

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.02.11

飞机直流供电特性测试系统畸变频谱参数校准方法

王文健, 王建强

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘 要: 通过对飞机直流供电特性测试系统校准装置的畸变频谱信号产生原理进行介绍, 并依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》对飞机直流供电特性测试系统校准装置直流电压畸变频谱进行不确定度来源分析, 给出了直流电压畸变频谱不确定度的具体评价方法。最终, 按照上述不确定度评价方法对飞机直流供电特性测试系统校准装置直流电压畸变频谱不确定度进行了评定。

关键词: 供电特性; 畸变频谱; 不确定度

中图分类号: TB971

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)02-0042-05

The Calibration Method of the Distortion Spectrum of Aircraft DC Power Supply Characteristic Testing System

WANG Wenjian, WANG Jianqiang

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

Abstract: In this paper, the principle of distortion spectrum signal generation of the calibration device for the aircraft DC power supply characteristic testing system is introduced. According to JJF 1059-1999 "Measurement Uncertainty Evaluation and Representation", the uncertainty sources evaluation of DC voltage distortion spectrum calibration system of DC power supply characteristic calibration device were carried out, and the uncertainty evaluation method was given. Finally, according to the above-mentioned uncertainty evaluation method, the calibration uncertainty of DC voltage distortion spectrum of the DC power supply characteristic calibration device was evaluated.

Key words: power supply characteristic; distortion spectrum; uncertainty

0 引言

飞机供电系统的品质是评估飞机性能的重要指标之一。飞机供电特性参数主要描述机载用电设备电源输入端供电参数的品质, 其中针对稳态参数、调制参数、畸变参数、瞬态参数和非正常工作极限参数的评价, 是飞机供电质量评价工作的核心, 其指标的优劣直接关系到飞机供电系统和机载用电设备是否符合设计要求, 因而也是飞机供电特性测试系统测试的重点和关键参数。

飞机供电特性测试系统用于对供电系统的电压和电流参数进行实时准确的记录与分析, 进而对供电品质进行评价。为保证飞机供电特性测试系统测试数据的准确可靠, 相应的校准工作必不可少。飞机供电特性测试系统校准装置的核心是可程控的多功能高精度校准信号源, 可实现计算机程序控制, 产生并仿真高压直流供电系统各种供电情况下的电气信号, 其中包括直流电压的畸变频谱信号。

全文详细介绍了飞机供电特性测试系统校准装置直流电压畸变信号的产生方法, 并对校准结果的不确定度进行了评价。

1 畸变频谱参数校准方法

直流电压畸变信号由直流电压(飞机直流供电系统电压为 28 V 或 270 V)叠加宽带交流小信号构成, 其产生原理为计算机的虚拟仪器平台控制任意波形发生器产生宽带交流小信号, 输入宽带功率放大器进行调理以达到标准要求之后, 将信号偏置到所需直流电压(28 V 或 270 V)进行输出。采用宽带分压器加数据采集器对输出信号进行采集, 对采集得到的数据进行加窗和傅里叶变换等处理得到输出信号的标准值, 原理如图 1 所示。

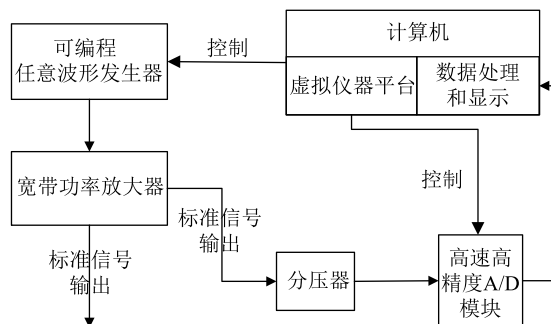


图 1 直流电压畸变信号的产生原理

高压直流供电特性测试系统校准装置的硬件组成主要分为主控计算机、任意波发生器模块、高速高精度 A/D 模块、宽带功率放大模块及分压器。

校准信号源各频率点畸变频谱幅值如图 2 所示,符合 GJB181B-2012, MIL-STD-704 系列的相关规定。

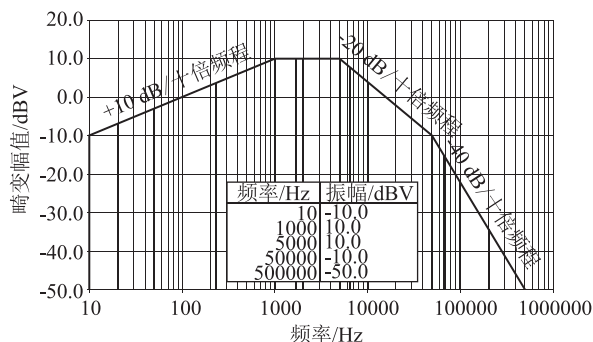


图 2 直流电压畸变频谱特征频点的幅度

直流电压畸变频谱信号由直流信号叠加宽带交流小信号构成,由于无法预知两种信号叠加过程中产生的误差,因此,为了保证输出信号的精度,利用分压器和高速高精度 A/D 模块对功放输出端信号进行数据采集,采集到的数据经计算机的加窗截断和傅里叶变换等分析计算,得到实际输出信号的各频点的幅值,并以此作为标准值。

整个校准信号的输出和采集以及数据处理过程均由校准程序自动完成。校准程序的开发由图形化语言 LabVIEW 完成,校准程序流程如图 3 所示。

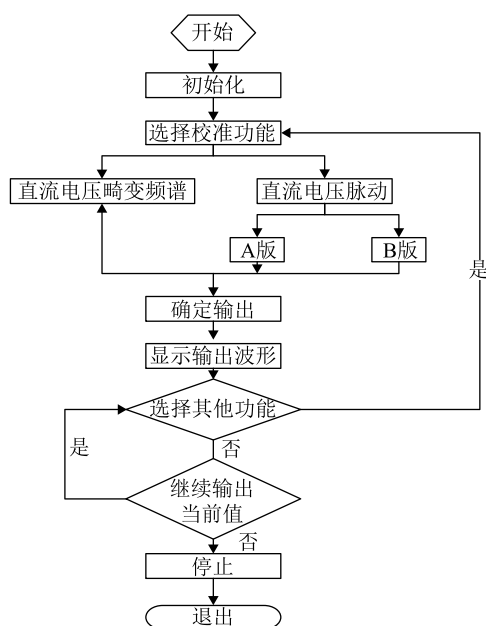


图 3 校准程序流程图

2 测量不确定度来源分析

直流电压畸变频谱输出信号经过数据采集系统采集,再进行加窗和傅里叶变换等处理得到标准值。因此,不确定度来源主要为分压器的分压比误差、数据采集系统的量化误差以及算法对数据进行处理时产生的误差。

3 测量不确定度评定方法

依据 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》对飞机直流供电特性测试系统校准装置直流电压畸变频谱进行不确定度评定。

根据前文所述的直流电压畸变频谱生成原理可知,校准信号源输出的某频点 f_k 的幅度显示值设为 Y_k , 则

$$Y_k = K_k \cdot X_k \quad (1)$$

式中: Y_k 为频点 f_k 处的幅度显示值; K_k 为频点 f_k 处的分压器分压比; X_k 为由数据采集模块采集后经 FFT 算法分析得到频点 f_k 处的幅度值。

变量由自变量之积所表示时,用相对不确定度进行计算较为方便,由于 K_k 和 X_k 相互独立,则三者的关系为

$$\frac{u_{Y_k}}{Y_k} = \sqrt{\left(\frac{u_{K_k}}{K_k}\right)^2 + \left(\frac{u_{X_k}}{X_k}\right)^2} \quad (2)$$

1) K_k 的相对不确定度

分压器频点 f_k 处的分压比相对误差 δ_k 可以通过校准获得,并按均匀分布计算相对不确定度为 $\frac{u_{K_k}}{K_k} = \frac{\delta_k}{\sqrt{3}}$ 。

2) X_k 的相对不确定度

X_k 的不确定度由数据采集系统的量化误差引入的不确定度 u_{1k} 和数据被加窗截断时引入的不确定度 u_{2k} 组成。二者相互独立得

$$u_{X_k} = \sqrt{u_{1k}^2 + u_{2k}^2} \quad (3)$$

$$\frac{u_{X_k}}{X_k} = \frac{\sqrt{u_{1k}^2 + u_{2k}^2}}{X_k} \quad (4)$$

3.1 数据采集系统的量化误差引入的不确定度 u_{1k}

数据采集卡的量化误差可以通过测量其动态有效位数来评估,动态有效位数确定后,再结合数据采集卡的采集范围可得到数据采集卡的量化误差。假设数据采集卡的上下采集范围分别为 $-U$ 和 U , 某一采集频率下的动态有效位数为 m , 则相当于采集卡在对采集到的数据进行量化时,将 $2U$ 范围内的电压等分为 $N = 2^m$ 份, 因此,可将其等效为一个数表在量程 $2U$ 范围

内的分辨力为 $2U/N = U/2^{m-1}$ ，由此可得，量化误差引入的不确定度按均匀分布计算为 $u_{1k} = \frac{U}{2^m \sqrt{3}}$ 。

3.2 数据被加窗截断时引入的不确定度 u_{2k}

数据处理过程包括加窗截断和傅里叶变换，对多个单频信号的叠加信号在时域进行加窗截断时，在频域相当于将窗函数的频谱搬移至各个单频信号的频点处并叠加。

窗函数的频谱分为主瓣和旁瓣，主瓣对应我们需要的信号，旁瓣对应泄露到无用频带中的信号的能量，旁瓣相对于主瓣的衰减越快越好，说明泄露的能量少，泄露的能量即加窗过程中产生的误差，数据被加窗截断时引入的不确定度便由这个误差来评价。

图 4 所示为算法使用的布莱克曼窗函数的频谱，观察可知，窗函数的旁瓣随着频率的升高而衰减，计算误差时，只需考虑对结果影响显著的那些旁瓣，根据分贝值与幅度比值之间的换算关系可知，当分贝值相差 20 dB 时，幅度比值相差了 10 倍，这时的影响相差了一个数量级，便可以忽略，因此，计算时考虑的最小旁瓣为与第一旁瓣相差 20 dB 的旁瓣，如图 4 所示，幅度为 -57.8 dB 的旁瓣与第一旁瓣的幅度 -35.8 dB 相差 22 dB，计算布莱克曼窗函数的频谱泄露误差时，只考虑这一旁瓣与第一旁瓣之间的能量。

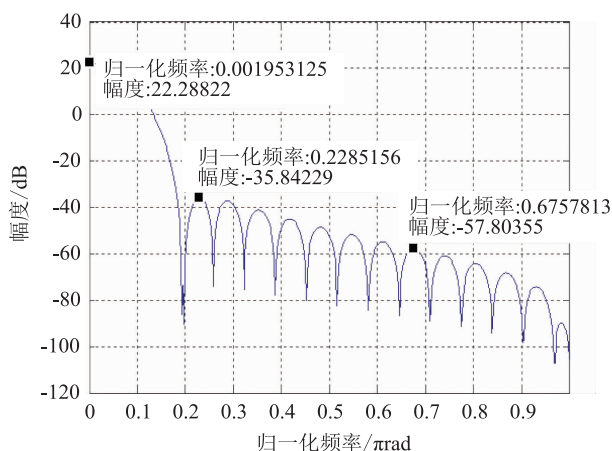


图 4 布莱克曼窗函数频谱

具体计算过程为：

1) 首先计算第一旁瓣的幅度，假设第一旁瓣相对于主瓣幅值的衰减值为 B ；主瓣的幅度为 V_x ，第一旁瓣的幅度为 V_{y1} ，则 B 与二者的关系为

$$B = -20 \cdot \lg\left(\frac{V_{y1}}{V_x}\right) \quad (5)$$

B 值根据窗函数的类型能够查询到， V_x 作为被测设备的设置值是已知的，根据上式能够计算得到 V_{y1} ，该值即第一旁瓣的幅度。

2) 重复第一步的过程，计算其他旁瓣的幅度 V_{y2} ， $\dots$ ， V_{yk} ， $k = \{1, \dots, K\}$ ，其中第 K 个旁瓣相对于第一旁瓣衰减 20 dB。

3) 计算各幅值的方均根值即为窗函数泄露产生的误差， $V_Y = \sqrt{\sum_{k=1}^K V_{yk}^2}$ 。按均匀分布计算频谱泄露造成的不确定度贡献，则 $u_{2k} = \frac{V_Y}{\sqrt{3}}$ 。

4 实例验证

验证实例选择 270 V 高压直流供电特性测试系统直流电压畸变频谱校准系统，其宽带分压器分压比为 40 : 1。

4.1 宽带分压器分压比误差引入的不确定度

分压器频点 f_k 处的分压比相对误差 δ_k 可以通过校准获得，并按均匀分布计算相对不确定度为 $\frac{u_{Kk}}{K_k} = \frac{\delta_k}{\sqrt{3}}$ ，结果如表 1 所示。

表 1 分压比误差引入的相对不确定度

频率 f_k/Hz	$\delta_k/\%$	$\frac{u_{Kk}}{K_k}$
10	0.03	0.0002
25	0.01	0.0001
50	0.01	0.0001
60	0.01	0.0001
250	0.01	0.0001
1000	0.01	0.0001
1700	0.03	0.0002
2000	0.03	0.0002
5000	0.03	0.0002
6500	0.03	0.0002
10000	0.03	0.0002
20000	0.03	0.0002
50000	0.03	0.0002
100000	0.09	0.0005

4.2 数据采集系统的量化误差引入的不确定度

由前文可知 $u_{1k} = \frac{U}{2^m \sqrt{3}}$ 。宽带衰减器会将仿真电源的输出电压衰减至 $-10 \sim +10 \text{ V}$ ，以便数据采集系统进行采集，因此 $U = 10 \text{ V}$ 。所采用的 16 位数据采集器经校准得到其在 2 MHz 采样频率时的动态有效位数为 10 位，即 $m = 10$ ，由此计算得到 $u_{1k} = 0.006 \text{ V}$ 。

4.3 数据被加窗截断时引入的不确定度

数据采集系统对叠加了畸变频谱信号的高压 (270 V) 直流信号进行采集，采样频率为 1 MHz，采样时间设为 1 s。对采集数据加布莱克曼窗并作 FFT 运算得到各频率点的信号幅值如表 2 所示。

表 2 畸变频谱信号各频率正弦波信号幅值校准结果

频率 f_k/Hz	畸变幅值校准结果/Vrms	频率 f_k/Hz	畸变幅值校准结果/Vrms
10	0.311	2000	3.160
25	0.498	5000	3.158
50	0.561	6500	2.428
60	0.774	10000	1.574
250	1.581	20000	0.784
1000	3.161	50000	0.315
1700	3.161	100000	0.186

由图 4 可知，包含第一旁瓣在内共有 8 个旁瓣需要参与计算，这 8 个旁瓣相对于主瓣的衰减值如表 3 所示。

表 3 各旁瓣相对于主瓣的衰减值

旁瓣	相对于主瓣的衰减/dB
1	58.13
2	60.93
3	64.40
4	68.38
5	71.40
6	75.31
7	77.29
8	80.09

根据表 2 所测得主瓣值，按照前文所述步骤计算得频谱泄露误差如表 4 所示。

表 4 畸变频谱信号各频率点的频谱泄露误差

频率 f_k/Hz	误差/Vrms	频率 f_k/Hz	误差/Vrms
10	0.0005	2000	0.0055
25	0.0009	5000	0.0055
50	0.0012	6500	0.0042
60	0.0013	10000	0.0027
250	0.0027	20000	0.0014
1000	0.0055	50000	0.0005
1700	0.0055	100000	0.0003

按照均匀分布计算不确定度如表 5 所示。

表 5 畸变频谱信号各频率点的频谱泄露误差引入的不确定度

频率 f_k/Hz	u_{2k}/Vrms	频率 f_k/Hz	u_{2k}/Vrms
10	0.0003	2000	0.0032
25	0.0005	5000	0.0031
50	0.0007	6500	0.0024
60	0.0008	10000	0.0016
250	0.0016	20000	0.0008
1000	0.0032	50000	0.0003
1700	0.0032	100000	0.0002

4.4 X_k 的相对不确定度 $\frac{u_{X_k}}{X_k}$

根据式 $\frac{u_{X_k}}{X_k} = \frac{\sqrt{u_{1k}^2 + u_{2k}^2}}{X_k}$ 可得不同频点 X_k 的相对不确定度如表 6 所示。

表 6 X_k 的相对不确定度

频率 f_k/Hz	$\frac{u_{X_k}}{X_k}$	频率 f_k/Hz	$\frac{u_{X_k}}{X_k}$
10	0.019	2000	0.002
25	0.012	5000	0.002
50	0.011	6500	0.003
60	0.008	10000	0.004
250	0.004	20000	0.008
1000	0.002	50000	0.019
1700	0.002	100000	0.032

4.5 显示值 Y_k 的相对不确定度 $\frac{u_{Y_k}}{Y_k}$

根据式 $\frac{u_{Y_k}}{Y_k} = \sqrt{\left(\frac{u_{K_k}}{K_k}\right)^2 + \left(\frac{u_{X_k}}{X_k}\right)^2}$ 可得显示值 Y_k 的相对不确定度如表 7 所示。

表 7 Y_k 的相对不确定度

频率 f_k/Hz	$\frac{u_{Y_k}}{Y_k}$	频率 f_k/Hz	$\frac{u_{Y_k}}{Y_k}$
10	0.019	2000	0.002
25	0.012	5000	0.002
50	0.011	6500	0.003
60	0.008	10000	0.004
250	0.004	20000	0.008
1000	0.002	50000	0.019
1700	0.002	100000	0.032

换算成以方均根值 1.0 V 为基础的分贝数的不确定度如表 8 所示。

表 8 畸变频谱的扩展不确定度

频率 f_k/Hz	$U/\text{dB}(k=2)$	频率 f_k/Hz	$U/\text{dB}(k=2)$
10	0.34	2000	0.04
25	0.20	5000	0.04
50	0.18	6500	0.04
60	0.14	10000	0.08
250	0.08	20000	0.14
1000	0.04	50000	0.32
1700	0.04	100000	0.56

5 结束语

根据 GJB 5189 - 2003《飞机供电特性参数测试方法》的规定, 直流电压畸变频谱测试设备的最大允许误差(以方均根值 1 V 为基准的分贝数)需满足: ①频率小于或等于 50 kHz 时, ± 2 dB 范围内; ②频率大于 50 kHz 时, ± 5 dB 范围内。由此校准装置的测量结果不确定度至少应满足: ①频率小于或等于 50 kHz 时, 0.5 dB($k=2$); ②频率大于 50 kHz 时, 1 dB($k=2$)。由表 8 得到的不确定度可知, 校准装置的直流电压畸变频谱参数满足溯源要求。

参考文献

- [1] 国家质量技术监督局. JJF 1059 - 1999 测量不确定度评定与表示[S]. 北京: 中国计量出版社, 1999.
- [2] 国家质量技术监督局. JJF 1048 - 1995 数据采集系统校准规范[S]. 北京: 中国计量出版社, 1995.
- [3] 胡广书. 数字信号处理: 理论、算法与实现[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [4] 张乃国. 电子测量技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1985.
- [5] 梁志国. 数据采集系统若干问题的研究[D]. 北京: 航空航天大学, 2009.
- [6] 陆祖良. 采样测量数据的插值极其误差分析[J]. 计量学报, 1986, 7(4): 314 - 322.

收稿日期: 2017 - 08 - 11



王文健(1972 -), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事航空综测与电学计量科研课题、计量测试专用设备的研制开发及综合测试工作。

1994 年于西北工业大学获学士学位, 2005 年北京航空航天大学控制工程专业工程硕士毕业。主持承担国防技术基础、工信部民机专项、型号及军事计量等十余项科研项目; 曾获“中国一航青年岗位能手”称号, 荣获集团三等功 2 次, 被收录 GF 报告 6 篇, 出版专著 1 部, 发表文章 7 篇, 申请发明专利 5 项。