

微纳技术应用中的快速频率响应测量方法

Tomi Roinila¹, 刘凯², 席文明², 雷李辉², 俞 骁³, 张惠国⁴, Matti Vilkkö¹

- (1. 坦佩雷理工大学 自动化科学技术系, 芬兰 坦佩雷 33101;
2. 厦门大学 机电系, 福建 厦门 361005;
3. 中国科学院 上海微系统与信息技术研究所传感技术联合国家重点实验室, 上海 200050;
4. 常熟理工学院 物理与电子工程学院, 江苏 常熟 215500)

摘 要: 频率响应测试技术作为一种有效的系统辨识技术, 可用于开发新型全自动系统, 如微注射等. 由于缺乏快速、高效的测量方法, 频率响应测试技术仍未得到广泛应用. 典型的频率响应测试是采用传统的正弦扫描法, 一次测量往往需要几分钟. 本文提出一种快速测量方法, 以最大长度的伪随机二进制序列作为激励信号, 利用互相关技术处理输出信号, 得到系统的特征频率响应. 采用这种方法只需几秒钟就能获得频率响应的测试结果. 对三种不同系统的实际测试结果证实了该方法的有效性.

关键词: 微纳技术; 频率响应; 激励信号设计; 快速分析

中图分类号: TN06 **文献标识码:** B **文章编号:** 1008-2794(2013)04-0039-07

1 引言

纳米相关技术的快速发展, 推动了其他领域如物理^[1]和化学^[2]中纳米技术的广泛应用. 这些应用中, 由于微纳器件非常脆弱且容易损坏以及相应的反馈信号强度小, 其自动测控水平还很低. 为了更好地了解测试对象系统的特性, 完成更高自动化水平的测控, 需要先建立一个合适的数学模型. 可用的数学模型有两种形式: 参数化模型和非参数化模型. 参数化模型下反馈的是诸如系统差分方程组系数等系统参数, 而非参数化模型下反馈的是脉冲响应或频率响应等信号. 参数化模型需要事先对系统建立较为完整的几何模型甚至有限元模型, 而非参数模型只需要选择合适的输入激励, 而不要求对系统的总体参数进行估计或任何限定性假设. 非参数模型比参数化模型直观, 非参数模型中辨识对象也比在参数化模型中的更简单, 可迅速完成计算取得结果, 因而往往具有高的测量效率. 这两种方法既可以用于时域分析, 也可以用于频域分析^[3].

采用阶跃响应信号的时域分析方法简单直接, 能够为系统的动态特性提供充分的信息, 但由于抗干扰能力较差, 具有一定局限性. 实际测试中, 通常增大阶跃步长来提高测试性能, 但因此可能使系统变得更加非线性. 此外, 这种测试仅能在极其有限的频带宽度内得到信号, 得到的数据信息对于复杂和高干扰性的系统精度低. 相对传统的时域分析, 另一种选择是在频域中分析系统过程. 目前许多领域中的应用都表明了它可以提供最有效的系统动态信息, 相比时域中的分析, 频域中的分析具有许多优势^[3].

收稿日期: 2013-03-24

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目“高灰阶低干扰LED显示驱动芯片关键技术研究”(BK2011366)

通讯联系人: Tomi Roinila(芬兰), 博士后, 研究方向: 系统建模、仿真及分析, E-mail: roinit@rpi.edu.

测量频率响应的简单方法是直接利用对单频正弦输入信号的响应来辨识系统. 虽然这种方法可以得到精确可靠的响应,但其存在着测量时间长的缺陷. 由于只能对单正弦信号逐频测量,使得一个测量周期通常需要几分钟甚至几个小时,在实际应用中效率较低.

相对于对单频正弦输入信号响应的辨识,更好的选择是使用基于宽频带激励信号的测试技术^[4]. 因为具有宽频带的激励信号在多个频率处都有能量,因此可以在这些频率处同时测量频率响应. 相对于通过逐个频率来测量频率响应,这种方法可以通过一次测量获得所有需要的信息,从而大大降低了测量次数.

这些具有宽频带的信号通常可被分为二进制序列、伪二进制序列以及非二进制序列,每种信号都有一些较好的特性^[5]. 在微纳系统的连续监测和评估中,为了保证正常的操作,一个重要的前提条件是系统受到的干扰要小. 因此,在选择激励信号的时候,必须选择在时域范围内幅值很小而在频域范围内幅值能量能够达到最大的激励信号. 分析这种激励特性的方法是测量信号峰值因子,就是所谓的峰值系数. 峰值系数越小,信号幅值的能量就越大. 研究显示,二进制序列信号具有最低可能的峰值系数^[6],被认为是敏感系统持续频率响应函数测量的最有效的激励之一. 二进制序列信号相对于伪二进制序列信号以及非二进制序列信号的另一个优点是它能应用于只能输出少数几种信号的低成本系统.

在频率响应测量中,测量频率响应最常用的二进制信号之一是周期性的伪随机二进制序列(PRBS)信号. 作为其中的一种特殊信号,最大长度二进制序列(MLBS)信号由于激励简单、峰值系数低、良好的频率性质等特性,被普遍用于系统识别中,基于MLBS的测量技术已经成为许多非线性系统中测量频率响应的常用测量方法^[7-9].

随着微纳技术的发展,系统分析有了新的手段,基于频域测量技术的系统分析方法逐渐受到关注. 本文研究基于伪随机二进制序列和互相关技术分析方法,并对其在微纳领域中的潜在应用进行简要概述.

2 测试理论

2.1 互相关技术

考虑一种稳态的线性系统,其采样模型为

$$y(m) = \sum_{k=1}^m g(k)u(m-k) + v(m) \quad (1)$$

式中: $y(m)$ 是采样输出信号, $u(m)$ 是输入信号, $g(m)$ 是系统脉冲响应, $v(m)$ 是干扰信号,例如测量噪声和量化噪声^[4]. 输入和输出信号之间的互相关函数由下式表示

$$R_{uy}(m) = \sum_{k=1}^m u(k)y(k+m) = \sum_{k=1}^m g(k)R_{uu}(m-k) + R_{uv}(m) \quad (2)$$

式中: $R_{uu}(m)$ 是输入信号的自相关函数, $R_{uv}(m)$ 则是输入信号与干扰信号之间的互相关函数. 在白噪声作为输入信号的情况下具有以下特点

$$\begin{cases} R_{uu}(m) = \alpha\delta(m) \\ R_{uv}(m) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: α 表示 $u(m)$ 的方差, $\delta(m)$ 为 Kronecker 函数. 因此,输入信号的自相关函数是一个 δ 函数,而输入信号和干扰信号的互相关函数为零. 在(3)式成立的条件下,公式(2)中的互相关函数可以表示为:

$$R_{uy}(m) = \alpha g(m) \quad (4)$$

因此,通过测量输入和输出信号之间的互相关可以得到系统的脉冲响应. 通过有限长度信号获得的一个估计值与 $R_{uy}(m)$ 得到一个估计的脉冲响应. 通过应用离散傅里叶变换,脉冲响应可以转换到频率范围并且表示成频率响应函数

$$\hat{G}(e^{j\omega T_s}) = \frac{1}{\alpha} \sum_{k=0}^{M-1} \hat{R}_{uy}(m) e^{-jk\omega T_s} \quad (5)$$

式中: $\hat{G}(e^{j\omega T_s})$ 为近似频率响应函数, M 表示采集的信号数据的总长度, T_s 为采样间隔, $\hat{R}_{uy}(m)$ 为测量的输入与输出信号之间互相关的近似值, (5) 式成立的条件是系统的干扰为类似白噪声的信号干扰. 这个条件可以通过应用 PRBS(伪随机)信号来近似获得.

2.2 最大长度二进制序列

二进制最大长度序列(MLBS)是一种特殊的 PRBS 信号. PRBS a_k 表示最大长度序列, 并且满足线性递归函数:

$$a_k = \sum_{i=1}^n c_i a_{k-i} \mod(2) \quad (6)$$

式中: C_i 的值为 1 或者 0, a_k 的周期为 $p=2^n-1$ [10], 周期的长度由 C_i 的值决定, 通过合理的设定 C_i 值可以得到最大的周期长度. 通过运用异或反馈的 n 位移位寄存器(如图 1 所示)可以有效地获得 MLBS 信号. 在实际的应用中, 通过移位寄存器得到的 0 和 1 被映射成 +1 和 -1, 产生一个均值接近零的最大对称长度序列.

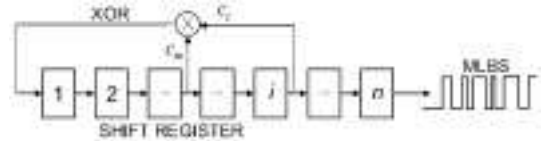


图 1 MLBS 的形成

MLBS 与真正的随机白噪声有相似的频谱特性. 但由于其确定性的性质, 它可以精确地重复激励. 因此, 可以通过计算多个响应周期信号的平均值来增加信噪比.

MLBS 的功率谱被定义为 ACF 序列的傅里叶转换, 它描述了信号能量是如何划分的. 频谱由 sinc2 函数表示 [11].

$$\Phi_{MLBS}(q) = \frac{a^2(N+1)\sin^2(\pi q/N)}{N^2(\pi q/N)^2}, q = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (7)$$

式中: q 代表的是谱线的序列号, N 为序列的总长度. 功率谱有一个包络线并在生成序列的频率处降到零, 如图 2 中所示, Δt 表示相邻 bits 之间的时间间隔. 信号能量最大处的频率称为谱频. 谱频发生在频率为 q/T_p 的地方, T_p 是一个信号周期的时间长度. 在黑箱系统 FRF 的测量中, 激励信号在系统频率范围内的每个特定频率上通常应该有近似相同的能量.

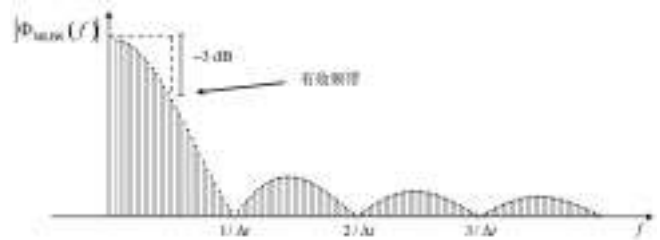


图 2 MLBS 功率谱的形状

从图 2 中可以看出, MLBS 中的能量并不是一致地分布在谱频上, 除非通过产生足够高频率的序列来近似实现. 当能量降幅在 3 dB 以内时, 则可以近似认为频谱是平直的, 而且这部分激励信号才称为有效频带(effective frequency band).

当测量频率超出有效频带时, 由于信号能量下降较多, 甚至在 $N/\Delta t$ 的地方下降为 0, 信号将变得难以捕捉. 因此, 必须选择合理的信号频率, 使测量对象的系统频率在信号频率的有效频带内.

2.3 MLBS 的设计

频率响应的 MLBS 激励的特性由以下变量所决定.

f_{gn} - MLBS 生成频率; P - 一个 MLBS 周期的长度; R - MLBS 周期的数量; a - MLBS 的振幅; f_{BW} - 感兴趣的频带宽度.

如图 2 所示, MLBS 的功率谱在第一个谱频处取得最大值, 在 $q = P/3$ 处到达有效频带边缘. 因此, MLBS 的生成频率至少要达到所感兴趣的频带宽度的三倍以上, 从而为整个测量频带内提供近似一致的能量.

MLBS 的周期 P 的选择要满足两个条件. 文献[11]表明测量结果会因时间重叠而破坏, 除非一个激励周期 T 至少和所设置的系统脉冲响应的时间一样长. 另一个关于 P 选择的说法是它表明了频率的分辨率. 因此, P 的选择应该满足如下条件:

$$P=2\cdot(2^n-1)\geq f_{gn}T$$

(8)

MLBS的周期数 R 可由随机噪声能量的估计值决定. 通过多次的激励周期可使噪声下降 $1/\sqrt{R}$. 这种方法会增加测量时间而且只有当随机噪声被考虑的时候才能被使用.

激励振幅需要仔细地选择. 它不能太大,以免对动态非线性现象的产生造成太大的影响,但又不能太小,以便提供好的信噪比. 非线性特性和噪声特性取决于试验设备和特定的操作条件. 因此,振幅很难进行选择,它取决于人们是否对设备及其操作很了解.

3 基于快速频率响应测量的实验

这一部分列出了几个将本文提出的方法应用于微纳技术领域的实例. 包括一个已经由本文第一作者发表的实验和两个新的实验. 第一个实验表明这种快速测量技术如何被应用在微注射系统中,包括检测微细胞注射过程中的接触角,以及一系列的操作^[7]过程中毛细管的破损和阻塞情况. 第二个实验则是关于对压电驱动结构在微纳米应用中的特性分析. 第三个实验对用于测量微注射中微力的PVDF压电传感器的特性进行分析.

3.1 细胞注射中的异常现象

微注射过程指通过微玻璃吸管将一个活细胞的薄膜刺破,然后通过压力脉冲将液体注射进细胞内. 这一应用领域包括药物研发、细胞生物学研究(例如基因组学研究)、体外毒理学以及抗癌研究等.

该实验显示了如何将频率响应技术应用于检测细胞注射时的接触情况以及一系列的操作过程中毛细管的破损和阻塞情况. 而这些过程由于很难直接观察,一直以来都是自动注射系统发展面临的主要挑战.

图3显示的是测量装置的概念性图解. 实验中用到的软件是Matlab xPC Target,通过仿真产生MLBS信号. xPC Target是一个可以快速产生系统原型的平台,它的最大采样频率是50 Hz. 连接电脑和实际测量设备的接口板是国家仪器公司的PCI-6052E. 该卡的最大采样频率和最大数模转换频率都为333 kHz.

系统的实际测量设备是由文献^[12]中所提到的团队开发的接触式检测设备. 其操作过程如下:首先通过电压跟随器缓冲激励信号(MLBS),再通过电阻使信号降低,接着将信号输入到对象系统中;然后测量输出电流并把电流转换为电压;最后放大电压信号并读出. 该设备通过两个电极与对象系统相连接,这两个电极一个是测量电极,另一个是接地电极.

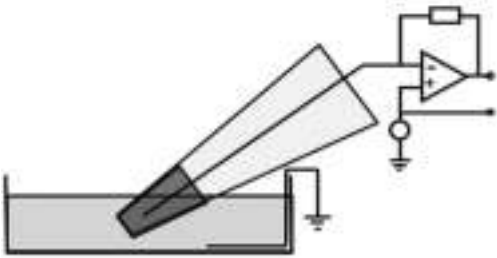


图3 测量装置的概念性图解

图4为测量的波特图,它显示了这种方法对检测吸管破损所起的作用. 从图中可以看出,吸管破损前后图形发生了明显的变化,从而有效辨识出这一过程. 当然,吸管的接触和阻塞同理也很容易检测出来.

3.2 压电执行器性能评估

压电执行器属于智能材料,对它施加外部压力会使其内部电荷分布发生变化. 通常这些传感器对压力变化的探测能够达到很高的灵敏度. 因此,它可以很好地应用在有关纳米技术的许多领域,以产生或检测很小的力.

本文中提到的方法同样可以有效地应用在分析压电执行器方面. 频率响应测量为评估微器件结构、

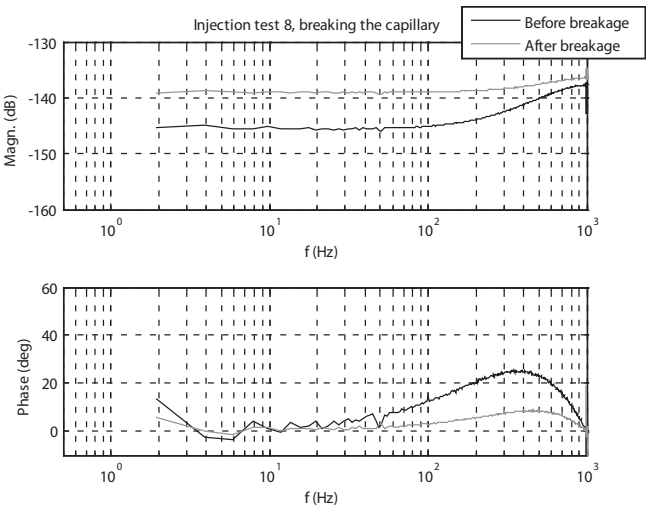


图4 微注射实验测量的波特图

研究执行器的运行条件以及分析质量^[13]等方面提供了很好的方法. 图5显示的是对某个压电执行器上阻抗的频率响应,它表明测得的共振峰值比在新器件中所测得要小得多. 因此,该实验表明这种方法可应用于相应的器件质量评估. 相对于传统的单频正弦类信号测量法,该方法将测试时间从2分钟缩短到了仅有2秒钟.

3.3 PVDF 压电传感器工作范围评估

在微操作的应用中,精确地测量微牛量级的力非常重要. 已有的研究表明 PVDF 压电传感器可以很精确地测量微牛量级的力^[14]. 它的工作原理是基于悬臂梁加速计,梁中的张应力产生压电响应,可以通过电流或者电压的形式来检测. PVDF 压电传感器可以检测连续或者脉冲式的振动和冲击.

本实验用一个 PVDF 压电传感器测量阻抗. 实验操作系统由一台 PC 机,测量数据卡 NI USB-6251,放大器和一个短量程的纳米平台(M-112.1DG)组成.

图6为测量系统的示意图. 平台通过一个小探针与 PVDF 的顶端相连. 通过 Matlab 和数据采集箱产生 MLBS 信号,然后将其传送到平台控制器,使平台前后运动,从而使 PVDF 产生相应的变形,再通过数据采集卡(MC)测量出 PVDF 上产生的电压.

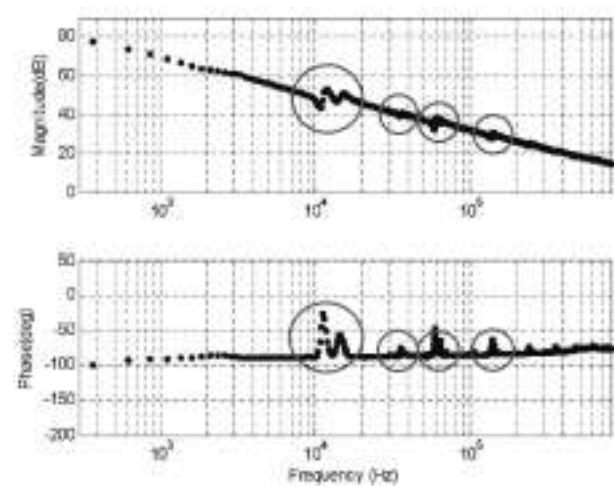


图5 压电驱动器阻抗的波特图

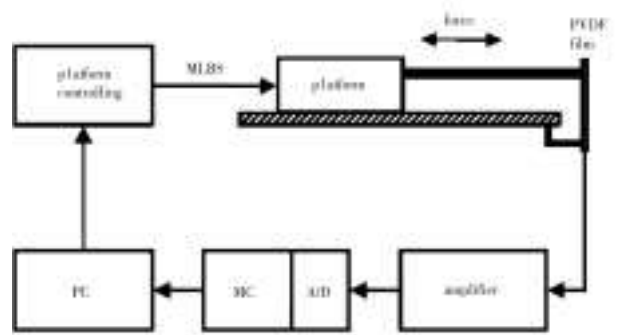


图6 测量系统示意图

图7为频率响应测量结果. 从图中可以看出,曲线非常一致,显示出了很高的信噪比. 在低频段,结果与预期一致. 然而在频率为16 Hz的地方振幅变化很多,这可能是由于对 PVDF 的不当操作引起的,还有待进一步的分析,不过至少说明了这个器件在某些频率下呈现出了超出预期的特性.

这个实验展示了如何无损、快速的对 PVDF 传感器性能进行分析. 其实验结果可用来检测所用的 PVDF 传感器在共振频率、带宽以及其他属性方面的有效范围. 由于整个测量过程仅有几秒钟,这种实验完全可以在每次该传感器进行实际探测前进行,从而使其更有效地进行力学测量.

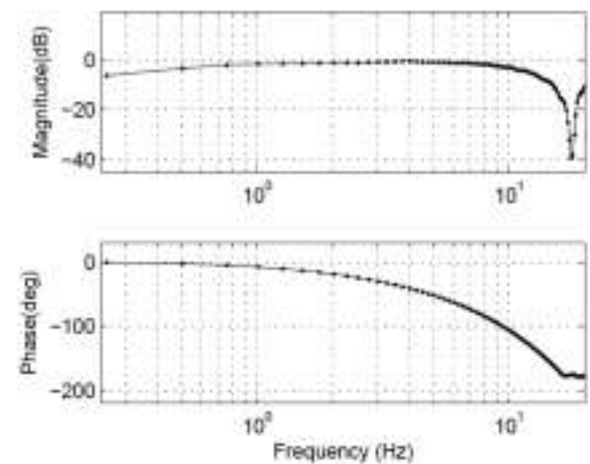


图7 PVDF的频率响应测量结果

4 结论

微纳技术领域的特点是应用系统尺寸非常小且动力学特性复杂,手工操作耗时且容易出错,因而自动控制的系统分析和机器人技术将对许多纳米操作过程提供极大的方便.

系统特征频率响应为微纳米技术领域中的研究分析提供了一个可能的方向,但这些快速可靠的测量方法还未在这一领域中被人熟知. 本文介绍了其中的几种方法,包括最大长度二进制序列和互相关技

术. 这些方法的特点在于当使用二进制序列信号时, 系统受到的干扰较小, 从而确保其正常运行. 另外, 由于激励信号采用二进制形式, 测试的成本可大幅降低. 利用本文介绍的方法, 测量时间只需要几秒钟, 而运用传统方法, 测试时间则需要几分钟到几个小时. 同时, 文中讨论的方法可在基于频率响应的很多应用中使用^[15-17].

参考文献:

- [1] Kasaya T, Miyazaki H T. Circular Graphical template software for accurate micromanipulation in a scanning electron microscope[J]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(1): 016104–016104.
- [2] Yamada M, Seki M. Microfluidics and microfabrication technology for highly precise cell manipulation and cultivation[C]. International Symposium on Micro–Nano Mechatronics and Human Science, 2011.
- [3] Pintelon R, Schoukens J. System Identification–A Frequency Domain Approach[C]. Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 2001.
- [4] Ljung L. System Identification–Theory for the User[M]. London: Prentice Hall PTR, 1999.
- [5] Godfrey K. Perturbation Signals for System Identification[M]. London: Prentice Hall, 1993.
- [6] Wulich D. Comments on the Peak Factor of Sampled and Continuous Signals[J]. IEEE Communications Letters, 2000, 4: 213–214.
- [7] Hirvonen J, Vilkkio M, Roinila T, et al. Estimation of Electrical Cell–Capillary Admittance During Injection with Frequency Response Method[C]. Proc. IFAC World Congress, 2008: 13749–13754.
- [8] Roinila T, Helin T, Vilkkio M, et al. Circular Correlation Based Identification of Switching Power Converter With Uncertainty Analysis Using Fuzzy Density Approach[J]. Journal of Simulation Modelling Practice and Theory, 2009, 17(6): 1043–1058.
- [9] Amrani M E H, Dowdeswell R M, Payne P A. Pseudo–random binary sequence interrogation technique for gas sensors[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 1998, 47, (1–3): 118–124.
- [10] Golomb S W. Shift Register Sequence[M]. San Francisco: Holden–Day, 1967.
- [11] Vanderkooy J. Aspects of MLS measuring systems[J]. Journal of the Audio Engineering Society, 1994, 42(4): 219–231.
- [12] Lukkari M J, Kallio P J, Linne M–L, et al. Electrical detection of the contact between a microinjection pipette and cells Proc[C]. IEEE Conference on Engineering in Medicine and Biology Society, 2004: 2557–2560.
- [13] Bowen C R, Lopez–Prieto M, Mahon S, et al. Impedance spectroscopy of piezoelectric actuators[J]. Scripta Materialia, 2008, 42(8): 813–818.
- [14] Yantao S, Ning X, Jung L W, et al. A high sensitivity force sensor for microassembly: design and experiments[C]. In Proc IEEE/ASME Conference on Advanced Intelligent Mechatronic, 2003: 703–708.
- [15] Roinila T, Vilkkio M, Suntio T. Fast Loop Gain Measurement of Switched–Mode Converter Using Binary Signal with Specified Fourier Amplitude Spectrum[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 17(6): 2746–2755.
- [16] Roinila T, Vilkkio M, Suntio T. Frequency Response Measurement of Switched–Mode Power Supplies in the Presence of Nonlinear Distortions[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(8): 2179–2187.
- [17] Vilkkio M, Roinila T. Fast Simulated Frequency Response Measurement for Switched–Mode Power Circuits[J]. Journal of European Power Electronics and Drives Association, 2010, 25 3): 14–20.

Introduction to Fast Frequency–Response Measurements in Micro and Nano Technology

Tomi Roinila¹, LIU Kai², XI Wen–ming², LEI Li–hui², YU Xiao³, ZHANG Hui–guo⁴, Matti Vilkkio¹

(1. Department of Automation Science and Engineering, Tampere University of Technology, Tampere 33101, Finland;

2. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China;

3. State Key Laboratories of Transducer Technology & Science and Technology on Micro–System Laboratory, Shanghai Institute of Microsystem and Information Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200050, China;

4. School of Physics and Electronic Engineering, Changshu Institute of Technology, Changshu 215500, China)

Abstract: Increasing automation is of great interest in various fields of micro and nano technology. Past studies have shown that frequency responses can provide efficient system-identification techniques which can be used in developing novel automated systems e.g. in microinjection. Despite this fact, the frequency responses have not gained so much popularity so far. The reason is that efficient and fast measurement techniques are not so well known in these fields. Typically the frequency responses have been measured by using traditional sine-sweep technique. The traditional technique requires several minutes for one measurement and hence, the development of most practical applications is effectively prevented. This paper presents a fast measurement technique where maximum-length binary sequence (MLBS) is applied as an excitation and the system-characterizing frequency responses are possible to obtain within few seconds. The proposed techniques are verified by experimental data from three different applications. The aim of the paper is to give a short introduction of the methods, thus becoming a starting point for engineers who are trying to find new ideas to implement fast system analysis.

Key words: micro and nano technology; frequency response; excitation signal design; fast measurement

声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中,以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文。该著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。

《常熟理工学院学报》编辑部