

微渦輪發電機轉子動態分析

林聖哲、郭義雄、邱琪芳、李基銓

Lin, Sheng-Che、Kuo,Yee-Hsiung、Chiu,Chi-Fang、Lee,Chih-Chuan

國家中山科學研究院航空研究所

National Chung-Shan Institute of Science and Technology, Aeronautical Systems Research Division

摘要

本研究針對自製 200 kW 微渦輪發電機之渦輪引擎轉子進行動態分析。轉子系統的額定操作轉速約為 45,000 rpm，臨界轉速分析結果顯示單軸式轉子系統之第一個臨界轉速為 8,870 rpm、第二個臨界轉速為 71,783 rpm，第三個臨界轉速為 107,527 rpm，與額定轉速皆符合設計安全裕度(大於 20%)要求。其軸承採用 17-4PH 航空軸承材料，經計算評估前、後軸承壽命可分別達到 25,600 與 17,700,000 小時左右。

關鍵字：微渦輪發電機、轉子動態、臨界轉速、軸承壽命

Abstract

This paper reports rotor dynamics analysis for a micro-turbine generator, which generates 200 KW power. The rated rotation speed is 45,000 rpm. For the single shaft system, the first critical speed is 8,870 rpm, the second critical speed is 71,783 rpm and third critical speed is 107,527 rpm. The second critical speed of the rotor is higher than 20% of the rated rotation speed. The estimated bearing life are 25,600 hrs and 17,700,000 hrs for forward and backward bearing respectively, with 17-4PH bearing.

Keywords: Gas turbine generator、rotor dynamics、critical speed、bearing life

一、前言

微渦輪發電機基本構造是使用小型渦輪引擎，燃燒可燃氣體如沼氣或天然瓦斯來轉動發電機的轉子進而產生電力。小型渦輪引擎的轉子設計方式大都是由離心式壓縮器及幅流式渦輪組合而成。

在渦輪引擎的設計中，轉子動力系統的臨界轉速分析是很重要的項目，因為其關係著引擎在操作轉速內是否有足夠的安全裕度、振動與軸承負荷是否過大及軸承壽命是否足夠等問題。

本文介紹本所自行研發之 200 KW 微渦輪發電機，所使用的小型渦輪引擎轉子動態分析結果。內容針對單軸式轉子設計，探討轉子重量特

性與支撐勁度對臨界轉速之影響，並評估其與額定轉速 45,000 rpm 間之安全裕度。選擇合適之支撐勁度計算軸承反力做為選取軸承之依據，計算軸承處之反力並評估軸承之使用壽命，並分析扭轉振動之結果。

二、轉子設計與動態分析

2.1 單軸式渦輪引擎

圖 1 為單軸式渦輪引擎的剖面圖及各零件的名稱，其構造是由一根轉軸系統所組成，藉由前軸承 B1(滾珠軸承)與後軸承 B2(滾柱軸承)支撐在靜態結構件，其 2D 模型如圖 2 所示。

單轉軸系統的慣性分佈及支撐勁度決定系

統的臨界轉速，壓縮器與渦輪轉子所使用的材料皆為 17-4PH，轉子材料及質量特性如表 1。支撐勁度是由軸承及靜態支撐結構所組成，由靜態分析結果獲得。支撐結構與軸承的支撐勁度值設定為 300k lbf/in，本文將使用此勁度值做為轉子動態分析時之支撐勁度。

表 1. 轉子的材料與質量特性

	Mass (lbf-sec ² /in)	Dia. Inertia (in-lbf-sec ²)	Polar Inertia (in-lbf-sec ²)
Compressor (17-4PH)	0.02	0.05	0.08
Turbine (17-4PH)	0.04	0.1	0.14

圖 3 為壓縮器使用與渦輪使用 17-4PH 時之臨界轉速分析結果，前 3 個臨界轉速分別為 8,870 rpm、71,783 rpm 及 107,527 rpm；此設計符合 20% 以上的操作安全裕度。

2.2 軸承特性分析

本研究中，單軸式渦輪引擎前後軸承分別為 B1 與 B2，壓縮器與渦輪材料皆使用 17-4PH，支撐勁度為 300k lbf/in。時，設定參數為軸承特性(油膜軸承與線性軸承)，利用 DyRoBeS 軟體分析軸承反力，參考相關之航太軸承型錄，軸承的壽命與其所承受的負荷有以下的關係，可利用下列兩式進行疲勞週期計算[1,2]：

$$\text{滾柱軸承壽命 } L_{10} = \frac{(C/P)^{10/3} \times 10^6}{n \times 60}$$

$$\text{滾珠軸承壽命 } L_{10} = \frac{(C/P)^3 \times 10^6}{n \times 60}$$

L_{10} ：可靠度為 90% 時之軸承壽命(小時)

n ：軸承轉速(RPM)

C ：軸承之動額定負荷，其值詳載於型錄中

P ：軸承所承受之等值負荷

本文之單軸引擎使用 2 個軸承來支撐整個轉動系

統，前軸承為滾珠軸承，規格代號 HTH106，主要承受系統的軸向推力與少量的徑向反力，前軸承同時承受轉子氣動力所造成的 44 lbf 軸向負載；後軸承為滾柱軸承，規格代號 RUH106，則僅承受系統大部份的徑向反力。軸承組合與疲勞週期分別如下所示：

(1). B1 油膜軸承，B2 線性軸承(表 2)。

(2). B1 線性軸承，B2 油膜軸承(表 3)。

(3). B1 油膜軸承，B2 油膜軸承(表 4)。

表 1. B1 油膜軸承，B2 線性軸承

	Clearance = 0.001 in		Clearance = 0.0015 in	
	Transmitted Force (lb)	Lifetime L_{10} (HRS)	Transmitted Force (lb)	Lifetime L_{10} (HRS)
B1油膜軸承 (In Phase)	13.5 lb	27615	13.0 lb	27902
B2線性軸承 (In Phase)	19.0 lb	8.44E+06	20.5 lb	6.55E+06

表 2. B1 線性軸承，B2 油膜軸承

	Clearance = 0.001 in		Clearance = 0.0015 in	
	Transmitted Force (lb)	Lifetime L_{10} (HRS)	Transmitted Force (lb)	Lifetime L_{10} (HRS)
B1線性軸承 (In Phase)	21.3 lb	23611	21.6 lb	23473
B2油膜軸承 (In Phase)	15.8 lb	1.56E+07	15.7 lb	1.59E+07

表 3. B1 油膜軸承，B2 油膜軸承

	Clearance = 0.001 in		Clearance = 0.0015 in	
	Transmitted Force (lb)	Lifetime L_{10} (HRS)	Transmitted Force (lb)	Lifetime L_{10} (HRS)
B1油膜軸承 (In Phase)	17.5 lb	25458	15.2 lb	26670
B2油膜軸承 (In Phase)	20.5 lb	6.55E+06	19.6 lb	7.61E+06

由上列表可得知，當 B1 為線性軸承 B2 為油膜軸

承時，其疲勞週期較差(23,611 小時)。當 B1 為油膜軸承 B2 為線性軸承時，其效果與 B1 與 B2 皆為油膜軸承時接近，最大疲勞週期分別為 27,902 小時與 26,670 小時。

2.3 扭轉振動分析

本段針對微渦輪系統，執行扭轉振動分析。除原先的引擎轉子之外，也將其它結構軸的參數輸入，同步執行扭轉分析，計算出整體結構軸的臨界轉速頻率，其結構如圖 4 所示，由左至右分別為發電機、齒輪箱低速軸、齒輪箱高速軸、搭接軸與引擎轉子。經過參數設定後，利用 DyRoBeS 軟體執行扭轉振動分析，可得到 4 個模態與臨界轉速分別為 1,554 rpm、4,946 rpm、30,376 rpm 與 156,397 rpm(圖 5)，其臨界轉速皆遠離操作轉速 45000 rpm，操作轉速符合安全裕度大於 20%之設計要求。

三、結論

轉子系統的額定操作轉速為 45000 rpm，當壓縮器與渦輪皆使用 17-4PH，支撐勁度為 300k lbf/in.時，臨界轉速分析結果，顯示前 3 個臨界轉速分別為 8,870 rpm、71,783 rpm 及 107,527 rpm；此設計具足夠安全裕度。此外，當軸承更換為油膜軸承時，可計算出軸承反力值，利用公式可推得其最大疲勞壽命可達 27,902 小時。最後利用整體主軸，計算出扭轉振動所產生的模態與臨界轉速，分別為 1,554 rpm、4,946 rpm、30,376 rpm 與 156,397 rpm，遠離操作轉速，亦符合安全裕度大於 20%之設計要求。

參考文獻

- [1] SBB, Design Guide for Metric Ball & Roller Bearing.
- [2] TIMKEN Aerospace Design Guide for Precision Metric Ball and Cylindrical Roller Bearings.

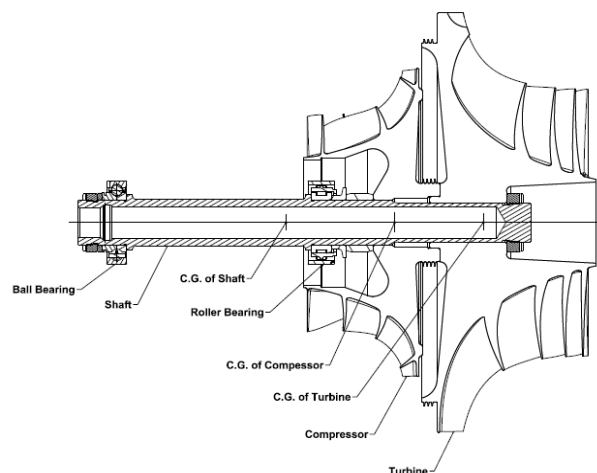


圖 1. 單軸式渦輪引擎轉子

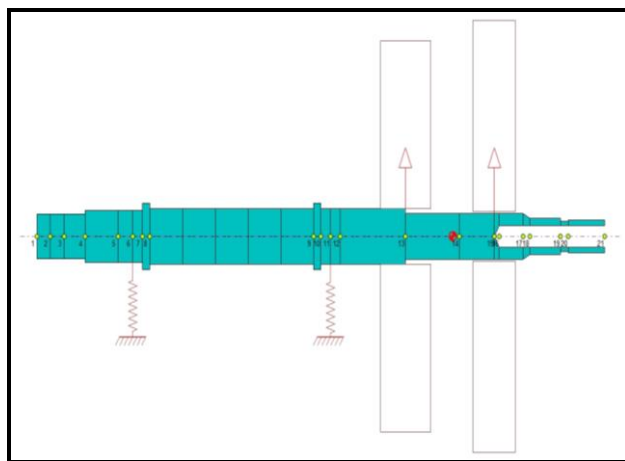


圖 2. 單軸式渦輪引擎轉子 2D 模型圖

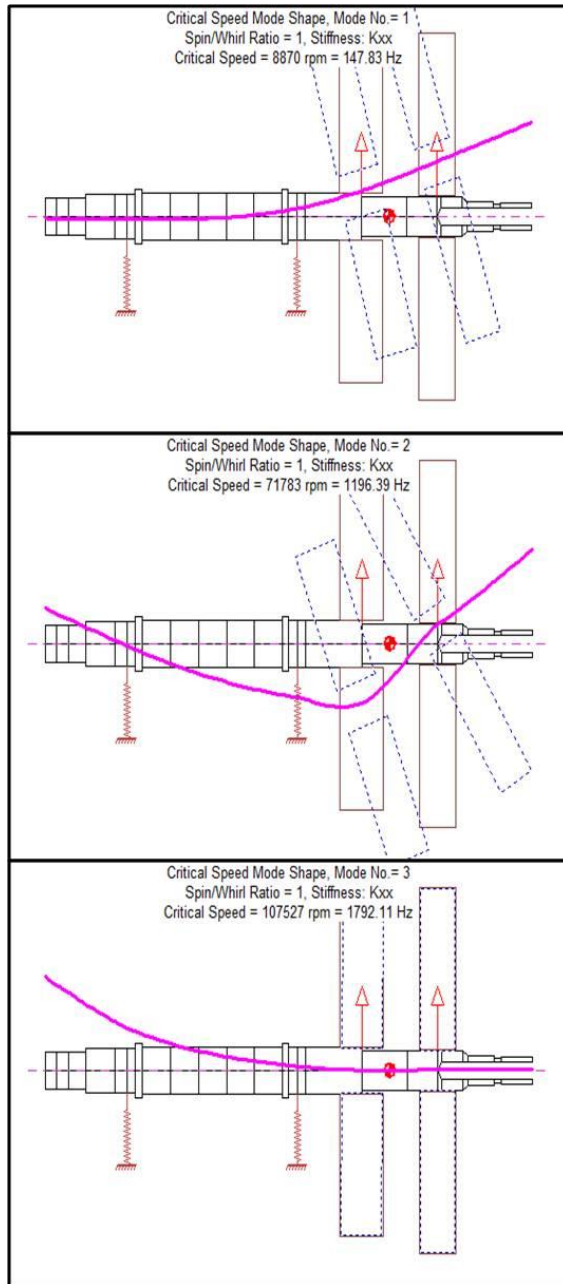


圖 3. 單軸式渦輪引擎臨界轉速與模態

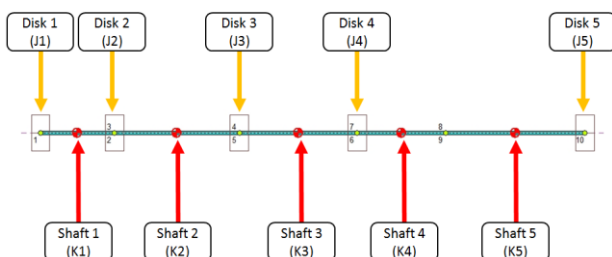


圖 4. 2D 模型圖(結構主軸)

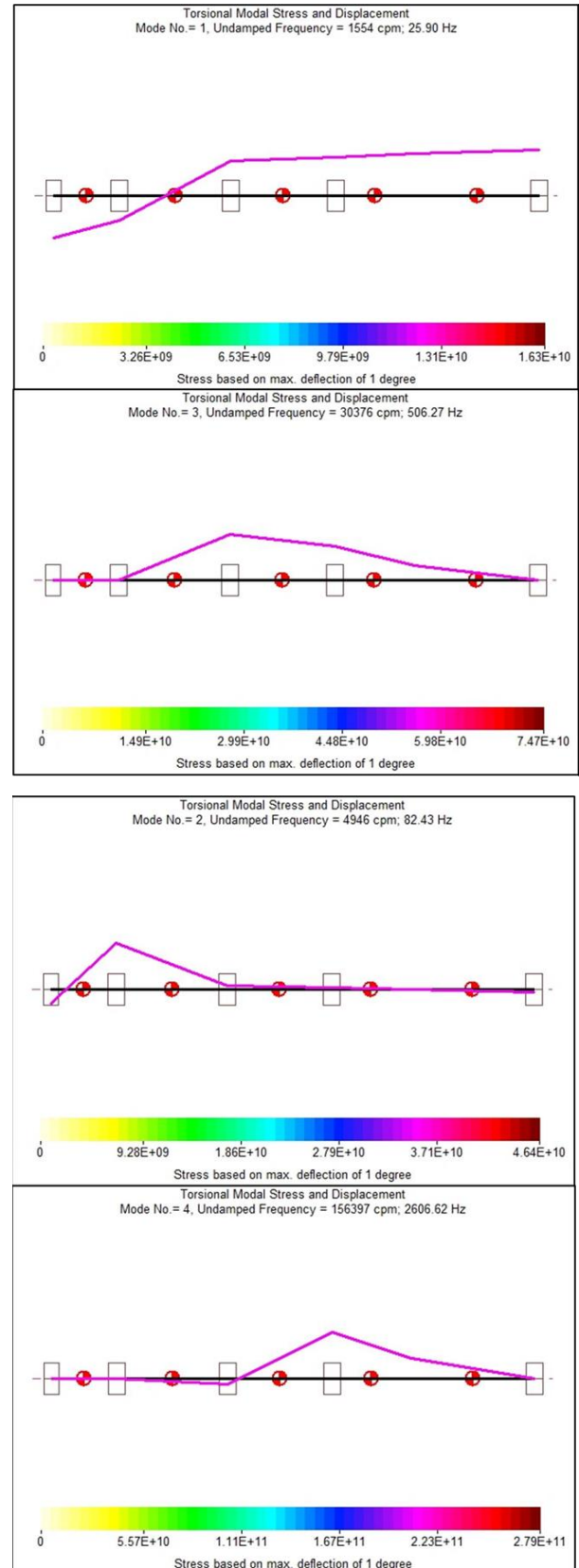


圖 5. 4 組模態與臨界轉速值