

# 中華民國第 62 屆中小學科學展覽會

## 作品說明書

---

高級中等學校組 工程學(二)科

佳作

052401

屋頂仿生蝶翅構造

學校名稱：臺中市立臺中工業高級中等學校

作者： 高二 朱恩欣 高二 林佳勳 高二 廖士璿	指導老師： 張炳堯
-----------------------------------	--------------

關鍵詞：蝴蝶、追日、隔熱塗料

## 摘要

據 2017 年台電歷年售電量統計，撇除佔了七成多的工業用電，佔比最多的便是住宅用電。住宅用電中，第二耗電的家電為冷氣機。雖近年冷氣機大多為變頻冷氣，能夠減少耗電，但因臺灣位居亞熱帶，常年氣候炎熱潮濕，於夏季時許多家庭會開著冷氣長達十小時。因此，冷氣耗電一直都是每個家庭的問題，冷氣帶來的溫室氣體也是每位人民該重視的問題。秉持減少家庭用電的理念下，我們以蝴蝶鱗片為發想作機構、銀蟻反射陽光（反射長波，並吸收短波）原理為塗料，設計出了烈日當空時，可以主動追日，使屋頂板角度呈現與太陽垂直之狀態，最大化的反射太陽熱能，藉此改善夏季熾熱的源頭，進而解決冷氣耗電，間接減緩地球暖化之議題。

## Abstract

According to the statistics of Taipower's annual electricity sales amount in 2017, beside the industrial electricity, which accounts for more than 70%, The highest proportion of electricity consumption is residential electricity. In residential electricity, the second current consuming household appliances is air conditioner. Although most of the air conditioners are frequency air conditioners in recent years, which can reduce the requirements of electricity. But Taiwan is in the subtropical zone, the weather here is always sweltering and humid, there are many families use air conditioners in summer last for ten hours to avoid the heatwave. Therefore, the electricity consumption of air conditioners is the problem of every family, the greenhouse gas which the air conditioners bring from is the issue that everyone should take it seriously, too. To accomplish the faith of reduce the requirements of electricity and unburden the Erath. We were inspired of butterflies' scales and Saharan silver ants' hairs. We use the principle of butterflies' scale serve as the organization, and use the principle that why Saharan silver ants' hairs can reflect sunlight serve as the coating material. As a result, our roof panel can active tracking the sun to change its angle to make vertical with the it, thus, it can reflect the sunlight and the solar heat to improve the source of the high temperature in summer, then solve the electricity consumption of air conditioners.

## 壹、研究動機

導致全球暖化的主要元兇即溫室氣體中的二氧化碳，二氧化碳不外乎的便是工業燃燒煤炭、化石燃料燃燒時所排放出的氣體。我們無法阻止工業燃煤，但能夠從身邊的節能減碳做起—夏季時減少使用冷氣頻率與冷氣溫度設定不要過低。室內之所以會悶熱，是因屋頂吸收了大量太陽的熱能，再透過鋼筋混凝土結構傳導至室內，使屋內酷熱難忍。若能夠讓屋頂板主動追日，與太陽照射角度呈垂直，並漆上能夠大量反射熱能的塗料，便能夠解決屋頂吸收太陽熱能並傳導至室內燥熱之問題，進而達成減少使用冷氣之頻率，實現節能減碳的弘願。

表 1 主題與課程之相關性說明

課程內容	課程之相關性
建築製圖手繪	運用建築製圖手繪，初步勾勒出我們模型的概略圖與形狀，也可迅速將構思、發想畫出，方便與組員進行討論或修正。
建築製圖電繪	利用建築製圖電繪中所學到的 SketchUp 繪製出模型的 3D 立體圖，讓構想更為具體，清楚明瞭。
材料與試驗	藉由材料與試驗了解該如何調配塗料，如何確定比例、濃度，以及調配完的塗料需測試的時長為多久最為恰當。
專題製作	透過專題製作了解專題的製作流程，學習專題報告書需撰寫的內容，以及排版呈現。
模型製作	使用模型製作所學到的要領與技巧，將模型完美呈現。
數位邏輯	運用數位邏輯中學到的 Arduino 程式撰寫與基本應用，將程式輸入至我們模型的 SG90 伺服馬達與 dht11 溫溼度感測器中，使其控制追日機構頭和偵測當前環境溫度。
國文	利用文字逐步表達我們專題的發想至完成，包含了琢磨文句、用詞，共同探討該使用哪個字詞能夠更精準、精確的表達想法，使組員、閱覽者得以更加

## 貳、研究目的

- 一、探討蝴蝶鱗片為何能調節自身溫度。
- 二、利用蝴蝶鱗片散熱、調節體溫原理，創造出以蝴蝶鱗片為發想之主動追日，並且反射太陽光的隔熱屋頂板。
- 三、研究非洲銀蟻為何能在高溫的撒哈拉沙漠中存活。
- 四、藉由非洲銀蟻反射太陽光之原理，調配出能夠有效反射太陽熱能之隔熱塗料，並使用於屋頂板上。
- 五、調查太陽對於都市與建築造成的熱輻射。
- 六、剖析臺灣之日射量，決定屋頂仿生蝶翅構造安裝的最佳方位與角度。
- 七、分析一般屋頂板與經過改良後的追日蝴蝶鱗片屋頂板的溫度關係。

## 參、研究設備及器材

表 2 屋頂仿生蝶翅構造之控制零件

零件名稱	零件圖片	零件說明
追日機機頭		安裝光敏電阻電路板及固定在追日機機頭上。
Arduino NANO 擴展板		因 Arduino 板子給的 gnd (接地) 及 vcc (正電) 過少，需要拓展板以擴展更多的 gnd 及 vcc，方便接更多的模組塊。
SG90 伺服馬達		利用伺服馬達改變物體的朝向方向。
伺服馬達雲台		固定 SG90 伺服馬達及追日機機頭。

零件名稱	零件圖片	零件說明
感光電路板		需要固定光敏電阻與接線。
dht11 溫溼度感測器		偵測當下環境的溫度及濕度。
Arduino MEGA2560 擴展版		因 Arduino 板子給的 gnd (接地) 及 vcc (正電) 過少, 需要擴展板以拓展更多的 gnd 及 vcc, 方便接更多的模組塊。
Arduino UNO		執行 Arduino 的程式。
Arduino NANO		執行 Arduino 的程式。
1602 lcd 顯示器		能夠顯示由 dht11 溫溼度感測器所偵測到的當前環境溫度與濕度。

表 3 屋頂仿生蝶翅構造之塗料與材料

材料名稱	材料圖片	材料說明
奶板		用於製作支撐追日機構頭、雲台等零件之長方體模型。
不鏽鋼片		以不鏽鋼片代替實體的瓦片, 透過 Arduino 程式使其被控制, 自動與太陽照射角度呈垂直, 以反射陽光與熱能。
金屬用底漆噴漆		使用於防水隔熱面漆之前, 提高面漆的附著力、鮮豔度, 保證面漆得以均勻上在不鏽鋼片。
P-701 防水防熱面漆		P-701 是一種壓克力樹脂, 兼具防水、防熱、 <u>耐候</u> 多項效果的防水防熱材料。白色以中空陶瓷作添加物, 此陶瓷粉質地輕、隔熱性佳, 可降低熱傳導係數達到防熱效果, 且白色是能夠最大值反射光線的顏色。我們選此作為以 <u>銀鏡</u> 為發想的隔熱塗料之基底。

<p>硫酸銀</p>		<p>坊間常見白漆常含有二氧化鈦，雖該元素能夠增加光線折射率，但也會吸收太陽的紫外線。而硫酸銀能夠不吸收紫外線且減少吸收陽光，其也能使油漆具有較高的光澤度與耐候性。我們選此作為以銀鏡為發想的隔熱塗料之添加物。</p>
------------	---	--

表 4 屋頂仿生蝶翅構造之儀器與器材

器材名稱	器材圖片	器材說明			<p>剪斷不鏽鋼片。</p>
<p>非金属雷射切割雕刻機</p>		<p>利用 AutoCAD 繪製要切割的路徑後輸入雷射切割機，幫助切割較厚、難以割斷的板。</p>			<p>黏著劑。</p>
<p>標寶 GM321 紅外線測溫槍</p>		<p>測試不鏽鋼片塗抹以銀鏡為發想之塗料後，照射離合保溫燈的表面溫度，以此判斷塗料效果。</p>			<p>接合物件。</p>
<p>數位電子秤</p>		<p>精度 1g 的數位電子秤，用以秤材料重量。</p>			<p>測試不鏽鋼片塗抹以銀鏡為發想之隔熱塗料後對於溫度之接收。</p>
<p>美工刀</p>		<p>調整、修飾切板的邊緣。</p>			<p>保護雙手。</p>

竹筷		將水、面漆、硫酸銅攪拌均勻。
小湯匙		蘸取面漆、硫酸銅。
紙杯		盛裝水、面漆、硫酸銅。
真空壓縮機		將空氣抽出，使空氣不存在於 dht11 溫溼度感測器周圍，防止試驗時發生熱平衡之狀況。
真空壓縮袋		包裹內含 dht11 溫溼度感測器的保鮮盒。
超強大力膠布		填補將保鮮盒與真空壓縮袋剝洞後引出杜邦線的洞。
保鮮盒		裝 dht11 溫溼度感測器。
保麗龍		固定於箱體與裝載內含 dht11 溫溼度感測器之保鮮盒，隔絕熱量傳導，令數據準確。

## 肆、研究過程與方法

### 一、研究流程

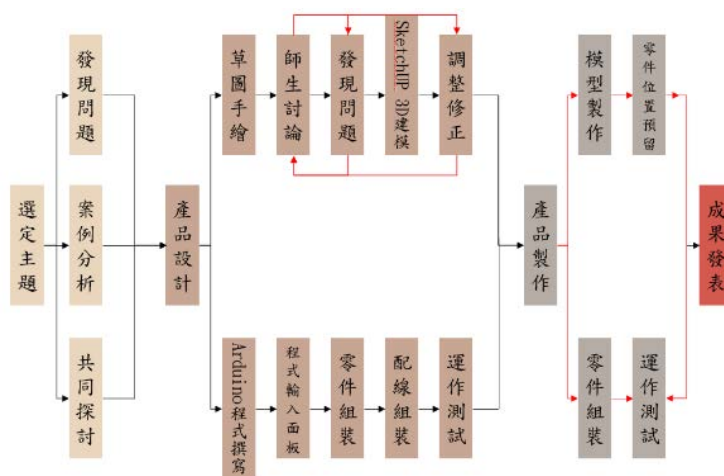


圖 1 研究流程圖

## 二、案例分析

### (一) 阿布達比—投資局總部大樓

阿布達比投資局總部大樓於阿拉伯聯合大公國，屬亞熱帶乾燥氣候，全年幾乎晴朗高溫，日照時數長。為因應此極度熾熱之氣候，其大樓在外牆太陽能板上運用參數化手段，使得立面能依據太陽一年中的運行軌跡、照射角度進行調整。據估計，此建築物在實施一系列遮陽措施後，可減少 50% 的太陽輻射。



圖 2 阿布達比投資局總部大樓（圖片出處：cn.wsj.com）

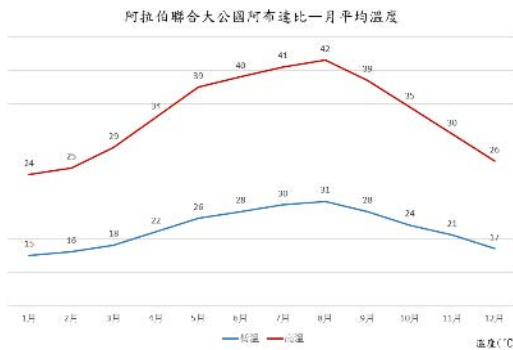


圖 3 阿布達比一月平均溫度圖

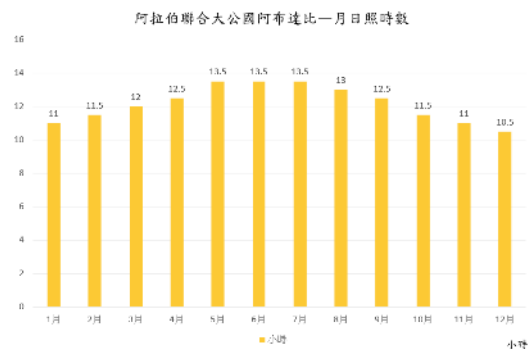


圖 4 阿布達比一月日照時數圖

### (二) 昆士蘭大學—全球變化研究所

全球變化研究所位於澳洲昆士蘭州的布里斯本，該地大部分受副熱帶高氣壓控制，其夏季（12月至隔年2月）典型天氣為炎熱、晴朗、乾燥。其百葉遮陽系統由電動控制，可隨著外界溫度、陽光變化進行調節，追蹤陽光並自動控制角度，藉此降低室內溫度。



圖 5 昆士蘭大學全球變化研究所（圖片出處：jianzhutu.com）



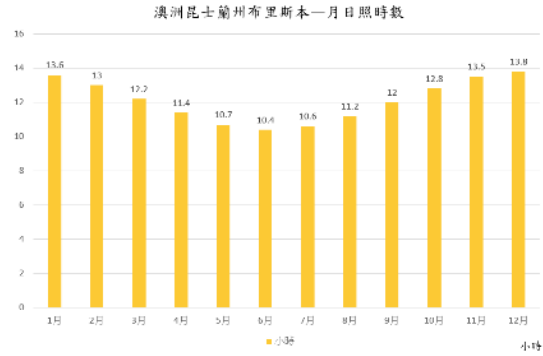
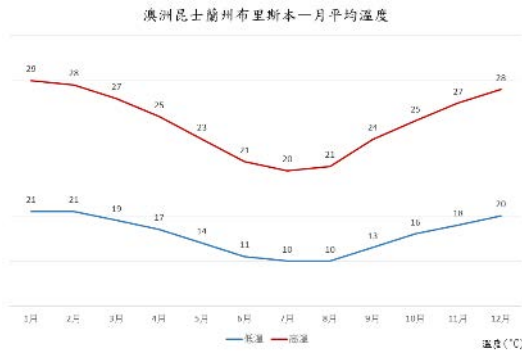


圖 6 澳洲昆士蘭州布里斯本一月平均溫度圖

圖 7 澳洲昆士蘭州布里斯本一月日照時數圖

### (三) 墨爾本—墨爾本市政廳

墨爾本市政廳坐落在澳洲維多利亞州，當地氣候屬於溫帶海洋型氣候，四季分明。墨爾本市政廳西面有嚴重的西曬問題，因此西立面採用了智能遮陽系統，設置了由電腦控制的大型遮陽板系統，該系統能夠自動辨識太陽方位、陽光照射角度，自動調整遮陽板角度，從而達到根除西曬問題之目的。



圖 8 墨爾本市政廳 (圖片出處: TripAdvisor)

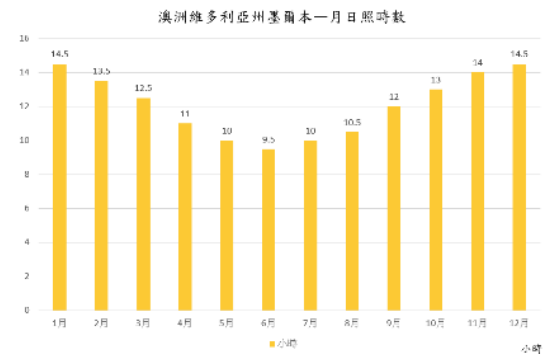


圖 9 澳洲維多利亞州墨爾本一月平均溫度圖

圖 10 澳洲維多利亞州墨爾本一月日照時數圖

### (四) 案例分析整合

我們整合了上述三棟藉由電腦控制可後主動追日，使太陽能板與太陽照射角度成垂直狀態的建築物，並細分出各自的優、缺點。我們細分出了「電腦控制」、「主動追日」、「呈垂直角度」、「空氣流動」，並在其基礎上新增了「馬達控制」與「隔熱塗料」。

表 5 案例分析整合

	阿布達比 投資局總部大樓	昆士蘭大學 全球變化研究所	墨爾本市政廳	屋頂仿生蝶翅構造
電腦控制	O	O	O	X
主動追日	O	O	O	O
呈垂直角度	O	O	O	O
空氣流動	X	X	O	X
馬達控制	X	X	X	O
隔熱塗料	X	X	X	O

### 三、文獻探討

#### (一) 蝶翅散熱機制

蝴蝶翅膀所看到的圖樣、色彩，都是由如瓦片般掛在翅膀表面的「鱗片」所組成的。當陽光直射於蝶翅時，鱗片會自動張開，藉以減少與太陽光的輻射角度；而當外界氣溫下降時，鱗片便會自動閉合，使陽光能夠直射於蝶翅表面，達到保溫之目的。

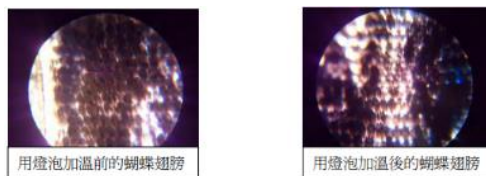


圖 11 蝶翅受熱前後之對比圖

(圖片出處：蝴蝶鱗片散熱的秘密—仿生材料的探討與應用之作品說明書)

#### (二) 太陽輻射理論

從房間來了解熱輻射理論：短波（太陽射出的波）會在房間內的地板、牆面、天花板之間來回反射並且被室內的不同材料吸收，使表面溫度上升。室內較高溫的地板，會放射出較多能量的長波（物體材料會吸收短波並使表面溫度上升所釋放的波），並在室內進行多次的吸收及放射現象。

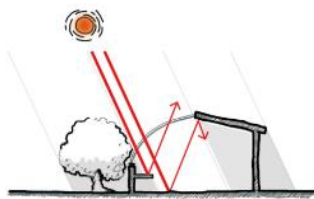


圖 12 白天室內的短波輻射示意。圖中的短波在反射後線條變細，暗示部分能量已被材料吸收。(圖片出處：商周出版)

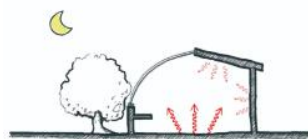


圖 13 夜晚房間內的長波輻射示意。圖中地板釋放長波以較粗的線條呈現，即暗示了地板白天的吸熱量比天花板及牆面高，因此表面溫度較高，會釋放出更多能量的長波。

(圖片出處：商周出版)

**材料與波的特性，對熱環境有極大的影響：**材料對於短波入射及反射的比例稱為反射率，很黑的材料反射率接近 0，鏡子的反射率則接近 1，**數值愈高代表材料反射短波的比例愈高**。如果是不透明材料，那麼材料對短波的吸收率加上反射率等於 1，這代表進入材料的短波被反射後的剩餘部分，會完全被物體吸收。也就是說，**當材料反射率愈低，就會吸收愈多太陽熱量，造成高溫化問題**。

**長波輻射會加熱空氣使氣溫上升：**短波能量很強，被物體吸收後表面溫度會快速上升，然而，**它的特性是幾乎不會加熱空氣，如果能在第一時間被高反射材料反射回天空，對都市蓄熱的影響其實不大**。相反的，**長波能量雖弱，對表面溫度的增加並不明顯，但它的問題便是會加熱空氣，使空氣溫度上升**，不能輕忽。(林子平，都市的夏天為什麼愈來愈熱？，2021)

### (三) 安裝方位及角度

臺灣位於北半球上，對於北半球而言，日照量最多的方位為正南向，屋頂仿生蝶翅構造最佳安裝方位應面向於正南方。

2001 年，張子文以 1990~1999 年台北等地之氣象資料為基礎，採用弦式模型以氣象模擬方法求取太陽能板最佳高度角，其結果顯示，**在方位上仍以正南向最佳**，在高度角方面，**全年最佳高度角介於 11.2 度至 18.4 度**，夏季因太陽高度角較大，正午時均接近 90 度，且日出時之方位角異常大於 -90 度，故**夏季六至八月太陽能板最佳高度角較全年最佳高度角為低**，除台北地區外，其餘地區高度角均小於 0 度（即方位正北），介於 -7.3 度 3.7 度之間。(張子文，賴榮平教授指導，太陽電池應用於建築上之研究，2001)

2005 年，詹肇裕發現**全年中水平面逐月累積日射量以八月為最大**，十二月最小，就各方位斜面日射量而言，春季二、三月日射量以南向 25 度斜面為最大，其次為水平面、南向 48 度斜面。夏季五月至八月則以水平面最大，其次為南向 25 度斜面、南向 48 度斜面；秋季九、十月則以水平面與南向 25 度斜面較大，其次為南向 48 度斜面。冬季十二、一月則是南向 25 度、48 度斜面最大。實測結果如圖 4 所示。(詹肇裕，建築外殼斜面太陽能光電板發電量概估之研究，2005)

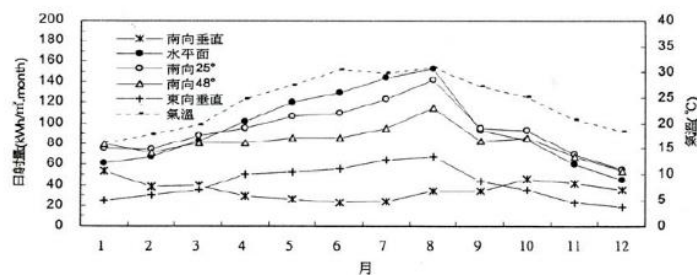


圖 14 2002 全年斜面日射量分布圖

(圖片出處：詹肇裕，建築外殼斜面太陽能光電板發電量概估之研究，2005)

#### (四) 銀蟻耐熱關鍵

科學家發現這些銀色的毛髮截面為三角形。這種三角形的構造有特殊的功用：當可見光及近紅外線的入射角為 35-90 度時，這些毛髮就像是小稜鏡一樣，可以把這些入射光以全反射的方式全部反射掉。在小入射角的狀況下，可見光是會穿透毛髮，但是也會被之後的毛髮反射掉。非洲銀蟻的表面就像一面鏡子一樣，可以反射掉絕大多數的陽光，所以不會提昇自己的溫度。

科學家觀察了去毛跟未去毛的銀蟻對光的反射效果。結果顯示，未去毛的螞蟻對光的反射效果比去毛的螞蟻好上十倍。科學家在實驗室中模擬撒哈拉沙漠的環境，並用數位溫度計來測量螞蟻的體溫。我們發現在這種環境中待上 90 秒，去毛的螞蟻體溫比未去毛的螞蟻平均高出了兩度。(Quetin Willot, Priscilla Simons, Jean-Pol Vigneron, Serge Aron, Total Internal Reflection Accounts for the Bright Color of the Saharan Silver Ant, 2016)

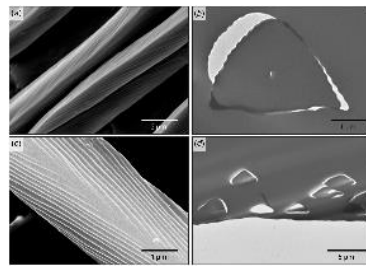


圖 15 掃描式電子顯微鏡下的非洲銀蟻 圖 16 掃描式電子顯微鏡下的非洲銀蟻三角構造毛髮

(圖片出處：Total Internal Reflection Accounts for the Bright Color of the Saharan Silver Ant)

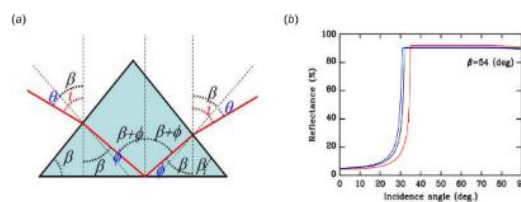


圖 17 (a)為於三角構造毛髮基礎面上的全反射光線追蹤模型示意

(b)為入射角與反射率之關係

(圖片出處：Total Internal Reflection Accounts for the Bright Color of the Saharan Silver Ant)

#### (五) 建築外殼節能技術

1. 建築外殼概論：建築物室內熱狀態受**建築結構**所影響，因此**建築物空調**能耗在很大程度上與**建築外殼形式**有關，改善建築物外殼的**立面**與**屋頂形式**以改善建築熱性能，是**建築節能**的重要途徑。

造成空調能耗之主要熱負荷來源包括「建築外殼熱負荷」。「建築外殼熱負荷」是由建築牆體、屋頂流入室內的熱量。其中，屋頂與牆體的隔熱性能及開窗部位的遮陽性能是上述三大因素中，可透過建築外殼熱性能來控制空調能耗的重要因素。建築外殼隔熱性能在於阻絕因為建築室內外溫差所造成外殼傳導熱，亦即在於抑制經由屋頂面、牆壁以熱傳透方式進出的熱流。(經濟部能源局指導，財團法人台灣綠色生產力基金會編印，建築節能應用技術手冊，2013)

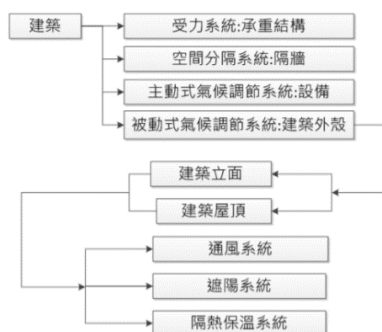


圖 18 建築全系統與建築外殼節能

(圖片出處：經濟部能源局指導，財團法人台灣綠色生產力基金會編印，建築節能應用技術手冊，2013)

2. 屋頂隔熱技術：住宅等低樓層大空間建築的屋頂隔熱，更是左右舒適環境與空調能耗的關鍵。如圖 8 所示，台灣水平方位的日射量為南向的 2.78 倍，建築物屋頂層的空調負荷量甚高。尤其在仲夏尖峰期間，台灣屋頂層外表面溫度可能高達 60~70°C，非空調頂層內部表面溫度可能高達 45°C，使室內產生高輻射熱。解決這些能源與居住環境問題最好的方法莫過於屋頂隔熱工程。(經濟部能源局指導，財團法人台灣綠色生產力基金會編印，建築節能應用技術手冊，2013)

方位地名	北緯	東經	S	SSW SSE	SW SE	WSW ESE	W E	WNW ENE	NW NNE	NNW NNE	X	H
基隆	25.13	121.75	1172	1249	1349	1402	1389	1314	1186	1036	942	3091
台北	25.03	121.52	1241	1321	1427	1481	1462	1377	1234	1070	969	3263
新竹	24.80	120.97	1368	1469	1604	1675	1654	1549	1370	1164	1038	3711
台中	24.15	120.67	1338	1434	1565	1635	1618	1518	1348	1151	1032	3629
花蓮	23.97	121.62	1230	1328	1462	1539	1537	1456	1308	1127	1012	3451
嘉義	23.50	120.42	1273	1365	1493	1564	1555	1468	1313	1131	1020	3491
台南	23.00	120.22	1351	1460	1616	1707	1701	1602	1422	1207	1077	3837
台東	22.75	121.15	1246	1346	1491	1578	1580	1500	1348	1159	1043	3560
高雄	22.58	120.30	1242	1342	1487	1574	1578	1500	1349	1161	1046	3557
宜蘭	24.77	121.75	1202	1290	1406	1470	1462	1384	1245	1080	974	3267
合計	<12 測站>		15290	16458	16094	19028	18952	17901	16010	13736	12344	42581
比值	以 S 為 1		1	1.08	1.18	1.24	1.24	1.17	1.05	0.90	0.81	2.78

註：日射量單位 W/(m<sup>2</sup>.day)

圖 19 台灣各地溫熱期間(5-10月)各方位日射量及比例

(圖片出處：經濟部能源局指導，財團法人台灣綠色生產力基金會編印，建築節能應用技術手冊，2013)

屋頂是建築物中吸收最多太陽熱能的部位，在全天太陽日射下蓄積熱能，並由外層逐漸向室內側傳遞，導致建築熱負荷的增加。另外在太陽的照射下，特別是夏季期間，屋頂室內側的表面溫度會遠高於其他牆面與地板的表面溫度，形成居室內表面溫度不對稱現象，或所謂的不對稱熱輻射現象。當屋頂的內表面與其他牆面及地板的表面溫度差過大時，室內人員會因為輻射不對稱而感到局

部不舒適。有關局部不舒適的詳細評估方法可以參考 ISO7730:2005，其重要的公式節錄如公式 (3-1) ~ (3-4)：

- 冷牆面(cool wall)
 
$$PD = \frac{100}{1 + \exp(6.81 - 0.345 \times \Delta t_{pr})} \cdot \Delta t_{pr} < 15^\circ\text{C} \quad (3-1)$$
- 暖屋頂(warm ceiling)
 
$$PD = \frac{100}{1 + \exp(2.04 - 0.174 \times \Delta t_{pr})} - 5.5 \cdot \Delta t_{pr} < 23^\circ\text{C} \quad (3-2)$$
- 冷屋頂(cool ceiling)
 
$$PD = \frac{100}{1 + \exp(9.93 - 0.5 \times \Delta t_{pr})} \cdot \Delta t_{pr} < 15^\circ\text{C} \quad (3-3)$$
- 暖牆面(warm wall)
 
$$PD = \frac{100}{1 + \exp(3.72 - 0.052 \times \Delta t_{pr})} - 3.5 \cdot \Delta t_{pr} < 35^\circ\text{C} \quad (3-4)$$

其中  
 PD：不舒適百分比，%  
 $\Delta t_{pr}$ ：冷熱壁面的表面溫度差， $^\circ\text{C}$

圖 20 輻射不對稱導致人員不舒適之評估公式圖片節錄

(圖片出處：經濟部能源局指導，財團法人台灣綠色生產力基金會編印，建築節能應用技術手冊，2013)

考慮照在外表面上的太陽輻射，綜合太陽輻射、屋頂長波輻射和熱對流的作用，計算屋頂傳導熱所需的等效外氣溫度 ( $t_e$ ) 的計算公式如公式 (3-5)：

$$t_e = t_o + \alpha G_t / h_o - \varepsilon \delta R / h_o \quad (3-5)$$

其中

$h_o$ ：熱對流與熱輻射的合併係數， $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$

$\alpha$ ：屋頂外表面的吸收係數

$G_t$ ：太陽輻射， $\text{W}/\text{m}^2$

$\varepsilon \delta R / h_o$ ：長波輻射修正項，對屋頂而言通常取  $3.9^\circ\text{C}$

單位屋頂面積傳入室內的熱量(Q)可以表示為：

$$Q = (t_e - t_i) \times U \quad (3-6)$$

其中

$t_i$ ：屋頂室內側表面溫度

U：屋頂的熱傳導率， $\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$

圖 21 屋頂傳導熱所需的等效外氣溫度 ( $t_e$ ) 之計算公式圖片節錄

(圖片出處：經濟部能源局指導，財團法人台灣綠色生產力基金會編印，建築節能應用技術手冊，2013)

從公式 (3-6) 可了解到降低透過屋頂傳入室內熱量主要有兩個重點，一是降低屋頂外表面的等效外氣溫度，亦即減少屋頂的太陽光吸收；另一則是加強屋頂隔熱層性能，亦即降低其U值，如圖 11 所示。(經濟部能源局指導，財團法人台灣綠色生產力基金會編印，建築節能應用技術手冊，2013)

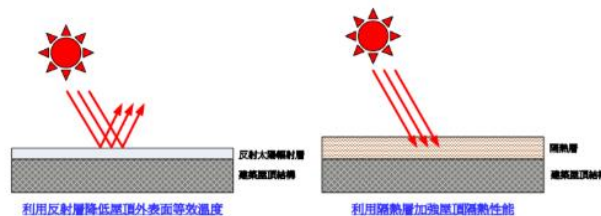


圖 22 降低屋頂傳熱的主要兩種方法

(圖片出處：經濟部能源局指導，財團法人台灣綠色生產力基金會編印，建築節能應用技術手冊，2013)

於本次的屋頂仿生蝶翅構造，我們採用的方法為前者：利用反射層降低屋頂外表面等效溫度。

3. 冷屋頂：藉由屋頂反射太陽光內大部分能量，減少進入屋內的熱量，如圖 12 所示。

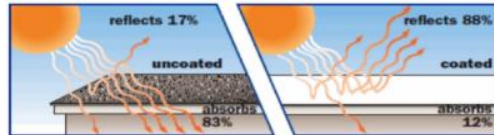


圖 23 屋頂反射太陽光能量

(圖片出處：<http://us.henry.com/>)

「冷屋頂」是指日射反射率高的屋頂，透過對普通屋頂塗上高反射率的塗料，可提高屋頂的日射反射率，減少太陽熱量的吸收。如圖 13 所示，冷屋頂的主要作用除了減少空調能耗及改善室內熱環境外，因太陽光直接反射，對於地球降溫有一定的作用。



圖 24 高反射率屋頂及低反射屋頂的差異

(圖片出處：經濟部能源局指導，財團法人台灣綠色生產力基金會編印，建築節能應用技術手冊，2013)

冷屋頂需注意的問題：(1) 費用高：為了使塗料具有高日射反射率，需要對它們進行處理，再塗上反射率高的塗料，使成本上升。另外，需定期的維修更換，也會增加費用。

(2) 可能引發交通事故與損鄰事件：具有高日射反射率的冷屋頂，由於反光產生視覺干擾，容易導致交通事故與鄰近住戶反彈。用來評估冷屋頂的物理性質包含太陽反射率與表面熱輻射率。理想的冷屋頂應能有效的反射太陽能與發散熱輻射冷卻自身，因此應具備高太陽反射率（能夠反射太陽光）與高表面輻射率（能夠散發輻射熱），如圖 14 所示。此類屋頂能阻擋大量原本要進入建築物內的太陽輻射，而且因為高的熱輻射率使得屋頂表面溫度較低，進而能降低都市熱島效應。(經濟部能源局指導，財團法人台灣綠色生產力基金會編印，建築節能應用技術手冊，2013)

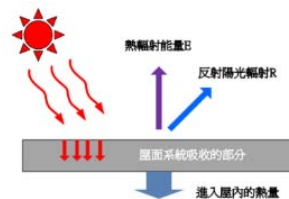


圖 25 屋面的陽光反射和熱傳導

(圖片出處：經濟部能源局指導，財團法人台灣綠色生產力基金會編印，建築節能應用技術手冊，2013)

#### 四、Arduino 程式控制方法與原理

將四顆光敏電阻接上 Arduino 類比 pin 腳並命令為輸入腳位，設定串列埠通訊速率可以在序列部視窗觀看四顆光點電阻每一顆光敏電阻得到的電壓大小。

利用 FOR 迴圈，是為了要取得 ADC 的平均值，累加 10 次到 analogValue 陣列並延遲 2 秒讓讓 ADC 轉換有足夠時間，使 IC 中電容充電。

**計算水平數據 (判斷 X 軸哪邊有太陽光):**

上半部光敏電阻，左減右，取 X1 宣告區域變數；

下半部光敏電阻，左減右，取 X2 宣告區域變數。

**計算水平數據 (判斷 Y 軸哪邊有太陽光):**

左半部光敏電阻，上減下，取 Y1 宣告區域變數；

右半部光敏電阻，上減下，取 Y2 宣告區域變數。

**伺服馬達轉向太陽光位置：**

X 軸：將 X1 與 X2 的區域變數作平均 (X3)，伺服馬達轉向當前角度加上 X3 區域變數角度；

Y 軸：將 Y1 與 Y2 的區域變數作平均 (Y3)，伺服馬達轉向當前角度加上 Y3 區域變數角度。

**去除誤差值：**相差大於設定的誤差值才進行矯正處理，避免上下左右不停矯正。

判斷 Y2 轉動方向，判斷 Y2 是否大於馬達最小角度，是的話 Y3 變負數；

判斷 X2 轉動方向，判斷 X2 是否大於馬達最小角度，是的話 X3 變負數。

如果有任一軸移動與調整，則延遲 20 毫秒，將 X1，X2，Y1，Y1 陣列變數歸零

#### 五、雙層屋頂 (以平屋頂為例)

當屋頂仿生蝶翅構造探測到陽光時會自動調整與其之夾角，使構造本體能夠與太陽光呈垂直。但若屋瓦抬起或有移動，便會於屋頂板和構造間產生空隙，在雨天時屋頂板下方會遭雨水沖刷、侵蝕。因此，我們選用雙層屋頂，當位於外層 (上層) 有加裝屋頂仿生蝶翅構造之屋頂板有空隙時，縱使逢雨天，還有內層 (下層) 屋頂板，可防止雨水滲入進建築物，使住戶不必擔心雨天漏水之問題。

##### (一) 雙層屋頂定義

雙層屋頂，即指建築物屋頂外殼為數公分至一公尺左右厚度的複層構造。在建築設計中常利用封閉的空氣層，作為結構的保溫層。(卓子傑，雙層鋼板屋頂之空氣層高度對室內溫度影響之研究，2015)



## (二) 雙層屋頂功用

為因應臺灣夏季炎熱氣候，雙層屋頂主要用於鐵皮屋的隔熱與通風。我們採雙層屋頂的隔熱與通風，並且在原優點的基礎上希望也能夠達到防水之目的。

## (三) 雙層屋頂防水

我們選擇於雙層屋頂之上層使用鋼板，以便於後續鉚釘接合仿生蝶翅構造與屋頂（因大部分鉚釘皆用於金屬工件之接合），並刷上以銀蟻為發想之隔熱塗料，再塗上防水漆，以確保達到隔熱與防水之目的。雙層屋頂之下層保持平屋頂原本之混凝土材質，但同樣也會刷上隔熱與防水漆，保證日後日曬與雨淋時，依舊能使活動人員感到舒適與安心。

## (四) 雙層屋頂檢討

1. 隔熱最佳高度：2015年，卓子傑在《雙層鋼板屋頂之空氣層高度對室內溫度影響之研究》之結論與建議中提到：「兩組試驗數據經由分析後，得知雙層屋頂空氣層高度為15cm時，其降溫效果較10cm時為佳，顯示空氣層高度愈高，降溫效果愈好。」「本次試驗目前僅針對空氣層高度為10cm、15cm進行實際量測，未來將繼續探討雙層屋頂之隔熱最佳高度，並進行試驗。」

其試驗結果如下：

箱體編號	A 箱	B 箱	箱體編號	C 箱
實驗形式	實驗組，空氣層高度=15 cm	實驗組，空氣層高度=10 cm	實驗形式	對照組
量測部位名稱	平均溫 (°C)	平均溫 (°C)	量測部位名稱	平均溫 (°C)
上層鋼板外表面	61.48 °C	60.52 °C	單層鋼板外表面	57.28 °C
上層鋼板內表面	60.49 °C	60.41 °C	單層鋼板內表面	56.17 °C
空氣層	47.64 °C	49.76 °C		
下層鋼板外表面	49.12 °C	50.28 °C		
下層鋼板內表面	46.45 °C	47.53 °C		
室內溫度	38.62 °C	39.70 °C	室內溫度	43.12 °C
風速	1.39 m/s		日射量	989.23 W/m <sup>2</sup>
濕度	45.27 %		大氣溫度	31.60 °C

箱體編號	A 箱	B 箱	箱體編號	C 箱
實驗形式	實驗組，空氣層高度=15 cm	實驗組，空氣層高度=10 cm	實驗形式	對照組
量測部位名稱	平均溫 (°C)	平均溫 (°C)	量測部位名稱	平均溫 (°C)
上層鋼板外表面	54.12 °C	55.70 °C	單層鋼板外表面	53.19 °C
上層鋼板內表面	53.31 °C	54.11 °C	單層鋼板內表面	51.89 °C
空氣層	44.29 °C	46.69 °C		
下層鋼板外表面	45.36 °C	46.99 °C		
下層鋼板內表面	43.77 °C	45.10 °C		
室內溫度	38.35 °C	39.48 °C	室內溫度	41.88 °C
風速	1.93 m/s		日射量	711.07 W/m <sup>2</sup>
濕度	59.45 %		大氣溫度	31.65 °C

圖 26 (左) 設置灰色鋼板，不同空氣層高度實驗數據比較圖 (第一組)

圖 27 (右) 設置綠色鋼板，不同空氣層高度實驗數據比較圖 (第二組)

(圖片出處：卓子傑，雙層鋼板屋頂之空氣層高度對室內溫度影響之研究，2015)

根據卓子傑發表的試驗結果中，撇除雙層屋頂之鋼板顏色探討，可以發現空氣層15cm的A箱室內溫度皆低於空氣層10cm的B箱（不論鋼板顏色皆是如此）。因此在其論文最後的結論與建議中提到空氣層高度愈高，降溫效果愈好。不過目前試驗皆尚未找出雙層屋頂隔熱之最佳高度，因此，我們打算使用雙層屋頂可架設之最高高度，以符合卓子傑於《雙層鋼板屋頂之空氣層高度對室內溫度影響之研究》提出的結論。

2. 建築法規檢討：若要採用雙層屋頂隔熱通風之好處，於原屋頂上加蓋多高的雙層屋頂也是問題。據六都法規條款最嚴格的臺北市合法建築物平屋頂建造斜屋頂申請規定之「臺北市免辦建築執照建築物或雜項工作物處理原則」第二點第十三款之2：「斜屋頂應以非鋼筋混凝土材料（含鋼骨）及




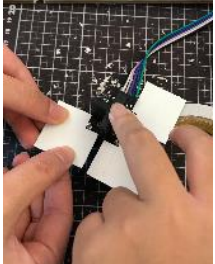
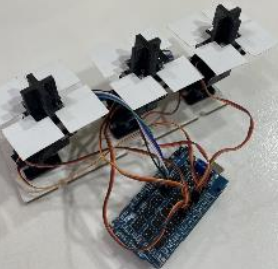

不燃材料建造，四周不得加設壁體或門窗，高度從屋頂平台面起算，屋脊小於二.一公尺。」依照上述處理原則，我們決定將雙層屋頂的高度訂定於2.1公尺，最大化實現雙層屋頂的隔熱與通風之優勢的同時，也能夠符合規定。




## 六、模型製作

### (一) 模型本體製作

表6 模型製作流程

製作流程	圖片	流程說明
1. 模型外觀電繪		使用 SketchUP 繪製出模型外觀，方便組員溝通與修改。
2. 模型裁切		確認模型尺寸 (23*7*30cm) 後使用雷切機切割奶板。
3. 箱體大致固定		將箱體大抵固定，並先切割出 lcd1602 顯示模組預留安裝孔洞。
4. 程式撰寫		利用 Arduino IDE 撰寫程式並燒錄至板子中，並對追日機構還有 dht11 溫溼度感測器進行測試，確認運作與功能是否準確。若無，則反覆 debug 及修正指令，直到正常為止。

5. 不鏽鋼片裁切		裁切不鏽鋼片，使用鐵皮剪精細修剪出需要預留的位置，再噴上金屬用底漆噴漆。
6. 調配隔熱塗料		調配隔熱塗料，配出 0%~50% 濃度之塗料，並塗抹於已噴有金屬用底漆噴漆上的不鏽鋼片。
7. 塗料測溫試驗		將塗有 0%~50%隔熱塗料的不鏽鋼片與 dht11 溫溼度感測器放置太陽底下測溫，觀察並記錄溫度數據變化。
8. 不鏽鋼片固定		選定隔熱效果數據最佳的隔熱塗料，塗抹於不鏽鋼片上，並將塗有隔熱塗料的不鏽鋼片黏貼在追日機構頭上。
9. 追日機構安裝		安裝追日機構頭於箱體，並確認機構在運轉時不會阻礙到彼此。
10. dht11 溫溼度感測器放入箱體		dht11 溫溼度感測器放入保鮮盒，再使用真空壓縮袋包裹之，並於盒身與袋身上挖洞，將杜邦線引出，再用超強大力膠布把有洞口的地方黏貼住。

11. 抽取空氣		將真空壓縮袋袋口放入真空壓縮機，把空氣抽出，並將袋口加熱密封。
12. 保麗龍黏貼		把保麗龍黏貼於箱體與真空壓縮袋之間，防止空氣介於兩者間時會干擾後續的測溫試驗。
13. 箱體固定		箱體固定，模型即完成。

### (二) 隔熱塗料調配

面漆需要先兌水，使稀釋後才能夠使用。金絲猴的官網介紹：P-701 水性防水防熱面漆原液加水 0~10%。我們在本試驗中面漆兌水的比例為 10：1。調配詳細比例見表 10。

表 7 隔熱塗料調配比例

濃度	油漆兌水後	硫酸銀
0%	10	0
10%	9	1
20%	8	2
30%	7	3
40%	6	4
50%	5	5

### (三) 機構程式撰寫

```
int analogValue[4]; //存放光敏電阻的電壓分壓 ADC 值
byte angleX = 90, angleY = 10; //宣告角度變數，並設定水平與垂直的初始角度

//face to LPR angleX>90 to right
//face to LPR angleY>90 to down
const int compare = 10; //誤差值
```

```

void setup() {
    // put your setup code here, to run once:
    myservoX1.attach(5); //水平軸伺服馬達對應腳位設定
    myservoY1.attach(6); //垂直軸伺服馬達對應腳位設定
    myservoX2.attach(9); //水平軸伺服馬達對應腳位設定
    myservoY2.attach(10); //垂直軸伺服馬達對應腳位設定
    myservoX3.attach(11); //水平軸伺服馬達對應腳位設定
    myservoY3.attach(3); //垂直軸伺服馬達對應腳位設定
    myservoX1.write(angleX); //水平軸移動至初始角度
    myservoY1.write(angleY); //垂直軸移動至初始角度
}

void loop() {

    //這裡的 FOR 迴圈，是為了要取得 ADC 的平均值，累加 10 次到 analogValue
    陣列
    for (int i = 0 ; i < 10 ; i++) {
        analogValue[0] += analogRead(L_T_PR); //取得左上光敏電阻電壓分壓
        後的數值，並 ADC 類比轉數位值，儲存於 analogValue 陣列
        analogValue[1] += analogRead(R_T_PR); //取得右上光敏電阻電壓分壓
        後的數值，並 ADC 類比轉數位值，儲存於 analogValue 陣列
        analogValue[2] += analogRead(L_B_PR); //取得左下光敏電阻電壓分壓
        後的數值，並 ADC 類比轉數位值，儲存於 analogValue 陣列
        analogValue[3] += analogRead(R_B_PR); //取得右下光敏電阻電壓分壓
        後的數值，並 ADC 類比轉數位值，儲存於 analogValue 陣列
        delay(2); //延遲兩毫秒，讓 ADC 轉換有足夠時間，使 IC 中電容充電
    }

    analogValue[0] /= 10; //將先前累加的值除與 10 才會得到平均值
    analogValue[1] /= 10; //將先前累加的值除與 10 才會得到平均值
    analogValue[2] /= 10; //將先前累加的值除與 10 才會得到平均值
    analogValue[3] /= 10; //將先前累加的值除與 10 才會得到平均值

    //calc X，計算水平的數值
    int dirX1 = analogValue[0] - analogValue[1]; //宣告區域變數，left-
    right，上半部光敏電阻，左減右
    int diffValueX1 = abs(dirX1); //宣告區域變數，取得相減後的絕對值

    int dirX2 = analogValue[2] - analogValue[3]; //宣告區域變數，left-

```

```

right, 下半部光敏電阻, 左減右
int diffValueX2 = abs(dirX2); //宣告區域變數, 取得相減後的絕對值

//calc Y
int dirY1 = analogValue[0] - analogValue[2]; //宣告區域變數, up-
down, 左半部光敏電阻, 上減下
int diffValueY1 = abs(dirY1); //宣告區域變數, 取得相減後的絕對值

int dirY2 = analogValue[1] - analogValue[3]; //宣告區域變數, up-
down, 右半部光敏電阻, 上減下
int diffValueY2 = abs(dirY2); //宣告區域變數, 取得相減後的絕對值

```

上述程式碼皆為部分節錄, 供參考。

## 伍、研究結果

### 一、雞舍保溫燈對於塗有隔熱塗料之不鏽鋼片 (表面溫度)

將 0~50%濃度的隔熱塗料分別塗抹於六片不鏽鋼片 (7\*7cm, 已噴有金屬用底漆) 上, 再使用雞舍保溫燈照光加熱十分鐘。測溫時我們將不鏽鋼片分成九個點位, 待十分鐘到, 用紅外線測溫槍分別測其表面溫度。

表 8 雞舍保溫燈對於塗有隔熱塗料之不鏽鋼片試驗數據

	左上	中上	右上	左中	正中	右中	左下	中下	右下	平均
0%	36.2°C	35.4°C	33.7°C	35.7°C	35.6°C	35.3°C	35.8°C	35.7°C	35.7°C	35.4°C
10%	36.6°C	35.6°C	34.5°C	36.7°C	36.2°C	34.2°C	37.5°C	37.1°C	34.9°C	35.9°C
20%	36.9°C	36.6°C	34.6°C	37.2°C	37.3°C	34.9°C	37.4°C	37.4°C	36.6°C	36.5°C
30%	38.0°C	38.0°C	36.4°C	37.6°C	37.0°C	35.3°C	37.5°C	35.5°C	36.0°C	36.8°C
40%	39.1°C	38.6°C	36.2°C	38.0°C	38.5°C	35.5°C	37.8°C	38.1°C	36.2°C	37.5°C
50%	38.9°C	38.9°C	37.1°C	38.1°C	38.6°C	37.0°C	39.7°C	40.2°C	37.9°C	38.4°C

### 二、太陽光對於塗有隔熱塗料之不鏽鋼片 (內部環境溫度)

我們將塗有隔熱塗料的不鏽鋼片置於紙杯上, 並在杯身側邊挖一小開口, 將 dht11 溫溼度感測器放入, 再將洞口封填, 防止其他因素干擾測溫準確性。再接上 lcd1602 顯示器, 顯示杯中當前環境溫度, 並於 0 分、10 分、20 分、30 分、40 分、50 分、60 分時記錄一次。

由於 dht11 溫溼度感測器模組只有兩組, 我們只能將測試拆成三組進行, 分別為 0%與 10%、20%與 30%、40%與 50%濃度隔熱塗料相互比較, 並選出最適合作本次試驗的隔熱塗料濃度。當天測試日期、時間、氣溫及試驗數據詳見表 9 至表 11。

表 9 0%與 10%濃度隔熱塗料相互比較之試驗數據 (第一組)

111/1/31 下午 12:15 開始測溫 當時氣溫 20.6°C

	0 分	10 分	20 分	30 分	40 分	50 分	60 分
0%	25.0°C	28.1°C	28.6°C	28.8°C	29.1°C	30.4°C	31.0°C
10%	25.0°C	27.4°C	28.1°C	28.3°C	28.6°C	30.1°C	30.3°C

表 10 20%與 30%濃度隔熱塗料相互比較之試驗數據 (第二組)

111/1/26 上午 11:37 開始測溫 當時氣溫 24.2°C

	0 分	10 分	20 分	30 分	40 分	50 分	60 分
20%	25.0°C	32.3°C	33.2°C	34.8°C	35.1°C	35.2°C	35.3°C
30%	25.0°C	32.5°C	33.1°C	34.6°C	35.0°C	35.0°C	35.0°C

表 11 40%與 50%濃度隔熱塗料相互比較之試驗數據 (第三組)

111/1/26 下午 01:18 開始測溫 當時氣溫 25.4°C

	0 分	10 分	20 分	30 分	40 分	50 分	60 分
40%	25.0°C	34.7°C	35.3°C	35.6°C	35.9°C	36.3°C	36.5°C
50%	25.0°C	32.5°C	33.4°C	33.9°C	34.2°C	35.0°C	35.9°C

### 三、太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造 (內部環境溫度)

對照組為 23\*7\*30cm 之箱體 (同實驗組)，頂部塗深色，模擬一般平屋頂房屋為灰黑色的水泥，抑或鐵皮屋之深色鋼浪板。

表 12 太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造之試驗數據

111/2/9 下午 04:00 開始測溫 當時氣溫 21.5°C

	0 分	10 分	20 分	30 分	平均
對照組	23.5°C	25.5°C	26.4°C	26.8°C	25.6°C
實驗組	23.5°C	24.8°C	25.3°C	25.3°C	24.7°C

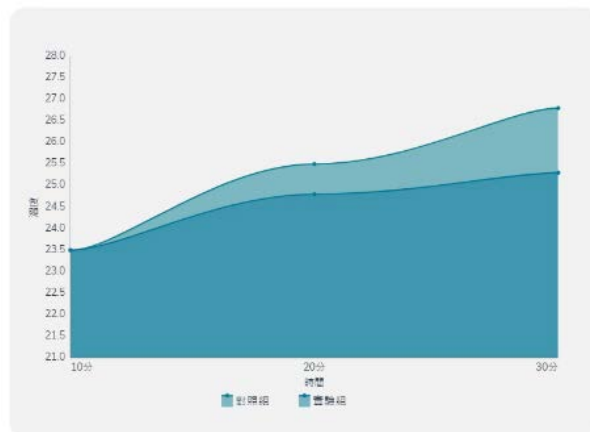


圖 28 對照組與實驗組之數據折線圖

#### 四、雞舍保溫燈對於屋頂仿生蝶翅構造（表面溫度）

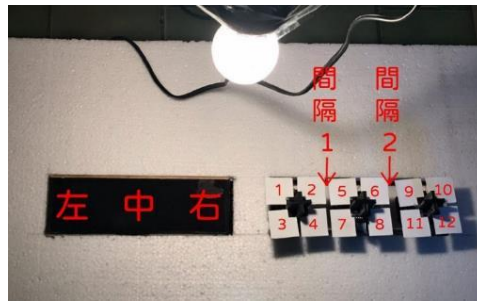


圖 29 測溫位置說明

表 13 雞舍保溫燈下的對照組與實驗組之試驗數據

	測溫位置	0 分	10 分	20 分	30 分
對照組	箱體頂部左	22.5℃	22.8℃	23.4℃	23.5℃
	箱體頂部中	22.5℃	23.4℃	23.7℃	23.9℃
	箱體頂部右	22.7℃	23.5℃	23.9℃	24.0℃
實驗組	不鏽鋼片 1	21.8℃	21.9℃	22.8℃	22.4℃
	不鏽鋼片 2	21.8℃	22.5℃	22.9℃	22.5℃
	不鏽鋼片 3	21.9℃	22.4℃	22.8℃	22.2℃
	不鏽鋼片 4	21.9℃	22.3℃	22.4℃	22.0℃
	不鏽鋼片 5	21.8℃	22.1℃	22.4℃	22.2℃
	不鏽鋼片 6	21.8℃	22.2℃	22.4℃	22.2℃
	不鏽鋼片 7	21.9℃	22.1℃	22.3℃	22.1℃
	不鏽鋼片 8	21.9℃	21.9℃	22.2℃	22.0℃
	不鏽鋼片 9	21.6℃	21.9℃	22.2℃	22.1℃
	不鏽鋼片 10	21.7℃	22.0℃	22.0℃	21.9℃
	不鏽鋼片 11	21.8℃	22.0℃	22.0℃	21.9℃
	不鏽鋼片 12	21.8℃	21.9℃	22.0℃	21.9℃
	間隔 1	21.6℃	22.5℃	22.3℃	22.2℃
	間隔 2	21.7℃	22.3℃	22.0℃	21.9℃

#### 五、太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造與琉璃瓦對照組（內部環境溫度）

對照組為 23\*7\*30cm 之箱體（同實驗組），頂部置有一塊 23\*7cm 的琉璃瓦，模擬一般屋頂上使用琉璃瓦作為屋頂材料的房屋。

表 14 太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造與琉璃瓦對照組之試驗數據

111/3/12 下午 02:00 開始測溫 當時氣溫 27.7℃

	0 分	10 分	20 分	30 分	40 分	50 分	60 分	平均
對照組	24.1℃	26.2℃	28.9℃	31.3℃	32.8℃	33.3℃	33.3℃	34.9℃
實驗組	24.1℃	25.8℃	27.2℃	28.1℃	28.9℃	29.4℃	29.4℃	32.1℃



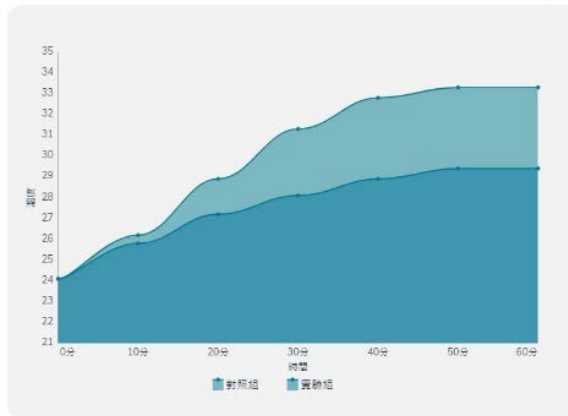


圖 30 琉璃瓦對照組與實驗組之數據折線圖

## 六、太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造與水泥砂漿對照組（內部環境溫度）

對照組為 23\*7\*30cm 之箱體（同實驗組），頂部置有一塊 23\*7cm 的水泥砂漿板，模擬一般屋頂上使用水泥砂漿作為屋頂材料的房屋。

表 15 太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造與水泥砂漿對照組之試驗數據

111/3/12 下午 03:00 開始測溫 當時氣溫 27.7°C

	0分	10分	20分	30分	40分	50分	60分	平均
對照組	24.5°C	26.1°C	27.8°C	29.6°C	30.5°C	30.9°C	30.9°C	33.4°C
實驗組	24.5°C	26.2°C	28.0°C	28.9°C	29.8°C	30.2°C	30.2°C	33.0°C

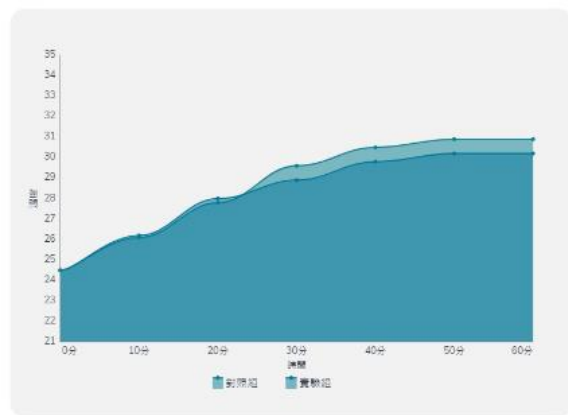


圖 31 水泥砂漿對照組與實驗組之數據折線圖

## 七、太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造與鋼浪板對照組（內部環境溫度）

表 16 太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造與鋼浪板對照組之試驗數據

111/3/20 上午 11:00 開始測溫 當時氣溫 29.3°C

	0分	10分	20分	30分	40分	50分	60分	平均
對照組	24.8°C	30.2°C	33.3°C	35.2°C	36.8°C	37.2°C	37.2°C	39.1°C
實驗組	24.8°C	27.9°C	30.3°C	31.8°C	32.8°C	33.0°C	33.0°C	35.6°C

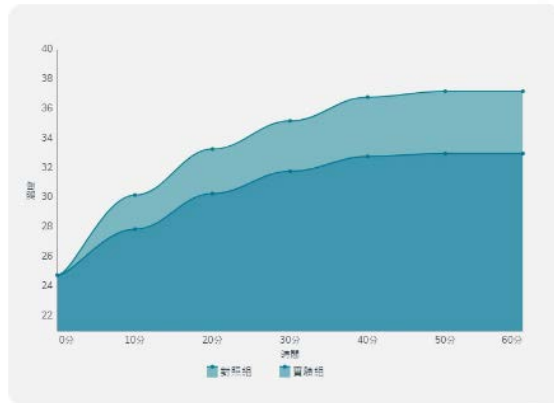


圖 32 鋼浪板對照組與實驗組之數據折線圖

## 八、即時溫度動態折線圖網站

該網站能夠即時看到模型的溫度變化，不必透過觀看模型本體的 lcd 顯示器才能得知當前內部溫度。溫度變化也都會呈折線圖，使閱覽者一目瞭然。

## 陸、討論

### 一、雞舍保溫燈對於塗有隔熱塗料之不鏽鋼片（表面溫度）

當隔熱塗料中硫酸鋇的濃度越高，不鏽鋼片測得表面溫度越高，這是因為熱容量之關係。0%濃度塗料不含硫酸鋇，面漆光滑、輕薄，溫度測得低，這是因其累積熱量的速度快，所以逸散熱量的速度也快，易將熱能傳導至建築物內；反之 50%濃度之塗料，雖表面測得溫度高，但能夠將熱能阻擋於塗有高濃度隔熱塗料之不鏽鋼片上，不易傳遞至建築物內。

### 二、太陽光對於塗有隔熱塗料之不鏽鋼片（內部環境溫度）

礙於 dht11 溫溼度感測器模組只有兩組，我們只能將測驗拆成三次進行，外在條件不盡相同，所以我們採當日氣溫最高的 111/1/26。50%無論在何時，其杯中環境溫度皆低於 40%，因此我們採 50%濃度塗料為本試驗的最佳濃度。本次試驗中發現：「塗料濃度越高，隔熱效果越好。」

### 三、太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造（內部環境溫度）

我們將塗有隔熱塗料之不鏽鋼片安裝至機構頭上，並將其固定於模型上進行主動追日後開始測溫。實驗組在 20 分後就沒有再升溫，而對照組則繼續增加了 0.4 度。本次試驗中發現：「能夠主動反射太陽光與熱能之屋頂，降低熱傳導至建築物的機率越大。」

### 四、雞舍保溫燈對於屋頂仿生蝶翅構造（表面溫度）

在雞舍保溫燈的加熱下，對照組的屋頂不斷升溫，而實驗組的屋頂有安裝塗有隔熱塗料之不鏽鋼片，其塗料中的鋇能夠有效反射不同的波長與熱能，所以在第 20 分後，12 片不鏽鋼片與其間隔皆開始降溫。本次試驗中發現：「塗料濃度越高，反射光線與熱能的效果越好。」

## 五、放上不同屋頂材料後的對照組與實驗組之數據對比

為求得更多數據，我們也將琉璃瓦、水泥砂漿板、鋼浪板放置於對照組之上作為比較，而無論是上述三種何種材料，我們所測得的內部溫度皆高於屋頂仿生蝶翅構造（即為實驗組）。由此可知，若屋頂上置有屋頂仿生蝶翅構造並漆上反射陽光、熱能之塗料，且主動追日，與太陽呈垂直角，便可最大化的反射陽光與熱能，阻止熱能傳導進建築物內，致使室內悶熱，令活動人員感到不適。

## 柒、結論與建議

### 一、結論

（一）該屋頂仿生蝶翅構造在經過與不同屋頂材料對照組的測溫相比之下，屋頂仿生蝶翅構造測得的溫度皆低於對照組。因此，該構造對於阻斷熱源是可行的，能夠順利反射熱能，阻止熱能透過建築材料傳導至室內。

（二）該構造確實能夠反射熱能，阻止熱能傳導至室內，可以有效減少室內的熱不適感，並降低使用冷氣的頻率。

（三）在不鏽鋼片漆上以銀蟻為發想的隔熱塗料後，隔熱效果有提升，且當硫酸鋇在油漆中的比例愈高（即濃度愈高）時，隔熱效果也愈佳。但硫酸鋇比例愈高時，愈難於溶劑中完全溶解，需提高攪拌次數，未來若可在不破壞塗料本體的前提下，找到溶解硫酸鋇的方法，將濃度提升至 80%、90%，隔熱效果也會更有起色。

（四）該構造與雙層屋頂的概念都是以隔熱為起點，但雙層屋頂為被動式隔熱，屋頂仿生蝶翅構造為主動隔熱，因此太陽無論在何方為、角度，該構造都能夠自動追蹤，達成最大化隔熱。

### 二、建議

若該發想商品化，四片不鏽鋼片中可擇兩片不鏽鋼片替換成太陽能板。因太陽能板發電為陣列，需一塊以上同時進行才能夠保證供電，而當其中一塊太陽能板被陰影遮蔽後便會大幅降低發電效率，但是該屋頂仿生蝶翅構造為「主動」追日，所以不必擔心太陽能板被陰影遮蔽，既能夠達到隔熱需求，也能夠將陽光轉換成電能，供該構造自身使用，不必耗電，抑或將多餘之電能回饋給住宅。

## 捌、參考資料

1. 臺北市建築管理工程處(2021)，臺北市合法建築物平屋頂建造斜屋頂申請規定。
2. 林子平(2021)，都市的夏天為什麼愈來愈熱？。
3. 柯秉森、蔡青瑾(2013)，蝴蝶鱗片散熱的秘密－仿生材料的探討與應用。中國民國第53屆中小學科學展覽會作品說明書。
4. Quetin Willot 等(2016)，Total Internal Reflection Accounts for the Bright Color of the Saharan Silver Ant。
5. 張子文(2001)，太陽電池應用於建築上之研究。
6. 詹肇裕(2005)，建築外殼斜面太陽能光電板發電量概估之研究。
7. 經濟部能源局指導，財團法人台灣綠色生產力基金會編印(2013)，建築節能應用技術手冊。
8. 卓子傑(2015)，雙層鋼板屋頂之空氣層高度對室內溫度影響之研究。
9. 常用屋頂瓦片的種類有哪些？農村自己修建別墅用什麼瓦片最合適？：  
<https://kknews.cc/agriculture/j5ajvql.html>
10. 鉚釘的簡介及用途：tupian27.pixnet.net/blog/post/68501216-鉚釘的簡介及用途
11. 澳洲旅遊局：<https://www.australia.com/zh-hk>
12. 洪國珍等(2020)，材料與試驗。

## 【評語】 052401

本作品從蝴蝶翅膀鱗片與銀蟻空心三角形纖維啟發，設計可追日且反射陽光熱能之裝置，期望能達到降溫效果，解決冷氣耗電和熱島效應問題。本研究學生自行設計組構屋頂仿生蝶翅構造，塗抹不同濃度硫酸鋇塗料不銹鋼片之製作等，提供溫差試驗量測與結果分析歸納，皆屬良好之科學訓練與分析方法。案例分析、原理說明與文獻回顧完整。利用電腦繪圖、雷射切割、Arduino 編程、調配塗料等步驟設計製作模型本體。量測保溫燈對不同比例塗料於不銹鋼片之表面溫度、太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造與琉璃瓦、水泥砂漿之內部環境溫度。主要結論是屋頂仿生蝶翅構造測得的溫度皆低於對照組。在作品檔案中並無呈現此裝置如何追日或追蹤光源。實驗僅量測溫度，其他環境因素如濕度等未考量。對降溫機制的討論簡短，從結果、討論到結論的論述不夠完整。不同實驗組與對照組的比較只各做一次量測(一天)，再現性與統計上的顯著性不足。仿生蝶翅的屋頂確實有達到降溫的效果(1°C左右)，但實驗數據看出屋頂材質的影響比結構的影響還要大，宜多做說明。在臺灣還要考量到玻璃窗戶的問題，建議討論比較屋頂和玻璃窗戶何者受太陽光的影響較大。

## 作品簡報

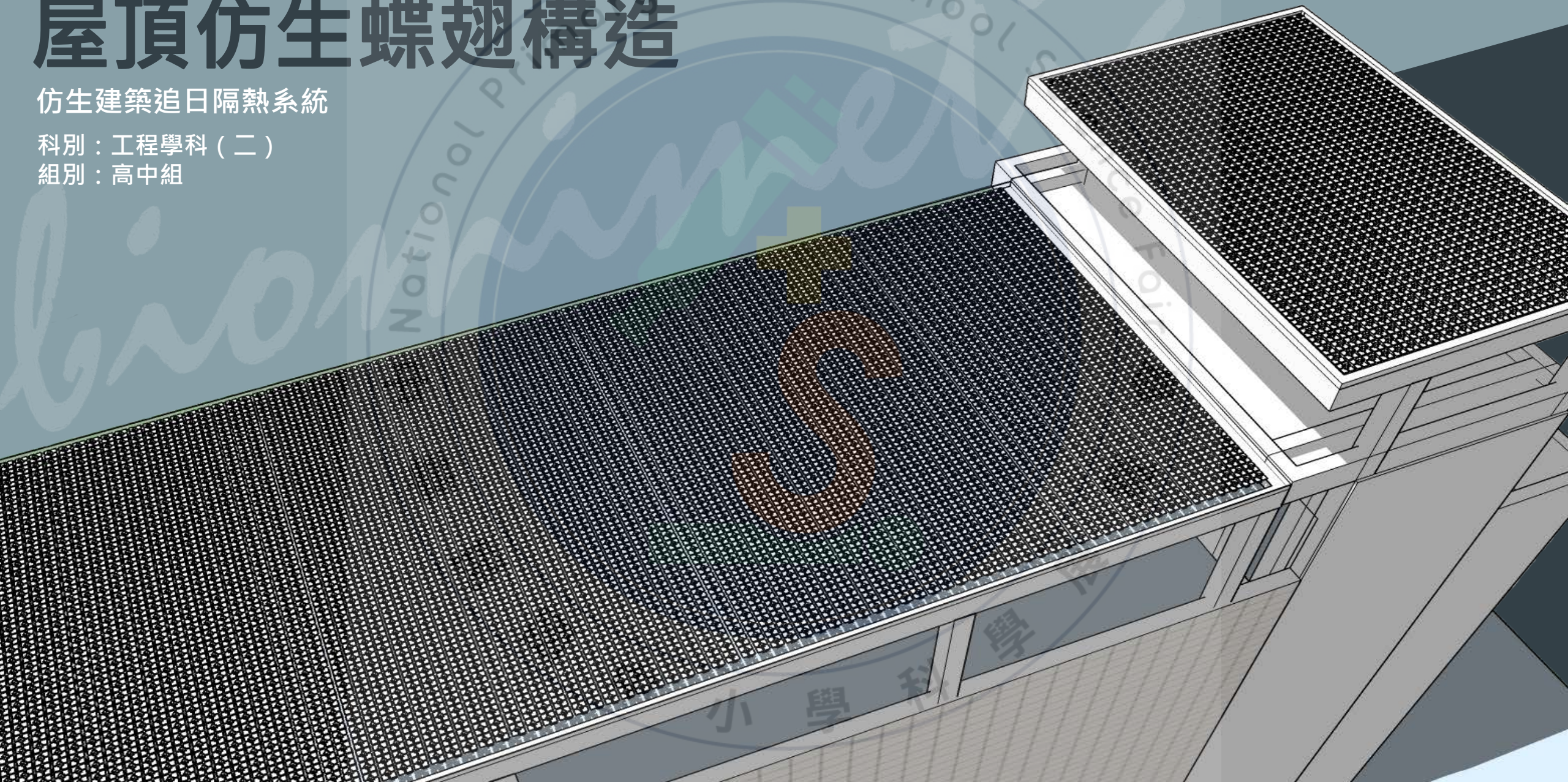
蝴蝶 | 追日 | 隔熱塗料

# 屋頂仿生蝶翅構造

仿生建築追日隔熱系統

科別：工程學科（二）

組別：高中組



# 研究動機

## 問題發現

### 研究動機

臺灣夏天悶熱，  
冷氣**使用次數頻繁**、**溫度設定低**，  
其中的二氧化碳導致**全球暖化**。  
而氣溫上升也使**屋內活動人員熱不適**。

### 問題原因

- ①太陽輻射理論：白天短波      ②太陽輻射理論：夜晚長波

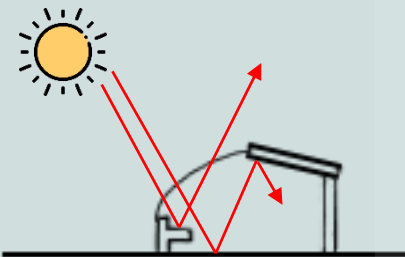


圖1：白天室內的短波輻射示意

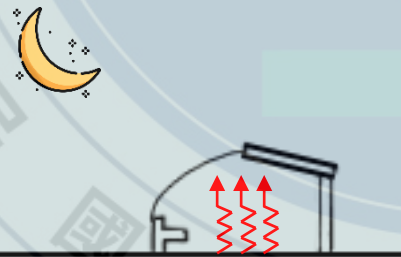
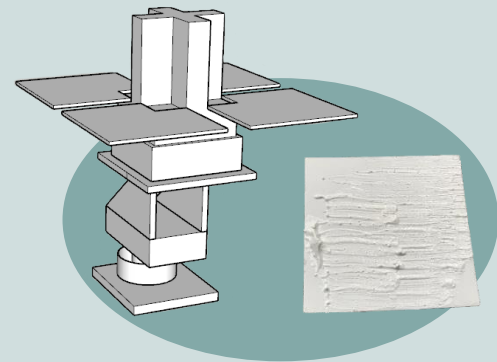


圖2：夜晚房間內的長波輻射示意

### 解決方法

製作出能夠主動追日之構造，  
並於其上塗隔熱塗料，  
使它與太陽呈垂直角度後，  
最大化的反射熱能。



### 期望達成

- ①減少冷氣使用頻率
- ②使冷氣溫度設定不必那麼低
- ③實現節能減碳





# 原理探討

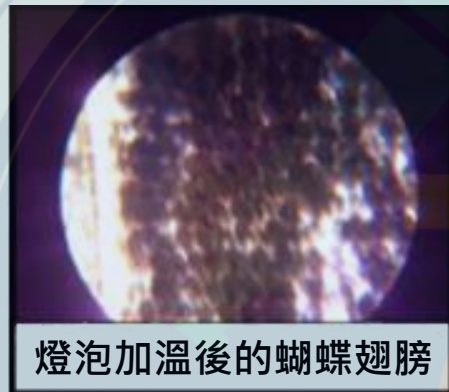
蝴蝶 | 主結構體



當**光線直射**於蝶翅時

鱗片會自動張開

藉以減少與太陽光的輻射角度



燈泡加溫後的蝴蝶翅膀

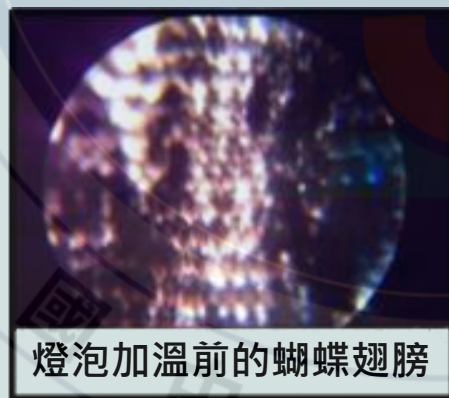
圖3：燈泡加溫後的蝴蝶翅膀

當**外界氣溫下降**時

鱗片自動閉合

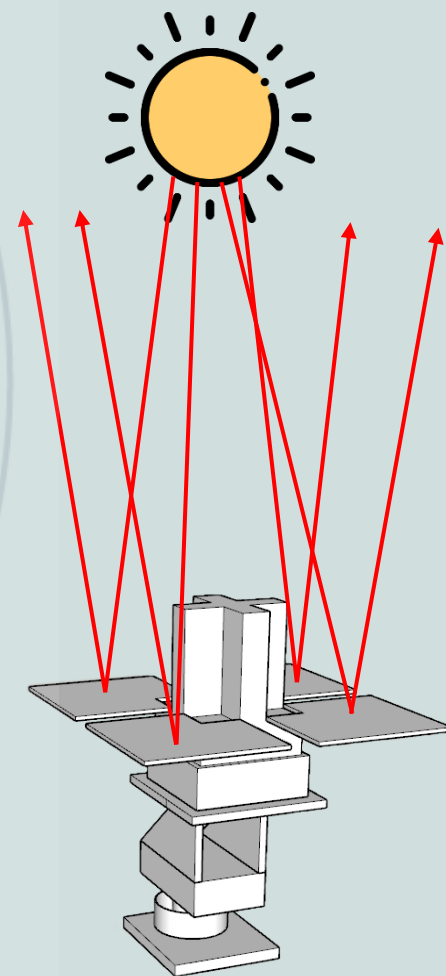
使陽光能夠直射於蝶翅表面

達到保溫之目的



燈泡加溫前的蝴蝶翅膀

圖4：燈泡加溫前的蝴蝶翅膀



# 原理探討

銀蟻 | 隔熱塗料



## 非洲銀蟻表面毛髮

當光的入射角為35-90度時  
這些毛髮便如**稜鏡**  
能以**全反射**的方式全部反射之

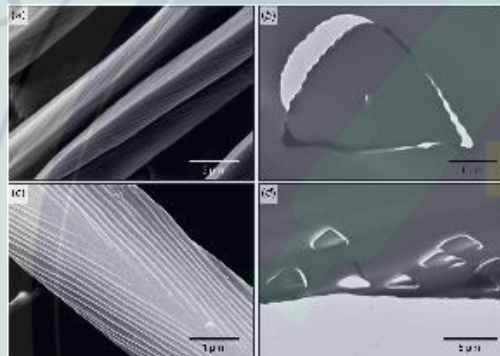


圖5：掃描式電子顯微鏡下的非洲銀蟻三角構造毛髮

## 去毛跟未去毛的銀蟻

未去毛的螞蟻對光的**反射**  
效果比去毛的螞蟻**好上十倍**

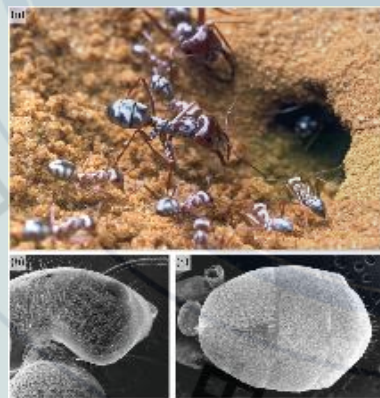


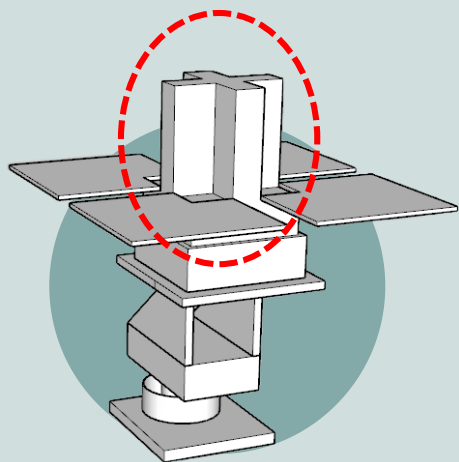
圖6：掃描式電子顯微鏡下的非洲銀蟻



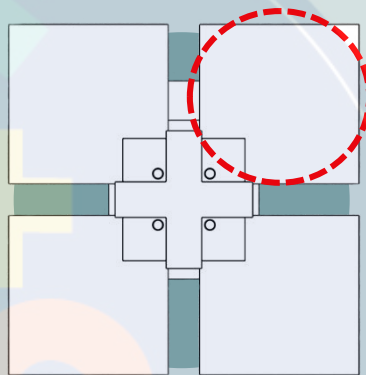
濃度	油漆兌水後	硫酸鋇
0%	10	0
10%	9	1
20%	8	2
30%	7	3
40%	6	4
50%	5	5

# 構件說明

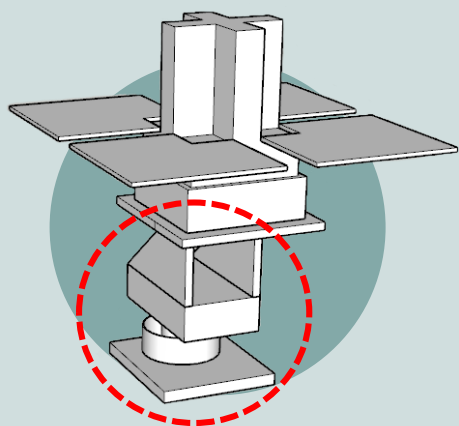
## 追日機構頭



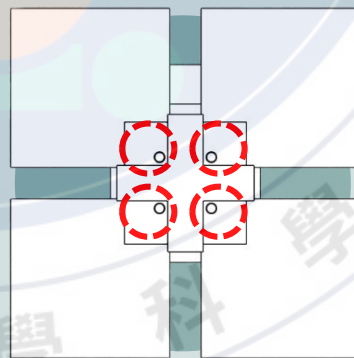
**追日機構頭**  
安裝四顆光敏電阻於其上



**不鏽鋼片**  
四片不鏽鋼片上皆有隔熱塗料  
用以反射長波，吸收短波



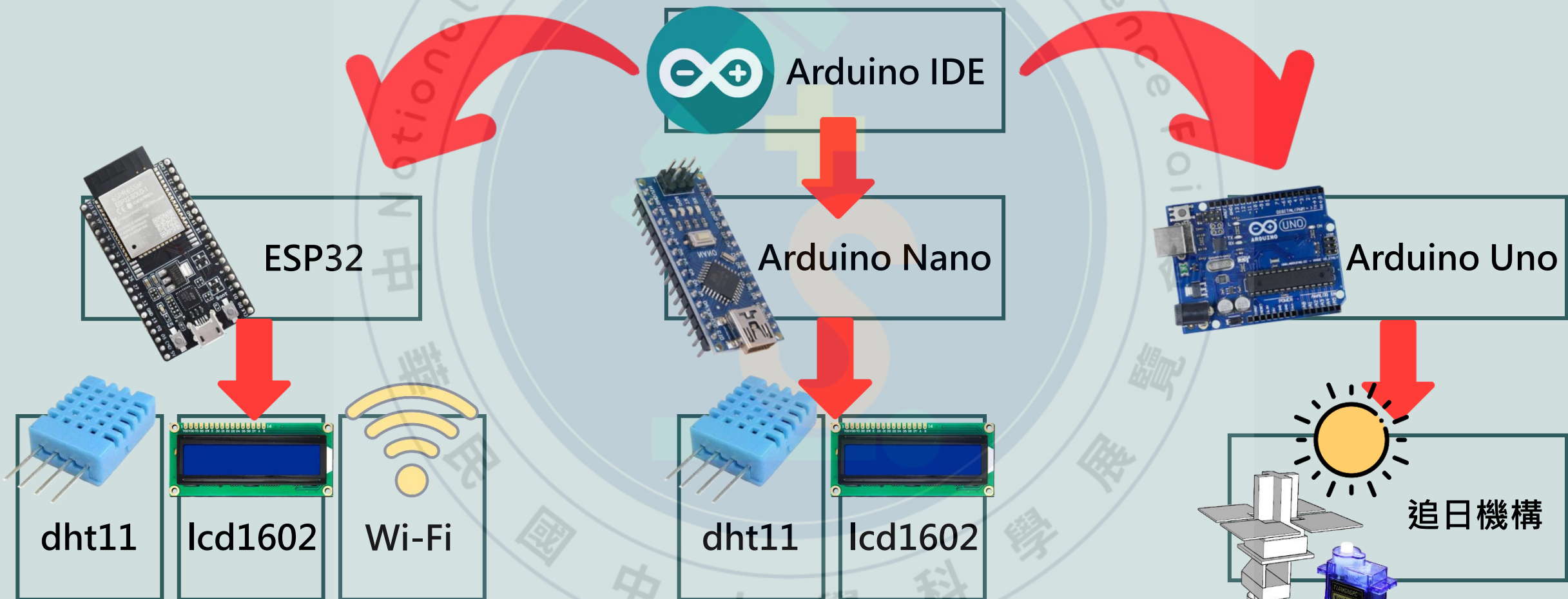
**伺服馬達雲台**  
固定SG90伺服馬達與  
追日機構頭



**光敏電阻**  
遇光改變內阻Arduino程式判  
斷哪邊太陽光最大

# 程式說明

控制流程

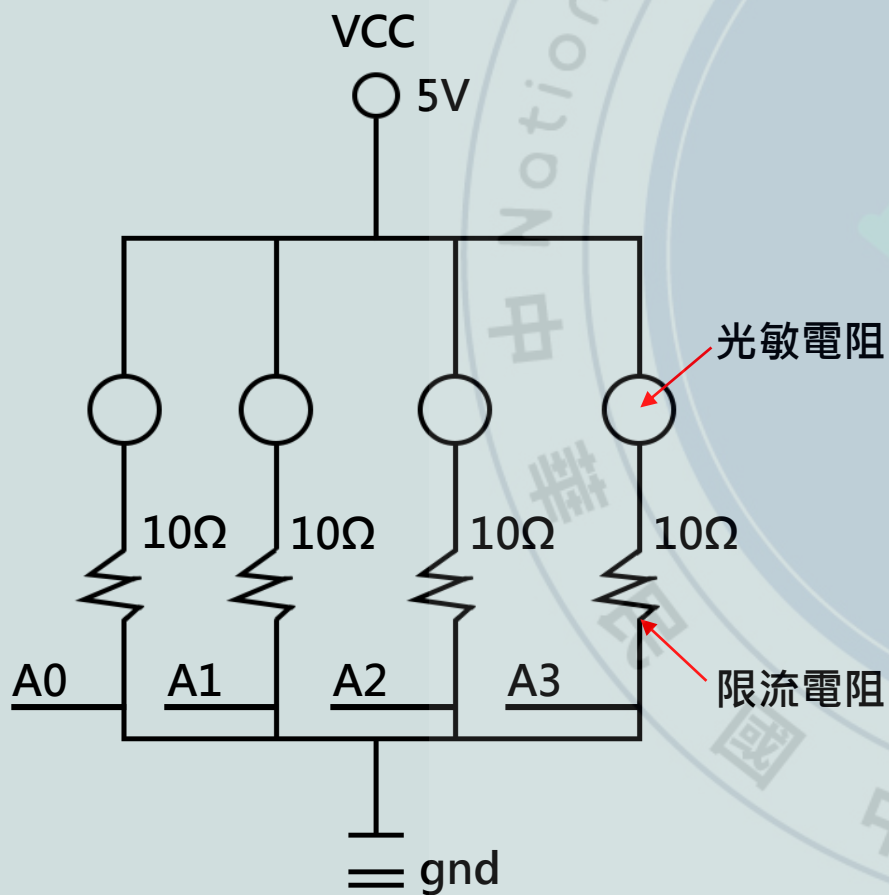


# 程式說明

程式碼撰寫



四顆光敏電阻接上Arduino類比pin腳  
並命令為輸入腳位



## 計算水平數據(判斷X軸哪邊有太陽光)

上半部光敏電阻，左減右。取X1宣告區域變數  
下半部光敏電阻，左減右，取X2宣告區域變數

## 計算垂直數據(判斷Y軸哪邊有太陽光)

左半部光敏電阻，上減下，取Y1宣告區域變數  
右半部光敏電阻，上減下，取Y2宣告區域變數

## 伺服馬達轉向太陽光位置

X軸：將X1與X2的區域變數做平均(X3)  
伺服馬達轉向當前角度加上X3區域變數角度  
Y軸：將Y1與Y2的區域變數做平均(Y3)  
伺服馬達轉向當前角度加上Y3區域變數角度

## 去除誤差值

相差大於設定的誤差值才進行矯正處理  
避免上下左右不停矯正

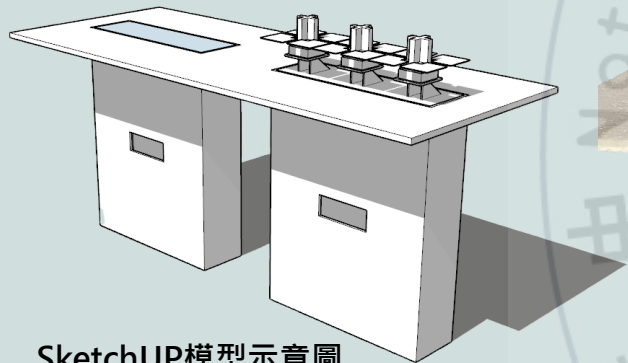
# 實驗方法

## 測溫實驗



### Step 1

將對照組與實驗組置於太陽底下，避開遮擋物



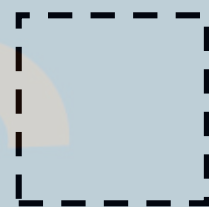
SketchUP模型示意圖



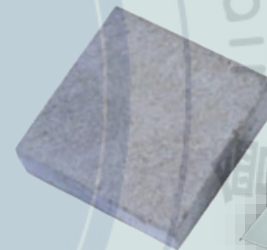
模型實際成品圖

### Step 3

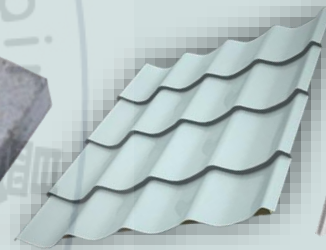
當該次實驗結束時，將不同屋頂材料置於對照組上，以模擬各種屋頂材料與實驗組的對照



無



水泥砂漿



琉璃瓦



鋼浪板

### Step 2

每隔十分鐘記錄一次內部溫度，持續一小時

	0分	10分	20分	30分	40分	50分	60分	平均
對照組								
實驗組								

### Step 4

重複步驟二、三，並彙整數據，製作成表格、折線圖

# 實驗數據

## 測溫數據

### 太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造

111/2/9 下午04:00開始測溫 當時氣溫21.5°C

	0分	10分	20分	30分	平均
對照組	23.5°C	25.5°C	26.4°C	26.8°C	25.6°C
實驗組	23.5°C	24.8°C	25.3°C	25.3°C	24.7°C

\*2月時氣候陰、多雨，常突有大片烏雲、降雨，因此只能測30分鐘左右

### 太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造與琉璃瓦對照組

111/3/12 下午02:00開始測溫 當時氣溫27.7°C

	0分	10分	20分	30分	40分	50分	60分	平均
對照組	24.1°C	26.2°C	28.9°C	31.3°C	32.8°C	33.3°C	33.3°C	34.9°C
實驗組	24.1°C	25.8°C	27.2°C	28.1°C	28.9°C	29.4°C	29.4°C	32.1°C

### 太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造與水泥砂漿對照組

111/3/12 下午03:00開始測溫 當時氣溫27.7°C

	0分	10分	20分	30分	40分	50分	60分	平均
對照組	24.5°C	26.1°C	27.8°C	29.6°C	30.5°C	30.9°C	30.9°C	33.4°C
實驗組	24.5°C	26.2°C	28.0°C	28.9°C	29.8°C	30.2°C	30.2°C	33.0°C

### 太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造與鋼浪板對照組

111/3/20 上午11:00開始測溫 當時氣溫29.3°C

	0分	10分	20分	30分	40分	50分	60分	平均
對照組	24.8°C	30.2°C	33.3°C	35.2°C	36.8°C	37.2°C	37.2°C	39.1°C
實驗組	24.8°C	27.9°C	30.3°C	31.8°C	32.8°C	33.0°C	33.0°C	35.6°C

### 雞舍保溫燈對於屋頂仿生蝶翅構造 (表面溫度)



測溫位置說明圖

	測溫位置	0分	10分	20分	30分
對照組	箱體頂部左	22.5°C	22.8°C	23.4°C	23.5°C
	箱體頂部中	22.5°C	23.4°C	23.7°C	23.9°C
	箱體頂部右	22.7°C	23.5°C	23.9°C	24.0°C
實驗組	不鏽鋼片1	21.8°C	21.9°C	22.8°C	22.4°C
	不鏽鋼片2	21.8°C	22.5°C	22.9°C	22.5°C
	不鏽鋼片3	21.9°C	22.4°C	22.8°C	22.2°C
	不鏽鋼片4	21.9°C	22.3°C	22.4°C	22.0°C
	不鏽鋼片5	21.8°C	22.1°C	22.4°C	22.2°C
	不鏽鋼片6	21.8°C	22.2°C	22.4°C	22.2°C
	不鏽鋼片7	21.9°C	22.1°C	22.3°C	22.1°C
	不鏽鋼片8	21.9°C	21.9°C	22.2°C	22.0°C
	不鏽鋼片9	21.6°C	21.9°C	22.2°C	22.1°C
	不鏽鋼片10	21.7°C	22.0°C	22.0°C	21.9°C
	不鏽鋼片11	21.8°C	22.0°C	22.0°C	21.9°C
	不鏽鋼片12	21.8°C	21.9°C	22.0°C	21.9°C
	間隔1	21.6°C	22.5°C	22.3°C	22.2°C
	間隔2	21.7°C	22.3°C	22.0°C	21.9°C

# 結果討論



## 太陽光對於屋頂仿生蝶翅構造

本次實驗中發現：

「能夠主動反射太陽光與熱能之屋頂，降低熱傳導至建築物的機率越大。」

## 放上不同屋頂材料後的對照組與實驗組之數據對比

本次實驗中發現：

「無論使用何種材料作為對照，實驗組的溫度數據皆低於對照組，屋頂仿生蝶翅構造能有效減少室內熱不適。」

## 雞舍保溫燈對於屋頂仿生蝶翅構造（表面溫度）

本次實驗中發現：

「塗料濃度越高，反射光線與熱能的效果越好。」



# 結論與建議



## 結論

- ① 構造對於阻止熱源是可行的，能夠順利**反射熱能**，**阻止熱能透過建築材料傳導至室內**。
- ② 可以**有效減少室內的熱不適感**，並**降低使用冷氣的頻率**。
- ③ **硫酸鋇**在油漆中的**比例愈高時**，**隔熱效果愈佳**。
- ④ 屋頂仿生蝶翅構造為**主動隔熱**，因此太陽無論在何方為、角度，該構造都能夠**自動追蹤**，達成**最大化隔熱**。

## 建議

四片不鏽鋼片中可擇兩片不鏽鋼片替換成太陽能板，既能夠**達到隔熱需求**，也**能夠將陽光轉換成電能**，供該構造自身使用，不必耗電，抑或將**多餘之電能回饋給住宅**。

# 參考資料



圖1、圖2：商周出版

林子平(2021)，都市的夏天為什麼愈來愈熱？

圖3、圖4：柯秉森、蔡青瑾(2013)，蝴蝶鱗片散熱的秘密 - 仿生材料的探討與應用。中國民國第53屆中小學科學展覽會作品說明書

圖5、圖6：Quetin Willot, Priscilla Simons, Jean-Pol Vigneron, Serge Aron(2016)，Total Internal Reflection Accounts for the Bright Color of the Saharan Silver Ant