

光电调制反馈激光多普勒测速仪研究

史绍熙 王仕康 郭晓明
(天津大学热物理工程系)

提 要

本文介绍一种新型激光多普勒测速仪——光电调制反馈激光多普勒测速仪(简称 OEMF-LDA)。该仪器突破了传统 LDA 系统构成的模式,采用变频光学频移技术和光电混合反馈技术,将光路和电路连接成闭环负反馈跟踪环路,提高了信噪比,降低了成本。文中结合实验,讨论了 OEMF-LDA 的静态及动态特性,并在系统的结构及性能等方面与传统 LDA 作了比较。

关键词: 激光多普勒测速仪。

一、概 述

LDA 是六十年代发展起来的一种新的流速测量技术,它具有不干扰流场、空间和时间分辨率高、动态响应快、测量值与其它流动参数无关等特点,现已成为实验流体力学和燃烧测量等领域的一种重要测试手段。但是,目前国内外对 LDA 的研究还局限于从光路到电路单方向联系的水平上。整机性能的提高,往往建立在提高各个环节性能的基础上,成本及仪器的复杂性也随之提高。从而在某种程度上限制了 LDA 技术的普及和发展。我们从整个 LDA 系统有机构成的角度入手,研究、制作了光电调制反馈激光多普勒测速仪* (*OEMF-LDA)。与传统的 LDA 相比,OEMF-LDA 不仅具有更好的信噪比和动态测试范围,还具有环节少、成本低、制造工艺简单等特点。

二、仪器的结构及工作原理

LDA 是用单色激光照射到流体中的散射粒子质点上,测其散射光的多普勒频移,以确定流体的速度。双光束 LDA 的多普勒频率与被测流体的关系^[1]为

$$f_D = \frac{2 \sin(\theta/2)}{\lambda} v, \quad (1)$$

式中 f_D 为多普勒频率, v 为被测流速, θ 为两束光的夹角(常数), λ 为激光的波长(常数)。带有光学频移装置的 LDA^[2],两束相干光通过并联差分声光调制器,产生恒定的频移量 $4f$,信号频率表达式为

$$f = 4f + f_D, \quad (2)$$

通过(1)和(2)式即可求得流速 v 。流速方向为正时,信号频率在 $4f$ 的基础上增加,反之减少,因而该系统可以辨别流动方向

收稿日期: 1986年8月18日; 收到修改稿日期: 1986年11月10日

* 本仪器于 1985年11月通过技术鉴定。

OEMF-LDA 如图 1(a)所示,采用光学变频调制技术,把光路和电路连接成频移反馈跟踪的方式。主要区别在于频移器件的驱动源是由反馈电压信号控制的,于是就产生了变频光学频移作用,亦即在测量点上产生的差分频移量 Δf 随反馈电压变化。从控制理论的角度来看,如果把测量点的散射光频率 f 当作控制对象,传统的 LDA 是一个不受控的开环随动系统而 OEMF-LDA 是定值控制系统(如图 1(b)所示)。

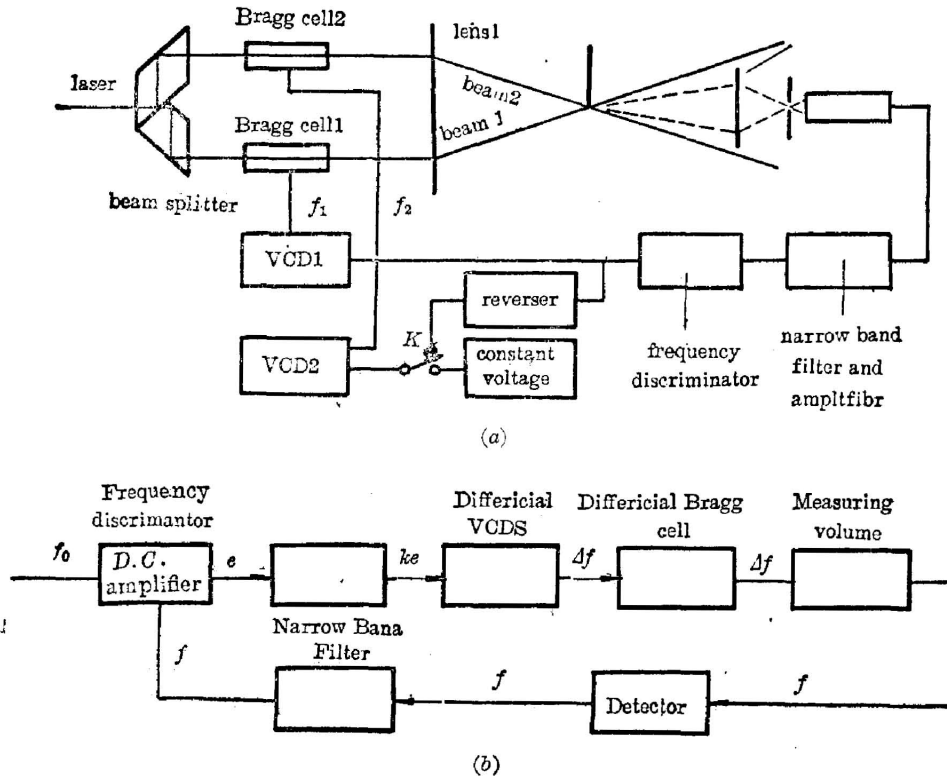


Fig. 1 OEMF-LDA system

(a) structure; (b) block diagram

由系统方块图可知,将流速在测量点产生的多普勒频率 f_D 视为“扰动”作用在被控对象上,测量点发出的散射光频率 f 经光电转换,滤波放大后与鉴频器内部的“给定”值 f_0 进行比较,比较后产生的误差电压 e 经直流放大后控制差分压控驱动源,改变频移器件输出的差分频移量 Δf ,以抵消 f_D 对系统的作用,使系统建立动态平衡。系统平衡时,差频 Δf 跟随多普勒频率 f_D 变化,而散射信号频率始终近似保持常数,即 $f \approx f_0$ 。规定了速度 v 的正方向与 Δf 的符号之后,(2)式也可适用于 OEMF-LDA 系统。于是式中的信号频率 f 为常数,频移量 Δf 随 f_D 变化,而传统 LDA 的 Δf 为常数,信号频率 f 随 f_D 变化。

三、OEMF-LDA 系统特性分析

OEMF-LDA 的系统特性可用经典控制理论^[2]提供的方法进行分析。首先要建立系统的传递函数。

光电转换器和窄带滤波放大器对时域输入信号而言是线性环节, 信号传输过程中不改变频率, 只影响幅度和相位*。所以这两个环节的传递函数都是 1。鉴频器相当于减法器与一阶环路滤波器的卷积, 忽略了移相网络的微小时间常数后, 传递函数为 $K_1(TS+1)^{-1}$ (减法折合到最后输出端)。直流放大器的传递函数为 K_2 。差分压控驱动源的载波频率远远大于调制频率, 无需考虑延迟作用, 其传递函数为 K_3 。

差分光学频移器件的动态过程比较复杂。本仪器采用中心频率为 60 MHz 的钼酸铅晶体声光调制器。来自压控驱动源的高频信号通过换能器进入晶体, 信号到达有效光束边缘有一个时间延迟, 完全复盖有效光束也需要一个过程, 可以认为, 信号从换能器开始, 经过延迟时间 τ 之后完全复盖有效光束, 因此传递函数为 $\exp(-\tau s)$ 。这个 τ 值与频移器件的几何光学参数和介质材料有关。计算结果表明, $\tau < 1 \mu s$ 远远小于环路滤波器时间常数 $T (\tau \ll T)$, 可忽略。在测量点处, $4f$ 与 f_D 进行光混频, 可认为是瞬时完成的, 没有延迟和惯性。

各环节的传递函数确定以后, 就可求得系统的传递函数

$$W_1(s) = \frac{K_1 K_2}{Ts+1+K_1 K_2 K_3}, \quad (3)$$

$$W_2(s) = \frac{K_1 K_2 K_3}{Ts+1+K_1 K_2 K_3}. \quad (4)$$

(3) 式的 W_1 是取模拟输出端作为系统输出的闭环传递函数。(4) 式的 W_2 是以差分压控驱动源输出为系统输出的传递函数。由拉氏变换终值定理可求得系统的稳态输出值

$$\lim_{s \rightarrow 0} s W_1(s) \frac{f_D}{S} = \frac{K_1 K_2 K_3}{1+K_1 K_2 K_3} \cdot \frac{f_D}{K_3}, \quad (5)$$

$$\lim_{s \rightarrow 0} s W_2(s) \frac{f_D}{S} = \frac{K_1 K_2 K_3}{1+K_1 K_2 K_3} f_D. \quad (6)$$

由(5)式、(6)式可分别算出静态相对误差都为 $(1+K_1 K_2 K_3)^{-1}$ 。开环放大倍数 $K_1 K_2 K_3$ 远大于 1, 因此误差很小。取差频输出时, 测量结果几乎与系统参数无关, 由(6)式可知, 当开环放大倍数很大时, 系统参数 K_1, K_2, K_3 在一定范围内变化也不会对输出值有多大的影响。取模拟输出时(见(5)式), 就要对 K_3 有一定的要求, 就是说, 压控驱动源的特性对模拟输出的精度有直接影响。首先是线性度, 即 K_3 是否不随输入值变化。我们选用的集成电路在 15~85 MHz 范围内的非线性度为 1%, 实际应用中, 频率变化范围仅为 60 ± 5 MHz, 在这样小的范围内, 非线性度可以忽略。其次是转换系数 K_3 的稳定性, 它主要取决于外接电容的稳定性, 用温度系数很小的云母电容或用正负温度系数相补偿的电容并联使用, 可有效地抑制温漂。最后, 输出结果实际上还要做一次减法运算才能得到 f_D , 然后求出速度 v 。由(2)式可知, 同样是求 $f_D = f - 4f$, OEMF-LDA 的 f 是常数 f_0 , 它可以选得较小, 因此处的微小漂移对测量结果影响不大, 而传统 LDA 的 $4f$ 是常数, 它不但在数值上大于 f , 而且本身是由两频移器件的频移量 $(f_1 - f_2)$ 所得, f_1 与 f_2 至少是 40 MHz 的量级, 它们的微小偏差都会对测量结果产生相当大的影响, 一般要求 f_1 与 f_2 各自稳定在六位有效数字以上。

用 $j\omega$ 代替(3)式中的拉氏算子 S , 取模之后就得到 OEMF-LDA 系统的幅频特征

* 信号幅度不传递流速信息, 可不考虑。相移不足一个周期, 也可忽略。

$$H(\omega) = \frac{K_1 K_2 \sqrt{T^2 \omega^2 + (1 + K_1 K_2 K_3)^2}}{T^2 \omega^2 + (1 + K_1 K_2 K_3)^2} \quad (7)$$

为了验证分析结果,我们做了系统的静态和动态特性实验。在图 1(a)中的测量点处安放一个由可逆直流调速电机带动的有机玻璃转盘,取定不同的转速,测得 $4f$, 代入(2)式算出的速度与转速表测得的速度相比,误差在 0.5% 以内。然后将开关 K 打到正弦波信号发生器的输出端,固定信号振幅,逐渐改变其频率,在此期间检测模拟输出信号,直到其幅度衰减 3 db 为止,在不同的电机转速(包括正反转和静止)下,测得的截止频率 f_0 相同,并与(7)式的计算结果一致,这说明对光学频移器件数学模型的简化处理是正确的。我们设计制作的 OEMF-LDA 经过整机性能测试,主要性能指标是,频率测量范围为 ± 10 MHz; 静态误差小于 0.5%; 动态截止频率为 50 kHz; 最大中心频率 f 为 500 kHz。

四、OEMF-LDA 的特点

OEMF-LDA 与现有其它 LDA 有本质的区别,关键在于散射光频率是人为给定的常数,而后者是随被测流速变化的,这就使得 OEMF-LDA 具备了显著的特点,可以归结为:

(1) 散射光信号的信噪比可以大幅度提高。这是因为信号的频带极窄,可用窄带滤波放大器代替原系统的宽带前置放大器。由于信噪比与接收带宽成反比,因而在相同的速度测量范围内,OEMF-LDA 的信噪比远好于传统 LDA 的信噪比。

(2) 对光电转换器和电子放大器的频率响应要求低。这是因为 f_0 是人为给定的常数,一般取满量程的 5% 以内,这就意味着,频率响应要求可以至少降低一个量级。

(3) 系统构成闭环工作方式以后,对各个环节的稳定性要求降低,仪器的制造工艺比较简单。

此外,OEMF-LDA 不存在传统 LDA 的“方向模糊^[3]”。而且仍保持了传统 LDA 的其它特点。

参 考 文 献

- [1] R. J. Goldstein, D. K. Kreid; *J. Appl. Mech.*, 1967, 34, No. 4 (Dec), 813~818.
- [2] 绪方胜彦; 《现代控制工程》, (科学出版社,北京,1976), 4~9 章。
- [3] L. E. Drain; 《激光多普勒技术》, (清华大学出版社,北京,1985), 192 页。

Investigation of optic-electro-modulation-feedback laser Doppler anemometer

SHI SHAOXI, WANG SHIKANG AND GUO XIAOMING

(Department of Thermo-physic Engineering, Tianjin University)

(Received 18 August 1986; revised 10 November 1986)

Abstract

In this paper a new laser doppler anemometer (LDA), optic-electro-modulation-feedback LDA (OEMF-LDA), has been described. In this system the optical components and electronic components are combined in a closed-loop by means of feedback signal which drives two Bragg cells to introduce a changable frequency difference between the two laser beams. The signal-to-noise ratio in this system is much higher than that in a conventional LDA. The frequency response of the OEMF-LDA has been discussed, based on both analysis and experiments.

Key Words: laser doppler anemometer.