

文章编号: 1000-8055(2000) 04-0435-04

基于高阶累积量的齿轮系统辨识方法研究

邵忍平, 陈立群, 孙进才, 沈允文
(西北工业大学 二系 机械设计教研室, 陕西 西安 710072)

摘要: 高阶累积量分析技术是近年来迅速发展起来的新技术, 作为处理非高斯信号、非线性信号以及盲信号的重要工具而受到日益重视。它有许多优点, 特别是对于外加高斯噪声不敏感以及可以检测系统的非线性特性, 故理论上可以完全抑制高斯噪声的影响, 提高分析精度。本文在对其研究的基础上, 将它应用于齿轮旋翼传动系统动态特性分析之中, 对传动系统和旋翼桨叶的动态固有频率等进行了识别, 并与频域和时域识别法进行了比较, 表明该方法是一种可行的有发展前途的方法, 为齿轮系统的动力学研究提供一种新的有效分析方法。

关键词: 齿轮传动系统; 旋翼; 高阶累积量; 辨识
中图分类号: TH113.1 文献标识码: A

1 引言

高阶累积量(higher order cumulants)技术是近年来国际上在现代信号处理方面发展起来的新技术, 在对非高斯性、非线性、非因果信号处理和高斯有色噪声及盲信号处理中, 是非常有用的重要分析工具而受到越来越多的关注^[1,2], 其最独特的优点是可弃除外加干扰噪声的影响, 提高分析和辨识精度, 在理论上有良好的降噪作用, 所以给机械系统的动力特性辨识和故障诊断提供一种可靠的分析方法。

齿轮传动系统作为一个复杂的弹性系统在内外激励作用下而发生振动, 由于齿轮啮合刚度的非线性时变性和轴承、箱体等支承系统非线性刚度的影响, 系统形成一种耦合的非线性振动, 再加上齿轮和轴承的调制作用, 故系统的动态信号是非常复杂的非高斯信号, 用以往的方法对系统进行分析, 其结果往往不够理想。本文采用高阶累积量方法对系统的非线性特性进行检测, 识别系统的动态固有频率等特性, 并与功率谱法和 ARMA 法进行比较, 验证了该方法是一种有效的齿轮系统辨识新方法。

2 高阶累积量和累积量谱

对于单个随机变量 x , 其高阶累积量 C_k 定义为^[3]:

$$C_k = \left. \frac{d^k \ln \Phi(\omega) / d\omega^k}{j^k} \right|_{\omega=0} = \left. \frac{(-j)^k d^k \Psi(\omega)}{d\omega^k} \right|_{\omega=0} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

对于 n 维随机变量 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则 $r = k_1 + k_2 + \dots + k_n$ 的联合累积量定义为:

$$C_{k_1 k_2 \dots k_n} = \left. \frac{(-j)^r \partial^r \Psi(\omega, \omega, \dots, \omega)}{\partial \omega^{k_1} \partial \omega^{k_2} \dots \partial \omega^{k_n}} \right|_{\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_n = 0} \quad (2)$$

其中: $\Psi(\omega) = \ln \Phi(\omega)$, $\Phi(\omega) = E[e^{j\omega}]$,
 $\Psi(\omega, \omega, \dots, \omega) = \ln \Phi(\omega, \omega, \dots, \omega)$,
 $\Phi(\omega, \omega, \dots, \omega) =$

$$E\{\exp[j(\omega x_1 + \omega x_2 + \dots + \omega x_n)]\}$$

根据上述定义, 通过分析计算可知: 高斯分布随机变量 x 的一阶累积量 C_1 和二阶累积量 C_2 恰好分别等于 x 的均值和方差; 高斯随机变量 x 的高阶累积量 $C_k (k > 2)$ 恒等于零, 而高斯随机过程 $\{x(n)\}$ 阶次高于 2 的高阶累积量亦等于零。因此可知高阶累积量对于高斯过程不敏感, 当外加噪声是高斯有色噪声时, 高阶累积量在理论上可以完

收稿日期: 1999-10-10; 修订日期: 2000-04-09

基金项目: 航空科学基金资助项目(94C53092)

作者简介: 邵忍平(1962-), 男, 西北工业大学二系机械设计教研室副教授, 博士

全抑制噪声影响, 提高分析精度。

k 阶累积量谱定义为 k 阶累积量的 $(k-1)$ 维离散时间傅立叶变换:

$$S_{kx}(\omega, \omega, \dots, \omega_{k-1}) = \sum_{\tau_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{\tau_{k-1}=-\infty}^{\infty} C_{kx}(\tau_1, \dots, \tau_{k-1}) \exp\left[-j \sum_{i=1}^{k-1} \omega_i \tau_i\right] \quad (3)$$

累积量谱又称为多谱。在实际工程中, 三阶累积量谱(简称三阶谱)是最为重要且获得广泛应用的高阶统计量, 常常用 $B(\omega, \omega)$ 来表示即:

$$S_{3x}(\omega, \omega) = B(\omega, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} C_{3x}(\tau_1, \tau_2) \exp[-j(\omega \tau_1 + \omega \tau_2)] d\tau_1 d\tau_2 = \sum_{\tau_1=-\infty}^{+\infty} \sum_{\tau_2=-\infty}^{+\infty} C_{3x}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1 \tau_1 + \omega_2 \tau_2)} \quad (4)$$

三阶谱有许多重要的性质^[4], 如双周期性、对称性、含有幅值和相位信息等。根据这些性质可知, 三阶谱对于高斯噪声不敏感, 用三阶谱可检测出系统的非线性特性等。在实际工程当中, 许多混入系统的随机噪声都是高斯噪声, 若采用三阶谱分析, 那么这些外加噪声对于有用信号不产生影响, 因此可提高分析精度。另外它与功率谱不同, 含有相位信息, 可用来检测非线性调制成份及非线性特性, 因而可用来研究具有非线性特性的系统, 诸如齿轮系统等。

3 齿轮系统动态固有频率的累积量识别

三阶谱经过变换整理后为:

$$\begin{aligned} B(\omega, \omega) &= X(\omega)X(\omega)X^*(\omega + \omega) \\ &= X(\omega)X(\omega)X(-\omega - \omega) \end{aligned} \quad (5)$$

其中: $X(\omega)$ 是 $x(t)$ 的傅立叶变换, 表示它的频域特性。如果信号中不含 ω 和 ω 则 $B(\omega, \omega)$ 等于零, 否则含有 ω 和 ω 则 $B(\omega, \omega)$ 不为零, 此时当适当的选取频率 ω 和 ω , 使得 ω 和 ω 为系统固有频率时, 那么由于共振区附近的响应对固有频率的变化敏感, 所以 $X(\omega)$ 和 $X(\omega)$ 数值较大, 此时三阶谱图 $B(\omega, \omega)$ 会出现谱峰, 峰值在 (ω, ω) 处; 当 ω 和 ω 不等于系统任一阶固有频率时, $B(\omega, \omega)$ 谱图较平坦, 因此通过对三阶谱图分析, 可以获得系统固有频率数值, 同样可用更高阶的高阶累积量谱来识别固有频率以及振型等。

由于齿轮传动啮合刚度的非线性时变性和传动误差的影响以及轴承非线性刚度的作用和齿轮及轴承的调制影响^[5], 使系统呈现非线性特性, 再加之当工作装置带有旋翼时, 其旋翼对系统的耦合影响作用, 使系统的耦合非线性特性更加突出, 这给系统动力学研究带来困难。因此有必要采用三阶累积量或高阶累积量进行分析, 其具体过程如下:

齿轮传动系统模型如图 1 所示, 系统在电机驱动正常运转条件下, 提取各测点处的扭振响应信号作为三阶谱分析信号, 即研究系统在随机激励作用下的扭振特性, 由于测量等各方面因素, 必然有一些随机噪声混入。通过提取传动系统扭振响应和旋翼桨叶摆振(弯曲)响应, 进行归一化处理及去均值后, 变成零均值的振动信号, 计算三阶累积量, 并可得到三阶谱图如图 2 和图 3 所示。从图中可见, 谱图出现了许多谱峰, 遍及整个二维频率平面。通过设置幅值的阈值(如均方根值等), 当超过该阈值时, 认为该频率成份对系统具有贡献,

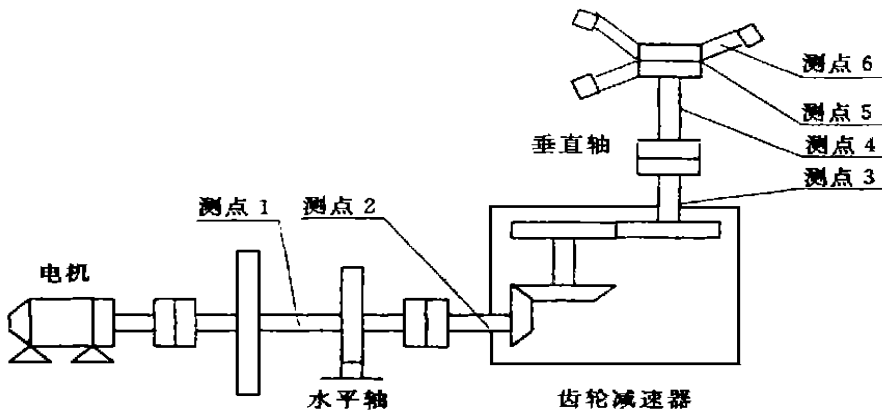


图 1 齿轮传动系统简图

表 1 系统固有频率识别结果(单位: Hz)

名称	阶次	1	2	3	4	5	6	7	8
桨 叶	理论值	15.77	36.68	94.69	228.04	254.87	348.25		
	功率谱法	13.00	32.50	96.50	223.80	253.80			
	ARMA 法	14.513	35.19	90.285	225.38	246.38			
	三阶累积量法	13.50	35.30	91.75	225.20	257.25	347.75		
传 动 系 统	理论值	27.34	74.21	183.76	237.33	294.89	494.97	550.88	636.96
	功率谱法	25.00	65.00	187.50	232.50	290.00			
	ARMA 法	25.198	63.382	182.38	237.108	297.587	479.287	557.958	594.117
	三阶累积量法	25.25	70.00	177.50	237.50	295.00	490.30	557.50	630.70

是系统特征频率。那么通过分析该特征频率(弃除啮合频率, 旋转频率及各自谐频等) 即可获得系统固有频率, 其结果如表 1 所示。表中给出了理论分

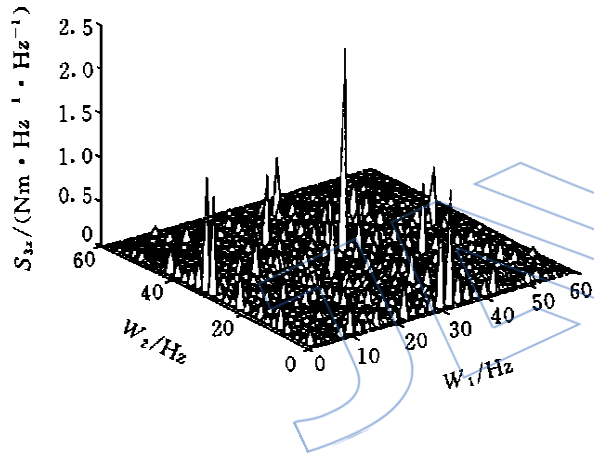


图 2 桨叶三阶累积量谱

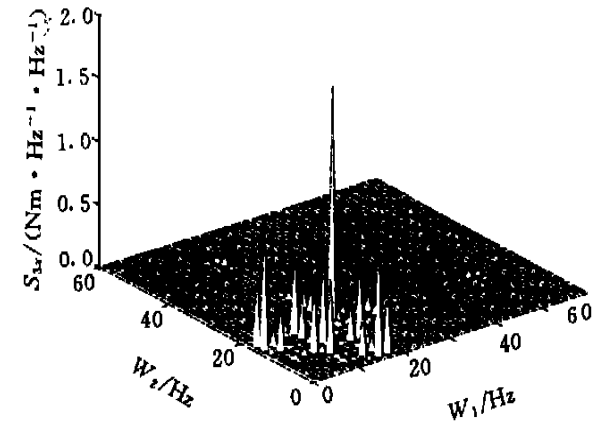


图 3 水平轴三阶累积量谱

析结果^[6]和用功率谱法及时间序列分析法(ARMA 法)^[7]的识别结果, 传动系统对应的各阶振型是扭转振动振型, 而桨叶各阶振型对应于摆

振(弯曲) 振型, 两者通过结构上的结合而耦联起来。理论值是根据文献[6] 得出的, 即按照 Weber 公式计算轮齿啮合刚度, 锥齿轮啮合刚度是按照当量直齿轮来处理的; 轴承刚度根据系统传递功率(7. 5 kW) 以及刚度与载荷间的非线性特性、通过计算而得到; 之后建立传动系统集中参数模型(子结构 1) 和桨叶有限元模型(子结构 2)^[5]通过整体系统分析计算而得到。根据研究结果表明: 齿轮非线性系统低阶固有频率(小于 1505 Hz) 基本上稳定在某一数值附近, 故表中取其平均值。

从表中对比结果可知, 功率谱法由于不能抑制噪声, 故识别精度受到一定限制。三阶累积量法与 ARMA 法的识别结果是一致的, 但识别的准确度有所提高, 比功率谱法更高, 特别是高阶固有频率识别得更为准确。这一方面说明了三阶累积量(高阶累积量) 对噪声确有抑制作用, 识别精度比功率谱法和时域法高, 而时域法确因偶然因素影响识别精度有所降低; 另一方面还说明了齿轮啮合刚度对于高阶固有频率影响较大这一结论的正确性^[8], 采用时域法识别的高阶频率不是很准, 而应用三阶累积量分析法, 由于可以检测系统的非线性特性, 故识别结果更为准确。

4 结 论

高阶累积量是近年来现代信号处理方面迅速发展的高新技术, 是非高斯信号处理的重要内容。本文将其应用于齿轮传动系统的非线性调制分析当中, 识别了系统的动态固有频率等特性, 研究结果表明高阶累积量对噪声确有抑制作用、识别精度高以及可以检测系统的非线性特性, 这给系统的动力学研究提供一种新的有效方法。

本文仅是用高阶累积量识别齿轮系统动态特

性(固有频率)的探索,对于更为可靠的识别方法可以利用累积量的相位信息、并结合对振型的识别进行判定,关于这方面的工作,有待于进一步研究。

参考文献:

[1] Dogan M C, Mendel J M. Cumulants-Based Blind Optimum Beamforming [J]. IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30: 722– 741

[2] Zhang X D, Zhang Y S. FIR Systems Identification Using Higher Order Cumulants Alone [J]. IEEE Trans. Signal

Processing, 1994, 42: 2854– 2858

[3] 方同. 工程随机振动[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995

[4] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995

[5] 邵忍平, 沈允文等. 齿轮旋翼传动系统动态固有特性识别[J]. 航空动力学报, 1997, 12(2): 206– 208

[6] 邵忍平. 齿轮传动系统振动特性辨识及声辐射机理研究: [博士学位论文][D]. 西安: 西北工业大学, 1999

[7] 邵忍平, 孙进才. 齿轮旋翼系统时域特征识别[J]. 机械传动, 1998, 22(4):

[8] 邵忍平, 沈允文, 孙进才. 齿轮减速器系统可变固有特性动力学研究[J]. 航空学报, 2000, 21(4):

(责任编辑 王震华)

A Gear System Identification Method Based on Higher Order Cumulants

SHAO Ren-ping, SUN Jin-cai, SHEN Yun-wen

(2nd Dept., Northwest Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: A gear transmission system exhibits a coupling nonlinear vibration due to the nonlinearity of gear meshing, bearing and gearbox supporting system stiffnesses incorporated with the modulating of gear and bearing as well as the nonlinear coupling of rotary wings. The dynamic signals of the system appear of complicated non-Gauss and nonlinear characteristics. A new method of modern signal processing—the higher order cumulant was adopted. The nonlinear modulating characteristics of the system were monitored by determining the dynamic response of the transmission system and helicopter rotary wings. The dynamic natural frequencies of the transmission system and the rotary wings were obtained by analyzing in the cumulant domain. Its comparison with the power spectrum method and the time-series analysis (ARMA) identification Method shows that the higher order cumulant method is superior in noise inhibiting, higher identification accuracy and nonlinear characteristic extracting of the system.

Key words: gear transmission system; rotor wings; dyanmic properties; higher order cumulant; identification

(The Chinese test of the following abstract is printed in PP439– 441)
(上接第 441 页)

Experimental Investigation of Ejector with Main Flow Inclined

ZHANG Kun-yuan¹, XU Hui¹, SHEN Ping-yuan², XU Qi-qiang², NIU Yan-yun²
〔1. 2nd Dept., Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Aeroengine Research Institute, Shenyang 110015, China〕

Abstract: Four ejector models designed with changeable main flow angles were investigated experimentally under four back pressure and five flow angles. The results indicated that the ejection coefficient N of the model with constant cross section was higher than the model with diffusion inlet. The maximum N of 3.379 was measured from model №4. It was found that the model №4 has a favorable performance among the tested four models.

Key words: ejector; turbulent mixing; experiments