



# 畜舍內溫度與濕度控制設計模式之研究

## Design and Simulation of Temperature and Relative Humidity of Livestock House

國立臺灣大學農工研究所碩士

于 若 石

Jo-shih Yu

國立臺灣大學農工系副教授

王 鼎 盛

Tin-sen Wang

### Abstract

We combine the theory of steady state heat transfer and mass transfer, the physiological reactions and needs of animals, and concept of ideal ventilation curve to establish a mathematical model on design and simulation of temperature and relative humidity of livestock house, from which we can find out an optimum and most economic design of insulation, ventilation and heating systems.

We design the optimum insulation under different insulation levels by using the steepest ascent method. From input climatic data, material properties, economic and environment design criteria data, we can simulate the daily fluctuation of temperature, relative humidity and insolation and calculate annual insulation, ventilation and heating initial and operating costs. Finally, the most economic design can be found.

The mathematical model is used in a 400-head frontal fattening confined swine house in Chu-nan. The results reveal that the optimum design of this swine house needs slightly insulation and a large capacity ventilation system.

This model not only can be used to design livestock house, but also can be applied to general purpose such as dwellings, factories green houses and environmental chamber, etc.

### 摘 要

本研究的目的係利用穩定狀態下熱傳遞與質量傳遞的理論，配合家畜的生理反應與生長需要，以及理想通風曲線的概念以建立一畜舍溫度控制設計之一般化模式，藉以模擬畜舍內溫、濕度變化，並據以求出一最經濟而適當的隔熱、通風與加熱設計。

本模式中以陡坡法 (Steepest Ascent Method) 導出不同隔熱程度下最適隔熱層分佈，然後將輸入的氣象資料，利用合理的假設模擬每日氣象的變化狀況，再配合輸入的材料性質與溫、濕度設計條件，演算年計隔熱、通風與加熱的初期與動力成本，在不同等效熱阻下選取一成本最經濟者，則其隔熱層分佈與通風和加熱系統容量即為所求。

本文中以南南畜產研究所氣象資料，對一飼養頭數四百頭，飼養密度  $1.25 \text{ 頭}/\text{m}^2$  的前期肥育密閉式豬舍加以模擬，並分析其結果。

本模式不僅可用於畜舍之溫度與濕度控制設計，同時亦可用於一般住宅、工廠、溫室及糧倉等之隔熱、通風與加熱設計。為便於實際應用，並將本模式寫成電子計算機程式以資利用。

## 一、前言

臺灣地區的畜牧生產過去一直停留在農村副業的階段，由於近年來政府積極地大力推展畜牧事業，以期增加動物性蛋白質食物的生產，促進國人健康，並拓展畜產品外銷。在政府鼓勵下，畜牧事業已漸由舊日農村副業邁向經營企業化、飼養集約化、管理科學化的多元化生產方式。養豬事業一向為本省畜牧生產事業中最重要的一環，亦為國人蛋白質的主要來源近年政府更推行綜合性的擴大養豬生產計劃，使豬隻能充分供應市場及外銷之需要，故養豬事業的規模日漸擴大，且大規模養豬所佔全年飼養頭數比例亦逐年提高。故養豬事業由以往的小農經營一變而成為大規模企業化經營。

隨着企業化養豬的擴展，逐漸產生土地之有效利用、勞力不足、糞尿處理困難等問題，畜舍設計方式亦漸漸走向密閉式或半密閉式條狀地面之設計，以提高土地利用效率促進畜舍省力化自動化、機械化減少畜舍沖洗用水，使糞尿較易處理，且對疾病瘟疫防治可有效控制。同時亦可對畜舍內環境加以控制以符合豬隻的生理需要，使其生存在適當的環境下，以增進其飼養效率及提高其肉類品質。

一般而言環境因素可概分為二，其一為氣候因素如光週期、溫度、濕度、氣流、氣壓等。其二為非氣候因素如音響或噪音、空氣成分、土壤、寄生蟲、放射能、震動等<sup>(7)</sup>。其中最主要者為溫度、濕度、氣流，三者的相成與抵消作用乃構成影響家畜生長的感覺溫度。家畜依種類、品種、年齡、體重等差異均各有適宜的環境溫、濕度與風速範圍。若將畜舍溫、濕度控制在此範圍內，使家畜在舒適的環境裡生長，則其飼養效率可相對提高。惟因本省過去對豬舍的環境未予以重視，常使家畜生長於通風不良、高溫多濕的環境下，故難冀望有較佳之成果。

本省地處亞熱帶，氣候條件特殊，年平均氣溫、相對濕度均極高，故畜舍的隔熱、通風設計若不良，往往造成通風量不當，溫度分佈不均勻等惡果，致使家畜未蒙其利反受其害。

本研究之目的為建立一個一般化的畜舍溫、濕度控制設計模式，冀以各種氣象、經濟、建築、環境等資料，藉有關的理論與合理的假設，以推估一最經濟且最適當的隔熱、通風與加熱之組合設計，使溫、濕度與通風量均在合理的範圍內，以提供家畜一適宜的生存空間。模式之主要內容有四，即最適隔熱層分佈之計算、氣象資料之模擬、通風量之

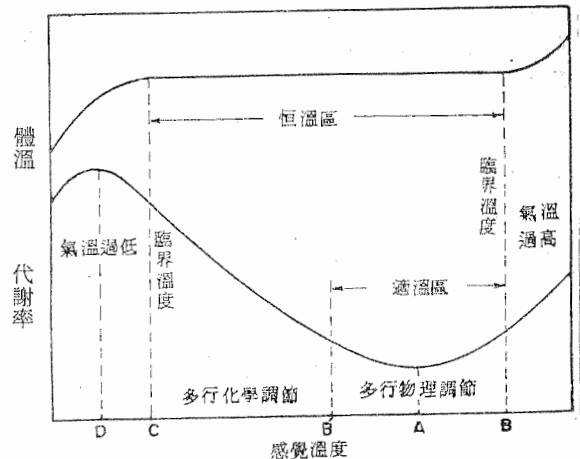
計算與能量平衡方程式之建立。

本模式中除詳盡闡釋有關溫、濕度控制設計，理論與模式的建立外，並利用電子計算機的高速資料處理與運算功能，將模式編寫成一計算機程式，以濃縮冗長的計算時間。將有關資料輸入程式，在短暫時間內即可得到設計結果，極為迅速便捷。

## 二、有關研究與文獻

### 2-1 環境因子對家畜，生理影響與環境設計條件之決定

家畜為恆溫動物 (Homeotherm)，必需依靠熱量的產生與發散藉以調節其體溫維持恆定，體溫變化容許的範圍極為狹窄。體溫的調節機能是依照感覺環境溫度 (Effective environment temperature) 而進行物理和化學調節，如圖 (2-1) 所示。所謂感覺溫度乃一包含氣溫、濕度、風速與輻射等諸因子的綜合性影響指標。<sup>(11)</sup>



圖(2-1) 感覺溫度對家畜恆溫性與代謝影響示意圖<sup>(11)</sup>

圖 (2-1) 中， $B' \sim B$  為適溫範圍 (Zone of thermoneutrality)，在此範圍中，家畜主要藉物理調節使維持恆溫，此時由於代謝率較低，故飼養效率最高。當感覺環境溫度在  $C \sim B'$  範圍中，家畜必須提高其代謝率 (化學調節) 產生熱量以適應在較低感覺環境溫度之影響，故此時之攝食量乃大增，每日增重降低，飼料換肉率提高。但當感覺溫度過高 (高於  $B$  點) 或過低 (低於  $C$  點) 時，其體溫調節機能即難以發揮正常的作用，此時體溫急遽上升或下降，最終導致家畜的死亡。

在適溫範圍中，其代謝率最低，故飼養效率相對地提高，其產肉能亦增力進。因此畜舍環境設計的目的，即使畜舍內之環境感覺溫度保持在適溫範

園中。一般而言適溫範圍與家畜的種類、品種、年齡、體重等因素有關。

近年來，環境控制逐漸受到重視，因而有關研究漸多，由這些研究文獻中證實環境對飼養效率有莫大的影響。由於豬隻對周圍環境的適應性，較其他家畜為強，故而以往對環境未加注意，常使豬隻在受污染、通風不良、高溫與多濕的環境中生活，影響到生產性功能，隨着企業化養豬的推展，養豬事業更趨向集約化經營，使豬舍的環境控制之設計益受重視。故環境因子對豬隻生長發育的影響乃成爲環境設計最重要的考慮因素，以下將幾位學者研究中認爲最重要的環境因子如環境溫度、相對濕度等對豬隻成長的影響略述於後，以提供在環境控制設計上的參考。

根據 Bond, Hazen and Mangold, Bell, *et al.*,<sup>(14)</sup> 的研究顯示當環境溫度在 60°F 與 70°F 之間時，豬隻的增重最速；且飼養效率亦最高，然而氣溫超出此範圍時，每日增重下降而飼料換肉率卻提高。又 Mangold 認爲若氣溫高於 70°F 時攝食量減少而飼料換肉率則無顯著變化。氣溫若高於 75°F 時每日增重下降。如圖 (2-2) 所示。

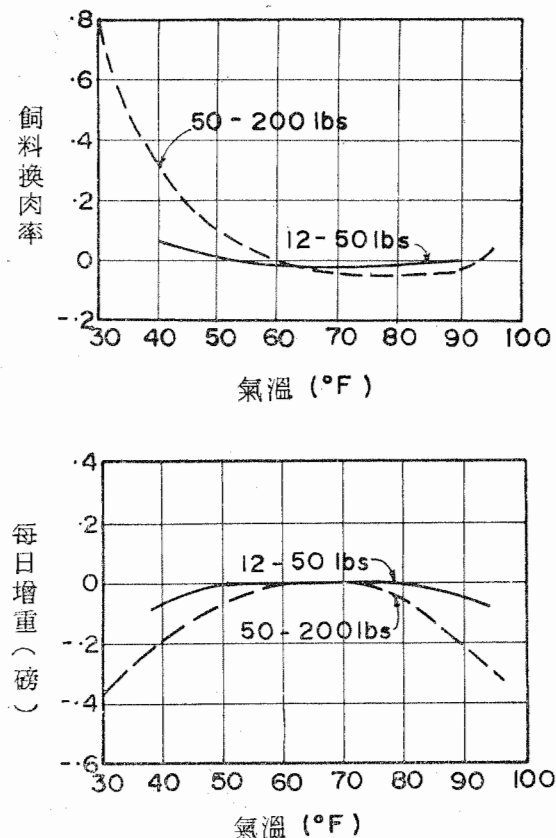


圖 (2-2) 氣溫對豬體 (a) 每日增重 (b) 飼料換肉率的影響<sup>(14)</sup>

高樹正也<sup>(8)</sup> 認爲一般豬隻的適當環境溫度在 59°F 與 77°F 之間，此時所攝取的飼料在體內進行消化作用，藉代謝（化學）作用產生的熱量，可由物理調節發散，使體溫維持恒定狀態，其熱量之發散係藉輻射、對流、傳導與蒸散作用而達成。若環境溫度低於適溫時，攝食量增加，代謝率提高，主要以輻射與對流發散體熱，反之當高於適當環境溫度時，攝食量遞減，此時主要以蒸散來發散體熱。又相對濕度應保持在 70% 以下。

Heitman<sup>(14)</sup> 的研究顯示，若相對濕度維持 50%，豬隻體重 70 公斤以下，當溫度 70°F 至 80°F 時其增重最大；而在 70 至 90 公斤，60°F 至 70°F 時增重最大。又 Heitman<sup>(14)</sup> 的研究顯示體重 30 至 65 公斤時，於 77°F；而 75 至 120 公斤時，於 59°F 左右之每日增重與飼料換肉率均達最佳狀況。

Bond<sup>(14)</sup> 的報告認爲環境溫度保持在 70°F 時的恒定狀態下與每日環境溫度在 60°F 與 80°F 間變動時豬隻的每日增重並無顯著的差異存在。

根據 Morrison<sup>(14)</sup> 的研究認爲氣溫低於 70°F 時，相對濕度的變化對豬隻無顯著的影響，但當氣溫高於 70°F 時相對濕度變化即會影響增重，氣溫愈高，則相對濕度益形重要。如圖 (2-3) 所示，圖中增重比爲不同溫、濕度下之增重與在 72°F，相對濕度 50% 時增重之比率。

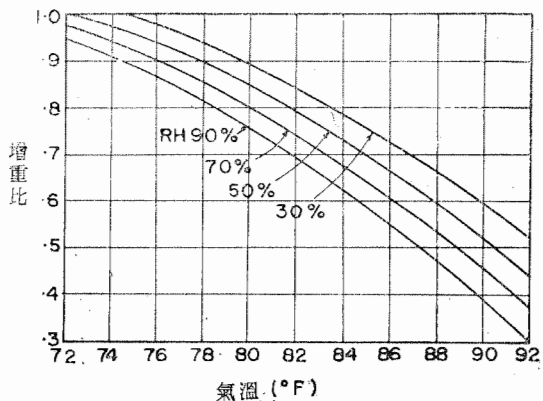


圖 (2-3) 相對濕度與氣溫對豬體每日增重的影響<sup>(14)</sup>

Pfeifer<sup>(7)</sup> 認爲適溫帶爲 57°F 至 72°F，溫度愈低飼料換肉率愈小。

Wagenback, Kalich<sup>(7)</sup> 認爲豬的舒適溫度在 59°F 至 68°F 間。

Comberg, *et al.*<sup>(7)</sup> 定出 40 公斤至 110 公斤的豬最適溫度爲 72°F，並指出當豬重在 70 公斤

以下時其相對濕度以 80 % 為最好，70 公斤以上則以 60 % 最好。且羣飼時其適溫應降低 3.6°F。

Gunarson<sup>(14)</sup> 的研究發現在 50°F 至 70°F 間風速對增重有顯著影響，風速愈高則增重愈低。

根據 Moustgaard<sup>(12)</sup> 的研究在 52°F 至 68°F 時肥育豬生長最適宜。於 59°F 至 73°F 之間時蛋白質累積最多(羣飼)，Fuller 之研究則認為 77°F 時蛋白質累積最多(單飼)。

環境溫度影響豬的顯熱 (Sensible heat) 發散量與潛熱 (Latent heat) 發散量，如圖 (2-4) 所示，部分之顯熱用以蒸發水分而變成潛熱，故較實際代謝所產生的顯熱量為低，但與實際的畜舍情況極相合，故在設計上頗為實用。<sup>(15,16)</sup>

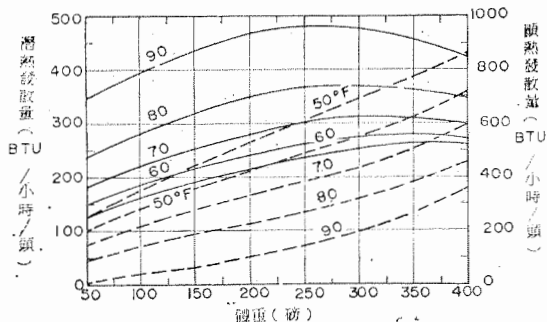


圖 (2-4) 不同體重豬隻在不同溫度下的  
(a) 顯熱發散量 (---) 與 (b) 潛熱發散量 (——) <sup>(15,16)</sup>

由上述所引用的研究文獻發現，各結果頗不一致，故 Hirning<sup>(14)</sup> 分析多項文獻提出了一套畜舍環境控制的設計標準如表 (2-1)。

表 (2-1) 中環境氣溫之選定是由快速生長、防止仔畜死亡與成畜之耐冷耐熱等因素決定之。氣溫之上限係為了減少相對濕度與風速的影響。氣溫的下限在防止對成畜有不利的的作用。初生畜與肥育家畜適宜溫度的下限之決定係要確保良好的飼養效率。

相對濕度範圍的決定並非依動物的需要為標準，而是為了要防此隔熱層中的水分凝結 (Condensation)，故相對濕度需低於 80 %；反之若相對濕度低於 50 % 時，則空氣過分乾燥，造成塵沙飛揚。因而將相對濕度範圍設定為 50 % 至 80 %。然若氣溫超過最適範圍，則氣溫在 80°F 以上每遞增 1°F 時則相對濕度需相對的降低 9 %，以使其感覺溫度與 80°F 時相同。

表 (2-1) 環境控制設計條件表<sup>(14)</sup>

生長階段	保育階段	肥育階段	成熟階段
氣溫(°F)	80°~95° 每隔一週齡減去 5°F 直至肥育階段，短期於低溫下並無害處。	50°~80°	35°~75°
相對濕度	50%~80%	50%~80%	50%~80%
塵埃	無可見塵埃	0.1mg/ft <sup>3</sup>	0.4mg/ft <sup>3</sup>
臭味與氣體	無臭 O <sub>2</sub> >16% CO <sub>2</sub> <1%	Ammonia <50ppm H <sub>2</sub> S<5ppm O <sub>2</sub> >16% CO <sub>2</sub> <1%	Ammonia <50ppm H <sub>2</sub> S<5ppm O <sub>2</sub> >16% CO <sub>2</sub> <1%

## 2-2 畜舍環境設計的有關研究：

Jordan, Barwick, De Shazer<sup>(23)</sup> 利用 Fourier 級數之向量 (Vector) 表示法模擬每日溫度的週期變化，並配合畜舍的物理與操作性質，藉以模擬出畜舍內每日氣溫之變動。模擬過程中並未考慮日射的因素。此為有關畜舍模擬之最早文獻。

Wilson<sup>(22)</sup> 採用隱性有限差分法 (Implicit Finite Difference Method) 藉計算機以模擬通風畜舍，結果顯示最高溫受日射的影響極大。

Phillips 和 Esmay<sup>(24)</sup> 建立一電子計算機模式以模擬穩定狀態週期溫度變化，模式中未考慮畜舍之貯熱性質與日射的影響。其中並模擬通風控制系統。

Albright 和 Scott<sup>(20,21)</sup> 利用 Fourier 級數模擬穩定週期溫度變化，模式中未考慮水分之蒸發與凝結，人工加熱、冷卻與閉窗。並假設畜舍內的空氣溫度完全均勻，利用轉換矩陣法 (Transmission matrix method) 計算屋頂與牆壁的熱傳遞。日射以太陽氣溫表示 (Sol-Air temperature)。

Albright 和 Scott<sup>(26)</sup> 利用上述的方法模擬多層畜舍，並利用矩陣法 (Matrix Method) 預測氣溫與熱量之獲得和損失，並以 Response factor method 求解 Fourier 級數。

## 三、模式之原理與模式之建立

### 3-1 模式之基本原理

畜舍內之溫、濕度隨着隔熱程度 (Insulation level) 而變動，若隔熱程度愈高，其所需之隔熱

固定成本亦相對地增高，但由於其隔熱效果好，所以冬天可減少熱量之損失而降低了加熱之補充；夏天遮斷輻射熱之入侵使得畜舍內保持涼爽，因而減低通風量。反之，若隔熱程度低，雖固定成本減少，但因冬天之輔助熱及夏天之換氣量增加而提高了其動力成本。在不同的隔熱程度下，其隔熱、通風、加熱的固定成本與通風、加熱的動力成本之變動中，可以找到一特定隔熱程度下的隔熱、通風、加熱之組合設計其總成本為最經濟者。本模式之研究目的即在建立一溫、濕度控制設計模式，以尋找一最經濟、最適當的隔熱、通風與加熱設計。

在同樣的隔熱程度下，藉調整各壁面的隔熱層厚度，可以得到無數種熱層分佈方式，其中定有一種分佈其隔熱成本為最低者，本模式中利用陡坡法 (Steepest Ascent Method) 尋求最適隔熱層分佈，使其成本最經濟。

利用畜舍設計地點的氣象資料，以合理的假設模擬畜舍外的每日溫、濕度與日射量變化，並由畜舍的飼養頭數計算家畜的潛熱、顯熱發散量。從畜舍各部設計尺寸與容積，配合理想通風曲線 (Ideal Ventilation Curve) 之理論，在所給予的容許最低氣溫、最適氣溫和容許最大相對濕度的畜舍內控制條件下，以每一小時為一時段，利用穩定狀態 (Steady State) 質量傳遞與能量傳遞原理，計算該小時所需加熱量與通風量，並由所給予的經濟分析資料計算所需動力成本。最後可得全年所需通風與加熱量及其所需之動力，和系統容量的大小。並確佔年計運轉動力成本和攤還的固定成本與總成本。比較不同隔熱程度，即可得到一最適當、最經濟的設計。

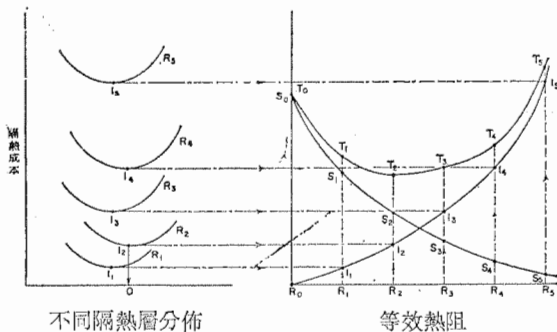


圖 (3-1) 模式基本原理示意圖

茲以圖 (3-1) 略予說明本模式的運算程序，圖中左圖係不同隔熱層分佈在不同隔熱程度或謂不同等效熱阻 (Equivalent Building Thermal

Resistance) 下，其隔熱成本變動示意圖。對每一等效熱阻 ( $R_{0,1}, R_1, R_2, R_3, R_4, R_5$ ) 而言，均可得到一隔熱成本最經濟之點 ( $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$ )，此即最適隔熱層分佈。右圖為不同等效熱阻條件下，隔熱固定成本曲線 ( $R_0-I_5$ )、通風與加熱系統固定、動力成本變動曲線 ( $S_0-S_5$ ) 與總成本變化曲線 ( $T_0-T_5$ ) 之示意關係圖。當等效熱阻增加時，隔熱成本相對提高，惟熱阻加大則通風與加熱系統成本即形降低。

本模式中，先由無隔熱層時，求出其最初等效熱阻 ( $R_{00}$ )，再計算其通風與加熱的系統成本 ( $S_0$ ) 和總成本 ( $T_0$ )，此時  $S_0 = T_0$ 。其後給予等效熱阻一增量，得一新等效熱阻 ( $R_1$ )，由此等效熱阻可得一最適隔熱層分佈，成本為  $I_1$ ，同時推算出系統成本 ( $S_1$ ) 與總成本 ( $T_1$ )，此時  $T_1 = I_1 + S_1$ 。然後再給予一增量，重覆上述演算。本模式中計算六種不同等效熱阻下，其成本的變動。如圖 (3-1) 中總成本達最低點 ( $T_2$ ) 時，可求出其最適隔熱層分佈 (O) 與通風系統和加熱系統容量的大小。

### 3-2 模式之有關理論

本模式利用氣象資料、建築材料特性、經濟成本資料及溫濕度設計資料等，各項資料利用熱傳遞 (Heat Transfer) 與質量傳遞 (Mass transfer) 的理論以推估最適當的畜舍溫濕度設計。

本模式中包括下述四部分：

1. 最適隔熱層分佈之計算。
2. 每日氣象變化的模擬。
3. 通風量的計算。
4. 能量平衡方程式之建立與解法。

茲將上述原理與方法詳述如后。

#### 1. 最適隔熱層分佈之計算：<sup>(15,16,17)</sup>

本模式是藉變化畜舍的等效熱阻，以推算其最適隔熱層分佈。所謂等效熱阻即畜舍各壁面的熱阻所組合而成的一箇相當熱阻值，用以表示熱流經畜舍壁面時其阻力程度的大小。由等效熱阻吾人即可知畜舍壁面隔熱的程度與效果，本模式中係由無隔熱層開始，每一次遞增  $1.25 \text{ hr-ft}^2 \cdot \text{°F/Btu}$ ，對每一等效熱阻，即可求得一最適隔熱層的分佈。

由 Fourier 的熱傳導 (Conduction) 理論微分方程式配合對流 (Convection) 和輻射 (Radiation) 熱傳遞係數在穩定狀態 (Steady state) 下，可以推導出畜舍壁面的熱傳遞量，如

式 (3-1a) 與 (3-1b)。

畜舍總熱傳導量 ( $Q_{con}$ ) 可由下式求得：

$$Q_{con} = A_{total} U_{total} \quad (3-1a)$$

$$= \frac{A_{total}}{R_{total}} (TO - TI) \quad (3-1b)$$

上式中： $U_{total}$  = 畜舍的總熱傳遞係數 (Overall Coefficient of heat transmission or Thermal transmission)

$R_{total}$  = 畜舍的等效熱阻 (Thermal equivalent resistance of Building)

TO = 畜舍外的氣溫

TI = 畜舍內的氣溫

$A_{total}$  = 畜舍壁面的總表面積

式 (3-1b) 中的等效熱阻可利用並聯組合律 (Combination Law of Series)，由各壁面的面積與熱阻推算而得：

$$\frac{A_{total}}{R_{total}} = \sum_{j=1}^k \frac{A_j}{R_j} \quad (3-2)$$

式中： $A_j$  = 壁面 j 的面積

$R_j$  = 壁面 j 的熱阻

但若畜舍有天花板的設計，必須先將屋頂與天花板的熱阻以串聯組合律 (Combination Law of Parallel) 求出一替代熱阻<sup>(99)</sup>，再代入式 (3-2) 中計算等效熱阻。

一般而言，實際計算過程中，有天花板之屋頂熱傳遞係數，可採用 Barre 和 Sammet<sup>(99)</sup> 所提出公式計算之：

$$U_c = \frac{U_r U_{c_0}}{U_r + \frac{U_{c_0}}{n_r}} \quad (3-3)$$

式中： $U_c$  = 屋頂與天花板之組合熱傳遞係數

$U_r$  = 屋頂的熱傳係數

$U_{c_0}$  = 天花板的熱傳遞係數

$n_r$  = 屋頂面積與天花板面積之比率

式 (3-3) 所求得的  $U_c$  是以天花板的面積為計算標準，用以估計屋頂與天花板的熱傳遞量。

故具有天花板之屋頂之替代熱阻為

$$R_c = \frac{1}{U_c} \quad (3-3a)$$

至於各壁面的熱阻值則可以串聯組合律計算之。

$$R_j = \frac{1}{U_j} = \frac{1}{HI_j} + \frac{x_j}{K_j} + \frac{1}{HO_j} \quad (3-4)$$

式中： $R_j$  = 壁面 j 的熱阻

$HI_j, HO_j$  = 壁面內、外表面的表面傳導度或稱薄膜傳導度 (Surface conductance, Film conductance)

$x_j$  = 壁面 j 的厚度

$K_j$  = 壁面 j 的熱傳導率 (Conductivity)

式 (3-4) 中，表面傳導度為代表物體表面所有輻射、對流及傳導諸性質的綜合因子，因此其大小與物體表面的絕對溫度、放射率 (Emissivity)、風向、風速以及物體表面與接觸流體的溫差等諸因子均有關係，欲精確估計，可藉實驗或由經驗公式<sup>(18)</sup> (19) 利用設計地區之平均風速推求之。惟依物體表面為穩流 (Laminar flow) 抑或亂流 (Turbulent flow) 其係數差異頗大，故需正確的判斷以定其流型，再由有關公式推求其係數。

若一壁面的構造較複雜時則無法直接以式 (3-4) 計算壁面總熱阻，Threlkeld<sup>(19)</sup> (19) 對常見之隔熱牆設，譬如不同的牆骨 (Stud) 與隔熱層的設計，利用串聯和並聯組合律導出下述四公式，茲概述之。

(1) 牆壁含靜止空氣夾層與隔熱層 (如圖 (3-2a) 所示)：

$$R = R_1 + \frac{1}{HI} + \frac{1}{HO} + \frac{1}{\frac{r_s K_s}{d_s} + \frac{r_1 K_1}{d_1 + \frac{K_1}{C_a}}} \quad (3-5)$$

(2) 不含空氣夾層者 (如圖 (3-2b) 所示)：

$$R = R_1 + \frac{1}{HO} + \frac{1}{HI} + \frac{d_1}{r_s K_s + r_1 K_1} \quad (3-6)$$

式中： $d_1 = d_s$

(3) 隔熱層厚度超過牆骨者 (如圖 (3-2c) 所示)：

$$R = R_1 + \frac{1}{HO} + \frac{1}{HI} + \frac{d_s}{r_s K_s + r_1 K_1} + \frac{d_1 - d_s}{K_1} \quad (3-7)$$

(4)基牆 (如圖 (3-2d) 所示) :

$$R = R_1 + \frac{d_i}{K_1} \quad (3-8)$$

上述同式中:

$R$  = 牆壁的總熱阻

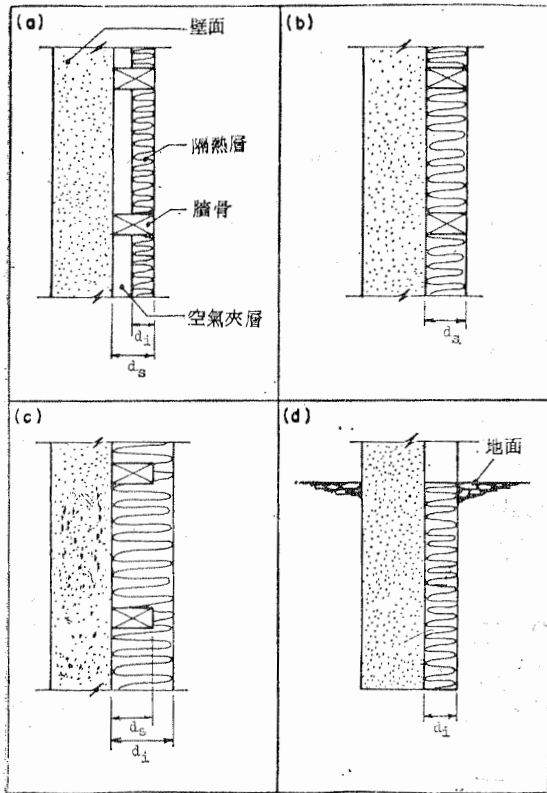


圖 (3-2) 不同種類的隔熱層設計

$R_1$  = 牆壁的最初熱阻 (不包括內、外表面熱傳導度)

HI, HO = 內、外壁面的表面傳導度

$r_s$  = 牆骨面積與牆骨和隔熱層總面積之比

$r_1$  = 隔熱層面積與牆骨和隔熱層總面積之比  
 $r_s + r_1 = 1$

$d_s$  = 牆骨厚度

$d_i$  = 隔熱層厚度

$C_a$  = 空氣夾層 (air space) 的熱傳導度 (Conductance)

$K_s$  = 牆骨的熱傳導度

$K_1$  = 隔熱層的熱傳導度

空氣夾層亦具隔熱作用, 惟不可小於  $\frac{3}{4}$  吋, 若小於此厚度時, 其隔熱效果迅速降低, 反之亦不可超過四吋, 否則會形成對流, 降低其隔熱效果。<sup>(16)</sup>

牆壁若有開鑿門窗時, 其處理方式可以下法為之。將牆壁實體與門窗二者視為不同的壁面, 分別將其資料輸入模式中, 以求出個別的隔熱層厚度與總熱阻。

本研究中係用陡坡法 (Steepest ascent method) 推估最適隔熱層分佈, 茲略述其原理如下:

(1)對各壁面, 輸入隔熱層熱阻與熱容量, 並決定各壁面隔熱層的最大容許厚度。其厚度可基於美觀、建築物負荷等客觀因素決定之。

(2)計算最初無隔熱材料的等效熱阻。

(3)由最大容許厚度, 逐一校驗各壁面減少單位厚度時, 何者對單位的等效熱阻所節省, 成本最大, 則將該壁面減少一單位厚度, 即可得一較適當的隔熱分佈。

(4)將新的隔熱層分佈算得的等效熱阻與給予的設計等效熱阻比較之, 若小於設計等效熱阻則該隔熱層分佈即為最適分佈。但若大於設計等效熱阻時, 則新的隔熱層分佈須再重覆步驟(3), 如此反覆運算即可求得最適隔熱層分佈。

(5)校核: 逐一校核各壁面之隔熱層為零時, 其單位等效熱阻所節省成本是否較原有的隔熱層成本為高, 若較高則令該壁面隔熱層厚度為零。

(6)再重覆步驟(3)–(5), 直到找到最適隔熱層分佈。

## 2. 氣象之模擬與計算方法

氣象的模擬包含畜舍外氣溫、濕度與日射量 (Insolation) 之模擬, 茲分述如后。

(1)畜舍外氣溫變化之模擬:

氣溫受日射量、空氣循環流動、標高、地理位置、季節變化與區域性氣候型態等自然因素所支配, 故氣溫變化可視為一隨機變數 (Random Variable), 然其平均值卻有一週期可循<sup>(15)</sup>, 故可藉調和函數 (Harmonic Function 表示之, 常見之表示法為 Fourier's 級數, 如下式:

(20, 21, 26, 23)

$$T(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n \omega_0 t + b_n \sin n \omega_0 t) \quad (3-9)$$

式中:  $T(t)$  =  $t$  時刻的氣溫

$a_n, b_n$  = 係數

$n$  = 調和次數

$t$  = 時間

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \text{ 基本頻率, } T = \text{週期}$$

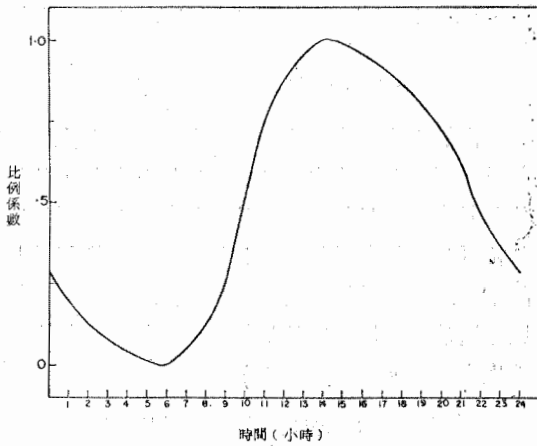
若截取前數項，則可得下式<sup>(9)</sup>：

$$T(t) = \bar{T} + a_1 \sin(\phi_1 + t) + a_2 \sin(\phi_2 + 2t) + a_3 \sin(\phi_3 + 3t) \quad (3-10)$$

式中： $\bar{T}$  = 平均氣溫

$\phi_1, \phi_2, \phi_3$  = 偏差相角

根據 ASHRAE<sup>(15)</sup> 的資料每日氣溫變化可以一標準曲線表示之，由是推求每日任一時刻的氣溫變化。一日的氣溫變化，自以夜間低而白晝高，惟最低溫大約出現於清晨六時許，而最高溫則出現於午後二時，其間的變化可以一平滑的週期性曲線表示之。如圖(3-3)所示。



圖(3-3) 標準氣溫變化曲線<sup>(15, 16)</sup>

本模式中因係以一小時為一時段 (Time Interval) 計算一次，故可以下式計算各小時的氣溫如：

$$T_i = T_{min} + (T_{max} - T_{min}) C_i \quad (3-11)$$

式中： $T_i$  = 第  $i$  時的氣溫， $i = 1 \sim 24$

$T_{max}$  = 每日最高溫(或午後二時氣溫)

$T_{min}$  = 每日最低溫(或清晨六時氣溫)

$C_i$  =  $i$  時的係數，參見表(3-1)

或圖(3-3)

表(3-1) 每日氣溫變化比例係數表<sup>(15, 16)</sup>

時間 $i$ (小時)	比例 係數 $C_i$	時間 $i$ (時間)	比例 係數 $C_i$	時間 $i$ (時間)	比例 係數 $C_i$	時間 $i$ (小時)	比例 係數 $C_i$
1	0,200	7	0,048	13	0,952	19	0,800
2	0,125	8	0,125	14	1,000	20	0,715
3	0,083	9	0,250	15	0,986	21	0,625
4	0,042	10	0,500	16	0,958	22	0,500
5	0,036	11	0,750	17	0,917	23	0,375
6	0,000	12	0,875	18	0,875	24	0,285

氣溫受到種種自然因素支配變幻莫測，如前所述可視為一隨機變數，且氣溫對畜舍通風量的計算影響至鉅，故僅以每月的平均最高溫、最低溫描述每個月的溫度變化，實不足以代表全月的氣溫變化狀況，故假設每個月的氣溫變化呈標準常態分佈 (Gaussian Standard Normal Distribution)<sup>(27)</sup>，則每日氣溫發生的或然率可以高斯函數 (Gaussian Function) 積分而得。高斯函數如下式：

$$f(T) = \frac{1}{V\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(T-\bar{T})^2}{2V^2}} \quad (3-12)$$

式中： $f(T)$  = 氣溫  $T$  發生的密度函數 (Density function)

$T$  = 氣溫

$\bar{T}$  = 平均氣溫 (Mean)

$V$  = 氣溫的標準偏差 (Standard Diveration)

$$= \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n T_k^2 - \bar{T} \sum_{k=1}^n T_k}{n-1}} \quad (3-13)$$

$n$  = 每月日數

本模式為簡化計算過程，假設各月的日數均為三十日，最後之結果再乘以各月實際日數與三十日之比率即可得實際結果。其分佈情況如圖(3-4)所示，則各月份中任一最高溫與最低溫即可由該月份的平均最高溫與最低溫及最高溫與最低的標準偏差求得，如下式：

$$T_{ij} = \bar{T}_i + Z_j V_i \quad (3-14)$$

式中： $T_{ij}$  = 第  $i$  月第  $j$  日之最高或最低氣溫

$i = 1 \sim 12, j = 1 \sim 30$

$\bar{T}_i$  = 第  $i$  月之平均最高或最低氣溫



$V_i$  = 第  $i$  月之最高或最低氣溫標準偏差平均值，可以式 (3-13) 計算之

$Z_j$  = 第  $j$  日的溫度分佈係數，得以式 (3-12) 計算之，其結果如表 (3-2)

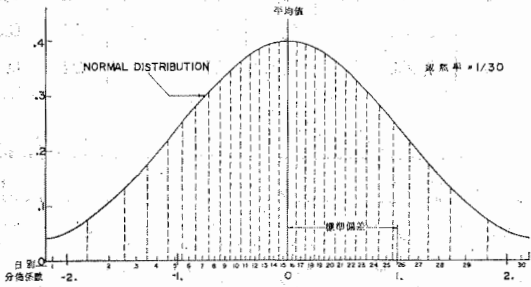


圖 (3-4) 每月氣溫分佈圖型

表 (3-2) 每月氣溫分佈係數表

時間 (小時)	$Z_N$	時間 (小時)	$Z_j$	時間 (小時)	$Z_j$
1	-2.1280	11	-0.3854	21	0.4771
2	-1.6450	12	-0.2968	22	0.5730
3	-1.3831	13	-0.2104	23	0.6745
4	-1.1918	14	-0.1252	24	0.7835
5	-1.0364	15	-0.0418	25	0.9027
6	-0.9027	16	0.0418	26	1.0364
7	-0.7835	17	0.1252	27	1.1918
8	-0.6745	18	0.2104	28	1.3831
9	-0.5730	19	0.2968	29	1.6450
10	-0.4771	20	0.3854	30	2.1280

畜舍外氣溫變化為畜舍設計中最重要之邊界條件 (Boundary Condition)，以上述方法所求得之經年氣溫變化足以代表實際之溫度變化情況。

(2) 畜舍外濕度變化之模擬：(2, 10)

一般情況下氣溫上升後，若空氣中所含水量未變更，但因飽和蒸氣壓增高，故相對濕度下降，由是假設一日中的空氣為同一空氣，則濕度的全日變化恰與氣溫的變化成反比。通常太陽初昇，約清晨六時許相對濕度達最高點，午後二至三時相對濕度則降至最低點，其變化如圖 (3-5) 所示，故全日中任一小時之相對濕度可以下式計算之：

$$RH_i = RH_{min} + (RH_{max} - RH_{min})D_i \quad (3-15)$$

式中： $RH_i$  = 第  $i$  時的相對濕度

$i = 1 \sim 24$

$RH_{max}$  = 每日最高相對濕度 (或清晨六時之相對濕度)

$RH_{min}$  = 每日最低相對濕度 (或午後二至三時之相對濕度)

$D_i$  = 相對濕度比例係數，參見表 (3-3)

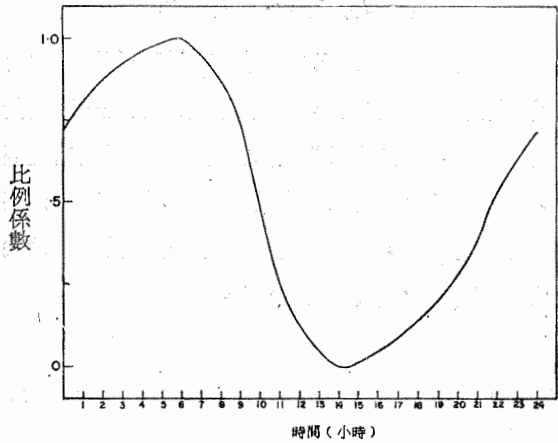


圖 (3-5) 標準相對濕度變化曲線

由於至今尚未完全明瞭每月氣溫變化之分佈與每月相對濕度變化之分佈其間之關係如何，故無法依每月中某一日的氣溫分佈來推估該日相對濕度的分佈為何。故各月份每一日的相對濕度概以該月份的平均最高、最低相對濕度計算之。又濕度調節通風量所佔總通風量之比例極微，故以平均值表示其差異亦很小。

表 (3-3) 每日相對濕度變化比例係數表

時間 $i$ (小時)	比例係數 $D_i$	時間 $i$ (小時)	比例係數 $D_i$	時間 $i$ (小時)	比例係數 $D_i$	時間 $i$ (小時)	比例係數 $D_i$
1	0.800	7	0.958	13	0.048	19	0.200
2	0.875	8	0.875	14	0.000	20	0.285
3	0.917	9	0.750	15	0.016	21	0.375
4	0.958	10	0.500	16	0.042	22	0.500
5	0.986	11	0.250	17	0.083	23	0.625
6	1.000	12	0.125	18	0.125	24	0.715

(3) 日射量的計算：(2, 15)

一般利用理論與半經驗公式，由地球與太陽的相關位置，日射入射角度及大氣層的組成與變化，可以精確的估計日射量為若干。日射量推測的方法極多，本研究係採取 ASHRAE (15) 所提出的計

算方法，據以推估各月份之平均每日日射強度變化，現將其方法略述如后：

太陽光穿過地球大氣層時，受到大氣層中的氣體分子、水蒸氣、雲層與塵埃和臭氧層等之反射作用 (Reflected)、散射作用 (Scattered) 與吸收作用 (Absorbed) 影響。

任一照射面所獲得的日射強度 (Insolation) 係直接日射強度，大氣之散射日射強度與其他物體所反射的太陽光之總和，可以下式表示之。即：

$$I_t = I_{DN} \times \cos\theta + I_{ds} + I_r \quad (3-16)$$

式中： $I_t$  = 照射面所獲得的全短波日射強度 (total short wave radiation)

$I_{DN}$  = 直接垂直日射強度 (Direct normal radiation)

$I_{ds}$  = 大氣散射日射強度 (Diffused sky radiation)

$I_r$  = 鄰近物體之反射強度 (Reflected solar radiation)

$\theta$  = 日射入射角 (Angle of incidence)

太陽在空中的位置可以太陽高度角 (Solar altitude,  $\beta$ ) 與太陽方位角 (Solar azimuth,  $\phi$ ) 定義之。所謂太陽高度角係水平面與地球太陽連線之夾角，而太陽方位角則為正南方與連線在水平面上投影之夾角， $\beta$  與  $\phi$  可分別利用式 (3-17) 與式 (3-18) 計算求得，

$$\sin \beta = \cos L \cos \delta \cos H + \sin L \sin \delta \quad (3-17)$$

$$\sin \phi = \cos \delta \sin H / \cos \beta \quad (3-18)$$

上二式中： $L$  = 該地的緯度 (Latitude)

$H$  = 時角 (Hour angle)

$\delta$  = 太陽傾斜角 (Solar declination)，其數據可參考表 (3-4)

照射面入射角得以下列三式求之。

(1) 水平面入射角 ( $\theta_H$ )：

$$\cos \theta_H = \sin \beta \quad (3-19)$$

(2) 垂直面入射角 ( $\theta_r$ )：

$$\cos \theta_r = \cos \beta \cos \gamma \quad (3-20)$$

(3) 任意平面入射角 ( $\theta$ )：

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \gamma \sin \Sigma + \sin \beta \cos \Sigma \quad (3-21)$$

上述式 (3-19) 與式 (3-21) 中， $\Sigma$  為照射面與水平面夾角， $\gamma$  為照射面太陽方位角 (Surface solar azimuth) 可由式 (3-22) 求之。

	照射面面南偏西	照射面面南偏東
上午	$\gamma = \phi - \psi$	$\gamma = \phi + \psi$
下午	$\gamma = \phi + \psi$	$\gamma = \phi - \psi$

(3-22)

式 (3-22) 中， $\psi$  為照射面方位角 (Surface azimuth) 直接水平日射強度可以下式計算之：

$$I_{DN} = \frac{A}{B} \frac{1}{e^{\sin \beta}} \quad (\text{Btuh/ft}^2) \quad (3-23)$$

式中： $A$  = 大氣層外的日射強度 (Btuh/ft<sup>2</sup>)

$B$  = 大氣層的日射折減係數 (Extinction coefficient)

根據明尼蘇達大學 (University of Minnesota) 研究結果所得  $A$  與  $B$  之值列於表 (3-4) 中。 $A$ 、 $B$  值受太陽、地球間距離與大氣層中永蒸氣、塵埃的季節性變化所支配，由式 (3-23) 中可推估月別晴天 (clear day) 平均直接垂直日射強度，此值僅可代表太陽及其鄰近無雲時，直射於垂直日射方向的照射面所獲得的日射強度，惟事實上，地面所獲得的日射強度與入射角度與雲層的種類和厚度均有密切關係<sup>(5)</sup>。雲層的厚薄對日射的穿透能力極有影響，而實際垂直日射強度與晴天垂直日射強度的比率稱為穿透率 (Transmissivity, TR)，以晴天垂直日射強度乘以穿透率即可求出實際垂直的日射強度<sup>(4)</sup>，即：

$$T_{DNT} = I_{DN} \times TR \quad (3-24)$$

式中： $I_{DNT}$  = 實際直接垂直日射強度

TR = 月平均穿透率

任一照射面所獲得 散射日射強度 (Diffuse sky radiation) 乃由空氣分子、塵埃、水蒸氣等大氣層因素對日射所反射、散射而來，散射日射並非均勻來自各方。垂直與水平 散射強度 之比率 ( $Y$ ) 可以下列兩式計算之。

照射面背光且入射角很大時：

$$Y = 0.45 \quad (3-25)$$

照射面迎光或入射角很低時：

$$Y = 0.55 + 0.437 \cos \theta + 0.313 \cos^2 \theta \quad (3-26)$$

則水平散射日射强度為：

$$I_{dsH} = C \times I_{DN} \quad (3-27)$$

式中：C = 散射日射因數(Diffuse radiation factor) 可查表 (3-4)

垂直散射日射强度為：

$$I_{dsV} = I_{dsH} \times Y \quad (3-28)$$

則總散射日射强度可以下式求之。

$$I_{ds} = [I_{dsH} - (I_{dsH} - I_{dsV}) \times (I - \text{css } v)] \times \text{TR} \quad (33-29)$$

式中：v = 照射面法線與鉛垂線夾角

表 (3-4) 傾斜角與日射强度計算係數表<sup>(15)</sup>

月別	傾斜角 (度)	A Btu/hr/ft <sup>2</sup>	B	C
1	-0.349	390	0.142	0.058
2	-0.188	385	0.144	0.060
3	0.000	376	0.156	0.070
4	0.202	360	0.180	0.097
5	0.349	350	0.196	0.121
6	0.409	345	0.205	0.134
7	0.360	344	0.207	0.136
8	0.215	351	0.201	0.122
9	0.000	365	0.177	0.092
10	-0.183	378	0.160	0.073
11	-0.346	387	0.149	0.063
12	-0.409	391	0.142	0.067

將式 (3-24) 與式 (3-29) 代入式 (3-30) 中乘以照射面的平均吸收率即可求得照射面實際所吸收的全短波日射强度。

$$I_i = (I_{DNT} \times \cos \theta + I_{ds}) \times \alpha \quad (3-30)$$

式中：I<sub>i</sub> = 全短波日射强度

α = 照射面的吸收率 (Absorptance)

茲以竹南地區資料模擬三月份的全短波日射强度週日變化，如附圖 (3-6) 所示。

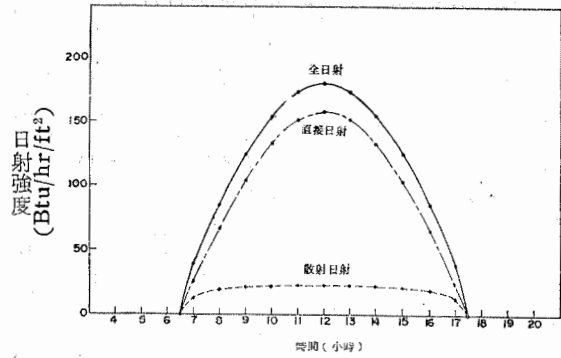


圖 (3-6) 水平照射面模擬日射量曲線

### 3. 通風量的計算：<sup>(16, 1, 2)</sup>

Dale<sup>(33)</sup> 將畜舍通風的必要性歸納為五點如下：

- A、移除畜舍中的水分。
- B、盡其可能提供更舒適的生存環境，以提高生長速率，放進飼養效率。
- C、移除臭味。
- D、供應家畜所需要的氧氣。
- E、移除有毒物質與稀釋空氣傳播的病原菌。

而畜舍的通風系統的良好與否取決於：

- A、足夠且適量的空氣。
- B、空氣完全均勻的散佈。
- C、良好的空氣品質。

若能完全滿足上述三項條件則通風系統必可完全發揮功能，然而在無冷卻與加熱系統的協助下，要時時刻刻滿足這些條件極不可能，但冷卻系統的初期成本與操作成本均甚昂貴，故本模式中未予考慮，然加熱系統的初期和操作成本則較低廉，故本研究在環境設計中以加熱系統輔助通風系統以獲得適當的通風效果。

本模式中利用 Midwest Plan Service<sup>(16)</sup> 所提出的理想通風曲線做為通風量設計的準繩，如圖 (3-7) 所示。圖中共分成三部分，即濕度調節通風 (Moisture Control Ventilation)、溫度調節通風 (Temperature Control Ventilation) 與家畜舒適通風 (Animal Comfort Ventilation)。三者的劃分是由畜舍內最適氣溫 (Optimum inside temperature)，容許最大相對濕度 (Maximum relative humidity desired) 與畜舍內、外氣溫及相對濕度所共同決定之。若畜舍外的溫度或相對濕度大於畜舍內的溫

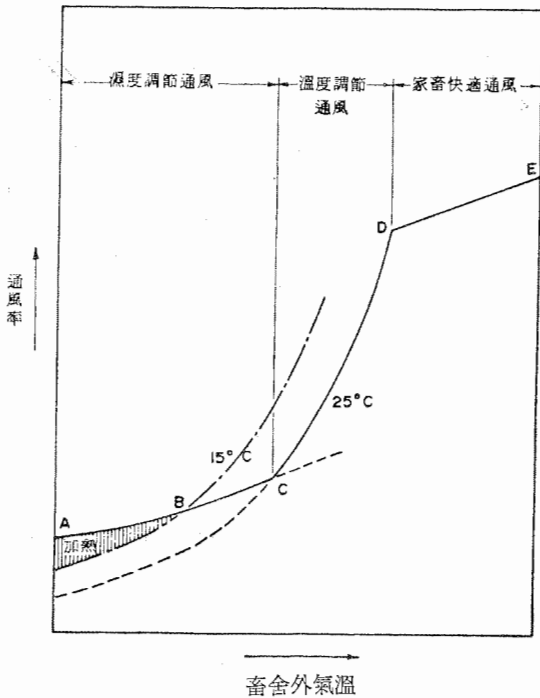


圖 (3-7) 理想通風曲線示意圖<sup>(16)</sup>

度或相對濕度時，即無法進行溫度與濕度調節通風，此時必須進行家畜快適通風，如圖 (4-7) 中 D-E 線。

反之，若低於畜舍內的氣溫或相對濕度時則可進行溫度或濕度調節通風，究竟採用何種通風，端視兩者的大小而定。當畜舍外氣溫較低時，畜舍內外溫差大，故僅需少量通風即可使畜舍內氣溫保持在最適氣溫上，然而欲控制畜舍內濕度在容許最大相對濕度以下的濕度調節通風量反較溫度調節通風量為高，故此時需進行濕度調節通風，如圖 (4-7) 中，A-C 線。惟因其通風量較溫度調節通風量為大，因此所帶走的熱量亦較多，故理論上此時需輔助熱量以維持畜舍內氣溫。但若畜舍內氣溫高於容許最低氣溫 (Minimum temperature desired)，則氣溫尚在容許範圍內，因而無需加熱，如圖中 B-C 線。反之，若畜舍內氣溫低於容許最低溫時，必須予以適當加熱，使畜舍內氣溫維持在容許最低溫上，如圖 (4-7) 中，A-B 線。

當畜舍外氣溫增加時，濕度調節通風呈緩慢增加，而溫度調節通風則急遽增加；當畜舍外氣溫到一定值時，濕度與溫度調節通風量相等，如圖 (4-7) 中點 C，若畜舍外氣溫高於此點時，溫度調節通風量即大於濕度調節通風量此此時需行溫度

調節通風以維持畜舍內氣溫在最適氣溫上，如圖 (4-7) 中，C-D 線。本模式即據此原理計算通風量，茲詳述其計算過程與方法於后。

#### A、濕度調節通風量的計算

當外界氣溫低於 C 點時，須行濕度調節通風，以相對濕度與氣溫可由濕度線圖 (Psychrometric chart) 查得畜舍內、外空氣的水蒸氣諸性質。惟為方便電子計算機運算起見，學者建立多種數學模式可資運用。本文中係採用 Brooker<sup>(28)</sup> (1968) 所建立之數學模式，茲略述其運算過程如下：

若氣溫高於 32°F 時：

$$P_s = RH \left( e^{54.3829 - \frac{12301.688}{T}} - 5.16923 \ln T \right) \quad (3-31)$$

否則以下式計算之：

$$P_s = RH \left( e^{23.3924 - \frac{11286.6489}{T}} - 0.46057 \ln T \right) \quad (3-32)$$

上二式中：P<sub>s</sub> = 水蒸氣壓 (psi)

T = 乾球溫度 (°F)

RH = 相對濕度 (Decimal)

此法之優點為計算精簡且結果正確。P<sub>s</sub> 一經求出後代入下式即可求得比濕 w (Humidity ratio, 無單位)

$$w = 0.6219 \frac{P_s}{P - P_s} \quad (3-33)$$

式中：P = 大氣壓 (psi)

將畜舍內、外氣溫、濕度代入式 (3-31) 或式 (3-32) 中求得畜舍內、外之水蒸氣壓 P<sub>s1</sub>、P<sub>s0</sub>，再代入 (3-33) 中即可得畜舍內、外之比濕為 w<sub>1</sub>、w<sub>0</sub>，由下式可求得舍內空氣之比容 (v) (Specific volume, ft<sup>3</sup>/lb)。

$$v = 0.5957 \times \frac{w_1 A T_1}{P_{s1}} \quad (9-34)$$

式中：w<sub>1</sub> = 畜舍內比濕

A T<sub>1</sub> = 畜舍內的絕對氣溫 (°F)

A T<sub>1</sub> = T<sub>1</sub> + 459.59

P<sub>s1</sub> = 畜舍內水蒸氣壓 (psi)

再代入質量平衡 (Mass balance) 方程式中求得：

$$Q_m = \frac{M_w}{w_1 - w_0} \quad (3-35)$$

式中： $Q_m$  = 濕度調質量流率(Mass flow rate), (lb/hr)

$M_w$  = 需要移除的水分重量 (lb),  
可由家畜的潛熱發散量求出。

家畜的潛熱發散量受環境溫度、相對濕度、本身的運動情況和健康狀態及家畜的種類、品種、年齡和體重等因子所影響。其中最重要的因子為氣溫、品種與體重，根據 ASHRAE<sup>(15)</sup> 與 Midwest Plan Service<sup>(16)</sup> 的資料，家畜的潛熱發散量可以下式表示之。

$$QL = Q_o(W, T) \times N \quad (3-36)$$

式中： $QL$  = 畜舍內家畜單位時間潛熱發散量

$W$  = 體重

$T$  = 氣溫

$N$  = 畜舍內家畜飼養頭數

$Q_o$  = 每頭家畜單位時間潛熱發散量

Albright 和 Scott<sup>(20, 21)</sup>、Christianson<sup>(27)</sup> 將  $Q_o$  以氣溫的直線函數表示之。惟本文依照 ASHRAE<sup>(15)</sup> 與 Midwest Plan Service<sup>(16)</sup> 的資料以最小二乘法迴歸不同體重豬隻的潛熱發散量，其結果以用溫度的二次式表示精確度較高，如圖 (3-8) 與表 (3-5) 所示。

表 (3-5) 不同體重豬體潛熱發散量二次迴歸方程式

體重 (磅)	潛熱發散量 (Btu/小時/頭)
50	$461,1587 - 13,05885T + 0.1299922T^2$
100	$503,3921 - 13,68911T + 0.1378521T^2$
150	$544,0422 - 14,18879T + 0.1435634T^2$
200	$608,6467 - 15,46887T + 9.1535636T^2$
250	$630,6157 - 15,30896T + 0.1507081T^2$

則家畜所產生的水分為：

$$M_w = \frac{QL}{w_e} \quad (3-37)$$

式中： $w_e$  = 水分蒸發熱 (Btu/lb)。如表 (3-6)

$M_w$  = 畜舍內家畜產生的水分 (lb)

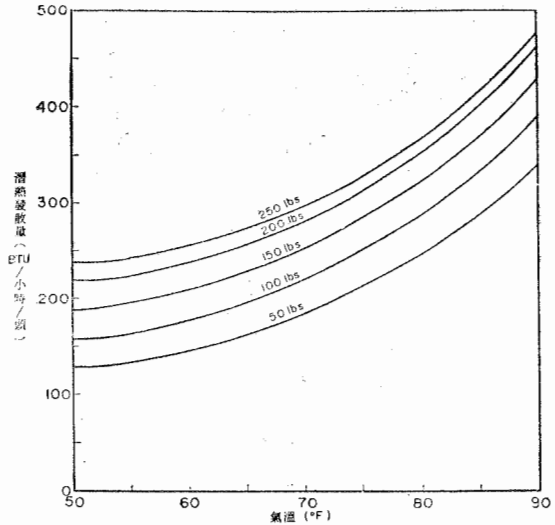


圖 (3-8) 不同體重豬體潛熱發散量與溫度關係圖

表 (3-6) 水分蒸發熱表

氣溫 (°F)	蒸發熱 (Btu/磅)
32	1076
40	1071
60	1061
80	1048
100	1036
120	1025
140	1013
160	1001
180	990
200	978
212	970

則可求得通風量為：

$$Q_v = \frac{Q_m V}{60} \quad (3-38)$$

式中： $Q_v$  = 通風量 (cfm)

B、溫度調節通風量的計算：

當畜舍內氣溫超過最適氣溫，必須進行溫度調節通風以維持在最適氣溫上，其質量流率 ( $Q_m$ ) 可以下式求得：

$$Q_m = \frac{q}{0.24(TI - TO)} \quad (3-39)$$

式中： $q$  = 需移除的熱量 (Btu/小時)

$TI, TO$  = 畜舍內外氣溫 (°F)

再利用式 (3-38) 即可求出溫度調節通風量。

C、家畜快適通風的計算：<sup>(11, 27)</sup>

當畜舍內氣溫低於畜舍外或舍內的相對濕度低於舍外，因此時無法進行溫度或濕度調節通風，故需進行家畜快適通風。家畜的感覺溫度係受溫度、濕度、風速三者所影響。若相對濕度高時，家畜藉蒸散排出體熱即較困難，故感覺溫度較實際溫度為高。

又風速高時，對流係數較大，故畜體散熱較快，感覺溫度較實際溫度為低。本模式基於此原理，提高其通風量使感覺溫度較低，以減少高溫對家畜的影響。

根據 Midwest Plan Service<sup>(16)</sup> 研究指出家畜快適通風與家畜種類、大小及畜舍的型式有關係，本模式中假設快適通風率與舍內氣溫呈線性關係。

由上述 A 至 C 小節的計算過程中求出的通風量，需換算成電力以進行經濟分析。一般通風馬達所需電力可以下列通式表之。

$$E = k \cdot Q_v^n \quad (3-40)$$

式中：E = 電力 (度)

k, n = 係數

#### 4. 能量平衡方程式的推衍與計算：

利用能量平衡 (Energy balance) 方程式，配合建築、環境、材料等諸性質與氣象模擬等資料，即可算出畜舍內氣溫，與各種熱傳遞量及通風、加熱系統的容量。

能量平衡方程式得以一簡示表示之。即：

$$\text{獲得的熱量} - \text{散失的熱量} = \text{貯存的熱量變化} \quad (3-41)$$

一般畜舍模擬考慮的熱傳遞因素有六，計：

- (1) 家畜與設備產生的顯熱 (Sensible heat) 量。
- (2) 日射獲得量。
- (3) 壁面的熱傳遞量。
- (4) 通風與透氣所造成的熱傳遞量。
- (5) 材料的貯熱量。
- (6) 輔助加熱系統加熱量。

上述六項熱傳遞量如圖 (3-9) 所示，其計算均可利用已知條件，如模擬的畜舍外氣溫、家畜之顯熱發散量與材料特性等代入計算式中，再代入能量

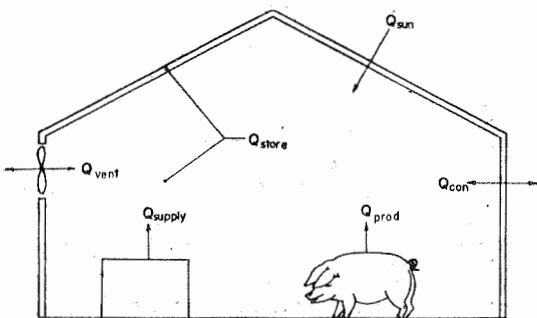


圖 (3-9) 畜舍熱收支示意圖

方程式 (式 (3-41)) 中得式 (3-49)，其中僅有畜舍內氣溫為未知數，由式 (3-49) 解出舍內氣溫，再代入上述六項計算式中即可分別求出其熱傳遞量。茲將各項熱傳遞計算式分述如次：

#### (1) 家畜的顯熱發散量 (Sensible Heat)：

家畜的顯熱發散量的多寡受環境溫度、相對濕度和自身的運動與健康情況及家畜的種類與體重等因子所決定。其中最重要的影響因子為氣溫與品種及體重等，如 ASHRAE<sup>(15)</sup> 與 Midwest Plan Service<sup>(16)</sup> 有詳細的資料。則家畜的顯熱發散量可以下式表示之。

$$Q_{prod} = Q_s (W, T) \times N \quad (3-42)$$

式中：Q<sub>prod</sub> = 畜舍內家畜單位時間顯熱發散量

W = 體重

T = 氣溫

N = 畜舍內家畜飼養頭數

Q<sub>s</sub> = 每頭家畜單位時間顯熱發散量

本文根據 ASHRAE<sup>(15)</sup> 的資料利用最小二乘法迴歸不同體重豬隻的顯熱發散量，以溫度二次式表示精確度較高，如圖 (3-10) 與表 (3-7) 所示。

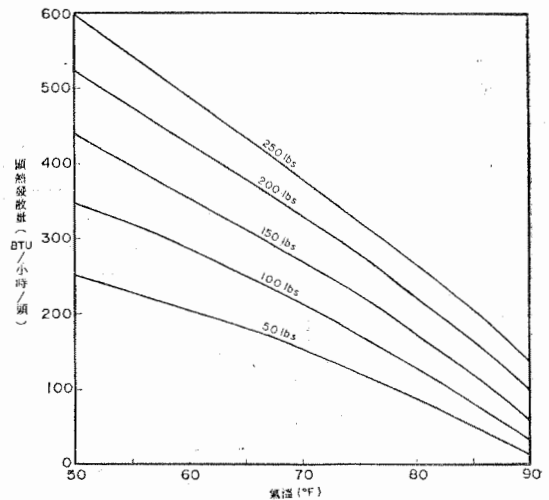


圖 (3-10) 不同體重豬體顯熱發散量與溫度關係圖

表 (3-7) 不同體重豬體顯熱發散量二次迴歸方程式

體重 (磅)	顯熱發散量 (Btu/小時/頭)
50	$272,8328 + 2,4991903T - 0,0599953T^2$
100	$480,0588 + 0,2192192T - 0,0571391T^2$
150	$663,0042 - 1,900788T - 0,0528528T^2$
200	$831,0544 - 3,860678T - 0,0471387T^2$
250	$1064,317 - 8,300562T - 0,0214270T^2$

(2) 畜舍所獲得日射量：

畜舍內所獲得日射量包含日射穿過壁面投射於畜舍內部及日射經壁面吸收而傳導到畜舍內的熱量，茲略述其推導過程如下：

(a) 壁面所貯存的熱量：

$$Q_{storej} = \frac{TS_{i,j} - TS_{i-1,j}}{2} \cdot SH_j \quad (3-43)$$

式中： $Q_{storej}$  = 壁面 j 所貯存熱量變化量  
 $TS_{i,j}$ ,  $TS_{i-1,j}$  = 壁面 j 在 i 時與前一小時日射效應使壁面增高的溫度與氣溫之差

$SH_j$  = 壁面 j 的熱容量 (Heat capacity)

(b) 經對流輻射向外發散的熱量：

$$Q_{oj} = HO_j \cdot TS_{i,j} \quad (3-44)$$

式中： $Q_{oj}$  = 壁面 j 向外流失的熱量

$HO_j$  = 壁面 j 外表面傳導度

(c) 經傳導對流與輻射進入畜舍內的熱量：

$$Q_{ij} = \frac{TS_{i,j}}{R_j - \frac{1}{HO_j}} \quad (3-45)$$

式中： $Q_{ij}$  = 壁面 j 向內流入畜舍的熱量

$R_j$  = 壁面 j 的總熱阻

將式 (3-43) 至式 (3-45) 與日輻射量代入式 (3-41) 得：

$$Q_{solarj} - Q_{ij} - Q_{oj} = Q_{storej} \quad (3-46)$$

式中： $Q_{solarj}$  = 壁面 j 所穿透之日射量，如圖 (3-11) 所示

由式 (3-46) 解得該小時 (i) 日射效應各壁面的等效溫度增加量為：

$$TS_{i,j} = \frac{Q_{solarj} + \frac{TS_{i-1,j} \cdot SH_j}{2}}{\frac{SH_j}{2} + R_j - \frac{1}{HO_j} + HO_j} \quad (3-47)$$

則畜舍內所獲得的日射量得以下式求之。

$$Q_{sun} = \sum_{j=1}^k (Q_{solarj} \cdot TR_j + \frac{TS_{i,j}}{R_j - \frac{1}{HO_j}}) A_j \quad (3-48)$$

式中： $Q_{sun}$  = 畜舍獲得日射量

$TR_j$  = 壁面 j 的穿透率

$A_j$  = 壁面 j 的面積

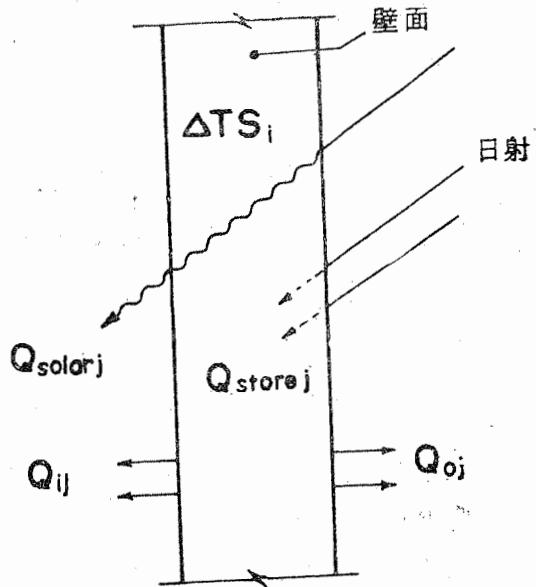


圖 (3-11) 日射量計算示意圖

(3) 畜舍之傳導熱傳遞損失：

可由式 (3-1) 計算求得。即：

$$Q_{con} = U_{total} A_{total} (TI_1 - TO_1) \quad (3-49)$$

式中： $Q_{con}$  = 傳導熱損失

(4) 通風所損失的熱量：

通風損失之熱量計算，假設畜舍內氣溫呈均勻分佈，熱損失量得以下式計算之。

$$Q_{vent} = 60 \times 0.24 \times Q_v \times (TI_1 - TO_1) / v \quad (3-50)$$

式中： $Q_{vent}$  = 通風熱損失量 (Btu小時)

$Q_v$  = 通風量 (cfm) 可由式 (3-38) 計算之

(5) 畜舍貯熱量的變化：

畜舍之貯熱性質與材料的特性和空氣性質有關，本模式中畜舍貯熱量變化包含兩部分，一為建築材料之貯熱量變化，可以下式求之。

$$Q_{store} = \frac{(TI - TI_{i-1}) + (TO_1 - TO_{i-1})}{2} \cdot \sum_{j=1}^k (SH_j \cdot A_j) + 0.24 (TI_1 - TI_{i-1}) \cdot Vol / v \quad (3-51)$$

式中： $Q_{store}$  = 畜舍貯存熱量變化量

$Vol$  = 畜舍內的容積

將式 (3-42), (3-48), (3-49), (3-50) 與 (3-51) 代入式 (3-41) 中得。

$$Q_{prod} - Q_{con} + Q_{sun} - Q_{vent} - Q_{store} = 0 \quad (3-52)$$

惟若畜舍內氣溫低於容許最低氣溫時，加熱量 ( $Q_{supply}$ ) 可以下表式之。

$$Q_{supply} = Q_{prod} - Q_{con} + Q_{sun} - Q_{vent} - Q_{store} \quad (3-53)$$

式 (3-52) 中  $TI_1$  為未知數，在計算機中無法以解析法直接求出，故以數值分析法 (Numerical analysis) 解之，本模式中採用類似半區間法 (Half-interval method) 解  $TI_1$ ，此法之優點為穩定性高不會發散，惟收斂速度較慢。茲將解法略予說明如下，如圖 (3-12) 所示。

(1) 首先假設畜舍內氣溫的初值為前一小時的氣溫，即  $TI_1^{(1)} = TI_{1-1}$ ，然各月的頭一天則以容許最低氣溫為初值。代入能量方程式，式 (3-52) 中，得：

$$DQ_1^{(1)} = Q_{prod} - Q_{con} + Q_{sun} - Q_{vent} - Q_{store} \quad (3-54)$$

(2) 式 (3-54) 中， $DQ_1^{(1)}$  若大於零則表示所假設氣溫過低，則給予一正增量  $DT^{(+)}$ ，則  $TI_1^{(2)} = TI_1^{(1)} + DT^{(+)}$ ，再代入式 (3-52) 中，得  $DQ_1^{(2)}$ ，比較  $DQ_1^{(1)}$  與  $DQ_1^{(2)}$  的絕對值，若前者較大則再重複計算，若後者較大則前者即為所求之氣溫。

(3) 若  $DQ_1^{(1)}$  小於零則表示所假設氣溫過高，需給予一負增量  $DT^{(-)}$ ，則  $TI_1^{(2)} = TI_1^{(1)} + DT^{(-)}$ ，再進行上述之計算。

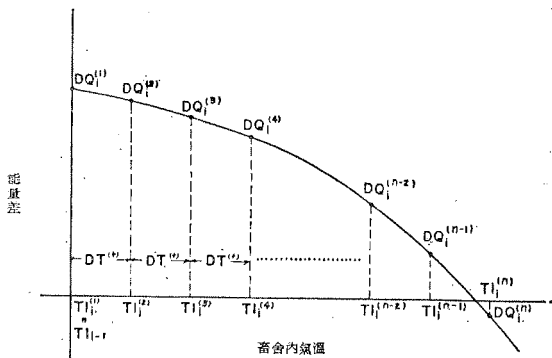


圖 (3-12) 能量平衡方程式圖解示意圖

#### 四、電子計算機之模擬例與結果討論

本例中以竹南畜產研究所的氣象資料模擬一密閉型肥育前期豬舍，其飼養密度為  $1.25$  頭 /  $m^2$ ，飼養頭數 400 頭，畜舍內容許最低氣溫  $15^\circ C$ ，最適

氣溫  $25^\circ C$ ，容許最大相對濕度 80%，畜舍的各部尺寸如圖 (4-1)。茲將其輸入資料詳述如下：

#### 4-1 輸入基本資料：

##### A. 氣象輸入資料：

採用竹南畜產研究所民國六十一年至六十八年氣象月報表，統計結果如表 (4-1)。

##### B. 環境設計輸入資料：

- 畜舍容許最低氣溫： $15^\circ C$  ( $59^\circ F$ )
- 畜舍最適設計氣溫： $25^\circ C$  ( $77^\circ F$ )
- 家畜顯熱、潛熱發散量計算式：  
設計體重：45 公斤  
顯熱 =  $480.0588 + 0.2192912 T - 0.05713191 T^2$  (Btu/小時/頭)  
潛熱 =  $503.3921 - 13.68911 T + 0.13785 T^2$  (Btu/小時/頭)
- 每棟畜舍飼養頭數：400 頭。
- 估計透氣率： $0.5^{(1)}$
- 最大通風率計算係數：166.0, 36700<sup>(27)</sup>
- 畜舍容許最大相對濕度：0.8
- 大氣壓：由標高 55 公尺，代入下式計算而得：

$$\begin{aligned} \rho &= \log^{-1} \left[ 1.47712 - \frac{h}{64000} \right] \times 0.4913 \\ &= \log^{-1} \left[ 1.47712 - \frac{180.45}{64000} \right] \times 0.4913 \\ &= 14.65 \text{ (psi)} \end{aligned}$$

$\rho$ ：氣壓 (psi)

$h$ ：標高 (呎)

- 緯度：北緯  $24.72^\circ$

##### C. 建築與材料輸入資料：

畜舍方位與各部尺寸及各壁面編號如圖 (4-1)。

- 畜舍容積： $1121.08 m^3$  ( $39590.6 ft^3$ )

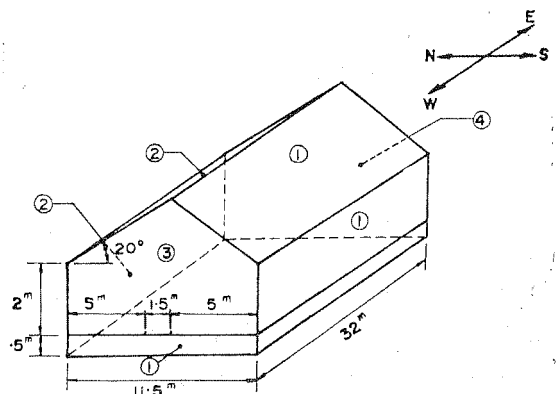


圖 (4-1) 設計畜舍尺寸及編號圖



表(4-1) 竹南畜產研究所氣象資料表

月別	月最 平均 最高溫 (°C)	月最 平均 最低溫 (°C)	月平均最高溫 標準差 (°C)	月平均最低溫 標準差 (°C)	日射量 比率	月平均最低 相對溫度 (%)	月平均最高 相對濕度 (%)
1	18.17	10.90	3.17	2.55	0.67	71.68	85.46
2	18.64	11.34	4.23	2.86	0.55	71.00	85.00
3	21.07	13.29	3.76	2.72	0.55	73.33	86.67
4	25.41	17.56	3.60	3.01	0.53	73.67	88.33
5	28.31	21.15	2.44	1.91	0.53	76.14	88.00
6	30.68	23.25	1.97	1.54	0.51	73.57	86.28
7	32.18	24.22	1.37	1.09	0.55	67.14	86.14
8	31.59	24.13	1.38	1.27	0.59	70.71	89.00
9	30.83	22.68	1.53	1.19	0.58	69.28	89.86
10	28.03	20.20	2.58	2.10	0.63	69.86	86.43
11	23.64	16.23	3.30	2.84	0.63	68.75	83.88
12	20.54	12.85	3.36	2.86	0.67	68.35	85.88

註：因竹南地區無日射記錄，故日射量比率採距離最近的臺北測站民國五十九年至六十三年之紀錄<sup>(4)</sup>，若無實際資料時，亦可大略估計之，一般市區在 0.6~0.8，平均約 0.70 高山、海濱則高達 0.87~0.92<sup>(2)</sup>。

- b. 屋頂數目：2
- c. 牆壁數目：4
- d. 基牆數目：1
- e. 天花板數目：0

上述的畜舍設計其中央留置走道 1.5 公尺，每欄長×寬 = 5 公尺× 3.2 公尺，每欄飼養 20 頭豬隻。即飼養密度 = 1.25 頭/m<sup>2</sup>。

f. 各壁面尺寸與材料性質：

表(4-2) 畜舍各壁面性質表

壁面	採用材料	面積 (m <sup>2</sup> )	RI	SHW	cosV	cosW	cosS	HI	HO	CIV	CIC
屋頂①	石棉浪板	195.81	0.21	0.6	0.9397	0	0.342	1.65	6.0	2.7527	0
屋頂②	石棉浪板	195.81	0.21	0.6	0.9397	0	-0.342	1.65	6.0	2.7527	0
牆壁①	四吋磚	64.0	0.8	7.6	0	0	1	1.65	6.0	2.7527	0
牆壁②	四吋磚	64.0	0.8	7.6	0	0	-1	1.65	6.0	2.7527	0
牆壁③	四吋磚	35.0	0.8	7.6	0	1	0	1.65	6.0	2.7527	0
牆壁④	四吋磚	35.0	0.8	7.6	0	-1	0	1.65	6.0	2.7527	0
基牆①	雙層四吋磚	-43.5	1.6	15.2	0	0	0	0	0	0	0

壁面	採用材料	KI	SHI	TINS	SD	KS	PI	CA	AB	TR
屋頂①	石棉浪板	0.16	0.047	25	4	8	0.9	0.9	0.93	0
屋頂②	石棉每板	0.16	0.047	25	4	8	0.9	0.9	0.93	0
牆壁①	四吋磚	0.16	0.047	6	0	0	1.0	0.9	0.93	0
牆壁②	四吋磚	0.16	0.047	6	0	0	1.0	0.9	0.93	0
牆壁③	四吋磚	0.16	0.047	6	0	0	1.0	0.9	0.93	0
牆壁④	四吋磚	0.16	0.047	6	0	0	1.0	0.9	0.93	0
基牆①	雙層四吋磚	0.16	0	0	0	0	-1.0	0	0	0

註：所有材料性質查自 ASHRAE FUNDAMENTAL 1977<sup>(15)</sup> 基牆的面積與 PI 值需以負值輸入。

隔熱材料：以保利龍為隔熱材料，每張 3 台尺× 6 台尺× 1 吋以 48 元計，故每平方呎時一原單價為 2.7527 元。

D. 經濟分析輸入資料：

a. 加熱系統成本：

每小時燃燒三升柴油之間接加熱燃燒器以 10,000 元計算。

效率：45%

柴油理論發熱量：33037.57 Btu/升

柴油價格：6 元/升

油料成本： $\frac{6}{33037.57 \times 0.45} = 0.000403581$   
元/Btu

加熱器成本： $\frac{10000}{3 \times 33037.57 \times 0.45}$   
 $= 0.2242116$ 元/Btu/小時

設計壽命：15年

b. 隔熱層設計壽命：20年

註：因保利龍材料性質極脆弱，故需置保護層以延長其壽命。

c. 通風系統成本：

採用順光 SK-18 送風扇，110V， $\frac{1}{4}$  HP，3105 cfm。

每臺尺以 2800 元計，打六五折計 1820 元。

通風系統成本 =  $\frac{1820}{3105} = 0.5861524$ 元/cfm

通風電力成本：1.5 元/度

通風所需電力 =  $\frac{\frac{1}{4} \times 0.74548}{3105}$   
 $= 0.0000600322$ 度-小時/cfm

通風設計壽命：15年

以上成本計算是以民國六十八年五月的物價為準。

4-2 輸出結果：

將 4-1 節所述各項資料輸入本模式中，以各種不同隔熱程度下，對各種成本的變動加以比較選出一最適當而經濟的溫、濕度設計，茲將所得結果分述如后：

A. 不同等效熱阻下隔熱層的分佈情況：

表 (4-3) 不同等效熱阻增量下隔熱層最適設計厚度 (吋) 與隔熱成本 (新臺幣元) 表

不 同 等 效 熱 阻 增 量	0	1.25	2.5	3.75	5	6.25
屋 頂①	0	0	1.0	1.0	1.0	2.0
屋 頂②	0	1.0	1.0	1.0	2.0	2.0
牆 壁①	0	0.5	0	0.75	1.0	2.0
牆 壁②	0	0.75	1.0	1.0	2.0	2.0
牆 壁③	0	0	0.5	0.5	1.0	1.5
牆 壁④	0	0.5	1.0	1.0	2.0	1.75
基 牆①	0	0	0	0	0	0
隔 熱 成 本 (元)	0	8,690.69	15,055.44	16,477.67	26,205.41	34,162.77

最初之等效熱阻 (無隔熱層) 經計算為 1.78  $\text{hr-ft}^2\text{-}^\circ\text{F/Btu}$ 。

每一次等效熱阻增量設定為  $1.25\text{hr-ft}^2\text{-}^\circ\text{F/Btu}$ ，不同等效熱阻增量經計算其最適隔熱層分佈如表 (4-3) 所示。

表 (4-3) 中等效熱阻愈高，則隔熱效果愈佳，惟其成本相對提高，本模式中假定若有天花板的設置時，隔熱層即自動加在天花板上，而屋頂則不設置隔熱材料，一般而言以天花板隔熱其效果較屋頂為高，且成本亦廉<sup>(29)</sup>。但臺灣一般畜舍均無天花板之設計，故在本例中亦未置天花板。隔熱初期成本變化如圖 (4-2)。

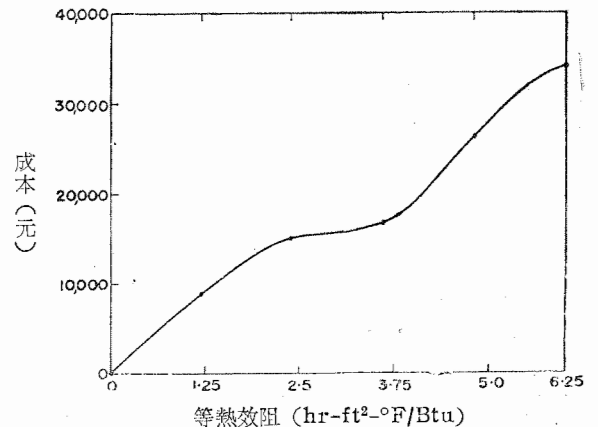


圖 (4-2) 隔熱初期成本變化圖

B. 平均每頭所需年成本：

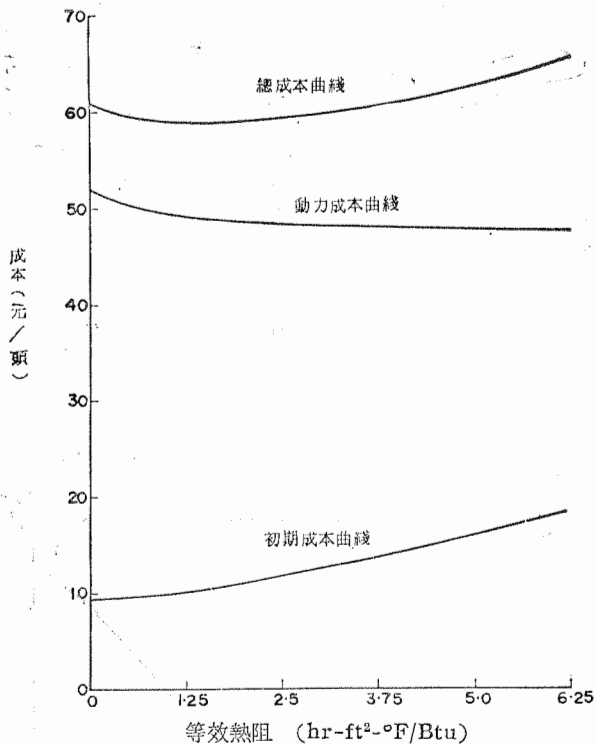
本模式將固定成本由折舊以及年利率計算每年攤還成本，與每年操作成本之和即為年計總成本，比較年計總成本最低者，即為所求之最適隔熱、通風與加熱設計。

表(4-4) 不同等效熱阻增量下每頭豬分擔各項成本表(新臺幣元/頭)

固定成本	熱阻增量 (hr-ft <sup>2</sup> -°F/Btu)	0	1.25	2.5	3.75	5	6.25
	加熱系統	1,709	0	0	0	0	0
通風系統	7,788	7,758	7,758	7,758	7,758	7,758	7,758
隔熱材料	0	2,380	4,123	4,513	7,177	9,356	17,114
小計	9,497	10,138	11,881	12,271	14,935	17,114	

操作成本	加熱系統	0.982	0	0	0	0	0
	通風系統	50,070	48,857	48,368	48,113	48,004	47,963
小計	51,052	48,857	48,368	48,113	48,004	47,963	
總成本	60,549	58,995	80,248	60,384	62,939	65,077	



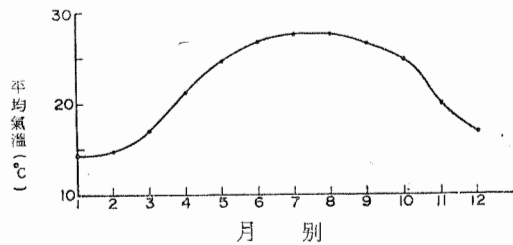
圖(4-3) 不同等效熱阻增量總成本變化關係圖

表(4-4)中顯示除無隔熱層時需要少量加熱以外(加熱時數32.7小時)其他具隔熱層設計時均無需加熱系統，又不同隔熱程度通風固定成本無甚差異，其通風所需電力成本變化亦極微，故一般而言隔熱層對通風系統的成本影響不大，惟不同隔熱層分

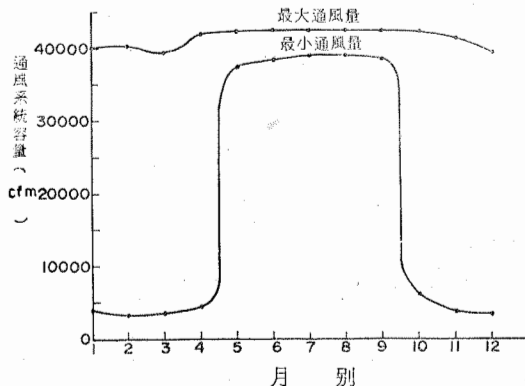
佈下隔熱固定成本變化極鉅，故成為設計上取決的決定性因素，其中以熱阻增量為 1.25 hr-ft<sup>2</sup>-°F/Btu 時年計總成本最低，此即為最適當的隔熱通風設計，此時通風系統所需容量為 42,676 cfm，每年消耗電力 13,028.43 度，需電費 19,542.65 元，佔年計總成本的 82.81%，故為年計總成本所佔比例最大的一項，其成本變化依熱阻之增加而略微減少，然隔熱成本却急遽增加，故若無需加熱系統時，以無設置隔熱層其成本最低。茲將表(4-4)繪如圖(4-3)。

表(4-5) 各月月平均氣溫與月間最大、最小通風量表

月別	月平均溫度 (°C)	最小通風量 (cfm)	最大通風量 (cfm)
1	14.36	4216	40020
2	14.70	3359	40684
3	17.03	3632	39522
4	21.23	4637	42178
5	24.46	37696	42344
6	26.58	38526	42676
7	27.40	39190	42676
8	27.38	39024	42510
9	26.25	38692	42510
10	23.38	6036	42344
11	19.51	3716	41514
12	16.61	3424	39522



圖(4-4) 每月平均氣溫分佈圖



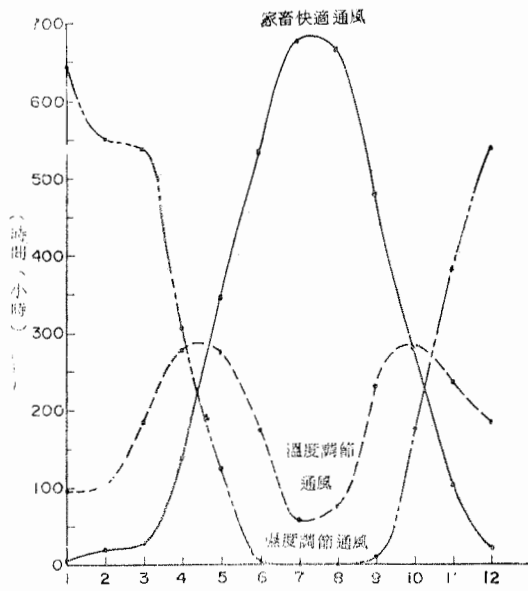
圖(4-5) 每月最大最小通風量變化圖

由上述可得最低年成本的熱阻增量為  $1.25\text{hr-ft}^2\text{-}^\circ\text{F/Btu}$ ，現將其各月份其通風成本的消長的情形與平均氣溫間關係型態分述如次。

C. 平均氣溫與通風量大小的關係(如表4-5)：

由表(4-5)與圖(4-4)和圖(4-5)觀察得知一月至四月與十一月至十二月間氣溫平均值約在  $20^\circ\text{C}$  以下此時最大與最小通風量相差約達  $36000\text{cfm}$ ，故通風量變化極大；當於五月至十月期間，平均氣溫均在  $20^\circ\text{C}$  以上，此時因氣溫過高故多已超過最適畜舍氣溫，無法行正常的溫度與濕度調節通風，而須行家畜快適通風，其變化範圍極狹窄約在  $4000\text{cfm}$  以內的故通風量一直維持在極高的狀態，通風電力成本在這六個月佔全年的比例極大。由表(4-7)得知其佔全年通風電力成本比例高達  $76.5\%$ 。

D. 各類型通風所佔時數的變化與氣溫關係：



圖(4-6) 通風操作時數關係圖

表(4-6) 每月各類型通風所佔時數表(單位：小時)

月 別	1	2	3	4	5	6
濕度調節通風時數	641.7	550.7	539.4	306.0	124.0	4.0
溫度調節通風時數	96.1	101.73	177.73	278.0	273.8	130.0
家畜快適通風	5.17	19.60	26.87	136.0	346.17	536.0

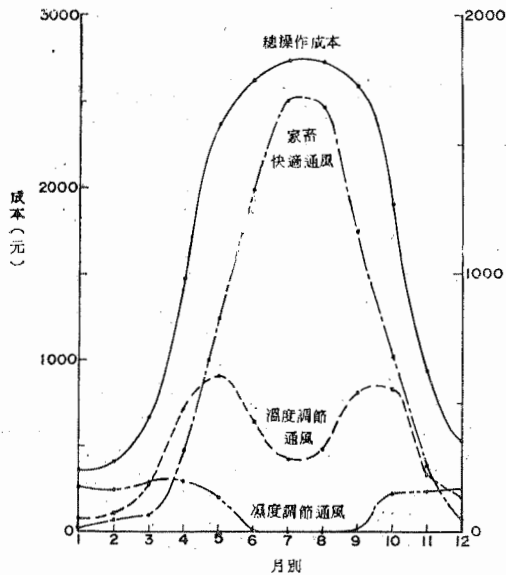
月 別	7	8	9	10	11	12
濕度調節通風時數	0	1.03	10.0	174.63	387.0	536.3
溫度調節通風時數	61.0	75.4	232.0	282.1	231.0	185.0
家畜快適通風	683.03	667.53	478.0	287.3	102.0	22.7

由表(4-6)與圖(4-6)觀察可知通風類型因氣溫的變化而相互消長，當月平均溫約在  $17^\circ\text{C}$  以下(一月至三月，十二月)時多行濕度調節通風，其運轉時間所佔比例高達  $90\%$  以上，其他溫度調節通風佔  $7\%$  左右，快適通風所佔比例則極微少。當氣溫漸高，溫度調節與快適通風所佔比例漸增，當到達  $24^\circ\text{C}$  左右(四月至五月與九月至十一月)時，溫度調節通風達於巔峯，三者所佔比例差異較小，平均溫高於  $24^\circ\text{C}$  時幾無濕度調節通風，溫度調節通風亦告銳減，唯有快適通風到達最高峯(六月至八月)，所佔比例高達  $90\%$  以上。

E. 各月份通風電力成本變化與氣溫關係：

表(4-7) 每月通風電力成本表(單位：新臺幣元)

月 別	1	2	3	4
濕度調節	263.75	228.45	290.37	288.13
溫度調節	77.38	98.02	279.47	709.08
快適通風	18.56	70.83	96.73	493.81
合 計	359.7	397.30	666.57	1491.02
月 別	5	6	7	8
濕度調節	212.12	8.56	0	3.52
溫度調節	906.02	631.14	216.51	267.67
快適通風	1262.97	1968.37	2517.55	2456.52
合 計	2381.11	2600.07	2734.06	2727.71
月 別	9	10	11	12
濕度調節	19.9	222.06	237.52	252.90
溫度調節	820.09	832.53	335.93	201.35
快適通風	1755.64	1047.64	369.37	81.75
合 計	2595.63	2102.23	942.82	536.0



圖(4-7) 通風和總成本變化圖

由表(4-7)與圖(4-7)可知通風電力的總成本與月平均溫成正比關係，即氣溫愈高通風電力成本亦愈昂貴，與上節所述同樣地，其各類型通風電力成本與圖(4-6)變化型態相類似，惟所佔比重則各不相同，由於濕度調節通風量極小，故其電力成本亦極少，各類型不同通風中自以快適通風所需電力成本所佔比例最大，計佔總通風電力成本之62%。

由上述討論中可知氣溫成為環境控制的重要影響因子，而濕度所佔比重較小。氣溫非但影響通風系統容量的大小，亦對通風所需電力成本有極大影響。

### 4-3 輸出結果討論：

本例中係以竹南畜產研究所為畜舍設計地點，模擬一密閉型肥育前期豬舍，其飼養密度為 1.25 頭/m<sup>2</sup>，飼養頭數為 400 頭，畜舍內的溫、濕度設計條件各為容許最低氣溫 15°C，最適溫 25°C，容許最大相對濕度 80%，其他輸入基本資料與輸出結果已分別於 4-1、4-2 節詳細說明，故在此不予贅述。

模式在不同的等效熱阻增量 (0, 1.25, 2.5, 3.75, 5.0, 6.25 hr<sup>-1</sup>ft<sup>2</sup>-°F/Btu) 根據設計壽命與年利率和成本資料分別算出其每年的攤還固定成本各為 9.5, 10.14, 11.88, 12.27, 14.94, 17.14 元/頭，動力成本各為 51.05, 48.86, 48.37, 48.11, 48, 17.96 元/頭，兩者之和即為年計總成本各為 60.55, 59.60, 60.38, 62.94, 65.08 元/頭，故當等效熱阻增量為 1.25 hr<sup>-1</sup>ft<sup>2</sup>-°F/Btu 時，總成本最低，故即取此時的隔熱、通風的設計為最適當且經濟之設計，茲予以詳盡說明如次。

因密閉型豬畜自身即有相當的隔熱效果，且自然透氣率 (Infiltration rate) 亦較低，故雖然在冬季時竹南地區的氣溫常低於 15°C，然因熱量損失較一般開放式舍畜為少，故即使在無隔熱情況下，亦僅需在一月與十二月份給予少量的輔助熱量，所需加熱時數為 32.7 小時。其他有隔熱層設計時則根本無需加熱，即可將舍畜內氣溫維持在 16°C 以上。

等效熱阻增量為 1.25hr<sup>-1</sup>ft<sup>2</sup>-°F/Btu 時，畜

表(4-8) 每月通風用電量表(單位:度)

月別	1	2	3	4	5	6	7
濕度調節	175.8	152.3	193.6	192.1	141.4	57	0
溫度調節	51.6	65.4	186.3	472.7	604.0	420.8	144.3
家畜快適	12.4	47.2	64.5	329.2	842.0	1,312.2	1,678.4
合計	239.8	264.9	444.4	994.0	1,587.4	1,738.4	1,822.7
月別	8	9	10	11	12	合計	
濕度調節	2.3	13.3	148.0	158.3	168.6	1,351.4	
溫度調節	178.4	546.7	555.0	224.0	134.2	3,583.4	
家畜快適	1,637.7	1,170.4	698.4	246.2	54.5	8,093.1	
合計	1,818.5	1,730.4	1,401.5	628.5	357.3	13,028.4	

舍各壁面隔熱層分佈如下，北面屋頂厚度一吋，東南面牆壁各加半吋，北面牆壁加 $\frac{1}{2}$ 吋，其他各壁面無需加隔熱層。所需隔熱材料共需保利龍 263.1 ft<sup>2</sup>，初期成本計 8 691 元。通風系統設計容量為 42,676 cfm，每年消耗電力 12 852.2 度 (Kw/hr)，佔年計總成本之 82.8%，故通風電力成本為總成本中最主要的項目。茲將各月份的通風用電列於表 (4-8) 並繪如圖 (4-7) 所示。

由表 (4-8) 可知通風所需電量與月平均溫有關係，若月平均溫愈高則通風所需電量亦愈高，兩者呈正比關係。然而濕度通風用電量的影響却極微。

通風依作用不同可分為家畜快適通風，溫度調節通風與濕度調節通風，其所需電力各佔全年通風用電量的 63%、27.9% 與 9.1%，其中以家畜快適通風所佔比例最大。至於三種通風運轉時間所佔比例亦隨各月份的份而有消長，當一月至三月與十二月時，月平均溫在 17°C 以下，此時以濕度調節通風運轉時間最佔優勢，達全月時間 90% 以上，惟因其通風量小，故所需電力亦小。四月、五月與九至十一月，月平均溫在 17°C 與 24°C 間，溫度調節通風達高峯，惟三型通風所佔運轉時間之比例大略相同。六至八月間，月平均溫在 24°C 以上，此時快適通風所佔運轉時間比例高達 90%，且因通風量極大故佔電力成本比例亦很大。

茲將上述討論作一結論如次：

(1) 本省氣候夏季炎熱而潮濕，因此密閉式、半密閉式甚至於開放式的畜舍均必須加以通風換氣以調節畜舍內的溫濕度，以提供家畜適宜的生存環境。

(2) 一般而言在無隔熱層設計時，必須在冬季稍予補充熱量，然若有隔熱層之設置時，則無須加熱即可使畜舍內氣溫常年維持在 15°C 以上。

(3) 本省因夏季氣溫高，故畜舍外氣溫常高於畜舍內氣溫，故必須行家畜快適通風。因快適通風量較大，故其所佔通風用電量比例極大，為通風動力成本最大支出者。

(4) 本省春、秋兩季氣溫適中，三種類型通風所佔運轉時間比例大致相同，惟其耗用電量依通風量大小比較，依次為家畜快適通風、溫度調節通風及濕度調節通風。

(5) 本省冬季氣候略低，在此期間主要進行濕度調節通風，需要少許輔助熱量或無需加熱。

(6) 通風所需電力成本佔年計總成本比例極大，

故通風系統設計的良窳與否，不惟對畜舍內部環境的優劣有直接、間接影響，且對電力成本的支出影響至鉅。

## 五、討論與建議

1. 自石油危機以來，能源短絀日甚一日，故節約能源乃成為社會的重大問題之一。本模式僅需要略予修改即可應用於一般住宅、工場以及其他農業設施——如：溫室、糧倉、人工氣候室 (Environment Chamber)——隔熱與通風和加熱系統設計，減少能源的耗費，節省國庫支出。

2. 本模式不惟可用於畜舍的溫度與濕度控制設計，同時亦可對現存的畜舍之隔熱或通風與加熱系統評估其功能，藉以作為改善現有設計的參考。

3. 本模式中等效熱阻，增量指定為 1.25 hr-ft<sup>2</sup>-°F/Btu，在年平均溫較低地區可略予以提高。反之，在年平均溫較高地區則可酌量予以降低，或可依自身需要取某一的特定的等效熱阻以設計在該等效熱阻下，其最適隔熱層分佈與通風和加熱系統。

4. 隔熱不僅可以在冬季時保持熱量，減少輔助熱的供應，而且在夏天時亦可抑制輻射熱之入侵，使畜舍內溫不致過高，而耗用電力來通風以降低氣溫，根據 Midwest Plan Service<sup>(16)</sup> 的報告顯示若牆壁與屋頂直接曝曬於日射下，其溫度較氣溫高 28°C，若未予以適當隔熱與通風，畜舍內必然酷熱難當，不利於家畜的生存。

5. 一般而言，天花板較屋頂的隔熱效果更佳，成本更低，故天花板需加隔熱層時，可應用本模式自行控制使屋頂無需再加隔熱材料。

6. 適當的基牆隔熱有助於保持地面溫暖 (冬季) 或涼爽 (夏季)，且可減少熱傳遞量，故本模式亦將基牆設置隔熱層之情形列入設計中。

7. 本模式僅分析隔熱、換氣及加熱之成本，至於家畜種類，體重在某一氣溫下之每日增重，攝食量及飼料換肉率則未加以考慮。若考慮上述因素可根據 Teter, Deshazer 和 Thompson<sup>(30,31,32)</sup> 所提出的數學模式加入本模式中，則更臻完整。

8. 有關環境，尤其是溫度與相對濕度對家畜的生理與生長的影響的研究，國外的論著較多，反觀國內因限於設備、人力、興趣，故在這方面的研究可謂鳳毛麟角。然而環境對家畜的影響正是設計者所不可或缺的基本資料，若無適當的資料，設計者

亦無能為力。臺灣地處亞熱帶，屬海島型氣候，其氣候特徵為高溫多濕，年平均溫 21.2°C 年平均相對濕度 88%，家畜長期生長於此特殊氣候型態下，必然已經能適應環境，故完全採用歐美、日本的研究資料作為設計上的參考或有未盡理想之處，故深切的期望國內亦能對這方面多加研究。

9. 本模式曾對竹南地區，飼養頭數 400 頭，飼養密度 1.25 頭/m<sup>2</sup> 的密閉式畜舍加以模擬，取容許最低氣溫為 15°C，最氣溫 25°C，容許最大相對濕度 80%，所得結果當未置隔熱層時需加熱 32.7 小時，若有隔熱層則無需加熱，故一般而言，僅需稍加隔熱層即無需加熱了。本研究中顯示氣溫的變化對通風量有極大的影響，且動力成本亦深受影響。

10. 本模式不但可用於密閉式畜舍的設計，亦可用於半密閉式畜舍的設計，因半密閉式畜舍牆壁間門窗較多，故其自然透氣率較高，且陽光亦可經門窗直接射入畜舍中，因此必須輸入所估計之自然透氣率，又門窗以及牆壁實體可視為兩不同之壁面分別輸入有關資料，即可用於模擬半密閉式畜舍。

11. 本研究依照理論推衍出的畜舍溫濕度控制之設計模式，用以設計畜舍之最適隔熱、通風與加熱系統。其效果有賴於實驗之印證，故冀望對此有興趣研究者能進行這方面的實驗以驗證本模式。

## 六、誌 謝

本研究進行過程中，承恩師王鼎盛副教授諄諄教誨，悉心指導，在有關知識上多所啓迪，初稿完成，又詳加審閱再三，給予核正，謹致由衷衷謝忱。又承農工中心給予經費補助及本所施嘉昌主任時予關注，均不勝感荷。

程式編寫期間承農工中心曹以松主任，林俊男先生惠予使用農工中心 Interdata 732 計算機，使程式順利編譯完成，臺糖公司吳松雄先生提供氣象資料，國立臺灣大學電子計算機中心惠予使用 UNIVAC 1100/E 計算機，特此併致謝忱。

## 七、參 考 文 獻

1. 林佑澤，劉貴芳，66 年，空氣調節概論，三民書局，p. 1~131.
2. 王錦堂，66 年，建築應用物理學，臺隆書店，p. 1~365.
3. 張漢聖，李庭槐，67 年，溫室型太陽能乾燥系統室內空氣溫度之預估，農工學報，第二十四卷，第

四期，p. 42~51.

4. 陳正改，林蘭貞，65 年，臺灣氣象與太陽能發展之關係，能源季刊，第六卷，第二期，p. 62~79.
5. 顏俊士，63 年臺灣各地之日射量估計問題，大氣科學，第一期，p. 72~79.
6. 蕭長庚，臺灣氣溫週期變動之分析，氣象學報。
7. 岡本正幹，1970，家畜、家禽的環境與生理，養賢堂，p. 1~10, 58~65, 71, 78, 84, 90, 95, 123~124.
8. 高橋正也，1972 年，豚の榮養と生理からみた適正環境，畜産の研究，第 26 卷，第一號，p. 158~162.
9. 長島守正，*et al.*，1977 年，畜産施設，文永堂。
10. 大後美保，1962 年，農業氣象學通論，養賢堂，p. 9~47.
11. Esmay, M. L., 1969. Principle of Animal Environment, AVI Inc., p. 1-90.
12. Sainsbury, D., 1970. Pig Housing, Farming Press Ltd., p. 1-70.
13. Mount, L. E., 1968. The Climatic Physiology of the Pig, Edward Arnold Ltd., p. 36-130.
14. Hirning, H. J., 1970. Design of Environmental Control Systems for Livestock, p. 1-119.
15. ASHRAE Handbook and Product Directory 1977. Fundamentals, 1977. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
16. Midwest Plan Service, 1973. Structures and Environment Handbook, Iowa State University, p. 133-184.
17. Kreith, F., 1966. Principles of Heat Transfer, Second-Edition.
18. Holman, J. P., 1976. Heat Transfer, Fourth-Edition, McGraw-Hill, Inc.
19. Thelkeld, J. L., 1970. Thermal Environmental Engineering, Prentice-Hall, Inc.
20. Albright, L. D., Scott, N. R., 1974. An Analysis of Steady Periodic Building Temperature Variations of Warm Weather Part I: A Mathematical Models, Trans. of ASAE, p. 88-92.
21. Albright, L. D., Scott, N. R., 1974. An Analysis of Steady Periodic Building Temperature Variations of Warm Weather Part II: Experimental Verification and Simulation, Trans. of ASAE, p. 93-98.
22. Wilson, J. D., 1972. Determining Transient

Heat Transfer Effects in Structures with the Use of a Digital Computer, Trans. of ASAE, p. 726-728, 731.

23. Jordan, K. A., Barwick, A. J., and Deshazer, 1968. Frequency Analysis of Weather for Estimation of Temperature Fluctuations in Animal Shelters, Trans. of ASAE, p. 98-103.

24. Phillips, R. E., Esmay, M. L., 1973. Systems Model of Summer Environment in Egg Production Facility, Trans. of ASAE, p. 152-156.

25. Buffington, D. E., 1978. Simulation Models of Time-Varying Energy Requirements for Heating and Cooling and Cooling Buildings, Trans. of ASAE, p. 736-741.

26. Albright, L. D., Scott, N. R., 1977. Diurnal Temperature Fluctuations in Multi-Airspaced Buildings, Trans. of ASAE, p. 319-326.

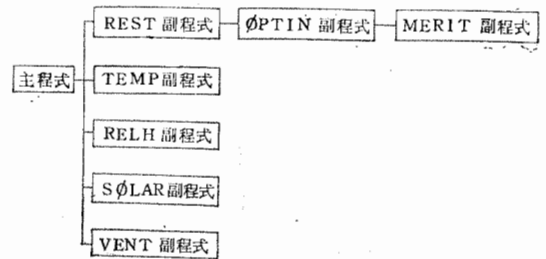
27. Christianson, L. L., Hellickson, M. A., 1977. Simulation and Optimization of Energy Requirements for Livestock Housing, Trans. of ASAE, p. 327-335.

28. Brooker, D. B. 1967. Mathematical Mode of the Psychrometric Chart, Trans. of ASAE, p. 558-560.

29. Teter, N. C., DeShazer, J. A. & Thompson, T. L., 1973. Operational Characteristics of Meat Animals Part I Swine, Trans. of ASAE, p. 157-159.

30. Teter, N. C., DeShazer, J. A. & Thompson, T. L., 1973. Operational Characteristics of Meat Animals Part II Beef, Trans. of ASAE, p. 740-742.

31. Teter, N. C., Deshazer, J. A. & Thompson, T. L., 1973. Operational Characteristics of Meat Animals Part III Broilers, Trans. of ASAE, p. 1165-1167.



上圖中為各程式間呼叫 (CALL) 的關係，茲將各程式的作用分述如下：

- 主程式：輸入資料，並呼叫 TEMP, RELH 及 SφLAR 副程式，以模擬氣象資料，呼叫 REST 副程式計算最適隔熱層分佈並解能量平衡方程式，計算成本，輸出結果。
- REST 副程式：計算各壁面的熱阻值，呼叫 φPTIN 副程式求出最適隔熱層分佈，與隔熱成本。
- φPTIN 副程式：找出最適隔熱層的分佈，並呼叫 MERIT 副程式。
- MFRIT 副程式：計算壁面的熱阻與成本。
- TEMP 副程式：由氣象資料模擬溫度的變化。
- 副程式：計算月平均相對濕度。
- SφLAR 副程式：由緯度，太陽的方位，各壁面的方向、吸收率、穿透率等計算各壁面所吸收的熱量各為若干並計算畜舍所獲得的穿透日射量。
- VENT 副程式：計算通風量。

