

地板式出風空調系統設計對電影院室內熱舒適度之影響

黃建勝^{1,2*} 盧韋廷¹ 王祥璋¹

¹ 中原大學機械工程學系

² 中原大學熱管理研發中心

摘要

本研究旨在探討室內空間中地板式出風空調系統之進風口參數設計對室內熱環境的影響，研究場所選定在有密閉特性與階梯式地板高度的電影院室內空間，由於電影院內屬於人員密集、長時間滯留且通風效率要求較高的場所，室內空氣品質與人體的健康及熱舒適度具有高度相關性，因此具有重要的實務應用價值，本研究採用計算流體力學(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法，以 ANSYS Fluent 做為模擬軟體，建立三維電影院空間模型，針對不同進風口溫度、進風口風速以及進風口位置配置條件下，討論人體周圍溫度、氣流推進效果以及溫度均勻性的影響，在穩態模擬的過程中考慮人體的熱釋放，研究內容以人體坐姿頭腳溫差 ΔT_{ah} 小於 3°C 、不同行列人體之間溫差 T_{gap} 比較以及人體坐姿呼吸高度溫差做為評斷標準比較，研究結果發現當進風溫度為 18°C 、進風風速為 1.2 m/s 以及進風口配置為 C 配置時為最佳設計參數組合，此研究過程將有助於了解不同進風口配置對於階梯式地板電影院室內熱環境的影響，並提出對未來空調通風系統設計具有重要的參考建議。

關鍵字： 地板式出風、熱舒適度、溫度均勻性、計算流體力學

Keywords: under-floor air distribution, thermal comfort, temperature uniformity, computational fluid dynamics

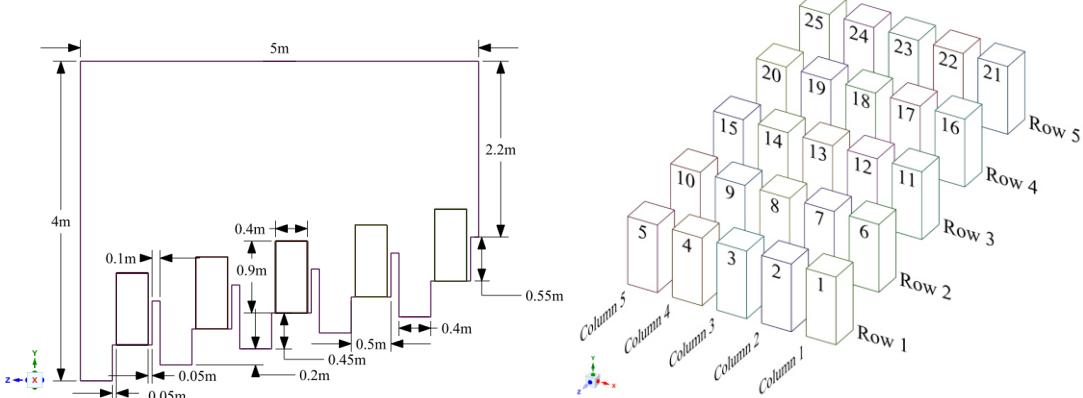
1. 研究背景與動機

根據 Li 等人研究指出[1]，建築的能源消耗約佔全球初級能源使用量的 40%，其中製暖通風空調(Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC)系統的消耗更超過建築能源消耗的一半以上，預計到 2050 年，建築節能潛力將高達 50%至 75%，兼顧節能與室內環境舒適性之平衡，已成為未來重要研究方向之一。然而，根據美國採暖、製冷與空調工程師學會(American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, ASHRAE)的標準[2]，現代人有超過 90% 的時間待在室內，特別是在辦公、學習以及娛樂等高人流密度的空間中，室內環境品質(Indoor Environmental Quality, IEQ)不良則容易引起疲勞、頭痛與認知表現下降等症狀[3]，電影院即屬於密閉型的高人流密度的空間，無法利用對外窗引入新鮮空氣，人體產生的熱量容易堆積在座位區，因此，需要耗費大量的強冷空氣，才能夠解決室內空間溫度不均的問題，另外，又因為

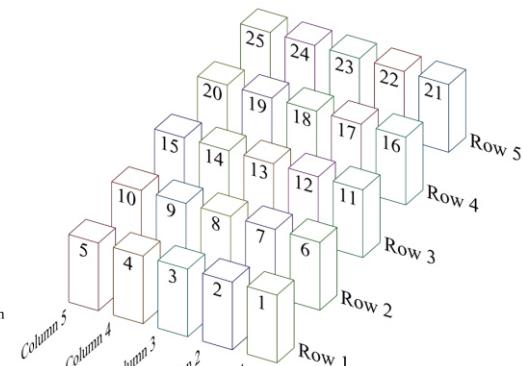
電影院有著低占用率、高天花板高度與大室內空間體積的特殊性，更使得電影院的室內環境受到嚴峻的新鮮空氣分佈、人體熱舒適度以及能源浪費等挑戰。

2. 研究方法

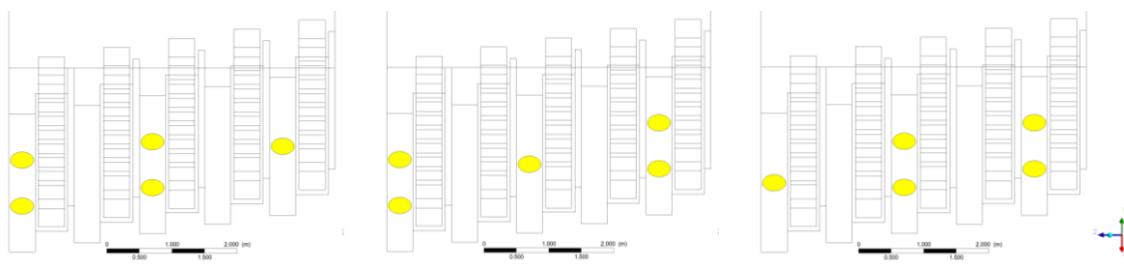
本研究參考 Nada 等人所作之研究[4]，使用計算流體力學模擬軟體 ANSYS Fluent 2022 R2 之 DesignModeler 建立物理模型，模型尺寸示意圖如圖一所示，人體位置示意圖如圖二所示，空間中設有 5 列座椅，座椅包含椅墊與椅背，每列座椅上皆有 5 個人體，共有 25 人。地板進風口面積為 0.1 m^2 ，以天花板排風口為直徑為 0.4 m 的圓，邊界設定上將座椅、地板以及天花板皆設定為絕熱邊界，四周牆壁設定為 Symmetry，人體設定為 Solid Zone，以體積發熱的方式作為室內熱源，在標準室內環境中，人體於坐姿進行輕度活動時的總發熱功率為 95 W ，人體體積為 0.144 m^3 (長 $0.4\text{ m} \times$ 寬 $0.4\text{ m} \times$ 高 0.9 m)時，經換算即可得出每個人體體積熱通量為 660 W/m^3 ，研究中以五種進風溫度(14°C 、 16°C 、 18°C 、 20°C 、 22°C)、四種進風風速(0.4 m/s 、 0.8 m/s 、 1.2 m/s 、 1.6 m/s)以及三種進風口位置配置(A、B、C)組合，三種進風口位置配置示意圖如圖三所示，並以腳踝高度溫度 T_{ankle} 與頭頂高度溫度 T_{head} 之溫差 ΔT_{ah} 量化座位區溫度分佈，判定各項進風參數組合對人體頭腳溫差之影響，最後提出最佳進風條件之設計建議。



圖一：模型尺寸示意圖



圖二：人體位置示意圖



(A)2-2-1

(B)2-1-2

(C)1-2-2

圖三：進風口配置示意圖

本研究主要將會考慮以下質量守恆、動量守恆以及能量守恆方程式[4]：

質量守恆方程式(Mass conservation equation)

質量守恆方程式又稱連續方程式(Continuity equation)，在流體力學計算過程中必須保持質量守恆定律，意即進入控制體積的質量必須等於離開控制體積的質量，此定律將寫成以下方程式(1)：

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

其中 U_i 為時間平均速度。

動量守恆方程式(Momentum conservation equation)

動量守恆方程式為在流體力學中，描述流體運動的核心方程式，其建立基於牛頓第二運動定律(Newton's Second Law of Motion)，此定律將寫成以下方程式(2)：

$$\rho U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij} \right] \quad (2)$$

其中 ρ 為流體密度， P 為靜壓， μ 為黏度。

當中又以理想氣體方程式作為 P 與 ρ 之關係式，理想氣體方程式寫成以下方程式(3)：

$$P = \rho RT \quad (3)$$

其中 T 為時間平均溫度。

方程式(2)中的雷諾應力(Reynolds stresses) τ_{ij} 被定義為以下方程式(4)：

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (4)$$

其中 u'_i , u'_j , T' 代表速度與溫度的脈動分量， $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 為平均雷諾應力， δ_{ij} 為克羅內克爾 delta (Kronecker delta) 符號， k 為紊流動能，當中紊流黏度 μ_t 被定義為以下方程式(5)：

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

其中 ε 為紊流耗散率， C_μ 為紊流模型常數，將由模擬軟體以 Realizable $k-\varepsilon$ 紊流模型計算[5]，該模型如下所示，由 k 方程式(6)及 ε 方程式(7)所組成：

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k u_j \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (6)$$

其中 G_k 為由平均速度梯度產生之紊流動能， G_b 為浮力產生之紊流動能， Y_M 為可壓縮膨脹對耗散率的修正， S_k 為 k 方程式中使用者自訂源項。

$$\rho \frac{\partial}{\partial x_j} (\varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{v\varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (7)$$

其中 S_ε 為 ε 方程式中使用者自訂源項，常數 $C_2 = 1.9$, $\sigma_k = 1.0$ and $\sigma_\varepsilon = 1.2$. $C_{1\varepsilon} = 1.44$ 。

能量守恆方程式(Energy conservation equation)

能量守恆方程式是描述在流體力學中能量轉換與傳遞的統御方程式，基礎是熱力學第一定律，寫成以下方程式(8)：

$$\rho c_p U_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\lambda \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho c_p \overline{u'_i T'} \right] \quad (8)$$

其中 λ 為熱擴散係數， $-\rho c_p \overline{u'_i T'}$ 為紊流熱通量。

本研究網格生長形狀主要以四面體網格(tetrahedral mesh)為主，透過改變全域網格大小、進排風口網格大小、人體網格大小、座椅網格大小以及人體邊界層等不同網格數量，進行網格品質獨立性分析，分析結果如表一所示，並與 Nada 等人所作之數值模擬研究[4]中 Fig. 10 之 Line 1 的溫度與速度分佈進行比對，Case 1 的網格數量為 193,955 個、溫度誤差為 2.01%、速度誤差為 499.57%，Case 2 網格數量提升至 305,616 時、溫度誤差為 1.49%、速度誤差為 333.40%，Case 3 網格數量為 374,006 個、溫度誤差為 0.45%、速度誤差為 -3.43%，Case 4 網格數量為 674,912 個、溫度誤差為 0.13%、速度誤差為 11.29%，Case 5 網格數量為 1,237,590 個、溫度誤差為 -0.06%、速度誤差為 28.89%，可觀察出網格數量增加時，溫度誤差逐漸減小，而速度誤差卻在調整至 Case 4 及 Case 5 回升，由此可得 Case 3 為權衡溫度誤差與速度誤差後之最佳網格數。

表一：網格品質獨立性分析結果

Case	1	2	3	4	5
網格數量	193,955	305,616	374,006	674,912	1,237,590
溫度誤差(%)	2.01	1.49	0.45	0.13	-0.06
速度誤差(%)	499.57	333.40	-3.43	11.29	28.89

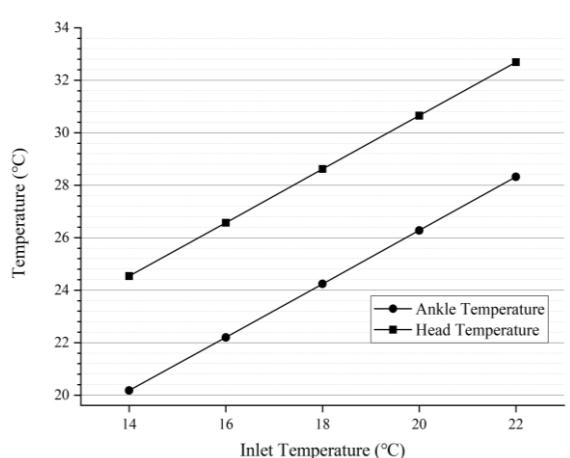
3. 結果與討論

以地板高度以上 0.1 m、人體中心距離座椅前方 0.05 m 位置取點做為人體坐姿腳踝溫度 T_{ankle} 的量測位置，人體高度以上 0.01 m 之人體中心位置取點做為人體坐姿頭頂溫度 T_{head} 的量測位

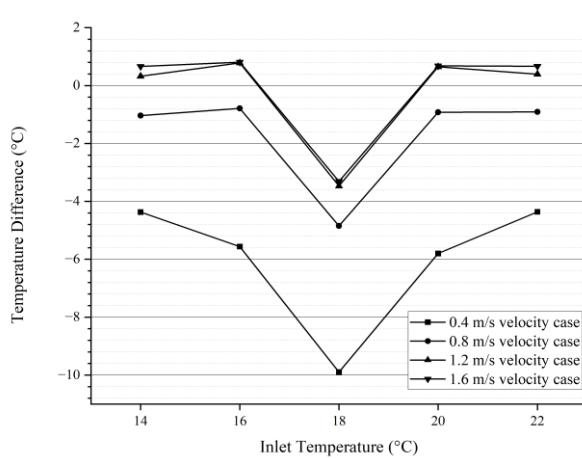
置，計算 T_{ankle} 與 T_{head} 的溫度差 ΔT_{ah} 做為判斷標準，並以 ISO 7730 [6]之建議值 3°C 做為判斷的臨界值， ΔT_{ah} 大於 3°C 即視為人體周圍環境有不舒適感。

如圖五人體頭腳位置溫度折線圖所示，不同進風溫度之間， T_{ankle} 的增幅約略相等於進風溫度的增幅，以進風風速 0.4 m/s 之 A 配置搭配不同進風溫度討論， 14°C 與 16°C 之第一位人體的 T_{ankle} 相差 2.02°C ， 16°C 與 18°C 之第一位人體的 T_{ankle} 相差 2.04°C ，另外，在單進風口列中，第三行人體，如圖二之第 3、13 和 23 號人體的 T_{ankle} 極度接近進風溫度，在無進風口列中，由於沒有直接從地板進入空間的進風氣流，因此出現 T_{ankle} 略高於 T_{head} 的現象，在雙進風口列中，靠近空間中央人體的 T_{ankle} 較低，推測出靠近進風口能夠有效降低人體部位溫度。

不同進風風速之間，在無進風口列中在四種進風風速條件下，人體坐姿頭腳溫差 ΔT_{ah} 均小於 3°C 以內，說明進風氣流動量衰減後對人體局部熱環境的影響較小，在單進風口列中，如圖六所示，第三行人體的 T_{ankle} 呈現明顯低溫，當進風風速為 0.4 m/s 與 0.8 m/s 時， ΔT_{ah} 從約 10°C 大幅降至 5°C ，當進風風速增加至 1.2 m/s 與 1.6 m/s 時， T_{head} 下降幅度幾乎停滯， ΔT_{ah} 僅能進一步縮小至約 3°C 至 4°C ，在雙進風口列中，進風風速為 1.2 m/s 以上時，可維持 ΔT_{ah} 於最舒適區間 0.5 至 2°C 。



圖五：A 配置下進風風速 0.4 m/s 之不同進風溫度案例之人體頭腳位置溫度折線圖



圖六：A 配置下單進風口列人體坐姿頭腳溫差折線圖

4. 結論

綜合以上模擬結果可以得出，進風溫度為主要決定室內溫度基準的參數，當進風溫度過低時雖可快速降低 T_{ankle} ，但容易造成 ΔT_{ah} 過大，因此建議進風溫度為 18°C ，進風風速則主要影響進風氣流流動距離，當進風風速為 1.2 m/s 時，可將絕大多數 ΔT_{ah} 下降至約 3°C ，進風口位置配置則影響室內空間進風氣流流動方向，進而影響人體坐姿頭腳溫差 ΔT_{ah} ，C 配置之 ΔT_{ah} 最小且分布最均勻，因此，本研究建議以進風溫度為 18°C ，進風風速為 1.2 m/s ，搭配 C 配置之進風口位置，做為地板式出風空調系統之最佳設計組合。

5. 參考文獻

- [1] Y. Li, L. Li, X. Cui, P. Shen, Coupled buildings simulation and CFD for real-time window and HVAC control in sports space, *J. Build. Eng.*, Vol.97, 110731, 2024.
- [2] 陳希立，空調通風換氣與節能效益探討，2020。
- [3] S. Flagner, S. Schiavon, N. Kok, F. Fuerst, D. Licina, A. Loder, S.A. Rahman, F.A.J.L. Scheer, L. Wang, G. Weeldreyer, H. Pallubinsky, Ten questions concerning the economics of indoor environmental quality in buildings, *Build. Environ.*, Vol.282, 2025.
- [4] S.A. Nada, H.M. El-Batsh, H.F. Elattar, N.M. Ali, CFD investigation of airflow pattern, temperature distribution and thermal comfort of UFAD system for theater buildings applications, *J. Build. Eng.*, 274-300, 2016.
- [5] ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide.
<https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node60.htm>
- [6] ISO 7730, Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria, 2005.