

熱浮力效應對手術房污染散佈的影響

The Effect of Thermal Buoyancy on the Pollutant Distribution in an Operation Room

黃建民¹、李鎮谷²

Jeng-Min Huang¹, and Chen-Ku Li²

國立勤益科技大學冷凍空調與能源系

Department of Refrigeration, Air-Conditioning and Energy Engineering,
National Chin-Yi University of Technology

¹E-mail : jmh@ncut.edu.tw

²E-mail : asusj502@gmail.com

摘要

本研究以數值計算探討下吹式進風的醫院手術室中，不同進風速度與不同無影燈間距下的污染散佈情況，評估規範對風速的建議是否恰當。統御方程式為包含熱浮力效應的動量方程式，以 Pseudo-transient 的方法計算穩態的流場及濃度場。計算結果顯示在低風速時，熱浮力效應相當強烈，考慮熱浮力與不考慮的計算結果差別很大；若以手術區平均污染濃度為污染源的 1% 做為潔淨標準，即使無影燈的間距拉大到 0.6m，依然無法達到規範的要求；在無影燈間距為 0.3m 且出風速度 0.3m/s 時，因受到無影燈及熱浮力的影響，病人身體上方的平均氣流流速不到 0.2m/s 且溫度比出風溫度高 2 度，對病人失溫的影響沒有那麼大，因此建議將出風速度修改成 0.3m/s。

關鍵字：手術室、出風速度、無影燈間距、污染濃度、熱浮力

Abstract

This study numerically investigates the pollutant distribution at different downward inlet air speeds and gaps between shadow-lamps in a hospital operation room. The purpose of the investigation is to estimate the inlet air speeds suggested by standards. The governing momentum equations include the thermal buoyancy effect. The steady flow and concentration fields are calculated by pseudo-transient method. The computational results show that the buoyancy effect must be considered, especially at low inlet air speeds. When the average concentration at operation region is 1% of pollutant sources, the inlet air speeds suggested by standards cannot be achieved even if the gap of two shadow lamps is 0.6m. When the gap between two shadow lamps is 0.3m and the inlet air speed is 0.3m/s, the average velocity above the patient's body is less than 0.2m/s and the temperature is 2°C higher than inlet air, and does not strong affect to the health of patients. We suggest that the suggested inlet air speed in the standard may increases to 0.3m/s.

Keywords: operation room, inlet air speed, the gap between the shadow lamps, pollutant concentration, buoyancy effect

1. 前言

手術室的空調設計及換氣率一直遵循工業用無塵室的規範，然而在工業潔淨室所應用的大風量且高風速的出風，其保護對象是產品而非病患，將工業潔淨室的規範應用在手術室並不適用 [6]。美國 2006 年版本的「醫院和衛生設施設計與建造指南」開始採用了外科手術局部送風裝置，並在附錄中建議送風流速為 0.13~0.18m/s [1]。不同於工業用無塵室，人不能視為製程設

備，手術中低體溫可引起神經外科手術的組織含氧不足造成手術的甦醒延遲和寒顫，也可引起有機體對低溫的反應，嚴重者可危及生命，且病人低體溫的預防比處理更為重要。國外手術讓病人使用保溫毯可使體溫維持在正常水平，避免因進入手術室後的環境因素使病人體溫大幅度降低 [2]。手術室的送風溫度常低於室溫，因為手術室醫護人員穿著無菌服同時曝露在手術室無影燈的高熱量下，從舒適角度考慮是需要的，如採用

上送風下回風氣流佈置對手術傷口的降溫效應會有更大的關聯性，手術台正處於冷氣出風口的下方，乾冷空氣直接下降到傷口組織處，雖可抑制細菌的快速滋長，但使病人全身降溫而大幅降低人體免疫系統的功能對手術感染是個已知的風險因素[5]。室內熱源可形成自下向上運動的浮升氣流，此時室內存在向上運動的浮升氣流和向下運動的空調氣流，兩股氣流相互作用力改變空調氣流下降路徑，甚至改變非等溫氣流的流動軌跡[4]。潔淨手術室空調通風設計依據 ASHRAE Standard 170[3]建議應用在手術室的層流，其初始風速控制在 0.15m/s ；Lo [7]運用 CFD 方法進行手術室污染物控制研究，該研究假設手術室為等溫，而忽略了室內重要的熱浮升作用的影響。Fountain[8]等人則介紹使用 PMV 和 PPD 兩種指標來探討熱舒適度，提出舒適度是個人對所處溫度環境展現的滿意程度，基本上是一種主觀的認定。關於醫療建築當中，美國冷凍空調學會 (ASHRAE) 於 ASHRAE Handbook- HVAC Applications[9]中提供醫院空調設計之重要參考，其中包含室內外環境條件、房間壓力設立等任何可能造成病人健康考量之項目，並且明確提出室內環境控制參數建議值。Chow[10]、[12]等人藉由 CFD 來模擬改變室內送風風速以及移動無影燈，對於手術室室內氣流所造成的影響，由研究結果發現改變室內送風風速以及移動無影燈，則會影響帶菌物質在空氣中的活動，而同時亦增加感染之風險。Memarzadeh[11]等人則運用 CFD 氣流模型和微粒子追蹤法來比較採用不同的通風系統對於手術區域和準備區域微生物粒子沉積的危險性，結果認為每小時換氣次數不如通風設計重要。

目前 CFD 軟體應用於潔淨室，大多分析一些特定模型潔淨室，並沒有探討熱浮力效應對污染排除的影響。本文針對手術中人員及設備存在的熱源所產生自然對流造成浮力效應對室內氣流產生影響進行研究，採用 CFD 軟體探討不同進風速度及無影燈間距對典型手術室內流場及污染濃度的影響，考慮在有熱浮力的條件下，評估美國「醫院和衛生設施設計與建造指南」建議的送風速度是否能突破熱浮力而有效的將污染物帶離手術區域。

2. 物理模型及邊界條件

本研究模擬的手術室模型，其平面圖如圖 1 所示。手術室長 8.45m、寬 6.4m、高 3m。此手術室進風口集中在天花板，總面積為 12.15m^2 ，

回風口分布在四面牆下，手術台位於進風口正下方，假設室內人員為醫護人員 4 人、病人 1 人，而無影燈位於手術台兩側上方 1.3m 處，2 組燈共 4 盞，其發熱量為 600W。本研究將手術區域分為三個剖面(如圖 2 所示)，以便分析在不同條件下，各個剖面污染物濃度的變化。

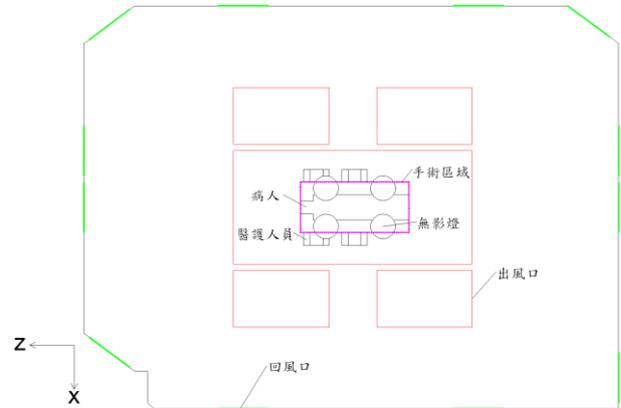


圖 1.手術室平面圖

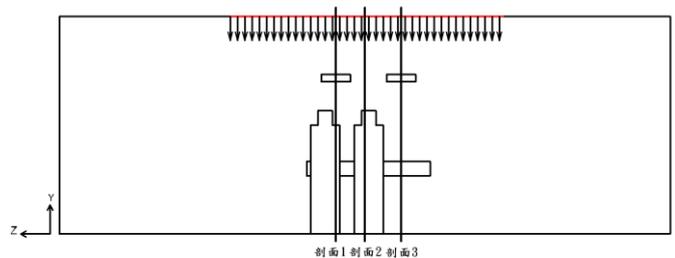


圖 2.手術室側面圖

本研究假設如下：

- (1) 假設空氣流動為穩態且不可壓縮，除了密度外，各物理性質不隨溫度及速度而變。
- (2) 假設醫護人員雖穿手術衣，因開刀時間較久，仍有細菌釋出。
- (3) 假設醫護人員沒有走動。
- (4) 假設細菌在空氣中隨氣流運動，不會對空氣流動造成阻礙，可視為氣體的一部分，因此以濃度來表示細菌分佈。

本研究的邊界條件設定如下：

- (1) 新鮮空氣進風口，設為「入口邊界」，風速為設定條件，新鮮空氣為 100%，污染物為 0%。
- (2) 四面的牆壁下的回風口，設定為「出口邊界」，速度、溫度及濃度由程式計算而得。
- (3) 病人及醫護人員的身體，設定為「壁面邊界」，速度以「牆函數」計算，假設病人發熱量為 100W，污染物釋放為 100%，醫護人員發熱量為 150W，污染物釋放為 20%。
- (4) 其他固體邊界皆為「壁面邊界」，速度以牆

函數計算，溫度梯度為零（絕熱），空氣及污染物濃度為零。

3. 數值方法及網格建立

本研究選用商業軟體 STAR-CD 來計算手術室的模擬，使用到的方程式包含連續方程式、能量方程式、動量方程式及質傳方程式，其中的對流項是採用 Upwind scheme，數值迭代的方法採用 SIMPLE method 的假暫態法 (pseudo transient)，紊流模式採用 k-ε High Reynolds Number method，收斂標準則以速度、壓力、紊流動量殘餘值為 10^{-5} 作為基準。網格建立採用結構網格分區塊生成，可解決複雜的幾何，而手術區是主要探討的區域，所以網格生成較密，網格分布如圖 3 所示。

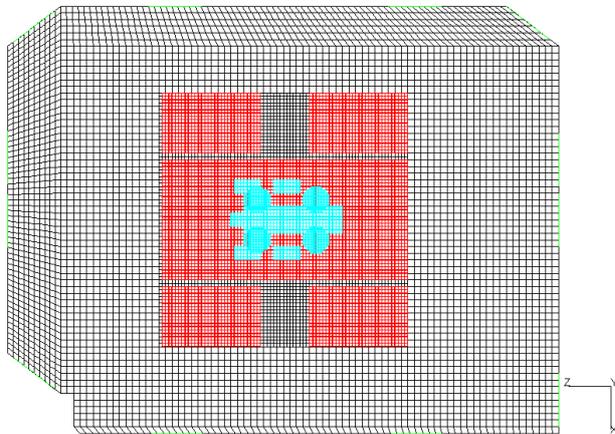


圖 3.網格分佈圖

4. 結果與討論

本研究定義剖面 1 為無影燈、醫護人員、病人同時存在的剖面，剖面 2 為醫護人員與病人同時存在但不包含無影燈的剖面，剖面 3 為無影燈與病人同時存在但不包含醫護人員的剖面。(如圖 2 所示)

圖 4-1 是不同無影燈間距、不同出風速度下手術區域的污染物濃度，由圖 4-1a 可知無影燈間的距離愈大，污染濃度愈低，顯示無影燈之間的距離是一個影響手術區域濃度的重要參數。無影燈距離愈小，無影燈形成的幾何阻礙會愈大，而且熱浮力效應造成的邊界層也會愈厚，阻礙了潔淨空氣通過無影燈之間的通道，造成病人周圍的污染無法有效排除。圖 4-2 為無影燈間距 0.2m，不考慮浮力效應時，出風速度 0.2m/s，剖面 1 之流場及濃度場圖，圖 4-3 為無影燈間距 0.2m，考慮浮力效應時，出風速度 0.2m/s，剖面 1 之流場及濃度場圖。圖 4-2a 可看出無影燈幾何對下吹流

場造成阻礙，下吹氣流從無影燈的外側及中間的通道向下流動，外側的潔淨空氣直接流向回風口，沒有有效帶走污染就離開手術室，這是屬於空調「短路」的現象，在很多文獻都有探討到。但從無影燈中間通道下吹的潔淨空氣直接到達病人身體帶走污染，從圖 4-2b 可看到病人上方污染物的濃度相當低。

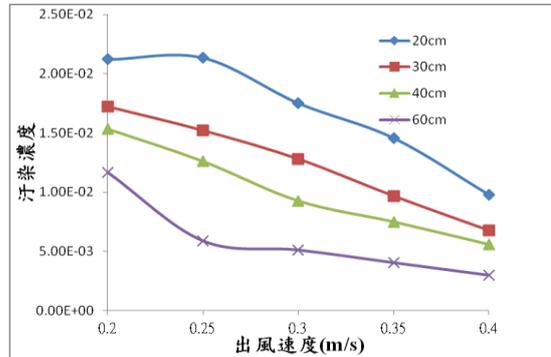
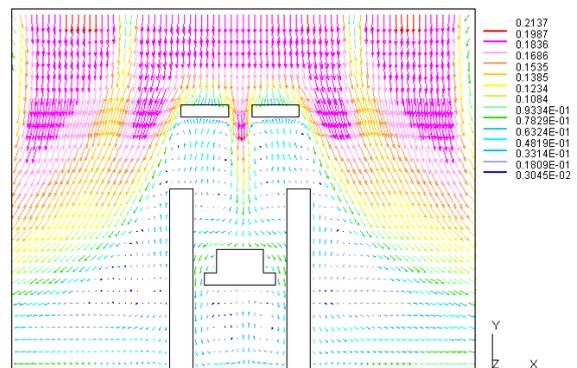
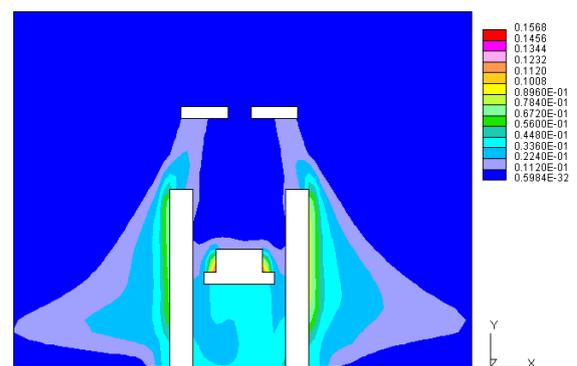


圖 4-1 不同無影燈距離、不同出風速度下手術區域的污染物濃度



(a)



(b)

圖 4-2、無影燈間距 0.2m，不考慮浮力效應時，出風速度 0.2m/s 之(a)流場及(b)濃度場圖(剖面 1)

圖 4-3a 顯示潔淨氣流碰到無影燈的阻礙往兩

側流動，只有部份的潔淨空氣穿過無影燈之間的通道進入手術區，這與不考慮浮力的時差別不大。氣流再往下時就有很大的不同，由於燈及人產生的熱浮力往上阻擋了下記の潔淨氣流，連無影燈兩側的潔淨空氣都無法下沉，從無影燈之間下記の氣流，也因為無影燈的浮力邊界層使通過的潔淨空氣量減少，加上醫護人員及病人產生的熱浮力頂住了這些少量的潔淨空氣，使病人上方幾乎沒有潔淨空氣進來帶走污染(如圖 4-3b)，這也與圖 4-2b 有很大的差別。

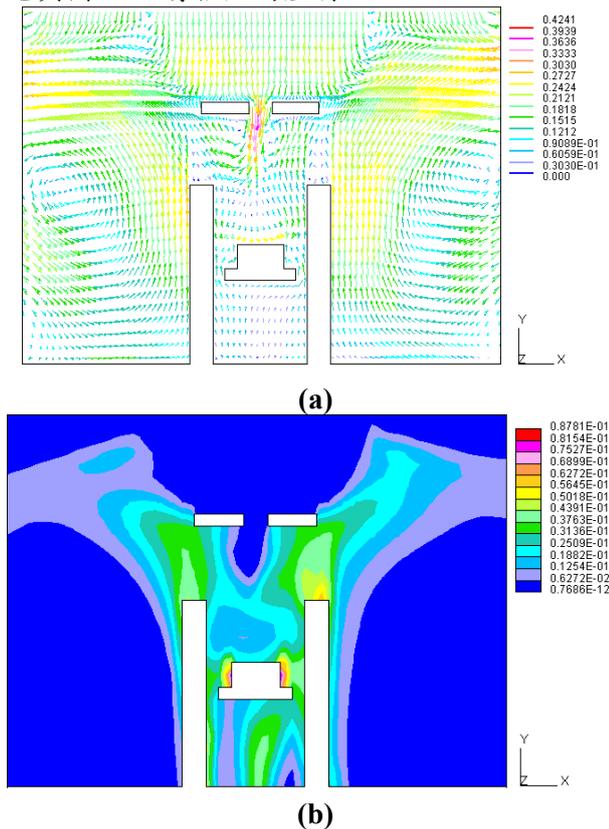


圖 4-3、無影燈間距 0.2m，考慮浮力效應時，出風速度 0.2m/s 之流場及濃度場圖(剖面 1)

圖 4-4 為無影燈間距 0.2m，考慮浮力效應時，出風速度 0.2m/s，剖面 3 之流場及濃度場圖。從圖 4-4a 可看到雖然病人兩側沒有醫護人員但潔淨氣流依然無法順利到達病人身上，主要是穿透無影燈之間的流道的潔淨氣流流量太小，即使只有病人產生的浮力，依然可以擋住下記の潔淨氣流，造成剖面 3 病人上方污染濃度依然偏高的情況，如圖 4-4b。

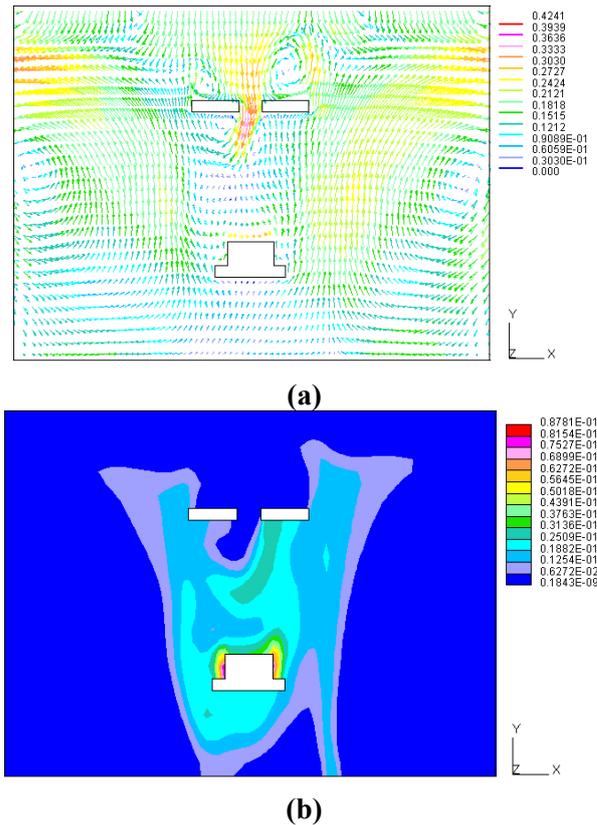
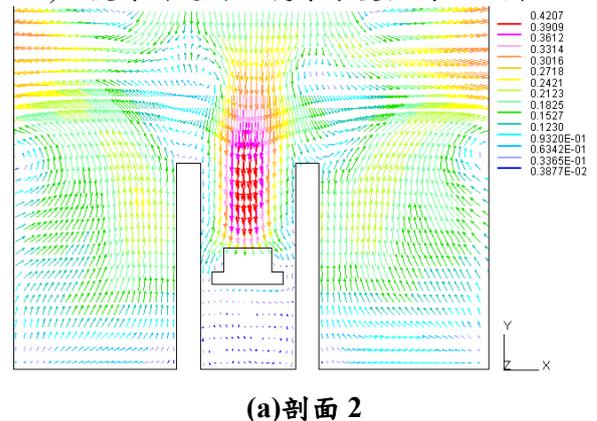


圖 4-4、無影燈間距 0.2m，考慮浮力效應時，出風速度 0.2m/s 之流場及濃度場圖(剖面 3)

圖 4-5 為無影燈間距 0.2m，考慮浮力效應時，出風速度 0.2m/s，剖面 2 之流場及濃度場圖。圖 4-5a 顯示潔淨氣流在剖面 2 可以充分的下記の下沉到病人身上，雖然病人及醫護人員都會產生浮力阻礙潔淨氣流的下沉，但是剖面 2 匯聚集了被無影燈擋住而無法下記の潔淨氣流，以較高的下記の速度克服了「浮力凹洞」的影響到達病人的身上(如圖 4-5b)，使得附近的空氣潔淨度很高，如圖 4-5c。



(a)剖面 2

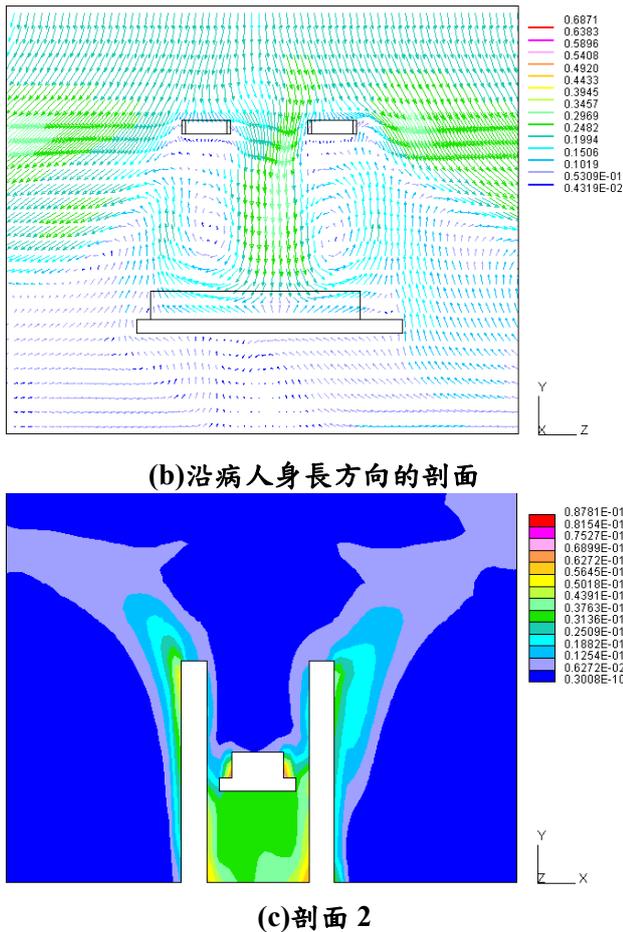


圖 4-5、無影燈間距 0.2m，考慮浮力效應時，出風速度 0.2m/s，之(a, b)流場及(c)濃度場圖

圖 4-1 顯示雖將出風速度提升到 0.25m/s，但是潔淨空氣仍不足以克服熱浮力效應到達病人身上，手術區的污染物濃度情況也與 0.2m/s 的時候差不多。然而，較大的出風速度壓制了醫護人員熱浮力效應帶上去的污染，減少污染在局部區域擴散的範圍，對局部區域有益，但對手術區域沒有正面的作用。

圖 4-1 顯示出風速度 0.3m/s 時手術區的污染濃度低於 0.2m/s 及 0.25m/s 時，經檢視 0.3m/s 的流場及濃度場，發覺剖面 1 及剖面 2 的流場與 0.2m/s 差異很小，剖面 3 則有明顯的不同。0.3m/s 的潔淨氣流可穿透無影燈中間的通道下沉到病人的身上，有效帶走污染，使附近的污染濃度大幅下降。0.2m/s 時剖面 3 則因潔淨氣流被熱浮力阻擋使得污染無法有效排除。由此可知無影燈的熱浮力效應在間距 0.2m 時，出風速度 0.3m/s 就可以完全的突破。

圖 4-1 顯示出風速度 0.35m/s 時手術區的污染濃度更進一步下降，經檢視 0.35m/s 的流場及濃度場，發覺剖面 2 及剖面 3 的潔淨氣流已經能

夠部份包覆病人身體，使得附近的污染濃度相當低。剖面 1 的潔淨氣流已經到達病人身體，然而兩旁醫護人員造成的熱浮力氣流將潔淨空氣往上推擠，使潔淨氣流無法包覆病人。因此出風速度 0.35m/s 時污染濃度下降主要是剖面 2 及 3 更加潔淨，剖面 1 對污染的下降貢獻不大。

圖 4-1 顯示出風速度 0.4m/s 時手術區的污染濃度已經下降到 0.01 以下，經檢視 0.4m/s 的流場及濃度場，發覺剖面 2 及剖面 3 仍然相當的潔淨，與出風速度 0.35m/s 沒有太大差異，污染濃度的下降主要在剖面 1 的潔淨氣流已能部分包覆病人身體。雖然還無法完全包覆病人身體，但潔淨氣流已經算是突破了熱浮力的阻擋。因此可以說無影燈間距 0.2m 時，要完全突破熱浮力效應需要 0.4m/s 的出風速度。

圖 4-1 顯示無影燈間距 0.3m，出風速度 0.2m/s 時污染濃度明顯低於無影燈間距 0.2m，出風速度 0.2m/s 時，無影燈間距拉到 0.3m 時，更多的潔淨空氣可以通過無影燈中間的通道下沉到病人身上，明顯的優於無影燈間距 0.2m 時，主要是因為下沉氣流通過無影燈中間的通道時，熱浮力造成的邊界層會使氣流可以通過的有效寬度比幾何寬度窄，當寬度從 0.2m 加到 0.3m 時，熱邊界層的厚度沒有增加，因此有效寬度與幾何寬度的比例增加，使得潔淨空氣有更大的空間可以通過進而到達病人身上，因此病人上方的污染濃度比寬度 0.2m 時明顯較低。雖然潔淨氣流在無影燈間距 0.3m 的時候可以下沉到病人身上，但仍受醫護人員熱浮力效應的影響而無法包覆病人，使得污染濃度無法大幅下降。由於剖面 1 及剖面 3 潔淨空氣通過無影燈中間通道的風量比間距 0.2m 時明顯較多，在總風量固定下，被無影燈阻擋而流向剖面 2 的風量降低，潔淨氣流可以到病人身上，但無法包覆病人身體，造成間距 0.3m 時剖面 2 的污染濃度要高於間距 0.2m 時。由上面的結果可知間距 0.3m 時手術區域的污染濃度低於間距 0.2m 時，主要是因為剖面 1 及剖面 3 的流場及濃度場有明顯的改善，但由於剖面 2 的污染濃度不減反增，抵消了一部分剖面 1 及剖面 3 的效果，因此手術區域的污染濃度僅較間距 0.2m 時降低 19%。

若以手術區污染濃度為污染源濃度的 1% 為可接受的潔淨度，由圖 4.1 可知當無影燈間距為 0.2m 時需要 0.4m/s 的出風速度；無影燈間距為 0.3m 時需要 0.35m/s 的出風速度；無影燈間距為 0.4m 時需要 0.28m/s 的出風速度；無影燈間距為 0.6m 時需要 0.22m/s 的出風速度。以本研究的結

果來看，美國「醫院和衛生設施設計與建造指南」及 ASHRAE 建議的潔淨空氣出風速度看來似乎太低了。若是不考慮熱浮力效應，無影燈間距為 0.2m 時就可以滿足規範的出風速度建議值。其實，在無影燈間距為 0.3m 且出風速度 0.3m/s 時，因受到無影燈及熱浮力的影響，病人身體上方的平均氣流流速不到 0.2m/s 且溫度比出風溫度高 2 度，對病人失溫的影響沒有那麼大，因此建議在無影燈間距 0.3m 時，將出風速度修改成 0.3m/s。

5. 結論

本研究以數值計算探討下吹式進風時，不同進風速度與不同無影燈間距的污染散佈情況，評估規範對風速的建議是否恰當。以下是所得的結論：

- (1) 在低風速時，熱浮力效應相當強烈，不考慮熱浮力與考慮的計算結果差別很大。
- (2) 若以手術區平均污染濃度為污染源的 1% 做為潔淨標準，即使無影燈的間距拉大到 0.6m，依然無法達到規範的要求。
- (3) 在無影燈間距為 0.3m 且出風速度 0.3m/s 時，因受到無影燈及熱浮力的影響，病人身體上方的平均氣流流速不到 0.2m/s 且溫度比出風溫度高 2 度，對病人失溫的影響沒有那麼大，因此建議將出風速度修改成 0.3m/s。

6. 參考文獻

1. AIA Guidelines for Design and Construction of Hospital and Health Care Facilities, The American Institute of Architects Press, Washington, DC, 2006.
2. 田維琴，『手術中使用保溫毯對患者體溫影響的研究』，現代護理學報，第 13 卷，第 7 期，2007。
3. ASHRAE Standard 170P, Ventilation of Health Care Facilities, American Society for Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, GA, 2006。
4. X. Wang, C. Hunag, and W. W. Cao, "The fluid mechanics of ventilation system generated by buoyancy and momentum sources in a single room," University of shanghai for science and Technology, Vol. 31, No.1, 2009.
5. A. C. Melling, B. Ali, E. M. Scott, "Effects of preparative warming on the incidence of wound infection after clean surgery : flrandomized contmlled trial", Lancet , 2001 , 358(9285) : 876—880
6. Air motion control in the hospital operating room ASHRAE Journal March 2009
7. L. M. Lo, "Numerical studies of airflow movement and contaminant transport in hospital operating rooms", M.Sc thesis, University of Minnesota, 1997.
8. M. E. Fountain, "Using the ASHRAE Thermal Comfort Model", An 114 ASHRAE Special Publication, 1997.
9. ASHRAE Handbook - HVAC Applications, American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, USA, 2003.
10. T. T. Chow, Z. Lin and W. Bai, "The integrated effect of medical lamp position and diffuser discharge velocity on ultra-clean ventilation performance in an operating theatre", Indoor and Built Environment, Vol. 15, No. 4, pp. 315-331, 2006.
11. F. Memarzadeh, A. P. Manning, Comparison of operating room ventilation systems in the protection of the surgical site, ASHRAE Transactions, Vol. 108, Part 2, 2002, pp. 3-15.
12. T. T. Chow, X. Y. Yang, Performance of ventilation system in a nonstandard operating room, Building and Environment, Vol. 38, No. 12 1401-1411, 2003.