

CAE 數位分身潛在運用 - 高速轉軸診斷

Potential Applications of CAE Digital Twins - High-speed Spindle Diagnostics

林正生

皮托科技股份有限公司 CAE 工程師

摘要：我們透過物理模型，建置可作為軸承內部熱源診斷依據的數位分身 (CAE Digital Twin)。此數位分身可將轉軸外部表所測量的溫度當作輸入條件，反算出轉軸的溫度分佈與滾珠模差的熱源。再經由具經驗之人員或其他方法，判斷熱源是否有異狀，採取對機台必要的操作。

Abstract : Based on physical model, a CAE digital twin was built which is capable of providing data for overheating diagnostics in inner bearings of spindles. This digital twin can take measured temperature data from sensors on the outer shell of spindle as input, and reverse calculates the heat sources of the bearings. Such data can then be monitored by experienced engineer to determine whether abnormal conditions have occurred and to take necessary actions on the machine.

關鍵詞：轉軸、模擬數位分身

Keywords : Spindle, CAE digital twin

前言

機械過熱會導致其精度和生產率下降。而高速主軸是機器內的重要部件，也是最重要的熱源之一。在主軸中，熱源是由軸承產生的，軸承占主軸總變形的 30-50% [1]。因此，高速轉軸在運作時有效監控其內部軸承熱源以做預測與診斷是非常重要的。軸承在轉軸內部。另外，以轉珠軸承為例，熱源也不斷在動，由內部埋溫度計等偵測器並不容易。

我們可透過數值模擬等電腦輔助工程技術 (Computer-Aided Engineering (CAE))，建置轉軸的數位分身 (Digital Twin)。透過物理模型的建置由轉軸外部表所測量的溫度當作輸入條件，反算出轉軸的溫度分佈與滾珠模差的熱源。此逆運算可做為有效監控其內部軸承熱源以做預測與診斷的方法。

轉軸模擬數位分身

以物理模型建置的數值分析需耗費計算

資源與時間，而如轉軸此類熱問題又需即時計出溫度分佈，因此有效將問題簡化成“輕盈模型”(lightweight model) 十分重要。

本文章透過一簡化的轉軸逆運算熱模擬案例來說明此類數位分身如何達到監控內部熱源。此研究用 COMSOL Multiphysics 軟體熱傳模組功能建模。首先模型幾何包括一 3D 軸承結構如圖 1。因對稱性，幾何可簡化為 2D- 軸對稱。

途中圓形部分為滾珠。軸承運作時滾珠產生熱源，命名為 Q 。

軸承內熱傳播的方程式為

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot \mathbf{k} \nabla T = Q \quad (1)$$

ρ 為材料密度， C_p 為熱容， \mathbf{k} 為熱傳導， Q 為感應熱源。而我們假設兩個溫度測計分別貼附在外殼靠近滾珠的位置，如圖 1 右方黑點處。座標各為 (0.045 m, 0.05 m) 與 (0.045 m, 0.16 m)。透過測量，我們可收集此兩點的溫度隨時間的變化，如圖 2。測量溫圖的時間間隔為 100 秒。

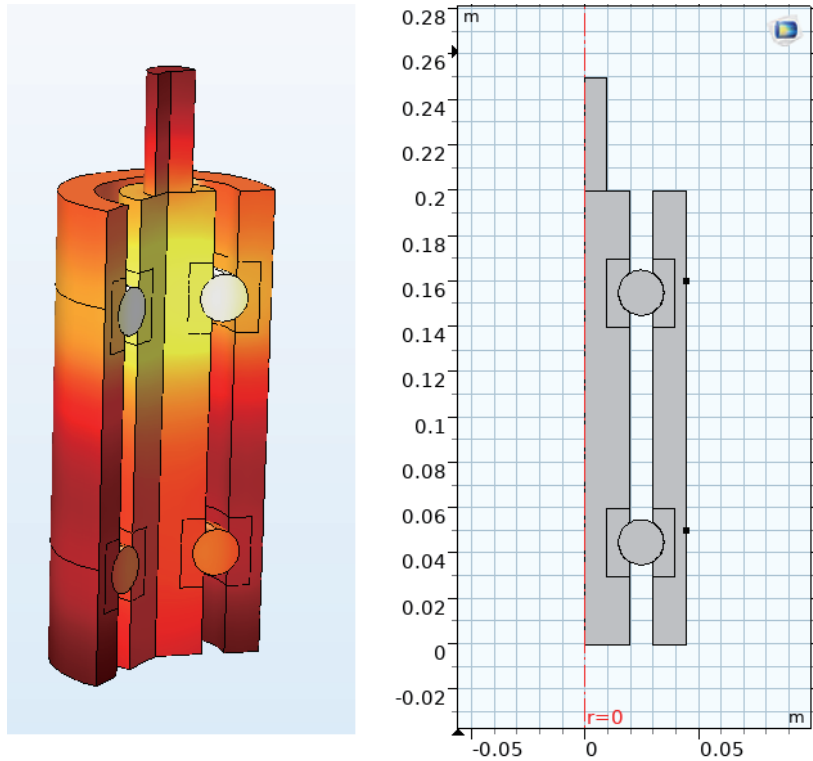


圖 1 轉軸幾何

% Time (s)	溫度 (degC),
0	20.00000001696492
100	21.28134932420795
200	22.44464996620684
300	23.541143728549457
400	24.430171813669403
500	25.319199898789407
600	26.160715879630686
700	26.796450653378884
800	27.43218542712708
900	27.98773920038758
1000	28.338503629126933
1100	28.689268057866286
1200	29.04003248660564
1300	29.390796915344936
1400	29.741561344084346
1500	29.99927405679699
1600	30.15161008385627
1700	30.303946110915547
1800	30.456282137974824
1900	30.608618165034045
2000	30.760954192093322
2100	30.827797581045445
2200	30.84991287664019
2300	30.87202817223499
2400	30.894143467829792
2500	30.91625876342465
2600	30.938374059019452
2700	30.960489354614253
2800	30.982604650209055
2900	30.97011971508499
3000	30.93953260901327
3100	30.90894550294155
3200	30.878358396869885
3300	30.847771290798107
3400	30.817184184726443

圖 2 溫度計測量溫度隨時間變化



圖 3 轉軸熱傳逆運算數位分身 APP

此溫度數據可在模擬中作為輸入的條件，經過物理模型的機制（方程 (1)），計算出分別在兩個滾珠產生的熱源。

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模擬開發成簡單操作的 APP 模擬器。我們將此逆運算模型設計為數位分身 APP 如圖 3。

此 APP 中瀏覽案件可讓使用者載入圖 b 的溫度數據。當數據載入後，計算按鈕將執行計算，反推出不同時間點在上下兩方滾珠產生的熱源，以 q1 與 q2 標記。圖 3 中 “溫度 3D” 圖示區域顯示溫度分佈，而 “Measured Data vs Simulation” 區則圖示化測量值與模擬結果的比對，請見圖 4。途中可見計算結果與測量值一致。另外，數位分身之 “熱源 q1, q2” 區塊則顯示所算出的 q1 與 q2，

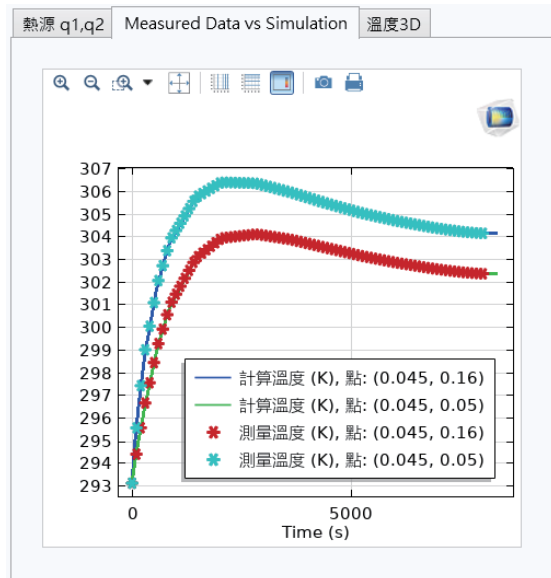


圖 4 測量值與模擬結果的比對

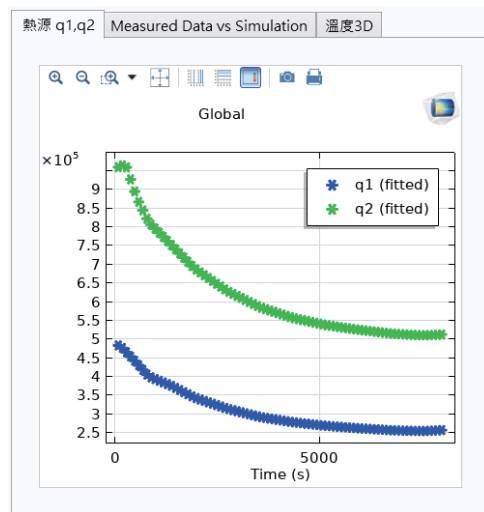


圖 5 模型計算出之熱源 q1, q2

請見圖 5。

數位分身獨立執行檔

COMSOL 公司發表之 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，成為可計算的獨立應用程式。此程式可在 Windows®、Linux® 操作系統和 MacOS 使用。圖 6 示意此數位分身之轉軸熱源與溫度預測之運用。從機台表面測量之溫度可輸入

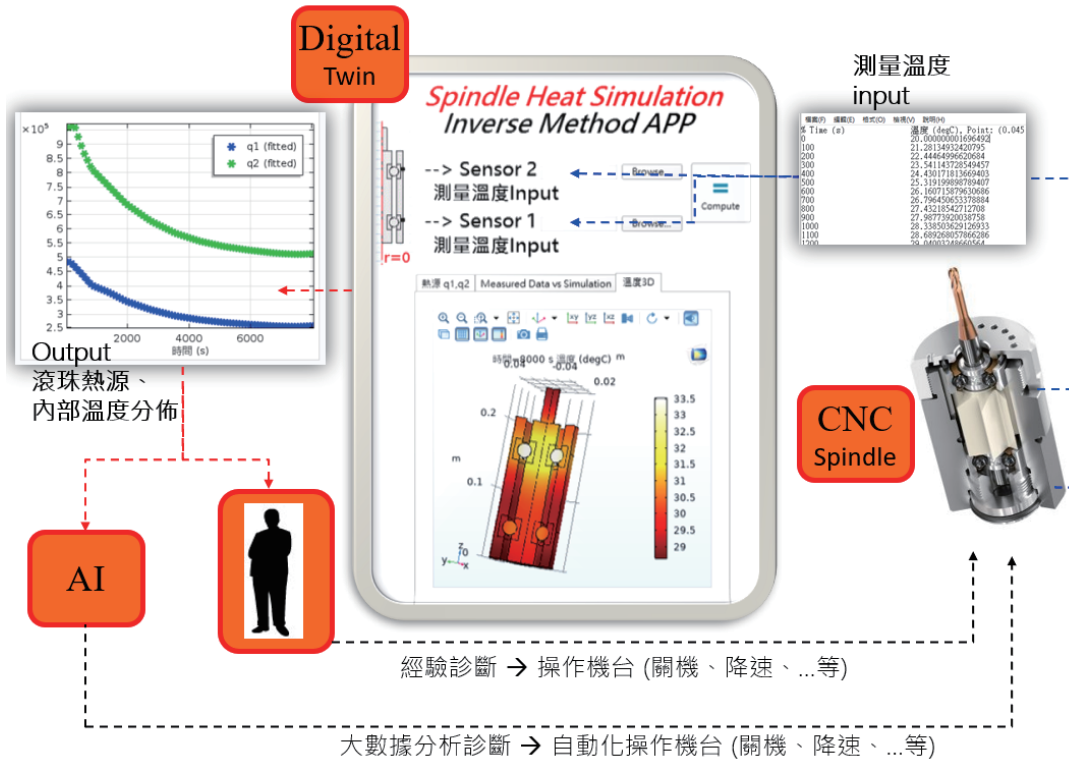


圖 6 數位分身運用在轉軸熱源與溫度預測之示意圖

CAE 數位分身。再透過模擬反算出內部熱源。具經驗之操作員或透過大數據等技術可判斷熱源是否有異狀，採取對機台必要的操作。

結論

此研究我們透過物理模型，建置可作為軸承內部熱源診斷依據的數位分身 (CAE Digital Twin)。此數位分身可將轉軸外部表所測量的溫度當作輸入條件，反算出轉軸的溫度分佈與滾珠模差的熱源。再經由具經驗之人員或其他方法，判斷熱源是否有異狀，採取對機台必要的操作。

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] V.T. Than, C.C.Wang, T.T. Ngo, J.H. Huang, *International Journal of Thermal Sciences* 111, 50-65 (2017).