

齿轮故障诊断中的单齿分析技术

孟 涛, 廖明夫

(西北工业大学 航空动力与热能工程系, 陕西 西安 710072)

摘要: 齿轮故障诊断通常先对振动信号进行时域同步平均降噪处理, 进而利用频谱分析或包络分析等方法, 得出故障特征信息。本文在此基础上提出了单齿分析技术。它将振动平均信号等距分段(所分段数与被监测齿轮齿数相等), 然后对分段信号进行频谱分析等。比较各段信号的异同以揭示故障齿的确切位置。该方法对齿轮的表面局部损伤故障的早期诊断和断齿故障早期诊断十分有效, 可以准确地辨别出有故障齿的位置, 为齿轮故障诊断提供了一种有效手段。

关键词: 航空、航天推进系统; 故障诊断; 齿轮; 数据分段; 单齿分析

中图分类号: TH132; V214.3⁺3

文献标识码: A

Single Gear Analysis Technique for the Detection of Gear Faults

MENG Tao, LIAO Ming-fu

(Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: This paper presents a procedure of single gear tooth analysis for early detection and diagnosis of gear faults. The objective of this procedure is to develop a method for more sensitive detection of the incipient faults and locating the faults in the gear. The main idea of the single gear tooth analysis is that the vibration signals collected with high sampling rate are divided into a number of segments with the same time interval. The number of the signal segments is equal to that of gear teeth. The analysis of individual segment reveals more sensitively the changes of the vibration signals in both time and frequency domain caused by gear faults. In addition, the location of failed tooth can be indicated in terms of the position of the segment that deviates from normal segments. A numerical simulated signal and an experimental investigation verified the advantages of the single gear tooth analysis.

Key words: aerospace propulsion system; diagnosis; gear; data segment; single gear tooth analysis

1 引言

对于航空发动机, 减速器是动力涡轮功率输出的主要环节。减速比高、负荷大, 属于故障多发

件。对减速器故障的诊断是航空发动机状态监测与故障诊断中的关键技术之一, 意义重大。振动分析广泛地应用于齿轮状态监测与故障诊断之中^[1~3]。由于齿轮的结构特点及齿轮故障的多样

收稿日期: 2002-11-18; **修订日期:** 2003-03-25

基金项目: 航空支撑科学基金资助项目(02B53004)

作者简介: 孟涛(1976-), 男, 河北盐山人, 西北工业大学航空动力与热能工程系博士生, 主要从事振动信号处理与旋转机械故障诊断等研究。

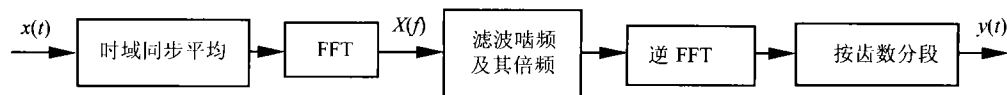
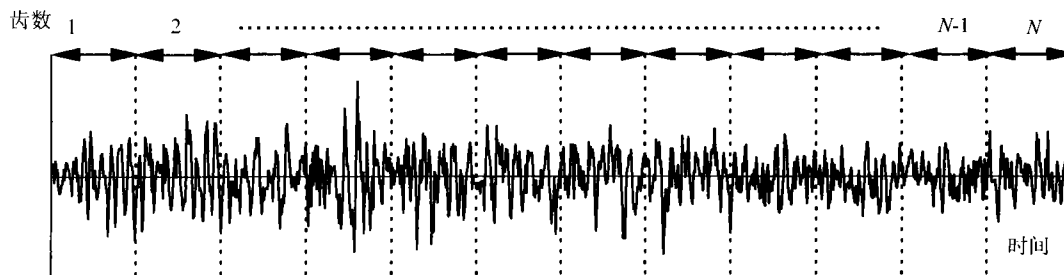


图 1 齿轮故障诊断单齿分析流程图

Fig. 1 The processing flow chart of the single gear tooth analysis technique

图 2 被监测齿轮时域同步平均信号按其齿数 N 等距分段示意图Fig. 2 Equally segmenting the signal of the interested gear in one revolution by the number N of the gear teeth

性,振动信号的规律性常常受到干扰,使得富有经验的诊断工程师也难以识别信号所反映的故障特征信息和解释信号各段之间的关系。通常将振动信号以某一感兴趣齿轮的旋转周期(即其所在轴旋转周期)进行时域平均,然后对此信号进行频谱分析^[4,5]。但是直接对振动信号进行频谱分析,故障早期特征有可能淹没在噪声中。因此,人们一直在寻求有效的信号处理方法^[6~10]。

为了能够在故障发生的初期对齿轮进行监测,并且寻求故障的确切位置,本文将阐述一种新的信号处理方法,即单齿分析技术。这种技术的核心是以较高的采样频率整周期采集振动信号,将时域同步平均信号等间隔分成与被监测齿轮齿数相等的段数。如果所监测齿轮无故障,则各段信号无论在频域还是时域波形类似,至少各段的相异程度在允许的范围内。如果所监测齿轮有点蚀、裂纹等局部故障发生,存在故障的一段信号无论在时域还是频域都会与其它段有较大区别。为了考核单齿分析技术的可行性,本文进行了仿真验证,并在 JZQ-250 型齿轮箱上做了实验验证。

2 单齿分析技术

当齿轮发生表面损伤或轻微崩齿时,振动信号中常常混有脉冲信号。这就是单齿分析技术得以实现的基础。故障发生初期,脉冲幅值较小,在噪声的干扰下,不易识别。对信号的降噪处理常常采用时域同步平均法或者是自相关法。自相关降

噪后表征故障的脉冲信息可能消失;而时域同步平均虽可能降低脉冲的幅值,但不可能完全消除脉冲信息。

图 1 是齿轮故障诊断中实现单齿分析技术的信号流程图。由齿轮箱箱体测得的振动信号 $x(t)$ 首先需在时域上平均降噪,然后将此平均信号经 FFT 转换到频域 $X(f)$,滤除啮合频率及其倍频,得到残余振动信号。将此残余振动信号经逆 FFT 变换到频域。把时域信号按所检测齿的齿数进行

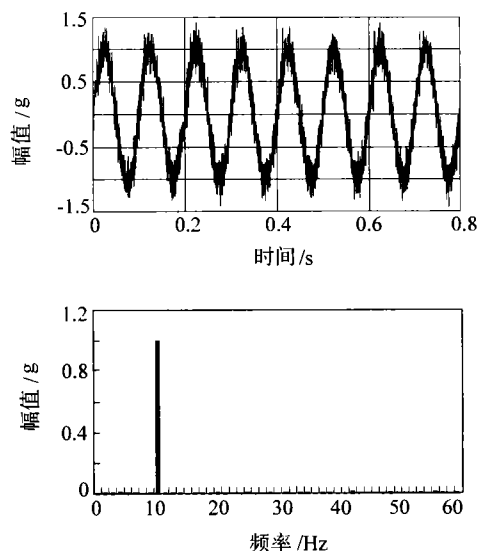


图 3 模拟信号的时域波形及频谱

Fig. 3 The waveform and its spectrum of the simulated signal

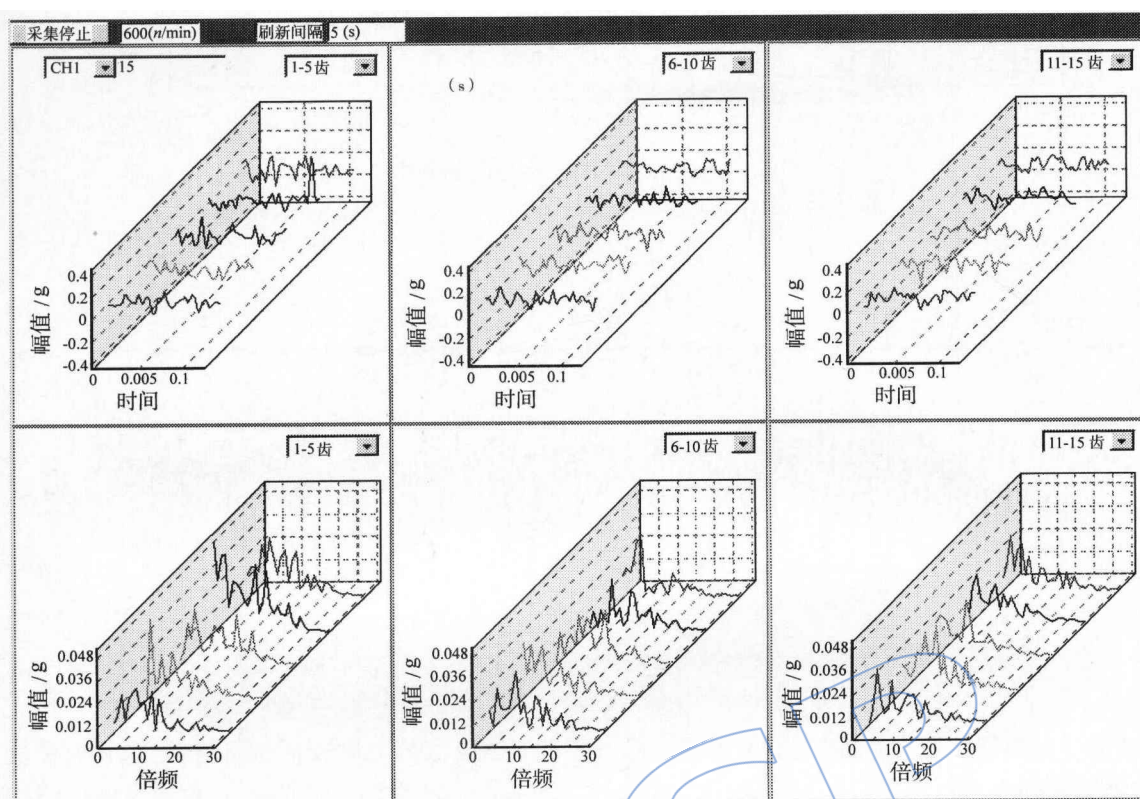


图 4 利用单齿分析技术处理仿真信号

Fig. 4 Single gear tooth analysis on the simulated signal

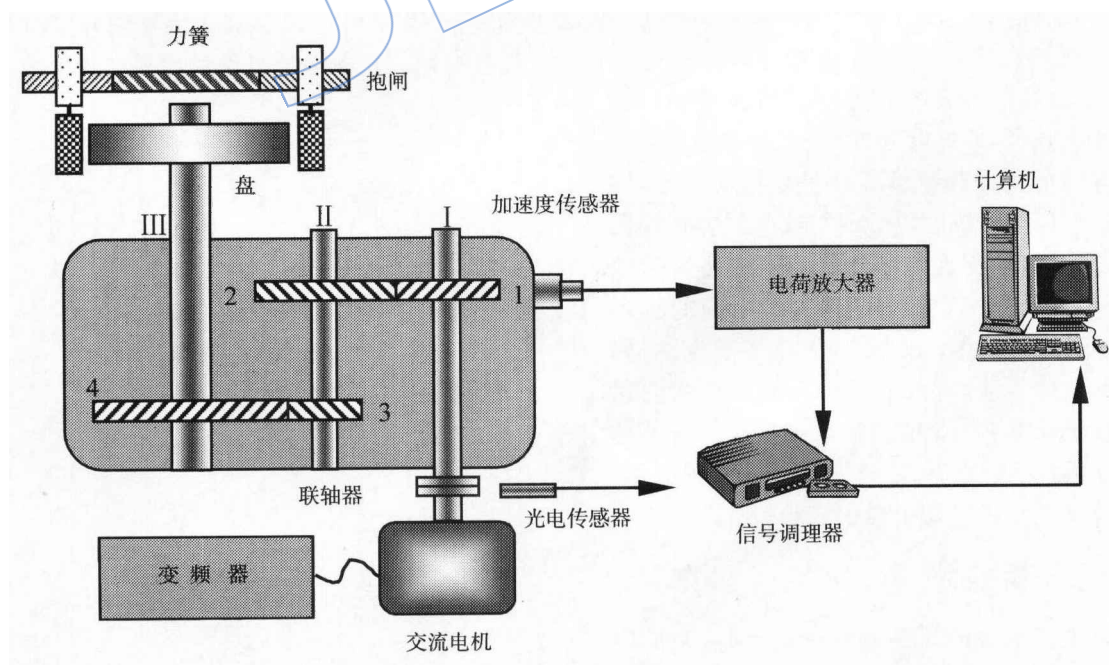


图 5 齿轮实验装置图

Fig. 5 Schematic diagram of gear test rig

等距分段处理,见图 2。在作频谱分析之前,每段应进行适当的插值以满足数据点数的要求^[11],本文中采用线性插值方法。通过比较各段的在时域波形及频谱,将会确定故障齿的位置。

3 数字仿真验证

为了验证单齿分析技术的可行性,采用一数字仿真信号,它由正弦信号、白噪音及脉冲信号构成,三者的幅值分别是 1, 0.15, 0.5。脉冲每周期发生一次。本文对此合成信号采样 8 周期,其时域波形及其频谱见图 3。从仿真信号频谱上根本无法得知脉冲的存在,而时域波形中脉冲也被噪声淹没。对此信号采用单齿分析技术进行分段处理,这里将信号分成 15 段,其各段时域波形和频谱见图 4。图 4 中,上面的 3 小图为各段时域波形,下面 3 小图为相应的频谱。信号各段顺序为由上到下,由左到右。可以清楚的看到,第 2 段数据在时域有一尖峰,其相应频谱也较其它各段峰值突出。可见,单齿分析技术对信号的局部突变有很高的灵敏度,这种特性可在齿轮故障诊断中加以利用。

4 实验装置

本文应用的实验装置如图 5 所示。它由 JZQ-250 型齿轮减速机、交流驱动电机、变频器和抱闸等部件组成。齿轮 1 至 4 的齿数依次为 35, 64, 18 和 81。减速机和驱动电机均固定在平台上。变频器可调整电机转速在 100~3000 r/min 范围内运转。抱闸系统为齿轮箱提供扭矩负载,其大小可由系统中的力簧调整。这种加载系统与工业中齿轮箱的负载类似,且结构简单。联轴器上贴有反光纸,作为齿轮分段的起始标志,光电传感器为振动采集提供相位信号并且测量电机转速。由加速度传感器测得的箱体振动信号经电荷放大器,送至 CAMD-6100 型信号调理器预处理,最后由装于计算机的自行开发的“齿轮 & 滚动轴承状态监测与故障诊断软件包”分析。

5 实验验证

拆开齿轮箱,在齿轮 1 第 24 齿(以光电标记为起始齿记数)侧面节圆附近制造一凹坑($\Phi = 1.2 \text{ mm}$)。

测试时,电机转速为 1258 r/min。连续采样 16 周期,每周期 1024 点。各轴转频及各齿轮副啮合频率如下:

$$f_1 = 20.97 \text{ Hz} \quad f_2 = 11.47 \text{ Hz}$$

$$f_3 = 2.55 \text{ Hz}$$

$$f_{M1} = 733.83 \text{ Hz} \quad f_{M2} = 206.4 \text{ Hz}$$

图 6 为加速度传感器测得的箱体振动信号的时域波形。图 7 为振动同步平均信号。图 8 为振动信号的频谱。可以看出 1、2 齿轮副啮合频率 $f_{M1} = 733.83 \text{ Hz}$ 振动剧烈,可以初步估计为 1、2 齿轮副中某一部件出现异常。下面将利用单齿分析技术对齿轮 1 进行分析。

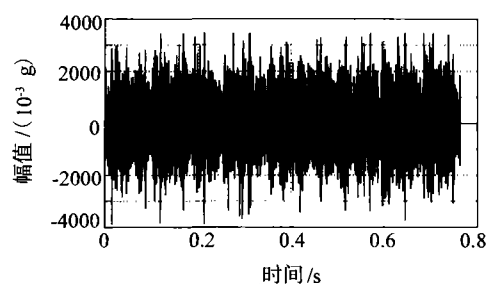


图 6 齿轮箱体振动信号时域波形
Fig. 6 Vibration signal measured from gearbox housing

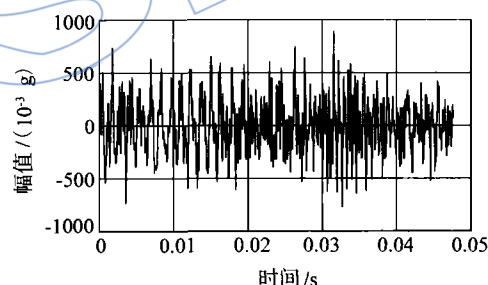


图 7 齿轮箱振动同步平均信号
Fig. 7 Synchronous signal averaging

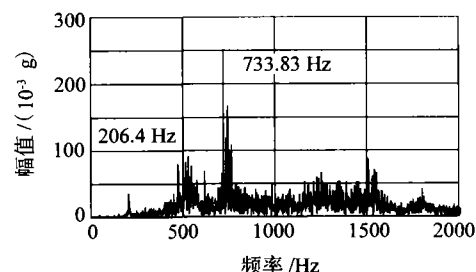


图 8 齿轮箱振动信号频谱

Fig. 8 The spectrum of the vibration signal

图 9 为齿轮箱体振动的单齿分析结果(上各段为时域波形,下为相应频谱)。图 9 中,上面两图示出了第 1~15 段及第 31~35 段的时域波形及频谱(由于版面的原因第 1~10 段重复显示);下

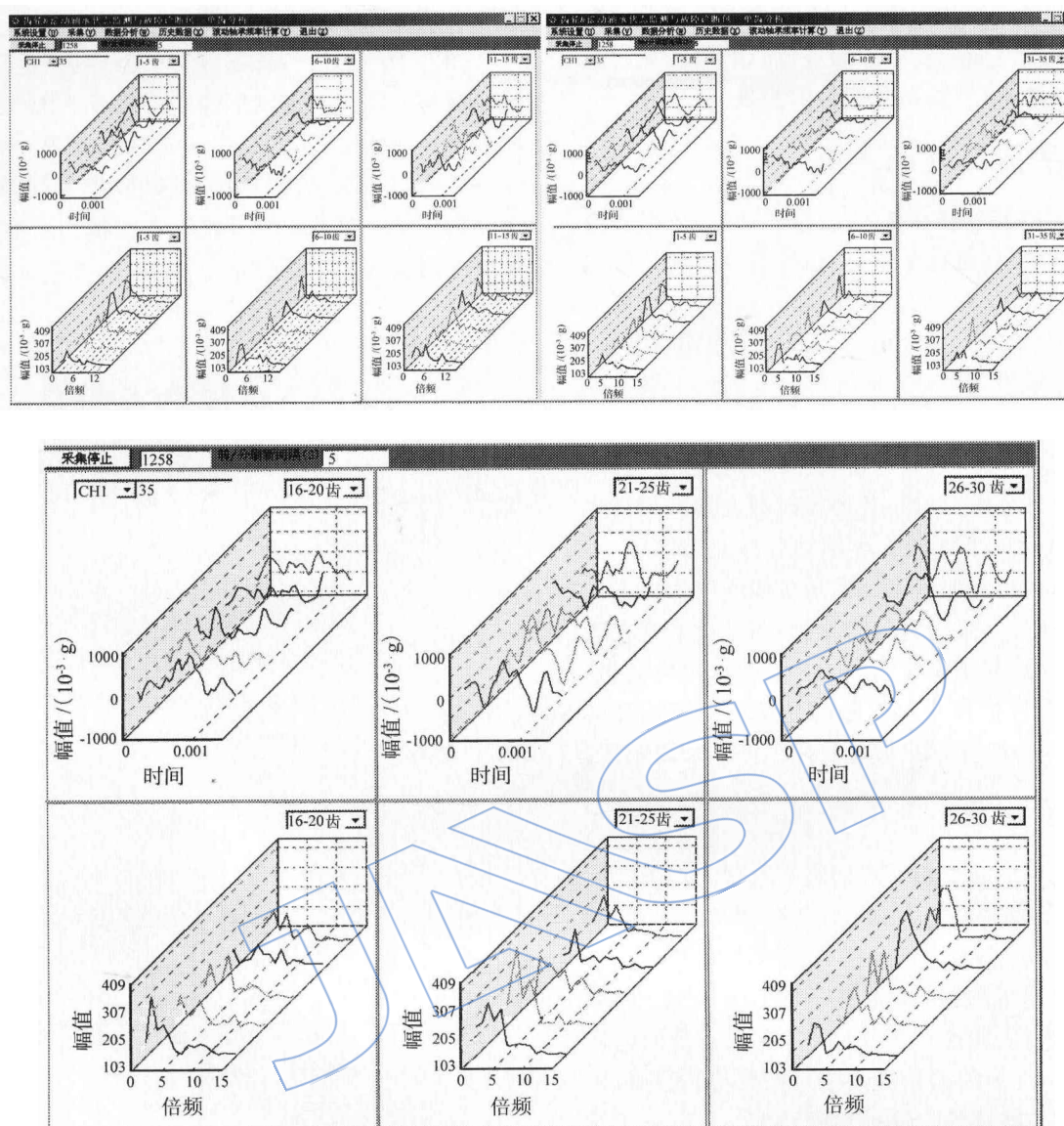
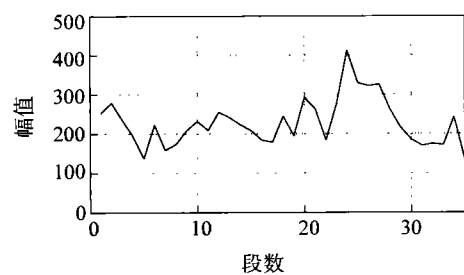
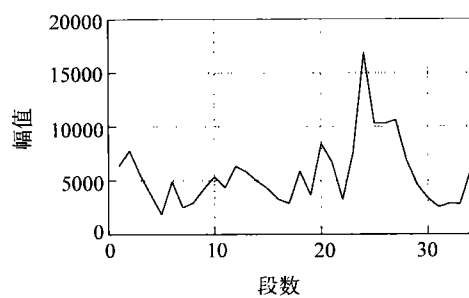


图 9 齿轮箱体振动单齿分析

Fig. 9 Single gear tooth analysis on the vibration signal

图 10 各段残余振动信号的均方根值
Fig. 10 The RMS of vibration signal图 11 各段残余振动信号的方差
Fig. 11 The variance of the vibration signal

方的一图为第 16~30 段的时域波形及频谱。比较第 1~35 段的时域波形及频谱,发现 24 段时域波形变化剧烈,且频域峰值最为突出。由此判定第 24 齿存在故障,这与预期结果相同。这也可以从各段的均方根值(见图 10)与方差(见图 11)中得到证实。由于图 10 和图 11 为统计特性曲线,因只需了解其相对大小,故图中没有给出量纲。

6 结 论

本文建立了将单齿分析技术应用于齿轮故障诊断的方法。数字仿真结果验证了这种诊断方法原理的可行性,实验结果证实了该诊断方法的有效性。该方法具有可以准确地辨别出故障齿位置,以及诊断早期齿轮故障的优点。

参考文献:

- [1] Randall R B. A New Method of Modelling Gear Faults[J]. Trans. ASME, J. Mech. Des., 1982, 104: 259—267.
- [2] WANG Wen-yi, Albert K Wong. Some New Signal Processing Approaches for gear Fault Diagnosis[A]. ISSPA'99 Brisbane in Australia[C]. 1999: 22—25.
- [3] LI Hui-bin. Research on the Gear Vibration and on-Line Monitoring and Fault Diagnosis of Gear Reducer[D]. Dissertation of Tsinghua University, 1999.
- [4] WANG Wen-yi. Early Detection of Gear Tooth Cracking Using the Resonance Demodulation Technique[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(5): 887—903.
- [5] McFadden P D, Toozhy M M. Application of Synchronous Averaging to Vibration monitoring of Rolling Element Bearing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14(6): 891—906.
- [6] McFadden P D, Smith J D. A Signal Processing Technique for Detecting Local Defects in a Gear from the Signal Average of Vibration[J]. Proc Instn Mech Engrs, 1985, 199(C4): 287—292.
- [7] 韩捷, 张琳娜. 齿轮故障的振动频谱机理研究[J]. 机械传动, 1997, 21(2): 21—24.
- [8] Randall R B. The Relationship Between Spectral Correlation and Envelope Analysis in the Diagnostics of Bearing Faults and other Cyclostationary Machine Signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15(5): 945—962.
- [9] Katherine McClintic. Residual and Difference Feature Analysis with Transitional Gearbox Data[A]. Proceedings of 54th Meeting of the Society for MFPT[C]. 2000: 635—645.
- [10] Mitchell Lebold. Review of Vibration Analysis Methods for Gearbox Diagnostics and Prognostics[A]. Proceedings of the 54th Meeting of the Society for MFPT[C]. 2000: 623—634.
- [11] McFADDEN P D. Interpolation Techniques for Time Domain Averaging of Gear Vibration[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1989, 3(1): 81—87.