

文章编号:1000-8055(2011)03-0716-05

基于物理模型和灰色关联分析的直升机 传动系统损伤定量检测方法

程 哲, 胡葛庆, 秦国军

(国防科学技术大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘 要: 结合物理模型与灰色理论,提出了一种直升机传动系统损伤定量检测方法. 针对直升机主传动系统的 2K-H 行星轮系,建立了太阳轮缺齿损伤的物理基模型,通过仿真获得了不同损伤严重度的行星轮系振动信号. 选择并计算仿真信号的特征向量,并以此作为损伤特征的标准模式,然后对待检信号特征向量与标准模式进行灰色关联度分析,根据关联度对损伤进行定量检测. 试验数据的验证结果证明该方法对行星轮系太阳轮缺齿损伤具有良好的定量检测能力,并可将其应用于其他旋转机械典型损伤的定量检测.

关 键 词: 物理模型; 灰色理论; 行星轮系; 缺齿损伤; 定量检测

中图分类号: TH132.41

文献标识码: A

Quantitative detection approach for transmission system of helicopter based on physical model and gray relational analysis

CHENG Zhe, HU Niao-qing, QIN Guo-jun

(College of Mechatronic Engineering and Automation,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: An approach to detect the damage quantitatively in rotary machine was presented based on physical model and gray theory. For the purpose of detecting sun-gear tooth-chipped damage in 2K-H planetary gear sets, physics-based models for damage system with multi-stage severity were established, and then simulation data of damage system was obtained. Then, feature vector of simulation data extracted and computed was used as standard damage mode. Relational analysis in grey theory was carried out between standard damage mode and the feature vector of signal, and also checked. The quantitative detection result for damage was achieved from relational grade computed before. Tooth-chipped seeded tests were carried out and used to validate the approach. It is proved that the approach presented above is effective to detect the sun-gear tooth-chipped damage, and its potential profit in other rotary mechanical equipments will be researched in the future.

Key words: physical model; gray theory; planetary gear sets; tooth-chipped damage; quantitative detection

近年来,物理基模型和灰色系统理论逐步被应用于旋转机械设备状态监控和故障诊断领域,为直升机传动系统旋转部件典型损伤的定量检测

提供了新的思路.

行星轮系是直升机传动链主传动系统的关键部分,对行星轮系物理基损伤检测方法的研究主

收稿日期:2010-03-19; 修订日期:2010-05-18

基金项目:国家自然科学基金(50905183); 部委级预研项目

作者简介:程哲(1982—),男,山西陵川人,博士生,主要从事机器设备状态监控与故障诊断方向的研究.

要集中在行星轮系的物理基模型和动力学分析、典型故障部件有限元仿真以及损伤检测与故障诊断等方面。如 Ambarisha, Lin 等建立了行星轮系的动力学模型和有限元模型,对固有频率和振型等模态参数进行了仿真和分析^[1-2]。Yuksel C 等针对行星轮系的齿面磨损故障建立了有限元模型,并进行了数值仿真和动态分析^[3]。Wu B 等对比了时域、频域和小波域特征在直升机行星轮系典型损伤检测中的效果^[4]。

本文以直升机动力传动系统中常用 2K-H 行星轮系为研究对象,针对由于偏载造成的太阳轮缺齿损伤,将物理基模型与灰色系统理论的关联度分析方法相结合,通过物理基模型为关联度分析提供标准损伤模式数据,在此基础上研究损伤的定量检测方法,最后采用故障植入试验数据进行验证。

1 行星轮系损伤物理基建模与仿真

通过动力学模型对 2K-H 行星轮系的运行特性进行仿真分析,然后建立太阳轮缺齿损伤的物理基模型。

1.1 行星轮系健康状态的力学建模

在 2K-H 行星轮系传动问题中,考虑到行星轮的支承轴刚度很大,内齿圈是机架的一部分,行星轮和内齿圈的中心位移都可以忽略,因此选择 2K-H 行星轮系的集中参数纯扭模型进行动力学分析^[1-2]。

由 Lagrange 方程可推导出 2K-H 行星轮系的动力学微分方程为

$$\begin{cases} \ddot{\theta}_s + \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{1}{M_s} + \frac{1}{M_c} \right) C_{spi} \dot{\theta}_{spi} + \frac{1}{M_c} C_{rpi} (\dot{\theta}_{sc} - \dot{\theta}_{spi}) \right] + \frac{1}{M_{pi}} [C_{spi} \dot{\theta}_{spi} - C_{rpi} (\dot{\theta}_{sc} - \dot{\theta}_{spi})] + \\ \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{1}{M_s} + \frac{1}{M_c} \right) K_{spi}(t) f(x_{spi}, b_{spi}) + \frac{1}{M_c} K_{rpi}(t) f(x_{sc} - x_{spi}, b_{rpi}) \right] + \\ \frac{1}{M_{pi}} [K_{spi}(t) f(x_{spi}, b_{spi}) - K_{rpi}(t) f(x_{sc} - x_{spi}, b_{rpi})] = \frac{T_d}{M_s r_{bs}} + \frac{T_l}{M_c r_c \cos \alpha}; \\ \ddot{\theta}_{sc} + \left(\frac{1}{M_s} + \frac{2}{M_c} \right) \sum_{i=1}^N C_{spi} \dot{\theta}_{spi} + \frac{2}{M_c} \sum_{i=1}^N [C_{rpi} (\dot{\theta}_{sc} - \dot{\theta}_{spi})] + \\ \left(\frac{1}{M_s} + \frac{2}{M_c} \right) \sum_{i=1}^N K_{spi}(t) f(x_{spi}, b_{spi}) + \frac{2}{M_c} \sum_{i=1}^N [K_{rpi}(t) f(x_{sc} - x_{spi}, b_{rpi})] = \frac{T_d}{M_s r_{bs}} + \frac{2 T_l}{M_c r_c \cos \alpha} \end{cases} \quad (3)$$

式中 t 代表时间; $K_{spi}(t)$, $K_{rpi}(t)$ 分别为太阳轮与行星轮、内齿圈与行星轮之间的时变啮合刚度; C_{spi} , C_{rpi} 分别代表太阳轮与行星轮、行星轮与内齿圈沿作用线的啮合阻尼(下标中的 s, pi, r, c 分别代表太阳轮、行星轮、内齿圈和保持架); $f(x, b)$

$$\begin{cases} I_s \ddot{\theta}_s + \sum_{i=1}^N (D_{spi} + P_{spi}) r_{bs} = T_d \\ I_{pi} \ddot{\theta}_{pi} - (D_{spi} - D_{rpi} + P_{spi} - P_{rpi}) r_{bpi} = 0 \\ (I_c + \sum_{i=1}^N m_{pi} r_c^2) \ddot{\theta}_c - \\ \sum_{i=1}^N (D_{spi} + D_{rpi} + P_{spi} + P_{rpi}) r_c \cos \alpha = -T_l \end{cases} \quad (1)$$

式中 I_s , I_{pi} , I_c 分别为太阳轮、行星轮和保持架的转动惯量; m_{pi} 为行星轮质量; α 为齿轮副啮合角; N 为行星轮数量; D_{spi} , D_{rpi} , P_{spi} , P_{rpi} 分别为太阳轮与行星轮、内齿圈与行星轮之间的黏性啮合力与弹性啮合力; T_d , T_l 分别代表驱动扭矩和负载扭矩; θ_s , θ_{pi} 和 θ_c 分别代表太阳轮、行星轮、保持架的自转角度; r_{bs} , r_{bpi} 分别为太阳轮和行星轮的基圆半径, r_c 为保持架的半径。

式(1)为 $N+2$ 个自由度的半正定、非线性二阶微分方程组,系统坐标含有刚体角位移。为了将刚体角位移转换为刚体的相对线位移,定义啮合线上太阳轮、行星轮之间,太阳轮和保持架之间的相对位移 x_{spi} , x_{sc} 为

$$\begin{cases} x_{spi} = \theta_s r_{bs} - \theta_{pi} r_{bpi} - \theta_c r_c \cos \alpha \\ x_{sc} = \theta_s r_{bs} - 2 \theta_c r_c \cos \alpha \end{cases} \quad (2)$$

设 M 为等效质量, $M \triangleq I/r_b^2$, $M_c = \frac{I_c}{r_{bc}^2} + \sum_{i=1}^N \frac{m_{pi}}{\cos^2 \alpha}$ 。

将式(2)代入式(1),并经化简可以得到动力学模型为

为非线性间隙函数, b 为间隙常数。

1.2 行星轮系太阳轮缺齿损伤动力学建模

2K-H 行星轮系中,太阳轮的啮合频率最高,转速最快,因此当装配不良出现偏载时容易导致局部缺齿损伤。损伤轮齿进入啮合周期时,会使这

一周期内的啮合刚度发生变化. 相对而言, 损伤引起的啮合阻尼变化对动力学模型的影响相对较小, 在此不予考虑. 设损伤引起的刚度周期性变化为 $\Delta K(f_d, t)$, 由此可以得到损伤太阳轮与行星轮的时变啮合刚度

$$K_{spi}(t) = K_0(f_0, t) + \Delta K(f_d, t) \quad (4)$$

式中 $K_0(f_0, t)$ 为正常状态下太阳轮与行星轮的时变啮合刚度, f_0 为啮合频率, f_d 为太阳轮轴转频. 啮合刚度的具体计算方法可参考文献[5], 文中不再赘述.

为了分析问题的方便, 假设缺齿损伤模式如图1所示, 设损伤严重度为 s , 可通过 h 和 b 两个参数来衡量. 图中, m 为齿轮模数, w 为齿宽. 为消除单位以便于计算, 设 $\tilde{h}_i = \frac{h_i}{2m}$, $\tilde{b}_i = \frac{b_i}{w}$, $\tilde{b}_i = \beta \tilde{h}_i$, $i = 1, 2, 3, \dots$, 那么 $s = s(\tilde{h}_i, \tilde{b}_i) = s(\tilde{h}_i, \beta)$, $\tilde{h}_i, \tilde{b}_i \in [0\%, 100\%]$. 本研究中取 $\beta = 1$.

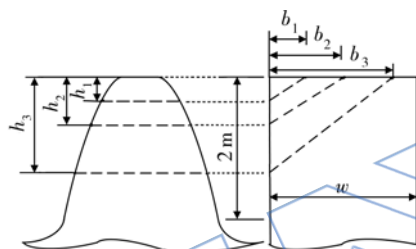


图1 损伤齿轮的侧向和轴向视图

Fig. 1 Lateral and axial view of damage gear tooth

1.3 2K-H行星轮系的动力学仿真

针对以上所建立的行星轮系动力学模型, 参数设置如表1所示, 采用4阶Runge-Kutta方法进行数值仿真, 仿真时间设为1s, 步长为0.0001.

表1 行星轮系动力学模型参数

Table 1 Model parameters of planetary gear sets

参数	数值	参数	数值
模数/mm	2.5	$Z_s = 28$	
		齿数	$Z_{pi} = 32$
			$Z_r = 92$
行星轮数	4	齿宽/mm	12
压力角/(°)	20	驱动扭矩/(N·m)	100
负载扭矩/(N·m)	220	材料	S45C
$s/\%$	[0 : 10 : 100]		

图2为太阳轮损伤动力学模型的时域和频域仿真信号. 时域中, 信号边缘光滑, 随着损伤的出

现及其严重度的提高, 信号幅值显著增加, 出现显著的幅值调制, 同时周期性冲击信号的幅值也不断变大, 如图2(a)所示. 频域中, 健康状态的信号频谱呈现出行星轮系的啮合频率及其倍频, 以及由刚度和间隙等非线性因素引起的边频, 随着损伤的出现, 啮合主频及倍频周围出现大量边带, 其中主频边带相对突出, 边带幅值随损伤严重度的提高而增加, 而主频幅值随损伤严重度的提高而降低, 如图2(b)所示.

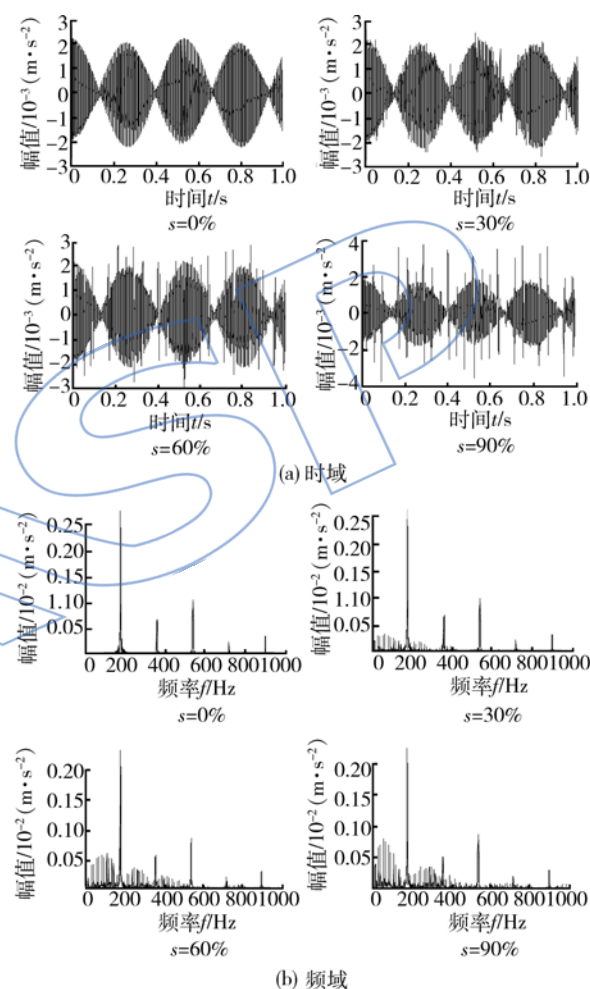


图2 动力学模型仿真信号的时域波形及频谱

Fig. 2 Simulation signal in time domain and frequency domain

2 损伤定量检测

2.1 损伤关联度分析

关联度分析是灰色系统理论分析和处理随机量的一种方法, 也是数据到数据的“映射”. 利用灰色理论识别行星轮系损伤的过程中所采用的判别函数即为未知模式与标准模式之间的关联度计算式[6]. 在做关联度分析之前, 必须建立参考模式,

即标准损伤模式,形成标准损伤模式序列矩阵 $[X_{0i}(k)]$,具体形式如下:

$$[X_{0i}(k)] = \begin{bmatrix} X_{01} \\ X_{02} \\ \vdots \\ X_{0n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{01}(1) & X_{01}(2) & \cdots & X_{01}(n) \\ X_{02}(1) & X_{02}(2) & \cdots & X_{02}(n) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{0n}(1) & X_{0n}(2) & \cdots & X_{0n}(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 $\eta_{ji}(k)$ 为待检模式序列 $[X_j]$ 与标准模式序列 $[X_{0i}]$ 在第 k 点的关联系数; β 为分辨系数,在此根据经验一般取 0.5,令 γ_{ji} 为 $[X_j]$ 对 $[X_{0i}]$ 的关联度,其计算式如下:

$$\gamma_{ji}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_{ji}(k) \quad (7)$$

2.2 损伤定量检测

目前有多种损伤特征,如峭度、FM0、FM4、NA4 和谱峭度 (spectral kurtosis, 简称 SK) 等^[7-12],成功应用于直升机传动系统的损伤检测和故障诊断,从中选择 FM4、SK 和主频边带特征 (分别记为 F_1 、 F_2 和 F_3) 进行损伤关联度分析. 首先将损伤按严重程度等分为 10 个区间, $S_i = [0.1(i-1), 0.1i]$, $i=1, 2, \dots, 10$, 计算仿真数据各损伤严重程度区间的特征值, $X_{0i}(F_k)$, 如表 2 所示; 矩阵 $[X_{0i}(F_k)]$ 即标准模式特征向量. 然后, 计算待检信号的特征值并得到相应的待检特征向量 $[X_j(F_k)]$. 根据式(5)、式(6)和式(7)计算待检特征向量与标准模式向量矩阵的关联度向量, $[\gamma_{ji}]$, $i=[1, 10]$. 关联度向量中,极大值 $\max\{\gamma_{ji}\}$ 所对应的 i 值即为相应的损伤严重程度区间.

表 2 仿真数据损伤严重程度区间的特征值
Table 2 Feature value of simulation data with multi-stage-severity

	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5
F_1	1.266	1.289	1.306	1.348	1.423
F_2	0.4000	0.4131	0.4211	0.4328	0.4439
F_3	0.2206	0.2551	0.2868	0.3128	0.3513
	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}
F_1	1.833	1.846	2.522	2.987	3.010
F_2	0.4726	0.5419	0.7325	0.8468	0.9030
F_3	0.4676	0.8096	0.9459	0.9819	1.0000

式中 k 为损伤严重度的级别数,对于损伤是否存在检测取 $k=2$,对于损伤定量检测取 $k \geq 3$,且检测精度随 k 的增大而提高; n 为每种标准模式所含的特征个数.

令 $X_j(k) = [X_j(1), X_j(2), \dots, X_j(k)]$ 为待检模式序列, $j \in \{1, 2, \dots, n\}$, n 为待检模式的个数; $[X_{0i}(k)]$ 表示第 j 个待检模式. 则关联系数的表达式如下:

$$\eta_{ji}(k) = \frac{\min_i \min_k |X_{0i}(k) - X_j(k)| + \beta \max_i \max_k |X_{0i}(k) - X_j(k)|}{|X_{0i}(k) - X_j(k)| + \beta \max_i \max_k |X_{0i}(k) - X_j(k)|} \quad (6)$$

3 案例验证

本研究采用美国 Spectra Quest 公司生产的直升机传动系统故障模拟试验台 (如图 3 所示), 在试验台第二级行星轮系的太阳轮上植入局部缺齿损伤,开展行星轮系损伤试验. 采用美国压电有限公司 (PCB Piezotronics Inc.) 生产的 SQI601 型压电加速度传感器采集振动信号. 加速度传感器安装于第二级行星轮系外壳顶部的中心位置,测量行星轮系垂直方向的振动.



图 3 直升机传动系统故障模拟试验台

Fig. 3 Test rig of fault simulation for helicopter transmission system

不考虑转速、扭矩和环境变化对损伤检测的影响,设置转速和负载为定值,驱动电机输入转速设为 1000 r/min,负载设为 50 N·m. 行星轮系的参数与表 1 相同,采样频率为 5 000 Hz,采样时间为 4 s.

从第二级行星轮系太阳轮缺齿试验数据中任意选取 4 组时域振动信号,试验中植入的损伤严重程度未知. 分别从各组振动信号中选取 20 个数据样本,计算各样本的特征值并取均值,如表 3 所示.

测试数据样本特征值与标准模式向量矩阵的关联度向量的归一化曲线如图 4 所示,可以看出,四个峰值点所对应的损伤严重程度区间分别为 $S_1[0\%, 10\%]$, $S_7[60\%, 70\%]$, $S_3[20\%, 30\%]$, $S_5[40\%, 50\%]$,由此判断 4 组数据来自于相应严

重度级别的损伤植入试验。

表3 测试数据样本的特征值均值

Table 3 Mean value of feature for test data samples

	S_{x1}	S_{x2}	S_{x3}	S_{x4}
F_1	1.277	1.845	1.323	1.448
F_2	0.4053	0.5320	0.4221	0.4528
F_3	0.2436	0.7308	0.2870	0.3524

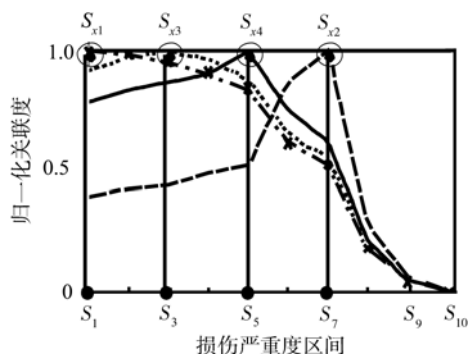


图4 测试数据样本的特征关联度曲线

Fig. 4 Relational ratio curve of feature for test data samples

为了验证损伤定量检测结果的准确性,根据试验记录,检查了以上4组试验中的植入损伤配件,四组配件的损伤严重度分别为 $S_1=0\%$, $S_2=66.7\%$, $S_3=25\%$, $S_4=47.9\%$,如图5所示,与检测结果完全相符。



图5 太阳轮缺齿损伤验证

Fig. 5 Validation of sun gear damages in tests

4 结论

针对行星轮系太阳轮缺齿损伤,本文研究了基于物理模型和灰色理论的损伤定量检测方法,得到以下结论:

1) 将物理模型与灰色理论相结合,可以进行

旋转机械典型损伤的定量检测;

2) 由于对损伤进行了简化,并忽略了实际系统振动中的载荷、扭矩及环境因素,下一步应研究以上因素对本方法的影响。

参考文献:

- [1] Ambarisha V K, Parker R G. Nonlinear dynamics of planetary gears using analytical and finite element models[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 302(3): 577-595.
- [2] Lin J, Parker R G. Sensitivity of planetary gear natural frequencies and vibration on modes to model parameters[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 228(1): 109-128.
- [3] Yuksel C, Kahraman A. Dynamic tooth loads of planetary gear sets having tooth profile wear[J]. Mechanism and Machine Theory, 2004, 39(7): 695-715.
- [4] Wu B, Saxena A, Khawaja T S, et al. An approach to fault diagnosis of helicopter planetary gears[C]// Proceedings of 2004 IEEE Autotestcon. San Antonio TX: IEEE, 2004: 475-481.
- [5] Charri F, Baccar W, Abbes M S, et al. Effect of spalling or tooth breakage on gearmesh stiffness and dynamic response of a one-stage spur gear transmission[J]. European Journal of Mechanics A/Solids, 2008, 27(4): 691-705.
- [6] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [7] Dempsey P J, Lewicki D G, Le D D. Investigation of current methods to identify helicopter gear health[C]// Proceedings of 2007 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, Montana: NASA, 2007: 1-13.
- [8] Barszcz T, Randall R B. Application of spectral kurtosis for detection of a tooth crack in the planetary gear of a wind turbine[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(4): 1352-1365.
- [9] Antoni J, Randall R B. The spectral kurtosis: application to the vibratory surveillance and diagnostics of rotating machines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(2): 308-331.
- [10] Samuel P D, Pines D J. A review of vibration-based techniques for helicopter transmission diagnostics[J]. Journal of Sound and Vibration, 2005, 282(1-2): 475-508.
- [11] Heng A, Zhang S, Tan A C C, et al. Rotating machinery prognostics: state of the art, challenges and opportunities[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(3): 724-739.
- [12] Pryor A H, Mosher M, Lewicki D G. The application of time-frequency methods to HUMS[R]. Washington D C: The American Helicopter Society's 57th Annual Forum, 2001.