电 子 科 技 大 学

（ ）士学位论文开题报告表

班 学 号：

姓 名：

论文题目：

指导教师：

学科专业：

所在学院：

电子科技大学研究生院制表

年 月 日填

**填 表 说 明**

**1**.研究生须认真填写本表相关内容。

**2**.凡所列栏目填写不下的，可以另加附页，页码按第1页起连续顺序编排。

**3**.本表采取**双面**复制（复印），且保持原格式不变，纸张限用 A4（页边距为上、下：2.5cm, 左为2.6cm,右为2.1cm；字体为宋体小四，行间距为18磅，为保证表格的整体美观，可适当调整行间距。），装订要整齐。

**4**.开题报告完成，此表经相关人员签字后，须交学院研究生教务秘书保存。

**5**.交表时，保证表格规范、美观，不要随意把表格断页；本页（说明页）不需打印。

**一、学位论文研究内容**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 班学号： | | | 姓名： | 入学时间： |
| 学位论文题目 | |  | | |
| 学位论文的课题来源： 1.纵向 2.横向 3.自拟 | | | | |
| 学位论文类型： 1.基础研究 2.应用基础研究 3.应用研究 | | | | |
| 研究内容 |  | | | |

1

**二、国内外研究现状**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 学位论文的选题依据和研究意义，以及国内外研究现状和发展态势（应有2000—3000字），主要参考文献  1. **学位论文的选题依据和研究意义**  **在现代电子仪器系统中，如方波、三角波等稳定且可复现的波形通常不可或缺。在某些特定仪器系统中，有时会需要产生特殊的波形，如模拟爆炸冲击等。随着电子技术的发展，对信号模拟要求的提高推动着波形频率、稳定性以及可调节性等指标的提升，而能够根据用户需求提供各种高质量信号的任意波形发生器（Arbitary Waveform Generator，AWG）正在为现代电子系统提供巨大便利**[1]**。**  **任意波形发生器主要结构可分为控制模块、波形合成模块和模拟通道，图1-1是其主体结构。其中，控制接口模块提供相应的总线接口和用户接口，管理并调度各功能模块协同工作；波形合成模块一般采用波形合成技术，根据用户需求产生相应的波形；模拟通道的作用是将对波形合成模块输出的波形进行调理，以使其满足最终的指标要求[2]。本课题基于“4GSPS任意波形发生器”项目，主要负责模拟通道电路的设计与实现。**    **图1-1：任意波形发生器主体结构**  **模拟通道作为任意波形发生器的最末级，其性能与输出信号的所有指标都息息相关。本课题所在项目研究的任意波形发生器采样率达到了4GSPS，带宽达到了1.5GHz。如何设计出带宽更高，输出幅度范围更大，幅度和偏移准确度更高以及波形纯度更好的模拟通道，既是本课题的重点又是难点。**  **传统的模拟通道主要是直流通道，其最低频率可达0Hz，输出信号的指标都比较好，然而直流通道所使用的一些关键器件发展滞后，如乘法器和运算放大器的大信号带宽增长很慢，而波形合成的采样率已经可以达到GSPS级，对信号调理通道的带宽也提出了更高要求。因此出现了以射频放大器为核心的交流通道以及波形合成信号直接滤波输出的的DAC直接输出通道。交流通道输出的最低频率无法达到0Hz,但其具有高带宽的优点，带宽可达GHz级别，但是交流通道使用交流耦合方式，不适合输出加偏。DAC直接输出通道使用滤波器对DAC的输出进行滤波输出，最低频率可达0Hz，但带宽受限于DAC器件的能力，在输出幅度范围和波形纯度方面难以达到较高水准，比较适用于给用户进行二次调理[2]。**  **由上述对比分析，可以看出直流通道、交流通道、DAC直接通道分别有不同的适用范围。如果将三种通道组合在一起，根据不同的指标要求，选择不同的信号处理通道对DAC输出的波形进行处理，就可以扬长避短，将三种通道的优势结合起来由此提升任意波形发生器整体的性能指标。本课题所设计的模拟通道包含DC、AC、直接DAC输出三种方式，在不同情况选择不同的输出通道进行信号处理。**  **2.国内外研究现状和发展态势**  任意波形发生器的发展可以追溯到上个世纪60年代，那个时期主要采用模拟电子技术，用分立元件来搭建信号发生器，只能产生正弦波、方波、三角波以及锯齿波等波形，且电路结构复杂，不仅体积大，功耗高，而且精度很难保证[3]。1971年美国学者提出了直接数字合成技术[4]（Direct Digital Synthesis，DDS），1985年美国德克萨斯仪器用锗半导体设计出了第一个集成电路，同一时期美国仙童半导体公司用硅半导体设计出了集成电路[5]。此后随着数字电子技术的飞速发展，DDS技术在工程上得到了很好的应用，其合成波形的频率越来越高，现在已经达到了GHz级别。如此高带宽的信号也相应对模拟通道的性能提出了更高的要求。  任意波形发生器模拟通道的性能主要由其幅度控制范围、输出波形纯度以及偏移控制能力来衡量，每一项指标的改善都能增强模拟通道的处理能力，提升任意波形发生器的整体性能。  1）幅度控制范围：由放大/衰减电路模块的性能决定，这是任意波形发生器模拟通道最基础的功能，如何在不失真的前提下，在满足指标要求的带宽内对波形的幅度进行连续无步进的调节是幅度控制研究的重点。由于任意波形发生器输出信号需要小步进大范围的调节，单纯用放大或衰减电路的一种来完成幅度控制是不现实的，因此幅度控制功能由放大和衰减两部分结合而成，这两种电路模块的实现有多种方法，每种方法亦有其各自的适用范围。  关于任意波形发生器放大电路功能模块的实现，目前国内外所采用的主要有这几种方式：（a） 采用三极管沃尔曼电路，如泰克公司的ADG3252型任意波形发生器就采用了两路三极管渥尔曼电路作为模拟通道放大输出级，其基本电路连接如图1-2。所谓渥尔曼电路（Cascode）电路，就是将晶体管或FET纵向堆积起来（将下面器件的集电极（或者漏极）与上面的发射极（或者源极）连接起来），将上面器件的基极（或者栅极）交流接地，将这样的连接的晶体管（或FET）看做一个器件并以发射极或源极接地来使用的电路[6]。渥尔曼电路的优点是不会因密勒效应而使频率响应变坏，因此可以扩大带宽。  图1-2：渥尔曼电路  （b）采用电流反馈型运放电路，如电子科技大学测试与仪器研究所的ES1653型任意波形发生器采用了这种方式，其电路图如图1-3。电流反馈放大器不受基本增益带宽积的限制，随着信号幅度的增加，带宽的损失非常小。因为可以在最小失真的条件下对大信号进行调节，这些放大器在非常高的频率下通常都具有优异的线性度；  图1-3：电流反馈型运放  （c）采用射频放大器，如Tabor Electronics公司的WX2181B/2182B型任意波形发生器的模拟通道实现就采用了这种方式。  关于任意波形发生器衰减电路功能模块的实现，目前国内外所采用的主要有这几种方式：（a）采用电阻衰减网络实现衰减，常见电阻衰减网络有PI型、T型衰减器等。电阻衰减网络只包含电阻元件，电路结构简单因此成本一般很低，除了实现信号衰减功能，还能与前后级实现阻抗匹配，应用非常广泛。但其缺点也很突出，衰减倍数一旦确定就不可更改，灵活性差，不适用于需要衰减倍数可调的场合；（b）采用数字步进衰减器实现衰减，相较于电阻网络衰减法，此方法的突出优势是衰减倍数可控可调，灵活性高；  2）波形纯度：这一指标包括谐波失真、非谐波失真和相位噪声等[7],波形纯度的改善依赖于模拟通道中滤波模块性能的提升。波形合成模块输出的信号由DAC直接输出，并非平滑的信号，其频谱中带有镜像频率，因此必须使用滤波器将镜像频率滤除干净。  信号波形从被噪声污染中恢复称为滤波。这是信号处理中经常采用的主要方法之一，具有十分重要的应用价值。常用的滤波器是采用电感、电容等分立元件构成，如RC低通滤波器、[LC谐振](https://baike.baidu.com/item/LC%E8%B0%90%E6%8C%AF" \t "_blank)回路等。但对于混在随机信号中的噪声滤波，这些简单的电路就不是最佳滤波器，这是因为信号与噪声均可能具有连续的[功率谱](https://baike.baidu.com/item/%E5%8A%9F%E7%8E%87%E8%B0%B1)，不管滤波器具有什么样的频率响应，均不可能做到将噪声完全滤掉，而信号波形完全不失真。因此，需要寻找一种使误差最小的最佳滤波方法，可以尽可能的滤除噪声且保证波形不失真，又称为最佳滤波准则。滤波理论的基础是估计理论，而估计理论有着悠久的历史。最早的估计理论是1795年，Gauss在《天体理论》中提出了最小二乘估计法。在之后的1912年，R. A. Fisher首次将概率密度引入估计，提出了极大似然估计方法，对估计理论做出了重大贡献。二战期间，基于防空系统的跟踪问题，诞生了维纳滤波器，可以在最小均方误差意义下获得信号的最佳估计[8]。  在上世纪初，德国科学家 K.w.wagner 等提出了一种名为“瓦格纳滤波器”滤波器设计方法。几乎是与此同时，美国人 GA.Canbell 发明了滤波器的图像参数法设计方法。稍后，LC 滤波器诞生，由此诞生了美国第一个多路复用系统[9]。1958 年，Seymour B. Cohn 提出了平行耦合传输线滤波器结构[10]，在平面结构下实现了滤波。1962 年，George L. Matthaei 第一个对交指型滤波器结构理论进行了阐述和分析[11]。此结构提高了微带线滤波器的空间结构。1971 年，Edward G. Cristal 和 Sidney Frankel 提出了发夹型滤波器设计理念[12]在平行耦合传输线滤波器上加入了发夹形状结构设计，使其性能，集成性均有提高。  LC滤波器和微带线滤波器是目前主流的滤波器。其中LC滤波器适用于低带宽应用场合，在几百兆带宽内具有很好的截止特性；微带线滤波器适用于GHz级别的带宽范围，这是LC滤波器所无法代替的。一般在模拟通道中将LC滤波器和微带线滤波器结合应用，弥补各自的不足。  3）偏移控制：偏移控制功能是给波形信号加上一个直流偏置以使其满足指标要求，它对输出信号的质量影响很大，其设计与实现也是本课题中的重要一环。  加偏的本质是通过电阻分压来得到所需要的直流偏置电平，并把它注入到波形信号中，国内外目前主要有如下几种方法实现：（a）通过并联电阻加偏。如安捷伦公司的33250A型任意波形发生器就使用这种方法。此方法比较适合用在末级放大器前端，因此在使用时往往需要考虑其后级放大器的输出动态范围。（b）通过三极管放大电路加偏，泰克、安捷伦以及普源精电等公司的多款产品都采用这种加偏方法。其优点是简单灵活，加偏范围大，但是限制了末级放大器的类型。（c）通过放大器的输入端加偏，设计较复杂，当放大器不选通时偏移无法加到输出信号，不适用于直流通道。  以上分析了模拟通道主要功能的实现方法以及国内外的研究现状，下表给出了国内外任意波形发生器模拟通道目前所能达到的指标：  表1-1 国内外任意波形发生器模拟通道指标对比   |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | | 主要指标 | 国 外 | | 国 内 | | | 泰 克 | 安 捷 伦 | 普 源 精 电 | 电子科大测试与仪器研究所 | | 型号 | AWG70001A | M8190A | DG5352 | ES1655 | | 采样率 | 50GSPS | 12GSPS | 1GSPS | 1.25GSPS | | 最高输出  频率 | 20GHz | 5GHz | 350MHz | 500MHz | | 单端输出幅度特性 | 差分输出：500mVpp~1Vpp | 直流通道：500mVpp~1Vpp  交流通道：200mVpp~2Vpp  DAC直接通道：350mVpp~700mVpp | 100MHz：5mVpp~10Vpp；300MHz：5mVpp~5Vpp；350MHz：5mVpp~2Vpp | 250MHz：10mVpp~4Vpp；250MHz：20mVpp~2Vpp |   通过上表的对比，可以看出国内任意波形发生器各项指标与国外的差距。但是国内各高校和  [1] High-speed Arbitrary Waveform Generator based on FPGA. Hong-fei ZHANG, Chun-li LUO, Peng-yi TANG, Ke CUI, Sheng-zhao LIN, Ge JIN, Jian WANG, Member, IEEE  [2]刘科.高速任意波形合成关键技术研究[D].成都：电子科技大学，2004  [2] 金文锋.1GHz带宽任意波形发生器模拟通道设计[D]. 成都：电子科技大学，2012  [3] 陈跃.高速存储任意波形发生数字系统设计[D]. 成都：电子科技大学，2009 5-20  [4] J Tierney, C M Rader, B Gold. Adigital Frequency Synthesizer[J]. IEEE Transactions ON Aduio AND Electroacoustics.1971,19(1):48-57  [5] 胡志峰.应用于低频微弱信号的前置放大电路设计[D]. 长沙：湖南大学，2015  [6] 铃木雅臣.晶体管电路设计[M].(周南生).北京：科学出版社，2001,141-161  [7] 周鹏骥.LXI1GSPS任意波形发生器模拟通道设计[D]. 成都：电子科技大学，2013  [8] 彭彤.离散T\_S模糊系统的模型降阶及降阶滤波器设计研究[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014  [9] 刘红艳.宽带射频滤波器的设计与仿真[D].成都：电子科技大学，2014  [10] Seymour B. Cohn. Parallel-Coupled Transmission-Line-Resonator Filters [J]. IRE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, 1958, 6 (2), 223-231.  [11] George L. Matthaei. Interdigital Band-Pass Filters [J]. IRE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, 1962, 10 (6), 479-491.  [12] Cristal, E.G., Frankel, S. Design of Hairpin-Line and Hybrid Hairpin-Parallel-Coupled-Line Filters [J]. GMTT International Microwave Symposium Digest, 1971, 71 (1), 12-13. |

2

**三、拟采用技术和主要研究内容**

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 1.拟解决的关键问题和最终目标，以及拟采取的主要理论、技术路线和实施方案  **一、拟解决的关键问题**  （1）按照项目指标要求，将模拟通道划分为直流、交流和DAC直接输出三种输出方式，设计每种输出方式的实现方案。  （2）设计并实现幅度控制和加偏功能，使模拟通道的输出在1.5GHz带宽内满足项目要求的幅度和偏移指标。  （3）设计并实现滤波模块，使三种输出方式的谐波、相噪以及幅度平坦度都满足指标。  **二、最终目标**  （1）  （2）  （3）  **三、拟采取的主要理论、技术路线和实施方案**  本小节先分析模拟通道前端，即波形合成模块的原理，从而得到模拟通道输入信号的特点，再结合最终的输出指标要求，给出模拟通道的实施方案。  （1）DDS原理分析  DDS技术是基于数字取样技术，从相位概念出发直接合成所需波形的一种频率合成技术。相对于传统频率合成技术，其频率分辨力高，频率切换速度快，可以输出宽带正交信号和任意波形，并且相位噪声低，因此应用极其广泛。DDS的基本结构主要包含地址发生器、波形查找表、数模转换器（Digital-to-Analog Converter，DAC），其框图如1-4所示。波形查找表中存放波形的样本数据，N 位的频率控制字 K 在采样时钟的每一个上升沿累加一次，将其累加结果作为地址对波形查找表进行查表操作，将查得的波形点发送给数模转换器，再由DAC输出经过滤波器后得到想要的波形。    图1-4 DDS结构  DDS可分为直接数字频率合成技术（Direct Digital Frequency Synthesis，DDFS）和直接数字波形合成技术（direct digital waveform synthesis，DDWS）。两者都是通过时钟驱动地址发生器，在波形查找表中读出波形点送到数模转换器，得到想要的波形。二者的区别是：DDFS采用的是固定时钟，通过频率控制字来改变地址发生器产生的地址进而改变波形采样点数，达到控制输出频率的目的；DDWS采用的是可变时钟，频率控制字固定为1，从波形查找表中一个接一个的读出所有波形点，因而输出频率由驱动时钟频率直接来控制。两种频率合成技术在合成不同波形时各有其优势，DDFS引入了频率控制字，在合成电平不连续的波形（如方波）时，由于要求采样点数为整数，这就限制了频率控制字的连续变化，因此DDFS主要应用于电平连续变化波形的合成；DDWS的采样点从波形查找表中逐个读出，理论上可以实现任意波形的合成，但是对时钟要求较高，一般应用于序列波、任意波的合成。  （2）DDS合成信号分析  假设波形查找表的容量为无穷大，且不考虑幅度量化误差，则DDS可以看做是对连续信号采样后恢复的过程，根据奈奎斯特采样定理，当采样频率高于信号最高频率的 2 倍时，能够通过重构系统，利用采样后的样本数据无失真的恢复出原信号。要使样本信号经重构系统后的输出信号 与输入信号 相等，除满足奈奎斯特采样定律以外，还必须采用理想的低通滤波器作为重构系统来实现。在实际电路中，由于理想单位冲击采样信号与低通滤波器均无法实现，因此，常采用具有一定宽度的矩形脉冲周期性信号来采样，即在一个给定的瞬间对采样，并将这一样本值保持一定的时间。在一定精度范围内，用一个可实现的滤波器来逼近理想低通滤波器。DDS采样还原的实际框图如图1-5因为采样信号和重构系统都是非理想的，这就不可避免的引入了误差。    图1-5 DDS采样还原模型  设输入信号为，则样本信号的频谱是原信号频谱的周期性延拓：  其中，表示采样频率的角频率。样本信号经过零阶保持器后的频谱为：  由上述分析可知，滤波器的输入信号频谱中包含了原信号频谱的周期性延拓，而且幅度也发生了改变。要满足输出信号相对于不发生失真，这就对滤波器的幅频特性提出了要求。滤波器模块位于模拟通道中，根据前面对DDS输出信号的分析可以确定模拟通道滤波模块的设计方案，再加上指标中对幅度和偏移等的要求，可以确定幅度控制和偏移控制的方案，下面就对模拟通道的设计具体阐述。  （3）模拟通道方案设计  本项目要求模拟通道具有直接DAC输出通道、直流通道和交流通道三种输出方式。其中直接DAC输出通道带宽为DC~1GHz，直流通道处理带宽为DC~600MHz，交流通道带宽为4MHz~1.5GHz。每种通道方式都包含滤波、幅度控制、偏移控制等模块，但各通道由于带宽以及处理的信号类型不同，其各自的实现方式也有差别。  **滤波模块**：  滤波模块的设计主要是滤波器的选型和参数设定，滤波器大致分为有源滤波器和无源滤波器，本项目主要使用无源滤波器。无源滤波器主要有LC滤波器和微带线滤波器，LC滤波器设计简单，性能参数较好但是带宽有限；微带线滤波器处理带宽可达GHz，但是容易引入谐振。滤波器的设计都归结为先设计一个“样本”的归一化原型低通滤波器，然后通过频带变换得到所需类型的滤波器，低通滤波器主要有巴特沃斯型、切贝雪夫型（I型和II型）、椭圆型和贝塞尔型，其各自特点如表1-1所示：   |  |  | | --- | --- | | **滤波器类型** | **特点（阶次相同时）** | | **巴特沃斯型** | **通带没有起伏在全频段具有单调下降的幅度特性，具有最宽的过渡带宽。** | | **切贝雪夫I型** | **通带中幅度特性呈等波纹型，阻带单调下降。** | | **切贝雪夫II型** | **通带中幅度特性呈单调下降，阻带呈等波纹形。** | | **椭圆型** | **具有陡峭的衰减特性和较小的阻带波动，最窄的过渡带宽。** | | **贝塞尔型** | **具有最好的群延迟特性和较好的幅度平坦度，适合宽带滤波。** |   **表1-1 各种滤波器特性**  由上述分析，直流通道采用，交流通道采用，直接DAC输出通道采用。  **幅度控制模块**：  根据项目指标要求，直流通道主要处理DC~600MHz带宽内的信号，其单端输出幅度为100mVpp~3Vpp，精度达到±（3%\*设定值+5mV）。要同时满足如此高幅度和精度要求，需要幅度精调电路和粗调电路配合工作。幅度精调环节可由前级DAC完成，可以达到256~476mVpp(-8~-2.6dBm)的精密输出，因此只需要在直流通道中设计粗调电路即可。在50Ω负载下，输出幅度最高为3Vpp（13.4dBm），则末级放大器至少需要放大12.6倍。当末级放大器倍数为12.6倍，不带载时其输出为3.2~6Vpp，则不接放大器时输出为0.256~0.476Vpp，两个幅度段之间没有覆盖，因此需要增加幅度段，使幅度段之间达到连续覆盖状态。增加幅度段即增加不同倍数的放大模块和衰减模块，将其选通或不选通来实现不同的幅度控制倍数，考虑采用两级衰减网络和一级放大电路来组合实现全覆盖的幅度段，如图1-6，其中衰减网络可用电阻搭建，放大电路用电流反馈运放实现。直接DAC输出通道处理DC~1GHz带宽内的信号，其幅度控制实现与直流通道类似。交流通道处理4MHz~1.5GHz带宽内的信号，在设计上要侧重考虑满足带宽指标。交流通道的幅度范围为64mVpp~2Vpp,幅度控制模块同样由精调和粗调部分构成，精调部分由前级DAC实现，粗调在模拟通道中实现。由于交流通道的幅度范围较小，不需要对幅度进行分段，因此考虑用一级放大器对信号进行放大，再使用一个大范围的数字步进衰减器辅助调节输出即可，如图1-7。  **加偏模块**：  项目要求直流通道的单端输出偏移为-2.25V~+2.25V，直接DAC通道的单端输出偏移为-2.1V~+2.1V。由前面幅度控制模块实现方案的分析，直流通道与直接DAC输出通道在电路结构上比较类似，在末级都存在放大器。因此可以在放大器前，衰减网络之后并联加偏电阻，不管放大器选通与否，偏移都可以加在信号上，而且可以避免被衰减，连接示意图如下图1-9所示：  （4）本课题总体方案： |
| 2.实验条件落实情况，可能存在的问题及解决办法  实验条件良好，仪器设备满足要求，所需器件均可在市场上购买 |

3

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 3.年度研究计划及预期研究成果 | | |
| 年  度  计  划 | 起始时间 | 完 成 内 容 |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
| 学位  论文  特色  或  创新 |  | |
| 最终  成果  形式 |  | |

4

**四、开题报告审查意见**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1.导师对学位论文选题和论文计划可行性意见，是否同意开题：  签名： 年 月 日 | | |
| 2.评审专家意见 | | |
| 开 题  报告会 | 时间： 年 月 日 | 地点： |
| 评审专家（至少3位）： | |
| 评审专家组对学位论文的选题、方案实施的可行性，是否通过开题报告的具体意见和建议：  组长签名： 年 月 日 | | |
| 3.学院意见：  负责人签名： 年 月 日 | | |

5