

# 基于有限元仿真的缝纫机震动噪音控制方法研究与实践

程丽<sup>1</sup> 熊锋<sup>2</sup>

1. 艾图(浙江)智能缝制科技有限公司 浙江杭州 310000; 2. 杰克科技股份有限公司 浙江台州 318000

DOI:10.32629/ems.v8i5.20190

**[摘要]** 针对缝纫机运行过程中震动与噪音超标、影响操作舒适性及周边环境的问题,结合有限元仿真技术的精准分析优势,开展震动噪音控制方法的研究与实践。首先明确缝纫机震动噪音的主要产生源及传播路径,基于 HyperWorks、MSC. Patran/Nastran 等仿真工具,构建缝纫机关键部件及整机的有限元模型,通过模态分析、频响分析识别结构薄弱环节与共振风险点;随后结合拓扑优化、形貌优化及阻尼降噪技术,制定针对性的控制方案,优化部件结构刚度、抑制共振现象、削弱噪音传播;最后通过样机试制与试验测试,验证控制方案的有效性。研究表明,优化后的缝纫机整机震动加速度有效值降低 32.7%,噪音声压级降低 5.8dB(A),完全满足行业标准要求。该研究将有限元仿真与工程实践深度结合,避免了传统试错法的盲目性,为缝纫机震动噪音控制提供了精准、高效的技术路径,具有较强的工程应用价值。

**[关键词]** 缝纫机;有限元仿真;震动控制;噪音抑制;结构优化

## 引言

目前,传统的震动噪音控制方法多依赖经验设计与试错试验,存在针对性不强、控制效果不佳、研发周期长、成本高的弊端,难以满足高精度、低噪音的行业发展需求。有限元仿真技术作为一种高效的数值分析方法,能够精准模拟设备运行过程中的结构动力学特性,提前识别震动噪音产生的根源与传播规律,为控制方案的制定提供科学依据。基于此,本文以缝纫机震动噪音控制为核心目标,将有限元仿真技术应用与控制方法的研究与实践,通过建模、分析、优化、验证的闭环流程,提出切实可行的控制策略,解决缝纫机震动噪音超标问题,为相关设备的性能优化提供技术参考。

## 1 缝纫机震动噪音产生机理与传播路径分析

### 1.1 震动噪音产生机理

缝纫机的震动与噪音主要源于机械结构的动态响应,结合其工作原理,核心产生源可分为三类。一是传动机构震动,缝纫机的电机、皮带轮、齿轮、丝杠等传动部件在高速运转时,由于制造精度不足、质量分布不均、啮合间隙不合理等问题,会产生周期性的惯性力与冲击力,引发结构震动,进而辐射噪音,其中齿轮啮合不均与皮带张力不稳定是主要诱因。二是工作部件冲击震动,缝针高速上下运动与面料接触、梭床与缝线的摩擦撞击,会产生高频冲击载荷,导致针杆系统、梭芯机构等部件产生剧烈震动,形成冲击噪音,这类噪音频率较高、辨识度强,是影响操作舒适性的主要因素<sup>[1]</sup>。三是结构共振噪音,缝纫机壳体、底座等结构部件存在固有

频率,当传动机构、工作部件的激励频率与结构固有频率接近或重合时,会引发共振,导致震动幅度急剧增大,噪音被显著放大,其中油盘、底座等薄壁部件的共振现象最为突出。

### 1.2 震动噪音传播路径

缝纫机震动噪音的传播主要分为固体传播与空气传播两条路径,二者相互叠加,扩大了噪音影响范围。固体传播路径中,震动从产生源(电机、针杆、梭床等)通过机体框架、底座等结构部件传递,一方面导致设备自身震动加剧,另一方面通过底座与地面的接触,将震动传递至地面及周边建筑物,形成固体传声。空气传播路径中,震动部件推动周围空气产生压力波动,形成空气动力噪声,通过自由空间扩散,其中高频冲击噪音主要通过空气传播,而低频震动噪音则以固体传播为主。此外,缝纫机机壳的开口布局、内部空腔结构等会形成噪声共振腔,进一步放大空气传播噪音,加剧噪音污染<sup>[2]</sup>。

## 2 缝纫机有限元仿真模型构建与验证

### 2.1 有限元模型构建

结合某型工业缝纫机的结构参数,采用 SolidWorks 建立整机三维实体模型,重点保留电机、针杆系统、梭床、油盘、底座等关键部件,简化无关的细小结构(如螺栓孔、倒角),减少模型冗余,提高仿真效率。将三维模型导入 HyperWorks 软件进行网格划分,采用四面体单元与六面体单元混合划分方式,对针杆、齿轮等受力复杂、震动明显的部件采用细密网格,对底座、机壳等大面积结构采用相对稀疏的网格,兼

顾仿真精度与计算效率, 最终生成包含 128600 个单元、189200 个节点的有限元模型<sup>[3]</sup>。

根据缝纫机各部件的材料特性, 设置模型材料参数: 机壳、底座采用灰铸铁, 密度  $7200\text{kg/m}^3$ , 弹性模量  $1.9 \times 10^{11}\text{Pa}$ , 泊松比 0.28; 针杆采用合金钢, 密度  $7850\text{kg/m}^3$ , 弹性模量  $2.1 \times 10^{11}\text{Pa}$ , 泊松比 0.3; 油盘采用薄钢板, 密度  $7800\text{kg/m}^3$ , 弹性模量  $2.0 \times 10^{11}\text{Pa}$ , 泊松比 0.29。边界条件设置贴合实际工作状态, 底座底部采用固定约束, 模拟设备安装后的固定状态; 电机、传动部件施加相应的激励载荷, 其中电机激励按额定转速对应的惯性力设置, 针杆系统施加周期性冲击载荷, 载荷大小根据缝纫机实际工作参数确定。

## 2.2 模型验证

为确保有限元模型的准确性, 通过试验测试与仿真结果对比, 对模型进行验证。采用加速度传感器、声级计等设备, 对原机进行震动与噪音测试, 测试工况为缝纫机额定转速  $1500\text{r/min}$ , 分别测量针杆顶部、底座、机壳表面的震动加速度, 以及机身周围 1m 处的噪音声压级。将试验数据与有限元仿真得到的模态频率、震动加速度、噪音声压级进行对比, 结果显示, 仿真值与试验值的误差均控制在 5% 以内, 其中油盘前 5 阶固有频率的仿真误差为 3.2%, 针杆震动加速度仿真误差为 4.1%, 噪音声压级仿真误差为 3.8%, 验证了有限元模型的有效性, 可用于后续的震动噪音分析与控制方案优化<sup>[4]</sup>。

## 3 基于有限元仿真的震动噪音控制方法设计

### 3.1 结构优化设计

基于有限元模态分析结果, 识别出缝纫机结构的薄弱环节的共振风险点, 重点对油盘、底座、针杆系统进行拓扑优化与形貌优化。对于油盘, 采用 HyperWorks-Optistruct 进行拓扑优化, 以体积分数不超过原体积 10% 为约束条件, 以提高前 5 阶固有频率、降低表面振动速度为目标, 优化油盘的结构布局, 增加局部加强筋, 调整油盘厚度分布, 避免其与激励频率发生共振; 优化后油盘前 5 阶固有频率平均提高 18.6%, 表面振动速度降低 27.3%。

对于底座, 针对其刚度不足、易产生震动传递的问题, 采用形貌优化方法, 在底座内部增加交叉加强筋, 优化加强筋的布置密度与截面尺寸, 提高底座的结构刚度与阻尼特性, 减少震动传递; 优化后底座的刚度提高 23.8%, 震动传递效率降低 31.2%。对于针杆系统, 通过优化针杆的直径与长度, 调整针杆与导套的配合间隙, 减少针杆运动过程中的摩擦与

冲击, 降低高频震动; 同时在针杆尾部增加阻尼套, 吸收部分震动能量, 进一步抑制针杆的震动幅度<sup>[5]</sup>。

### 3.2 阻尼降噪优化

结合有限元频响分析结果, 明确缝纫机震动集中部位(针杆顶部、梭床周围、电机安装处)与噪音辐射较强的区域(机壳、油盘表面), 针对这些区域采用阻尼降噪技术, 通过增加阻尼、削弱振动能量传递, 进一步降低整机震动与噪音水平, 实现减震降噪的二次优化。阻尼降噪技术的核心是利用阻尼材料的耗能特性, 将结构振动的机械能转化为热能消散, 从而抑制振动传播与噪音辐射, 结合缝纫机的结构特点和工作工况, 选择高阻尼橡胶材料作为降噪材料, 该材料具有阻尼比高、柔韧性好、耐磨损、适配设备运行环境的优势。在机壳内壁、油盘表面均匀粘贴高阻尼橡胶材料, 阻尼材料厚度严格控制在 2-3mm, 既保证阻尼降噪效果, 又避免因材料过厚影响设备内部结构布局和部件运动。粘贴过程中, 确保阻尼材料与部件表面紧密贴合, 无空隙、无脱落, 充分发挥其耗能作用, 吸收结构振动能量, 抑制振动在机壳、油盘等部件中的传播, 同时削弱噪音的辐射强度。此外, 电机作为缝纫机的主要振动激励源之一, 其振动会通过底座传递至整机, 针对这一问题, 在电机与底座之间安装弹性联轴器与阻尼隔振垫, 弹性联轴器用于缓冲电机输出轴的振动, 减少振动向传动系统的传递, 阻尼隔振垫则用于隔离电机与底座之间的振动传递, 降低固体传声效率。

### 3.3 传动系统优化

针对传动机构运行过程中产生的震动噪音, 结合有限元仿真分析结果, 明确传动系统震动噪音的主要产生原因的薄弱环节, 重点从齿轮啮合、皮带传动、皮带轮振动三个方面对传动系统进行优化设计, 从源头削弱震动噪音的产生与传播。齿轮传动作为缝纫机传动系统的核心组成部分, 其啮合精度直接影响震动噪音水平, 原齿轮因制造精度不足、啮合间隙不合理, 在高速啮合过程中易产生冲击、摩擦, 进而引发振动并辐射噪音。通过提高齿轮的制造精度, 将齿轮齿面粗糙度控制在  $Ra0.8\mu\text{m}$  以下, 保证齿轮齿形、齿距的加工精度, 同时将齿轮啮合间隙调整至 0.02-0.03mm 的合理范围, 减少齿轮啮合过程中的冲击与摩擦, 降低啮合振动与噪音。皮带传动过程中, 原传动皮带强度不足、弹性模量过高, 易出现打滑、振动现象, 导致传动不稳定并产生噪音, 因此更换为高强度、低弹性模量的聚氨酯传动皮带, 该皮带具有韧

性好、耐磨性强、振动阻尼大的优势,同时通过专用张紧装置调整皮带张力,使皮带张力保持均匀稳定,避免皮带运行过程中的打滑与振动,减少皮带与皮带轮之间的摩擦噪音。此外,皮带轮在高速运转过程中,因质量分布不均、表面振动剧烈,会辐射一定的振动噪音,在皮带轮表面喷涂一层厚度为0.5-1mm的阻尼涂层,该涂层具有良好的耗能特性,能够吸收皮带轮的振动能量,抑制皮带轮的振动幅度,减少振动噪音的辐射。经优化后,传动机构的震动幅度降低29.7%,啮合噪音降低4.3dB(A),有效解决了传动系统震动噪音超标问题,进一步提升了缝纫机的运行稳定性。

#### 4 控制方法实践验证

##### 4.1 样机试制

根据上述优化设计方案,进行缝纫机样机试制。严格按照优化后的结构参数加工关键部件,包括优化后的油盘、底座、针杆系统,安装阻尼材料、弹性联轴器、阻尼隔振垫等降噪部件,确保各部件的装配精度,模拟实际工作状态完成样机组装,组装后对样机进行初步调试,确保设备运行稳定。

##### 4.2 试验测试与结果分析

采用与模型验证相同的测试设备与测试工况,对优化后的样机进行震动与噪音测试,测试项目包括针杆顶部、底座、机壳表面的震动加速度,以及机身周围1m处的噪音声压级,同时与原机测试结果进行对比。测试结果显示,优化后缝纫机针杆震动加速度有效值从原机的 $1.25\text{m/s}^2$ 降低至 $0.84\text{m/s}^2$ ,降低32.7%;底座震动加速度有效值从 $0.98\text{m/s}^2$ 降低至 $0.63\text{m/s}^2$ ,降低35.7%;机壳表面震动加速度有效值从 $0.76\text{m/s}^2$ 降低至 $0.49\text{m/s}^2$ ,降低35.5%;机身周围1m处噪音声压级从78.3dB(A)降低至72.5dB(A),降低5.8dB(A),完全满足GB/T 22764-2008《缝纫机 噪声限值》中工业缝纫机噪音声压级不超过75dB(A)的要求。

同时,对样机进行连续8小时的稳定性测试,测试过程中设备运行平稳,无明显震动与异常噪音,零部件无磨损、松动现象,表明优化后的控制方法不仅有效降低了震动与噪音,还提高了设备的运行稳定性与使用寿命,验证了控制方法的可行性与实用性。

#### 5 结论与展望

##### 5.1 结论

本文以缝纫机震动噪音控制为目标,将有限元仿真技术与工程实践相结合,开展了震动噪音控制方法的研究与实践,

得出以下结论:一是明确了缝纫机震动噪音的主要产生源为传动机构震动、工作部件冲击震动与结构共振噪音,传播路径主要为固体传播与空气传播,为控制方案的制定提供了理论依据;二是构建了缝纫机整机有限元模型,通过试验验证了模型的准确性,误差控制在5%以内,可用于震动噪音的精准分析;三是提出了结构优化、阻尼降噪、传动系统优化相结合的综合控制方法,通过有限元仿真优化确定了各环节的具体参数;四是通过样机试制与试验测试,验证了控制方法的有效性,优化后缝纫机震动与噪音均达到行业标准,运行稳定性显著提升。该研究解决了传统控制方法针对性不强、效果不佳的问题,为缝纫机震动噪音控制提供了精准、高效的技术路径。

##### 5.2 展望

本次研究主要针对某型工业缝纫机开展震动噪音控制研究,后续可进一步拓展研究范围,针对不同型号、不同工况的缝纫机,优化有限元仿真模型,提高模型的通用性;同时,可结合主动控制技术,研发智能减震降噪系统,实现震动噪音的实时监测与动态控制,进一步提升控制效果;此外,还可探索新型阻尼材料、轻量化结构在缝纫机震动噪音控制中的应用,在降低震动噪音的同时,实现设备的轻量化设计,推动缝纫机行业的绿色化、智能化发展。

#### [参考文献]

- [1]张红月, 郑鹏. 基于模糊PI全电动工业平缝缝纫机多电机同步控制方法研究[J]. 微电机, 2024, 57(11): 50-56.
  - [2]林毅, 许晓红, 叶志, 马颖. 自动缝纫机嵌入式控制系统现存问题及优化策略[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(03): 35-37.
  - [3]马颖, 叶志, 许晓红, 林毅. 自动缝纫机嵌入式控制系统的应用与实现路径分析[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(03): 62-64.
  - [4]许晓红, 林毅, 马颖, 叶志. 自动缝纫机嵌入式控制系统的质量保障与监控[J]. 造纸装备及材料, 2024, 53(02): 27-29.
  - [5]梅武, 张家友, 唐德姣. 一种缝纫机在线噪音和力矩的自动化测试系统[J]. 日用电器, 2022, (02): 92-96.
- 作者简介:程丽(1992-01),女,汉族,黑龙江,硕士,中级工程师,研究方向:AI与缝制设备。