

客家委員會獎助客家學術研究計畫
結案報告

世界遺產客家圓樓熱環境分析
The analysis of thermal environment
of circular earth building

張智傑
高苑科技大學

中華民國 104 年 11 月 23 日

摘要

世界遺產客家圓樓採用傳統風水理論佈局，延用漢族傳統的內向型合院式的建築格局，獨特的建築格局和建造方式帶來許多獨特的生態特性，客家圓樓的內部環境一直有冬暖夏涼的說法，本研究將以電腦輔助方式分析客家圓樓內部環境的熱環境，可得知客家圓樓內部環境的特性。本研究對客家圓樓在不同外界溫度與風速下，利用場協同理論配合 COMSOL Multiphysics 套裝應用軟體對客家圓樓內部的環境進行熱環境的分析，其結果顯示對客家圓樓內部的人來說，冬天較夏天會有較舒適的感受，而客家圓樓內部環境的熱環境較一般民居擁有較佳的舒適性。本研究能對改善客家圓樓內的居住環境提供參考，並給予建築師在設計類似建築時設計的依據。

一. 研究目的

客家民居建築的風格和形式，在不同的歷史時期和不同的地區有不同的變化，有圓樓、圍龍屋、走馬樓、四角樓等，其中圓樓是很具代表性的一種，客家圓樓採用傳統風水理論佈局，延用漢族傳統的內向型合院式的建築格局，獨特的建築格局和建造方式帶來許多獨特的生態特性，以往有關客家圓樓的研究多從文化意涵以及建築結構方面的研究，較少針對內部環境舒適度的研究分析。環境的舒適度是建築內部環境最重要的部分，直接影響使用者的身心健康。關於客家圓樓的內部環境一直有冬暖夏涼的說法，研究客家圓樓內部環境的舒適性可得知圓樓內部環境的特性以及其形成原因。本研究將以客家圓樓為研究對象，對客家圓樓在不同外界溫度與風速下，利用場協同理論對客家圓樓內部的環境進行舒適性的分析，以期對改善客家圓樓內的居住環境提供參考。

二. 相關文獻之回顧

客家圓樓總數約3000餘座，以不加工的生土構築厚牆壁形成群居和防衛合一的大型樓房，是世界獨一無二的大型民居。客家圓樓乃用生土夯成高大厚重的外牆，構成圓形或方型土樓，土樓始建於13世紀以迄20世紀初期，它們成群存在，景象特殊，既不同於中國北方民居村寨的碉樓，亦不同於歐洲各地中古時期的貴族古堡。2008年7月聯合國教科文組織通過「福建土樓」為世界文化遺產[1]。

客家圓樓所在的閩西南山區，正是福佬與客家民係的交匯處，地勢險峻，人煙稀少，盜匪四起。聚族而居既是根深蒂固的中原儒家傳統觀念要求，更是聚集力量、共禦外敵的現實需要使然。集居住和防禦功能於一體的土樓就這樣應運而生了[2]。

永定土樓是以生土、沙石和木料為主要建築材料，以夯築土牆作承重和圍護結構的民居。永定土樓高大堅固、雄偉壯觀，具有良好的安全防禦、防風抗震、通風採光、陰陽平衡、適於生產生活和聚族而居等優異功能，外牆既作護圍，又具承重作用，沿著外牆內側，運用抬梁式木構架與外牆共同構成房間；房間朝向樓內天井，房間外的回廊及二層以上的走廊為貫通全樓的通道。

客家圓樓之優點為：

- 1 沒有角房間，沒有防衛死角。
- 2 各房間為同心圓分配均等。
- 3 同週長，圓形面積內部空間最大。
- 4 節省建材。
- 5 因圓形關係，建築構件材料統一。
- 6 只有一脊頂屋頂，施工較方樓容易。
- 7 圓對風之阻力小。
- 8 圓對地震抵抗力較強。

在客家土樓環境的研究方面，2008年袁炯炯等[3]實地進行客家土樓與一般民居的熱環境測試，其結果表明不論是在冬天還是夏天，在相同地域環境氣候下，客家土樓熱環境均優於一般民居。

2010年花長城等[4]針對方型土樓的風環境進行數值模擬，為土樓風環境的評估提供了可靠的依據。2010[5]年邵昆等人研究圓形土樓在數值風洞模擬中計算域的設置問題，得到這類型建築的計算域設置的參考標準。

1998年，在中國大陸學者過增元[6-7]就邊界層類型的流動，提出了一個新的構想，認為要強化熱傳效果，應該使速度向量與溫度梯度向量的夾角減小，也就是從場的角度對強化傳熱問題的討論。這一觀點被稱為場協同原理（Field Synergy Principle）。

閔斌[8]提出舒適性空調室內設計參數的優化，在不同設計參數下找出空間的最佳舒適度。王子介[9]提出室內熱適性的綜合定量評價方法與應用，用定量評價方法做綜合性的考量。楊萊等[10]利用場協同與對流換熱的穩定性的關係作深入研究。

因此本研究想利用場協同理論做客家圓樓熱舒適度分析，並用COMSOL 套裝應用軟體分析場協同角的特性，以研究客家圓樓之舒適度，以期對改善土樓內的居住環境提供參考。

三. 研究方法

環境熱舒適度之相關研究，近年來研究者已開始有所著墨，而分析環境舒適溫度及環境品質，必須考量區域性、氣候環境、人種、及生活習性等條件。人體對氣候寒冷及溫暖的感覺係源自於人體器官，環境變化對於人體的影響程度唯實際上舒適與否仍由人體周遭表面溫度的高低而決定，人體皮膚表面溫度和室溫間之關係，則會因空氣中熱移動所左右。本研究將針對客家圓樓之熱傳導、對流所引起之熱移動等各性質就理論上加以探討，並嘗試於環境所面對的不同風速、溫

度等條件下，全面模擬人體周遭溫度變化，將結果進行統計分析，以評估對人體周遭溫度之影響。

運用場協同理論來驗證所得到的數值解，說明透過速度場與溫度梯度場之間的相互配合可使熱傳係數增加，速度場與溫度梯度場之間的協同角越小其協同程度越好，因而得到較佳的熱傳係數，成功的利用簡化模擬不可壓縮的熱流場，不同的氣流方式會形成不同的速度場、溫度場，藉分析計算求得人體周遭溫度，進而嘗試由進風口位置、速度、大小、溫度等要件之控制，尋求一舒適之空調環境。

接下來說明有關熱對流以及場協同理論的研究方法：

熱對流能量方程式

在一般三維熱對流能量方程式[11]：

$$\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q} \quad (1)$$

二邊積分得：

$$\int_0^{\delta} \left[\rho C_p \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) - k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) - \dot{q} \right] dy = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_w \quad (2)$$

在此有三種熱源：

1. 流體中之真實熱源 \dot{q} ，如熱化學反應放熱或電弧等離子中之歐姆加熱等取 \dot{q} 為正，液滴蒸發取 \dot{q} 為負
2. 流體流動引起之當量熱源
3. 流體中多維導熱引起之當量熱源

以上對流換熱能量守恆方程的分析以及某些對流換熱的實例分析可以看到，對流換熱從本質上來說是具有內熱源的導熱，流體的運動起著定量熱源作用，對流換熱的強度取決於定量熱源的強度，它不但僅取決於流體與固壁的溫差、流動速度和流體熱物理和輸運性質，而且還取決於流體速度矢量的夾角。流

動引起的定量熱源項可以為正，也可以為負。所以流體流動可以強化換熱，也可以減弱換熱。

傳熱強化的場協同原理

速度場與熱流場協同的改善能夠使傳熱強，稱之為傳熱強化的場協同原理，對流換熱的強度，不僅取決於溫差和流動速度，而且還取決於流場與溫度梯度（熱流）場的協同，它們的協同愈好（夾角 $\beta(x, y, z)$ 愈小），則換熱強度愈高。

其向量化式為：

$$\int_0^{\delta_t} \rho C_p (\bar{u} \cdot \nabla T) dy = -k \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_w \quad (3)$$

無因次化時利用下列無因次化參數：

$$\bar{U} = \frac{\bar{u}}{u_\alpha}, \quad \bar{y} = \frac{y}{\delta_t}, \quad \bar{x} = \frac{x}{\delta_t} \quad (4)$$

$$\bar{T} = \frac{T - T_\alpha}{T_w - T_\alpha}, \quad \text{且 } T_w > T_\alpha \quad (5)$$

$$\nabla T = \frac{T_w - T_\alpha}{\delta_t} \nabla \bar{T}, \quad \text{Re}_x = \frac{\rho u_\alpha}{\mu}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{\kappa} \quad (6)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad \kappa = \frac{k}{\rho C_p}, \quad \text{Nu}_x = \frac{hx}{k} \quad (7)$$

無因次化後可改寫為：

$$\text{Re}_x \text{Pr} \int_0^1 (\bar{U} \cdot \nabla \bar{T}) d\bar{y} = \text{Nu}_x \quad (8)$$

向量純積為：

$$\bar{U} \cdot \nabla T = |\bar{U}| |\nabla T| \cos \beta \quad (9)$$

當 $\beta = 0$ 時達最大值：

$$S_t = \frac{Nu_x}{Re_x Pr} = I = \int_0^1 (\vec{u} \cdot \nabla T) d\bar{y} \quad (10)$$

其中 $S_t = \text{Stanton Number}$

$$\Rightarrow \int_0^1 (\vec{u} \cdot \nabla T) d\bar{y} = f(Re_x, Pr) \quad (11)$$

$$\therefore I = f(Re_x, Pr) < 1 \quad (12)$$

當熱對流換熱整個區域內，速度與熱流均勻並能處處同向

亦即 $\beta = 0$

則： $S_t = 1$

$$\Rightarrow Nu_x = Re_x \cdot Pr \quad (13)$$

Nu_x 與 Re_x 和 Pr 乘積之一次方成正比。

亦即： Nu_x 達最大值

現有對流換熱研究首先是基於牛頓冷卻定律定義的對換熱系數 h 來進行的，因為它反映了流體與固壁間對流換熱的強度。然後再把注意力放在對流換熱系數 h 與其他參數之間的關係，為了增加其普適性，引進一些反映換熱、流動、物理性質等無因次數組如 Nu 、 Re 、 Gr 和 Pr 等，再建立它們的關係式。現有換熱研究的另一特點是，由於對流換熱現象比較複雜，只能進行分類研究，如分為內流/外流、層流/湍流、受迫對流/自然對流以及某些特殊的流動如旋轉流、衝擊流等。

對於對流換熱問題，由於有流體流動必然存在著一個流體速度場，或稱流場。此外流體不均勻的，還存在一個流體溫度場，由於我們關心的是熱量輸運速率，因此在對論中用溫度梯度場(或熱流場)代替溫度場則更為方便。

因此場協同的特點為 $|\vec{U}|$ 與 ∇T 的夾角盡可能小； $|U|$ ， $|\nabla T|$ 盡可能均勻； $|U|$ ， $|\nabla T|$ ， $\cos \beta$ 大值的搭配。

場協同理論

利用場協同理論可知流場的溫差與流動速度協同越好也就是所夾角度 θ 越小，換熱強度越高舒適效果越好，協同角表示如下：

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{U \cdot \nabla T}{|U| |\nabla T|} \right) = \cos^{-1} \left(\frac{u(\partial T / \partial x) + v(\partial T / \partial y) + w(\partial T / \partial z)}{|U| |\nabla T|} \right) \quad (14)$$

在計算區域內速度向量與溫度梯度向量間的夾角之平均值稱為平均場協同角 (mean square filed synergy angle) 如方程式

$$\theta_m = \frac{\iint \theta dx dy}{\iint dx dy} \quad (15)$$

其中平均協同角越小，散熱效果越好，也就是說越容易達到最佳充填的效果。

L 為密閉流任選 6 點場協同均方根指標 (index of mean square root filed synergy angle)

$$L = \sqrt{\frac{\theta_1^2 + \theta_2^2 + \theta_3^2 + \theta_4^2 + \theta_5^2 + \theta_6^2}{6}} \quad (16)$$

其中 L 越低表示整體場協同效果越佳舒適度指標越高。

本研究係為利用場協同理論於客家圓樓熱舒適度分析，以研究客家圓樓之舒適度。場協同理論顯示場協同角越低表示速度場與溫度梯度場越平行對客家圓樓舒適就能產生較佳的效果，也就是說場協同理論可以用來評估客家圓樓舒適度，以提出建議給予設計者參考。

四. 研究架構

本研究係為利用場協同理論於客家圓樓熱舒適度分析，並用 COMSOL Multiphysics 套裝應用軟體分析場協同角的特性，以研究客家圓樓於夏冬之舒適度。有限元素數值模擬工具 COMSOL Multiphysics，是一套具備完整 CAD/CAE 模擬流程的視窗圖形化介面軟體，應用在兩相流的模擬上，提供堅實理論架構下的

模型與數值方法，能快速的提供完整的建模方案，大幅縮短我們對問題分析與研究上所需要的時間。場協同理論顯示場協同角越低表示速度場與溫度梯度場越平行對客家圓樓舒適就能產生較佳的效果，也就是說場協同理論可以用來評估客家圓樓舒適度，以提出建議給予設計者參考。

本研究架構如下：

首先選用COMSOL Multiphysics套裝應用軟體繪製出客家圓樓的建築模型，接著選擇內建物理模版、設定方程式係數/屬性設定、邊界條件設定、網格載入、開始分析、最後再從電腦分析結果整理數據提出完整的分析研究報告。

客家圓樓的建築模型

本文研究的圓形土樓建築模型如圖所示，圓樓的環數以一環為主。其模型剖面圖如圖1所示：

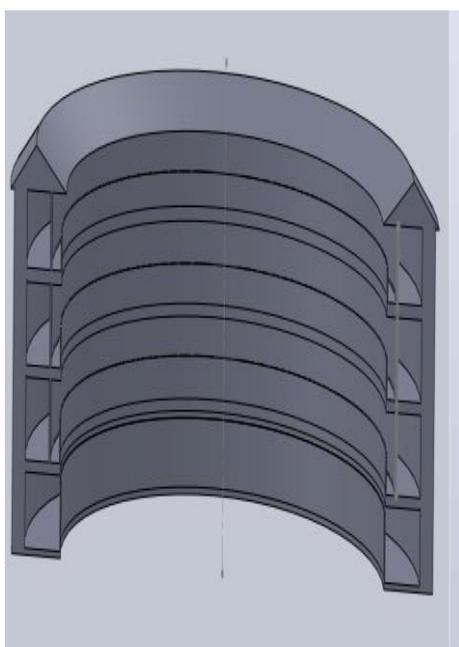


圖 1 客家圓樓的建築模型剖面圖

五. 分析結果與討論

本研究係為利用場協同理論於客家圓樓熱舒適度分析，並用 COMSOL Multiphysics 套裝應用軟體分析場協同角的特性，對客家圓樓在不同外界環境條件下，對客家圓樓內部的環境進行舒適性的分析，以提供分析結果對改善土樓

內的居住環境提供參考。

圖 2 和圖 3 是在不同溫度與風速條件下所得到的場協同角分析圖，如前面論述可知場協同角越低表示速度場與溫度梯度場越平行，對客家圓樓內部的人來說也會有較舒適的效果，圖 2 是模擬冬天的狀態，由圖可知此時的場協同角較低，因此對客家圓樓內部的人來說會有較舒適的感受。圖 3 是模擬夏天的狀態，由圖可知此時的場協同角較冬天來的高，因此對客家圓樓內部的人來說，冬天較夏天會有較舒適的感受。而根據本計畫所收集得到的資料[3]也顯示在冬季時客家圓樓的舒適性明顯優於一般民居，但在夏天的舒適性則無如此明顯優於一般民居，但在溫度變化劇烈的程度上也是較一般民居優異，這是因為在冬季時客家圓樓能有效阻隔冬季的冷空氣進入，但在夏天時反而熱空氣較無法排出所導致。但是室內環境的舒適性只有相對的優劣，無絕對的好壞，還必須考慮濕度、環境熱輻射、風速等，綜觀此項可得 PMV 值(熱感指標)，而比較此數值則可得知即使在夏季，客家圓樓的 PMV 值比起一般民居更加穩定，更符合人體舒適性的要求。

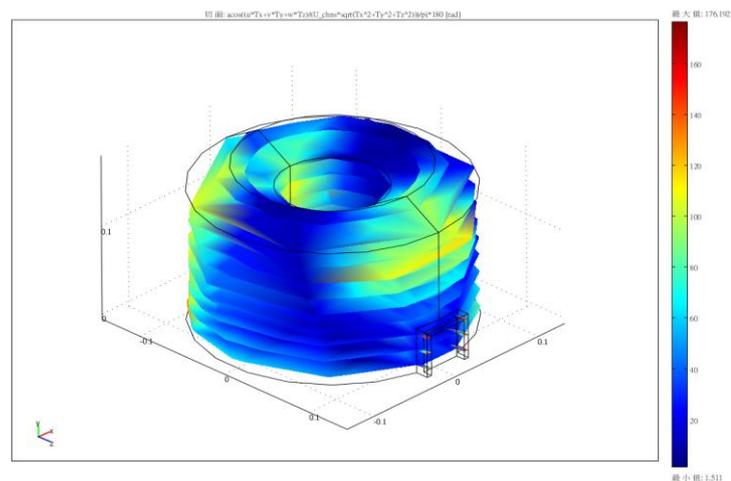


圖 2 冬天客家圓樓的場協同角

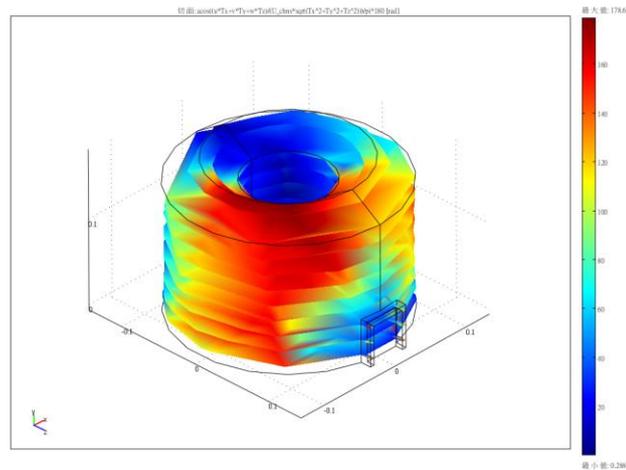


圖 3 夏天客家圓樓的場協同角

八. 參考文獻

- [1] 劉鴻喜， “福建土樓” 世界文化遺產—以永定客家土樓為例， 華岡地理學報， Vol. 22， pp. 65-76， 2008.
- [2] 林三郎， 世界遺產福建客家土樓的起源及演變， 臺灣源流， vol. 45， pp. 121-127， 2008.
- [3] 袁炯炯、冉茂宇， 土樓民居的室內熱環境測試， 僑大大學學報， Vol. 29， No. 1， pp. 91-93， 2008.
- [4] 花長城、彭興黔、朱海， 方型土樓風環境的數值模擬及評價， 鄭州輕工業學院學報， Vol. 25， No. 5， pp. 90-94， 2010.
- [5] 邵昆、彭興黔、劉春艷、徐剛， 圓形土樓在數值風洞模擬中計算域的設置， 鄭州輕工業學院學報， Vol. 25， No. 4， pp. 55-58， 2010.
- [6] 過增元， 對流換熱的物理機制及其控制: 速度場與熱流場的協同， 科學通報， Vol. 45， No. 19， pp. 2118-2122， 2000.
- [7] 過增元、黃素逸， 場協同理論與強化傳熱新技術， 中國電力出版社， pp. 1-39， 2004.
- [8] 閻斌， 舒適性空調室內設計參數的優化， 全國暖通空調製冷論文集， 1988.

- [9]王子介， 室內熱適性的綜合定量評價方法與應用， 南京師範大學動力工程學院， 2003.
- [10]楊茉、趙明、章立新、殷俊、呂樹申、華貴， 場協同與對流換熱的穩定性， 工程熱物理學報，2002.
- [11] Chang Shiuh-Ming, Chang Yuan-Chih, Li Wen-Chi, Lin Yu-Cun, Lu Wun-Ting, Ma Yi-Ling, Cai-Wan Chang-Jian, “ Optimal Air-Condition Analysis for High Speed Rail Carriage by Field Synergy Principle”, Journal of Professional Mechanical Engineers, Vol.4, No.4, pp.69-76, 2011.