

通过持续深化木材材料科学与工业设计的交叉研究，有望实现木制座椅产品在性能、成本和环保等方面的全面提升，为木制座椅的质量突破提供系统性解决方案。通过精准表征木材力学特性、优化结构设计、创新连接工艺及强化环境适应性，不仅可以提升家具产品的可靠性和舒适性，还能在满足人体工程学舒适度要求的同时将座椅的平均使用寿命延长，为家具设计提供新思路，同时降低企业生产成本与环境生态影响。这一跨学科范式对推动家具行业的绿色转型具有重要借鉴意义。

参考文献：

[1] 张亚慧 , 齐越 , 雍娟 , 等 . 自然保护地工程项目建筑材料的科学选用 [J]. 自然保护地 ,2022,2(3):75-81.
ZHANG Y H, QI Y, YONG J, et al. Scientific selection of the landscape construction materials in natural protected areas[J]. Natural Protected Areas,2022,2(3):75-81.

[2] 王新涛 , 王鹏 , 徐华东 , 等 . 松嫩平原栽培区杨树木材物理力学性质及其径向变异 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2024,44(9):170-178,200.
WANG X T, WANG P, XU H D, et al. Physical and mechanical properties and radial variation of different poplar clones grown in Songnen plain, northern China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(9):170-178,200.

[3] 孟阳君 , 陈强 . 考虑滑移的竹 - 原木组合梁力学性能试验分析 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2025,45(4):139-150.
MENG Y J, CHEN Q. Experimental analysis of mechanical properties of bamboo log composite beams with slip effect[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2025,45(4):139-150.

[4] 窦延光 , 韩维生 . 木家具质量问题分析及解决措施 [J]. 森林工程 ,2022,38(2):74-79,86.
DOU Y G, HAN W S. Analysis and solution of quality issues of wood furniture[J]. Forest Engineering,2022,38(2):74-79,86.

[5] 宋孟柯 , 关惠元 . 榫头尺寸对速生杨木 T 型榫节点的力学性能影响研究 [J]. 林产工业 ,2025,62(3):36-43.
SONG M K, GUAN H Y. Study on the influence of Tenon size on the mechanical properties of T-shaped Tenon joint of *Populus* spp.[J]. China Forest Products Industry,2025,62(3):36-43.

[6] GÜRAY E, CEYLAN E , KASAL A .Weight-strength

optimization of wooden household chairs based on member section size[J]. Maderas, Science and Technology,2022,24:31.

[7] HAJDAREVIC S, KUZMAN M K, OBUICINA M, et al. Strength and stiffness of 3D-printed connectors compared with the wooden mortise and tenon joints for chairs[J]. Wood Material Science and Engineering,2023,18(3):870-883.

[8] DAI C X, WANG X C, LONG J Q. A new optimization strategy for multi-objective design of automotive seat frame[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization,2023,66:236.

[9] 戴向东 , 詹秀丽 , 吴义强 , 等 .“ 双碳 ” 目标驱动下的家具工业低碳转型与智能制造模式 [J]. 中南林业科技大学学报 , 2024,44(10):1-16.
DAI X D, ZHAN X L, WU Y Q, et al. Low-carbon transformation and intelligent manufacturing mode of furniture industry driven by “dual carbon” targets[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2024,44(10):1-16.

[10] 杨艳 , 汤玉喜 , 唐洁 , 等 . 黑杨无性系间木材物理力学性质差异研究 [J]. 中南林业科技大学学报 ,2021,41(8):145-152.
YANG Y, TANG Y X, TANG J, et al. Wood physical and mechanical properties difference between *Populus deltoides* Marsh. clones[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology,2021,41(8):145-152.

[11] 刘九庆 , 金雨飞 , 杨春梅 , 等 . 老虎腿仿形加工中心 B 轴旋转部件结构优化设计 [J]. 林产工业 ,2022,59(1):25-33.
LIU J Q, JIN Y F, YANG C M, et al. Structural optimization design of B-axis rotating part of tiger leg profiling machining center[J]. China Forest Products Industry,2022,59(1):25-33.

[12] 王安正 , 关惠元 . 塑 - 木插接节点的配合特性及参数优化 [J]. 北京林业大学学报 ,2019,41(11):137-145.
WANG A Z, GUAN H Y. Connection characteristics and parameter optimization of plastic-wood insert joint[J]. Journal of Beijing Forestry University,2019,41(11):137-145.

[13] 刘郅政 , 易欣玥 , 张驰 , 等 . 基于用户需求驱动的新中式座椅设计研究 [J]. 家具与室内装饰 ,2024,31(1):75-81.
LIU Z Z, YI X Y, ZHANG C, et al. Research on new Chinese style seat design based on user demand[J]. Furniture and Interior Design,2024,31(1):75-81.

[14] 陶毓博 , 李鹏 , 刘德喜 , 等 . 传统木雕花板的三维数字化重构与打印 [J]. 木材工业 ,2020,34(2):42-44.
TAO Y B, LI P, LIU D X, et al. Three-dimensional modeling and printing of Chinese traditional wood carving boards[J]. China Wood Industry,2020,34(2):42-44.

[15] 邱棋 , 丁凡 . 基于用户需求驱动下的可成长性儿童座椅设计研究 [J]. 家具与室内装饰 ,2025,32(3):30-38.
QIU Q, DING F. Research on the design of growable child seats driven by user needs[J]. Furniture and Interior Design,2025,32(3):30-38.

[16] 姚令华 , 徐曼 , 孙德林 , 等 . 基于实木弯曲技术的柚木家具设计及节点优化研究 [J]. 家具与室内装饰 ,2024,31(8):78-85.
YAO L H, XU M, SUN D L, et al. Research on teak furniture design and joint optimization based on solid wood bending technology[J]. Furniture and Interior Design,2024,31(8):78-85.

[17] 丁俊豪 , 刘果 . 浅析木结构节点连接类型及其性能 [J]. 四川水泥 ,2023(5):138-140.
DING J H, LIU G. A brief analysis of joint types and performance of timber structures[D]. Sichuan Cement,2023(5):138-140.

[本文编校：吴　彬]