

文章编号:1000-6893(2007)06-1369-05

航空发动机双转子系统的拍振分析

韩军¹, 高德平¹, 胡绚¹, 陈高杰²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

(2. 总装工程兵科研一所, 江苏 无锡 214035)

Research on Beat Vibration of Dual-rotor for Aero-engine

Han Jun¹, Gao Deping¹, Hu Xuan¹, Chen Gaojie²

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 210016, China)

(2. The First Engineers Scientific Research Institute, The General Armaments Department,
Wuxi 214035, China)

摘 要: 在双转子航空发动机中,由于转子系统不可避免地存在不平衡量,当两个转子的转速比较接近时,发动机会出现拍振现象,拍振将引起振动强度过大问题。对双转子系统的拍振进行了研究,分析了拍振的周期性、信号强度及其反向转子特性,阐明了拍振产生的机理和特征,并采用数值仿真和试验对拍振进行了定量分析和验证。研究表明,拍振与双转子转速差和不平衡量的相位因素有关,当转速差小于工作转速的 20% 时,双转子系统拍振信号的强度较大。

关键词: 双转子系统; 拍振; 转速差; 初相位; 信号强度

中图分类号: V235 **文献标识码:** A

Abstract: There is inevitable unbalance in the dual-rotor system of the aero-engine, the beat vibration will occur to engine when two rotors are operating at approximately the same speed. The beat vibration will induce unacceptable level of vibration amplitude. The beat vibration is studied for a dual-rotor system in this paper. Some features, such as the beat vibration periodicity, intensity of beats and counter-rotating characteristic, are analyzed in order to disclose the mechanics and distinction of the beat vibration. The characters of beat vibration are quantitatively analyzed and verified by numerical analysis and experiment. The results show that the beat is related to the speed difference of the dual-rotor and two rotors' unbalanced phases. The beat vibration usually becomes noticeable when the speed difference between two rotors speed is less than 20% of the operating speed.

Key words: dual-rotor system; beat vibration; speed difference; initial phase; signal intensity

在双转子航空发动机中,由于转子系统制造、安装误差或运行过程中热变形等因素,使得转子系统不可避免地存在不平衡量。双转子系统的转子转速是由航空发动机的气动、结构、强度设计决定的,运行中两个转子各自具有较确定性的值,但没有固定的比值。当两个转子的转速比较接近时,发动机会出现拍振现象。资料表明^[1],为了防止航空发动机产生拍振,一般两个转子的转速差不应低于 20%,但该数据没有从理论上给出说明。在航空发动机双转子系统的不平衡故障诊断中,要同时识别两个转子不平衡故障的相位和不平衡量,需要利用拍振原理,分离出内、外转子各自的不平衡量和相位,其中涉及到双转子系统的

转速差值量化问题,也关系到不平衡故障的识别精度。贺世证^[2]和张志新^[3-4]利用拍振原理开发了微差速双转子整机动平衡仪并进行了相关的技术研究,但这些文献没有对双转子的转速差进行定量分析。工程中,安装在同一个结构上两台发动机,当两个振源的频率值相互接近到 20% 的时候,结构系统将发生拍振现象^[5]。因此,防止或利用拍振在工程中具有较强的应用背景。

本文推导了拍振的基本公式,分析了拍振的周期性、信号强度及反向转子的基本特性,阐明了拍振产生的机理和特征,并采用数值仿真和试验对拍振特性进行了分析和验证。

1 拍振理论分析

(1) 拍振基本公式

设内外转子的振动响应分量分别为

收稿日期:2006-11-23; 修订日期:2007-03-19

基金项目:中国博士后基金(2005037728);江苏省博士后基金

通讯作者:韩军 E-mail:hanjun2002@msn.com

$$X_1 = A_1 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \quad (1)$$

$$X_2 = A_2 \cos(\omega_2 t + \phi_2) \quad (2)$$

式中: A_1, A_2 分别为内外转子的振幅; ω_1 和 ω_2 为角速度; ϕ_1, ϕ_2 为初相位。在支承座上测得的信号实际上是上述两种信号的叠加

$$X = X_1 + X_2 \quad (3)$$

为了得到式(3)中关于内外转子的差值 $\omega_1 - \omega_2$ 项的关系式, 对式(3)分解, 得到

$$\text{当 } \sin\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) \geq 0 \text{ 时}$$

$$X = -\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2]} \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} + \Delta\varphi\right) \quad (4)$$

$$\text{当 } \sin\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right) < 0 \text{ 时}$$

$$X = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos[(\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2]} \cdot \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t + \frac{\phi_1 + \phi_2}{2} + \Delta\varphi\right) \quad (5)$$

$$\text{式中: } \Delta\varphi = -\arctan\left[\frac{A_1 + A_2}{A_1 - A_2} \cot\left(\frac{\omega_1 - \omega_2}{2}t + \frac{\phi_1 - \phi_2}{2}\right)\right]$$

$$\Delta\varphi \in \left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$$

由式(4)和式(5)可知拍振信号 X 可以看成是由以 $(\omega_1 - \omega_2)/(2\pi)$ 为频率的调幅项 $\sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos 2\alpha}$ 与以 $(\omega_1 + \omega_2)/(4\pi)$ (其中 $\Delta\varphi$ 也为周期函数, 其值较小, 可忽略其对频率项周期的影响, 下同) 为频率的振动信号 $\sin[(\omega_1 + \omega_2)t/2 + (\phi_1 + \phi_2)/2 + \Delta\varphi]$ 的两项乘积所组成。拍振的波形及包络线如图 1 所示。从图中可以看出, 组成拍振的两个简谐振动分量同相时出现拍峰, 拍峰的幅值 $A_{\max} = A_1 + A_2$; 当组成拍振的两个简谐分量反相时出现拍谷, 拍谷的幅值为 $A_{\min} = A_1 - A_2$ 。

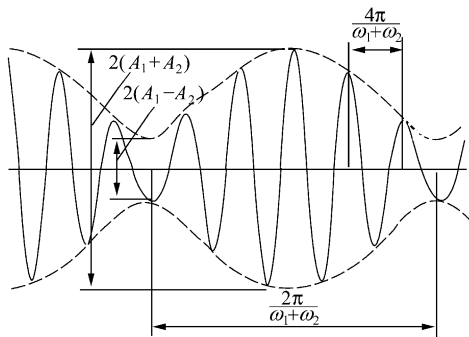


图 1 拍振的波形及包络线

Fig. 1 Wave and envelope of beat vibration

(2) 拍振特性分析

① 周期性

当 $\omega_1 \neq \omega_2$ 时, 按频率不同的两简谐振动合成原理^[6], 两频率之比为有理数时, 即

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{m}{n} \quad (6)$$

其中 m 和 n 互为质数, 则合成信号为周期振动, 其周期为 $T_0 = 2m\pi/\omega_1 = 2n\pi/\omega_2$; 两频率之比为无理数时, 合成为非周期振动; 当 $\omega_1 \approx \omega_2$ 时, 调幅项的周期 $2\pi/(\omega_1 - \omega_2)$ 趋于很大值, 而频率项的周期 $4\pi/(\omega_1 + \omega_2)$ 趋于一个定值, 此时, 式(4)和式(5)的信号 X 将产生拍振; 当 $\omega_1 = \omega_2$ 时, 由式(4)和式(5)可知, 合成信号的周期为 $2\pi/\omega_1$ 或 $2\pi/\omega_2$ 。

② 信号强度

当 ω_1 与 ω_2 非常接近时, 调幅项的周期 $T_1 = 2\pi/(\omega_1 - \omega_2)$ 很长, 拍振信号的幅值出现在峰值 $A_1 + A_2$ 附近的时间就会越长, 总体上信号的强度就越大。而频率项的周期 $T_2 = 4\pi/(\omega_1 + \omega_2)$ 在该情况下的周期变化比较缓慢, 对信号的强度影响不大。图 2 为调幅项和频率项周期对 ω_2 的变化曲线, 从图中可以看出, 当 ω_2 接近 ω_1 时, 调幅项的周期变化急剧, 而频率项的周期变化缓慢。因此, 调幅项的周期对信号的强度影响较大。

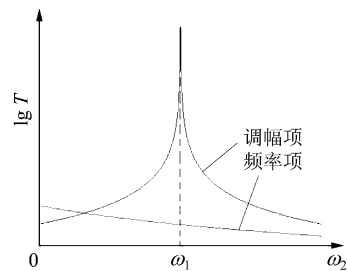


图 2 调幅和调频周期对 ω_2 的关系

Fig. 2 Relations of modulation and frequency items with ω_2

当 ω_1 与 ω_2 相差较远时, 设 $\omega_1 = \omega_2 + \Delta\omega$, 调幅项周期 $T_1 = 2\pi/\Delta\omega$, 频率项为 $T_2 = 4\pi/(2\omega_1 + \Delta\omega)$ 。

由此可以得到它们对 $\Delta\omega$ 的灵敏度分别为 $\frac{dT_1}{d(\Delta\omega)} = -\frac{2\pi}{\Delta\omega^2}$ 和 $\frac{dT_2}{d(\Delta\omega)} = -\frac{4\pi}{(\Delta\omega + 2\omega_1)^2}$, 其灵敏度关系如图 3 所示, 其中 A 和 B 点的横坐标分别为 $2(1 + \sqrt{2})\omega_1, 2(1 - \sqrt{2})\omega_1$ 。

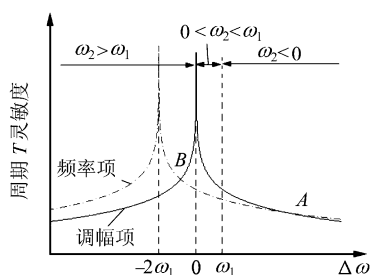


图 3 调幅项、调频项周期对 $\Delta\omega$ 的灵敏度

Fig. 3 Sensitivities of $\Delta\omega$ to modulation and frequency items

由图 3 可知,沿横坐标方向以 $\Delta\omega=0, \Delta\omega=\omega_1$ 为界将图分 3 个区域。在 $\omega_2 < 0$ 区域里, ω_2 与 ω_1 反相,调幅项周期在 A 点之前,相对于频率项周期,对 $\Delta\omega$ 较为敏感,过 A 点后两者相反,但都呈下降趋势,信号的强度也呈下降趋势;在 $\Delta\omega < 2 \cdot (1-\sqrt{2})\omega_1$ 区域内,即在 B 点之前,调幅项周期随 $\Delta\omega$ 减小而减少,而频率项周期灵敏度在 $\Delta\omega = -2\omega_1$ 出现了峰值,由式(5)和式(6)可知,调幅项和频率项的周期都为 π/ω_1 ,两信号产生耦合,此时信号强度再一次达到峰值,当 $\Delta\omega < -2\omega_1$ 时,两者周期的灵敏度都随 $\Delta\omega$ 减小而减小,且频率项周期灵敏度大于调幅项的灵敏度。另外,信号 X_1 和 X_2 中的相位 ϕ_1, ϕ_2 对拍振信号的强度有一定影响。

③ 反向转子特性

在双转子航空发动机中,有同向转子和反向转子两种形式。反向转子即为 ω_2 和 ω_1 的旋转方向相反,从式(3)可以看出,对于拍振信号周期,反向转子与同向转子相同,只相差一个确定的初始相位。从式(5)和式(6)看出,反向转子的调幅项周期和同向转子的频率项周期相对应,反向转子的频率项的周期与同向转子的调幅项周期相对应。反向转子的信号强度变化规律与同向转子相同。

2 数值分析

利用信号的均方值 E 来描述^[7]拍振信号的强度,即

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T X^2(t) dt \quad (7)$$

式中: T 为观察时间; $X(t)$ 为信号。

举例: 已知 $X_1 = 25\cos(100t + 0.1)$ mm, $X_2 = 10\cos(\omega_2 t + 0.2)$ mm, 求当 ω_2 由 -150 rad/s 变化到 150 rad/s 时拍振的信号 $X = X_1 + X_2$ 强度。由式(7), 在单位时间内, 求得拍振信号强度随 ω_2 变化曲线如图 4(a) 所示。从图中看出, 在 $\omega_2 = -100$ rad/s 和 $\omega_2 = 100$ rad/s 处具有较大峰值, 前者表示反向转子, 后者表示同向转子, 在这

两处 ω_2 值与 ω_1 值相等, 说明当双转子的转速差很接近时, (包括反向), 振动信号的强度将出现较大的峰值, 直观看, 当 $\omega_2 \in [-120, -80]$ 或 $\omega_2 \in [80, -120]$ 时, 拍振信号的能量集中了绝大部分能量, 符合上述理论分析结果和文献[1, 4]中的相关数据, 另外, 当 $\omega_2 = 0$ 时也出现了较小的峰值, 该峰值是仅由信号 X_1 振动信号产生的能量。

为了研究内外转子不平衡量的初相位对拍振信号强度的影响, 取不同的初始相位, 得到拍振信号的强度曲线如图 4(b)~(d) 所示。从图中可知, 不同的初始相位会影响拍振信号强度的分布情况, 但不会影响其在转速差接近零时的能量较集中的特征。

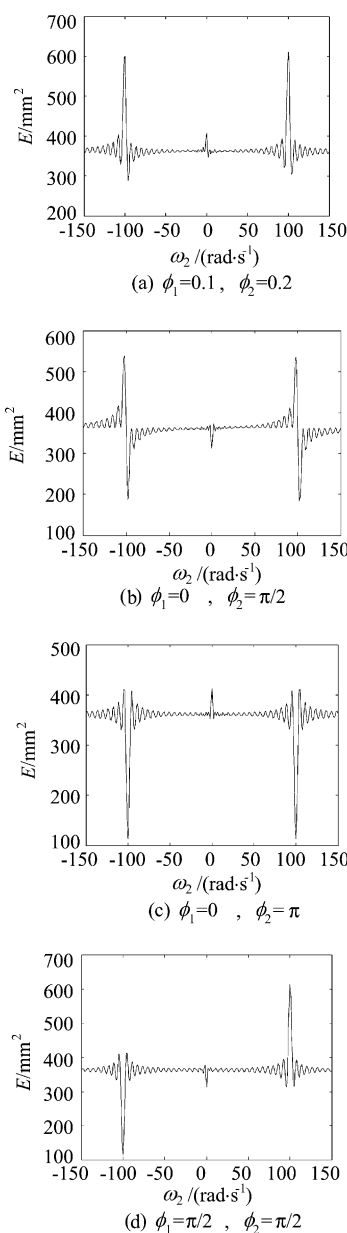


图 4 不同初始相位时的拍振信号强度曲线

Fig. 4 Strength curves of the vibration signal with different initial phases

3 试验验证

图5为双转子系统试验模型及其测点布置图。测点①,②采用电涡流位移传感器,分别测量内外转子的位移;测点③,④采用转速传感器,分别测量外、内转子的转速。各传感器信号经信号预处理后,进入数据采集与分析系统。测量方法:固定外转子转速为587 r/min,调整内转子的转速从250 r/min变化到800 r/min。在该转速范围内,取30组采样点(零转速差附近,取点较多),依次控制转子在稳定的转速下进行采样,采样时间均为10 s,采样频率为100 Hz,设置低通滤波器的上限为40 Hz。

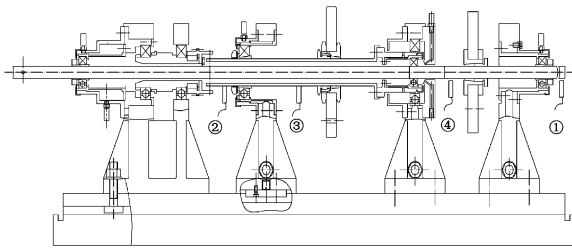
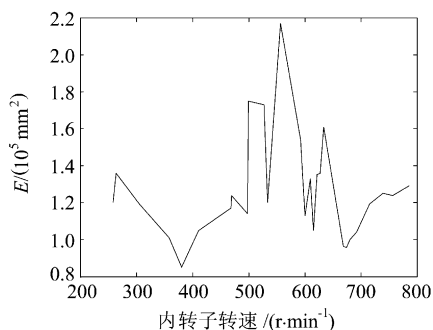


图5 双转子系统试验模型

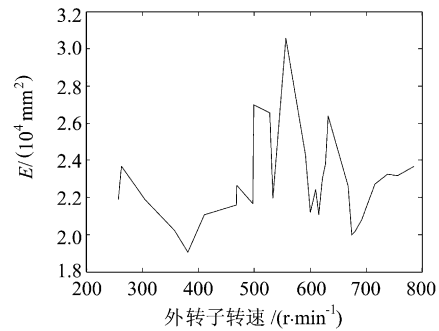
Fig. 5 Test model for dual-rotor system

按式(7)对数据处理,并对信号采用去均值、去趋势项和数字滤波处理,数字滤波采用带过渡带的多带FIR滤波器设计^[8]。可分别得到内、外转子的振动信号强度随内转子转速变化的曲线,如图6所示。

由图6可知,当内转子的转速变化到外转子固定转速587 r/min附近,内、外转子的振动响应信号的强度,在该转速的约15%范围(510~675 r/min)内均有较明显的峰值,并且都呈波动状态,与数值仿真分析的结果一致,说明拍振现象在实际的双转子发动机中是存在的。



(a) 内转子



(b) 外转子

图6 内、外转子振动信号强度曲线

Fig. 6 Vibration strength curves of inner and outer rotors

4 结论

(1) 对双转子系统,当转速差 $\Delta\omega=0$ 时,拍振信号的强度最大。当两个转子的转速差为工作转速的15%~20%的范围内时,拍振信号强度都比较大,随着转速差的增大,信号强度呈下降趋势;

(2) 双转子不平衡量的初始相位,会影响在零转速差附近的分布,而不影响拍振信号能量集中的特征;

(3) 对于同向转子和反向转子,都具有相近的拍振特征。

参 考 文 献

- [1] NPR 8831. 2D. Reliability centered building and equipment acceptance guide[S]. National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2004.
- [2] 贺世正,周保堂,严利华. 微速差双转子整机动平衡仪的开发与研究[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(6): 633-636.
He Shizheng, Zhou Baotang, Yan Lihua. Development and study for whole machine balancing of double-shaft rotating with small speed difference[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1999, 20(6): 633-636. (in Chinese)
- [3] 张志新,金涛,陈爱萍. 便携式微速差双转子系统智能化整机动平衡仪的开发与研究[J]. 振动工程学报, 2003, 16(3): 316-320.
Zhang Zhixin, Jin Tao, Chen Aiping. Development and research of a portable and intelligent whole-machine balancing instrument of dual-rotor system with littlerotation speed difference[J]. Journal of Vibration Engineering, 2003, 16(3): 316-320. (in Chinese)
- [4] 张志新,周保堂,贺世正. 卧螺离心机不解拍整机动平衡方法及拍振信号的提取与处理[J]. 机械科学与技术, 2003, 20(2): 182-184.
Zhang Zhixin, Zhou Baotang, He Shizheng. Method of balancing horizontal decanter centrifuge without resolving beat and pick-up and process of "best" signal [J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 20(2): 182-184. (in Chinese)

- [5] Buscarello R T. Practical solutions to machinery and maintenance vibration problems[M]. Fourth Revised Edition, Denver: Update International, 2002.
- [6] 胡海岩. 机械振动与冲击[M]. 北京: 航空工业出版社, 1998:5-10.
Hu Haiyan. Mechanical vibration and shock[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1998:5-10. (in Chinese)
- [7] 贝达特 J S, 皮尔索 A G. 随机数据处理[M]. 北京: 科学出版社, 1989:30-34.
Bensdat J S, PIERSOL A G. Random data analysis and measurement procedures[M]. Beijing: Science Press, 1989: 30-34. (in Chinese)
- [8] 胡广书. 数字信号处理:理论、算法与实现[M]. 北京: 清

华大学出版社, 2003:259-358.

Hu Guangshu. Digital signal processing: theory, method and realizing [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003:259-358. (in Chinese)

作者简介:



韩军(1966—) 男, 博士后, 副研究员。主要研究方向: 车辆工程、机械振动与控制。

Tel:13921165163

E-mail:hanjun2002@msn.com

(责任编辑:李铁柏)