

文章编号 1004-924X(2004)06-0581-06

# 计数型激光测速仪信号处理器及其应用研究

刘昌文<sup>1</sup>, 罗诗金<sup>2</sup>, 刘 杰<sup>1</sup>, 王仕康<sup>1</sup>

(1. 天津大学 机械工程学院, 天津 300072; 2. 天津大学 无线电厂, 天津 300072)

**摘要:** 讨论了计数型多普勒信号处理器, 着重介绍计数型信号处理器的工作原理, 及各主要硬件部分的构成原理和具体结构。其主体部分采用包括集成计数器、存储器、比较器为主的全硬件设计, 具有响应快和精度高的特点。通过合理设计闪烁包络检测单元、计数器主体部分和计数有效性判别电路, 既增强了处理器的噪声适应能力, 进一步提高了仪器的处理速度。并应用于双锥水力旋流器内部流场的研究, 证实了零轴向速度包络面将流场分为内外旋流区的特点, 得到了包络面为一柱锥联合面及其与旋流器结构参数之间的关系。

**关键词:** 激光测速; 多普勒信号处理; 计数器; 旋流器

中图分类号: TN911.73 文献标识码: A

## Counting LDA signal processor and its application

LIU Chang-wen<sup>1</sup>, LUO Shi-jin<sup>2</sup>, LIU Jie<sup>1</sup>, WANG Shi-kang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Radio Factory of Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A practical LDA signal processor based on the burst counting technique is presented, focusing on its working principle, hardware system and detailed construction. The processor is constructed by the common integrated circuits functioning as counter, memory, comparator and logic. The Doppler frequency related to the velocity being measured is extracted out all by hardware, so fast response can be achieved with high accuracy. Optimized design of three main parts for constructing the instrument, the burst generator which detects particles passing through the measurement volume, the counter core which obtains the period of Doppler signal and the counting validation analyzer, increase the capability of noise rejection as well. An application of the processor in the measurement of tangential and axial velocity distributions inside a hydraulic cyclone is given. The results show that the locus of zero vertical velocity, which divides the flow field into outer eddy area and inner eddy area, of the double-cone hydrocyclone is a compound surface of a cylinder and a cone, which is related to the construction parameter of the cyclone.

**Key words:** laser doppler anemometry; LDA signal processor; counter; hydraulic cyclone

收稿日期: 2004-04-22; 修订日期: 2004-09-15.

基金项目: 高等学校骨干教师资助计划和国家自然科学基金资助项目 (No. 50076033)

## 1 引言

流体中所含杂的微粒或固体表面的颗粒对入射激光要产生散射,且散射光所携带的多普勒频率与微粒或颗粒的运动速度成正比。激光多普勒测速仪(简称 LDA)就是通过探测散射光所携带的多普勒频移值来测量流体或固体表面运动的速度<sup>[1-2]</sup>。由于 LDA 测量具有不干扰被测对象、空间分辨率高、不需标定、动态响应快等特点,已被公认为是科学研究中测量复杂流场流动速度的最先进的手段,受到了普遍的重视。

由于有效的散射光很弱,又受杂散光、散射粒子尺寸和位置随机分布等的影响,使得 LDA 光电探测器输出的电信号随机间断,且信噪比较低,如何从 LDA 光电信号中实时地提取出多普勒频移值成为了一个特殊问题。各国学者一直在探索该问题,追求噪声适应能力强、动态响应快和精度高的信号处理方法<sup>[2-4]</sup>。

目前 LDA 信号处理研究以讨论数字信号处理方法为主<sup>[3-4]</sup>,因为其具有噪声适应能力强、处理速度快和精度高的特点。该方法的工作过程是:先对光电信号进行采样,再利用软件分析其频率成分,并将最强成分对应的频率值作为多普勒频移量,最终计算出被测速度的大小。随着微机处理速度和各种数字信号处理器件的飞速发展,该方法的处理速度有了很大的提高,逐步实用化。但由于主要是靠软件分析实现信号提取,处理速度有限,特别是测量精度要求较高时,计算量更大,处理时间更长,跟踪速度变化的能力受到限制。虽然噪声适应能力不及数字信号处理,但是闪烁计数型信号处理方法具有响应速度快和精度高的特点<sup>[2]</sup>。同样,受集成电路高速发展的推动,计数型信号处理方法也有长足的进步。本文研究的以全硬件方式实现的闪烁计数型 LDA 信号处理器,通过合理设计高低通滤波放大器、闪烁包络检测器、计数有效性判别电路,既增强了处理器的噪声适应能力,又进一步提高了处理速度。实际应用结果<sup>[5-9]</sup>表明:在信号质量相对较好的场合,如在前向散射接收方式<sup>[2]</sup>LDA 系统中,计数型信号处理器具有较大竞争优势。

## 2 仪器的工作原理以及硬件构成

闪烁计数型 LDA 信号处理器的基本工作原理是:利用高频时钟脉冲填充法,求得所选定的  $N$  个多普勒信号周期所持续的时间  $T_N$ ,再算出多普勒频率  $f_D$ 。具体实现原理如图 1 所示。

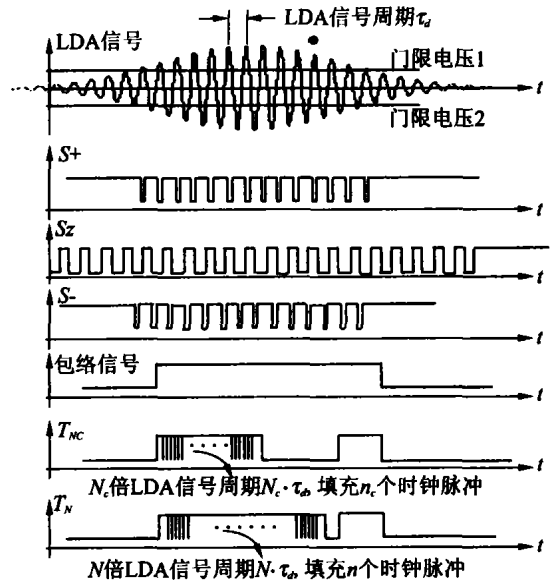


图 1 计数型 LDA 信号处理器的信号流程

Fig. 1 Signal flowchart in counting LDA signal processor

设高频时钟的频率为  $f_c$  (周期  $c = 1/f_c$ ),如在  $T_N$  时间内填充了  $n$  个时钟脉冲,则多普勒信号周期为:

$$a = c \times n / N = n / f_c N, \quad (1)$$

多普勒信号频率为:

$$f_D = N \times f_c / n. \quad (2)$$

在  $N, c$  (或  $f_c$ ) 已知的情况下,得到  $n$ ,便可求得多普勒信号频率  $f_D$ ,再由光路参数就可以求出被测速度的大小。

实际 LDA 系统的光电信号很复杂,主要是信号中包含许多噪声,同时在时间上间断,且频率随时间变化。作为 LDA 信号处理器必须能消除各种噪声的影响,捕捉信号的出现(闪烁),实时分析出多普勒频率值并记录其变化规律。针对这些基本要求,精心设计了闪烁计数型 LDA 信号处理器。它主要由四大部分构成,如图 2 所示。

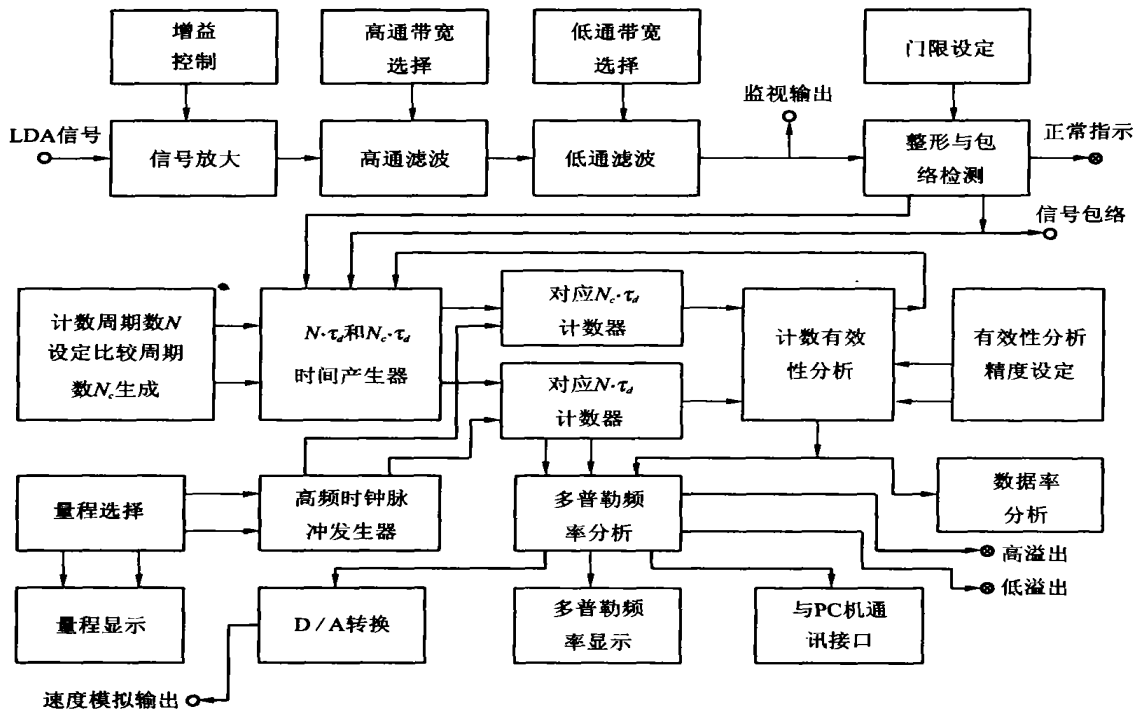


图 2 计数型 LDA 信号处理器的构成框图  
 Fig. 2 Structure of counting LDA signal processor

2.1 信号预处理(包括高通滤波器,放大器,低通滤波器,整形及信号包络产生器)

信号预处理部分将信号放大并通过滤波器滤除干扰,达到从众多干扰中选出有效多普勒信号的目的。如果有合适的散射粒子通过测量点,滤波放大后的信号将出现较大强度的闪烁,称之为包络。为了去掉多普勒信号的调幅特性并探测出包络以启动计数器主体部分,预处理时设定了不同的 3 个阈值电压  $V_+$ 、 $V_z$ 、 $V_-$  (阈值电压由操作者根据信号的强弱进行设置)对信号分别进行整形,得到图 1 所示的 3 个方波信号  $S_+$ 、 $S_z$ 、 $S_-$ 。其中过零信号  $S_z$  代表了多普勒信号的频率并与  $S_+$ 、 $S_-$  组合产生包络。如果光电信号顺序通过  $V_+ > 0 > V_- > 0$ ,则认为信号是在包络中,包络有效(Burst 为高)。如果不按照此顺序通过,则认为信号不在包络中,包络无效(Burst 变低)。可以看出包络检测的过程实际上也是信号的去噪过程。

2.2 计数主体(包括时钟产生器,计数和比较脉冲产生器,计数器 1、2,有效性判别器等)

计数主体工作时需要以下 3 个参数值:信号

脉冲数  $N$ ,量程选择值  $n_n$ ,比较精度  $e_c$ 。这 3 个参数值主要有以下的作用:

(1) 信号脉冲数,即为式(1)、(2)中的  $N$  值,它表示高频脉冲填充是在被测信号  $N$  次振荡( $N$  个周期)对应的时间内完成的。该值是由用户根据 LDA 光路结构和信号质量自行设定的(一般是  $2^3, 2^4, 2^5, \dots$ ),当  $N$  值确定后,系统会按照 8:5 的规则自行产生比较脉冲数  $N_c$ ,用于计数有效性判别。

(2) 量程选择设定值  $n_n$  决定了高频时钟发生器输出的信号频率  $f_c$ 。由于本计数型信号处理器处理的信号频率范围很宽:从 100 Hz 到 12 MHz,应用时必须根据被测信号的频率范围设定适当的时钟频率,以保证计数器 1 和 2 既不溢出又具有较大的值(以确保精度)。

(3) 比较精度  $e_c$  是有效性判别的依据。如果滤波后的信号没有包含噪声,计数过程也没有受到外部的干扰,则取两个不同的  $N$  值,同时填充高频脉冲,求得两个被测信号频率值应接近。计数有效性判别的原理就是基于这一点。图 1 中脉冲宽度  $T_N, T_{N_c}$  分别对应包络中  $N$  周(称为计数脉冲周数,通常取为 8 的倍数)和  $N_c$  周(称为

比较脉冲周数,通常取为 5 的倍数) 对应的时间长度。假设计数得到的  $T_N$ ,  $T_{Nc}$  所包含的时钟脉冲个数分别为  $n$  和  $n_c$ 。则对有效的测量应有:

$$\frac{T_N/N - T_{Nc}/Nc}{T_N/N} < e_c, \quad (3)$$

将  $T_N = e_c \times n$  和  $T_{Nc} = e_c \times n_c$  带入式(3), 得到:

$$(N/Nc) \times n_c / (1 + e_c) < n < (N/Nc) \times n_c / (1 - e_c), \quad (4)$$

当计数值满足式(4)时,计数有效,接收计数结果,并利用锁存电路将  $N$  周多普勒信号所对应的时钟脉冲数  $n$  锁存下来直到下一次有效信号的到来,如图 1 所示的第 1 次计数。如果计数过程起始于不同的包络,或被包络的结束而强行终止,或受到噪声的干扰,都将导致错误的计数结果,从而式(4)不成立,计数无效,此时不接收计数结果,如图 1 中所示的第 2 次计数。有效性判别其实是对干扰的第 3 次滤除(第 1 次是通过高、低通滤波器实现,第 2 次是通过包络产生器实现)。通过 3 次去噪可以大大提高处理器的噪声适应能力。

过去传统的计数型 LDA 信号处理器常利用单片机或微机系统通过软件来实现计数有效性判别,这样势必会影响处理器的处理速度并增加了系统的复杂性。本文讨论的计数型 LDA 信号处理器使用了查表方式,先将可能的  $n_c$ 、 $e_c$  和  $N/Nc$  计算出式(4)的左边值  $(N/Nc) \times n_c / (1 + e_c)$  (有效  $n$  的最小值,记为  $n^-$ ) 和右边值  $(N/Nc) \times n_c / (1 - e_c)$  (有效  $n$  的最大值,记为  $n^+$ ),并利用大规模存储器将  $n^-$  和  $n^+$  存储起来;实际使用中,利用实测的  $n_c$ 、 $e_c$  和  $N/Nc$  值,从存储器中读出  $n^-$  和  $n^+$ ,再利用数值比较器完成式(4)的有效性判断,接受计数值  $n$  介于  $n^-$  和  $n^+$  的数据。通过上述方法可以大大提高处理器的处理速度,对于频率随时间变化的信号具有很好的跟踪效果。

### 2.3 工作状态及被测信号频率监视与显示

这一部分主要是为了更好的监控被测信号的状态而设计的。它主要包括:模拟输出、包络检测输出、滤波输出、低溢出高溢出指示灯、信号正常状态指示灯、被测信号的频率显示和数据率的统计结果显示。

### 2.4 微机接口及数据处理软件

微机接口的作用是将有效信号的瞬时频率值

送入微机。微机根据信号频率值和被测物体的速度之间的对应关系,求出被测速度值的大小。并且完成数理统计处理、结果显示和状态监视等功能。

## 3 计数型激光多普勒信号处理器的实际应用

本套计数型多普勒信号处理器已经在流体力学、水利学、石油化工等研究领域应用,收到了较好的效果。在此只介绍在石油化工领域,应用于诊断水力旋流器内流场速度分布的情况。

液-液旋流器分离设备具有体积小、效率高、成本低和可靠性好等优点,可能成为油田开发后期油田水处理及原油集输工程更新改造的首选设备之一。这种设备的技术含量高,公关难度大。大庆石油学院利用本文讨论的计数型 LDA 信号处理器构成的激光测速系统,对双锥体结构水力旋流器的切向速度和轴向速度分布规律进行了实测研究<sup>[5-7]</sup>。测试时,需要辨别流动的正反方向,必须在 LDA 系统中引入了光学频移技术<sup>[2]</sup>,构成的测试系统如图 3 所示。

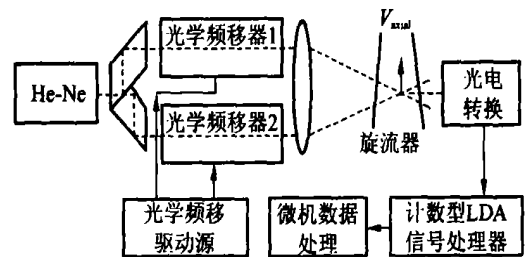


图 3 用于水力旋流器流场诊断的 LDA 系统  
Fig. 3 LDA system for hydraulic cyclone flow diagnosis

图 4 所示是旋流器结构及测试截面示意图。实测得到了各界面处的速度分布,图 5 和图 6 所示是部分实验结果<sup>[5-6]</sup>。

图 5 所示的切向速度分布反映了流场的旋转特性。图 6 所示的部分截面上轴向速度分布有特征点,那就是轴向速度为零的点;将各截面的这些特征点连接起来,就组成了零轴向速度包络面;该包络面将流场分为内外两个旋流区。外旋流区的流体边旋转边向底流流动,最终从底流口排除;内旋流区的流体则边旋转边向溢流口流动,最终从

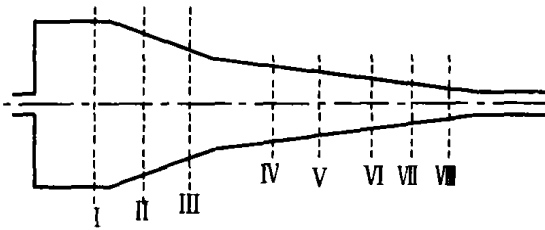


图 4 水力旋流器结构示意图  
Fig. 4 Sketch map of hydraulic cyclone

溢流口排出<sup>[6]</sup>。进一步深入分析,还可建立流场特征与旋流器结构及操作参数的关系,再配以相关的理论分析,使人们对水力旋流器的分离机理有了更充分的认识,开发出了结构合理、流场稳

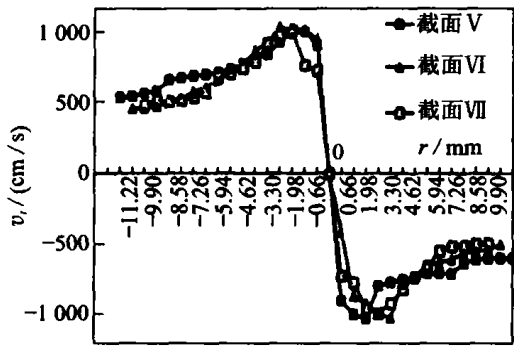


图 5 部分切向速度分布的 LDA 测量结果  
Fig. 5 Some LDA experimental tangential velocity profiles

定、分离效果好的双锥体结构水力旋流器分离设备<sup>[7]</sup>。

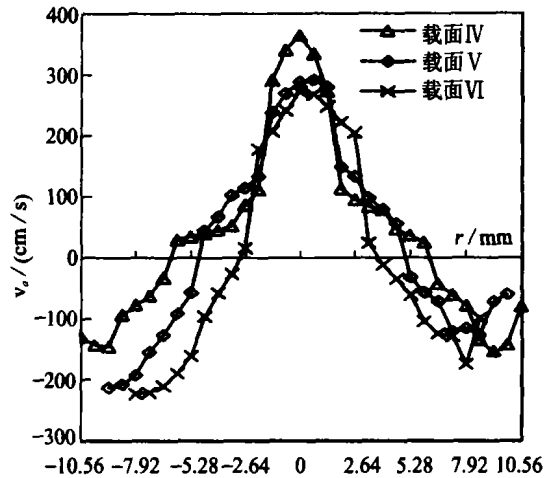


图 6 部分轴向速度分布的 LDA 测量结果  
Fig. 6 Some LDA experimental axial velocity profiles

## 4 结 论

采用通用的数字计数器、存储器和比较器,以全硬件方式构成的闪烁计数型 LDA 信号处理器,具备高精度快速提取多普勒信号的功能。配以合适的高-低通滤波放大器、闪烁包络检测器、计数有效性判别等电路,处理器的噪声适应能力大为提高后,能较好地满足流体力学、水力学、化工研究等领域的流场的测量需要。

## 参考文献:

- [1] YEH Y, CUMMINS H Z. Localized fluid flow measurements with on He-Ne laser spectrometer[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1964, 4(10):176-178.
- [2] 王仕康,沈熊. 激光多普勒技术[M]. 北京:清华大学出版社,1985.  
WANG SH K, SHEN X. *Laser doppler technology*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1985. (in Chinese)
- [3] 沈熊,张松. 激光测速数字相关信号处理器的研制[J]. 实验力学, 1998, 13(3):194-201.  
SHEN X, ZHANG S. A digital correlation signal processor used in LDV system[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 1998, 13(3):194-201. (in Chinese)
- [4] 刘昌文,路菲. 一种基于 PC 微机的新型激光多普勒信号处理器研究[J]. 光学精密工程, 2002, 10(2):130-134.  
LIU CH W, LU F. Investigation on a laser doppler anemometry signal processor based on PC[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2003, 10(2):130-134. (in Chinese)
- [5] 蒋明虎,王尊策. 结构及操作参数对旋流器切向速度场的影响[J]. 石油机械, 1999, 27(2):16-18.  
JIANG M H, WANG Z C. Effects of structural and operating parameters on tangent velocity field of Hydrocyclone[J]. *China Petroleum Machinery*, 1999, 27(2):16-18. (in Chinese)
- [6] 蒋明虎,王尊策. 旋流器轴向速度分布规律[J]. 石油机械, 1999, 27(3):17-19.

- JIANG M H, WANG Z C. Distribution pattern of axial velocity of hydrocyclone[J]. *China Petroleum Machinery*, 1999,27(3):17-19. (in Chinese)
- [7] 蒋明虎,赵立新. 注聚采出水脱油用水力旋流器机理及实验研究[J]. *石油机械*,1998,26(8):14-16.
- JIANG M H, ZHAO L X, *et al.* Mechanism of hydrocyclone for oil water separation of produced water in polymer injection[J]. *China Petroleum Machinery*,1998,26(8):14-16. (in Chinese)
- [8] 李恩帮,刘昌文. 智能计数-跟踪型激光多普勒测速仪研究[J]. *仪器仪表学报*,1995,16(2):198-200.
- LI E B, LIU CH W. Investigation on intelligent laser doppler anemometry with combination of tracking and counting [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*,1995,16(2):198-200. (in Chinese)
- [9] 刘昌文,刘杰. 油水两相分层流流动速度分布的激光诊断[J]. *流体力学实验与测量*,2000,14(2):83-87.
- LIU CH W, LIU J. Laser diagnosis of velocity profile in oil-water stratified flow[J]. *Measurements in Fluid Mechanics*, 2000,14(2):83-87. (in Chinese)

作者简介:刘昌文(1963 - ),男,四川富顺人,教授,博士,主要研究方向为激光测试技术、微机控制技术和动力机械电控技术的研究。