

激光相关测速中的半极性相关方法*

陈长缨 郑莹娜 刘 强

(广东工业大学电信系 广州 510643)

提要 提出了一种激光测速的新方法——半极性相关法,它既具有极性相关法中数字信号便于延迟的优点,又保留了经典相关法中不丢失幅度信息的长处。文中证明了半极性相关法与经典相关法具有相同的最大峰值点,并给出了初步的实验结果。

关键词 激光测速,半极性,相关测量

采用激光相关检测法测量多相混合流态物料的即时速度,是一种对物料流量实施非接触计量与在线速度监控的新方法。通过对在管道(或传送带)上游采集到的信号 $x(t)$ 给予一个可控延时量 τ 的滞后,再与下游信号 $y(t)$ 进行相关运算,便得到两个信号的互相关函数 $R_{x,y}(\tau)$ 。调节 τ 的大小,总可找到使 $R_{x,y}(\tau)$ 出现极值的最佳延时量 τ_0 。 τ_0 即为流体经过上、下游两传感器之间所需的渡越时间。此时,物流的实际速度为

$$v = l/\tau_0 \quad (1)$$

式中 l 为上、下游两个传感器采样点的间距。

通常,传感器采集到的信号是一个随机的模拟信号,根据物流速度及表面粗糙度的不同,其频谱域会在大范围内变化。对一个宽带模拟信号实施可调节的延时,技术处理上会有不少困难。因此,出现了将模拟量二值化的极性相关法^[1]。其基本方法是通过一个过零比较器将大于零及小于等于零的模拟量值分别转化为 $+A$ 与 $-A$ 两个值再进行相关运算,该方法利用数字信号处理电路进行上游信号的可控延时,为简化结构带来了极大方便。然而,由于在转化过程中丢失了原模拟信号的幅度信息,因而需要比原来更长的信号序列来进行运算,方可获得有明显峰值的互相关函数,由此影响了流速流量监控的实时性。

为克服上述两种相关分析方法的不足,本文提出了一种新的相关测速方法——半极性相关法。它既具有极性相关分析方法中数字信号延时处理的简便,又保留了经典相关分析方法中不丢失原始信号幅度信息的优点,在提高相关测速方法实时性的同时减少了数字序列的存储长度。

1 半极性相关分析的基本原理

1.1 相关分析的数学表达与测速原理

* 广东省自然科学基金资助项目。

收稿日期 · 1999-02-01; 收到修改稿日期 · 1999-05-10

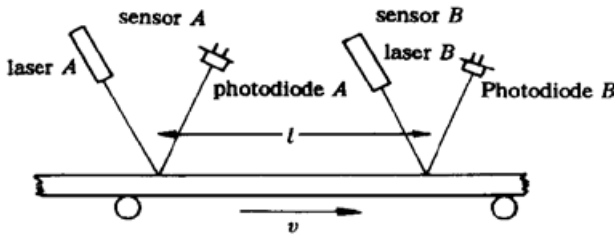


图1 相关分析测速法原理装置

Fig. 1 The principle of the correlation analysis method for speed measurement

两个随机过程 $x(t)$ 与 $y(t)$ 的互相关函数可以用随机变量的平均值来定义, 即

$$R_{x,y}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau) dt \quad (2)$$

参见图 1 所示的原理装置, 在距离 l 的两点处安装传感器 A, B 。传感器由激光器光源与光电接收管组成。激光束射向运动物料, 其散射光由光电二极管接收。两光电管接收到的光强随机信号分别为 $x(t)$ 与 $y(t)$ 。由于两个采样光点都对准物体上的同一条直线轨迹, $x(t)$ 与 $y(t)$ 两者波形应十分相似, 仅在时间轴上相差一个 τ_0 的距离。忽略微小差别后, 可有下式成立

$$y(t + \tau) = x(t - \tau_0 + \tau) \quad (3)$$

此时, (2) 式可等价地表示为随机过程 $x(t)$ 的自相关函数

$$R(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t - \tau_0 + \tau) dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t - \tau)x(t - \tau_0) dt \quad (4)$$

由不等式 $a^2 + b^2 \geq 2ab$, 知有下式成立

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t - \tau)]^2 dt + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t - \tau_0)]^2 dt \geq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T x(t - \tau)x(t - \tau_0) dt \quad (5)$$

由于 $x(t)$ 为平稳随机过程, 所以式中

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t - \tau)]^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t - \tau_0)]^2 dt = R(\tau_0) \quad (6)$$

这样(5)式可写作

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T [x(t - \tau_0)]^2 dt \geq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{2}{T} \int_0^T x(t - \tau)x(t - \tau_0) dt \quad (7)$$

(7) 式两边同乘 $1/2$, 并将(4), (6) 式代入即得到

$$R(\tau_0) \geq R(\tau) \quad (8)$$

(8) 式表明, 相关函数 $R(\tau)$ 在 $\tau = \tau_0$ 时取得最大值 $R(\tau_0)$ 。再由(1) 式便最终获得流动物体的即时速度 v 。

1.2 半极性相关分析原理

半极性相关分析是指仅将随机信号中的一路加以极性化处理, 再与另一路信号作相关运算的信号处理方法。如图2所示, 将上游采样信号通过过零比较电路进行极性化处理: 不失一般性, 将大于零的信号令其为“1”, 小于或等于零的信号令其为“-1”, 随机信号 $x(t)$ 即转化为极性化随机信号 $\text{sgn}x(t)$ 。可以证明该随机信号仍然具有平稳性与遍历性。

参照(4) 式, 将 $\text{sgn}x(t)$ 与 $x(t - \tau_0)$ 的互相关函数表示为

$$R_{\text{sgn}x,x}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \text{sgn}x(t - \tau)x(t - \tau_0) dt \quad (9)$$

采用推演(5) 式的同样方法, 可得

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\text{sgn}x(t)]^2 dt + \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t - \tau_0)]^2 dt \geq \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \text{sgn}x(t - \tau)x(t - \tau_0) dt \quad (10)$$

根据极性化信号的定义, 恒有

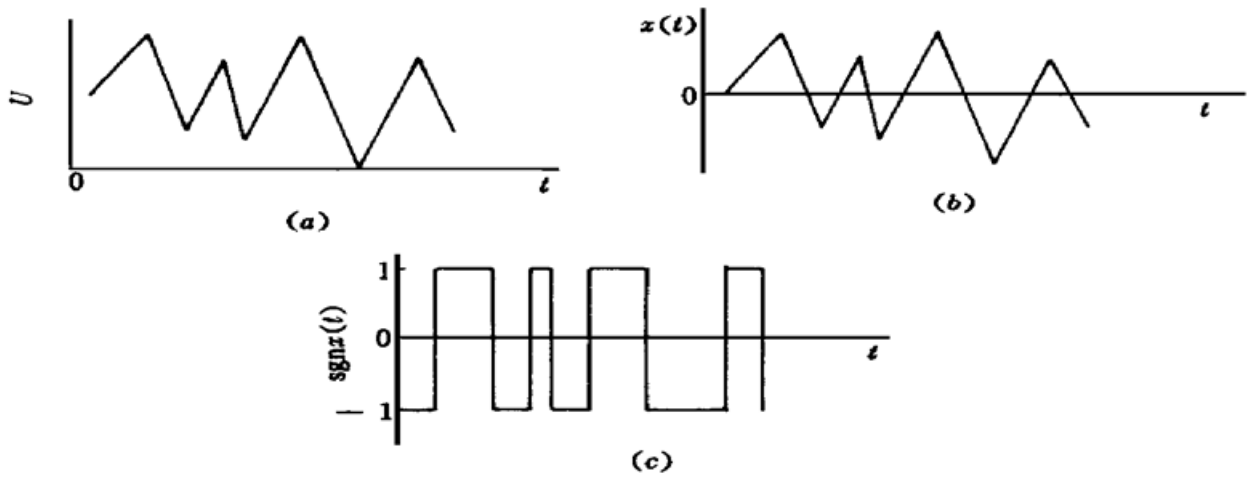


图2 极化电路的工作过程

(a) 光电传感器实际输出的信号波形; (b) 隔直流后的信号波形; (c) 极化后的信号波形

Fig. 2 The working process of the polarization circuit

(a) The practical output signal waveforms of a photoelectric sensor;

(b) The signal waveforms after D. C. separation; (c) The signal waveforms of polarization

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [\text{sgnx}(t)]^2 dt = 1 \quad (11)$$

综合(6), (9), (10)与(11)式, 得到

$$R_{\text{sgnx}, x}(\tau) \leq R(\tau) + 1 \quad (12)$$

此外, 考察 $\text{sgnx}(t - \tau)$ 与 $x(t - \tau_0)$, 只有 $\tau = \tau_0$ 时两者的过零点方能完全对齐。此时(9)式中的被积函数才能在积分区间内处处满足

$$\text{sgnx}(t - \tau)x(t - \tau_0) \geq 0$$

显然只在此时积分结果 $R_{\text{sgnx}, x}(\tau)$ 方可取得最大值

$$R_{\text{sgnx}, x}(\tau_0) = R(\tau_0) + 1 \quad (13)$$

(13)式表明, 半极性相关函数与经典相关函数具有相同的最大值点与确定的最大值数量关系, 在实际应用中用半极性相关分析来代替经典相关分析是完全可行的。

2 半极性相关测速方法的实现

2.1 半极性相关器的硬件设计

半极性相关器的硬件结构框图如图3所示。它由极化电路、可控延时器、频率合成器、相关积分器、采样—保持电路, A/D 变换器以及微机控制系统构成。该相关器能较好地完成对物流信息的多点采样, 逐点计算并进行相关分析, 同时可由操纵者对整个装置进行操控与测试、调整。

由光电传感器采集的随机信号分作上游信号 $x(t)$ 与下游信号 $y(t)$ 两路。上游信号经一个过零比较器作极化处理, 通过可控延时器延时后再与下游信号进行相关运算。由于速度与精度的要求, 延时时间 τ 采用了硬件的方式来延时。而对积分时间 T 则采用软件延时器, 以方便微机系统根据不同的测量对象加以灵活的选择。此外, 在微机内存中仅需占用两个存储单元分别存放上次采样积分值与当前的采样积分值, 而不是象以前的方案^[1]需要存放两个样本整个

采样周期内全体波形的数字序列。

2.1.1 可控延时器

可控延时器由先进先出(FIFO)移位寄存器构成。其延迟时间为

$$\tau = N/f \tag{14}$$

式中, N 为 FIFO 移位寄存器的位数, f 为移位节拍频率。(14) 式表明, 在移位寄存器位数 N 选定后只能通过平滑调节 f 来获得所需的延时量 τ 。时钟发生器发出的频率为 f_0 的时钟信号, 经频率合成器作 n 次分频后, 变成移位寄存器的移位节拍频率 f , 由此, (14) 式可写作

$$\tau = Nn/f_0 \tag{15}$$

这样, 微机可通过实时控制分频比 n 来实现 τ 的准连续变化, 且 n 与 τ 为正比例关系。

移位寄存器的位数 N 应与信号 $x(t)$ 的“精细”程度有关系。由于移位寄存器每前移一位均可视为对输入信号作一次采样, 因而 f 亦被视为采样脉冲频率。根据奈奎斯特取样定理, f 至少应满足

$$f > 2f_{\max} = 2f_x v \tag{16}$$

式中 f_{\max} 为 $x(t)$ 的最高时域频谱分量, f_x 为物料表面的最高空间频谱分量, v 为运动速度。由 (1), (14) 和 (16) 式, 可知 FIFO 移位寄存器的位数应满足

$$N = f \cdot \tau > 2f_x l \tag{17}$$

(17) 式表明, 物料表面越精细, 两传感器采样距离 l 越大要求的位数 N 就越多。

2.1.2 相关积分器

相关积分器为一个相关器与一个积分器的有机组合。根据极性价随机信号 $\text{sgn}x(t)$ 的定义, (9) 式中的被积函数可写作

$$\text{sgn}x(t - \tau)x(t - \tau_0) = \begin{cases} x(t - \tau_0), & \text{当 } \text{sgn}x(t - \tau) = +1 \text{ 时} \\ -x(t - \tau_0), & \text{当 } \text{sgn}x(t - \tau) = -1 \text{ 时} \end{cases} \tag{18}$$

此外, 考虑到 $x(t - \tau_0)$ 与 $\text{sgn}x(t - \tau)$ 均具有平稳性与遍历性, 用它的一个足够长的样本函数的数学期望来代替总体的数学期望不会引起大的误差, 忽略常数因子的影响后, 可将 (9) 式改写作

$$R_{\text{sgn}x, x}(\tau) = \int_0^T \text{sgn}x(t - \tau)x(t - \tau_0) dt \tag{19}$$

综合考虑 (18), (19) 两式, 本文设计了如图 4 所示的半极性相关积分器。

在该相关积分器中, 极性价随机信号 $\text{sgn}x(t - \tau)$ 被用作电子开关的控制信号。在 $\text{sgn}x(t - \tau) = +1$ 时, 电子开关打向上, 将正向信号 $x(t - \tau_0)$ 接入积分器积分, 而在 $\text{sgn}x(t - \tau) = -1$ 时电子开关打向下, 将反向信号 $-x(t - \tau_0)$ 接入积分器积分。直至时间为 T 时积分过程结束, 这样便完成了 (19) 式所示

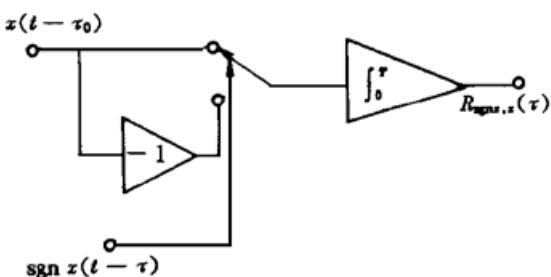


图4 相关积分器电路

Fig. 4 The circuit of a correlation integrator

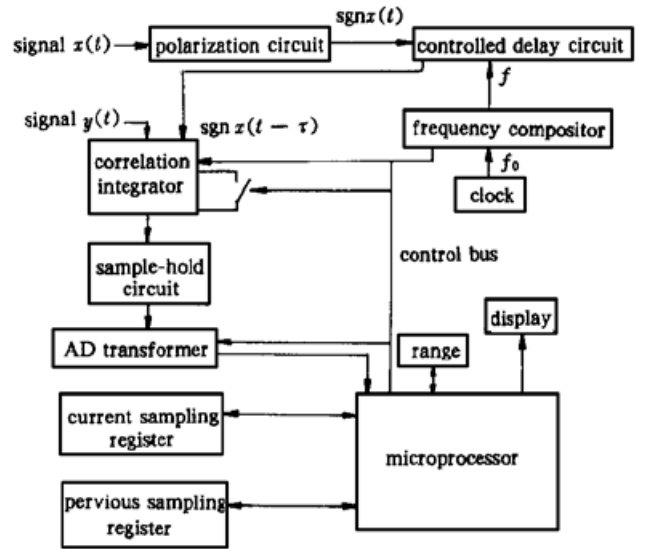


图3 半极性相关器的硬件框图

Fig. 3 The hardware block diagram of a half-polarity correlator

的相关积分运算。

2.2 实验与结果分析

在本研究中为保持两个输入通道的一致性, 将一支 10 mW, 650 nm 半导体激光器的输出分作两束光分别充当传感器 A, B 的光源。激光器光束准直后由两对光楔将光斑切割为两束光线, 两光轴中心距为 8 mm。为提高对物体“纹路”的细节分辨率, 用一对柱面镜将两光束聚焦为 8 mm × 0.015 mm 的狭长线状光斑。光源系统的工作距离为 88.72 mm。接收系统为一个 4f 系统, 其物镜为 $\phi 40$ mm 的两片组合透镜, 焦距 $f = 40$ mm, 物像距均为 80 mm。用成像方式让光斑像分别成像在两个相距 8 mm 的光电二极管光敏面上, 以减少两路信号之间的相互串扰。

实验中待测物为一由调速直流电机带动的传动带, 调整电机的供电电压改变传动带的运动速度, 用一双踪虚拟示波器观察在不同速度下延迟时间的变化。从图 5 中可清楚地观察到一次采样中上下游两路随机信号的时间差约为 2.5 ms。

为准确地获取两路输入信号的时间延迟量, 实验中使用了本文提出的半极性相关器。通过编程, 使计算机在连续地改变可控延时器延时量 τ 的同时, 逐点采集相关积分器的输出 $R_{\text{sgnx},x}$, 最后可以在显示器屏幕上同时获得两路信号的互相关曲线 $R_{\text{sgnx},x}(\tau)$, 曲线峰值的幅度及其对应的最佳延迟量 τ_0 等测量数据。半极性相关器的测量结果表明: 互相关曲线峰值明显, 其最大值为 919.08, 下游信号相对上游信号的滞后时间为 $\tau_0 = 2.5$ ms。在本方案中, 两个采样光斑的中心距为 $l = 8$ mm, 代入(1)式后, 即可得到待测物的即时速度

$$v = \frac{l}{\tau_0} = 8 \times 10^{-3} \text{ m} / 0.0250 \text{ s} = 3.2 \text{ m/s}$$

在工业生产中, 有许多物体的即时速度是难以用通常的接触测量方法来测量的, 如高温钢板、某些固液混合的流态物(纸浆, 混凝土)等。半极性相关测速法是一种非接触的测量方法, 因而可在上述场合中得到应用, 同时也避免了接触测量方法中由于滑动、磨损等引入的测量误差。由公式 $v = l/\tau_0$ 知, 该方法可能的测量误差来源为 l 与 τ_0 , 由于 l 是一个固定值, 其误差可通过定标来消除, 而对时间量 τ_0 的测量, 精度达到 10^{-6} 量级并不困难, 由此可见, 该方法可以获得较高的测量精度。另一方面, 与其他非接触测速方法(如激光多普勒方法^[2])相比, 由于半极性相关测速法是一种基于光强的测量, 所以又有光路成本低, 适应性强的优点。因此可以说, 它是一种有较好应用前景的测速方法。

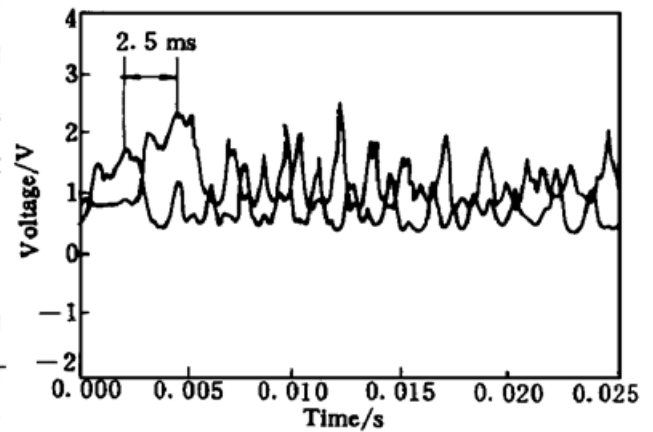


图5 两路输入信号的采样波形

Fig. 5 A sampled waveform from two-way laser sensors

参 考 文 献

- 1 Zheng Yingna, Xiang T. Y., Huang N. M. et al.. A study of real time polarity cross correlator. *Chinese Journal of Scientific Instrument* (仪器仪表学报), 1991, 12(3): 296 (in Chinese)
- 2 Chen Changying. A new type vibration sensor of laser Doppler technology. *Opto-electronic Engineering* (光电工程), 1997, 24(2): 12 (in Chinese)
- 3 A. Yrivi. Introduction to Optical Electronics. 2nd Edition. U. S. A: Holt. Rinehart and Winston, 1976. 317~ 331

- 4 J. C. Erdmann, D. C. Soreide. Fiber-optic laser transit velocimeters. *Appl. Opt.*, 1982, **21**(11): 1876 ~ 1880

Half-polarity Correlation Method for Laser Speed Measurement

Chen Changying Zheng Yingna Liu Qiang

(*Department of Electronics and Information Engineering,
Guangdong University of Technology, Guangzhou 510643*)

Abstract This paper puts forward a new method for laser speed measurement with half-polarity correlation. It not only has the advantage that the digital signal is easy to delay on polarity correlation, but also keeps the advantage that no amplitude message is lost on the classical correlation method. In this paper, it is proved that the half-polarities correlation method can give the same maximum amplitude as the classical correlation method. A preliminary test result is presented.

Key words laser speed measurement, half-polarity, correlation-measuring