

國防部 113 年「補助軍事院校教師(官)從事學術研究」

研究計畫名稱：

以數值模擬及實驗探討渦流在限制條件變化

委 託 單 位：國防部

研 究 單 位：空軍航空技術學院

研究計畫主持人：葉崇偉 副教授

共 同 主 持 人：許掙強 助理教授

國防部編印

中華民國 113 年 11 月 30 日

摘要

本計畫的主要目的進行小型乾衣裝置的烘箱形狀改良與分析，並設計實用化的裝置構造。採用計算流體力學技術，探討烘箱形狀、進氣口、排氣口位置等參數對氣流狀態的影響。首先以數值模擬瞭解現有市售烘衣機常用的進排氣口設計與內部對流特性的關係，並比較經過位置調整後的差異。再加入進氣方向之設計，由模擬結果確認箱體內空氣可形成大範圍渦漩運動。經適當調整後，內部渦漩氣流速度低於進氣流速一半以下的區域可降到 14%，大幅提高有效對流的區域，減少氣流死角。實務上以個人攜帶於野外操作為使用情境，合併考慮操作細節，完成商品化之設計，是立即可運用之技術。

目錄

摘要	i
目錄	ii
圖表目錄	iii
第一章 緒論	1
1-1 烘乾原理	3
1-2 研究動機與目的	4
第二章 研究方法	5
2-1 OpenFOAM 計算流體力學軟體	5
2-2 FreeCAD 建模軟體	6
2-3 CfdOF 流體力學分析介面	8
2-4 ParaView 後處理可視化工具	9
第三章 結果與討論	10
3-1 進氣口與排氣口配置之影響	10
3-2 圓筒型烘箱之三維流場分析	11
3-3 蝸捲式進氣流道之圓筒型烘箱模擬	12
3-4 實體結構設計	14
第四章 結論	20
參考文獻	21

圖表目錄

圖 2-1 OpenFOAM 整體架構 [11].....	5
圖 2-2 CfdOD 工作流程 [13].....	8
圖 3-1 不同進氣、排氣配置之二維流場模擬	10
圖 3-2 基本烘箱形狀設計.....	11
圖 3-3 三維流場數值模擬.....	12
圖 3-4 蝸捲式進氣流道烘箱模型.....	13
圖 3-5 蝸捲進氣道烘箱流場數值模擬.....	13

第一章 緒論

物品或材料的乾燥處理，從日常生活、實驗室到工廠產線作業，都是經常進行的程序。例如混凝土構造物中的骨材(砂、石子)的含水量會造成相當程度的體積變化，乾後體積會收縮，加水拌合後，體積回脹可能超過 35%，而重量變化也可能超過 10%。因此在試驗室中，進行各類檢測之前都要對材料進行烘乾，以避免水分影響其性質[1]。紡織品是經常需要乾燥的物品。不論是日常衣物洗滌，或是紡織廠的產品清潔，在經過水洗之後，通常先以離心脫水設備去除大部分的水份。不過由於紡織品的材料特性，離心作用無法完全將水份去除，最後階段必須藉由蒸發程序，才能將紡織品上的水份完全去除。農牧產品也是常見需要乾燥的例子。

影響蒸發速度的關鍵為溫度及對流。液態水溫度提高時，水分子的內能增加，越容易蒸發為氣態。水分子變為氣態時，會吸收很大的潛熱(2260 kJ/kg)，使液態水溫度下降。因此若要維持蒸發速度，必須持續提供熱能，保持足夠的溫度。因此，讓水分快速蒸發的最基本方法是加熱。在許多情況下，待乾燥物品加熱的溫度不能過高，否則可能造成損壞。例如紡織品、農產品等。在溫度未達到沸點的情況下，液態水蒸發速度和周圍空氣的相對溼度有直接關聯。相對溼度越低，蒸發的速度會越快。如果水分子氣化之後仍逗留在紡織品周圍，將使局部的空氣濕度提高，造成蒸發速度下降。因此，必須藉由對流作用，將氣化的水分子移離紡織品的周圍，才能維持蒸發速度不變。

考量到溫度與相對濕度的要求，使用熱風烘乾是常見的乾燥方法。經過熱氣流可以對物品加熱，同時將周圍的氣態水移走，加快乾燥的速度。因為氣流狀態對於加熱和對流效應都有影響，使得熱氣流控制成為烘乾效率的關鍵。一般而言，熱氣流與物品接觸時間越久，可以有越多的熱量傳遞，維持蒸發所需的溫度。但是若熱氣流速度太慢，可能造成週邊空氣內的水分子停滯，使濕度升高。反之，若熱氣流快速通過，雖然可以帶走氣化的水分子，但因接觸時間短，許多熱空氣的熱量尚未完成傳遞，就被離開物品，排到週邊大氣中，將產

生過多的廢熱。此外，放置待乾燥物品的空間中，可能有部份區域流速較低，或是形成封閉的迴流區，氣體交換率較差，也會造成局部烘乾效率不佳。

對於烘乾設備而言，提供足夠熱量來產生熱氣流是基本要件。而烘乾效率的高低，與熱氣流在烘乾區域內的流動狀況有關。有效的熱氣流動，必須滿足幾項要件：

1. 氣流必須經過烘乾設備內部所有放置物品的空間；
2. 有適當的氣體交換率；
3. 待烘乾物件加熱溫度分佈均勻。

為達到上述的要求，常見烘乾設備採取的策略，包括下列方法：

1. 內部空間規劃為狹長通道，使氣流沿單一方向流動，並有足夠的熱傳時間 [2, 3]；
2. 利用進氣方向、導流片等裝置，導引氣流到所有內部空間 [2, 4-7]；
3. 循環移動待烘乾物件的位置，使重複接觸流動的熱氣流 [8, 9]。

不同的烘乾策略適用於不同的待乾燥物品及運用場域，在規劃與設計之前，必須先確定應用對象與場合。本創作以小型可攜式烘衣設備為主要考量，可於戶外活動期間使用，或是作為臨時性緊急裝備。現有可攜式烘衣裝置是以一般簡易衣櫥為基礎，其結構包括形成容置空間的支架與遮布，吊掛衣物的支撐桿及外部的熱風設備。容置空間底部設置有入風口，以連接熱風設備。當熱風設備啟動後，則可將加熱空氣經由入風口吹入封閉的容置空間，使得支撐桿上的衣物溫度升高而能快速乾燥。然而，支架與遮布組成的內部空間近似於矩形體，不利於空氣流動，使得熱空氣無法自然達到所有內部空間。另一方面，通常將入風口設置在架體的底部，且僅利用裝置的接縫或遮布的多孔性排出，使內部空氣流速不均勻。在自然對流作用下，熱空氣可能直接上升至空間頂部，然後由孔隙排出，縮短熱量滯留在內部的時間，造成熱風能量消耗率較高，降低衣物的烘乾效率。

本研究理念之創新為：利用重新設計入風口與排風口位置，以及改善容置空間外型，使熱空氣於內部自動產生氣旋流動，提升容置空間中的濕氣排出效率，並減少能量消耗。

1-1 烘乾原理

空氣為烘乾機中的乾燥媒介。空氣可以含有水蒸氣，因此可用來吸收紡織品上的水分，並將其帶走。空氣的水蒸氣含量常用絕對濕度(absolute humidity)、相對濕度(relative humidity)與比濕度(specific humidity)表示。相對濕度是目前空氣水蒸氣含量與飽和值的比率，通常以蒸氣壓來定義

$$\phi = \frac{p_v}{p_{sat}} \quad (1)$$

其中 p_v 與 p_{sat} 分別為蒸氣壓與飽和蒸氣壓。飽和蒸氣壓與空氣的溫度有關。相對濕度必須小於 100% 才能具有吸收額外水份的能力。

烘乾機實際移除的水份，可以用進、出空氣的比濕度差值來表示。比濕度可表示為

$$Y = 0.622 \frac{p_v}{p - p_v} = 0.622 \frac{\phi p_{sat}}{p - \phi p_{sat}} \quad (2)$$

其中係數 0.622 為水分子量與空氣平均分子量的比值。

在烘乾機中，乾燥程序與空氣可以獲得濕氣的能力有關。空氣與紡織品接觸時，與乾燥有關的現象有兩個：由空氣到紡織品表面的熱傳、由紡織品表面到空氣的質傳。空氣與紡織品的熱量傳率可表示為

$$\frac{dQ}{dt} = \bar{h} A_t (T_A - T_t) \quad (3)$$

其中 \bar{h} 為平均熱傳係數， A_t 是接觸表面積， T_A 是空氣溫度， T_t 是紡織品表面溫度。紡織品表面到空氣的質量傳遞率為

$$\frac{dm_{ev}}{dt} = \bar{h}_m A_t (p_t - p_A) \quad (4)$$

其中 \bar{h}_m 為平均質傳係數， p_A 是空氣的蒸氣壓， p_t 是紡織品表面的蒸氣壓。如果紡織品表面覆蓋有液態水，則 p_t 應為飽和值。與空氣之間的蒸氣壓差值越大，質傳的效果越佳。如果紡織品表面未被液態水覆蓋，則表面的蒸氣壓與紡織品的吸水性質有關：

$$p_t(X_t, T_t) = p_{sat}(T_t) a(X_t) \quad (5)$$

其中 a 代表紡織品內含水份的蒸發活性，與吸水特性及含水量 X_t (=含水質量/紡織品質量) 有關。

熱傳與質傳特性的決定性因素，可藉由 Biot 數分析，來判斷與內部或外部因素有關。熱傳的 Biot 數定義為

$$Bi = \frac{h_h L}{k_s} \quad (6)$$

其中 h_h 為對流熱傳係數， L 為特徵長度，等於固體的半厚度， k_s 為紡織品的熱傳導係數。代表熱傳導阻力與熱對流阻力的比值。由於紡織品厚度不大 ($\sim 10^{-3}$ m)，自然對流的 h_h 大約在 5~25 左右，纖維編織品的 k_s 約在 0.1~1 之間，因此通常 Bi 值小於 1 [10]，代表熱對流阻力大於熱傳導阻力，因此若提升熱對流效能，對整體熱傳效能有較大的影響。

質傳的 Biot 數為

$$Bi_m = \frac{h_m L}{D_{AS}} \quad (6)$$

其中 D_{AS} 為擴散係數。對於具有大量孔洞的多孔材料，微小分子物質在其中十分容易擴散，因此 Bi_m 通常小於 0.1 [10]，代表質傳效能的關鍵仍是取決於對流特性。根據 Bi 與 Bi_m 分析，對流特性對於紡織品烘乾裝置的效能有關鍵性的影響。

1-2 研究動機與目的

考慮設計裝置的可攜性，主要尺寸為 1~2 公尺量級，因此不適合採用狹長通道設計。為了簡化裝置，待烘乾物件以固定放置為原則，不考慮納入移動機構。因此，針對提高烘乾效率的目標，設計的重點在於內部空間中的對流控制。在本研究中，將利用進氣方向、排氣位置及空間區隔等方法，使進入烘衣機內部的熱氣流產生渦漩，並且可通過所有內部空間，有效達到使水分蒸發及對流之作用。

運用相關學理以數值模擬方式改良習知的進(排)氣方式，重新設計的入風口與排風口位置優化氣場環境，減少紊流及熱能溢散，並使熱空氣於內部自動產生氣旋流動，延長熱風能量滯留在容置空間的時效性，進而增加熱風能量使用率，減少能源消耗，使有利於資源缺乏的戰場或救災現場。

第二章 研究方法

為驗證設計之流動方式是否滿足所需，採用計算流體力學軟體作為輔助工具。在本研究中採用 OpenFOAM 開源軟體[11]來分析流場現象。為了方便執行建模與前處理工作，選用三維電腦輔助設計軟體 FreeCAD [12]繪製數位模型，並使用其內建的 CfdOF 工作模組[13]作為數值模擬的前處理介面。數值模擬結果以 ParaView 軟體[14]進行資料的圖形化分析與顯示。

2-1 OpenFOAM 計算流體力學軟體

OpenFOAM 是針對解學連體力學問題所設計的開源 C++函式庫，可用於建立應用程式。這些應用分為兩類：解算器(solver)和通用程序(utility)。針對解決連體力學中的特定問題，設計了對應的解算器函式。而通用程序是用於執行資料操作的任務。使用者可以運用涉及的基礎方法、物理和程式設計技巧等先決知識，創建新的解算器和通用程式。

OpenFOAM 提供了預處理和後處理環境。預處理和後處理的介面本身就是 OpenFOAM 的通用程序，確保所有環境中資料處理的一致性。OpenFOAM 的整體結構如圖 2-1 所示。

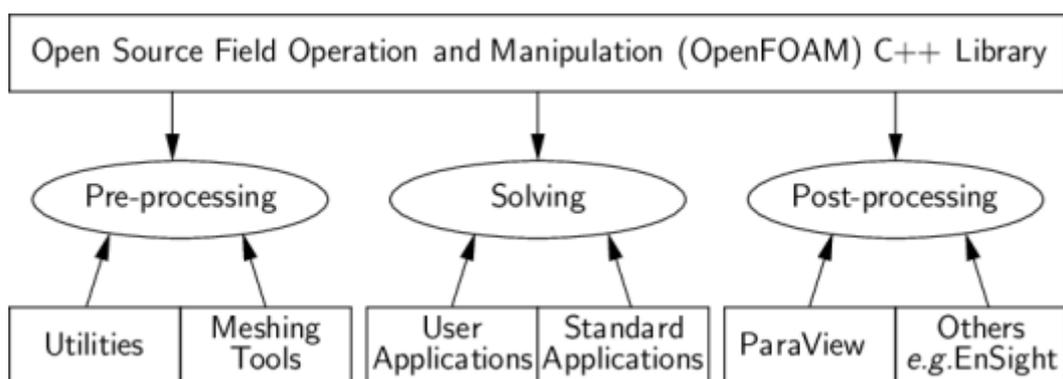


圖 2-1 OpenFOAM 整體架構 [11]

不論是前處理、解算或後處理，均無圖形化介面的通用程序，直接以文字命令介面處理對應的檔案文件。專案資料必須放置在指定的檔案目錄中，並依照特定的文件結構。目錄名稱即為專案名稱。專案目錄可以位於任何位置，但

建議設置於使用者專案目錄的子目錄中，避免文件搜尋失敗及使用者權限不足等問題發生。OpenFOAM 包括了多個預先編譯的函式庫，在解算器和通用程式的編譯過程中作動態連結。物理模型等函式庫以原始程式碼形式提供，使用者可以輕鬆地將自己的模型加入函式庫中。

OpenFOAM 包含大量解算器，各針對特定類別的問題而設計。不同解算器的方程式和演算法有所不同，因此解算器的選用與使用者針對其特定情況的建模有關。各解算器需要定義許多參數和物理屬性，但也有供使用者決定的建模選項。

OpenFOAM 有許多物理模組，除基本的勢流、純量傳輸等解算器外，在模擬穩態/非穩態流場、可壓縮/不可壓縮流等不同情境時，由於統御方程式不同，分別採用不同的解算器。在一般情形下，低速流場的問題大多符合不可壓縮流假設，因此可直接選擇不可壓縮流解算器。進行穩態與非穩態模擬之決定，則應考量是否需受時間變化影響結果。若對於時間變化並不敏感，適合選擇穩態流場。此外，流體依運動方式可分為層流及紊流，在複雜環境中大多數流動無法避免變換為紊流。紊流流場是以紊流模式進行模擬，例如直接求解法(Direct numerical simulation, DNS)、k- ϵ 模式、大渦模擬(Large Eddy Simulation, LES)等，其中 DNS 為目前最精準之解法，但於實際應用上因解析至最小紊流尺度之計算資源過於龐大，以目前之電腦運算能量來看，能夠使用之場合仍然相當有限。k- ϵ 模式以時間平均的連續方程式及 N-S 方程式，配合包含紊流動能 k 與消散率 ϵ 之控制方程式解出紊流流場。LES 模式則是直接求解大於網格尺度之渦流，而小於網格部份則以次網格模式模擬。除上所述外，尚有許多紊流模式，常見之紊流模式於 OpenFOAM 內皆有模組可使用，依據所需之精準度、時間效率及運算能量等考量，挑選適當的紊流模式來做使用。

2-2 FreeCAD 建模軟體

FreeCAD 是開源、免費的參數化 3D 電腦輔助設計(CAD)建模軟體，可用於簡單設計到大量零件組成的複雜專案物件。主要用於機械設計，但也可用於需要精確建模 3D 物件並控制建模歷史的所有其他用途。參數化設計是一種基於定

義參數及其之間的關係來設計物件的方法。在這種方法中，參數的變更會自動傳播到設計的相關元素中，從而實現快速迭代和調整。

由於其開源性質，FreeCAD 可以免費下載、分發、修改以及用於個人和商業目的。原始碼在 LGPL 許可下公開發布，可在 Windows、macOS 和 Linux 平台上運作，並具有相同的外觀和功能。軟體最初於 2002 年發布。具有模組化軟體架構，可以在不修改核心系統的情況下提供附加功能。歷年來不僅持續改進 CAD 工具功能，而且還在不同領域開發了與 CAD 相關的功能，例如有限元素分析(FEM)、建築資訊模型 (BIM)功能等。FreeCAD 大量使用科學計算領域中已存在的開源程式庫。其中包括開放級聯技術(Open Cascade Technology, OCCT)的 CAD 核心、Coin3D 圖形開發工具包、Qt 使用者介面軟體架構和目前正快速發展的 Python 語言。FreeCAD 本身也可以被其他程式作為函式庫使用。

FreeCAD 的主要特點為：

1. 以 Open Cascade 技術為基礎的完整幾何內核，允許對複雜形狀類型進行複雜的 3D 操作，並原生支援邊界表示(BREP)、非均勻有理基礎樣條(NURBS)曲線和曲面、各種幾何實體等概念，布林運算和圓角，以及內建對 STEP 和 IGES 格式的支援。
2. 全參數化模型。所有 FreeCAD 物件本身都是參數化的，代表其形狀都是根據屬性來產生，或甚至與其他物件相關。所有變更都會根據需要來重新計算，並且記錄於取消/重作堆疊。可以輕鬆增加新的物件類型，甚至可以完全用 Python 進程式設計。
3. 模組化架構允許使用外掛擴展(模組和工作台)，添加功能到核心應用程式。擴充功能可以像用 C++程式設計的全新應用程式一樣複雜，也可以像 Python 腳本或自錄製巨集一樣簡單。可以透過內建的 Python 直譯器、巨集或外部腳本完全存取 FreeCAD 的幾乎任何部分，無論是幾何體創建和轉換、該幾何體的 2D 或 3D 表示(場景圖)，甚至是 FreeCAD 界面。
4. 除了 FreeCAD 的原生 FCStd 檔案格式之外，還可以匯入/匯出為標準格式，例如 STEP、IGES、OBJ、STL、DXF、SVG、DAE、IFC 或 OFF、NASTRAN、VRML。FreeCAD 和給定檔案格式之間的相容性等級可能會有所不同，因為它取決於實作它的工作台。

5. 具有整合約束求解器的草圖繪製，可繪製受幾何約束的 2D 形狀的草圖。然後，使用 Sketcher 建構的受約束的 2D 形狀可以用作在整個 FreeCAD 中建立其他物件的基礎。
6. 工程繪圖工作台，提供詳細視圖、剖面視圖、尺寸標註等選項，可產生現有 3D 模型的 2D 視圖，並匯出 SVG 或 PDF 檔案。
7. BIM 工作台允許類似建築資訊模型(BIM)的工作流程，並具有行業基礎類別(IFC)相容性。
8. 專用於電腦輔助製造機械加工的 CAM 工作台。使用 CAM 工作台，可以輸出、顯示和調整用於控制目標機器的 G 程式碼。
9. 整合式電子表格和表達式解析器可用於驅動基於公式的模型並在中央位置組織模型資料。

2-3 CfdOF 流體力學分析介面

CfdOF 是 FreeCAD 的外掛工作檯，用於提供計算流體力學(CFD)的工作流程。以圖形化介面整合 OpenFOAM 解算器及外部前、後處理軟體，方便將 3D 模型直接轉換到 CFD 應用。CfdOF 的工作流程如圖 2-2。

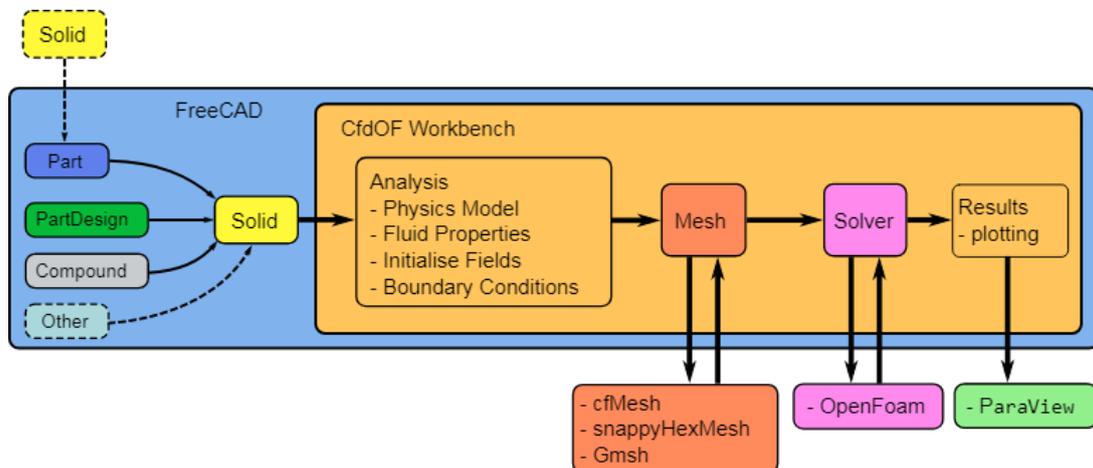


圖 2-2 CfdOD 工作流程 [13]

不論是使用 FreeCAD 的 CAD 工具建模，或由外部匯入實體模型，利用 FreeCAD 的 3D 顯示介面和工具，視覺化定義模擬分析的流場範圍及邊界。依照工具列與對話方塊指引，選擇適當的物理模型、指定流體屬性及分配邊界條件，完成參數設定。生成計算用網格可使用 OpenFOAM 提供的通用程式，或使用其

他外部軟體，如 gmsk。啟動 OpenFOAM 的解算器，並以圖形顯示分析進度。最後再啟動 ParaView 軟體進行後處理，顯示流場分析結果。

由於 OpenFOAM 並沒有提供圖形化介面，對於並非計算流體力學專長的使用者而言，以文字檔案進行參數設定有實質上的困難。而配合 OpenFOAM 所設計的圖形化介面多為需要付費的商用軟體，價格不菲。CfdOF 雖然無法使用 OpenFOAM 的所有功能，但在基本的流場分析上，是結合 3D 建模相當方便的工具。

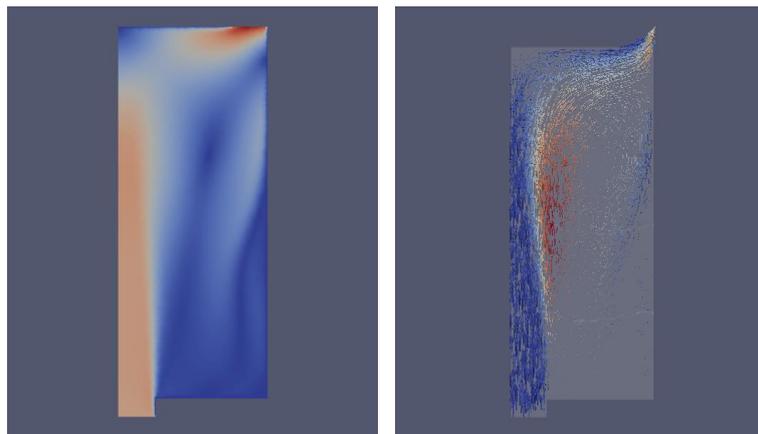
2-4 ParaView 後處理可視化工具

ParaView 是一款開源、多平台科學資料分析和可視化工具，可利用平行資料處理和渲染來達到超大資料集的互動式可視化。ParaView 既是泛用型、具有分散式架構的最終用戶應用程式，可以被桌面或其他遠端並行運算資源無縫利用，也是一個可擴展架構，具備適用各種應用程式的工具和函式庫集合，包括腳本編寫(使用 Python)、Web 視覺化(透過 Trame 和 ParaViewWeb)，或現場分析(使用 Catalyst)。OpenFOAM 模擬結果的後處理過程即預設以 ParaView 為工具，如圖 2-1 架構所示。因此在 CfdOF 的操作介面中，設置了啟動 ParaView 的連結，並自動將當前的模擬果匯入。

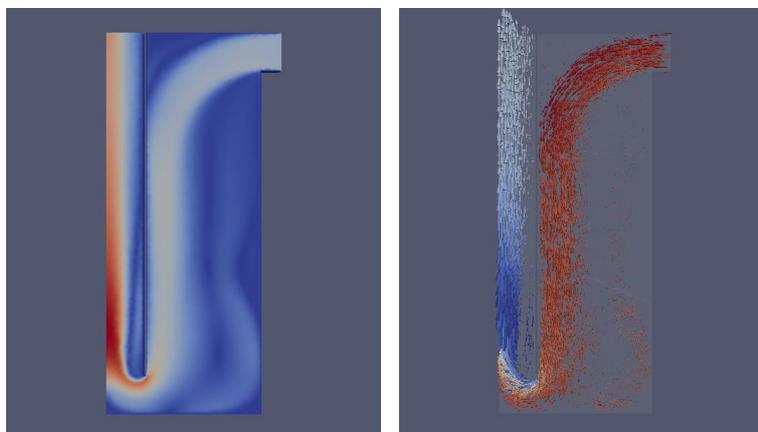
第三章 結果與討論

3-1 進氣口與排氣口配置之影響

不同氣流入口與出口配置對內部氣流方向的影響，以二維流場進行數值模擬，以快速獲得設計參考。圖 3-1 是兩種不同配置的二維流場分析結果。流場為左右對稱，因此只顯示半邊。圖 3-1(a)是下方中心位置進氣、上方邊緣排氣，此為目前市售小型可攜式烘衣機常見的配置方式。由模擬結果可以發現，自下方進入的氣流會直接向頂端流動，然後沿頂端流動到邊緣的排氣口。內部明顯有大範圍區域的流速很低，不利於對流作用。圖 3-1(b)是將進氣口放置於頂端側邊，排氣口在頂端中間，並搭配導管沿伸至接近底部。氣流進入後，必須先向下流動到中心底部，才能沿導管排出。此過程經過的內部空間範圍較大，死角較少。



(a) 底部進氣、頂端排氣



(b) 頂端進氣、導管排氣

圖 3-1 不同進氣、排氣配置之二維流場模擬

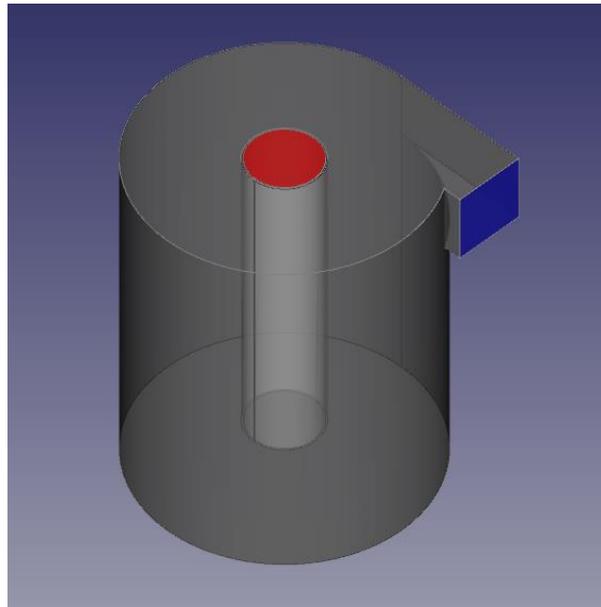


圖 3-2 基本烘箱形狀設計

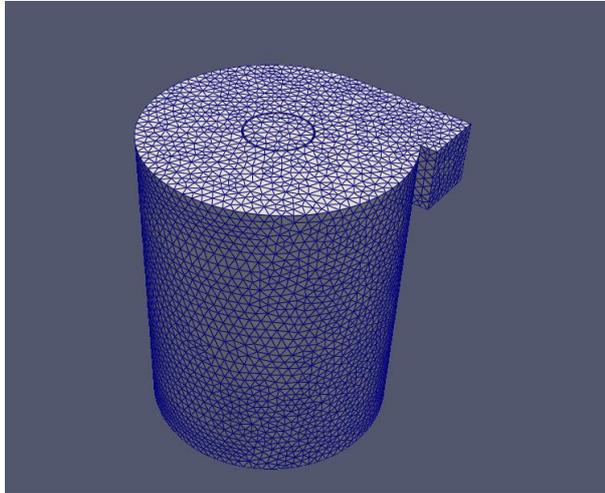
3-2 圓筒型烘箱之三維流場分析

根據二維流場模擬各種配置之結果，為了使氣流可以涵蓋烘箱內部空間，所設計之基本形狀如圖 3-2。圖中藍色位置為進氣口，紅色位置為排氣口。此設計之特點為：

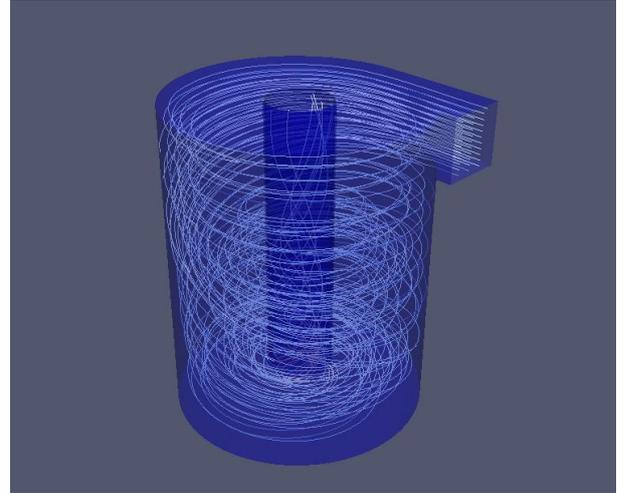
1. 型體以圓筒型為基礎，以利氣流在內部流動。
2. 進氣口位於烘箱頂端，並且與側邊相切，使進入氣流可以沿圓筒內側平順流動，並形成渦漩氣流。
3. 排氣口位於頂端中央，並連接導管向下延伸到接近底部。由頂端進入的氣流必須向下流動到底部中央，才能沿導管排出。可迫使進氣口到排氣口之間的流動軌跡可以涵蓋內部所有空間。

使用 OpenFOAM 驗證三維流場，建置計算網格如圖 3-3(a)。採用非結構性四面體網格，共有 89704 個網格。以穩態、不可壓縮流條件計算，紊流模型採用 $k-\omega$ SST。計算所得的穩態流場速度，可用來分析流體自進氣口進入後的流動軌跡，結果如圖 3-3(b)。採用此種烘箱形狀，確實可以讓氣流涵蓋烘箱的內部空間，減少流動死角。為瞭解烘箱中的速度分布情況，取一垂直縱向截面(XZ 平面)，觀察截面上的切向速度(Y 方向分量 U_y)分佈，如圖 3-3(c)。圖中右半側之切向速度方向為垂直穿入紙面，左半側為垂直穿出紙面。除了進氣口之外，其

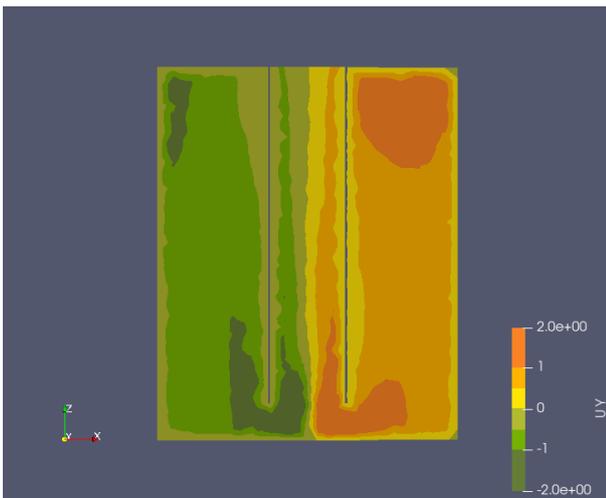
餘部分之速度分佈顯示烘箱內的氣流確實環繞中心軸穩定轉動。切向速度小於 0.5 之區域僅佔小部份，且鄰近壁面，為邊界層造成的現象。切向速度值在此截面上的分佈比率如圖 3-3(d)，速度小於 0.5 的部分佔 28.7%。



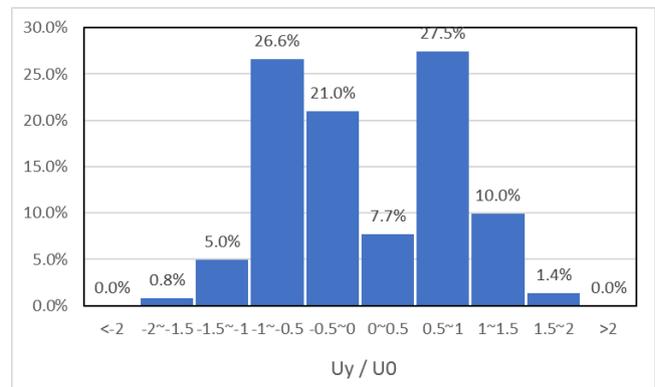
(a) 數值模擬用網格配置



(b) 以速度場計算之流線分佈



(c) 縱切截面之切向速度分佈



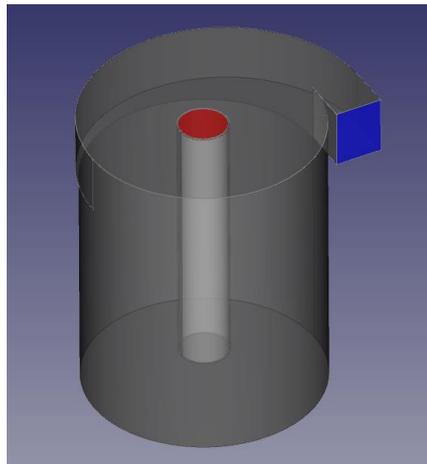
(d) 切向速度分步比率

圖 3-3 三維流場數值模擬

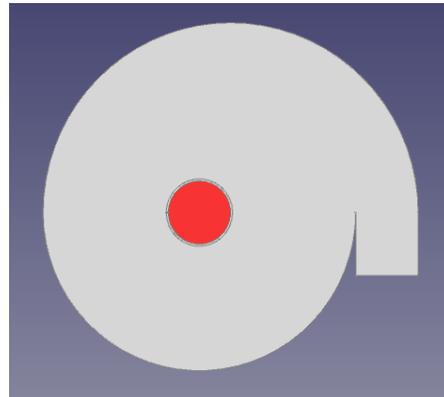
3-3 蝸捲式進氣流道之圓筒型烘箱模擬

依據前一節所述之流場分析結果可知，圓筒型烘箱搭配適當的進氣口與排氣口位置，可以使烘箱內大部分區域獲得相當的流速，減少氣流循環死角。考量實際產品的可攜性，規劃烘箱頂部(包括進氣道)與筒形本體為可分離之組件，因此將進氣口位置向外偏移，避開組裝結構之位置，重新設計為如圖 3-4 之形

狀。進氣口位置在圓筒烘箱外側，連接之流道採用漸近方式切入圓筒，形成類似蝸卷之外觀。

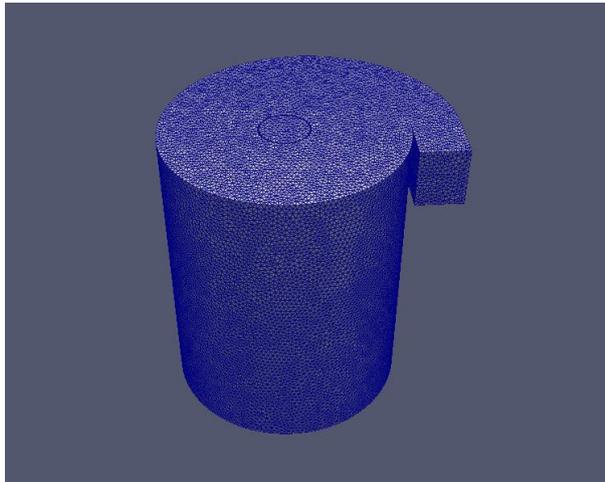


(a) 等角視圖

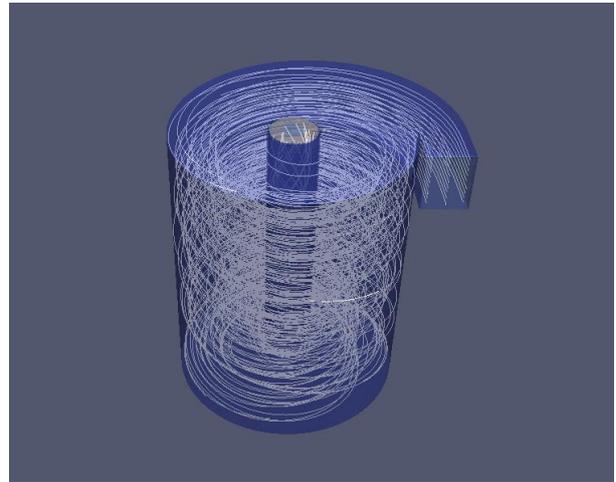


(b) 上視圖

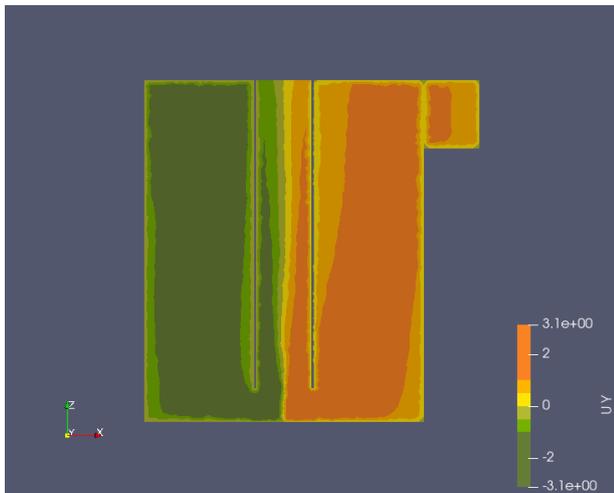
圖 3-4 蝸捲式進氣流道烘箱模型



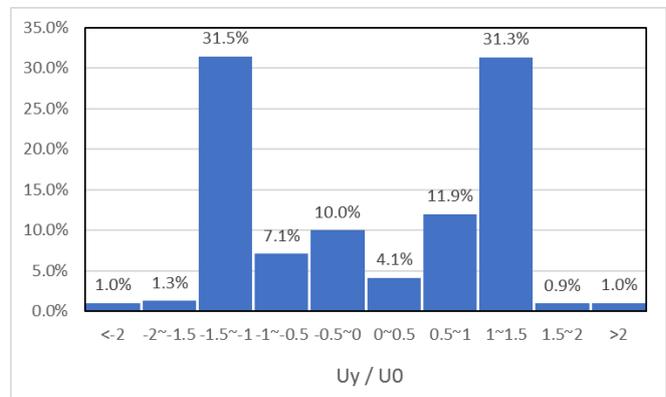
(a) 數值模擬用網格配置



(b) 以速度場計算之流線分佈



(c) 縱切截面之切向速度分佈



(d) 切向速度分步比率

圖 3-5 蝸捲進氣道烘箱流場數值模擬

流場模擬所使用之網格如圖 3-5(a)，共有 614171 個網格。數值模擬採用之條件與前一節相同。所得的穩態流場流動軌跡如圖 3-5(b)，同樣是呈現明顯的渦旋流動狀態。垂直縱向截面(XZ 平面)的切向速度(Y 方向分量 U_y)分佈如圖 3-5(c)。和前述基本造型所得的模擬結果相似，氣流可以順利到達烘箱內各部份。比較圖 3-5(c)與圖 3-3(c)之分佈情況，可知進氣口位置向外偏移後，內部氣流可以更順利的形成旋轉流動。從切向速度值的分佈比率(圖 3-5(d))可以更清楚觀察到內部流動的改善，切向速度值小於 0.5 的部分僅佔 14.1%，較前一節所述之結果減少一半。

3-4 實體結構設計

經過數值模擬驗證，以圖 3-2 之形狀為基礎，進行旋風式乾衣裝置之實體設計。成果如圖 3-6 ~ 3-8 所示。

整個旋風式乾衣裝置包含一本體、一氣流導入件及一排氣管。本體具有一開放部及相反於開放部之一封閉部，本體更具有中空狀之一身部，身部之內緣輪廓概呈圓形，且身部沿一軸心線延伸並連接於開放部與封閉部，以圍成連通開放部之一容置空間；氣流導入件設置於本體之開放部，氣流導入件具有一連通於容置空間之進氣部，進氣部能夠連接一輸出氣流之導風設備，導風設備之氣流能經由進氣部導入容置空間中，且氣流沿軸心線環繞而形成氣旋；排氣管設置於氣流導入件，排氣管朝封閉部伸入並連通於容置空間，且排氣管徑向設有一掛衣桿，俾使進氣部導入的氣流能將掛衣桿上的衣物吹乾，且氣流旋向受壓而自封閉部流至排氣管導出。因此，當衣物洗淨後並懸掛於掛衣桿上，直接啟動導風設備運轉，以使導風設備產生氣流自進氣部吹出，並朝衣物方向吹乾，且氣流在容置空間形成氣旋流動，進而旋向吹動衣物，以提升容置空間中的濕氣及冷空氣排出效率，達到加速衣物晾乾效果。

圖 3-6 是直接參照前述經過數值模擬驗證的烘箱形狀設計之產品。考慮可攜性要求，實際結構設計為可拆裝及折疊，如圖 3-7 所示。另外，稍為修改烘箱形狀，但主要構造相同之產品如圖 3-8。以下說明各細部之構造與功能，相關編號參照圖中之標示。

圖 3-6 ~ 3-8 所示，本創作實施例提供一種旋風式乾衣裝置，包含一本體 10、一氣流導入件 20 及一排氣管 30。

1. 本體 10：

其具有一開放部 11 及相反於開放部 11 之一封閉部 12，本體 10 更具有中空狀之一身部 13，身部 13 之內緣輪廓概呈圓形，且身部 13 沿一軸心線 L 延伸並連接於開放部 11 與封閉部 12，使本體 10 內部圍成有連通開放部 11 之一容置空間 14，值得一提的是，本發明本體 10 能依需求設計不同型態，請配合圖 3-6 及圖 3-7 所示，開放部 11 之外徑相等於封閉部 12 之外徑，而身部 13 筆直延伸於開放部 11 與封閉部 12 間，使本體 10 之外觀概呈圓柱狀；或者請配合圖 3-6 所示，開放部 11 之外徑大於封閉部 12 之外徑，而身部 13 由開放部 11 朝封閉部 12 漸縮延伸，使本體 10 之外觀概呈上寬下窄之倒圓錐狀。

2. 氣流導入件 20：

其設置於本體 10 之開放部 11，氣流導入件 20 具有一連通於容置空間 14 之進氣部 21，進氣部 21 能夠連接一輸出氣流之導風設備 100，導風設備 100 可為電風扇或吹風機，其中，本發明利用流體力學理論，使導風設備 100 之氣流能經由進氣部 21 旋向導流至身部 13 的內周緣，且氣流沿本體 10 的軸心線 L 環繞而於容置空間 14 中形成氣旋；具體說明，氣流導入件 20 包含一結合進氣部 21 之外蓋 22，外蓋 22 對應蓋設於本體 10 之開放部 11，而進氣部 21 具有一平直段 211 及一導流段 212，平直段 211 自外蓋 22 之切線方向延伸而出，導流段 212 自外蓋 22 之周緣弧形延伸於平直段 211。

請配合圖 3-6 (c)及(d)所示，本發明導風設備 100 以吹風機作為說明，當導風設備 100 朝進氣部 21 輸出氣流時，氣流會依序經由平直段 211 及導流段 212 進入本體 10 之容置空間 14，且氣流能透過導流段 212 逆時針旋向導流至身部 13 的內周緣，以使得氣流能夠由開放部 11 朝封閉部 12 方向形成氣旋流動，達到降低氣流產生亂流之目的，進而提升氣流能量置於容置空間 14 的時效性。

3. 排氣管 30：

其穿設於氣流導入件 20，排氣管 30 朝本體 10 之封閉部 12 伸入並連通於容置空間 14，且排氣管 30 徑向設有一掛衣桿 31，俾使進氣部 21 導入的氣流能

將掛衣桿 31 上的衣物 200 吹乾，且氣流旋向受壓而自本體 10 之封閉部 12 流至排氣管 30 導出；請配合圖 3-6(a)及(d)所示，排氣管 30 貫穿於氣流導入件 20 之外蓋 22，且排氣管 30 與本體 10 同心設置，其中，排氣管 30 設有一第一段 30a 及一第二段 30b，第一段 30a 露出於外蓋 22 之外側，第二段 30b 設於外蓋 22 之內側並伸入至本體 10 之封閉部 12，且第二段 30b 長度大於第一段 30a 長度，而掛衣桿 31 設於排氣管 30 之第二段 30b，於本實施例中，第二段 30b 徑向設有一穿孔 32，掛衣桿 31 穿設於穿孔 32 並抵接於本體 10 之內緣，使掛衣桿 31 相對排氣管 30 橫向定位在本體 10 之容置空間 14 中，作為吊掛衣物 200 之用。

值得一提的是，本發明掛衣桿 31 具有一固定段 311 及一伸縮段 312，固定段 311 套接於該伸縮段 312，且固定段 311 之口徑大於伸縮段 312 之口徑，使伸縮段 312 能相對縮入及伸出固定段 311，以提升掛衣桿 31 的使用機動性。

請配合圖 3-7(a)所示，當衣物 200 洗淨後並懸掛於掛衣桿 31 上，直接啟動導風設備 100 運轉，以使導風設備 100 產生氣流自氣流導入件 20 之進氣部 21 吹出，並朝衣物 200 方向吹乾，且氣流受導風設備 100 強制對流的影響能將容置空間 14 中的濕氣及冷空氣由開放部 11 旋向封閉部 12，再由排氣管 30 之第二段 30b 沿軸心線 L 方向由第一段 30a 導出濕氣及冷空氣；因此本發明氣流在容置空間 14 形成氣旋流動，進而旋向吹動衣物 200，提升容置空間 14 中的濕氣及冷空氣排出效率，達到加速衣物 200 晾乾效果。

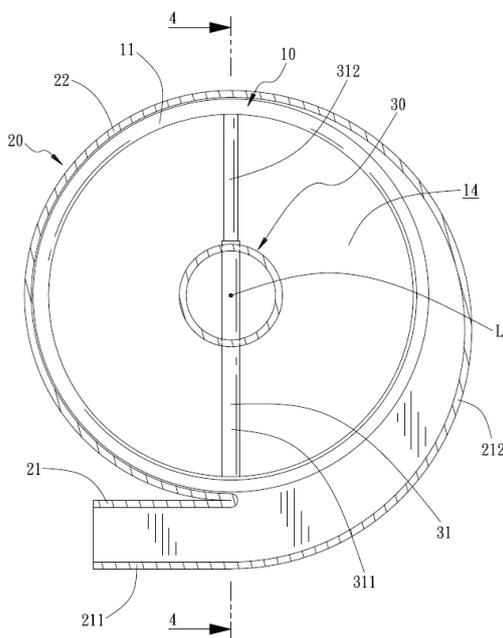
另外，本發明更包含一彈性件 40，彈性件 40 設置於本體 10，彈性件 40 結構概呈壓縮彈簧，彈性件 40 沿本體 10 之軸心線 L 繞設於身部 13 周緣，且彈性件 40 彈性抵推於開放部 11 及封閉部 12，以使本體 10 常態處於一打開位置，而本體 10 能夠將開放部 11 朝封閉部 12 施力以壓縮彈性件 40，俾使本體 10 收成扁平圓狀並保持在一收摺位置；請配合圖 3-7(b)及圖 6 所示，本體 10 更設有兩提帶 15，兩提帶 15 分別設於身部 13 之兩側並鄰近於開放部 11，各提帶 15 設有一扣接部 151，本體 10 於收摺位置時能夠將各提帶 15 繞置於封閉部 12 再將兩扣接部 151 相互扣接，使各提帶 15 定位於封閉部 12 的外側，以致於彈性件 40 保持壓縮而使本體 10 處於收摺位置，進而縮小本體 10 的收摺體積，提供便於攜帶且具有不易遺失的功效。

藉此，本發明具有下列功效：

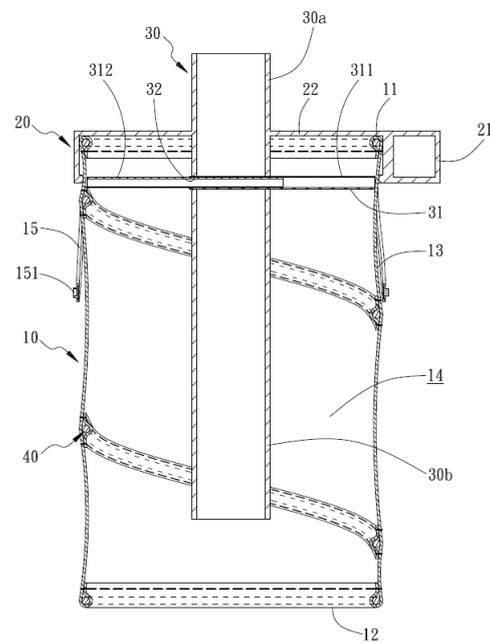
1.本發明結構簡單，無需複雜設備，且本體 10 不受天候影響，而能夠在室內進行乾衣，並達到快速乾衣的功效。

2.氣流能在本體 10 之容置空間 14 形成氣旋流動，進而旋向吹動衣物 200，提升容置空間 14 中的濕氣及冷空氣排出效率，達到加速衣物 200 晾乾效果。

3.本體 10 能由打開位置收成扁平圓狀之收摺位置，進而縮小本體 10 的收摺體積，提供便於收納及攜帶的功效。

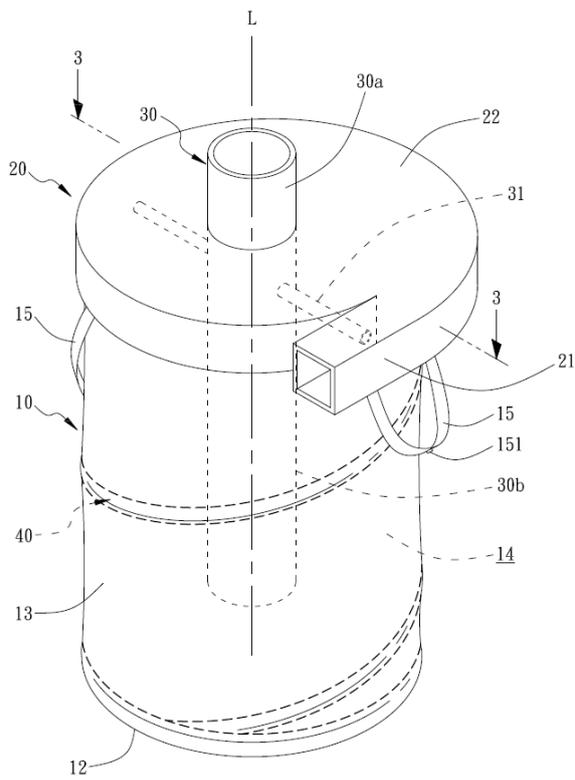


(c) 沿剖面線 3-3 之剖視圖

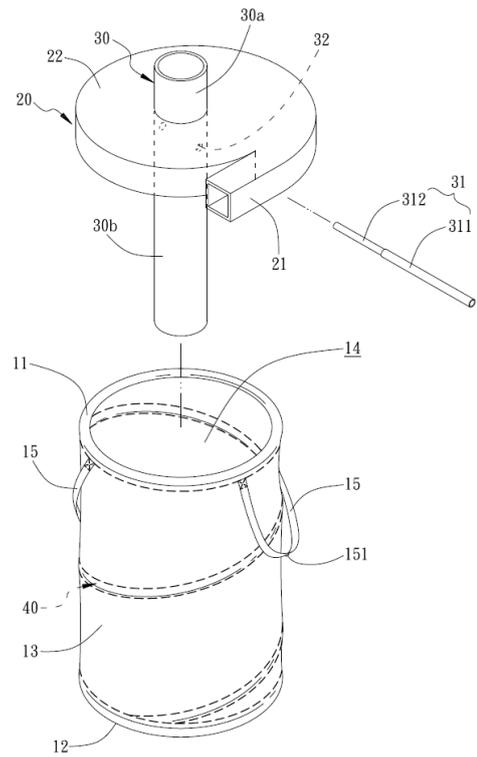


(d) 沿剖面線 4-4 之剖視圖

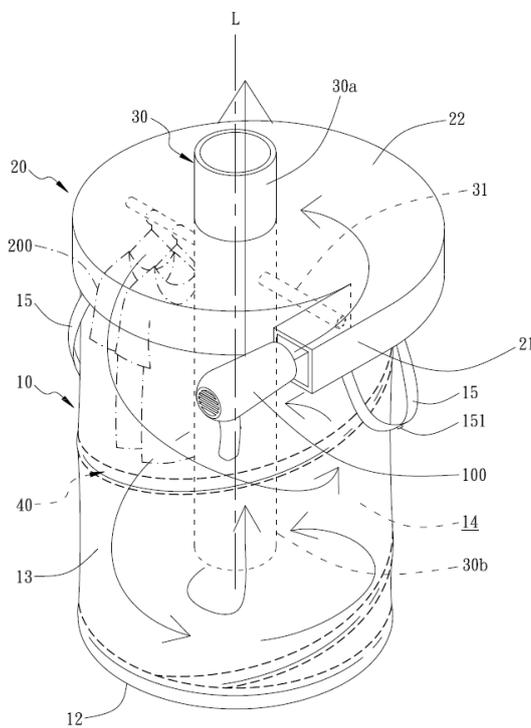
圖 3-6 第一種型態旋風式烘衣機之結構



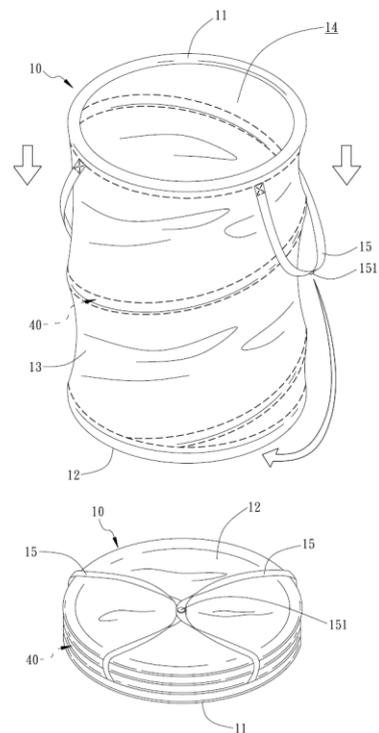
(a) 打開位置之立體圖



(b) 結構分解圖



(a) 實施狀態示意圖



(b) 收摺位置之動作示意圖

圖 3-7 第一種型態旋風式烘衣機之實施與收摺

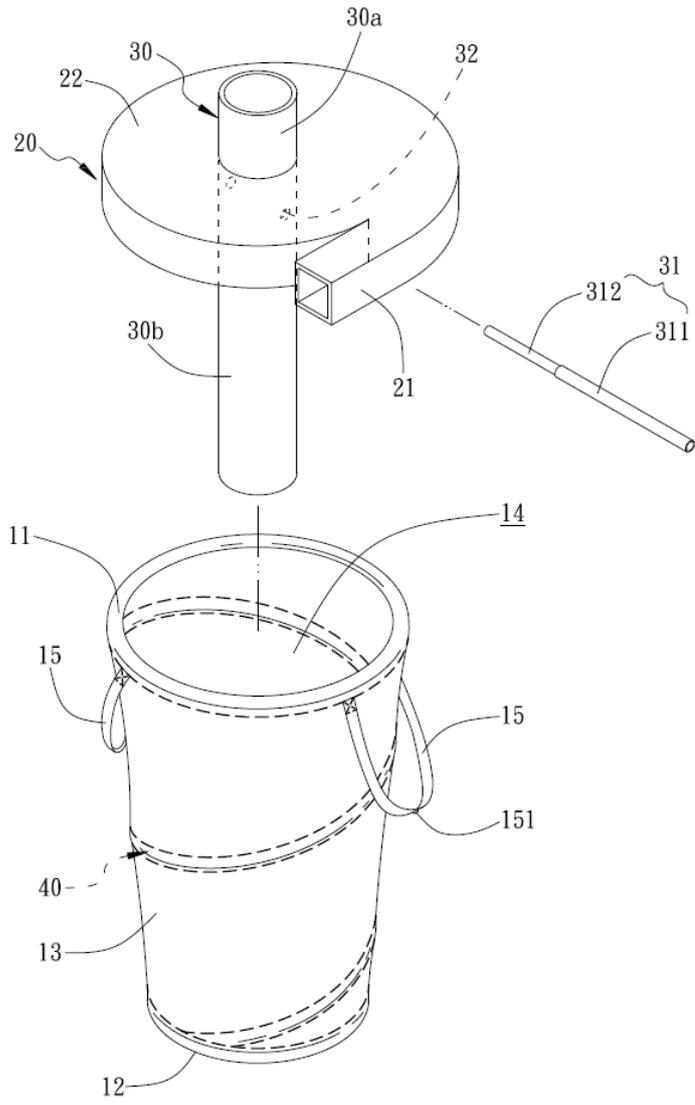


圖 3-8 第二型態實施例之結構分解圖

第四章 結論

本研究基於流體力學原理，進行小型乾衣裝置的烘箱形狀改良，提升對流效能，可以減少熱量損失，對於提高能源使用效率十分重要。本研究採用計算流體力學技術，針對烘箱內氣流狀態與箱體形狀、進氣口、排氣口位置等參數的影響進行初步的探討。首先確認了進氣口與排氣口配置作適當改良後，可以減少箱體內氣流停滯區域的範圍，增加對流可以有效觸及的空間。利用進氣口位置與方向，強迫箱體內空氣形成大範圍渦漩運動的設計概念，也經由數值模擬確認為有效。經過適當調整後，箱體內部渦漩氣流速度低於進氣流速一半以下的區域低於 14%，讓大部分空間具備有效的對流作用，提高移除水氣的速度。

在實務上，本研究也完成整體及細部設計，可以實際進行製造與使用。整個旋風式乾衣裝置的本體、氣流導入件及排氣管均設計為可拆卸，方便分解後攜帶與快速組裝使用。本體部分運用撓性材料，可摺疊縮小體積，是達到可攜性的重要構造方式。

本研究除了基礎原理之探討與驗證，實務上也完成商品化之設計，使用情境與操作細節均已合併考慮，是立即可運用之技術。

參考文獻

1. 經濟部標準檢驗局，「細粒料密度、相對密度(比重)及吸水率試驗法」，中華民國國家標準，CNS 487，2013。
2. Precoppe, M., Chapuis, A., Müller, J., and Abass, A., “Tunnel dryer and pneumatic dryer performance evaluation to improve small-scale cassava processing in Tanzania,” *Journal of Food Process Engineering*, vol. 40: e12247, 2015.
3. Ajala, A. S., Ngoddy, P. O., and Olajide, J. O., “Design and Construction of a Tunnel Dryer for Food Crops Drying,” *International Multidisciplinary Research Journal*, vol. 8, pp. 01-07, 2018.
4. Bali, T. and Sarac, B. A., “Experimental Investigation of Decaying Swirl Flow through a Circular Pipe for Binary Combination of Vortex Generators,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 174-179, 2014.
5. 方建洲、蔡政志、許文正、周致偉、蔡仲軒，熱烘系統烘室空間優化之機構實作研究，*華岡紡織期刊*，第二十四卷，第二期，211-216 頁，2017。
6. 蔡政志、林于棟、黃慶堂、林峰標、蔡仲軒、林世章、方建洲，熱烘系統烘室空間優化設計之研究，*華岡紡織期刊*，第二十四卷，第三期，180-185 頁，2017。
7. Sundaram, P. and Sudhakar, P., “Experimental Performance Investigation of Swirling Flow Enhancement on Fluidized Bed Dryer,” *ARP Journal of Engineering and Applied Science*, vol. 11, no. 21, pp.12529-12533, 2016.
8. Berghel, J., Brunzell, L., and Bengtsson, P., “Performance Analysis of a Tumble Dryer,” *Proceedings of the 14th International Drying Symposium, Brazil, 22-25 August 2004*, vol. B, pp.821-827, 2004.
9. Stawreberg, L., “Energy Efficiency Improvements of Tumble Dryer,” *Dissertation, Karlstad University*, 2011.
10. Marinos-Kouris, D. and Maroulis, Z. B., “Transport Properties in the Drying

of Solids.” Handbook of Industrial Drying, Third Edition, Mujumdar A.S., Taylor & Francis Group: Boca Raton, pp.82-114, 2007.

11. OpenFOAM, The OpenFOAM Foundation, <https://openfoam.org>.
12. FreeCAD, The FreeCAD Team, <https://www.freecadweb.org>.
13. CfdOF: A Computational fluid dynamics (CFD) workbench for FreeCAD, Eskom Holdings SOC Ltd and the Council for Scientific and Industrial Research (South Africa), <https://github.com/jaheyns/CfdOF>.
14. ParaView, Kitware Inc., <https://www.paraview.org/>.