

## 引擎整體葉盤模態分析

蔡育霖, 李育茹, 黃峻源

國家中山科學研究院航空研究所

### 摘要

為提高高速運作下的穩定性以及減輕重量之目的，發動機引擎諸多轉動件採用整體葉盤 (Blisk)，即葉片與轉盤一體化之設計。當整體葉盤運作過程中產生共振時，容易導致高週疲勞破壞，因此在研發過程中模態分析實為重要。本文利用 Abaqus 有限元素分析軟體進行整體葉盤模態分析，以單位葉盤幾何藉由圓周週期邊界條件取代整圈模型，以減少分析整圈模型所需的電腦硬體需求以及計算時間，依據後處理結果判定其振動模態類型分析其 Campbell 圖與 SAVE 圖，以確認幾何構型符合設計之安全裕度要求。

**關鍵字：**整體葉盤、有限元素法、Abaqus、圓周週期對稱、模態分析

### ABSTRACT

Recently, blisk has been widely used in rotating parts of engine to improve the stability at high rotational speed situation and lighten the engine weight. A blisk is an aero-engine component consisting of rotor disk and multiple blades in a single part. High cycle fatigue is usually caused by resonance during operation, therefore, modal analysis is important to determine the vibration characteristics. In this paper, to enhance the efficiency of simulations, a sector geometry with cyclic symmetry boundary conditions replaces the full circular model. Natural frequency and mode shape are calculated by finite element software, Abaqus. To ensure the blisk geometry meets the requirement of safe margin, Campbell diagram and SAVE diagram are determined by the vibration family according to the post processing.

**Keywords:** blisk, finite element method, Abaqus, cyclic symmetry, modal analysis

### 一、緒論

發動機核心引擎主要可分為三個部分：壓縮器、燃燒室、渦輪。首先氣流流入壓縮器時，藉由轉動件與靜態件將機械能轉換至氣體使其氣體壓力增加，轉動件即為轉子，由轉盤與葉片所組成，除了插槽式葉片轉盤外，為了提高高速運作下的穩定性以及減輕重量之目的，諸多轉動件採用整體葉盤 (Blisk)，即葉片與轉盤一體化之設計。

高週疲勞為渦輪引擎中常見的破壞模式，圖 1 為低週疲勞與高週疲勞裂紋成長之特性比較[1]，當疲勞裂紋成長至檢測長度時，高週疲勞裂紋成長至破壞之速度將會大幅提升，而共振效應更是導致高週疲勞破壞的主要原因，因此，在設計研發過程中，對於整體葉盤之模態分析便顯得極為重要[2-5]。由於整體葉盤幾何具圓周週期性，因此在分析過程中利用單位葉盤幾何依圓周

週期性邊界取代整圈模型，如此可有效的降低有限元素分析所需之計算機硬體需求以及提升分析效率。

葉盤振動軸向撓度一般表示式為

$$W(r, \theta, t) = U(r) e^{\pm im\theta} e^{\pm i\omega t}, \quad (1)$$

而激振外力可以表示為

$$F_k(r, \theta, t) = A_k(r) \sin K(\theta + \Omega t), \quad (2)$$

對於  $m$  階模態的振動，將(1)式表示為

$$W_m(r, \theta, t) = U_m(r) \sin(m\theta \pm \omega t), \quad (3)$$

當葉盤之自然振動頻率與激振力頻率相同， $\omega = K\Omega$ ，且葉盤模態節徑數與激振力階次相同時， $m = K$ ，才能滿足葉盤振動的共振效應，此時便有發生高週疲勞破壞之危險，因此在設計、研發時，藉由振動模態分析與建立 Campbell 圖以預測共振發生之可能頻率，以期該頻率能避開急速頻率與工作轉速頻率。由於轉動件之自然頻率與模態量

測實為不易，且隨著計算機電腦的升級以及數值模擬技術的提昇，發動機引擎開發初期藉由電腦輔助工程的技術進行設計優化儼然成為趨勢。本文以 Abaqus 套裝分析軟體進行數值分析，Abaqus 基於有限元素分析之方法，可針對固體力學、振動、熱傳等物理問題進行數值模擬，協助研究人員能深入地瞭解研究議題。本文依序介紹 Abaqus 有限元素分析模型、分析結果探討以及結論。

## 二、Abaqus 分析模型

本文以引擎壓縮器為分析目標，針對整體式葉盤之模態進行數值模擬以了解其振動特性，圖 2 為本文之分析流程，然本文中並未討論溫度對材料性質的影響，故以灰色圖示代表暫時忽略不計，將整圈葉盤模型切割出單一葉盤知單位幾何，如圖 3 所示，然而要藉由此單位葉盤幾何取代整圈模型，則需輔以圓周週期對稱邊界條件，對於幾何的圓周對稱條件，可以將其位移函數表示為

$$X = e^{i\psi} X_a, \quad (4)$$

其中  $\psi = 2\pi h/N$ ， $h = 0, 1, 2, \dots, \text{int}[N/2]$ ，用以表示單位幾何內的相位角變化， $N$  為葉片數目，本文之幾何葉片數共 33 片，取其單位葉盤幾何並定義圓周週期邊界如圖 4 所示，材料為 Ti6242，約束其搭接處之軸向位移為零，執行 Abaqus 特徵頻率分析。由於分析整體葉盤振動模態過程中，必需針對不同葉片振動模態與葉盤節徑數目(nodal diameters)的關係進行探討，因此在設定圓周週期性邊界時，須輸入計算所需之節徑數目，如此才能完整的體現出整圈模型。

## 三、分析結果探討

依葉片振動模態可分為一階彎曲模態、扭轉模態、二階彎曲模態等，由於整體葉盤幾何葉片與轉盤間有耦合影響的效果，因此分析過程中依據不同葉片之模態類型進行分類，將其轉盤上不同節徑數目下之特徵頻率繪出如圖 5 所示之 SAFE 圖 (Singh's Advanced Frequency Evaluation Diagram)。當節徑數目增加時，該葉片模態類型之整體葉盤特徵頻率則趨於一定值。圖 6 為一階彎曲模態 0ND 至 5ND 之模態結果。

以節徑數目區分，將三種家族分類之

振動頻率繪製成 Campbell 圖，如圖 7~10 所示，分別為 1ND、3ND、6ND、10ND，並分別依 1 倍、3 倍、6 倍以及 10 倍激振轉速頻率繪製 Campbell 圖以判斷其臨界轉速，圖 7 為 1 節徑之模態分析結果，在 1 節徑時，1 倍頻之激振轉速並未與自然頻率產生交點，故在此構型中 1 節徑的共振不會被激發出來。圖 8 為 3 節徑之模態分析結果，由圖中可發現，3 倍頻之激振轉速與一階彎曲模態分類(Family 1)約 20000RPM 時產生交點，故此處便很有可能被激發共振，因此在操作過程中，盡量避免於 20000RPM 停留。圖 9 為 6 節徑之模態分析結果，在此振動模態下，考慮 6 倍頻之激振轉速，由圖中所示，於 7000RPM 與 22000RPM 時分別交一階振動模態分類(Family 1)與扭轉模態(Family 2)，因此在操作過程中需快速通過此轉速，以避免共振產生。圖 10 為 10 節徑之模態分析結果，在此振動模態下，考慮 10 倍頻之激振轉速，由圖中所示，於 4000RPM、13000RPM、19000RPM 時分別交一階振動模態分類(Family 1)、扭轉模態(Family 2)以及二階彎曲模態(Family 3)，故在操作過程中亦需注意避免停留於此操作轉速而導致共振產生。

## 四、結論

本文以 Abaqus 進行整體葉盤模態分析，並藉由圓周週期性對稱邊界條件取代整圈葉盤進行數值計算，可有效的降低分析過程中計算機硬體需求，提升分析效率。葉片與轉盤互相影響著整體葉盤幾何之模態，依據葉片振動模態進行家族分類，並依照不同節徑數目之模態繪製其 SAFE 圖與 Campbell 圖，提供該轉動件可能發生共振情況之轉速，以此模型為例，於 20000RPM 有 3 節徑之一階振動模態共振之可能，7000RPM 與 22000RPM 有 6 節徑模態共振，4000RPM、13000RPM 與 19000RPM 則有 10 節徑共振情況。若發生共振之轉速接近於工作轉速，研發人員將進行設計修改，以避免共振導致高週疲勞破壞。

## 五、參考文獻

- [1] J. A. Beck, "Fundamental Understanding of Blisk Analytical Response," A dissertation submitted in partial fulfillment

of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy, Wright State University, 2013.

- [2] W. Zhao, Y. Liu, and M. Lu, "Vibration Analysis of Aeroengine Compressor Blade-Disc Coupling System," Applied Mechanics and Materials, Vol. 16-19, 2009, pp.264-268.
- [3] L. Chromek, "Design of the blisk of an aircraft turbojet engine and verification of its resonance free operation," Applied and Computational Mechanics, Vol. 10, 2016, pp.5-14.
- [4] M. Takaffoli, A. Yousefi-Koma, M. Mahjoob, A. Shahsavari, S.M. Vaezi, M. Safa, and H. Khoshnavaz, "Experimental and Finite Element Modal Analysis of a Bladed Disk," The 9<sup>th</sup> Iranian Aerospace Society Conference, 2010.
- [5] Y.B. Raju and A.S. Prashanth, "Evaluation of The Turbine Bladed Disc Design for Resonant Vibration Excitation," International Research Journal of Engineering and Technology, Vol. 4, 2017, pp.1412-1418.

## 六、圖片

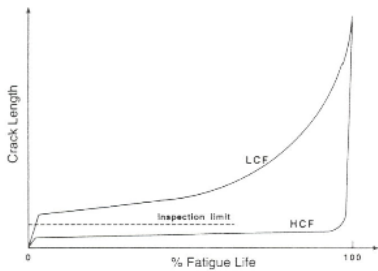


圖 1. 低週疲勞與高週疲勞裂紋成長與疲勞壽命關係圖

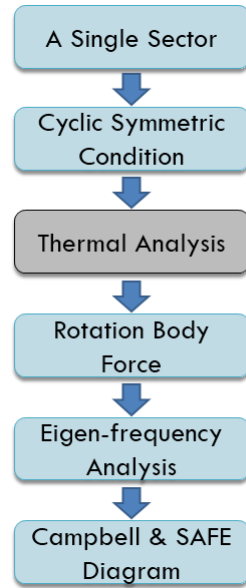


圖 2. 模態分析流程

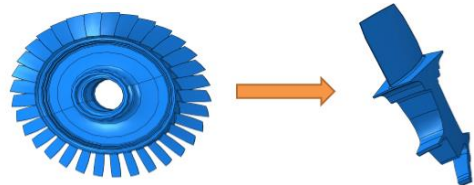


圖 3. 整圈葉盤幾何取出其單位葉盤幾何

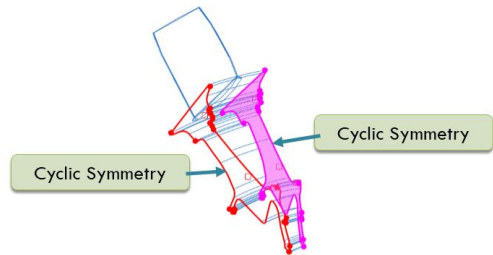


圖 4. 單位葉盤圓周週期性對稱邊界



圖 5. 不同轉速下，葉片一階彎曲模態 (Family 1)、扭轉模態 (Family 2)、二階彎曲模態 (Family 3) 之節徑數與頻率關係圖

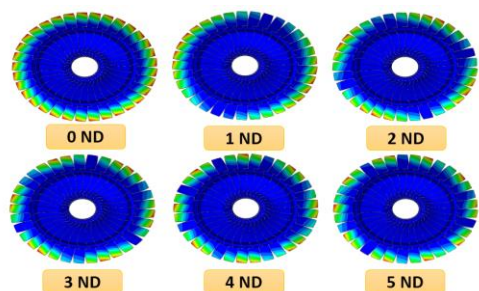


圖 6. 葉片一階彎曲模態 0 至 5 節徑數之模態振動結果

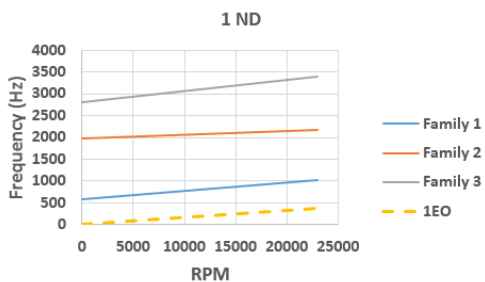


圖 7. 三種分類的 1 節徑 Campbell 圖

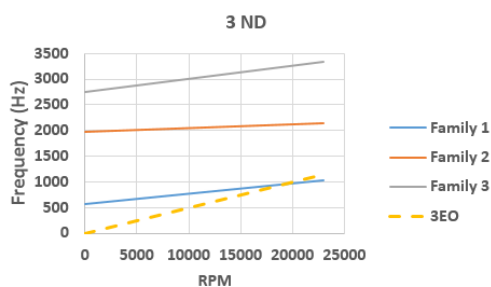


圖 8. 三種分類的 3 節徑 Campbell 圖

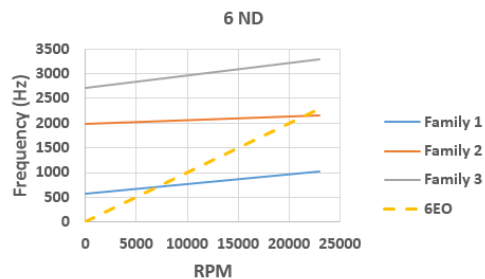


圖 9. 三種分類的 6 節徑 Campbell 圖

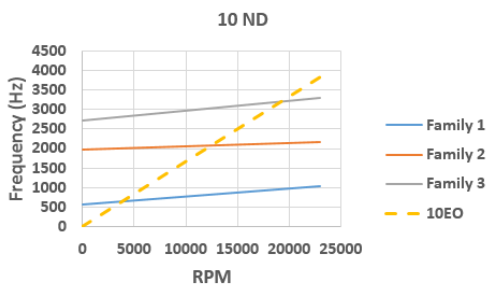


圖 10. 三種分類的 10 節徑 Campbell 圖