

# 超声频段固有频率测试设备

苏州太阳花感知  
孙静远

**关键词：**超声波频段、超高频、固有频率、模态测试、阻尼、锤击法、Q 因子、FFT

**摘要：**一般的固有频率测试系统，固有频率的测试范围在 10kHz 以内。要测试 20kHz 的固有频率需要比较特殊设备和采用特殊试验方法。但是在具体的生产和试验中，有时需要深入超声波段测试固有频率（比如需要测试约 40kHz 的固有频率），本文根据自己的超声频率范围内的锤击法模态试验，探讨了试验仪器的实现和试验方法。

## 1. 应用背景

尺寸小，刚度高的金属小部件，固有频率往往超出 20kHz。电子线路，集成块和其它微型的电子元件，在恶劣环境下工作时（强冲击等），为避免脱落和失效，需要在不同部位测试固有频率，这种固有频率往往深入到超声波范围；有时出于耐磨性要求，一些旋转部件（小齿轮，小叶片、泵的转子等）往往通过粉末冶金来铸造，由于脆性较高，容易断裂，需要测试固有频率检查裂隙，这时的固有频率可以到 30kHz。超声手术刀的固有频率需避开指定超声频段以防引起扰动和损伤使用寿命，因此产品在实验室阶段需要反复测试比对固有频率，以确认合适的材料和结构，这时要求测试的固有频率往往达到 40kHz 以上。

在超声波段的固有频率测试，目前市场上尚没有成熟的测试产品和测试服务，尤其是低成本高精度的测试设备，用户找不到。我们在原有的 TYH801 普通版上进行了一定程度上的改进，使之测量范围扩展到 64kHz。精度在 0.5% 以内，并具有较好的重复性和再现性

## 2. 算法

粘性阻尼系统的运动微分方程式为：

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f$$

系统的机械阻抗：

$$Z(s) = ms^2 + cs + k$$

其倒数为机械导纳，又称传递函数：

$$H(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k}$$

对其在傅氏域中进行变换，得频率响应函数：

$$H(\omega) = \frac{1}{-m\omega^2 + jc\omega + k}$$

拟合求得各阶模态系数和响应函数。

**2.1 模态分析的基本假设：**结构上任何一点的惯性都可以用分析带宽内各阶模态的惯性的加权和来表示。

$$\gamma_{jk}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{\psi_{rj}\psi_{rk}}{1 - \Omega_r^2(1 + \eta_r)}$$

其中,

$\gamma_{jk}(\omega)$  激励点 j 和相应点 k 之间的惯性

$r$  模态数

$\omega$  谐波激振频率

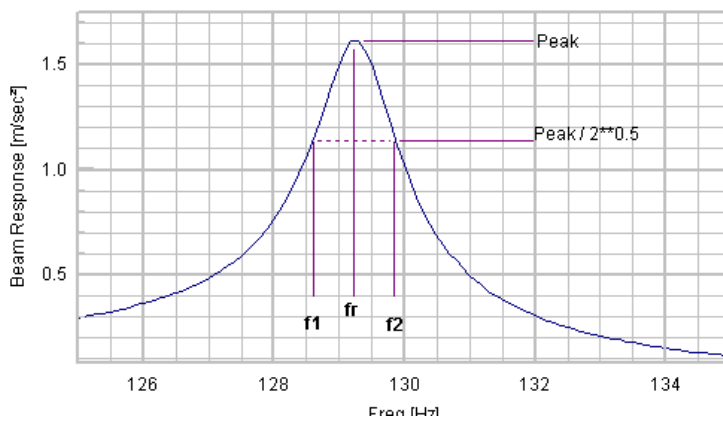
$\Omega_r = \frac{\omega_r}{\omega}$  第 r 个固有频率和激振频率的比

$\eta_r$  模态 r 的模态阻尼

$\psi_{rj}$  和  $\psi_{rk}$  点 j 和 k 模态 r 的振幅

所求参数为  $\omega_r$ ,  $\eta_r$  和  $\psi_{rj}$

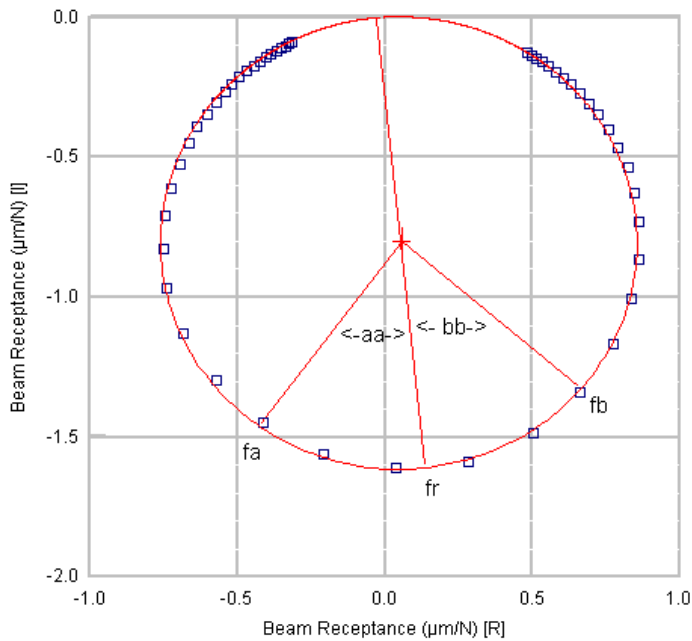
**2.2 半功率法:** 通过峰值点（共振频率点）及其两侧半功率点位置确定阻尼



迟滞阻尼:  $\eta_r = (f_2^2 - f_1^2)/2f_r^2$

粘滞阻尼:  $\zeta_r = \eta_r/2$

**2.3 圆拟合法:** 通过奈奎斯特圆求得相关模态参数



迟滞阻尼:  $\eta_r = \frac{(\omega_a^2 - \omega_b^2)}{\omega_r^2(\tan(aa/2) + \tan(bb/2))}$ ;  $\omega_i = 2\pi f_i$

## 2.4 多自由度拟合

先对各模态做线性最小二乘圆拟合和线性最小二乘参数拟合, 求得初始估计值和模态参数。通过这些初始值再用非线性最小二乘对各阶模态做同步拟合。

$$\alpha(i\omega) = \alpha_0^* + \sum_{r=1}^N \left( \frac{F_r + i\omega G_r}{\omega_r^2 - \omega^2 + i2\omega\omega_r\zeta_r} \right) e^{j\varphi}$$

试验三种方式, 我们都进行了试验, 计算结果下差异不大, 我们选定最后一种方式。

## 3. 试验方法及结果

3.1 超声刀的工作原理是利用超声波发生器将电信号转换成高频振荡信号传递给换能器, 再由换能器将高频振荡信号转换为高频机械信号产生高频机械振动, 然后经过变幅杆的作用把振幅放大, 最后把机械振动传递到连接变幅杆的超声刀部分, 进而通过接触作用于生物组织以实现组织切除和血管止血的功能。<sup>[5]</sup>

超声手术刀近年来逐渐有取代电刀的趋势。但在实际应用中, 超声手术刀的设计需要考虑很多因素。首先, 超声波会引起手术刀的高频振动, 时间长会发热; 另外, 由于刀柄细长, 振动的时候会产生扰动, 这些都会影响手术进度和精度。另外, 应力分布不均匀, 会减少刀具的使用寿命。因此, 固有频率测试是手术刀性能研究的重要一环。目前这方面的研究文章主要以 ANSYS 软件模拟分析为主, 算法仿真进一步需要试验测试来检测, 我们为此研发了这个工作于超声范围的固有频率测试设备。

3.2 本次测试主要关注超声手术刀不通电、不带壳纯手术刀、自由态下的固有频率。其他相关测试方向应改动三个相关条件(带手柄/不带手柄纯手术刀、自由悬挂/约束状态、通电/不通电)分别测试, 以更好地确认手术刀不同状态下的固有频率是否符合要求。为保护客户信息, 将测试频段圈定在 44~48kHz, 给出实验示例, 实际可测范围可为 0~64kHz, 可任意调整观察范围。

3.3 通常情况下, 锤子质量越小激励出的固有频率越高, 高频要尽量选择硬质的小锤; 但另一方面, 没有消声室环境, 受这个试验条件制约, 锤头质量过小引起敲击声音过轻, 超高频传声器捕捉信号困难, 尤其超声波段信噪比会变差。因此锤头要硬质, 但质量不宜过重也不宜过轻。试验了多种锤子, 感觉约 20g 的钢质锤头效果较好。(若条件允许, 应选择消声室环境试验效果会更好)

## 3.4 试验过程



图 1 将手术刀软橡皮绳悬挂

进入软件界面配置完毕，为减少减小随机误差，选择平均三次，开始敲击。为防止遗漏模态，依次敲击左中右三段。

结果如下，红色为最近一次敲击的结果，灰线为三次敲击的平均，蓝线将黄色区间内的灰线做了一定的平滑拟合。

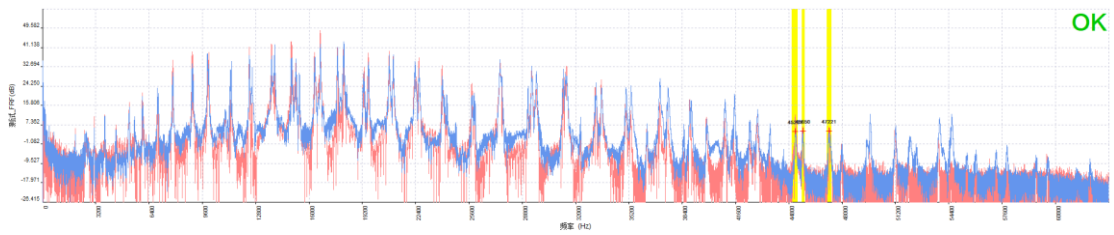


图 2 全带宽频谱图

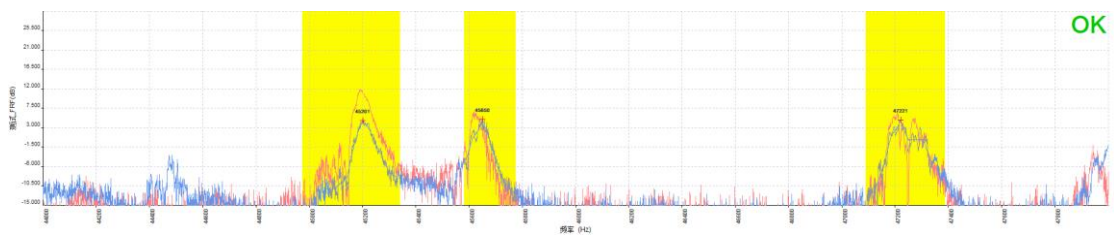


图 3 X 轴范围 44~48kHz 放大图

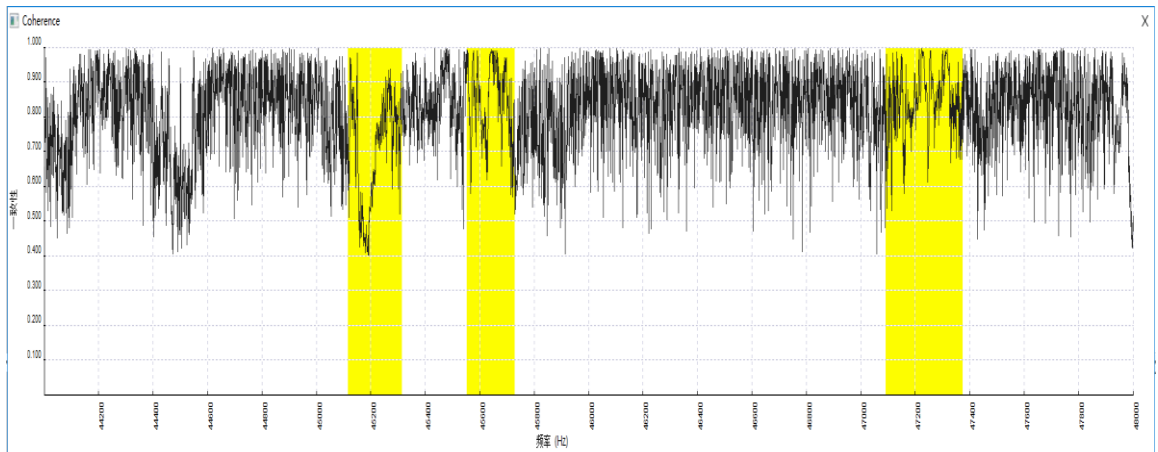


图 4 X 轴范围 44~48kHz coherence 曲线图

一致性 (coherence) 的计算方法如下:

$$C = |G_{XY}|^2 / [G_{XX} * G_{YY}]$$

其中,

$$G_{XX} = \sum X^*(f) * X(f)$$

$$G_{XY} = \sum X^*(f) * Y(f)$$

$$G_{YY} = \sum Y^*(f) * Y(f)$$

X 为激励信号, Y 为响应信号

详细结果:

固有频率区间设置和测试结果表

3 阶数 3% 公差范围 导入图纸定义文件 保存现场定义模板 导入现场定义模板

Mode	标称频率(Hz)	公差下限(Hz)	公差上限(Hz)	峰值	固有频率(Hz)	品质因数	阻尼系数	OK/NG		
1	45159.2	44975.50	45342.98	4.69	45201.17	883.52	0.0006	OK		
2	45679.3	45581.29	45777.28	4.98	45650.39	1184.38	0.0004	OK		
3	47240.5	47091.31	47389.75	4.86	47220.70	1026.59	0.0005	OK		

确定 取消 应用

试验自动记录结果:

20190220管理员.xls - Excel

序号	操作员	零件号	时间	检测结果	f1	f2	f3	P1	P2	P3	Q1	Q2	Q3	Damp1	Damp2	Damp3
20	管理员	ProductSelNo_023	2019/2/20 11:49	OK	45201.2	45650.4	47220.7	4.7	5.0	4.9	883.5	1184.4	1026.6	0.0006	0.0004	0.0005

注：精度、重复性实验详见附录 1。

3.5 本次测试的局限以及规范测量可能的方向：不同方向、不同部位的敲击结果并不相同，手术刀结构虽然不十分复杂但长度较长，不同部位的敲击结果可能并不一致，简单的敲击左中右三段并求均值的所得测量结果可能并不客观。根据具体应用需求对不同位置的敲击结果做不同要求可能更符合实际情况。

3.6 实验总结：在非消声室条件下，改进后的 TYH801 可测范围达到了 64kHz，精度在 0.5%以内，重复性再现性良好。能够很好地满足刚度大、体积小、超声频率范围的物体的固有频率测试需求。

## 参考资料

1. <https://wenku.baidu.com/view/d48adf053186bceb18e8bb26.html>
2. TS4-15-137, Frequency Response Measurements on Carriers, Calipers, Pads and Rotors for CAE Correlation and Quality Control
3. A0007G8845, NVH RELEASE PROCESS FOR CALIPER ASSEMBLIES IN DISC BRAKES – SUPPLIER EXTRACT
4. Gaukroger, D.R., Skingle, C.W. and Heron, K.H. Numerical Analysis of Vector Response loci J.Sound and Vibration, 29(3), pp341-53, 1973
5. 索建军, 王彤宇, 王小毓. 超声手术刀振动特性分析, 长春理工大学学报 (自然科学版), 2017, 40 (2): 60-63
6. 陈颖, 罗晓宁, 史文勇. 超声手术刀的研制现状与应用 [J]. 生物医学工程杂志, 2005, 22 (2): 377-380.
7. 李力怡, 林书玉. 超声手术刀刀头纵振动的研究 [J]. 声学技术, 2011 (10): 38-40.
8. 吴敏, 汤黎明, 吴巍. 多功能超声外科手术装置的原理及设计 [J]. 医疗装备信息, 2004 (10): 13-15.
9. 周红生, 许小芳. 超声手术刀的优化设计 [J]. 声学技术, 2012 (2): 48-52.
10. 周昌玉, 贺小华. 有限元分析的基本方法及工程应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006

## 附录 1:

### 10 次重复固有频率测试结果

	f1	f2	f3
1	45204	45642	47290
2	45206	45620	47307
3	45237	45660	47242
4	45202	45720	47336
5	45252	45657	47323
6	45273	45662	47219
7	45228	45689	47258
8	45226	45619	47207
9	45203	45697	47224
10	45201	45650	47221
均值	45223	45662	47263
最小值	45201	45619	47207
最大值	45273	45720	47336
标准差	24.67	32.40	47.68
标准差/均值	0.055%	0.071%	0.101%