

## 阶比谱分析与汽车起动电机故障的实时诊断\*

陈 循 田江红 温熙森 唐丙阳

(国防科学技术大学机电工程与仪器系 长沙 410073)

**摘 要** 本文主要论述阶比谱分析方法及其在汽车起动电机故障实时诊断中的应用。首先阐述了阶比谱分析的原理以及阶比采样中混迭与泄漏的产生及其抑制方法,然后讨论了如何在起动电机运行过程短、升速快的情况下获取感兴趣的噪声信号,进而采用阶比谱分析方法从信号中提取故障特征信息,最后利用阈值判别法起动电机的故障进行实时诊断。

**关键词** 阶比谱分析,特征提取,起动电机,噪声监测,实时诊断

**分类号** TB533, TB535

## The Order Ratio Spectrum Analysis and the Realtime Fault Diagnosis of the Car-Starters

Chen Xun Tian Jianghong Wen Xisen Tang Bingyang

(Department of Electromechanics and Instrumentation, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** This paper mainly treats the order ratio spectrum analysis (ORSA) and its application to the realtime fault diagnosis of the car-starters. First, it elaborates the principle of the ORSA and the way of generating and the method of being restrained to the aliasing and leakage in the process of order ratio sampling. Then the paper discusses how to acquire the interested noise signals in the short working process of the car-starters with the rapid acceleration, and how to extract the information of their fault features from the signals in accordance with the ORSA. Finally it diagnoses realtimely the faults of the car-starters by means of threshold judgement.

**Key words** order ratio spectrum analysis, feature extraction, car-starter, noise monitoring, realtime diagnosis

在回转机械的振动和噪声信号测试中,匀速情况下通常采用等时间间隔采样并对其进行常规谱分析。但在转速变化较快时,用这种采样方式将使得信号频谱图上随转速变化

\* 1996年3月12日收稿

的频率分量变得模糊。如图 1(a)所示, 一个正弦扫描信号, 对其进行等时间隔采样。在每个回转周期内, 由于采样点数的变化, 其频谱将分布在一个宽频带上, 见图 1(b); 若采用等回转角采样, 使采样频率与转速同步变化, 使每个回转周期的采样点数保持不变, 由此作 DFT 则可在谱图上得到一个单一的成份, 如图 1(c)所示, 这样就便于分析信号与回转轴转速间的关系。这种等回转角采样及其富立叶谱分析法即所谓阶比谱分析法。汽车起动电机运行时转速变化极快, 且在其噪声信号中所包含的故障信息多与转速变化有关, 此时采用阶比谱分析对有效地提取起动电机的故障征兆无疑非常适用。

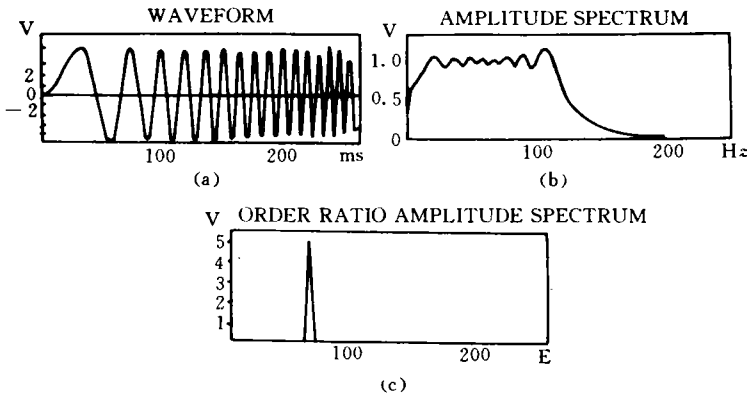


图 1

## 1 阶比谱分析

### 1.1 阶比谱

阶比谱分析与常规谱分析的数据处理方式之区别在于信号采集的方式不同。阶比谱分析采用的是等回转角采样即阶比采样, 也即在机器的回转轴旋转时, 每隔等角度  $\Delta\theta$  采一次样。这种采样方式可保证不论转轴的转速如何变化, 在每一回转周期内都能得到固定的采样点数。若对回转机械的振动或噪声信号进行整周期阶比采样, 并将转角数据序列  $x(m)$  作 DFT,  $x(m)$  便变换为阶域序列  $X(l)$ ,  $|X(l)|$  称为阶比幅值谱, 取

$$G(l) = \frac{2\Delta\theta}{N} |X(l)|^2 \quad (0 \leq l \leq N-1) \quad (1)$$

$G(l)$  称为阶比功率谱, 图 4 即为起动电机运行时其噪声信号的一组典型的阶比功率谱图。在阶比谱图中, 阶  $E$  的定义为

$$E = \text{波动次数} / \text{转(阶)} \quad (2)$$

阶  $E$  与频率  $f$  的关系为

$$f = \frac{n \times E}{60} (\text{HZ}) \quad (3)$$

式中,  $n$  为回转轴转速 (r/min)。

显然, 阶  $E$  只与信号在每个回转周期中的波动次数有关, 利用阶比谱图便于识别信号中与转速有关的信息。

## 1.2 阶比采样中的混迭与泄漏

### 1.2.1 阶比采样定理<sup>[1]</sup>

模拟信号  $x(\theta)$  ( $\theta$  为转角连续变量) 在角域采样后, 转角序列经 DFT, 便得到

$$\hat{X}(E) = \frac{1}{\Delta\theta} \sum_{-\infty}^{+\infty} X(E - mE_s) \quad (4)$$

这里,  $E_s$  为采样阶次。阶比谱在阶域中依  $E_s$  作周期性延拓, 因此, 进行阶比采样时保证阶比谱不产生混迭的充要条件是

$$E_s > 2E_{\max} \quad (5)$$

式中,  $E_{\max}$  为最大分析阶次, 上式即为阶比分析中的采样定理。

### 1.2.2 混迭与泄漏

在频谱分析中, 混迭是通过提高采样频率或降低低通滤波截止频率来避免的。而在阶比采样中, 要避免混迭应采取什么措施呢?

在阶比采样过程中如果仍采用普通的低通滤波器, 并设置一个固定的截止频率  $f_c$ , 假设  $f_c$  使低速时采样阶次与最大分析阶次的关系满足(5)式而不产生混迭; 那么, 在高速时  $E_{\max}$  所对应的频率则可能大于  $f_c$  而被滤除; 反之, 若设定  $f_c$  保证高速时  $E_{\max}$  不被滤除, 那么低速时,  $E_s$  所对应的频率将可能小于  $2f_c$ , 从而使阶比采样产生混迭。显然, 若采用跟踪滤波方式, 采样时根据转速的变化同步调节  $f_c$ , 便能解决阶比采样中的混迭问题, 但是, 同步跟踪滤波技术实现起来有较大难度, 针对汽车起动电机起动过程中转速及噪声信号的变化特点, 在本文中, 我们利用磁带记录仪和低通滤波器采用分段滤波方式解决了起动电机噪声信号阶比采样中的混迭问题。

图 2 为某型号轿车起动过程中发动机曲轴在起动电机带动下的升速曲线, Q 点之前, 起动机轴与发动机曲轴通过齿轮啮合同步升速 (齿数比为 9 : 132); Q 点之后, 两齿轮脱离啮合, 起动机减速, 发动机则点火继续升速。由图 2 可见, 起动电机的工作时间很短, 发动机从被动升速到点火成功的时间通常不到 1 秒。

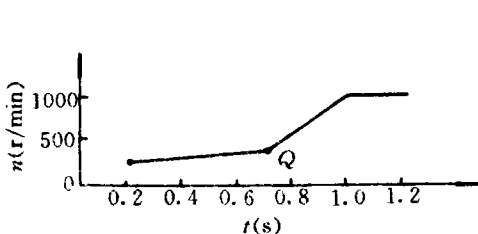


图 2

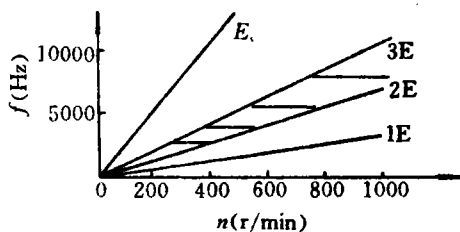


图 3

利用多通道磁带记录仪对起动电机运行噪声的原始信号进行记录时, 我们同时记录了转速信号<sup>[2]</sup>。在用微机进行阶比采样和分析过程中, 通过软件处理自动跟踪转速变化并适时触发阶比采样, 使采样序列所对应的转速变化在允许的范围之内。简而言之, 要在不同的转速下采用不同的滤波截止频率进行阶比采样 (见图 3)。

在频谱分析中, 非整周期采样将使谱图中产生泄漏问题。阶比谱分析中, 要避免泄漏就必须进行整圈数采样。

### 1.3 阶比谱分析

汽车起动电机与其运行噪声有关的制造缺陷主要有两种表现形式：一种是起动电机轴在回转过程中定子与转子之间发生摩擦，俗称摩极；另一种是起动电机齿轮和发动机曲轴飞轮的啮合性不好，这主要是由于齿轮齿面的加工误差所致，简称齿廓畸形。此外，个别起动电机由于装配时前后端盖的安装误差，使得起动电机轴在回转时可能与端盖发生碰撞而产生异响。

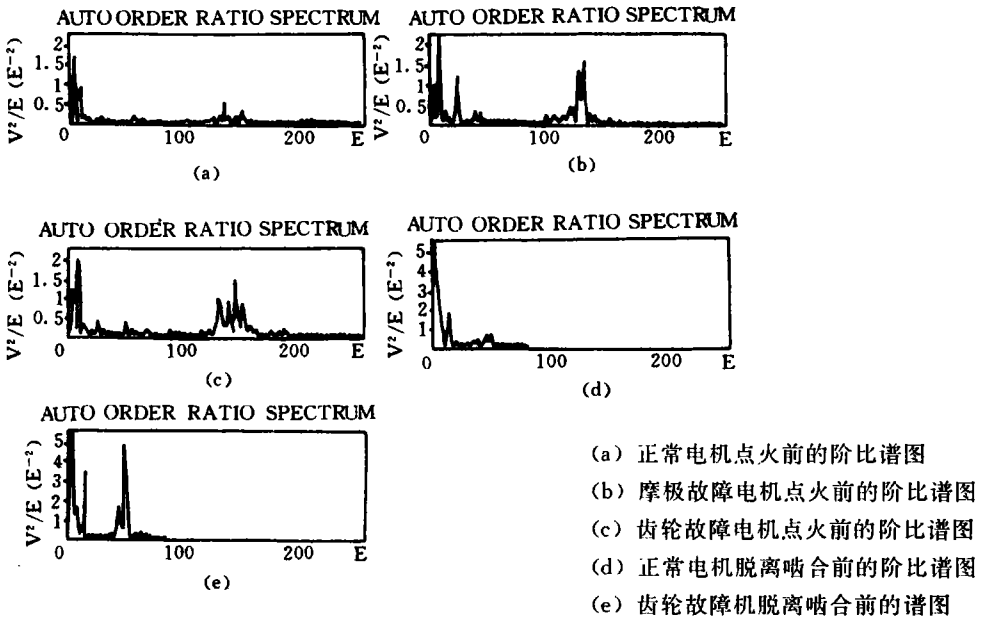


图 4

在阶比功率谱图中，经研究和对比发现，发动机在点火（曲轴转速约 400r/min，图 2 中 Q 点）之前，正常和故障电机的噪声信号在阶比谱图中区别明显。在点火点之前的阶比谱图中，有摩极缺陷的故障电机在基阶（132 阶）附近的幅值与正常电机相比明显要大得多，见图 4(a,b)。与正常电机相比，有轮齿缺陷的故障电机其阶比谱图的差异表现在两方面，一是基阶附近的幅值较大；二是其大幅值的阶次带较宽，见图 4(c)。此外，起动电机齿轮与发动机曲轴的飞轮脱离啮合时（飞轮转速约为 900r/min），齿廓畸形将激发 50 阶附近的某阶次（据分析为起动电机的固有频率，约为 780Hz），使其幅值明显增大，如图 4(e) 所示。谱图中低阶的大幅值成分为发动机运转的背景噪声，与起动电机关系不大。上述谱图特征及分析结果可作为我们区分正、异常起动电机的主要判据。

### 2 起动电机噪声的特征参数选择及其故障的实时诊断

为满足工厂现场检测的速度要求（10 秒/台），我们直接利用几个特征参数阈值划分正常和故障电机。这几个特征参数包括： $Y_1$  为点火点前阶比谱图中 66~190 阶之间的能量值（简称基阶能量）； $Y_2$  为点火点前阶比谱图中 66~190 阶之间的最大幅值（简称基阶

幅值);  $Y_3$  为起动电机与发动机脱离啮合前阶比谱图中 40~60 阶之间的能量值 (简称低阶能量)。

我们以大量的实验样本为依据,对正常和故障电机的上述特征参数阈值进行训练,利用简单的越界判决方式识别故障电机。通过与现场人工检测的结果进行比较,证明上述特征参数提取方式以及直接阈值划分法切实可行。

### 3 实验结果及结语

针对汽车发动机起动过程中起动电机运行及其噪声的特点,在大量实验分析研究的基础上,我们建立了一套汽车起动电机噪声检测系统<sup>[2]</sup>,该系统以普通微机为主控单元,能对起动电机的运行噪声进行在线自动测试,并利用本文所述的方法对起动电机的故障进行实时诊断。

大量的对比检测实验结果表明,该系统对起动电机摩极、齿廓畸形和异响这三种故障的正确识别率在 80% 以上。现例举系统某次跟班检测的部分测试结果如下表所示,“?”表示可能存在故障。

电机编号	基阶能量	基阶幅值	低阶能量	判别结果
1	2731. 8	240. 9	1478. 4	正常
2	3057. 3	252. 0	1583. 3	正常
3	3228. 7	232. 6	2793. 6	?
4	3727. 4	506. 6	1691. 1	摩极
5	3165. 2	211. 2	3272. 1	异响
6	3764. 3	308. 4	2470. 3	畸齿
7	2923. 7	443. 5	1024. 4	摩极

本方法经过适当改进可应用于其它发动机、发电机的振动或噪声信号的监测与诊断。为了得到更准确的诊断效果,在设计系统时可以考虑增加信源和测点,并采用更完善的特征提取方法和模式识别方法。

### 参 考 文 献

- 1 曲绚,唐丙阳,温熙森. 机械振动分析中的信号处理技术与微机特征分析系统. 国防科技大学学报, 1989, (3)
- 2 陈循,唐丙阳,温熙森,田江红. 汽车起动电机异常噪声监测系统的设计原理. 数据采集与处理,1995, 10 (1)

(责任编辑 卢天贶)