

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.06.12

# 飞机 270 V 直流电源供电特性参数 校准方法实现与验证

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:** 针对飞机 270 V 直流电源供电特性测试系统的校准需求, 结合 GJB 5189-2003《飞机供电特性参数测试方法》等相关标准, 完成测试系统的校准项目和校准方法研究, 并基于 LabVIEW 平台编写校准程序, 实现了标准信号的生成和采集; 基于直接数据合成、宽带精密放大和宽带分压等技术研制了测试系统的校准装置, 形成校准系统, 实现了稳态参数和瞬态参数的校准能力。编制现场验证试验大纲, 并对电源试验台进行了现场试验。结果表明: 该校准装置的功能和技术指标满足测试系统的校准需求, 验证了以宽带精密放大和分压技术为基础的飞机 270 V 直流电源供电特性测试系统校准方法的合理和有效性, 为四代机 270 V 直流电源系统研制、生产及维护过程中量值的准确性、可靠性和统一性提供了重要保障。

**关键词:** 飞机电源供电特性; 校准; LabVIEW; 直接数据合成

**中图分类号:** TB9

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-5795(2021)06-0073-07

## Implementation and Verification of Calibration Methods for Aircraft 270 V DC Power Supply Characteristic Parameters

WANG Jianqiang

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

**Abstract:** Based on the calibration requirements of aircraft 270 V DC power supply characteristic test system, combined with GJB 5189—2003 and other relevant standards, the calibration items and methods of the test system are studied. The calibration program is written based on LabVIEW platform, which realizes the functions of standard signal generation and collection. A calibration device is developed based on direct data synthesis, broadband precision amplification and voltage divider. The calibration system is formed, which achieves the calibration ability of steady-state parameters and transient parameters. The field verification test program is prepared. The field test of power supply test-bed is carried out. The test results show that the functions and technical indexes of the calibration device meet the requirements of the test system, which verifies the rationality and effectiveness of the calibration method for aircraft 270 V DC power supply characteristic test system based on broadband precision amplification and voltage divider. The calibration methods studied provide an important guarantee for the accuracy, reliability and uniformity of the value in R & D, production and maintenance of the 270 V DC power supply system of the fourth generation airplane.

**Key words:** aircraft power supply characteristic; calibration; LabVIEW; direct data synthesis

## 0 引言

飞机供电特性参数主要描述机载用电设备电源输入端的供电参数的品质。良好的飞机电源供电特性应

具有电压稳定性好、波形畸变小、谐波含量低, 以及瞬态变化范围窄、非正常工作极限与正常供电差别小等特点。因此飞机供电特性参数中的稳态参数、畸变参数、谐波参数(直流电源系统中为脉动参数)、瞬态

收稿日期: 2021-11-08; 修回日期: 2021-12-13

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

引用格式: 王建强. 飞机 270 V 直流电源供电特性参数校准方法实现与验证[J]. 计测技术, 2021, 41(6): 73-79.

WANG J Q. Implementation and verification of calibration methods for aircraft 270 V DC power supply characteristic parameters[J]. Metrology and measurement technology, 2021, 41(6): 73-79.

参数和非正常工作极限参数,是飞机供电质量评价的核心,也是飞机电源供电特性测试系统测试的重点和关键。

270 V 高压直流供电系统是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型电源,当前已经在 F-22A, F-35 等飞机上应用,具有良好的应用前景。高压直流电源系统的特点是发电机结构简单、工作可靠、并联方便,主电源和二次电源内部损耗小、效率高,电网质量轻、对人体的危害较小<sup>[1-2]</sup>。针对上述电源系统,相关主机厂研制了飞机 270 V 直流电源供电特性测试系统,用于发电机试验台和电网试验台的性能测试。该系统主要测试飞机供电系统中直流电压、电流等动、静态参数特性以及分析供电品质,具有采集速率高、数据量大、准确度高、通道数多、使用方便等特点。测试系统主要由计算机、数据采集模块、信号调理模块及相应的传感器等部分组成。将调理后的模拟信号输入数据采集模块,完成各种动、静态参数的测试<sup>[3]</sup>。

为了确保测量值的准确可靠, GJB 5109-2004《装备计量保障通用要求 检测与校准》明确规定,武器装备研制、使用、维护等过程中的测试系统必须经过校准后才能投入使用。针对飞机 270 V 直流电源供电特性测试系统校准需求,基于宽带精密放大、高偏置电压放大和宽带分压等技术,研制了校准装置;根据 GJB 5189-2003《飞机供电特性参数测试方法》、GJB 5558-2006《飞机供电特性测试要求》、GJB 181B-2012《飞机供电特性》等标准进行了校准方法的研究<sup>[4-6]</sup>,并基于 LabVIEW 开发平台,编写校准程序,最终形成了飞机 270 V 直流电源供电特性测试系统的校准系统,实现了对稳态参数和瞬态参数的校准,确保飞机 270 V 直流电源供电特性测试系统量值的准确性、可靠性、统一性,进而保证飞机的研究、生产以及将来的维护质量。

## 1 校准装置组成原理

校准装置组成原理如图 1 所示,计算机控制任意波形发生模块,基于直接数据合成技术计算需要输出的波形并输出至宽带功率放大器,其中宽带功率放大器 A 主要完成高偏置信号放大,实现畸变和脉动信号的输出,宽带功率放大器 B 主要完成高精度高增益信号放大,实现幅度瞬变信号的输出<sup>[7]</sup>。输出的校准信号经过宽带分压模块衰减后由高精度数据采集模块进行采集,计算机对数据进行后处理得到校准信号的标准值,通过与被测采集系统的数据进行对比,完成校准<sup>[8]</sup>。

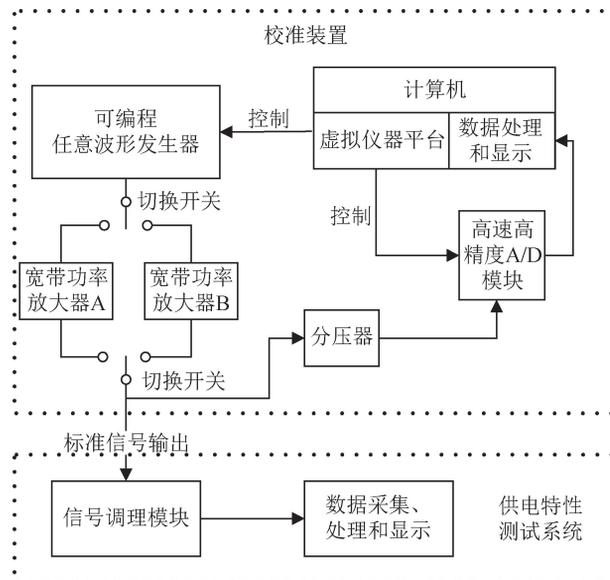


图 1 校准装置组成

Fig. 1 Diagram of calibration device composition

## 2 校准程序设计

根据 GJB 5189-2003《飞机供电特性参数测试方法》、GJB 5558-2006《飞机供电特性测试要求》、GJB 181B-2012《飞机供电特性》等标准研究校准方法,基于 LabVIEW 开发平台,编写校准程序。

校准程序按照功能主要分为两个部分:①仪器控制部分,包括任意波发生模块和高速高精度 A/D 模块;②数据处理、分析以及显示部分,该部分对直流电压畸变频谱信号进行加窗截断并实现短时傅里叶变换,从而得到频谱信息。

实际编程过程中,按照功能的关联程度将软件规划为三个部分:稳态直流电压和瞬变直流电压输出单元、直流电压畸变频谱和直流电压脉动输出单元、信号的采集分析单元。

### 2.1 稳态直流电压和瞬变直流电压输出

稳态直流电压和直流电压瞬变在输出电压的特征上具有一致性,且二者经过任意波形发生器模块模拟后的信号均通过高增益放大器进行放大和输出<sup>[9-10]</sup>,因此将二者合并为软件的一个单元,其流程图如图 2 所示。

### 2.2 直流电压畸变频谱和直流电压脉动输出

直流电压畸变频谱和直流电压脉动在输出电压的特征上具有一致性<sup>[11]</sup>,且二者经过任意波形发生器模块模拟后的信号均通过低增益、高偏置电压放大器进行放大和输出,因此将二者合并为软件的一个单元,流程图如图 3 所示。

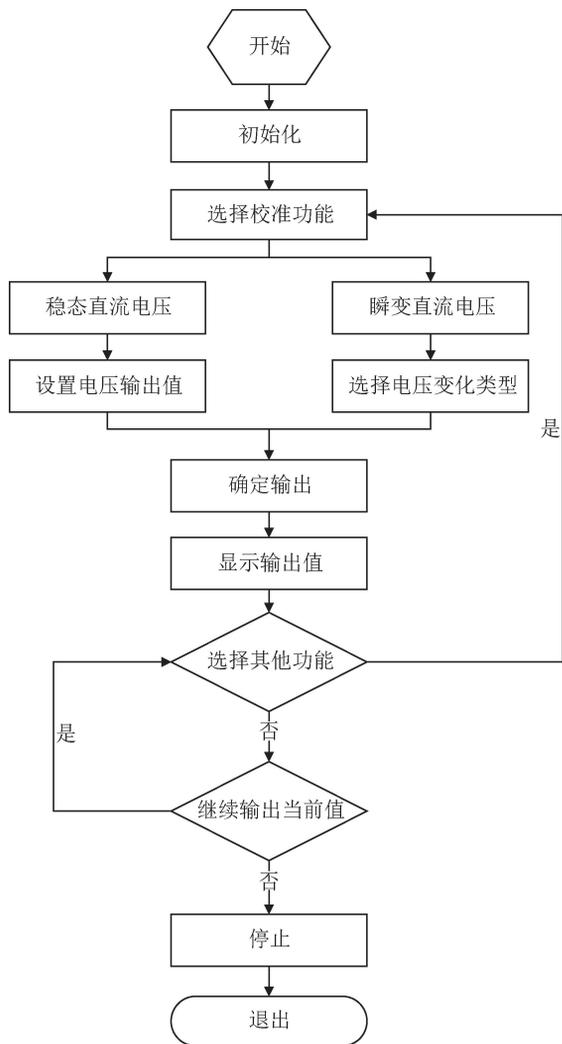


图2 稳态直流电压和直流电压瞬变单元流程图  
 Fig. 2 Flow chart of steady-state DC voltage and DC voltage transient unit

2.3 信号的采集和分析

信号采集和分析单元根据不同的信号类型，按照不同的采样率和采样时间运行，并调用不同的后处理算法，可以得到稳态、瞬态、畸变和脉动不同的校准信号标准值<sup>[12-14]</sup>，其中，稳态直流电压信号主要通过低通滤波并求取均值的算法获得；瞬态直流电压输出时会提供触发信号，使校准装置的采集功能与测试系统的采集得以同步，信号采集和分析单元以足够的采样率获得瞬态直流电压标准信号的变化过程，并与测试系统得到的波形进行对比；畸变和脉动信号通过短时傅里叶变换算法获得，选择窗函数的原则是：读取频率值时选择矩形窗函数，读取幅度值时选择布莱克曼窗函数。

信号的采集与分析功能软件的流程图如图4所示。

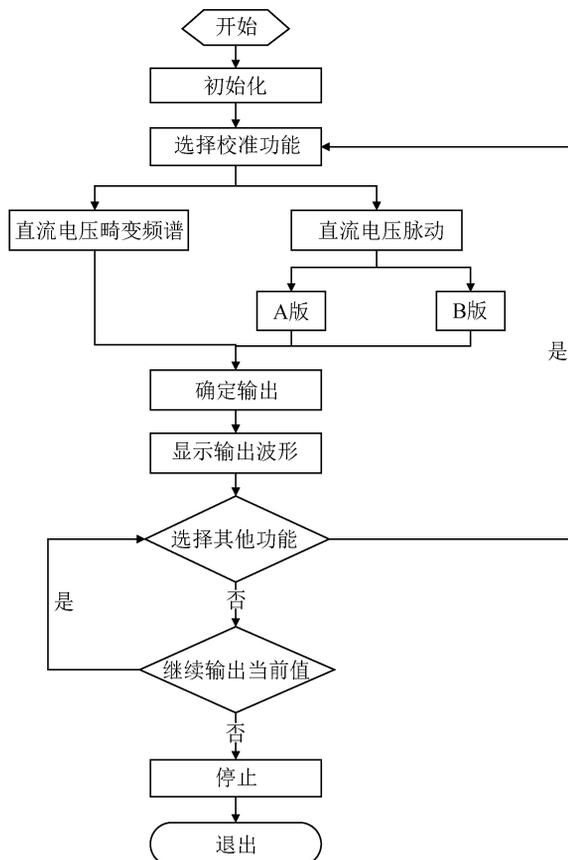


图3 直流电压畸变和脉动单元流程图  
 Fig. 3 Flow chart of DC voltage distortion and ripple unit

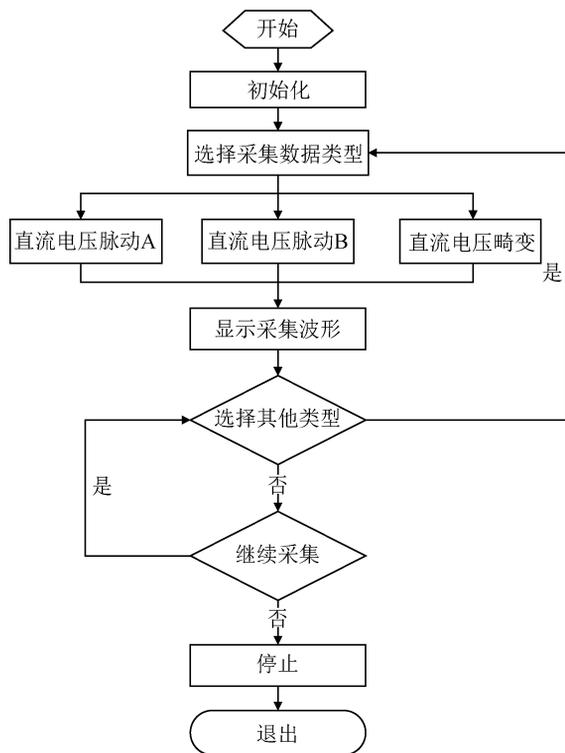


图4 信号采集和分析单元流程图  
 Fig. 4 Flow chart of signal acquisition and analysis unit

### 3 验证试验

按照相关标准编制现场验证试验大纲,针对某型战机电源系统试验台进行了该校准系统的功能和技术参数的验证试验<sup>[15-16]</sup>。试验结果表明该测试系统主要技术指标满足相关标准要求,畸变测量功能由于采样率的设置问题有不符合要求的测试点,提高采样率之后即能达到标准要求。

#### 3.1 稳态直流电压功能验证

稳态直流电压输出范围为100~350 V,在稳态直流电压为额定值时,最大允许相对误差在 $\pm 0.5\%$ 范围内。

运行专用校准软件,飞机高压直流供电特性测试系统校准装置按照标准值逐点输出,被测设备和监测设备的测量数据如表1所示。

表1 稳态直流电压输出

Tab.1 Steady state DC voltage output

| 序号 | 输出标称值/V | 标准值/V  | 测试结果   |        |
|----|---------|--------|--------|--------|
|    |         |        | 测量值/V  | 误差/%   |
| 1  | 100     | 99.91  | 99.90  | -0.010 |
| 2  | 200     | 199.92 | 199.91 | -0.005 |
| 3  | 240     | 239.96 | 239.95 | -0.004 |
| 4  | 250     | 249.97 | 249.95 | -0.008 |
| 5  | 270     | 270.00 | 269.97 | -0.011 |
| 6  | 280     | 280.00 | 279.99 | -0.004 |
| 7  | 285     | 285.01 | 285.00 | -0.004 |
| 8  | 300     | 300.01 | 299.99 | -0.007 |
| 9  | 320     | 320.02 | 319.99 | -0.009 |
| 10 | 350     | 350.03 | 349.98 | -0.014 |

如表1所示,按照稳态直流电压的测量范围(100~350 V)选取十个测量点进行了校准试验,出现的最大误差为-0.014%,满足相关标准“在稳态直流电压为额定值时,测量的相对误差应在 $\pm 0.5\%$ 以内”的要求。

#### 3.2 直流电压畸变频谱功能验证

直流电压畸变频率( $f$ )范围为10 Hz~100 kHz。当 $f \leq 50$  kHz时,畸变频谱幅值误差在 $\pm 2$  dB范围内;当 $f > 50$  kHz时,畸变频谱幅值误差在 $\pm 5$  dB范围内。

运行专用校准软件,控制校准装置按表2逐点输出畸变信号分量,被测设备和监测设备的测量结果见表3。

表2 直流电压畸变频谱

Tab.2 DC voltage distortion spectrum

| 序号      | 畸变分量频率/ $f$ /Hz | 畸变信号幅值/V |
|---------|-----------------|----------|
| HDC103A | 10              | 0.316    |
| HDC103B | 25              | 0.500    |
| HDC103C | 50              | 0.707    |
| HDC103D | 65              | 0.775    |
| HDC103E | 250             | 1.581    |
| HDC103F | 1000            | 3.162    |
| HDC103G | 1700            | 3.162    |
| HDC103H | 2000            | 3.162    |
| HDC103I | 5000            | 3.162    |
| HDC103J | 6500            | 2.433    |
| HDC103K | 10000           | 1.581    |
| HDC103L | 20000           | 0.791    |
| HDC103M | 50000           | 0.316    |
| HDC103N | 65000           | 0.187    |
| HDC103O | 100000          | 0.079    |

表3 直流电压畸变频谱测量结果

Tab.3 Measurement result of DC voltage distortion spectrum

| 频率/Hz  | 标准值/V | 测量值/V | 误差/dB |
|--------|-------|-------|-------|
| 10     | 0.316 | 0.314 | -0.06 |
| 25     | 0.496 | 0.497 | 0.02  |
| 50     | 0.713 | 0.72  | 0.08  |
| 60     | 0.758 | 0.768 | 0.11  |
| 250    | 1.578 | 1.574 | -0.02 |
| 1000   | 3.163 | 3.16  | -0.01 |
| 1700   | 3.146 | 3.157 | 0.03  |
| 2000   | 3.21  | 3.186 | -0.07 |
| 5000   | 3.174 | 3.186 | 0.03  |
| 6500   | 2.43  | 2.358 | -0.26 |
| 10000  | 1.572 | 1.578 | 0.03  |
| 20000  | 0.798 | 0.613 | -2.29 |
| 50000  | 0.314 | 0.325 | 0.30  |
| 65000  | 0.185 | 0.168 | -0.84 |
| 100000 | 0.081 | 0.073 | -0.90 |

直流电压畸变频谱测试中，将 10 Hz 至 100 kHz 频段内的交流小信号与 270 V 直流信号叠加输入测试系统。标准要求测试系统“畸变频谱幅值(以方均根值 1.0 V 为基准的分贝数)的误差为：频率不超过 50 kHz 时，误差不超过 ±2 dB，频率大于 50 kHz 时，误差不超过 ±5 dB”。对比测试系统的测量值与校准装置的标准值可知，被测系统的 20 kHz 频点超过最大误差限值，这是由于测试系统在 20 kHz 处的频率分辨力不足，在设置为 20 kHz 时，实测为频率 19.825 kHz 的幅值，导致结果不满足要求，当提高采样频率或增加采样点数后，均可使该频点校准结果满足要求。

试验发现：其他条件无变化时，只要采样率达到信号频率的 20 倍以上，就容易获得  $10^{-5}$  量级频谱频率分析准确度和  $10^{-3}$  以上的幅度的分析准确度，继续提升采样率无法显著提高直流电压畸变频谱信号的测量准确度，故应考虑其他因素的影响，如测试系统的信噪比等。

通过对标准信号添加噪声的方式，验证测试系统对噪声的敏感程度。其他条件不变的情况下，当标准信号信噪比由 20 dB 提高至 110 dB，测试系统计算得到的直流电压畸变频谱信号的频率误差  $e_f$ 、幅度误差  $e_v$  和相位误差  $e_\phi$  均有显著提升，变化规律如图 5 所示。

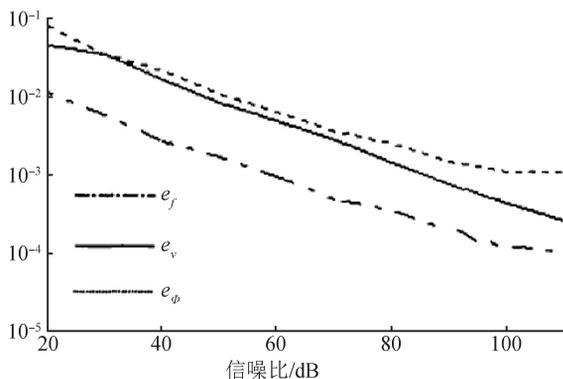


图 5 信噪比对畸变频谱测量误差的影响

Fig. 5 Influence of SNR on measurement error of distorted spectrum

### 3.3 直流电压脉动功能验证

直流电压脉动的频率范围为 1.2 ~ 16.8 kHz，幅值最大允许误差在 ±3% 范围内。

运行专用校准软件，校准装置根据表 4 的测试项输出直流电压脉动信号，被测设备和监测设备的测量结果如表 5 所示。

表 4 直流电压脉动  
Tab. 4 DC voltage ripple

| 测试项              | 脉动频率分量/Hz | 脉动幅度/V |
|------------------|-----------|--------|
| A: 1.2 kHz 及七次谐波 | 1200      | 3.16   |
|                  | 2400      | 0.96   |
|                  | 3600      | 1.56   |
|                  | 4800      | 0.48   |
|                  | 6000      | 0.78   |
|                  | 7200      | 0.24   |
|                  | 8400      | 0.36   |
| B: 2.4 kHz 及七次谐波 | 2400      | 3.16   |
|                  | 4800      | 0.96   |
|                  | 7200      | 1.56   |
|                  | 9600      | 0.48   |
|                  | 12000     | 0.78   |
|                  | 14400     | 0.24   |
|                  | 16800     | 0.36   |

表 5 直流 270 V 脉动测量结果

Tab. 5 Measurement result of DC voltage ripple

| 测试项 | 脉动频率/Hz | 脉动幅度设置值/V | 脉动幅度标准值/V | 脉动幅度测量值/V | 误差/%   |
|-----|---------|-----------|-----------|-----------|--------|
| A   | 1200    | 3.16      | 3.153     | 3.152     | -0.03% |
|     | 2400    | 0.96      | 0.956     | 0.961     | 0.52%  |
|     | 3600    | 1.56      | 1.550     | 1.557     | 0.45%  |
|     | 4800    | 0.48      | 0.474     | 0.474     | 0.00%  |
|     | 6000    | 0.78      | 0.768     | 0.764     | -0.52% |
|     | 7200    | 0.24      | 0.233     | 0.231     | -0.86% |
|     | 8400    | 0.36      | 0.353     | 0.351     | -0.57% |
| B   | 2400    | 3.16      | 3.152     | 3.166     | 0.44%  |
|     | 4800    | 0.96      | 0.954     | 0.954     | 0.00%  |
|     | 7200    | 1.56      | 1.549     | 1.538     | -0.71% |
|     | 9600    | 0.48      | 0.474     | 0.466     | -1.69% |
|     | 12000   | 0.78      | 0.762     | 0.758     | -0.52% |
|     | 14400   | 0.24      | 0.232     | 0.233     | 0.43%  |
|     | 16800   | 0.36      | 0.351     | 0.348     | -0.85% |

直流电压脉动类似于交流电源系统中的谐波，由于 270 V 直流电压由 400 Hz 交流电压整流得到，因此

脉动信号的频率均为 400 Hz 频率的谐波小信号，由表 5 测试结果可知，该测试系统的直流电压脉动测量功能满足“幅值最大允许误差在 ±3% 范围内”的要求。

### 3.4 直流电压瞬变功能验证

直流电压输出范围为 0 ~ 350 V，当电压最大时，最大允许相对误差在 ±1% 范围内。

运行校准软件，按照表 6 的测试项输出直流电压瞬变信号，被测设备和监测设备的测量数据见表 7。

表 6 直流电压瞬态

Tab. 6 DC voltage transient

| 稳态电压/V | 电压从稳态到瞬态的时间/ms | 瞬变电压/V | 瞬变电压持续时间/ms | 电压从瞬态到稳态的时间/ms |
|--------|----------------|--------|-------------|----------------|
| 280    | <1             | 330    | 20          | <1             |
| 280    | <1             | 330    | 20          | 20             |

表 7 直流电压瞬态测量结果

Tab. 7 Measurement result of DC voltage transient

| 次数 | 稳态电压/V | 瞬变电压/V | 瞬变电压持续时间/ms | 电压/时间波形 |
|----|--------|--------|-------------|---------|
| -  | 270.0  | -      | -           | -       |
| 1  | 280.0  | 329.9  | 20.0        | 图 5     |
| 2  | 280.0  | 329.9  | 20.0        |         |
| 3  | 280.0  | 329.9  | 20.0        |         |
| 4  | 280.0  | 329.9  | 20.0        |         |
| 5  | 280.0  | 329.9  | 20.0        |         |
| 6  | 280.0  | 329.9  | 20.0        |         |
| 1  | 280.0  | 330.0  | 20.0        | 图 6     |

测试系统得到的波形如图 6 和图 7 所示。

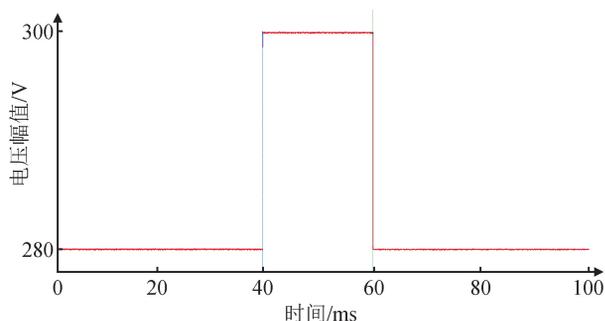


图 6 直流电压瞬变波形图 1

Fig. 6 Waveform 1 of DC voltage transient

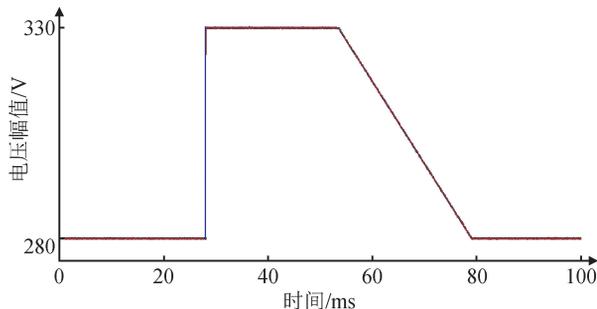


图 7 直流电压瞬变波形图 2

Fig. 7 Waveform 2 of DC voltage transient

根据 GJB 5189 - 2003《飞机供电特性参数测试方法》的相关规定，针对直流电压瞬变信号，在最大极限范围时，测量的相对误差应在 ±1% 范围内，比较表 6 和表 7 的标准值与测量值可知，瞬变电压幅度最大误差为 -0.03%，满足标准要求。

## 4 结束语

本研究针对飞机 270 直流电源供电特性测试系统的实际校准需求，结合 GJB5189 - 2003《飞机供电特性参数测试方法》等相关标准，进行了测试系统校准项目和校准方法的研究。结果表明，基于宽带精密放大和分压技术可以解决大动态范围交直流叠加信号的溯源问题。下一阶段，随着多电/全电飞机技术的突破，飞机电源功率密度日益增大，机载用电设备数量增加，电源供电特性也相应发生了显著变化，如采用交流、直流结合的电源系统，同时，单个用电设备负载增加，为飞机电源供电品质提出了新的挑战。新一代启动发电系统对电源供电特性测试系统和校准装置都提出了新的要求，尤其在应对浪涌电流、电源谐波、电压不平衡、电压畸变和电压瞬态特性问题等方面，应提早部署，统筹安排测试和计量技术的研究进程<sup>[17]</sup>。

## 参考文献

[1] 戴卫力, 王慧贞, 严仰光, 等. 航空起动/发电系统的发展趋势与研究现状[J]. 航空科学技术, 2010, (5): 28 - 32. DAI W L, WANG H Z, YAN Y G, et al. Development trend and current situation of starter-generator for aircraft engine[J]. Aeronautical science and technology, 2010, (5): 28 - 32. (in Chinese)

[2] 董锁利. 装备计量保障中 GJB 5109 - 2004 的适用性分析[J]. 计测技术, 2016, 36(5): 44 - 47. DONG S L. Applicability analysis of GJB 5109 - 2004 in measurement support of equipment[J]. Metrology and measurement technology, 2016, 36(5): 44 - 47. (in Chinese)

- [3] 司剑飞, 郝世勇, 战祥新. 飞机地面电源供电品质在线测试系统设计[J]. 电子测量技术, 2012, 35(7): 116-118, 128.  
SI J F, HAO S Y, ZHAN X X. Online-testing system of parameters in aeroplane ground power supply[J]. Electronic measurement technology, 2012, 35(7): 116-118, 128. (in Chinese)
- [4] 中国航空综合技术研究所. GJB5189-2003 飞机供电特性参数测试方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2003.  
China Aviation Integrated Technology Research Institute. GJB5189-2003 The measurements of parameters in aircraft power supply system[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of National Defense Science, Technology and Industry Commission, 2003. (in Chinese)
- [5] 中国人民解放军空军装备部综合计划部. GJB 5558-2006 飞机供电特性测试要求[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2006.  
Comprehensive Planning Department of Air Force Equipment Department of the People's Liberation Army. GJB 5558-2006 Requirements for test characteristic in aircraft electric power system[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of General Equipment Department. (in Chinese)
- [6] 中国人民解放军空军装备部综合计划部. GJB 181B-2012 飞机供电特性[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2012.  
Comprehensive Planning Department of Air Force Equipment Department of the People's Liberation Army. GJB 181B-2012 Aircraft electric power characteristics[S]. Beijing: Military Standard Publishing and Distribution Department of General Equipment Department. (in Chinese)
- [7] CHIHEB R, DOMINIQUE D, PHILIPPE M. Noncoherent spectral analysis of ADC using filter bank[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement, 2004, 53(3): 652-660.
- [8] AHMAD E, H. EL-KISHKY, MAZEN A S et al. On power quality of variable-speed constant-frequency aircraft electric power systems [J]. IEEE transactions on power delivery, 2010, 25(1): 55-65.
- [9] YANG S S, LIU Y, ZHAO J, et al. Research on methods of distortion spectrum analysis for aircraft VFAC power system [C]//15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, 2013.
- [10] JENQ Y C, CROSBY P B. Sinewave parameter estimation algorithm with application to waveform digitizer effective bits measurement[J]. IEEE transactions on instrumentation and measurement. 1989, 37(4): 529-532.
- [11] JING W, WEI Z. New precise measurement method of power harmonics based on FFT[C]// Intelligent Signal Processing and Communication Systems, 2005. ISPACS 2005. Proceedings of 2005 International Symposium on. IEEE Xplore, 2005: P365-368.
- [12] ZHANG J Q, ZHAO X M AND SUN J W. An automatic compensation of Quasi-synchronous sampling for distorted power measurement [C]//IMTC 96 digest. Brussels. 1996: 951-955.
- [13] ZHU X G, HONG B R, WANG D M. Implementation of time-scale transformation based on continuous wavelet theory [J]. Journal of systems engineering and electronics, 2000, 11(1): 32-37.
- [14] 刘应梅. 电能质量扰动检测和分析的研究[D]. 中国电力科学研究院, 2003.  
LIU Y M. Research on power quality disturbance detection and analysis[D]. China Electric Power Research Institute, 2003. (in Chinese)
- [15] 全国法制计量管理计量技术委员会. JJF 1001-2011 通用计量术语及定义[S]. 北京: 中国质检出版社, 2012.  
National Legal Metrology Management and Metrology Technical Committee. JJF 1001-2011 General terms in metrology and their definitions[S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2012. (in Chinese)
- [16] 赵健, 王宾, 马苗. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.  
ZHAO J, WANG B, MA M. Digital signal processing[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012. (in Chinese)
- [17] 侯毅, 柴艳丽, 程勤. 基于 DDWS 技术的飞机 270 V 直流畸变标准信号源设计[J]. 计测技术, 2021, 41(2): 113-118.  
HOU Y, CHAI Y L, CHENG Q. Design of aircraft 270 V dc distortion standard signal source based on ddws technology[J]. Metrology & measurement technology, 2021, 41(2): 113-118. (in Chinese)