

# 雷射都卜勒測速法\*

## Laser Doppler Velocimetry

美國 B&W 公司高級研究工程師

黃文旭

Dr. W. S. Hwang

### 一、前言

雷射都卜勒測速法 (Laser Doppler Velocimetry, 簡稱 LDV) 是利用雷射光自隨流體運動的小粒子散反射 (Scattered) 來測定流體之流速, 其基本原理是都卜勒頻率遷移 (Doppler Frequency Shift); 自一運動中的物體散反射的光頻率與原射入者不同, 其頻率之變化與該物體之運動速度及散反射光之幾何 (角度) 有關。若反射粒子甚小 (通常 < 10 micron) 而與流體同步法運動, 則由測定上述之頻率變化可得知粒子之速度。換言之, 即測定了流體流速。

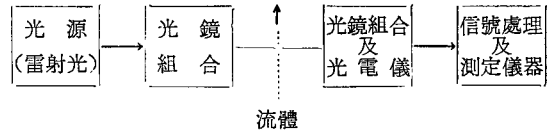
自 1964 年首次證實 LDV 測速理論可行後, 由於具有甚多傳統測速法所不及的優點 (詳見後) 立即引起科學界廣泛的注意及研究。LDV 不僅可測平均流速 (Mean Velocity), 同時可測紊流速 (Turbulent Velocity), 除了應用於各種流體 (氣體、水及其他) 之流速測定外, 最近又發展到測定固體面的運動速度, 進而有助於結構震動 (Structural Vibration) 的研究。

LDV 發展的初期會面臨困難而進展緩慢, 一則是雷射本身為甚新而昂貴之儀器 (1962 年才發現雷射), 不僅未能普遍而且其性質及危險性 (高能雷射可傷人體) 未被了解及接受, 再則是 LDV 整個測速理論牽涉了物理, 光學, 信號處理, 流體力學及其他方面的知識。非一方面專才可完全解決其所遇到的疑惑和困難。一直到七十年代才開始有齊集各方面研究人員, 不斷的舉行共同研討會及許多團隊研究的出現, LDV 科技才有長足的進展。尤其是信號處理的理論和方法日

新月異, 發展到目前雖未達完全成熟的階段, 但已能圓滿而準確的測定流速, 廣泛的應用於學術和工業界的研究了。

### 二、LDV 系統及理論

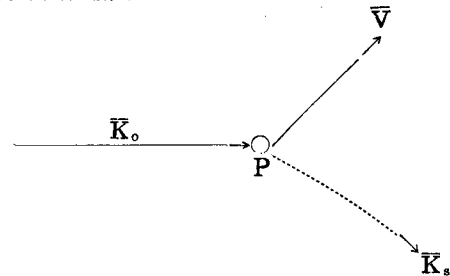
一般而言, LDV 系統包括下列主要部份:



由於應用上的需要, LDV 系統的組合及操作可有數種不同的方式, 但其基本原理還是利用都卜勒效應來測定流速的。當一光 (頻率  $K_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ ,  $\lambda$  為光波長) 射於一運動體 "P", 其速度為  $\bar{V}$ , 則在  $K_0$  方向反光之都卜勒頻率變移,  $\Delta\nu$  為

$$\Delta\nu = (K_s - K_0) \cdot \bar{V} \dots \dots \dots (1)$$

利用此公式和光鏡, 光電儀位置的幾何排列組合可推演得下列之關係:



圖(-): 基本都卜勒效應

$$= \frac{\lambda}{2\sin(\frac{\theta}{2})} \cdot \Delta f \dots \dots \dots (2)$$

\*本文為美國維吉尼亞大學工程博士黃文旭於 64 年 7 月 5 日在臺灣臺大農工系中國農業工程學會之學術講演稿。

U: 瞬時流速

$\lambda$ : 雷射光之波長

$\theta$ : 雷射光 ( $\lambda$  射光或反射光) 之交角 (見圖二)

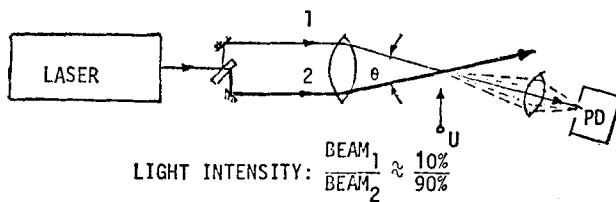
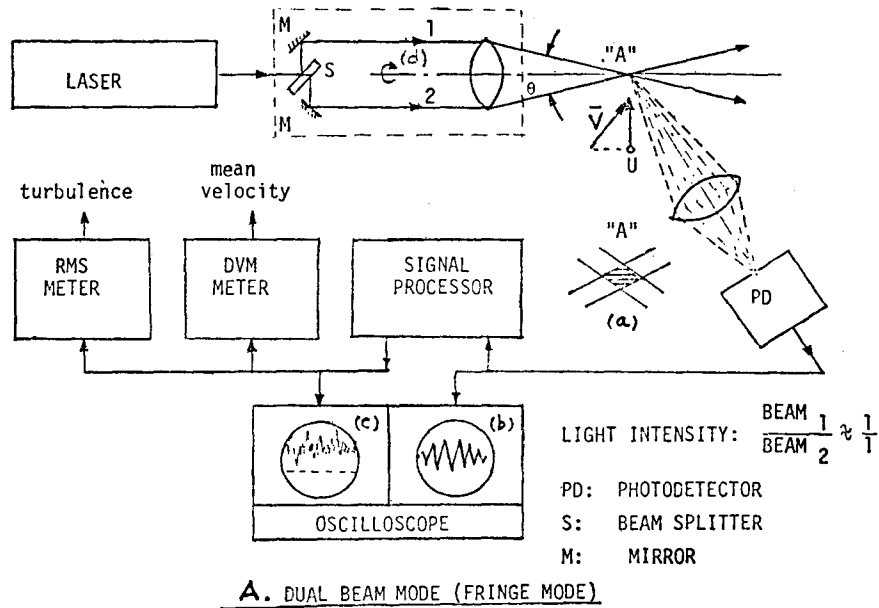
$\Delta f$ : 都卜勒光頻率

以上之關係式適用於 LDV 各種不同操作組合 (圖二)。除 (B) 法外 Photodetector 之位置與上式無關, 可放置於任何地點而對準測點來測定流速。以測點為界, 若與雷射光源同一邊之操作方式, 稱為 Backscatter Mode (圖三), 若於不同邊者稱為 Forward Scatter Mode (圖二所示均此式)。因為散射光之強度依方向而異, 以後者之操作方式可得較強之信號, 操作起來較易, 其中又以 Dual Beam Forward Scatter Mode 最常使用。

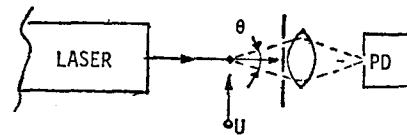
Dual Beam Mode 除了可以都卜勒效應推演得上面之關係式外, 亦可以下面光學上之光干擾理論

(Light Interference) 來解釋, 更容易令人對所測得信號了解。當兩同頻率, 同強度之光交射於測點時, 由於光的相互干擾, 於兩光道之交射區內產生一明一暗之 fringe pattern [圖(二) A. (a)] 其明暗區之距離 (fringe spacing) 由光之波長及兩光道之交射角度決定, 
$$d_f = \frac{\lambda}{2\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}$$

此交射區內時, 在明區產生強反射, 在暗區則無反射或微弱反射。因此 Detector 所獲得之信號如圖(二) A (b), 每一頂點表示粒子於明區, 底點表示在暗區, 只要測出頂點信號之頻率, 即得知粒子經過明暗區間之時間, 加上前面已知之明暗區間距離, 自然可得到粒子之速度了。由於微小粒子可與流體同步法運動, 信號之傳遞幾乎是同步反應, 所以測得之速度為瞬時速度, 其速度信號如圖(二) A (c)。由此信號可進一步測得平均流速 (Mean Velocity) 及紊流速 (Tur-

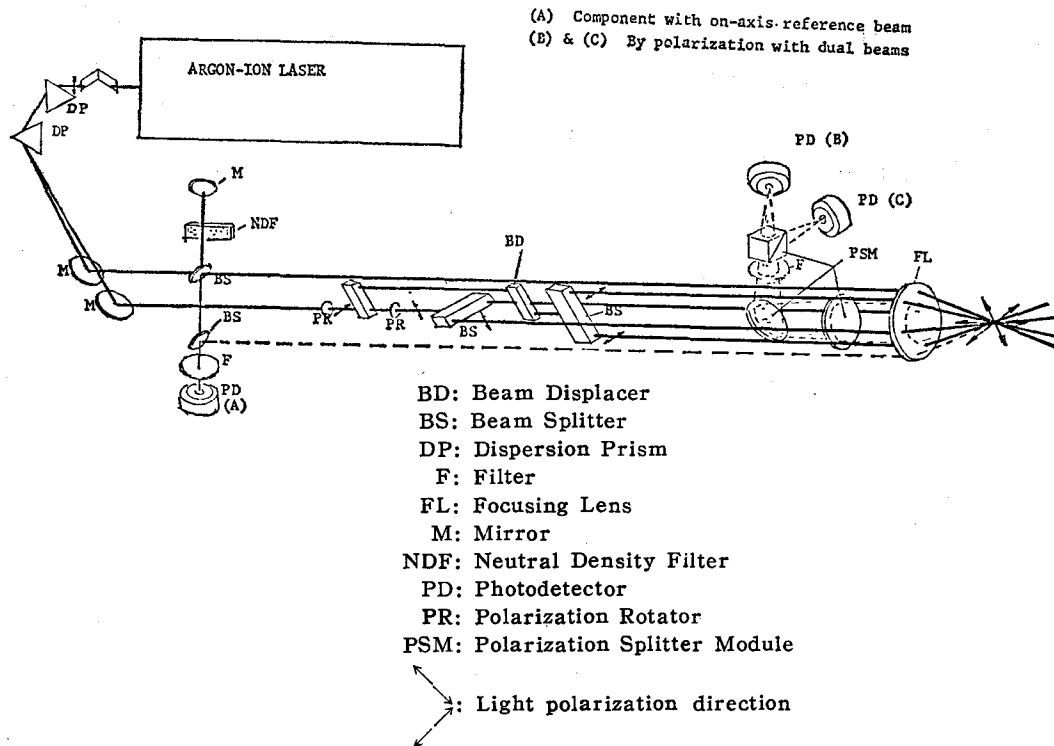


**B. REFERENCE BEAM MODE**



**C. DUAL SCATTER MODE**

圖(二): LDV 之操作組合方式



圖(三): 三方向流速測定之 LDV 組合

bulent Velocity)。

LDV 所測得之速度方向是在兩交射光道所構成之面上，而與其中間軸成直交之方向，其值即總流速 ( $\bar{V}$ ) 在該方向之投影，只要 X, Y, Z 三方向之值測得，自然可推算出其總流速及其方向，LDV 流速之測定其準確度不受其放置方向影響，不像 Pitot tube 和 Hot-wire probe 必須考慮流向產生之誤差，由於兩交射光道構成之面，決定測得流速之方向，只需依中間軸轉動分光鏡 [圖(三)A(d)] 即可測得在 360° 內任何方向之速度了，操作上頗方便。

LDV 常用之雷射為 He-Ne 或 Argon CW (continuous wave) Laser，前者為低能量，單色光 (紅光， $\lambda=6328\text{\AA}$ ) 雷射，多用於低流速，小流域之測定。後者為高能量，多色光 (藍光， $\lambda=4880\text{\AA}$ ，綠光， $\lambda=5145\text{\AA}$ ) 雷射，應用甚廣，不僅可用於低流速，小範圍，亦可用於超音速等流速測定。進一步可利用濾光鏡 (Filter) 或偏光鏡 (Polarizer) 加上一系列之各種光鏡可分引 Argon 雷射光而成三對交射光道而射入同一測點，再利用三對感光系統可同時測得 X, Y, Z 三方向之瞬時流速，這對紊流之研究提供非常相當重要的實驗資料，非 Pitot tube 及

Hot-wire 流速測定所可比擬的。圖，即此種操作之一例，由此亦可見 LDV 可簡可繁，依應用而異。

若雷射光交射於一固體面，一般面上存有之小波紋可如上述之粒子反射雷射光，同樣之原理以 Back Scatter Mode 可測定固體面上運動速度，進而應用到結構震動之研究。

### 三、LDV 測速法之優點

LDV 與一般測速儀 (如 Pitot tube, Hot-wire/film anemometer 等) 比較有下列優點：

- (1) 未置 detector 於流體內，故不干擾流況。
- (2) 不需要校準 (calibration)。
- (3) 量點甚小 (1mm×1mm)。
- (4) 流速測定與流體性質無關 (如溫度、壓力、氣體、液體等)。
- (5) 測得信號與流速為直線 (linear) 關係 [公式(2)]。
- (6) 測定流速範圍甚廣 (3mm/sec. 至 >300 m/sec)。
- (7) 所測得流速之方向由 LDV 之光鏡排列來決定，(與交角  $\theta$  之中間線成直交之方向)，

準確度不受流向影響。

#### 四、LDV 測速法之缺點

- (1) 流體必須為透明體或半透明體，所以雷射光及散射光可通過。
- (2) 流體必須有可散射雷射光之粒子，粒子之大小界限依流體而異，空氣為  $< 5\text{micron}$ ，水為  $< 10\text{micron}$ ，因太大時粒子不能與流體同步法運動，一般自來水中含有甚多粒子可用，不必另加粒子。
- (3) 實驗模型若非透明體，須裝有透明窗使雷射光能射入及散射出來。

#### 五、應 用

LDV 之應用甚廣，列舉一些如下：

——上接第 53 頁——

and will be enough for the supply of more than 100 hectares transplanting operation. This nursery production can very well cooperate with the irrigation requirement and transplanting speed ratio (Yc) at 5.42 ha/day.

#### 六：參 考 文 獻

1. 甘俊二 (1974)：水稻共同保溫育苗及機械插秧之有關研究，農復會，農林廳、臺大農工系合作編印，單行本。
2. 甘俊二、張森富 (1972)：水稻插秧機械化系統之研究，農業工程學報，18 卷 2, 3 期。p. 3-7
3. 李祿豐 (1971)：蒸氣加熱效果之研究，農業工程學報，17 卷 3, 4 期。p. 45-50.
4. 李祿豐 (1971)：水稻保溫育苗與機械插秧試驗，農業工程學報，17 卷 2 期 p. 20-26.。
5. 林文雄 (1974)：育苗方式與機械插秧對稻作影響試驗，農工學報，20 卷 1 期。p. 33-42.
6. 彭添松 (1974)：20 年來農業機械之發展，農業工程學報，20 卷特刊。
7. 張建勛 (1970)：臺灣水稻插秧機與育苗室之試驗與應用，農業工程學報，16 卷，3, 4 期。p. 1-4.
8. 張漢聖、黃根財 (1972)：水稻保溫育苗室蒸氣加熱器之設計研究，農業工程學報，18 卷 2, 3 期
9. 張訓舜 (1974)：農林廳向臺灣省議會報告書
10. 陳澤亞 (1974)：加速推行農業機械化之研究，臺灣農業，10 卷 4 期。
11. 鄔清標 (1973)：農機具檢定試驗，臺灣農業 9 卷 1 期
12. 盧守耕 (1945)：稻作學、正中書局出版
13. 汪呈因 (1955)：稻作學。p. p. 78-82.

- (1) 各種流體 (氣體, 液體) 之流速測定, 如 Mean velocity turbulence, Vortex shedding, Boundary layer profile 及 Free jet 等。
- (2) 火焰 (Flame) 速度之測定, 如工業或發電用鍋爐燃燒火焰之研究。
- (3) 兩相流 (Two-phase flow) 之流速測定。
- (4) 血液流 (Blood-flow) 之研究。
- (5) 引擎內燃燒 (Combustion) 之研究。
- (6) 金屬工廠內高熱液化金屬流體之流速測定。
- (7) 機械操作中運動零件之速度測定。
- (8) 粹弱物體之速度測定, (如薄片或非常小之零件, 不容許以任何接觸法來測定其速度)。

14. 農復會工作報告第 21 期 (1969)。p. p. 31.
15. 臺北區農業改良場 (1970, 1971)：不同苗齡及不同育苗法對水稻產量之影響，稻作改良年報 (59, 60 年)，農林廳印。
16. 臺北區農業改良場 (1975)：紙框育苗 (paper pet) 觀察試驗報告，油印本。
17. 高雄區農業改良場 (1975)：64 年度高屏地區育苗中心簡報資料，油印本 (觀摩會資料)。
18. 臺中區農業改良場 (1972)：動力插秧機育苗法綜合研究(-)(-)，稻作改良年報 (61 年版)

#### 誌 謝

本研究承臺大農工系甘俊二副教授及蘇昭山博士之指導，文成並蒙劉昆揚講師與甘俊二副教授及彭添松教授等之指正並提供寶貴意見，及湯松義先生協助繪圖又本場洪汝煌場長之鼓勵發表，在此敬致謝忱。

#### 後 記

拙作係在 64 年 6 月 1 日，深夜完成初稿。本文之發表如對本省推行機械化插秧的成效有所幫助時，應感謝張故教授建勛先生巨著「臺灣水稻插秧機與育苗室之試驗與應用」，係針對推動本省機械化插秧的最大轉捩點。也是農田水利配合輪流灌溉，與共同育苗和機械化插秧，由點跨入面的大力推動，對提高機械化與減低成本，增進農民收益，增加糧食生產最具體的事實。筆者謹以此文對吾師張建勛教授表達個人衷心悼念之忱。