

离散傅里叶变换在电离辐射探测器 性能分析中的应用

邢桂来

(清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084)

摘要:为了研制性能优良的电离室探测器前置放大器,以满足冷轧钢板测厚仪的需要,本文将傅里叶分析方法应用于电离室探测器前置放大器的性能分析中。通过对探测器零点数据的离散傅里叶变换(DFT),对电离室探测器前置放大器的设计予以有效的指导,设计出应用于实际冷轧钢板测厚仪中的电离室探测器前置放大器。

关键词:离散傅里叶变换;频谱;前置放大器

中图分类号:TL811.1

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2012)02-0239-04

Application of DFT in Performance Analysis of Detectors Used for Ionizing Radiation Measurement

XING Gui-lai

(Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to develop the front-end amplifier in the gas-filled ion chamber, which was used in high accuracy thickness gauge for cold-mill steel strip, the Fourier analysis was applied in evaluating the performance of the front-end amplifier in the gas-filled ion chamber. Based on the research for the discrete Fourier transform (DFT) with the zero-point data sampled from the chamber, the design of the front-end amplifier in the chamber was optimized and it was used in the actual thickness gauge.

Key words: discrete Fourier transform; frequency spectrum; front-end amplifier

电离辐射探测器的探测对象是光子、质子、中子等粒子,在一些场合下,粒子的能量有限、注量不大,探测器所产生的信号很小(电流为nA量级,甚至更小)。小信号测量易受外界噪声的干扰,若探测器前置放大器(以下简称为探测器前放)设计不佳、屏蔽不良、甚至PCB板走线不合理,均有可能造成探测器测得的信号动

态范围小、信噪比差。本文基于工作实践,将傅里叶变换方法用于对冷轧钢板测厚仪的电离室探测器输出数据的分析,以达到分析探测器前放性能、优化探测器的目的。

1 离散傅里叶变换基本原理^[1]

1822年,法国工程师傅里叶(Fourier)指

出,任意一个函数 $x(t)$ 均可分解为无穷多个不同频率正弦信号的和,这即是谐波分析的基本概念。在数字计算机时代,模拟信号所携带的信息均被处理为基于 0 和 1 的二值离散数据。模拟信号通过 A/D 变换为离散的数字信号。连续函数 $x(t)$ 因此被抽样为离散的有限长序列 $x(nT_s)$ ($n=0, 1, 2, \dots, N-1, T_s$ 为采样周期)。离散傅里叶变换(DFT)将离散的时域信号 $x(nT_s)$ 与离散的频率点结合,使谱分析得以在数字计算机上实现。

根据 DFT 理论, $x(t)$ 的 N 个抽样点的频谱为:

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

其中: $n=0, 1, 2, \dots, N-1; k=0, 1, 2, \dots, N-1$ 。通常,为应用 DFT 的快速算法(快速傅里叶变换,FFT), N 取值为 2 的整数次幂。

式(1)的处理结果为复数,在绘制信号频谱时需进行相应的取模运算;另外,为使频谱图直观,通常还会采用半对数图。

1.1 DFT 的频率分辨率

DFT 变换中,频谱的最小间隔,即频率分辨率为:

$$\Delta f = f_s/N = (1/T_s)/N = 1/(N \cdot T_s) = 1/t \quad (2)$$

其中: t 为信号采集总时间(即收集 N 个采样数据总共需要的时间, $t=NT_s$)。

由式(2)可知,要提高 DFT 的频率分辨率,必须采集更长的数据序列,在 t 给定(即采集总时间固定)的条件下,单纯提高采样频率无法提高频率分辨率。

式(1)实际上只给出信号 $x(nT_s)$ 在 $0 \sim 2\pi f_s$ 角频率范围内,以 $2\pi f_s/N$ 为间隔的 N 个角频率点上的频谱,即在 $-f_s/2 \sim f_s/2$ 频率范围内,以 $\Delta f(f_s/N)$ 为间隔的 N 个频率点上的频谱。因为负频率没有实际物理意义,式(1)给出的是 $0 \sim f_s/2$ 频率范围内 $N/2$ 个频率点上的频谱。

1.2 采样频率与抽样定理

根据乃奎斯特(Nyquist)抽样定理,若连续信号 $x(t)$ 为有限带宽(其频率的最大值为 f_c),对 $x(t)$ 抽样时,若保证抽样频率 $f_s \geq 2f_c$,可由 $x(nT_s)$ 恢复出 $x(t)$,即 $x(nT_s)$ 保留了 $x(t)$

的全部信息。也就是说,当采样频率 f_s 确定后,它只能对带宽 $f_c \leq f_s/2$ 的信号进行准确恢复。

2 DFT 在电离辐射探测器性能分析中的应用

清华大学核能与新能源技术研究院核技术实验室研制的冷轧钢板测厚仪(图 1),是用 X 光机作为射线源,气体电离室为探测器,应用于冷轧钢板生产线,对冷轧钢板厚度进行在线检测的测厚设备。其中的电离室探测器信号电流最大为百 nA 量级,探测器前放单次数据采集时间为 4.4 ms(信号经 1 次模数转换(A/D)的时间,即 $T_s=4.4$ ms),A/D 有效位数为 16 bit,满量程数据最大为 65 535。

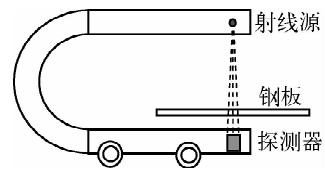


图 1 测厚仪系统原理图

Fig. 1 Model of strip thickness gauge

2.1 探测器前放的电磁屏蔽

图 2a 为气体电离室探测器前放在未做良好电磁屏蔽处理时的零点输出数据(零点输出为探测器在未受到射线照射时的输出,其输出数值的变化直接表征探测器前放的性能),图 2b 为图 2a 中椭圆形区域的局部放大(纵坐标的探测器输出对应探测器前放输出信号经 A/D 后的数值,为无量纲量,通过转换可与探测器的信号电流相对应;横坐标的采样次数为 A/D 的输出次数)。

利用式(1),将图 2a 的数据(取 2 048 个点,即 $N=2\ 048$)进行 DFT 处理,并将结果绘制于图 3(根据式(2),频谱图中频率分辨率为 0.111 Hz,频率范围为 $0 \sim 113.6$ Hz,据此将频谱的横坐标直接转换为频率值)。由图 3 可看出,非良好屏蔽的情况下,频谱中有 50 Hz 的尖峰(这个尖峰正是来自于 50 Hz 市电的影响)。

由图 3 可知,需对探测器前放进行良好电

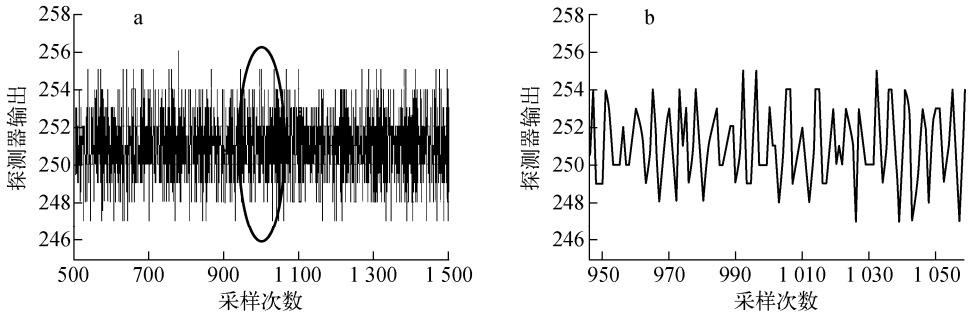


图2 探测器前放未做良好电磁屏蔽时探测器的零点输出数据

Fig. 2 Zero-point data from detector using front-end amplifier without well shielding

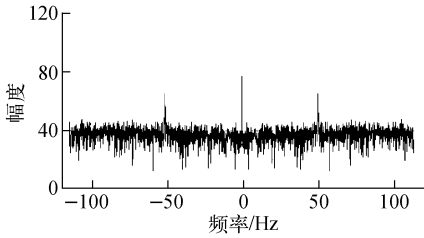


图3 非良好屏蔽下的 DFT 频谱

Fig. 3 DFT spectrum without well-shielding

磁屏蔽。图 4a 所示为探测器前放在做好电磁屏蔽处理后的零点输出数据,图 4b 为图 4a 中椭圆形区域的局部放大。可见探测器前放在良好屏蔽后,其性能明显提升,屏蔽前零点数据不确定度有 12 个码,在屏蔽后仅有 1 个码。

类似地,对图 4 中数据(取 2 048 点)进行 DFT 处理,并将频谱绘制于图 5。从图 5 可知,50 Hz 的干扰在做好良好屏蔽后被消除。

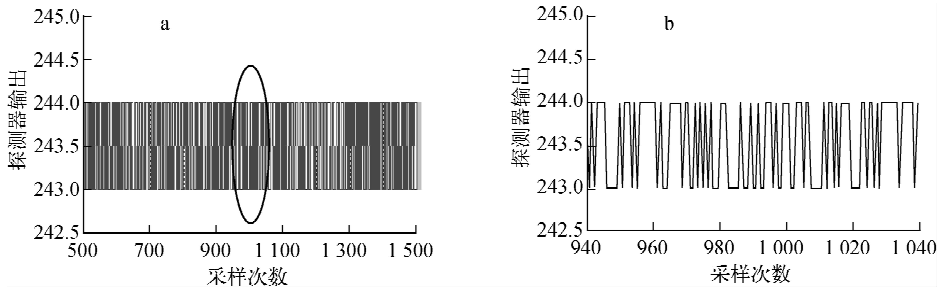


图4 探测器前放做好良好电磁屏蔽时探测器零点输出数据

Fig. 4 Zero-point data from detector using front-end amplifier with well shielding

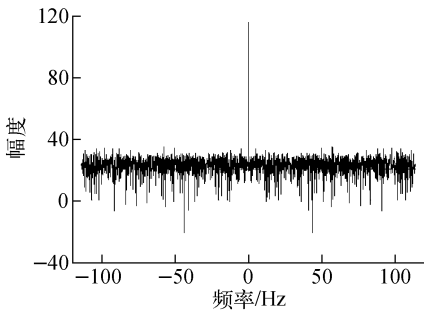


图5 良好屏蔽下的 DFT 频谱

Fig. 5 DFT spectrum with well-shielding

分,要求电路板在元器件布局和信号走线上妥善处理,否则数字电路的噪声极易被引入到模拟信号中,造成电路噪声增大,测量准确度下降。图 6 所示亦为测厚仪电离室探测器的零点输出曲线,但与图 4 相比,虽也做好了良好屏蔽,但其性能很差,约有 11 个码的不确定度。其原因是使用的探测器前放电路板(PCB)与图 4 中使用的不同,该前放虽经过较好的数字、模拟信号的分区布局,但 PCB 上的走线是电路板制作软件自动布线,而未经过防止数字信号串入模拟信号的特殊设计。

将图 6 中的零点数据用式(1)进行处理,将频谱绘制于图 7。可看出,零点数据中混杂有

2.2 探测器前放电路板布线对其性能的影响

探测器前放电路通常包含数字和模拟部

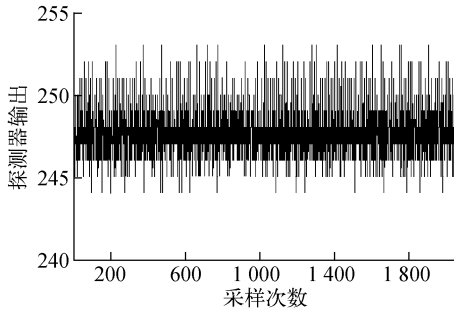


图6 探测器前放 PCB 布线不良的
探测器零点数据

Fig. 6 Zero-point data from detector using
front-end amplifier with bad routing on PCB

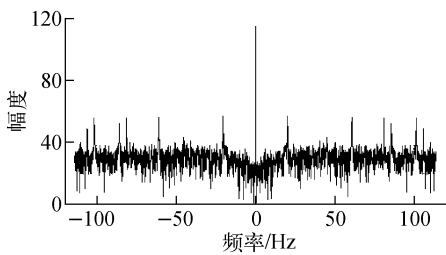


图7 PCB 布线不良时的 DFT 频谱

Fig. 7 DFT spectrum at front-end amplifier
with bad routing on PCB

多个频率的噪声信号(约为 20、60、80 Hz 等),零点信号噪声水平高,信噪比差,其原因正是由于布线不合理,造成了模拟与数字信号的混杂以及地电流回流分布的杂乱无序。

3 结论

通过以上两个应用实例可见,傅里叶变换在探测器前放的性能分析中有如下作用:1)可直接给出探测器所受到的干扰信号的频率;2)根据该频率点上幅值的大小,可确定所受干扰的大小;3)信号的频谱可直接体现信号的信噪比情况。

在冷轧钢板测厚仪的探测器前放设计过程中,通过运用本文的方法,对探测器零点信号进行 DFT 频谱分析,有效地完成了探测器前放的布线优劣及其屏蔽性能的评估,对探测器前放的研制、性能优化及定型起到了重要的作用。

参考文献:

- [1] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实践 [M]. 北京:清华大学出版社,2001.

“2012 年中国网络科学论坛”通知

为了回顾和探讨中国网络科学及其交叉领域的发展,展望未来面对的挑战与机遇,在诺贝尔奖得主李政道为主任的中国高等科学技术中心的积极支持下,即将召开“2012 中国网络科学论坛”,本论坛在 2012 年第八届网络科学论坛基础上,同时关注以微博为代表的社会化网络,李政道已经为论坛发来热情洋溢的贺信和亲笔题词:“融合科学与艺术,发展世界之和谐”,这正是本次论坛的宗旨,论坛主题为“科学与艺术的和谐统一”,着重探讨自然科学与社会科学在新媒体时代下的融合与发展,开展科学、艺术、人文等交叉学科之间的广泛交流。

网络正在改变着人们的生活,网络科学是网络时代的研究前沿,今天有必要站在社会科学、艺术、人文的角度研究社会化媒体的传播机制、社会网络分析、网络演化、数据挖掘、网络可视化、微博营销、舆情监测等问题。在网络信息时代,自然科学家和社会科学家只有联合起来,才能让网络更好地服务于人们的生活,更好地促进我国网络的进一步发展。

论坛时间:2012 年 4 月 27—29 日。论坛规模:600~1 000 人。论坛地点:中国传媒大学。主办方:中国传媒大学;协办方:中国原子能科学研究院、中国社会网研究学会、北京师范大学和中国科学院系统科学研究所。论坛组织联系人:方锦清研究员(中国原子能科学研究院)和沈浩教授(中国传媒大学)。网上报名注册:<http://event.weibo.com/333745? fuid=1657809832& t=1>

论坛组织委员会热烈欢迎多个领域跨学科的广大研究生、高校老师、科学工作者、艺术家和人文学者共同参与论坛,一起携手促进我国网络科学与社会科学、艺术、人文之间的交叉与和谐统一发展。

(方锦清报道)