

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.15

基于 DDWS 技术的飞机 270 V 直流畸变标准信号源设计

侯毅, 柴艳丽, 程勤

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 通过对飞机 270 V 直流供电特性参数中畸变信号校准方法的研究, 结合校准过程中的实际需求, 设计出一种基于 DDWS 技术的飞机 270 V 直流畸变标准信号源, 并从硬件设计方面给予了详细介绍。

关键词: 270V 直流; 直流畸变; 直接数字波形合成; 标准信号源; 校准

中图分类号: TB97

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0113-06

Design of Aircraft 270V DC Distortion Standard Signal Source Based on DDWS Technology

HOU Yi, CHAI Yanli, CHENG Qin

(Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: Based on the study of the calibration method of distortion signal in the characteristic parameters of aircraft 270V DC power supply, combined with the actual needs in the calibration process, a standard signal source of aircraft 270V DC distortion based on direct digital waveform synthesis (DDWS) technology is designed, and the hardware design is introduced in detail.

Key words: 270V DC; DC distortion; direct digital waveform synthesis; standard signal source; calibration

0 引言

270 V 直流畸变是飞机供电特性中的一个重要参数, 主要是由发电机后端的整流设备, 大功率非线性负载和其它如开关电源、开关数字电路和旋转电机等设备产生。其危害包括增加机载电源系统的能量损耗、对飞控系统产生干扰并造成错误动作。飞电网试验台电气参数测试系统主要用于在飞机研制和生产阶段, 对飞机供电系统的供电特性参数进行准确测量, 从而对飞机电源系统和机载设备适应性进行有效评估, 其中, 270 V 直流畸变是重要的测量参数之一。为了保证飞电网试验台电气参数测试系统中畸变参数测量的准确性, 本文设计了一种基于 DDWS 的飞机 270 V 直流畸变标准信号源用于实现畸变参数的校准和溯源。

1 标准信号源主要技术要求

直流畸变是指直流电压中交流分量的方均根值。直流畸变与稳态直流电压之比称为直流电压畸变系数, 直流畸变每一频率分量的方根均值即为畸变频谱。对

于飞机 270 V 直流供电系统来说, 直流畸变就是在 270 V 直流上叠加的交流分量。

国军标 GJB 181B-2012《飞机供电特性》对飞机 270 V 直流供电电源畸变频谱做出了明确要求, 如图 1 所示, 畸变幅值是以均方根值 1.0 V 为基准值, 畸变分量为均方根值。交流分量频率范围 10 ~ 500000 Hz, 畸变频率在 10 ~ 1000 Hz 变化时, 幅值从 -10 dB 逐渐增大, 在 1000 ~ 5000 Hz 时最大, 为 10 dB, 随后逐渐降低, 在 500000 Hz 时为 -50 dB。因此, 产生的合成波形信号中交流分量的频率范围应从 10 ~ 500000 Hz, 对应的幅值应从 -50 ~ 10 dB。各个典型频率点初对应的畸变分量的数值如表 1 所示。

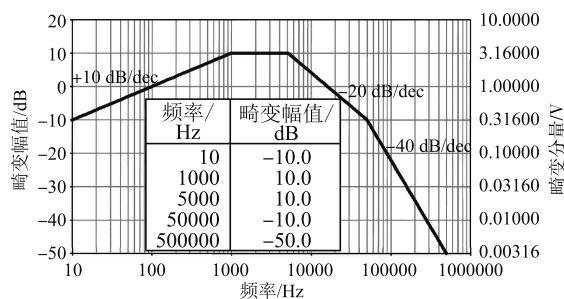


图 1 270 V 直流电压最大畸变频谱

表1 270 V 直流电压最大畸变信号幅值的测量要求

频率/Hz	畸变幅值/dB	畸变分量 (方均根值)/V	畸变分量 (峰值)/V
10	-10	0.32	0.45
1000	10	3.16	4.47
5000	10	3.16	4.47
50000	-10	0.32	0.45
500000	-50	0.00316	0.00447

飞机电网试验台电气参数测试系统在测量畸变频谱时,按照不低于1 MHz的采样频率采集稳态直流电压中的交流电压分量,采集时间小于并趋于近1 s;将所采集的数据用离散傅里叶变换算法计算出每一频率分量的幅度。

结合上述电网试验台电气参数测试系统在畸变参数测量的主要技术指标,根据计量校准的基本原则,确定标准信号源的主要技术指标如表2。

表2 标准信号源技术指标

项目	频率范围/ kHz	测试系统 技术指标/dB	标准信号源 技术指标/dB
畸变频谱(以方均根值1.0 V为基础的分贝数)	$0.01 \leq f \leq 50$	$\leq \pm 2$	$\leq \pm 0.2$
	$50 < f \leq 500$	$\leq \pm 5$	$\leq \pm 0.5$

2 标准信号源的工作原理及设计

标准信号源由高速高准确度信号发生器加宽带高压功率放大器构成,其原理如图2所示。

由主计算机控制高准确度信号发生器,产生标准畸变信号,通过宽带功率放大器放大后加载到被校电气参数测试系统,将标准信号值与被校电气参数测试

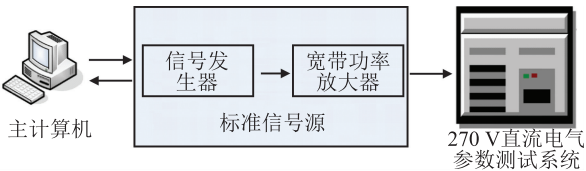


图2 标准信号源结构原理图

系统的测量值进行对比分析。其中信号发生器用于产生270 V直流信号和畸变波形,宽带功率放大器用于270 V直流信号的放大,同时将畸变波形叠加到270 V直流信号上,也就是波形合成。

2.1 基于DDWS技术的信号发生器设计

为了能够更好的控制信号发生器输出畸变波形的准确度,本文采用基于DDWS技术(直接数字波形合成)的信号发生器设计。

畸变信号是周期性正弦信号,其输出信号频率及幅度需要实现程序控制,因此该信号的生成需要通过D/A(数模转换器)来实现,这就涉及到DDS(直接数字合成)技术。根据结构的不同,DDS分为直接数字频率合成(Direct Digital Frequency Synthesis, DDFS)和直接数字波形合成(Direct Digital Waveform Synthesis, DDWS)。

2.1.1 直接数字频率合成

直接数字频率合成(DDFS)由相位累加器、波形查找表、数模转换器以及低通滤波器组成,结构如图3所示,其中相位累加器、波形查找表和数模转换器时钟由同一个时钟控制,且时钟固定不变。首先将常规波形信号根据DA分辨率和波形点数量化后按相位存储在波形查找表中,当时钟信号上升沿到来时,相位累加器对频率控制字K进行累加,并取累加结果的高M位作为地址信号来寻址波形查找表,取出对应地址的波形数据并输送到数模转换器经数模转换后得到相应的模拟信号,再经过低通滤波器后得到想要的信号。

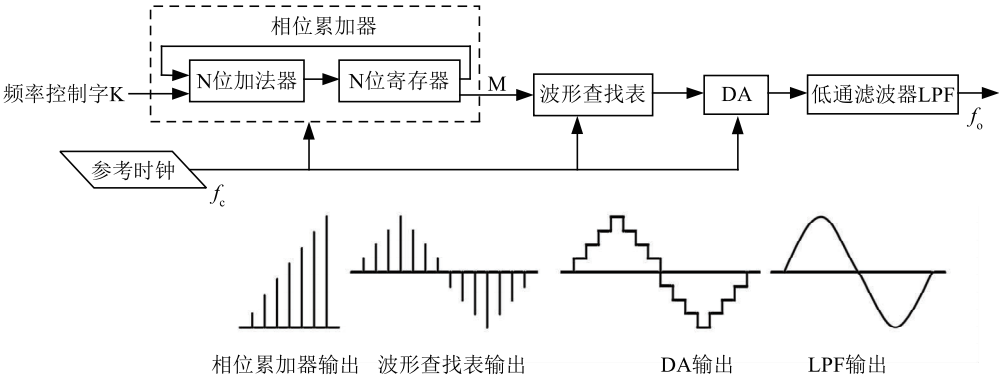


图3 DDFS的结构原理图

DDFS 输出波形信号频率为

$$f_o = \frac{K}{2^N} f_c \quad (1)$$

式中: f_c 为参考时钟频率; N 为相位累加器位数; K 为频率控制字。

当 $K=1$ 时, 可得输出信号频率分辨力为

$$f_{\text{res}} = \frac{1}{2^N} f_c \quad (2)$$

DDFS 技术一般是保持参考时钟频率不变, 通过改变频率控制字 K 的大小来改变输出信号频率。输出信号频率分辨力和相位累加器的位数 N 有关, 可通过增大 N 来提高频率分辨力, 但是 N 每增大一位, 相应的波形查找表的大小需要增加一倍, 这显然是不现实的。一般通过截取相位累加器的高 M 位去寻址波形查找表来减小波形查找表的存储空间, 但是与此同时也产生了相位截断误差, 这将影响输出信号的质量。和 DDWS 逐点读出波形数据原理不同, DDFS 是以 K 为步长读出波形查找表中的数据, 所以无法保证输出波形细节, 不适用于不规则波形合成。

2.1.2 直接数字波形合成

直接数字波形合成 (DDWS) 主要由地址发生器、波形查找表、DA 数模转换器、低通滤波器 LPF 和可变时钟发生器组成, 结构如图 4 所示。首先根据 DA 的分辨力以及波形点数将相应的波形量化存到波形查找表中, 同时可变时钟发生器根据输出信号频率输出相应的参考时钟频率, 地址发生器在参考时钟上升沿对地址进行加 1, 并根据该地址信号依次取出波形查找表中的波形数据, 并将其依次送至 DA 数模转换器将数字信号转换成模拟信号, 再经过低通滤波器输出相应的波形信号。

DDWS 输出波形频率 $f_o = \frac{f_c}{N}$, 其中, N 为每个完整

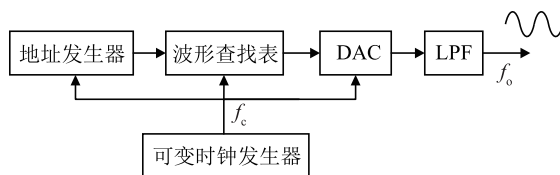


图4 DDWS 的结构原理图

信号波形的量化点数。信号频率取决于波形点数 N 和参考时钟频率 f_c 。因此, 可以通过改变 f_c 或者 N 的大小来实现输出波形信号频率。

通过 DDWS 的原理可得, DDWS 是根据参考时钟信号按照存储顺序依次输出波形查找表中的所有数据, 存储的任意波形的细节都能够完整保留, 能够不失真的还原出波形, 波形稳定性高。基于这种特性, 用户可以根据需求将波形量化存储在波形查找表中, 比如不规则波形、畸变波形和谐波等, 再经过数模转换器和低通滤波器输出设定的波形。所以基于 DDWS 技术的波形合成适合用于任意形状的波形合成。

本文基于 DDWS 技术采用“ARM + FPGA + DA”的结构实现波形合成输出, 原理如图 5 所示。其中, ARM 根据设定幅值大小量化成相应的波形数据分别存入不同的双口 BRAM (波形查找表) 中, 然后 ARM 与 FPGA 之间通过 AXI 总线通信协议完成波形数据交互, 同时 FPGA 根据 GPIO 信号确定 BRAM 中波形存储区域, 地址发生器在时钟上升沿产生地址信号去分别寻址存有波形数据的双口 BRAM, 依次读出波形查找表中的波形数据, 并将波形数据依次传给 DA 控制模块完成并串转换, 并按照控制时序输出波形数据, 输给 DA 将数字信号转换成模拟信号, 并经过低通滤波器得到相应的波形信号。

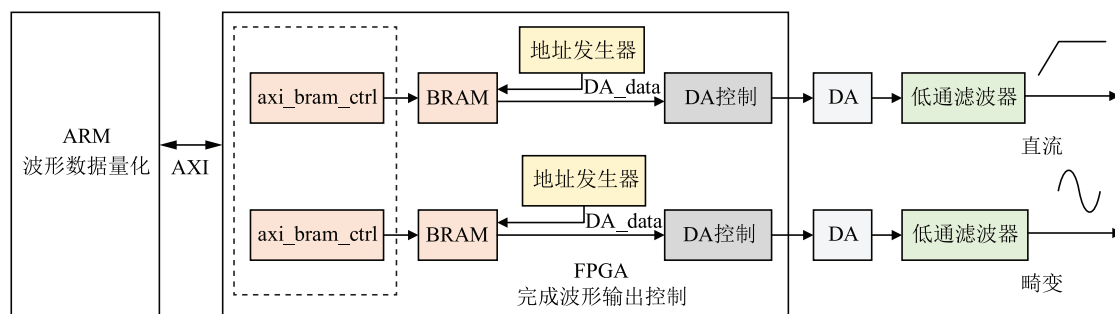


图5 波形输出控制原理框图

基于 DDWS 技术的信号发生器电路结构原理如图 6 所示。ARM 处理器主要用于与主控计算机通讯和对 FPGA 的控制。其首先接收到主控计算机发出的波

形数据参数, 经过运算处理后传输至 FPGA。FPGA 分别控制两路 D/A 转换器生成直流信号和畸变信号。其中 DDS 芯片产生的时钟信号作为畸变信号的控制时

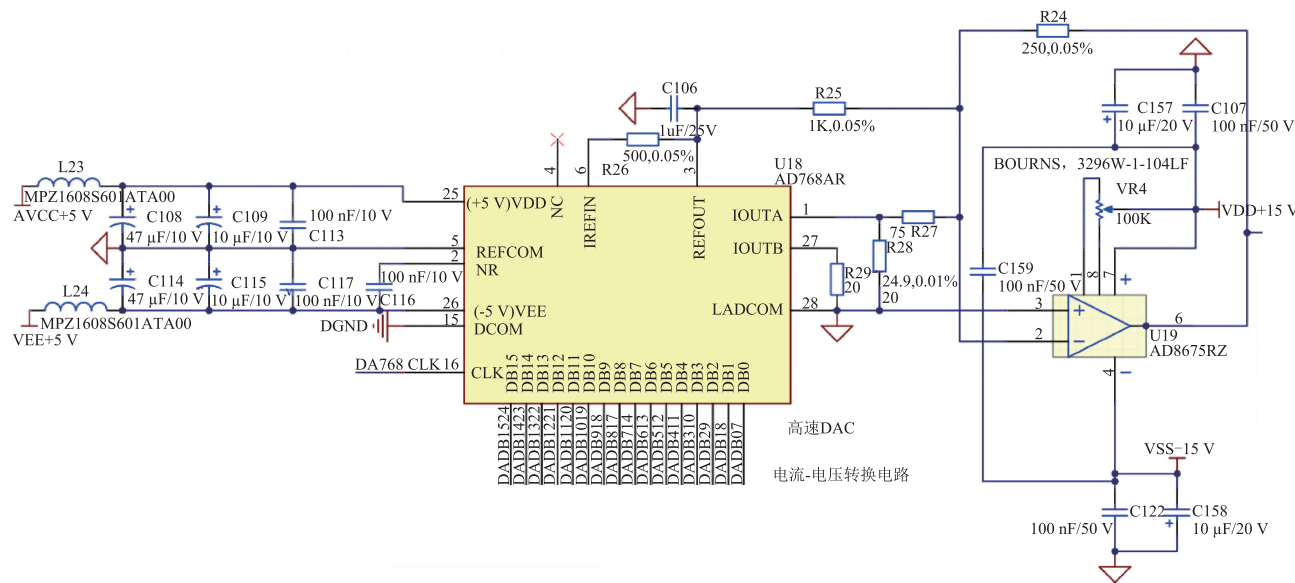


图8 畸变信号生成电路原理图

在准确度和谐波叠加输出等方面比较良好。随着电子技术的不断发展，线性功率放大器的性能还会不断提高，所以目前一般采用线性功率放大器进行设计。宽带线性功率放大电路主要功能是对输出的小信号幅值进行线性放大，输出特性满足畸变校准的要求。

本文功率放大电路采用两级放大结构。功率放大芯片 PA94 存在输入失调电压大的特点，不满足稳态电压要求，因此选用两级放大电路设计。功率放大电路不仅需要对直流信号进行放大，还需要对畸变信号进行放大。

宽带线性功率放大电路板实现将直流预放大 2.5 倍，并与直流畸变分量叠加，最终放大 13.5 倍的功

能。功率放大硬件结构图如图 9 所示。

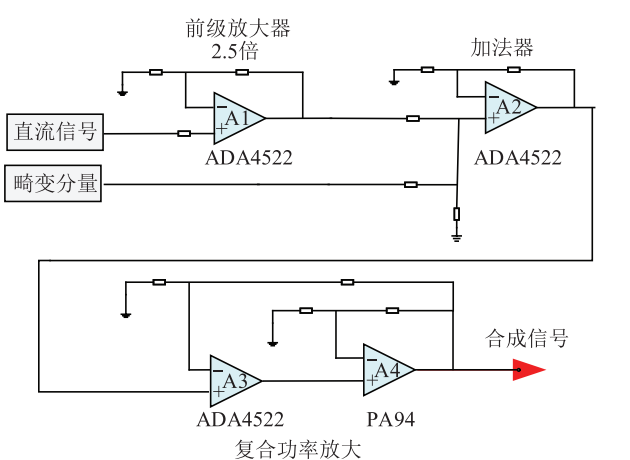


图9 宽带线性功率放大硬件结构图

均采用低温漂零失调运算放大器 ADA4522，其最大输入失调电压为 $5\text{ }\mu\text{V}$ ，温漂为 $22\text{ nV}/^\circ\text{C}$ 。功率放大部分由于 PA94 芯片最大输入失调电压为 5 mV ，温漂为 $50\text{ }\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ，无法达到精度要求，因此采用复合放大电路，将 ADA4522 与 PA94 构成内外环串级系统，降低了功率放大部分由于输入失调与温漂造成的输出误差。基波谐波放大通道由于输入失调电压造成的最大稳态误差为 $5\text{ }\mu\text{V} \times 2.5 \times 14 = 0.175\text{ mV}$ ，完全满足精度指标要求。

宽带线性功率放大电路中反馈电阻均采用高精度电阻，容差低于 0.05%，温漂低于 $0.00001/^\circ\text{C}$ 。为保证功率放大电路的稳定性，在反馈电阻上并联电容，增加系统零点进行稳定性补偿，使得相角裕度在 $45 \sim 60^\circ$ 之间，实现了电路系统的稳定与快速响应。由于补偿电容会影响精密功率放大电路带宽，因此需选择低温漂、高耐压值电容。设计中补偿电容选用 COG 材质陶瓷电容，容差低于 5%，温漂低于 $0.00003/^\circ\text{C}$ 。宽带线性功率放大电路如图 10 所示。

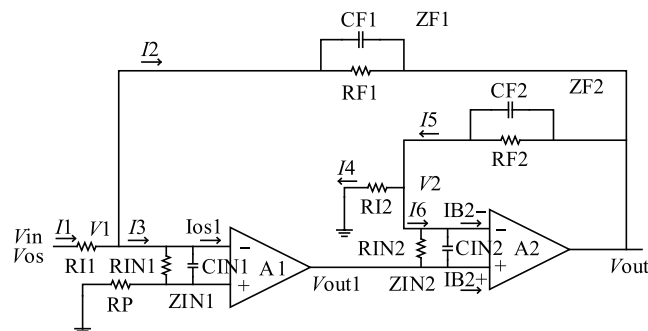


图10 线性宽带高压复合放大电路结构

3 标准信号源测试

基于 DDWS 技术的飞机 270 V 直流畸变标准信号源研制完成后, 通过标准数据采集系统在实验室环境下对其进行了准确度测试, 其结果如表 3、表 4 所示。

表 3 270 V 直流信号测试结果

设置值/V	显示值/V	实测值/V	相对误差/%
200	199.90	199.86	0.02
240	239.95	239.90	0.02
270	269.99	269.94	0.02
290	289.99	289.94	0.02
350	350.03	350.00	0.01

表 4 直流畸变信号测试结果

畸变频率/Hz	参考值/V	显示值/V	测量值/V	误差/dB
10	0.316	0.316	0.318	-0.05
25	0.500	0.493	0.493	0.00
50	0.707	0.715	0.716	-0.01
60	0.775	0.757	0.757	0.00
250	1.581	1.576	1.576	0.00
1000	3.162	3.163	3.151	0.03
1700	3.162	3.144	3.117	0.07
2000	3.162	3.211	3.178	0.09
5000	3.162	3.174	3.115	0.16
6500	2.433	2.430	2.382	0.17
10000	1.581	1.572	1.541	0.17
20000	0.791	0.796	0.779	0.19
50000	0.316	0.314	0.303	0.31
65000	0.187	0.185	0.180	0.24
100000	0.079	0.081	0.079	0.22

注: 参考值、显示值与测量值均为方均根值。

GJB 5198-2003《飞机供电特性参数测试方法》中对飞机供电特性测试系统技术指标的要求包括: 1) 直流稳态电压的相对误差在 $-0.5\% \sim 0.5\%$ 范围内; 2) 畸变频谱的误差为 $f \leq 50 \text{ kHz}$ 时, 在 $-2 \sim 2 \text{ dB}$ 范围内; $f > 50 \text{ kHz}$ 时, 在 $-5 \sim 5 \text{ dB}$ 范围内。由表 3、表 4 可知, 标准信号源输出直流稳态电压的相对误差小于等于 0.02% ; 畸变频谱的误差为: 当 $f \leq 50 \text{ kHz}$ 时, 畸变频谱误差小于等于 0.31 dB ; 当 $f > 50 \text{ kHz}$ 时, 畸变频谱误差小于等于 0.24 dB , 满足量值传递的要求。

4 结束语

本文从飞机 270 V 直流畸变的测量校准需求入手, 结合被校准对象的测量原理和技术指标, 设计了一种基于 DDWS 技术的飞机 270 V 直流畸变标准信号源。文中着重阐述了标准信号源的原理、结构以及具体电路的设计。经过验证试验, 畸变标准信号源的技术指标完全满足飞机 270 V 直流畸变的校准需要。

参考文献

[1] 中国人民解放军总装备部. GJB 181B-2012 飞机供电特性[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2012.

[2] 国防科学技术工业委员会. GJB 5189-2003 飞机供电特性参数测试方法[S]. 2003.

[3] 杨远里. 高性能频率合成技术研究与应用[D]. 四川: 电子科技大学, 2011.

[4] 杨林. 浅析飞机低压直流电源系统电网实验[J]. 军民两用技术与产品, 2015(20): 27-29

[5] 周俊山. 基于 FPGA 和 DDS 的信号源设计[J]. 硅谷, 2014(9): 38, 30.

[6] 林源泉. 高精度高速 ADC 测试方案设计与实现[D]. 四川: 电子科技大学, 2020.

[7] 巴文强. 高速高精度 ADC 设计[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.

[8] 王文健, 王建强. 飞机直流供电特性测试系统畸变频谱参数校准方法[J]. 计测技术, 2018, 38(2): 42-46.

[9] 李小舟, 金海彬. 基于希尔伯特变换的信号解调算法及其在飞机供电特性参数测试系统中的应用[J]. 计量学报, 2020, 41(3): 344-348.

[10] 雷涛, 张晓斌. 基于虚拟仪器的飞机供电特性参数测试系统的设计[J]. 航空计测技术, 2013, 23(4): 16-19.

收稿日期: 2021-03-22

基金项目: 国家“十三五”技术基础科研项目(JSJL2018205B002)

作者简介



侯毅(1978-), 男, 高级工程师, 从事电学计量及专用测试设备的研发工作, 在飞机供电品质分析、航空电子综合校准技术研究方面具有丰富的经验。从 2000 年工作至今, 主持或作为主要成员参加过相关计量项目十多项。主持或参与完成专用测试、校准设备 20 余套。