

柔性转子-挤压油膜阻尼器系统中 非协调涡动轨道的实验研究

燃气涡轮研究所 祝长生 冯心海

摘 要

本文以实验为基础分析了在柔性转子——挤压油膜阻尼器系统中出现非协调涡动轨道的可能性及规律性；研究了系统参数（如油膜的径向间隙比、承载长度、不平衡量及定心弹簧刚度等）对非协调涡动轨道的影响以及非协调涡动轨道与转子振动之间的关系。

一、前 言

对带有挤压油膜阻尼器(以下简称SFD)转子系统的动力特性无论是在理论分析还是在试验研究方面都已作了大量的工作。但大多数研究者都采用了带有定心弹簧的同心型SFD作为研究的模型，在转子系统的特性分析中所作的一个极为重要的简化假设是在稳态条件下轴颈中心绕轴承座的几何中心作协调圆进动。对于不带定心弹簧的非同心型SFD，在系统的特性分析中一般不可能采用上述的同心协调圆假设。即便是同心型SFD，一方面由于系统重力因素的影响，转子涡动轨道不可能始终是同心协调圆轨道；另一方面由于SFD油膜力的非线性作用使转子涡动轨道可能产生非协调轨道，因而对转子——SFD系统特性的分析不能仅限于同心协调圆轨道的范围内，而应对偏置的轨道特别是对非协调轨道进行深入地研究。

文献〔1~3〕在同心型SFD转子系统中分别观察到了1/2、1/3及1/4阶亚协调涡动轨道；文献〔4〕从理论及试验上研究了带有多内环非协调涡动轨道的稳定性；文献〔5〕最近报道了在SFD转子系统中随着转速的增大1/2、1/3阶亚协调涡动轨道依次出现的现象；文献〔6、7〕理论分析表明仅在极小的轴承参数下才能得到1/2阶亚协调涡动轨道，而增大轴承参数将会完全抑制这种轨道的出现。

本文在模型转子试验结果的基础上，对油膜的径向间隙比、承载长度、不平衡量及定心弹簧刚度等系统参数对出现非协调涡动轨道的可能性、规律性及这种轨道与转子振动之间的关系等问题进行较系统的分析。

二、试验转子及测试方法

试验转子如图1所示。

试验中的SFD采用了中央周向槽供油的双承载区结构，端部无密封。轴承的外环用销钉限转。表1给出了试验用SFD的主要结构参数及经换算后得到的系统的无量纲参数。试验时动力粘度 $\mu = 0.9842 \times 10^{-7} \text{ kg} \cdot \text{s} / \text{cm}^2$ ，质量比 $\alpha = m_B / m_D = 0.26715$ ， m_B 和 m_D 分别为折算得

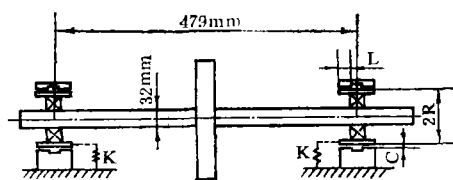


图 1 试验转子简图

到的轴颈及盘处的质量, $R = 55\text{mm}$, ω_c 为系统的一阶刚支临界转速, ω 为转子工作转速, $W = g/c\omega_c^2$, $B = \mu RL^3/m_B\omega_c C^3$, $U = U/m_D C$, $\Omega = \omega/\omega_c$ 。

定心弹簧采用了鼠笼式结构。试验中所用的两对定心弹簧的刚度分别为 3381.2kg/cm 及 4032.3kg/cm 。

表 1 试验参数及非协调涡动轨道的分布

原始参数	L(mm)	16.0								
	C/R	0.1%			0.3%			0.5%		
	U(g·cm)	28.70	51.45	81.35	28.70	51.45	81.35	28.70	51.45	81.35
无量纲参数	W	0.26734			0.08911			0.05347		
	B	4.75243			0.17602			0.03802		
	U	0.4296	0.7702	1.2178	0.1432	0.2567	0.4059	0.0859	0.1540	0.2435
各子非协调转速比 Ω 之下分布	0.7692									✓
	0.8974			✓				✓		✓
	1.0256			✓				✓		✓
	1.0897		✓	✓				✓		✓
	1.1538		✓	✓				✓		✓

原始参数		12.0								
		0.1%			0.3%			0.5%		
		28.70	51.45	81.35	28.70	51.45	81.35	28.70	51.45	81.35
无量纲参数	W	0.26734			0.08911			0.05347		
	B	2.00493			0.07426			0.01604		
	U	0.4296	0.7702	1.2178	0.1432	0.2567	0.4059	0.0859	0.1540	0.2435
各子非协调转速比 Ω 之下分布	0.7692									✓
	0.8974							✓		✓
	1.0256							✓		✓
	1.0897						✓	✓		✓
	1.1538					✓	✓	✓		✓

采用非接触式电涡流测振仪分别测量了轴颈及盘处水平和垂直方向上的振动大小。用 PS-600 数字信号分析仪对信号进行分析, 得到了转子振动量的大小及转子的涡动轨道。在数据处理中仔细地考虑了传感器静态标定与动态测量间的误差。

三、试验结果及分析

试验是在转子两端支承对称的条件下进行的。

首先进行了刚性支承及弹性支承转子系统的特性试验。在这样的支承条件下,即便系统的不平衡量较小,转子系统都具有较大的振动,而且轴颈及盘处的涡动轨道始终为协调轨道,以便排除由轴及支承的非对称刚度、转子的内摩擦及轴承的非线性等因素引起系统的非协调涡动轨道的可能性,从而使分析问题的注意力放在SFD的影响上。试验测得的刚性支承转子的一阶临界转速为7800rpm。

然后进行了改变油膜径向间隙比、承载长度、不平衡量及定心弹簧刚度等参数下的转子——SFD系统稳态特性试验。试验发现轴颈及盘处的涡动轨道具有基本相同的特点,没有发现轴颈处的涡动轨道为非协调而盘处的涡动轨道为协调的情况。但由于轴颈及盘处的振动大小不同使轴颈及盘处的涡动轨道的非协调程度存在一定的差异。

在同心型SFD——转子系统的试验中,在系统的各种参数的组合条件下,无论在超临界还是亚临界;在小不平衡量还是大不平衡量下,转子的涡动轨道均为偏置的斜椭圆,而没有观察到任何形式的非协调涡动轨道。这是由于定心弹簧的存在使轴颈在间隙中的运动受到了极大的限制,SFD所产生的油膜力的非线性不十分明显之故。

在非同心型SFD——转子系统的试验中,转子的涡动轨道除了在同心型SFD——转子系统的试验中观察到的偏置的斜椭圆轨道之外,还得到了如图2所示的基本上表现为带有单内环的非协调涡动轨道。表1和文献〔8〕表1给出了在不同的系统参数条件下非同心型SFD-转子系统在各稳态转速下出现这种非协调涡动轨道的统计结果。分析表1和文献〔8〕表1的试验结果可以得到系统参数对非协调涡动轨道影响的一般规律。

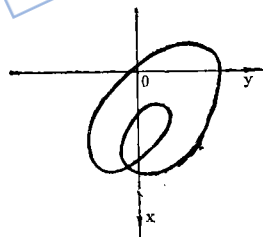


图2 1/2 阶非协调涡动轨道

1. 不平衡量对非协调涡动轨道的影响 在一定的油膜径向间隙比、承载长度的条件下,当系统的不平衡量较小时一般不出现非协调涡动轨道;当系统的不平衡量较大时在超临界首先出现非协调涡动轨道。如果继续增大系统的不平衡量,则非协调涡动轨道的转速区扩大,转子不仅可以在超临界而且还可以在亚临界甚至临界附近产生非协调涡动轨道,而且已有的非协调涡动轨道的非协调程度加强。总之,系统的不平衡量是影响系统产生非协调涡动轨道的一个主要因素。

2. 油膜的径向间隙比对非协调涡动轨道的影响 在一定的油膜承载长度及不平衡量的条件下,一般当油膜径向间隙比较大时系统容易产生非协调涡动轨道;当油膜径向间隙比较小时,只要系统的不平衡量较大也同样可以产生非协调涡动轨道。后者是现有文献资料上未曾报道过的。

须要特别指出,在一定的油膜承载长度及中等大小的油膜径向间隙比的组合下,转子系统在一个极大的不平衡量范围内不产生非协调涡动轨道。如本试验中的油膜承载长度为16mm与3%的油膜径向间隙比及油膜承载长度为12mm与1%的油膜径向间隙比的组合。从试验中还发现在这样的参数组合条件下SFD能够起到良好的减振作用,转子的振动较小而且还容易通过临界。这个不产生非协调涡动轨道的油膜径向间隙比随油膜承载长度的减小而减

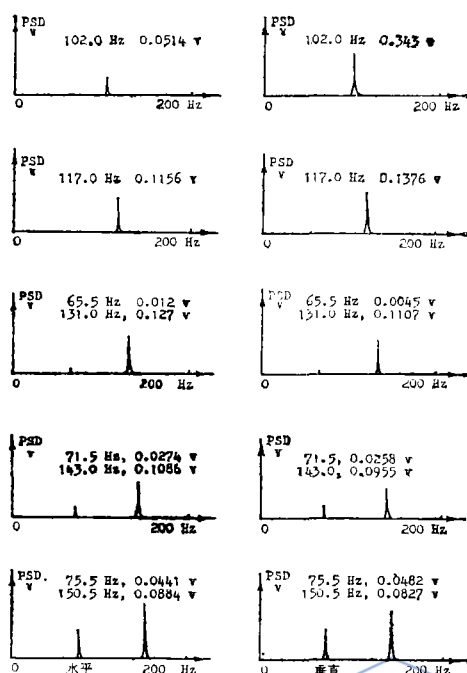


图3 谱分析结果

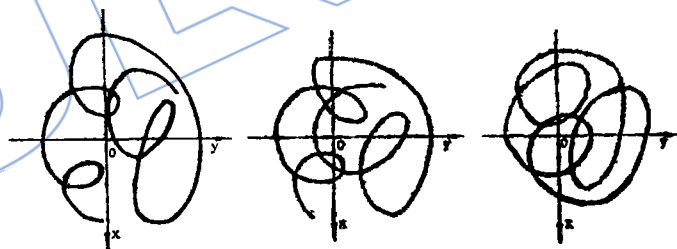


图4 带有多内环的非协调涡动轨道

小。在较大或较小的油膜径向间隙比的情况下,如果系统的不平衡量较大,转子不仅振动较大,易产生非协调涡动轨道而且还容易出现双稳态跳跃现象。这似乎表明在系统中存在着一个最佳的组合参数,使得转子系统的振动较小,转子易过临界而且还可以避免出现非协调涡动轨道及双稳态。

3. 油膜承载长度对非协调涡动轨道的影响 当转子系统的不平衡量一定时,减小油膜的承载长度使转子系统不产生非协调涡动轨道的最佳油膜径向间隙比范围的上限值减小;而在同一油膜径向间隙比的条件下,如油膜承载长度减小则较小的不平衡量就会使转子系统出现非协调涡动轨道,说明减小油膜承载长度易于引起非协调涡动轨道。

虽然油膜的径向间隙比及承载长度对转子系统是否产生非协调涡动轨道都有一定的影响,但前者比后者更为显著。

为了分析这种带有单内环的非协调涡动轨道的特性,对试验中出现非协调涡动轨道情况下的振动信号进行了谱分析。图3给出

了一组谱分析的结果。从谱图上可以得到,无论是在水平方向还是在垂直方向上的振动信号中不仅存在着与转子转速同步的频率成份而且还存在着一个自动跟踪的频率恒等于转子转速之半的成份。这个恒等于转子转速之半的频率成份随系统参数及工作条件而变化,当其强度大到一定程度时,转子的涡动轨道将会出现这种带有一个单内环的非协调涡动轨道。在某些条件下,这个半频分量的强度比同步分量的强度还大。这种带有单内环的非协调涡动轨道在转子转过两周后才能形成一个封闭完整的轨道,其进动轨道的频率恰好为转子转速之半,故称之为1/2阶亚协调涡动轨道。

虽然在系统具有较大的油膜径向间隙比或在较小的油膜径向间隙比的条件下都可能出现

非协调涡动轨道,而且涡动轨道主要为 $1/2$ 阶亚协调轨道,但在某些条件下其涡动轨道的特性又有一定的差异。图4是从具有较大的油膜径向间隙比的试验中得到的几个具有代表性的非协调涡动轨道,其系统的轴承参数都较小,而不平衡量较大或转速较高。很显然这不是 $1/2$ 阶亚协调涡动轨道,这种涡动轨道本身不仅是非协调的而且整个轨道又以极小的频率进动。从试验数据的分析方法及测试方案来看,这种具有进动特点的非协调涡动轨道无法用误差来解释。容易证明这种具有多内环的非协调涡动轨道主要是由于振动信号中存在着一个约为转子转速的 $1/(n+1)$ 倍的频率分量所产生。 n 表示一个完整的涡动轨道上内环的个数。这种轨道又称之为 $1/(n+1)$ 阶亚协调涡动轨道。较小的油膜径向间隙比时系统所产生的非协调涡动轨道一般为 $1/2$ 阶非协调涡动轨道。

试验结果与文献〔8〕中计算分析结果有较好的一致性。

五、结 论

1. 在同心型 SFD——转子系统中,由于定心弹簧能极为显著地抑制非协调涡动轨道的产生,因而这类转子系统中转子的涡动轨道一般为偏置的斜椭圆。

2. 在非同心型 SFD——转子系统中,无论径向间隙比较小或很大,只要系统的不平衡量参数大到一定值,都可能产生非协调涡动轨道。而中等大小的径向间隙比的情况下,转子的涡动轨道不仅是协调的,而且转子的振动较小。

3. 在非同心型 SFD——转子系统中,在一定的参数组合条件下,可能得到具有多内环的或更为复杂的低阶非协调涡动轨道。

4. 一般而言,当转子的涡动轨道为非协调时,转子系统的振动普遍较大。因此最佳工作的 SFD 不仅可以避免出现非协调涡动轨道,而且还可以明显地减小转子系统的振动。

本文的试验工作得到了本所第八研究室及西北工业大学数据处理中心等单位的大力协助和支持,作者在此表示感谢。

参 考 文 献

- 〔1〕 Darlow, M.S. and Zorzi, E.S., "Nonsynchronous Vibration Observed in a Supercritical Power Transmission Shaft", ASME paper 79-GT-146, 1979.
- 〔2〕 Tonnesen, J. and Lund, J.W., "Some Experiments on Instability of Rotors Supported in Fluid Film Bearing", ASME, J. of Mech. Desg, Vol. 100, 1978, pp147-152.
- 〔3〕 Holmes, R., "Investigation of Squeeze Film Isolators for the Vibration Control of a Flexible Rotor", J. Mech. Engeg Sci., Vol. 21, No. 4, 1979, pp247-252.
- 〔4〕 Bannister, B.H. and Makdisy, J., "The Effects of Unbalance on Stability and its Influence on Nonsynchronous Whirling", Second. Inter. Confer., I.M.E., Vibration in Rotating Machinery, 1980, C310/80.
- 〔5〕 Kaya, F., "Vibration Control Capability of Squeeze Film Bearings", Proceedings of the International Conference on Rotordynamics, Sept. 14-17, 1986, Tokyo, pp257-263.
- 〔6〕 Cookson, R.A., and Kossa, S.S., "An Analytical Investigation of Squeeze Film Damper Bearing Supporting Flexible Rotors without a Centrifuging Spring", Cranfield Institute of Technology Report AM 62 1979.
- 〔7〕 徐建康、陈松洪, "刚性转子挤压油膜阻尼器支承系统的不平衡响应", 西北工业大学科技资料 Jch8417, 1984.
- 〔8〕 孟光、祝长生等, "柔性转子-非同心型挤压油膜阻尼器系统非协调响应分析", 航空动力学报, 第2卷, 第2期, 1987.

(责任编辑 李其汉)

optimization of the blade tip sweep should be determined from both aerodynamic and acoustic considerations, and the factors which should be taken into account in integrated or single optimization are indicated accordingly.

ELASTICITY MODEL FOR SCALING GAS TURBINE PERFORMANCE PREDICTION

Zhu Xingjian

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

W. F. O'Brien

(Virginia Polytechnic Institute and State University)

Abstract

Before a gas turbine is designed, many candidate designs with different values of design parameters must be studied. Calculation of design and off-design performances of proposed engines is needed, but actual component maps do not exist. In this paper, new scaling laws are developed and shown to produce component maps and estimates of new engine performances which are predicted to be close to the actual values. This "elasticity" model is based on the fundamental operating principles of the components.

EFFECTS OF ALTERNATIVE FUEL COMPONENTS ON PERFORMANCES OF A GAS TURBINE COMBUSTOR

Wu Wendong, Sha Yingpu, Sun Xiuchan, Yang Jingshang,

Zhang Yanan

(Institute of Engineering Thermophysics)

Abstract

The exchangeability of gaseous fuel for a gas turbine combustor was investigated experimentally and analysed in terms of indices J_H and J_I given in ref.(3).

Experimental results show that the effects of the alternative fuel components on the combustor exit temperature profile and distribution factor are not significant. It is also found that the ratio of H/C affects the combustion efficiency quite notably provided the inlet airflow is at normal pressure and temperature, but this effect weakens when the pressure and temperature of the inlet airflow rise.

A conclusion is made that the index J_I can be adopted to predict gaseous fuel combustion efficiency and thereby the exchangeability can be evaluated.

NONSYNCHRONOUS ORBITS IN A FLEXIBLE ROTOR-SQUEEZE FILM DAMPER SYSTEM

Zhu Changsheng and Feng Xinhai

(Gas Turbine Establishment)

Abstract

The possibility and the regularity of occurrence of nonsynchronous orbits are investigated based on experiments of a Jeffcott rotor-squeeze film damper (SFD) with/without a centralizing spring system. The influences of system parameters, such as radial clearance ratio,

load length, unbalance and centralizing spring stiffness, on nonsynchronous orbits and the relation between nonsynchronous orbits and rotor vibration are studied. It is found that the centralizing spring is a very effective means to suppress the nonsynchronous orbit. The unbalance of the rotor is a main cause for occurrence of the nonsynchronous orbits. $1/2$ subsynchronous orbit can be observed no matter whether the bearing parameter is quite small or very large provided the unbalance of the rotor is large enough. In some cases, the subsynchronous orbits with many inter loops can be obtained. Analytical and experimental results are found in good agreement.

EXPERIMENTAL ANALYSIS AND MODIFICATION OF A WINDMILL FAN FOR PREVENTING FLUTTER

Song Zhaohong, Kong Ruilian, Wei Xinglu, Wang Yuwei

(Beijing Institute of Aeronautics and Astronautics)

Abstract

A Violent vibration emerged in the fan of a 50W wind-driven generator and caused many cracks at its surface as the velocity of wind reached about 8-10m/s. Some of the fans even broke down near the root (about $1/3$ length to root). Theoretical and experimental analyses of the faults show that the violent vibration is caused essentially by flutter due to flow-induced vibration. Therefore, the fan was modified into two new types (FD-1 and FD-2) to prevent the forced vibration and flutter. According to the flutter theory, the attack angle of the original fan was changed and its weight center was moved ahead so that the modified fans possessed enhanced natural frequency and decreased reduced velocity.

The modified fan FD-1 was investigated by testing on the running car. The windmill generator with this fan started smoothly and ran very well. When the velocity of wind was about 8m/s, its maximum power was about 74W, nearly 1.5 time of the original. No flutter phenomenon occurred.

MODEL SIMPLIFICATION FOR A MARINE GAS TURBINE PROPULSION SYSTEM

Ni Weidou and Lu Siqing

(Tsinghua University)

Abstract

Simplification of the mathematical model for a marine gas turbine propulsion system is studied by modal analysis, and selection of remained state variables in the order-reduced model is considered. The dynamical characteristics of the system are evaluated according to the relationship between the state and the modal variables. The ratio of the output variation to input variation is obtained from the sensitivity analysis, and then the state variables to be remained are determined. The modal variables are adopted to simplify the model, finally they are reduced to remained state variables. Numerical evaluation show that this order-reduced model is much better than the simplified model obtained directly from the state equations.