

测量条干均匀度的平行板式电容传感器优化设计

黄胜村, 姚恩涛, 左莹

(南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

摘要: 条干均匀度一般是指纱线沿轴向粗细变化的均匀程度; 检测纱线的微小变化对仪器灵敏度等指标提出了很高的要求, 因此对电容传感器的结构尺寸进行优化设计是很有必要的; 文章对平行板式电容传感器检测纱线的原理进行了研究, 并利用电磁场有限元分析软件 ANSYS, 构建了平行板式电容传感器三维模型, 分析了传感器极板尺寸参数的变化对灵敏度和线性度两个优化指标的影响, 提出多组传感器分段检测法, 完成对电容传感器尺寸的优化; 另外, 针对平行板电容边缘发散电场对检测结果产生干扰的问题, 提出等电位保护环法, 并仿真验证其对电容传感器边缘效应的抑制作用; 研究结果为平行板式电容传感器优化设计提供了依据。

关键词: 有限元仿真; 优化设计; 等电位保护环

Optimal Design of Parallel-plate Capacitance Sensors for Measuring Yarn Evenness

Huang Shengcun, Yao Entao, Zuo Ying

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Evenness refers to the uniformity of yarn in the axial direction. It is necessary to optimize the size of capacitive sensors, so as to detect little changes of yarn. The article studies the principle of detecting the quantity of yarn with parallel plate capacitance sensor, then constructs three-dimensional model using finite element analysis software to analyze the influence of size on sensitivity and linearity of sensors. Finally the optimal size is obtained with the method of multi-segmented detection. In addition, equipotential protection ring is proposed to restrain the interference caused by diverging electric field, and the method has been verified by ANSYS. The research results provide the basis for the optimal design of the parallel plate capacitance sensor.

Keywords: finite element simulation; optimal design; equipotential protection ring

0 引言

条干均匀度是指纱线、条子或者粗纱沿轴向较短片段内粗细或重量的均匀程度, 一般用不匀率 CV 表示, 而 CV 值则由纱线片段重量的标准差相对于其重量平均值的百分率计算得到。目前常用的测量条干均匀度的方法有切段称重法、黑板条干目测法和电容式传感器测量法。但是切段称重法需要将纱条按规定切成很多段进行分别称重, 耗费时间较多, 且对同一支纱无法实现重复测量, 属于有损检测; 黑板条干目测法需要人员直观的检测, 对黑板规格、检验时的光照、观察距离以及检测人员本身都有一定的要求。而电容传感器具有分辨率高、响应速度快、体积小、结构简单等优点, 被广泛应用。文章针对前两种检测条干均匀度的不足, 提出了平行板式电容传感器检测法。纱线在两平行极板间沿着纱线轴向方向移动的过程中, 由于纱线粗细变化会导致电容极板间检测区域内等效介电常数变化, 从而引起电容值变化实现由非电量到电量的转化。通过后续电路处理对所测的电容信息进行分析, 便可得到敏感区内被测纤维量的信息, 进而计算出纤维的均匀度。

因为纤维一般都很细, 其变化量更是微小, 这就对电容传感器的灵敏度提出了很高的要求, 所以对电容传感器的结构参数进行优化设计是很有必要的。当极板间介质不均匀时, 利用解析法获得电场及电容信息是相当复杂的, 因此文章利用有限元分析软件 ANSYS, 对平行板电容传感器进行三维仿真, 通过比较传感器各结构参数对其性能的影响, 优化结构参数, 最后通过仿真验证了施加等电位保护环对于抑制电容传感器边缘

效应的作用, 从而保证了测量结果的准确性。

1 平行板电容传感器检测原理

假设极板间空气的相对介电常数为 ϵ_r , 为纱线的相对介电常数为 S_a , 为极板正对面积, 纱线层与极板平行, D 为极板间距, d 为纱线层模型的厚度, 理想情况下认为极板足够薄, 厚度不计, 极板足够长, 忽略其边缘效应。平行板电容传感器的理想物理模型如图 1 所示。

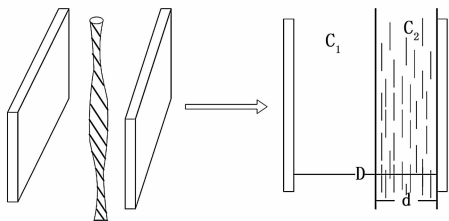


图 1 变介质式平行极板电容传感器

根据平行板电容的计算公式, 有:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_0 S_a}{\frac{D-d}{\epsilon_{r1}} + \frac{d}{\epsilon_{r2}}} \quad (1)$$

若空气的相对介电常数为 1, 则有:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\epsilon_0 S_a}{D-d + \frac{d}{\epsilon_{r2}}} \quad (2)$$

如果极板间纤维的厚度发生变化, 电容器的等效电容 C 将随之改变, 式 (2) 是平行板式电容传感器测量的理论基础。通过后续电路处理对所测的电容信息进行分析, 便可得到敏感区内被测纤维量的统计信息, 进而计算出纤维的均匀度。

2 电容传感器优化指标

由于纱线一般都非常细, 其沿轴向的均匀程度更难被感

收稿日期: 2015-10-21; 修回日期: 2015-12-04。

作者简介: 黄胜村(1991-), 男, 河北邢台人, 硕士研究生, 主要从事智能传感技术及系统方向的研究。

知,这就对传感器的灵敏度提出了很高的要求;另外,利用电容传感器测量条干均匀度是通过获得电容信息反向求解纤维重量(体积)信息,较好的线性度有利于纤维重量信息的统计。

考虑到灵敏度及线性度对统计得到的纤维重量的标准方差 S 和平均值 X 的影响,文中将传感器的灵敏度和线性度作为主要性能指标对极板结构参数进行优化设计,来提高测量条干均匀度的准确性。

1) 灵敏度,作为传感器优化的重要指标,其定义为:纱线接入敏感区后,由纱线重量(体积)变化引起的电容的相对变化量与纱线重量变化量的比值。

$$\Delta CA = \frac{\Delta C}{C} = \frac{C_{ij}(org) - C_{ij}(rear)}{C_{ij}(air)} \quad (3)$$

$$\eta = \left| \frac{\Delta CA}{V(org) - V(rear)} \right| \times 100\% \quad (4)$$

式中, η 为传感器的灵敏度, ΔCA 为纱线变化引起的电容相对变化量, $C_{ij}(org)$ 为敏感区放入固定型号纱线的电容值, $C_{ij}(rear)$ 为纱线量变化后传感器的电容值, $C_{ij}(air)$ 为空载(介质只有空气)时的静态电容值; $V(org)$ 为接入敏感区内的纱线的体积, $V(rear)$ 为敏感区内纱线量变化后的体积。在电容的相对变化量与纱线重量(体积)关系曲线中,其斜率的大小即为传感器的灵敏度大小,并且斜率越大,表示传感器的灵敏度越高。

2) 线性度,描述传感器静态特性的重要指标,其定义为:表征传感器输出—输入校准曲线与所选定的作为工作直线的拟合直线之间的偏离程度,该指标以相对误差表示。

$$\epsilon_L = \frac{\Delta Y_{max}}{Y_{ES}} \times 100\% \quad (5)$$

式中, ΔY_{max} 为输出曲线与拟合直线间的最大偏差; Y_{ES} 为满量程输出。由公式(5)可知, ϵ_L 值越小,传感器的线性度越高。

3 有限元分析

3.1 电容传感器的有限元法计算

根据有限元的思想,静电场问题的有限元分析法就是求解静电场能量泛函的极值问题。静电场中各点的电位可用泊松方程来描述,三维静电场的泊松方程为:

$$\nabla \cdot [\epsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = -\rho(x, y, z) \quad (6)$$

式中, $\epsilon(x, y, z)$ 为空间的介电常数; $\varphi(x, y, z)$ 为电场中各点的电位; $\rho(x, y, z)$ 为空间电荷密度,通常认为电容传感器的检测场内无自由电荷,即 $\rho(x, y, z) = 0$ 。此时,式(6)变为式(7)电磁场中的拉普拉斯方程。

$$\nabla \cdot [\epsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z)] = 0 \quad (7)$$

即电容传感器的敏感场可由拉普拉斯方程描述为:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\epsilon(x, y, z) \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon(x, y, z) \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon(x, y, z) \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) \quad (8)$$

边界条件为:

$$\varphi = \begin{cases} V & (x, y, z) \in \Gamma_i \\ 0 & (x, y, z) \in \Gamma_j \end{cases} \quad (9)$$

式中, Γ_i 和 Γ_j 分别为电容极板上的点所构成的集合。设激励极板 i 施加电压 V , 检测极板 j 接地。利用高斯定理可计算出极板 j 上的感应电荷:

$$Q_j = \oint_{(x, y, z) \in \Gamma_j} \epsilon(x, y, z) \nabla \varphi(x, y, z) \cdot d\Gamma_j \quad (10)$$

电极 i 和电极 j 之间的电容可通过如下公式(6)求得:

$$C_{ij} = \frac{Q_j}{V} \quad (11)$$

3.2 ANSYS 建模与网格剖分

为了便于建立物理模型进行仿真分析,文中将纱线实体抽象为几何中的圆柱体模型,并且将纺织行业中衡量纱线粗细的计量单位特克斯近似转化为几何中圆柱体的直径大小。

利用 ANSYS 有限元软件进行分析的基本过程主要包括创建有限元模型、施加载荷进行求解以及查看分析结果三部分。仿真模型如图 2 所示(规定沿纱线方向的极板长度 W 定义为极板纵向长度,垂直纱线方向的极板长度 L 定义为极板横向长度,极板间距为 D)。

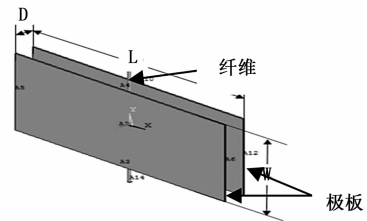


图 2 ansys 环境下纤维与极板仿真模型

设定好各个极板参数并建立好有限元模型后,利用网格剖分工具对传感器敏感区及空气区域进行剖分,然后使用软件自带的 CMATRIX 命令即可计算出极板间的电容值。其直接作用就是通过求取传感器敏感区内电位分布,然后通过后处理程序计算电容值。最后通过对数据的处理,进一步分析平行板电容极板参数对检测纱线灵敏度及线性度的影响。

3.3 参数设置

依据常用纱线的测量范围,针对影响测量结果的因素——极板横向长度和极板间距。选取不同的极板横向长度和极板间距,设计一组不同尺寸组合的传感器,将直径依次递增的纱线放入平行板电容器中心的位置,进行建模仿真,然后分析不同极板参数对于电容传感器检测纱线性能的影响。图 3 是在极板横向长度 L 由 $L1$ 到 $L6$ 依次增大,其他参数保持不变时测得的纤维体积与极板电容相对变化量的关系曲线;图 4 是在极板间距 D 由 $D1$ 到 $D7$ 依次增大,其他参数保持不变时测得的纤维体积与极板电容相对变化量的关系曲线。

3.4 性能指标比较

通过 ANSYS 仿真计算得到传感器在不同电极结构下的电容值,分析比较各结构参数对灵敏度及线性度的影响。

1) 极板横向长度的影响:由图 3 可以看出,当极板间距取定时,极板横向长度越小,检测纱线的灵敏度越高,但是在整个测量区间内线性度会变差。

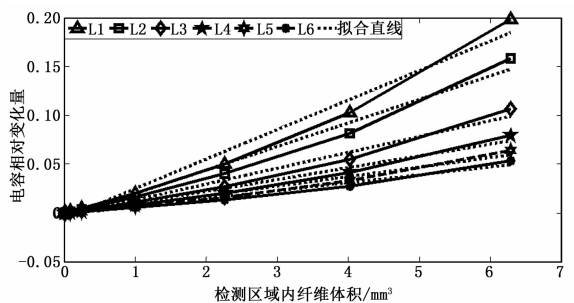


图 3 不同极板横向长度下,纤维体积与极板电容相对变化量的关系曲线及拟合直线图

2) 极板间距的影响:由图 4 可以看出,当极板横向长度取定后,极板间距越小,检测纱线的灵敏度越高,同样会使得

其线性度变差。

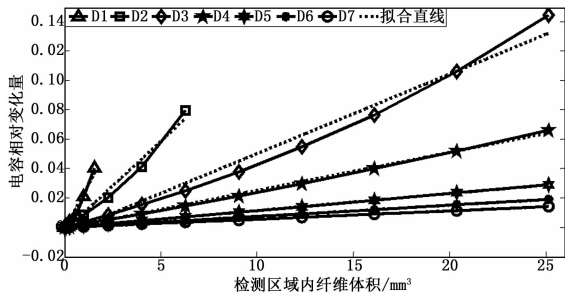


图 4 不同极板间距下, 纤维体积与极板电容相对变化量的关系曲线及拟合直线图

3) 纤维量的影响: 由图 3 和图 4 都可以看出, 当传感器结构参数固定时, 随着检测区域内纱线体积变大 (即纱线变粗), 检测纱线的灵敏度变大, 但是会使得整个测量范围内的线性度变差。

4) 极板横向长度与极板间距的影响对比: 极板间距对检测灵敏度的影响较极板横向长度对检测灵敏度的影响大得多, 或者说极板间距对于调节检测纱线灵敏度起主要作用, 极板横向长度主要用来改变信号强度, 调整电容传感器的电容值。

3.5 传感器尺寸设计

由 3.4 中的分析可以看出, 电容传感器在检测纤维的整个范围内无法同时兼顾灵敏度和线性度两个指标。文中将灵敏度作为优先考虑的指标, 在满足较高灵敏度的前提下, 力求能有较理想的线性度。

由上述分析可知, 极板间距对电容传感器的灵敏度有更为显著的影响, 且间距越小灵敏度越高。因此, 参考 3.4 中的分析结果以及进一步的仿真实验, 设定了 4 个间距不同的电容传感器。为了满足线性度的要求, 根据极板间距的不同将纤维的检测范围划分为 4 个区间, 从而最大限度地保证 4 个传感器在各自的检测区间内都有较高的灵敏度及较理想的线性度。

另外, 通过设定合适的极板横向长度, 保证电容传感器有合适的电容值, 便于后续电路检测电容信息。

图 5~8 为所设计的 4 个电容传感器在各自检测范围内, 纤维体积与极板电容相对变化量的关系曲线及拟合直线图。可以看出, 所设计的电容传感器组合整个检测范围内都能有较高的灵敏度和较好的线性度。

4 边缘效应抑制

通过以上仿真, 使平行板电容传感器的结构得到优化, 满足了检测纤维的灵敏度和线性度的要求。但是两平行金属极板的边缘存在发散电场, 该发散电场形成边缘附加电容, 影响到后续电路对传感器电容信息的检测, 进而影响纤维均匀度的计算结果。

在不加等电位保护环进行屏蔽时, 传感器的截面电位分布如图 9 所示 (该图是沿着纤维方向看进去的俯视图), 图中左右两侧为传感器极板, 中间部位为检测区域。由图 9 可以看出, 无屏蔽极板的电容传感器中检测区域的电位分布很不均匀。

按照图 10 所示的方式接入等电位保护环, 并且保证每一侧保护环电位与同侧的传感器极板等电位。

接入等电位保护环后的传感器截面电位分布图如图 11 所示, 可以看出检测区域内的电位分布比较均匀。

由于电力线垂直于图中的等位线, 可以看出未接入等电位

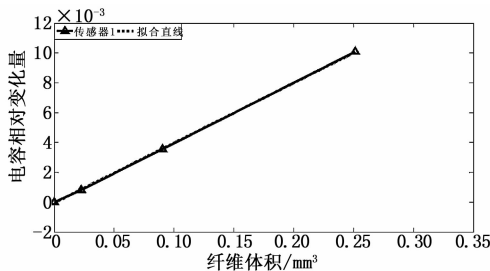


图 5 传感器 1 在其检测范围内的仿真特性图

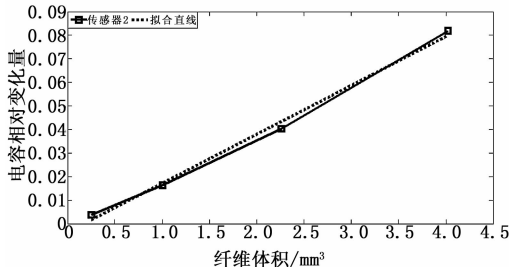


图 6 传感器 2 在其检测范围内的仿真特性图

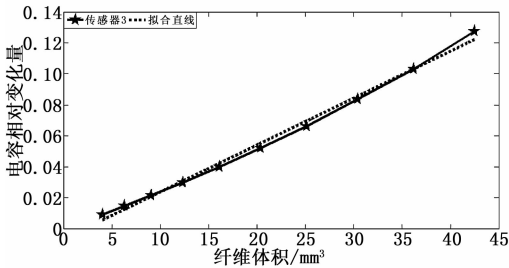


图 7 传感器 3 在其检测范围内的仿真特性图

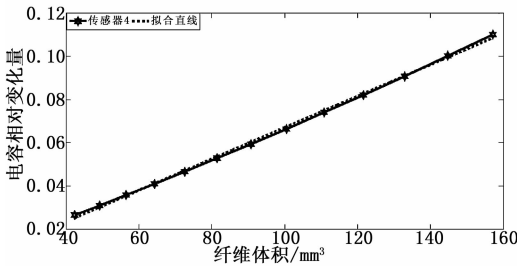


图 8 传感器 4 在其检测范围内的仿真特性图

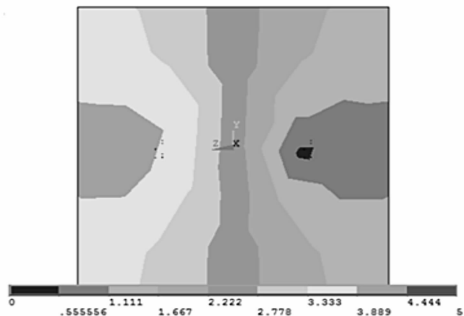


图 9 未加等电位保护环, 传感器电位分布图

保护环时电容传感器的电力线有向外发散的趋势, 特别是靠近两侧极板附近以及敏感区的边缘处, 导致传感器敏感场内不同位置的灵敏度不同, 检测结果会出现很大偏差。而带有等电位保护环的电容传感器在检测区域内电力线发散性较小, 传感器的边缘效应得到有效抑制, 灵敏度分布比较均匀, 在不同位置

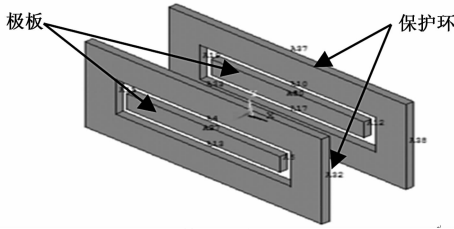


图 10 等电位保护环模型

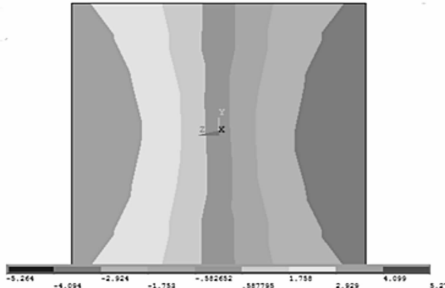


图 11 接入等电位保护环, 传感器电位分布图

进行测量时, 测量结果偏差不会太大。另外, 为了最大限度的减小测量偏差, 应该尽量将纱线置于检测区域中间部位。

(上接第 297 页)

块化设计, 主要由主控模块、PCM 信号设置模块、MIL-STD-1553B 信号设置模块、ARINC-429 信号设置模块、设置文件生成模块、设置文件加载模块、以太网数据模拟模块、UART 数据模拟模块组成。

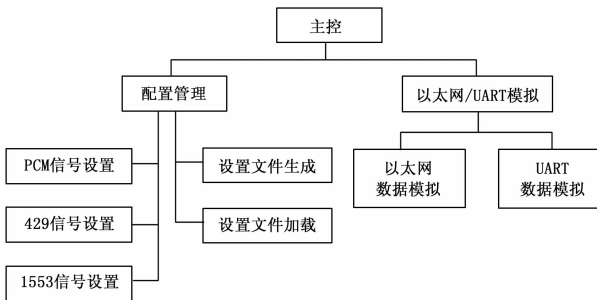


图 6 应用软件组成示意图

根据实际需要, 可分别调用相应软件模块对 PCM 信号模拟、1553 信号模拟、429 总线数据模拟进行相关设置, 包括发送的数据帧结构, 数据帧内容等。在完成全部设置后, 可选择生成配置文件并保存设置, 以便以后使用同样的配置。然后可通过设置文件加载, 将设置文件发送至相应的板卡。以太网及 UART 模拟数据的设置, 直接在以太网/UART 模拟软件中完成。在主控模块的界面中, 可进行仿真发送相关控制的设置, 包括各类仿真数据是否发送, 某一类数据通过哪些通道发送等, 以及是否连续循环发送, 还是逐帧发送。

地面软件与设备连接成功后, 根据设备的配置信息, 软件会显示各个信号源的启动状态, 根据需要选择相应信号源进行配置并输出信号。选取以太网为例来介绍, 双击信号源浏览处的以太网信号源。

选择好数据包类型之后点击数据定义, 将弹出对应类型的数据配置框 (IENA 或者 INET), 数据包定义配置好之后, 根据数据配置对话框来配置包定义的数据部分内容, 配置完成之

5 结论

文章使用 ANSYS 有限元分析软件, 构建了平行极板电容传感器与待测纤维量的三维模型, 对传感器各结构参数进行优化设计, 仿真结果表明, 经优化后的传感器可以满足检测纤维的灵敏度及线性度的要求, 保证了检测条干均匀度的准确性。通过对极板接入等电位保护环, 有效抑制了电容传感器的边缘效应, 使传感器的灵敏场更加均匀, 为传感器的优化设计提供了依据, 同时也为计算纱线的条干不匀度奠定了基础。

参考文献:

[1] 张 君, 许锦峰, 姚恩涛, 等. 测量围护结构含水率的同面散射场式电容传感器设计 [J]. 计测技术, 2008, 28 (1): 7-11.

[2] 曹 河, 董恩生, 范作亮, 等. 同面多电极电容传感器优化设计 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (6): 1711-1714.

[3] 曲开文. 电容传感器的三维静电场分析及其优化设计 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.

[4] 王兆华. 基于有源电桥的电容式传感器及其测量系统的研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2006.

[5] 李宁波. 纱条条干均匀度测试仪新型专用电容传感器的研究 [D]. 西安: 西安工程科技学院, 2005.

[6] 樊玉铭, 赵鸿林. 条干不均匀度检测装置中电容传感器的研究 [J]. 天津大学学报, 1996, 29 (6): 930-937.

后点击确定, 生成对应数据内容, 在发送界面点击发送即可, 其他板卡与此类似。

4 实验结果及结论

飞行试验中对整个系统进行了联试, 对系统功能和技术指标进行了验证, 通过应用软件可以设置 PCM 模拟数据、MIL-STD-1553B 总线模拟数据、ARINC-429 总线模拟数据、RS232/RS422 总线模拟数据、以太网模拟数据的格式和数据内容, 并可将从外部接收的 GPS 信号或 IRIG-B AC/DC 码中提取的时间信息嵌入模拟数据中输出。

多功能信号源在基于标准化、可靠性设计的基础上实现了多类型、多通道的高精度、高可靠性信号的独立输出和同时输出。

5 结束语

本文提出了一种新型多功能信号源设计方案, 详细阐述了信号源系统的硬件及软件设计, 方案设计兼顾标准化、高速、可靠性 3 个方面, 可实现多类型、多通道信号的发送, 系统工作稳定、可靠性高, 实验结果表明, 该方案满足设计需求, 该套系统已成功应用于飞行试验中, 系统采用模块化与通用化的设计思路, 对其他领域的应用也有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 蔡卓准, 万玲玉. 基于 ZigBee 技术的多信号源控制系统 [J]. 计算机应用, 2015, 35 (17): 11-13.

[2] 田晓丹, 张会新, 刘文怡. 一种新型多功能信号源系统的设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (7): 2604-2606.

[3] 牛 耕, 陈思宇, 于继翔. 基于 DDS 技术的正弦交流信号源的设计 [J]. 现代电子技术, 2012, 35 (3): 52-56.

[4] 孙 群, 宋 卿. 基于 DDS 技术的便携式波形信号发生器 [J]. 仪表技术与传感器, 2009 (4): 69.

[5] 杨建华, 于小宁, 朗宝华. DDS 技术和 FPGA 在多功能信号源中的应用 [J]. 西安工业大学学报, 2012, 32 (4): 334-338.

[6] 王 丹, 李 平, 文玉梅, 等. 采用 DDS 频率合成的虚拟信号发生器研究 [J]. 传感技术学报, 2007, 20 (3): 586.