

輻射效應對作業車廂內熱流場之影響分析

徐子圭¹ 陳致融² 戴昌賢² 苗志銘³

空軍航空技術學院飛機工程系¹

屏東科技大學車輛系²

國防大學理工學院機電航空系³

摘要

本研究以計算流體力學(CFD)方法模擬三維指揮管制車廂流場的輻射熱影響分析，分析方向為車內通風口配置擺設與車廂內冷氣對流場影響，應用有限體積法 SIMPLE 算則及 k- ϵ RNG 紊流模組，結合太陽輻射模式及考慮重力效應，模擬密閉車廂內部的空氣熱流場，以達到改善車內流場空間配置的目的，而研究結果顯示：對於指揮管制車廂出風口設置則顯示設置在車廂下方處，較能使車廂內流場流動狀況產生對流，故出風口設置在車廂下方較佳，而車廂前後方冷氣對車廂之影響，發現後方冷氣可將車廂內機台所散發的熱量平均分散，前方冷氣則無此功能，且前方冷氣會引起車廂內溫度不平均的狀況，故後方冷氣機對車內人員與車廂內機台影響較大。

關鍵詞：輻射效應、熱流場、熱舒適度、空氣年齡

Abstract

This study uses the method of CFD to simulate the thermal radiation effect in a 3D military vehicle, add the concept of PMV, PPD and age of air, to analyze the feeling of people for thermal comfortable. The military vehicle which carries out certain special tactics may have strong armor surrounding its sealed carriage. When the special vehicle is enclosing in the battle field under the burning sun, the waste heat produced from the engine system also transfers to the vehicle, then it will make an uncomfortable environment. Using the simulation improves the thermal field to the thermal comfort level. By the results of simulation, we can find out the effects of exhaust setup in the vehicle under different position and understand the influence of people's thermal comfort feelings when the forward and backward air-conditioners begin to operate. According to the information above, an engineer could improve the design of the vehicle and enhance thermal comfort feelings for people.

Key words: radiation effect, thermal field, thermal comfort, age of air,

一、前言

各類軍用車輛為防禦敵火攻擊，大多配置厚實的裝甲外殼以確保車廂內所載運人員

與物資之安全，一般車輛之裝甲防護厚度由數公厘至數十公厘不等，由於鋁合金與鋼材的熱傳導係數較大，當車輛在烈日下待命或戰場上運動時，太陽熱輻射對車廂內部所產

生的類「溫室效應」與動力系統所產生的廢熱，皆可迅速傳入車廂內且不易散去。

若車廂內部無配置適當的空調通風設備，在炎夏時車廂內部的溫度可能高達 50°C 以上，人員長期處於如此高溫的環境下，身體會因高熱脫水而產生乾渴、煩躁、幻覺、虛脫、昏沉與無精打采等症狀，且對事物的判斷能力降低，若車廂內部作業人員長期處於此類高熱的環境必然會影響到戰力的發揮，有鑑於高溫的作業環境會影響到作業人員的判斷力、工作能量與各類設備的正常運作，為確保戰力有效發揮，因此進行在不同天候下，太陽的熱輻射對車廂內部熱流場的影響效益分析研究工作就顯得非常值得深入探討；另對於作業車輛若因任務需要，暴露於大氣中吸收太陽輻射熱後，車體表面會產生高溫熱影像，此高溫與背景溫度差異甚大，其被敵方之紅外線偵蒐系統所偵測獲得的跡訊與改善方法，亦為研究的一個重點，車廂內部熱流場運動的形態的影響參數可作為設計車廂的依據〔1〕、而太陽輻射熱對車廂內部熱流場的分佈影響甚鉅，對車廂內部作業人員的舒適度與設備正常運作的影響甚為重要，值得深入探討與研究，在車廂內部流場之設計，根據美國陸軍化學部門所規劃在西元 2010 年之化學遠景(Chemical Vision)資料〔2〕中顯示，其重點在於未來武力之保護以及主控戰場之訊息資料獲得兩大主軸，而各型指揮車輛為戰時指揮管制之樞紐，除武力保護之全方面性核生化防護能力外，如何兼顧戰鬥人員之舒適度等人因工程之設計，也是相當重要的課題，諸如美軍 MCS(微氣候控制系統)之核生化防護系統及 M1 系列戰車之人員溫控系统，均為提升戰鬥效率與創造戰鬥能力自主戰場環境的關鍵技術，而過去幾十年來，在室內氣流運動方面研究方式主要分為實驗量測及電腦模擬兩種，研究重點著重於室內流場之速度分佈、溫度分佈、紊流特性研究等〔3、4、5、6〕，由於實驗量測常需花費龐大之經費及時間，故藉由電腦模擬研究室內氣流流場即成為最

經濟有效的研究工具之一，而要使用電腦模擬研究室內空氣流場，其商用軟體的設定與意義理解就顯的非常重要。

二、物理模式

2.1 問題描述

本次研究為指揮管制車廂受到內部各種電子儀器的輻射熱和外部太陽照射，在車廂內部設有兩台冷氣用來冷卻室內溫度，另外還設有一個進風口和一個出風口，而車廂材料主要是由鐵和鋁所構成，重力向下，由於熱重引起密度梯度所以發展為浮力流。

車體中的介質認為是有吸收性和散射性的，因此牆壁間的輻射交換因存在吸收性而被減弱，同時也因為介質的散射作用而增強如圖 1。

2.2 基本假設

研究以實際車廂內部狀況為假設條件，故車廂內部的所有材質皆會對輻射有不同的放射率，而車廂內部所有操作櫃和機台亦會對車內環境發熱，而兩台冷氣出風口吹出速度會對車廂內流場造成紊流狀態，且吹出的低溫冷風亦會對車內溫度造成影響，車廂內部邊界條件如表 1。

2.3 統御方程式

由此題目可了解，題目對於流體運動所需要使用的統御方程式為三維 Navier-Stokes 方程式，而車廂內的溫度影響需要使用的統御方程式為能量方程式(energy)。連續方程式(Continuity equation)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

動量方程式(momentum equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \quad (2)$$

能量方程式(energy equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \frac{\partial}{\partial x_i}[u_i(\rho E + P)] = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[k_{eff}\frac{\partial T}{\partial x_i} + u_j(\tau_{ij})_{eff}\right] + S_h$$

(3)

其中， p 是靜壓、 τ_{ij} 是應力張量、 k_{eff} 為有效熱傳導係數、 S_h 為熱源項、 F_i 為物體力。

2.4 紊流模式

由於車廂內考慮兩台冷氣運作，流場屬於紊流狀態，為了要模擬在密閉空間紊流狀態，在近壁流場模擬需要有一定精準度，故本研究將採用 $\kappa-\varepsilon$ RNG 紊流模式模擬流場 [7]。

2.5 輻射模組

根據參考文獻 [8、9] 的資料，輻射熱通量算法用 q_r 表示，由以下的方程求得：

$$q_r = -\frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \nabla G \quad (4)$$

其中， a 為吸收係數， σ_s 為散射係數， G 為入射輻射， C 為線性各相異性相位函數係數 (linear-anisotropic phase function)，引入參數：

$$\Gamma = \frac{1}{3(a + \sigma_s) - C\sigma_s} \quad (5)$$

之後，方程(5)可化為：

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad (6)$$

熱源項的輸運方程為：

$$\nabla(\Gamma \nabla G) - aG + 4a\sigma T^4 = S_h \quad (7)$$

合併方程(6)和(7)，可得到如下方程：

$$-\nabla q_r = aG - 4a\sigma T^4 \quad (8)$$

$-\nabla q_r$ 的運算式帶入能量方程，從而得到由於輻射所引起的熱源。

2.6 太陽掛載模式

本研究採用離散座標太陽掛載模式中的太陽光線追蹤模擬 [10] 來模擬真實狀態的太陽輻射和天候狀況，而太陽掛載模式計算方法為平均天候狀況計算法，其表示式為：

$$Edn = \frac{A}{e^{\frac{B}{\sin \beta}}} \quad (9)$$

其中 A 代表在空氣質量為 0 時的表面太陽輻射， B 為大氣的消散係數， β 為水平太陽高度，本式是以地球天氣為晴朗、空氣潔淨的狀況作為基礎。

2.7 人體舒適度

根據 Fanger [11] 和 ISO7730 [12] 的資料，可利用人體舒適度 PMV (predicated mean vote) 作為觀察人體舒適度的一種指標，其影響的變數包含了人體的衣著量、新陳代謝率和工作量等變數。

$$PMV = [0.303e^{(-0.036M)} + 0.028] \times B \quad (10)$$

其中， B 為人體熱平衡效應， M 為人體新陳代謝產生熱量。

2.8 氣體冷流不滿意度

根據參考文獻 [13] 的資料，氣體冷流不滿意度 (predicted percentage of dissatisfied, PPD) 一為舒適性指標；一但 PMV 計算出來後可利用(11)式計算出 PPD，而 PMV 與 PPD 的相對關係如圖 2 所示。

$$PPD = 100 - 95e^{-(0.03353PMV^4 + 0.2179PMV^2)} \quad (11)$$

2.9 空氣年齡

根據參考文獻 [13] 的資料，為了探討空間內空氣新鮮度的問題，可採用空氣年齡 (Age of Air) 的概念。空氣年齡是指空氣在空間中某一點已停留的時間，藉由空間內空氣年齡的計算，可做為判定空氣品質優劣的指標，空氣年齡愈大，表示空氣在此點停留的時間愈久，相對的空氣年齡愈小即表示空氣在此點停留愈短，亦表示空氣愈新鮮。

$$\Delta\tau = \frac{L}{u} \quad (12)$$

式中 $\Delta\tau$ = 空氣年齡增量； L = 管道長度； u = 空氣流動速度。

2.10 數值方法

本次研究題型是屬於三維熱傳導流場和對流流場問題，另外還加上輻射熱效應對流場的影響，由於考量到節省計算的時間，故選定使用一階上風法作為統御方程式的離散

法，運用有限體積法 SIMPLE 算則及 $k-\epsilon$ RNG 紊流模組，結合太陽輻射模式及考慮重力效應，並以人體舒適度指標 PMV 為量化標準模擬密閉車廂內部的空氣熱流場。

三、網格系統及邊界條件

3.1 格點系統

計算網格系統之製作在計算流體力學的應用上，本研究分析是使用 ICEM/CFD 商用軟體來繪製三維結構化網格，然而為有效模擬流場特殊現象如，另考慮格點之疏密性與長寬比例縮放的配合，故網格系統共區分 35 區塊 218759 網格，如圖 3，運算平台為 DELL PRECISION 380，CPU 為 3.2 GHz，1GB RAM。

3.2 邊界條件

本研究設定車廂空間在大氣空間是固定的，假設車廂空間之表面為光滑無摩擦之表面，故流體經過壁面除了滿足不可穿透性的條件外還必須滿足無滑動與無摩擦條件，表面設定為輻射不可穿透面。

入口邊界條件即為初始計算之值，為模擬空氣流入進氣口，在此取用速度大小值為入口邊界條件。

出口邊界條件為模擬空氣流出排氣口流向外界。因為本研究模擬環境為大氣空間之中，因此出口邊界條件取用標準大氣壓力。

四、結果與討論

4.1 速度邊界層流場驗證

在流體存在邊界層現象時，溫度場也會擁有邊界層特性，故是否正確模擬出物體邊界層現象極其重要，網格的精準度需能夠模擬出邊界層效應，而格點過多又會影響電腦 cpu 的使用負荷，故以此驗證取出能夠模擬出邊界層效應的最佳網格比例。

4.2 層、紊流邊界層流場驗證

先以層流平板為測試，計算第一層網格厚度之選取，而網格之增長倍率參考 Wilcox [14] 之建議為 1.06~1.08，其結果與理論值作比較，以平板長度為特徵長度

$L=1$ 如圖 4，取一計算域長度為 1.25，入口高度為 2，出口高度為 2.13，以平板之頭端為原點，入口及出口設定為壓力邊界條件，經測試平均最小網格高度為 1.0×10^{-3} 如表 2，而以相同條件測試紊流平板，其平均最小網格高度為 35 如表 3。

4.3 熱邊界層流場驗證

Prantdl 數在強制對流的情況中，代表的就是速度邊界層和溫度邊界層之間的一種直接尺度，對於縱向受攻平板流而言，在 $Pr=1$ 及平板壁面溫度為常數時，速度邊界層和溫度邊界層的厚度會相等，在此將邊界條件設定符合 $Pr=1$ 的狀況做模擬，其結果證明此層流和紊流邊界層的網格配置比例對於溫度邊界層亦可精確模擬圖 5、6。

4.4 車廂熱流場模擬

應用以上驗證結果，設計一車廂外型圖 7，並配合不同材質特性設定表 4，模擬車廂在太陽照射狀態下車內熱流場狀態，由車廂切面的溫度流線圖 8、9、10 可看出再車廂內的流體主要是由冷氣口高速流出，由於吹出氣體溫度較低，造成空氣分子密度較高，再加上重力影響導致吹出來的空氣會向下流動，碰到車內座椅後空氣便分兩方向沿著座椅上下方流動，部分空氣在前座和儀表板上方處產生渦流，部分則流至座椅下方再由出風口流出，而溫度場可看出由於太陽照射在儀表板處和車內座椅前座處，故此兩處溫度較高，而座椅和儀表板兩處的物質性質不同，對太陽輻射的吸收性也不同，所以座椅和儀表板的溫度也有所差異，而儀表板上方由於空間較小且空氣分子在此處產生渦流，導致此處熱量散失較快、溫度較低，而擋風玻璃雖然有太陽照射，但是因為玻璃面為透明面，且外部還有風的對流可將熱量降低，所以擋風玻璃處的溫度相對較低，而溫度最冷處即為冷氣出風口處，由此車廂模擬可知其模擬結果顯示非常符合實際物理現象。

4.5 指揮管制車廂不同出風口模擬

本研究主題之一即為不同出風口的配置分析，分為出風口設置於車廂上方和出風口

設置於車廂下方兩種，期望能藉由模擬結果判斷出何種配置方式較適當，判斷方法為取垂直於出風口與入風口的溫度流線剖面圖與空氣年齡剖面圖來分析比較，如圖 11。

4.6 上方出風口模擬

出風口設置在車廂上方處，由溫度流線圖 12、13 可觀察出，進風口導入的氣流會因為出風口設置太過於接近出風口而迅速往出風口處流動，又因冷氣出風影響，會在車廂上方處造成渦流，導致氣流不易在車廂內部流動，無法將車廂內空氣均勻的混合，再加上機台與太陽照射放出的熱量，導致車廂上半部溫度與下半部溫度造成明顯的溫差，而出風口設置在上方處的空氣年齡圖 17，可看出車廂空氣年齡分布較平均。

4.7 下方出風口模擬

出風口設置在車廂下方處，由溫度流線圖 14、15 可觀察出，由進風口導入的空氣不再因為出風口設置太過於接近而造成迅速流出的情況，並且出風口設置在車廂下方處會帶動車廂下方的空氣流動，使得車廂氣流活動較明顯，機台放出的熱量與車廂吸收的太陽熱量不再淤積於車輛上方，而會隨著氣流將熱量平均導入熱車廂內，讓車廂上方處與下方處的溫差較小，而由空氣年齡來比較不同出風口的差異，可清楚看到出風口設置在下方處圖 16，由於空氣在車廂後方產生對流效應，所以車廂後方空氣年齡較高於車廂前方，但是整體比較可看出，出風口設置在車廂下方，車廂內的空氣年齡比出風口設置在上方更年輕，由此可判斷出出風口設置在車廂向方處是較好的設置方式。

4.8 指揮管制車廂空調關閉模擬

本研究另一主題為指揮管制車廂內部空調分別關閉的情況下，車廂內的溫度變化與舒適度變化分析，期望由模擬的方式來觀察若車廂內空調只剩單邊的狀況，車廂內的溫度變化與舒適度變化對操作人員或機具的影響。

4.9 車廂後方空調關閉模擬

由後方冷氣機關閉的溫度剖面圖 18，

可看出由於主要機台都設置在車廂後方，造成前後車廂溫差大，最大溫差甚至到 10 度，若後方冷氣不作動的情況下，車廂內機台較容易有過熱的情況，而人員在操作時，前方冷氣所造成的溫差亦有 5 度左右，故操作人員會感覺不舒適。

4.10 車廂前方空調關閉模擬

前方冷氣關閉的溫度剖面圖 19，可看出後方機台散發的熱量會被流場往車廂前方帶，導致整體車廂溫度普遍較高，但是車廂內溫度較平均，由人體舒適度來觀察，發現在正午 12 點時，車廂內溫度過高的情況下，人體舒適度都是在不舒適的層級，但是由後方冷氣關閉的舒適度剖面圖 20 與前方冷氣關閉的舒適度剖面圖 21 作比較，可看出在前方冷氣關閉的情況下，平均舒適度是較好的，故不論是由機台散熱或是由操作人員作考量標準，前方冷氣不作動時，雖然車廂內部溫度普遍約有 30 度左右，屬於稍熱的狀況，但車內機台得以散熱，不會產生過熱的影響，故後方冷氣對車廂影響較大。

五、結論

5.1 指揮管制車廂不同出風口模擬

本研究主題之一即為不同出風口的配置分析，分為出風口設置於車廂上方和出風口設置於車廂下方兩種，期望能藉由模擬結果判斷出何種配置方式較適當，而研究結果顯示，將出風口設置在車廂下方，對於車內流場流動幫助較大，如此對車廂溫度的調節及車內人員都較好。

5.2 指揮管制車廂空調關閉模擬

本研究另一主題為指揮管制車廂內部空調分別關閉的情況下，車廂內的溫度變化與舒適度變化分析，期望由模擬的方式來觀察若車廂內空調只剩單邊的狀況，車廂內的溫度變化與舒適度變化對操作人員或機具的影響，而研究結果顯示，車廂後方的冷氣對於車廂內流場影響較大，且可助於車廂內機台的散熱，故車廂內後方冷氣較前方冷氣重要。

六、參考文獻

1. 苗志銘, 李峻溪, 張厚起, 郭明樺, “人員操作艙空氣調節與熱舒適度分布之研究,” 2005 能源與冷凍空調學術研討會, 2005
2. ETL No.1110-3-490, “Design of Chemical Agent Collective Protection Shelters for New and Existing Facilities,” May 13, 1998.
3. Ciofalo, M. and Karayiannis, T.G., “Natural Convection Heat Transfer in a Partially-or Completely-Partitioned Vertical Rectangular Enclosure.” International Journal of Heat and Mass Transfer Vol.34, pp.167-179, 1991.
4. Karayiannis, T.G., Ciofalo, M. and Barbaro, G. “On Natural Convection in a Single and Two Zone Rectangular Enclosure,” International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.35, No.7, pp.1645-1657, 1992.
5. Murakami, S., Kaizuka, M., Yoshino H. and Kato S., “Room Air Convection and Ventilation Effectiveness,” International Symposium on Room Air Convection and Ventilation Effectiveness,” Tokyo, Japan, 1992.
6. Li, Y. and Fuchs, L. “An Anisotropic Local Grid Refinement Method for Fluid Flow Simulation,” Numerical Heat Transfer, Part B, Vol.30, pp.195-216, 1996.
7. Yakhot, V. and Orszag, S. A., “Renormalization Group Analysis of Turbulence: I. Basic Theory,” Journal of Scientific Computing, Vol.1, No.1, pp.1-51, 1986.
8. Cheng, P., “Two-Dimensional Radiating Gas Flow by a Moment Method,” AIAA Journal, Vol.2, pp.1662-1664, 1964.
9. Siegel, R. and Howell, J. R., “Thermal Radiation Heat Transfer,” Hemisphere Publishing Corporation, Washington DC, 1992.
10. Chapter 30 of the 2001 ASHRAE Handbook of Fundamentals.
11. Fanger, P.O., “Thermal comfort,” McGraw-Hill, New York, 1970.
12. ISO7730, “Moderate thermal environments -determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort,” International Organization for Standard, Geneva, 1994.
13. 苗志銘, 李峻溪, 謝明達, “不同天候對作業車廂內熱流場之影響效應分析”, 國推會結案報告, 2006.
14. Wilcox, D.C., “Comparison of Two-Equation Turbulence Models for Boundary Layers with Pressure Gradient,” AIAA Journal, Vol.31, No.8, pp.1414-1421, 1993.

表 1. 指揮管制車廂邊界條件設定

邊界	類型	熱傳導	溫度	放射率	厚度	材質
冷氣外殼	wall			0.9	0.01	壓克力
冷氣放置板	wall			0.9	0.03	混凝土
冷氣下方外殼	wall			0.9	0.01	壓克力
桌子	wall			0.8	0.03	鋁
外牆	wall	4	隨太陽變化	0.88	0.05	鐵
地板	wall	4		0.88	0.05	鐵
天花板	wall	4	隨太陽變化	0.88	0.05	鐵
內部隔離牆	wall			0.88	0.05	鐵
門	wall	4	隨太陽變化	0.88	0.05	鐵

表 2. 測試層流平板算例平均最小邊界網格

高度		
邊界網格高度(h/L)	邊界層厚度誤差值(X/L=0.4)	邊界層厚度誤差值(X/L=0.8)
2.0×10^{-3}	2%	2.2%
1.0×10^{-3}	0.6%	0.65%
5.0×10^{-4}	0.6%	0.63%

表 3. 測試紊流平板算例平均最小邊界網格

高度		
邊界網格高度(h/L)	邊界層厚度誤差值(X/L=0.4)	邊界層厚度誤差值(X/L=0.8)
5.5×10^{-3}	1.3%	2%
3.0×10^{-3}	0.75%	1%
1.5×10^{-3}	0.62%	0.7%

表 4. 汽車車廂不同物質特性

名稱	密度 ($\frac{kg}{m^3}$)	比熱 ($\frac{j}{kg-k}$)	熱傳導係數 ($\frac{w}{m-k}$)	吸收係數 ($\frac{l}{m}$)	發散係數 ($\frac{l}{m}$)	折射率
車頂	590	2500	0.109	0	0	1
擋風玻璃	2800	750	1.5	831	0.01	1.5
儀表板	1800	471	0.1	0	0	1
座椅	590	2500	0.109	0	0	1

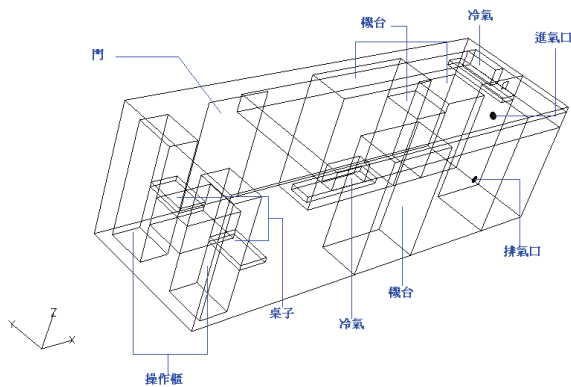


圖 1 指揮管制車廂內部示意圖

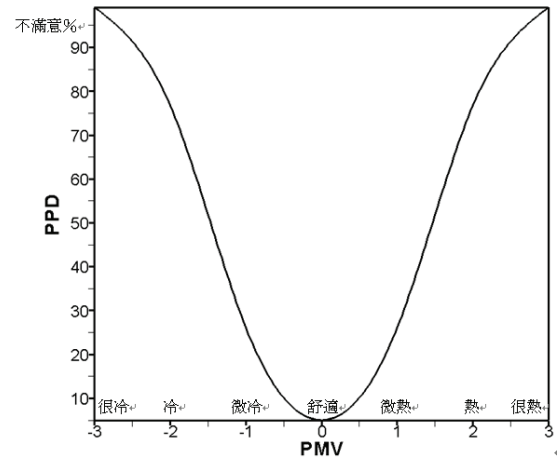


圖 2 PPD 與 PMV 的相對關係圖

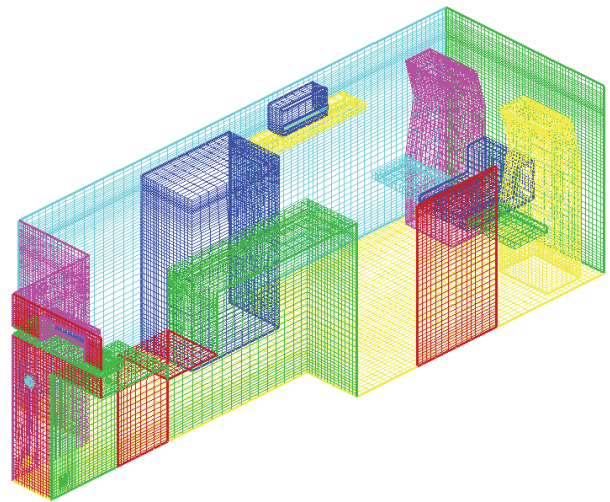


圖 3 指揮管制車廂網格圖

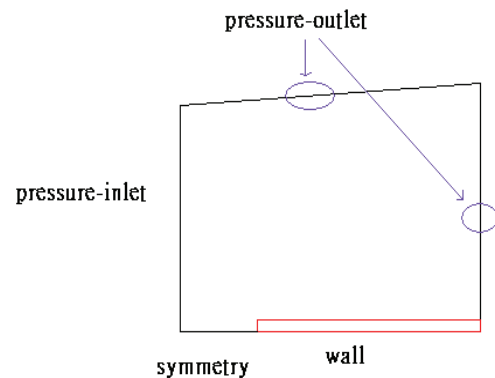


圖 4 平板邊界層流場圖形建構與邊界條件設定

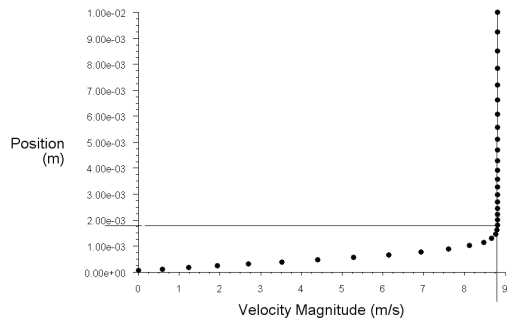


圖 5 平板流速度邊界層高度比較

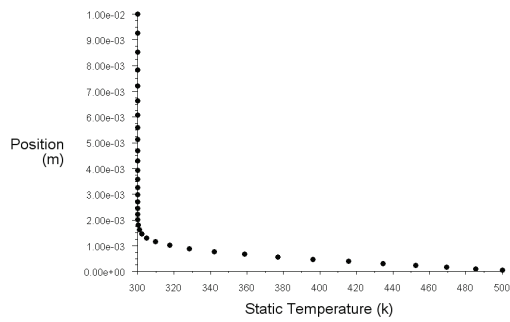


圖 6 平板流溫度邊界層高度比較

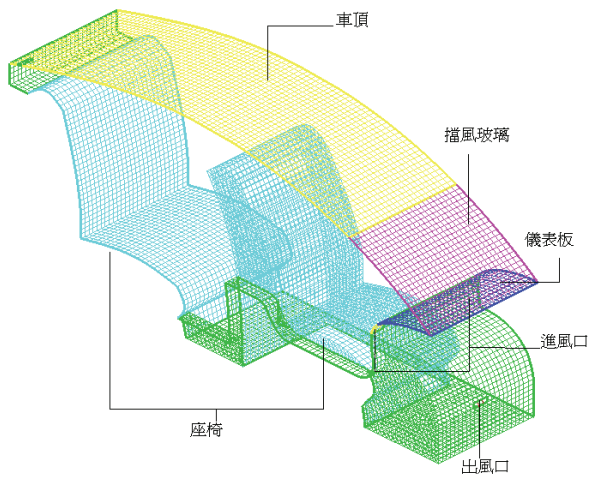


圖 7 車廂外型與邊界條件

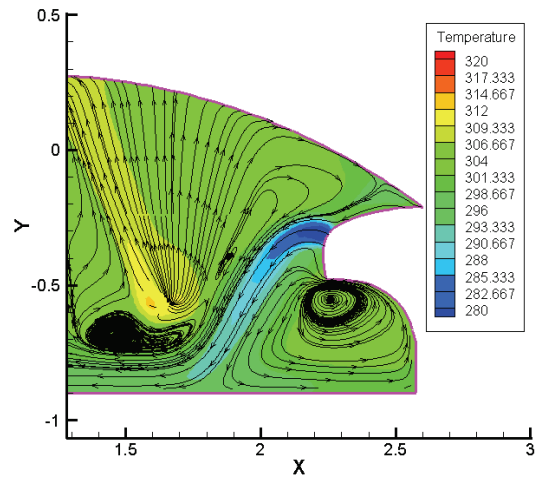


圖 8 車廂左側溫度流線圖

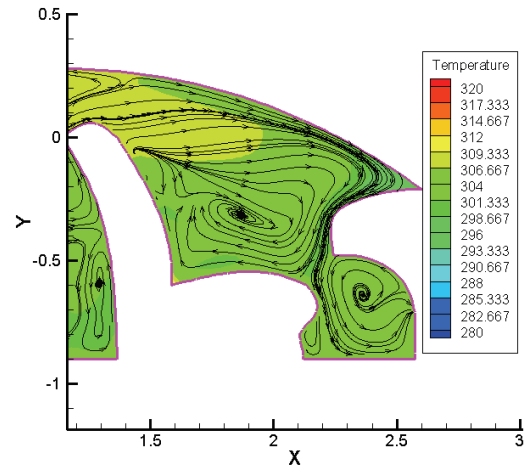


圖 9 車廂中間溫度流線圖

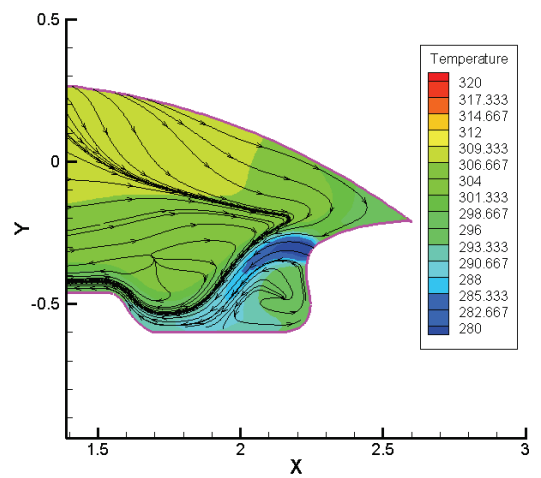


圖 10 車廂右側溫度流線圖

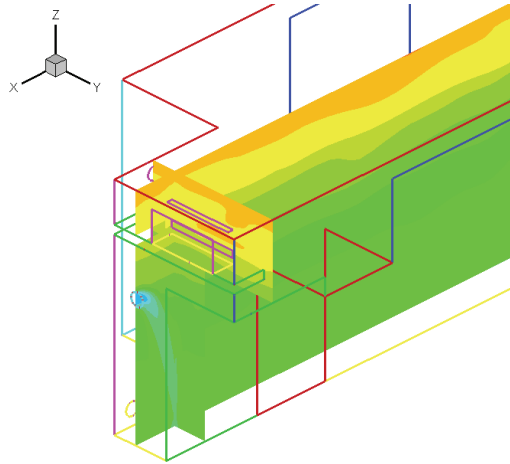


圖 11 車廂溫度流線取面圖

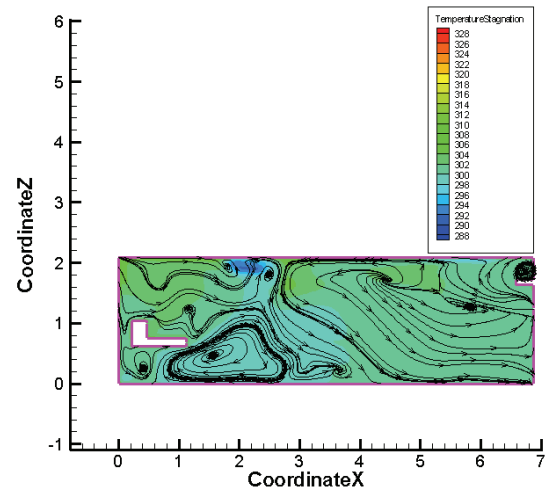


圖 14 出風口設置於車廂下方時車廂進風口
截面溫度流線圖

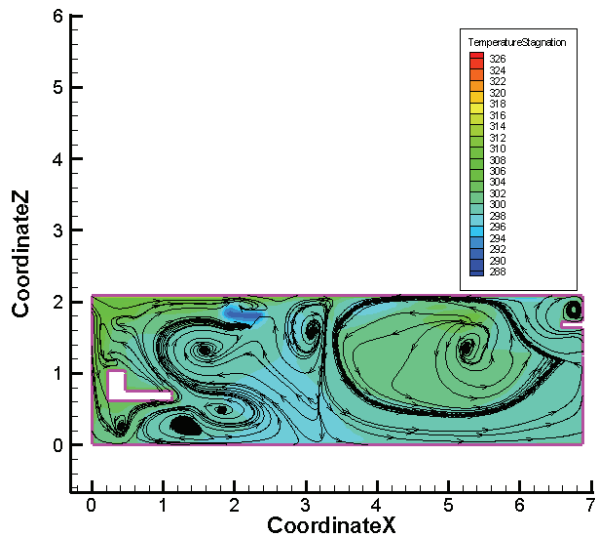


圖 12 出風口設置於車廂上方時車廂進風口
截面溫度流線圖

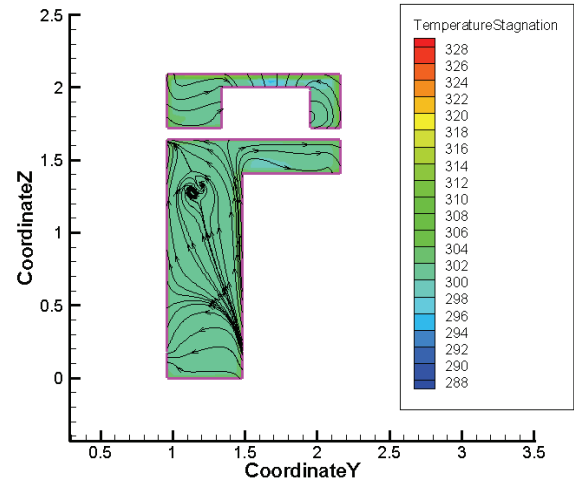


圖 15 出風口設置於車廂下方時車廂出風口
截面溫度流線圖

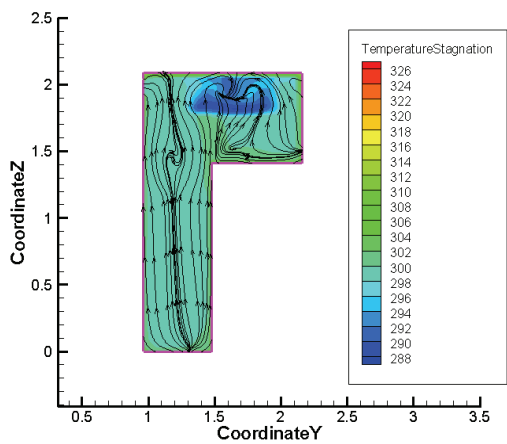


圖 13 出風口設置於車廂上方時車廂出風口
截面溫度流線圖

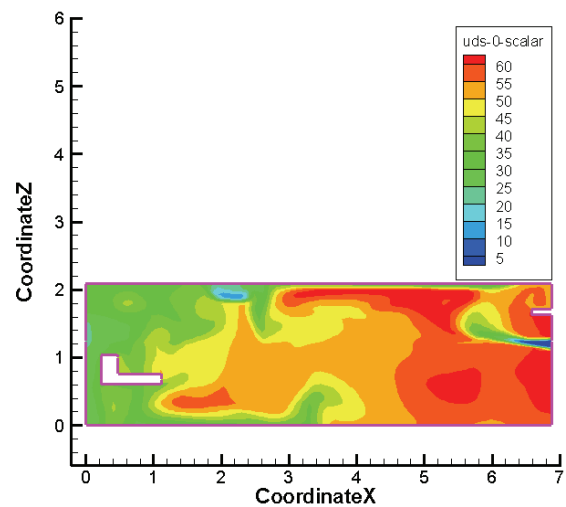


圖 16 出風口設置於車廂下方時車廂進風口
截面空氣年齡圖

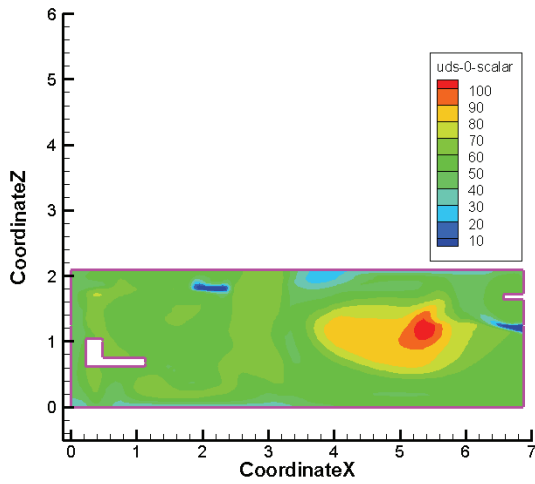


圖 17 出風口設置於車廂上方時車廂進風口
截面空氣年齡圖

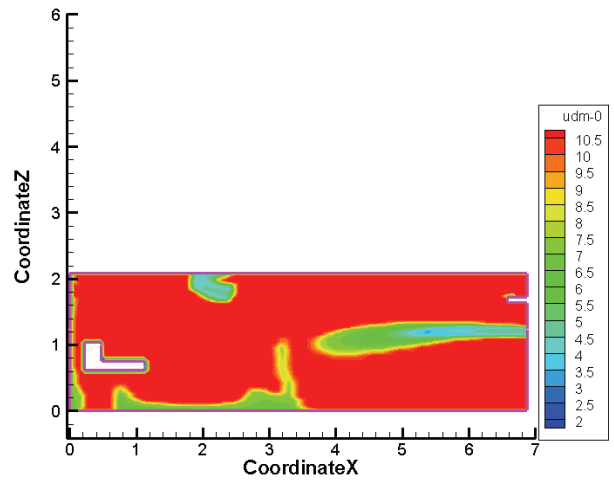


圖 20 車廂後方冷氣關閉時車廂截面舒適度
剖面圖

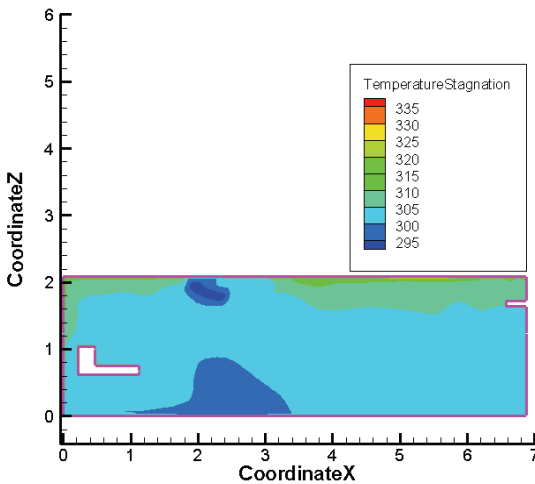


圖 18 車廂後方冷氣關閉時車廂截面溫度剖
面圖

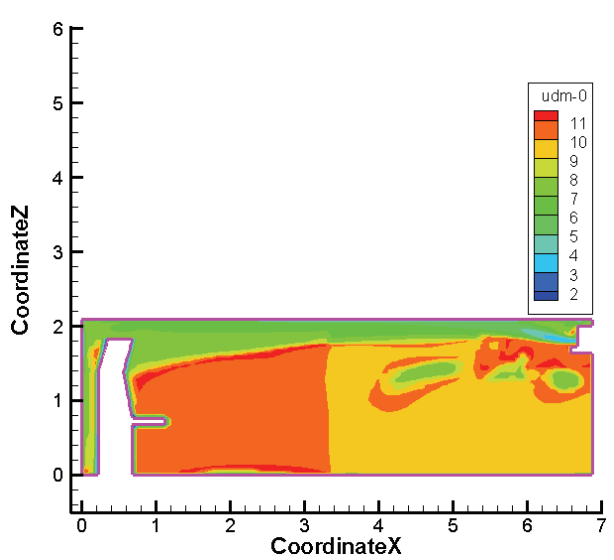


圖 21 車廂前方冷氣關閉時車廂截面舒適度
剖面圖

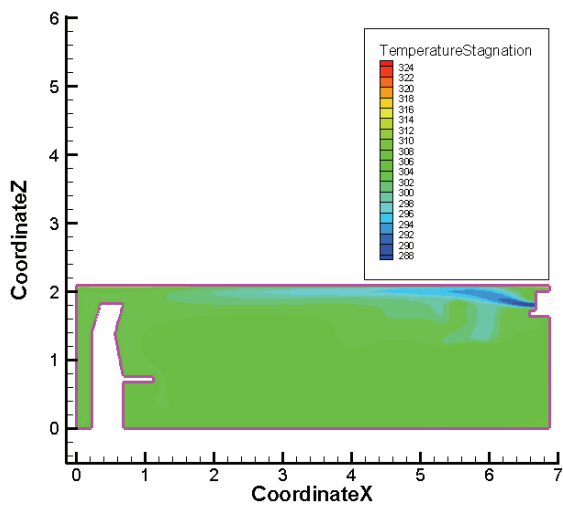


圖 19 車廂前方冷氣關閉時車廂截面溫度剖
面圖