

高高空無人機 發展現況

提報人：余重信

提報日期：2025/06/20

大綱

- 高高空無人機介紹
- 國內外發展歷史
- 氣動技術發展
- 結構技術發展
- 能源技術發展
- 結論

高高空載具分類

電動力

噴射推進

飛機



高高空
載具

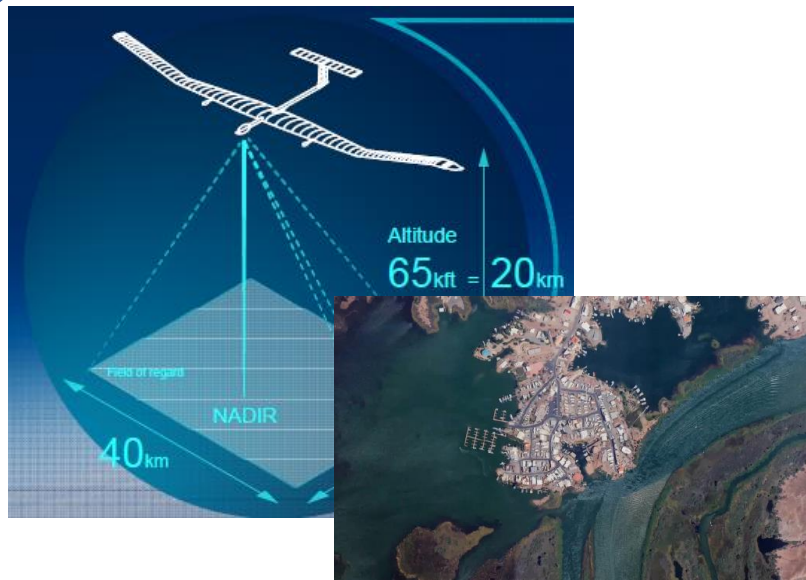
飛船

氣球



比空氣重
比空氣輕

高高空載具的應用



地球觀測

高高空載具

通訊

商業

- 石油、天然氣與作物監測
- 智慧城市

機構

- 野火、環境監測
- 陸地邊界防衛

軍事

- 海上安全
- 陸地/沿海邊界防衛
- 航空母艦打擊群

- 商業LTE泡泡
- 網路服務

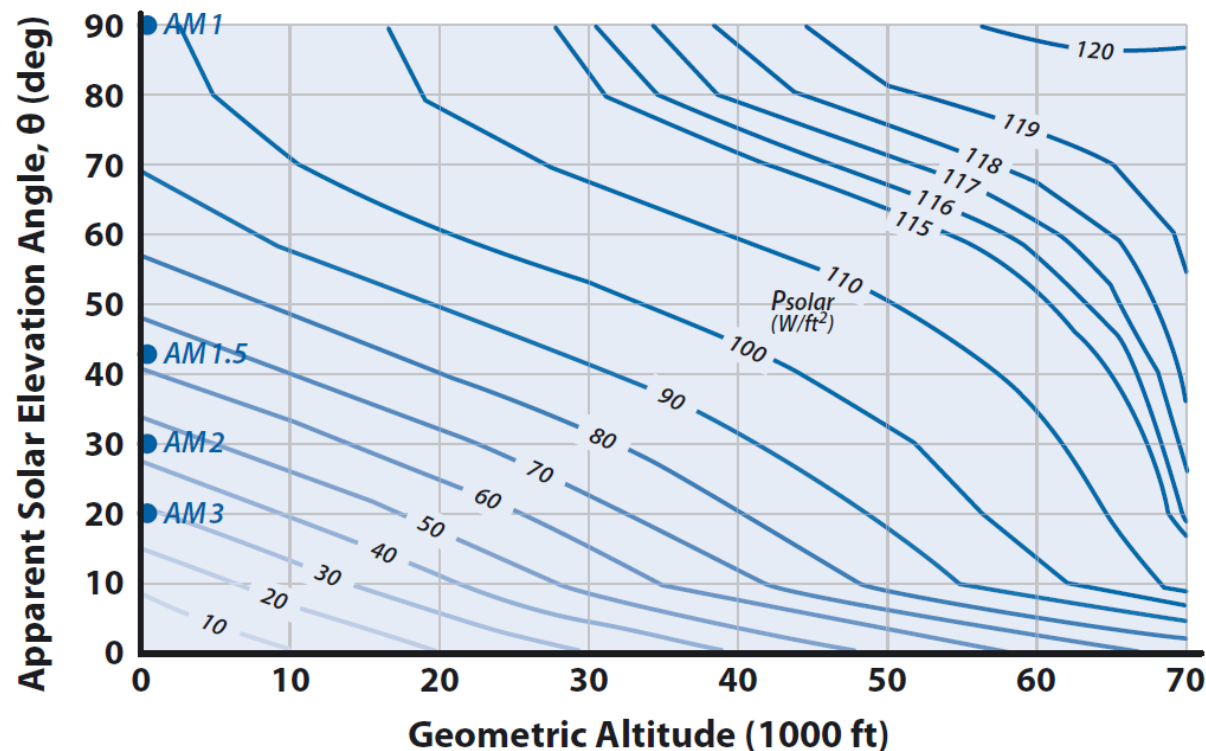
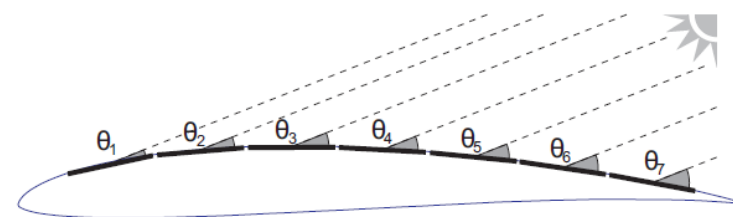
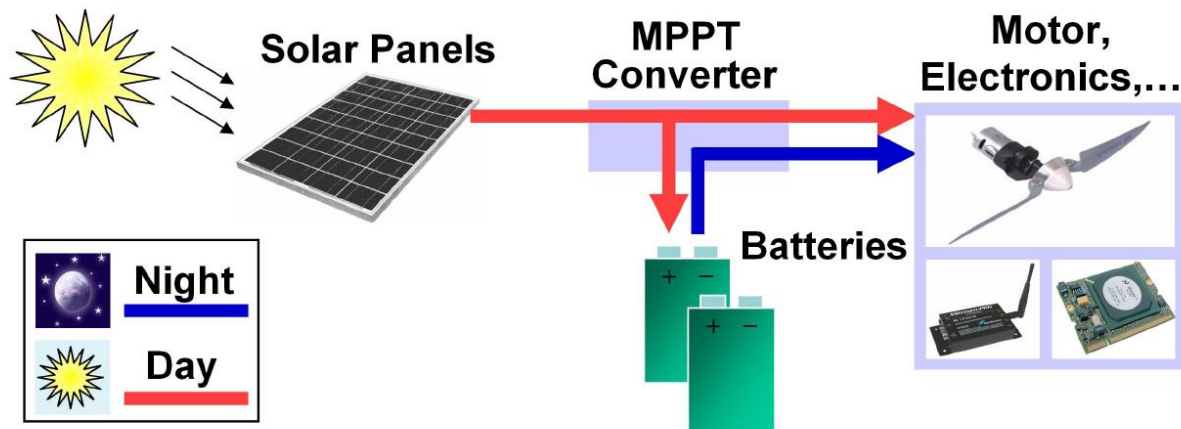
- 災難恢復

- V/UHF
- 軍用LTE泡泡



太陽能動力之概念

- 太陽能動力是由太陽能板取得能量後藉由最大功率追蹤轉換後提供電池或動力等系統使用。
- 太陽能依照不同高度與入射角取得之能量有所不同。



$$AM = 1/\cos \theta$$



國外太陽能飛機發展



Sunrise I
(1974)



Solaris
(1976)



Gossamer Penguin
(1980)



Solar Challenger
(1981)



Solair I
(1981)



Solar Excel
(1990)



Sunseeker
(1990)



Icaré 2
(1996)



Centurion
(1997)



Solair II
(1998)



PicoSol
(1998)



Solitair
(1998)



Helios
(1999)



Solong
(2005)



Zephyr
(2005)



Solar Impulse
(2005)



Atlantiksolar
(2015)



Aquila
(2016)



PHASA-35
(2020)



ApusDuo
(2023)

國內太陽能無人機發展

- 國內學術界也有許多針對於太陽能飛機研究的計畫，近期以國立虎尾科技大學的研究為主。



鷺鷥號
淡江大學
(2012)



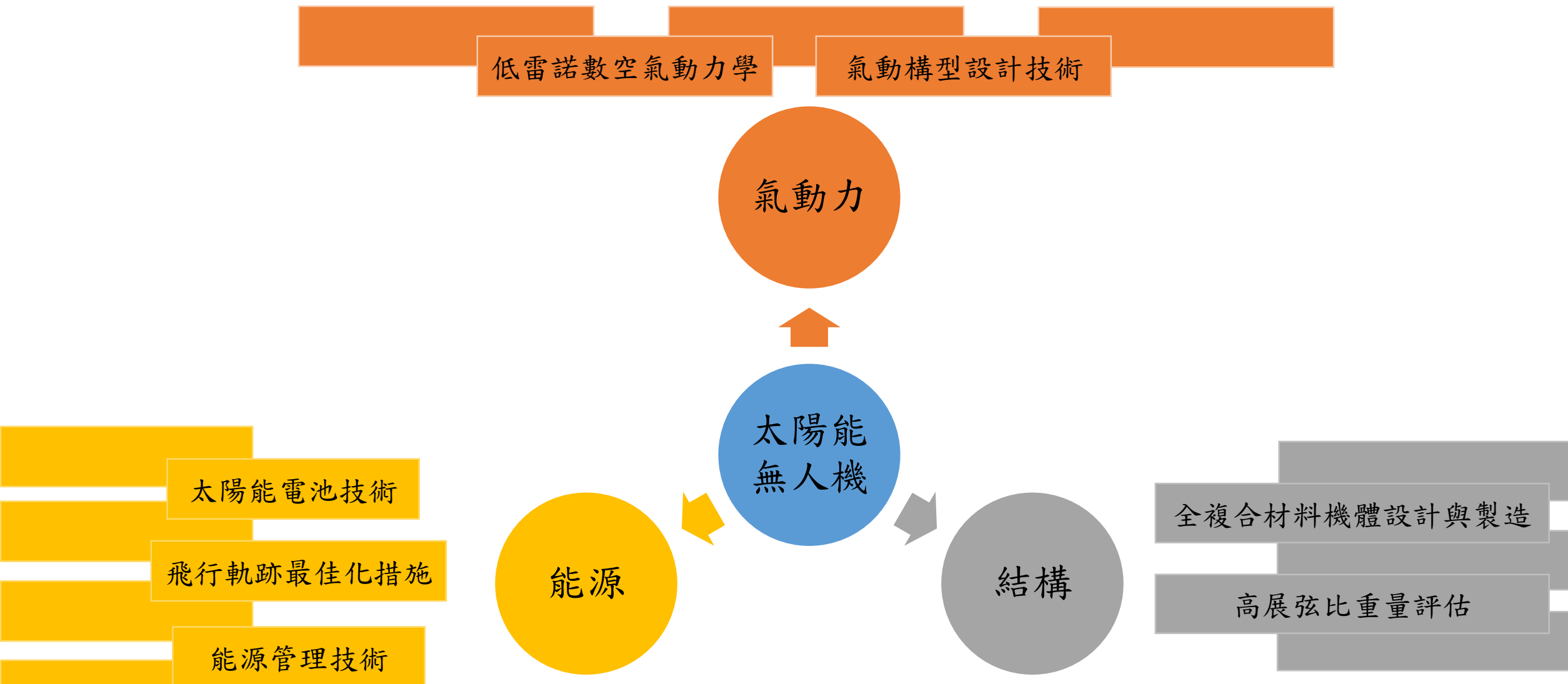
屏鵬計畫
屏東縣太陽能UAV研發小組
(2012)

小型太陽能無人機
中科院
(2014)

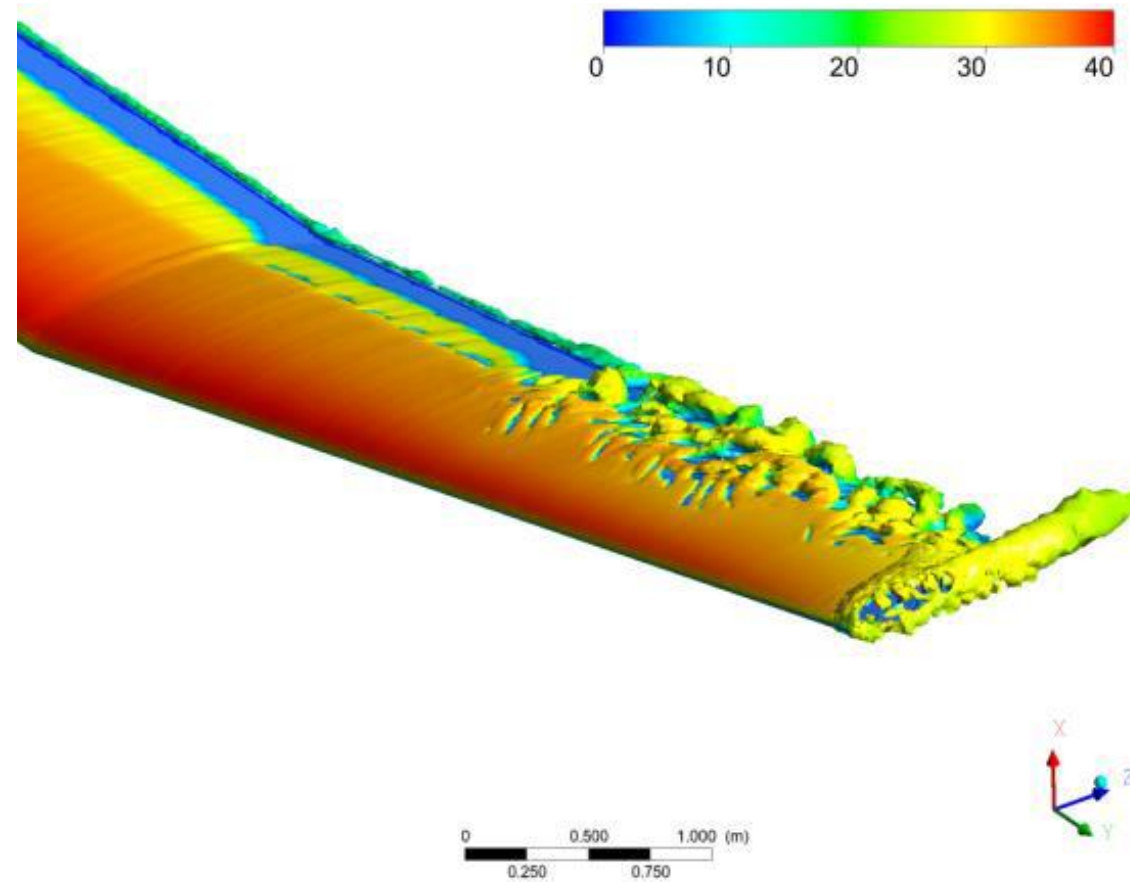


月光飛行二號
國立虎尾科技大學
(2017)

太陽能無人機相關技術

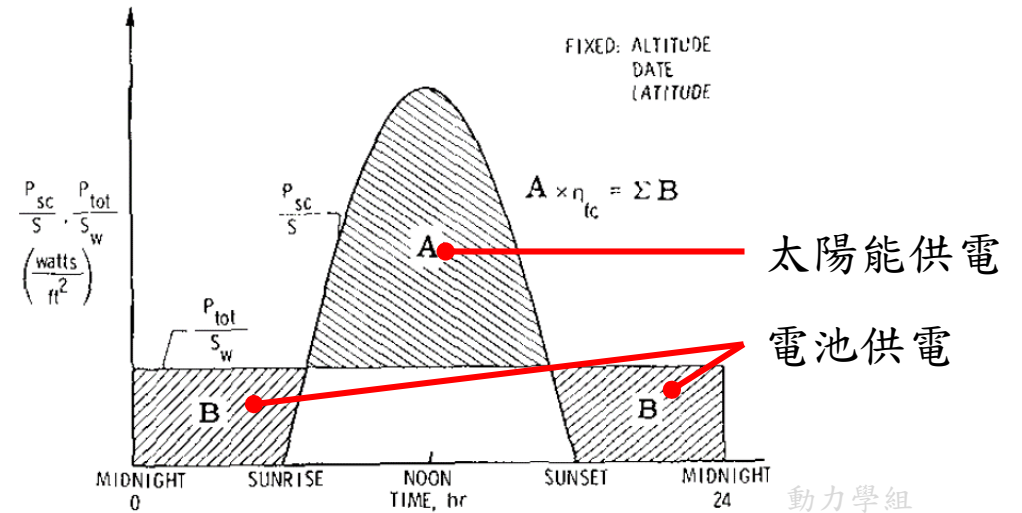
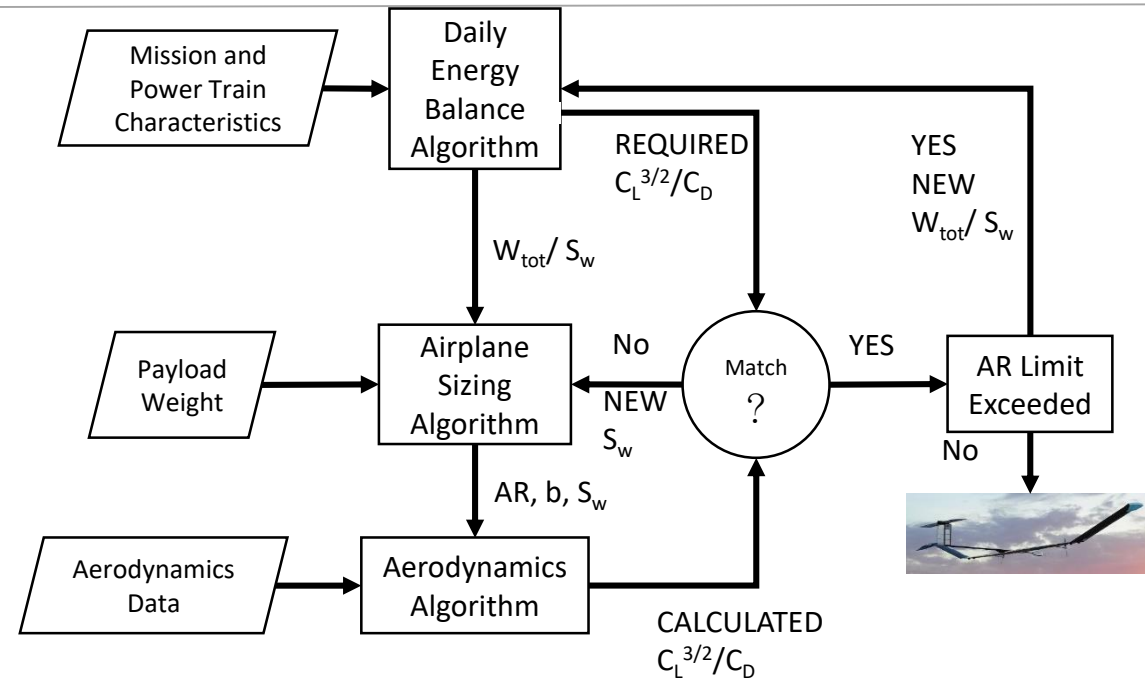


氣動技術發展



太陽能飛機設計概念

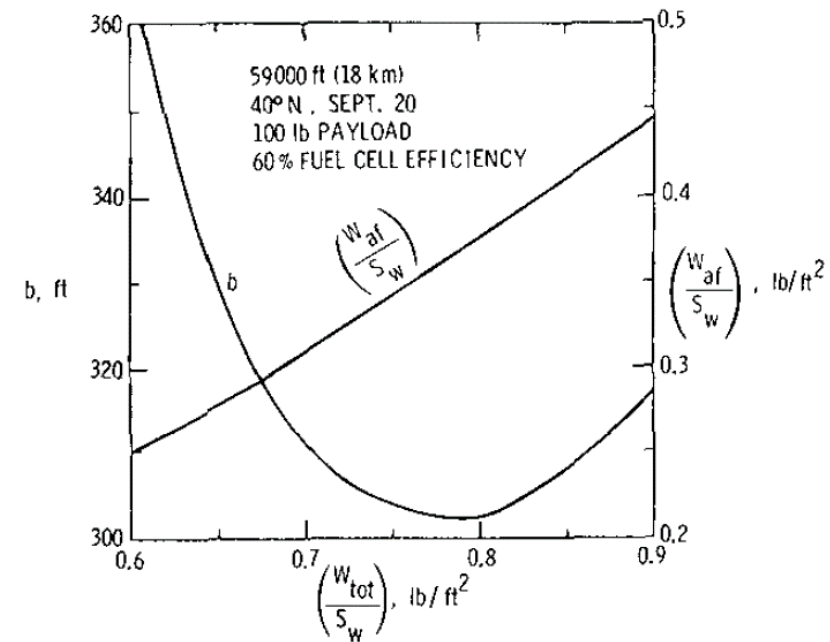
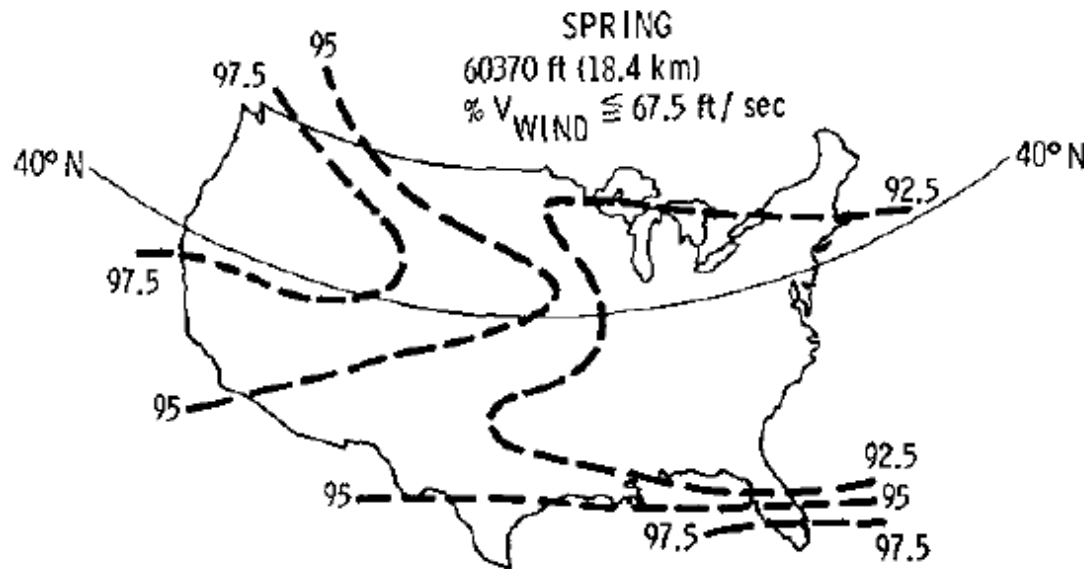
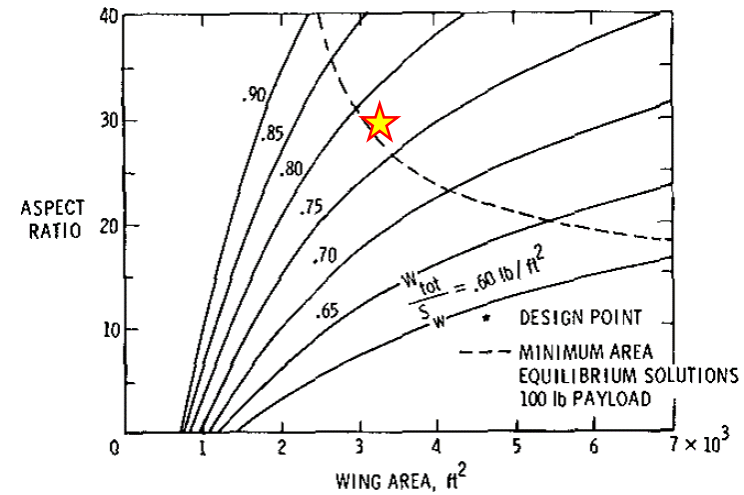
- NASA於1982年提出長滯空高空太陽能飛機的設計概念與設計流程。
- 由能量平衡到飛機的Sizing，再分析氣動力是否符合原先任務需求之概念。
- 能量平衡需考量太陽能與電池供給之能量。



動力學組

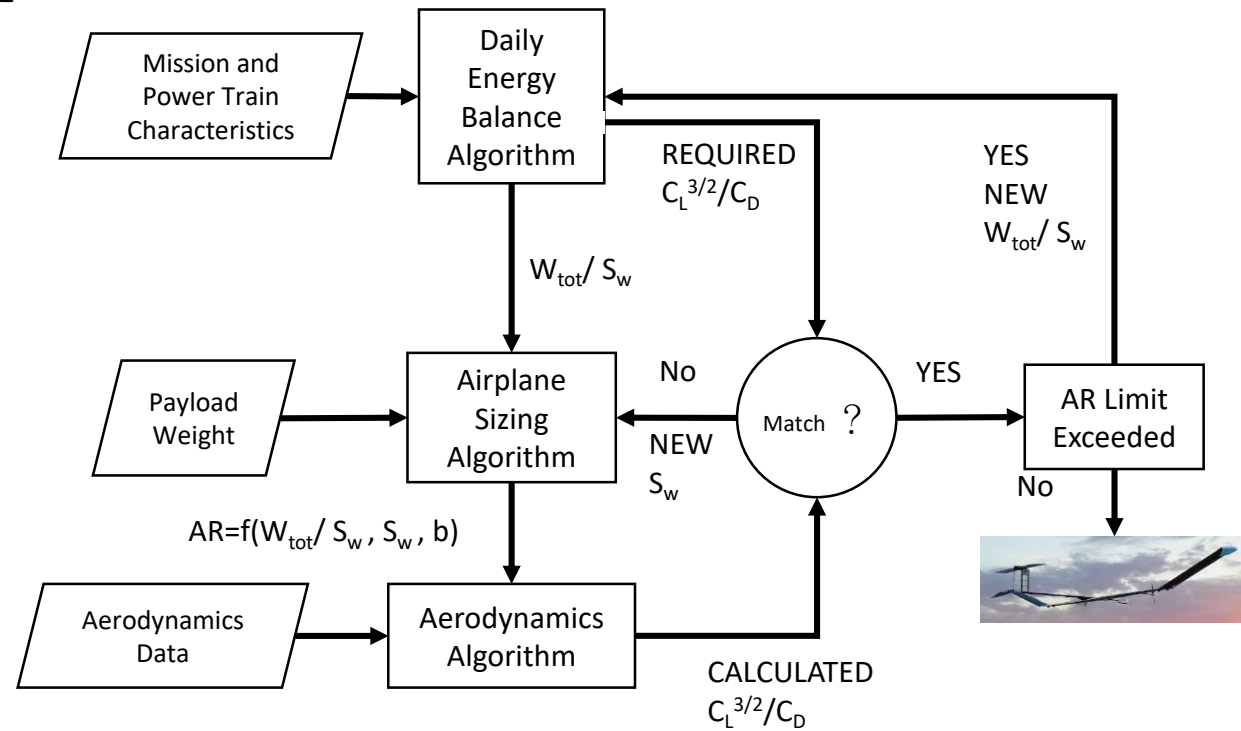
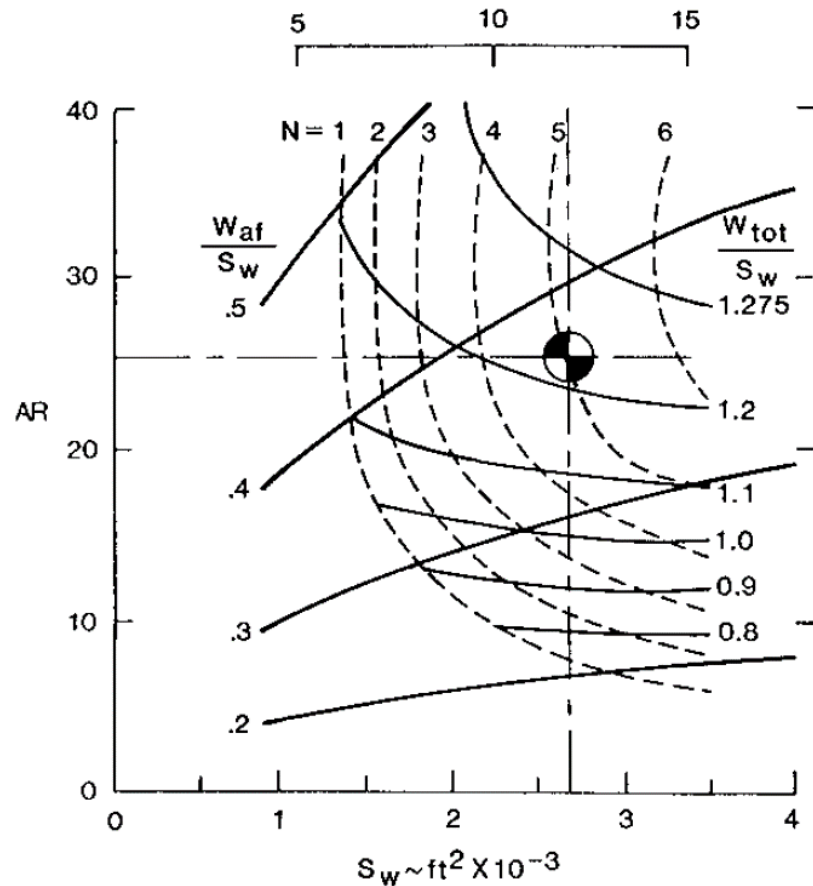
太陽能飛機設計概念

- 依據能量平衡得到之翼負載進一步到Sizing中可以得到一組翼面積與展弦比。
- 考量飛行地區風場後決定氣動力需求的升力係數而決定設計點。



太陽能飛機設計概念

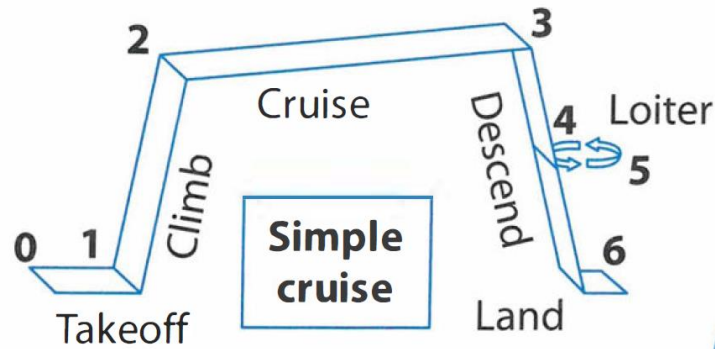
- 以早期的概念設計流程(1982年)加入更多展弦比的參數化，尋找更適合設計點。



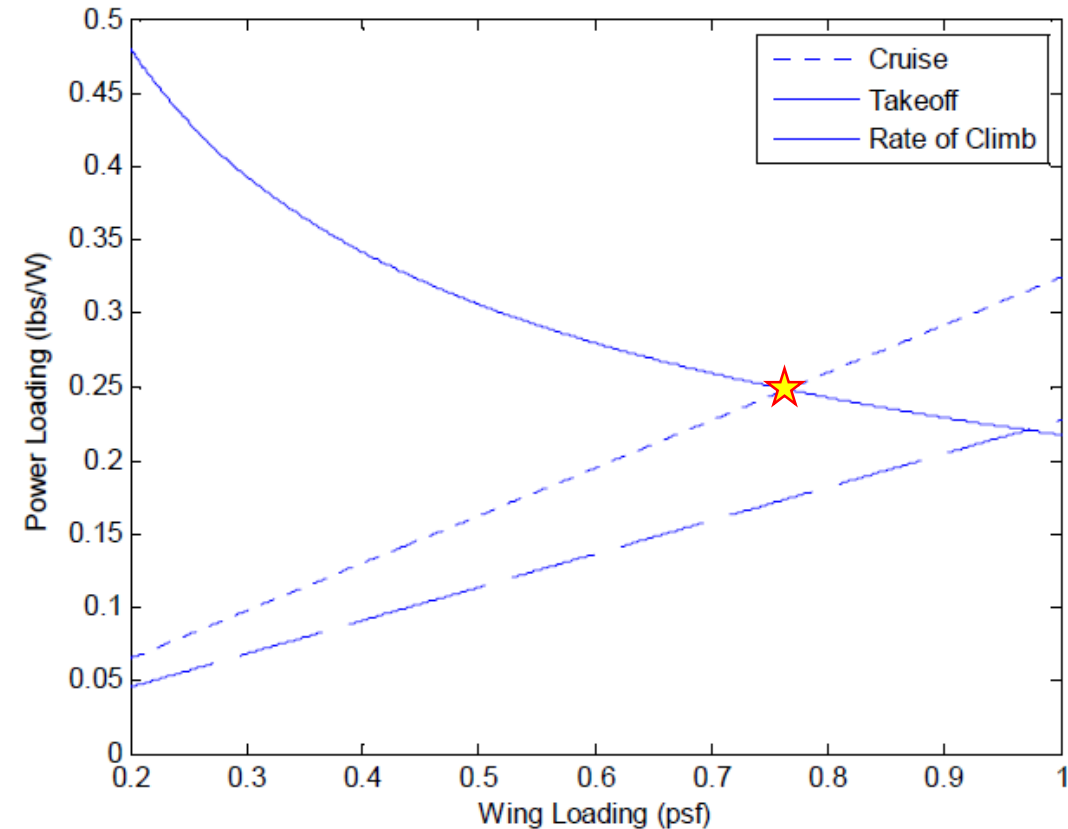
$$\frac{W_{af}}{S_w} = .31 \ln .311 S_w^{-.222} AR^{.467}$$

太陽能飛機設計概念

- 近期也有持續對於太陽能飛機概念設計的研究，依照標準飛機任務剖面以及性能需求(巡航速度30 mph以及爬升率0.3 m/s)進行設計。



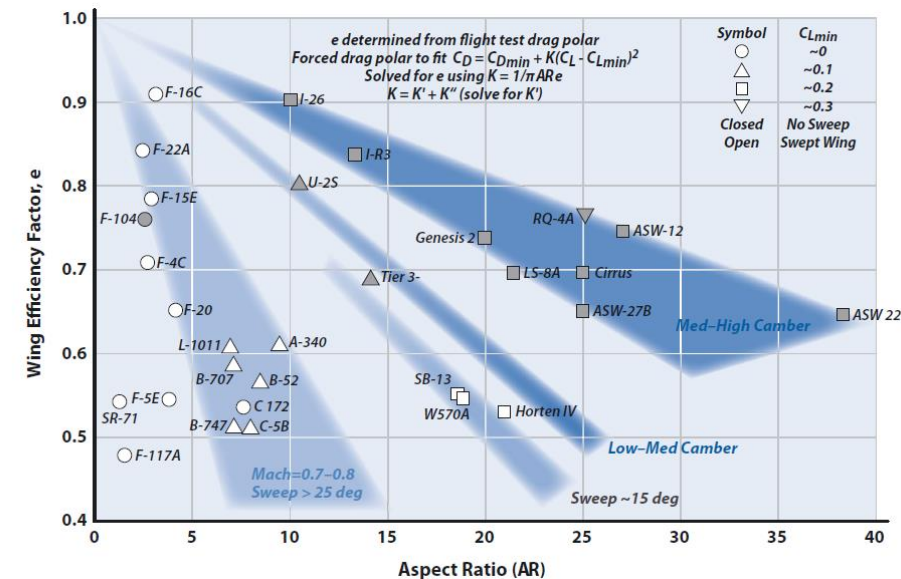
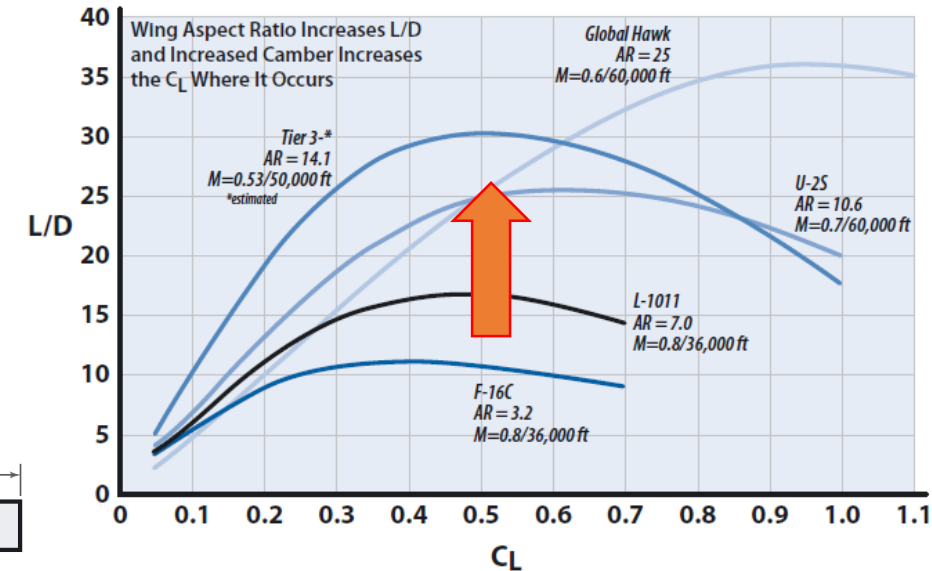
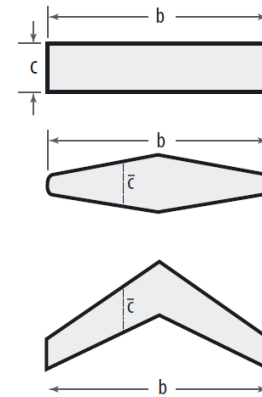
- 尋找設計點之法，進一步換成 Power loading 與 Wing Loading 之關係尋找設計點。



為何展弦為設計的重要參數

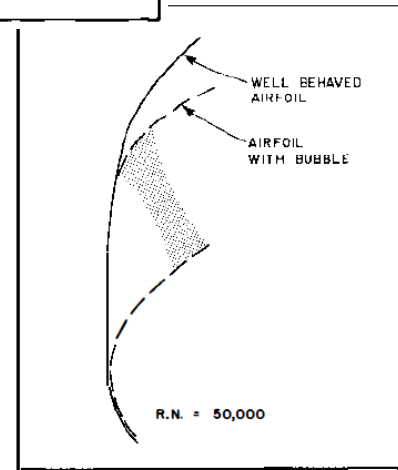
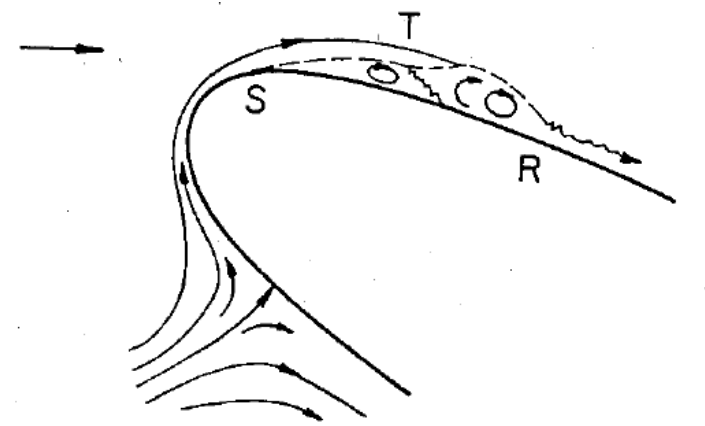
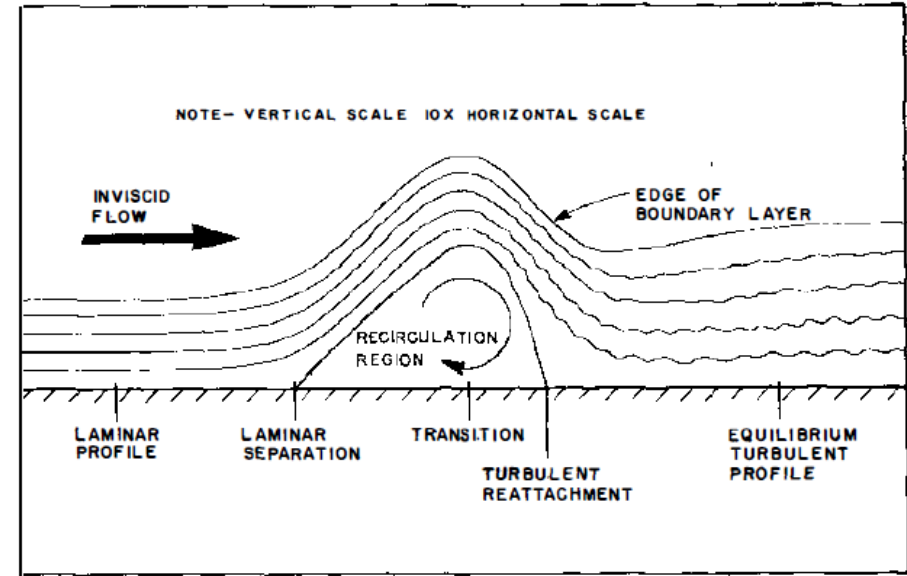
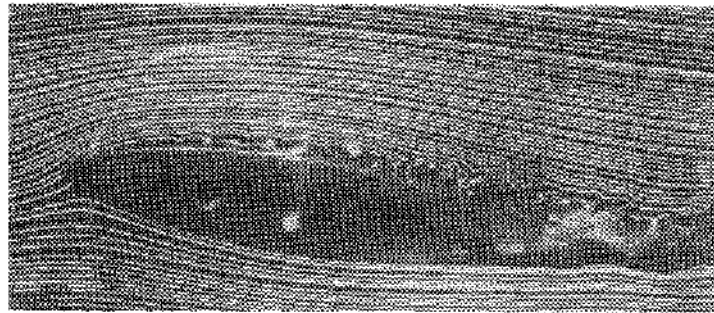
- 依照基本的機翼外形對於氣動力之影響為增高展弦比會降低誘導阻力係數，而提高升阻比 (L/D)。

Increase In	Changes	C _{D0}		K	C _{Lα}	C _{Lmax}	Wing Wt	Wing Vol
		Subsonic	Supersonic					
Aspect Ratio	↓	NO EFFECT	↑	↓	↑	↑	↑	↓
Wing Sweep		NO EFFECT	↓	↑	↓	Aft ↓ Fwd ↑	↑	NO EFFECT
Taper Ratio		NO EFFECT	NO EFFECT	↓	↑	NO EFFECT	↑	↓
Airfoil Thickness Ratio		NO EFFECT	↑	NO EFFECT	NO EFFECT	↑	↓	↑
Leading Edge Radius		NO EFFECT	↑	↓	NO EFFECT	↑	NO EFFECT	↑
Camber		↑	↑	↓	NO EFFECT	↑	NO EFFECT	NO EFFECT



為何太陽能無人機需要討論低雷諾數

- 一般航空領域定義之低雷諾數範圍為 $10^4 \sim 10^5$ ，而太陽能飛機的巡航速度低以及飛行高度高（空氣密度低），而屬於低雷諾數飛行條件。
- 低雷諾數會產生層流分離與紊流再附著等現象，影響翼型上的升阻力係數。



C_D

Reference :

-MA D L, ZHANG L, YANG M Q, et al., "Review of key technologies of ultra-long-endurance solar powered unmanned aerial vehicle", Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 623418

-LISSAMAN P S., "Low-Reynolds-number airfoils", Annual Review of Fluid Mechanics , 1983 , 15 : 223-239

-Muller T J, Batil S M, "Experimental studies of separation on a two-dimension airfoil at low Reynolds number", AIAA Journal, 1982, 20(4) : 457-463

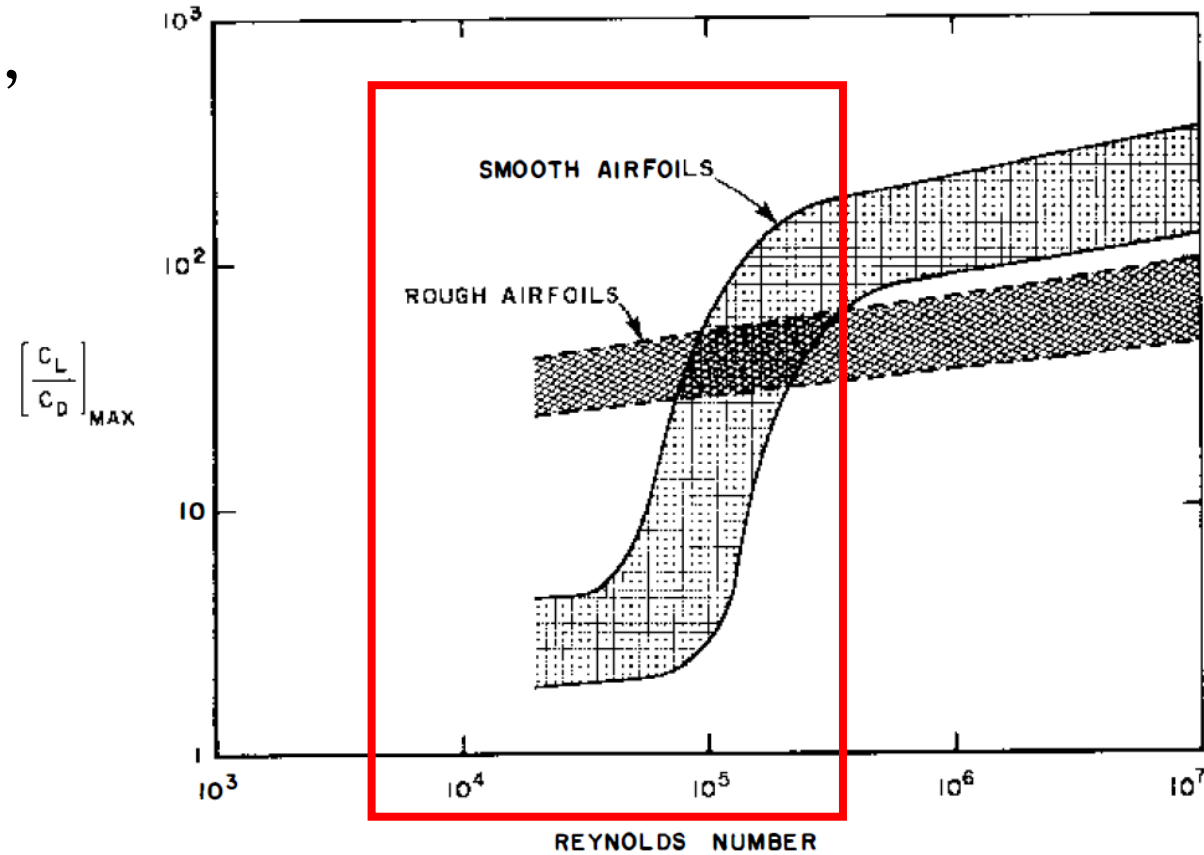
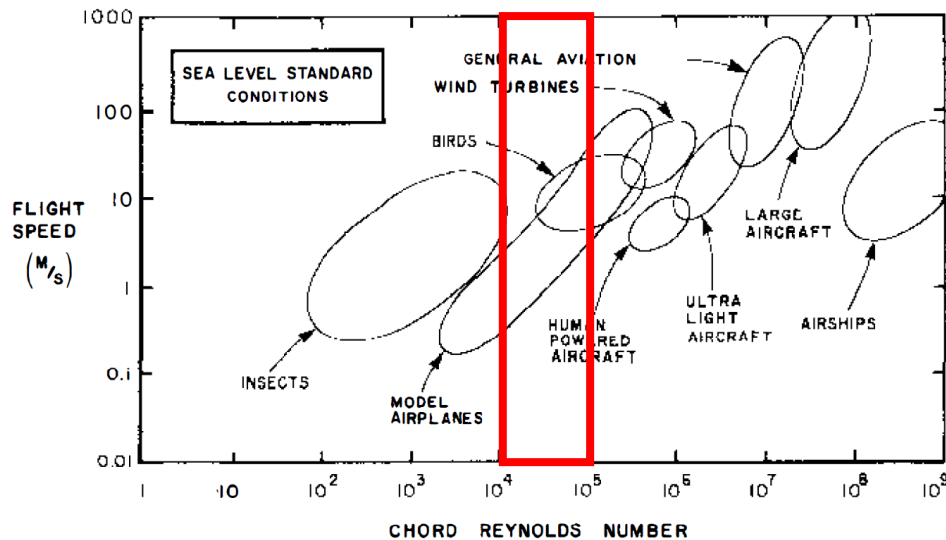
航空研究所氣動力學組

Aeronautical Systems Research Division

Aerodynamics Department

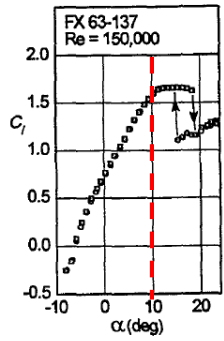
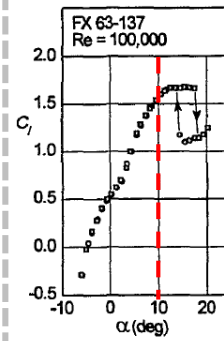
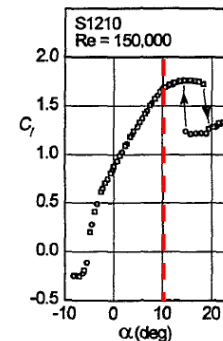
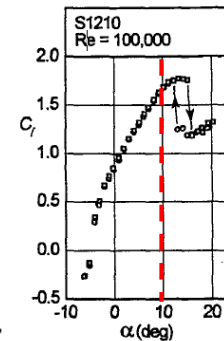
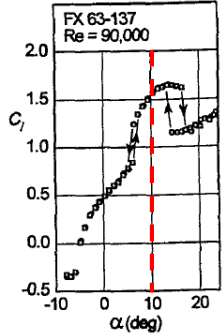
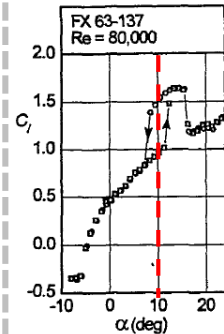
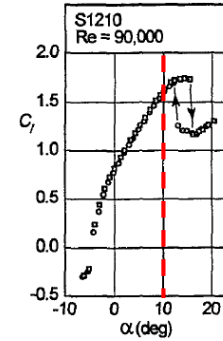
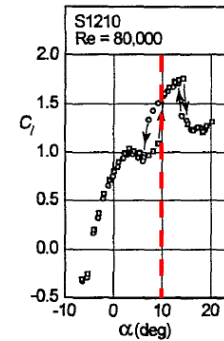
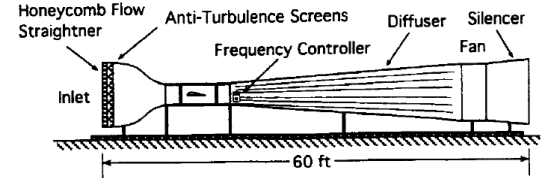
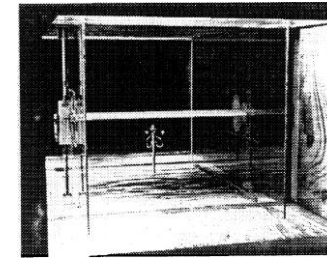
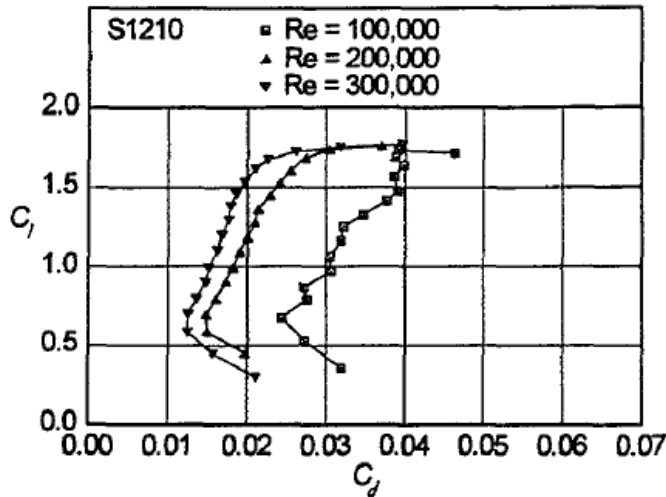
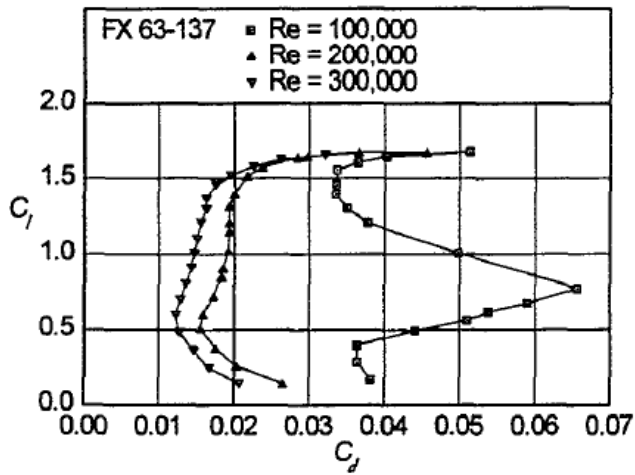
低雷諾數翼型特性

- 雷諾數對於最大升阻比之影響，可以明顯地看到高雷諾數情況下光滑表面的翼型有較大最大升阻比，而粗糙表面的翼型的最大升阻比較低；而低雷諾數情況下光滑表面翼型之最大升阻比驟降很多。



低雷諾數翼型試驗

- 對於低雷諾數的翼型有許多早期試驗成果，可以明顯地看到不同雷諾數對於升力係數有明顯地影響，尤其是10度攻角以內特為明顯。
- 於阻力極可看到越低的雷諾數有較高的升阻比。



航空研究所氣動力學組

近代針對太陽能飛機設計之翼型

- 近期國外也有利用風洞試驗針對數款較為適合太陽能飛機的翼型以不同雷諾數研究，其中以BC 3X92有較低的阻力係數與較高的升力係數。

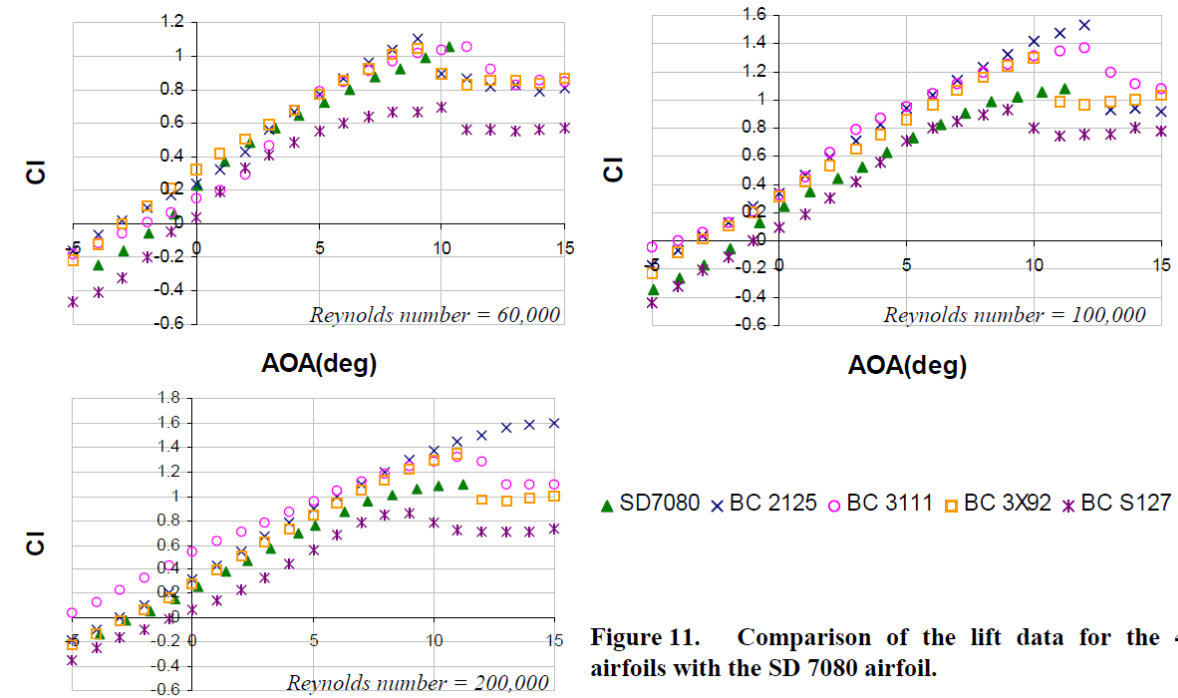
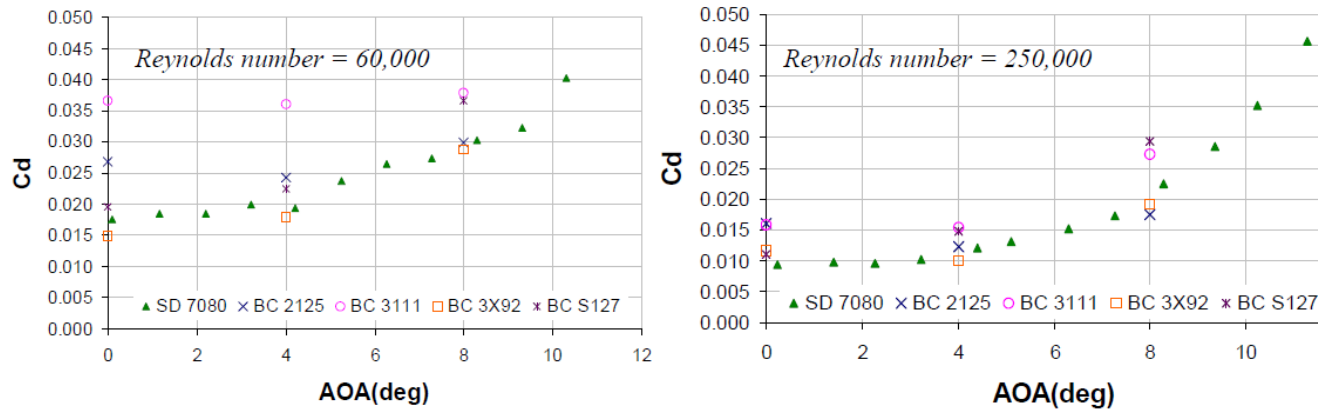
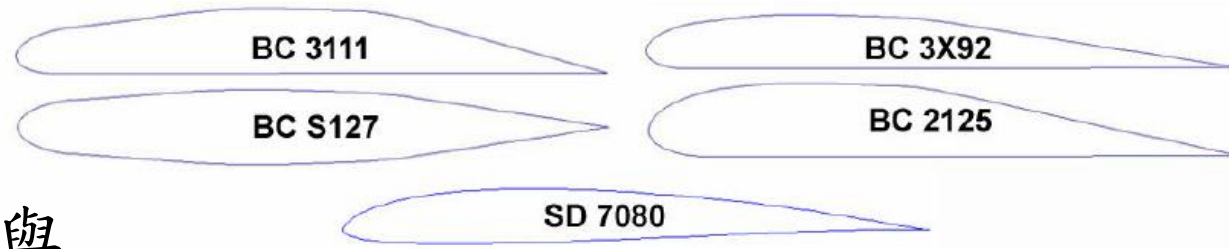
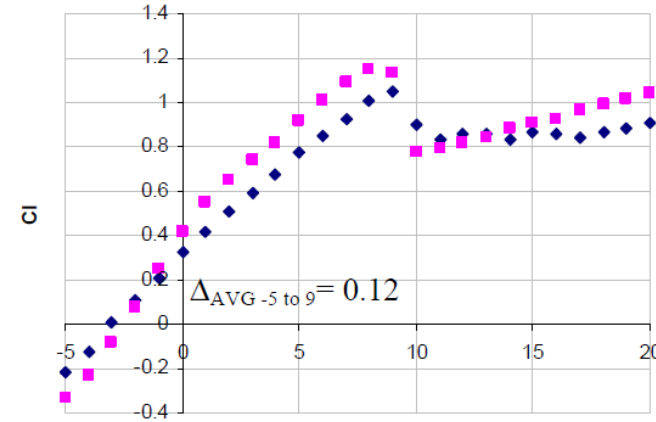
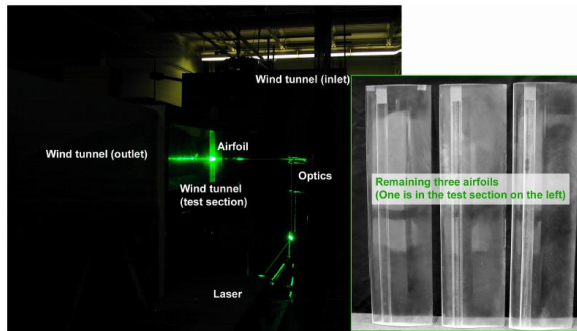
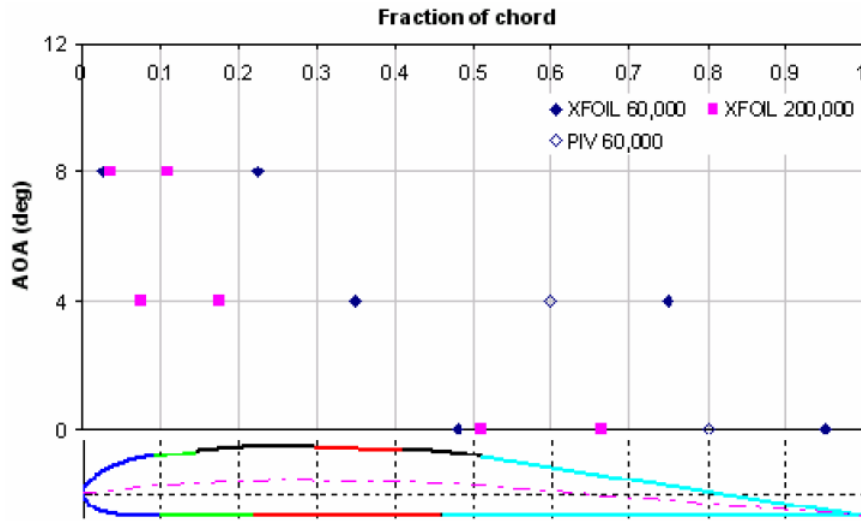


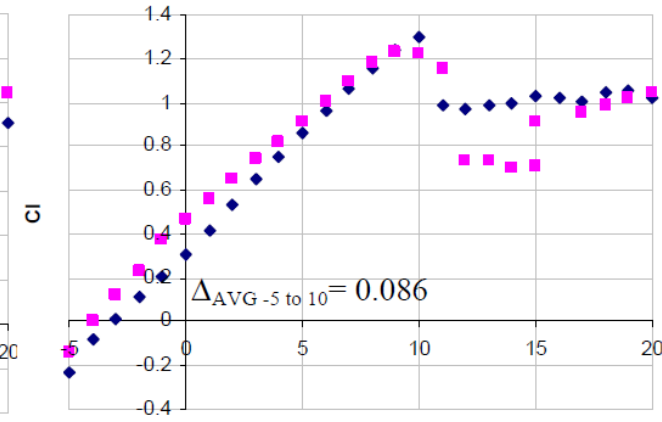
Figure 11. Comparison of the lift data for the 4 airfoils with the SD 7080 airfoil.

近代針對太陽能飛機設計之翼型

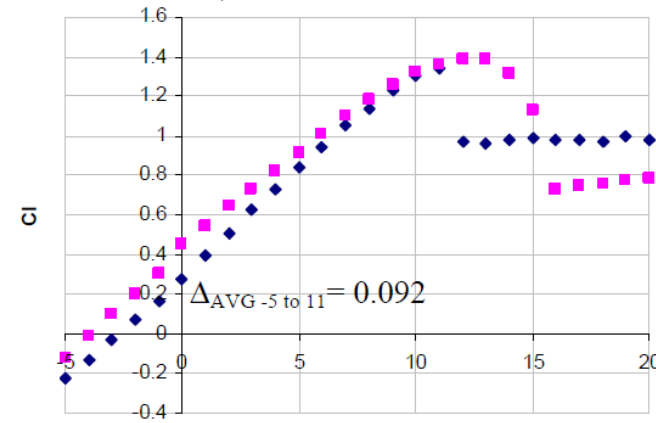
- 該研究也利用XFOIL開源軟體與風洞試驗比對升力係數與產生渦流位置。



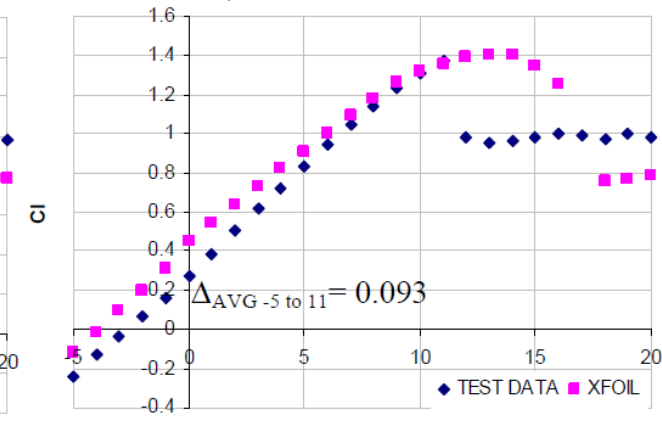
$Re = 60,000$ AOA(deg)



$Re = 100,000$ AOA(deg)



$Re = 200,000$ AOA(deg)



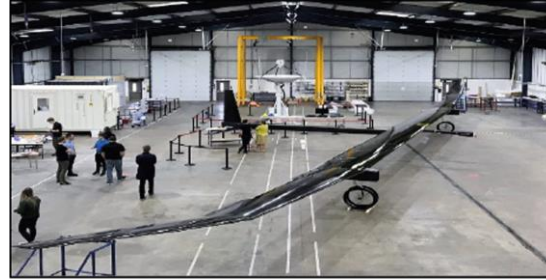
$Re = 250,000$ AOA(deg)

航空研究所氣動力學組

Aerodynamics Department

太陽能飛機構型

Conventional



Fly wing



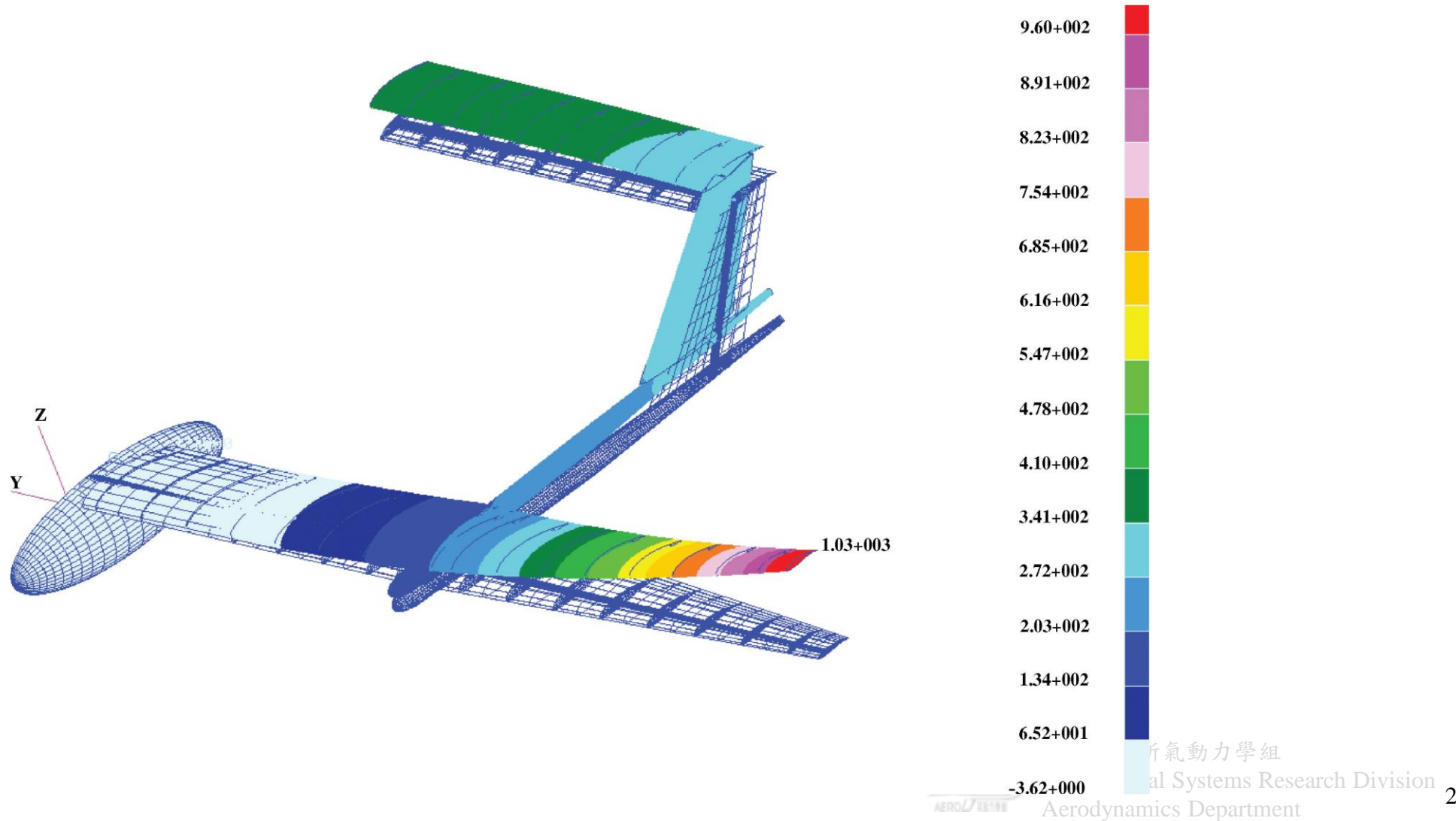
Z-shaped wing



Tandem wing



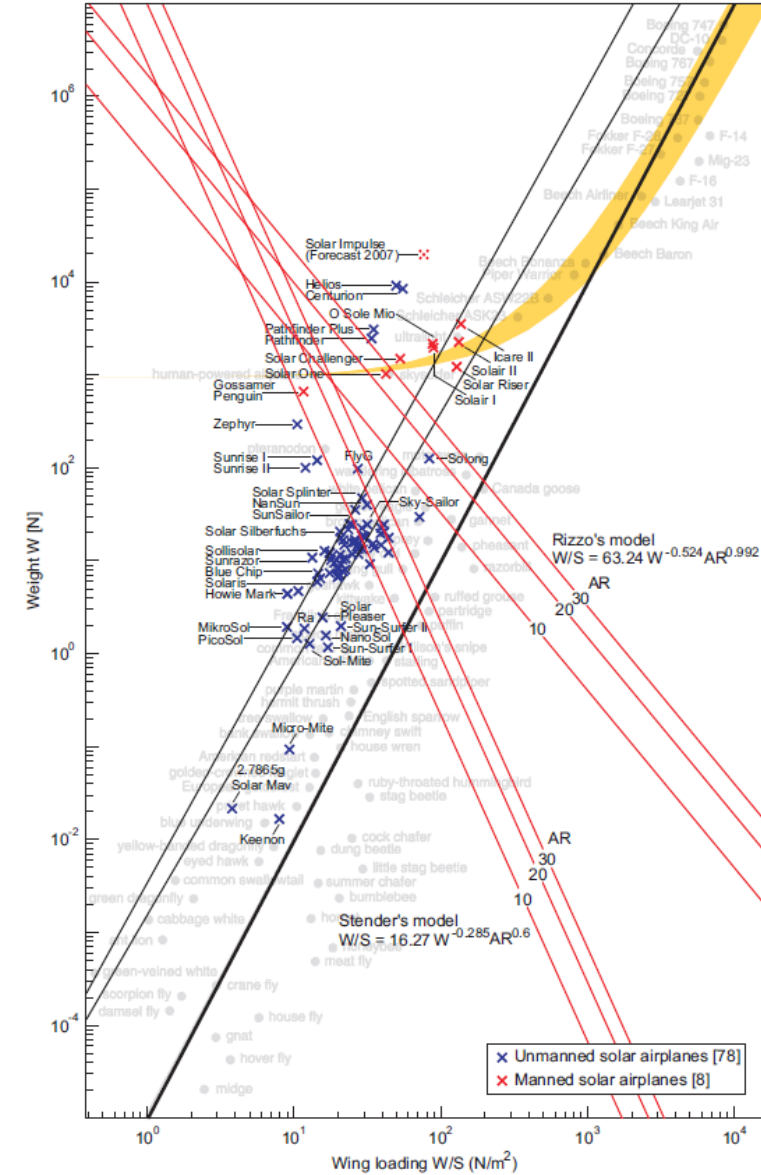
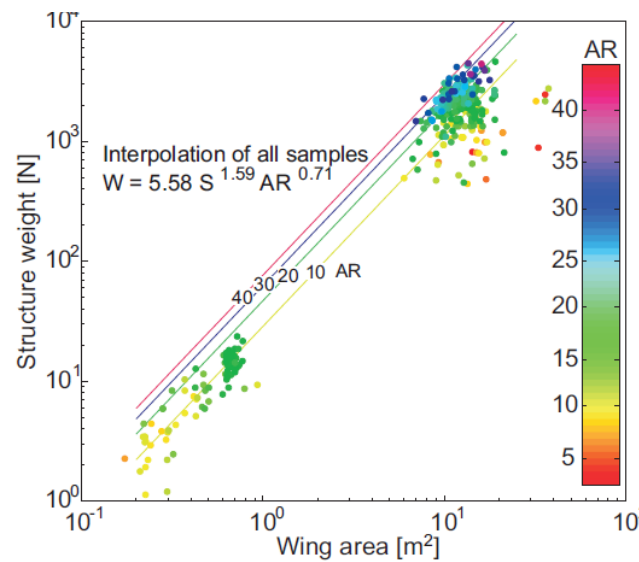
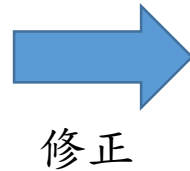
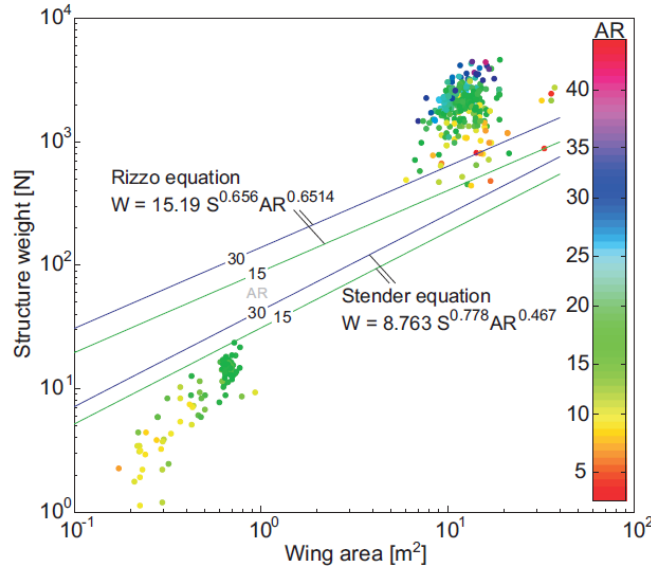
結構技術發展



高展弦比之機翼面積與結構重

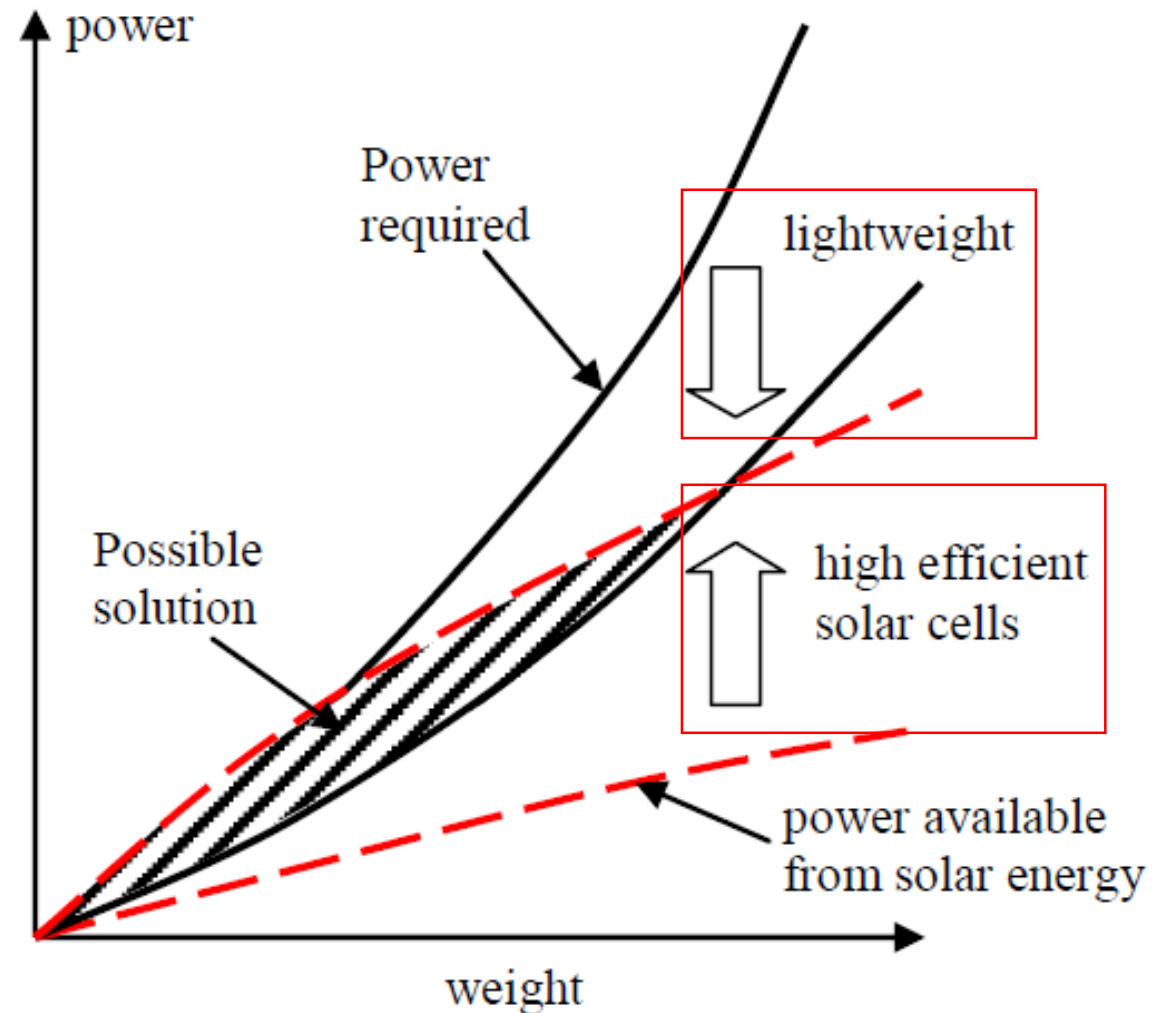
- 太陽能飛機為高展弦比設計，在結構重量評估與一般無人機不同，而外國文獻在太陽能飛機設計階段修正不同展弦比的重量評估。

Model	$W_{af} = f(S, AR)$	$W_{af} = f(b, AR)$	$W_{af}/S = f(W_{af}, AR)$
Noth	$0.44 S^{1.55} AR^{1.30}$	$0.44 b^{3.10} AR^{-0.25}$	$0.59 W_{af}^{0.35} AR^{0.84}$
Stender	$8.763 S^{0.778} AR^{0.467}$	$8.763 b^{1.556} AR^{-0.311}$	$16.27 W_{af}^{-0.285} AR^{0.600}$
Rizzo	$15.19 S^{0.656} AR^{0.651}$	$15.19 b^{1.312} AR^{-0.005}$	$63.24 W_{af}^{-0.524} AR^{0.992}$



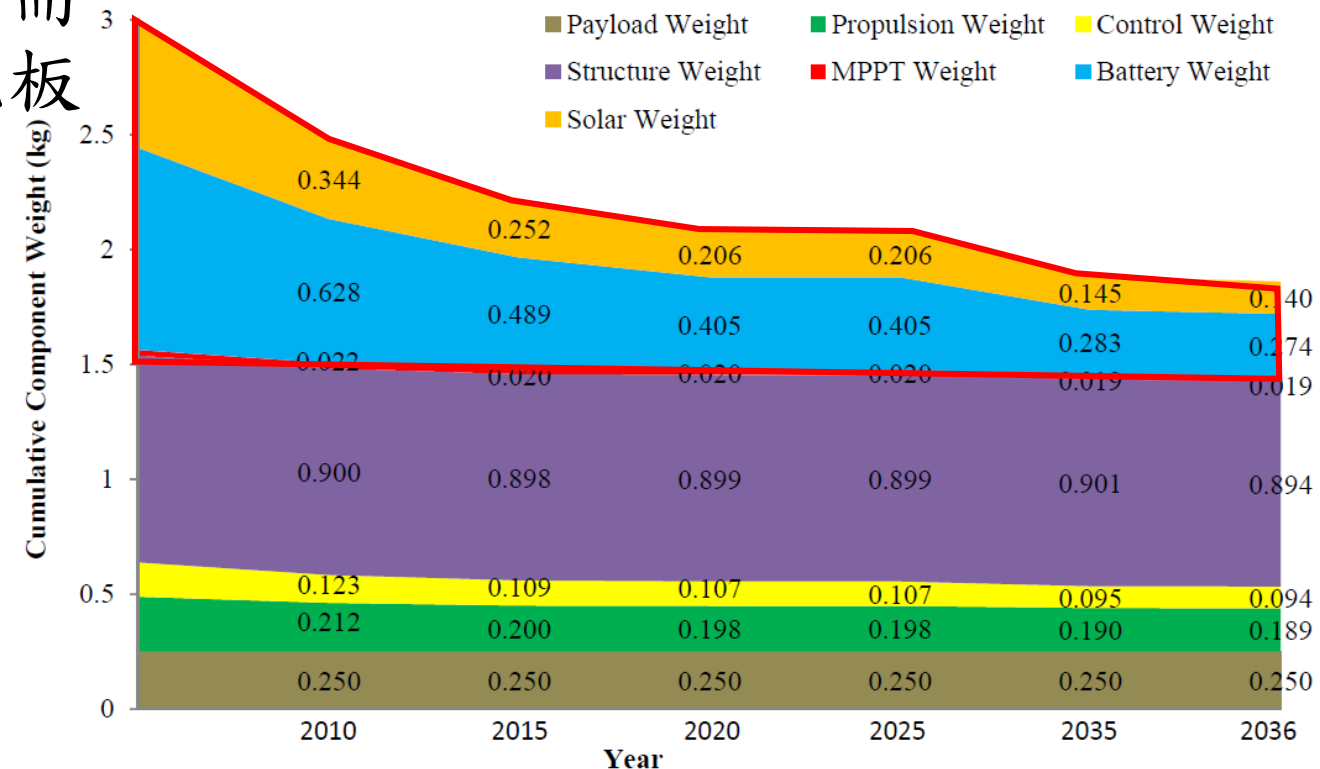
總重與能量變化關係圖

- 太陽能飛機搭配輕量化的結構，結合能取得太陽能之能量，會在特定的重量區間產生出可能之設計點。

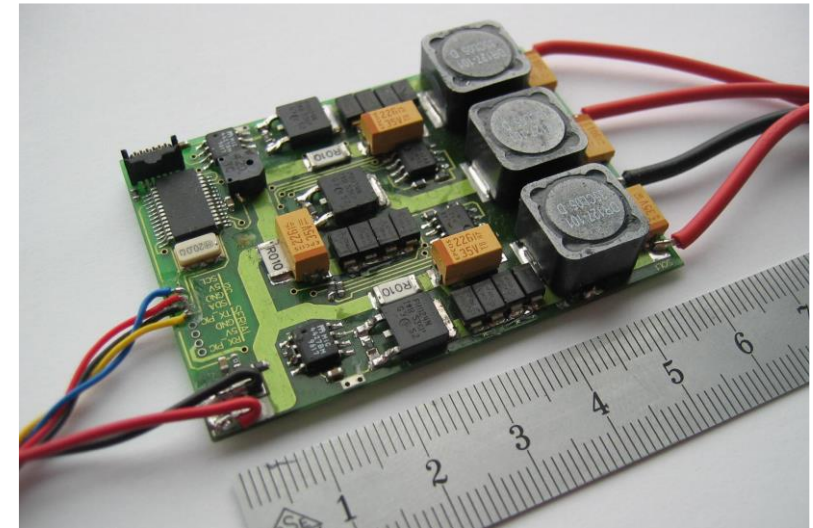
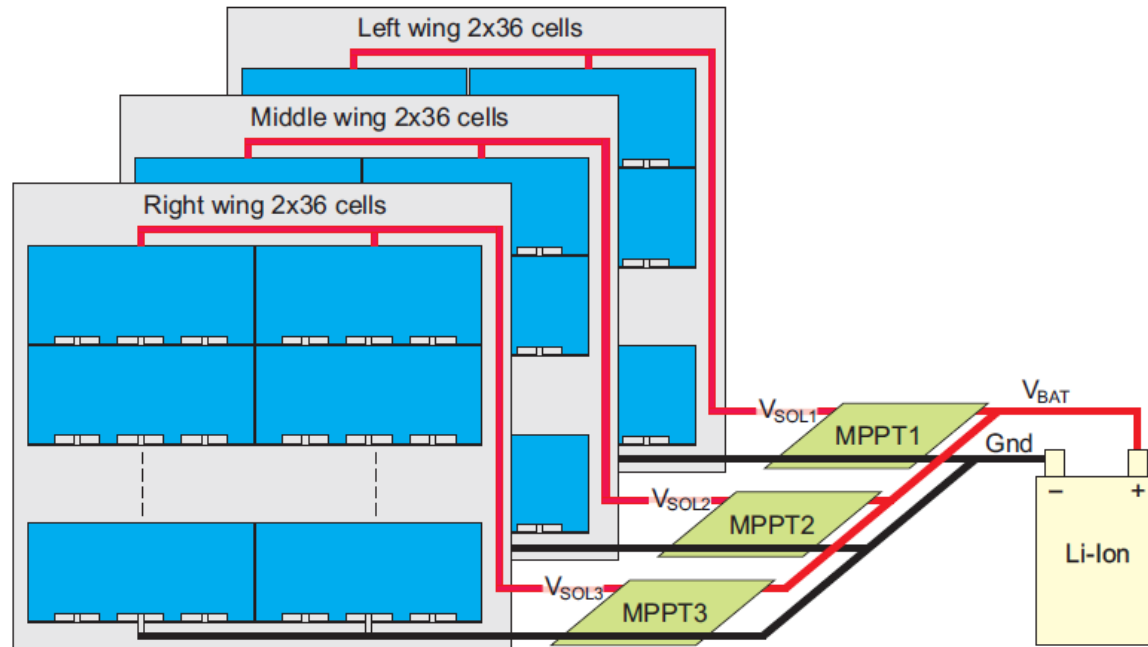


結構重量比例變化趨勢

- 依照近年太陽能無人機之各組成結構重，在特定太陽能無人機的尺寸下，變化趨勢為結構、飛導控系統、最大功率追蹤系統與酬載系統之比例穩定，而最可能異動的部分為太陽能板與電池。

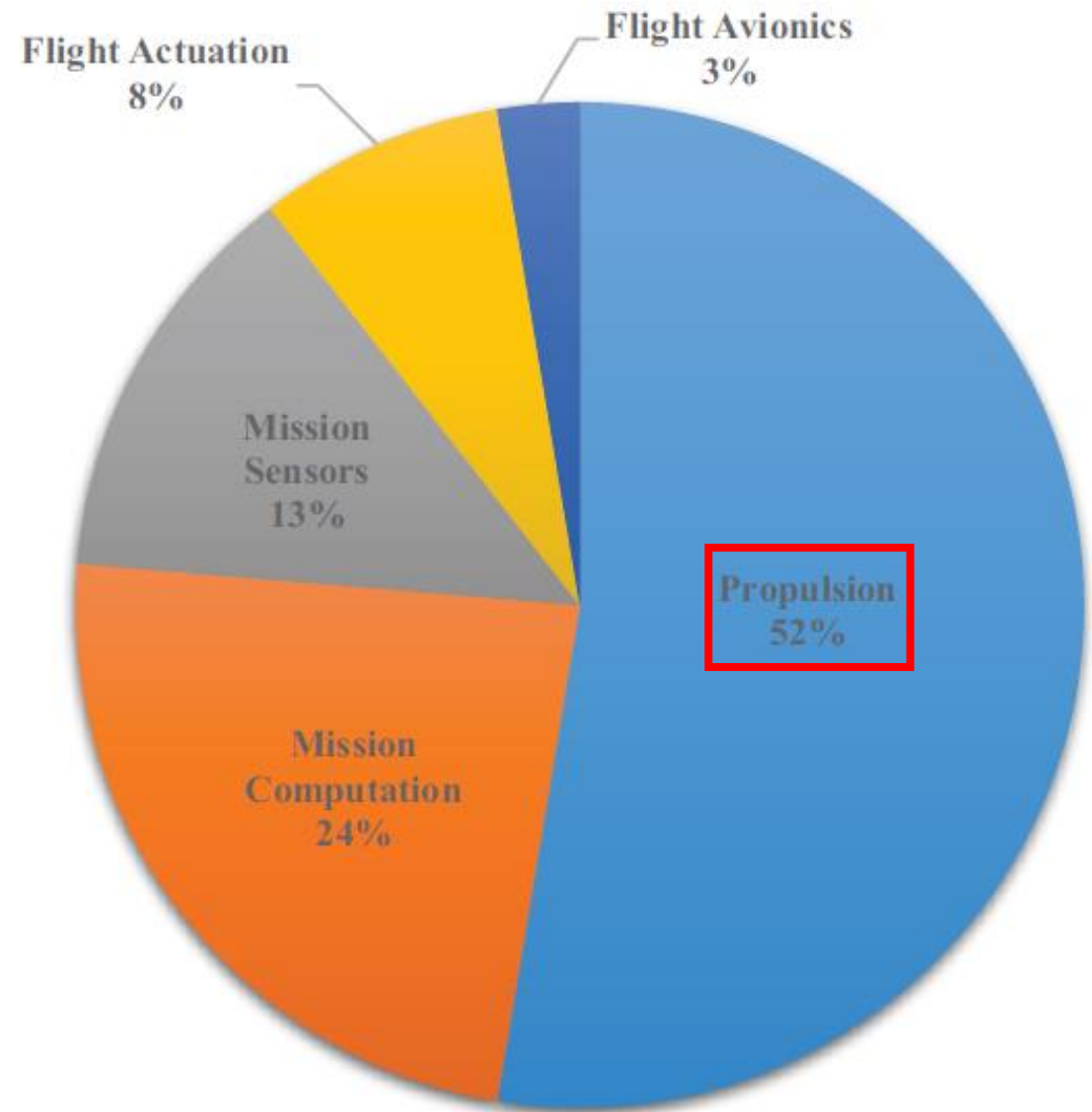


能源技術發展



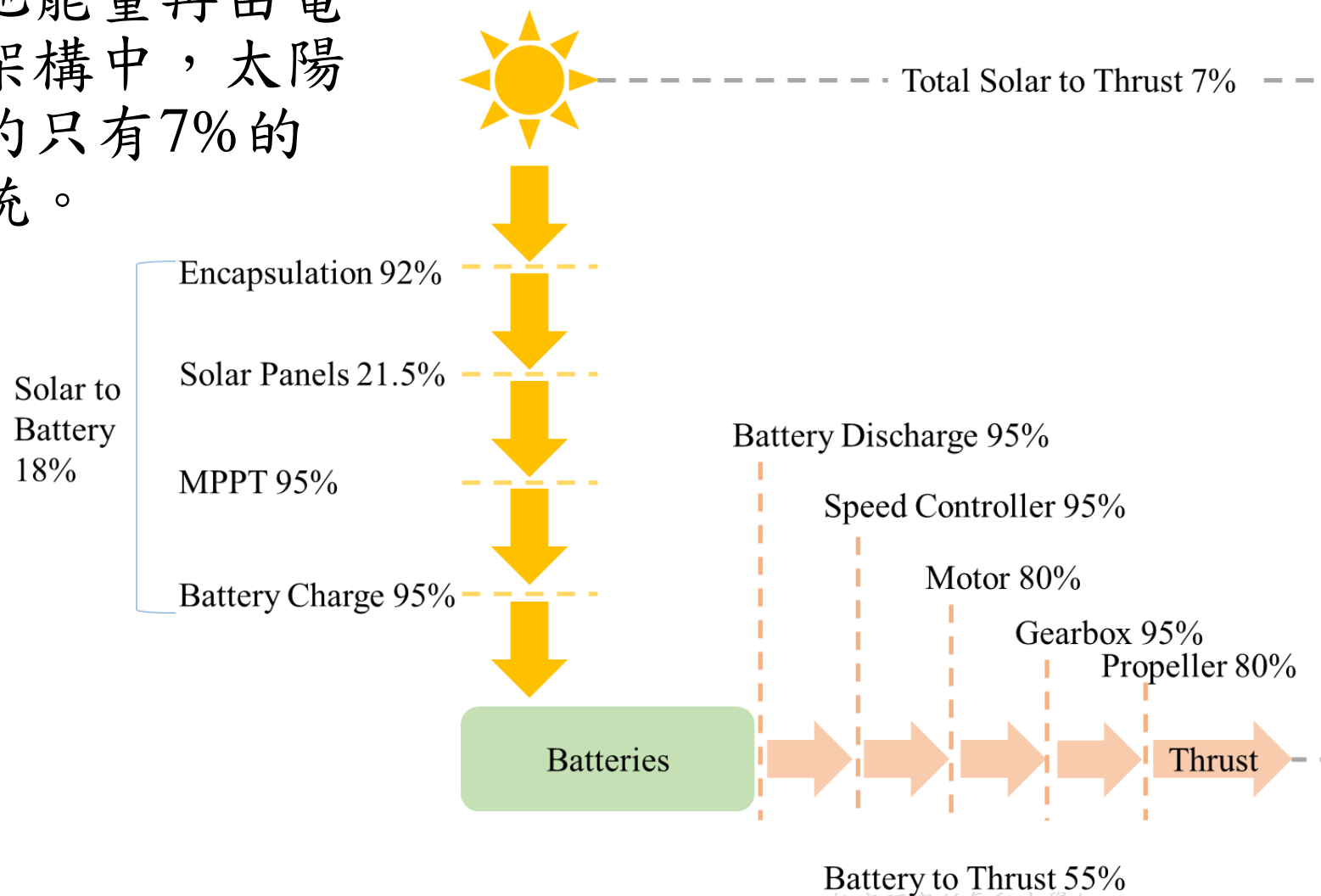
巡航能量分布

- 太陽能無人機絕大部分的能量使用在推進系統上，而飛行的航電系統使用最小。



能量損失

- 在太陽能提供給電池能量再由電池提供動力的系統架構中，太陽能經由能量轉換後約只有7%的能量提供給推進系統。



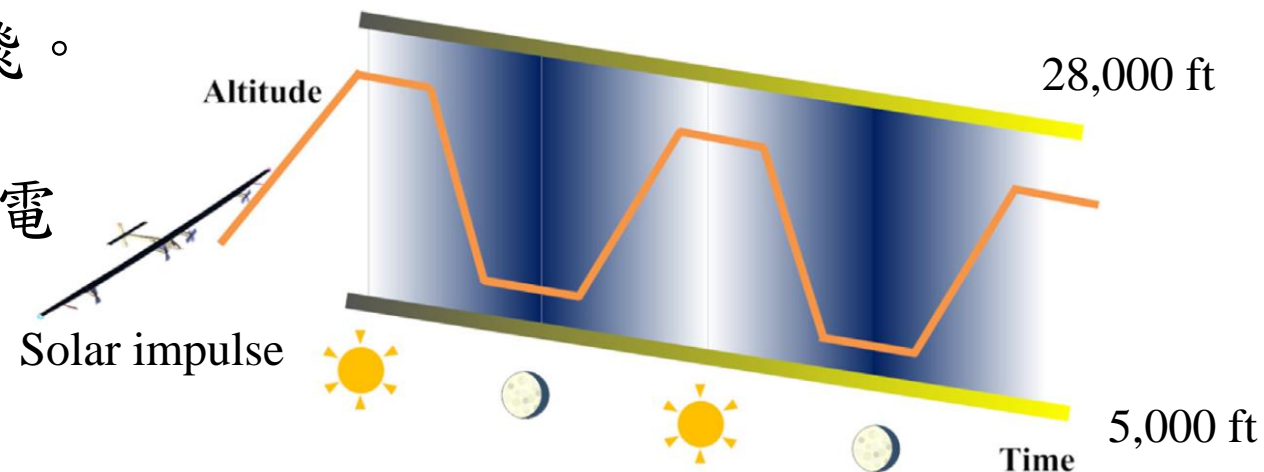
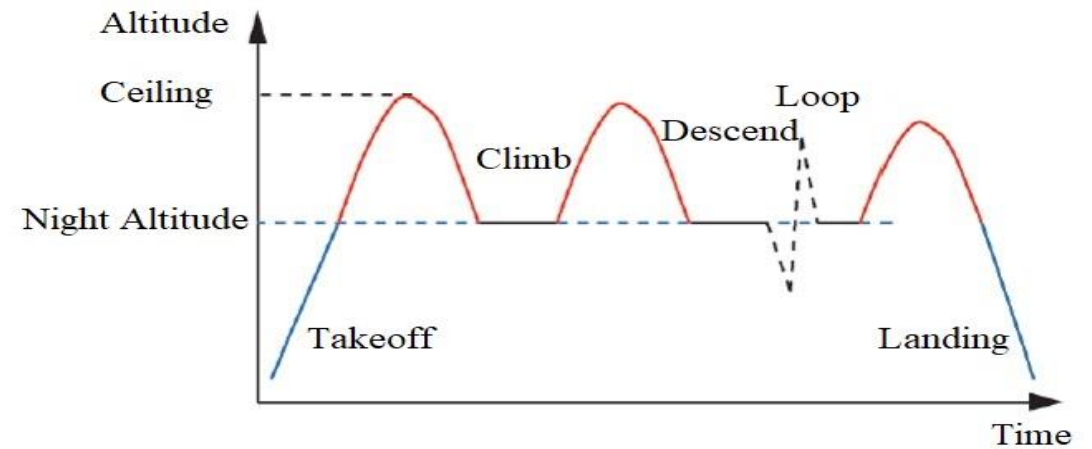
Battery to Thrust 55%

航空研究所氣動力學組

Aerodynamics Department

太陽能飛機的循環飛行高度面能量策略

- 一般太陽能飛機之長滯空飛行任務，除了起飛與降落外，以4個階段執行。
- 階段一為日出時間依照任務需求平飛或爬升。(太陽能供電)
- 階段二為爬升充電，充電完成後繼續爬升，直到無法維持平飛開始下滑。(太陽能供電)
- 低三階段為下滑至黃昏改成平飛。(太陽能轉電池供電)
- 第四階段平飛從夜間至日出。(電池供電)



Reference :

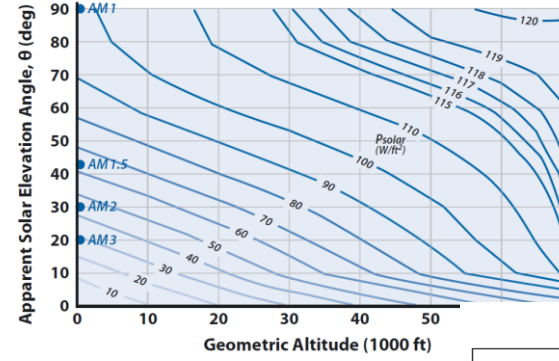
-ZHONG W G, GUO Y G, ZHANG K., "Energy strategy on altitude profile for cycle flight of solar powered aircraft", Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 623429

-Xian-Zhong Gao, Zhong-Xi Hou, Zheng Guo, Xiao-Qian Chen, "Reviews of methods to extract and store energy for solar-powered aircraft", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44(2015): 96-108

44(2015): 96-108

臺灣太陽能飛機的飛行限制

- 高空雲層最高之平均高度為 60,000 ft，避免太陽能飛機之效率受到雲及水氣影響，飛行高度須於 60,000 ft 以上。
- 臺灣一年四季對於平飛太陽能飛機的入射角都會有變化，太陽能於 60,000 ft ~ 70,000 ft 之每平方呎能量約為 100 ~ 120 W。
- 需在設計流程之能量平衡中考量此地區限制。



臺灣各地四季太陽仰角與方位角

臺 北 (東經 121°31', 北緯 25°02')															
季節	時	6	7	8	9	10	11	中天	12	13	14	15	16	17	18
春分	仰角		13.2	26.6	39.5	51.5	61.0	65.0	65.0	61.3	52.0	40.2	27.3	13.9	0.4
	方位		96.4	103.6	112.7	125.9	147.0	180.0	179.2	211.8	233.5	246.9	256.2	263.5	270.0
夏至	仰角	10.6	23.5	36.7	50.1	63.6	77.2	88.4	88.1	75.3	61.7	48.2	34.8	21.6	8.8
	方位	69.0	74.0	78.5	82.8	87.4	94.3	180.0	211.6	267.1	273.4	277.8	282.1	286.7	291.8
秋分	仰角	3.1	16.6	29.9	42.7	54.1	62.6	65.0	64.8	59.3	49.2	37.0	23.9	10.5	
	方位	91.4	97.9	105.5	115.4	130.1	154.1	180.0	188.0	218.2	237.3	249.4	258.0	265.0	
冬至	仰角		4.3	15.8	26.1	34.4	39.9	41.5	41.5	38.8	32.5	23.6	12.9	1.2	
	方位		118.4	126.0	135.8	148.5	164.3	180.0	182.4	200.1	215.1	227.0	236.1	243.4	
臺 中 (東經 120°41', 北緯 24°09')															
季節	時	6	7	8	9	10	11	中天	12	13	14	15	16	17	18
春分	仰角		12.6	26.1	39.2	51.3	61.3	65.9	65.9	62.4	53.1	41.2	28.2	14.8	1.1
	方位		95.8	102.7	111.5	124.1	144.7	180.0	177.2	211.1	233.5	247.0	256.3	263.4	269.7
夏至	仰角	9.6	22.5	35.8	49.2	62.8	76.5	89.3	89.3	76.1	62.4	48.8	35.3	22.1	9.2
	方位	68.5	73.4	77.6	81.5	85.3	90.0	180.0	197.2	270.2	274.8	278.6	282.5	286.8	291.7
秋分	仰角	2.4	16.0	29.4	42.4	54.1	63.1	65.9	65.8	60.5	50.3	38.0	24.8	11.3	
	方位	91.0	97.3	104.6	114.0	128.2	151.6	180.0	186.2	217.7	237.4	249.5	258.0	264.8	
冬至	仰角		4.0	15.7	26.2	34.8	40.5	42.4	42.4	39.9	33.7	24.7	14.0	2.2	
	方位		117.9	125.3	134.9	147.4	163.2	180.0	181.4	199.4	214.7	226.7	235.9	243.0	
臺 南 (東經 120°12', 北緯 23°00')															
季節	時	6	7	8	9	10	11	中天	12	13	14	15	16	17	18
春分	仰角		12.3	25.9	39.2	51.6	61.9	67.1	67.0	63.6	54.2	42.1	28.9	15.3	1.6
	方位		95.4	102.0	110.3	122.4	142.6	180.0	175.8	211.4	234.2	247.6	256.6	263.5	269.5
夏至	仰角	8.7	21.8	35.1	48.6	62.3	76.0	89.6	89.5	76.4	62.7	49.0	35.5	22.2	9.2
	方位	68.2	72.8	76.7	80.1	83.0	85.2	0.0	26.4	274.8	276.9	279.8	283.2	287.1	291.7
秋分	仰角	1.9	15.7	29.3	42.4	54.5	63.8	67.1	67.0	61.7	51.3	38.8	25.5	11.9	
	方位	90.7	96.8	103.7	112.7	126.3	149.5	180.0	185.3	218.2	238.1	250.1	258.3	264.9	
冬至	仰角		4.2	16.0	26.7	35.5	41.5	43.6	43.6	41.2	34.9	25.8	15.0	3.1	
	方位		117.7	124.8	134.1	146.5	162.3	180.0	180.8	199.2	214.7	226.8	235.9	242.9	
恆 春 (東經 120°45', 北緯 22°00')															
季節	時	6	7	8	9	10	11	中天	12	13	14	15	16	17	18
春分	仰角		12.9	26.6	40.0	52.6	63.0	68.1	68.1	64.2	54.3	42.0	28.7	14.9	1.1
	方位		95.4	101.7	109.9	121.9	142.4	180.0	177.1	213.5	236.0	248.8	257.4	264.0	269.8
夏至	仰角	8.8	21.9	35.3	48.9	62.6	76.4	88.6	88.5	75.8	62.1	48.4	34.8	21.4	8.3
	方位	68.2	72.6	76.2	79.1	81.2	81.2	0.0	34.9	278.7	278.8	281.0	284.0	287.6	292.0
秋分	仰角	2.4	16.3	30.0	43.3	55.5	64.9	68.1	67.9	62.1	51.3	38.7	25.2	11.4	
	方位	90.9	96.7	103.4	112.2	125.8	149.6	180.0	187.0	220.3	239.7	251.1	259.0	265.3	
冬至	仰角		5.1	17.0	27.7	36.6	42.6	44.6	44.5	41.9	35.4	26.1	15.2	3.1	
	方位		117.8	124.9	134.2	146.6	162.7	180.0	181.5	200.1	215.6	227.5	236.4	243.1	

Reference :

-臺灣四季太陽仰角與方位角(<https://www.cwa.gov.tw/Data/astronomy/season.pdf>)

臺灣高空風場特性

- 依據文獻紀錄臺灣平流層以副熱帶東風(Subtropical easterly)為主，夏季時向下延伸至對流層中上部，並因緯度低而有差異。臺灣平流層上部(26.7km)高度，出現全年東風之現象。在此高度以下於冬季時對流層之西風會向上入侵平流層。
- 太陽能飛機飛行高度需考量風場之影響，甚至還須依照不同高度風場調整軌跡。

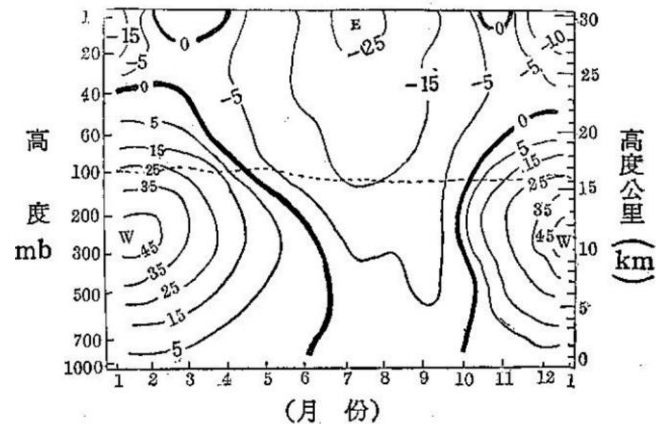
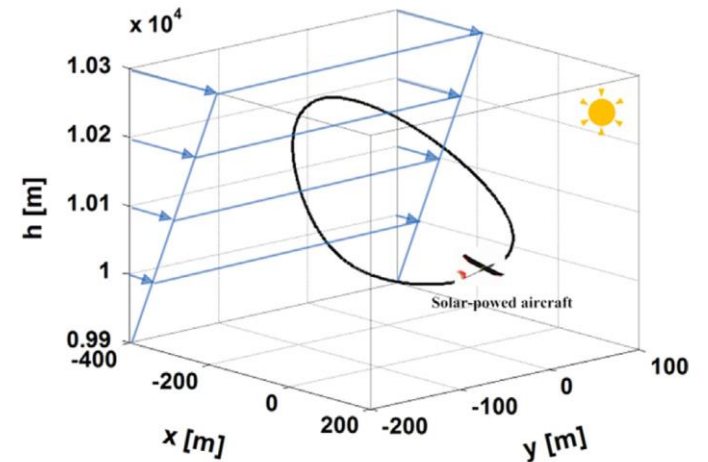


圖5：東港全年緯流風速隨高度之變化

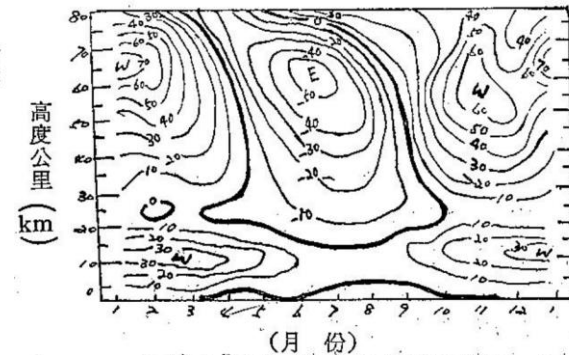


圖6：沿30°N月平均緯流風(單位m/s)

Reference :

-Grenstedt J, Spletzer J R, "Towards perpetual flight of a gliding unmanned aerial vehicle in the jet stream", n:Proc.IEEEconf.ondecisionandcontrol, Atlanta, GA, 2010

-魏元恆,"臺灣對流層頂級平流層風系之研究",交通部 中央氣象署

航空研究所氣動力學組

ms Research Division

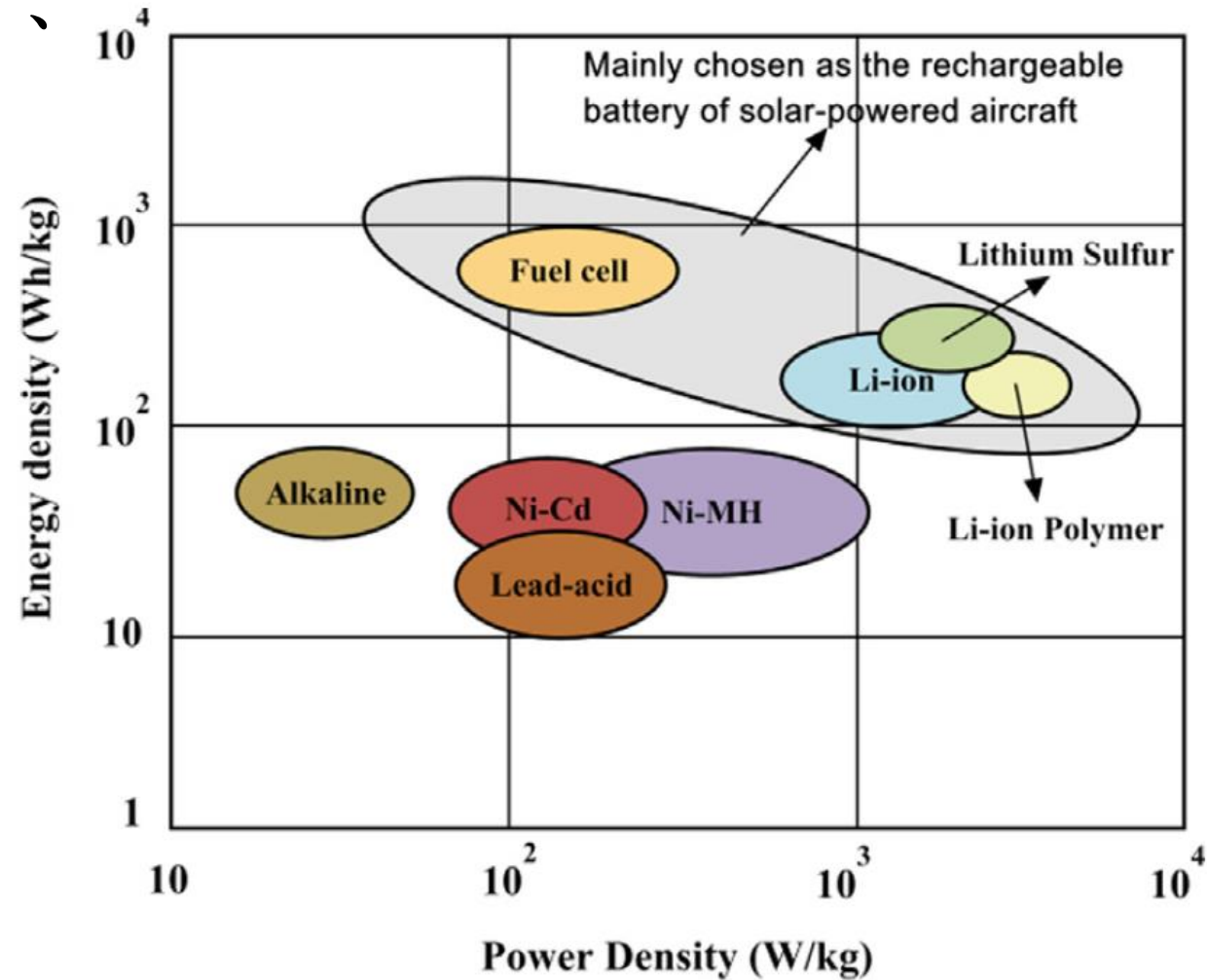
Aerodynamics Department

常用電池特性

特性	單位	鉛酸電池	鎳鎘電池	鎳氫電池	鋰離子電池	鋰離子聚合物電池	鋰硫電池	鋅空氣電池
能量密度	$W \cdot h/kg$	33~40	40~60	30~80	160	130~200	250~350	230
能量/體積	$W \cdot h/L$	50~100	50~150	140~300	270	300	600	270
功率密度	W/kg	80~300	200~500	250~1,00	1,800	2,800	2,800	105
充電時間	Hour	8~16	1	2~4	2~3	2~4		0.2
循環效率	%	82	80	70	99.9	99.8	99.8	
壽命	Months				24~36	24~36	24~36	
循環壽命		300	500	500-1,00	1,200	>1,000	>1,000	>2,000
額定電壓	V	2	1.2	1.2	3.6	3.7	3.7	1.2
工作溫度	$^{\circ}C$	12~25	-20~60	-20~60	-40~60			-25

太陽能無人機的電池與飛行規劃

- 太陽能飛機適合使用之電池主要選用高能量密度之燃料電池、鋰鐵電池、鋰鐵聚合電池與鋰硫電池。

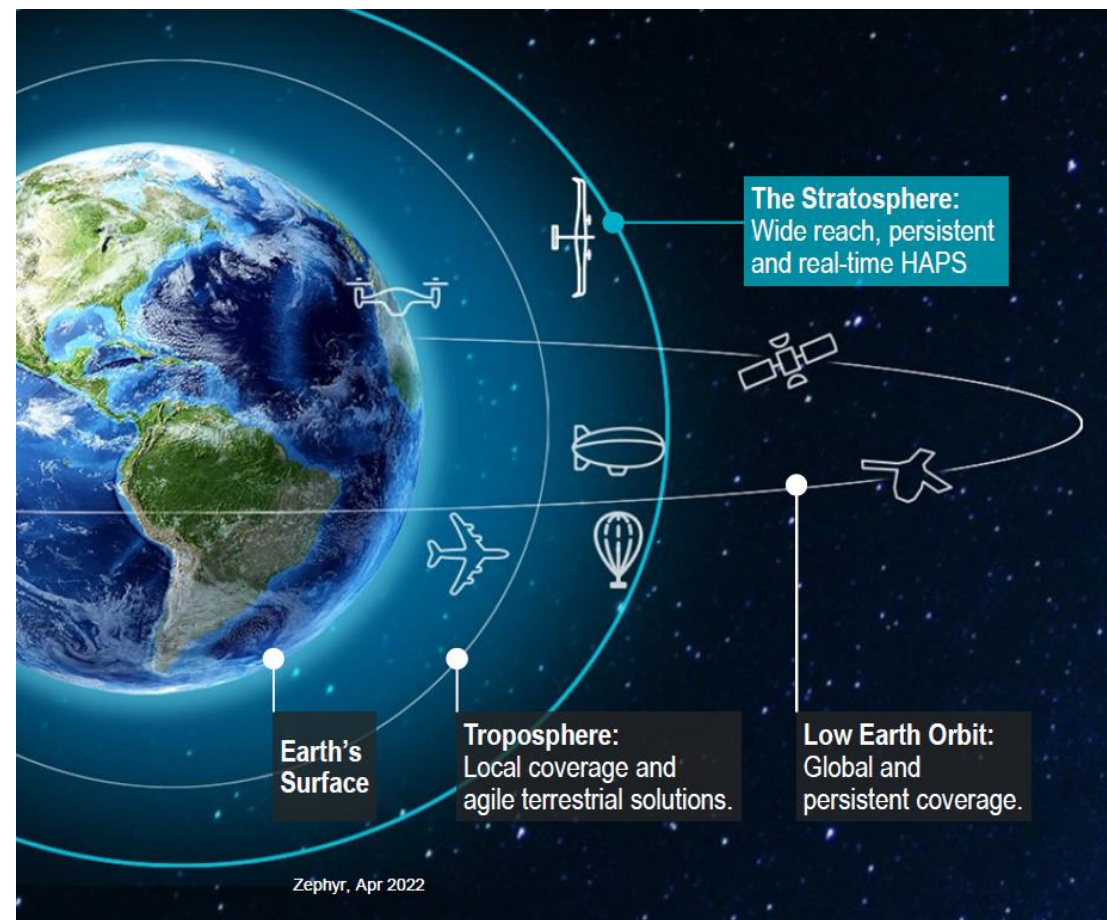


結論

- 國際現有許多高高空載具發展對於氣動力、結構以及能源主題於業界與學術界均有持續的發展。
- 高高空載具以太陽能飛機有更多實際成功的案例，例如Solar Impulse、Zephyr與PHASA-35等，可填補低軌道衛星到飛機之應用領域。



無人機氣動力性能檢測中心建置意向調查問卷



謝謝聆聽