

莫尔条纹细分中相位误差的软件补偿方法

李江国 宣明 王一凡

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 长春 130021)

摘要 在实施莫尔条纹细分中, 两路信号的相位误差将影响计量光栅的测量位移时的精度。本文从软件的角度详细论述了相位误差的补偿方法, 并且通过理论分析与计算, 说明利用该方法的补偿效果, 进而证明该方法在实际应用中的可行性。

关键词: 莫尔条纹细分; 相位误差补偿

1 前言

现代科学技术的发展, 要求不断提高精密机械和精密仪器的精度。提高精度的办法有两种: 一是设法减小加工和调试过程中的各种误差; 二是对现有误差进行补偿。随着微型计算机在我国的推广和普及, 人们开始利用软件来补偿机械和仪器的误差。利用计算机能够可靠地实现误差的实时补偿, 如果选用单片计算机, 则可以很经济地实现上述目的。

长光栅在精密测量和精密机械中, 常做为位移测量的工具。人们习惯于提高光栅的刻划精度来提高计量光栅的测量精度。到目前为止, 用软件补偿光栅相位误差的办法来提高计量光栅的测量精度尚未见报导。基于此, 本文将就此问题进行专题探讨。

2 光栅相位误差产生的原因

长光栅由于受到刻线间距的限制, 其量化误差将影响计量光栅工作精度的发挥, 所以常常对光栅莫尔条纹进行细分。

莫尔条纹细分的硬件原理如图1所示, 其中 a, b, c 为光电器件 1、2、3、4 之间的距离。理想情况要求: $a = b = c = \omega/4$, 式中 ω —莫尔条纹宽度。在 OUT 处, 输出的两路信号分别为 $A(1 + \sin\alpha)$ 和 $A(1 - \cos\alpha)$ (如图2所示)。二者相位差为 90° 。

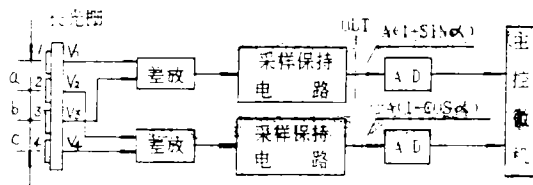


图1 莫尔条纹细分硬件原理图

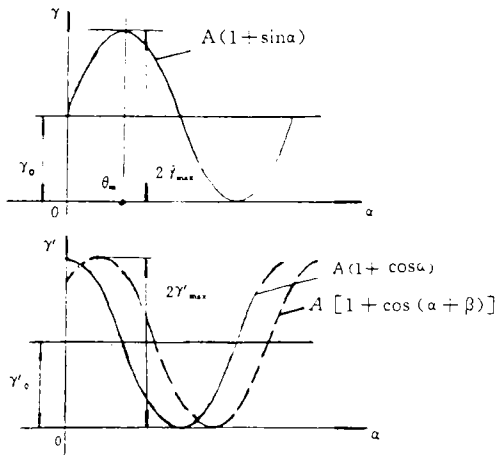


图2 转换前的信号

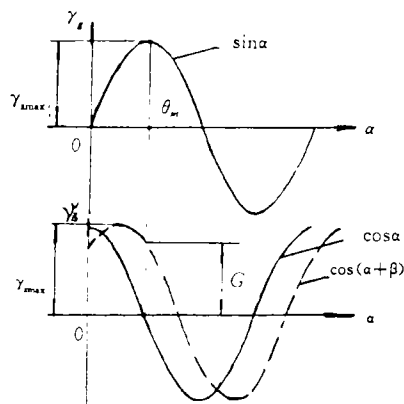


图3 转换后的信号

但是, 由于器件安装和调试水平的限制, 往往使得 $a \neq b \neq c \neq \omega/4$, 而且, 其间各电路的性能不均匀以及 ω 的变化等因素的影响, 使输出的余弦信号与正弦信号之间产生了相位误差 β 。图 2 中的 $A[1+\cos(\alpha+\beta)]$ 信号, 便是有相位误差的信号。

通过调节中间电路和 a, b, c 的值, 可以使 β 角大大减小。根据经验, β 角能够调至 $\pm 5^\circ$ 以内。

3 相位误差对计量光栅精度的影响

由参考文献 [1] 知: 莫尔条纹细分中, 图 2 所示的信号必须先转化成图 3 所示的标准信号, 而 $\sin\alpha/\cos\alpha = C$ 隐含了确定的位移信息 (以后简称 C 为位移)。只有求出 C , 才能确定位移。而由于 β 角的影响, 实际的信号值之比为 $\sin\alpha/\cos(\alpha+\beta)$, 直接由它代表位移, 必然会带来误差。计算和分析表明: 若细分分数 $n = 100$, 则一个位移当量 $S = 360^\circ/100 = 3.6^\circ$, 当 $\beta = 5^\circ$ 时, 由 β 所引起的误差为两个位移当量。本来计量光栅的测量误差可以小到 1 个位移当量, 然而, β 的影响将大大降低它的测量精度。由此可见, 有必要对 β 角予以补偿。

4 相位误差的补偿方法

$$\therefore \frac{\sin\alpha}{\cos(\alpha+\beta)} = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha\cos\beta - \sin\alpha\sin\beta} = \frac{\operatorname{tg}\alpha}{\cos\beta - \operatorname{tg}\alpha\sin\beta}$$

令

$$C = \operatorname{tg}\alpha$$

$$E = \sin\alpha$$

$$F = \cos(\alpha+\beta)$$

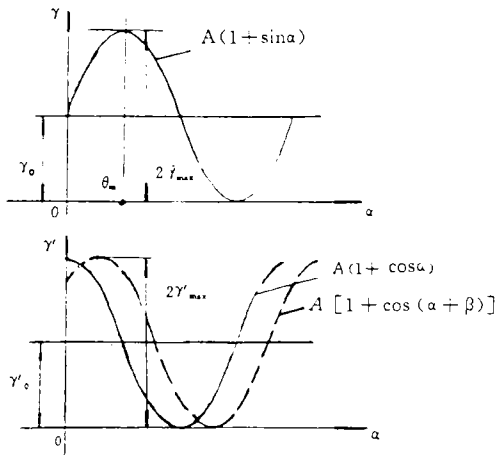


图2 转换前的信号

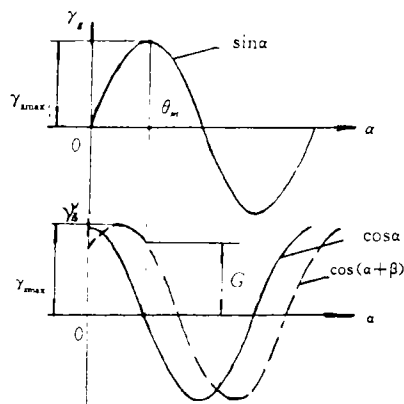


图3 转换后的信号

但是, 由于器件安装和调试水平的限制, 往往使得 $a \neq b \neq c \neq \omega/4$, 而且, 其间各电路的性能不均匀以及 ω 的变化等因素的影响, 使输出的余弦信号与正弦信号之间产生了相位误差 β 。图 2 中的 $A[1+\cos(\alpha+\beta)]$ 信号, 便是有相位误差的信号。

通过调节中间电路和 a, b, c 的值, 可以使 β 角大大减小。根据经验, β 角能够调至 $\pm 5^\circ$ 以内。

3 相位误差对计量光栅精度的影响

由参考文献 [1] 知: 莫尔条纹细分中, 图 2 所示的信号必须先转化成图 3 所示的标准信号, 而 $\sin\alpha/\cos\alpha = C$ 隐含了确定的位移信息 (以后简称 C 为位移)。只有求出 C , 才能确定位移。而由于 β 角的影响, 实际的信号值之比为 $\sin\alpha/\cos(\alpha+\beta)$, 直接由它代表位移, 必然会带来误差。计算和分析表明: 若细分分数 $n = 100$, 则一个位移当量 $S = 360^\circ/100 = 3.6^\circ$, 当 $\beta = 5^\circ$ 时, 由 β 所引起的误差为两个位移当量。本来计量光栅的测量误差可以小到 1 个位移当量, 然而, β 的影响将大大降低它的测量精度。由此可见, 有必要对 β 角予以补偿。

4 相位误差的补偿方法

$$\therefore \frac{\sin\alpha}{\cos(\alpha+\beta)} = \frac{\sin\alpha}{\cos\alpha\cos\beta - \sin\alpha\sin\beta} = \frac{\text{tg}\alpha}{\cos\beta - \text{tg}\alpha\sin\beta}$$

令

$$C = \text{tg}\alpha$$

$$E = \sin\alpha$$

$$F = \cos(\alpha+\beta)$$

则

$$\frac{E}{F} = \frac{C}{\cos\beta - C\sin\beta}$$

$$\therefore C = \frac{E\cos\beta}{F + E\sin\beta} \quad (1)$$

这就是相位误差的补偿公式。其中, E 和 F 为实测值。

由图 2 和图 3 不难看出, 当余弦信号滞后于正弦信号时, β 取负值; 反之, β 取正值。

下面从软件的角度出发, 探讨公式 (1) 的应用。

4.1 信号转换

由节 3 中所述, 对莫尔条纹信号处理之前首先要对图 2 所示的信号进行转换。

设采样间隔 p 为一个步距当量, 采样次数为 N 。为了提高测量精度, 应满足

$$(N - 2) \cdot p = m \cdot s \cdot n \quad (2)$$

式中, m 为大于或等于 2 的正整数。

这样, $\sin\alpha$ 信号和 $\cos(\alpha + \beta)$ 信号的采样点数各为 N 个, 分别记为 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N$ 和 $\gamma'_1, \gamma'_2, \dots, \gamma'_N$, 其均值分别为

$$\gamma_0 = \left(\sum_{i=1}^N \gamma_i \right) / N \quad (3)$$

$$\gamma'_0 = \left(\sum_{i=1}^N \gamma'_i \right) / N \quad (4)$$

其幅值分别为

$$\gamma_{\max} = \max(\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_N) - \gamma_0 \quad (5)$$

$$\gamma'_{\max} = \max(\gamma'_1, \gamma'_2, \dots, \gamma'_N) - \gamma'_0 \quad (6)$$

信号转换公式为

$$\gamma_z = \frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_{\max}} \quad (7)$$

$$\gamma'_z = \frac{\gamma' - \gamma'_0}{\gamma'_{\max}} \quad (8)$$

式中, γ, γ' 分别为 $A(1 + \sin\alpha)$ 和 $A[1 + \cos(\alpha + \beta)]$ 信号上的任一对对应点。

若两信号的幅值没有误差, 原理上 $\gamma_{\max} = \gamma'_{\max}, \gamma_0 = \gamma'_0$ 。但为了考虑一般情况, 应分别计算。

4.2 相位误差 β 的计算

找出 γ_{\max} 和与之对应的横坐标值 θ_m , 再找出与 θ_m 对应的 $\cos(\alpha + \beta)$ 上的点 M , 设其值为 G (如图 2 和图 3 所示)。

事先按精度要求列出 $\theta = \arccos G$ ($\theta = -20^\circ \sim 20^\circ$) 的函数值表, 将 G 与该表对照, 找出与 G 值对应的 θ 值。也可以用泰勒——麦克劳林公式将 $\theta = \arccos G$ 展开成级数形式, 根据计算精度, 取其前若干项作 θ 的近似计算。但这个计算量很大, 与查表法比较, 其速度相当慢。

显然 $\beta = \theta - 90^\circ$, 到此, 就可以通过式 (1) 计算 C 值了。

4.3 相位误差补偿的原理框图

如图4所示。

5 误差补偿效果

通过上述工作,可将 β 值计算出来。但是,在计算过程中,因为采用了平均值法,以及采样的不连续性,使得实际上求得的 β 值也有一个误差,记为 β' 。

由计算机分别计算 $\sin\alpha/\cos(\alpha+\beta)$ 和 $\sin\alpha/\cos(\alpha+\beta+\beta')$,通过分析可以发现:在 β' 不超过一个位移当量的情况下,用 $\sin\alpha/\cos(\alpha+\beta+\beta')$ 来代替 $\sin\alpha/\cos(\alpha+\beta)$ 对位移测量结果的最终影响,将不会超过一个位移当量。由于 $\sin\alpha/\cos(\alpha+\beta+\beta')$ 与 $\sin\alpha/\cos(\alpha-\beta)$ 的同周期性(其周期为 180°),使得替代所产生的误差不会随着周期数的递增而累积。相反,在整周期数处,误差变为0(相对于位移当量来讲)。

综上所述,该补偿方法的原理误差在一个位移当量之内。(补偿前误差在两个位移光量以内)。

6 该误差补偿方法的应用范围

计算表明,用上述方法补偿误差,原理上允许 β 角在 $-20^\circ\sim 20^\circ$ 之间,而且均可以将误差补偿到一个位移当量以内。但在实际应用中,并不允许出现这么大的相位误差,如果 β 角接近于 $\pm 20^\circ$ 时,在 a, b, c 之间将出现较大的差别,使得1—3信号之间和2—4信号之间分别会产生较大的相位误差。根据图5,差放的输出 V_{OUT} 可以表示为

$$V_{OUT} = (1 + \frac{R_f}{R_1}) \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_3 - \frac{R_f}{R_1} V_1 \quad (9)$$

一般采用 $R_1 = R_2, R_3 = R_f$ 的参数。则

$$V_{OUT} = \frac{R_3}{R_1} V_3 - \frac{R_f}{R_1} V_1 = \frac{R_f}{R_1} (V_3 - V_1) \quad (10)$$

若 $V_3 - V_1$ 信号间有相位差,则 V_{OUT} 就不是完全的正弦(或余弦)信号了。若误差较大,则 V_{OUT} 就会出现严重失真。这样,输出信号的处理就会出现较大的误差,导致最终的测量精度下降。 $V_1 - V_2$ 信号之间同理。

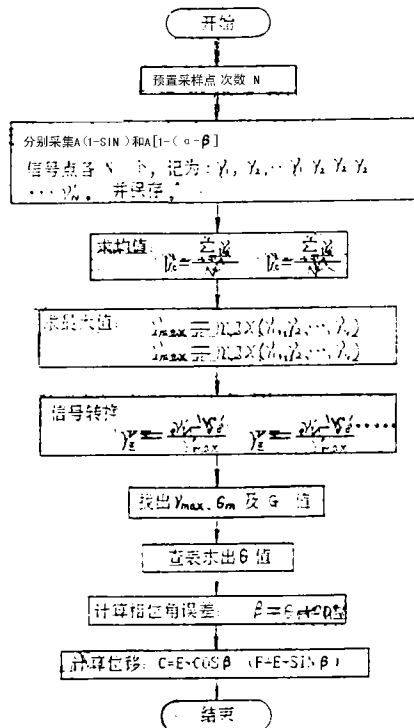


图4 相位误差补偿及其后的位移计算框图

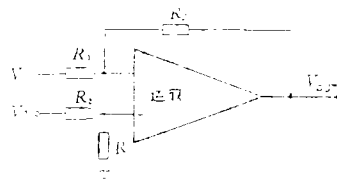


图5 差动运放接线原理图

为了慎重起见，建议 β 角应控制在 $\pm 10^\circ$ 以内。

参 考 文 献

- [1] 张彤, 王作斌, 微型计算机在莫尔条纹信号细分中的应用. 光学机械, 1985, (2): 43—48
- [2] 魏之馨, 电子技术基础. 北京: 电子工业出版社, 1987
- [3] 方建淳, MCS—96系列8098单片机原理与应用技术. 天津: 天津科学技术出版社, 1990
- [4] 王国明, 光学计量仪器设计(上). 北京: 机械工业出版社, 1983
- [5] 张毅刚, 乔景录, 8098单片机应用设计. 北京: 电子工业出版社, 1993
- [6] 张如洲, 微型计算机数据采集与处理. 北京: 北京工业学院出版社, 1988
- [7] 王惠民, 光学仪器信号转换技术. 北京: 北京理工大学出版社, 1993

Software Compensation Method of Phase Error In Morie' Strip Division

Li Jiangguo, Xuan Ming and Wang Yifan

(Changchun Institute of Optics and Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130021)

Abstract

In morie strip division, the phase error between two signals will affect the measurement precision. This paper discussed in detail the compensation method of the phase error using software. In addition, the effect of adopting this method is illustrated by theoretical analysis and calculation. Furtherly, the feasibility of this method in practice is testified.

Key Words: Morie strip division, Phase error compensation