

[制造·使用·改进]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.01.021

基于 OptiStruct 的塑料手轮模态分析与结构再设计

柯祥林, 郑吉, 祝书伟, 位延辉, 何明金

(杰克缝纫机股份有限公司, 浙江台州 318000)

摘要:针对某缝纫机存在塑料手轮噪声普遍高于铝质手轮的问题,课题组通过对塑料手轮进行有限元建模与模态分析,求解塑料手轮结构的各阶固有频率及与其对应的模态振型,分析其结构动态响应特性;利用 OptiStruct 求解器,基于提升固有频率的拓扑优化法,对该塑料手轮进行结构优化,结合手轮的实际工况与相关风扇叶片设计理论,实现对该塑料手轮的结构再设计;对改进后手轮进行相关噪声测试,噪声数值明显降低。研究表明模态分析与结构拓扑优化可以有效改善塑料手轮的结构动态响应特性,降低其工作噪声。

关键词:缝纫机手轮;有限元分析;模态分析;拓扑优化;降噪;SolidWorks 软件

中图分类号:TS941.56;TP274 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)01-0095-04

Modal Analysis and Structure Design of Plastic Hand-Wheel Based on OptiStruct Solve

KE Xianglin, ZHENG Ji, ZHU Shuwei, WEI Yanhui, HE Mingjin

(Jack Sewing Machine Co., Ltd., Taizhou, Zhejiang 318010, China)

Abstract: This paper analyzed and studied the problem that the noise of the plastic hand-wheel is generally higher than aluminum hand-wheel in the application of one kind sewing machine in plastic hand-wheel. Through the finite element modeling and modal analysis of the plastic hand-wheel, the natural frequencies and its corresponding modal shapes of the plastic hand-wheel structure were analyzed, then the dynamic response characteristics of the structure were analyzed. Using the OptiStruct solver, the structure of the plastic hand-wheel was optimized with the topology optimization method based on the increase of natural frequencies, and the redesign of plastic wheel structure was completed by combining the actual working conditions of the hand wheel and the related fan blade design theory. The relevant noise tests of the new designed hand-wheel were carried out and the noise was significantly reduced, which showed the modal analysis and structural topology optimization could effectively improve the dynamic response characteristics of the plastic hand-wheel and reduce the working noise.

Keywords: sewing machine hand-wheel; FEA (Finite Element Analysis); modal analysis; topology optimization; noise reduction; SolidWorks

近年来随着工业技术的发展,设备工作时的振动与噪声成为当下企业关注的焦点,减振降噪已经成为各行业研究热点^[1]。有限元分析技术在中国已经成为一门重要的工程技术,在汽车等行业的应用已经比较成熟^[2]。课题组计划将有限元分析技术应用到缝

纫机行业,对缝纫机零部件结构进行优化,提升其动态性能。

目前工业缝纫机^[3]的设计转速越来越高,对于电机散热的要求更高。在整个缝纫机工作过程中,手轮固定安装于缝纫机右侧电机轴端,随电机轴转动;手轮

收稿日期:2017-03-29;修回日期:2017-09-10

第一作者简介:柯祥林(1992),男,安徽天长人,工学学士,助理工程师,主要研究方向为 CAE 仿真分析与结构轻量化设计。E-mail:2297062361@qq.com

内置扇叶用于电机散热,同时起辅助缝纫机操作的作用。目前市场上手轮的材质主要有塑料和铝 2 种,由于铝材的成本较高,因此塑料手轮的应用越来越普遍。然而在手轮的应用过程中,存在塑料手轮比铝手轮噪声大的问题。这是由于塑料手轮的结构设计不合理导致刚度较低,在缝纫机的工作频率下产生了共振引起的。因此有必要对塑料手轮的结构刚度进行分析,并进行再设计。

利用模态分析^[4]求解结构的各阶固有频率与其对应的模态振型,即分析结构动态响应特性^[5]。在对缝纫机塑料手轮进行结构再设计时,需要对其进行模态分析,以便了解塑料手轮结构动态特性,从而判断塑料手轮是否会与电机轴输入的激振频率产生共振^[6]。

1 有限元建模与模态分析

课题组研究的塑料手轮结构包括塑料外壳、风扇叶片、停针位磁钢和用于连接电机轴的铝轴套。塑料外壳底部直径 85 mm,顶部直径 80 mm,高度为 30 mm,中间部位为镂空栅格用于进给空气;铝套内孔径 18 mm,高度 22 mm,呈 2 段式结构,分别用于连接塑料外壳与风扇;风扇圆周均布 12 片扇叶,每片扇叶厚度为 2 mm,圆周方向 180°对称分布有停针位磁钢座,中间部分平面与铝套配合限位,风扇与铝套连接部加胶水过盈配合。铝套与塑料外壳采用整体注塑工艺一体成型。各构件与整体几何模型如图 1 所示。

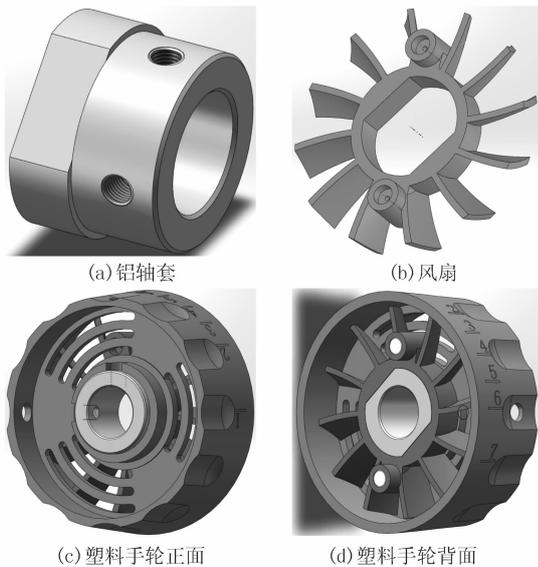


图 1 塑料手轮几何模型

Figure 1 Geometric model of plastic hand-wheel

1.1 有限元建模

在 SolidWorks 中建立塑料手轮的三维模型,在

HyperMesh 中进行分网处理^[7]。生成塑料手轮的有限元模型如图 2 所示,包括 10 766 个节点和 34 468 个单元。

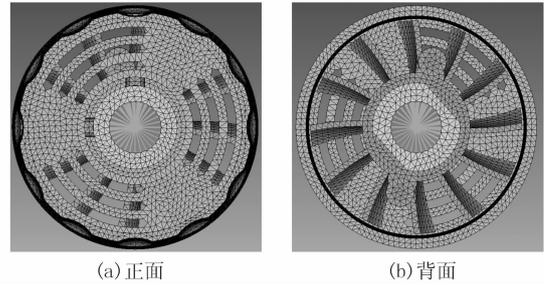


图 2 塑料手轮有限元模型

Figure 2 Finite element model of plastic hand-wheel

1.2 模态分析

1.2.1 包缝机实际工况分析

包缝机的工作转速为 5 000 ~ 7 000 r/min,转换为电机转轴频率为 83 ~ 117 Hz。结合扇叶数目考虑倍频关系,实际作用于手轮的激振频率约为电机频率的 12 倍,即 996 ~ 1 404 Hz。

1.2.2 边界条件定义

边界条件对塑料手轮的固有频率与模态振型的影响较大。根据实际工况,要对塑料手轮的结构动态特性做全面准确的分析则需采用约束模态分析。塑料手轮工作时,通过拧紧设置在铝轴套内的径向螺钉,将手轮固定在电机轴轴端。为了模拟塑料手轮的实际工况,达到准确预估塑料手轮动态特性的目的,需要对塑料手轮的模态分析施加正确的边界条件。设置边界条件:在铝套中间部位建立刚性元约束,约束铝轴套内孔的表面节点,对刚性单元约束 6 个自由度。

塑料手轮各部件材料:外壳与风扇材料为 ABS 塑料,铝套材料为 YL113 压铸铝合金,磁钢材料为 45 号钢。材料各项物理属性如下表 1 所示。

表 1 塑料手轮各部件材料属性

Table 1 Material properties of components of plastic hand-wheel

材料	弹性模量/GPa	泊松比	密度 × 10 ³ /(kg · m ⁻³)
ABS	2.00	0.394	1.02
YL113	69.00	0.330	2.70
45#	209.00	0.269	7.89

利用 OptiStruct 求解器计算求解,在后处理软件 HyperView 中观察各阶的模态固有频率与其对应的模态振型。提取塑料手轮前 6 阶的模态分析结果,其各

阶固有频率与其对应的振型描述如表 2 所示。

表 2 塑料手轮各阶固有频率与振型描述

Table 2 Natural frequencies and mode shapes of plastic hand-wheel

阶数	频率/Hz	振型描述
第 1 阶	632	外轮廓绕 Y 方向一阶旋转变形
第 2 阶	642	外轮廓绕 Z 方向一阶旋转变形
第 3 阶	896	中间栅格沿 X 方向一阶伸缩变形
第 4 阶	1 126	轮廓二阶弯曲变形
第 5 阶	1 206	轮廓二阶弯曲变形
第 6 阶	1 209	轮廓二阶弯曲变形

由表 2 可知,塑料手轮的 3 阶~6 阶的固有频率处于激振频率(996~1 404 Hz)的共振范围内,塑料手轮会因为结构共振产生较大的工作噪声。

第 3 阶~6 阶模态振型如图 3 所示。

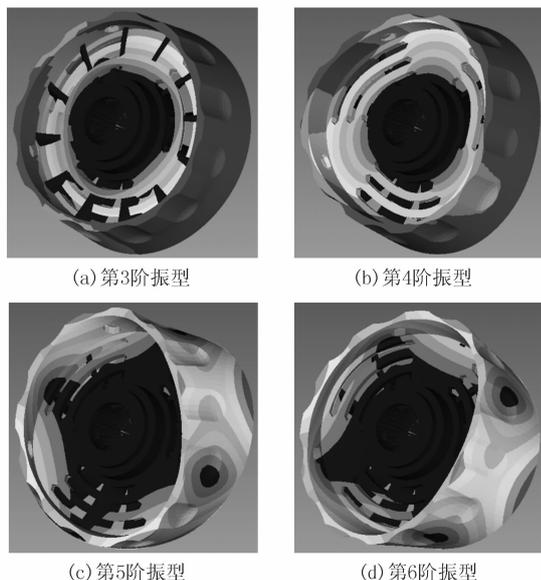


图 3 振型

Figure 3 Model shape

1.2.3 基于提升固有频率的手轮结构拓扑优化^[8-9]

以塑料手轮的一阶固有频率最大化为目标函数,对塑料手轮结构进行拓扑优化,优化结果云图如图 4 所示。由图 4 可知,塑料手轮结构中对固有频率值贡献最大的部分为手轮塑料外壳中间用于进给空气的栅格部。根据优化结果云图,针对性地对塑料手轮结构进行再设计。

2 塑料手轮结构优化

2.1 结构优化

结构优化时,需要改进塑料手轮外壳结构来减小振动变形。针对塑料手轮模态分析结果中各振型对塑

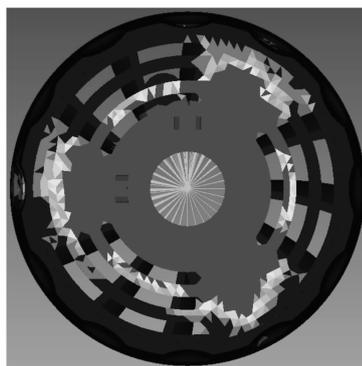


图 4 拓扑优化结果云图

Figure 4 Contour map of topological optimization result

料手轮结构和性能的影响,增强塑料手轮外轮廓中间栅格部的结构强度来减小结构共振对塑料手轮的性能影响。

现采取在变形较大的区域适当地增加塑料外壳刚度的方法来减小变形。结合拓扑优化结果,在栅格处布置加强筋可以有效增加塑料外壳的刚度,提升其固有频率。结合手轮的功用与制造工艺,采用将塑料手轮扇叶与外壳注塑成一体的方式来增加其结构刚度,提升其固有频率。当风扇叶片与外壳制成一体时,每片扇叶都是一根连接手轮外轮廓与中心的加强筋。根据叶片设计理论中奇数叶片不易产生共振的风扇设计经验,确定扇叶数目为 7 片,并确定扇叶的其余各项参数^[10]。具体设计方案手轮几何模型如图 5 所示。

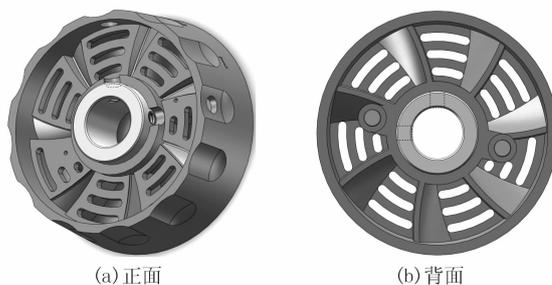


图 5 设计方案手轮结构

Figure 5 Structure of designed hand-wheel

2.2 模态分析

对改进后手轮进行模态分析,提取第 1~4 阶的固有频率与其对应模态振型如表 3 所示。第 1 阶固有频率值提升至 1 605 Hz,较原塑料手轮 632 Hz 提升了 937 Hz,提升幅度达到 148%,主要振型为外轮廓绕 Y 方向旋转,设计方案的一阶固有频率已经避开激振频率的范围 996~1 404 Hz。

表3 设计方案手轮各阶固有频率与振型描述

Table 3 Natural frequencies and mode shapes of designed hand-wheel

阶数	频率/Hz	振型描述
第1阶	1 605	外轮廓绕Y方向一阶旋转变形
第2阶	1 763	外轮廓二阶扭转变形
第3阶	1 817	外轮廓二阶扭转变形
第4阶	1 904	外轮廓二阶扭转变形

各阶振型如图6所示。

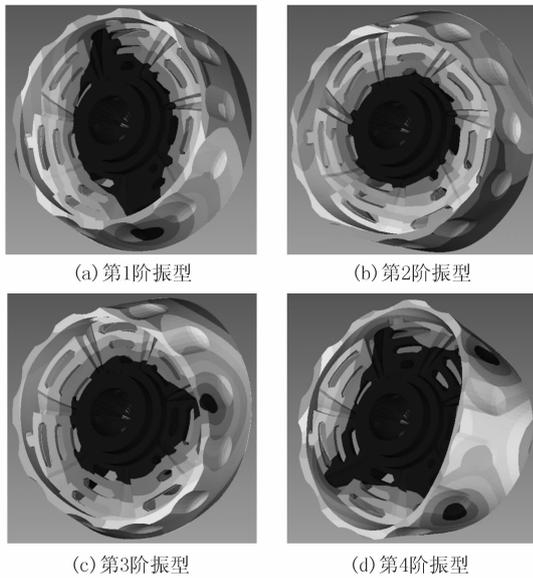


图6 再设计后的振型

Figure 6 Redesign model shape

3 噪声测试

试制设计方案手轮样件若干,对比改进前的塑料手轮进行机器跑合测试;分别测试空载(无缝线缝料且去除压脚板)与缝料(梗缝、2层布料及6层布料)2种工况下的噪声情况,测试转速4 900~7 000 r/min,以700 r/min的间隔递增。

实验条件:静音室,内部声强低于40 dB;专用包缝机台板,机器4脚的支撑橡胶垫置于台板之上,台板4脚与地接触位置皆用双层棉布包裹,减小台板对于手轮噪声的影响。

测试条件:

- 1) 测量前,包缝机5 500 r/min间歇空载运行15~20 min;
- 2) 测量点位于手轮正对面,垂直距离15 cm;

3) 测量转速为4 900~7 000 r/min,间隔700 r/min;

4) 所测机器共计4台(生产线上随机取得);

5) 每个转速测量3个噪声数据(分贝仪数据稳定时读取)。

经过噪声测试,设计方案塑料手轮分贝仪实测噪声值较原塑料手轮平均降低约1.5 dB,且在声音品质方面,设计方案手轮工作产生的声音较原塑料手轮更加沉闷,减少了原塑料手轮尖啸的杂音。

4 结语

课题组将有限元分析技术应用到缝纫机行业,对目前噪声较大的工业缝纫机塑料手轮进行模态分析与拓扑结构优化,并对塑料手轮进行结构再设计。通过对缝纫机塑料手轮的研究可以得出:塑料手轮本身结构对其工作噪声影响较大,且通过模态分析与结构拓扑优化可以有效地改善其动态响应特性。实际噪声测试结果显示,改进后塑料手轮的实测噪声值较改进前平均降低约1.5 dB。目前改进后塑料手轮已经在此机型上批量使用,噪声改善明显,市场反响较好。课题进一步研究方向:在保证结构刚度与强度的基础上,进行轻量化设计,减少材料成本,降低其高速工作时的转动惯量。

参考文献:

- [1] 邱卫明,王以超.机械产品的降噪和减震措施研究[J].中外缝制设备,2015(6):68-69.
- [2] 曾攀.有限元基础教程[M].北京:高等教育出版社,2009:7-70.
- [3] 邹慧君,雷杰,杜如虚,等.现代缝纫机原理与设计[M].北京:机械工业出版社,2015:1-29.
- [4] 傅志方,华宏星.模态分析理论与应用[M].上海:上海交通大学出版社,2000:20-98.
- [5] 李军锁.机械结构系统的动态优化设计方法研究[D].西安:西安电子科技大学,2006:7-22.
- [6] 殷青峰.发动机框架振动噪声分析与多目标拓扑优化[D].北京:清华大学,2014:14-28.
- [7] 李涛,左正兴,廖日东.结构仿真高精度有限元网格划分方法[J].机械工程学报,2009,45(6):304-307.
- [8] 苏胜伟.基于Optistruct拓扑优化的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008:49-53.
- [9] 荣见华,唐国金,杨振兴,等.一种三维结构拓扑优化设计方法[J].固体力学学报,2005,26(3):289-296.
- [10] 昌泽舟.轴流式通风机实用技术[M].北京:机械工业出版社,2005:63-85.