

渦輪引擎轉盤葉片熱固耦合應力分析

時毓謙, 魏楞傑, 李育茹, 林明煌

國家中山科學研究院航空研究所

摘要

本文藉由Abaqus軟體進行渦輪引擎轉盤與葉片熱固耦合應力分析，模擬引擎轉子於溫度、壓力負載、離心力作用下的應力分佈情況。由於引擎轉子為一圓周對稱之結構，故以單一葉片進行「圓周對稱」等效完整模型，可提高計算效率並節省分析時間，而轉盤與葉片插槽部分則使用考慮摩擦力的接觸設定。藉由本文熱固耦合分析方法，所得應力之分佈結果，配合「爆裂裕度」與「安全裕度」，可用於引擎初步開發設計與安全性檢驗。

關鍵字：轉盤與葉片、引擎轉子、熱固耦合

ABSTRACT

In this paper, Abaqus software is used to analyze the stress of the disk and blades of turbine engine, and to simulate the stress distribution of the engine rotor under temperature, pressure load and centrifugal force. To improve the efficiency of simulations, an unit blade model is equivalent to the full model by setting “cyclic symmetry” as the boundary condition, and the contact setting between the disk slot and blades takes into account the friction. Through the analysis method of heat-solid interaction, the results of the obtained stress distribution in conjunction with “burst speed margin” and “safety margin”, can be used for initial design and safety inspection of the engine.

Keywords: disk and blades, engine rotor, heat-solid interaction

一、前言

渦輪引擎的開發過程複雜且艱鉅，設計構型時，需要考慮各領域需求以及可能遭遇問題，包括：氣動性能、頻率響應[1-4]、結構強度[5-6]、疲勞分析[10-11]等等，為了滿足各項要求，長期以來工程師採用試誤法與經驗公式，從理論與實驗中找尋最佳解，此過程需建立在大量人力與金錢成本上，耗時且費力。

隨著科技的日新月異以及電腦技術的普及，時至今日，使用電腦工程軟體進行分析模擬已漸漸取代以往的試誤法。有限元素分析[7-9](Finite Element Analysis, FEA)在工程上被廣泛運用於解決各領域問題，不論熱傳、流場、電磁、結構等等分析問題，皆能有效運算並快速處理，也因此許多企業與公司都將有限元素應用於產品的設計與開發。

引擎的構型開發，也可利用有限元素進行結構應力分析，方便設計人員進行評估

與構型修改。由於引擎運轉時，除了扇模組溫度較低之外，壓縮器、燃燒室、高低壓渦輪等核心段，皆為較高溫區段，常溫狀態下的結構分析已經無法滿足分析與設計需求，因此本文採用熱傳分析串接結構分析之熱固耦合分析方法與流程，模擬引擎運轉時轉子的應力分佈結果。

建立模型網格時，若以整體模型進行分析，網格數量將過於龐大，所需計算時間過多且不易收斂，故以單片轉盤葉片單元依圓周對稱(Cyclic Symmetry)邊界之設定[10]等效整圈模型進行有限元素分析，以增加計算效率與精準度。本文以 Abaqus 進行溫度、壓力與轉速 15000rpm 下之應力分析，藉由葉片、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，並依建立之數值模擬分析流程探討其應力是否符合爆裂裕度與安全裕度[11-12]，最後對設計構型提出修改建議，並且提供此方法未來發展方向。

二、有限元素分析模型

本文以引擎葉片轉盤模組做為分析目標，圖 1 為分析之步驟流程，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、轉盤兩個部分，分析模型係以 CATIA 進行繪製，葉片高度約 4 英吋，軸向長度約 1.5 英吋；轉盤軸向長度約 2 英吋，內徑約 3.3 英吋，單一葉片規格如圖 3 所示。葉片置於縱樹槽內，整圈模型共安裝 45 片。葉片材料為 Mar-M247、轉盤材料為 Udimet720，材料強度如表 1 與表 2 所示。

熱傳分析採用 DC3D10 熱傳分析之二次四面體網格，轉盤葉片共計 710657 節點與 460120 個網格。為模擬轉盤與葉片於溫度負載下之熱傳情況，熱傳分析時除了設定已知溫度邊界條件外，在轉盤與葉片接觸部份採用 Tie 方式設定，使其能傳遞熱能。

結構分析時，採用 C3D10 之 3D 應力分析二次四面體網格，節點、網格數量與熱傳分析時相同。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續面切出而得單片模型，再以圓周對稱之邊界條件[10]定義兩接續面為主從面，如圖 4 所示，總片數輸入 45 即可將單片模型等效為整圈模型；轉盤與葉片插槽接觸面則採用具 0.2 摩擦係數之接觸設定。由於引擎轉動時，徑向不受約束可自由伸張而軸向方向固定，故建立一圓柱座標系統，引擎轉軸為該座標系之 z 軸方向，並於引擎搭接處設定其軸向與周向約束位移為零，做為其邊界條件之設定。此外，為模擬引擎於溫度、壓力負載下(如圖 5，紅字為溫度、藍字為壓力)，轉動至 15000rpm 穩態情況之應力分佈情況，故於負載設定讀入熱傳分析之結果，並設定壓力負載與旋轉產生之體積力。

最後，將熱固耦合分析方法所得應力分佈結果，結合轉盤爆裂裕度與安全裕度的結構驗證[11-12]，可用於引擎初步開發設計與安全性檢驗。

三、分析結果與討論

引擎設計規範中規定，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，故轉盤元件底部的圓周方向應至少具有 22% 之爆

裂裕度(Burst Speed Margin)，插槽需具有 15% 之安全裕度(Safety Margin)，而葉片部份則需具有 33% 之安全裕度，兩者公式如下：

$$\text{爆裂裕度} : \sqrt{\frac{\text{MUF} \times (-3\sigma \text{ Ultimate Strength})}{\text{Average Tangential Stress}}} - 1$$

$$\text{安全裕度} : \sqrt{\frac{-3\sigma \text{ Material yield strength}}{\text{Applied direct stress}}} - 1$$

其中，材料的降伏與極限強度皆採用 -3σ 之材料強度，而轉盤底部所使用之周向應力，取轉盤底部梯型面積之平均應力進行計算。由於材料選用鎳基超合金，故材料應用係數(MUF)為 0.85。

圖 6 為熱傳分析所得溫度分佈，將結果讀入結構分析中做為溫度負載，並加入邊界條件及其他設定，以熱固耦合方式得出應力分佈結果。

圖 7、圖 8 與圖 9 為初始設計之渦輪轉盤與葉片分析結果，轉盤底部平均周向應力約為 110 ksi，轉盤插槽之 Von-Mises 應力值最大約為 146 ksi。依 Udimet720 於 800 °F 之破壞強度 206 ksi 計算，轉盤底部所得爆裂裕度為 26%，大於設計要求；轉盤插槽部份，依 Udimet720 於 1100 °F 之降伏強度 153 ksi 計算，所得安全裕度為 4%，不符合設計要求，故須將模型幾何形狀做適度的調整。葉片依 Mar-M247 於 1480 °F 之降伏強度 108 ksi 計算，所得安全裕度為 35%，大於設計要求。

由於初始構型之轉盤插槽圓角較小，導致其應力未符合足夠之安全裕度，因此適度加大轉盤插槽圓角半徑，由原本的 0.03 英吋增加至約 0.05 英吋。依照同樣的分析流程，其分析結果如圖 10、圖 11 與圖 12 所示，轉盤底部周向應力的平均值差異不大，由 110 ksi 變為 109 ksi，因此爆裂裕度依然為 26%；插槽之 Von-Mises 應力由 146 ksi 降為 134 ksi，安全裕度由原本 4% 增加為 14%，而葉片 Von-Mises 應力由 80 ksi 變為 77 ksi，變化不大，安全裕度由 35% 增為 40%，滿足設計需求。將原構型與修正構型之轉盤模擬結果整理如表 3 所示。

由表 3 顯示，轉盤插槽的構型修改對於此部份的應力降低有相當大的影響，也使轉盤插槽幾乎符合設計需求應具備之安全裕度。然而，縱樹型插槽的設計流程較繁複，且各齒之間斜率與圓角半徑等參數關係

複雜，其構型設計無法以理論或試驗直接得出最佳解，因此將此分析流程結合 Isight 及 Abaqus 進行參數最佳化分析，將可有效提升引擎效能且符合設計需求所規定之結構安全裕度，本文在此並未探討最佳化分析之流程。

四、結論與未來展望

本文採用 Abaqus 軟體模擬引擎葉片轉盤模組於溫度、壓力與轉速 15000rpm 環境下之穩態熱傳結構應力分析。藉由圓周對稱之邊界條件設定，有效減少分析運算所需時間，並利用磨擦係數之設定，模擬葉片與轉盤插槽於引擎運轉中的接觸情形。由應力分析之結果可以看出，構型經過修改後，應力最大值減少，也增加了安全裕度，但因為樑樹型插槽的參數眾多且複雜，單以直觀理論修改構型，將可能導致構件其他部分因構型的改變而不滿足設計需求與結構裕度，產生顧此失彼之情況，故將此方法與最佳化分析結合將是本文未來研究目標。

數值分析方法不但可以提供引擎設計團隊參考構型，也能做為試驗資料比對依據；發動機設計階段，藉著本文所建立之熱固耦合分析流程與方法，可得知引擎葉片與轉盤的應力分佈，以修正其構型使其符合設計需求。另外，此方法也具備未來發展性，可應用於與溫度負載有關之結構分析問題，例如：熱挫屈分析、溫度條件下的模態分析、最佳化分析等。

五、參考文獻

- [1] Pavel Polach, "Evaluation of the suitability of the bladed disk design regarding the danger of the resonant vibration excitation", Engineering Mechanics, Vol. 18, 2011, No.3/4, p.181-191.
- [2] B.L.Jaiswal, "Resonance behavior of steam turbine blades with zigzag damping pins", Additional General Manager, Experimental Mechanics Laboratory.
- [3] Murari Singh, Ph.D, "History of evolution, progress and application of safe diagram for tuned and mistuned systems", Proceeding of the Forty-Second Turbomach Symposium, October 1-3, 2013 Houston, Texas.
- [4] F. W. Perkins, Duane E. Cromack, "Wind

Turbine Blade Stress Analysis And Natural Frequencies", Wind Energy Center Reports, 1978

- [5] P. R. Surve, R.V. Shitole, D. R. Shirdhankar, S. N. Shigwan, V. S. Bagade., "Structural Analysis of Gas Turbine Blade", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol.4, Issue 5, May, 2017.
- [6] C. M. Lewis, R. A. Samuel, and F. Yen, "3-D STRESS ANALYSIS OF A TURBINE BLADE", Boeing Aircraft Company, Army Materials and Mechanics Research Center CTR 77-14.
- [7] M. J. Tuner, R. W. Clough, H.C. Martin, L. J. Topp, "Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structure", Journal of The Aeronautical Sciences, Volume 23, Issue 9, P. 805-823, September, 1956.
- [8] Robert D. Cook, "Concept and Application of Finite Element Analysis", Second Edition, Department of Engineering Mechanics, University of Wisconsin-Madison, 1981.
- [9] Oliver G. McGee, "Finite Element Analysis of Flexible, Rotating Blades", NASA Technical Memorandum 89906, July 1987
- [10] P. Městánek, "Low cycle fatigue analysis of a last stage steam turbine blade", Applied and Computational Mechanics2 (2008), 71-82, October 2008.
- [11] Harinath SP, Sarath Chandra GV, Shreyas PM, Kumar Godwa, "Evaluation of Over-speed, Burst Margin and Estimation of Low-cycle Fatigue Life of an Aero Engine Disc", International Journal of Innovative Research in Advanced Engineering (IJIRAE), Issue 4, Volume 4, April 2017.
- [12] Ranjan Kumar, Vinayak Ranjan, Bipin Kumar, Sanjoy K. Ghoshal, "Finite element modelling and analysis of the burst margin of a gas turbine disc using an area weighted mean hoop stress method", Engineering Failure Analysis 90, (2018), 425-423, 2018.

六、表格

Mar-M247		
溫度(°F)	降伏強度(ksi)	極限強度(ksi)
75	118	154
1480	108	141

表 1、Mar-M247 材料強度表

Udimet720		
溫度(°F)	降伏強度(ksi)	極限強度(ksi)
75	159	210
800	156	206
1100	152	199

表 2、Udimet720 材料強度表

	轉盤底部	轉盤插槽	葉片
構改前應力	110 ksi	146 ksi	80 ksi
構改後應力	109 ksi	134 ksi	77 ksi
採用裕度	爆裂裕度	安全裕度	安全裕度
裕度標準	22%	15%	33%
構改前裕度	26%	4%	35%
構改後裕度	26%	14%	40%

表 3、轉盤葉片應力與裕度比較表

七、圖片

Geometry	<ul style="list-style-type: none"> Unit Blade + Disk Model
Material	<ul style="list-style-type: none"> Blade : Mar-M247 Disk : Udimet720
Mesh	<ul style="list-style-type: none"> Heat Transfer Analysis : DC3D10 Static Structural Analysis : C3D10
Heat Transfer Analysis	<ul style="list-style-type: none"> Interaction : Tie Boundary Condition : Temperature
Static Structural Analysis	<ul style="list-style-type: none"> Interaction : Cyclic Symmetry & Contact Load : Thermal & Pressure & Rotational Force Boundary Condition: Displacement & Rotation

圖 1、分析流程圖

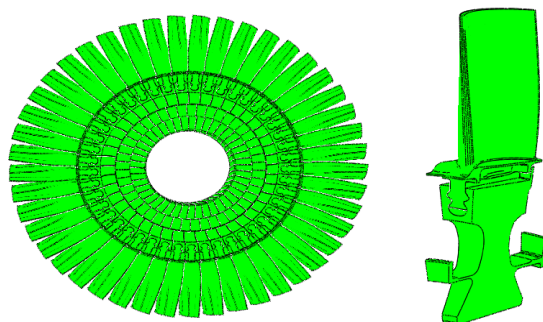


圖 2、整圈模型與單一葉片轉盤單元模型

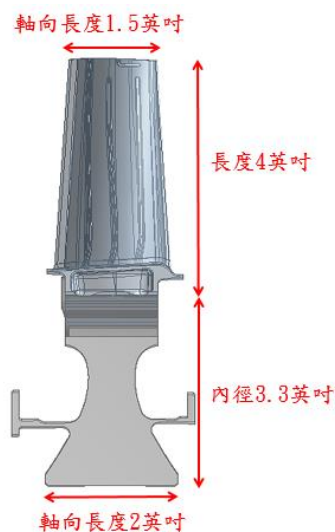


圖 3、模型尺寸

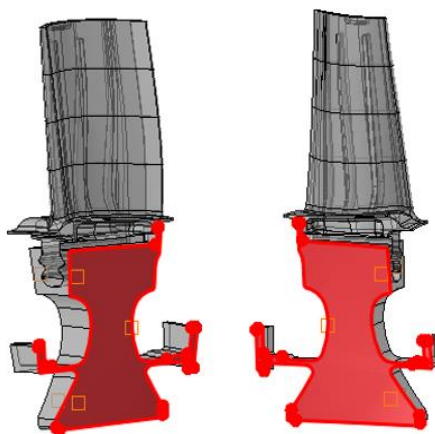


圖 4、圓周對稱邊界主從面設定

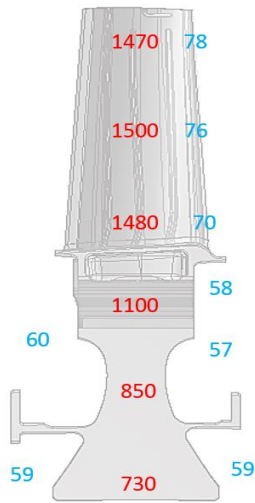


圖 5、溫度壓力分佈

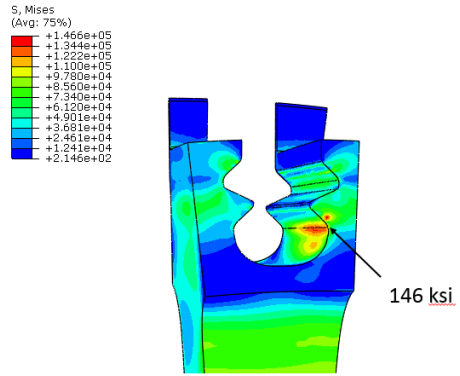


圖 8、初始構型插槽 Von-Mises 應力結果

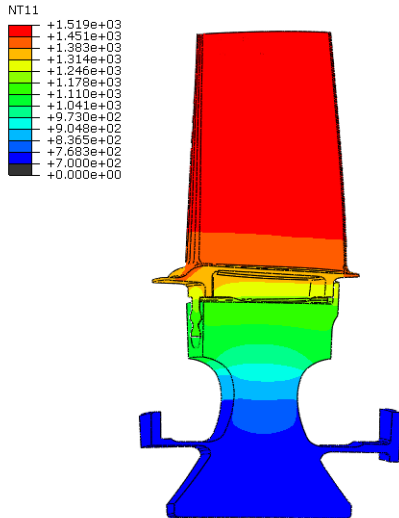


圖 6、熱傳分析結果

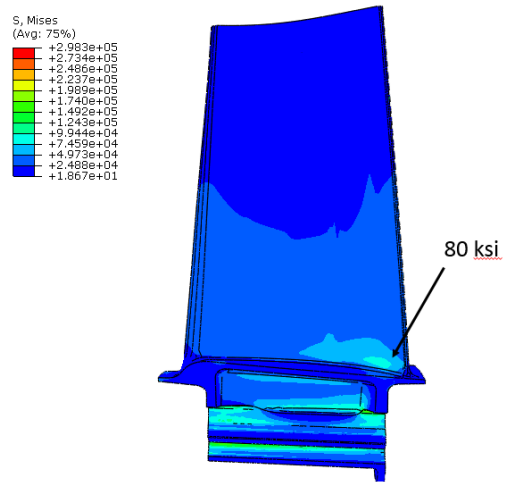


圖 9、初始構型葉片 Von-Mises 應力結果

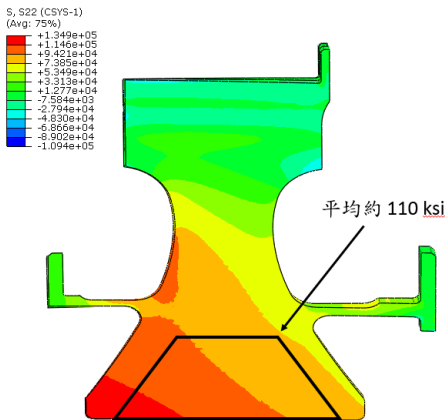


圖 7、初始構型圓周應力結果

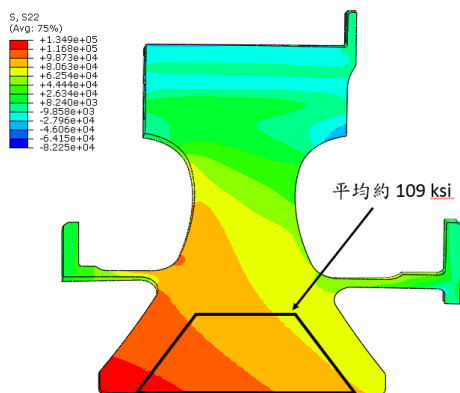


圖 10、修正構型圓周應力結果

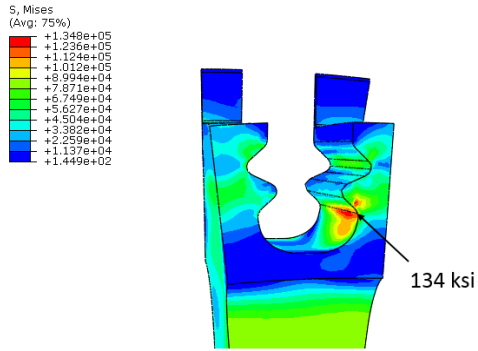


圖 11、修改構型插槽 Von-Mises 應力結果

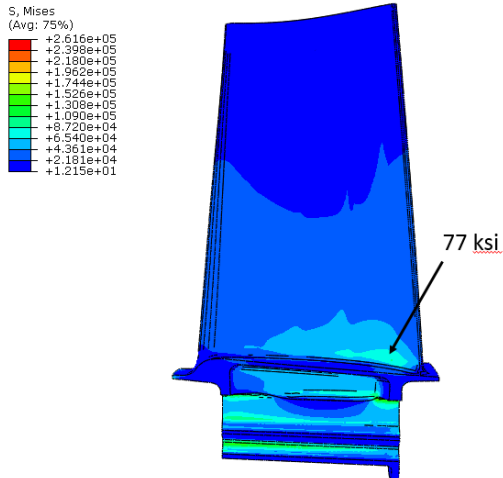


圖 12、修改構型葉片 Von-Mises 應力結果