

基于 DSP 的宽动态范围莫尔条纹计数 与精密细分技术

苏绍景, 吕海宝, 李圣怡

(国防科技大学机电工程研究所, 湖南长沙 410073)

摘要: 为莫尔条纹的计数与细分提供了一种基于 DSP(数字信号处理器)的高速软件解决方案。它能有效的解决传统系统中计数电路与细分功能不能无缝匹配的问题, 提高测量的准确性。由于采用了高速信号处理和闪烁采样技术, 采用该方案的系统能处理宽动态范围的莫尔条纹信号。提供的实例能对从直流到 1MHz 的莫尔条纹信号进行计数与细分, 对于 $1\mu\text{m}$ 光学分辨率的光栅测长系统来说, 其相应的最高测量速度为 1000mm/s, 细分步长可以达到 nm 级。

关键词: 位移测量; 莫尔条纹; 计数细分; 数据采集

中图分类号: TH741.1 **文献标识码:** A

1 引言

1953 年, 英国 Ferranti 公司的爱丁堡实验室建立了第一个利用莫尔条纹(Moiré Fringe)系统测量位移的工作样机, 并取得了专利。从此, 陆续出现了许多种利用莫尔条纹来精密测量位移的光学方法, 其中主要以各种光栅位移测量系统为主^[1-2]。

当被测目标产生一定位移的同时, 光学系统会产生成比例的一串莫尔条纹, 测量数显电路对大的整脉冲进行计数, 对尚不能构成一个完整的莫尔条纹周期进行细分, 然后由计数值与细分值共同得到精确的位移量。例如, 当一个脉冲表示 $1\mu\text{m}$ 时, 大的计数值为 500, 细分片段值为 0.32 个脉冲, 那么总的位移量为 $500.32\mu\text{m}$ 。在传统的数显装置中, 高倍数的细分电路与可逆计数电路基本上是分开的, 当计数发生错误时, 再高的细分倍数也变得没有用处了。因此, 解决好计数电路与细分电路的匹配问题, 是本文重点研究的一个问题。

2 常规计数方法及其存在的问题

常规计数法的基本原理如下: 两路正交的条

纹信号经过零触发器整形变为矩形波, 以正弦波整形信号的上跳沿作为计数触发信号, 可逆计数器根据该上跳沿所对应的余弦波整形信号的电平来决定移动方向。

如图 1 所示, 图中(a)为条纹信号, 其中粗实线为正弦信号, 细实线为正向移动时的余弦信号, 虚线为反向移动时的余弦信号。(b)、(c)、(d)分别为上述三种信号经整形后的波形。不难发现, 如果光栅正向移动, 当(b)图所示信号上跳时, 对应余弦信号的整形信号为高电平, 计数器加 1; 反之, 光栅反向移动, 当(b)图所示信号上跳时, 对应余弦信号的整形信号为低电平, 计数器减 1。

但在对该计数方法的分析中发现, 它在某些特殊的情况下会计错数。例如当光栅在一定范围内振动时, 会发生计数器只加不减或只减不加的现象。如图 2(a)所示, 光栅在半个信号周期的幅度内来回振动, 图中曲线即为位移曲线。这种情况下的条纹信号见(b)图所示, 图中粗实线为正弦信号, 虚线为余弦信号, (c)、(d)分别为正余弦信号经过零触发器整形后的信号。可以看出, 在光栅来回振动的时候, 对于正弦信号整形信号的每一个上跳沿, 余弦信号整形信号电平为高, 计数器一直在做加法计数, 这显然是不对的。这仅是诸多特殊情况下的一种, 这种硬件计数法由于没有智能

化可言,在光栅单方向移动时,可以正确计数,但光栅的移动情况比较复杂时,就有可能发生丢数或多计数现象。而在机械加工中这种振动、爬行的现象又非常普遍^[3]。

另外,当物体移动的速度很缓慢或很快时,可逆计数器要么不计数,要么乱计数。即计数器的动态范围窄,这样就大大限制了使用范围,不适合高速机械加工中使用。

而且,可逆计数器的计数范围是有限的,一个8位计数器的最大值为255,16位计数器的最大值为65535,当一个莫尔条纹代表 $1\mu\text{m}$ 时,物体移动 65.535mm 时,计数器就溢出了。如果条纹的灵敏度更高、量程范围更大,所需的可逆计数器则更复杂。

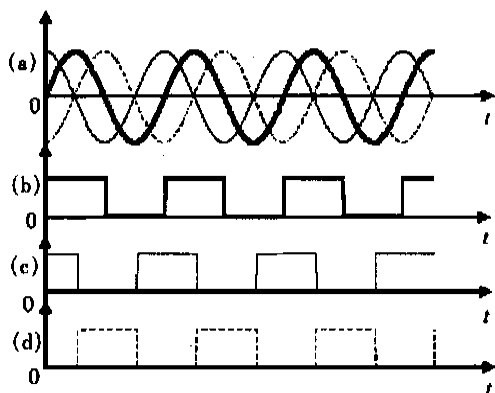


Fig. 1 Waveforms of single direction displacement

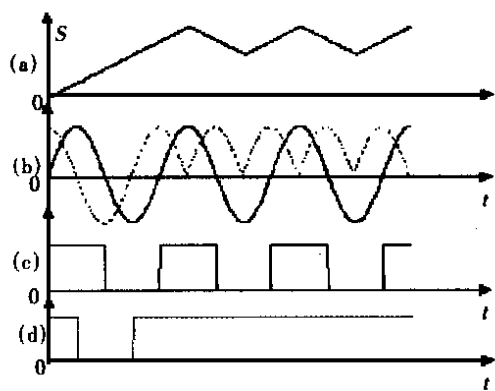


Fig. 2 Waveforms of vibration displacement

本文研究的计数方法重点要解决以上三个问题:1. 要适应各种复杂的位移情况,例如能测量轴向振动位移;2. 有宽的动态范围;3. 计数器量程范围大。

3 技术原理与实现

3.1 高速信号采集处理平台

图3显示的就是基于数字信号处理器 DSP (Digital Signal Processor) 的莫尔条纹计数细分计算机插卡。它以 ADSP2181 处理器为核心,该处理器是美国 AD 公司(Analog Device Inc.) 90 年代中期推出的性能最高的定点数字信号处理器,每秒钟可执行 4 千万条指令。模数转换芯片 ADC 采用闪烁转换原理,它的最高采样速率可以达到 $20\text{M}—50\text{M}/\text{s}$,在本系统中,推荐使用单片集成两独立通道的 ADC,以简化系统设计^[4]。

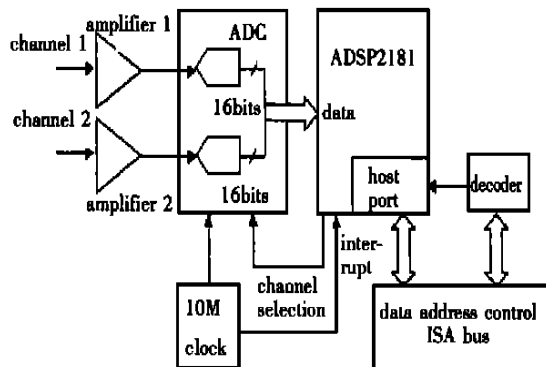


Fig. 3 Schematic diagram of the system

当两路正交的莫尔条纹光电转换信号通过运放之后,被送入 ADC 进行模数转换,转换频率为 $10\text{M}/\text{s}$,其时钟基准由 10M 时钟提供。该时钟也接入 ADSP2181 的中断线,中断 DSP 来取回上 1 个时钟内转换完成的两个数据。根据采样定理, 10M 的采样速率完全可以处理 1MHz 的莫尔条纹信号。如果莫尔条纹的灵敏度为每 μm 一个条纹,那么系统最快的测试速度可以达到 $1000\text{mm}/\text{s}$ 。如果每个莫尔条纹代表更大的位移量,那么系统可以拥有更高的测试速度。由于采用了高速采样技术,系统的动态范围可以很宽,从直流信号一直到 1MHz 。

另外,ADC 的分辨率与细分倍数成正比,ADC 的分辨率有 8、10、12、16 位几种,相对应的细分倍数可达 100、200、500、1000 倍。

当 DSP 处理完当前的莫尔条纹脉冲,它把运算得出的最新位移值放入处理器片内的主机接口 (Host Port),由于计数细分插卡是插入计算机 ISA 插槽的,计算机可以通过 ISA 总线直接访问 DSP 的主机接口,获取最新的位移值。该数显装置的最高数据输出可达 $40\text{k}/\text{s}$,完全可以满足机械加工中高速测试的需要。

3.2 DSP 软件双阈值二倍频计数方法

该计数法是在 DSP 采集到条纹信号以后,通过软件来判断被测目标的移动方向,并对信号的

整周期数进行可逆计数。图 4 为莫尔条纹信号的波形示意图, 图中粗实线为通道 1 正弦信号, 细实线为正向移动时通道 2 的余弦信号, 虚线为反向移动时通道 2 的余弦信号。

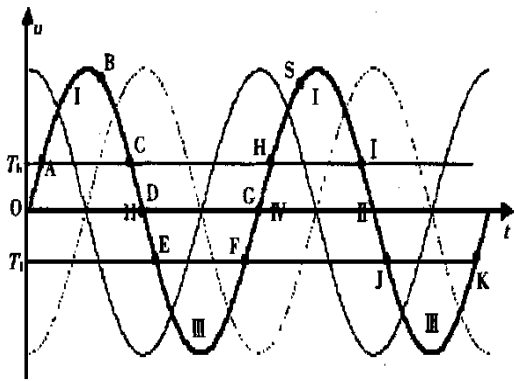


Fig. 4 Waveform of two channels of orthogonal signal

在 DSP 内设置一个存储单元作为可逆计数器, 并赋初值 0。当通道 1 正弦信号过零时, 即图中的 D 和 G 点, 判断当前通道 2 余弦信号的幅值, 当正弦信号下跳, 通过 D 点时, 余弦信号为负则正向运动, 作加计数; 为正则反向移动, 作减计数。信号上跳, 通过 G 点时, 鉴向条件与此相反。这样, 信号每移过一个脉冲周期, DSP 计两个数(二倍频计数)。

为防止信号在零点附近的高频扰动带来计数误差, 对信号上跳和下跳的计数条件分别加一个正和负的阈值(双阈值), 即图中的 T_h 和 T_l 。只有当信号上跳超过 T_h 或下跳低于 T_l 时才计一个数。

采用这种方法, 当光栅在移动中发生诸如图 2 所示的振动情况时不会发生漏计或多计的现象。

为减小计算量, 在大数计数中可只考虑 ADC 采样值的高 8 位, 这样就减小了计算量, 而且避免了 16 位数操作中常出现的结果溢出的麻烦。软件计数法的另一个优点是计数器位数不受限制, 可任意扩展, 在测量过程中不会发生普通硬件计数器可能出现的计数溢出现象。

3.3 分片段细分原理

准确无误的大数计数是实现高精度测量的必要条件, 而高倍数的条纹细分则是获得高测量分辨率的必要手段。

首先把一个信号周期分为四个片段, 片段的分界点为正负双阈值, 即图中的 T_h 和 T_l 。如图 4 中 I、II、III、IV 所示。其中 I 为 AC 段; II 为 CE 段; III 为 EF 段; IV 为 FH 段。在本测量系统中,

细分插值是融合在 3.2 节软件计数法之中的。在准确无误地获得大数计数值和起始、终止点电压及其所在片段之后, 再通过计算得出起始点和终止点在各自片段内的位置, 再加上大数计数结果, 即为当前测量结果。

当 DSP 获取条纹信号的波形之后, DSP 记录下最新的峰值 V_p 和谷值 V_v , 然后通过被测点的通道 1 信号电压 V_1 和通道 2 电压 V_2 计算出被测点在该片段的位置。计算公式如下所示, 其中一个莫尔条纹代表长度为 d 的位移量, L_{AB} 定义为 A 点到 B 点的距离。

首先, 片段 I 和片段 III 的长度是

$$L_I = L_{III} = \frac{d}{2} - \arcsin\left(\frac{T_h - T_l}{V_p - V_v}\right) \times \frac{d}{\pi} \quad (1)$$

片段 II 和片段 IV 的长度是

$$L_{II} = L_{IV} = \arcsin\left(\frac{T_h - T_l}{V_p - V_v}\right) \times \frac{d}{\pi} \quad (2)$$

当被测点位于片段 I, 片段 I 中被测点的左片段长度 L_{left} 和右片段长度 L_{right} 由下式得到:

$$L_{left} = \left[\pi - \arcsin\left(\frac{2V_1}{V_p - V_v}\right)\right] \times \frac{d}{2\pi} - \frac{L_{II}}{2} \quad (\text{如果 } V_2 > 0) \quad (3)$$

$$L_{left} = \arcsin\left(\frac{2V_1}{V_p - V_v}\right) \times \frac{d}{2\pi} - \frac{L_{II}}{2} \quad (\text{如果 } V_2 < 0) \quad (4)$$

$$L_{right} = L_I - L_{left} \quad (5)$$

当被测点位于片段 II, 片段 II 中 L_{left} 和 L_{right} 由下式得出:

$$L_{left} = \frac{L_{II}}{2} - \arcsin\left(\frac{2V_1}{V_p - V_v}\right) \times \frac{d}{2\pi} \quad (6)$$

$$L_{right} = L_{II} - L_{left} \quad (7)$$

当被测点位于片段 III 和片段 IV 时, 其计算公式和上面相似, 在此不加赘述。

3.4 计数与细分的匹配

在任何一种计数方法的开始和结束位置都可能出现 ± 1 的计数误差。由于本计数方法的特点, 只可能发生多计数的情况。例如 D 点为起始位置, 光栅正向移动, 下跳过 E 点时计一个数, 经 F、G 点, 上跳过 H 点时再计一个数, 过 H 点后光栅反向移动, 回到 G 点, 结束测量。从 D 点到 G 点仅有半个周期, 但 DSP 计了两个数, 多计一个, 第二次计数属于错误计数, 应该消除。传统的计数方法对此无能为力。

为解决这个问题, 我们在开始测量时记录起始点的所在片段, 经正向(或总体正向)位移后记

录当前点所处的片段, 根据所计数的奇偶性来判断是否计错数。例如当图 4 中信号从最左端 B 点 (属于 I 片段) 开始计数, 到 S 点 (属于 I 片段) 停止, 计数值应该是偶数, 否则应减 1 个数。若从最左端 O 点 (属于 IV 片段) 开始计数, 到 E 、 F 中间一点 (属于 III 片段) 停止, 计数值应该是偶数, 否则应减 1 个数。因此, 根据起始点位置不同有四种不同的情况, 结束点也有四种情况, 在光栅正向移动时有 16 种不同情况需要考虑。为方便起见, 表 1 给出了这 16 种情况的逻辑图, 表中左边第一列为始点所处片段, 上边第一行为止点所处片段, 表中“1”表示计数值应为奇数, “0”表示应为偶数。与表中情况不同时计数绝对值应减 1。同理, 当目标位移量为负时, 存在同样一个逻辑图, 如表 2 所示, 共计 32 种情况。在测量时需要分别加以考虑。

Table 1 Logic table of positive displacement

Stop Start	I	II	III	IV
I	0	0	1	1
II	0	0	1	1
III	1	1	0	0
IV	1	1	0	0

Table 2 Logic table of negative displacement

Stop Start	I	II	III	IV
I	0	1	1	0
II	0	1	1	0
III	1	0	0	1
IV	1	0	0	1

当获取到起始点、测量点的细分片段值以后, 然后用上面 32 个判别准则对计数值进行校正, 我们便可根据以下公式计算出最终完整准确的位移值。例如图 2 中从 B 点到 S 点的正位移 L_{BS} 由公式 (8)、(9) 得到

$$L_{BS} = (\text{Count} - 1) \times \frac{d}{2} + L_{\text{right}_B} + L_{\text{left}_S} + L_{II} \quad (\text{Count} > 0) \quad (8)$$

$$L_{BS} = |L_{\text{right}_S} - L_{\text{right}_B}| \quad (\text{Count} = 0) \quad (9)$$

从 S 点到 B 点的负位移 L_{SB} 由公式 (10)、(11) 得到

$$L_{SB} = (\text{Count} + 1) \times \frac{d}{2} - [L_{\text{left}_B} + L_{\text{right}_S} + L_{II}] \quad (\text{Count} < 0) \quad (10)$$

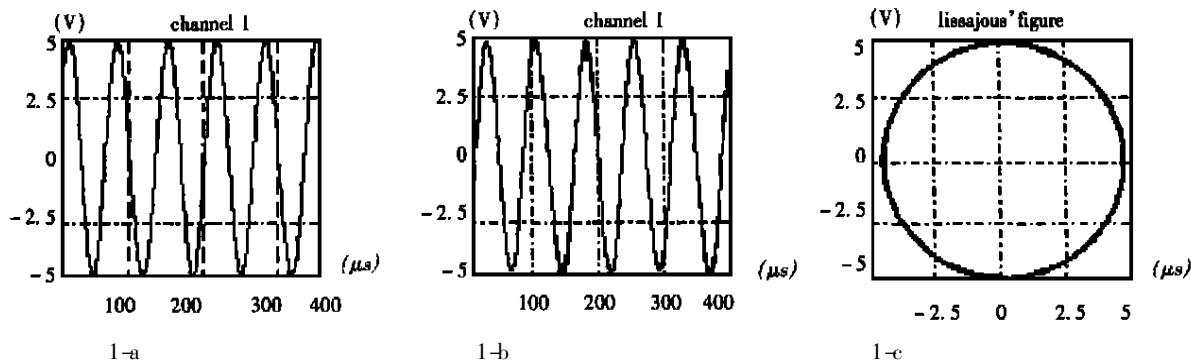
$$L_{SB} = - |L_{\text{left}_S} - L_{\text{left}_B}| \quad (\text{Count} = 0) \quad (11)$$

上述公式中, Count 是通过 32 条判别准则校正以后的计数值, d 为单个脉冲对应的位移值。

4 实际效果检验

图 5 显示的是测量时高速采集的实际波形, 每通道 4k 点数据, 信号幅值为 $\pm 5V$, 为高倍数的细分奠定了良好的基础。其中 (1-a)、(1-b)、(1-c) 显示的是单方向位移测量时的两通道波形及合成李沙育图。光栅系统中莫尔条纹的位移光学分辨率是 $1\mu\text{m}$, 细分倍数为 500。实际测量计数值为 10, 起始点的右片段值 318nm , 终止点的左片段值为 366nm , 片段 II 的长度为 100nm 。根据公式 (8), 最终计算的位移值为 5284nm , 数显值的波动范围为 2nm , 这是由测量分辨率与噪声共同决定的。

(2-a)、(2-b)、(2-c) 显示的是测量轴向小位移振动时的两通道波形及合成李沙育图, 振动频率在 10kHz , 振幅在 $1.5\mu\text{m}$ 以内。在这种情况下, 该计数细分方法仍然能够正常工作, 表现出极强的适应性、和很宽的动态测量范围。这是传统计数细分系统无法完成的。



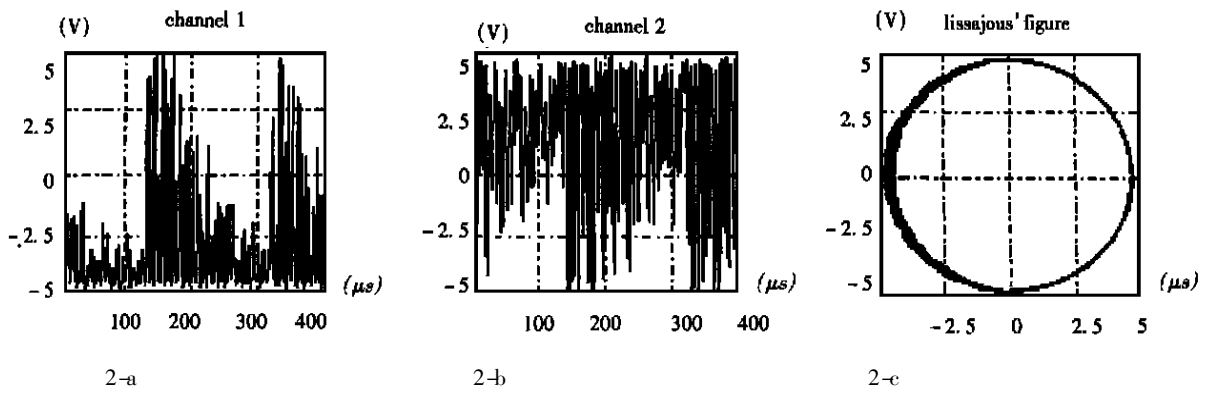


Fig. 5 Experimental results

本方法在几套光栅位移测量系统中都得到了广泛的应用场合。成功的应用。表现出极强的可靠性,可大大拓展系

参考文献:

- [1] 森山茂夫. 用衍射光栅进行精密位移检测[J]. 国外计量, 1984,(6):11- 14.
- [2] Su Shaojing, Lu Haibao. A software solution to counting and subdivision of Moiré fringes with wide dynamic range[C]. Proc. SPIE, 2000, 4222: 308- 311.
- [3] 孟超. 高精度光栅测量系统的误差修正理论与技术研究[D]. 天津: 天津大学, 1996.
- [4] Wang Yueke, Lu Haibao, Su Shaojing. Dynamic mixed signal processing instrument based on multi-DSP[A]. Proceedings of the 3rd International Symposium on Test and Measurement[C]. Beijing: International Academic Publishers, 1999, 237- 241.

DSP based counting and ultra- precision subdivision of Moiré fringe with wide dynamic range

SU Shao-jing, LU Hai-bao, LI Sheng-yi

(*Institute of Mechatronics Engineering National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

Abstract: A method of counting and subdivision of Moiré fringe is provided to implement precision displacement measurement. The counting and subdivision of the fringe are completed in DSP (digital signal processor), so it can solve the problem that counting circuit can't match the subdivision system properly by logical judgement. Because of utilizing high-speed optoelectronic converter and flash sample technique, the system can process Moiré signal with wide frequency range. The example demonstrates in the paper can count and divide signals from DC to 1MHz, i. e. If the optical sensitivity of the signal is 1 fringe per μm , the fastest measuring speed can reach 1000mm/s, and the highest resolution is in nm level. The experimental result shows that the software solution has high accuracy and sound reliability.

Key words: Moiré fringe; counting; subdivision; digital signal processing

作者简介: 苏绍景(1973-),男,江西南昌人,国防科技大学测试计量技术及仪器专业博士研究生,从事光电精密检测、测试信号处理方面的研究工作,获部委级科技进步二等奖一项,在国内外学术期刊和会议上发表论文十余篇。