

隔振器的阻尼设计

许 滨 张强星

(中国科学院力学研究所)

摘 要

本文推导了隔振系统的传递系数公式,实际隔振系统 in 高频段传递比的斜率不一定是-12dB/oct,并且计算了由三种不同阻尼材料制成隔振器的隔振系统传递系数曲线,进行了讨论分析。提供了隔振器的阻尼设计方法,分析了隔振系统的高频噪声产生的原因和解决方法。

一、前 言

目前我国柴油机的隔振系统基本上是采用传统的低阻尼橡胶隔振器。这种隔振器等效粘性阻尼比约为 0.08 (无锡减震器厂提供的数据)随着现代舰船的发展,提出了降低高频噪声的要求。在整个柴油机隔振系统中,噪声不仅来自柴油机的高频干扰力,也来自隔振器内的驻波。而且柴油机机身是个弹性体,机身也是一个高频发声体。本文是从加大隔振器的阻尼着手,来降低柴油机隔振系统的振动和噪声。

二、隔振系统的传递比公式

1. 理想阻尼材料的隔振系统的传递系数计算公式

一般传统橡胶隔振器的阻尼不大,并且假设阻尼和剪切模量为常数,即不随温度和频率变化。在计算隔振系统的传递系数时,常常将阻尼按粘性阻尼考虑。因此,就得出了加大阻尼,会使高频段的传递系数变坏的结论。例如当粘性阻尼比(C/C_0)从零增加到 1 时,高频段传递系数斜率从 -12dB/oct 变为 -6dB/oct^[1]。

由粘弹性材料制成的大阻尼隔振器,其刚度和阻尼可用变刚度表示 [$K^* = K(1+i\eta)$, 其中 η 为损耗因子]。在这里假定了粘弹性材

料是理想的,即它的杨氏模量和损耗因子为一常数。所以,复刚度为一常数。隔振系统的运动方程可写成:

$$m\ddot{x} + K(1+i\eta)x = F_0 \sin \omega t$$

设 $x = X e^{i\omega t}$ 的虚部, $X = \frac{F_0}{K - m\omega^2 + iK\eta}$

$$\begin{aligned} \text{传递到基础的力为: } F_r &= K(1+i\eta)X \\ &= K(1+i\eta) \frac{F_0}{(K - m\omega^2) + iK\eta} \end{aligned}$$

所以传递系数为:

$$\begin{aligned} T &= \frac{F_r}{F_0} = \frac{K(1+i\eta)}{(K - m\omega^2) + iK\eta} \\ |T| &= \left| \frac{F_r}{F_0} \right| = \frac{\sqrt{1+\eta^2}}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + \eta^2}} \end{aligned}$$

其中 $\omega_0^2 = \frac{K}{m}$

在高频段 $\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \gg 1$, $\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 \gg \eta^2$, 所以高频段传递比为:

$$|T| \approx \frac{1}{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

即高频段传递比的斜率为 -12dB/oct, 加大理想的粘弹性材料的损耗因子 η , 不会使高频段的传递系数斜率变坏, 仍为 -12dB/oct。

2. 实际隔振系统的传递系数公式

实际的橡胶胶料和粘弹性材料的动态性能是随频率和温度变化的。隔振器的复刚度 K^* 和损耗因子 η 不再是一个常数，而在给定的温度时为频率的函数 $K(\omega)$ 和 $\eta(\omega)$ 。表达式如下：

$$K^*(\omega) = K(\omega)[1 + i\eta(\omega)]$$

隔振系统的运动方程为：

$$m\ddot{x} + K(\omega)[1 + i\eta(\omega)]x = F_0 \sin \omega t$$

同上面的推导一样可以求得传递系数：

$$T = \frac{F_r}{F_0} = \frac{1 + i\eta(\omega_0)}{1 - \frac{K(\omega_0)}{K(\omega)} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + i\eta(\omega)}$$

其中 $\omega_0^2 = \frac{K(\omega_0)}{m}$ ， ω_0 为隔振系统的固定频率，所以^[2]，

$$|T| = \left| \frac{F_r}{F_0} \right| = \frac{\sqrt{1 + [\eta(\omega)]^2}}{\sqrt{\left[1 - \frac{K(\omega_0)}{K(\omega)} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2\right]^2 + [\eta(\omega)]^2}}$$

在高频段， $\frac{\omega}{\omega_0} \gg 1, \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4 \gg [\eta(\omega)]^2$

$$|T| \approx \frac{K(\omega)}{K(\omega_0)} \cdot \sqrt{1 + [\eta(\omega)]^2} \cdot \frac{1}{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

对理想的粘弹性材料讲，模量为一常数，即 $\frac{K(\omega)}{K(\omega_0)} = 1$ ，如果 $\eta(\omega)$ 小， $[\eta(\omega)]^2 \ll 1$ ，那么传递系数仍为 -12dB/oct 。但是实际的橡胶材料和粘弹性材料的剪切模量 G ，也就是隔振器的刚度 $K(\omega)$ ，是随频率提高而上升的。如果剪切模量上升很快就要影响高频段传递比的斜率，如果材料损耗因子 $\eta(\omega)$ 等于 1，大阻尼也将影响高频段的传递系数的斜率，即相差 3dB 左右。所以高频段传递比斜率不再是 -12dB/oct 。

因此，我们在选择阻尼材料制做隔振器时，除了考虑阻尼对高频段传递系数的影响外，还应该选择一种剪切模量随频率缓慢上升的粘弹性材料。

3. 计算实例^{[3][4]}

有一柴油机隔振系统的简化模型(见图

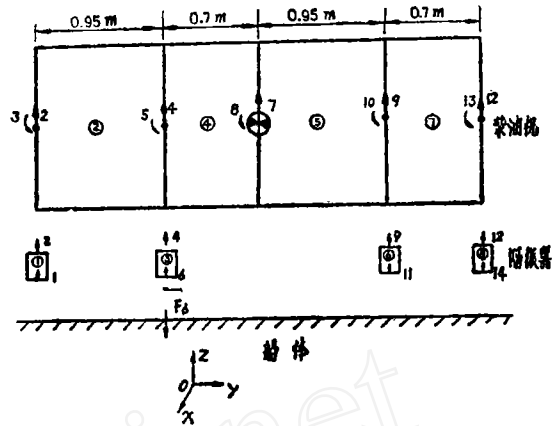


图 1

1)。柴油机机体作为弹性体计算，考虑了它的转动惯量和剪切变形，即作为 Timoshenko 梁处理。4 个隔振器(图 1 中①③⑥和④)按弹性体处理，因此可以考虑隔振器的驻波效应。

这是一个与重心不对称的隔振系统，在重心处加单位正弦力(1 Newton)求得在 ③号隔振器的传递力 F_0 。也即传递系数。

制造隔振器的橡胶材料有三种可供选择^[4]，5404*胶是一种传统的低阻尼橡胶材料，用 5404* 胶制成的隔振器的剪切模量 $G(f)$ 和损耗因子 $\eta(f)$ [$\eta = 2C/C_c$] 见图 2。为了改

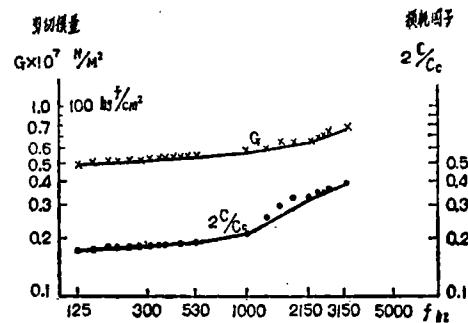


图 2

进隔振系统的传递比，试制了二种在 35°C 时阻尼较大的粘弹性阻尼材料，即 7* 和 9050* 橡胶。它们隔振器的剪切模量 $G(f)$ 和损耗因子 $\eta(f)$ 分别见图 3 和图 4。它们的阻尼较 5404* 胶为大，9050* 胶的剪切模量随频率上升比 7* 为快。

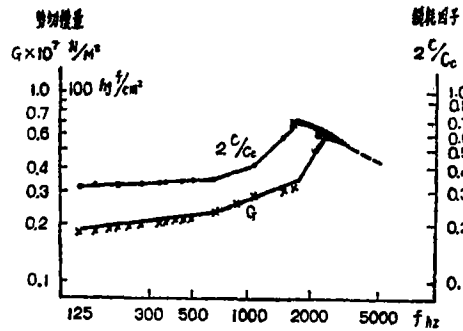


图 3

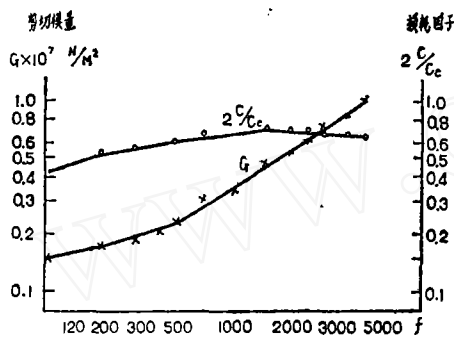


图 4

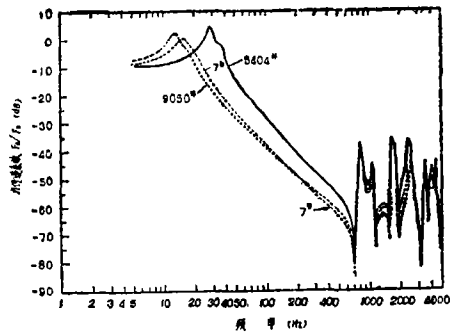


图 5

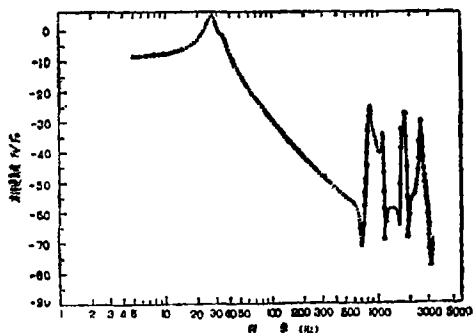


图 6

我们用动刚度耦合程序^[5]计算了隔振系统的传递系数曲线, 比较了三种不同橡胶材料对传递系数的影响。见图 5 可得出以下结论:

(i) 从 50Hz 到 700Hz 段传递比的斜率受到橡胶材料剪切模量 $G(\omega)$ 和损耗因子 $\eta(\omega)$ 的影响, 例如: 采用 5404* 橡胶隔振系统的传递系数斜率为 -12db/oct , 因为 1000Hz 以下 5404* 胶的损耗因子小于 0.2, 剪切模量基本上不变, 约为 $5 \times 10^6 \text{N/m}^2$ (图 2)。7* 胶的传递系数斜率比 5404* 差些, 9050* 胶的斜率就更差, 这是因为 9050* 胶的剪切模量随频率急剧上升的缘故(图 4)。

(ii) 由于大阻尼材料的剪切模量较软, 隔振系统的一阶共振频率从 28Hz 下降到 13~15Hz(图 5)。从而使高频段传递系数普遍下降 8dB 左右。

(iii) 大阻尼材料使一阶共振峰下降 2~4 dB。

(iv) 在图 5 的传递系数曲线中, 当扫描频率超过 700Hz, 没有出现隔振器中来回反射的明显的驻波效应而出现了一些共振峰, 其原因在下一节中作分析讨论。

4. 隔振系统传递系数曲线高频共振峰的分析

为了找出产生高频共振峰的原因, 在此我们假定隔振器的阻尼为理想阻尼材料, 即剪切模量 G 和损耗因子 η 是不随频率而变的, 为某一常数。

在计算模型中已设柴油机机身为一弹性体, 也设隔振器为一弹性体。估计大于 700Hz 的共振峰(图 6)是与这两个弹性体的振动有关。所以将柴油机单独作为一自由的 Timoshenko 梁来计算, 图 1 中第 4 点[在 3 号隔振器上]的加速度响应曲线(图 7)和图 1 中第 6 点[在 3 号隔振器之下]的大于 700Hz 的传递系数曲线很相似。为了压抑这些柴油机机身的共振峰, 在计算中, 故意将柴油机机身的损耗因子从 $\eta = 0.02$ 增加到 $\eta = 0.70$ (并不符合实际情况, 只是为了分析高频共振峰), 再计算第 6

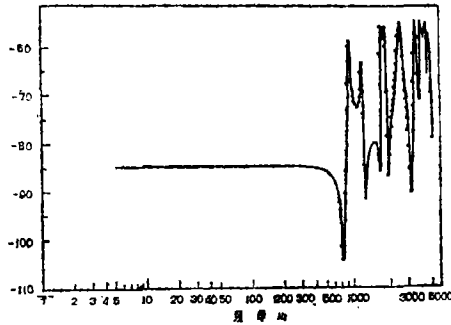


图 7

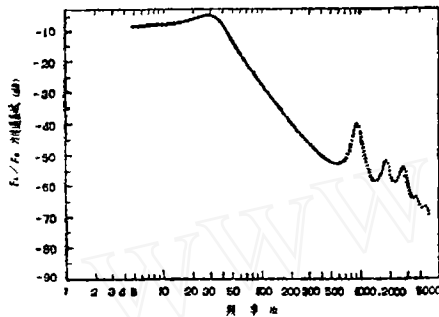


图 8

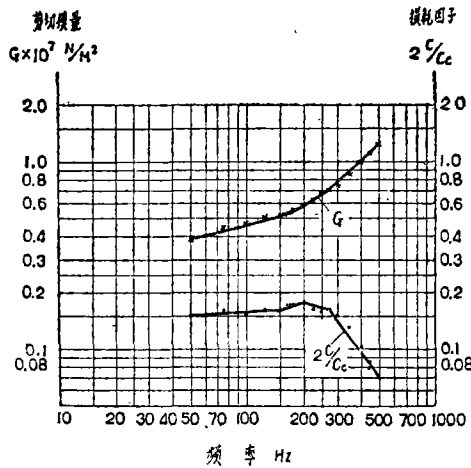


图 9

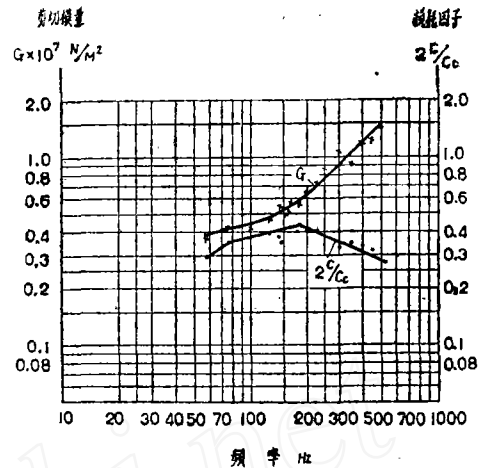


图 10

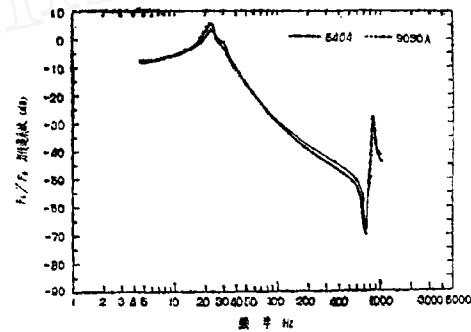


图 11

点的传递系数曲线，隔振器中的驻波就明显地出现在图8中。

所以，一个实际的弹性的柴油机隔振系统的高频段的传递系数曲线是由隔振器的驻波和柴油机机身的谐波合成的。

5. 温度对阻尼隔振性能的影响

粘弹性阻尼材料有个最佳的温度范围，超

过这个范围使用达不到最佳效果，在35℃情况下，7#胶隔振器和9050#胶隔振器要比5404#胶改善7~8dB图(5)，而同样的材料在11℃情况下，他们的剪切模量随频率上升有显著的变化(图9,图10)。在100Hz以下9050#A(改进型)要比5404#胶隔振器隔振效果略好。但在100Hz以上就反而变得差些(图11)，所以，选择隔振器的粘弹性阻尼材料时，必须根据环境温度选择合适的阻尼材料。

6. 剪切模量对静刚度的影响

隔振器的静刚度是与橡胶材料的低频模量密切相关。随着环境温度的变化。例如由35℃下降到11℃，5404#胶的低频模量基本不变，而9050#胶上升三倍之多，使隔振器的静刚度加大三倍，有可能产生机组之间的连接问题。所以研制粘弹性阻尼材料隔振器时，必须考虑到

低频模量受温度变化的影响。

三、结论

1. 为了加大隔振系统阻尼但又使柴油机隔振系统传递系数斜率接近 -12dB/oct , 隔振器选择阻尼橡胶时, 阻尼不应过大。例如 $\eta=0.5$ 时, 传递系数斜率将变 -11dB/oct , 应选择一种剪切模量随频率缓慢上升的阻尼材料。

2. 为了降低隔振系统的高频噪声, 仅仅压抑隔振器的驻波是不够的, 还应加大柴油机机身的阻尼。

3. 粘弹性阻尼隔振器的隔振有其温度范围, 超过这个温度范围使用, 其隔振效果不大或根本就没有作用。

值得注意的是, 阻尼材料一般都是粘弹性的, 本身在外界一定条件下会产生蠕变(比金属容易得多), 隔振器中加进阻尼材料, 那么就要考虑它能使用的环境要求, 如果环境条件或

自身受力条件到达了需要考虑材料蠕变或热疲劳的话, 无疑这将对阻尼材料的性能产生影响, 关于阻尼隔振器的蠕变、共振热疲劳问题有待于进一步研究。

4. 必须考虑到环境温度变化对阻尼材料低频模量的影响, 以保证隔振器的静变形在允许的范围之内。

参考文献

- [1] Harris .C M. & Cred C. E., Shock and Vibration Hand-Book, Vol. 2(1961)p 30-33;
- [2] J. C. Snowdon, Vibration and Shock in Damped Mechanical System, p 151-11;
- [3] 张强星 许滨: 中科院力学所报告 1985 年 8 月“某艇大阻尼减震器对比计算报告”; 张强星 许滨: 中科院力学所报告 1986 年 5 月“某艇隔振器的阻尼设计”;
- [4] 三种橡胶材料都由无锡减震器厂秦清明、庄国华研制提供。
- [5] “动刚度耦合程序”香港大学 M.G.SAINS BURY.

噪声与振动控制设备专利

安全阀排汽(气)小孔消声器

公告号: GG 85 2 02380

摘要: 一种属于环保设备的降噪装置的安全阀, 排汽(气)小孔消声器。本小孔消声器结构简单, 仅由消声筒和连接器组成。本发明的消声量可达 $30\sim 35\text{dB(A)}$, 不需装后续消声器即能达到环保要求, 且结构轻巧, 重量为传统的 $1/20$, 维护方便, 由于原理清晰, 因而可用到高压或临界压力。

一种空气压缩机的减噪排气装置

公告号: GG 85 2 01134

摘要: 一般工业用 $2V-0.6/T$ 空气压缩机排气装置的排气管, 可由一个缓冲和一个软管组成的减噪排空管来代替。缓冲腔的内径尺寸只需大于排气阀腔出口口径尺寸, 缓冲腔外壳布有散热片, 软管可由大阻尼弹性材料制成, 实用此种装置可以使得空气压缩机整机噪声降低 $9\sim 10\text{dB}$, 同时使整机运转平稳, 提高了机器运转的可靠性, 装置外形简单, 加工方便。

扁型合金蜂窝汽车排气净化消声器

公告号: GG 85 2 02881

摘要: 这是一种扁腰型汽车排气净化消声器, 它同时具备净化和消声两种功能, 可代替市售消声器。其特点是: 气流切线方向进入气流进出口处设有导流板, 在保温层盖板上打有小孔, 所用的净化消声器元件是大直径、薄层的合金蜂窝催化剂, 而且是分段放置的, 在段与段中间留有空隙, 外形呈扁腰形, 这种净化消声器体积小, 重量轻, 阻力小, 对道路路面和车速变化的适应能力都很强, 对排气的净化效果和消声效果都符合国家标准的要求。

低噪声花管加热器

公告号: GG 86 2 02291

摘要: 低噪声花管加热器属于一种直接接触热交换装置。本实用新型改变了常规花管加热器的钻孔方向, 钻孔与供汽管轴成 $30^\circ\sim 40^\circ$ 角, 且孔的排列规则, 供汽管外增设一长度短于供汽管的套管, 从而产生良好的消声效果。本装置结构简单、体积小、材料省、加工容易、安装方便、消声效果明显, 是较理想的蒸汽直接加热水装置。

(本栏编辑: 李磊, 劳毅, 施国强)