

## 小型競賽車風阻之實驗與數值探討及設計改進

吳佩學 謝琛 張順富 羅翊文  
大葉大學機械與自動化工程學系  
51591 彰化縣大村鄉學府路 168 號

### 摘要

本研究以風洞實驗與計算流體力學數值模擬之方法，探討小型競賽車輛外流場之空氣動力特性。藉由流場與壓力分布，了解主要造成風阻之因素，並藉以改善原型車減低風阻之設計。將實際含人偶的小型競賽車以 1:8 的比例做成縮小模型置於風洞中測試，同時利用計算流體力學軟體對模型在風洞測試中相同的情形做數值模擬，藉由風洞量測的風阻數據來選擇適切的數值計算紊流模型。並由數值模擬在高於風洞可量測雷諾數之實用範圍的延伸，比較市售小型競賽車與本研究新設計原型車之空氣動力特性。

實驗與數值模擬結果顯示，數值計算採用  $k - \omega$  紊流模型所得結果與風洞實驗數據最相吻合，而  $k - \varepsilon$  模型也有合理的吻合度。利用  $k - \omega$  紊流模型做高雷諾數之延伸，由數值計算結果提出風阻係數曲線。模擬結果顯示前擋板與前整流罩的外型對風阻的影響最大，對整車外型作減低風阻之設計後，本研究新設計原型車之風阻比市售小型競賽車有明顯的降低。

**關鍵詞：**小型競賽車輛，數值模擬，風洞實驗，風阻

## Experimental and Numerical Investigation on Drag: Design Improvement for Go-Karts

PEY-SHEY WU, CHEN HSIEH, SHUN-FU CHANG and YI-WEN LO  
*Department of Mechanical and Automation Engineering, Da-Yeh University*  
*168 University Rd., Dacun, Changhwa 51591, Taiwan, R.O.C.*

### ABSTRACT

This study investigated the aerodynamic characteristics of external flow field of go-karts by experimental testing in a wind tunnel with numerical modeling using a computational fluid dynamics (CFD) software package. From the distributions of flow and pressure fields, the major factors affecting drag were identified and the shape design of go-karts was improved. In our experiments, one-to-eight scaled models including the driver and the go-karts were tested in a wind tunnel. The same tested conditions were numerically modeled with a CFD package. Using a comparison of the experimental and numerical results, the most appropriate turbulence model was selected. Using the selected numerical model, aerodynamic characteristics of a commercially available go-kart, and our newly designed go-kart were compared for an extended Reynolds number (Re) range, which was realistic but beyond the measuring capability of the wind tunnel we used.

Our results show that the computation with the  $k - \omega$  turbulence model gave the best agreement between numerical and experimental results, while the  $k - \varepsilon$  model also had reasonable agreement. The drag coefficient curves were obtained with the  $k - \omega$  turbulence model for the extended Re range. The computational results indicated that the front fairing and the front panel were the most influential to the drag. With improved shape design, the new go-kart showed a remarkable reduction in the drag compared with the commercial go-kart.

**Key Words:** go-kart, numerical modeling, experimental testing, drag

## 一、前言

車輛競技產業為經濟部工業局推動的重點項目之一 [3]，為有利於車輛競技產業的技術在國內生根發展，本研究以小型競賽車輛（Go-kart 或 Karting）為研究對象。目前國內此種競賽所使用之車輛均由瑞士或義大利等國所進口，價格昂貴，容易使得國內欲入門者望怯，造成此運動推廣的瓶頸。本研究以計算流體力學（computational fluid dynamics, CFD）流場模擬與縮小模型於風洞內的風阻量測等方法，期能協助建立國內自行設計及自製之能力，以減低小型競賽車輛之製造成本，吸引更多的愛好者。

依規定，一部 Go-kart 車子總長度最大 182 公分（不含前後擾流罩），總寬度最大為 140 公分。在安裝初級引擎的競賽用車，最高時速大約 100 公里，而安裝高級競賽引擎的車輛能達到 160 km/hr 以上。其傳動方式為直接鏈條式帶動，由 0 到 100 km/hr 的加速時間只需 4 秒多，相當嚇人。在風阻（drag）大小、加速與操控性能的微小差異，都有可能造成比賽勝敗的重要關鍵。

風阻對於車輛有兩個主要的影響：耗油率與行車速度。在相同的引擎（或動力）條件下，要改進耗油率最有效的方法就是降低風阻，這是一般房車乃至大巴士以及大卡車的一個設計重點。然而對於賽車車輛而言，省油並非最優先的訴求，提升速度與操控穩定性才是最重要的考量，要提升速度當然也要降低風阻。由於風阻對車輛影響的重要性，目前一般車廠對於車輛的研發（包含從 F-1 方程式賽車、流線型房車、到方塊狀的卡車），均會將車輛空氣動力學的研究與其他研究項目（如結構、材料、操控性、動力配置、人工因素等）一併考量。

然而要注意的是，單只有考量將風阻（或阻力係數）盡可能的降低對競賽車輛而言並不一定就是在空氣動力學與操控方便性最好的設計，因為 Go-kart 的直線加速與過彎加速度均很大，維持車輛在高速下的穩定性與可操控性是必要的。一般如前擋板、擴散器形狀的下車體、前整流罩、以及

側邊防護罩等的適當設計，可提高對競賽車輛的下壓力（down force）或負升力（negative lift）以改善車子的穩定性，但這同時也會增加車子的風阻。因此，最佳的空氣動力學的設計應該是在低風阻與高下壓力之間取得最佳的平衡，使得賽車在高速下也能有好的穩定性與可操控性。另外，外部流場的適當設計也應該要能提供高溫元件（如輪胎、引擎、與煞車片）的充分冷卻。

雖然公開文獻中對於 F-1 方程式賽車以及市售轎車與運輸車輛等有比較多流場與風阻的研究結果，然而對於 Go-kart 的風阻係數，在文獻中則十分缺乏。風阻係數或阻力係數（ $C_D$ ）（drag coefficient）之定義為 [13]

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U^2 A} \quad (1)$$

其中  $F_D$  為阻力的大小， $U$  為自由流的速率， $\rho$  為流體的密度，特徵面積  $A$  通常取為正前向的投影面積。

## 二、文獻探討

目前各種車輛的研發（包括競賽車輛）均採用風洞測試與計算流體力學雙重管道併用的方式來得到需要的空氣動力學數據（流場、壓力分佈、阻力係數、升力係數等）。Fluent 公司的 CFD 軟體曾被用來模擬 F-1 賽車的外部空氣動力學 [5]，所得壓力係數分佈與實驗數據相當吻合，而且結果也充分顯示，離中心線不同距離的壓力係數有明顯變化，三維數值模擬是必要的。為符合 2001 年規則改變的要求，Makowski [12] 描述了如何成功地利用 Fluent 軟體幫助 Ferrari F-1 賽車換氣箱進氣口做快速的變更設計。為了爭取時間，計算區域只包含進氣箱及其附近區域，其邊界條件取自 2000 年全車模擬所得的結果。該小區域的計算就用了 1.04 百萬的混合形網格（hybrid mesh），紊流流場計算採用雷諾應力模型（Reynolds stress model, RSM），並在兩台

COMPAQ DS20 雙處理器的電腦平行執行運算。Kleber [9] 則利用 Fluent 軟體模擬 Opel Astra 房車的外部流場，並對整個模擬過程，包含前處理、計算與後處理，有概括性的介紹。他的數值模擬用了大約三百萬個混合形網格，紊流模型選用  $k-\varepsilon$  模型並採用非平衡的牆壁函數 (non-equilibrium wall function)，自由流速度設定為 140 km/hr。為了加速收斂，前三百次的疊代採用一階上風法 (upwind scheme)，接著再採用二階上風法繼續疊代。在計算過程中，為了滿足牆壁函數  $y^+$  的條件，必須做 5 次的網格調適 (grid adaptations)。整個計算在有 8 個處理器的 SGI Origin 200 電腦上執行，當升力與阻力係數變化量小於  $\pm 0.001$  時，所需疊代次數約 1,600 次。阻力係數的預估值與實驗比較結果，相差約 5-10%。

除了 Fluent 軟體外，也有其他人使用其他商業軟體或自行開發的軟體來模擬車輛外部的空氣動力學。Gruen [6] 的 Carflow 軟體採用分區處理的方法 (zonal approach) 來模擬車輛周圍的穩態、不可壓縮流場。他將計算範圍分成三個區域，每個區域取其統御主要物理現象的數學模式：在邊界層外面的勢能流區與採用區塊方法 (panel method)，在邊界層內，分離流發生之前的區域採用邊界層方法，而在尾流區則採用尾流模型。這三個問題藉由三個巢狀迴路互相疊代，以完成偶合的問題。計算工作在 CRAY Y-MP 的超高速電腦上執行，計算結果的靜壓分佈與實驗數據吻合良好，唯在車底部分的差異較大。計算預估的阻力係數比實驗值來得低，可低到 10% 左右，但是當車子流線型越好時，計算預估的阻力係數與實驗值的差異越小。Mitsubishi 汽車公司研發單位 Kataoka 等人 [8] 利用多區塊方法 (multi-block method) 發展出 NAGARE 的流體動力學計算軟體及其升級軟體，並應用在 HSR II (實驗研究型的跑車) 與 MITSUBISHI 3000GT (量產車) 的流場計算，模擬的雷諾數 (特性長為車長) 為  $5 \times 10^6$ ，所需的計算時間在 CRAY Y-MP 或 Fujitsu VP400 或 HITAC S820/80 的超高速電腦也仍需要 10 到 20 小時。然而其計算的壓力係數分佈結果與風洞實驗結果比較非常吻合，阻力係數與實驗值相差在 5% 以內，升力係數與風洞實驗比較的絕對值差異也在 0.02 以內，相當令人滿意。通用汽車公司研發中心 Han 等人 [7] 利用自行開發的 CFD 軟體 GMTEC 模擬三個代表性的汽車模型的流場、壓力分佈、升力阻力係數，並與利用 GM R&D BRWT 風洞設備測試結果作比較。紊流模型採用的有標準  $k-\varepsilon$  與 RNG 模型。結果顯

示，計算與實驗的壓力係數分佈吻合度良好。數值計算所得的阻力係數比實驗值稍微高，升力係數則有高低，但相對誤差都在 4% 之內。福特汽車公司 (Ford Motor Co.) Lietz 等人 [11] 利用商用軟體 Powerflow 做輕卡車的空氣動力模擬，並且以與風洞實驗之流動觀察結果做為主要的比較來評斷模擬的精確性。結果顯示 CFD 模擬可以正確表現出流場的正確結構，然而在比較阻力係數時，他們的預估值與實驗值有較大的差距。

Ramnefors 等人 [14] 利用富豪 (Volvo) 公司的 CFDS-FLOW3D 軟體，以富豪 ECC (environmental concept car) 車子當基本比較模型，檢視不同的網格數量與紊流模型對 CFD 模擬結果精確性的影響。計算工作在一台 6CPU，2GB 記憶體 of SGI Power Challenge 電腦上執行，計算結果再與風洞實驗數據做比較以評斷數值模擬的精確性。計算網格數量一般採用 2.7 百萬網格，但是在探討網格解析度對計算結果之影響時，三維網格數量從 5 萬變化到 3 千萬，取其二維部分做運算並利用瑞查森外插 (Richardson extrapolation) 方法估算要精確預估阻力係數所需的最少網格數量。結果顯示在網格數 2.7 百萬時，阻力係數的變化量在 0.002 之內，網格數量太少時，網格數量的變化對阻力係數預估值有明顯的變化。另外，在紊流模型方面，他們探討了低雷諾數  $k-\varepsilon$  模型、標準  $k-\varepsilon$  模型與雷諾應力模型。當與風洞實驗數據詳細比較，結果顯示，低雷諾數  $k-\varepsilon$  模型的計算結果與實驗較為吻合。Williams 等人 [16] 指出利用風洞實驗數據校正 CFD 數學模型的重要性，實驗與數值模擬的配合運用，不但可以提升計算預估能力，獲得較正確且詳盡的空氣動力學資料，而且可以縮短研發時間，提升研發品質。

由以上文獻回顧可綜合得知，無論何種車輛的研發，為了得到詳細的流場與壓力場分佈資料，且可以快速修改設計，CFD 模擬是最受採用的方法。各車廠的 CFD 模擬均採用穩態 (steady state)、不可壓縮流的計算。欲藉由 CFD 模擬正確預估車輛的阻力升力係數，網格品質 (由形狀比例決定) 與數量均很重要。網格數量太少會明顯影響阻力係數的估算值。因此，CFD 計算所需的硬體設備也必須要能夠快速執行龐大的運算量。計算模擬結果的正確性必須藉由或多或少的實驗數據做比較，並可由比較過程決定較佳的數學模型與合理的網格數量。在公開的文獻中，並沒有發現有對 Go-kart 的空氣動力學模擬或升阻力係數的實驗數據。除了市場因素外，有可能因為 Go-kart 的速度沒有 F-1 賽車那麼

快，或是比較有可能的是，Go-kart 並非包覆式的車子，其空氣動力學會受到人、車結合後的外型的明顯影響，不能只有考慮車型。

在實驗方面，由於實驗測試數據是驗證計算模擬結果精確性不可或缺的資料，目前世界各大車廠都有自己的風洞測試設備，以上所提的計算模擬研究，也都有風洞實驗結果做比對。然而這些實車測試的風洞設備均非常昂貴，例如 Wickern 與 Lindener [15] 描述奧迪 (Audi) 車廠的風洞設備，可放置車輛正前向投影面積高達 3 平方米，風速可達 300 km/hr，而且含有 5 條皮帶帶動的地面模擬系統。Laise 與 Bayless [10] 描述了 Chevrolet Lumina 在 1989 至 1994 年間參加 NASCAR 溫士敦盃 (Winston Cup) 比賽的車輛在該期間如何達到最佳空氣動力性能的研發過程。風洞測試模型採用 1:3 比例的模型。不斷的風洞測試與實車路面駕駛測試所做的改進結果，該賽車的升力係數每年降低(下壓力上升)約 0.050，而阻力係數幾乎維持不變。

本研究的主要目的在於利用實驗與數值模擬之方法併用，探討小型競賽車輛外流場之空氣動力特性。藉由流場與壓力分布，了解主要造成風阻之因素，以改善原型車減低風阻之設計，並藉由分析比較市售典型小行競賽車與自行研製的原型車在風阻方面的優劣，以提供 Go-kart 設計者改進之參考。

本研究分成風洞實驗與數值模擬兩部分。將吳佩學等人 [1] 成功建立的數值模擬程序應用到 1:8 縮小模型在風洞內輪胎不轉動的情形，計算所得的風阻結果與藉由風洞量測的數據來做比較，以選擇較適當的紊流數值模型。在確認數值計算的合理性與選定適當的紊流模式後，再利用數值計算方法延伸到整個小型競賽車輛可能的操作速度範圍，並考量實車大小以及實際輪胎轉動、車子與地面有相對運動之情形，分析並相對比較市售典型小型競賽車與本研究自製原型車之空氣動力特性。

### 三、研究方法

#### (一) 風洞實驗

欲完整量測全尺寸車輛的升阻力數據，必須要有非常昂貴的設備(如 Wickern 與 Lindener [15])。在有限的經費下，本研究採用 1:8 的縮小模型在風洞中量測風阻。模型與人偶以光硬化樹脂材料用 RP 製程製作，車輪固定不動。本實驗採用的風洞為 5.7 kW 吸氣式風洞(圖 1)。風洞的風速由變

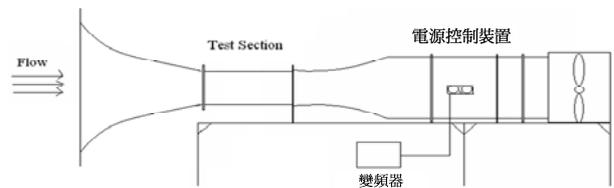


圖 1. 吸氣式測試風洞

頻器控制，並利用皮托管與差壓計作風速量測，風洞之風速與變頻器頻率之校正結果如圖 2 所示。在風洞吸入口下游緊接著就是測試段(如圖 3 所示)，其截面為 306 mm × 306 mm。在測試段的下板處有一處寬為 306 mm，沿流動方向為 228 mm 的矩形洞口，這是放置測試模型的地方。縮小小型賽車含人偶之模型固定於 306 mm (寬) × 226 mm (流動方向) 的壓克力模型座板上，將此板填塞於風洞底板的矩形洞，並且與底版面平齊。模型座下方則黏貼於 436 mm × 328 mm 的大壓克力板，其四個角落各以一條鉛垂線懸吊，使整座模型可以在預留的小空間 (2 mm) 做自由擺盪，採用小間隙在模型下游處可避免太大底板間隙造成對流場的影響。

模型重心的下方以不銹鋼棒連接到力平衡儀，以量測模型受風時之風阻(圖 4)。在不銹鋼棒與模型座連接處，沿著空氣流動的平行反方向(也就是風阻的反方向)，以細繩、滑輪、以及精密法碼施予一平衡拉力，使整個模型座隨時保持在可以自由擺盪的位置 [4]。在啟動風洞之前，先不加任何法碼，且將力平衡儀歸零。當風洞啟動時，以變頻器調整到所要的風速，並添加法碼平衡風阻，使力平衡儀回到零

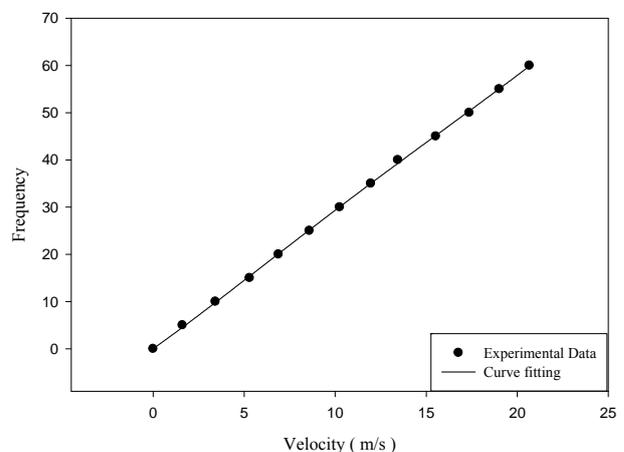


圖 2. 變頻器與風速校正圖

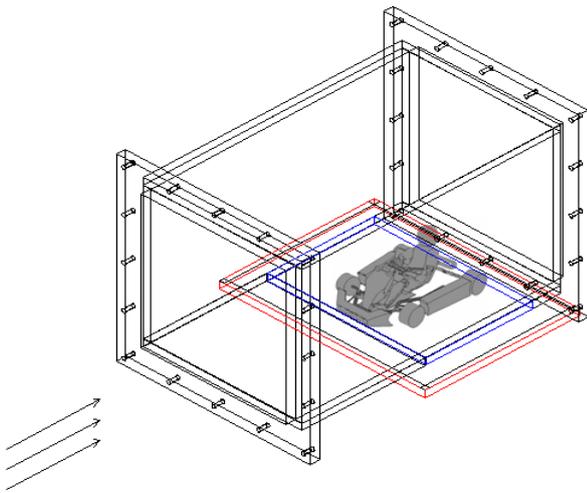


圖 3. 風阻實驗測試段

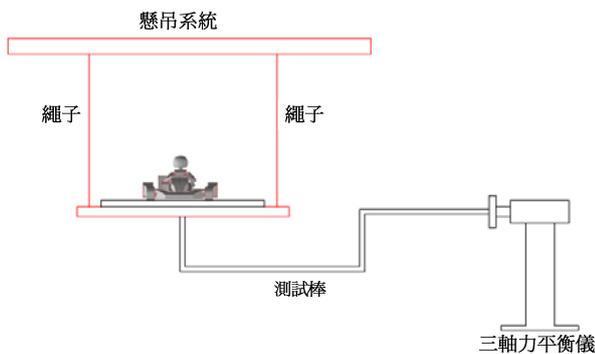


圖 4. 風阻之力量量測系統

點，此時記錄所添加精密法碼的質量，並換算為拉力。此拉力應等於在該風速下人車模型與平板底座的總風阻。需注意的是，模型座在小間隙自由擺盪與長的四周周圍盡量防漏的雙重要求下，實驗的控制著實不易。模型座與風洞壁任何些微（又不易察覺）的接觸以及懸吊法碼的滑輪的靜摩擦係數均會造成實驗量測阻力數據的波動。假設模型平板底座上方為紊流邊界層，依照 Munson 等人 [13] 計算平板摩擦阻力，將此摩擦阻力由量到的拉力中扣除後，所得結果即為小型賽車含人偶模型的修正風阻（詳細數據列於 [4]）。變化不同風速可得風阻對速度的曲線。本研究使用風洞的最大風速為 20 m/s。

## （二）數值風洞模擬

將吳佩學等人 [1] 已經成功建立的數值模擬程序應用到模擬縮小賽車(含人偶)模型在風洞的情形，利用 Fluent6.2

計算流體力學軟體進行流場模擬。在此整車計算模型主要涵蓋地面不動與輪胎不轉動的模型。計算區域之前視圖如圖 5 所示，模型後方有 6 倍的車長。在此受侷限的空間所需要的計算網格數可大幅減少。經測試結果，在固定的風速下，網格數量由 80 萬變化到 150 萬，所得的風阻變化已經小於 3% [4]。必須一提的是，本研究所使用的網格分區建置，從人車模型外表往計算區域外圍邊界之網格密度呈現由密變疏的情形，當網格總數量增加時，主要還是增加壁面附近區域的格點密度（詳述於 [4]），相鄰區域的網格密度須跟著調整使得相鄰區域界面處的網格比例維持在 1 比 2.5 以內。因此，本文所作的網格相依性測試主要是在測試壁面附近之格點大小對數值解的影響。為使得網格數對解答的影響可以忽略，後續的計算比較均採用約 80 萬的網格數。在計算的收斂控制中，質量與動量守恆方程式的平衡收斂殘值設定為  $1E-04$ 。

數值模擬的做法將流體視為定常性質的不可壓縮流體，假設流場為三維、穩態、不可壓縮的紊流，模擬全車模型（因為 Go-kart 結構並非對稱性）的周圍與風洞壁內的流場與壓力場，解連續方程式與動量方程式及描述紊流的方程式。數值計算程序中的前處理、計算與後處理已於 [1, 4] 中詳述。為了節省計算時間且不影響精度，本研究採用混合式網格，在車身附近採用非結構式網格，而在其它區域為結構式網格（如圖 6 所示）。若輪胎為真圓，則在輪胎與地面接觸的地方容易產生歪斜度過大的網格，因此必須做特別的處理。由於實際情形，車輛受重力作用，輪胎與地面接觸會有小部分的平面接觸面積，本研究模擬中也給予微小接觸平

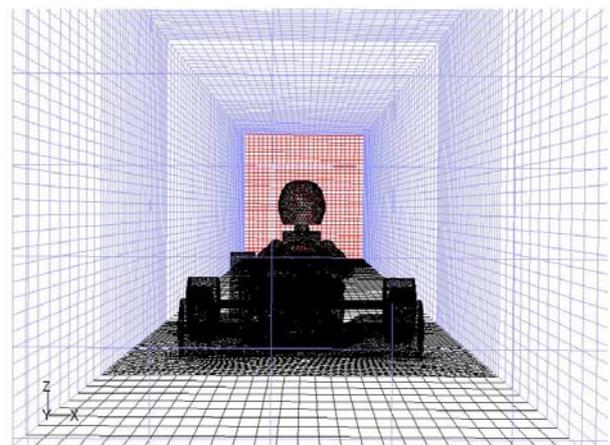


圖 5. 數值風洞計算區域前視圖

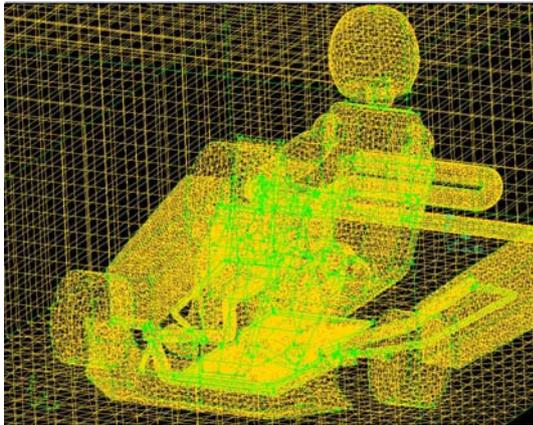


圖 6. 模擬所使用之混合式網格

面以消除歪斜度過大的網格。在實際許多尖銳交接處產生的小體積，本研究也採用消除尖銳角處理，以利網格之建立，但不影響外型。測試的紊流模型含有標準  $k-\varepsilon$ 、 $k-\varepsilon$  realizable、RSM、RNG、 $k-\omega$ 、SST 等模型，不同紊流模型預測結果之比較乃基於上述已經排除網格數相依性的結果。另外，由於在計算中檢查離壁面的第一個格點都滿足牆壁座標  $y^+ > 10$ ，因此，在本文的紊流計算中均有使用壁函數。

#### 四、結果與討論

將市售典型小型賽車以 1:8 的比例縮小，並加上人偶後，所得的模型以下簡稱舊模型 (old model)。利用風洞實驗所得舊模型的風阻數據於圖 7 之中以點符號表示，相對應的阻力係數則示於圖 8。

風阻的值大約隨風速的平方增加，與 (1) 式的形式吻合。在風速 12 m/s 以下，數據跳動比較小，超過該風速後，

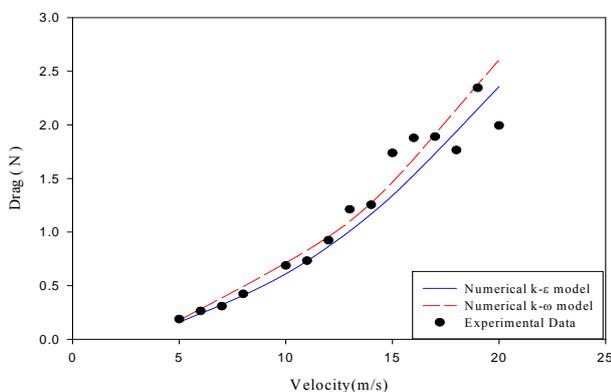


圖 7. 舊模型風洞實驗與數值模擬風阻結果之比較

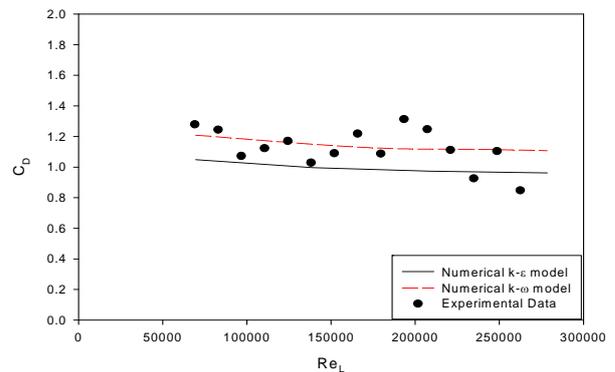


圖 8. 舊模型風洞實驗與數值模擬風阻係數結果之比較

力平衡儀顯示的數據跳動隨風速的增加而增加。這是因為本實驗測試模型與底座採自然懸吊方式，可以容易感受到微小的作用力，同時，力平衡儀的敏感度為 0.01 N，在高風速下，人車模型表面的渦流脫離頻率增加，後方尾流的混合效用增強，模型感受到紊流造成的震盪力量。此時利用法碼平衡風阻，在測量上造成較大的不準度。

圖 7 與圖 8 也同時顯示兩組紊流數值模型 ( $k-\varepsilon$  與  $k-\omega$ ) 的計算結果。 $k-\varepsilon$  紊流模型通常比較經得起考驗，也比較普遍被採用在一般的流體力學計算，在此與實驗數據比較，計算的風阻雖有稍微低估的趨勢，其吻合度也尚稱良好，均在實驗不準度範圍之內，而且其計算結果的流場結構與  $k-\omega$  模型結果相似。圖 7 與圖 8 顯示採用  $k-\omega$  紊流模型所得舊模型的結果與實驗比較吻合度更好，有可能是因為此流場含有大小不同渦流尺度之故。在固定風速 10 m/s 之下 ( $Re_L = 1.39 \times 10^5$ )，採用  $k-\varepsilon$ 、 $k-\varepsilon$  realizable、RSM、RNG、 $k-\omega$ 、SST 等紊流模型所得舊模型的風阻值如表 1 所列，其中雷諾數採用車身長為特性長  $L$ 。表 1 模擬狀況的量測數據為  $C_D = 1.179$ 。所有紊流數值模型對風阻的預測值相差不超過 15%，其中以  $k-\omega$  的模型最適用於延伸至小型競賽車真實的操作速度範圍做不同車型的空氣動力特性相對比較。

利用  $k-\omega$  紊流模型計算市售典型競賽車 (舊模型) 在風洞中風速為 30 m/s (時速 108 公里) 情形下，人偶與車子表面的壓力分布如圖 9 所示。由該圖可以看出，前擋板 (front panel)、整流罩 (front fairing, bumper 的外形罩)、輪胎迎面、頭盔正前方等易造成流體停滯點的地方，均會產生局部的高壓。這些表面壓力分布也反應在流場的壓力分布。沿著人車中心切面畫出的流場壓力分布如圖 10 所示。圖中顯示人車的後方發展出大片的低壓尾流區，這是使得小型賽車風

表 1. 不同紊流模式計算結果比較 ( $Re_L=1.39 \times 10^5$ )

紊流模式	Drag (N)	$C_D$
$k-\varepsilon$	0.6102	0.9961
$k-\varepsilon$ realizable	0.5944	0.9705
RSM	0.5786	0.9447
RNG	0.5837	0.953
$k-\omega$	0.6677	1.0902
SST	0.58595	0.9567

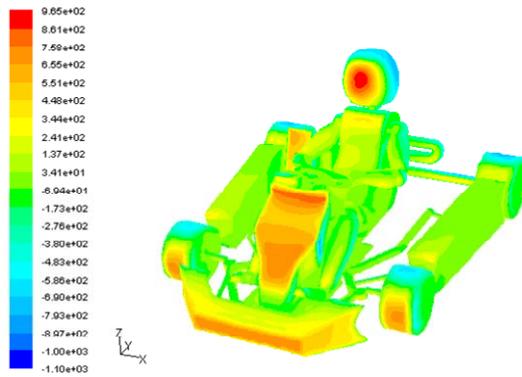


圖 9. 舊模型 Go-kart 含駕駛人偶之表面靜壓分布 (單位: Pa)

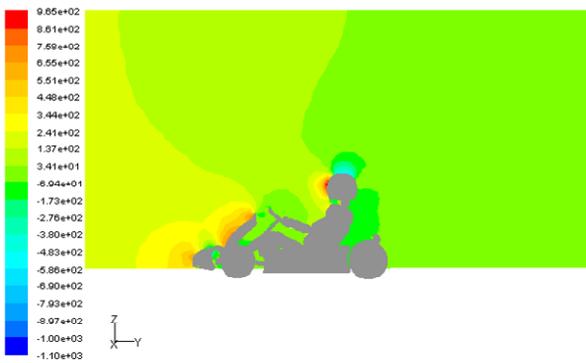


圖 10. 舊模型中心切面之壓力分布 (單位: Pa)

阻係數比一般流線型房車偏高的原因。相同風速下的局部速度大小分布如圖 11 所示，尾流的部份明顯的速度較低。將鄰近人車後方的流場以向量圖表示，由圖 12 可看出尾流含有多個渦流系統。為進一步了解高停滯壓與高風阻造成的原因，利用在進口處離地面 2 mm 高度流體質點的釋放，並追蹤其質點軌跡 (徑線 path line)，結果如圖 13。徑線圖顯示，流體在衝擊整流罩及前擋板後，繼續由前擋板上方向後流向駕駛頭、胸部，造成如圖 9 與圖 10 的表面高壓區，顯示該市售車對於減低風阻並沒有良好的導流設計。

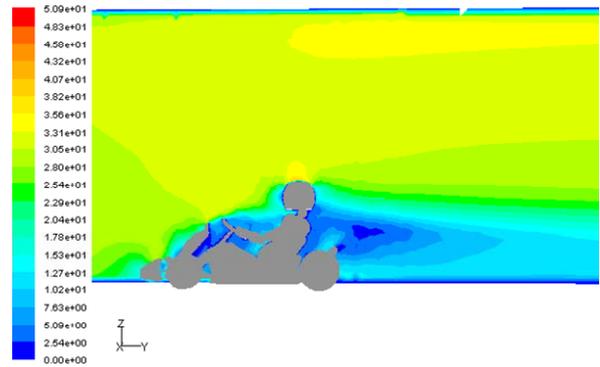


圖 11. 舊模型中心切面之速度大小分布 (單位: m/s)

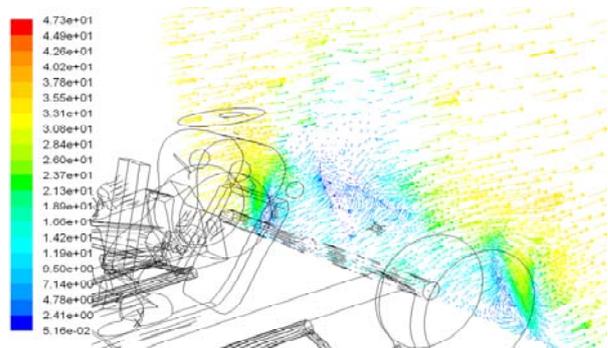


圖 12. 舊模型人車模型後方之尾流速度圖 (單位: m/s)

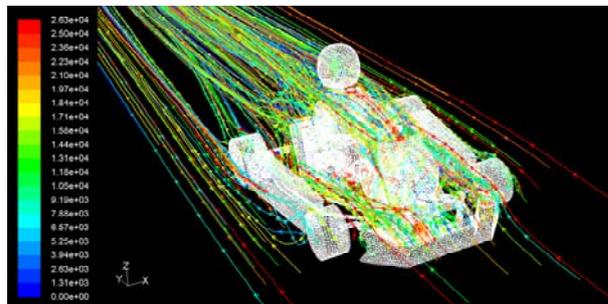


圖 13. 舊模型流體質點運動軌跡

對於市售小型賽車的風壓分布有清楚的了解後，本研究相關的團隊設計出新的車子外形 [2]，主要明顯的改變在於前擋板、前整流罩、與側護罩之外型。前擋板除了變成較銳利形外，其長度較長，放置角度也比較傾斜。將新車外形同樣以 1:8 比例縮小，並加上相同的人偶後 (以下稱此為新模型)，利用上述相同的風洞實驗與數值模擬方法進行流場與風阻的探討。所得新模型風洞實驗與數值模擬風阻係數結果之比較表示於圖 14，與舊模型不同的是， $k-\varepsilon$  與  $k-\omega$  紊流模型所預測的結果相差不多，而且除了很低速的情形外，都

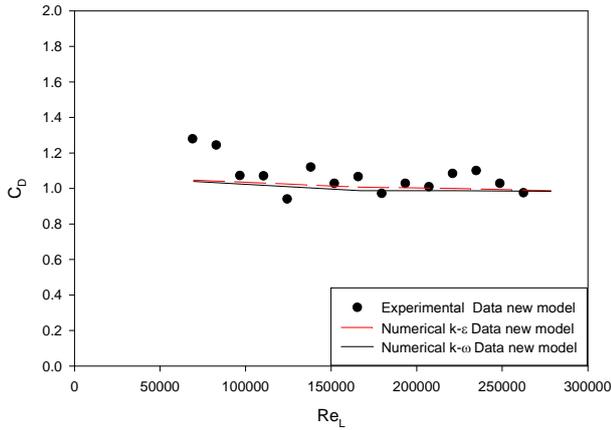


圖 14. 新模型風洞實驗與數值模擬風阻係數結果之比較

與實驗數據合理相符。新模型之表面壓力分布與中心切面之壓力分布分別畫於圖 15 與圖 16。與舊模型圖 9 及圖 10 做比較，前擋板的風壓有顯著的降低。利用前述在進口處離地兩公分釋放的質點軌跡（圖 17）顯示，新賽車模型前擋板對流體有往兩側推開的作用，作用在人偶頭罩與胸部的停滯靜壓力造成減低的效果。新模型中心切面之速度大小分布畫於圖 18。由於新車型前後壓差明顯比舊車型低，流場顯示新模型車後尾流低壓區明顯減小，有助於風阻之改善。

由於風洞的功率限制，而且實車風阻實驗耗資昂貴，本研究利用上述選定的  $k-\omega$  紊流數值計算模型，應用到速度延伸到 400 m/s 的範圍（以動力相似轉換為原車大小時相當於時速 180 公里的車速，因此在計算中仍然採用不可壓縮流之假設），採用  $k-\omega$  紊流模型所得新舊車型含相同人偶的阻

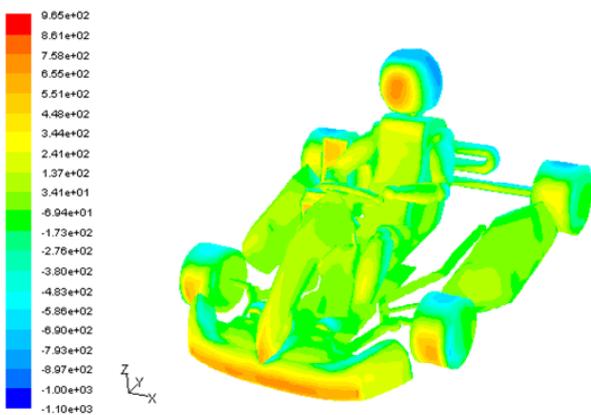


圖 15. 新模型 Go-kart 含駕駛人偶之表面壓力分布 (單位: Pa)

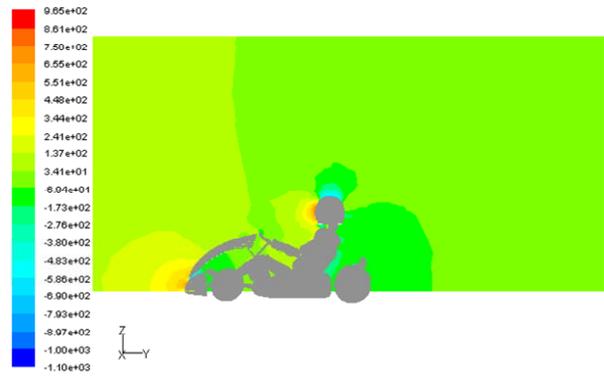


圖 16. 新模型中心切面之壓力分布 (單位: Pa)

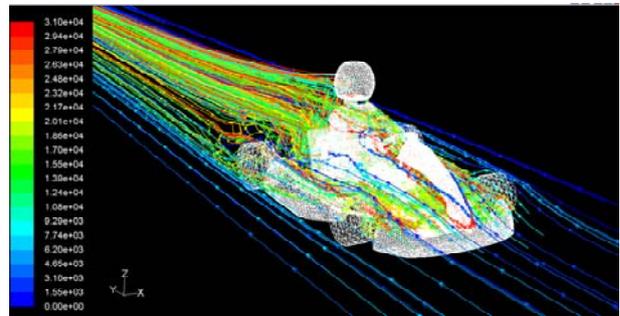


圖 17. 新模型流體質點運動軌跡

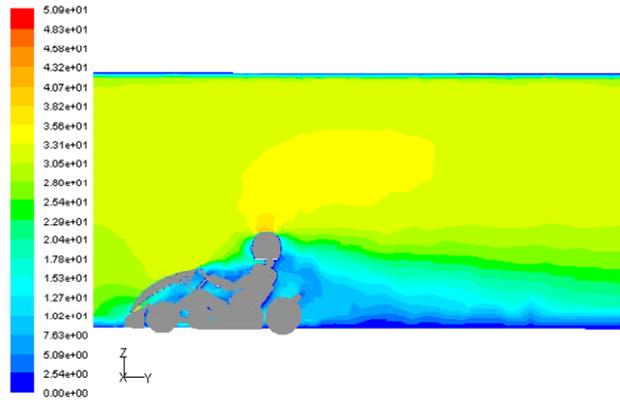


圖 18. 新模型中心切面之速度大小分布 (單位: m/s)

力係數對雷諾數作圖如圖 19 所示，其中雷諾數的特性長採車子模型的長度。在此延伸數值模型做高雷諾數實際小型賽車在開放空間運動的風阻比較時，數值模擬的地面與車身做與車速一樣大小的相對運動，而且輪胎也做相對應的轉動，輪胎外徑的線速度等於地面的相對運動速度。結果顯示，本研究團隊新設計的小型賽車外形有效且明顯的減低了風阻係數。

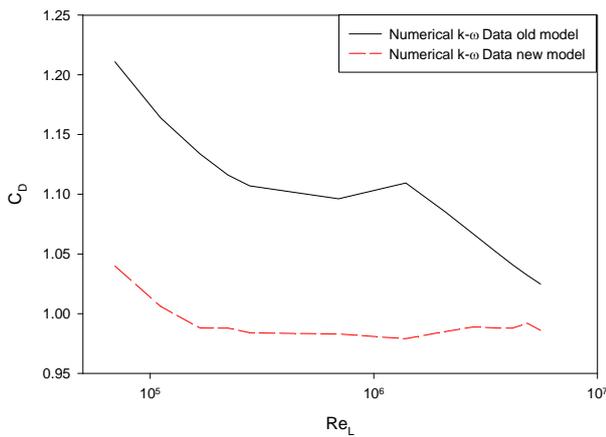


圖 19. 新舊模型之風阻係數模擬結果比較

## 五、結論

本研究以風洞實驗與數值模擬並進的方法，探討小型競賽車輛之外流場與風阻，並藉以改善原型車減低風阻之設計。風洞實驗採用 1:8 的縮小模型置，數值模擬則利用計算流體力學軟體 Fluent 對舊模型（市售車）與新模型 [2] 在風洞中的情形做計算，藉由風動量測的風阻數據來選擇最適當的數值計算模型。並由數值計算在高風速之延伸，比較市售小型競賽車與本團隊新設計原型車之風阻係數。本研究結果可得以下結論：

1. 風洞實驗結果有助於正確紊流數值模型的選擇。
2. 對於新舊兩種車型，實驗與數值模擬結果均顯示，數值計算採用  $k-\omega$  紊流模型所得結果與風洞實驗數據最相吻合， $k-\epsilon$  紊流模型吻合度次之。
3. 新車型前擋板的銳利外型與傾斜角度，有效排開氣流，降低擋板與頭罩的停滯壓力，也減少了尾流低壓低速區的範圍。
4. 對整車外型，尤其是前擋板與前整流罩，作減低風阻之設計後，新設計原型車之風阻在整個實際操作速度範圍內都有明顯的降低。

## 誌謝

本研究經費承蒙國科會補助，計畫編號 NSC 94-2745-E-212-004-URD，謹此誌謝。

## 參考文獻

1. 吳佩學、莊育鑫、陳立昫、邱懷慶（民 94），小型競賽

車輛外部流場與風阻之數值模擬，中國機械工程學會第二十二屆全國學術研討會論文集，論文編號 C12-008，2005 年 11 月 25-26 日，中央大學。

2. 梁卓中、楊旻洲、吳佩學、李春穎、鄧作樑、林海平、陳志鏗、吳佳璟、張瑞宏（民 94），小型競賽車輛之自行設計與研製，中國機械工程學會第二十二屆全國學術研討會論文集，中央大學。
3. 經濟部工業局（民 91 年 3 月 6 日），經濟部工業局推動新興產業之發展政策與方向新聞稿，經濟部工業局，台北。
4. 謝琛（民 97），小型競賽車外流場之數值模擬與風阻之實驗測試，大葉大學機械與自動化工程學系碩士論文。
5. Fluent Inc. (2002) Formula 1 External Aerodynamics, Application Briefs from Fluent, EX166, Lebanon, NH.
6. Gruen, N. (1996) *Simulating External Vehicle Aerodynamics with Carflow*. SAE paper No. 960679, SAE International, Warrendale, PA.
7. Han, T., V. Sumantran, C. Harris, T. Kuzmanov, M. Huebler and T. Zak (1996) *Flow-field Simulations of Three Simplified Vehicle Shapes and Comparisons with Experimental Measurements*. SAE paper No. 960678, SAE International, Warrendale, PA.
8. Kataoka, T., H. China, K. Nakagawa, K. Yanagimoto and M. Yoshida (1991) *Numerical Simulation of Road Vehicle Aerodynamics and Effect of Aerodynamic Devices*. SAE paper No. 910597, SAE International, Warrendale, PA.
9. Kleber, A. (2001) Simulation of air flow around an OPEL ASTRA vehicle with FLUENT. *Journal Articles by Fluent Software Users*, JA132, 1-6.
10. Laise, T. D. and K. S. Bayless (1994) *Aerodynamic Development of a Successful NASCAR Winston Cup Race Car*. SAE paper No. 942521.
11. Lietz, R., W. Pien, D. Hands and J. McGrew (1999) *Light Truck Aerodynamic Simulations using a Lattice Gas Based Simulation Technique*. SAE 1999-01-3756, SAE International, Warrendale, PA.
12. Makowski, F. T. (2001) Computer simulation helps engineers improve Ferrari formula one aerodynamics. The High Tech Cars and Engines Symposium (HCTE2001), Mostra-Convegno, Italy.
13. Munson, B. R., D. F. Young and T. H. Okiishi (2002) *Fundamentals of Fluid Mechanics*, 4th Ed., John Wiley &

- 
- Sons, Hoboken, NJ.
14. Ramnefors, M., R. Bensryd, E. Holmberg and S. Perzon (1996) *Accuracy of drag Predictions on Cars using CFD – Effect of Grid Refinement and Turbulence Models*. SAE paper No. 960681, SAE International, Warrendale, PA.
15. Wickern, G. and N. Lindener (2000) *The Audi Aeroacoustic Wind Tunnel: Final Design and First Operational Experience*. SAE 2000-01-0868, SAE International, Warrendale, PA.
16. Williams, J., W. J. Quinlan, J. E. Hackett, S. A. Thompson, T. Marinaccio and A. Robertson (1994) *A Calibration Study of CFD for Automotive Shapes and CD*. SAE paper No. 940323, SAE International, Warrendale, PA.
- 收件：99.05.10 修正：99.06.22 接受：99.09.20**