

模具感應加熱模擬技術

Induction Heating in Molding Using COMSOL Multiphysics

楊棟焜

皮托科技股份有限公司 CAE 處長

摘要：模具感應加熱技術，是利用電磁誘導感應的方式用以溫度精準快速控制，以最節能並在最短時間內搭到溫度目標，且必須考量冷卻水路冷卻的週期時間和效果，可以藉由模擬的方式，達到優化設計。特定設出成型模具需要達到特定溫度，傳統方式是使用電熱方式加熱模具到達目標溫度值，相較感應加熱方式，加熱時間冗長且耗能。故感應加熱方式由線圈通電並靠近加熱物，電磁誘導在被加熱物上產生一相對應的感應渦電流，產生渦流損以至於達成快速加熱的目的。可以在此兩方面達到跳躍的改善。

Abstract : Induction heating has become an important process in many applications, from cooking meals to manufacturing. It is valued for its precision and efficiency along with being a non-contact form of heating. The physical principles that govern the process of induction heating are quite simple: An alternating current flows in a solenoid (coil), which generates a transient magnetic field. Following Maxwell's equations, this magnetic field induces electric currents (eddy currents) in nearby conductor materials. If the application is a furnace and subject to the Joule effect, heat is generated and the melting point of the charge (metal) can be reached. By adjusting the current parameters, the molten metal can be maintained as a liquid and its solidification can be precisely controlled.

關鍵詞：感應加熱、有限元素、數值模擬

Keywords : Induction heating, Finite element method, COMSOL multiphysics

前言

磁感應加熱運用很廣泛，例如烹飪食物的電磁爐，和金屬工業的熱處理、溶鋼與模具加熱等等。利用高週波電流產生磁場，在金屬上產生渦電流，進而使金屬材料加熱，精準的控制金屬熱處理的面積與深度。

模具感應加熱技術，是利用電磁誘導感應的方式用以溫度精準快速控制，以最節能並在最短時間內搭到溫度目標，且必須考量冷卻水路冷卻的週期時間和效果，可以藉由模擬的方式，達到優化設計。特定設出成型模具需要達到特定溫度，傳統方式是使用電熱方式加熱模具到達目標溫度值，相較感應加熱方式，加熱時間冗長且耗能。

故感應加熱方式由線圈通電並靠近加熱物，電磁誘導在被加熱物上產生一相對應的感應渦電流，產生渦流損以至於達成快速加熱的目的。可以在此兩方面達到跳躍的改善。

感應加熱原理

如同依據維基百科的定義：感應加熱是一種利用電磁感應來加熱電導體（一般是金屬）的方式，會在金屬中產生渦電流，因電阻而造成金屬的焦耳加熱。感應加熱器包括一個電磁鐵，其中會通過高頻的交流電，若物體有較大的磁導率，也可能會因為磁遲滯現象的損失而產生熱。使用的交流頻率依欲加熱物品的尺寸金屬種類，加熱線圈和欲加熱物品的耦合程度以及滲透深度來決



圖 1 高週波感應加熱 (摘自維基百科影片截圖)

定。(取自維基百科網頁)。

感應加熱背後的原理非常簡單：如圖 1 所示交流電會流過螺絲管（線圈），進而產生瞬態磁場。根據麥克斯威爾方程組，該磁場會在附近的導電材料中感應出電流（渦電流）。在爐體類的應用中，會因為焦耳效應而產生熱，從而使導電對象（金屬）達到設定的溫度點。

模具感應加熱技術

感應渦電流除了節能和能量轉換快速特點外，升溫速度非常快，大約每秒可升溫 30~65 度 C。還具有控制加熱工件的深度分佈的特色，離模具表面只有約 1 mm 的深度，電流頻率與加熱距離相關係，只要改變電流頻率和電流大小就能快速控制感應加熱的能量轉換。

加熱線圈的擺放方式上可分做內部式與外部式兩種：前者是將線圈埋設在模具內部當中進行加熱，整體週期可分別為合模、加熱、射出、冷卻、開模頂出。主要優點是保有加熱快速外，溫度上升的均勻性會較好。但因考量冷卻水管路的配置設計環境，感應線圈設計會更複雜。

外部式感應線圈則是裝設在模具外部，透過移動的機械手臂移動進感應線圈，從準備位置移到模具的表面處。此技術的整個週期為合模、射出、冷卻、開模頂出、治具上升加熱、治具回歸。最好的優點是不需要額外修改模具開發設變，不會干涉模具內部的流道。主要是要考量溫度均勻

分佈，故只要針對產品模穴的幾何形狀做線圈設計，工程相對簡單。

感應線圈設計是需要配合模具模穴與冷卻水管路、位置、數量、幾何形狀、加熱過程溫昇的均勻度和時間控制等等參數。因為感應加熱機制是高度非線性的物理現象，若要設計感應線圈到最佳化，電腦模擬技術是最快速和具有理論基礎的解決方案，以替代非精準的試誤實驗方法。

模具感應加熱數值模擬

本文章透過一簡單的感應加熱概念案例來說明模具如何設計磁感應加熱，COMSOL Multiphysics 軟體內建感應熱 Induction Heating 物理介面，首先在空間中透過一線圈導線載入 500 赫茲 Hz 的時變電流，而時變磁場則會使中心金屬材料產生渦電流，渦電流因金屬內電阻損耗進而產生熱，從時間的暫態變化了解金屬溫度升高的過程。

數值模型的建立步驟，首先是給定幾何及相關材料。此文章採用軸對稱假設。選定的幾何，如圖 2 所示，由感應爐核心組件構成：包含導電對象的金屬工件（模具），控制熱輻射的絕熱屏障，以及施加了電流的水冷線圈。

感應加熱的多物理耦合場介面，磁場和固體

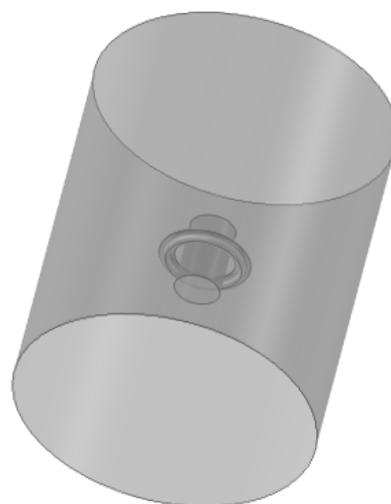


圖 2 感應加熱概念案例幾何

傳熱物理場耦合介面。電磁功率耗散是一個熱源，而電磁材料屬性會與溫度不同而改變。此多物理強耦合，能求解頻率 - 穩態或頻率 - 瞬態研究，將求解定頻率下每個時間步長的安培定律，隨後求解瞬態或穩態的傳熱問題。在電磁件模求解方面，採用軸對稱假設後，僅有垂直於幾何平面的磁向量分量。爐體距離較“遠”處，假定為磁絕緣狀態的邊界條件。

在每次計算中，都需量化一個重要參數：集膚深度，因為大部分電流都會流經該集膚深度 δ 。關係如下：

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \mu_R \cdot \mu_0 \cdot \sigma \cdot f}} \quad (1)$$

真空磁導率 μ_0 ，材料的相對磁導率 μ_R ，電導率 σ ，以及頻率 f

頻率越高，集膚深度越薄。因此，通過調整電流頻率，可以精確控制熱源範圍。從數值角度來看，意即每種導體材料的網格都需要足夠細化，以保證精度。至少四層結構網格來覆蓋此集膚深度區域。如圖 3 所示：

傳熱問題是只針對金屬工件模擬，忽略周圍空氣的影響。熱實際經由輻射和對流，通過外部邊界設定以完成。

電磁和傳熱結果如圖 4 繪製了所得到的電流密度大小和磁場通量線。最大電流密度位於線圈

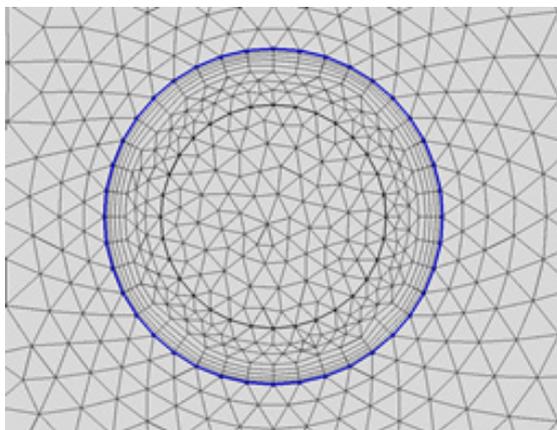


圖 3 集膚深度範圍的結構網格

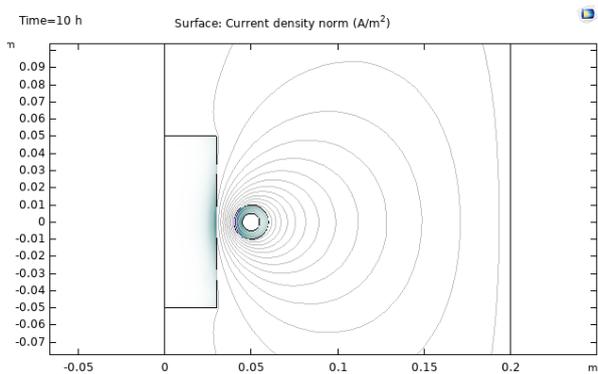


圖 4 電流密度大小和磁場通量等位線

域內。電流密度在整個線圈截面的分佈並不均勻，且電流傾向於在這些匝的內側流動。在導電對象中，磁場通量線發生了較大的變形，感應出反向流動的渦電流。

使用 Comsol Multiphysics 軟體的感應熱介面 (Induction Heating) 來建模分析，建模主要分下列步驟：

感應熱介面的使用，步驟 1. 軸對稱幾何結構設定，步驟 2. 磁絕緣與熱絕緣邊界條件設定，步驟 3. 透過頻域暫態分析，了解金屬溫度隨時間的變化過程。

感應加熱工程的模擬，需在有限空間內模擬出無限長直導線所產生的磁場，所以我們假定邊界為磁絕緣邊界，代表邊界上的磁向量位符合此數學式

$$(j\omega\sigma - \omega^2\varepsilon)A + \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) = 0 \quad (2)$$

其渦電流造成的損耗能 (dissipated power) 則可透過下列關係式

$$P_d = \frac{1}{2} (J_s \cdot E^*) \quad (3)$$

為感應面電流密度。

金屬導電率與溫度的關係式為

$$\sigma = \frac{1}{[\rho_0(1 + \alpha(T - T_0))]} \quad (4)$$

在一段溫度值域內，導電率可以被近似為與

溫度成正比。

描述熱源與金屬內熱傳播的方程式為

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot k \nabla T = Q(T, A) \quad (5)$$

為材料密度， C_p 為熱容， k 為熱傳導， Q 為感應熱源。

在做感應加熱的線圈，由於通入大電流，因此導線為中空設計，並且中心有水路散熱，其散熱的物理模型為

$$Q_c = \frac{dM}{dt} C_p (T_{in} - T) \quad (6)$$

Comsol Multiphysics 模擬真實設計的加熱元件，空心銅線圈的中心有冷卻水流，以避免銅導線升溫超過材料上限，如圖 5 之綠色虛線小四角方塊的曲線表示，導線很快的就降溫冷卻水的溫度。而銅柱中心隨著時間則逐漸升溫，最後與環境的散熱達成熱平衡，升溫曲線（藍色實線小三角形）最終會趨於平緩收斂。

數位分身應用 App

COMSOL Multiphysics 多物理模擬軟體中增加了應用程式創建器 (Application (APP) Builder)。

此功能可讓 CAE 研發人員依據已作好的有限元素模擬開發成簡單操作的有限元素模擬器。此模擬器以 APP 的形式呈現如圖 6。就像我們手機或平板電腦時常下載的 APP 一樣，公司內部任何授權人員可隨時隨地操作研發人員設計好的模擬器簡易介面，輕鬆對研發人員呈現的新產品或新技術構想做模擬與參數測試。此種新形式的交流與互動式資訊交流無疑可大大幫助各公司跨職門團隊在新產品開發的過程中更有效率的交流。以下我們以加熱感應線圈的研發為概念案例，客制化創建 APP UI 功能幫助設計流程，以幫助公司在構想到產品推出的過程中 (idea-to-launch process)，達到最高效率。

模擬最新技術

2018 年底發表 COMSOL Compiler™ 模組，可將 App 模型介面程式編譯成一執行檔，分享此執行檔給沒有安裝 COMSOL Multiphysics 軟體的電腦使用。也就是如圖 6 的數值模型，成為可計算的獨立應用程式。只要簡單的按鈕點擊，就能執行編譯和執行檔案分享。

COMSOL Compiler™ 您可以編譯應用程式產生器創建至 Windows® 獨立應用程式和 Linux® 操

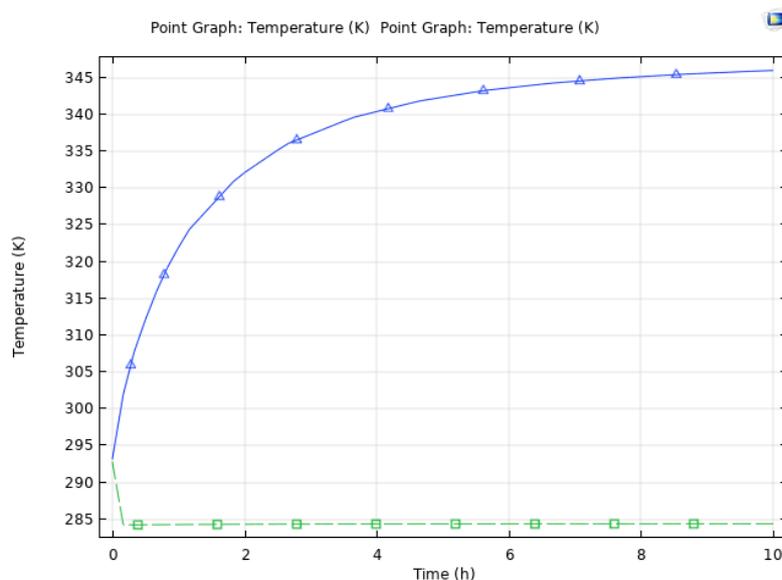


圖 5 感應加熱工件溫度時間曲線

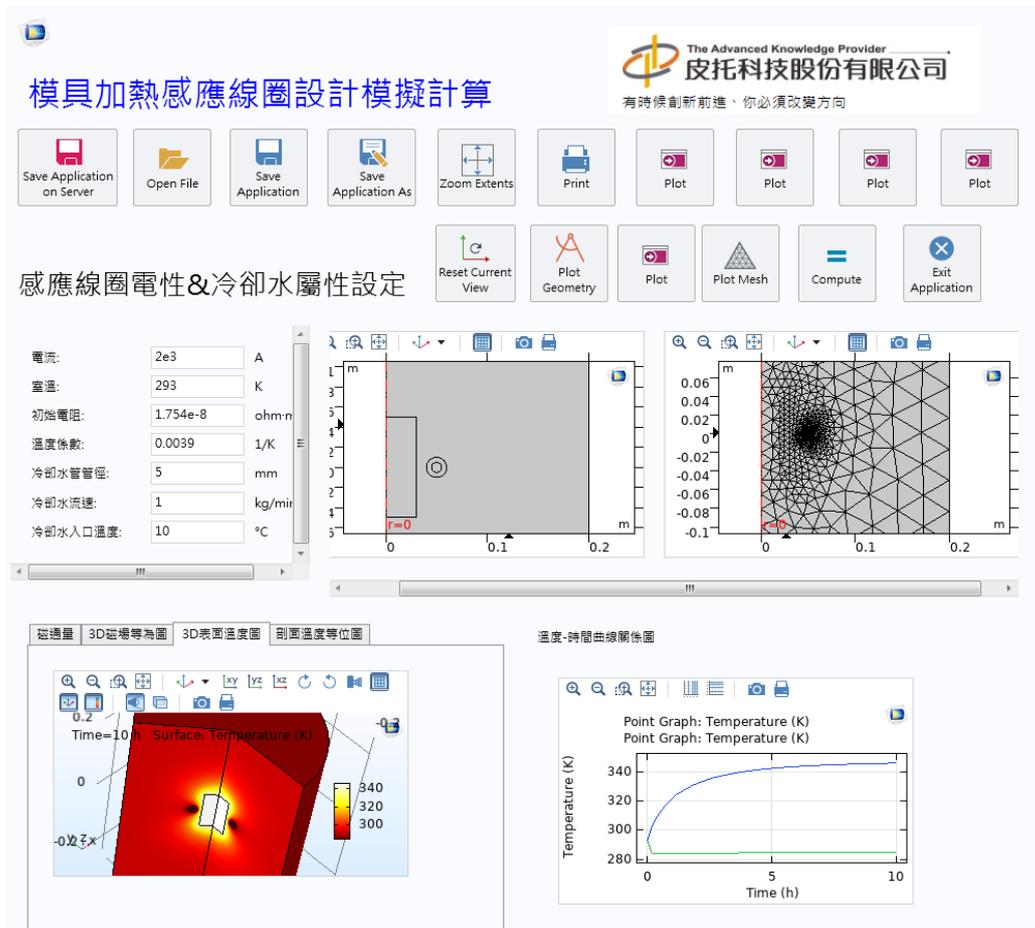


圖 6 客制化 App 圖形介面 & 編譯執行檔

作系統和 MacOS 使用。目前工業界廠商已經能成熟使用模擬的技術來開發設計解決工程問題和達到規格設計目標。

結論

此研究透過理論數學模型，可以證明數值計算是一種可靠幫助研發模具感應加熱的方法。並設計以數值求解器為模型的架構，操作介面是單一容易立即變更參數和設定條件，能快速獲得計算結果和多變因和設計準位的實驗設計方法。使用門檻降低的理想，給予工程師可以使用 CAE 強大能力，快速設計最佳的理想產品並可大量減少傳統的實品量測的成本。

目前電腦計算科技進步和模擬演算法軟體的更新，COMSOL Multiphysics 軟體不僅可帶改各

產業，如同此文章的模具產業，電腦模擬精準的快速最佳化和設計需求。

誌謝

本文為皮托科技股份有限公司之年度主題研究之計畫，由於 COMSOL 公司與皮托科技股份有限公司提供軟體和鼓勵支持，使本研究得以順利進行，特此致謝。

參考文獻

- [1] Vincent Bruyere, "Tips and Tricks for Modeling Induction Furnaces," COMSOL, Inc. Burlington, MA USA, COMSOL Official Blog, March 4, 2015.
- [2] 感應加熱, 維基百科