

双缸洗衣机振动与噪声分析*

——降低噪声的一种对策

杨宗炼

林敦祥

(应用力学与工程系)

(科技开发公司)

摘 要

通过试验,对双缸洗衣机的振动与噪声进行了分析,建立了力学模型,为一类在柔性支座上安装的机器的隔振问题提供了理论依据,并在此基础上提出一种减振降噪的对策。

关键词 洗衣机,隔振,降噪

降低洗衣机的噪声过去没有得到应有的重视,资料也较少。文〔1〕曾处理过一种双缸洗衣机的降噪问题,但缺乏理论分析。本文在试验结果的基础上对双缸洗衣机的振动与噪声进行了分析,建立了柔性支座上隔振问题的力学模型,为这类结构的减振降噪提出一种可行的对策。

1 振动与噪声试验

在中山大学材料科学研究所减振降噪试验室,对中山市洗衣机厂提供的一台样机进行了测试。用A计权声压级测量的噪声(噪声谱如图1所示),其峰值主要出现在100Hz,200Hz等处。在电机驱动时,洗衣机外壳的响应谱(图2)在24.5Hz、100Hz、200Hz等处有明显的峰值。为了搞清楚振动的原因,对洗衣机整机和电机支座进行了扫频试验,测出了外壳上的固有频率为63Hz,93Hz,100Hz,110Hz,142Hz,180Hz等,而支座的固有频率为80Hz,120Hz等。

2 噪声的初步分析

由测试结果可见,振动谱与噪声谱非常相似,噪声的频率以低中频为主。在100Hz时有明显的尖峰(图1)。这与文〔2〕的结论是一致的。振动谱上第一个峰值出现在24.5Hz处(图2),这恰好与电机轴的转速1470转/分一致,其来源是由于电机转子有制造和装配误差,产生不平衡所致。由于它远离洗衣机的固有频率,低频声在A计权声压级测量中又要作很大衰减,在这个频率处结构的声辐射效率很低,对噪声的影响不大,因此在噪声谱上24.5Hz处无明显峰值。100Hz是电源频率的两倍,由计算可知100Hz及其倍频200Hz是电机基波磁场的电磁力波频率〔2〕。因此在振动谱及噪声谱上这两个

本文1988年10月25日收到

* 李家驹、叶廷恩参加了本试验工作;中山市洗衣机厂的甘展荣、潘永权对本研究给予支持和协作

频率处出现的峰值应当是电机的电磁振动及电磁噪声。电磁噪声可以用固体声形式向支架及各构件传递，电机又可以成为一种强迫振动源，激励各薄壁构件振动而产生噪声。由于外壳和底架都有接近100Hz的固有频率，这就更加扩大了这一频率的噪声。下面着重对电机和底架间的隔振机制作进一步的分析。

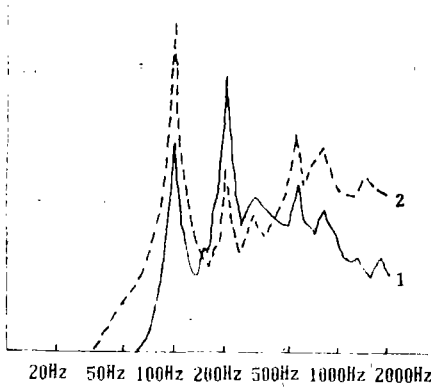


图1 噪声谱
1.有皮带, 2.去掉皮带
Fig. 1 Spectra of noise

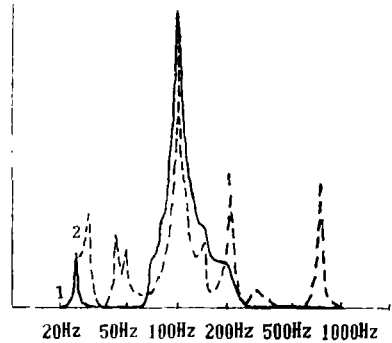


图2 响应谱
1.箱体下部, 2.箱体上部
Fig. 2 Spectra of response

3 理论分析

安装被保护机器的基座并非绝对刚性，这种柔性效应会使隔振后的传递率曲线出现新的峰值，需对隔振垫的参数进行优化处理。

考虑到底架柔性后，我们所讨论的电机与支架系统可以简化为图3所示的双自由度系统。其中 M 为电机质量， m_1, k_1 分别为支架的等效质量和等效刚度，这是设备固有参数，在我们的减振试验中作为常数处理， F_0 是激励的幅值， ω 是激励频率， K, c 分别为隔振垫的刚度和阻尼比，这是试验中需进行调整的参数。我们现在的的问题是求出在 F 的激励下， m_1 的响应 X 。

取坐标如图3所示，各自由度均以静平衡位置作为坐标原点，于是所讨论的系统的振动微分方程可写为⁽³⁾

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + K & -K \\ -K & K \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 1 \end{Bmatrix} F_0 e^{i\omega t} \quad (1)$$

(1)的稳态解为：

$$x^* = X e^{i\omega t}, \quad y^* = Y e^{i\omega t}$$

式中

$$\left. \begin{aligned} X &= F_0(K + i\omega c) / [(K_1 - \omega^2 m_1)(K_1 - \omega^2 M + i\omega c) - \omega^2 M(K + i\omega c)] \\ Y &= F_0(K_1 - \omega^2 m_1 + K + i\omega c) / [(K_1 - \omega^2 m_1)(K_1 - \omega^2 M + i\omega c) - \omega^2 M(K + i\omega c)] \end{aligned} \right\} (2)$$

通过隔振垫传到底架上的力，其幅值为

$$F_t = |K_1 - m_1 \omega^2| \cdot |X| \quad (3)$$

为了讨论及应用方便,引入下列无量纲参数 α, β, ζ 分别表示底架刚度 K_1 , 隔振垫刚度 K 及隔振垫阻尼 c 的特性

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 1 + M\omega^2 / (m_1\omega^2 - K_1), & \beta &= K / (M\omega^2), & \zeta &= c / (2M\omega_n) \\ \omega_n^2 &= K / M, & \omega_1^2 &= K_1 / m_1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

由(2), (3)式, 并利用(4)的记号, 得到传递率为

$$T = F_t / F_0 = \sqrt{(\beta^2 + 4\beta\zeta^2) / [1 - 2\alpha\beta + \alpha^2(\beta^2 + 4\beta\zeta^2)]} \quad (5)$$

下面分别讨论各参数对传递率的影响。

3.1 底架刚度对传递率的影响

引入记号

$$\begin{aligned} P &= \beta(\beta + 4\zeta^2), & Q &= 1 - 2\alpha\beta + \alpha^2P, \\ \alpha_0 &= \frac{\beta}{P} \end{aligned} \quad (6)$$

于是有

$$\frac{\partial T}{\partial \alpha} = \left(\frac{P}{Q} \right)^{3/2} (\alpha_0 - \alpha) \quad (7)$$

当 $\alpha < \alpha_0$ 时, 有 $\frac{\partial T}{\partial \alpha} > 0$, 这时降低底架刚

度(减小 α)就可使传递率降低, 而对于

$\alpha > \alpha_0$ 时, 有 $\frac{\partial T}{\partial \alpha} < 0$, 这时为了降低传递率

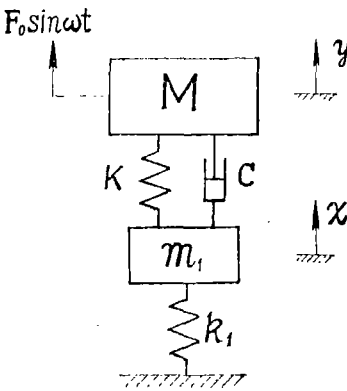


图3 系统力学模型

Fig. 3 The mechanical model of the system

应设法提高底架刚度。当 $\alpha = \alpha_0$ 时, 传递率取最大值。

3.2 隔振垫阻尼的影响

在(5)式中对 ζ 取偏导数有

$$\frac{\partial T}{\partial \zeta} = \frac{4\beta\zeta}{Q\sqrt{QP}}(1 - 2\alpha\beta) \quad (8)$$

当 $\alpha < 0$ 或 $0 < \beta < \frac{1}{2\alpha}$ 时, $\frac{\partial T}{\partial \zeta} > 0$, 此时阻尼对隔振起到不利的作用, 隔振垫应选用

无阻尼材料。反之, 当 $\beta = \frac{1}{2\alpha} > 0$ 时, 传递率与阻尼无关, 其值为 $T = \frac{1}{\alpha}$, 仅对于

$\alpha > 1$, 才有隔振作用。对于 $\beta > \frac{1}{2\alpha} > 0$ 时, $\frac{\partial T}{\partial \zeta} < 0$, 此时隔振垫采用具有较大阻尼值的

粘弹性材料是有利的, 这时系统较接近共振区, 阻尼的作用可大幅度降低传递率。

3.3 隔振垫刚度的影响

将(5)式对 β 取偏导数得

$$\frac{\partial T}{\partial \beta} = \frac{1}{Q\sqrt{QP}}(2\zeta^2 + \beta - \alpha\beta^2) \quad (9)$$

记

$$\beta_0 = \frac{1 + \sqrt{1 + 8\alpha\zeta^2}}{2\alpha} \quad (10)$$

易知当 $\alpha < 0$ 或 $\beta < \beta_0$ 时， $\frac{\partial T}{\partial \beta} > 0$ ，刚度增大使传递率增大，为了降低传递率，这时应选用较软的材料来制造隔振垫，但为了保证承载力 W ， K 又不能选得太小，通常按 $W = (0.15 \sim 0.25)HK$ 考虑， H 为隔振垫厚度。当 $\beta = \beta_0$ 时， T 达到极大值。对于 $\beta > \beta_0$ 情况， $\frac{\partial T}{\partial \beta} < 0$ ，提高刚度可降低传递率。

3.4 实现减振必须满足的条件

要使选用的隔振垫参数保证传递率小于1，即必须满足

$$(\alpha^2 - 1)\beta^2 - 2\xi\beta + 1 > 0 \tag{11}$$

式中： $\xi = \alpha + 2\zeta^2(1 - \alpha^2)$ 。

对于 $\alpha < -1$ 情况，(11)式恒成立，即不论隔振垫参数 ζ, β 取值如何，总满足减振条件，见图4(a)。

对于 $|\alpha| < 1$ 情况，满足(11)式的 β 取值范围为(图4(b))：

$$0 < \beta < \beta_* = [\sqrt{\xi^2 + (1 - \alpha^2)} - \xi] / (1 - \alpha^2) \tag{12}$$

对于 $\alpha > 1$ 情况，满足(11)式的 β 应在下列范围取值：当 $\zeta < \sqrt{\frac{\alpha}{2(\alpha^2 - 1)}}$ 时，应选

$$0 < \beta < \beta_* = [\xi - \sqrt{\xi^2 - (\alpha^2 - 1)}] / (\alpha^2 - 1) \tag{13a}$$

或 $1 > \beta > \beta_* = [\xi + \sqrt{\xi^2 - (\alpha^2 - 1)}] / (\alpha^2 - 1) \tag{13b}$

当 $\zeta > \sqrt{\frac{\alpha}{2(\alpha^2 - 1)}}$ 时，(11)恒满足，可任选 $0 < \beta < 1$ 的值(图4(c))。

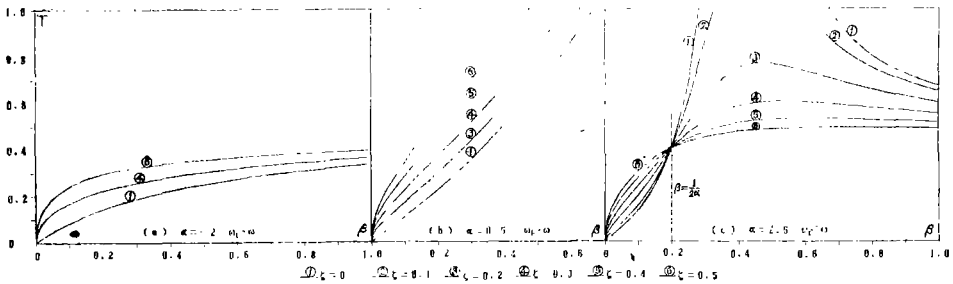


图4 传递率与隔振参数的关系

Fig. 4 Transferred rate with stiffness for various damping valale

4 隔振对策的讨论

由(4)式定义的参数 α 表示了底架刚度 K_1 的特性，当底架绝对刚性时，对应于 $\alpha = 1$ 的情况。当激振频率 ω 接近底架固有频率 ω_1 时， α 的绝对值很大($\omega < \omega_1$ 对应 $\alpha < 0$ ； $\omega > \omega_1$ 对应 $\alpha > 0$)。根据支座及隔振垫的不同刚度，前面分析的结果在满足减振条件(11)的前提下，对各参数优化采取的对策可在图5所示的 $\alpha - \beta$ 平面上分区进行讨论。

①图5中I区对应的参数是 $\alpha < 0, 0 < \beta < 1$ ，II区对应的参数是 $0 \leq \alpha \leq 1, 0 < \beta < \frac{1}{1 + \alpha}$ ，两者均对应于激励频率低于固有频率的情况(支座刚度比较大或激励频率较

低时, 对应于此种情况) 相应的传递率曲线为图 4(a)、(b)。Ⅲ区对应的参数是 $\alpha > 1 + \frac{M}{m_1}$, $\beta < \frac{1}{2\alpha}$, 对应于激励频率高于固有频率情况 (柔性支座或激励频率较高时出现此种情况), 对应的传递率曲线如图 4(c) 中 β 值较小的部分。在这三个区域所对应的参数范围内, 都有共同的特征: $\frac{\partial T}{\partial \alpha} > 0, \frac{\partial T}{\partial \beta} > 0, \frac{\partial T}{\partial \xi} > 0$, 因此采取的优化对策也相同: 减少底架刚度, 隔振垫选用尽可能软的无阻尼材料, 不过为了保证承载力 W , 隔振垫刚度 K 可按 $4 < \frac{HK}{W} < 6$ 考虑, 其中 H 为隔振垫厚度。

②图 5 中的Ⅳ、Ⅴ区对应的参数是 $\alpha > 1 + \frac{M}{m_1}, \beta > \frac{1}{2\alpha}$, 它们属于Ⅲ区的同类情况即柔性支座或激励频率较高情况, 不同的是由于承载力要求, 隔振垫的刚度比较大, 这时传递率曲线对应于图 4(c) 中 β 值较大部分, 在这两个区域所对应的参数范围内共同的特点是: $\frac{\partial T}{\partial \xi} < 0$, 隔振垫的阻尼特性对减振有利, 提高支座刚度亦有益于隔振。在Ⅳ区有 $\beta < \beta_0$, 优化对策是尽可能降低垫的刚度。对于Ⅴ区有 $\beta > \beta_0$, 则正好相反, 优化的对策是要选用较硬的隔振垫。总之, 对于Ⅳ、Ⅴ区选用隔振垫的原则是使其 β 值远离 β_0 。

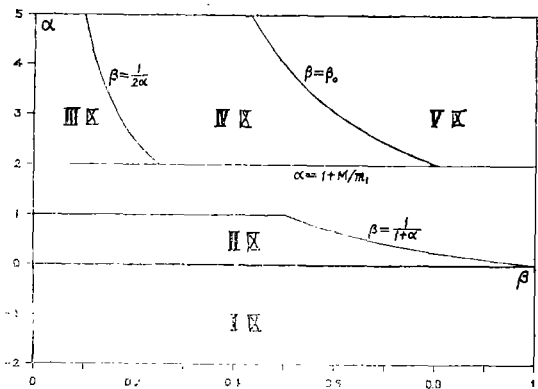


图 5 α - β 分区图
Fig. 5 α - β diagram

本试验所处理的洗衣机其 α 值约为 2.5~3, 若所选用的隔振垫刚度较大, 或激振频率较低时, 例如 $\beta \geq 0.2$ 时, 应考虑采用有阻尼的较软材料, 此时阻尼越大, 隔振效果越好。反之, 当 $\beta < 0.2$ 时 (本试验选用了 $\beta \approx 0.05$ 的隔振垫), 应尽可能减少隔振垫的阻尼值, 但由图 4(c) 看出, 此时阻尼的变化从 0~0.5, 而其振动传递率只是从 0.1 到 0.2 变化。因此在这种情况下阻尼值的存在对隔振效果的影响不大, 但人为地增加其阻尼值是不可取的, 相反的做法才是应当考虑的。文[1]指出 β 值的选取应在 0.04 至 0.16 范围内, 但从本文分析结果看, β 值越小效果越好, 只是考虑到承载能力, 才有此选择。

在此基础上, 试制了隔振垫并作了隔振效果试验。试验时传感器的配置如图 6 所示。由于皮带张紧度有一定的要求, 支承 D 上仍用原垫, 而 E 、 F 两个支承用新设计的垫。振动谱在处理前后的对比见图 7。使用原垫时, 其振动传递率均高于 1, 只在 E 、 F 两处使用新垫后, 其传递率均小于 0.5, 由于电机电磁振动传递至外壳的传递率减少了, 因而减少了外壳的振动, 随之外壳振动所辐射的噪声能量也大为减小。这样处理的结果, 该洗衣机用 A 计权声压级测量到的噪声减少了 3~8 分贝。对于其他质量较好的洗衣机, 其噪声可以控制在 52 分贝左右。

在此基础上, 试制了隔振垫并作了隔振效果试验。试验时传感器的配置如图 6 所示。由于皮带张紧度有一定的要求, 支承 D 上仍用原垫, 而 E 、 F 两个支承用新设计的垫。振动谱在处理前后的对比见图 7。使用原垫时, 其振动传递率均高于 1, 只在 E 、 F 两处使用新垫后, 其传递率均小于 0.5, 由于电机电磁振动传递至外壳的传递率减少了, 因而减少了外壳的振动, 随之外壳振动所辐射的噪声能量也大为减小。这样处理的结果, 该洗衣机用 A 计权声压级测量到的噪声减少了 3~8 分贝。对于其他质量较好的洗衣机, 其噪声可以控制在 52 分贝左右。

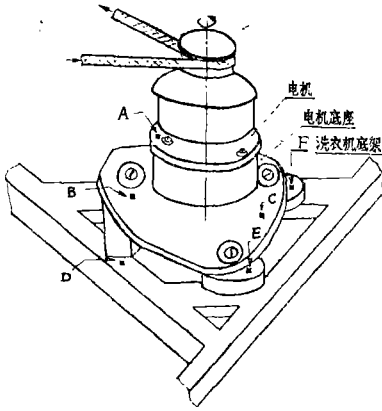


图6 测量点位置

Fig. 6 The positions of measuring points

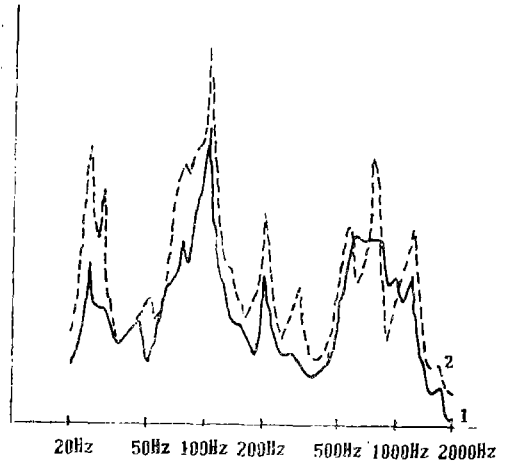


图7 E点处理前后的响应谱对比
1.处理后, 2.处理前

Fig. 7 Comparison of response of point E before and after treatment

参 考 文 献

- [1] 戴德沛, 噪声与振动控制, 阻尼技术专辑, 1985, 105~113
- [2] 陈心昭等, 噪声与振动控制, 3 (1987). 3~7
- [3] 吴福光等, 振动理论, 高等教育出版社, 1987

The Analysis of the Vibration and Noise of Bi-barrel Washing Machine—A Way to Reduce the Noise

Yang Zonglian*

Lin Dunxiang

Abstract

The Vibration and noise of bi-barrel washing machine have been analysed. According to the experimental results, the mechanical model has been suggested. The theory presented here provided the theoretical basis for designing the vibration insulation system of a machine lying on a flexible support. A way that may be used to reduce the noise of bi-barrel washing machine has been proposed.

Keywords washing machine, vibration insulation, noise reduction

* Department of Mechanics