



# 中华人民共和国国家标准

GB/T 34898—2017

## 微机电系统(MEMS)技术 MEMS 谐振敏感元件非线性 振动测试方法

Micro electromechanical system technology—Test method for the  
nonlinear vibration of the MEMS resonant sensitive element

2017-11-01 发布

2018-05-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局  
中国国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 ..... I

1 范围 ..... 1

2 规范性引用文件 ..... 1

3 术语和定义 ..... 1

4 敏感元件非线性振动测试特性参数 ..... 1

5 测试方法及其选用原则 ..... 2

    5.1 光学测试法 ..... 2

    5.2 电学测试法 ..... 2

6 敏感元件非线性振动幅频响应和相频响应测试方法 ..... 2

    6.1 光学测试方法 ..... 2

    6.2 电学测试方法 ..... 3

7 敏感元件非线性振动频率响应弯曲系数测试方法 ..... 4

8 敏感元件非线性跳跃振幅阈值测试方法 ..... 5

9 非线性振动引起的敏感元件频率偏移测试方法 ..... 5

    9.1 自激闭环系统、锁相闭环系统和锁幅闭环系统的频率偏移 ..... 5

    9.2 间歇激励闭环系统的频率偏移 ..... 5

附录 A（规范性附录） 敏感元件非线性振动数学模型和弯曲系数 ..... 6

附录 B（规范性附录） 敏感元件频率响应非线性跳跃 ..... 9

附录 C（规范性附录） 非线性振动引起的敏感元件的频率偏移 ..... 10

## 前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国微机电技术标准化技术委员会(SAC/TC 336)提出并归口。

本标准起草单位:北京遥测技术研究所、中机生产力促进中心。

本标准主要起草人:李庆丰、金小锋、李海斌、朱悦、程红兵。

# 微机电系统(MEMS)技术

## MEMS 谐振敏感元件非线性

### 振动测试方法

#### 1 范围

本标准规定了谐振式传感器中 MEMS 谐振敏感元件(以下简称敏感元件)非线性振动特性参数的测试方法。

本标准适用于敏感元件在研制和生产过程中关于非线性振动特性和敏感元件闭环系统频率偏移的测试,其他非 MEMS 敏感元件可参考使用。

#### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 2298 机械振动与冲击 术语
- GB/T 26111 微机电系统(MEMS)技术 术语
- GB/T 26112 微机电系统(MEMS)技术 微机械量评定总则

#### 3 术语和定义

GB/T 2298 和 GB/T 26111 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

##### 3.1

**非线性振动 non-linear vibration**

随着振动幅度的变化,弹性恢复力与位移不成线性关系的振动。

##### 3.2

**非线性跳跃 non-linear jump**

当振动系统的振动幅度超过某一阈值时频率响应曲线的跳跃现象。

##### 3.3

**频率偏移 frequency deviation**

敏感元件闭环系统输出的频率相对于敏感元件固有振动频率的偏移。

#### 4 敏感元件非线性振动测试特性参数

敏感元件非线性振动测试的特性参数主要包括:

- a) 非线性振动幅频响应  $A(\omega)$ ,无量纲;
- b) 非线性振动相频响应  $P(\omega)$ ,单位为弧度(rad);
- c) 非线性振动幅频响应弯曲系数  $b$ ,单位为弧度每秒二次方米( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ );
- d) 非线性跳跃振幅阈值  $a_c$ ,单位为米(m);



- e) 自激闭环系统、锁相闭环系统和锁幅闭环系统的频率偏移率  $E_{\omega_1}$ , 无量纲;
- f) 间歇激励闭环系统频率偏移率  $E_{\omega_2}$ , 无量纲。

## 5 测试方法及其选用原则

### 5.1 光学测试法

激光多普勒测振方法(GB/T 26112)、全息照相及其他可以提供相当功能和精度的测试方法适用于测量 MEMS 谐振敏感元件的非线性振动。

### 5.2 电学测试法

电学测试法是指利用谐振器自身的拾振单元将谐振敏感元件的振动转化为电信号,之后利用锁相放大器对此电信号进行检测,从而获得振动非线性特性的测试方法。当传感器封装完毕后,无法进行光学测试时应选用电学测试法。

## 6 敏感元件非线性振动幅频响应和相频响应测试方法

### 6.1 光学测试方法

#### 6.1.1 测试设备

光学测试法测试系统组成如图 1 所示,主要测试设备包括:

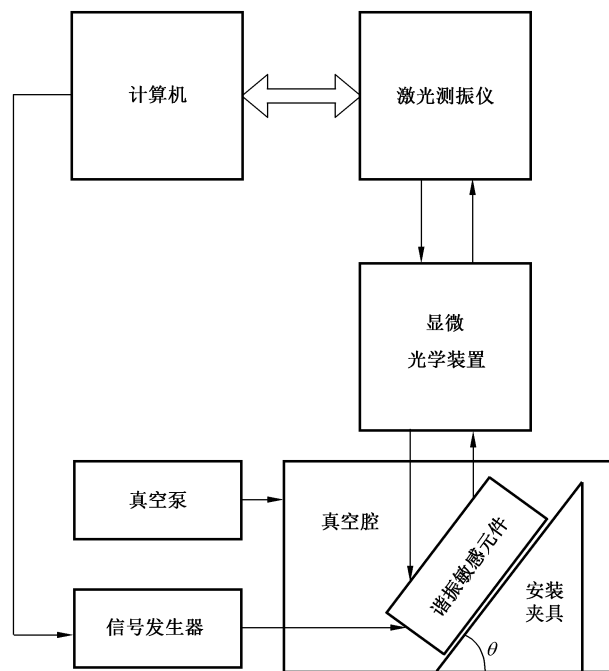


图 1 光学测试法测试系统原理框图

- a) 激光测振仪;
- b) 显微光学装置;
- c) 信号发生器;

- d) 真空腔；
- e) 安装夹具；
- f) 真空泵,或与此相当的设备。

### 6.1.2 测试条件和注意事项

测试条件和注意事项包括：

- a) 测试环境温度保持  $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度应控制在  $30\% \sim 70\%$ ,真空腔的真空度可根据敏感元件的实际工作环境施加；
- b) 调节显微光学装置,使汇聚到敏感元件表面的光斑不能超出敏感元件表面；
- c) 对于透光性敏感元件,如石英敏感元件,激光测振仪的光斑应汇聚于敏感元件的金属电极表面,以增加激光测振仪接收的反射光强度；
- d) 敏感元件在安装夹具上的固定,以及安装夹具在真空腔中的固定应牢固可靠,避免测试过程中发生移位,影响测试精度；
- e) 对于离面振动的敏感元件,夹具安装面与水平面的夹角  $\theta = 0^{\circ}$ ;对于面内振动的敏感元件,应根据被测敏感元件的几何形状调节夹具安装面与水平面的夹角  $\theta$ ,使激光测振仪获得较高的检测信号信噪比；
- f) 真空泵和真空腔之间的连接采用柔性波纹管,真空泵与真空腔、显微光学装置和激光测振仪之间应采取有效的振动隔离,真空腔设备可调至规定的真空度；
- g) 激光测振仪工作过程中真空泵应处于关闭状态。

### 6.1.3 测试步骤

测试步骤如下：

- a) 根据敏感元件固有频率估计值设置振动激励源,在以固有频率为中心的较宽频率范围内进行初次频率扫描,根据激光测振仪测得的敏感元件振动位移计算出幅频响应和相频响应,并记录谐振频率；
- b) 设置振动激励源进行二次频率扫描,扫描频率间隔减小为初次扫描时的二分之一,频率扫描范围约为半功率带宽的 10 倍,根据激光测振仪测得的敏感元件振动位移计算出幅频响应和相频响应,并记录谐振频率；
- c) 将初次和第二次频率扫描获得的谐振频率进行对比,若两次结果的偏差小于或等于规定值,则两次测量结果均可作为最终的敏感元件幅频特性和相频特性。若两次结果的偏差大于规定值,则继续降低频率扫描间隔,进行频率扫描,直至与前一次测得的谐振频率偏差小于或等于规定值,将最后一次获得的频率响应作为最终测试结果。

## 6.2 电学测试方法

### 6.2.1 测试设备

电学测试法测试系统组成如图 2 所示,主要测试设备包括：

- a) 锁相放大器；
- b) 信号发生器；
- c) 数据采集设备。

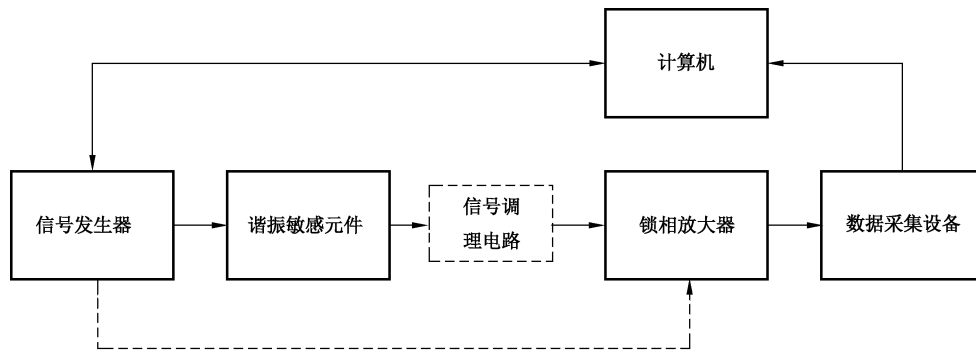


图 2 电学测试法测试系统原理框图

### 6.2.2 测试条件和注意事项

在图 2 所示的电学测试法测量系统硬件组成上,数据处理环节应根据敏感元件的振动检测方式进行添加和删除,当敏感元件的输出反映敏感元件的振动速度时(如磁电振检测方式),应添加数据处理环节,将敏感元件的输出信号转换为振动位移信号后再输入锁相放大器;当敏感元件的输出反映敏感元件的振动位移时(如电容检测方式、压敏电阻检测方式等),去除数据处理环节,将敏感元件的输出直接输入锁相放大器。

### 6.2.3 测试步骤

测试步骤为:

- 根据敏感元件固有频率估计值设置信号发生器扫描频率,在以固有频率为中心的较宽频率范围内进行初次频率扫描,根据锁相放大器测得的敏感元件振幅和相位计算出幅频响应和相频响应,并记录谐振波形;
- 设置信号发生器进行二次频率扫描,扫描频率间隔减小为初次扫描时的二分之一,频率扫描范围约为半功率带宽的 10 倍,根据锁相放大器测得的敏感元件振幅和相位计算出幅频响应和相频响应,并记录谐振波形;
- 将初次和第二次频率扫描获得的谐振频率进行对比,若两次结果的偏差小于或等于规定值,则两次测量结果均可作为最终的敏感元件幅频特性和相频特性。若两次结果的偏差大于规定值,则继续降低频率扫描间隔,进行频率扫描,直至与前一次测得的谐振频率偏差小于或等于规定值,将最后一次获得的频率响应作为最终测试结果。

## 7 敏感元件非线性振动频率响应弯曲系数测试方法

测试方法为:

- 按第 6 章的要求和步骤测试敏感元件的非线性幅频响应,得到谐振频率  $\omega_r$  和谐振峰值  $a_r$ ;
- 将谐振频率  $\omega_r$  和谐振峰值  $a_r$  代入附录 A 中的式(A.6),可得到频率响应弯曲系数,见式(1):

$$b = \frac{\omega_r - \omega_n}{a_r^2} \dots\dots\dots (1)$$

其中,敏感元件的固有频率  $\omega_n$  可依据元件的设计值进行确定。

## 8 敏感元件非线性跳跃振幅阈值测试方法

测试方法为：

- a) 按第 7 章中的测试方法得到敏感元件的频率响应弯曲系数；
- b) 敏感元件的非线性跳跃现象如附录 B 中的图 B.1 所示，将弯曲系数  $b$  代入式(2)，即可得到敏感元件的频率响应发生非线性跳跃时的振幅阈值  $a_c$ 。

$$a_c = \sqrt{\frac{4\omega_n}{3\sqrt{3}Q|b|}} \dots\dots\dots (2)$$

式中：

$Q$  ——敏感元件的机械品质因子，无量纲；

$a_c$  ——振幅阈值，单位为微米( $\mu\text{m}$ )。

## 9 非线性振动引起的敏感元件频率偏移测试方法

### 9.1 自激闭环系统、锁相闭环系统和锁幅闭环系统的频率偏移：

- a) 按第 7 章中的测试方法得到敏感元件的频率响应弯曲系数；
- b) 将弯曲系数  $b$  代入式(3)，即可得到非线性振动引起的敏感元件自激闭环系统、锁相闭环系统和锁幅闭环系统的频率偏移，相对于敏感元件的固有频率  $\omega_n$  的偏移率。

$$E_{\omega 1} = \frac{ba_t^2}{\omega_n} \times 100\% \dots\dots\dots (3)$$

式中：

$a_t$  ——敏感元件振动幅度，单位为米(m)。

### 9.2 间歇激励闭环系统的频率偏移：

- a) 按第 7 章中的测试方法得到敏感元件的频率响应弯曲系数；
- b) 将弯曲系数代入式(4)，即可得到非线性振动引起的敏感元件间歇激励闭环系统的频率偏移，相对于敏感元件的固有频率  $\omega_n$  的偏移率。

$$E_{\omega 2} = \frac{ba_t^2}{\omega_n} e^{-\frac{1}{Q}\omega_n t} \times 100\% \dots\dots\dots (4)$$

式中：

$t$  ——时间，定义断开激励信号的时刻为  $t=0$ ，单位为秒(s)；

$a_t$  —— $t$  时刻敏感元件振动幅度，单位为米(m)；

$e$  ——自然常数。



## 附 录 A (规范性附录)

### 敏感元件非线性振动数学模型和弯曲系数

#### A.1 非线性振动数学模型

MEMS 谐振敏感元件在简谐激励下非线性振动时可采用杜芬方程描述,见式(A.1):

$$\ddot{x} + \omega_n^2 x = -2\epsilon\zeta\dot{x} - \epsilon\alpha x^3 + F\cos(\omega t) \quad \cdots\cdots\cdots (A.1)$$

式中:

- $x$  —— 振动位移,单位为米(m);
- $t$  —— 时间,单位为秒(s);
- $\omega_n$  —— 固有振动频率,单位为弧度每秒( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ );
- $\zeta$  —— 阻尼因子,单位为每秒( $\text{s}^{-1}$ );
- $\alpha$  —— 非线性系数,单位为二次方秒每四次方米( $\text{s}^2 \cdot \text{m}^{-4}$ );
- $\epsilon$  —— 摄动参数,无量纲;
- $F$  —— 单位质量的激励力,单位为牛每千克( $\text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$ );
- $\omega$  —— 激励力角频率,单位为弧度每秒( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

#### A.2 非线性振动模型的解

非线性振动模型式(A.1)没有精确解析解,可通过摄动法得到其近似解析解,见式(A.2):

$$x = a\cos(\omega t - \varphi) + O(\epsilon) \quad \cdots\cdots\cdots (A.2)$$

式中:

- $a$  —— 敏感元件振动幅度,单位为米(m);
- $\varphi$  —— 敏感元件振动位移相对于等效激励力的相位延迟,单位为弧度(rad);
- $O(\epsilon)$  —— 为同阶无穷小符号。

振动幅度  $a$  与等效激励力角频率  $\omega$  的关系可用式(A.3)表示:

$$\omega = \omega_n + \frac{3\epsilon\alpha a^2}{8\omega_n} \pm \sqrt{\frac{F^2}{4\omega_n^2 a^2} - \epsilon^2 \zeta^2} \quad \cdots\cdots\cdots (A.3)$$

式(A.3)即为 MEMS 谐振敏感元件非线性振动幅度-频率响应的隐函数表示。

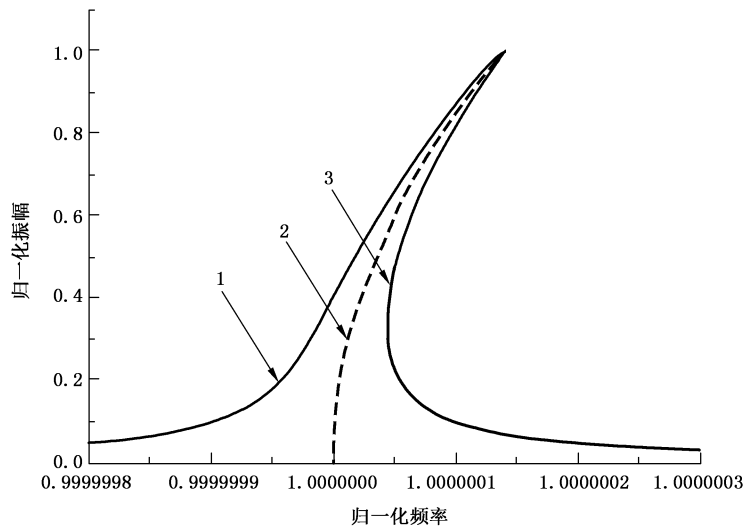
相位延迟  $\varphi$  与等效激励力角频率  $\omega$  的关系可用式(A.4)表示:

$$\omega = \omega_n + \frac{3k^2 a \epsilon}{32\omega_n^3 \mu^2} \sin^2 \varphi - \zeta \epsilon \cot \varphi \quad \cdots\cdots\cdots (A.4)$$

式中  $k = F/\epsilon$ 。式(A.4)即为 MEMS 谐振敏感元件非线性振动相移-频率响应的隐函数表示。

#### A.3 非线性振动幅频响应弯曲系数

根据式(A.3)得出 MEMS 谐振敏感元件非线性振动幅度-频率响应曲线如图 A.1 所示,响应曲线分为左支曲线和右支曲线,左支曲线和右支曲线的中间线为骨架曲线。



说明：  
1——左支曲线；  
2——骨架曲线；  
3——右支曲线。

图 A.1 谐振式 MEMS 敏感元件非线性振动幅度-频率响应曲线

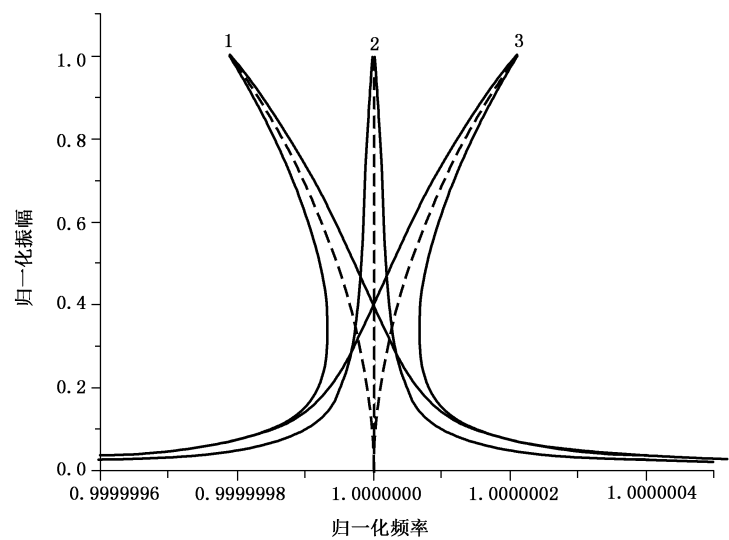
骨架曲线为一条抛物线,可用式(A.5)表示:

$$\omega = \omega_n + ba^2 \dots\dots\dots (A.5)$$

式(A.5)中的参数  $b$  称为弯曲系数,将测试得到的谐振角频率  $\omega_r$  和谐振峰值  $a_r$  带入式(A.5),即可得到弯曲系数,见式(A.6):

$$b = \frac{\omega_r - \omega_n}{a_r^2} \dots\dots\dots (A.6)$$

根据弯曲系数  $b$  的取值可以定量判别 MEMS 谐振敏感元件非线性振动的性质和强弱, $b$  取不同值时非线性幅度-频率响应曲线如图 A.2 所示:当  $b < 0$  时,非线性振动幅度-频率响应曲线向低频段弯曲,弹性恢复力与振动位移的比例关系随振动位移的增加而增大,表现为刚度软化非线性振动;当  $b > 0$  时,非线性振动幅度-频率响应曲线向高频段弯曲,弹性恢复力与振动位移的比例关系随振动位移的增加而减小,表现为刚度硬化非线性振动;并且  $|b|$  越大,非线性振动越强。当  $b = 0$  时,表现为线性振动。



说明：

1—— $b < 0$ ；

2—— $b = 0$ ；

3—— $b > 0$ 。

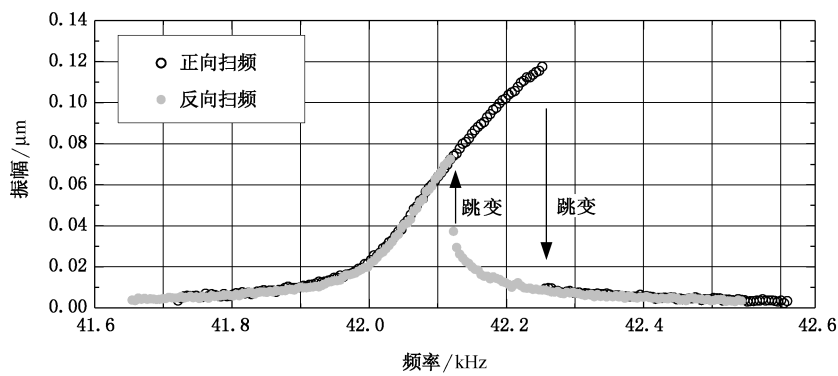


图 A.2 弯曲系数  $b$  取不同值时敏感元件非线性振动幅度-频率响应曲线

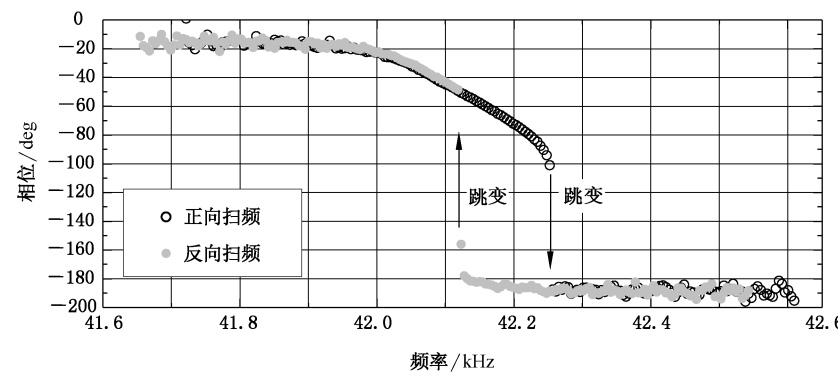
附录 B  
(规范性附录)

敏感元件频率响应非线性跳跃

当振动幅度超过某一阈值时,频率响应将发生非线性跳跃现象,如图 B.1a)、图 B.1b)所示。跳跃现象可能使敏感元件停振,相位跳跃可能使闭环系统失锁,敏感元件无法工作,因此有必要评估发生非线性跳跃的振幅阈值,以确保敏感元件实际振动的振幅小于该振幅阈值。



a) 幅度-频率响应



b) 相位-频率响应

图 B.1 MEMS 谐振敏感元件的非线性跳跃现象

## 附 录 C (规范性附录)

### 非线性振动引起的敏感元件的频率偏移

#### C.1 敏感元件频率偏移对谐振式传感器测量精度的影响

敏感元件的闭环系统按照所采用的固有频率跟踪原理主要可分为：自激闭环系统、锁相闭环系统、锁幅闭环系统和间歇激励闭环系统。这些闭环系统都是利用敏感元件线性振动状态下的相频特性或幅频特性实现对固有频率跟踪的，当敏感元件处于非线性振动状态时，幅频特性和相频特性均发生改变，使闭环系统无法准确跟踪固有频率的变化，引起谐振式传感器测量误差。

#### C.2 非线性振动引起的自激闭环系统频率偏移

处于自激闭环系统中的敏感元件所受的激励力和阻尼力相抵消，系统的频率输出等于敏感元件的无阻尼自由振荡频率，对比敏感元件非线性振动的无阻尼自由振动频率和固有振动频率可得敏感元件自激闭环系统的频率偏移。

#### C.3 非线性振动引起的锁相闭环系统频率偏移

处于锁相闭环系统中的谐振敏感元件的振动位移与输入激励信号之间维持 $-\pi/2$ 的相位差，敏感元件相频特性中与 $-\pi/2$ 相移对应的频率为系统的频率输出，对比该频率输出与敏感元件固有振动频率可得锁相闭环系统的频率偏移。

#### C.4 非线性振动引起的锁幅闭环系统频率偏移

锁幅闭环系统将敏感元件的频率输出锁相为幅频响应最大值对应的频率，将非线性振动时幅频响应最大值对应的频率与固有频率对比，得到非线性振动引起的锁幅闭环系统频率偏移。

#### C.5 非线性振动引起的间歇激励闭环系统频率偏移

在间歇激励闭环系统中，敏感元件的激励和振动的检测分时进行，在检测振动信号时断开激励信号，检测敏感元件的自由振动频率，将检测到的自由振动频率作为闭环系统的频率输出，将系统频率输出和敏感元件固有振动频率进行对比，可得到非线性振动引起的间歇激励闭环系统的频率偏移。