

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103363921 A

(43) 申请公布日 2013. 10. 23

(21) 申请号 201310285596. X

(22) 申请日 2013. 07. 09

(71) 申请人 中国工程物理研究院总体工程研究所

地址 621908 四川省绵阳市绵山路 64 号

(72) 发明人 牛宝良 张荣

(74) 专利代理机构 北京天奇智新知识产权代理有限公司 11340

代理人 杨春

(51) Int. Cl.

G01B 11/24 (2006. 01)

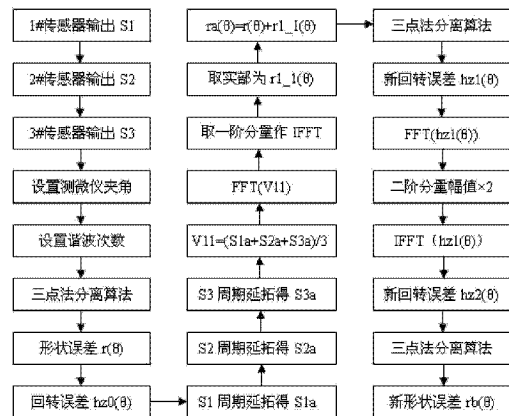
权利要求书1页 说明书5页 附图3页

(54) 发明名称

一种改进型三点法回转误差、圆度误差计算方法

(57) 摘要

本发明公开了一种改进型三点法回转误差、圆度误差计算方法,包括本发明通过对三个传感器信号的平移和加权平均,并利用频域滤波,有效获得了形状误差的一阶分量,使用该方法可明显改善形状误差与回转误差的分离精度,仿真表面,传感器无噪声干扰情况下,形状误差和回转误差的分离精度可达 10<sup>-8</sup>量级,能有效提高回转误差、圆度误差的测量精度。



1. 一种改进型三点法回转误差、圆度误差计算方法,包括三个位移传感器,三个所述位移传感器布置在圆柱零件外侧且分布在同一截面,所述转轴带动圆柱零件顺时针旋转,转角为  $\theta$  表示,转角为  $\theta$  取离散量  $i*d\theta$  ( $i=0, 1, 2, \dots, n-1, n$  是光栅编码器的线数,  $n*d\theta=360$  度),三个位移传感器的输出为第一传感器输出量  $S1(\theta)$ 、第二传感器输出量  $S2(\theta)$ 、第三传感器输出量  $S3(\theta)$ ,其特征在于:包括以下步骤:

步骤 1:对第一传感器输出量  $S1(\theta)$ 、第二传感器输出量  $S2(\theta)$ 、第三传感器输出量  $S3(\theta)$  进行三点法分离算法,得出一次形状误差  $r(\theta)$ 。

步骤 2:分别对第一传感器输出量  $S1$ 、第二传感器输出量  $S2$ 、第三传感器输出量  $S3$  进行周期拓展后得出第一传感器平移输出量  $S1a$ 、第二传感器平移输出量  $S2a$ 、第三传感器平移输出量  $S3a$ 。

步骤 3:对三个平移输出量进行相加平均得出平均平移输出量  $V11=(S1a + S2a + S3a)/3$ ,对所述平均平移输出量  $V11$  做傅立叶变换后,保留一阶分量,做逆傅立叶变换,取其实部,作为形状误差  $r(\theta)$  的第一阶分量的近似值  $r1\_1(\theta)$ ,第一阶分量近似值  $r1\_1(\theta)$  与所述一次形状误差值  $r(\theta)$  相加后得出二次形状误差值  $ra(\theta)$ ,根据二次形状误差值  $ra(\theta)$ ,通过三点回差算法计算出一次回转误差分量  $xa(\theta)$ 、 $ya(\theta)$ ;

步骤 4:把一次回转误差分量  $xa(\theta)$ 、 $ya(\theta)$  合成为一次回转误差幅值  $hz1(\theta)$ ,回转误差幅值  $hz1(\theta)$  做傅立叶变换后对其二阶分量的幅值乘以二后做逆变换得到二次回转误差幅值  $hz2(\theta)$ ,所述二次回转误差幅值  $hz2(\theta)$  分解得到二次回转误差分量  $xb(\theta)$ 、 $yb(\theta)$ ,根据二次回转误差分量  $xb(\theta)$ 、 $yb(\theta)$  通过三点回差算法计算二次形状误差  $rb(\theta)$ 。

2. 根据权利要求 1 所述的一种改进型三点法回转误差、圆度误差计算方法,其特征在于:所述第一传感器在 0 度,所述第二传感器在 90 度附近的( $i2*d\theta$ ),所述第三传感器的设置角度在 225 度附近( $i3*d\theta$ ), $i2$  与  $i3$  之间没有共同因子。

## 一种改进型三点法回转误差、圆度误差计算方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及机床等精密旋转机械的回转误差测量，或者圆柱类零件的圆度误差测量，尤其涉及一种改进型三点法回转误差、圆度误差计算方法。

### 背景技术

[0002] 机床主轴回转误差是衡量机床性能的重要指标，是影响加工精度的主要因素。主轴回转误差的测量技术对精密机床的发展有着重要作用。精密离心机主轴的回转误差也是影响精密离心机工作性能的主要因素。因此主轴回转误差的精确测量技术长期以来引起众多学者的关注，他们运用不同的技术、手段对其进行了长期、深入的研究，产生了多种多样的测量方法。

[0003] 主轴的回转误差包括轴向回转误差和径向回转误差。轴向回转误差的测量相对比较简单，只需在主轴端面放置微位移传感器，进行一维位移量的测量即可。因此主轴回转误差测量技术的研究焦点一直集中在径向误差的精确测量上。

[0004] 主轴回转径向误差通过精密圆柱来测量，让主轴回转，用设置在圆柱外的几个位移传感器测量圆柱表面径向位移，这样圆柱的形状误差不可避免地进入了位移传感器数据，影响了对回转误差的测量。

[0005] 圆柱零件的形状误差测量，通常也是利用精密转轴带动圆柱零件旋转来测量。办法与测量主轴回转误差相同，让主轴回转，用布置在圆柱外的几个位移传感器测量圆柱表面径向位移，此时精密转轴的回转误差不可避免地进入了位移传感器的数据，影响了零件的圆度形状误差。

[0006] 常见的圆度误差分离技术有圆度三点法、混合二点法、时域三点法等，不论你是想得到回转误差还是形状误差，都涉及从测试数据中分离出形状误差和回转误差。如果能把回转误差和圆柱形状误差精确分离，将会有效提高回转误差、形状误差的测量精度。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的就在于为了解决普通三点法忽略形状误差一阶分量的缺陷，提出一种改进型三点法回转误差、圆度误差计算方法。在普通三点法的基础上，通过获得形状误差一阶分量的办法和回转误差 2 阶分量乘 2 办法，把从三点传感器测得数据分离出来，使得回转误差和圆度误差的精度显著提高。

[0008] 为了达到上述目的，本发明采用了以下技术方案：

[0009] 本发明包括三个位移传感器，三个所述传感器布置在圆柱零件外侧且分布在同一截面，所述转轴带动圆柱零件顺时针旋转，转角为  $\theta$  表示，转角为  $\theta$  取离散量  $i * d\theta$  ( $i=0, 1, 2 \dots n-1, n$  是光栅编码器的线数)，三个位移传感器的输出为第一传感器输出量  $S1(\theta)$ 、第二传感器输出量  $S2(\theta)$ 、第三传感器输出量  $S3(\theta)$ ，其特征在于：包括以下步骤：

[0010] 步骤 1：对第一传感器输出量  $S1(\theta)$ 、第二传感器输出量  $S2(\theta)$ 、第三传感器输出

量  $S3(\theta)$  进行三点法分离算法, 得出一次形状误差  $r(\theta)$

[0011] 步骤 2: 分别对第一传感器输出量  $S1$ 、第二传感器输出量  $S2$ 、第三传感器输出量  $S3$  进行周期拓展后得出第一传感器平移输出量  $S1a$ 、第二传感器平移输出量  $S2a$ 、第三传感器平移输出量  $S3a$ 。

[0012] 步骤 3: 对三个平移输出量进行相加平均得出平均平移输出量  $V11=(S1a + S2a + S3a)/3$ , 对所述平均平移输出量  $V11$  做傅立叶变换后, 保留一阶分量, 做逆傅立叶变换, 取其实部, 作为形状误差  $r(\theta)$  的第一阶分量的近似值  $r1\_1(\theta)$ , 第一阶分量近似值  $r1\_1(\theta)$  与所述一次形状误差值  $r(\theta)$  相加后得出二次形状误差值  $ra(\theta)$ , 根据二次形状误差值  $ra(\theta)$ , 通过三点回差算法计算出一次回转误差分量  $xa(\theta)$ 、 $ya(\theta)$ ;

[0013] 步骤 4: 把一次回转误差分量  $xa(\theta)$ 、 $ya(\theta)$  合成为一次回转误差幅值  $hz1(\theta)$ , 对  $hz1(\theta)$  做傅立叶变换, 对其二阶分量的幅值乘以 2 后做逆傅里叶变换得到二次回转误差幅值  $hz2(\theta)$ , 根据二次回转误差幅值  $hz2(\theta)$  分解得到二次回转误差分量  $xb(\theta)$ 、 $yb(\theta)$ , 根据二次回转误差分量  $xb(\theta)$ 、 $yb(\theta)$  通过三点回差算法计算二次形状误差  $rb(\theta)$ ;

[0014] 本发明的有益效果在于:

[0015] 本发明通过对三个传感器信号的平移和加权平均, 并利用频域滤波, 有效获得了形状误差的一阶分量, 解决了原三点法不能获得形状误差一阶分量的缺陷. 使用该法可明显改善形状误差与回转误差的分离精度. 仿真表明, 无随机干扰情况下, 分离出的误差与原误差的差异在  $10^{-8}$  量级. 比原三点法算法提高一个数量级, 有效提高分析仪的精度。

## 附图说明

[0016] 图 1 是本发明的一种改进型三点法回转误差的方法的流程示意图;

[0017] 图 2 是本发明的有噪声算法效果比较表;

[0018] 图 3 是本发明的无噪声算法效果比较表;

[0019] 图 4 是本发明的模拟三个所述传感器的输出表。

[0020] 图 5 本发明的原形状误差和改进型形状误差幅值比较图。

[0021] 图 6 本发明的原回转误差和改进型回转误差幅值比较图。

## 具体实施方式

[0022] 下面结合附图对本发明作进一步说明:

[0023] 如图 1 所示, 三个位移传感器按图 3 所示位置布置, 零件顺时针转动, 转角以  $\theta$  表示, 三个位移传感器的输出为  $S1(\theta)$ 、 $S2(\theta)$ 、 $S3(\theta)$ , 他们包含了圆柱零件的形状误差  $r(\theta)$ 、回转误差的  $x$  向分量  $x(\theta)$ 、 $y$  向分量  $y(\theta)$ , 关系如下:

$$[0024] \quad S1(\theta) = r(\theta) + x(\theta) \quad (1)$$

$$[0025] \quad S2(\theta) = r(\theta + \alpha) + x(\theta) * \cos(\alpha) + y(\theta) * \sin(\alpha) \quad (2)$$

$$[0026] \quad S3(\theta) = r(\theta + \beta) + x(\theta) * \cos(\beta) + y(\theta) * \sin(\beta) \quad (3)$$

[0027] 误差分离就是要从实测得到的三个输出  $S1(\theta)$ 、 $S2(\theta)$ 、 $S3(\theta)$  分离出形状误差  $r(\theta)$ 、回转误差 ( $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$ )。

[0028] 具体算法是:

[0029] 构造一个由  $S1(\theta)$ 、 $S2(\theta)$ 、 $S3(\theta)$  组成的函数  $S(\theta)$ ：

$$[0030] \quad S(\theta) = S1(\theta) + a * S2(\theta) + b * S3(\theta) \quad (4)$$

$$[0031] \quad S(\theta) = r(\theta) + a * r(\theta + \alpha) + b * r(\theta + \beta)$$

$$[0032] \quad + x(\theta) * (1 + a * \cos(\alpha) + b * \cos(\beta))$$

$$[0033] \quad + y(\theta) * (a * \sin(\alpha) + b * \sin(\beta)) \quad (5)$$

[0034] 令  $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$  系数为 0, 即

$$[0035] \quad (1 + a * \cos(\alpha) + b * \cos(\beta)) = 0 \quad (6)$$

$$[0036] \quad (a * \sin(\alpha) + b * \sin(\beta)) = 0 \quad (7)$$

[0037] 则：

$$[0038] \quad S(\theta) = r(\theta) + a * r(\theta + \alpha) + b * r(\theta + \beta) \quad (8)$$

[0039] 就只是形状误差的函数。形状误差是严格的周期函数, 因此  $S(\theta)$  成为严格的周期函数, 可以用傅立叶级数表示：

$$[0040] \quad r(\theta) = \sum (Ak * \cos(k\theta) + Bk * \sin(k\theta)) \quad (9)$$

[0041] 式中： $Ak$ 、 $Bk$ —傅立叶系数；

[0042]  $k$ —序号,  $1, 2, \dots$ , 其中的直流分量预先剔除, 这里从一阶分量开始, 到旋转一周采样点数的一半。

[0043] 把  $r(\theta)$  带入  $S(\theta)$  得：

$$[0044] \quad S(\theta) = \sum (Ak * \cos(k\theta) + Bk * \sin(k\theta))$$

$$[0045] \quad + a * \sum (Ak * \cos(k(\theta + \alpha)) + Bk * \sin(k(\theta + \alpha)))$$

$$[0046] \quad + b * \sum (Ak * \cos(k(\theta + \beta)) + Bk * \sin(k(\theta + \beta))) \quad (10)$$

$$[0047] \quad = \sum Ak(1 + a * \cos(k\alpha) + b * \cos(k\beta)) \cos(k\theta)$$

$$[0048] \quad + \sum Ak(-a * \sin(k\alpha) - b * \sin(k\beta)) \sin(k\theta)$$

$$[0049] \quad + \sum Bk(1 + a * \cos(k\alpha) + b * \cos(k\beta)) \sin(k\theta)$$

$$[0050] \quad + \sum Bk(a * \sin(k\alpha) + b * \sin(k\beta)) \cos(k\theta) \quad (11)$$

$$[0051] \quad \text{令 } Ck = 1 + a * \cos(k\alpha) + b * \cos(k\beta) \quad (12)$$

$$[0052] \quad Dk = a * \sin(k\alpha) + b * \sin(k\beta) \quad (13)$$

[0053] 则上式可写为：

$$[0054] \quad S(\theta) = \sum Ak * Ck * \cos(k\theta) + \sum Ak * (-Dk) * \sin(k\theta)$$

$$[0055] \quad + \sum Bk * Ck * \sin(k\theta) + \sum Bk * Dk * \cos(k\theta) \quad (14)$$

[0056]  $S(\theta)$  的傅立叶级数可以直接写出：

$$[0057] \quad S(\theta) = \sum (Fk * \cos(k\theta) + Gk * \sin(k\theta)) \quad (15)$$

[0058] 传感器布置角度  $\alpha$ 、 $\beta$  是已知的, 根据式 (6)、(7) 计算出  $a$ 、 $b$  的值；

[0059] 由式 (12)、(13) 计算得到  $Ck$ 、 $Dk$ ；

[0060] 实测得到  $S1(\theta)$ 、 $S2(\theta)$ 、 $S3(\theta)$ , 构建  $S(\theta)$ , 进行傅立叶变换得到  $Fk$ 、 $Gk$ , 计算得到  $Ak$ 、 $Bk$ ；

[0061] 由式 (9) 得到形状误差  $r(\theta)$ ；

[0062] 由式 (1) 得到回转误差的  $x$  分量  $x(\theta)$ ；

[0063] 由式 (2) 得到回转误差的  $y$  分量  $y(\theta)$ ；

[0064] 至此, 实现了形状误差、回转误差的分离。

[0065] 步骤2:分别对第一传感器输出量 S1、第二传感器输出量 S2、第三传感器输出量 S3 进行周期拓展后得出第一传感器平移输出量 S1a、第二传感器平移输出量 S2a、第三传感器平移输出量 S3a。

[0066] 周期延拓:

[0067]  $s1a=[s1 \ s1]$ ,

[0068]  $s2a=[s2 \ s2]$

[0069]  $s3a=[s3 \ s3]$

[0070] 平移:

[0071]  $s1a=s1a(1:nmax)$ ;

[0072]  $s2a=s2a(nmax+1-np2:2*nmax-np2)$ , np2 是第二个传感器对应的角度序号

[0073]  $s3a=s3a(nmax+1-np3:2*nmax-np3)$ , np3 是第三个传感器对应的角度序号

[0074] 步骤3:对三个平移输出量进行相加平均得出平均平移输出量  $V11=(S1a + S2a + S3a)/3$ , 对所述平均平移输出量 V11 做傅立叶变换后, 保留一阶分量, 做 IFFT 变换, 取其实部, 作为一次形状误差  $r(\theta)$  的第一次近似值  $r1\_1(\theta)$ , 第一次近似值  $r1\_1(\theta)$  与所述一次形状误差值  $r(\theta)$  相加后得出二次形状误差值  $ra(\theta)$ , 根据二次形状误差值  $ra(\theta)$ , 通过三点回差算法计算出一次回转误差分量  $xa(\theta)$ 、 $ya(\theta)$ , 其目的是为了分离出一阶分量。

[0075] 平均:

[0076]  $V11=(S1a + S2a + S3a)/3$

[0077] 傅里叶变换:

[0078]  $V11f=fft(V11)$ ;

[0079] 保留一阶量:

[0080]  $V11f(i)=0; i=1, 3, \dots, nmax-2$ .

[0081] 逆傅里叶变换, 保留实部:

[0082]  $r1\_1=real(iff(V11f))$

[0083] 得到二次形状误差值:

[0084]  $ra=r+r1\_1$

[0085] 由式 (1) 得到回转误差的 x 分量  $xa(\theta)$ ;

[0086] 由式 (2) 得到回转误差的 y 分量  $ya(\theta)$ ;

[0087] 步骤4:把一次回转误差分量  $xa(\theta)$ 、 $ya(\theta)$  合成为一次回转误差幅值  $hz1(\theta)$ , 回转误差幅值  $hz1(\theta)$  做傅立叶变换后对其二阶分量的幅值乘以二后做逆变换得到二次回转误差幅值  $hz2(\theta)$ , 所述二次回转误差幅值  $hz2(\theta)$  分解得到二次回转误差分量  $xb(\theta)$ 、 $yb(\theta)$ , 根据二次回转误差分量  $xb(\theta)$ 、 $yb(\theta)$  通过三点回差算法计算二次形状误差  $rb(\theta)$ ;

[0088] 合成为一次回转误差:

[0089]  $hz1=sqrt((x0+xa)^2+(y0+ya)^2)-sqrt(x0^2+y0^2)$

[0090] 傅里叶变换:

[0091]  $hz1f=fft(hz1)$

[0092] 二阶分量乘 2:

[0093]  $hz1f(3)=hz1f(3)*2$

[0094]  $hz1f(nmax-1)=hz1f(nmax-1)*2$

[0095] 逆傅里叶变换,取实部:

[0096]  $hz2=real(fft(hz1f))$

[0097] 计算回转误差分量:

[0098]  $xb=hz2*\cos(jd)$

[0099]  $yb=hz2*\sin(jd)$

[0100] 计算二次形状误差:

[0101]  $rb=s1-xb$

[0102] 第一传感器在 0 度,所述第二传感器在 90 度附近的( $i2*d\theta$ ),所述第三传感器的设置角度在 225 度附近( $i3*d\theta$ ), $i2$  与  $i3$  之间没有共同因子。

[0103] 仿真算例:

[0104] 每圈采样点数:128

[0105] 最高谐波阶次:10

[0106] 传感器角度 序号

[0107] 0 0

[0108] 90 32

[0109] 227.81 81

[0110] 如图 2 所示,传感器信号存在随机干扰成分时,分离出来的形状误差和回转误差比普通算法精度提高一个数量级。

[0111] 如图 3 所示,传感器信号无随机干扰成分时,分离出来的形状误差和回转误差比普通算法精度提高八个数量级。

[0112] 假定传感器的信号波形图如图 4 所示,分别保护了一定的随机噪声,噪声的最大值为(0.0073613 0.0074185 0.0078726)

[0113] 本发明算法分离出的形状误差如图 5 所示,与原形状误差吻合。差异为 0.013, 0.12%。

[0114] 本发明算法分离出的回转误差如图 6 所示,与原回转误差吻合,差异为 0.0169, 0.27%。

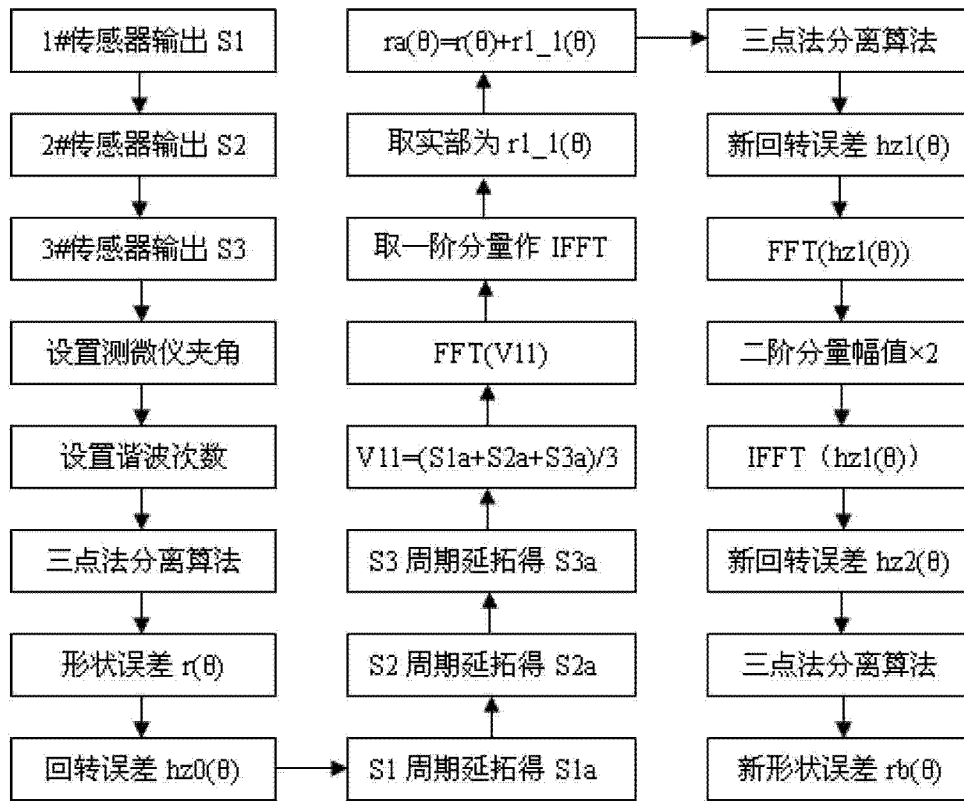


图 1

	形状误差 差异		回转误差 差异	
	幅值	百分比	幅值	百分比
普通三点法	0.47244	4.3%	0.4769	7.7282
本算法	0.013381	0.12%	0.016919	0.27%

图 2

	形状误差 差异		回转误差 差异	
	幅值(um)	百分比	幅值(um)	百分比
普通三点法	3	3.52%	3	13.43%
本算法	1.04e-8	0.12e-8%	1.13e-8	5.09e-8%

图 3

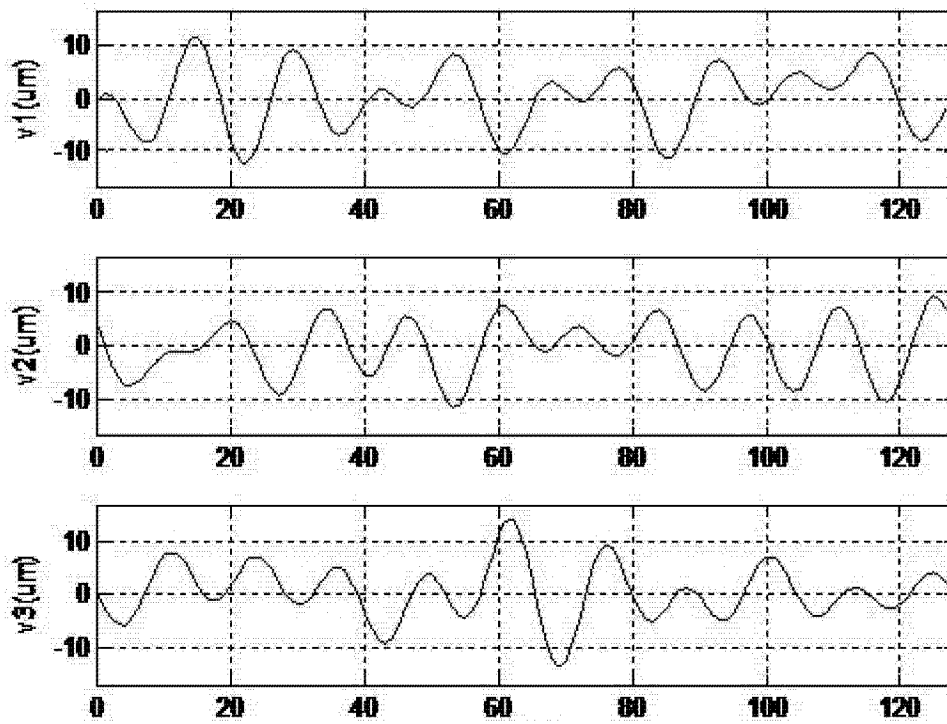


图 4

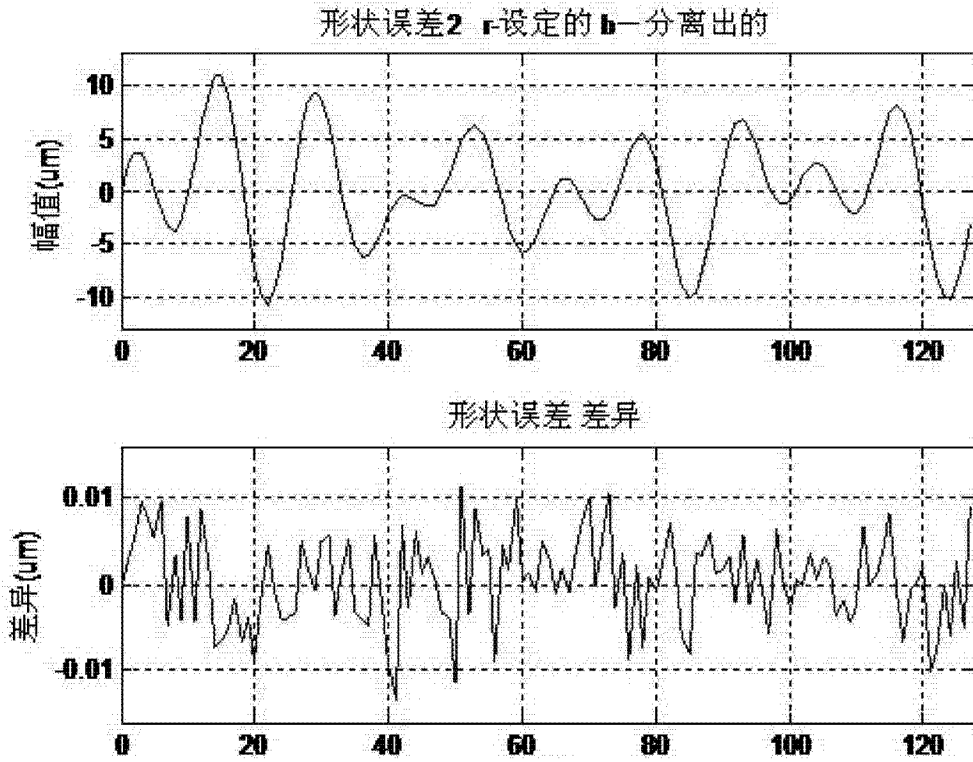


图 5

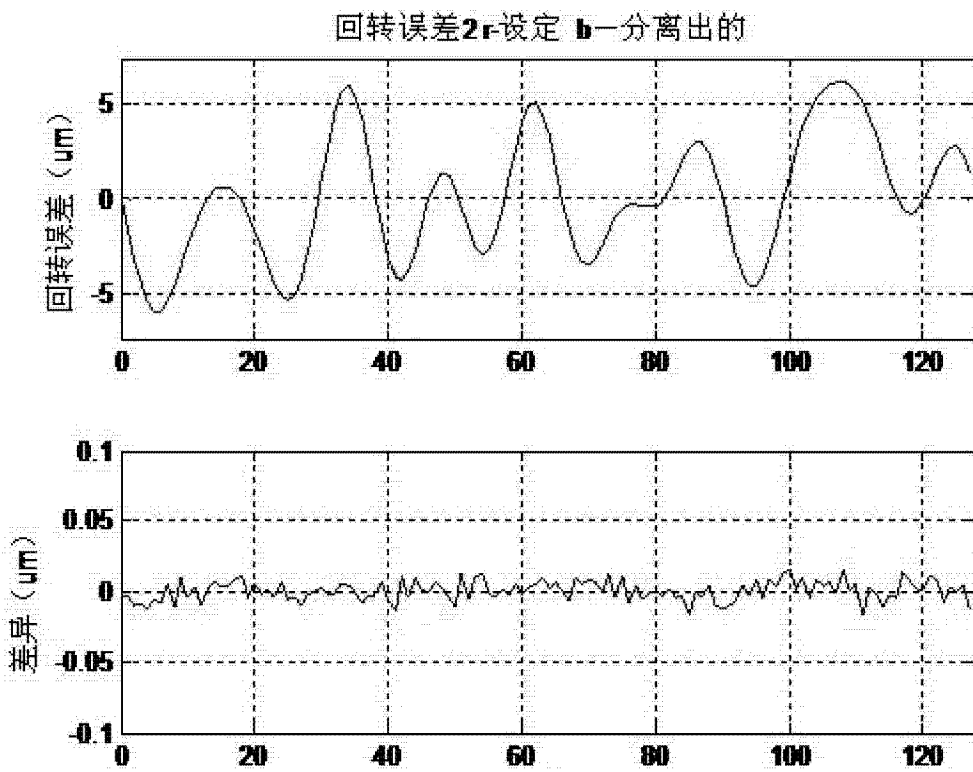


图 6