

刹车卡钳固有频率测试

苏州太阳花感知技术有限公司

孙静远

摘要：出于制动系统安全性、噪声等级、工件刚度一致性和铸模一致性的考虑，固有频率测试是刹车卡钳质检的重要一环。TYH801 固有频率测试系统较宽的频率测试范围和高精度完全满足了测试需要，所提供的 Q 因子和阻尼系数计算模块对工件性能具有重要的参考意义，此外，交互通信协议和自动判决模块为厂家将测试系统集成到生产或测试环节提供了可能。

关键词：卡钳 模态 固有频率 噪声 振动 品质因数 Q 因子 阻尼系数

1. 应用背景

刹车卡钳是制动系统中的重要构件。制动时，刹车盘与卡钳制动副的剧烈摩擦会引起振动，从而产生噪音。出于对系统安全性的考虑，制造厂商应避免刹车卡钳与其他组件（尤其是卡钳）产生共振；制动所引起的噪声等级也应被限制在允许范围以内以免造成用户的不适。

刹车卡钳固有频率测试也用于检测工件铸造过程的一致性。铝铸件、铁铸件、锻造件和粉末冶金工件，在制造过程中，容易产生裂纹，夹渣，化合物，外形缺失，充填不足，尺寸差异、球化率不合格、碳化物等问题，这些问题会使固有频率的范围发生变化。例如掺碳量的微小变化，可以使铸铁部件很多阶固有频率同时发生偏移，内部裂纹、夹渣、填充不足会使某阶固有频率变化或消失等等，汽车零部件厂及整车厂的出于质量控制要求，需要通过有效的检测手段来检测生产质量。固有频率的公差检测就是简单而且方便有效的工具。固有频率测试是质检的重要一环。

铸造过程的一致性测试，主要参考 TRWA0007G8845 标准：对每个铸模/图纸，抽测至少 75 个工件，要求工件的各阶模态在其均值 $\pm 3\%$ 的范围之内；新铸模也应比照原有铸模，生产出的工件应符合原有铸模的范围，即原有各铸模均值 $\pm 3\%$ 的范围。除卡钳固有频率测试程序外，我们还编写了批量测试结果的统计分析软件，完成标准的工件占比和箱图分析等功能。

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

ω 谐波激振频率

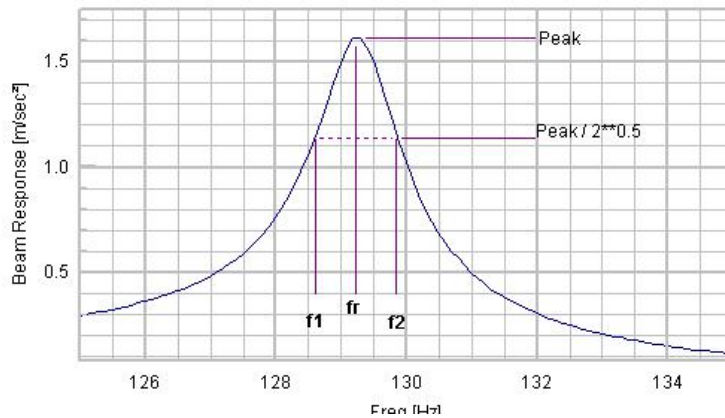
$\Omega_r = \frac{\omega_r}{\omega}$ 第 r 个固有频率和激振频率的比

η_r 模态 r 的模态阻尼

ψ_{rj} 和 ψ_{rk} 点 j 和 k 模态 r 的振幅

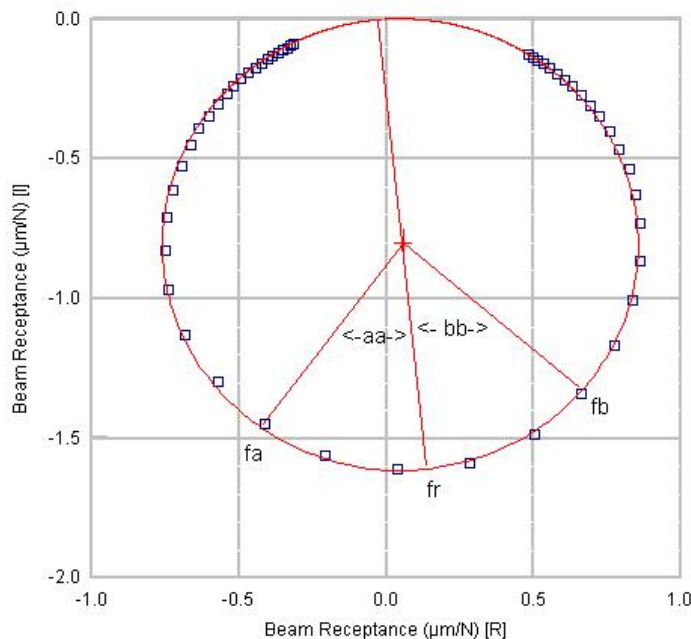
所求参数为 ω_r , η_r 和 ψ_{rj}

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: $\zeta_r = \eta_r / 2$



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

2.3. 圆拟合法：通过奈奎斯特圆求得相关模态参数

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。

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

由于材料的阻尼较小，模态也不密集，三种计算方法我们都进行了多次试验，结果相差很小。我们选用最后一种为程序的标准计算方法，后面的计算结果都是用这种计算方法完成的。

3. 使用 TYH801 固有频率测试卡钳固有频率

TYH 固有频率测试系统硬件方面采用进口的高性能传感器和本公司研发的高精度、高性能数据采集器。设备简便、稳定、操作简单，且已应用于多家汽车部件生产厂的噪声振动测试系统。软件方面总结了国际和国内目前主流的固有频率测试技术，且充分考虑到了厂家和客户需求，提供 Q 因子和阻尼系数的计算、生产线工件合格判定、合理的数据管理和用户管理机制等多项功能和服务。

3.1. 范围和精度

TYH801 固有频率测试系统的分析范围 0-32kHz。固有频率测量 10kHz 以下精度 $\pm 1\%$ ，10kHz-20kHz 精度 $\pm 2\%$ 。设备的重复性再现性误差小于 10%。

目前市场上的固有频率测试仪测试范围大多在 10kHz 以下，且精度往往没有经过具体产品的比较验证。TYH801 与丹麦 BK 和比利时 LMS 以及英国 Prosig 固有频率测试系统在用户处有多次对标和比较，测量精度几乎一样，而且 TYH801 固有频率分析的频率测试范围更宽。和英国 Prosig 固有频率测试系统测试数据比对表见附录 1。

对于刹车卡钳固有频率测试，TS4-15-137 中指明所测范围为 0-16kHz。TYH801 较宽的频率测试范围和高精度完全满足测试需要。

3.2. Q 因子阻尼系数

TYH801 固有频率测试系统在计算固有频率的同时，为每阶固有频率计算其 Q 因子和阻尼系数。部分高端汽车系统集成商在要求汽车部件生产商提供部件的，有时会要求同时提供部件在该固有频率处的 Q 因子或者阻尼系数。固有频率反应工件容易被什么频率激振，Q 因子反应工件被激振的难易程度，而阻尼系数反应振动衰减的快慢。这三者对于工件性能具有重要的参考意义。

目前市场上的固有频率测试仪，一般不计算 Q 因子，或需要额外购买昂贵的模态分析模块在事后进行分析处理。我们在客户的一再要求下，添加了 Q 因子和阻尼系数的自动计算模块，在计算固有频率的同时计算其 Q 因子和阻尼系数。

TYH801 可以在给出固有频率的同时，根据客户标准判断工件是否合格，从而为生产线上大批量零件的快速测试提供实现前提，可以方便的集成应用到生产线检测上。操作简便，仅需加载一个用户定义文件即可形成自动判决模块。

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	3342.8	3242.49	3443.06	36.61	3342.77	51.30	0.0097	OK		
2	4317.4	4187.86	4446.90	27.40	4317.38	342.67	0.0015	OK		
3	4812.5	4668.13	4956.88	38.99	4812.50	438.02	0.0011	OK		
4	5721.7	5550.03	5893.33	44.04	5721.68	636.95	0.0008	OK		
5	7555.7	7328.99	7782.33	41.54	7558.59	42.49	0.0118	OK		
6	8067.4	7825.36	8309.40	39.51	8067.38	69.19	0.0072	OK		
7	8530.6	8389.13	8672.14	39.15	8445.31	19.73	0.0253	OK		
8	9993.2	9693.37	10292.96	22.64	9988.28	41.41	0.0121	OK		
9	12472.5	12310.80	12634.24	23.74	12548.83	6.34	0.0789	OK		
10	13126.0	12732.20	13519.76	21.38	13071.29	5.98	0.0836	OK		
11	13737.3	13325.19	14149.42	20.64	13348.63	836.88	0.0006	OK		
12	14934.6	14486.53	15382.61	20.12	14939.45	2.75	0.1819	OK		
13	15556.6	15089.94	16023.34	17.43	15583.98	27.88	0.0179	OK		
14	17542.0	17015.73	18068.25	12.64	17546.88	62.49	0.0080	OK		

苏州太阳花感知技术

确定 取消 应用

图 3 固有频率测试结果表

3.3. 自动判断工件是否合格

工件被敲击后，在计算固有频率频率时，自动判断这个工件是否合格，从而为生产线上大批量零件的快速测试提供实现前提，可以方便地集成应用到生产线检测上。TYH801 固有频率测试系统可以输入工件参数的容许范围上下限（公差范围），就可以形成自动判决的模版。一旦形成，判决模版具有持续化机制。

对于有设计公差容限的，操作过程非常简单，只要加载一个用户定义的公差文件即可。更换产品类型时，再加载新的公差文件即可。

如果手里有个刹车盘或卡钳，却没有设计公差容限，可以利用自动按钮功能，程序协助用户搜索前 N 阶模态，计算一个程序建议的模版设置，提供给用户作为参考。用户可以直接使用，一般情况下，手工稍作修改即可形成自动判决模版。也可以完全手工输入各个参数（支持视图和表格两种修改方式），形成判决模版。

3.4. 用户管理和数据管理机制

TYH801 会将操作员、时间、工件序号等一并记录在 Excel 表格中，同时会将原始测试数据存入相应测试目录，确保任何时候都可以回放并计算结果，极大的方便了质监部门数据统计和数据检索。此外，TYH801 有完善的用户管理机制，区分操作员和管理员权限，便于设备日常维护和事后追责。

3.5. 客户服务与技术支持

除了配套的固有频率测试系统使用培训以外，我们还提供有力的技术支持和咨询服务。对于客

户提出的合理要求，会尽可能地予以满足。我们期待也正实践与客户共同进步。

3.6. 便于自动化集成（可通过网络控制）

为方便客户将 TYH801 固有频率测试系用集成进生产或测试环节，我们提供相应的通信协议，见附录 1。控制台可向 TYH801 发送零件号等信息，并控制测试系统的启动和停止。TYH801 将根据收到的指令进行工作，并在检测结束后把检测结果发送至控制台。

4. 应用实例

4.1. 台州 XXXX 用户卡钳固有频率测试



图 4 固有频率测试现场

工件置于厚海绵垫上，传感器粘结在工件指定位置处，电脑连接采集器。敲击后，采集器接收传感器传递的信号，软件处理信号后显示结果。对标结果完全符合要求。

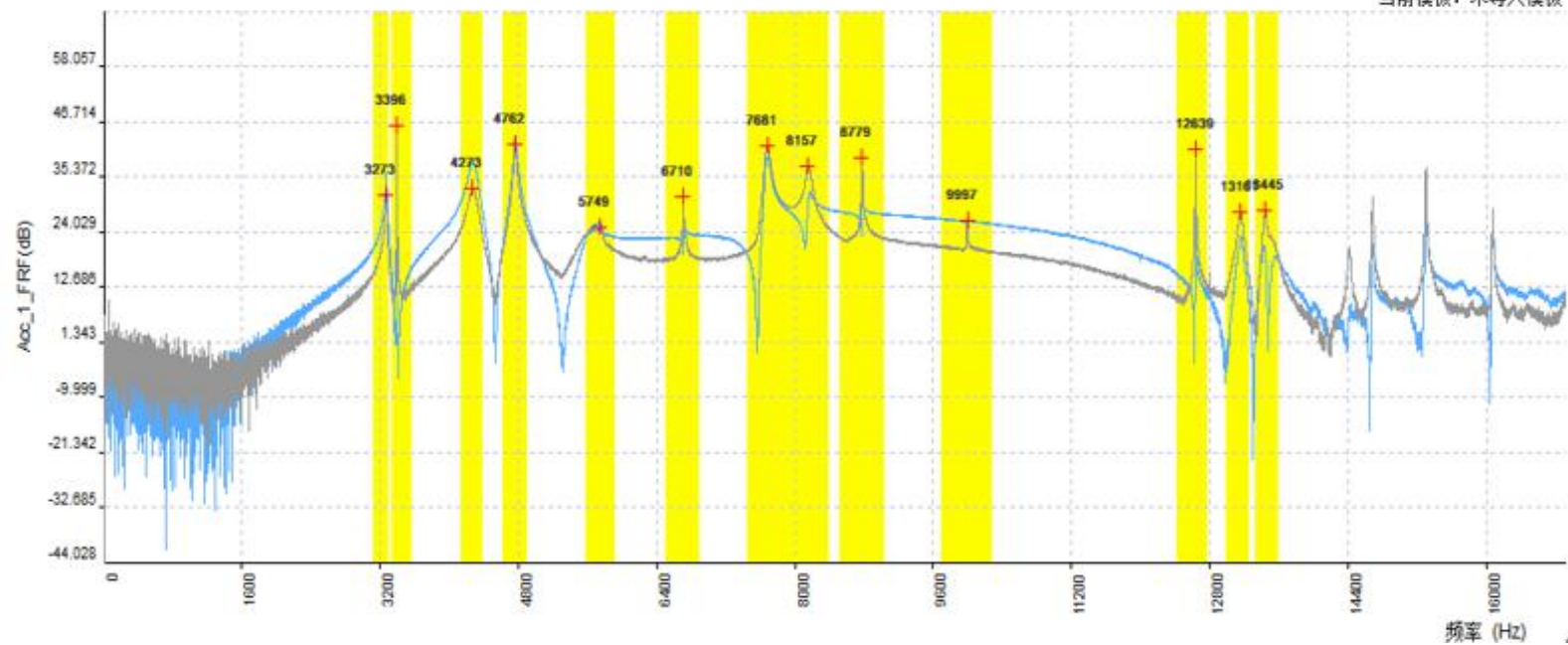


图 5 固有频率测试 FRF 图 (无论那种敲击方式, 可以在 20kHz 的范围内可以清楚地分辨前 16 阶)
 (其中, 蓝色曲线: 卡钳爪部里侧敲击 灰色曲线: 卡钳耳部敲击)

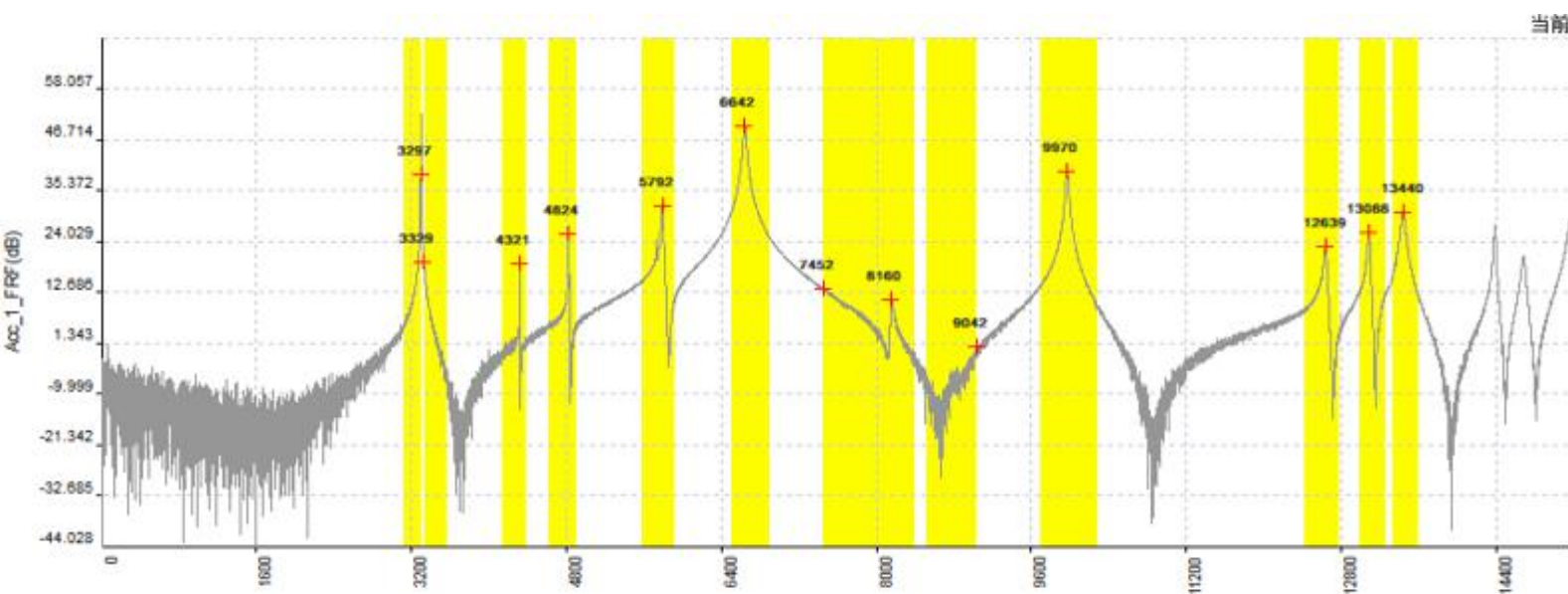


图 6 固有频率测试 FRF 图 (钳爪部内侧敲击)

4.2. 宁波 XXXX 用户卡钳固有频率测试

和客户一起探讨了 TRWA0007G8845 标准后, 客户提出需要在工件测试结果的基础上, 绘制统计图表 (工件占比图、箱对比图)。为此, 我们提供程序实现了 TRWA0007G8845 的要求。

在执行 RWA0007G8845 标准的过程中, 我们根据标准的提示, 自己开发了一套批量测试结果的统计处理软件, 实现了标准的上工件占比图、箱图对比等比较方法 (见下图)。

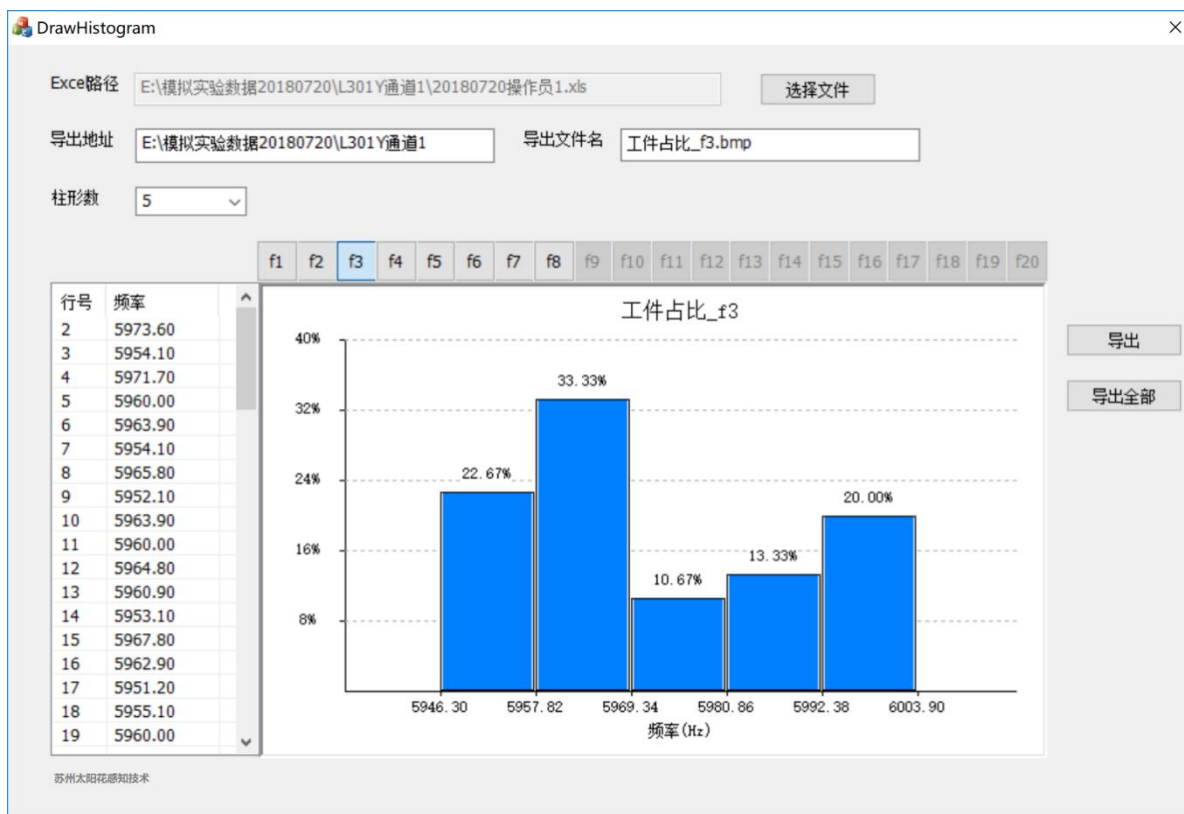


图 7 太阳花的工件占比图程序界面

4.3. 卡钳固有频率测试用户的其它要求

卡钳固有频率测试通常使用质量非常小的加速度传感器来测量响应新号，使用蜡粘或磁铁方式。可否使用传声器让测试的过程更加快速。苏州太阳花感知技术有限公司已经完成试验和改进，让同一台 TYH801 固有频率测试仪，既能使用微型加速度传感器也可以使用宽带传声器测试卡钳固有频率，完全满足用户的要求。但是在车间或噪声较大的场合，传声器测试固有频率的方法会受到限制。



图 8 左图使用微型加速度传感器测试 右图使用宽频传声器测试

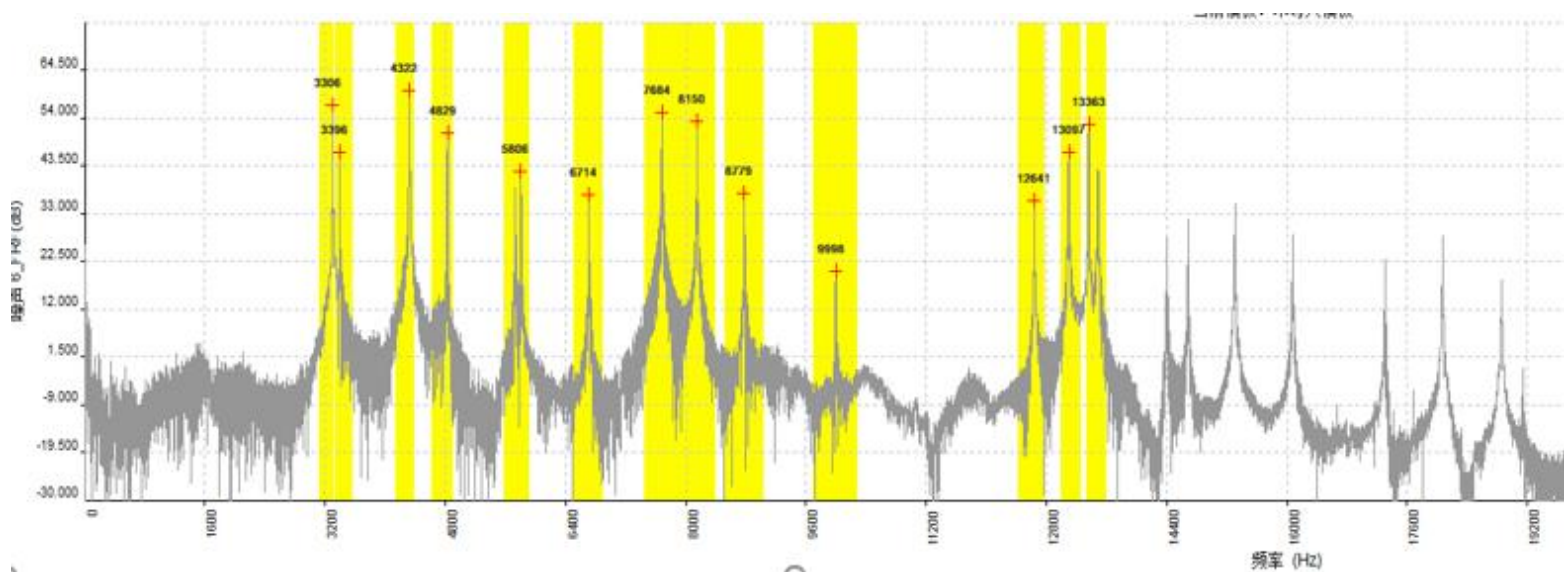


图 9 使用传声器测试卡钳固有频率结果图（连续敲击纵向爪部和耳部）

5 总结

TYH801 固有测试系统充分总结了国际和国内目前主流的固有频率测试技术，TYH801 测试系统的测试精度和测试范围可以与市场上高端的国外产品相媲美；TYH801 具有 Q 因子的计算功能，这是市场上几乎所有的同类产品所不提供的；另外，TYH801 可以自动检测零件是否合格，方便生产线检测集成，这也是市场上几乎所有的同类产品没有提供的功能；在测试数据管理方面给出更加合理的机制，非常方便质检部门对数据的统计和分析。

采用国际先进的高性能微型传感器，信号采集设备采用本公司研发的高精度、高性能的数据采集器(这种采集器已经应用于多家汽车部件生产厂的噪声振动测试系统中，性能稳定可靠)。设备简便、稳定、操作简单。目前，所有用户给予很高评价。

参考资料

1. <http://www.docin.com/p-1612106662.html?docfrom=rrela>
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. Gaukroger, D.R., Skingle, C.W. and Heron, K.H. The Derivation of Equations of Motion from Response Data and its Application in Flutter Testing. Royal Aircraft Establishment Technical Report, TR 73051, June 1973

6. Hillary B. and Ewins DJ. The use of Strain Gauges in Force Determination and Frequency Response Function Measurements, Proceeding of The 2nd IMAC, 1984: 630
7. Bartlett F D. and Flannelly W D. Modal Verification of Force Determination for Measuring Vibration loads, Journal of the American Helicopter Society, 1979: 10
8. Giansante N., Jones R. and Calapodas N J. Determination of in-flight Helicopter Loads, Journal of the American Helicopter Society, 1982: 58
9. 傅志方. 振动模态分析与参数辨识. 北京: 机械工业出版社, 1990
10. Thomson W T. Theory of Vibration with Applications, 2nd Ed. Prentice-Hall, INC, Englewood Cliffs, N. J. 1981
11. Ewins D J. Modal Testing: Theory and Practice, RSPLTD. 1986
12. Newland DE. An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis. Longman Group Limited. 1975
13. Kammer DC. Sensor Placement for On-orbit Modal Identification and Correlation of Large Space Structure, J. of Guidance, Control and Dynamics, 1991 14

附录 1:

客户与太阳花通信协议（固有频率版）

一、客户发往太阳花数据包格式

1 停止太阳花工作

序号	字节位置	名称	类型	含义
1	0 -3	标识码	Long	固定值 0x00230512 客户发往太阳花
2	4 -7	命令码	Long	固定值 0xC0D00000 停止工作命令
3	8-11	数值	Long	暂填 0 值，以后根据需要再定义
4	12-15	数值	Long	暂填 0 值，以后根据需要再定义
5	16-511	保留	Long	填 0 值

```
struct PKG_CUSTUMER2TYH_STOP{  
    int direction;  
    int cmd;  
    int resv1;  
    int resv2;  
    BYTEresv[512-sizeof(int)*4];  
};
```

2 启动太阳花工作

序号	字节位置	名称	类型	含义
1	0 -3	标识码	Long	固定值 0x00230512 客户发往太阳花
2	4 -7	命令码	Long	固定值 0xC0D00001 开始工作命令
3	8-11	数值	Long	暂填 0 值，以后根据需要再定义采样率
4	12-15	数值	Long	暂填 0 值，以后根据需要再定义通道号
5	16-511	保留	Long	填 0 值

```
struct PKG_CUSTUMER2TYH_START{  
    int direction;  
    int cmd;  
    int resv1;  
    int resv2;  
    BYTEresv[512-sizeof(int)*4];  
};
```

3 传递操作员名字

序号	字节位置	名称	类型	含义
1	0 -3	标识码	Long	固定值 0x00230512 客户发往太阳花
2	4 -7	命令码	Long	固定值 0xC0D00002 操作员名字传递
3	8-263	名字	unicode	操作员名字 unicode 字符串
4	264-511	保留	Long	填 0 值

```
struct PKG_CUSTUMER2TYH_OPERATORNM{
```

```

int direction;
int cmd;
char operatorm[256];
BYTE resv[512-sizeof(int)*2-256];
};

```

4 传递零件号参数

序号	字节位置	名称	类型	含义
1	0 -3	标识码	Long	固定值 0x00230512 客户发往太阳花
2	4 -7	命令码	Long	固定值 0xC0D00003 传递零件号
5	8-263	零件号	unicode	零件号 unicode 字符串
6	264-511	保留	Long	填 0 值

```

struct PKG_CUSTUMER2TYH_RPMPRESSPARTNUMBER {
    int direction;
    int cmd;
    char pumpnmb[256];
    BYTE resv[512-sizeof(int)*2-256];
};

```