

DOI: 10.3901/JME.2019.13.064

无参考传感器叶端定时叶片同步振动参数 辨识方法研究*

周畅祎^{1,2} 胡海峰² 杨拥民² 官凤娇² 徐海龙²

(1. 中国空气动力研究与发展中心低速空气动力学研究所 绵阳 621000;

2. 国防科技大学装备综合保障技术重点实验室 长沙 410073)

摘要: 叶端定时(Blade tip timing, BTT)是一项具有应用前景的非接触式叶片振动在线监测技术,已有的BTT测量系统需要配备参考传感器来测量转速和提供时间基准。但航空发动机结构复杂及安装空间等限制,造成参考传感器安装困难,导致现有的BTT测量方法无法正常使用。针对无参考传感器叶片同步振动BTT测量及参数辨识方法展开研究,基于改进双参数法,在利用三个BTT传感器进行测量的条件下,对叶片振动位移差进行分析处理即可完成叶片同步振动幅值和倍频(Engine order, N_e)的辨识。结合数值仿真分析及试验研究的手段,将该方法与双参数法进行对比分析。结果表明,该方法能够准确辨识出叶片的振动参数,验证了其可行性和有效性,为无参考传感器BTT测量的工程应用提供了技术手段。

关键词: 叶端定时; 叶片同步振动; 参考传感器; 叶片振动参数辨识

中图分类号: TH17; O329

Research on Blade Synchronous Vibration Parameter Identification Using Blade Tip Timing without the once per Revolution Sensor

ZHOU Changyi^{1,2} HU Haifeng² YANG Yongmin² GUAN Fengjiao² XU Hailong²

(1. Low Speed Aerodynamics Institute, China Aerodynamic Research and Development Center,
Mianyang 621000;

2. Science and Technology on Integrated Logistics Support Laboratory,
National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: Blade tip timing (BTT) is considered a promising technique for monitoring blade vibration online for aero-engine. The majority of BTT measurement and analysis systems require a once-per revolution (OPR) sensor to generate a timing reference and measure the rotating speed of blades. However, one of the challenges in the development of BTT technique is that it's extremely difficult to install the OPR sensor and that the installation of the OPR sensor may cause potential security risks, leading to the failure of the existing BTT measurement. The method of synchronous vibration parameters identification, called two parameter plot method, is improved by mounting an additional BTT sensor and the amplitude and engine order (N_e) of blade vibration can be identified through analyzing the vibration displacement change. By numerical simulation and experiments, the results of vibration parameters identification are analyzed, which show validity and feasibility of the arithmetic. The work provides technology means of BTT measurement without the once per revolution sensor.

Key words: blade tip timing; blade synchronous vibration; OPR sensor; vibration parameters identification

0 前言

旋转叶片作为航空发动机中完成功能转换的重要零件,工作时承受很大的载荷和复杂的作用力,

易发生振动,导致叶片疲劳,甚至出现裂纹、断裂等故障^[1]。一方面,叶片振动是导致发动机故障的重要原因之一;另一方面,叶片故障通过振动信号能够很好地反映出来。因此,对叶片振动进行监测,及时发现叶片出现的结构故障、损伤,是保证发动机运行安全的有效途径。相对于传统接触式测量方法,BTT测量技术^[2-4]因其原理简单,操作便捷,安

* 国家重点基础研究发展计划资助项目(973计划, 2015CB057400)。
20180820收到初稿, 20190315收到修改稿

装成本低, 灵敏度高, 且可以同时监测整圈叶片的振动状态等优点, 是叶片振动非接触式在线监测的研究热点。

BTT 测量技术的原理^[5]是通过安装在固定机匣上的 BTT 传感器来测量叶片的到达时间, 并将实际测量时间与叶片无振动时的到达时间进行比较, 得到时间偏差序列 $\{\Delta t\}$, 利用该时间差序列进行计算可以得到叶片叶端的振动位移序列, 进而通过参数辨识方法获取叶片的振动特性。典型的 BTT 测量系统除了包含 BTT 传感器外还包含一个参考(Once per revolution, OPR)传感器, 其通常安装在靠近转动中心轴线处, 对叶片转速进行测量, 为后续测量数据的处理提供转速信号和位置时间基准^[6]。由于参考传感器安装于发动机内部, 发动机的复杂工况及恶劣的内部环境不仅会影响参考传感器测量的准确性, 且易导致传感器失效甚至发生脱落, 轻则造成测量系统失效, 重则引发严重的安全事故^[7]。此外, 受限于发动机的结构和内部空间, 将参考传感器安装至最佳测量位置往往具有难度。因此, 不安装参考传感器的 BTT 测量系统更加符合航空发动机安全性、可靠性及经济性的发展需求。

2005 年德国 MTU 公司的 MICHAEL 等^[8]首次提出了无参考传感器 BTT 测量的概念。近年来, 无参考传感器 BTT 测量和参数辨识方法逐渐引起关注, 但公开发表的文献比较少, 尚且没有投入到工程应用的测量系统。英国罗罗公司的 RUSSHARD 等^[9]提出了通过分析估计叶片到达时间与叶片旋转角度的关系产生虚拟参考信号的方法, 并对测量过程中出现的计错数的情况进行了分析且提出了相应的解决方案。中国航空发动机集团 606 所的胡伟等^[7]运用单自由度理论分析了无参考传感器 BTT 测量技术的原理, 并研究了无参考传感器条件下影响叶片振动测量误差的因素。天津大学郭浩天等^[10-11]分别提出了在变速扫频情况下使用三个 BTT 传感器和恒定转速情况下使用五个 BTT 传感器实现无参考传感器叶片同步振动参数辨识的方法。ZHANG 等^[12]发现相比于有参考传感器 BTT 测量, 无参考传感器 BTT 测量对转轴弯曲和扭转的影响不敏感且能够提升转速测量的精度。但这些方法的使用有着严格的前提条件, 如叶片振幅很小, 叶片安装误差已知等。

本文针对无参考传感器叶片同步振动 BTT 测量及参数辨识方法展开研究, 完成了对双参数法的改进, 即在增加一个 BTT 传感器的情况下对叶片振动位移差进行分析处理, 实现了无参考传感器叶片同步振动参数辨识。结合理论推导、数值仿真及试

验研究的手段, 验证了该方法的有效性和实用性, 为无参考传感器 BTT 测量的工程应用提供了一定的技术基础。

1 同步振动参数辨识方法的理论分析

现有的无参考传感器 BTT 测量的技术路线是对已有的 BTT 测量和数据分析方法进行改进, 通过增加 BTT 传感器数目的方法来替代参考传感器的作用。选取一个 BTT 传感器测量的位移为参考, 将其他 BTT 传感器测量的位移分别与其作差, 得到叶片振动位移差 Δd , 对叶片振动位移差进行分析, 完成叶片振动参数辨识, 图 1 将有参考传感器和无参考传感器 BTT 测量流程进行了对比展示。

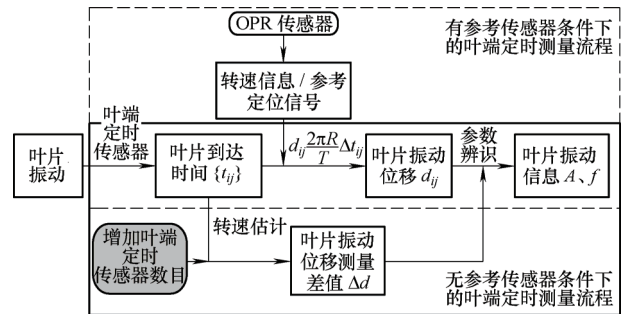


图 1 有参考传感器和无参考传感器 BTT 测量流程图

发动机中引起叶片振动的激振力与叶片的转频有关, 当激振力的频率为叶片转频的整数倍时, 叶片发生同步振动^[1]。通常将激振力频率对叶片转频的倍数称为振动倍频, BTT 测量中叶片转动频率往往容易获取, 因此测量同步振动时只要获得了振动倍频即可知道叶片振动频率。双参数法是 HEATH 等^[13]于 2000 年提出了一种在变速扫频测量下能够同时辨识叶片同步振动振幅及振动倍频的方法。

将 BTT 传感器如图 2 所示进行布局, 图中的箭头指向表示叶片的旋转方向, α_1 、 α_2 分别表示传感器 Tip1、Tip2 与传感器 Tip0 的安装夹角。假定叶片在单频简谐激励作用下产生单自由度振动^[10], 则 BTT 传感器测得的叶片振动位移为

$$y = A_0 |H(\omega)| \cos(\omega t - \varphi(\omega) + \phi_0) + C \quad (1)$$

式中, A_0 为恒定激励下叶片产生的位移; $|H(\omega)|$ 为幅频响应; $\varphi(\omega)$ 为相频响应; ω 为叶片振动频率; t 为叶片的实际到达时间; ϕ_0 为振动初始相位; C 为常数偏量。其中幅频响应为

$$|H(\omega)| = \frac{\sin(\varphi(\omega))}{2\xi\omega/\omega_n} \quad (2)$$

式中, ω_n 为叶片的固有频率。叶片同步振动的频率

是叶片转频 Ω 的整数倍,若叶片的振动倍频为 N_e ,则 $\omega = N_e \Omega$,不妨令叶片到达传感器 Tip0 的时间 $t_0 = 0$,则到达传感器 Tip1、Tip2 的时间分别为 $t_1 = \alpha_1 / \Omega$, $t_2 = \alpha_2 / \Omega$,结合式(2)可将式(1)化为

$$\begin{cases} y_0 = \frac{A_{\max}}{2} \frac{\omega_n}{\omega} [\sin(2\varphi(\omega) - \phi_0) + \sin(\phi_0)] + C \\ y_1 = \frac{A_{\max}}{2} \frac{\omega_n}{\omega} [\sin(2\varphi(\omega) - N_e \alpha_1 - \phi_0) + \sin(N_e \alpha_1 + \phi_0)] + C \\ y_2 = \frac{A_{\max}}{2} \frac{\omega_n}{\omega} [\sin(2\varphi(\omega) - N_e \alpha_2 - \phi_0) + \sin(N_e \alpha_2 + \phi_0)] + C \end{cases} \quad (3)$$

式中, A_{\max} 为共振幅值。当 $\omega = \omega_n$ 时,叶片发生共振,三个传感器测得的叶片共振位移为

$$\begin{cases} y_0 \approx \frac{A_{\max}}{2} \sin(2\varphi(\omega) - \phi_0) + \frac{A_{\max}}{2} \sin(\phi_0) + C \\ y_1 \approx \frac{A_{\max}}{2} \sin(2\varphi(\omega) - N_e \alpha_1 - \phi_0) + \frac{A_{\max}}{2} \sin(N_e \alpha_1 + \phi_0) + C \\ y_2 \approx \frac{A_{\max}}{2} \sin(2\varphi(\omega) - N_e \alpha_2 - \phi_0) + \frac{A_{\max}}{2} \sin(N_e \alpha_2 + \phi_0) + C \end{cases} \quad (4)$$

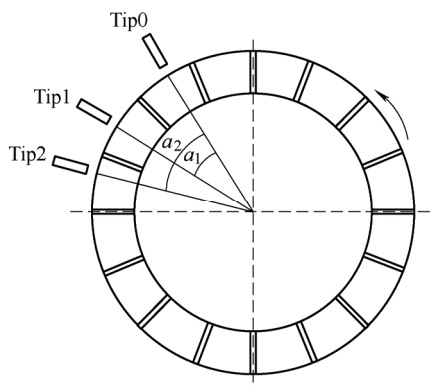


图2 传感器布局示意图

选传感器 Tip0 作为参考传感器,用传感器 Tip1 和 Tip2 测得的位移值减去传感器 Tip0 测得的位移值得

$$\begin{cases} \Delta y_1 = \frac{A_{\max}}{2} [\sin(2\varphi(\omega) - N_e \alpha_1 - \phi_0) - \sin(2\varphi(\omega) - \phi_0)] + \frac{A_{\max}}{2} [\sin(N_e \alpha_1 + \phi_0) - \sin(\phi_0)] \\ \Delta y_2 = \frac{A_{\max}}{2} [\sin(2\varphi(\omega) - N_e \alpha_2 - \phi_0) - \sin(2\varphi(\omega) - \phi_0)] + \frac{A_{\max}}{2} [\sin(N_e \alpha_2 + \phi_0) - \sin(\phi_0)] \end{cases} \quad (5)$$

式(5)经化简得

$$\begin{cases} \Delta y_1 = A_{\max} \cos\left(2\varphi(\omega) - \frac{N_e}{2} \alpha_1 - \phi_0 + 180^\circ\right) \sin\left(\frac{N_e}{2} \alpha_1\right) + x_0 \\ \Delta y_2 = A_{\max} \cos\left(2\varphi(\omega) - \frac{N_e}{2} \alpha_2 - \phi_0 + 180^\circ\right) \sin\left(\frac{N_e}{2} \alpha_2\right) + y_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_0 = \frac{A_{\max}}{2} [\sin(N_e \alpha_1 + \phi_0) - \sin(\phi_0)] \\ y_0 = \frac{A_{\max}}{2} [\sin(N_e \alpha_2 + \phi_0) - \sin(\phi_0)] \end{cases} \quad (7)$$

进一步化简得

$$\begin{cases} \Delta y_1' = A_{\max} \cos\left(2\varphi(\omega) - \frac{N_e}{2} \alpha_1 - \phi_0 + 180^\circ\right) + x_0' \\ \Delta y_2' = A_{\max} \cos\left(2\varphi(\omega) - \frac{N_e}{2} \alpha_2 - \phi_0 + 180^\circ\right) + y_0' \end{cases} \quad (8)$$

式(8)类似于椭圆方程,且相位差 $\Delta\phi$ 为 $N_e(\alpha_2 - \alpha_1)/2$ 。以 Δy_1 为横坐标, Δy_2 为纵坐标,画出轨迹图。根据式(8),利用最小二乘算法对该图形进行拟合,可以得到椭圆的特征参数(记长轴为 a ,短轴为 b ,绕椭圆中心顺时针旋转的角度为 θ),则同步共振的振幅 A_{\max} ,倍频 N_e 为

$$A_{\max} = \frac{\sqrt{(a \cos \theta)^2 + (b \sin \theta)^2}}{\left| \sin\left(\frac{N_e}{2} \alpha_1\right) \right|}$$

或

$$A_{\max} = \frac{\sqrt{(b \cos \theta)^2 + (a \sin \theta)^2}}{\left| \sin\left(\frac{N_e}{2} \alpha_2\right) \right|} \quad (9)$$

$$N_e = \frac{2\Delta\phi}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \quad (10)$$

完成椭圆拟合并得到椭圆的特征参数后,结合式(9)可得到同步共振幅值 A_{\max} 。由式(10)可知,得到振动倍频 N_e 需要先已知相位差 $\Delta\phi$ 。将式(8)与经旋转平移后的椭圆方程进行类比,可知相位差 $\Delta\phi$ 为

$$\Delta\phi = \gamma_1 + \gamma_2 \quad (11)$$

$$\begin{cases} \tan \gamma_1 = \frac{a \cos \theta}{b \sin \theta} \\ \tan \gamma_2 = \frac{a \sin \theta}{b \cos \theta} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可将式(11)化为

$$\gamma_1 + \gamma_2 = \arctan \left[\frac{2ab}{(b^2 - a^2) \sin 2\theta} \right] \quad (13)$$

式(13)的符号不定, 需要将其折算到 $[0^\circ, 360^\circ]$ 范围内, 相位差 $\Delta\phi$ 由下式确定。

① 若传感器 Tip1 和 Tip2 的安装夹角大于 $180^\circ/N_e$, 则有

$$\Delta\phi = \begin{cases} \arctan\left[\frac{2ab}{(b^2-a^2)\sin 2\theta}\right] & \gamma_1 + \gamma_2 \in (0^\circ, 180^\circ] \\ 360^\circ - \arctan\left[\frac{2ab}{(b^2-a^2)\sin 2\theta}\right] & \gamma_1 + \gamma_2 \in (180^\circ, 360^\circ] \end{cases} \quad (14)$$

② 若传感器 Tip1 和 Tip2 的安装夹角小于 $180^\circ/N_e$, 则有

$$\Delta\phi = \begin{cases} \arctan\left[\frac{2ab}{(b^2-a^2)\sin 2\theta}\right] & \gamma_1 + \gamma_2 \in (0^\circ, 90^\circ] \\ 180^\circ - \arctan\left[\frac{2ab}{(b^2-a^2)\sin 2\theta}\right] & \gamma_1 + \gamma_2 \in (90^\circ, 180^\circ] \\ \arctan\left[\frac{2ab}{(b^2-a^2)\sin 2\theta}\right] - 180^\circ & \gamma_1 + \gamma_2 \in (180^\circ, 270^\circ] \\ 360^\circ - \arctan\left[\frac{2ab}{(b^2-a^2)\sin 2\theta}\right] & \gamma_1 + \gamma_2 \in (270^\circ, 360^\circ] \end{cases} \quad (15)$$

式中, 判断条件 $\gamma_1 + \gamma_2$ 是经调整后的角度。

无参考传感器同步振动参数辨识方法利用 BTT 传感器测量的位移差值对叶片同步振动参数进行辨识。从该方法的原理可知, 叶片振动参数辨识的结果与由 BTT 传感器测量的位移差值构成的椭圆的特征参数相关, 而椭圆的特征参数由传感器安装位置决定, 所以分析传感器布局对参数辨识结果的影响很重要。

令传感器 Tip2 的安装角大于 Tip1 的安装角, 即 $\alpha_2 > \alpha_1$ 。为了保证参数辨识的准确性, 应避免拟合而得的椭圆短轴接近 0, 即椭圆被压扁成一条直线的情况^[14]。实际测量中, 可依据一定的先验知识得到叶片易发生的同步振动倍频 N_e , 无参考传感器同步振动参数辨识方法中传感器的安装应该避开 $\alpha_2 - \alpha_1 = 360^\circ k/N_e$ 。因为此时两个传感器测量到的振动位移相位差为 180° 的整数倍, 位移差的绝对值相等, 画出的图形接近为直线。

2 同步振动参数辨识方法的数值仿真

单叶片一节弯曲振动可以被等效为单自由度弹簧-阻尼振动模型, 将叶片共振频率的仿真值设为 836 Hz, 共振幅值 1 mm^[15], 激励倍频值为 8, 为了使叶片在扫频过程中经过共振频率, 将转速扫频范

围为 5 400~7 200 r/min, 对应的转频为 90~120 Hz, 得到整个速度扫频过程中叶片振动仿真信号如图 3 所示, 当转频为 104.4 Hz 时, 叶片发生共振。

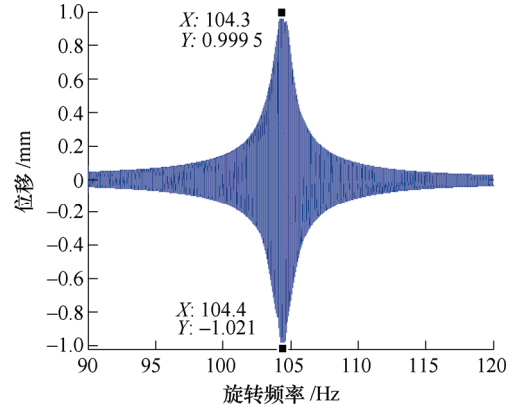


图3 速度扫频过程中叶片振动仿真信号

(1) 双参数法。

仿真中, 两个 BTT 传感器的安装夹角设置为 25° , 可得到图 4 所示结果。图中是两个 BTT 传感器测量到的叶片振动位移曲线, 可以观察到叶片在转频为 104 Hz 附近发生共振。将两个传感器测得的位移分别作为横坐标和纵坐标, 得到图 5 所示的图形, 通过最小二乘拟合及计算得到叶片振动幅值为 1.011 8 mm, 倍频为 8.001, 与仿真设定值基本一致。

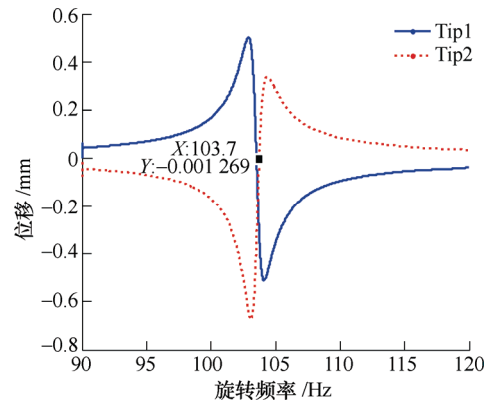


图4 BTT 传感器测得的叶片振动位移

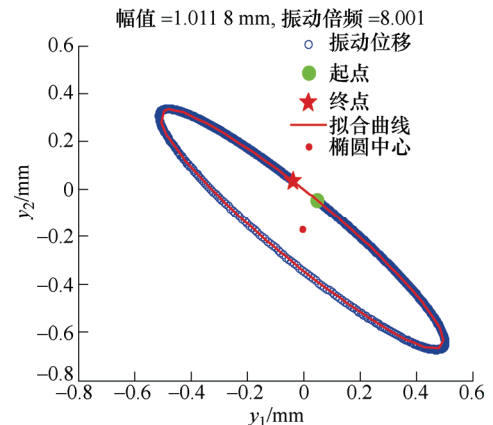


图5 叶片振动位移构成的轨迹圆

(2) 无参考传感器同步振动参数辨识方法。

仿真中将一个 BTT 传感器的安装角度定为 0° ，相对于该 BTT 传感器，另外两个 BTT 传感器的安装夹角分别为 25° ， 35° ，可得到图 6 所示结果。图中是以 BTT 传感器 Tip0 测量位移为参考，传感器 Tip1 和 Tip2 的测量位移分别减去 Tip0 测量位移，得到的测量位移差值曲线。从位移差值曲线中也可以观察到叶片在转频为 104 Hz 附近发生共振，将 BTT 传感器测量到的两个位移差值分别作为横坐标和纵坐标，可以得到图 7 所示的图形，通过最小二乘拟合及计算得到叶片振动幅值为 1.010 6 mm，倍频为 8.078 9，基本与仿真设定值一致。表 1 给出了不同仿真倍频值下的参数辨识结果，其中幅值设定值均为 1 mm，初步验证了无参考传感器条件下，该参数辨识方法能够实现叶片同步振动参数的辨识。

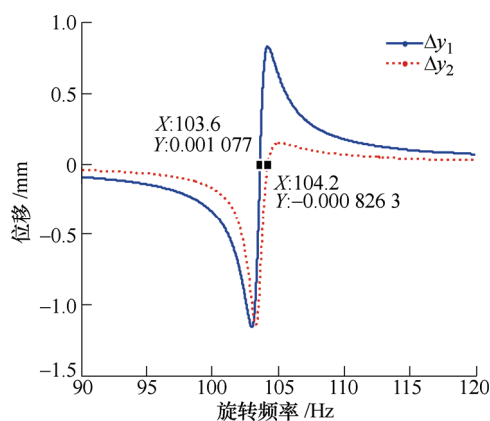


图 6 BTT 传感器测得的叶片振动位移差

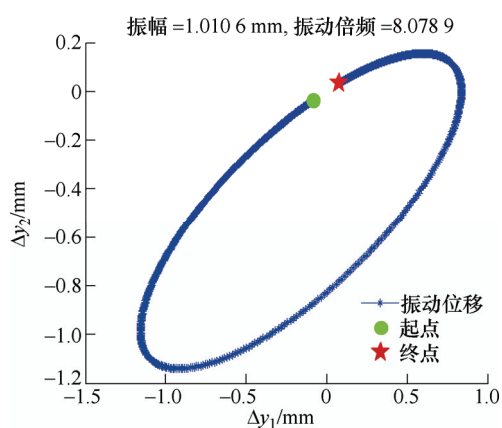


图 7 叶片振动位移差构成的轨迹圆

表 1 各倍频下的参数辨识结果

N_e 仿真值	N_e 辨识结果		幅值辨识结果/mm	
	双参数法	无参考传感器	双参数法	无参考传感器
6	5.974 9	6.163 1	1.011 0	0.994 92
7	6.965 7	7.005 5	0.934 85	1.017 4
9	9.032 8	9.015 2	1.017 1	1.114 1
10	10.001 5	10.023 7	1.017 2	1.018 0
11	11.001 7	10.986 8	1.017 5	1.017 7

3 试验研究

上述小节中结合理论分析和数值仿真研究了无参考传感器同步振动参数辨识方法，本节将通过试验对其可行性进行验证。本文用到的试验台整体情况如图 8a 所示，整个试验台水平放置，叶盘表面设计了键相标记，叶盘外的防护罩同时起到了传感器支架及激励支架的作用，通过改变防护罩上传感器的布局可以满足不同叶片振动参数辨识方法的需求。试验台采用永磁体进行激励，改变激励数量及分布情况，可以实现多种情况下的激励。试验中在防护罩上均匀安装了 6 个激励部件，以激励叶片发生 6 的整数倍倍频振动，选用了三个 BTT 光纤传感器，并如图 8b 所示将传感器以 6° 的间隔依次进行安装。OPR 传感器的安装位置与第一个 BTT 传感器相近即可，没有要求严格地对齐，仅需叶盘旋转时先经过 OPR 传感器。通过 ANSYS 进行模态分析得到叶片一阶固有频率为 2140.3 Hz^[16-17]。

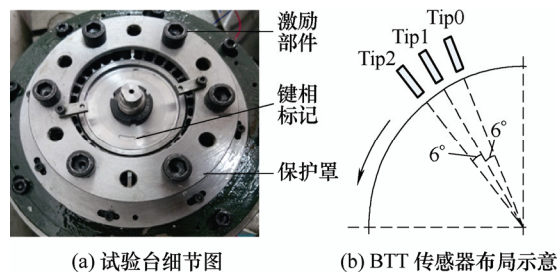


图 8 BTT 测量系统试验台

3.1 传感器安装角度校准

BTT 测量中将传感器安装在固定的防护罩上对叶片的到达时间进行测量，而进行传感器安装时不可避免地会出现误差，加之实际测量过程中试验台的整体振动带来的测量角度的改变，都将对叶片期望到达时间的获取造成影响，进而会影响到 BTT 测量后续叶片振动位移获取、振动参数辨识等过程。因此在进行叶片振动 BTT 测量试验之前，需对传感器安装角度进行校准。

本试验中所用到的传感器安装角度校准方法是在不添加任何激励的情况下，试验台以恒定转速运转时，用同一圈内某一叶片经过两个 BTT 传感器的到达时间差乘以转速，即可得到两传感器间的安装夹角，然后对测量到的所有数据进行处理取平均值，如式(16)，并将该值作为传感器的准确安装角度，用于叶片期望到达时间的获取。

$$A_{Probe} = \frac{1}{N_n N} \sum_{n=1}^{N_n} \sum_{i=1}^N (t_{i,np+1,n} - t_{i,np,n}) \quad (16)$$

式中 i 为叶片的编号, n_p 为传感器的编号, n 为旋转圈数, N_n 为测量过程中的旋转总圈数, N 为叶片的数量。本试验中将三个 BTT 传感器以 6° 的间隔依次进行安装, 经上述方法校准后传感器间的间隔为 6.0967° 、 6.1564° , 至此结合 OPR 传感器测量到的转速可以获取叶片的期望到达时间。

3.2 确定共振区域

根据上文中无参考传感器同步振动参数辨识方法的理论分析可知, 其需要在变速扫频过程中进行测量。试验中使试验台的转速在 $2\,300 \sim 8\,000$ r/min 之间进行升速扫描, 图 9 为某一 BTT 传感器测量到的某叶片在 $2\,300 \sim 8\,000$ r/min 之间进行升速扫描时的振动位移曲线和转速变化曲线。

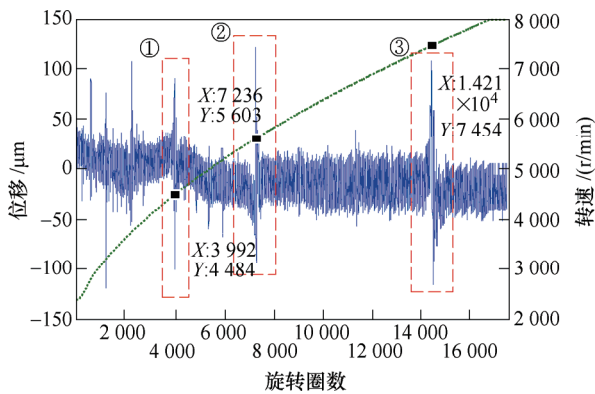


图 9 某叶片的振动位移曲线和转速变化曲线

从图中可以观察到叶片经过了多个共振区域, 在转速较低时, 各共振区域间相距很近, 而随着转速的升高各共振区域间的距离也就越大。本试验的目的是验证本文中所研究的无参考传感器同步振动参数辨识方法对单叶片单一共振区域进行辨识的准确性, 进而检验其可行性, 所以选取图 9 中标注出的三个共振区域进行研究。这些共振区域所对应的中心频率如表 2 所示, 根据表中的信息, 将各共振区域的转频范围分别选为 $73 \sim 76$ Hz, $92 \sim 95$ Hz, $122 \sim 126$ Hz。

表 2 各共振区域所对应的中心频率

序号	中心频率/Hz
1	74.73
2	93.38
3	124.2

3.3 叶片同步振动参数辨识结果

数值仿真的结果是在较为理想的情况下获得的, 而实际测量中由于噪声等干扰因素的存在, 测得的位移曲线和位移差曲线不平滑、有毛刺, 易影响后续参数辨识的结果。为了保证对叶片振动参数进行准确的辨识, 降低干扰因素对振动参数辨识结

果的影响, 进行参数辨识前, 使用基于 LM 算法的非线性最小二乘拟合方法^[11,18]对测得的曲线进行处理。

3.3.1 双参数法

图 10 为 BTT 传感器测得的叶片振动位移及其经过拟合得到的曲线, 从拟合曲线中可以得到共振区域 1 的共振中心转频为 74.5 Hz。图 11 给出了共振区域 1 中由叶片振动位移构成的轨迹圆, 并给出了双参数法的参数辨识结果。将双参数法得到的辨识结果(表 3)视作对比, 用来验证无参考传感器同步振动参数辨识方法的准确性。

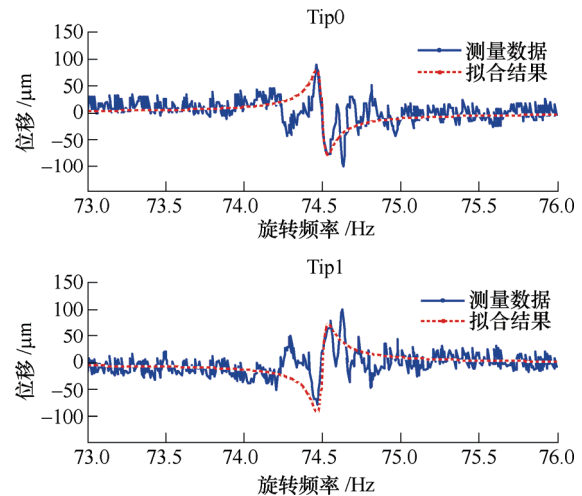


图 10 BTT 传感器测得的叶片振动位移及其拟合结果

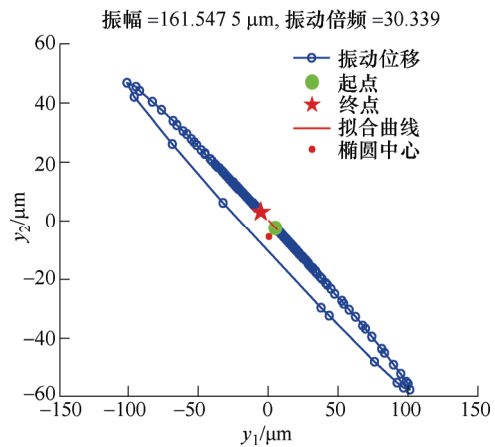


图 11 共振区域 1 中叶片振动位移构成的轨迹圆

表 3 各共振区域中双参数法的辨识结果

序号	共振幅值/μm	振动倍频
1	161.547 5	30.339 0
2	173.934 2	23.988 5
3	190.136 2	18.078 1

3.3.2 无参考传感器同步振动参数辨识方法

图 12 为 BTT 传感器测得的叶片振动位移差及其经过拟合的曲线, 从拟合曲线中同样也可以得到共振区域 1 的共振中心转频为 74.5 Hz。图 13 给出

了共振区域 1 中由叶片振动位移差构成的轨迹图, BTT 传感器安装角度间隔避开了 $360^\circ/30=12^\circ$, 但仍导致图形被压瘪成一条直线, 辨识得到的振动倍频为 29.197 5, 偏离于正确值 30。经分析可知, 由于此方法基于双参数法改进而来, 所以 BTT 传感器的安装角度还应避开 $180^\circ k/N_e$ 。对比表 3 和表 4 中的数据, 可知在另外两个区域无参考传感器同步振动参数辨识方法与双参数法均能对叶片同步振动进行准确的辨识。

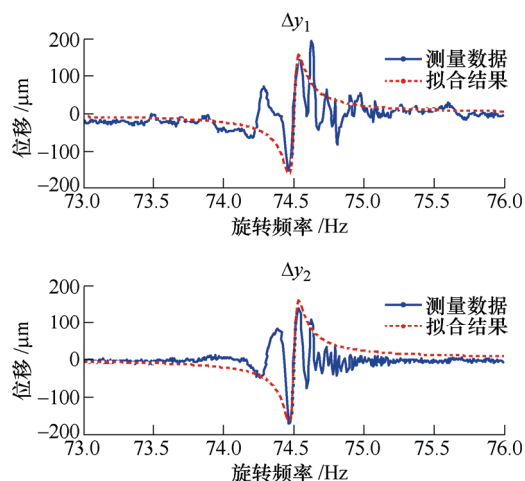


图 12 BTT 传感器测得的振动位移差及其拟合结果

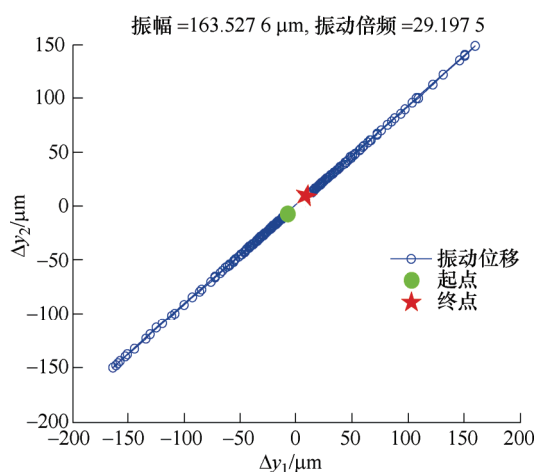


图 13 共振区域 1 中叶片振动位移差构成的轨迹图

表 4 各共振区域中无参考传感器条件下的辨识结果

序号	共振幅值/ μm	振动倍频
1	163.527 6	29.197 5
2	172.744 9	24.447 3
3	181.141 0	18.154 1

4 结论

针对无参考传感器叶片同步振动参数辨识的需求, 对双参数法进行了改进, 通过增加 BTT 传感器数目, 基于对叶片振动位移差的分析处理, 实现了

叶片同步振动幅值和倍频的辨识, 并结合数值仿真和试验研究进行了验证。结果表明, 该方法在无参考传感器条件下能对叶片同步振动进行准确地辨识, 与双参数法的辨识结果具有较好的一致性。该方法传感器布局在双参数法的基础上应避开传感器安装夹角为 $360^\circ k/N_e$ 的情况, 因为此时叶片振动位移差形成的轨迹图形接近为直线, 不易辨识出叶片的振动参数。本文的研究成果为无参考传感器 BTT 测量的工程应用提供了一定的理论和技术基础。

参考文献

- [1] 欧阳涛. 基于叶尖定时的旋转叶片振动检测及参数辨识技术[D]. 天津: 天津大学, 2011.
OUYANG Tao. Rotating blade vibration detection and parameters identification technique using blade tip-timing[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [2] RIGOSI G, BATTIATO G, BERRUTI T M. Synchronous vibration parameters identification by tip timing measurements[J]. Mechanics Research Communications, 2016, 79: 7-14.
- [3] GARCÍA I, ZUBIA J, BELOKI J, et al. Tip timing measurements for structural health monitoring in a low-pressure turbine using three optical sensors[C]// European Workshop on Structural Health Monitoring. 2016.
- [4] HOOD Technology. Overview of blade vibration monitoring capabilities [EB/OL]. http://www.hoodtech.com/bvm/overview_document.html, 2017.
- [5] PICKERING T M. Methods for validation of a turbomachinery rotor blade tip timing system[D]. Virginia: Virginia Tech. Univ., 2014.
- [6] PRZYSOWA, RADOSLAW, ROKICKI, EDWARD. Inductive sensors for blade tip-timing in gas turbines[J]. Journal of Konbin, 2015, 36(1): 147-164.
- [7] 胡伟, 杜少辉, 王德友, 等. 基于无转速定位信号的非接触叶片振动测试技术[J]. 航空发动机, 2012, 38(6): 53-57.
HU Wei, DU Shaohui, WANG Deyou, et al. Vibration measure technique of non-contact blade based on no rotate speed location signal[J]. Aeroengine, 2012, 38(6): 53-57.
- [8] ZIELINSKI M, ZILLER G. Noncontact vibration measurements on compressor rotor blades[J]. Measurement Science & Technology, 2000, 11(7): 847.
- [9] RUSSHARD P. Derived once per rev signal generation for blade tip timing systems[C]//Instrumentation Symposium 2014, Iet & Isa, International. IET, 2014: 5.1-5.1.

- [10] GUO H, DUAN F, ZHANG J. Blade resonance parameter identification based on tip-timing method without the once-per revolution sensor[J]. *Mechanical Systems & Signal Processing*, 2016, s66-67: 625-639.
- [11] GUO H, DUAN F, WANG M. Blade synchronous vibration measurement based on tip-timing at constant rotating speed without once-per-revolution sensor[C]// *International Symposium on Precision Mechanical Measurements. Seventh International Symposium on Precision Mechanical Measurements*, 2016: 990311.
- [12] ZHANG J, DUAN F, JIANG J. Analysis of a signal preprocessing method for blade tip-timing without the once-per revolution sensor[C]// *International Conference on Electrical, Automation and Mechanical Engineering*. 2017.
- [13] HEATH S. A new technique for identifying synchronous resonances using tip-timing[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2000, 122(2): 219-225.
- [14] 周畅祎. 无参考传感器条件下旋转叶片叶端定时参数辨识方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2017.
- ZHOU Changyi. Research on identification for vibration parameters of rotating blades using blade tip timing without the once-per revolution sensor[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2017.
- [15] ZHOU C, HU H, GUAN F, et al. Modelling and simulation of blade tip timing uncertainty from rotational speed fluctuation[C]// *Prognostics and System Health Management Conference*, Harbin. 2017.
- [16] 王维民, 任三群, 陈立芳, 等. 涡轮机叶片同步振动参数辨识方法研究(建模仿真)[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(17): 120-126.
- WANG Weimin, REN Sanqun, CHEN Lifang, et al. Synchronous vibration parametric identification method for blades of a turbine[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(17): 120-126.
- [17] 王维民, 任三群, 陈立芳, 等. 涡轮机叶片同步振动参数辨识方法研究(试验研究)[J]. *振动与冲击*, 2017, 36(17): 127-133.
- WANG Weimin, REN Sanqun, CHEN Lifang, et al. Tests for synchronous vibration parametric identification method of a turbine's blades[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2017, 36(17): 127-133.
- [18] DUAN F, TAO O, LI M. Research on detecting technology of rotating blade vibration performance parameters[C]// *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. IEEE Computer Society*, 2009: 693-696.

作者简介: 周畅祎, 男, 1993 年出生。主要研究方向为状态监控与故障诊断。

E-mail: zhouchangyi001@163.com

胡海峰(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 助理研究员。主要研究方向为状态监控与故障诊断、结构健康监测和现代信号处理方法。

E-mail: hhf_online@163.com