



IDT 传感器设计大赛

项目名称： 风电机组检测

工程名称： 基于位置传感器齿轮箱故障检测

参赛人： 王向东 黄孟君

完成时间： 2018 年 12 月

目录

摘 要	1
设计方案:	2
数据采集:	3
齿轮故障机理分析	5
信号分析方法简介:	8
振动加速度传感器检测信号分析	9
位置传感器检测信号分析	10
收获与总结	13

摘 要

风力发电已成为解决世界能源和环境问题的重要力量但风电机组的设备部件精细，故障高发区较多。传统的风电机组齿轮箱故障检测，通常使用振动加速度传感器或者SCADA数据。但振动加速度传感器与SCADA通常价格昂贵，且会有大量的数据冗余，不便于接下来的信号处理。本设计设想风电机组齿轮箱故障状态下运转时将会产生较强的振动，进而位置将会产生微弱变化，若位置传感器的精度能达到要求。便可根据位置传感器检测的信号来解决风电机组的故障检测。

关键字：故障诊断； 振动信号； 位置传感器

设计方案:

1. 分别利用振动加速度传感器与位置传感器测量齿轮箱正常状态下（300r/min）运行的振动信息。
2. 分别利用振动加速度传感器与位置传感器测量齿轮箱正常状态下（300r/min）运行的振动信息。
3. 分析齿轮正常状态运行下的信号特征与故障状态下运行下的信号特征。
4. 对采集到的信号进行同步压缩小波交叉变换处理，并绘出频谱图进行分析。

数据采集：

实验作了关于齿轮的故障诊断实验。其中振动加速度传感器采样频率为 1280Hz，每组实验采集 100s，在转速 300r/min 的转速下进行实验。

齿轮箱设备中设置有 3 种齿轮状态：正常、磨损、断齿（从左到右依次为断齿、磨损、正常）齿轮箱中各齿轮状态如图 1 所示。本次设计仅对齿轮箱的断齿故障进行分析，因此磨损实验本实验中未涉及。振动传感器摆放位置有轴向和径向两个位置，其中径向测量数据效果较差而舍弃。共有 4 组数据。传感器的放置位置如图 2、图 3 所示。

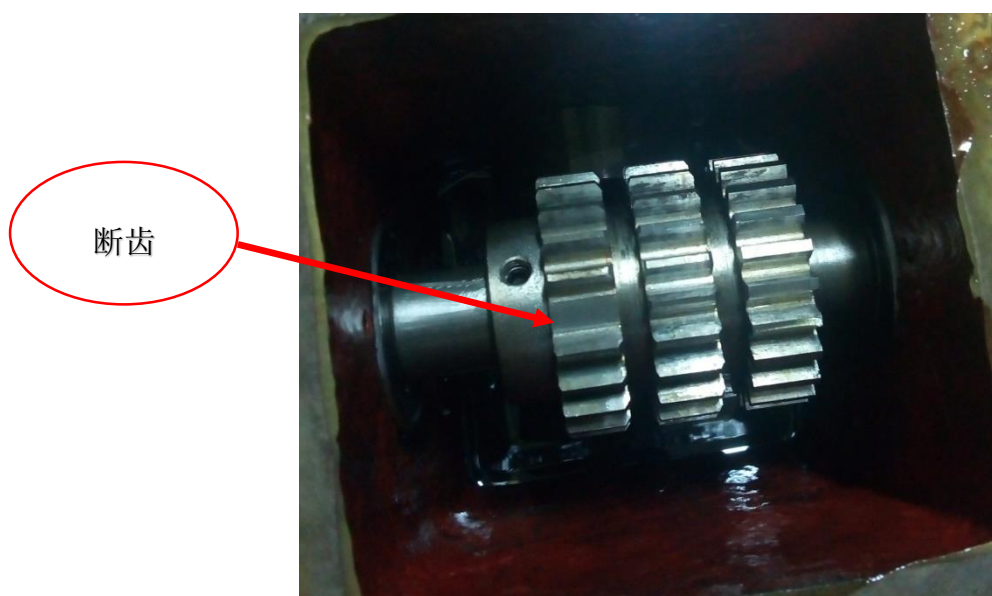


图 1 齿轮断齿故障

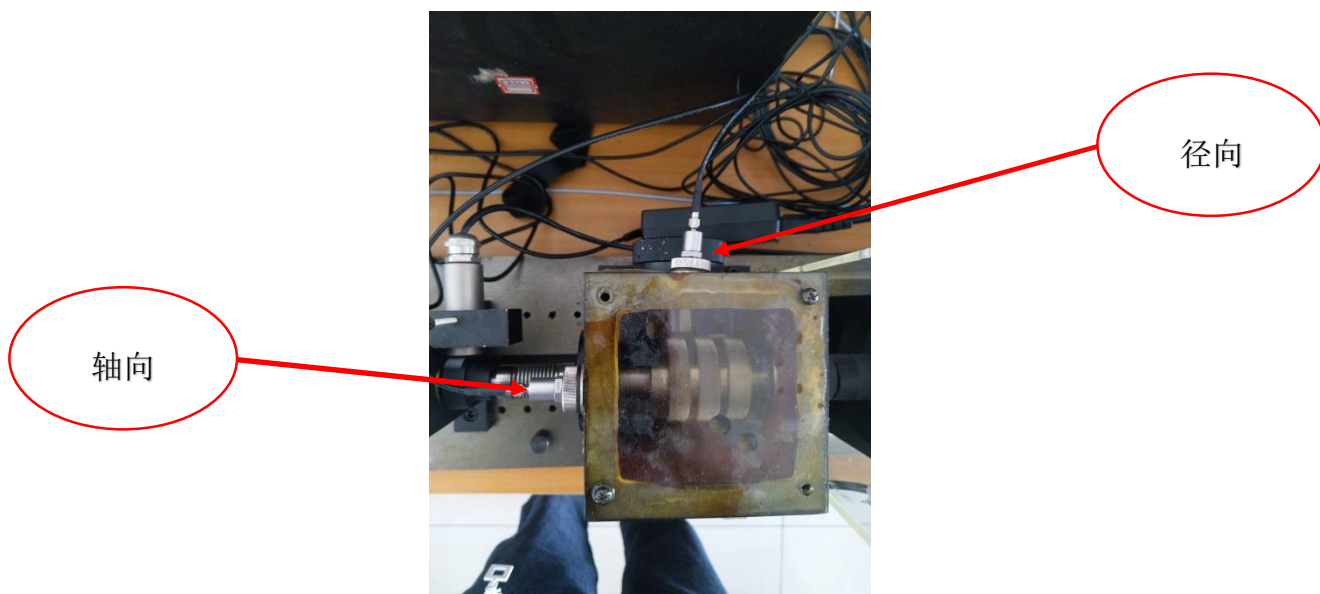


图 2 振动加速度传感器摆放位置。

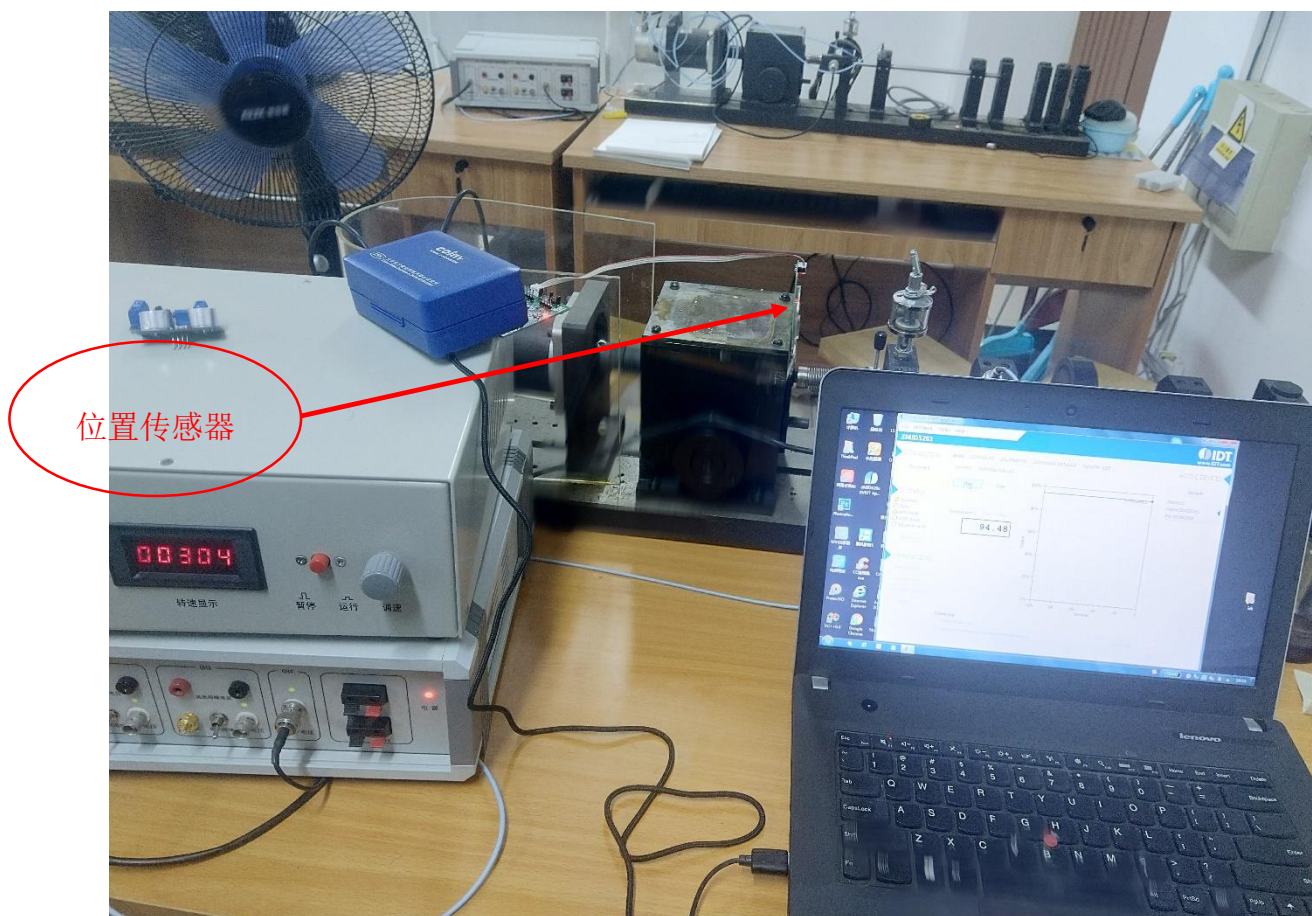


图3 位置传感器摆放位置

位置传感器垂直放置于齿轮箱的轴向位置，齿轮转动时将会带动齿轮箱产生一定频率的振动，进而带动位置传感器滑片的上下运动。

齿轮故障机理分析

由于齿轮最开始的制造误差、使用过程中的过负载运行或长期暴露在不良的环境下，都会对齿轮的正常运转产生不利影响，致使齿轮失效而无法运行。齿轮的失效形式主要有以下几种：断齿故障、齿面点蚀、齿轮磨损等。表 1 给出齿轮常见失效形式发生比例。

表 1 齿轮常见失效形式发生比例

失效形式	齿轮磨损	齿面点蚀	断齿故障	其它
比例	10%	31%	41%	18%

(1) 齿轮磨损

齿轮磨损的机理主要是指微小金属颗粒或者其他杂质混入齿面之间，导致齿面发生磨损，这种情况被称为齿面磨损。正常齿轮的轮齿表面光滑平整，无擦伤痕迹。但齿轮磨损将使轮齿变薄，减弱齿轮强度，最终导致齿轮失效。根据机理齿面磨损可分为正常磨损、腐蚀磨损、断面冲击磨损等。造成齿面磨损的原因主要包括：轮齿设计参数不合理、安装误差、杂质混入、润滑不当等。

(2) 齿面点蚀

点蚀故障是在交变载荷状态下齿轮进行啮合运转的过程中，啮合的齿轮相对滑动产生了方向相反的摩擦力，产生脉动载荷。无数次脉动载荷力的冲击，齿轮表面会逐渐的产生细微的裂纹，裂纹继续扩展，会使轮齿表面的金属微粒脱落，形成麻点和斑坑。随着齿轮的不间断运行使得这些麻点和斑坑增多，若不能及时处理，最终导致齿轮失效。

(3) 断齿故障

断齿故障是齿轮故障中最为常见也是最为严重的失效形式，以上齿轮磨损和齿面点蚀最终都有可能恶化为齿轮断齿。断齿故障产生的原因主要有两种：1. 齿轮啮合时，轮齿根部弯曲受力，其中一侧为受力为拉伸状态，另一侧为压缩状态，轮齿脱离啮合后，弯曲应力重新归为零。因此，在带负载的多次重复运行情况下，弯曲应力超过轮齿材料的弯曲极限时，齿根部分将出现疲劳裂纹。裂纹的逐渐扩大，最终导致整个轮齿折断，这种由于材料疲劳产生的折断称为疲劳折断。2. 齿轮突然过负载运行或突然高速运行而导致齿轮突然折断，这种被称为过载折断。

综上所述，齿轮的失效通常是由众多原因综合到一起造成的。主要失效原因可总结如下：首先，齿轮制作安装过程中存在偏差：设计参数不合理，安装位置不正确导致齿轮偏心、齿距、齿形等存在问题，为齿轮正常运行产生留下隐患；其次，齿轮长期过载运转而且在齿轮滑动速度过高。最后，润滑油受到污染或者不足，散热不良、滑动速度

过大或者设备维修不及时等，都会出现导致齿轮失效。

齿轮不同的失效形式产生的振动信号频谱特征不同，如果能准确的提取出这些信号特征，就能分析出齿轮失效的地方，进而方便维修。齿轮的振动信号特征分析：

齿轮的转动频率 f_r

$$f_r = n / 60 \quad (1)$$

其中， n 为齿轮转动速度，单位是 r/min。

两个齿轮之间的啮合频率 f_z

$$f_z = k f_r \quad (2)$$

其中 k 表示齿轮的齿数。

齿轮在无损伤情况下运行时，由于齿轮之间的啮合而产生的冲击信号频率是齿轮信号频谱图中的最明显特征频率，此时信号特征频谱中主要由啮合频率和其谐波分量组成，信号振动仿真表达式为：

$$x(t) = \sum_{k=0}^N X_k \cos(2\pi f_n k t + \omega_k) \quad (3)$$

其中 $x(t)$ 表示振动仿真信号； X_k 表示第 k 次啮合频率的谐波分量的幅值， ω_k 表示第 k 次谐波分量的相位； f_n 表示齿轮的啮合频率。

如果齿轮发生了故障，或者转速发生改变，就会使得齿轮在开始啮合和脱离啮合时的碰撞增加，产生相对较高的振动冲击，导致振动信号幅值和相位发生改变。如果把啮合频率及其各阶谐波当成载波频率，那么故障频率和其他特征频率就应该是调制频率。所以在对齿轮进行故障诊断时，可以发现在啮合频率或者其谐波分量附近会有一些易识别的边频。不同故障频率产生不同的边频成分。当那些特殊频率边频成分在频谱图上出现时，齿轮就可能已经发生某些故障。识别这些边频是进行故障诊断的关键一环。

齿轮振动信号发生调制现象以后，信号振动仿真表达式为：

$$x(t) = \sum_{k=0}^N X_k [1 + a_k(t)] \cos(2\pi f_n k t + \omega_k + a_b(t)) \quad (4)$$

其中 $a_k(t)$ 为第 k 阶的幅值调制函数。

$$a_k(t) = \sum_{m=0}^M a_{km} \cos(2\pi f_m k t + \alpha_{km}) \quad (5)$$

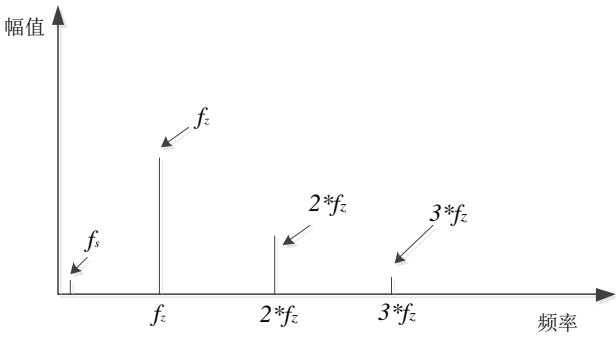
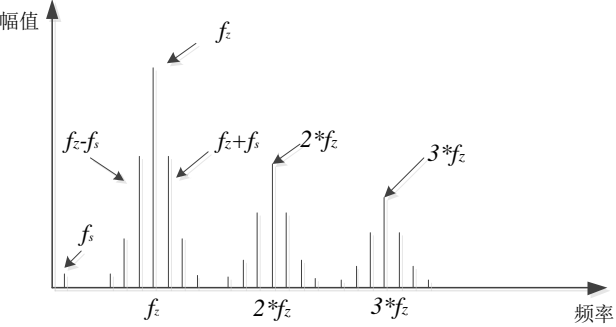
式中 $a_{km}(t)$ 和 $\alpha_{km}(t)$ 分别为 $a_k(t)$ 的第 m 个分量对应的幅值和相位大小。 $b_k(t)$ 为第 k 阶的频率调制函数。

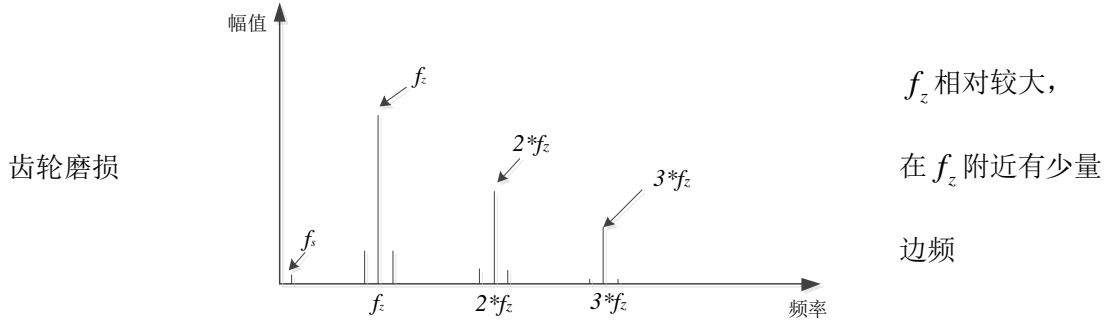
$$b_k(t) = \sum_{k=0}^M b_{km} \cos(2\pi f_t k t + \beta_{km}) \tag{6}$$

式中 $b_{km}(t)$ 和 $\beta_{km}(t)$ 分别为 $b_k(t)$ 的第 m 个分量对应的幅值和相位大小。

当齿轮发生故障时，齿轮故障振动信号的傅里叶变换谱图会在齿轮啮合频率附近产生边频带。不同故障产生边频带形式不同，所以根据啮合频率附近的边频信息可以判断齿轮的是否发生故障以及故障形式，实现齿轮故障检测。齿轮的各状态频谱图如下表 2 所示，表格中 f_r 表示齿轮的转频， f_z 表示啮合频率，从表格中的三个频域图对比可以看出：齿轮故障形式的不同导致其频谱图也不尽相同，其中正常齿轮振动的频谱图上只有幅值较小的转频、幅值相对较大的啮合频率及啮合频率高次谐波频率，没有差值为转频的边频带。断齿故障发生后，齿轮的振动频谱图会有一些变化，表现为：齿轮的啮合频率和其高次谐波幅值相对增大，其附近会出现明显的差值为转频的边频带，边频带较宽。齿轮磨损的频谱也会出现边频带，但其相对于断齿故障，它的边频带就不那么明显。

表 2 齿轮故障特征

齿轮状态	频域图	频域特征
正常齿轮		f_r 相对较小， f_z 相对较大， 无边频
断齿故障		f_z 相对较大， 在 f_z 附近有明显 边频



信号分析方法简介:

本实验采用同步压缩-交叉小波变换算法对信号进行分析。

当转动齿轮或滚动轴承发生故障时，其损伤部位与其他组件接触时会产生冲击，在连续旋转时将产生周期性冲击。故障发生的类型不同，碰撞故障点的频率也不一样。如果能够准确的识别这种冲击周期的长短，就可以实现故障预警与检测。基于同步压缩小波和交叉小波的振动信号特征提取方法是一种效果较好的用于故障诊断的方法。特征提取步骤如下：

- (1) 对长度为 $2n$ 的信号均分长度为 n 的两段信号，然后再做希尔伯特包络解调处理；
- (2) 对信号划分频率区间：假设其中一路信号 $x(t)$ 的长度 $n = 2^L$ ，采样时间间隔是 Δt ，取 $n_v = 32$ ，计算中间值 $n_a = Ln_v$ ， $\Delta\omega = \frac{1}{n_a - 1} \log_2(\frac{n}{2})$ ， $\omega_0 = \frac{1}{n\Delta t}$ ，规定频率区间中心频率 $\omega_l = 2^{l\Delta\omega} \omega_0$ ，其中 $l = 0, 1, \dots, n_a - 1$ ，将信号划分为不同的频率区间，每个频率区间范围 $W_l = (\frac{\omega_{l-1} + \omega_l}{2}, \frac{\omega_l + \omega_{l+1}}{2})$ ；
- (3) 根据以上划分的频率区间计算对应的尺度值，进而进行连续小波变换，得到小波系数 $W_x(a, b)$ 并计算瞬时频率 $\omega_x(a, b)$ ；
- (4) 对 $W_x(a, b)$ 进行同步压缩：取阈值 $\gamma = 1.4826\sqrt{2\ln(n)} \text{ median}(|W_x(a, b)|)$ ，按照公式(3-15) 得到信号 $x(t)$ 同步压缩小波变换为 $T_x(\omega, b)$ ；
- (5) 重复步骤(2)，(3)，(4)中的过程，得到另一路信号 $y(t)$ 的同步压缩小波变换系数为 $T_y(\omega, b)$ ；
- (6) 将以上求得的同步压缩小波变换系数 $T_x(\omega, b)$ 、 $T_y(\omega, b)$ 输入到 XWT 里面，按照公式(4-2)、公式(4-3)得到实现 XWT。运用交叉小波变换后的尺度谱识别出故障的特征频率，与理论计算值对比进行故障诊断。

振动加速度传感器检测信号分析

1. 齿轮正常状态运行分析，检测信号的同步压缩小波交叉变换频谱图如下图 所示

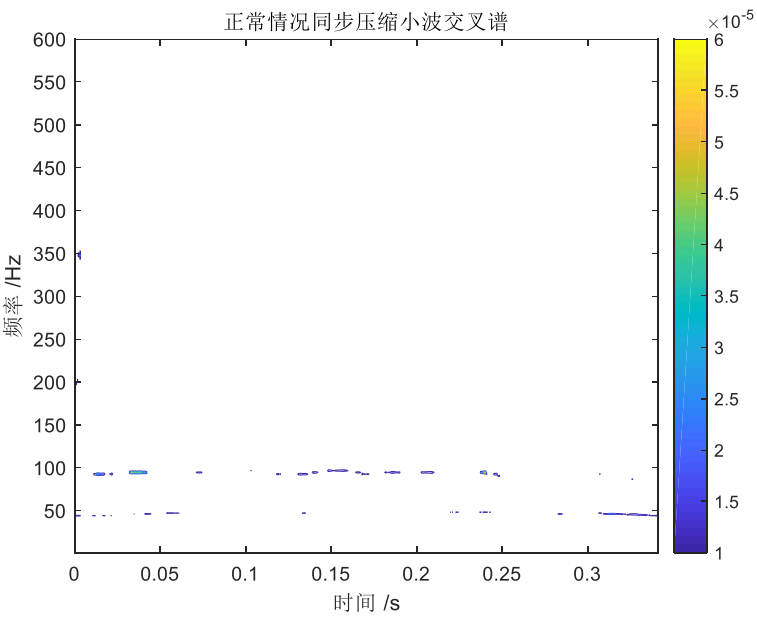


图 4 齿轮正常情况下振动加速度传感器采集数据处理频谱图

由上节分析知：其中正常齿轮振动的频谱图上只有幅值较小的转频、幅值相对较大的啮合频率及啮合频率高次谐波频率，没有差值为转频的边频带。由图可以看出，经过同步压缩小波变换后，由于齿轮的转动频率较齿轮的啮合频率而言很小在时频谱输出时被滤除，仅留下了齿轮的啮合频率及其二次谐波。但是由频谱图可以看出正常运行状态下的齿轮的啮合频率的幅值较小，频谱较不明显。

2. 齿轮断齿状态运行分析，检测信号的同步压缩小波交叉变换频谱图如下图 所示

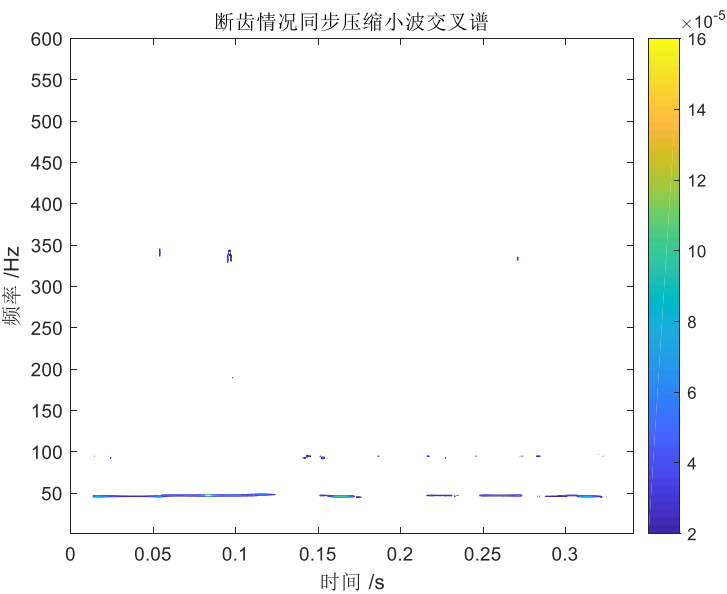


图 5 齿轮断齿情况下振动加速度传感器采集数据处理频谱图

断齿故障发生后，齿轮的振动频谱图会有一些变化，表现为：齿轮的啮合频率和其高次谐波幅值相对增大，其附近会出现明显的差值为转频的边频带，边频带较宽。齿轮磨损的频谱也会出现边频带，但其相对于断齿故障，它的边频带就不那么明显。由图中可以看出齿轮断齿故障状态下运行的频谱图其齿轮啮合频率幅值较大且频谱明显。据此对比图 可以判断出齿轮处于故障运行状态下。

位置传感器检测信号分析

由于采样频率的过小以及传感器的精度所限制，经多次数据采集和数据分析后，很遗憾的不得不宣布本次设计以失败告终。

齿轮箱正常状态运行以及断齿状态运行时产生的振动幅度都无法被传感器检测到或者位置仅仅有很小很小的变化。对采集到的正常运行数据与断齿数据进行分析，无法得到相应的频谱图，无法展现出相应的频率特征。具体频谱图如下图所示。

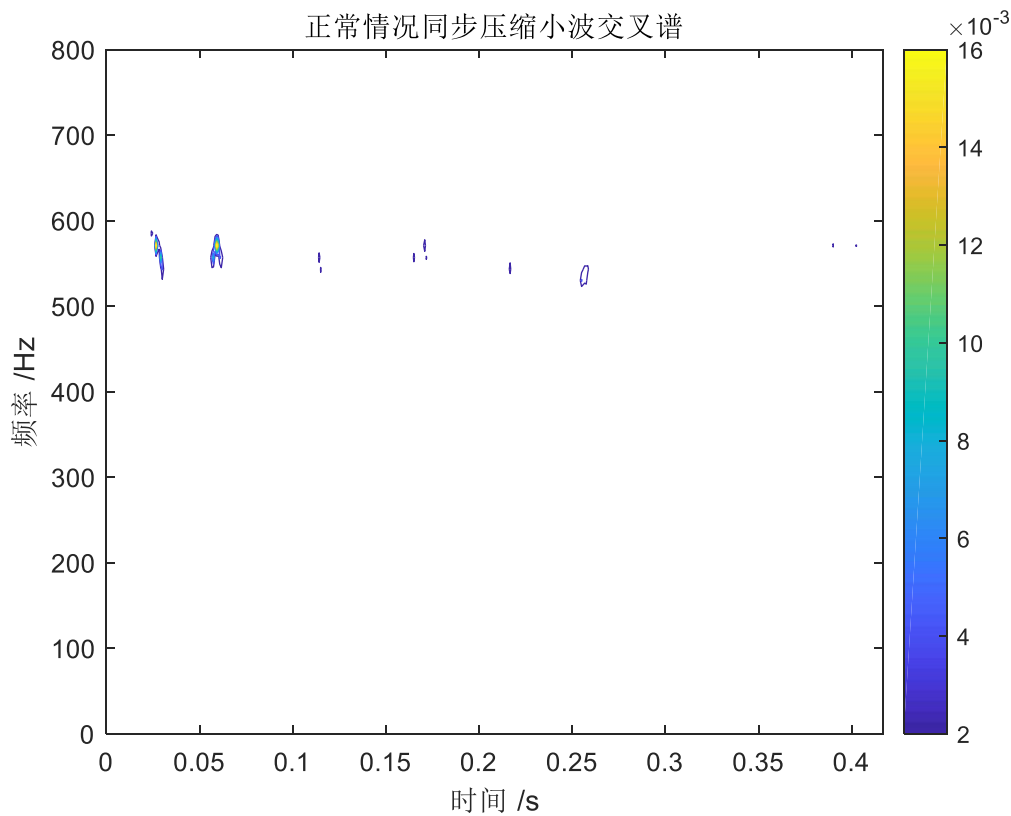


图 45 齿轮正常情况下位置传感器采集数据处理频谱图

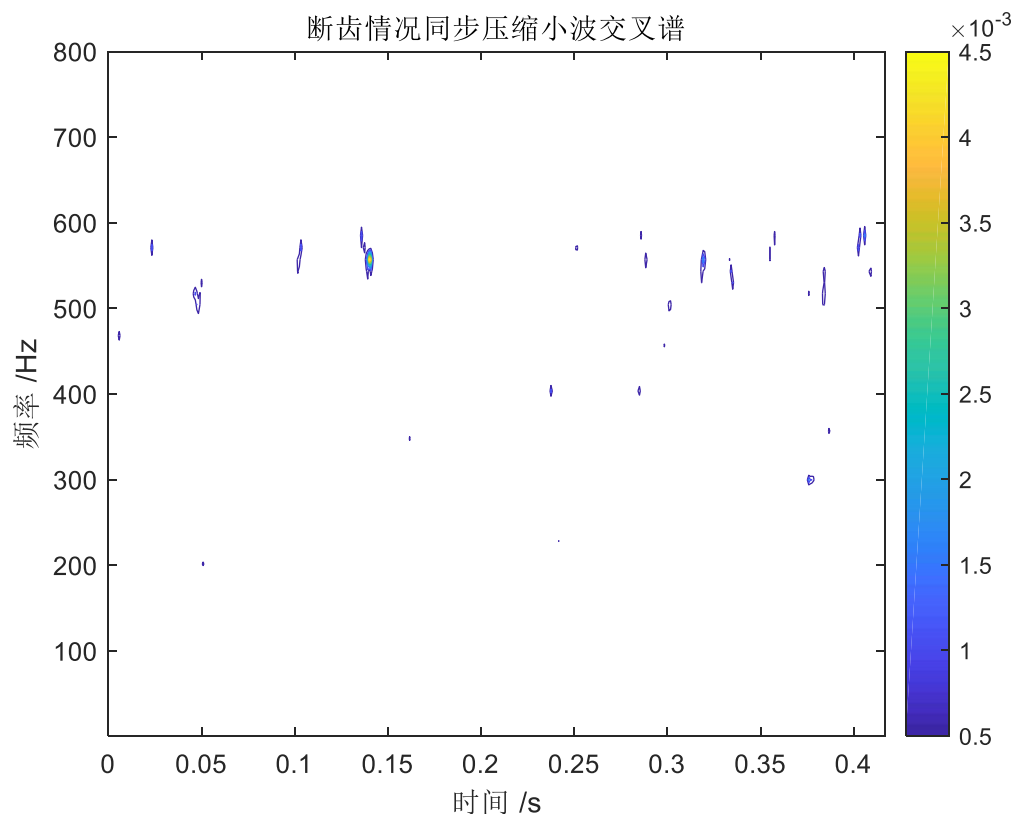


图 6 齿轮断齿情况下位置传感器采集数据处理频谱图

通过上面的频谱图我们可以观察到信号频率聚集在 550Hz 左右，虽然故障运行状态下的信号频谱图的能量更大一些，但是并不满足上述齿轮正常运行以及故障运行的频率特性，频率同步压缩小波交叉变换得到频谱图无法分析齿轮箱的故障。

通过同步压缩小波交叉变换无法判断出齿轮箱是否处于故障运行状态，为了查明原因，对采集到的信号进行了曲线绘制，来观察采集到的信号的具体波形如图 7 所示。经分析可知由于传感器的信号采样频率不能满足香农采样定理，故采集到的信号不能完全恢复至原始信号。

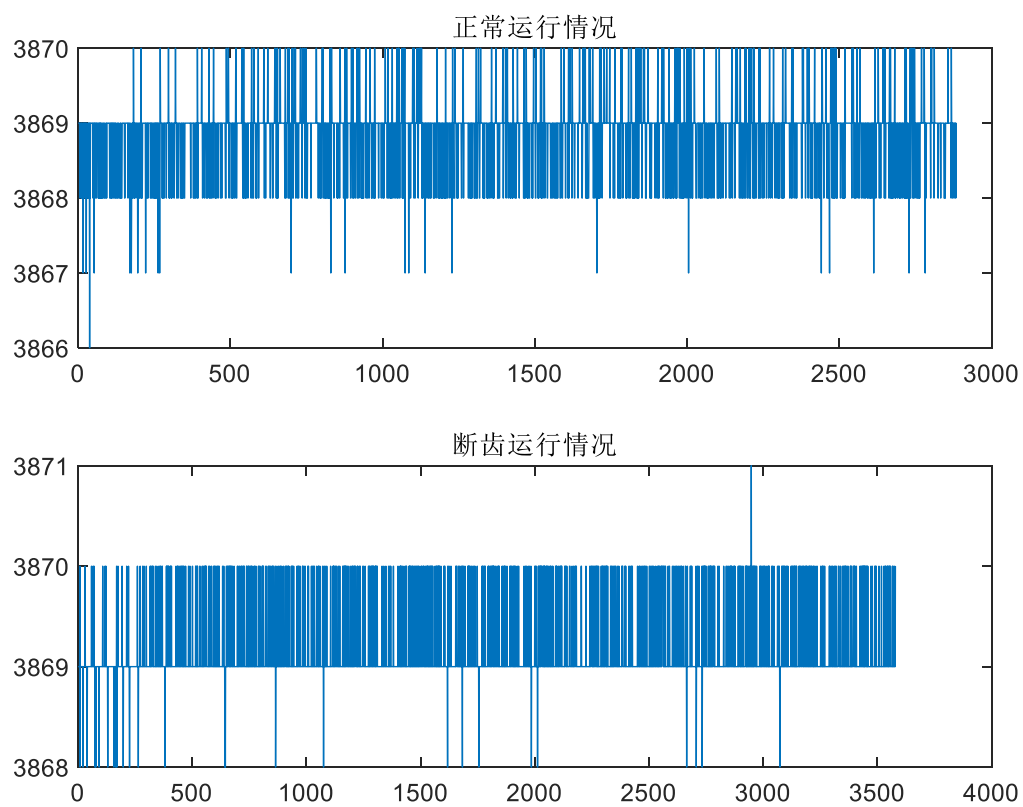


图 7 位置传感器采集信号波形图

收获与总结

经过了近一个月的努力虽然本次设计最终以失败告终，但是自己依旧从中学到了不少知识，获得了一些灵感。进一步学习了信号采集，处理等需要注意的细节。振动加速度传感器在采集到大量冗余信号的前提下，保证采集信号的完整性，但是这样的做法不便于接下来的信号处理（去噪、滤波等）与分析，且加速度传感器一般价格昂贵并需要与相应的设备配套使用。假如位置传感器的采样精度能进一步提高应可以在保证获得信号冗余量最小的情况下完成信号的测量，这样也便于信号的分析与处理，位置传感器的价格相对振动加速度传感器较便宜，且使用方便。