

# 2022 年【全國科學探究競賽-這樣教我就懂】

## 高中（職）組 成果報告表單

### 題目名稱：地面效應之成因及影響因素之分析與研究

#### 一、摘要：

本研究自製風洞以模擬飛機飛行，測量其升力及壓力變化，探討地面效應成因與影響因素。首先，透過改變飛機距地高度，觀察地面效應、升力與距地高度的關係。接著，測量機翼各處壓力，了解地面效應下之壓力分佈及變化。之後，分析地面效應之成因。再來，加裝翼尖小翼，探討翼尖形狀對地面效應之影響，並對翼地效應機提出設計想法。最後，探討飛行速度對地面效應的影響。

研究結果顯示：地面效應下飛機升力隨距地愈近而漸增；翼下壓力於近地一定程度，隨距地愈近而上升；翼尖上壓力隨距地愈近而愈小。地面效應可分兩階段，主要成因以翼尖渦流影響較顯著，次要為翼下高壓氣墊影響。而有翼尖小翼的飛行器翼尖渦流受破壞程度較大，有較好的能源效率及應用。

#### 二、探究題目與動機

高中課程中學習過白努力定律及飛機飛行的相關原理，再加上鄰近新竹空軍基地，經常看到戰鬥機起降，而對飛機很感興趣的我們偶然在新聞上看到了中國「彩虹-T1」翼地效應無人機完成測試的消息，感到好奇的我們便去網路上搜索一翻，我們發現地面效應的原因竟然有兩套不同的說法，我們不禁好奇地面效應到底是如何運作的？

早在 1932 美國單翼機飛行員就曾注意到單翼機在降落時，下降速度較預期低，感覺飛機很難再下降，好像機翼下方有氣墊存在[1]，這種升力提升的現象被稱為地面效應。目前學界對於地面效應的解釋有兩種說法：

##### (一) 高壓氣墊：

2014 年 Qiulin Qu 等人[2]解釋飛行器接近地面後，機翼下會形成高壓氣墊，使飛機升力提高。

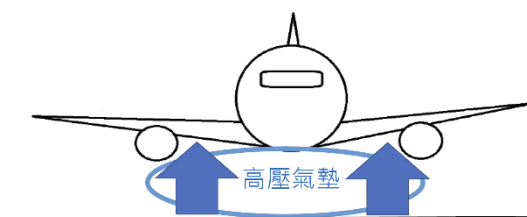


圖 1 高壓氣墊示意圖

##### (二) 翼尖渦流：

2011 年孫瑞敏[3]研究顯示當機翼因上下壓力差產生升力時，機翼下壓力大於機翼上壓力，使得氣流由側面經由翼尖向上捲動，形成會降低飛機升力且增加阻力的翼尖渦流，隨著機翼距地高度的降低，翼尖渦流的發展空間受到地面限制，飛機的升力增加。

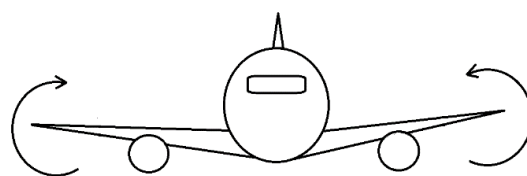


圖 2 翼尖渦流示意圖

#### 三、探究目的與假設

- |                       |                    |
|-----------------------|--------------------|
| (一) 探討飛機升力與距地高度之關係    | (四) 研究翼尖形狀對地面效應的影響 |
| (二) 探討地面效應作用下之壓力分布及變化 | (五) 探討飛行速度對地面效應的影響 |
| (三) 探討造成地面效應的原因       |                    |

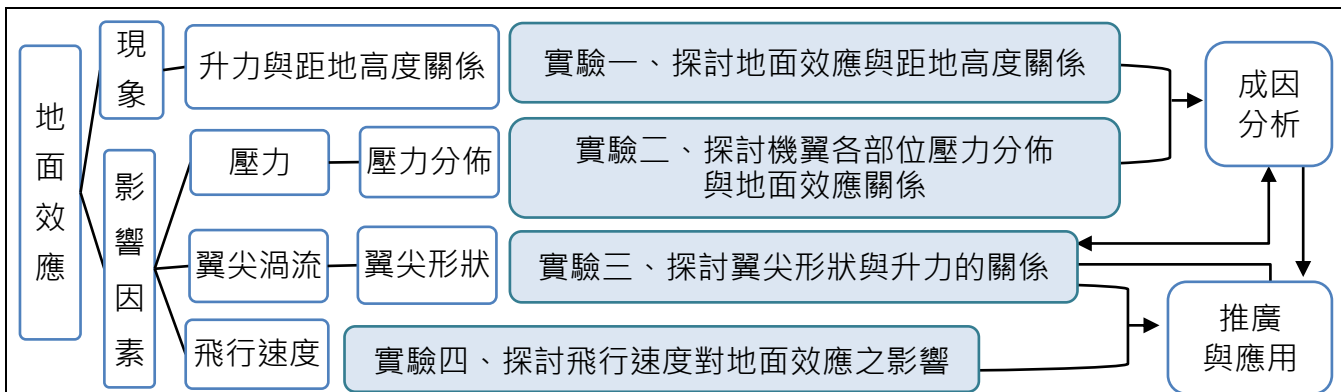
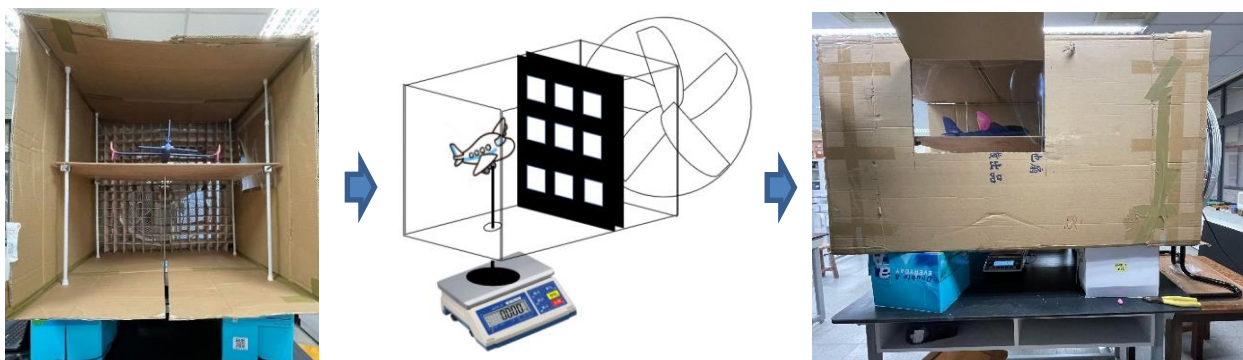


圖 3 研究架構圖

#### 四、探究方法與驗證步驟

##### (一) 風洞製作與飛機

1. 將紙箱拼裝成四方形外框，置入自製整流板，並置於四個紙箱之上、電扇之前。
2. 以伸縮桿和 S 型夾及木板製作可調式地板。
3. 飛機連接一細桿，穿越木板及紙箱後固定於一底座上，底座置於電子秤上以測量升力。



##### (二) 距地高度對升力之影響

1. 實驗步驟：
  - (1) 測量風扇風速及機翼攻角。
  - (2) 以皮尺測量機翼距地高度。
  - (3) 打開風扇，以手機拍攝秤讀值並以 Tracker 紀錄飛機 30 秒內平均升力數據。
  - (4) 調高木板，減少機翼距地高度並再次測量數據。
  - (5) 將各高度升力數據整理並繪製成圖加以分析。

##### 2. 研究結果與討論：

如圖 4，攻角為  $4.0^\circ$ ，風速  $6.356 \text{ m/s}$  時，飛機升力隨距地愈近而提升，由距地  $43.00 \text{ cm}$  的  $61.44 \text{ gw}$  到距地  $2.4 \text{ cm}$  時  $100.90 \text{ gw}$ ，升力增加了  $39.46 \text{ gw}$  ( $64\%$ )，可知飛機在此範圍內受到了地面效應之影響。

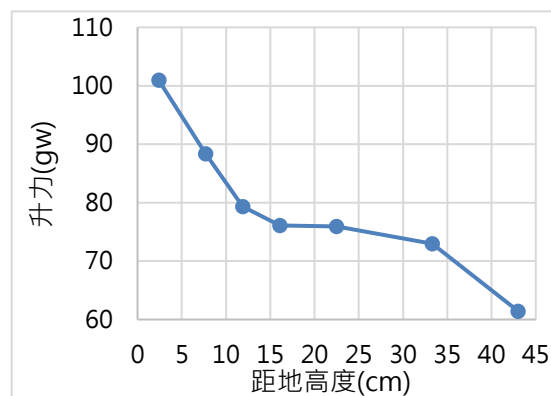


圖 4 攻角  $4.0^\circ$ ，風速  $6.356 \pm 0.086 \text{ m/s}$ ，升力(gw)-距地高度(cm)關係圖

### (三) 壓力分佈

#### 1. 實驗步驟：

- (1) 測量不同壓力下壓力計傳輸之電壓數值並繪製壓力校正曲線(如圖 5)。
- (2) 在機翼及翼尖處鑽孔並插上細管以測量壓力(如圖 6)。
- (3) 調整飛機距地高度，定風速測量不同高度下機翼和翼尖各自的上、下壓力(如圖 7、圖 8)。
- (4) 利用壓力校正曲線關係式將數據轉為壓力並分析。

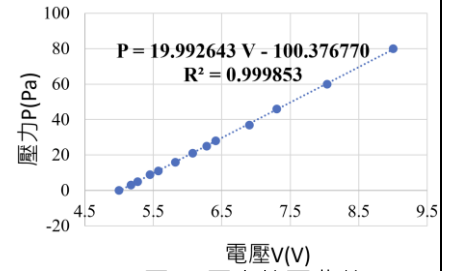


圖 5 壓力校正曲線

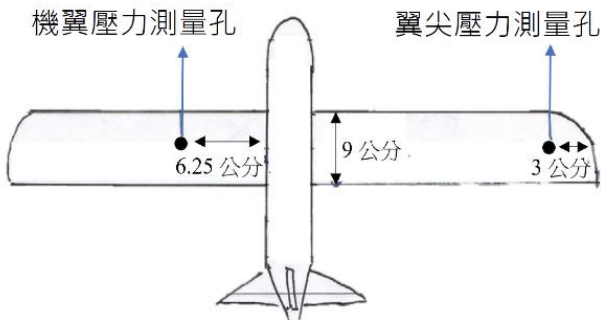


圖 7 機翼各部位壓力測量點



圖 6 插上細管測量壓力

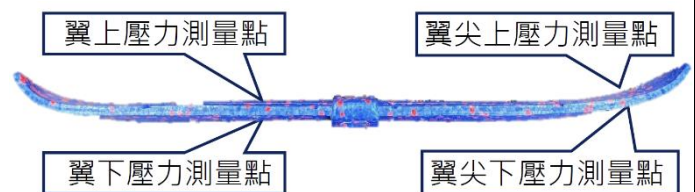


圖 8 機翼各部位壓力測量點

#### 2. 研究結果與討論：

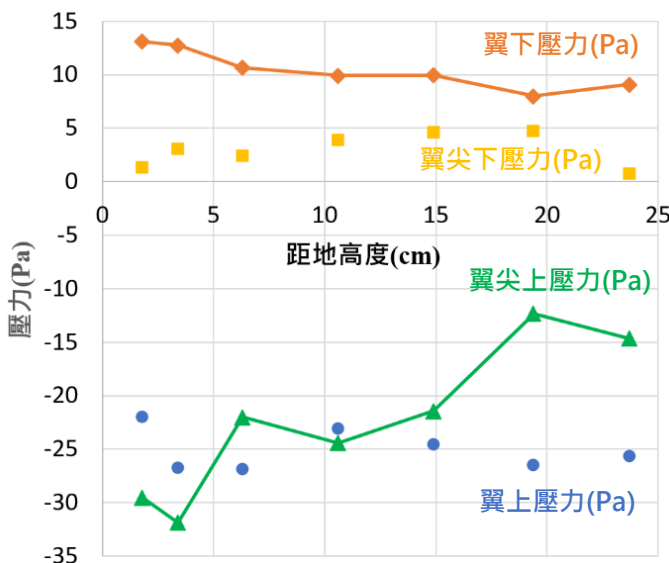


圖 9 壓力(Pa)-距地高度(cm)關係圖 (攻角  $4.0^\circ$ ，風速 10 m/s)

- (1) 飛行時，氣流流過機翼，使機翼上翼面產生低於環境大氣壓的壓力，壓力值小於 0；下翼面則有高於大氣壓之壓力，壓力值大於 0。此翼面上下之壓力差構成飛機一部分的升力。
- (2) 翼下壓力於距地約 10cm 內，隨距地高度愈小，壓力略為上升 3Pa。  
→ 因為隨著飛機愈接近地面，機翼下方空間逐漸減少，使得流經機翼下方之氣流受到壓縮的作用，以致翼下壓力升高。

(3) 翼尖上壓力隨飛機自距地面 23.7cm-1.8cm，壓力顯著減小 15Pa。

→ 因為翼面上下的壓力差使氣流在翼尖處由壓力較高的翼面下方捲至翼面上方，產生翼尖渦流，而此翼尖渦流捲至翼面上方時，會使上翼面接近翼尖處氣流受到擾動甚至一個向下壓的氣流，導致翼尖上壓力較無翼尖渦流時高，又隨飛機接近地面時，地面破壞了翼尖渦流，故隨距地高度愈近，翼尖渦流影響上翼面愈小，翼尖上壓力愈小。

(4) 翼上壓力與翼尖下壓力隨飛機距地高度無明顯變化趨勢，數值變化範圍在 5Pa 以內。

#### (四) 地面效應成因分析

1. 翼壓力差在飛機離地 10cm 以上時幾乎呈定值，距地 10cm 以內才開始隨升力變化。
2. 翼尖壓力差隨距地高度的變化則與升力變化極高度相似。

→翼尖壓力差對飛機升力影響較翼壓力差顯著，即翼尖部分的流場是造成地面效應的主要因素，影響較顯著，範圍較廣；而主翼處的流場為次要因素，影響幅度較小，作用範圍只在 10cm 內。而根據壓力分佈的討論，我們推論主翼處的壓力變化來自於翼下壓力的提升，翼尖處的壓力變化則來自於翼尖渦流被破壞。

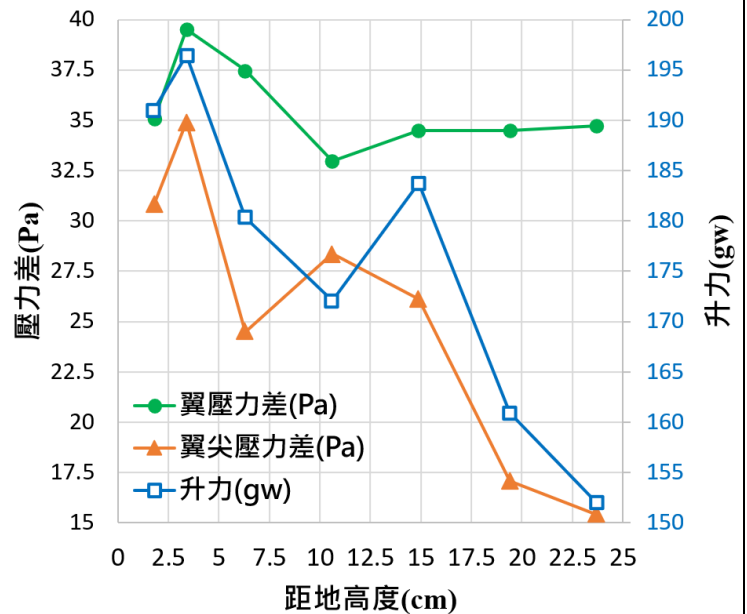


圖 10 機翼壓力差(Pa)與翼尖壓力差(Pa)與升力(gw)-距地高度(cm)關係圖 (攻角 4.0°，風速 10 m/s)

綜合以上，在本實驗的條件下，地面效應可依飛機的離地高度分為兩個階段：

- 較遠地階段(距地 10cm 以上)：在此階段地面效應決大部分是因為翼尖渦流的形成受到地面阻礙，使得翼尖處保有較大的壓力差並提供更多的升力。
- 較近地階段(距地 10cm 以下)：此階段除了主要受地面破壞翼尖渦流的影響，次要的影響因素包含飛機近地時翼下氣體遭到壓縮而產生的高壓區，然其影響幅度較小。此外，雖然此翼下壓力的提升反而有助於翼尖渦流的發展，但我們認為地面破壞翼尖渦流的程度遠大於此翼下壓力增加造成的影響。

#### (五) 翼尖形狀對地面效應之影響

##### 1. 實驗步驟：

- (1) 在飛機機翼兩端裝上輕黏土製的翼尖小翼。
- (2) 測量不同距地高度下飛機升力之數值。
- (3) 加寬翼尖小翼，並再次測量各高度的升力。
- (4) 將無翼尖小翼、加裝翼尖小翼、加寬翼尖小翼的三組數據整合並繪製成圖加以分析。





## 2. 研究結果與討論：

(1) 同高度下，加裝翼尖小翼後，整體升力提升。

→因為安裝翼尖小翼可阻擋部分翼尖渦流。

(2) 安裝翼尖小翼能在遠地時破壞翼尖渦流，但 38cm 內升力開始增加。

→此翼尖小翼無法完全阻擋翼尖渦流，接近地面時仍會有翼尖渦流被地面破壞，使升力增加。

(3) 距地 15cm 內隨著愈接近地面，是否安裝翼尖小翼的升力值的差距有變小的趨勢，且升力隨距地高度變化的幅度較沒安裝翼尖小翼的飛機小。

→翼尖小翼與地面一樣皆會破壞翼尖渦流使升力提升，故當飛機距地較遠，地面對翼尖渦流的破壞較不顯著時，翼尖小翼可相對有效地破壞翼尖渦流使升力較沒翼尖小翼時高；而當飛機很接近地面時，地面破壞翼尖渦流的效果已非常顯著，翼尖小翼的作用也就相對對升力貢獻較不重要，故可見到圖 11 中，距地較遠時加裝翼尖小翼與沒安裝翼尖小翼的升力值差距大，而離地較近時，加裝翼尖小翼的升力只比無翼尖小翼的多一點而已。

(4) 上方三點之討論同樣適用於加寬之翼尖小翼，因為翼尖小翼較寬，能阻擋更多翼尖渦流，故加寬翼尖小翼整體升力更大，升力曲線更平緩。

(5) 由此分析討論可更加確定我們對地面效應的主要成因是翼尖渦流所造成之推論。

## (六) 飛行速度對升力及地面效應之影響

### 1. 實驗步驟：

(1) 將延長線截斷一條火線串聯上調光器的兩條電線。

(2) 利用調光器調整電扇之風速。

(3) 測量不同風速下，飛機在不同高度時的升力數值並分析。

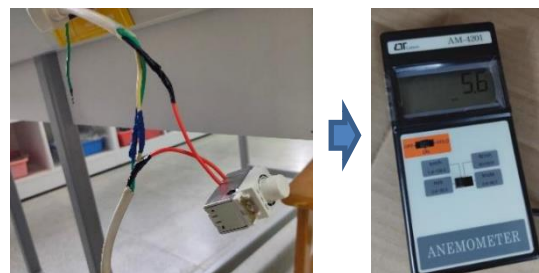


圖 11 不同翼尖形狀之升力(gw)-距地高度(cm)關係圖(攻角  $4.0^\circ$  · 風速  $6.51\text{m/s}$ )

### 2. 研究結果與討論：

(1) 如圖 12，攻角相同的情況下，隨著風速的提升，飛機整體之升力亦會提升。

(2) 風速愈大，飛機受地面效應而使升力上升的幅度愈大（如表 1）。

→飛行速度快時，單位時間內流過機翼的風量變多，所形成的翼尖渦流較強大（如圖 13，風速愈大，翼尖壓力差越大），飛機逐漸靠近地面時，可以因為地面而破壞的翼尖渦流的量較多。

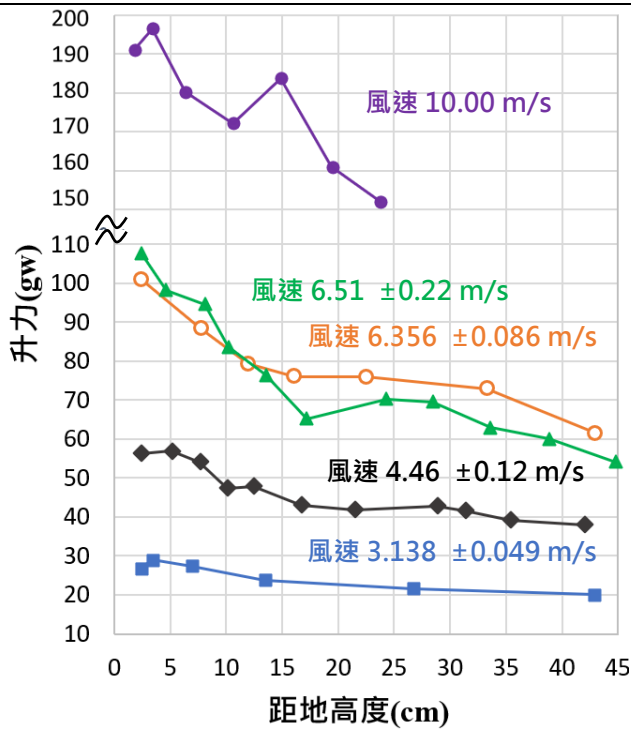


圖 12 不同風速下升力(gw)-距地高度(cm)關係圖(攻角 4.0°)

表 1

風速(m/s)	距地 45cm 起升力上升值(gw)
3.138	6.72
4.46	18.42
6.356	39.46
6.51	53.64

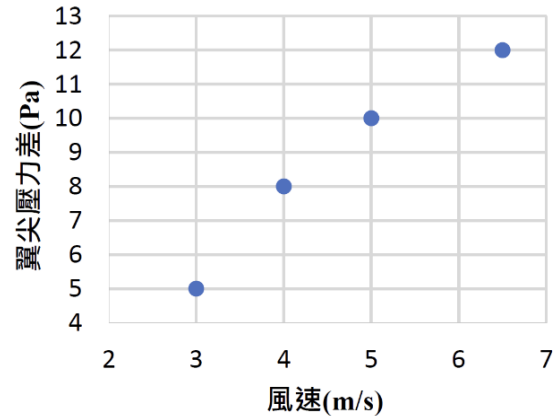


圖 13 翼尖壓力差(Pa)-風速(m/s)關係圖(攻角 4.0°)

## 五、結論與生活應用

- (一) 攻角為 4.0°時，飛機在距地 45cm 內受到了地面效應，其升力隨距地高度愈小而增加。
- (二) 翼上壓力與翼尖下壓力不隨飛機距地高度變化；翼下壓力於距地約 10cm 內，隨距地高度愈小而上昇；翼尖上壓力隨飛機愈接近地面，其值顯著減小。
- (三) 地面效應可依飛機的離地高度分為兩個階段：
  1. 較遠地階段：此階段因翼尖渦流的形成受到地面阻礙，使得翼尖處保有較好的流場並提供更多的升力。
  2. 較近地階段：除了主要受地面破壞翼尖渦流的影響，次要影響因素包含飛機近地時翼下氣體遭到壓縮而產生的高壓區，然其影響幅度較小。
- (四) 翼尖形狀對於地面效應及飛機升力有顯著影響且與翼尖渦流有關：
  1. 翼尖小翼能阻擋部分翼尖渦流使升力提升，本實驗中以加寬翼尖小翼表現最好。
  2. 當飛機距地較遠，地面對翼尖渦流的破壞較不顯著，翼尖小翼相對有效地破壞翼尖渦流；當飛機較接近地面時，地面破壞翼尖渦流的效果相對顯著，翼尖小翼的作用對升力貢獻相對較不重要。
- (五) 安裝翼尖小翼的飛機能在離地較遠處即獲得無翼尖小翼飛機在較近地處才能獲得的升力，故地面效應機設計時若能加裝翼尖小翼，便能於距地較遠處就達到需要的升力，達到有效能源利用的同時，也能使飛行時下方有更多空間，使飛行時更加安全或在下方空間做其他運用。此外安裝翼尖小翼也可使飛機在同高度下產生較大的升力，如此飛機就不用為了達到升力而耗費較多的燃料來提高飛行速度，達到節約能源的效果。
- (六) 飛行速度快時，整體升力會提升，且因地面效應可造成升力增加的幅度更顯著。

## 參考資料

- [1] Pistolesi, E. (1937). *Ground effect-theory and practice* (No. NACA-TM-828).
- [2] Qu, Q., Jia, X., Wang, W., Liu, P., & Agarwal, R. K. (2014). Numerical study of the aerodynamics of a NACA 4412 airfoil in dynamic ground effect. *Aerospace Science and Technology*, 38, 56-63.
- [3] 孫瑞敏(2011)。机翼地面效应气动特性与翼尖涡结构的实验研究。
- [4] 朱佳仁(2006)。風工程概論(初版)。科技圖書出版。