

DOI:10.13475/j.fzxb.20200704006

# 基于统计能量分析的簇绒地毯织机高频噪声抑制

张子煜, 徐洋, 盛晓伟, 解国升

(东华大学机械工程学院, 上海 201620)

**摘要** 为有效抑制簇绒地毯织机高频噪声,提出了基于统计能量分析(SEA)的簇绒地毯织机高频噪声降噪方法,并运用三聚氰胺多孔吸声材料实现了高频噪声的抑制。首先建立了包含 13 个结构子系统和 10 个声腔的簇绒地毯织机高频噪声 SEA 模型,随后采用理论计算方法确定了各子系统的模态密度、内损耗因子以及耦合损耗因子。实验测量了簇绒地毯织机工作时振动加速度信号从而获取 SEA 模型高频噪声声压级,并通过与簇绒地毯织机工作时实际声压级情况对比验证了 SEA 模型的有效性。最后在簇绒地毯织机表面粘附了不同厚度的三聚氰胺多孔吸声泡沫板实现降噪。结果表明:该方法能够满足工程上对簇绒地毯织机高频噪声抑制的要求,且噪声频率和三聚氰胺多孔吸声材料的厚度均对结果有影响。

**关键词** 簇绒地毯织机; 噪声抑制; 统计能量分析; 被动降噪; 多孔吸声材料

中图分类号:TS 103.1;TB 535.1 文献标志码:A

## Suppression of high frequency noise of tufted carpet loom based on statistical energy analysis

ZHANG Ziyu, XU Yang, SHENG Xiaowei, XIE Guosheng

(College of Mechanical Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China)

**Abstract** In order to effectively suppress the high frequency noise of tufted carpet loom, a statistical energy analysis (SEA) was proposed, where a melamine porous sound absorption material was used to suppress high frequency noise. In this research, the SEA model of high frequency noise of tufted carpet loom with 13 structural subsystems and 10 acoustic cavities was established, and then the modal density, internal loss factor and coupling loss factor of each subsystem were determined by using a theoretical calculation method. The vibration acceleration signal of tufted carpet loom was measured to obtain the high frequency noise sound pressure level of SEA model. The validity of SEA model was verified by comparing with the actual sound pressure level of tufted carpet loom, before the surface of tufted carpet loom was adhered with different thickness of melamine porous sound absorbing foam board to achieve noise reduction. The result shows that the method can meet the engineering requirements for high frequency noise suppression, and the noise frequency and the thickness of the melamine porous sound-absorbing material have influence on the results.

**Keywords** tufted carpet loom; noise suppression; statistical energy analysis; passive noise reduction; porous sound-absorbing material

纺织行业修订的 FZ/T 94056—2010《数字化簇绒地毯织机》标准中规定,簇绒地毯织机的工作噪声声压级限值为 75 dB。但是,现阶段我国簇绒地毯织机车间的噪声基本都在标准限值以上。纺织工

人长期暴露在这种极其强烈的噪声环境中,听觉器官会发生急剧外伤,引起鼓膜破裂出血,甚至可能完全失去听力,出现暴震性耳聋。高频噪声更是会引起血管紧张度增加以及血压升高<sup>[1]</sup>,因此,对簇绒

收稿日期:2020-07-06 修回日期:2020-12-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51675094)

第一作者:张子煜(1996—),女,硕士生。主要研究方向为簇绒地毯织机高频噪声抑制。

通信作者:徐洋(1977—),女,教授,博士。主要研究方向为复杂系统建模及参数识别。E-mail:xuyang@dhu.edu.cn。

地毯织机的高频噪声进行抑制是非常有必要的。

目前,国内外关于噪声的研究主要采用 3 种方法:有限元方法(FEM)、边界元方法(BEM)以及统计能量分析法(SEA)。由于系统模态密度等因素的制约,前二者应用范围被限制在 400 Hz 以内的低频段,统计能量分析法则可以用于解决复杂系统的宽带高频动力学问题的有效方法<sup>[2-3]</sup>。在国内,SEA 广泛应用于车辆工程、船舶工程等领域。陈书明等<sup>[4]</sup>提出基于 SEA 原理分析预测车外噪声的新方法,并验证了该方法的有效性。胡凡等<sup>[5]</sup>利用 SEA 方法对船舶约束阻尼结构和自由阻尼结构的隔声性能进行分析,得到了不同约束条件及不同敷设方式对隔声量的影响规律。除此之外,SEA 还应用在航空航天等领域。陈曦等<sup>[6]</sup>以卫星天线为例,建立了天线的 SEA 模型,研究了统计能量参数对计算结果的影响,并验证了该声振响应方法用于天线结构噪声振响应预示的有效性。

迄今为止,尚未发现国内外应用 SEA 方法对高端纺织机械设备噪声进行建模和分析的研究成果。为此,本文提出了用 SEA 对簇绒地毯织机高频噪声抑制的思路,建立了簇绒地毯织机的统计能量分析模型,获得声压级信号,并有针对性地采用多孔吸声材料对簇绒地毯织机高频噪声进行抑制,取得了较好的效果,为簇绒地毯织机的高频噪声控制提供了新的途径。

## 1 统计能量分析的基本原理

统计能量分析法(SEA)的基本思想是将一个完整的复杂系统分割为多个耦合子系统,利用振动能量描述各个子系统的特性;利用系统参数建立不同子系统之间的能量传递关系,推导出系统能量平衡方程;利用系统的能量平衡方程计算获得各个子系统所储存的能量,进而获得各个子系统的振动声辐射及振动响应<sup>[7]</sup>。对于具有  $N$  个子系统的复杂系统,各个子系统间的能量传递关系如图 1 所示。

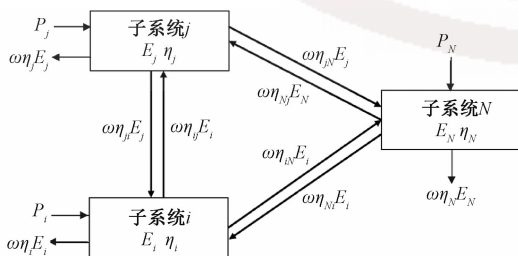


图 1 子系统间的能量传递示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy transfer between subsystems

假设簇绒地毯织机的 SEA 模型可以划分成  $N$  个子系统,则某个子系统  $i$  的内损耗功率  $P_{id}$  为

$$P_{id} = \omega \eta_i E_i \quad (1)$$

式中: $\omega$  为 1/3 倍频带中心圆频率,rad/s;  $\eta_i$  为簇绒地毯织机子系统  $i$  的内损耗因子;  $E_i$  为簇绒地毯织机子系统  $i$  贮存的能量,J。

子系统  $i$  与子系统  $j$  间功率流  $P_{ij}$  传递关系为

$$P_{ij} = \omega \eta_{ij} E_i - \omega \eta_{ji} E_j \quad (2)$$

$$n_i \eta_{ij} = n_j \eta_{ji} \quad (3)$$

式中: $\eta_{ij}$ 、 $\eta_{ji}$  均为簇绒地毯织机子系统  $i$  和子系统  $j$  间的耦合损耗因子;  $n_i$ 、 $n_j$  分别为子系统  $i$  和子系统  $j$  的模态密度,Hz<sup>-1</sup>;  $E_j$  为子系统  $j$  贮存的能量,J。

当外界对子系统  $i$  施加激励时,其输入功率  $P_{i,in}$  可表示为

$$P_{i,in} = \omega \eta_i E_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N (\omega \eta_{ij} E_i - \omega \eta_{ji} E_j) = \omega \sum_{k=1}^N \eta_{ik} E_i - \omega \sum_{j=1, j \neq i}^N \eta_{ji} E_j (i = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中, $\eta_{ik}$  为簇绒地毯织机子系统  $i$  和子系统  $k$  间的耦合损耗因子。

由此,在所研究频域范围内簇绒地毯织机子系统  $i$  的声压级为

$$L_p = 10 \lg \frac{\rho c^2 E_i p_0^{-1}}{V} \quad (5)$$

式中: $\rho$  为空气密度,kg/m<sup>3</sup>;  $c$  为声速,m/s;  $p_0$  为参考声压,取  $p_0 = 2 \times 10^{-5}$  Pa;  $V$  为声学空间的容积,m<sup>3</sup>。

簇绒地毯织机高频噪声抑制的具体流程如图 2 所示。首先对簇绒地毯织机建立初步 SEA 模型;随后对其添加簇绒地毯织机实际参数,包括模态密度、内损耗因子、耦合损耗因子以及外部激励,使 SEA 模型与实际簇绒地毯织机更加吻合。在验证了 SEA 模型的有效性后,进一步对高频噪声进行抑制研究。

## 2 簇绒地毯织机 SEA 模型的建立

基于统计能量分析原理的基本假设以及上述基本原理,以 GB/T 7111.6—2002《纺织机械噪声测试规范 第 6 部分:织造机械》中的要求“织机噪声测点须距机器表面 1 m,距地面或工作台高度 1.6 m。”为依据,根据簇绒地毯织机原型以及统计能量分析子系统划分与建模的简化原则<sup>[8]</sup>,建立如图 3 所示的簇绒地毯织机的 SEA 模型。

簇绒地毯织机结构 SEA 模型共包含有 56 个节点,13 个结构子系统以及 10 个声腔,其中包含距簇绒地毯织机 1 m 范围内的工人工作区域声腔建模,

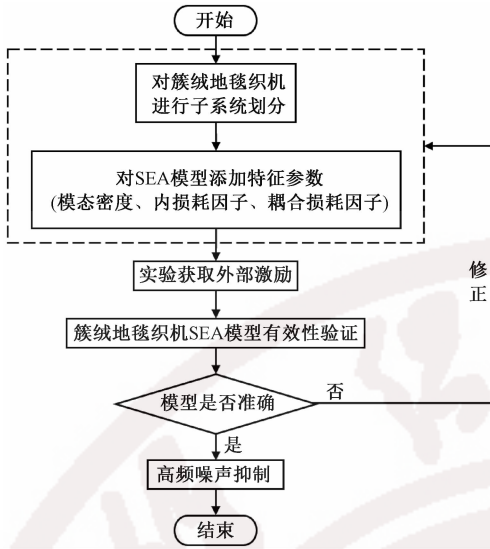


图 2 噪声抑制流程图

Fig. 2 Flow chart of noise suppression

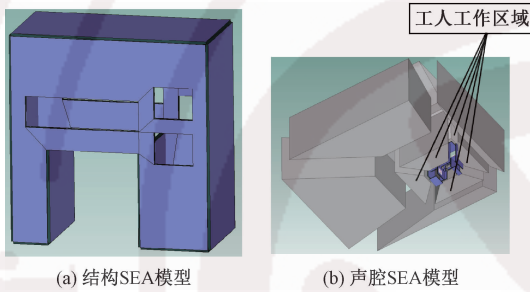


图 3 簇绒地毯织机 SEA 模型

Fig. 3 SEA model of tufted carpet loom.

(a) Structural SEA model; (b) Acoustic cavity SEA model

以及房间内部其余区域声腔建模。

由于簇绒地毯织机内部结构复杂,主要由提花部件、平圈送纱部件、耦连轴系部件、主轴曲柄机构和箱体等部分组成。织机运转过程中,存在高速回转、往复、多运动耦合的复杂状况,噪声源不止一个,如电动机、电动机主轴及其从动机构产生的振动噪声和针排穿刺基布产生的摩擦噪声等。运用统计能量分析法计算获得的声腔声压级则是簇绒地毯织机各处噪声源所产生的噪声之和。图 3(b)所示即为运用统计能量分析法建立的声腔 SEA 模型。

### 3 簇绒地毯织机 SEA 模型参数计算

为了能够使模型各子系统的特性贴近实际簇绒地毯织机系统的特性,需要对 SEA 模型各子系统的模态密度、内损耗因子以及各子系统间的耦合损耗因子 3 个参数进行计算,并将这些参数代入模型中。

#### 3.1 模态密度

SEA 模型子系统的模态密度是指该子系统在

某一频率范围内单位频段内的模态数。它代表着在某一频段内子系统的模态密集程度,也代表着振动系统贮存能量的能力。能量流动方向为低模态密度子系统到高模态密度子系统。

簇绒地毯织机结构 SEA 模型均由平板件建立完成,计算其模态密度可直接以规则板件处理。二维平板的模态密度  $n(f)$  为

$$n(f) = \frac{A_p}{2RC_l} \quad (6)$$

$$C_l = \sqrt{E/\rho(1-\mu^2)} \quad (7)$$

式中:  $A_p$  为平板面积,  $m^2$ ;  $R$  为截面回转半径,  $R = h/2\sqrt{3}$  ( $h$  为板厚),  $m$ ;  $C_l$  为纵波速,  $m/s$ ;  $E$  为平板材料的弹性模量,  $MPa$ ;  $\rho$  为材料密度,  $kg/m^3$ ;  $\mu$  为泊松比。

簇绒地毯织机各平板结构子系统的模态密度计算结果如表 1 所示。

表 1 平板结构子系统模态密度

Tab. 1 Modal density of plate structure subsystem

编号	子系统	结构性质	简化结构	模态密度/Hz <sup>-1</sup>
1	顶板	方形平板	平板	0.002 33
2	底板 1	方形平板	平板	0.000 41
3	底板 2	方形平板	平板	0.000 81
4	内侧板 1	方形平板	平板	0.001 12
5	内侧板 2	方形平板	平板	0.001 12
6	左侧板	方形平板	平板	0.002 46
7	右侧板	方形平板	平板	0.002 46
8	正面板 1	不规则形状板	平板	0.002 41
9	正面板 2	不规则形状板	平板	0.000 23
10	正面板 3	不规则形状板	平板	0.000 32
11	背面板 1	不规则形状板	平板	0.002 71
12	背面板 2	不规则形状板	平板	0.000 27
13	背面板 3	不规则形状板	平板	0.000 11

#### 3.2 内损耗因子

内损耗因子代表着子系统在单位时间、单位频率内部损耗的能量与平均储存能量的比值。能量流动方向为高内损耗因子系统向低内损耗因子系统。

子系统  $i$  的内损耗因子  $\eta_i$  主要是由结构损耗因子、振动声辐射阻尼形成的损耗因子以及边界连接阻尼构成的损耗因子构成,即:

$$\eta_i = \eta_{is} + \eta_{ir} + \eta_{ib} \quad (8)$$

式中:  $\eta_{is}$  为结构子系统本身材料内摩擦所构成的结构损耗因子;  $\eta_{ir}$  为结构子系统振动声辐射阻尼形成的损耗因子;  $\eta_{ib}$  为结构子系统边界连接阻尼构成的损耗因子。

一般地,通过查阅材料手册的方式可以获得结构损耗因子  $\eta_{is}$ 。由于簇绒地毯织机各结构子系统的组成成分均为铸铁,因此可查铸铁的结构损耗因子为  $1.0 \times 10^{-3}$ 。

声辐射阻尼形成的损耗因子  $\eta_{ir}$  可表示为

$$\eta_{ir} = \frac{\rho_0 c \sigma_{sa}}{\omega \rho_s} \quad (9)$$

式中： $\rho_0$  为空气密度， $1.29 \text{ kg/m}^3$ ； $\rho_s$  为表面质量密度， $\text{kg/m}^2$ ； $\sigma_{sa}$  为结构辐射比，且有

$$\sigma_{sa} = \begin{cases} \left[ \frac{\lambda_c P_r}{\pi A_p} \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{f}{f_c}\right)^{\frac{1}{2}} \right] \beta & f < f_c \\ \left(1 - \frac{f_c}{f}\right)^{-\frac{1}{2}} & f > f_c \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\lambda_c$  为波长， $\text{m}$ ； $P_r$  为簇绒地毯织机各子系统周长， $\text{m}$ ； $\beta$  为簇绒地毯织机各边界条件系数，其中简支时  $\beta=1$ ，固支时  $\beta=2$ ，一般边界条件  $\beta=\sqrt{2}$ ； $f$  为频率， $\text{Hz}$ ； $f_c$  为临界频率， $\text{Hz}$ 。且有

$$f_c = 0.556 \frac{c^2}{h} \sqrt{\frac{\rho}{E}} \quad (11)$$

式中， $h$  为板厚， $\text{m}$ 。

对于规则板件而言，边界连接阻尼对其影响较小，故边界连接阻尼所构成的损耗因子在内损耗因子的计算中可忽略。

基于上述分析可见，簇绒地毯织机结构子系统的内损耗因子均可通过理论计算的方法获得。其中，正面板与背面板的内损耗因子如图 4 所示。

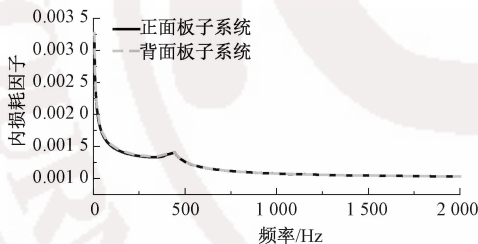


图 4 簇绒地毯织机板子系统内损耗因子

Fig. 4 Loss factor in board subsystem of tufted carpet loom

### 3.3 耦合损耗因子

耦合损耗因子代表着 2 个子系统间的耦合程度，也代表着子系统间能量流动过程中的损耗特性。能量流动方向为直接激励子系统到被间接激励的子系统。

互相耦合的子系统之间的耦合损耗因子为

$$n_{sc} = \frac{\rho_0 c \sigma}{\omega \rho_s} \quad (12)$$

式中， $\sigma$  为辐射比，且

$$\sigma = \begin{cases} \left[ \frac{\lambda_c P_r}{\pi A_p} \frac{2}{\pi} \arcsin\left(\frac{f}{f_c}\right)^{\frac{1}{2}} \right] \beta & f < f_c \\ \left(1 - \frac{f_c}{f}\right)^{-\frac{1}{2}} & f > f_c \end{cases} \quad (13)$$

根据上述分析可计算获得簇绒地毯织机结构子系统的耦合损耗因子，如图 5 所示。

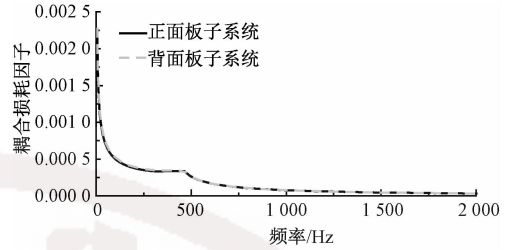


图 5 簇绒地毯织机板子系统耦合损耗因子

Fig. 5 Coupling loss factor in board subsystem of tufted carpet loom

## 4 簇绒地毯织机 SEA 模型有效性验证

本文测试对象为 DHU-2 型簇绒地毯织机，主轴转速为  $350 \text{ r/min}$ 。采用 PCB® 公司的加速度传感器，并结合 DH5922 动态信号测试分析仪和 DHDAS 动态信号采集分析系统采集振动加速度信号。采样频率设置为  $10 \text{ kHz}$ 。簇绒地毯织机振动加速度信号测量实验现场布置如图 6 所示。

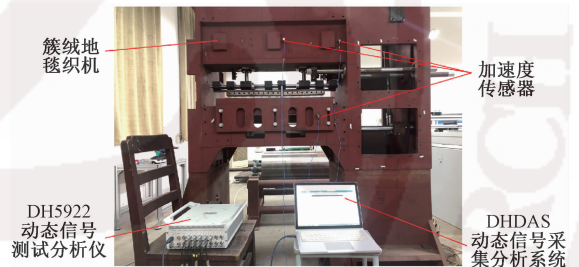


图 6 簇绒地毯织机实验现场图

Fig. 6 Test site of tufted carpet loom

依据实验测点布置的基本原则<sup>[9]</sup>，将簇绒地毯织机的正面板与背面板分别划分为 18 个子单元，左侧面板及右侧面板分别划分为 9 个子单元，顶板划分为 6 个子单元。而后将加速度传感器依次粘附于各个子单元采集振动加速度信号。共采集 5 组振动加速度数据，并对 5 组数据的平均值进行分析，得到各个面板的振动加速度激励谱。其中簇绒地毯织机正面板与背面板的振动加速度激励谱分别如图 7 所示。

将上述通过实验及计算得到的模态密度、内损耗因子、耦合损耗因子以及各个面板的振动加速度激励谱施加到已建立的簇绒地毯织机 SEA 模型中，并输入组成材料的密度、弹性模量、泊松比等参数后经统计能量分析计算，得到簇绒地毯织机 SEA 模型中各声腔的声压级情况。

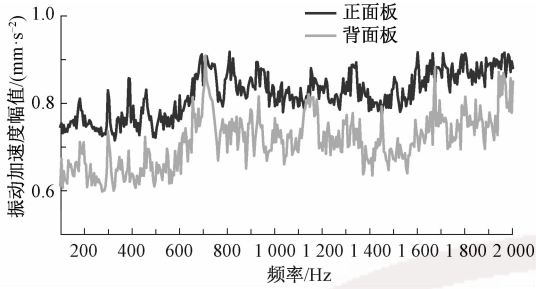


图 7 振动加速度激励谱

Fig. 7 Vibration acceleration excitation spectrum

采用 16 通道的 BK4961 传声器阵列, 结合 DH5922 动态信号测试分析仪和 DHDAS 动态信号采集分析系统测量实际高频噪声声压级情况。以工人工作区域为例, 图 8 示出簇绒地毯织机 SEA 模型声压级实验值与仿真值对比。可以看出, SEA 模型仿真结果与实验测量结果较为吻合, 准确度高。在 500~2 000 Hz 的高频范围内, 仿真误差小于 4 dB, 其中二者在 500 Hz 时相差最大, 最大值为 3.9 dB。在 315 Hz 之后的高频段内, 实验值与仿真值更加吻合, 即统计能量分析法在高频段噪声处更精确。由此验证了簇绒地毯织机 SEA 模型的有效性以及准确性。

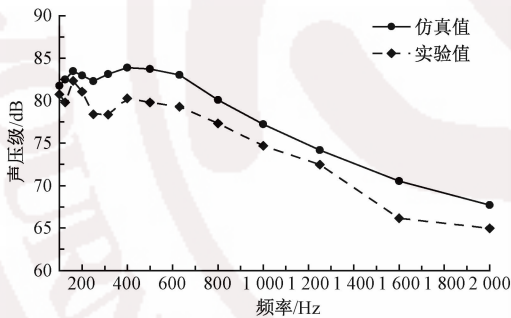


图 8 工人工作区域声场实验与仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of sound field experiment and simulation results in working area of workers

### 5 簇绒地毯织机高频噪声抑制

簇绒地毯织机工作时其噪声声压级超过了规定的 75 dB(见图 8), 充分显示了噪声抑制的必要性。为实现簇绒地毯织机工作噪声的抑制, 本文采用三聚氰胺泡沫吸声材料并结合已验证准确性的 SEA 模型对簇绒地毯织机高频噪声进行研究。三聚氰胺泡沫吸声材料具有高开孔率及均匀的孔隙结构, 使入射波能够方便有效地进入材料深层, 因此具有良好的吸声性能<sup>[10]</sup>。

为了验证三聚氰胺多孔吸声材料对簇绒地毯织机高频噪声抑制的有效性, 选取适当厚度的三聚氰

胺多孔吸声泡沫板进行仿真与实验的结果对比, 验证该材料的吸声有效性。结合经济性以及实验室空间适用性, 以厚度等于 40 和 60 mm 为例, 进行上述验证。

将 2 种不同厚度的三聚氰胺多孔吸声泡沫板分别粘附在簇绒地毯织机 SEA 模型表面, 经仿真计算获得噪声抑制仿真结果。同时搭建如图 9 所示的实验平台, 实验测量降噪效果。



图 9 降噪实验平台

Fig. 9 Noise reduction experiment platform

对簇绒地毯织机表面分别粘附与仿真计算相同的三聚氰胺多孔吸声泡沫板, 再次采用 16 通道的 BK4961 传声器阵列, 结合 DH5922 动态信号测试分析仪和 DHDAS 动态信号采集分析系统采集降噪后的声信号。图 10 示出施加三聚氰胺多孔吸声材料前后实验与仿真的噪声情况对比。

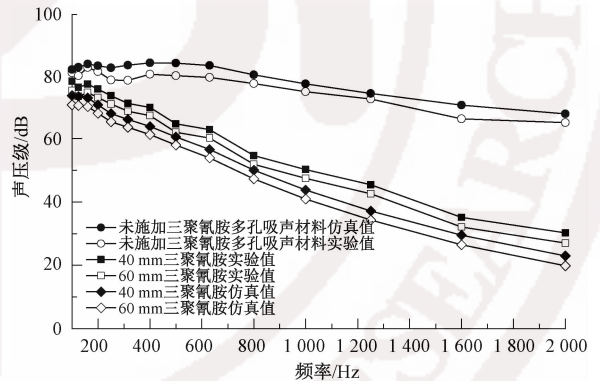


图 10 簇绒地毯织机噪声抑制情况

Fig. 10 Noise suppression of tufted carpet loom

从图 10 可以看出, 经三聚氰胺泡沫吸声材料作用后, 理论降噪可达 15 dB 左右, 且高频噪声降噪效果更为显著。同时, 三聚氰胺泡沫吸声板材越厚, 降噪效果越为明显, 由此充分显示了三聚氰胺多孔吸声材料对簇绒地毯织机噪声抑制的有效性。在 500~2 000 Hz 高频范围内, 仿真降噪效果比实验降噪效果更明显, 仿真误差在 9 dB 以内, 其中在 1 250 Hz 时相差最大, 最大值分别为 8.26 以及 7.93 dB。

### 6 结 论

本文基于统计能量分析法, 结合簇绒地毯织机

结构特点,对织机在正常工作状态下的高频段声场数据进行抑制,得出如下结论。

1) 运用统计能量分析法获取簇绒地毯织机高频噪声声压级的方法,能有效表达出簇绒地毯织机的高频噪声。

2) 基于统计能量分析法的簇绒地毯织机 SEA 模型的仿真值与实验值误差在高频段内相差均小于 4 dB。该模型能有效地计算出高频噪声声压级情况。

3) 基于三聚氰胺多孔吸声材料的簇绒地毯织机高频噪声抑制方法的理论降噪可达 15 dB 左右,且噪声频率及材料厚度均对吸声效果有一定影响。

#### FZXB

#### 参考文献:

- [ 1 ] 唱斗,梁武,王生. 高频稳态噪声对心血管系统影响的调查[J]. 中国职业医学, 2003(2): 25-27.  
CHANG Dou, LIANG Wu, WANG Sheng. Investigation on the influence of high frequency steady state noise on cardiovascular system [ J ]. Chinese Occupational Medicine, 2003 ( 2 ): 25-27.
- [ 2 ] 陈书明. 轿车中高频噪声预测与控制方法研究[D]. 长春:吉林大学, 2011: 2-11.  
CHEN Shuming. Research on prediction and control method of car medium and high frequency noise [ D ]. Changchun: Jilin University, 2011: 2-11
- [ 3 ] 朱卫红,邹元杰,韩增尧. 混合有限元-统计能量分析方法及其航天应用[M]. 北京:中国宇航出版社, 2017: 1-12.  
ZHU Weihong, ZOU Yuanjie, HAN Zengyao. Hybrid finite element statistical energy analysis method and its aerospace application [ M ]. Beijing: China Aerospace Press, 2017: 1-12.
- [ 4 ] 陈书明,王登峰,刘波,等. 汽车车外噪声预测的统计能量分析方法[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 88-94.  
CHEN Shuming, WANG Dengfeng, LIU Bo, et al. Statistical energy analysis method for prediction of vehicle exterior noise [ J ]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46 ( 10 ): 88-94.
- [ 5 ] 胡凡,车驰东,李正阳. 基于 VA One 船舶舱室动力设备空气噪声控制分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(12): 1-5.  
HU fan, CHE Chidong, LI Zhengyang. Analysis of air noise control of power equipment in ship cabin based on VA One [ J ]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15 ( 12 ): 1-5.
- [ 6 ] 陈曦,刘刚,谢伟华,等. 统计能量分析方法用于卫星天线结构声振响应预示的有效性研究[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(4): 335-339.  
CHEN Xi, LIU Gang, XIE Weihua, et al. The effectiveness of statistical energy analysis method in predicting the acoustic and vibration response of satellite antenna structure [ J ]. Spacecraft Environmental Engineering, 2019, 36 ( 4 ): 335-339.
- [ 7 ] COURTNEY B B. An introduction to statistical energy analysis [ J ]. Journal of the Acoustical Society of America, 1997, 101(4):1779-1789.
- [ 8 ] WANG Dengfeng, CHEN Shuming, QU Wei, et al. Car interior noise prediction and experimentation using statistical energy analysis[J]. Journal of Jilin University ( Engineering and Technology Edition ), 2009, 39(S1): 68-73.
- [ 9 ] 徐洋,李昂昂,盛晓伟,等. 基于近场声全息的纺织装备高速运动机构噪声源识别[J]. 纺织学报, 2019, 40(4): 129-134.  
XU Yang, LI Ang'ang, SHENG Xiaowei, et al. Noise source identification of high speed motion mechanism of Textile equipment based on near field acoustic holography [ J ]. Journal of Textile Research, 2019, 40(4): 129-134.
- [ 10 ] 苑改红,王完成,侯培中,等. 三聚氰胺泡沫塑料的吸声性能[J]. 机械工程材料, 2007(9): 55-57.  
YUAN Gaihong, WANG Xiancheng, HOU Peizhong, et al. Sound absorption properties of melamine foam plastics [ J ]. Mechanical Engineering Materials, 2007 ( 9 ): 55-57.