

多特征指标锥齿轮健康状态评估方法研究



熊天阳*, 李新民, 金小强, 张先辉, 孙伟
中国直升机设计研究所, 江西 景德镇 333001

摘要:针对不同的故障状态,健康状态指标的敏感程度不同的问题,提出了一种基于时域同步平均的直升机尾传动锥齿轮健康状态评估指标方法。首先,采用时域同步平均的预处理方法,去除环境噪声的影响。然后对相应的指标计算,比较健康状态与故障状态的指标值的不同,从而得到特定故障状态的健康状态指标。最后通过对故障植入“盲”数据的分析,验证结果的有效性。试验表明,该方法对锥齿轮故障诊断有很好的效果。

关键词:健康状态指标; 锥齿轮; 尾传动系统; 故障植入试验

中图分类号: TP277

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2020.03.004

齿轮传动是机械传动中应用最广的一种传动形式。它的传动比较准确,效率高,结构紧凑,工作可靠,寿命长。直升机尾传动系统中的中减和尾减速器采用的都是锥齿轮传动,因为锥齿轮传动具有运行平稳,可变传动传递方向、传递大扭矩等优点。针对尾传动系统的锥齿轮进行研究对于提高直升机的安全性、减少维护成本等方面均有好处。

目前,国内外对齿轮的研究主要从时域、频域、时-频域开展,具体由相关的方法获得齿轮的啮合频率及其谐波成分以及转速频率及其谐波成分,分析正常状态与故障状态相应频率对应的幅值,验证方法的有效性^[1,2],但对于齿轮方面的研究还有其他思路,如由健康状态指标方法对其进行研究。麦克法登^[3]、扎克雷奇^[4]各自出版了相关领域的经典著作,提出了基于状态的齿轮故障振动特征分析;登普西等总结了识别齿轮健康状态的方法,着重讨论了这些方法在美国联邦航空局(FAA)和美国陆军直升机上的应用^[5],参考文献[6]~参考文献[8]中对基于振动的齿轮故障探测进行了改进,但检验故障探测算法的经验数据非常少。为此,研究各齿轮故障的状态指标(CI),并通过大量试验,研究各状态指标对故障的敏感程度。

同时,由于直升机尾减速器的结构特点,传感器不能直接安装在需测点而应装在减速箱壳体,致使早期故障特征

较为微弱,难以准确地将其从尾减速器的强噪声背景下提取出来,同时尾减速器壳体上传感器测得的振动信息相互干扰重叠导致其各部件的信息难以分离,时域同步平均(TSA)技术可以实现从混有噪声干扰的信号中提取周期性信号,提高信噪比。因此,本文提出了一种基于TSA的锥齿轮健康状态指标评估方法。首先,对原始信号进行TSA处理实现从混有噪声干扰的信号中提取周期性信号,提高信噪比。然后根据各健康状态指标对信号进行处理分析,得到指标对各故障状态的敏感程度。最后通过进一步的试验数据分析,验证结果的有效性。

尾传动系统的锥齿轮,因其安装位置、结构等因素的影响,常出现齿轮剥蚀、裂纹、断齿等故障^[9],本文主要研究各状态指标对这三类故障的敏感程度,从而得到可以评估锥齿轮故障的状态指标。

1 齿轮健康状态评估指标及提取方法

1.1 特征信号提取方法

为提取精确的特征信号信息,需首先对原始振动信号进行预处理。时域同步平均(TSA)是一种消除干扰噪声信号、提取那些和转动频率有关的振动分量、提高信噪比的工具。

收稿日期: 2019-12-13; 退修日期: 2020-01-14; 录用日期: 2020-01-30

*通信作者. Tel.: 0798-8465906 E-mail: xiangyata_17@163.com

引用格式: Xiong Tianyang, Li Xinmin, Jin Xiaoqiang, et al. Research on health condition evaluation method of bevel gear with multi-feature indicators[J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(03): 41-46. 熊天阳, 李新民, 金小强, 等. 多特征指标锥齿轮健康状态评估方法研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(03): 41-46.

如图1所示,设振动信号为 $x(t)$,采样的间隔为 Δ ,旋转频率是 f_0 。此时相应的离散信号为 $x_n = x(n\Delta)$,根据旋转频率 f_0 得到对应的振动信号,假设把 x_n 分成 p 段,则每一段的周期为 $T = 1/f_0$ 。若每段所采样的点数均为 N (如果不相等则通过重采样的方式保证),所以时域同步平均 \bar{x}_n ,就可以用式(1)表示:

$$\bar{x}_n = \frac{1}{p} \sum_{p=0}^{p-1} x_{n+pN} \quad (1)$$

时域平均后可以抵消掉外部环境等引起的噪声信号,得到只与转动频率有关的振动分量^[10]。

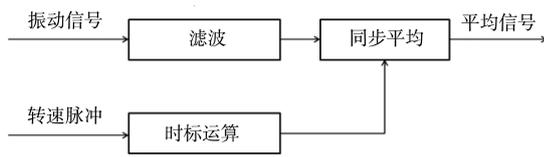


图1 时域同步平均原理图

Fig.1 Schematic diagram of the TSA

1.2 齿轮健康状态评估指标

国外常用健康状态评估的指标如下。

(1) 状态指数

均方根(RMS)对幅值变化量的统计分析,该参数的主要用途是用于监测整体振动水平:

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{raw}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{raw}}} x^2(i)} \quad (2)$$

式中: x 为一次采集的数据序列, i 为数据采集批次, N 为一次数据采集的次数。

当齿轮箱出现磨损或腐蚀损伤时,振动水平将会增大,是描述缺陷较为简单和直观的标志。

(2) FM4基于差分信号的状态指数

FM4可以表示差分信号的振幅分布与正常分布比较的测量值:

$$\text{FM4} = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^4}{\left\{ \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M (d_i - \bar{d})^2 \right\}^2} \quad (3)$$

式中: d_i 为差分信号中第 i 个数据, \bar{d} 表示差分信号的均值, N 为差分信号时间记录的总点数。

该参数假定处于健康状态的齿轮箱的差分信号具有高斯幅值分布,而从带缺陷轮齿的差分信号则拥有主峰值或多个主峰值,进而导致更少峰值的幅值分布,如果多个轮齿有缺陷,则数据分布变得平坦且峭度值降低。

(3) M6A基于差分信号的状态指数

M6A为差分信号的六阶中心矩同差分信号方差的三次方的比值:

$$\text{M6A} = \frac{N^2 \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^6}{\left\{ \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right\}^3} \quad (4)$$

M6A原理与FM4相似,适用于表面损伤类故障检测,比FM4对故障更敏感:

(4) M8A基于差分信号的状态指数

M8A为差分信号的八阶中心矩同差分信号方差的4次方的比值,适用于表面损伤类故障检测,比FM4、M6A对故障更敏感:

$$\text{M8A} = \frac{N^3 \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^8}{\left\{ \sum_{i=1}^N (d_i - \bar{d})^2 \right\}^4} \quad (5)$$

(5) 基于边频带分析的状态指数

数据算法1阶指数(DA1)检测信号中总体能量的增加情况,用来指示分布式的齿轮故障。

$$\text{DA1} = \text{RMS}(\text{TSA} - \text{mean}(\text{TSA})) \quad (6)$$

式中:TSA表示经过TSA处理后的数据。

2 齿轮健康状态评估指标敏感性试验

2.1 故障植入试验设计

2.1.1 齿轮故障植入试验设计

试验采用一对锥齿轮啮合的形式,故障齿轮为输出齿轮,主动轮齿数为31,从动轮齿数为28。

齿轮故障植入试验在90°夹角状态下的尾传动故障植入试验台上进行,控制转速4000r/min,输出端扭矩分别为总的输出扭矩的0%、25%、50%、75%、100%,输出端齿轮试验件分别为正常齿轮、深度25%裂纹故障齿轮、深度50%裂纹故障齿轮、5%齿面剥蚀故障齿轮、10%齿面剥蚀故障齿轮、齿形缺1/4断齿故障齿轮、齿形缺1/2断齿故障齿轮共7个试验件,35个试验状态,每个稳定状态下采集6min数据,采样率为2.5K。为了保证数据的准确性,各状态均有一次重复试验。

90°减速箱齿轮故障模拟件参数见表1,三维示意图如图2~图4所示。

2.1.2 齿轮故障植入试验测试

传感器的安装方案如图5所示。配有光电传感器、温度传感器分别对尾传动系统的输出转速、齿轮箱的输入、输

表1 被动锥齿轮故障模拟件参数表

Table 1 Fault seeded test piece parameters

序号	故障形式	设计尺寸
1	裂纹故障,深度25%	长20mm
2	裂纹故障,深度50%	长20mm
3	齿面剥蚀故障,5%	长10mm,宽2mm,深度0.188mm
4	齿面剥蚀故障,10%	长10mm,宽2mm,深度0.377mm
5	齿轮断齿故障,齿形缺1/4	大端断齿线长度3.53mm 小端断齿线长度2.37mm
6	齿轮断齿故障,齿形缺1/2	大端断齿线长度6.98mm 小端断齿线长度4.69mm



(a) 5% 齿面剥蚀故障 (b) 10% 齿面剥蚀故障

图2 齿面剥蚀故障件

Fig.2 Tooth surface denudation failure



(a) 1/4 断齿故障 (b) 1/2 断齿故障

图3 断齿故障件

Fig.3 Tooth broken failure



(a) 25% 裂纹故障 (b) 50% 裂纹故障

图4 裂纹故障件

Fig.4 Tooth cracked failure

出温度进行监控,加速度传感器分别采集齿轮箱输入、输出端齿轮、轴承的振动数据。数据采集系统为自研的8通道PXI动态采集系统。

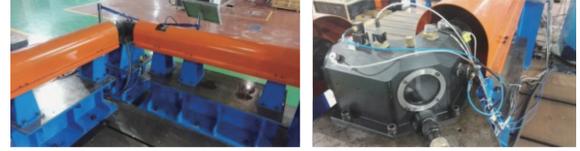


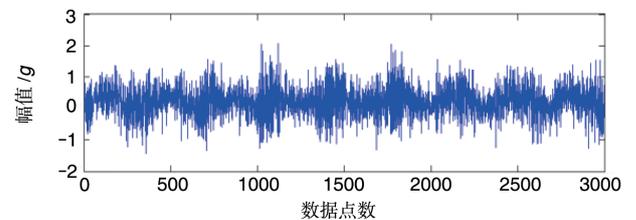
图5 传感器安装方案

Fig.5 Sensors installation scheme

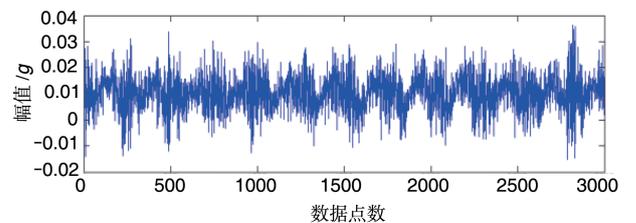
2.2 试验数据分析

以75%的扭矩,输出齿轮处的垂向振动数据为例,对试验数据进行预处理,采用每个状态的1min数据,重采样为每圈256个点,30圈为一组进行时域平均,共得到每个状态的10组数据。

如图6所示,与原始数据相比,TSA处理后的数据去除了背景噪声,更具有规律性。然后根据国外的健康状态指标,分析得到适合尾传动系统锥齿轮健康状态评估的指标。其结果如下:由图7可知,10组数据的正常状态与剥蚀、断齿故障状态的RMS取值范围有交集,与裂纹故障则无明显交集,即RMS对齿轮的裂纹故障十分敏感,且裂纹程度越大越敏感。同理可得出:FM4对断齿故障比较敏感(见图8),对剥蚀、裂纹故障不敏感;M6A对剥蚀故障更敏感(见图9),对断齿、裂纹故障并不敏感;M8A对剥蚀故障更敏感(见图10),对断齿、裂纹故障并不敏感;DA1对剥蚀、断齿故障并不敏感(见图11),对裂纹故障比较敏感。



(a) 齿轮剥蚀5%原始数据



(b) 齿轮剥蚀5%TSA处理数据

图6 TSA处理前后对比图

Fig.6 Comparison before and after TSA

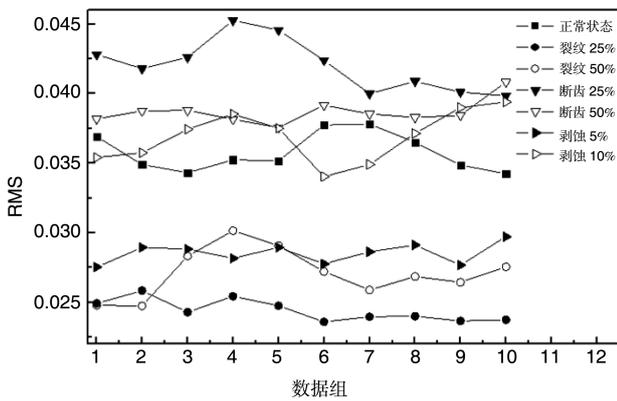


图7 RMS分析结果

Fig.7 RMS analysis result

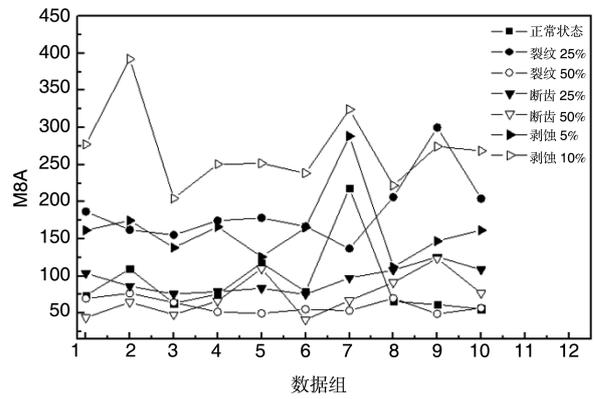


图10 M8A分析结果

Fig.10 M8A analysis result

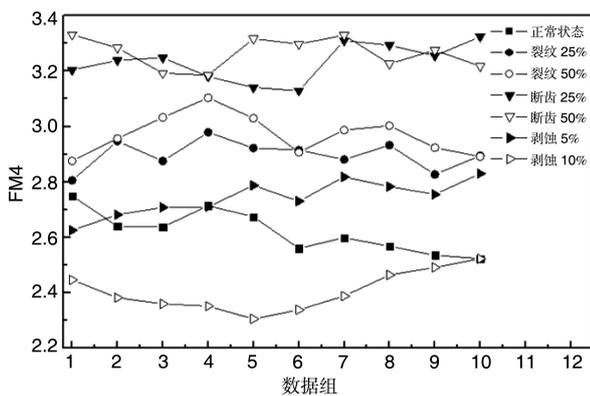


图8 FM4分析结果

Fig.8 FM4 analysis result

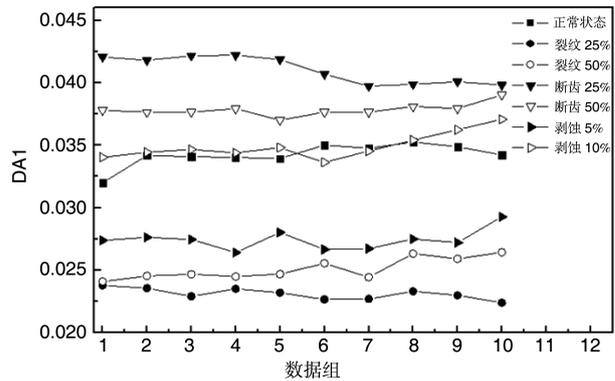


图11 DA1分析结果

Fig.11 DA1 analysis result

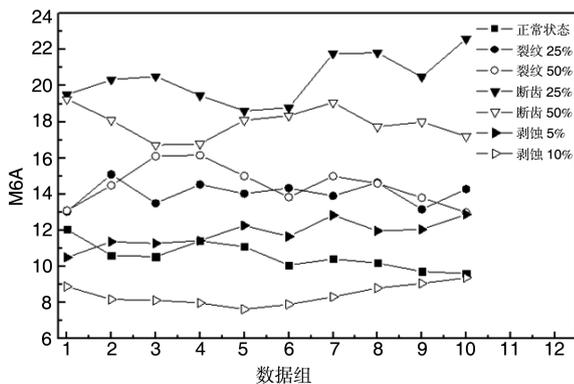


图9 M6A分析结果

Fig.9 M6A analysis result

3 “盲”数据分析

“盲”数据是指事先不知道其健康状态的一组数据。基于上述对尾传锥齿轮健康状态评估方法的研究,通过对“盲”数据的分析,可以判定该“盲数据”对应锥齿轮的健康

状态,并与真实的情况进行对比,验证评估方法的有效性。

图12~图16是“盲”数据的分析结果:正常状态与“盲”状态的M6A、M8A、FM4值相差不大,而RMS、DA1值两者差异较大,由上述研究可判定该“盲”状态应为锥齿轮的裂纹故障状态,与实际情况对比后发现,确为该故障状态。

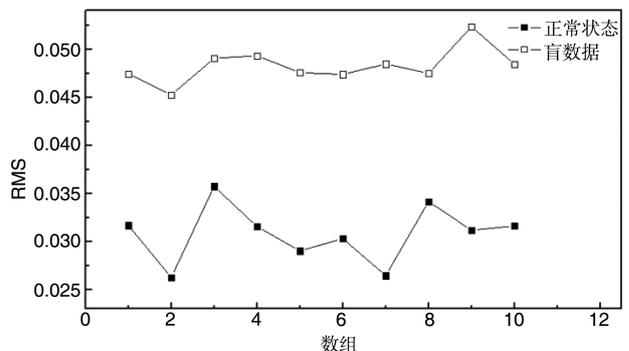


图12 RMS(“盲”状态)

Fig.12 RMS (“blind” state)

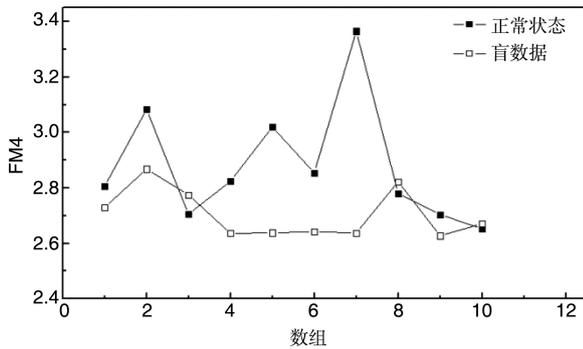


图13 FM4("盲"状态)

Fig.13 FM4 ("blind" state)

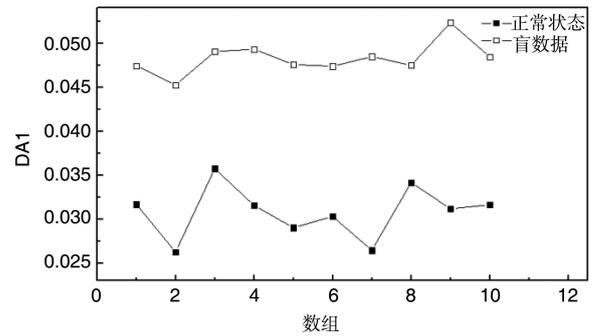


图16 DA1("盲"状态)

Fig.16 DA1 ("blind" state)

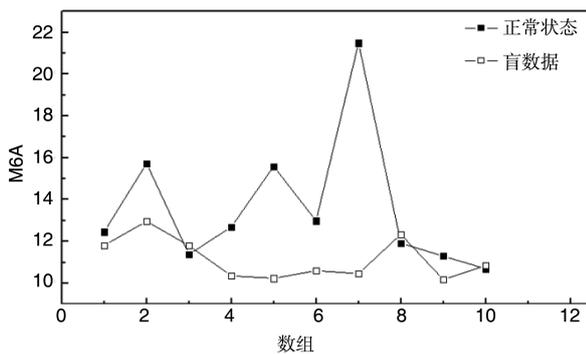


图14 M6A("盲"状态)

Fig.14 M6A ("blind" state)

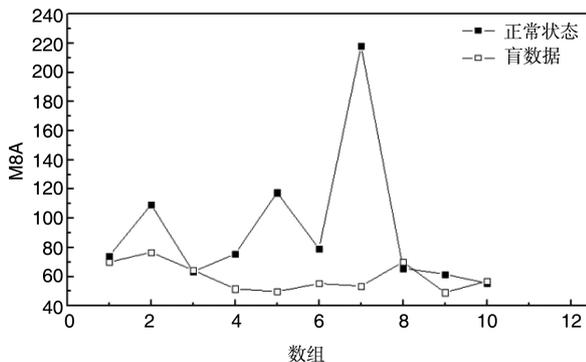


图15 M8A("盲"状态)

Fig.15 M8A ("blind" state)

4 结论

本文针对齿轮剥蚀、裂纹、断齿等故障模式,采用时域同步平均对故障植入试验原始振动信号进行去噪处理,对FM4、DA1等5种健康状态指标的敏感性进行了研究,并通过故障植入“盲”数据验证了方法的有效性:

(1)时域同步平均对齿轮振动数据具有较好的去噪作用。

(2)M6A、M8A对剥蚀故障比较敏感,可用于评估齿轮剥蚀故障。

(3)RMS、DA1对齿轮裂纹故障比较敏感,可用于评估齿轮裂纹故障。

(4)FM4对断齿故障比较敏感,可用于评估齿轮断齿故障。

综上, M6A、M8A对齿轮剥蚀, RMS、DA1对齿轮裂纹, FM4对断齿有较高的诊断能力。

AST

参考文献

- [1] 杨宇,潘海洋,李永国,等.一种增量式半监督VPMCD齿轮故障在线诊断方法[J].振动与冲击,2015,34(8):49-54.
Yang Yu, Pan Haiyang, Li Yongguo, et al. A novel incremental semi-supervised VPMCD gear fault on-line diagnosis method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(8) : 49-54. (in Chinese)
- [2] 边杰.基于LMD包络谱的齿轮剥落故障诊断[J].航空科学技术,2017,28(2):74-78.
Bian Jie. Gear spalling fault diagnosis based on LMD envelope spectrum [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(2): 74-78. (in Chinese)
- [3] McFadden P D. Detecting fatigue cracks in gears by amplitude and phase demodulation of the meshing vibration [J]. Journal of Vibration Acoustics Stress and Reliability in Design Transactions of the ASME, 1986, 108(2) : 165-170.
- [4] Zakrajsek J J. An investigation of gear mesh failure prediction techniques[R]. NASA-TM-102340, 1989.
- [5] Dempsey P J, Lewicki D G, le D D. Investigation of current methods to identify helicopter gear health [C]//Proceedings of the 2007 IEEE Aerospace Conference, 2007.

- [6] Parey A, Tandon N. Impact velocity modelling and signal processing of spur gear vibration for the estimation of defect size [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2007, 21 (1):234-243.
- [7] Hochmann D, Bechhoefer E. Gear tooth crack signals and their detection via the FM4 measure in application for a helicopter HUMS [C] // *Proceedings of the 2007 IEEE Aerospace Conference*, 2007.
- [8] Belsak A, Flaker J. Method for detecting fatigue crack in gears [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2006, 46(2): 105-113.
- [9] 丛家勇. 直升机尾传动系统的动力学分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
Cong Jiayong. Dynamics analysis of helicopter tail transmission system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008. (in Chinese)
- [10] 付海燕, 吉小军, 李兴旺. 基于TSA的直升机传动系统振动信号处理[J]. *计算机测量与控制*, 2014, 22(3):930-931.
Fu Haiyan, Ji Xiaojun, Li Xingwang. TSA-based helicopter transmission system vibration signal processing [J]. *Computer Measurement & Control*, 2014, 22(3):930-931. (in Chinese)

(责任编辑 王昕)

作者简介

熊天旻(1993-)男, 硕士。主要研究方向: 直升机健康监测研究。

Tel: 0798-8465906

E-mail: xiangyata_17@163.com

Research on Health Condition Evaluation Method of Bevel Gear with Multi-feature Indicators

Xiong Tianyang*, Li Xinmin, Jin Xiaoqiang, Zhang Xianhui, Sun Wei

China Helicopter Research and Development Institute, Jingdezhen 333001, China

Abstract: Aiming at the problem that health condition indicators have different levels of sensitivity to different failure modes, a multi-feature indicators bevel gear health assessment method is proposed. Firstly, the pre-processing method of time domain synchronization averaging is used to eliminate the influence of environmental noise. Then, by calculating the different characteristic indicators and comparing the difference between the health state and the fault state, the purpose of evaluating the health condition of the bevel gear is obtained. Finally, the method is verified by a set of fault-seeded blind data. Tests show that this method has a good effect on fault diagnosis of bevel gear.

Key Words: health status indicator; bevel gear; tail drive system; fault seeded test

Received: 2019-12-13; Revised: 2020-01-14; Accepted: 2020-01-30

*Corresponding author. Tel. : 0798-8465906 E-mail: xiangyata_17@163.com