

浅析数字信号处理技术在计量测试中的应用

张杨阳

内蒙古自治区计量测试研究院, 内蒙古呼和浩特, 010010;

摘要: 本文围绕数字信号处理技术在计量测试领域的应用展开研究, 阐述了数字信号处理技术的基本原理与特性, 分析其在计量测试中数据采集、信号滤波、特征提取等环节的关键作用, 探讨该技术为计量测试带来的精度提升、效率优化及功能拓展等优势, 并对未来发展趋势进行展望, 旨在为数字信号处理技术在计量测试领域的深入应用提供理论参考。

关键词: 数字信号处理技术; 计量测试; 数据采集; 信号分析; 应用发展

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 03. 016

引言

在科学技术快速发展的今天, 计量测试工作在工业生产、科学研究和质量控制等多个领域中都扮演着越来越关键的角色, 测量的准确性和效率直接关系到产业的发展程度。数字信号处理技术由于具有较强的信号分析、处理和优化能力, 而成为计量测试技术革新中不可忽视的动力。这种技术将信号数字化, 能有效地提取有用信息, 抑制噪声干扰, 并明显提高计量测试精度和可靠性。

1 数字信号处理技术基本理论

数字信号处理技术就是利用数学算法将离散化数字信号经过分析、转换、滤波和增强, 从而提取出有用信息或者提高信号质量的一种技术体系, 在信号采样环节中, 根据奈奎斯特采样定理, 要求连续模拟信号必须以不少于其最高频率 2 倍的采样率离散化, 这样就可以把时域内的连续信号变换成一个时间离散序列。量化过程涉及对采样后信号的幅度进行离散处理, 即将连续的幅度范围映射到有限的离散量化等级上, 这个过程可能会产生量化误差, 因此需要通过优化量化位数来控制精度^[1]。在编码阶段, 量化的离散值被转换成二进制数字序列以便于在计算机中储存和处理, 在数字信号处理领域, 算法处理占据核心地位, 其中常见的算法有快速傅里叶变换 (FFT)、数字滤波技术以及小波变换等。FFT 以一种有效的计算策略将时域信号变换到频域进行表达, 从而直观地显示出信号中的频率成分, 并为分析信号特征提供了依据; 像有限脉冲响应 (FIR) 滤波器和无限脉冲响应 (IIR) 滤波器这样的数字滤波技术, 可以基于预定的频率属性, 有效地抑制信号中的噪声和无效部分, 从而达到信号的纯化目的; 小波变换能够在时域和频域上对信号进行多层次的分析, 尤其是在处理非

平稳信号时, 它能够准确地捕获信号的局部属性。

2 数字信号处理技术在计量测试中的应用价值

数字信号处理技术在计量测试领域的运用, 从根本上改变了传统的测量方式, 为提高测试的精度、优化效率和扩展功能带来了显著的价值, 就促进测量精度而言, 数字信号处理技术能够有效地抑制噪声干扰和提高信号信噪比, 利用数字滤波算法实现了对测量信号高频噪声、工频干扰和其他无用成分的精准识别和去除, 较好地保留了实际物理信号特征。同时通过信号重构算法可以恢复出损伤或者缺失信号, 以降低测量误差。以微弱信号检测为例, 锁相放大技术与数字信号处理算法相结合, 可以提取出埋藏在噪声深处的微弱有用信号, 从而提高测量灵敏度几个数量级, 从优化测试效率的层面上看, 数字信号处理技术使得测量过程自动化和实时化。高速数字信号处理器和并行处理架构能够在非常短的时间内完成大量数据的处理和分析, 与传统的模拟信号处理方法相比, 大大缩短了测试周期。同时, 基于数字信号处理的智能测量系统能够自动识别信号特征、判断测量状态, 实现故障诊断与自适应调整, 减少人工干预, 提升测试流程的自动化程度。

从功能拓展上看, 数字信号处理技术使计量测试系统具有了更强大的分析能力。利用频谱分析和时频分析算法可以对信号频率特性、调制特征以及瞬态变化进行深度挖掘, 从而为复杂物理量测量提供更加多维度的数据。除此之外, 数字信号处理技术也支持多种参数的融合测量, 通过联合处理多个传感器的信号, 能够对复杂的物理现象进行全面的表征和分析, 从而拓宽了计量测试的应用范围。这些价值一起促进了计量测试技术向着高精度、智能化和多功能的方向不断发展, 从而为工业

生产和科学研究提供了更加可靠的技术支持。

3 数字信号处理技术在计量测试中的应用方法

3.1 在数据采集环节中运用

在进行计量测试的数据收集过程中,数字信号处理技术主要是通过改进采样策略和数据转换机制来确保原始信号的完整性和准确性,根据奈奎斯特采样定理,为了避免信号混叠失真的产生,必须以不少于信号最高频率的2倍采样率将模拟信号离散化。在实际使用时,经常使用过采样技术,即采样率比理论值高几倍进行数据采集,经过后续数字滤波和抽取算法后,在提高微弱信号捕捉能力的同时减少了量化噪声,提高了信噪比,在进行数据转化时,模数转换器(ADC)的表现会直接决定采集的品质。数字信号处理技术利用误差补偿算法修正ADC非线性失真和温漂等固有误差^[2]。如利用数字校准技术实时补偿ADC失调误差及增益误差,保证量化数字信号能真实地反映原模拟信号特性。另外,将多通道同步采集技术和数字信号处理算法相结合,可以通过时间戳标记和相位校准等技术来实现多路信号高精度同步采集,消除了通道之间时延误差,以满足例如振动测试和声发射监测多参数协同测量的需要。

针对复杂环境中信号的采集问题,数字信号处理中也引入了自适应采集策略。通过对信号动态范围、频率特性进行实时分析,实现了采样率和增益的自动调节。比如在冲击信号采集过程中,该系统能够在发现信号突变的一瞬间提高采样率并将信号瞬态特征完整地记录下来,同时在信号平稳期减小采样率从而节约存储资源,并达到采集效率和数据质量之间的均衡。

3.2 对信号进行滤波和降噪处理

在数字信号处理技术中,信号滤波和降噪是增强计量测试信号品质的关键步骤。在进行计量测试时,原始信号经常会混杂有工频干扰、白噪声和环境电磁干扰等不必要的成分,因此需要通过数字滤波算法来进行净化处理,有限脉冲响应(FIR)滤波器和无限脉冲响应(IIR)滤波器均为数字滤波领域的两大经典类型^[3]。FIR滤波器是一种线性相位特性的滤波器,可以通过设置不同抽头系数灵活地设计出低通、高通、带通和带阻滤波特性,常被用于抑制振动信号中低频噪声等相位敏感测量情景。IIR滤波器采用递归结构来实现高阶滤波特性,在保持相同性能指标的情况下,其计算需求较低,特别

适合于需要高实时性的应用场景,例如音频信号的噪声处理,除了传统的滤波器之外,自适应滤波算法对于动态噪声环境也表现出了特有的优越性。最小均方(LMS)算法和递归最小二乘(RLS)算法能够依据输入信号的统计属性,自动调节滤波器的系数,从而实现对非平稳噪声的动态追踪和抑制。以电子天平称重测试为例,自适应滤波器能够实时地消除环境振动、电磁干扰等因素对微弱电信号造成的干扰,增强测量稳定性,小波降噪方法为处理非稳态信号开辟了新的路径,该方法采用多分辨率小波分解的方法,把噪声和有用信号分配到不同小波系数上,并采用阈值处理除去含噪系数后重建信号,实现了突变信号、瞬态信号降噪,广泛应用于机械故障诊断和声发射检测。

3.3 对信号特征进行提取和分析

信号特征提取和分析的目的就是从纷繁复杂的测量信号当中提取出能反映物理现象本质特征的参量,从而为计量测试结果判读和故障诊断奠定基础。数字信号处理技术利用时域、频域和时频域的分析方法来达到深度挖掘信号特征的目的,时域分析时,通过对信号均值、方差、峰值和峭度统计参数的计算,可以直观地反映出信号强度、波动程度和冲击特性。如在诊断滚动轴承故障时,振动信号峭度值可以敏感反映轴承表面损伤所诱发的冲击特征,并为故障预警奠定基础。自相关和互相关分析主要用于揭示信号本身或不同信号之间的相似性和时延关系,这通常用于信号的定位和源的识别,频域分析是借助于傅里叶变换把时域信号变换到频域进行表达,并对其频率成分和幅值分布进行分析得到其频谱特征。通过功率谱密度(PSD)的分析,我们可以对各个频率部分的能量分布进行量化,这有助于识别设备的异常振动频率并确定故障的种类。倒频谱分析方法是通过对频谱的二次转换来提高信号中的周期性部分的识别能力,这在齿轮箱的故障检测中能够有效地区分调制信号和故障的特定频率。

时频分析方法集时域和频域分析优点于一体,能直观地显示出信号中各频率成分在时间上的变化情况,短时傅里叶变换(STFT)是一种通过窗口处理来完成信号局部频谱分析的方法;小波变换运用了多尺度分析技术,以实现非平稳信号的高精度时频定位;希尔伯特-黄变换(HHT)采用经验模态分解(EMD)方法,将信号拆分为多个本征模态函数(IMF),然后执行希尔伯特变

换,实现复杂信号自适应时频分析,在旋转机械故障诊断和生物医学信号处理中具有广泛的应用前景。

3.4 计量测试信号频谱分析和处理

频谱分析和处理是数字信号处理技术中解析计量和测试信号频率特性最核心的方法,把时域信号变换到频域可以清楚地揭示出信号中频率成分、能量分布及其关系,为信号特征识别、故障诊断和系统性能评估等提供了关键信息,快速傅里叶变换(FFT)被广泛认为是最常见的频谱分析方法,它利用高效的蝶形计算结构,显著减少了离散傅里叶变换(DFT)的计算难度,从而实现了信号频谱的迅速分析。在进行电力系统的谐波分析时,FFT能够准确地估算电压和电流信号中的各个谐波的振幅和相位,从而对电能的质量进行评估。为了增强频谱的分辨能力,经常使用加窗方法来减少频谱的泄露。通过选用汉宁窗、布莱克曼窗等多种窗函数,我们可以在主瓣宽度和旁瓣衰减之间找到平衡,从而提高频谱分析的准确性,功率谱密度(PSD)的估计被视为频谱分析的关键扩展,它被用来量化信号在各种频率上的能量分布情况。经典周期图法和改进 Welch 法采用分段平均处理减小频谱估计方差;现代的频谱估计技术,例如 AR 模型和 MA 模型,都是基于参数化建模的。即使在数据量受限的情况下,这些方法仍然能够实现高分辨率的频谱估计,特别适合于微弱信号的检测和故障特征的提取。

频谱处理中,数字信号处理技术可以通过频域滤波和频谱校正来优化信号的质量。频域陷波滤波可以精准地压制特定频率下的干扰成分;为了解决 FFT 分析中出现的频率偏移问题,频谱校正算法采用了插值计算和相位校正的方法,从而提升了频率测量的准确性。另外,以频谱分析为基础的信号调制辨识技术还可以通过对信号边带特征和载波频率进行分析来辨识出调幅(AM)和调频(FM)调制模式,它在通信信号测试和雷达信号分析中都有很大的应用价值。

3.5 基于数字信号处理的计量校准和补偿

采用基于数字信号处理的计量校准和补偿方法,对测量系统的误差特征进行了建模和分析,并使用特定算法对测量数据进行了修正,从而增强了计量测试的精确度和稳定性,计量测试时,测量系统难免会出现非线性失真、温漂和时漂,从而使测量结果与真实值产生偏差,

数字信号处理技术为误差的校正和补偿提供了一种高效的解决途径,在进行非线性校正的过程中,数字信号处理方法是构建输入与输出的非线性模型来描述测量系统的非线性属性。常用的有多项式拟合和神经网络建模。多项式拟合是通过收集若干标准输入信号和其相应的输出信号并采用最小二乘法对多项式系数进行拟合来建立输入输出关系数学模型,然后再将实际测量数据非线性修正。神经网络因其出色的非线性映射功能,在大量样本数据训练后,能够自动掌握测量系统的非线性属性,从而达到高度精确的非线性校正。以压力传感器标定为例,采用以上方法能够对传感器非线性误差进行有效校正,从而提高压力测量精度。

温漂与时漂补偿,是计量校准的又一重点,数字信号处理技术采用温度传感器对测量系统环境温度进行实时采集并建立测量数据和温度关系模型。采用回归分析和卡尔曼滤波的算法动态地补偿温度变化带来的测量误差。针对时漂,可以利用自适应滤波算法根据测量数据中的历史与当前数据实时地对补偿参数进行调整,以消除随着时间推移而慢慢发生漂移的误差。电子测量仪器中温漂、时漂补偿技术是以数字信号处理为基础,可显著改善仪器长期稳定性及测量精度。

4 结束语

综上所述,数字信号处理技术的引入为计量测试行业带来了翻天覆地的变化,它在提高测量的准确性、改进测试流程以及扩大应用范围等多个方面都起到了至关重要的作用。尽管当前应用仍面临硬件性能、算法优化、标准规范等挑战,但随着技术的不断进步,数字信号处理技术与人工智能、物联网与其他新兴技术结合在一起,将是今后的一个重要发展方向。今后,在计量测试领域将会得到更深更广的运用,并为各行各业高质量发展提供更为扎实的技术支持。

参考文献

- [1] 梁洁,李军. 航空发动机计量测试发展浅析[J]. 内燃机与配件,2025(06):145-147.
- [2] 林杰,孙静,冯佳楠,胡建阳,张修建,金鹏. 人工智能数据计量测试探索[J]. 宇航计测技术,2025,45(02):97-102.
- [3] 李元,王艳. 江西发布计量测试促进产业创新发展优秀案例[N]. 中国市场监管报,2025-05-22(001).