

旋转机械碰摩转子系统的可靠性灵敏度设计^{*}

苏长青¹ 张义民¹ 李乐新² 马辉¹

(1. 东北大学机械工程与自动化学院, 沈阳 110004; 2. 沈阳理工大学装备工程学院, 沈阳 110168)

【摘要】 在碰摩转子系统动力学方程的基础上,将可靠性设计理论与灵敏度分析方法相结合,应用随机摄动理论、Kronecker代数、四阶矩技术和矩阵微分理论,讨论了具有随机参数的转子系统碰摩的可靠性灵敏度问题,提出了转子系统可靠性灵敏度设计的数值方法,给出了碰摩转子系统随机参数统计特性可靠性灵敏度的变化规律,研究了转子系统随机参数统计特性的改变对碰摩转子系统可靠性的影响,为转子系统的可靠性设计提供了理论依据。数值算例表明,计算结果与通常的定性分析结果完全一致,验证了本文方法的有效性。

关键词: 转子系统 随机摄动 可靠性 灵敏度分析 碰摩

中图分类号: TH113.1

文献标识码: A

Reliability Sensitivity Design for Rub-impact Rotor System of Rotating Machinery

Su Changqing¹ Zhang Yimin¹ Li Lexin² Ma Hui¹

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China

2. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

Abstract

On the basis of rub-impact dynamics equation of rotor system with rub-impact fault, according with the reliability design theory and sensitivity analysis method, the reliability sensitivity analysis method of the rotor system with rub-impact was extensively discussed by applying the random perturbation theory, Kronecker algebra, the fourth moment technology and matrix calculus theory. A numerical method for reliability sensitivity design of rotor system with rub-impact was presented. The variation regularities for reliability sensitivity of random parameters statistics characteristic were obtained and the effects of random parameters statistics characteristic on reliability of the rotor system were studied. The presented method provided the theoretic basis for the reliability design of the rotor system with rub-impact. A numerical example demonstrates that the result of presented method is accord with the qualitative analysis, the proposed method is efficient and accurate.

Key words Rotor system, Random perturbation, Reliability, Sensitivity analysis, Rub-impact

引言

运动部件与静止部件间的碰摩是旋转机械运转中常见的故障之一。在旋转机械的设计、制造和安装过程中,当发生转子质量不平衡、转子与定子不对中等问题时,将发生碰摩现象。碰摩一旦发生,轻则

使转、静件间的间隙增大,影响工作效率,重则使叶片折断或使转子失稳^[1~2]。

可靠性灵敏度设计是在可靠性分析的基础上进行的灵敏度设计,能更直观地从定量分析角度反映随机参数对系统可靠性的影响。在实际工程设计中,若系统某随机参数对结构的失效有较大的影响,

收稿日期: 2008-03-31 修回日期: 2008-04-21

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50805019)和国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA04Z442)

作者简介: 苏长青,博士生,主要从事转子系统故障的可靠性研究,E-mail: neusucq@163.com

通讯作者: 张义民,教授,博士生导师,主要从事机械动态设计和机械可靠性设计等方面的研究,E-mail: zhanymneu@sohu.com

则在设计和制造过程中要研究加以控制；反之，如果某随机参数的变异性对结构系统可靠性的影响不显著，则在结构设计时可把它当成确定量来处理以减小随机参数的数目。目前，结构可靠性灵敏度计算方法已有了较大的发展^[3~8]，这些提供了有效的可靠性灵敏度的计算方法。

在建立碰摩转子系统的动力学方程的基础上，应用随机摄动理论、四阶矩技术、可靠性设计方法和灵敏度分析方法，讨论了转子系统碰摩故障的可靠性灵敏度问题。

1 模型建立

碰摩转子系统如图 1a 所示。转子两端采用对称结构的滑动轴承支承，转盘质量为 m ，转轴刚度为 k ，阻尼为 c ，静子径向刚度为 k_r 。

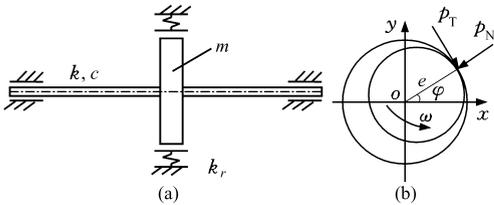


图 1 转子系统模型

Fig.1 Rotor system model

(a) 碰摩转子系统 (b) 转子局部碰摩力模型

转子局部碰摩力模型如图 1b 所示。图中 p_N 为径向碰撞力， p_T 为切向摩擦力， φ 为碰摩点的法向与 x 轴的夹角。 ω 为转子转动角速度， r 为转盘振幅。转子、静子间的摩擦系数为 f ，间隙为 δ ，在 $r > \delta$ 时，碰摩发生。在 xoy 坐标系中，设转盘的径向位移为 x, y ，碰摩力可以表示为

$$\begin{cases} \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \end{Bmatrix} = -\frac{(r-\delta)k_r}{r} \begin{bmatrix} 1 & -f \\ f & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \end{Bmatrix} & (r \geq \delta) \\ p_x = p_y = 0 & (r < \delta) \end{cases} \quad (1)$$

于是系统的运动微分方程为

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} + \frac{k_r(r-\delta)}{r} \begin{bmatrix} 1 & -f \\ f & 0 \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = m\omega^2 \begin{bmatrix} \cos\omega t \\ \sin\omega t \end{bmatrix} \quad (2)$$

2 随机响应分析

方程(2)可表示为一般的矩阵形式，即

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{q}} + (\mathbf{K} + \mathbf{K}_r)\mathbf{q} = \mathbf{F}(t) \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c & 0 \\ 0 & c \end{bmatrix} \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} k & 0 \\ 0 & k \end{bmatrix} \\ \mathbf{K}_r = \frac{k_r(r-\delta)}{r} \begin{bmatrix} 1 & -f \\ f & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}(t) = m\omega^2 \begin{bmatrix} \cos\omega t \\ \sin\omega t \end{bmatrix}$$

$$\ddot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix}, \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix}, \mathbf{q} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$

式(3)中 \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{K}_r 和 \mathbf{F} 分别为系统的质量、阻尼、刚度矩阵、定子的刚度矩阵和载荷向量， \mathbf{q} 为系统位移响应向量。

若向量 $\mathbf{A}(p \times l)$ 为矩阵 $\mathbf{B}(s \times t)$ 的函数，则 \mathbf{A} 在标称值 $\bar{\mathbf{B}}$ 处的一阶 Taylor 表达式为^[2]

$$\mathbf{A}(\mathbf{B}) = \mathbf{A}(\bar{\mathbf{B}}) + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial (\text{cs}\mathbf{B})^T} \Big|_{\mathbf{B}=\bar{\mathbf{B}}} d[\text{cs}(\mathbf{B})] \quad (4)$$

式中 $d[\text{cs}(\mathbf{B})] = d[\text{cs}(\mathbf{B})] \otimes d[\text{cs}(\mathbf{B})]$ 为 $d[\text{cs}(\mathbf{B})]$ 的二阶 Kronecker 幂，符号 \otimes 代表 Kronecker 积。

为了推导非线性结构动力学的一般概率摄动有限元法的矩阵方程，把方程(1) 两边在 $\bar{\mathbf{B}}$ 附近展开成二阶 Taylor 表达式，然后合并同阶项，可以得到与方程(1) 相一致的零阶、一阶和二阶方程，求解这些方程，可以得到动力响应的前四阶矩为^[2~4]

$$\mathbf{E}(\mathbf{q}) = \bar{\mathbf{q}} + \bar{\mathbf{q}}_2 \quad (5)$$

$$\text{Var}(\mathbf{q}) = \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{q}}}{\partial (\text{cs}\mathbf{B})^T} \right] [\text{Var}(\text{cs}\mathbf{B})] \quad (6)$$

$$\text{Tm}(\mathbf{q}) = \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{q}}}{\partial (\text{cs}\mathbf{B})^T} \right] [\text{Tm}(\text{cs}\mathbf{B})] \quad (7)$$

$$\text{Fm}(\mathbf{q}) = \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{q}}}{\partial (\text{cs}\mathbf{B})^T} \right] [\text{Fm}(\text{cs}\mathbf{B})] \quad (8)$$

式中， $\text{Var}(\text{cs}\mathbf{B})$ 、 $\text{Tm}(\text{cs}\mathbf{B})$ 、 $\text{Fm}(\text{cs}\mathbf{B})$ 和 $\mathbf{E}(\mathbf{q})$ 、 $\text{Var}(\mathbf{q})$ 、 $\text{Tm}(\mathbf{q})$ 、 $\text{Fm}(\mathbf{q})$ 分别代表基本随机变量和响应的均值、方差、三阶矩、四阶矩， $\bar{\mathbf{q}}$ 和 $\bar{\mathbf{q}}_2$ 分别为零阶和二阶方程的解， $\frac{\partial \bar{\mathbf{q}}}{\partial (\text{cs}\mathbf{B})^T}$ 为响应向量的灵敏度矩阵，可以表示为

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{q}}}{\partial (\text{cs}\mathbf{B})^T} = \left[\frac{\partial \bar{\mathbf{q}}}{\partial b_{11}} \dots \frac{\partial \bar{\mathbf{q}}}{\partial b_{s1}} \dots \frac{\partial \bar{\mathbf{q}}}{\partial b_{1t}} \dots \frac{\partial \bar{\mathbf{q}}}{\partial b_{st}} \right] \quad (9)$$

把方程(9)分别代入方程(5)~(8)，就可以得到响应的方差、三阶矩和四阶矩矩阵。

3 可靠性分析

可靠性分析中的一个目标是确定系统的可靠度

$$R = \int_{g(\delta, r) > 0} f(z) dz \quad (10)$$

式中， $f(z)$ 为响应 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 和阈值 δ 的联合概率密度函数， $g(\delta, r)$ 为状态函数，用来表示系统的两种状态

$$\begin{cases} g(\delta, r) \leq 0 & (\text{失败状态}) \\ g(\delta, r) > 0 & (\text{安全状态}) \end{cases} \quad (11)$$

其中， $g(\delta, r) = 0$ 为极限状态方程，代表极限状态

表面,也就是失败面。

根据状态函数的定义,非线性随机转子系统碰摩可靠性分析的状态函数定义为

$$g(\delta, r) = \delta - r \tag{12}$$

可以认为响应 r 与门限值 δ 是相互独立的随机变量。根据概率随机理论,状态函数 $g(\delta, r)$ 的前四阶矩可以表示为

$$\begin{cases} \mu_g = E[g(\delta, r)] = E(\delta) - E(r) = \mu_\delta - \mu_r \\ \sigma_g^2 = \text{Var}[g(\delta, r)] = \sigma_\delta^2 + \sigma_r^2 \\ \theta_g = E[g(\delta, r) - \bar{g}(\delta, r)]^3 = \theta_\delta - \theta_r \\ \eta_g = E[g(\delta, r) - \bar{g}(\delta, r)]^4 = \eta_\delta + \eta_r + 6\sigma_\delta^2\sigma_r^2 \end{cases} \tag{13}$$

可靠性指标定义为

$$\beta = \frac{3(\alpha_{4g} - 1)u_g/\sigma_g + \alpha_{3g}(\mu_g^2/\sigma_g^2 - 1)}{\sqrt{(9\alpha_{4g} - 5\alpha_{3g}^2 - 9)(\alpha_{4g} - 1)}} \tag{14}$$

其中 $\alpha_{3g} = \theta_g/\sigma_g^3$ $\alpha_{4g} = \eta_g/\sigma_g^4$
 式中 α_{3g} 、 α_{4g} ——状态函数的偏态系数和峰态系数

据此系统可靠度为

$$R(\beta) = 1 - \Phi(-\beta) = \Phi(\beta) \tag{15}$$

式中 $\Phi(\cdot)$ ——标准正态分布函数

4 可靠性灵敏度分析

系统可靠度对随机参数均值的可靠性灵敏度为

$$\frac{DR(\beta)}{D\mathbf{B}} = \frac{\partial R(\beta)}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial u_g} \frac{\partial u_g}{\partial u_r} \frac{\partial u_r}{\partial \mathbf{B}} \tag{16}$$

其中

$$\frac{\partial R(\beta)}{\partial \beta} = \varphi(\beta) \tag{17}$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial u_g} = \frac{3(\alpha_{4g} - 1)/\sigma_g + 2\alpha_{3g}u_g/\sigma_g^2}{\sqrt{(9\alpha_{4g} - 5\alpha_{3g}^2 - 9)(\alpha_{4g} - 1)}} \tag{18}$$

$$\frac{\partial u_g}{\partial u_r} = -1 \tag{19}$$

$$\frac{\partial u_r}{\partial \mathbf{B}} = \frac{u_x \frac{\partial u_x}{\partial \mathbf{B}} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial \mathbf{B}}}{u_r} \tag{20}$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial \mathbf{B}^T} = \left[\frac{\partial u_x}{\partial b_1} \quad \frac{\partial u_x}{\partial b_2} \quad \dots \quad \frac{\partial u_x}{\partial b_n} \right] \tag{21}$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial \mathbf{B}^T} = \left[\frac{\partial u_y}{\partial b_1} \quad \frac{\partial u_y}{\partial b_2} \quad \dots \quad \frac{\partial u_y}{\partial b_n} \right] \tag{22}$$

系统可靠度对随机参数方差的可靠性灵敏度为

$$\frac{DR(\beta)}{D\text{Var}(\mathbf{B})} = \frac{\partial R(\beta)}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \sigma_g} \frac{\partial \sigma_g}{\partial \sigma_r} \frac{\partial \sigma_r}{\partial \text{Var}(\mathbf{B})} \tag{23}$$

其中

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta}{\partial \sigma_g} = & \frac{-\left[3(\alpha_{4g} - 1) \frac{u_g}{\sigma_g^2} + 2\alpha_{3g} \frac{u_g^2}{\sigma_g^3} + \frac{12\alpha_{4g}u_g}{\sigma_g^2} \right]}{\sqrt{(9\alpha_{4g} - 5\alpha_{3g}^2 - 9)(\alpha_{4g} - 1)}} - \\ & \frac{\frac{3\alpha_{3g}\left(\frac{u_g^2}{\sigma_g^2} - 1\right)}{\sigma_g}}{\sqrt{(9\alpha_{4g} - 5\alpha_{3g}^2 - 9)(\alpha_{4g} - 1)}} - \\ & \frac{1}{2} \frac{\left[\left(-\frac{36\alpha_{4g}}{\sigma_g} + \frac{30\alpha_{3g}^2}{\sigma_g} \right) (\alpha_{4g} - 1) - (9\alpha_{4g} - 5\alpha_{3g}^2 - 9) \frac{4\alpha_{4g}}{\sigma_g} \right]}{\sqrt{(9\alpha_{4g} - 5\alpha_{3g}^2 - 9)^3 (\alpha_{4g} - 1)^3}} \\ & \frac{\left[3(\alpha_{4g} - 1) \frac{u_g}{\sigma_g} + \alpha_{3g} \left(\frac{u_g^2}{\sigma_g^2} - 1 \right) \right]}{\sqrt{(9\alpha_{4g} - 5\alpha_{3g}^2 - 9)^3 (\alpha_{4g} - 1)^3}} \end{aligned} \tag{24}$$

$$\frac{\partial \sigma_g}{\partial \sigma_r} = \frac{\sigma_r}{\sigma_g} \tag{25}$$

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial \text{Var}(\mathbf{B})} = \frac{\left(\frac{u_x}{u_r}\right)^2 \sigma_x \frac{\partial \sigma_x}{\partial \text{Var}(\mathbf{B})} + \left(\frac{u_y}{u_r}\right)^2 \sigma_y \frac{\partial \sigma_r}{\partial \text{Var}(\mathbf{B})}}{\sigma_r} \tag{26}$$

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial \text{Var}(\mathbf{B})} = \frac{1}{2\sigma_x} \left[\frac{\partial u_x}{\partial \mathbf{B}} \otimes \frac{\partial u_x}{\partial \mathbf{B}} \right] \tag{27}$$

$$\frac{\partial \sigma_y}{\partial \text{Var}(\mathbf{B})} = \frac{1}{2\sigma_y} \left[\frac{\partial u_y}{\partial \mathbf{B}} \otimes \frac{\partial u_y}{\partial \mathbf{B}} \right] \tag{28}$$

把已知条件、响应和可靠性分析计算结果代入式(16)和式(23),就可获得可靠性灵敏度 $DR/D\mathbf{B}$ 和 $DR/D\text{Var}(\mathbf{B})$ 。

5 数值算例

某转子系统的转盘质量为 $m = 10$ kg,摩擦系数 $f = 0.12$,激振频率 $\omega = 2\,500$ rad/s,随机变量 k 、 c 、 e 、 k_r 的均值分别表示如下:刚度 $k = 4.6 \times 10^3$ N/mm,阻尼 $c = 120$ N·s/mm,静子的径向刚度 $k_r = 1.2 \times 10^5$ N/mm,偏心距 $e = 0.2$ mm,随机变量 $\mathbf{B} = [k \ c \ e \ k_r]$,其变异系数均为 0.05,间隙 δ 的前四阶矩为 3 mm, 0.251 mm, 0.028 mm³, 0.001 7 mm⁴。

从图 2~图 5 中可以看出,转子系统在初始阶段,系统碰摩可靠度对随机参数均值的灵敏度表现出一定的不稳定性和振荡。工作一段时间后,可靠性灵敏度曲线呈现一定的规律性,即转轴刚度、静子径向刚度和阻尼均值的增加会使转子系统趋于更加可靠。而偏心距均值的增加,其结果会使转子系统趋于更加不可靠(发生碰摩)。变化率最大的为偏心距,最小的为静子径向刚度。

从图 6~图 9 中可以看出,转子系统碰摩可靠度对随机参数方差的灵敏度在初始阶段也表现出一定的不稳定性,当工作一段时间后,曲线趋于稳定。可以看出,随机参数方差的增加会使转子系统碰摩

的可靠度降低, 容易发生碰摩。其中变化率最大的为偏心距, 最小的为静子径向刚度。

因此在转子系统的设计和制造过程中应严格控制敏感随机参数, 即控制偏心距的大小。而对于非敏感随机参数, 则可以将其作为确定性参数进行设计, 从而减少设计和制造的成本。

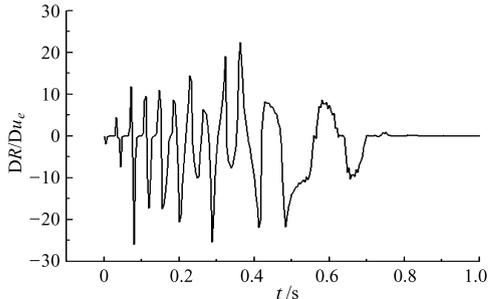


图 2 可靠性灵敏度 DR/Du_e 随时间的变化曲线
Fig. 2 Curve of reliability sensitivity DR/Du_e with respect to the time

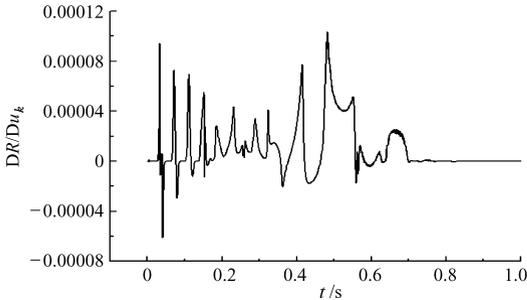


图 3 可靠性灵敏度 DR/Du_k 随时间的变化曲线
Fig. 3 Curve of reliability sensitivity DR/Du_k with respect to the time

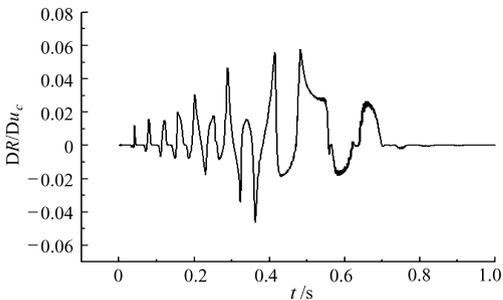


图 4 可靠性灵敏度 DR/Du_c 随时间的变化曲线
Fig. 4 Change of reliability sensitivity DR/Du_c with respect to the time

本文研究的对象为 Jeffcot 转子系统, 对于复杂转子系统, 如多盘转子、多跨转子系统, 该方法同样适用。对于多盘转子和多跨转子系统, 在求解系统可靠度时可将系统作为串联系统来研究。数值计算结果可为工程设计人员精确设计转子系统提供定量的依据。而上述的计算结果与通常的定性分析结果完全一致, 这进一步说明了灵敏度分析结果对转子系统各随机参数分析的全面性和正确性。

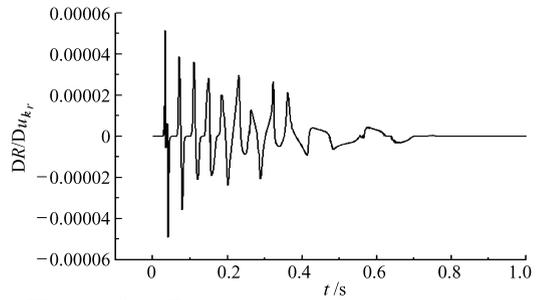


图 5 可靠性灵敏度 DR/Du_{k_r} 随时间的变化曲线
Fig. 5 Curve of reliability sensitivity DR/Du_{k_r} with respect to the time

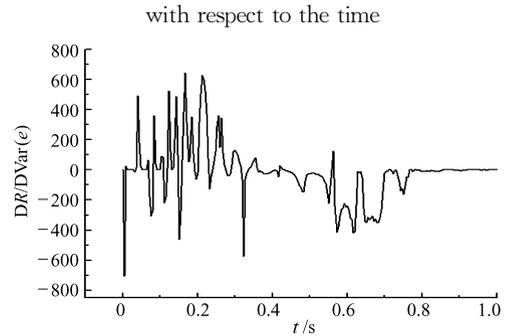


图 6 可靠性灵敏度 $DR/DVar(e)$ 随时间的变化曲线
Fig. 6 Curve of reliability sensitivity $DR/DVar(e)$ with respect to the time

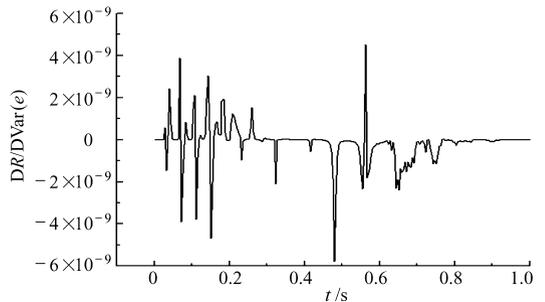


图 7 可靠性灵敏度 $DR/DVar(k)$ 随时间的变化曲线
Fig. 7 Curve of reliability sensitivity $DR/DVar(k)$ with respect to the time

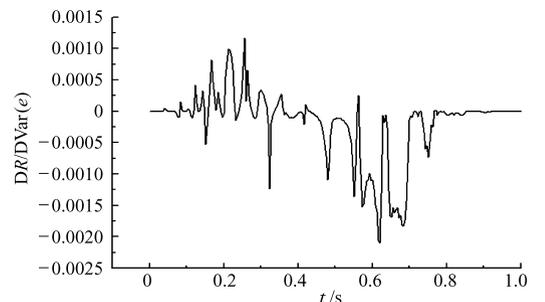


图 8 可靠性灵敏度 $DR/DVar(c)$ 随时间的变化曲线
Fig. 8 Curve of reliability sensitivity $DR/DVar(c)$ with respect to the time

6 结束语

在碰摩转子系统可靠性研究的基础上, 提出计算随机转子系统可靠性灵敏度的数值方法, 有效地

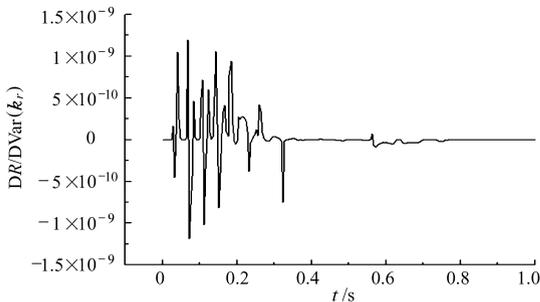


图9 可靠性灵敏度 $DR/DVar(k_r)$ 随时间的变化曲线

Fig.9 Curve of reliability sensitivity $DR/DVar(k_r)$

with respect to the time

反映了转子系统各随机参数统计特性的变化对碰摩故障的影响程度。本数值方法在随机参数前四阶矩已知的情况下,放松了对随机参数的分布概型的限制,使其更接近于工程实际中的转子系统问题,为分析和修改转子系统的可靠性水平提供了理论依据。数值算例表明,该方法是解决碰摩转子系统可靠性灵敏度设计问题的一种实用而有效的数值方法。

参 考 文 献

- 1 闻邦椿,武新华,丁千,等.故障旋转机械非线性动力学的理论与试验[M].北京:科学出版社,2004.
- 2 闻邦椿,顾家柳,夏松波,等.高等转子动力学[M].北京:机械工业出版社,1999.
- 3 Madsen H O, Krenk S, Lind N C. Methods of structural safety[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, Inc., 1986.
- 4 Hohenbichler M, Rackwitz R. Sensitivity and importance measures in structural reliability[J]. Civil Engineering Systems, 1986, 3(4):203~209.
- 5 Bjerager P, Krenk S. Parametric sensitivity in first order reliability analysis[J]. Journal of Engineering Mechanics ASCE, 1989, 115(7):1 577~1 582.
- 6 Melchers R E, Ahammed M. A fast approximate method for parameter sensitivity estimation in Monte Carlo structural reliability [J]. Computers & Structures, 2004, 82(1): 55~61.
- 7 张义民,刘巧伶,闻邦椿.非线性随机系统的独立失效模式可靠性灵敏度[J].力学学报,2003,35(1):117~120.
Zhang Yimin, Liu Qiaoling, Wen Bangchun. Sensitivity of reliability in nonlinear random systems with independent failure modes[J]. Acta Mechanica Sinica, 2003, 35(1):117~120. (in Chinese)
- 8 张义民.影响车辆前轴可靠度的参数灵敏度分析[J].农业机械学报,2004,35(3):5~8.
Zhang Yimin. Parametric sensitivity in reliability of front-axle of a vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3):5~8. (in Chinese)

(上接第 146 页)

- 6 邓小华,周冀衡,杨虹琦,等.湖南烤烟外观质量量化评价体系的构建与实证分析[J].中国农业科学,2007,40(9): 2 036~2 044.
Deng Xiaohua, Zhou Jiheng, Yang Hongqi, et al. Construction and empirical analysis of evaluating quantitative system of the appearance quality of flue-cured tobacco in Hu'nan[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(9): 2 036~2 044. (in Chinese)
- 7 张文彤,姜庆五,赵耐青,等.数据挖掘技术在生物信息学基因变异规律研究中的应用[J].中国卫生统计,2005, 22(1):5~8.
Zhang Wentong, Jiang Qingwu, Zhao Naiqing, et al. Application of data mining in gene mutation research of bioinformatics [J]. Chinese Journal of Health Statistics, 2005, 22(1):5~8. (in Chinese)
- 8 吴惠丰,张晓宇,李晓晶,等.模型毒物急性毒性尿液核磁共振氢谱标记物的二阶段聚类分析[J].分析化学,2006, 34(1):21~25.
Wu Huifeng, Zhang Xiaoyu, Li Xiaojing, et al. Studies on the acute toxicity of model toxins by proton magnetic resonance spectroscopy of urine combined with two-step cluster analysis[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2006, 34(1): 21~25. (in Chinese)
- 9 SPSS base 12 user's guide[M]. SPSS Inc. Chicago, Illinois,2003:391~399.
- 10 Clementine 8.0 user's guide[M]. SPSS Inc. Chicago, Illinois, 2003:307~380.
- 11 Clementine 8.0 algorithms guide[M]. SPSS Inc. Chicago, Illinois,2003:37~61.
- 12 Advanced modeling with clementine[M]. SPSS Inc. Chicago, Illinois,2003:1~23.