

文章编号:1000-8829(2001)03-0053-03

一种新的测量系统频率响应的方法

A New Way for Measuring System Frequency Response

(西安交通大学 陕西 西安 710065) 张三宝, 刘文江

(北京林克海德信息技术公司 北京 100027) 和甸涛

(西安二零所 陕西 西安 710000) 聂泽昆

摘要:以指数衰减的组合正弦信号作为系统输入信号,同时实时采集系统输出,在已知系统输入及输出的基础上,运用离散傅立叶变换求得系统频率响应,并采用频域补偿法对所求得系统频率响应进行处理,解决了系统的频率响应在高频端不准确这一特殊问题,从而得到了一套对单输入单输出系统频率响应的测量方法,具有较大的实用价值。

关键词:频率响应;频域补偿;最佳滤波参数

中图分类号:TP13

文献标识码:A

Abstract:The system output is real-time sampled by taking the exponential descent sine combined signal as the system input. Based on the known system input and output, the system frequency response is obtained through using the discrete Fourier transform and processed by the frequency domain compensation, so resolving the problem of inaccuracy of the frequency response of the system at the high frequency end and thus getting a measuring method of high applicable value for the single input and single output system frequency response.

Key words:frequency response; frequency domain compensation; optimum filtering parameter

在实际工程应用中,为了了解系统的频率特性,一般需要测量系统的频率响应。频率响应法、相关分析法、谱分析法都能确定系统的频率响应,但当系统输入、输出在所计算区间不趋于零时,系统频率响应的取得需要较复杂的计算。本文提出了一种新的测量系统频率响应的方法:首先以指数衰减的组合正弦信号作为系统输入信号,并采集系统输出,然后应用离散傅立

叶变换计算系统的频率响应,由于测量引入的噪声影响,使系统频率响应在高频端剧烈起伏,因此采用频域补偿法对系统频率响应进行处理,以解决系统的频率响应在高频端不准确这一特殊问题。频域补偿法的最佳滤波参数的确定采用 A. Bennis 和 S. M. Raid 提出的方法^[2],并推广到离散频域中。文章最后给出一个实例,取得了满意的补偿效果,该方法可以用于单输入、单输出系统频率响应的测量问题。

1 滤波函数的确定

应用反卷积公式可以求出系统的脉冲响应 $h(t)$, 已知系统输入 $x(t)$ 和系统输出 $y(t)$ 则

$$h(t) = y(t) \otimes x(t) \quad (1)$$

式中“ \otimes ”为反卷积运算符,如令 $H(j\omega)$ 、 $Y(j\omega)$ 、 $X(j\omega)$ 分别为 $h(t)$ 、 $y(t)$ 、 $x(t)$ 的傅立叶变换,则有

$$H(j\omega) = Y(j\omega) \oslash X(j\omega) \quad (2)$$

$$H(k) = Y(k) \oslash X(k) \quad (3)$$

(3) 式为(2)式的离散形式。

在实际应用中,由于测量引入的噪声影响,使得反卷积很不稳定。为避免系统频率响应在高频段剧烈起伏,必须采用数字滤波器对系统频率响应高频段进行处理,得到一个稳定的解。

定义滤波后系统的频率响应

$$H_e(j\omega) = Y(j\omega) \oslash \alpha(j\omega) \quad (4)$$

式中, $\alpha(j\omega)$ 为非零函数。取综合性能指标 E 为

$$E = E_e + u E_c \quad (5)$$

$$E_e = \int_{-W_0}^{W_0} |H(j\omega) - H_e(j\omega)|^2 d\omega$$

$$E_c = \int_{-W_0}^{W_0} |H(j\omega) \oslash \alpha(j\omega)|^2 d\omega \quad (6)$$

式中, u 为加权系数; W_0 为系统通带带宽; E_e 为滤波前后系统频率响应的差异,定义 E_c 是为了限制 $\alpha(j\omega)$ 有界。把(4)式、(6)式代入(5)式,并令 E 为最小,可得出

$$\alpha(j\omega) = \frac{X^*(j\omega)}{|X(j\omega)|^2 + u} \quad (7)$$

收稿日期:2000-09-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(69974029)

作者简介:张三宝(1971—),男,陕西丹凤人,工程师,博士。主要从事系统辨识、测试技术方面的研究。

把(7)式代入(4)式得:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} \cdot \frac{|X(j\omega)|^2}{|X(j\omega)|^2 + u} = H(j\omega) \frac{|X(j\omega)|^2}{|X(j\omega)|^2 + u} \quad (8)$$

变换到离散域中有

$$H(k) = \frac{Y(k)}{X(k)} \cdot \frac{|X(k)|^2}{|X(k)|^2 + u} = H(k) \frac{|X(k)|^2}{|X(k)|^2 + u} \quad (9)$$

(8)式、(9)式为频域补偿法滤波后的频率响应函数。

2 最佳滤波参数的确定

根据 A. Bennia 和 S. M. Raid 提出的确定最佳滤波参数的方法,并将其推广到离散频域中,可简述如下:首先根据频率响应模 $|H(k)|$ 的变化情况,将频段分为 3 段,即:通带,携带系统的主要信息;过渡带,携带一定数量的信息和噪声;阻带,携带大量的噪声和极少的系统信息。然后分别计算 3 个频段的标准偏差 $q_1(u)$ 、 $q_2(u)$ 、 $q_3(u)$,对应到离散域中,标准偏差可定义为

$$q_1(u) = \frac{1}{N_1} \sqrt{\sum_{i=0}^{N_1-1} [|H(k)|^2 - |H_c(k)|^2]^2} \quad (10)$$

$$q_2(u) = \frac{1}{N_2} \sqrt{\sum_{i=N_1}^{N_2-1} [|H(k)|^2 - |H_c(k)|^2]^2} \quad (11)$$

$$q_3(u) = \frac{1}{N_3} \sqrt{\sum_{i=N_2}^{N_3-1} [|H(k)|^2 - |H_c(k)|^2]^2} \quad (12)$$

式中, N_1 、 N_2 、 N_3 分别为 3 个频段的离散频率边界点,画出 $q_1(u)$ 、 $q_2(u)$ 、 $q_3(u)$ 随 u 变化的曲线,所求的最佳滤波参数 u 应使得 $q_1(u)$ 的值尽可能小, $q_2(u)$ 的值适中, $q_3(u)$ 的值尽可能大,即在低频段滤波影响尽量小,保持原系统的特性;在高频段强度尽量大,以消除噪声影响,而过渡带滤波强度选择适中。

3 实例

本实例原理如图 1 所示。

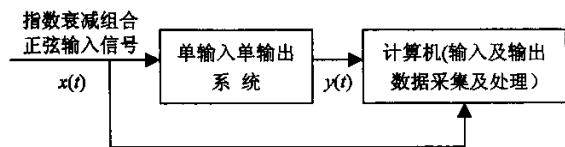


图 1 实验原理图

指数衰减的组合正弦信号由自行研制的信号发生器产生,单输入单输出线性系统通过模拟电路来实现。计算机对系统输入及输出信号进行实时采集及存储,然后进行傅立叶变换、最佳滤波参数确定、频域补偿法

计算等,最终给出系统频率响应的测量值。

根据文献[3],要维持对系统的持续激励和有效辨识,如需辨识的参数为 m 个,频域最优输入信号应至少包含 $(m+1)/2$ (m 为奇数)或 $m/2$ (m 为偶数)个单频率正弦信号的凸组合组成。本实例输入信号 $x(t)$ 采用指数衰减的组合正弦信号(8 个不同频率的正弦信号组合)表达式如下:

$$x(t) = e^{-0.5t} \left[\sum_{i=1}^8 \sin(w_i t) \right] \quad (13)$$

式中, W_i 分别为 0.05π 、 0.1π 、 0.3π 、 0.5π 、 0.9π 、 1.2π 、 1.4π 、 1.6π 。

模型为二阶系统,其传递函数为

$$H(s) = \frac{s+1}{3s^2+2s+1} \quad (14)$$

实时采集到的输入及输出信号如图 2 所示。在采集的时间段,应满足系统输入、输出信号近似为零。对输入及输出信号进行 DFT 变换,求得系统幅频特性 $|H(k)|$,如图 3 所示;并把频带划分为通带、过渡带、阻带,对各频带的标准偏差进行归一化处理,并画出其随 u 的变化曲线,如图 4 所示,选择最佳值 $u=5$,并对系统频率响应依据(9)式进行补偿,补偿后的系统频率响应幅频特性 $|H_c(k)|$,如图 5 所示。比较图 3 和图 5,在低频段, $|H(k)|$ 与 $|H_c(k)|$ 及实际系统频率响应基本相同,而在信号高频段, $|H_c(k)|$ 有较大幅度的下降,与实际系统频率响应基本相仿。

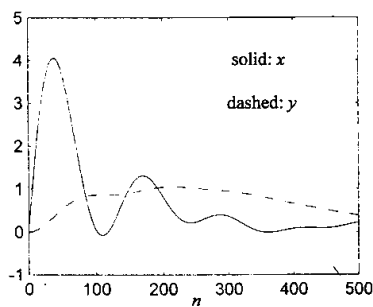


图 2 系统输入及输出

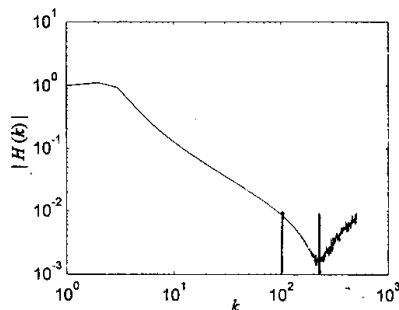


图 3 补偿前系统频率响应曲线

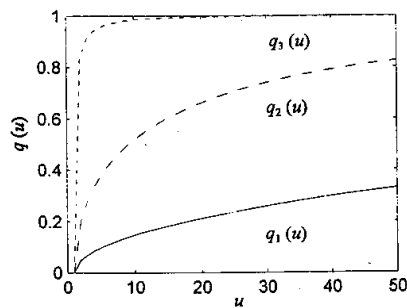


图 4 标准偏差随 u 的变化曲线

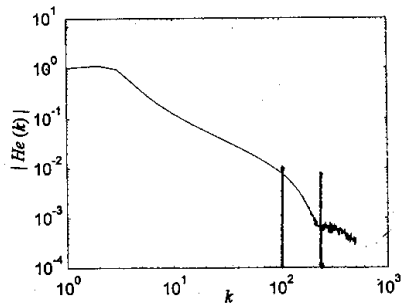


图 5 补偿后系统频率响应曲线

注 图 2 中的横坐标 n 为时域采样序列 ,图 3 及图 5 的横坐标 k 为经过傅立叶变换后频域的离散序列 ,对于 $x(n)$ 及 $x(k)$ 其关系式为

$$x(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}$$

式中 , N 为时域采集样本总数。

4 结论

以指数衰减的组合正弦信号作为系统输入信号 ,在已知系统输入输出的基础上 ,运用离散傅立叶变换和数字滤波求得系统频率特性 ,从而得到了一套对单输入单输出系统频率响应的测量方法。实例表明 :该方法实现简单 ,并可对系统频率响应高频段进行有效滤波 ,解决了系统频率响应在高频段不确定这一特殊问题 ,具有一定的实用和推广价值。

参考文献 :

[1] Zhang Shuming ,Hu Yan ,Liu Wenjiang. Identification and estimation of center temperature of moving-bed coal gasification reactors[J].Proc. IEEE TENCON 95 Control Theory Appl. 1995 ,14(2) 448 - 453.

[2] Bennia A ,Riad S M. An optimization technique for iterative frequency domain deconvolution. IEEE Trans ,1990 ,IM-39(2) 358 - 362.

[3] 胡德文 ,万百五 .系统辨识的最优输入(OI D)综述[J].控制理论与应用 ,1989 ,4(8).

