

文章编号: 1000-8055(2006)04-0727-5

信号周期分段处理法诊断单级传动齿轮副故障

陈 进, 廖明夫, 陈 刚

(西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 为了诊断单级传动齿轮副故障, 本文提出信号周期分段处理的方法。首先同步整周期采集振动信号, 然后对采集的振动信号做时域平均, 进行降噪和凸显故障脉冲的处理。利用周期分段处理法, 将振动平均信号等距分段, 分别对各段信号进行频谱分析。比较各段信号的时域波形和频谱的异同, 可以准确诊断出单级传动齿轮副中同步齿轮故障位置, 且还能诊断出非同步齿轮故障位置。数字仿真试验以及模拟故障实验结果都证实了信号周期分段处理法诊断齿轮故障的可行性和有效性; 它为诊断单级传动齿轮副故障提供一种有效手段。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 时域平均; 残余信号; 故障诊断; 周期分段

中图分类号: V233.1

文献标识码: A

Signal periodic segment processing technique for diagnosing gear pairs faults

CHEN Jin, LIAO Ming-fu, CHEN Gang

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: This thesis presented a technique for diagnosing gear pairs faults and introduced the procedure in detail. When there is a fault in the gear pairs, there will be some pulse (s) in the vibration signal which is picked with high sampling rate on the gearbox. Firstly, the vibration signal was processed by time domain averaging to weaken noise. Then the average signal was divided in equal segments with the same number of the gear teeth which was to be diagnosed in the gear pairs. The analysis of individual segment reveals more sensitive changes of the vibration signals in both time and frequency domain caused by gear faults. Further more, the location of the failed gear tooth can be identified in terms of the position of the segment which is different from normal segment. Both the numerical simulated signal and the experimental investigation verify the availability of the signal periodic segment processing technique.

Key words: aerospace propulsion system; time domain average; residual signal; diagnose; periodic segment

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。由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, 减速器的齿轮常常会发生崩齿、齿面破损等局部缺陷故障。齿轮上的局部缺陷在齿轮每转一周时产生一个脉冲激励^[1], 这样就使得齿

轮振动信号中含有冲击脉冲信息。

振动信号中的脉冲信息使得振动信号具有非平稳性。冲击振动虽然具有较大的幅值, 但是其能量在振动总能量中所占比例较小, 故障信息可能淹没在噪声之中。可将信号分段, 使得每段信号近似平稳, 比较各段时域波形和频谱的异同, 找

收稿日期: 2005-09-09; 修订日期: 2005-12-01

作者简介: 陈进(1980-), 男, 湖北枣阳人, 西北工业大学动力与能源学院硕士生, 主要从事信号处理和旋转机械故障诊断研究。

出故障部位所在。

同步整周期采集减速器的振动信号,对振动信号直接采用传统频谱分析,只能诊断同步齿轮的故障。实际情况,故障既可能出现在同步齿轮上,也可能出现在非同步齿轮上,甚至可能同时出现在两个齿轮上。

目前诊断齿轮箱中单个齿轮故障的方法和手段较多,相关的文献和论文国内外很多,其中较为典型的有单齿分析技术^[2];而诊断齿轮副故障,尤其对单级传动齿轮副中两个齿轮进行准确诊断的方法在国内外的文献中并不多见。

本文提出的周期分段处理法,基于单齿分析技术,通过对获取的齿轮箱振动信号分析处理,达到对单级传动齿轮副中同步和非同步两个齿轮的准确诊断,还能确定故障位置。

1 信号周期分段处理方法

本方法的适用对象是单级传动的齿轮副。设定该齿轮副有大、小两个齿轮,且信号采集与小齿轮同步。

以小齿轮轮轴的某一点为相位零点,以较高的采样频率同步整周期采集齿轮箱振动信号,然后滤除小齿轮转频、啮合频率,求得一次残余振动信号 $x_r(t)$ 。将 $x_r(t)$ 进行时域同步平均,得 $\bar{x}_{Tr}(t)$,按小齿轮的齿数进行等距分段处理。如果小齿轮无故障,则各段信号无论在时域还是在频域均类似,至少各段的相异程度在允许的范围内。如果小齿轮有点蚀、崩齿、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在频域都会与其它段信号有较大区别。从一次残余振动信号 $x_r(t)$ 中滤除小齿轮故障信息,得二次残余振动信号 $x_{rs}(t)$ 。此残余信号主要包含大齿轮故障信息。从二次残余振动信号 $x_{rs}(t)$ 中获取大齿轮的同步整周期振动信号,依照大齿轮周期做时域平均 $\bar{x}_{rs}(t)$,然后按大齿轮齿数进行等距分段,再对各段信号进行频谱分析,比较各段频谱和时域波形的异同。如果各段的相异程度在允许的范围内,则无故障;反之,则大齿轮存在故障。

2 数字仿真验证

2.1 构造仿真信号

信号周期分段方法是否可行,在正式做实验前做数字仿真信号,通过对仿真信号的分析处理来验证。选取正弦信号、周期脉冲信号、非周期脉冲信号以及高斯白噪音信号,4 种信号构成需要

的仿真信号,前 3 种信号的幅值分别为 1,0.5 和 0.5,正弦信号的频率为 20 Hz。因为信号采集与小齿轮转速同步,小齿轮有故障,则会产生周期脉冲;与小齿轮啮合的大齿轮齿数较多,若有局部故障只会小齿轮转动若干周期后产生一次脉冲,并且是非周期的。这里用周期脉冲表示小齿轮故障,非周期脉冲表示大齿轮故障。

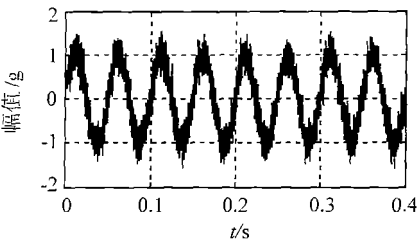


图 1 含脉冲和噪声的仿真信号时域波形

Fig. 1 Waveform of the simulated signal which only includes pulse and noise

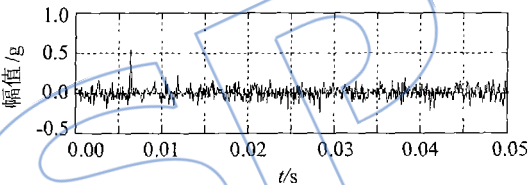


图 2 一次残余仿真信号的时域同步平均

Fig. 2 First residual simulated signal in one revolution by synchronous averaging

图 1 为加入高斯白噪音的仿真信号的时域波形,由于受噪声的干扰,在时域波形上不能识别脉冲信号。

2.2 一次残余信号的周期分段处理

将振动信号经 FFT 转换到频域,滤除信号的转频后,再将此信号经逆 FFT 变换到时域,得到一次残余信号。相对于原始信号,残余信号中脉冲信号被凸显了,易于辨识故障脉冲。

由文献[3]知,将信号按周期分为 N 段,将各段信号累加平均,经过 N 次平均后,噪声能量降低为原来的 $1/\sqrt{N}$ 。小齿轮故障产生的脉冲是周期的,对一次残余信号做时域同步平均,可以凸显同步的小齿轮故障信息。大齿轮故障信息是非同步的,将会和噪声一起,被抑制。图 2 为一次残余仿真信号的时域同步平均,在图中只能观察到小齿轮的故障脉冲,而不能看到大齿轮的故障信息,噪声信号被大大削弱,提高了信噪比。

一次残余仿真信号经过时域同步平均之后,对此信号采用周期分段处理技术,这里将信号分成 16 段,图中给出了 1~15 段信号的分析结果,各段信号时域波形和频谱见图 3。图 3 中上面为

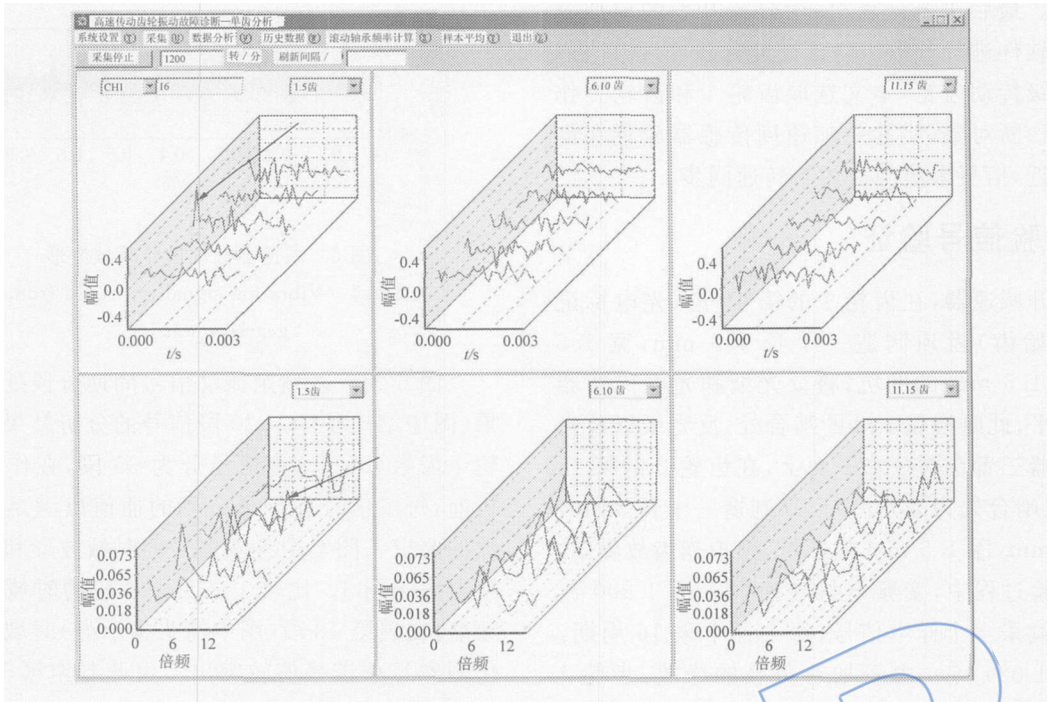


图 3 一次残余仿真信号的周期分段处理

Fig. 3 Periodic segment processing on the first residual simulated signal

各段信号的时域波形图,正下方为各自对应的频谱图。各段信号的顺序为从上到下,由左到右。可以很清楚的看到,第 3 段数据在时域有一个尖峰(图中箭头指示处),相对应的频谱峰值较之其它各段频谱的要突出许多。这说明,周期分段处理方法对信号的局部突变有很高的灵敏度,这种特性可以在齿轮故障诊断中加以利用。

2.3 二次残余信号的周期分段处理

要实现对大齿轮的故障诊断,就要排除小齿轮故障脉冲的干扰,凸显大齿轮的故障信息。要滤除小齿轮的故障信息,采用一次残余信号与其时域同步平均信号逐周期相减的方法,从而得到只剩下大齿轮故障信息的二次残余信号。设定小齿轮和大齿轮的齿数分别为 16 和 20,小齿轮旋转 8 个周期,则大齿轮同时旋转 6 个多周期。从二次残余信号中取出 6 个整周期的信号,做时域平均,得到图 4 所示的波形。从图中观察到大齿轮的故障脉冲。

对二次残余信号的时域平均信号依然采用周期分段处理技术,按设定的大齿轮齿数分为 20 段。依照图 3 所示的方式做信号分析处理,同样可以清楚的看到一段信号在时域有一个尖峰,其对应的频谱峰值也较突出。这说明,对二次残余振动信号的周期分段分析,可以用来诊断单级传动齿轮副中大齿轮的故障。

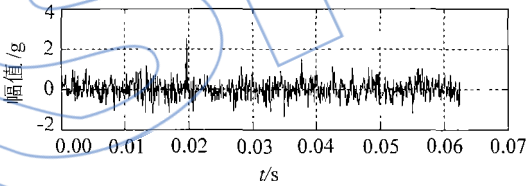


图 4 二次残余信号的时域平均

Fig. 4 Second residual simulated signal in one revolution by synchronous averaging

3 实验装置介绍

齿轮故障诊断实验装置由 JZQ-250 型齿轮减速器、交流驱动电机、变频器和 TJ2-100 型制动器等部件组成。减速器内有 4 个齿轮,与联轴器相连的齿轮记为齿轮 1,与齿轮 1 啮合的齿轮记为齿轮 2,依次类推记为齿轮 3、齿轮 4。齿轮 1 至 4 的齿数依次为 35, 64, 18 和 81。减速器、电机和制动器均固定在实验台上。变频器控制和调整电机转速。齿轮箱的扭矩负载由制动器提供,负载的大小可通过制动器上的力簧调整。这种加载负载的方式与实际工况相似,且结构简单。联轴器上贴有反光纸,与光电传感器配合使用。光电传感器为振动采集提供键相信号,同时测量轴 I 和电机的转速。加速度传感器测得的振动信号经电荷放大器,送至 CAMD-6100 型信号调理器

预处理。最后送至计算机,用自行开发的周期分段处理软件进行分析。由于周期分段处理方法适用于单级传动齿轮,本文选取齿轮 1 和齿轮 2 作为故障诊断对象,实验中加速度传感器放置在齿轮 1 附近,信号采集与齿轮 1 转速同步。

4 实验信号验证

拆开减速器,在齿轮 1 的第 18 齿(光电标记处为起始齿)齿顶制造一个长 2.5 mm,宽 1.5 mm,深 1.5 mm 的凹坑;将反光纸和光电传感器放置水平,此时齿轮 1、2 的啮合处,反光纸以及光电传感器三者同一水平面上,在齿轮 2 的第 16 齿(齿轮啮合处为起始齿)齿顶制造一个长 2 mm,宽 1.5 mm,深 1.5 mm 的凹坑,模拟崩齿故障。

实验过程中,变频电机转速设定为 1 200 r/min,连续采多个样本信号,每个样本采 16 周期,每周期 1 024 点。由于加有负载的缘故,齿轮 1 运转稳定后转速略低于电机设定转速,且转速有轻微波动。图 5 是振动信号的时域波形,测取转速为:1 197 r/min。

将振动信号转换到频域,滤除转频、啮合频率,得到一次残余信号,再做时域同步平均。下面将利用周期分段处理方法对一次残余信号的时域平均进行分析,诊断出故障位置。同上,要先对各段信号进行插值满足需要的点数

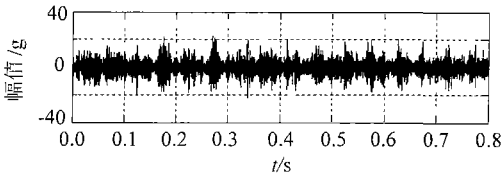


图 5 减速器振动信号时域波形
Fig.5 Vibration signal measured from gearbox housing

图 6 为一次残余振动信号周期分段处理的结果,图中给出了 16~ 30 段信号的分析结果。按齿轮 1 齿数(35 齿)将信号分为 35 段,在作频谱分析前,每段信号进行了适当的插值以满足数据点数的要求。图 6 中各段信号的时域波形和频谱观察方法同图 3。比较 1~ 35 齿各段的时域波形和频谱,发现第 18 段(图中箭头指示处)时域波形变化剧烈且频谱峰值较突出。由此判定第 18 齿存在故障,这与模拟故障位置相符。从一次残余信号中除去齿轮 1 的故障脉冲,得到二次残余信号。齿轮 1 和齿轮 2 的齿数分别为 35 和 64,齿轮 1 旋转 16 个周期,则齿轮 2 同时旋转 8 个多周期。从二次残余信号中取出 8 个整周期的信号,做时域平均,得到图 7 所示的波形。

将三次残余信号按齿轮 2 齿数分为 64 段,(2 的 N 次幂),然后进行周期分段处理。图 8 为

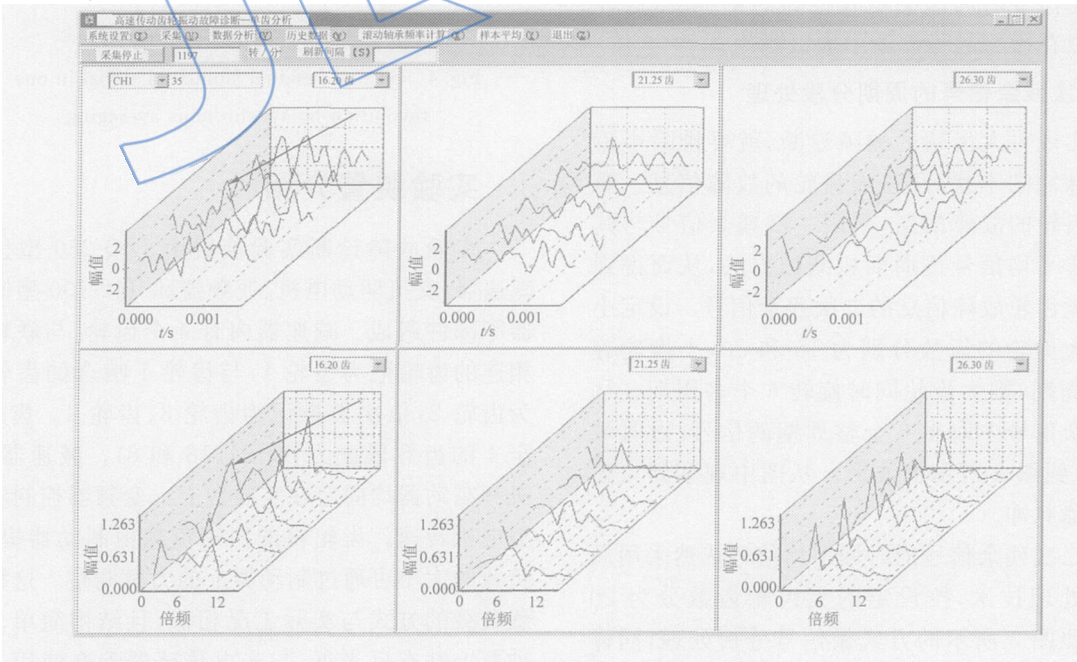


图 6 一次残余信号的周期分段处理
Fig.6 Periodic segment processing on the first residual vibration signal

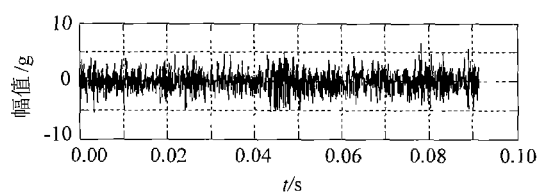


图 7 二次残余信号时域平均

Fig. 7 Second residual vibration signal in one revolution by synchronous averaging

二次残余振动信号周期分段处理的结果, 图中给出了 31~ 45 段信号的分析结果。比较各段的时域波形和频谱, 发现第 34 段(图中箭头指示处) 时域波形变化剧烈且频谱峰值较突出。

由于齿轮 1、2 的齿数分别为 35 和 64, 当齿轮 1 旋转 $2m(m = 1, 2, 3, \dots)$ 转, 则齿轮 2 上的模拟故障位置距两齿轮啮合处齿数为 $16 + 6m$ 齿; 当齿轮 1 旋转 $2m - 1(m = 1, 2, 3, \dots)$ 转, 故障齿为 $16 + 35m$ 齿, 当齿数超过齿轮 2 齿数时, 减去

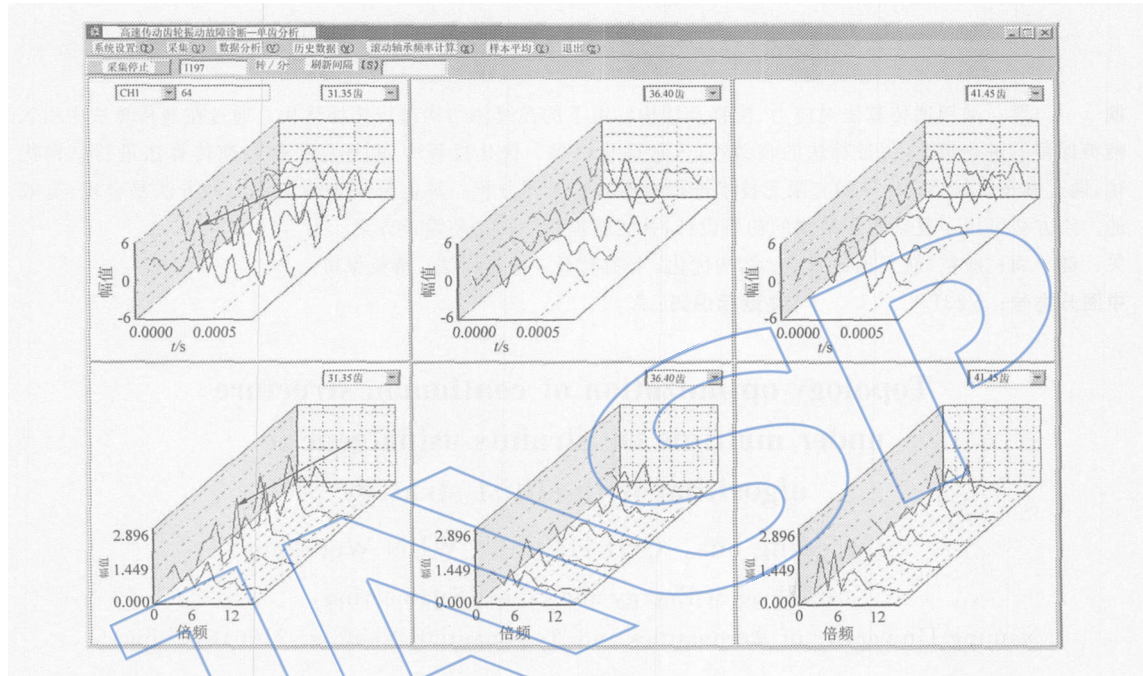


图 8 二次残余信号周期分段处理

Fig. 8 Periodic segment processing on the second residual vibration signal

齿轮 2 齿数的倍数即可。 $m = 3$ 时, 模拟故障齿位置在第 34 齿, 这与周期分段法分析结果吻合, 由此判定大齿轮存在局部故障。

5 结 论

本文建立的信号周期分段处理法, 适用于单级传动齿轮副的故障诊断。它不仅能诊断出齿轮副的局部故障, 还可以准确地诊断出单级传动齿轮副中同步齿轮和非同步齿轮的故障齿位置。通过数字仿真实例, 分析验证了所建立方法原理的正确性; 齿轮模拟故障实验结果, 则证实了该方法的可行性和有效性。因此信号周期分段处理法为诊断单级传动齿轮副故障提供了一种有效手段。

参考文献:

[1] 秦树人. 齿轮传动系统检测与诊断技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1999.

[2] 孟涛, 廖明夫. 齿轮故障诊断中的单齿技术[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 444-449.

Meng Tao, Liao Mingfu. Single gear analysis technique for the detection [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(3): 444-449.

[3] 余红英, 闫宏伟, 潘宏侠. 齿轮振动信号分解及其在故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2005, 25(2): 109-113.

Yu Hongying, Yan Hongwei, Pan Hongxia. Analysis of vibration signal of gearbox and application in diagnosis[J]. Journal of Vibration, Test and Diagnosis, 2005, 25(2): 109-113.

[4] 王宏禹. 非平稳随机信号分析与处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.