航空发动机非线性转子系统同步全周碰摩的温度影响分析

闻　静,李舜酩
(南京航空航天大学 能源与动力学院,南京 210016)

摘要:转子和静子碰摩是过程复杂且危害性很大的故障。为研究摩擦热对同步全周碰摩响应的影响,以航空发动机压气机转子为研究对象,考虑其刚度特性,建立了非线性转子系统分析模型,研究了单盘转子摩擦热碰摩响应特性,进行了数值分析,并与未考虑摩擦热效应的碰摩响应进行了对比。结果表明:碰摩处温度径向随相对碰摩点距离的增加呈非线性增大,周向呈对称分布并在30°时几乎等于室温;当考虑摩擦热效应时,发生同步全周碰摩的转速范围整体缩小,转子径向位移增大,摩擦热降低了同步全周碰摩的稳定性。

关键词: 转子;摩擦热效应;同步全周碰摩;非线性振动;稳定性;航空发动机
中图分类号: V231.1　　**文献标识码:**A　　doi:10.13477/j.cnki.aeroengine.2018.01.002

Analysis of Thermal Effect of Synchronous Full Annular Rubbing on Nonlinear Rotor System of Aeroengine

WEN Jing, LI Shun-ming
(**College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China**)

Abstract: Rubbing between rotor and stator is a failure whose process is complicate, and great harm. In order to study the effect of friction heat on synchronous full circular response, taking the aeroengine compressor rotor as research object, a nonlinear model of rotor system was established, considering the characteristics of stiffness. The characteristics of friction thermal rubbing of the rotor was studied and numerical simulation was conducted. The calculation were compared with that without friction thermal effect. The results show that the temperature increases nonlinearly with the increase of the distance of relative rubbing point in radial direction, and is equal to room temperature in 30 degree with symmetrical in circumference direction. Considering friction thermal effect, the speed range of synchronous full annular rubbing is integrally reduced, the radial displacement of the rotor is increased, and the stability of the synchronous full annular rub was reduced by the friction thermal effect.

Key words: rotor; friction thermal effect; synchronous full annular rubbing; nonlinear vibration; stability; aeroengine

0　引言

转子与机匣系统是航空发动机的核心部件,转子和静子在摩擦过程中产生的热冲击效应和转子干摩擦失稳是最具危害性的常见故障之一。当转子和静子发生接触时,摩擦热的生成使得转子接触表面局部温度升高,使转子受热不均而产生热挠曲,从而改变转子不平衡量的分布和振动情况。航空发动机转子处于高转速的工作状态,一旦接触,即使在短时间内也很容易发生全周碰摩,此时热挠曲将会在转子的一定方向不断加剧,从而造成新的不平衡,引起更严重的碰摩。Dimarogonas 等[1]在对轴封和转子的摩擦升温的研究中发现,当摩擦情况较为严重时,转子和轴封的温度变化会达到十分可观的程度。因此,碰摩及其热效应带来的影响不容忽视。目前,对于连续摩擦热冲击的问题已经有一些研究[2-3],对于碰摩力作用的转子系统非线性碰摩响应的研究也比较广泛[4-7],但在摩擦热对转子振动响应的影响方面,仅针对点碰或局部碰摩

收稿日期:2017-07-23　　**基金项目:**国家自然科学基金(51675262)资助
作者简介:闻静(1993),女,在读硕士研究生,研究方向为航空发动机推进系统结构强度、振动与可靠性;E-mail:715453592@qq.com。

引用格式:*闻静,李舜酩.航空发动机非线性转子系统同步全周碰摩的温度影响分析[J].航空发动机,2018,44(1):7-13.WEN Jing,LI Shunming. Analysis of thermal effect of synchronous full annular rubbing on nonlinear rotor system of aeroengine[J].Aeroengine,2018,44(1):7-13.*

PDF pdfFactory Pro　www.fineprint.cn

进行了研究[8]。近年来,转子同步全周碰摩响应问题开始得到越来越多的学者关注[9-12]。

本文以单盘转子为研究对象,在考虑摩擦热效应引起转子热挠曲情况下,建立转子与机匣之间的同步全周碰摩接触过程模型,采用数值计算研究了转子的摩擦生热和摩擦热效应对其振动特性的影响,并与未考虑摩擦热效应的碰摩响应进行了比较。计算结果可为航空发动机转子动力学设计提供一定的理论参考。

1 同步全周碰摩运动方程

在多种碰摩响应中,同步全周碰摩最容易发生在转子的工作转速附近。由于在现代转子设计中开始考虑越来越多的非线性因素,而转子的碰摩是典型的非光滑动力学问题,转子发生碰摩之前和发生碰摩时的约束条件不同,碰摩力的表达形式也不同,因此本文建立 1 个考虑转子刚度存在非线性的单盘跨中转子碰摩模型,如图 1 所示。转子在圆盘处的恢复力和位移之间存在三次非线性关系,恢复力表示为 $F=kr+\alpha r^3$,其中 k 和 α 为转子的线性和非线性刚度系数,$r=\sqrt{x_2+y_2}$,为转子在圆盘处的径向位移。

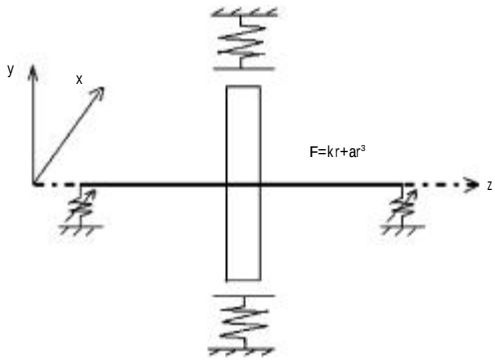


图 1 非线性单盘跨中转子碰摩模型

非线性转子碰摩运动方程可表示为

$$\begin{aligned} m\ddot{x}+c\dot{x}+kx+\alpha x(x^2+y^2)+F_x&=me\omega^2\cos\omega t\\ m\ddot{x}+c\dot{x}+kx+\alpha y(x^2+y^2)+F_y&=me\omega^2\sin\omega t \end{aligned} \tag{1}$$

式中:c 为系统阻尼;e 为转子偏心距;ω 为转子自转角速度;F_x 和 F_y 为 x、y 方向碰摩力。

系统的碰摩力由线性接触力 F_n 和库伦摩擦力 F_t 组成,如图 2 所示,分解到 x、y 轴上分别为 F_x、F_y

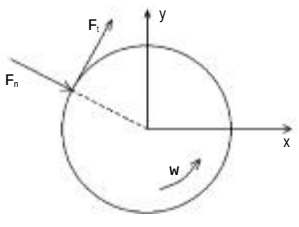


图 2 转子碰摩力模型

$$\begin{bmatrix}F_x\\F_y\end{bmatrix}=\begin{cases}0\\k_c\left(1-\dfrac{r_0}{r}\right)\begin{bmatrix}x-\mathrm{sign}(v_r)\mu y\\ \mathrm{sing}(v_r)\mu x+y\end{bmatrix}\end{cases} \tag{2}$$

式中:r_0 为转静间间隙;μ 为库伦摩擦系数;k_c 为接触刚度;$v_r=\omega r_{disc}+\omega_w r$,为碰摩点处的相对速度,$\omega_w$ 为转子进动角速度,r_{disc} 为转子圆盘半径。

$v_r>0$ 时,摩擦力方向与转子转动方向相反;$v_r<0$ 时,摩擦力方向与转子转动方向相同。当转子发生同步全周碰摩时,恒有 $v_r>0$,因此令 $\mathrm{sign}(v_r)=1$。

将式(1)无量纲化,定义 $X=\dfrac{x}{r_0}$,$Y=\dfrac{y}{r_0}$,$\tau=\omega_0 t$,可得

$$\begin{aligned} X''+\gamma X'+X+\beta X(X^2+Y^2)+F_X&=E\Omega^2\cos\Omega\tau\\ Y''+\gamma Y'+Y+\beta Y(X^2+Y^2)+F_Y&=E\Omega^2\sin\Omega\tau \end{aligned} \tag{3}$$

式中:$\gamma=\dfrac{c}{m\omega_0}$;$\omega_0^2=\dfrac{k}{m}$;$\beta=\dfrac{\alpha r_0^2}{m\omega_0^2}$;$E=\dfrac{e}{r_0}$;$\Omega=\dfrac{\omega}{\omega_0}$;$F_X$ 和 F_Y 分别为无量纲形式 x、y 方向的碰摩力

$$\begin{bmatrix}F_X\\F_Y\end{bmatrix}=\begin{cases}0 & R\leqslant 1\\ g\left(1-\dfrac{1}{R}\right)\begin{bmatrix}X-\mu Y\\ \mu X+Y\end{bmatrix} & R>1\end{cases} \tag{4}$$

式中:$g=\dfrac{k_c}{m\omega_0^2}$;$R=\dfrac{r}{r_0}$。

2 碰摩处温度分布及热弯曲

转子变形量可表示为

$$\delta(t)=\begin{cases}0 & r\leqslant r_0\\ \sqrt{x^2(t)+y^2(t)}-r_0 & r>r_0\end{cases} \tag{5}$$

式中:$x(t)$、$y(t)$为转子圆盘轴心位置坐标,是与时间有关的变量。

则在周期 T_t 内,转子平均变形量可表示为[13]$\delta=\dfrac{1}{T_t}\int_0^{T_t}\delta(t)\mathrm{d}t$。转、静子之间的摩擦热源可以表示为

$$Q=F_t\omega R_1 \tag{6}$$

式中:R_1 为转子圆盘半径。

计算转、静子摩擦生成温度场时,假设[14]:不考虑摩擦过程中材料磨损;转、静子材料满足各项同性;忽略转、静子外表面与空气进行对流换热和辐射换热的影响。

根据热传导理论,由于转子轴向热变形很小,因此忽略轴向的变化,柱坐标下转盘横截面上非稳态热传导方程为

$$\frac{\lambda}{\rho c_p}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial\theta}\right)=\frac{\partial T}{\partial t} \tag{7}$$

PDF pdfFactory Pro www.fineprint.cn

初始条件为 $T_{t=0}=T_0(r,\theta)$，边界条件为 $\lambda\left.\frac{\partial T}{\partial r}\right|_{r=R_1}=\frac{Q(\theta_c,t)}{S}$。

式中:S 为接触处面积;λ 为热传导系数;ρ 为材料密度;c_p 为材料比热容;$T(r,\theta,t)$为时刻 t转盘截面上的温度分布;θ_c 为转盘上发生碰摩位置。

假设转轴为简支 Euler 梁,受热后转轴轴向热应力为

$$\sigma=\chi_t E T(r,\theta,t) \tag{8}$$

式中:χ_t 为热膨胀系数;E 为弹性模量。

横截面上温度分布不均匀在该界面引起的弯矩为

$$M_x=\int_0^{2\pi}\int_0^{R_2}\sigma r^2\cos\theta\,dr\,d\theta$$

$$M_y=\int_0^{2\pi}\int_0^{R_2}\sigma r^2\cos\theta\,dr\,d\theta \tag{9}$$

式中:R_2 为转轴的半径;x、y 为转轴横截面 2 个正交的随体坐标轴;M_x、M_y 为热应力对 x、y 之矩。

根据 Castigliano 定理[15],热挠曲可表示为

$$\rho_t(l,t)e^{j\varphi}=\frac{\chi_T L}{I}\int_0^L\left[\left(\frac{l+z-|l-z|}{2L}-\frac{lz}{L^2}\right)\cdot\int_0^{2\pi}d\theta\int_0^{R_2}Te^{j\theta}r^2dr\right]dz \tag{10}$$

式中:L 为转轴的长度;$\rho_t(l,t)$ 为转轴在距离左端点 l 处的挠度;φ 为挠曲面和 xoz 面的夹角;I 为抗弯模量。

由于碰摩点附近温度在很小范围内发生急剧变化,假设转轴在转盘处温度为 $T(r,\theta,t)$,其他位置为 0,由于研究对象为单盘跨中转子,且可以看出热挠曲在转轴两端为 0,在碰摩点处最大,即当 $l=z=\frac{L}{2}$时最大。近似地用二次曲线形式表示转子的热挠曲

$$\rho_t(l,t)e^{j\varphi}=\frac{\chi_t}{\pi R_2}\tilde{T}$$

$$\tilde{T}=\int_0^L\left[\int_0^{2\pi}d\theta\int_0^{R_2}Te^{j\theta}\frac{r^2dr}{R_2^3}\right]dz \tag{11}$$

温度分布由式(7)以及初始条件、边界条件通过 MATLAB 数值计算得出。可以从式中看出,热弯曲随时间的变化取决于温度随时间的变化。

3　计算分析

3.1　计算条件

航空发动机转子系统材料选用高温合金,计算模型由某型航空发动机转子系统简化而来,模型参数以及材料参数如下[10]:圆盘等效质量 m=57.28 kg,L=2 m,$k=2\times10^6$ N/m,$\alpha=3.8\times10^{12}$ N/m^3,c=261.8 N·s/m,r_0=0.0003 m,R_1=0.4577 m,R_2=0.08 m,e=0.00003 m,$k_c=3\times10^6$ N/m,μ=0.15,λ=650 W/m·℃,ρ=7833 kg/m^3,c_p=465 J/kg·℃,$\chi_T=1.2\times10^{-5}$ m/℃。根据航空发动机工作转速范围,选取无量纲转速 $\Omega\in\{0.1,0.2,0.3\cdots1.4\}$,计算转子无量纲径向位移,然后在无量纲径向位移在小于 1 和大于 1 之间变化处进行细分,得到转子发生碰摩和脱离碰摩的转速。

3.2　计算分析步骤

由于转子存在质量偏心,转子径向位移随转速的变化而发生变化,当转子径向位移达到转、静间隙时,转、静子间将会发生碰摩,将转子径向位移无量纲化后转、静子间碰摩的发生条件表示为无量纲径向位移大于 1。当转、静子间发生碰摩时,产生碰摩力,由于转、静子间发生摩擦产生热源,转子上将产生不均匀分布的温度场,此温度场将引起转子热挠度,从而影响转子变形量和碰摩力,进而影响转子的振动特性。

计算发生碰摩的转子振动特性步骤如下:

(1)根据碰摩力计算公式(4),对运动方程(3)进行 MATLAB 数值积分求解得到碰摩力、转子变形量及无摩擦热时的转子振动特性;

(2)将步骤(1)中得到的转子变形量代入式(5)计算摩擦热源,并结合边界条件、初始条件等式(6)~(11)得到温度分布和转子热挠曲;

(3)考虑热挠度减小转、静子间间隙,从而改变碰摩力,采用顺序耦合法将计算得到的热挠曲耦合到运动方程中,得到考虑摩擦热后的转子振动特性。

顺序耦合分析方法(如图 3 所示)的关键在于先计算得到温度场分布,然后将其作为载荷施加到结构中来计算结构的响应。采用 MATLAB 软件编程实现不考虑和考虑摩擦热的转子碰摩振动特性的计算。

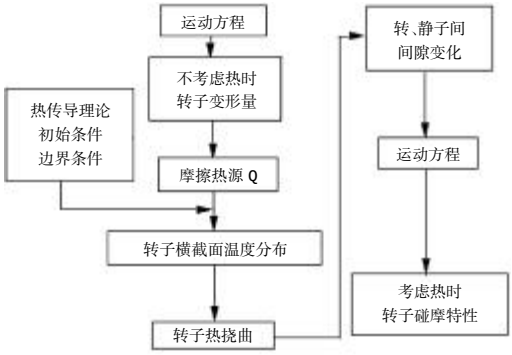


图 3　顺序耦合分析

PDF pdfFactory Pro　www.fineprint.cn

3.3 温度分布和热挠曲特征分析

用 MATLAB 自带的 ode45 函数对运动方程进行数值积分求解,并忽略求解开始时的不稳定部分。为研究转子上接触面的温度分布,需要选取发生同步全周碰摩的转速,初步选取 Ω=1.80、1.90、1.00、1.10、1.20、1.30,分别计算转子系统运动方程的稳定解,结果显示 Ω=1.10 时转子系统处于同步全周碰摩状态。因此计算温度分布时选取该转速,并用 countour 函数绘制转子上的 2 维温度分布曲线。Ω=1.10 时圆盘接触面温度沿径向和周向分布曲线如图 4、5 所示。从图中可见,径向温度随与接触面的距离的增大而呈非线性降低,最高温度达到 82.5 ℃;周向温度沿接触面呈对称分布,并且在周向角达到 30°时几乎等于室温。

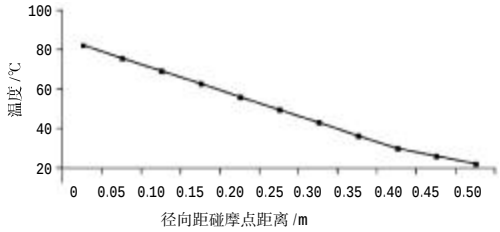


图 4 圆盘接触面径向温度分布

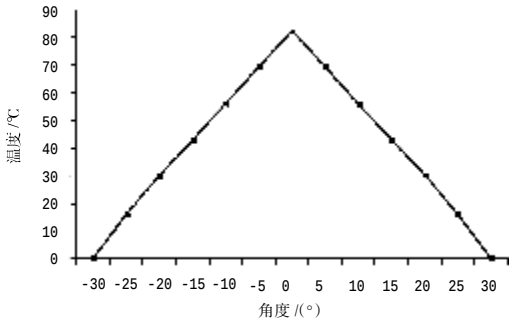


图 5 圆盘接触面周向温度分布

由于转子存在质量偏心,转子径向位移随转速的变化而变化,改变摩擦热源的大小,从而改变摩擦热引起的转子热挠度。为保证转子处于同步全周碰摩状态,在 Ω=1.10 周围进行转速的细分 $\Omega\in\{0.96,0.98,1.00,\cdots,1.18\}$,并计算转子系统运动方程的稳定解,结果显示在 Ω=1.02 和 1.14 之间转子系统处于同步全周碰摩状态。因此选取 Ω=1.02、1.04、1.06、1.08、1.10、1.12 来研究转子热挠度随转速的变化情况。热挠曲随转速变化的曲线如图 6 所示,纵坐标为无量纲热挠曲 $\frac{\rho_T}{r_0}$。

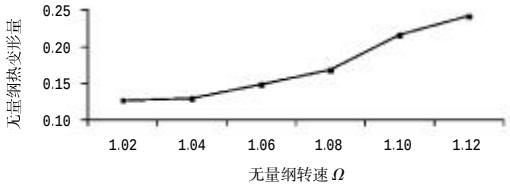


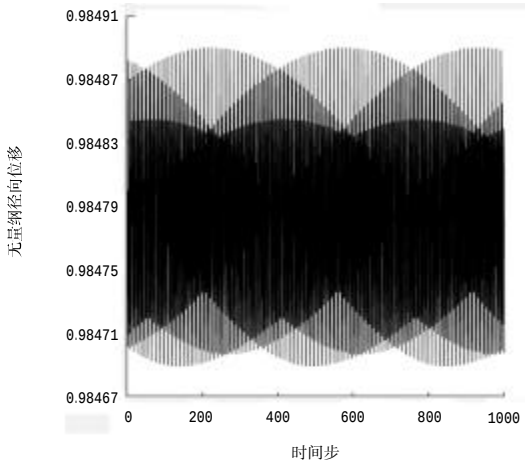
图 6 转子无量纲热挠曲随转速的变化曲线

从图中可见,随转速的升高,热挠曲呈非线性上升趋势,且当 Ω=1.12,无量纲热挠曲达到 0.242。这是由于转速的升高增大了转子径向位移,因此增大了碰摩摩擦力,摩擦热的增加增大了转子的热挠曲。

3.4 摩擦热对碰摩响应的影响

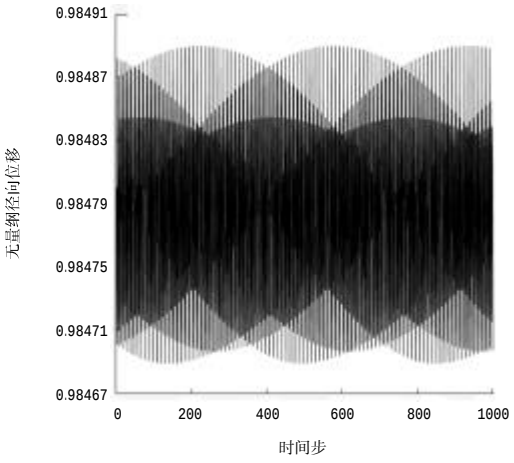
在第 3.3 节中已得到无摩擦热情况下转子进入和脱离同步全周碰摩的转速分别为 1.02 和 1.14。为得到摩擦热对转子碰摩响应的影响,计算有摩擦热情况的转子无量纲径向位移,以得到转子发生和脱离同步全周碰摩的转速。选取 $\Omega\in\{0.96,0.98,1.00,\cdots,1.18\}$分别代入运动方程,用 countour 函数得到各转速下的温度分布情况,储存为 txt 文件,代入式(11)中计算各转速对应的热挠度。将转子热挠度分解为 x、y 2 个方向得到 ρ_{Tx} 和 ρ_{Ty},并增加到式(4)得到考虑摩擦热情况的碰摩力,并代入运动方程,用 ode45 函数进行数值分析。

不考虑摩擦热时 4 种转速下转子的无量纲径向位移如图 7 所示。从图中可见,在 Ω=1.00、1.16 时无量纲径向位移小于 1,表示此转速下转子没有发生同步全周碰摩。在 Ω=1.02、1.14 时,转子无量纲径向位移大于 1,表示转子处于同步全周碰摩阶段。考虑摩擦热时 4 种转速下转子的无量纲径向位移如图 8 所示。从图中可见,在 Ω=0.98、1.14 时无量纲径向位移

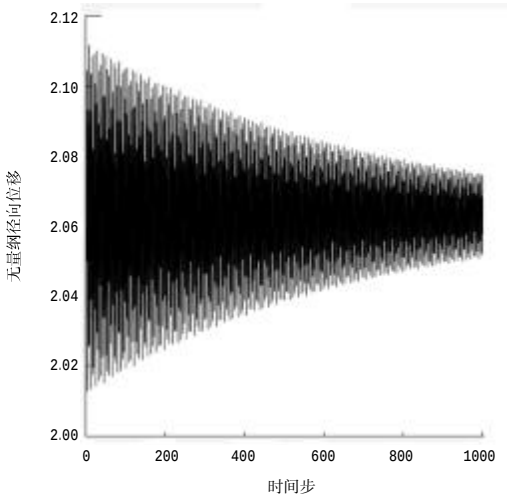


(a) Ω=1.00

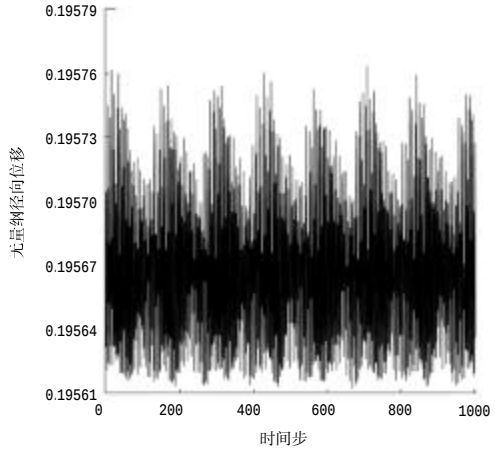
PDF pdfFactory Pro www.fineprint.cn



(b) Ω=1.02



(c) Ω=1.14

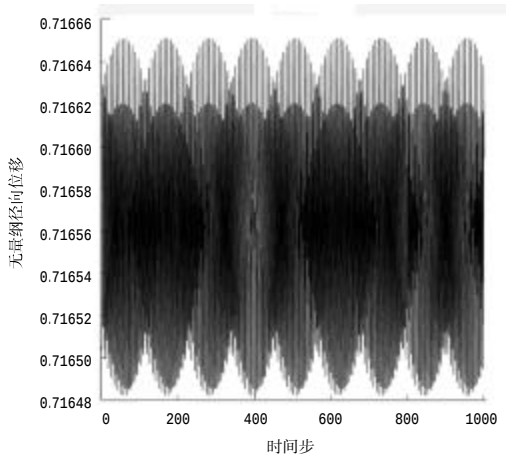


(d) Ω=1.16

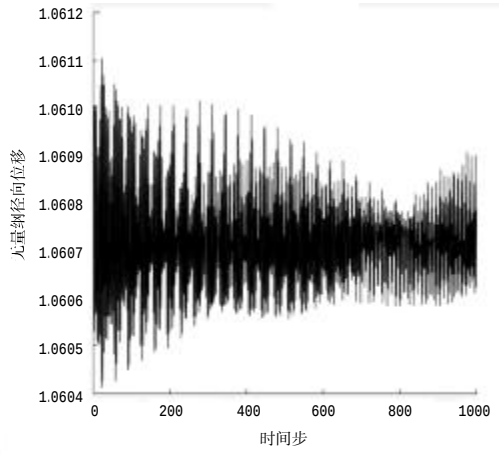
图 7　不考虑摩擦热时 Ω=1.00、1.02、1.14、1.16 的转子无量纲径向位移

小于 1，表示该转速下转子没有发生同步全周碰摩。在 Ω=1.00、1.12 时，转子无量纲径向位移大于 1，表示转子处于同步全周碰摩阶段。

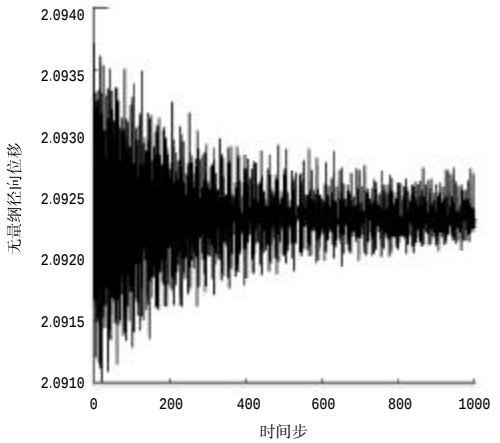
对比 2 种情况转子进入和脱离同步全周碰摩的转速，可见摩擦热使得转子发生和脱离同步全周碰摩的转速降低约 2%，但没有改变发生同步全周碰摩的转速范围。发动机在升速过程中转子系统将在更低转速时发生同步全周碰摩，也会在更低转速时脱离同步全周碰摩状态。



(a) Ω=0.98

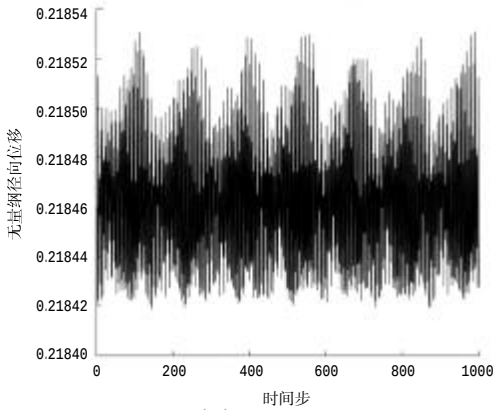


(b) Ω=1.10



(c) Ω=1.12

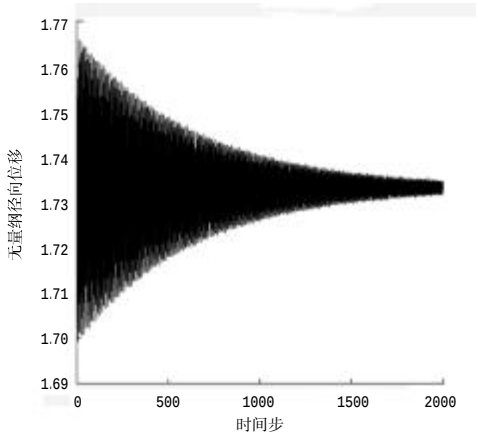
PDF pdfFactory Pro　www.fineprint.cn



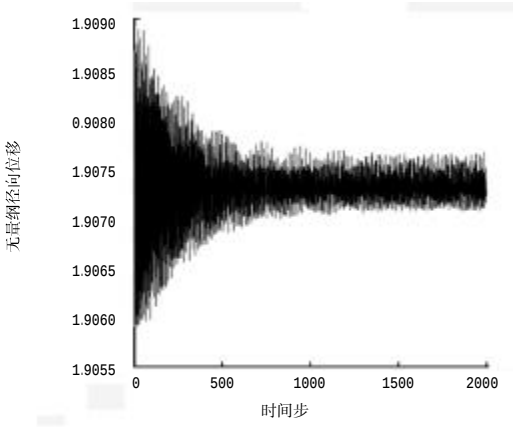
(d) Ω=1.14

图 8 考虑摩擦热时 Ω=0.98、1.00、1.12、1.14 的转子无量纲径向位移

摩擦热引起的热挠度将改变转子同步全周碰摩的运行状态。为有效对比,对无摩擦热和有摩擦热情况选取同一转速,取已发生碰摩的转速 Ω=1.10 代入运动方程并用 ode45 函数进行数值分析。在 Ω=1.10 时无摩擦热和有摩擦热转子无量纲径向位移如图 9 所示。



(a) 不考虑摩擦热



(b) 考虑摩擦热

图 9 Ω=1.10 时不考虑摩擦热和考虑摩擦热的转子无量纲径向位移

从图中可见,考虑摩擦热时转子无量纲径向位移比不考虑时增大约 9%,这是由于摩擦热产生的热弯矩增大了转子径向位移,加重了碰摩程度。同时可见,不考虑摩擦热时无量纲径向位移均匀趋向于一个值,同步全周碰摩渐进趋于稳定,而考虑摩擦热时无量纲径向位移发生不均匀波动,说明摩擦热降低了同步全周碰摩的稳定性。

3.5 结果分析

(1)对比有摩擦热和无摩擦热影响情况下转子径向位移随转速变化的情况,可以得到,有摩擦热情况下,转子进入和脱离同步全周碰摩的无量纲转速均降低 2%,发动机在升速过程中将在更低转速时进入和脱离同步全周碰摩状态。

(2)对比有摩擦热和无摩擦热情况下同步全周碰摩时转子径向位移随时间变化的情况,可以得到,不同于无摩擦热时转子无量纲径向位移均匀趋向一个值,碰摩渐进趋于稳定,考虑摩擦热时径向位移发生不均匀波动,碰摩稳定性降低,转子同步全周碰摩程度加重。

4 结论

本文分别在有摩擦热和无摩擦热情况下计算了某型航空发动机转子系统同步全周碰摩的转子振动响应,通过对比和分析可得出以下 3 点结论。

(1)圆盘接触面由于碰摩产生最高温升达到 82.5 ℃,径向温度随与接触面的距离的增加而呈非线性降低;周向温度沿接触面呈对称分布,并且在周向角达到 30°时几乎等于室温。摩擦产生的转子热挠曲随转速的增加而呈非线性增加;

(2)考虑摩擦热时,转子发生同步全周碰摩的转速降低,脱离同步全周碰摩的转速降低,同步全周碰摩发生的转速范围不变。转子径向位移增大,在 Ω=1.10 时增大约 9%,转子碰摩程度加重。

(3)不考虑摩擦热时,转子径向位移随时间均匀趋向于一个值,同步全周碰摩渐进趋于较为稳定的状态,考虑摩擦热时转子径向位移随时间变化发生不均匀波动,摩擦热降低了转子同步全周碰摩的稳定性。

参考文献:

[1] Kennedy F E. Single pass rub phenomena analysis and experiment[J]. Journal of lubrication Technology, Transactions of the ASME,1982, 104:582-588.

PDF pdfFactory Pro www.fineprint.cn

[2] Goldman P, Muszynska A. rotor-to-stator, rub-related, thermal/mechanical effects in rotating machinery [J]. Chaos, Solitons & Fractals, 1995,9(5):1579-1601.

[3] 杨建刚,黄宝华,高伟. 摩擦热冲击问题的建模、仿真与振动特性分析[J]. 中国电机工程学报,1999,19(6):25-31.
YANG Jiangang, HUANG Baohua, GAO Wei. Modeling simulation and vibration analysis of rub-induced thermal impact problem[J]. Proceedings of the CSEE,1999,19(6):25-31.(in Chinese)

[4] 罗跃纲,张松鹤,闻邦椿. 非线性弹性转子系统碰摩的动态特性[J]. 汽轮机技术,2004, 46(6):415-417.
LUO Yuegang,ZHANG Songhe,WEN Bangchun. Dynamic characteristics of nonlinear elastic rotor system with rub-impact faults[J]. Turbine Technology,2004, 46(6):415-417. (in Chinese)

[5] 袁惠群. 非线性转子动力学中的分叉与混沌运动研究概述[J]. 黄金学报,2000,2(4):309-314.
YUAN Huiqun. Summary on the study for bifurcation and chaos motion on nonlinear rotor dynamics[J]. Gold Journal,2000,2(4):309-314. (in Chinese)

[6] 刘献栋,李其汉. 转静件碰摩模型及不对中转子局部碰摩的混沌特性[J]. 航空动力学报,1998, 13(4):361-365.
LIU Xiandong,LI Qihan. Impact-rub model and chaotic feature of partial rub of eccentric rotor [J]. Journal of Aerospace Power,1998, 13(4):361-365. (in Chinese)

[7] 陶海亮,左志涛,高庆,等. 基于时频分析的裂纹转子碰摩故障特征研究[J]. 推进技术, 2013,34(4):520-528.
TAO Hailiang,ZUO Zhitao,GAO Qing,et al. Fault analysis of rotor with rub-impact and crack based on time-frequency analysis [J]. Journal of Propulsion Technology, 2013,34(4):520-528. (in Chinese)

[8] 王士敏, 陆启韶. 转子通过临界转速时碰摩热效应对振动特性的影响[J]. 动力学与控制学报,2004,2(3):64-69.
WANG Shimin, LU Qishao. The effect of run-impact thermal effects on vibration characteristics of a rotor passing through critical speed [J]. Journal of Dynamics and Control,2004,2(3):64-69. (in Chinese)

[9] 许斌,徐尉南,张文. 单盘转子的同步全周碰摩及其稳定性分析[J]. 复旦学报(自然科学版),2006,45(2):148-169.
XU Bin, XU Weinan, ZHANG Wen. Study of synchronous full annular rub of jeffcott rotor and its dynamic stability [J]. Journal of Fudan University(Natural Science) ,2006,45(2):148-169. (in Chinese)

[10] 徐尉南, 张文, 许斌. 柔性转子 - 柔性静子系统的同步全周碰摩分析[J]. 振动与冲击,2007,26(2):1-9.
XU Weinan,ZHANG Wen,XU Bin. Analytical study of synchronous full annular rub moniton of flexible stator and rotor system[J]. Journal of Vibration and Shock,2007,26(2):1-9. (in Chinese)

[11] 张华彪,陈予恕,李军. 弹性支承 - 刚性转子系统同步全周碰摩的分岔响应[J]. 应用数学和力学,2012,33(7):812-827.
ZHANG Huabiao,CHEN Yushu,LI Jun. Bifurcation on the synchronous full annular rub of a rigid-rotor elastic-support system[J]. Applied Mathematics and Mechanics,2012,33 (7):812-827. (in Chinese)

[12] 张华彪. 航空发动机转子系统碰摩的非线性动力学研究 [D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
ZHANG Huabiao. Nonlinear dynamics on impact-rub of aero engine rotor system [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2012. (in Chinese)

[13] Bachschmid N, Pennacchi P, Vania A. Thermally induced vibrations due to rub in real rotors[J]. Journal of Sound and Vibration,2007,299(4-5):6-9.

[14] 朱向哲,袁惠群,李东. 摩擦热效应对航空发动机高压转子系统碰摩响应的影响[J]. 推进技术,2010,31(3):366-371.
ZHU Xiangzhe,YUAN Huiqun,LI Dong. Friction thermal effect on rubbing response of a high pressure rotor system [J]. Journal of Propulsion Technology,2010,31(3):366-371. (in Chinese)

[15] Nowinski J L. Theory of thermoelasticity with applications[J]. Sijthoff &Noordhoff, Alphen ann den Rijn, 1980,47(2):459.

(编辑:李华文)

PDF pdfFactory Pro　www.fineprint.cn