

落花生終端速度之測定

The Measurements of Terminal Velocity for Peanuts

國立中興大學農機系副教授

國立中興大學農機系講師

盛 中 德

謝 廣 文

Chung-Teh Sheng

Loang-Wen Shieh

摘 要

農產品氣體動力特性之研究，浮力法已取代自由落體法。浮力法主要利用風洞進行試驗，量取物品與空氣的最終相對速度，即為終端速度。為進行氣體動力特性（終端速度）之量測試驗，本研究將規劃研製一垂直式風洞，所製之垂直式風洞利用變頻器控制風機之送風量 $0.16\sim 0.48\text{m}^3/\text{s}$ ，在 $5\text{m/s}\sim 15\text{m/s}$ 的平均風速內控制效能良好，此範圍適合一般農產品的氣體力特性研究用。利用相機重覆曝光方式攝取測試物品的水平與垂直位移，水平位移將用來檢視樣品是否在有效的均流區內，垂直位移將用來估算其速度，並計算終端速度，試驗所採用之風速略小於終端速度，如此所攝得之影像易於辨識。

以球型物品為樣品進行系統校正，所得之曳力係數介於 $0.452\sim 0.461$ 之間，與理論值 0.44 極為接近，由此說明此系統可用於農產品的終端速度量測上。以二仁落花生莢為樣品量測終端速度，所得之明顯曳力係數介於 $0.51\sim 0.67$ 之間，平均值為 0.60 ，標準誤差 0.065 ，平均值介於球形 ($C_D=0.44$) 與無限長圓柱體 ($C_D=1.2$) 的理論值之間，以幾何形狀判斷應為合理。

ABSTRACT

The floating method has replaced the free body falling method for measurements of aerodynamic properties of agricultural products. The floating method utilizes the wind tunnel to test the sample. The final steady relative velocity between the air and sample is the terminal velocity. For conducting the measurement of terminal velocity, a vertical wind tunnel was designed and constructed. The frequency inverter was used to control the airflow rate from the range of $0.16\sim 0.48\text{m}^3/\text{s}$. According to the applied flow rate, the air velocity was controlled very well within the range of $5\sim 15\text{m/s}$, which can be used to measure the terminal velocities for most agricultural products.

The horizontal and vertical displacements of a sample in a test were recorded with a camera in a multiexposure manner. The horizontal displacement was used to check if the sample was in the

uniform air velocity range or not. The vertical displacement was used to estimate the sample velocity corresponding to the ground. It can be used to calculate the terminal velocity between the sample and air inside the wind tunnel. The applied air velocity in a test was slightly less than the terminal velocity; therefore, the different images could be justified clearly and easily.

Four balls with different sizes were applied to calibrate the system. The calculated apparent drag coefficients of 0.452-0.461 from the measured terminal velocities are very close to the theoretical value of 0.44. It indicated that the constructed system could be used to determine the terminal velocities of agricultural products with experiments. The peanut pods with two kernels were selected to test. The values of apparent drag coefficient of peanuts were within the range from 0.51 to 0.67. The average value of C_{dapp} of peanut pods was 0.60, and the standard error was 0.065. The theoretical drag coefficient value of an infinite cylinder is 0.2. Considering the shape of peanut pod, it is reasonable that the average value of peanut pods was located between the theoretical values of drag coefficients of a sphere and an infinite cylinder.

一、前言：

農產品的氣體動力特性，對農產品的加工作業：如清選、分級、分類、乾燥、輸送等的作業成效，扮演著重要的角色。此方面的研究在國外已有相當的時間與成就，但受限於農產品區域特性、用途的不同，無法將國外此方面資料全盤引入使用；目前國內在此方面的研究成就除陳君（1989）曾針對農機清選器的設計做了農產品液體與氣體動力特性的研究外，尚未見有發表的。基於此，本研究參考國外已發表的設備與技術，配合國內試驗與實際應用環境的特點，研製一套適合國內使用的農產品氣體動力特性研究設備為本計畫的重點之一。

影響農產品氣體動力特性的因素非常多；如農產品的密度、體積、形狀、密度分佈、表面積粗糙特性、投影面積、阻力係數、摩擦係數、終端速度等都是，而這中間有許多因素是相互影響，這種現象造成此方面的研究非常困難。另外氣體動力特性的研究必須配合氣體流場試驗，一般的研究均在紊流（Turbulent）範圍內進行，紊流流場特性不穩定，試驗量測自然較困難；此外利用管流進行試驗時，由於流場受管壁影響，流體流速剖面並不均勻一致，對從事氣體動力特性研究的人而言，如何

製造一均流流場又成為另一挑戰。

氣體動力特性測定的方法因設備、試驗對象的不同有許多不同的設計，但大致可分為二類，即自然落體法與浮力法二種。自然落體法的使用因受其對作業環境要求的限制，實際應用較困難。浮力法依試驗研究狀況的不同又可再細分為漂浮法與落體法二種，其實此二種方法在基本機構與功能上非常類似，實無再細分的必要。本研究即依浮力法的原理，研製一農產品氣體動力特性測量設備，並將對設備進行作業效能檢測與分析，最後將針對落花生進行氣體動力特性研究。

二、文獻探討：

一物自高處自由落下，由於受地心引力影響，物體落下速度將增快，直到地心引力與阻止運動的曳力（Drag Force）與浮力和相等時，物體即進行等速運動，此速度稱之為終端速度（Terminal Velocity）。Mohsenin（1986）曾指出：在一穩定狀態下，當達終端速度時，若物體密度大於流體密度時，物體將做落體運動。反之物體密度較小時，則做上浮運動。不同物質因密度、幾何外觀的不同，有不同的終端速度，基於此空氣流（Air Stream）常在農業上被用來進行移除雜質或分選

產品之工作，在這些利用空氣流的加工作業中，若能了解終端速度將有助於作業中空氣流速的選定與效能的掌握。

由於影響終端速度的因子有許多，終端速度研究的能否成功也必須有許多條件配合。首先必須有一處良好的試驗室，若採用自由落體法，必須有一試驗高塔及嚴格的環境控制，使試驗受外界干擾減至最低，以得到精確的位置與速度位置量取，這些要求使得自由落體法施用的可能性大為降低。Keck 與 Goss (1965) 利用一低壓的通道，讓種子自由落下，以光遮斷法計數，量取苜蓿種子與玫瑰花種子的速度並計算曳力。Kiker 和 Ross (1966) 曾以穀物為試驗對象，利用自由落體法量取終端速度並估計曳力係數，同時他們說明自由落體法最大的優點，在試驗時可將風洞實驗中管壁的影響減至最小。另外他們也指出在試驗中由於穀物的運動會帶動空氣運動，實驗狀況與實際的自由落體仍有差異。

Gilgillan 與 Growther (1959) 即指出終端速度為一相對速度，可以利用空氣與樣品之間的相對速度值估計終端速度。因此他們在一垂直的風洞中，利用空氣向上吹樣品，降低樣品的絕對下降速度，分別量取馬鈴薯、石塊、泥塊的終端速度，並計算曳力係數，這些數據為馬鈴薯採收機分選機構設計的依據。

Garrett 與 Brooker (1965) 以玉米為試驗對象，利用二度空間求取曳力係數，以產品的水平距離與速度估計運動時間，垂直距離求取垂直速度改變量。他們指出速度應為空氣與產品的相對速度，此外產品在空氣中的方向性對氣體動力特性的值影響很大。

隨後研究人員廣泛的採用浮力法進行氣體動力特性研究，如 Menzies 與 Bilauski (1968) 的苜蓿草氣體動力特性研究，Muller 等人 (1967) 的核桃以氣體動力特性分級的研究，West (1972) 有關小麥的氣體動力特性研究，Law 與 Collier (1973) 對不同形狀的穀物進行試驗，Baerdemaeker 與 Segerlind 也利用氣體動力特性的差異進行草莓的分級作業。

產品的幾何特性影響氣體動力特性極大，而最大垂直投影面積為重要的幾何因子；Mohsenin (1986) 提及產品在進行氣體動力特性實驗時，最穩定的方向為受曳力最大的方向，即垂直投影面積

在流場方向上最大。但 Bilanski 等人 (1986) 在他們的研究中發覺穀物在風洞中的方向幾乎是無限制的，由於形狀的不規則，實驗中發覺樣品做旋轉運動的情況處處可見，但大部份仍能保持最長軸與流場方向垂直。

Garrett 與 Brooker (1965) 在研究中發現玉米的形狀、大小與試驗時玉米的方向均會影響曳力係數，他們利用等體積球的直徑估計雷諾數 (Reynolds Number) 與直垂投影面積，在試驗中方向的改變為試驗誤差的最大來源，因此他們認為所求得的並非是真正的曳力係數，應稱之為明顯曳力係數 (Apparent Drag Coefficient)。Menzies 與 Bilanski (1968) 利用長短不同的苜蓿草莖做試驗，樣品本身的表面特性與密度均視為相同，研究結果顯示明顯曳力係數與苜蓿草莖的長度成反比。

有關氣體動力特性試驗，攸關成敗的最重要兩個因素是流場的掌握與物品速度的準確量測。因此大部份為氣體動力特性研究所製作的試驗風洞均須具備均流的功能，而均流的目的在提供一均勻一致的流場；即流速穩定不變，如此試驗可在穩定的狀態下進行，所量測的數據自然較準確。Menzies 與 Bilanski (1968) 指出可利用鐵絲網與蜂巢 (Honeycomb) 達到均流的效果；Molfe 與 Tatepo (1972) 在他們的試驗風洞中亦加裝了均流裝置，但並未言明是何種機構，均流效果如何亦未述及；Baerdemaeker 與 Segerlind (1974) 在進行草莓的風洞實驗時亦加裝了均流機構。Jindal 等人 (1974) 在他們的試驗風洞中所使用的均流機構為蜂巢。除 Menzies 與 Bilanski 與 Jindal 等人在他們的論文中明白指出均流機構為一蜂巢結構外，其餘均未明示採用何種均流裝置，但應為類似的機構。

氣體動力特性中試驗中物品速度的準確量取對研究者而言常為一大挑戰，取得速度後如何判定其為終端速度又是另一難題。利用放射線量取速度 (Keller 等人, 1972) 須精密的儀器與嚴格的試驗環境，Chang 等人 (1986) 利用光學感測器配合 LED 量取穀物的下降速度，雖準確度高但試驗環境要求高，易受外界光源干擾，以上方法在本研究中都有採用上的困難，因此利用高速攝影機或相機拍取試驗狀況，再判讀所攝的影像仍是最普遍採用的方法 (Bilanski 和 Lal, 1965; Halles, 1972)

；Fiscus 等人，1971)，攝影機可連續拍攝，在資料取得上較連貫，但由不在一起的影像上判讀連續性資料常成爲一大難題。欲將多重影像呈現在一起，一般高速照像機都具有此種攝影的功能，它可利用相機本身的重覆曝光作業進行，亦可利用閃光器在一次快門開閉之間完成多次攝影作業，這種作業方式有時略嫌繁瑣，但資料判讀容易且準確性高。利用閃光器作業一般頻率較高，作業環境中其他光源的管制需較嚴格，使用相機本身的重覆曝光功能進行作業，一般頻率較低，作業環境要求亦低，較適合氣體動力特性研究使用。

三、理論分析：

若有一物體在一流體中作下墜運動（如圖 1），物體所受力應具有下列關係：

$$W = f_D + F_B \quad (1)$$

W：物體本身所具有的重力。

$$W = mg$$

f_D ：物體所受之曳力。

$$f_D = 1/2 \cdot C_D \rho_f A V_t^2$$

F_B ：物體在流體中所受之浮力。

$$F_B = \rho_f g V$$

m：物體質量。

g：地球之重力加速度。

ρ_f ：流體密度。

V：物體體積。

C_D ：曳力係數。

A：垂直最大投影面積。

V_t ：終端速度 (Terminal Velocity)

ρ_D ：樣品密度。

D：樣品直徑。

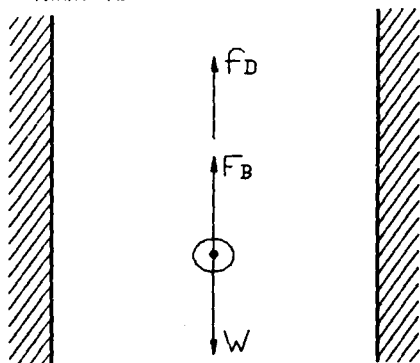


圖 1 流體中物體下墜所受應力圖
Figure 1 The forces on a dropping body in fluid.

若物品形狀爲一球體時

$$V_t = \frac{4gD(\rho_p - \rho_f)}{3C_D \rho_f} \quad (2)$$

McCabe 與 Smith (1976) 提到球體的曳力係數 C_D ，可以雷諾數 (Re) 表示：

$$C_D = \frac{P}{Re^Q}$$

$$Re = (VD\rho_f)/\mu_f$$

他們並指出常數具有下列關係：

$$0 < Re < 2 \quad P = 24.0, Q = 1.0$$

$$2 < Re < 500 \quad P = 18.5, Q = 0.6$$

$$500 < Re < 2 \times 10^5 \quad P = 0.44, Q = 0$$

Mohsenin (1985) 提到球體的曳力係數關係爲

$C_D = 0.44$ 當 $1.0 \times 10^3 < Re < 2.5 \times 10^5$ 此範圍表示流場爲紊流。若物品形狀爲一長柱條時

$$V_t = \frac{gD(\rho_p - \rho_f)}{2C_D \rho_f} \quad (3)$$

此式適用 $C_D = 1.2$ 當 $1.0 \times 10^2 < Re < 2.5 \times 10^5$ 陳君 (1989) 以二維流場進行分析，指出球體之雷諾數爲

$500 < Re < 2 \times 10^5$ ， $C_D = 0.44$ 並以此推得：在紊流中試驗球之速度變化爲：

$$V = 1/a \cdot \tanh(abt) \quad (4)$$

$$b = g |1 - \rho_f/\rho_p| \quad (5)$$

$$a^2 = (C_D A \rho_f) / (2mb) \quad (6)$$

已知終端速度爲一物體在流場中運動可得的終端速度，除非流場有變化，否則應爲一定值。已知 $\tanh(3) = 0.995$ ， \tanh 函數之極限值即爲 1，因此可預估其最終終端速度爲

$$V = 1/a,$$

因此可將上列式子(4)、(5)、(6)合併爲

$$V_t = \left[\frac{2mg}{C_D A \rho_f} \left| 1 - \frac{\rho_f}{\rho_p} \right| \right]^{1/2} \quad (7)$$

在一般情形下以空氣爲流體介質，其密度遠小於試驗樣品物質的密度 ($\rho_f \ll \rho_p$)，(7)式可再簡化爲

$$V_t = \left[\frac{2mg}{C_D A \rho_f} \right]^{1/2} \quad (8)$$

四、試驗設備與步驟：

(一)試驗設備：

空氣由風機驅動通過氣室 (Plenum) 進入均流區 (用麥管粘結捆紮而成，均流效果良好)，均

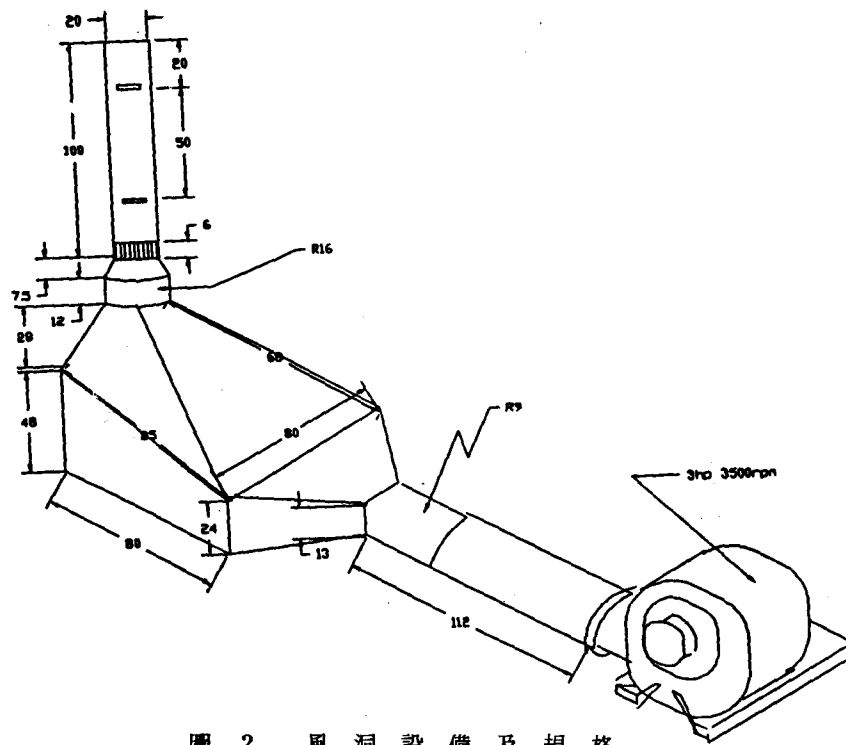


圖 2 風洞設備及規格
Figure 2 The Wind Tunnel Size

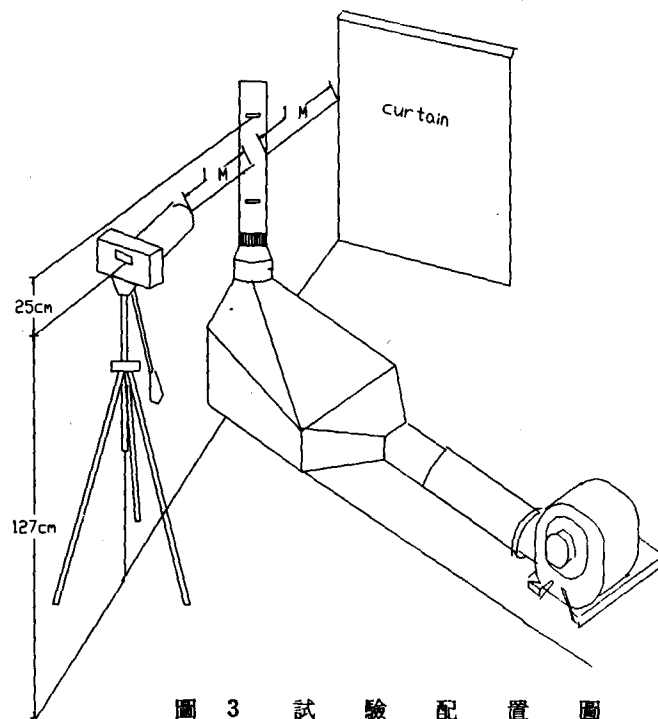


圖 3 試驗配置圖
Figure 3 Installation of Experiment

流後空氣進入試驗管中（即風洞）；整個設計及規格參考圖 2。

所使用之儀器如下：

A.風速計 (SIBATA, Mini Anemometer)

：用以量取風洞的流場速度剖面，實驗時並用以量取試驗的風速。

B.風機 (GE, Induction Motor, 5Hp, 3500 FPM)：輔以變頻器 (陽岡電機, Transister Inverter, 5Hp) 用以控制風量，最高平均風速可達 25m/s，此已遠超過試驗所需要。

C.密度計 (Micromeritics, He-Pycnometer)

：利用氦氣與雙缸氣壓差原理量取物體之實體積，主要是氦氣能通過的孔隙均將自體積中排除。

D.相機 (Nikon, F-4S)：單眼高速相機，每秒可高速自動攝取 6.7張相片，亦可利用自動重覆光功能於一張相片內攝取多重影像，本試驗以每秒重覆曝光 5 次進行。

(一)試驗步驟：

1.試驗配置如圖 3，相機置於風洞前方，背面置一黑色遮光布幕。

2.在風洞之一側貼以上下相距 50cm 之兩片紅色膠布（作為攝取樣品之參考起點與終點），取樣品（花生）置於膠布上方處，使其自由落下，待越過上紅色膠布後以重複曝光方式每秒 5 次拍攝花生介於膠布間之運動情形。

3.改變變頻器之頻率，利用不同的風量，重覆試驗。

4.使用 Nikon F4S 相機，其捲片速度可達 1 秒 6.7張，實驗時以光圈 3.5，速度 1/250 秒拍攝。攝前先扳開連續曝光桿，使其重複曝光 5 次，即能在照片中顯示花生落下過程的五個連續位置，每個位置間隔時間為 0.2 秒。

5.將沖洗出之照片置於數位板上，以 Auto CAD 量取照片中兩膠布間的距離後除 50，即為比例尺大小；此後所量得照片中各兩點間之距離再乘上此比例尺即為各點實際距離；求得距離後再除以時間（各點時間間隔為 0.2 秒），即為花生在設定之風速下掉落過程中的平均速度。

6.在風洞內的選定位置上，沿徑向以風速計量取試驗的風速（對應於一特定的變頻器頻率），利用所量得的風速觀察速度剖面圖，選定均流區，即試驗的有效區域。

7.每次試驗後均利用風速計，實際量測均流區內的

風速。

五、結果與討論：

(一)風洞性能：

利用風洞測試終端速度必須在一均勻流速之流場內進行，因此如何得到一均勻流速之流場，常成為研究成敗之重要關鍵之一。本研究之試驗風洞，在空氣進入風洞入口處加裝一均流裝置，利用麥管粘貼捆紮而成。在管流中流體為正發展中或已充分發展所具有的特性有很大的不同，如此試驗結果亦不相同，另流體為層流 (Laminar flow) 或紊流 (Turbulent flow) 所具有的特性也有很大的差異，層流與紊流的判定可參考雷諾數值。

本研究中 $V \sim 10\text{m/s}$, $D \sim 0.2\text{m}$,

$$\mu = 1.815 \times 10^{-5} \text{ kg/m-s}$$

則 $Re = 1.1 \times 10^5$ ，此值遠大於 2300，故試驗之空氣流為紊流，紊流自入口變化至充分發展的入口長度 (Entry length) 為

$$Le/D \geq 40 \sim 100$$

以最小 40 估計，管子長須 8m 以上才能成為充分發展紊流。本研究流場雖非充分發展，但試驗仍可利用其中央均流部分進行。（參考圖 4）

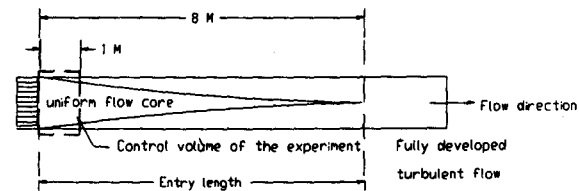


圖 4 管流之發展圖
Figure 4 Flow field developing in a pipe

利用變頻器改變風機轉速，可達到改變送風量的目的，不同的送風量，有不同的速度剖面與值，圖 5 至 8 為 10、20、30、40 等四種頻率在風洞內均流區上方 10cm、40cm 與 70cm 二個佔置的空氣速度剖面圖，四個圖均明顯地表示出 10cm 處流場不穩定，40cm 與 70cm 處流場較穩定且在離管心 70cm 半徑內流速近乎一致。此表示若在此範

圖內進行試驗，試驗因流場改變所引起之誤差可減至最小，有效之流場請參考表 1。圖 9 至圖 11 為在風洞不同高度時各頻率的空氣速度剖面圖，由圖 9 可知在風管靠近均流機構之流場不穩定，應避免在

10公分附近進行試驗，圖 10 顯示在 40公分處頻率為 40 時的空氣速度剖面均勻性較差，此時之 $Re = 1.8 \times 10^5$ ，極為接近有效試驗的上限 2.0×10^5 ，自然穩定性較差，其餘各頻率均無異常現象。

表 1 各種頻率、高度截面內不同不同截面半徑處之各點速度關係表

頻率 (1/sec)	x (cm)		0.00	0.32	0.52	0.71	0.84	0.96
	v (m/sec)	y (cm)						
10		10	4.50	5.05	5.85	5.60	5.05	2.60
		40	4.35	4.50	4.40	4.30	4.00	2.65
		70	4.40	4.50	4.50	4.35	3.70	3.10
20		10	8.55	9.00	8.40	8.70	9.05	7.85
		40	8.40	8.50	8.20	8.20	7.60	5.30
		70	8.40	8.50	8.40	8.20	7.45	5.45
30		10	12.45	12.10	12.80	13.00	12.50	9.85
		40	11.90	12.20	11.95	11.80	10.85	7.00
		70	11.90	12.25	12.15	11.90	10.50	7.95
40		10	16.75	15.80	17.00	15.60	15.50	2.15
		40	14.85	15.90	15.35	14.70	13.40	9.25
		70	14.95	15.20	15.20	14.80	13.40	10.00

(二) 終端速度量取系統校正：

利用浮力法量取終端速度 (V_t)，實際為空氣速度與測試物品的相對速度。本研究利用變頻器控制風機風量，使向上吹的風速與物品之終端速度儘量一致，若有困難則容許少許下降，再由下降的軌跡量取均等的下降速度，用以修正上升的空氣速度，成為實際的樣品終端速度。

$$V_t = V_{air} - V_p$$

V_{air} ：空氣向上吹之速度 (m/s)

V_p ：物品在風洞內下降之速度。

表 2 為四個不同球體的試驗數據所量得之終端速度與理論終端速度之比較，最大誤差為 5.7%，應為可接受，圖 12 即為試驗終端速度與理論終端速度之比較，由圖可知本試驗裝置在在量測物品之終

表 2 球之質量、規格、終端速度、曳引阻力等物理特性表

球	質量 (g)	直徑 (cm)	密度 (g/cm)	理論速度 (m/s)	實驗速度 (m/s)	Cd
一	2.6	5.75	0.026	5.94	5.60	0.5192
二	2.7	4.70	0.047	7.49	7.21	0.4868
三	1.2	3.72	0.043	6.30	6.29	0.4538
四	0.5	3.35	0.026	4.47	4.65	0.4266

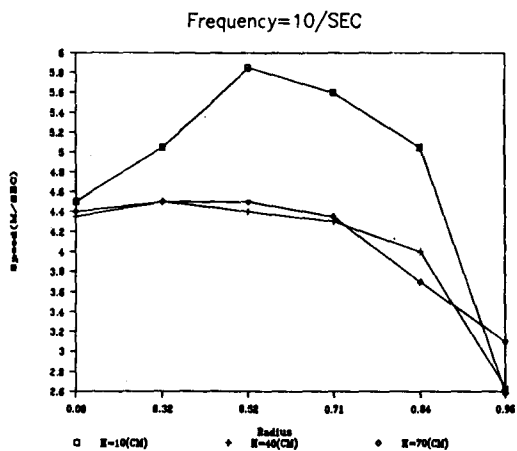


圖 5 變頻器頻率 = 10/sec 時風洞內不同高度空氣流速剖面

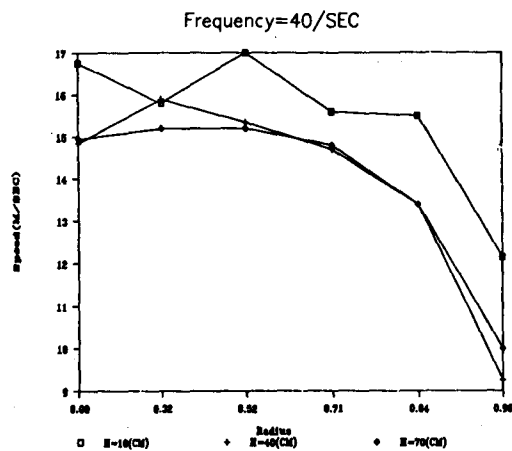


圖 8 變頻器頻率 = 40/sec 時風洞內不同高度空氣流速剖面

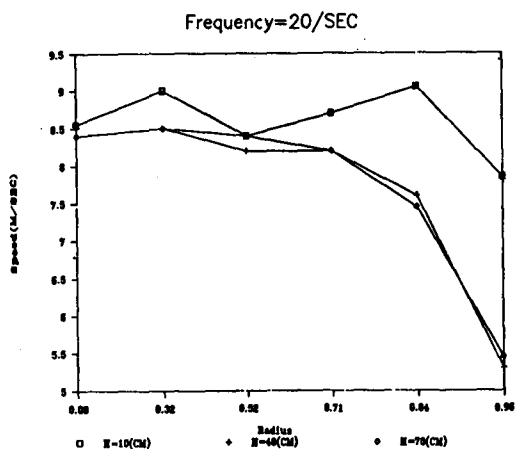


圖 6 變頻器頻率 = 20/sec 時風洞內不同高度空氣流速剖面

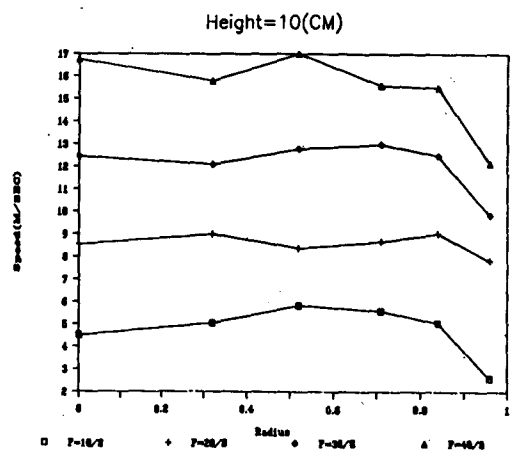


圖 9 在不同頻率下流區上方10公分處空氣流速剖面

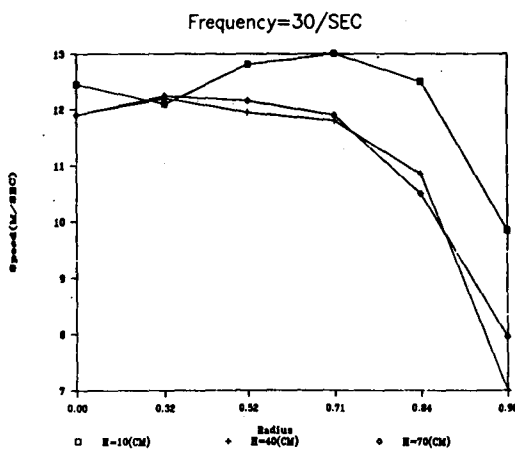


圖 7 變頻器頻率 = 30/sec 時風洞內不同高度空氣流速剖面

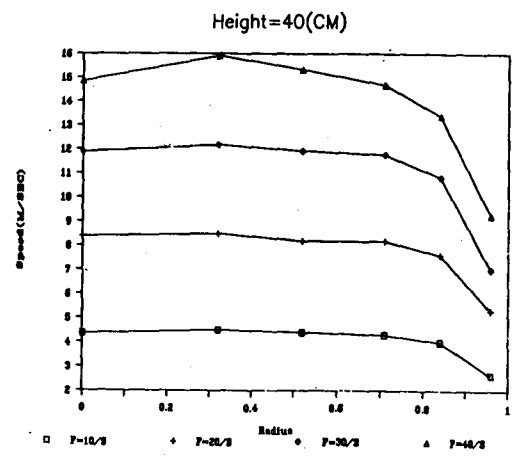


圖 10 在不同頻率下均流區上方40公分處空氣流速剖面

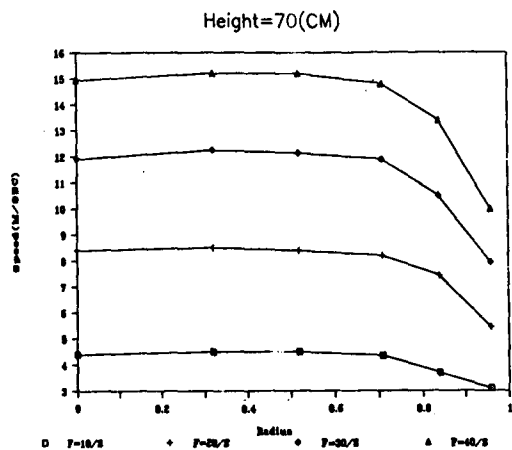


圖11 在不同頻率下均流區上方70公分處空氣流剖面

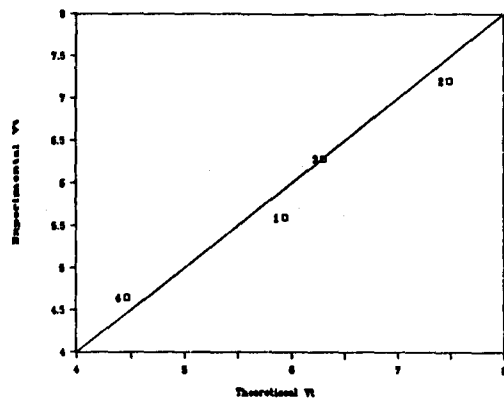


圖12 不同球體之理論終端速度與試驗終端速度

端速度時，所測得的值應可接受。

若以所測得的終端速度 (V_t) 計算明顯曳力係數 (Apparent drag Viscosity) 與理論曳力係數相較 (0.44)，參考表 2，表中各球之 C_D 均大於理論值 0.44，但誤差均小於 5%，此試驗值可接受。另一方面此結果也表示試驗球本身並非理想的球。

$$V_t = [4gd_p (\rho_p - \rho_f) / 3C_D \rho_f]^{1/2}$$

(三) 落花生終端速度：

進行落花生終端速度之量取實驗前，先檢視落花生之外型，雖然似乎存在著某些規則性，但其中的變化仍非常多，有單粒、雙粒、三粒的區別，亦有帶腰身與不帶腰身的差別。參考 Agrawal 等人 (1973) 對西班牙品系落花生幾何外型研究成果，報告指出落花生外型大致可分為四類：

- 第一類：單粒橢圓型 (One Kernel ellipsoid)
- 第二類：雙粒橢圓型 (Two Kernel ellipsoid)
- 第三類：成對橢圓型 (Paired ellipsoid)
- 第四類：不規則對稱型 (Cassinoid)

一般以第二類果實最飽滿，最為普遍。本試驗所採用測試之落花生即屬此類，如此可減少因外型不同所引起的差異。

表 3 為試驗用落花生之幾何數據、質量、量測之終端速度，理論速度為與落花生等體積球之理論終端速度，由表中可發覺實際之終端速度均小於等體積球的理論速度，此代表以球之曳力係數 0.44 估計落花生之曳力係數過於保守，落花生之形狀與球相差很多。落花生之球理論終端速度依下列式子計算：

$$V_t = \left[\frac{2mg_p}{C_D A \rho_f} / \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \right]^{1/2} \quad (9)$$

C_D ：球型物之理論值為 0.44。

A：垂直最大投影面積。

表 3 花生的質量、直徑、長度、密度、終端速度等相關物理特性表

花生	質量 (g)	直徑 (cm)	密度 (g/cm)	投影面積 (cm)	理論速度 (m/s)	實驗速度 (m/s)	
一	2.1300	1.4900	3.7500	0.693620	4.8332	12.76504	11.8081
二	2.0500	1.5000	3.4400	0.690783	4.4265	13.08573	10.6099
三	1.9000	1.5300	3.6000	0.615841	4.7572	12.15207	10.4166
四	2.1000	1.5000	2.9250	0.757552	3.6911	14.50377	12.1602

欲計算曳力係數或終端速度，最大投影面積為一種主要的幾何因子，而除用影像處理技術外，並無簡單的方法可用以正確地估計最大投影面積。

Jindal 等人 (1974) 曾以剝外皮平鋪的方式估計農產品的表面積，但對最大垂直投影面積並無探討。

此部份在本次研究由於受限於設備無法進行，不過 Agrawal 等人 (1973) 曾對落花生的幾何外型做過深入的研究，他們的報告提供一組最大垂直投影面積與長度、直徑的試驗數據，由於本試驗同樣以 Spanish 品系落花生為試驗對象，作者大膽地引用他們的資料，並以統計線性迴歸方式，求得下列關係式：

$$A = 0.152 - 0.157 \times L - 0.385D + 1.219 \times L \times D \quad (10)$$

L：落花生軸長度 (in)

D：落花生最大橫寬 (in)

A：最大垂直投影面積 (in²)

R² = 0.9893 (相關係數)

式子(10)將被用來估計試驗樣品落花生的最大垂直投影面積，表 3 中之 A 即由式子(10)求得。

六、結論與建議：

落花生氣體動力特性之研究為一相當具挑戰性的研究工作，風洞的設計須能掌握流場，提供一均勻的流速剖面進行實驗，欲得到一完全均勻之剖面極為困難，但提供一區域滿足試驗的需要是可以達到的。本研究所研製之風洞在一 20cm 直徑風洞內提供一 14cm 寬的區域供試驗，此風洞可擔任絕大部份顆粒狀農產品之氣體動力特性研究需要。

落花生之形狀規則中帶有變化，所量測之終端速度與計算的明顯曳力係數介於球型與無限長圓柱型間為合理之結果，不過差異性仍達 10%，此也許可由試驗步驟的再改進而縮小，但以農產品的不規則應為可接受的結果。

本次計畫在風洞設計、製作上，在終端速度量測上均有了結果，此結果尚可接受，但仍有以下列數點可供改進：

1. 利用相機攝取影像，若採用換片連拍方式，資料判讀較為困難，以重覆曝光方式，從單一相片上判讀資料準確度較高，但影像超過四、五個時，無法判定順序為一大缺點，因此試時樣品應進行下沉運動，誤差可減少，下沉速度不可大於 0.2

m/s，此點本次研究尚未能充分掌握。

2. 最大垂直投影面積在曳力係數計算上非常面要，由於無影像判讀備設可供使用，只能以別人的數據來估計，由於農產品具有區域性，引用國外資料於國內農產品，誤差在所難免，此為未來計畫繼續努力的目標之一。
3. 測試樣品在風洞中試驗時，由於本身形狀的不規則，容易產生力偶而旋轉，旋轉造成落花生的側向移動，另曳力亦受影響，此對量測的準確性影響很大，而此種旋轉現象又時常發生，因此在未來應考慮仿航空風洞增加曳力測量系統，鎖定測試樣品方向。

七、REFERENCES

陳世銘, 1989, 清選器之電腦輔助設計, 中國農業工程學報 35(1): 25-37.

Agrawal, K.K., B. L. Clary, and E.W. Schroeder. 1973. Mathematical Models of Peanut Pod Geometry. Transactions of the ASAE 16(2): 315-319.

Baerdemaeker, L. De, and L.J. Seegerlind. 1974. Aerodynamic Properties of Strawberries. Transactions of the ASAE 17(4): 729-732, 736.

Bilanski, W. K., D. K. Jones, and D.N. Mowat. 1986. Mechanical and Aerodynamic Separation of Whole-Plant Corn Silage into Grain and Stover. Transactions of the ASAE 29(5): 1188-1192.

Bilanski, W.K., and R. Lal, 1965, Behavior of Threshed Materials in a Vertical Wind Tunnel, Transactions of the ASAE 8(3): 411-413, 416.

Chang, C.S., C.R. Martin, and F.S. Lai. 1986. Grain Velocity Measurement with Optical Sensors. Transactions of the ASAE 29(5): 1451-1456.

Fiscus, D. E., O. V. Foster, and H. H. Kautmann, 1971. Grainstream Velocity Measurements. Transactions of the ASAE 14(1): 162-166.

Garrett, R.E. and D.B. Brooker. 1965. Aerodynamic Drag of Farm Grains.

Transactions of the ASAE 8(1): 49-52.

Gilligan, G. and A.T. Growther. 1959. The Behaviour of Potatoes, Stones, and Clods in a Vertical Air Stream. Journal of Agricultural Engineering Research 4(1): 9-22.

Hallee, Neal D. 1972. Aerodynamic Properties of Potatoes and Associated Soil Materials. Transactions of the ASAE 15(2): 303-307.

Jindal, V.K. and N. Mohsenin and J. V. Husted. Surface of Selected Agricultural Seeds and Grains. Transactions of the ASAE 74(4): 720-725, 728.

Keck Howard, and J. R. Goss, 1965. Determining Aerodynamic Drag and Terminal Velocity of Agronomic Seeds in Free Free Fall. Transactions of the ASAE 8(4): 553-554, 557.

Keller, Duane L., Ali F. El-Saiedi, R.M. Rubin, and H. H. Converse. 1972. Measuring Corn-Kernel Velocities in a Pneumatic Conveyor by a Radioactive Tracer Technique. Transactions of the ASAE 15(6): 932-934.

Kiker, C.F. and I.J. Ross, 1966. An Equation of Motion for Multiple Granular Particle in Free Free Fall in Enclosed Vertical Ducts. Transactions of the ASAE 9(3): 468-473, 479.

Law, S. Edward and John A. Collier. 1973. Aerodynamic Resistance Coefficients of Agricultural Particulates Determined by Elutriation. Transactions of the ASAE 16(6): 918-921.

Mccabe, W.L. and J.C. Smith, 1976. Unit Operation of Chemical Engineering. 3rd ed. McGraw-Hill Inc., New York.

Menzies, D. and W.K. Bilanski. 1968. Aerodynamic Properties of Alfalfa Particles. Transactions of the ASAE 11(6): 829-831.

Mohsenin, Nuri N. 1970. Physical Properties of Plant and Animal Materials. Gordon and Breach Science Publisher, New York.

Muller, R. A., D.B. Brooker and J.J. Cassidy. 1967. Aerodynamic Properties of Black Walnuts: Application in Separating Good and Bad Walnuts. Transactions of the ASAE 10(1): 57-61.

West, Neal L. 1972. Aerodynamic Force Predictions. Transactions of the ASAE 15(3): 584-587.

Wolfe, R.R. and C. G. Tatepo. 1972. Terminal Velocity of Chopped Forage Material. Transactions of the ASAE 15(1): 137-138, 140

收稿日期：民國80年2月11日

接受日期：民國80年3月5日

專營土木、水利、建築等工程

嘉南土木包工業

負責人：吳其旺 地址：台南縣將軍鄉將富村22號
電話：(06)7942627·7940627

專營土木、水利、建築等工程

開盟營造有限公司

負責人：李安南 地址：台南縣永康鄉中華西街31號
電話：(06)2329710