

# 小型食品粉碎机的双层隔振系统优化设计

## Optimal design on double isolation system of a small pulverizer

朱秀琳 李成清 翁秀奇

ZHU Xiu-lin LI Cheng-qing WENG Xiu-qi

(南京工业职业技术学院, 江苏 南京 210023)

(Nanjing Institute of Industry Technology, Nanjing, Jiangsu 210023, China)

**摘要:**基于 MATLAB 的图形与计算功能,分析双层隔振系统的各项动态参数对隔振性能的影响,在此基础上利用单纯形优化算法对某小型食品粉碎机的双层隔振系统的参数进行优化计算。然后根据优化结果重新选取隔振垫,经测试噪声指标降低了 12.1 dB,解决了该机器工作噪声超标问题。

**关键词:**食品粉碎机;隔振系统;优化设计;MATLAB

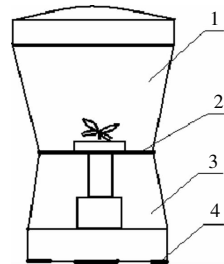
**Abstract:** The simplex optimal design of the parameters of a small pulverizer's double isolation system has been improved, based on the analysis of the effects of dynamic parameters of double isolation system on isolation performance, which was built upon the graphical and quantitative analysis in MATLAB. The noise has been reduced by 12.1 dB after change vibration isolators, so that the noise of the pulverizer has been cut to the permissible range.

**Keywords:** pulverizer; double isolation system; optimal design; MATLAB

小型食品粉碎机目前在中国使用非常普遍,给人们生活带来诸多便利。尽管生产企业一直致力于产品功能完善,但是其振动与噪声问题一直得到有根本解决。目前未发现有针对此类产品噪声问题的研究见诸于文献。

本设计以某款小型食品粉碎机(图 1)为研究对象,该机最高工作转速为 30 000 r/min,正常工作时噪声达到 66 dB,超过 GB 3096—2008《声环境质量标准》规定的“居民住宅小区区域环境噪声平均等效声级须达到环境质量 1 类标准,即昼间 55 dB,夜间 45 dB”。

该机由杯体 1(盛食物、刀具由刀杆与机身内连接)、机身 3(内装有电机、轴承、电路板等)组成。粉碎作业时,在电机高速旋转下,电机、轴承、刀片、机身、杯体及被粉碎食品会出现振动,并产生噪声。杯体与机身缝合处以及机身底部均有



1. 杯体 2. 橡胶隔振垫 3. 机身 4. 橡胶隔振垫

图 1 小型食品粉碎机

Figure 1 A small pulverizer

4 只沿圆周均布的橡胶隔振垫,共同组成双层隔振系统。本设计拟基于 MATLAB 编程与图形功能,对隔振系统进行优化。

### 1 数学模型的建立

相对来说,杯体、机身比隔振垫的刚度大很多,故将杯体、机身简化作刚体,质量分别为  $m_1$ 、 $m_2$ ,因塑料把手中空质量较轻忽略,故  $m_1$ 、 $m_2$  的质心均在其圆柱中心线上。第 1 层 3 只隔振垫  $x$  向总刚度为  $K_1$ 、粘性阻尼系数为  $C_1$ ,第 2 层 4 只隔振垫  $x$  向总刚度为  $K_2$ ,粘性阻尼系数为  $C_2$ 。激励力  $F(t)$  可以看做简谐力,  $F(t) = F_0 \sin \omega t$ ,传入基础的力为  $F_T(t)$ ,  $x_1$ 、 $x_2$  为绝对位移,其数学模型见图 2。

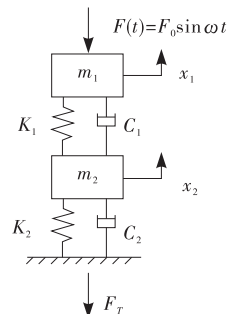


图 2 数学模型

Figure 2 Mathematical model

**基金项目:**江苏省高校青年骨干教师出国研修资助项目(编号:YK11-01-04)

**作者简介:**朱秀琳(1966—),女,南京工业职业技术学院副教授,硕士。E-mail:zhuxl@niit.edu.cn

**收稿日期:**2015-05-01

根据牛顿第二定律,系统运动微分方程为<sup>[1]</sup>:

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & -C_1 \\ -C_1 & C_1 + C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & -K_1 \\ -K_1 & K_1 + K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{(t)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

令  $F_T(t) = H(\omega)F(t)$ ,解微分方程(1)可以得到系统频响函数<sup>[1]</sup>:

$$H(\omega) = [K_1 K_2 - \omega^2 C_1 C_2 + j\omega(K_2 C_1 + K_1 C_2)] / \Delta \quad (2)$$

其中,  $\Delta = (K_1 - m_1 \omega^2 + jC_1 \omega)[K_1 + K_2 - m_2 \omega^2 + j\omega(C_1 + C_2)] - (K_1 + jC_1 \omega)^2$ .

$$\text{令 } \mu = \frac{m_1}{m_2}; \lambda = \frac{\omega}{\omega_1}; \alpha = \frac{\omega_2}{\omega_1}; \omega_1^2 = \frac{K_1}{m_1}; \omega_2^2 = \frac{K_2}{m_2}; \zeta_1 =$$

$$\frac{C_1}{2\sqrt{K_1 m_1}}; \zeta_2 = \frac{C_2}{2\sqrt{K_2 m_2}}$$

由式(2)整理得到用无量纲量表示的频响函数:

$$H(\lambda) = \frac{C + jD}{A - jB} \quad (3)$$

其中,  $A = \lambda^4 - \lambda^2(\alpha^2 + 4\zeta_1 \zeta_2 \alpha + \mu + 1) + \alpha^2$ ;  $C = \alpha^2 - 4\zeta_1 \zeta_2 \alpha \lambda^2$ ;  $B = 2\lambda^3(\zeta_2 \alpha + \zeta_1 \mu + \zeta_1) - 2\lambda\alpha(\zeta_1 \alpha + \zeta_2)$ ;  $D = 2\lambda\alpha(\zeta_1 \alpha + \zeta_2)$ .

因此,双层隔振系统的绝对传递率:

$$T_A = |H(\lambda)| = \sqrt{\frac{C^2 + D^2}{A^2 + B^2}} \quad (4)$$

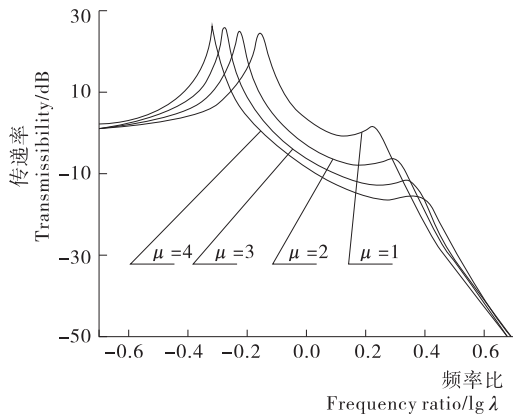
## 2 动态特性分析

单层隔振系统只要合理选择刚度比、阻尼比参数,在低频区( $<50$  Hz)能起到很好的隔振效果。但是对高频干扰( $>100$  Hz)的隔振效果并不理想,并且隔振的频段也比较窄<sup>[1-6]</sup>,而大部分结构噪声都是高频的。因此,双层隔振应运而生,越过共振区后双层隔振的传递率斜率从单层的12 dB/oct增加到24 dB/oct<sup>[1-6]</sup>,这对于高频振动的隔离意义重大。

影响双层隔振系统隔振性能的参数主要有质量比、阻尼比、固有频率比。以频率比  $\lambda$  为横坐标、以隔振系统绝对传递率  $T_A$  为纵坐标,分别以质量比、阻尼比、固有频率比为参变量,基于 MATLAB 编程与图形功能,由式(4)研究参变量变化时绝对传递率  $T_A$  的变化规律。为了使图形表达清晰,横坐标取对数  $\lg \lambda$ ,纵坐标取振动级差变化的分贝数,即  $20 \lg |H(\lambda)|$ 。

由图3可知,随着质量比  $\mu$  的增大,振动传递率曲线的第1峰位置左移而第2峰位置右移,故隔振频带变宽,隔振效果变好,尤其在第1峰与第2峰之间效果最好。例如当  $\zeta_1 = 0.03, \zeta_2 = 0.05, \alpha = 1.2, \lambda = 1, \mu$  从1增加到4时,振动级差减小了12 dB。但是在高频区即第2峰后,质量比的变化对隔振效果影响不大。

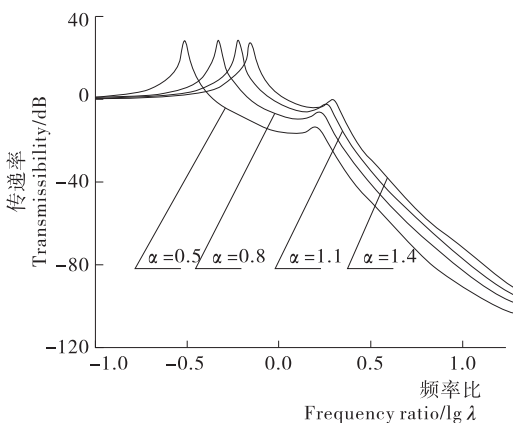
由图4可知,固有频率比  $\alpha$  的变化对隔振效果影响非常显著,且分布在整个低频及高频区。随着  $\alpha$  的变大,隔振效果变差。例如当  $\zeta_1 = 0.03, \zeta_2 = 0.05, \mu = 1.538, \alpha$  从1.4减少到0.5,  $\lambda = 1$  和  $\lambda = 10$  时,振动级差分别减小了17.96, 18.75 dB。



$\zeta_1 = 0.03, \zeta_2 = 0.05, \alpha = 1.2$

图3 质量比变化对隔振效果的影响

Figure 3 Magnification factors of vibrations at different mass ratio



$\zeta_1 = 0.03, \zeta_2 = 0.05, \mu = 1.538$

图4 固有频率比变化时对隔振效果的影响

Figure 4 Magnification factors of vibrations at different natural frequency ratio

由图5(a)可知,阻尼比  $\zeta_1$  变化时(取  $\zeta_1 = 0.02 \sim 0.15, \zeta_2 = 0.02, \alpha = 1.5, \mu = 1.538$ ),在低频区仅仅在共振区域随着  $\zeta_1$  增大能明显减小振动级差,而其他区域几乎无影响。但是在高频区( $\lambda > 2.5$ )时,  $\zeta_1$  增大反而会降低隔振效果。例如当  $\lambda = 10, \zeta_1$  由0.02增加到0.15时,振动级差增加了9.7 dB。

由图5(b)可知,阻尼比  $\zeta_2$  变化时(取  $\zeta_2 = 0.02 \sim 0.15, \zeta_1 = 0.02, \alpha = 1.5, \mu = 1.538$ ),在低频区对隔振效果的影响与  $\zeta_1$  的相同,只是区域变宽( $\lambda$  由2.5扩大到10)。在高频区  $\lambda > 10$ ,传递率曲线发生逆转,即随着  $\zeta_2$  的增大,反而会降低隔振效果。例如当  $\lambda = 33, \zeta_2$  由0.02增加到0.15时,振动级差增加了15.33 dB。

## 3 优化设计

利用频谱与相干分析法测试如图1所示的小型食品粉碎机,其振动和噪声频率集中在368 Hz,倍频为744, 1104, 1472, 2216, 2584 Hz,均属于高频振动范围,因此,采用双层隔振尤为必要。该机器也是如此设计的,但是噪声指标仍

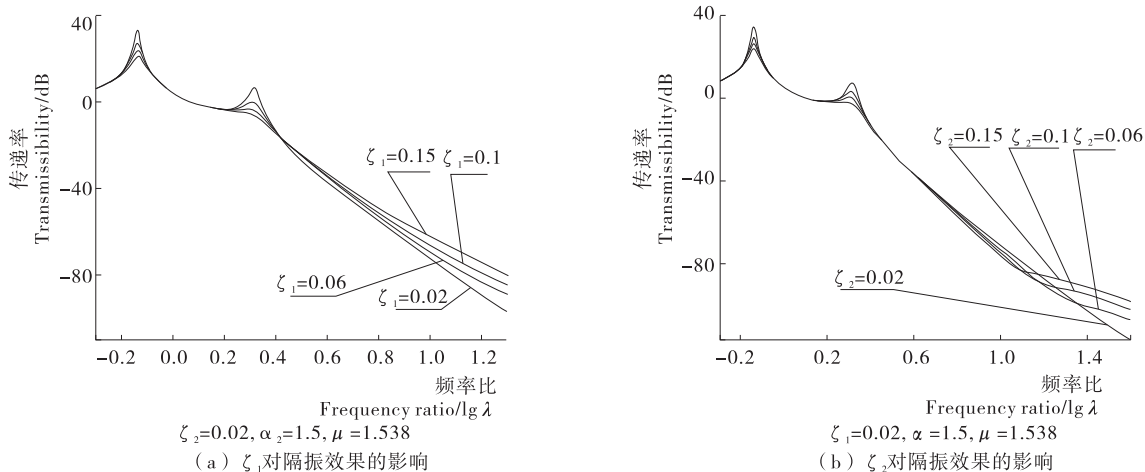


图 5 阻尼比变化对隔振效果的影响

Figure 5 Magnification factors of vibrations at different damping ratio

然不达标。本设计拟利用 MATLAB 编程,采用单纯形优化算法<sup>[7]</sup>,优化隔振系统从而达到减振降噪目的。

### 3.1 目标函数

根据以上双层隔振系统动态特性分析,在高频区为增加隔振效果,应该尽量增加质量比  $\mu$ 、取较小的阻尼比  $\zeta_1$  和  $\zeta_2$  以及尽量减小固有频率比  $\alpha$ 。但是,有些参数的改变是受限的。例如,增加质量比,如果增加机头质量,则增加了整机重量,使小型家电变得笨重。如果减小机身重量,则要减少本来就很小巧的各种电子元器件质量。况且,在高频区质量比的变化对隔振效果影响程度不大,所以,本机质量比( $\mu = 1.452$ )不做修改。

因此,本机双层隔振系统参数优化主要从适当调整阻尼比、优化固有频率比(选择合适隔振垫固有频率)的角度出发。

本设计以减小双层隔振系统振动级差为目标。

$$f(\alpha, \zeta_2) = T_A \quad (5)$$

### 3.2 约束条件

橡胶隔振垫的种类很多,其性能主要取决于橡胶配方、隔振垫形状以及硫化工艺。目前中国标准化的橡胶隔振垫主要有 XD 型和 WJ 型<sup>[8,9]</sup>,也可根据隔振性能要求自行设计。橡

胶的阻尼比较大,  $\zeta$  可达 0.15,但是常用范围在 0.02~0.08。橡胶垫的固有频率范围一般在 10~20 Hz<sup>[8,9]</sup>。即:

$$0.02 \leq \zeta_1 \leq 0.08 \quad (6)$$

$$0.02 \leq \zeta_2 \leq 0.08 \quad (7)$$

$$10 \leq \omega_1 \leq 20 \quad (8)$$

$$10 \leq \omega_2 \leq 20 \quad (9)$$

### 3.3 优化计算

采用无约束最优化直接算法:单纯形法。此算法不用求导,虽然收敛较慢,但是编程简单,由于本优化函数变量不多,也能收到较好效果。

经过测试,该机器各项动态特性原始参数为:机头  $m_1 = 1.35$  kg(包含常规预估食物重量),机身  $m_2 = 0.93$  kg,  $\omega_1 = 10$  Hz,  $\omega_2 = 15$  Hz,  $\zeta_1 = 0.10$ ,  $\zeta_2 = 0.07$ 。输入原始数据及约束条件,优化计算后结果见表 1。可见,只要调整阻尼比  $\zeta_1$ 、固有频率  $\omega_2$  至表 1 中数值,本粉碎机的隔振系统在工作噪声频率区域的振动级差就会降低 10~13 dB。

### 3.4 系统改进

根据优化结果,重新选取新的隔振垫:即  $\zeta_1 = 0.03$ ,  $\omega_2 = 10.5$  Hz,其它参数不变。按照相同步骤再次测试该机工作噪声为 53.9 dB,已符合 GB 3096—2008《声环境质量标准》的规定。

表 1 粉碎机工作噪声区域振动级差计算

Table 1 Calculation of Magnification factors of vibrations on the noise area of the pulverizer dB

频率比 $\lambda$	$\zeta_1$ 优化			$\alpha$ 优化		$\zeta_1, \alpha$ 优化后振动级差总的变化
	$\alpha = 1.333,$ $\zeta_1 = 0.08,$ $\zeta_2 = 0.05$	$\alpha = 1.333,$ $\zeta_1 = 0.03,$ $\zeta_2 = 0.05$	振动级差变化	$\alpha = 0.875,$ $\zeta_1 = 0.03,$ $\zeta_2 = 0.05$	振动级差变化	
6	-55.0	-56.8	-1.9	-65.2	-7.4	-9.3
33	-94.0	-103.6	-9.6	-107.2	-4.8	-14.4
180	-123.6	-132.2	-8.6	-135.9	-3.7	-12.3
193	-124.8	-133.4	-8.6	-137.1	-3.7	-12.3

(下转第 222 页)

### 3 结论

本试验将新型变温压差膨化干燥技术与传统热风干燥技术进行联合,研究其对菠萝蜜产品的影响。结果表明,采用热风—变温压差膨化联合干燥技术生产的菠萝蜜脆片品质较好,其中热风预干燥时间、抽真空温度、抽真空时间对菠萝蜜膨化产品的品质影响最大,其次为膨化温度和膨化次数。综合试验数据分析可知,菠萝蜜膨化的较适宜条件为:热风预干燥温度 60 ℃,热风预留水分含量 27.53%,膨化温度 90 ℃,抽真空温度 60 ℃,抽真空时间 2.5 h,膨化次数 5 次,停滞时间 5 min,真空度 -0.098 MPa。

#### 参考文献

- 1 焦凌梅. 菠萝蜜营养成分与开发利用价值[J]. 广西热带农业, 2010(1): 17~19.
- 2 王萍, 陈芹芹, 毕金峰, 等. 超微粉碎对菠萝蜜超微全粉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(1): 144~148.
- 3 Nakasone H Y, Paull R E. Tropical fruits[M]. 2th ed. New York: Wiley-Blackwell, 1998.
- 4 Zou Ke-jian, Teng Jing-wen, Huang Li, et al. Effect of osmotic pretreatment on quality of mango chips by explosion puffing drying [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013 ( 51 ): 253~259.
- 5 Cui Zheng-wei, Li Chun-yang, Song Chun-fang, et al. Combined microwave-vacuum and freeze drying of carrot and apple chips [J]. Drying Technology, 2008, 26(12): 1 517~1 523.
- 6 毕金峰, 魏益民. 果蔬变温压差膨化干燥技术研究进展[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 308~312.
- 7 毕金峰, 方蕾, 丁媛媛, 等. 菠萝变温压差膨化干燥工艺优化 [J]. 农业工程学报, 2009(10): 334~339.
- 8 方芳, 毕金峰, 李宝玉, 等. 不同干燥方式对哈密瓜干燥产品品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(5): 68~72.
- 9 何新益, 程莉莉, 刘金福, 等. 膨化温度对冬枣变温压差膨化干燥特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 27(12): 389~392.
- 10 Torreggiani D, Toledo R T, Bertolo G. Optimization of vapor induced puffing in apple dehydration[J]. Journal of Food Science, 1995, 60(1): 181~185.
- 11 Tabtiang S, Prachayawarakon S, Soponronnarit S. Effects of

- osmotic treatment and superheated steam puffing temperature on drying characteristics and texture properties of banana slices[J]. Drying Technology, 2012, 30(1): 20~28.
- 12 He Xin-yi, Liu Jin-fu, Huang Zong-huang. Preparation of cold brew tea by explosion puffing drying at variable temperature and pressure[J]. Drying Technology, 2011, 29(8): 888~895.
- 13 Nath A, Chattopadhyay P K, Majumdar G C. High temperature short time air puffed ready-to-eat (RTE) potato snacks: process parameter optimization[J]. Journal of food Engineering, 2007, 80(3): 770~780.
- 14 Tuyen C K, Nguyen M H, Roach P D. Effects of spray drying conditions on the physicochemical and antioxidant properties of the Gac (*Momordica cochinchinensis*) fruit aril powder [J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(3): 385~392.
- 15 Figiel A. Drying kinetics and quality of beetroots dehydrated by combination of convective and vacuum-microwave methods[J]. Journal of Food Engineering, 2010, 98(4): 461~470.
- 16 Xiao Hong-wei, Gao Zhen-jiang, Lin hai, et al. Air impingement drying characteristics and quality of carrot cubes[J]. Journal of Food Process Engineering, 2010, 33(4): 646~665.
- 17 Xu Su-xuan, Kerr W L. Comparative study of physical and sensory properties of corn chips made by continuous vacuum drying and deep fat frying[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 48(1): 96~101.
- 18 Maskan M. Drying, shrinkage and rehydration characteristics of kiwifruits during hot air and microwave drying[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 48(2): 177~182.
- 19 Costa C, Antonucci F, Pallottino F, et al. Shape analysis of agricultural products: a review of recent research advances and potential application to computer vision[J]. Food and Bioprocess Technology, 2011, 4(5): 673~692.
- 20 Gayosso-García Sancho L E, Yahia E M, González-Aguilar G A. Identification and quantification of phenols, carotenoids, and vitamin C from papaya (*Carica papaya L.*, cv. *Maradol*) fruit determined by HPLC—DAD—MS/MS—ESI [J]. Food Research International, 2011, 44(5): 1 284~1 291.
- 21 Klieber A, Begneto A. Colour stability of paprika and chilli powder[J]. Food Australia, 1999, 51(12): 592~596.

(上接第 121 页)

### 4 结论

基于 MATLAB 的编程、图形与计算功能,分析了双层隔振系统的各项动态参数对隔振性能的影响,在此基础上利用单纯形优化算法对该食品粉碎机的双层隔振系统的参数进行了优化计算,然后根据优化结果重新选取隔振垫,经测试噪声指标降低了 12.1 dB,解决了该机器工作噪声超标的问题。

#### 参考文献

- 1 严济宽. 机械振动隔离技术[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1985:21~93.
- 2 刘迎春,王开和. 基于弹性体模型的双层隔振器结构参数设计 [J]. 天津科技大学学报, 2006, 21(3): 57~19.

- 3 孙京平,王开和,卢学军,等. 水泵的双层隔振设计[J]. 机械设计与制造, 2006(3): 5~7.
- 4 Cai Liang-bin, Chen Da-yue. A two-stage vibration isolation system featuring an electrorheological damper via the semiactive static output feedback variable structure control method[J]. Journal of Vibration and Control, 2004, 10(5): 683~706.
- 5 苏荣华,彭晨宇,丁文文. 设计参数对双层隔振系统动态性能影响的研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2008, 16(6): 863~869.
- 6 骆江峰. 降低往复压缩机振动与噪声的设计[J]. 食品与机械, 2006, 22(6): 91~94.
- 7 陈宝林. 最优化理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社, 2005: 341~369.
- 8 周新祥. 噪声控制技术及其新进展[M]. 北京:冶金工业出版社, 2007: 152~160.
- 9 张弛. 噪声污染控制技术[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2007: 186~206.