

渦輪引擎轉盤葉片應力分析

蔡育霖、賴伯彥、李育茹
國家中山科學研究院航空研究所

摘要

隨著電腦輔助工程分析技術日益成熟，開發飛行載具時往往藉由有限元素分析以縮短時程與成本，本文藉由Abaqus進行渦輪引擎葉片應力分析，模擬轉速15000rpm狀態下轉盤與葉片受離心力作用下的應力分布情況，並分析葉片、墊片、轉盤間彼此之接觸應力。由於引擎幾何具有環型週期性對稱之特徵，故以單片轉盤葉片單元依環型週期對稱邊界之設定來等效於整圈模型，以增加計算效率。藉由本文建立之分析流程，提供引擎開發團隊能於設計初期進行模擬分析並輔以適當的修正，以降低結構所受之應力來增加其安全性。

關鍵字：有限元素分析、Abaqus、渦輪引擎、接觸應力、環型週期性對稱

ABSTRACT

According to CAE becomes a mature technology nowadays, finite-element-analysis has been applied to develop aircraft design to reduce time and costs for a long time. In this paper, using Abaqus to calculate the stress of bladed disk which is caused by centrifugal force with 15000 rpm rotating speed. In addition, the contact stress at the interface of blade and disk is also calculated. To improve the efficiency of simulations, a unit bladed disk cell model is presented to equivalent the full model by cyclic symmetric boundary conditions. Through this simulation process, it is shown that FEA provides a way to improve the safety of engine design.

Keywords: Finite-element-analysis, Abaqus, turbine engine, contact stress, cyclic symmetry.

一、前言

開發渦輪引擎是複雜且困難的挑戰，開發過程中，設計構型必須同時考慮結構強度、振動問題與氣動性能，故藉由不斷的修改設計構型，以期盡可能地滿足所有條件。在過往的開發時期，電腦運算速度尚未符合經濟效益，工程師們大量使用試誤法，且須建立於擁有大量人力、經驗與資料之基礎上，導致開發過程拉長至10年以上且耗費鉅資。時至今日，隨著電腦硬體的提升，電腦輔助工程分析技術的成熟，運用有限元素分析快速找到設計問題已成趨勢。藉由數值模擬分析的應用，大幅縮短各大產業之產品開發週期，並且降低試誤法所產生之鉅額成本。

引擎運作時，隨著高轉速的情況下產生離心力，離心力導致葉片轉盤產生張應力(tension stress)，因此於設計構型時須先進行常溫狀態下旋轉之應力分析。由於整圈模型

網格數量過於龐大，計算曠日廢時，故藉由引擎幾何具有環型週期性對稱(cyclic symmetry)之特徵，以單片轉盤葉片單元依環型週期對稱邊界之設定來等效於整圈模型進行有限元素模擬以增加計算效率[1,2]。旋轉應力除了須符合有效的安全裕度之外，亦會影響葉片轉盤之自然共振頻率，故設計引擎時，須避免工作頻率與其自然頻率產生共振[3]。

本文僅以Abaqus進行轉速15000rpm下之應力分布，藉由葉片、墊片、轉盤間接觸應力之計算使其結果更符合真實運作下的物理行為，由於葉片與轉盤皆為鈦合金材料，兩者在摩擦接觸時可能會產生鈦火，故於兩者之間夾有一墊片。藉由本文建立之數值模擬分析流程探討其應力是否符合安全裕度，最後對設計構型提出修改建議，並且分析新設計構型對原構型之問題改善程度。

二、有限元素分析模型

本文以引擎葉片轉盤模組作為本次分析目標，圖 1 為本文分析之步驟流程，圖 2 則為單片轉盤葉片模型與整圈模型幾何，模型主要分為葉片、轉盤與墊片三個部分，分析模型係以 CATIA 進行繪製，葉片高度約 5 英吋，軸向長度約 3 英吋，轉盤軸向長度約 2 英吋，內徑約 2 英吋，葉片置於鳩尾槽內，其間以墊片相隔，整圈模型共安裝 27 片葉片。葉片與轉盤材料皆為鈦合金，防鈦火墊片材料則為鈷合金。

為模擬引擎轉動時徑向不受約束之條件，故建立一圓柱座標系統，引擎轉軸即為該座標系之 z 軸方向，選取引擎搭接處設定其軸向與周向約束位移為零。本文以單片葉片單元分析整圈結構，依據整圈幾何特徵將接觸面切出而得單片模型，再以環型週期對稱(Cyclic Symmetry)之邊界條件定義兩接觸面為主從面，如圖 3 所示，總片數輸入 27 即可將單片模型等效為整圈模型。本分析為當引擎轉動至 1500rpm 穩態狀況時之應力模擬，旋轉產生之離心力為體積力，故在穩態分析之步驟中選取體積力負載，並於角速度中輸入其轉速。

本分析期望能更真實的模擬轉動時葉片與轉盤之應力與變形行為，故分析中分別將葉片、墊片、轉盤之間皆設以接觸對進行分析，接觸面共分為三個部分：葉片對墊片接觸、轉盤對墊片接觸以及葉片對轉盤接觸，其接觸面摩擦係數設定為 0.02。

三、分析結果與討論

圖 4 為初始設計之渦輪葉片轉盤分析結果，圖中轉盤頸部之 Von-Mises 應力值最大約為 115ksi，依引擎設計規範中，無論於飛行中或是地面狀態，皆不允許有破壞的情況發生，暫時變形亦不能影響引擎運作，故轉盤元件應至少有 122% 之安全裕度，依 Ti64 於 100°F 之破壞強度 140ksi 計算，此構型並不符合其安全裕度，故須將幾何形狀做適度的調整。

由於初始構型之轉盤頸部較細，導致其頸部應力未符合足夠之安全裕度，因此與設計人員討論後，適度的加寬轉盤頸部厚度，由原本的 0.3in 增加至約 0.6in，依照同樣的分析流程，其分析結果如圖 5 所示，轉盤頸部之應力藉由加寬轉盤頸部厚度，其最

大值由 115ksi 降為 69ksi，滿足規範要求之有效裕度。此外亦分析原構型與修正構型之位移結果，分別如圖 6 與圖 7 所示，修正構型之最大位移也從原構型之 0.03in 降低為 0.023in。將原構型與修正構型之轉盤模擬結果整理如表 1 所示。

圖 8 為轉速 15000rpm 穩態狀況下葉片的應力分析結果，由於其 Von-Mises 之應力結果滿足 Ti64 之 122% 安全裕度之要求，故不需做進一步之修改。圖 9 為葉片搭配修正構型之變形位移結果。

本引擎葉片轉盤模組於氣動力設計時將轉盤之鳩尾槽角度設計較大，以至於轉動時之離心力在鳩尾槽處產生極大之應力，如圖 10 所示為修正後構型之鳩尾槽處應力結果，其應力值已遠大於 Ti64 之降伏應力，勢必重新進行鳩尾槽之角度設計，本文在此並未針對鳩尾槽之新構型進行探討。

四、結論

本文藉由 Abaqus 進行引擎葉片轉盤模組進行轉速 15000rpm 之穩態應力分析，藉由單葉片之環型週期性對稱邊界條件等效於整圈模型進行分析，能大幅降低計算所需時間，並利用接觸對之設定以更符合真實運轉之情形。藉由數值分析能於設計初期提供研發團隊了解引擎可能發生破壞之情況並適當的進行修正，本文之初始構型由於轉盤厚度不足導致轉盤頸部應力未符合規範要求之安全裕度，將其加厚之後能確實達到降低應力之要求。此外，由於鳩尾槽之歪斜角度過大導致極大的應力，此部分仍須藉由氣動力之設計要求進行修正後再分析其應力結果。藉由本文所建立之分析流程，將可應用至其他級渦輪引擎之結構分析。

五、參考文獻

- [1] P.Městánek, "Low cycle fatigue analysis of a last stage steam turbine blade", 2008.
- [2] 賴伯彥, 魏悞傑, "有限元素分析應用於渦輪引擎葉片開發", 中華民國航太學會學術研討會, 2017.
- [3] L. Witek, "Influence of Engine Rotational Speed on The Natural Frequencies of The Turbine Blade", Journal of KONES Powertrain and Transport, vol. 23, 2016.

六、表格

表 1

	原構型	修正構型
最大應力	115ksi	69ksi
最大位移	0.03in	0.023in

七、圖

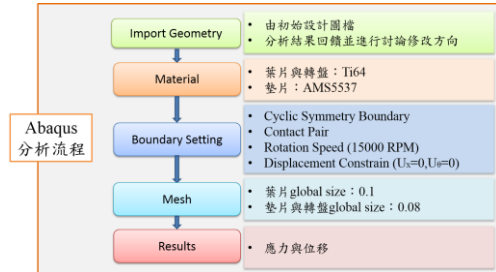


圖 1 分析流程步驟

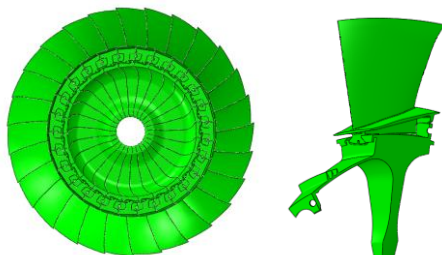


圖 2 整圖模型與單一葉片轉盤單元模型

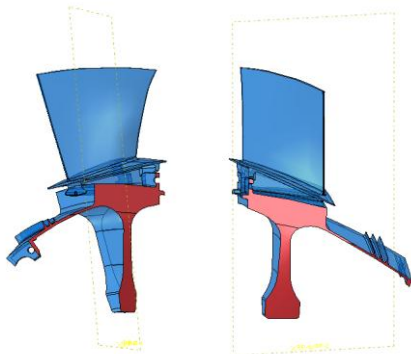


圖 3 環型週期性對稱邊界

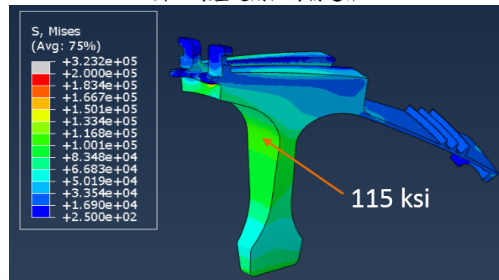


圖 4 初始構型之轉盤 Von-Mises 應力結果

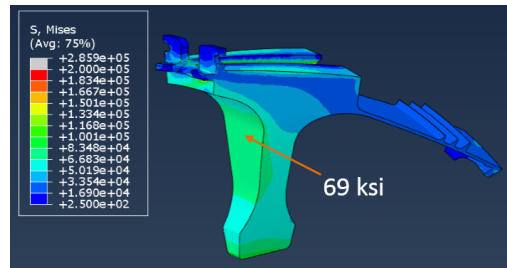


圖 5 修正構型之轉盤 Von-Mises 應力結果

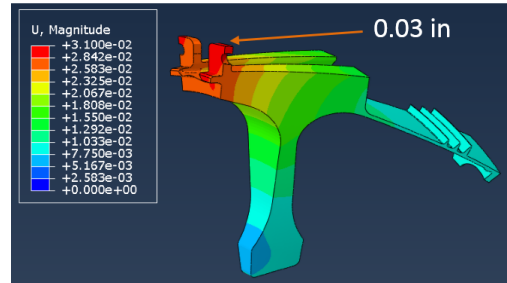


圖 6 初始構型之轉盤變形位移結果

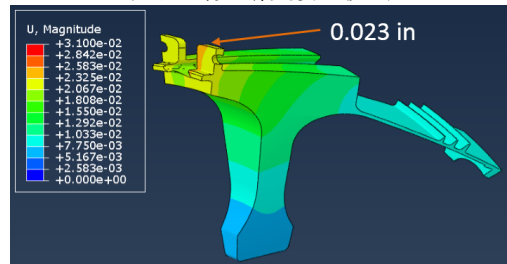


圖 7 修正構型之轉盤變形位移結果

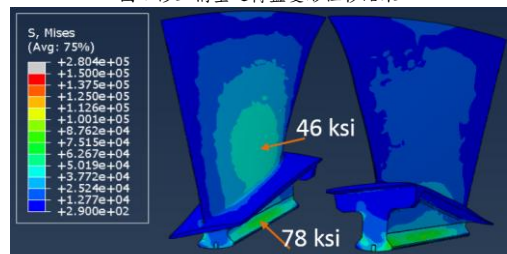


圖 8 初始構型之葉片 Von-Mises 應力結果

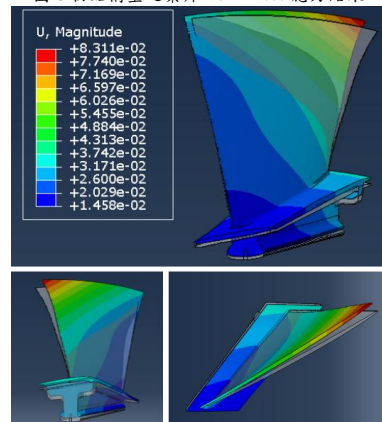


圖 9 葉片變形位移結果

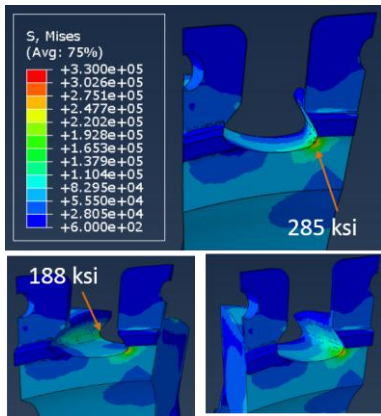


圖 10 修正構型之轉盤鳩尾槽應力結果