

中华人民共和国工业和信息化部  
电子计量技术规范

JJF(电子)××××—20××

直流机载电源特性模拟器校准规范

Calibration Specification for DC Aircraft Power  
Characteristic simulator

(报批稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中华人民共和国工业和信息化部发布

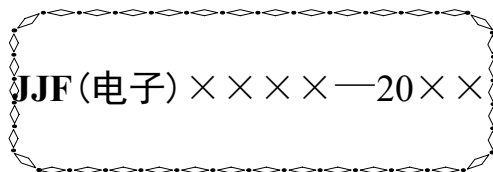
JJF(电子)××××—20××

# 直流机载电源特性模拟器

## 校准规范

Calibration Specification for DC Aircraft

Power Characteristic simulator



归 口 单 位：中国电子技术标准化研究院

主要起草单位：工业和信息化部电子第五研究所  
国营四达机械制造有限公司

参加起草单位：辽宁赛宝计量检测服务有限公司  
广州赛宝计量检测中心服务有限公司

**本规范主要起草人：**

强晓霄（工业和信息化部电子第五研究所）

刘福稼（工业和信息化部电子第五研究所）

张纪涛（国营四达机械制造公司）

**参加起草人：**

张 成（辽宁赛宝计量检测服务有限公司）

陈 彦（广州赛宝计量检测中心服务有限公司）

方 建（广州赛宝计量检测中心服务有限公司）

高翔宇（广州赛宝计量检测中心服务有限公司）

# 目录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 引言 .....                     | II |
| 1 范围 .....                   | 1  |
| 2 引用文件 .....                 | 1  |
| 3 术语和定义 .....                | 1  |
| 4 概述 .....                   | 2  |
| 5 计量特性 .....                 | 2  |
| 5.1 稳态直流电压 .....             | 2  |
| 5.2 直流畸变频谱 .....             | 2  |
| 5.3 脉动幅值 .....               | 2  |
| 5.4 直流电压瞬态波形参数的校准 .....      | 3  |
| 5.5 直流电压中断 .....             | 3  |
| 6 校准条件 .....                 | 3  |
| 6.1 环境条件 .....               | 3  |
| 6.2 测量标准及其他设备 .....          | 3  |
| 7 校准项目和校准方法 .....            | 4  |
| 7.1 校准项目 .....               | 4  |
| 7.2 校准方法 .....               | 4  |
| 8 校准结果的处理 .....              | 9  |
| 9 复校时间间隔 .....               | 9  |
| 附录 A 校准原始记录内页格式 .....        | 10 |
| 附录 B 校准证书内页格式 .....          | 12 |
| 附录 C 主要校准项目的测量不确定度评定示例 ..... | 14 |

# 引 言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范主要参考 GJB 181B-2012《飞机供电特性》、GJB 572A-2006《飞机外部电源供电特性及一般要求》、GJB 5558-2006《飞机供电特性测试要求》、HB 20326.7-2016《机载用电设备的供电适应性试验方法 第7部分：直流 270V》和 HB 20326.8-2016《机载用电设备的供电适应性试验方法 第8部分：直流 28V》中的相关条款编写。

本规范为首次发布。

# 直流机载电源特性模拟器校准规范

## 1 范围

本规范适用于满足机载用电设备的供电特性试验要求的直流机载电源特性模拟器（直流 28V 系统和直流 270V 系统）的校准，也适用于进行交、直流飞机供电特性试验测试设备的直流部分的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GJB 181B-2012 飞机供电特性

GJB 572A-2006 飞机外部电源供电特性及一般要求

GJB 5558-2006 飞机供电特性测试要求

HB 20326.7-2016 机载用电设备的供电适应性试验方法 第 7 部分：直流 270V

HB 20326.8-2016 机载用电设备的供电适应性试验方法 第 8 部分：直流 28V

JJF 1597-2016 直流稳定电源校准规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用本规范。

## 3 术语和定义

下列由 GJB 181B-2012 确立的术语和定义适用于本规范。

### 3.1 稳态 steady state

在任意长时间段内供电特性保持在正常工作稳态特性范围内的一种状态。

### 3.2 瞬态 transient state

由于电气负载变化或发动机转速变化等原因引起的正常扰动造成的电压变化的一种状态。

### 3.3 瞬变 transient

直流电压的变化过程，有些瞬变可能由于瞬时的供电中断或故障清除产生的非正常扰动而引起。

### 3.4 脉动 ripple

直流系统稳态工作期间，瞬时电压围绕稳态直流电压的变化。引起脉动的因素包括直流电源电压的调节、直流电源的内部换向或整流以及负载的变化等，但不局限于上述因素。

### 3.5 脉动幅值 ripple amplitude

瞬时电压与稳态直流电压的最大差值。单位：V。

### 3.6 直流畸变 DC distortion

直流电压中交流分量的方均根值。单位：V。

### 3.7 直流畸变系数 DC distortion factor

直流畸变与稳态直流电压之比。

### 3.8 直流畸变频谱 DC distortion spectrum

直流畸变每一频率分量的方均根值。单位：V。

## 4 概述

直流机载电源特性模拟器是模拟飞机直流供电系统输出，用于对飞机机载设备、航空用电设备进行供电适应性试验的设备。直流机载电源特性模拟器一般由程控单元、可编程直流稳压电源、波形发生单元及信号耦合单元等构成，典型结构框图如图 1 所示。其工作原理是通过程序控制可编程直流稳压电源模块的输出实现 GJB181B-2012 中所规定的直流电压瞬态特性试验波形；通过程序控制波形发生单元产生特定的交流信号并由耦合单元耦合至直流功率电源的输出回路中，输出直流畸变信号和直流脉动信号。

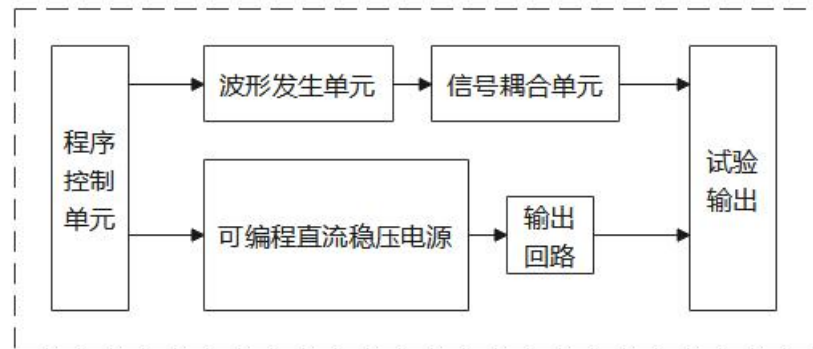


图 1 直流机载电源特性模拟器原理结构框图

## 5 计量特性

### 5.1 稳态直流电压

测量范围：10V～400V；

最大允许误差：±0.5%。

### 5.2 直流畸变频谱

测量范围：0.1V～3.16V（-20dBV～10dBV，以 1V 为基准电压分贝数）；

频率范围：10Hz～50kHz；

最大允许误差：±2dB。

### 5.3 脉动幅值

直流 28V 系统测量范围：0.08V～1.50V；

直流 270V 系统测量范围：0.34V～6.00V；

频率范围：1.2kHz～16.8kHz；

脉动幅值最大允许误差：±0.05V。

#### 5.4 直流电压瞬态波形参数的校准

瞬变电压测量范围：12V~350V；

瞬变电压最大允许误差：±1%；

稳态电压到瞬变电压的变化时间：0.01ms~30ms；

瞬变电压到稳态电压的变化时间：0.01ms~234ms；

电压变化时间最大允许误差：±1%；

瞬变电压持续时间测量范围：10ms~30s；

电压持续时间最大允许误差：±1%。

#### 5.5 直流电压中断

电压中断波形上升、下降时间：≤0.25ms；

中断持续时间：10ms~7s；

中断持续时间最大允许误差：±1%。

注：上述计量特性指标不用于合格性判定，仅供参考。

### 6 校准条件

#### 6.1 环境条件

a) 环境温度：23℃±5℃；

b) 相对湿度：≤80%；

c) 供电电源：(220±22)V，(50±1)Hz；

d) 其他：周围环境应无振动和强电磁干扰，不影响测量标准、辅助设备及被校设备的正常工作。

#### 6.2 测量标准及其他设备

校准用设备应经过计量技术机构检定或校准，满足校准使用要求，并在有效期内。

##### 6.2.1 数字示波器

直流增益：1mV~10V，最大允许误差：±2.0%；

时基：10ns~10s，最大允许误差：±1×10<sup>-5</sup>；

带宽：≥200MHz。

##### 6.2.2 差分探头

衰减比：10:1 或 100:1，最大允许误差：±2.0%；

最大输入电压：≥500V；

带宽：≥20MHz。

##### 6.2.3 直流数字电压表

电压测量范围：0V~500V；

采样率：≥200kS/s；

分辨力：优于 0.01V，最大允许误差：±0.2%。

#### 6.2.4 功率分析仪

电压测量范围：0V～500V，最大允许误差：±（0.1%读数+0.05%量程）；

测量带宽：≥1MHz；

采样率：≥200kS/s；

具有 FFT 测量功能，幅值测量允许误差±0.5%（10Hz～50kHz）。

#### 6.2.5 无感电阻

直流 28V 系统：阻值 10Ω，功率≥200W；

直流 270V 系统：阻值 100Ω，功率≥1000W。

### 7 校准项目和校准方法

#### 7.1 校准项目

表 1 校准项目一览表

| 序号 | 校准项目       | 计量特性条款 | 校准方法条款 |
|----|------------|--------|--------|
| 1  | 稳态直流电压     | 5.1    | 7.2.2  |
| 2  | 直流畸变频谱     | 5.2    | 7.2.3  |
| 3  | 直流电压脉动幅值   | 5.3    | 7.2.4  |
| 4  | 直流电压瞬态波形参数 | 5.4    | 7.2.5  |
| 7  | 直流电压中断     | 5.5    | 7.2.6  |
| 8  | 直流稳压电源特性   | \      | 7.2.7  |

#### 7.2 校准方法

##### 7.2.1 外观及工作正常性检查

###### 7.2.1.1 外观及附件检查

直流机载电源特性模拟器的标志（型号、唯一性识别编号、工作范围等）应明确。与计量特性有关的各引出端的标志应该清晰。结构特殊或专用的输入输出端口，须配有专用电缆和相应工具。直流机载电源特性模拟器应具有接地端子，并标明接地符号，接地线必须完好且良好连接。

###### 7.2.1.2 工作正常性检查

直流机载电源特性模拟器应结构完整，外观无明显的机械损伤。直流机载电源特性模拟器通电后应能正常工作，与使用有关的开关、旋钮、按键、屏幕等应正常。如发现工作不正常，则不进行校准，待修复后再进行校准。

###### 7.2.1.3 预热

校准前，校准用标准设备及被校设备应按各自使用说明书的要求进行开机预热；无明确要求时，开机预热时间不小于30min。

### 7.2.2 稳态直流电压

7.2.2.1 直流机载电源特性模拟器的稳态直流电压校准点一般在其直流电压输出范围内均匀选取不少于5个校准点，且其中所选校准点须包括直流28V、直流270V。如果直流机载电源特性模拟器为直流28V低压测试系统，则选取18V、22V、28V、29V、35V、50V等典型点为校准点；如果直流机载电源特性模拟器为直流270V高压测试系统，则选取220V、250V、270V、320V、350V等典型点为校准点。也可根据用户需求选取校准点。

7.2.2.2 按照图2连接线路。直流机载电源特性模拟器的输出接无感电阻，用于提供负载状态。

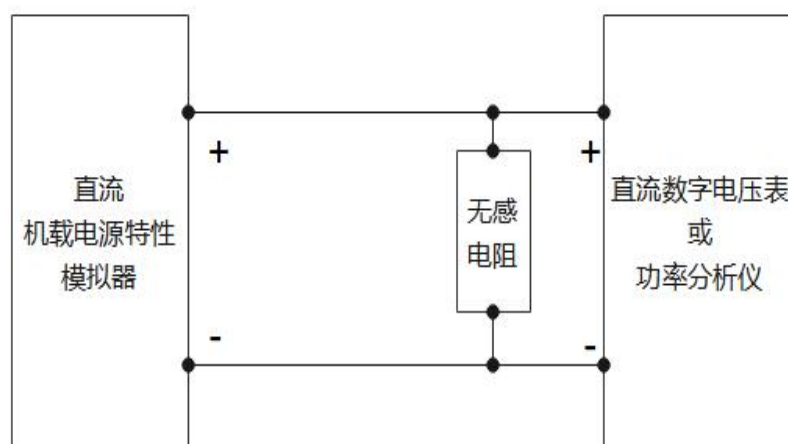


图2 直流机载电源特性模拟器稳态电压校准接线示意图

7.2.2.3 使用直流数字电压表或功率分析仪测量稳态直流电压 $U_Z$ 。记录被校设备显示值 $U_X$ 和直流数字电压表测量的稳态直流电压实测值 $U_Z$ 。

7.2.2.4 按公式（1）和公式（2）计算被校测试设备稳态直流电压绝对示值误差与相对示值误差；

$$\Delta U = U_X - U_Z \quad (1)$$

$$\gamma_U = \frac{U_X - U_Z}{U_N} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

$\Delta U$ ——被校测试设备稳态直流电压绝对示值误差，V；

$U_Z$ ——使用直流数字电压表测量的稳态直流电压实测值，V；

$U_X$ ——测试设备显示值，V；

$\gamma_U$ ——被校测试设备稳态直流电压相对示值误差。

### 7.2.3 直流畸变的校准

7.2.3.1 直流机载电源特性模拟器直流畸变的校准点依据表2选取。表2中选取的校准点为GJB181B-2012中图13和GJB181B-2012中图16给出的直流电压最大畸变频谱包络曲线的各个拐点。也可根据被校直流机载电源特性模拟器的实际输出能力和送检单位的要求选取校准点，但所选校准点应能满足飞机供电特性的实际测试需求。

表2 直流畸变频谱校准点

| 28V 直流系统 |                                   |             | 270V 直流系统 |                                   |             |
|----------|-----------------------------------|-------------|-----------|-----------------------------------|-------------|
| 频率<br>Hz | 畸变频谱幅值<br>(以方均根值 1.0V<br>为基准值) dB | 畸变频谱幅值<br>V | 频率<br>Hz  | 畸变频谱幅值<br>(以方均根值 1.0V<br>为基准值) dB | 畸变频谱幅值<br>V |
| 10       | -20                               | 0.1         | 10        | -10                               | 0.316       |
| 100      | -10                               | 0.316       | 100       | 0                                 | 1.0         |
| 1000     | 0                                 | 1.0         | 1000      | 10                                | 3.16        |
| 5000     | 0                                 | 1.0         | 5000      | 10                                | 3.16        |
| 50000    | -20                               | 0.1         | 50000     | -10                               | 0.316       |

7.2.3.2 按照图2连接线路。校准装置采用带有FFT功能的功率分析仪。

7.2.3.3 设置直流机载电源特性模拟器稳态直流电压输出为28V（或270V），交流成分为选定频率的畸变频谱幅值。按7.2.2测量直流机载电源特性模拟器的稳态直流电压 $U_Z$ ；打开功率分析仪的FFT功能，设置FFT测量模式的采样率不小于1MS/s，窗函数为布莱克曼窗，测量直流电压中的各频率 $f$ 对应的交流电压分量 $U_{Zf}$ 。 $U_{Zf}$ 即为畸变信号幅值， $f$ 为畸变信号频率。将 $U_{Zf}$ 在附录的表中。

7.2.3.4 直流畸变系数的计算

由公式（3）计算直流畸变系数，畸变信号幅值 $U_{Zf}$ 与稳态直流电压 $U_Z$ 之比即为直流畸变系数；

$$k_{Zf} = \frac{U_{Zf}}{U_Z} \quad (3)$$

式中：

$k_{Zf}$ ——直流畸变系数；

$U_{Zf}$ ——直流畸变信号幅值，V；

$U_Z$ ——稳态直流电压，V。

7.2.4 直流电压脉动幅值

7.2.4.1 直流电压脉动选取脉动信号A、脉动信号B作为校准信号，校准信号的频率及幅值分量可按表3所示选取。如果用户有特殊要求也可按照用户要求校准，但校准应能反映设备满足相应依据标准文件要求的能力。

表 3 直流电压脉动频率及幅值

| 脉动信号 | 脉动频率分量<br>(Hz) | 电压 (V方均根值) |          |
|------|----------------|------------|----------|
|      |                | 28V直流系统    | 270V直流系统 |
| A    | 1200           | 1.00       | 3.16     |
|      | 2400           | 0.20       | 0.96     |
|      | 3600           | 0.33       | 1.56     |
|      | 4800           | 0.10       | 0.48     |
|      | 6000           | 0.16       | 0.78     |
|      | 7200           | 0.05       | 0.24     |
|      | 8400           | 0.08       | 0.36     |
| B    | 2400           | 1.00       | 3.16     |
|      | 4800           | 0.20       | 0.96     |
|      | 7200           | 0.33       | 1.56     |
|      | 9600           | 0.10       | 0.48     |
|      | 12000          | 0.16       | 0.78     |
|      | 14400          | 0.05       | 0.24     |
|      | 16800          | 0.08       | 0.36     |

7.2.4.2 按照图2连接线路。校准装置采用带有波形记录功能的功率分析仪。

7.2.4.3 设置直流机载电源特性模拟器稳态直流电压输出为28V（或270V），叠加脉动信号。采用功率分析仪的波形记录功能，设置波形记录时长不少于1s，以不低于200kS/s的采样率记录脉动信号电压输出波形，记录输出电压中的在功率分析仪上显示的最小值 $U_{\min}$ 和最大值 $U_{\max}$ 。

7.2.4.4 脉动幅值的计算

按公式（4）计算直流电压脉动幅值；

$$U_{ZM} = \max[U_{\max} - U_Z, U_Z - U_{\min}] \quad (4)$$

式中：

$U_{\max}$ ——瞬时电压的最大值，V；

$U_{\min}$ ——瞬时电压的最小值，V；

$U_Z$ ——稳态直流电压，V；

$U_{ZM}$ ——直流电压脉动幅值，V。

7.2.5 直流电压瞬态波形参数

7.2.5.1 校准点的选取

28V直流系统的瞬变电压可设置为12V～80V内任意非28V的电压，当瞬变电压为大于28V输出时，为过压瞬变，瞬变电压为小于28V输出时，为欠压瞬变。稳态电压到瞬变电压的变化时间设置为不超过1ms；瞬变电压的持续时间选取10ms、20ms、50ms、30s等典型值；

瞬变电压到稳态电压的变化时间设置为不超过1ms。直流电压瞬态波形参数的设置也可以根据HB 20326.8-2016中LDC105正常电压瞬变、LDC302非正常电压瞬变、LDC501起动电压瞬变所规定的试验条件进行。

270V直流系统的瞬变电压可设置为115V~350V内任意非270V的电压，当瞬变电压为大于270V输出时，为过压瞬变，瞬变电压为小于270V输出时，为欠压瞬变。稳态电压到瞬变电压的变化时间设置为不超过1ms；瞬变电压的持续时间选取10ms、20ms、50ms、30s等典型值；瞬变电压到稳态电压的变化时间设置为不超过1ms。直流电压瞬态波形参数的设置也可以根据HB 20326.7-2016中HDC105正常电压瞬变、HDC302非正常电压瞬变、LDC501起动电压瞬变所规定的试验条件进行。

直流电压瞬态波形的各项参数也可以根据送检单位要求的校准点进行校准。

7.2.5.2 按照图3所示连接线路。采用示波器和差分探头组成的校准装置测量直流机载电源特性模拟器输出端输出的直流瞬态波形参数。差分探头的高低端分别接直流机载电源特性模拟器输出的正、负极。直流瞬态波形参数里的电压参数采用功率分析仪的示波器功能测量。直流机载电源特性模拟器的输出接无感电阻，用于提供带载状态。

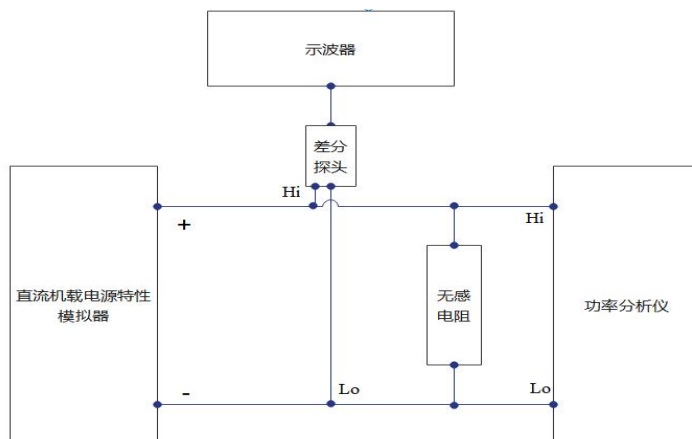


图3 直流机载电源特性模拟器瞬态参数校准接线示意图

7.2.5.3 设置示波器的采样率不低于200kS/s，调整示波器的时基和幅度，使示波器屏幕内完整显示一个瞬态波形。移动示波器光标，测量各瞬变电压持续时间，瞬变电压变化时间。采用功率分析仪的波形分析功能，测量正常电压瞬变时高压的（过压瞬变）瞬态波形的电压最大值和低压的（欠压瞬变）瞬态波形的电压最小值。将各测量结果记录在附录A的表A.6中。

#### 7.2.6 直流电压中断

7.2.6.1 设置直流机载电源特性模拟器输出直流电压中断的试验信号，中断电压设置为0V输出，中断持续时间在可设置范围内选取校准点，一般选择10ms、50ms、100ms、200ms、500ms等5个校准点，如果用户有特殊要求或被校设备特殊的，可另行选取。

7.2.6.2 按照图3所示连接线路，布置同7.2.5.2。

7.2.6.3 设置示波器采样率不低于200kS/s, 调整示波器的时基和幅度, 使示波器屏幕内可以显示一个完整的电压中断波形。测量直流电压中断的试验波形的上升时间、下降时间、中断持续时间, 并将测量结果记录在附录A的表A.7中。

#### 7.2.7 直流机载电源特性模拟器中直流稳压电源的补充说明

直流机载电源特性模拟器中包含的直流稳压电源模块, 其计量特性和校准方法参照JJF 1597-2016执行。

### 8 校准结果的处理

校准结束后应出具校准证书。校准证书应准确、客观地报告校准结果, 校准结果以校准数据、校准曲线等形式给出。校准证书至少应包含以下信息。

- a) 标题: "校准证书";
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点 (如果与实验室的地址不同);
- d) 证书的唯一性标识 (如编号), 每页及总页数的标识;
- e) 客户的名称和地址;
- f) 被校对象的描述和明确标识;
- g) 进行校准的日期, 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 应说明被校对象的接收日期;
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 应对被校样品的抽样程序进行说明;
- i) 校准所依据的技术规范的标识, 包括名称及代号;
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- k) 校准环境的描述;
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范的偏离的说明;
- n) 校准证书签发人的签名;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的说明;
- p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

### 9 复校时间间隔

直流机载电源特性模拟器的复校时间间隔一般不超过12个月。由于设备的使用情况、使用者、以及本身质量等诸多因素的影响, 送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

## 附录 A

## 校准原始记录内页格式

## A.1 外观及工作正常性检查

表A.1 外观及工作正常性检查

| 项目      | 检查结果 |
|---------|------|
| 外观检查    |      |
| 工作正常性检查 |      |

## A.2 稳态直流电压

表A.2 稳态直流电压

| 序号 | 设置值(V) | 显示值(V) | 实测值(V) | 误差 (%) |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 1  |        |        |        |        |
| 2  |        |        |        |        |
| 3  |        |        |        |        |
| 4  |        |        |        |        |
| 5  |        |        |        |        |

## A.3 直流畸变频谱

表A.3 直流（28V）畸变频谱

| 频率设置值 (Hz) | 幅值设置值 (V) | 幅值实测值 (V) |
|------------|-----------|-----------|
| 10         |           |           |
| 100        |           |           |
| 1000       |           |           |
| 5000       |           |           |
| 50000      |           |           |

表A.4 直流（270V）畸变频谱

| 频率设置值 (Hz) | 幅值设置值 (V) | 幅值实测值 (V) |
|------------|-----------|-----------|
| 10         |           |           |
| 100        |           |           |
| 1000       |           |           |
| 5000       |           |           |
| 50000      |           |           |

## A.4 脉动幅值

表A.5 脉动幅值

| 脉动信号 | 电压  |     |     |
|------|-----|-----|-----|
|      | 设置值 | 实测值 |     |
|      |     | 最大值 | 最小值 |
| A    | \   |     |     |
| 脉动幅值 |     |     |     |
| B    | \   |     |     |
| 脉动幅值 |     |     |     |

## A.5 直流电压瞬变

表A.6 直流电压瞬变

| 瞬变电压   |        | 瞬变电压持续时间 |         | 稳态电压到瞬变电压变化时间 |         | 瞬变电压到稳态电压变化时间 |         |
|--------|--------|----------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
| 设置值(V) | 实测值(V) | 设置值(ms)  | 设置值(ms) | 实测值(ms)       | 实测值(ms) | 实测值(ms)       | 实测值(ms) |
|        |        |          |         |               |         |               |         |
|        |        |          |         |               |         |               |         |
|        |        |          |         |               |         |               |         |
|        |        |          |         |               |         |               |         |

## A.6 直流电压中断

表A.7 直流电压中断

| 电压中断持续时间 |         | 电压中断变化时间 |          |
|----------|---------|----------|----------|
| 设置值(ms)  | 实测值(ms) | 上升时间(ms) | 下降时间(ms) |
|          |         |          |          |
|          |         |          |          |
|          |         |          |          |
|          |         |          |          |

## 附录 B

## 校准证书内页格式

## B.1 外观及工作正常性检查

表B.1 外观及工作正常性检查

| 项目      | 检查结果 |
|---------|------|
| 外观检查    |      |
| 工作正常性检查 |      |

## B.2 稳态直流电压

表B.2 稳态直流电压

| 序号 | 设置值(V) | 显示值(V) | 实测值(V) | 误差 (%) |
|----|--------|--------|--------|--------|
| 1  |        |        |        |        |
| 2  |        |        |        |        |
| 3  |        |        |        |        |
| 4  |        |        |        |        |
| 5  |        |        |        |        |

## B.3 直流畸变频谱

表B.3 直流（28V）畸变频谱

| 频率设置值 (Hz) | 幅值设置值 (V) | 幅值实测值 (V) |
|------------|-----------|-----------|
| 10         |           |           |
| 100        |           |           |
| 1000       |           |           |
| 5000       |           |           |
| 50000      |           |           |

表B.4 直流（270V）畸变频谱

| 频率设置值 (Hz) | 幅值设置值 (V) | 幅值实测值 (V) |
|------------|-----------|-----------|
| 10         |           |           |
| 100        |           |           |
| 1000       |           |           |
| 5000       |           |           |
| 50000      |           |           |

## B.4 脉动幅值

表B.5 脉动幅值

| 脉动信号 | 电压  |     |     |
|------|-----|-----|-----|
|      | 设置值 | 实测值 |     |
|      |     | 最大值 | 最小值 |
| A    | \   |     |     |
| 脉动幅值 |     |     |     |
| B    | \   |     |     |
| 脉动幅值 |     |     |     |

## B.5 直流电压瞬变

表B.6 直流电压瞬变

| 瞬变电压   |        | 瞬变电压持续时间 |         | 稳态电压到瞬变电压变化时间 |         | 瞬变电压到稳态电压变化时间 |         |
|--------|--------|----------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
| 设置值(V) | 实测值(V) | 设置值(ms)  | 设置值(ms) | 实测值(ms)       | 实测值(ms) | 实测值(ms)       | 实测值(ms) |
|        |        |          |         |               |         |               |         |
|        |        |          |         |               |         |               |         |
|        |        |          |         |               |         |               |         |
|        |        |          |         |               |         |               |         |

## B.6 直流电压中断

表B.7 直流电压中断

| 电压中断持续时间 |         | 电压中断变化时间 |          |
|----------|---------|----------|----------|
| 设置值(ms)  | 实测值(ms) | 上升时间(ms) | 下降时间(ms) |
|          |         |          |          |
|          |         |          |          |
|          |         |          |          |
|          |         |          |          |

## 附录 C

## 主要校准项目的测量不确定度评定示例

## C.1 概述

本附录依据 JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》的规定，对直流机载电源特性模拟器稳态直流电压示值误差、直流电压畸变频谱、直流电压脉动、直流瞬变电压持续时间等校准项目进行测量不确定度评定。

## C.2 稳态直流电压的不确定度评定

## C.2.1 测量模型

测量方法为标准表法，即由直流机载电源特性模拟器输出稳态直流电压到直流数字电压表（测量用标准设备），读取稳定的读数，从而得到直流机载电源特性模拟器稳态直流电压的示值误差。

其测量模型为：

$$\Delta = V_S - V_X$$

式中：

$\Delta$ ——被校直流机载电源特性模拟器的稳态直流电压示值误差，单位V；

$V_X$ ——校准装置相应测量结果参考值，单位V；

$V_S$ ——直流机载电源特性模拟器的设定值，单位V。

因各输入量不相关，则其不确定度传播可用以下公式表示：

$$u^2_c(\Delta) = C_1^2 u^2(V_X) + C_2^2 u^2(V_S)$$

式中：

$u_c(\Delta)$ ——为被校直流机载电源特性模拟器的稳态直流电压示值误差合成标准不确定度，单位 V；

$u(V_X)$ ——校准装置引入的标准不确定度，单位 V；

$u(V_S)$ ——被校直流机载电源特性模拟器引入的标准不确定度，单位 V；

灵敏度系数  $C_1 = -1$ ， $C_2 = 1$ 。

## C.2.2 测量不确定度来源

C.2.2.1 由校准装置引入的不确定度  $u(V_X)$ 

直流数字电压表的直流电压测量误差引入的不确定度  $u_1(V_X)$ 。

C.2.2.2 由被校直流机载电源特性模拟器引入的不确定度  $u(V_S)$  的来源

- 被校直流机载电源特性模拟器分辨力引入的标准不确定度分量  $u_2(V_S)$ ；
- 被校直流机载电源特性模拟器测量重复性引入的标准不确定度分量  $u_3(V_S)$ 。

注： $u(V_S)$ 取  $u_2(V_S)$ 和  $u_3(V_S)$ 中的最大值。

## C.2.3 测量不确定度评定

以直流机载电源特性模拟器稳态电压输出 28V 为例,使用直流数字电压表测量稳态直流电压。

C.2.3.1 校准装置引入的不确定度 $u(V_X)$ :

直流数字电压表的直流电压测量误差引入的不确定度 $u_1(V_X)$

根据溯源证书,直流数字电压表直流电压测量 28V 直流电压时的为 0.01V,由此引入的不确定度按 B 类评定。服从均匀分布,包含因子 $k = \sqrt{3}$ ,则直流数字电压表电压测量示值分辨力引入不确定度:

$$u_1(V_X) = \frac{0.01V}{\sqrt{3}} \approx 0.006V$$

C.2.3.2 被校直流机载电源特性模拟器的不确定度 $u(V_S)$ 评定如下:1) 被校直流机载电源特性模拟器分辨力引入的不确定度 $u_2(V_S)$ 

被校直流机载电源特性模拟器在设定为 28V 输出时的分辨力为 0.01V,由此引入的不确定度按 B 类评定,设概率分布为均匀分布,则:

$$u_2(V_S) = \frac{0.01V}{2\sqrt{3}} \approx 0.003V$$

2) 被校直流机载电源特性模拟器测量重复性引入的不确定度 $u_3(V_S)$ 

在重复性测量条件下,得到一系列数据如下表所示。

表 C.1 稳态直流电压重复性测量数据

| 第 i 次测量   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 测量值<br>/V | 28.01 | 28.01 | 28.00 | 28.01 | 28.02 | 28.00 | 28.01 | 28.01 | 28.00 | 28.01 |

用单次测量值作为校准结果时,被校直流机载电源特性模拟器稳态直流电压测量重复性引入的不确定度用贝塞尔公式按 A 类评定为:

$$u_3(V_S) = s(V_S) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{10} (V_{Si} - \overline{V_S})^2} = 0.006V$$

式中:

$V_{Si}$ ——为稳态直流电压第 i 次测量值;

$\overline{V_S}$ ——为稳态直流电压多次测量值的平均值。

## C.2.4 标准不确定度分量表

表 C.2 标准不确定度分量表

| 不确定度分量     | 不确定度来源               | 评定方法 | 分布 | 包含因子       | 标准不确定度分量 | 灵敏系数 |
|------------|----------------------|------|----|------------|----------|------|
| $u_1(V_X)$ | 直流数字电压表电压测量误差引入      | B    | 均匀 | $\sqrt{3}$ | 0.006V   | -1   |
| $u_2(V_S)$ | 被校直流机载电源特性模拟器分辨力引入   | B    | 均匀 | $\sqrt{3}$ | 0.003V   | 1    |
| $u_3(V_X)$ | 被校直流机载电源特性模拟器测量重复性引入 | A    | 正态 |            | 0.006V   | 1    |

C.2.5 合成标准不确定度 $u_c$ 

由于被校直流机载电源特性模拟器的分辨力和测量重复性存在重复，在合成标准不确定度将二者中较小值舍去。 $u(V_S)$ 和 $u(V_X)$ 不相关，则合成标准不确定度 $u_c(\Delta)$ 为：

$$u_c(\Delta) = \sqrt{u^2(V_X) + u^2(V_S)} = \sqrt{u_1^2(V_X) + u_3^2(V_S)} \approx 0.009V$$

C.2.6 扩展不确定度 $U$ 

取  $k=2$ ，则扩展不确定度 $U(\Delta)$ 为：

$$U(\Delta) = k \times u_c(\Delta) = 2 \times 0.009V = 0.018V$$

## C.3 直流畸变频谱不确定度评定

以直流机载电源特性模拟器输出 28V 直流电压，叠加 1000Hz 畸变频谱（畸变幅值 1.0V）校准为例。

## C.3.1 不确定度来源分析

使用功率分析仪校准直流畸变频谱的不确定度来源有：功率分析仪测量直流畸变幅值的测量误差引入不确定度 $u_f$ 、直流机载电源特性模拟器测量重复性引入不确定度 $u_2$ 。

C.3.2 直流畸变幅值测量误差引入不确定度 $u_f$ 

直流畸变频谱输出信号经过功率分析仪采集，再经过傅里叶变换算法处理得到标准值。因此，不确定度来源主要为功率分析仪的电压测量示值误差和算法对数据进行处理时产生的误差，二者相互独立可得：

$$u_f = \sqrt{u_{f1}^2 + u_{f2}^2}$$

1) 功率分析仪测量不准确引入的不确定度分量 $u_{f1}$ 

功率分析仪 30V 量程 1000Hz 的电压测量误差为 $\pm(0.1\% \text{读数} + 0.05\% \text{量程})$ ，符合均匀分布。则功率分析仪测量不准确引入的不确定度分量 $u_{f1}$ 为：

$$u_{f1} = \frac{0.1\% \times 1V + 0.05\% \times 30V}{\sqrt{3}} \approx 0.009V$$

2) 数据被加窗截断时引入的不确定度 $u_{f2}$

在进行 FFT 算法处理数据时，主要的不确定度来源是对时域信号加窗截断时所产生。窗函数的频谱分为主瓣和旁瓣，主瓣是我们需要的信号，旁瓣对应泄露到无用频带中的信号的能量，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。不同的窗函数产生的误差大小不同，布莱克曼窗函数由于其主瓣较宽，主瓣幅度与第一旁瓣幅度相差达 57.8dB，所以截断时域信号时的泄露能量更少，加窗过程中产生的误差较少。

根据布莱克曼窗函数的性质，其产生影响的旁瓣幅值  $V_Y$  为主瓣幅值  $V_X$  存在以下关系：

$$V_Y = 0.004V_X$$

加窗时产生的频谱泄露造成的误差符合均匀分布，按均匀分布计算频谱泄露造成的不确定度贡献，则

$$u_{f2} = \frac{V_Y}{\sqrt{3}}。$$

功率分析仪对叠加了 1000Hz（畸变幅值 1.0V）畸变频谱信号的直流信号进行采集，采样率为 1MS/s，采样时间设为 1s。对采集数据加布莱克曼窗并作 FFT 运算得到信号幅值为 0.966V。

$$u_{f2} = \frac{0.004 \times 0.966V}{\sqrt{3}} \approx 0.002V$$

合成不确定度

$$u_f = \sqrt{u_{f1}^2 + u_{f2}^2} \approx 0.009V$$

### C.3.3 测量值重复性引入的不确定度分量 $u_2$

在重复性测量条件下，得到一系列数据如下表所示。

表 C.3 直流畸变幅值重复性测量数据

| 第 i 次测量   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 测量值<br>/V | 0.966 | 0.964 | 0.965 | 0.967 | 0.967 | 0.965 | 0.966 | 0.965 | 0.966 | 0.967 |

用单次测量值作为校准结果时，被校直流机载电源特性模拟器直流畸变幅值测量重复性引入的不确定度用贝塞尔公式按 A 类评定为：

$$u_2 = s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{10} (X_{Si} - \bar{X}_S)^2} = 0.001V$$

式中：

$X_{Si}$ ——为直流畸变电压幅值第 i 次测量值；

$\bar{X}_S$ ——为直流畸变电压幅值多次测量值的平均值。

## C.3.4 合成标准不确定度

不确定度分量互不相关，合成标准不确定度约为

$$u_c = \sqrt{u_f^2 + u_2^2} \approx 0.009V$$

## C.3.5 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度为

$$U = ku_c = 0.018V$$

## C.4 脉动幅值不确定度评定

以直流机载电源特性模拟器输出 270V 直流电压，脉动输出设置为条件 A（脉动幅值标称值为 3.76V）的校准为例。

## C.4.1 不确定度来源分析

使用功率分析仪校准直流机载电源特性模拟器脉动幅值的不确定度来源有功率分析仪测量误差引入不确定度 $u_1$ 、被校直流机载电源特性模拟器测量重复性引入不确定度 $u_2$ 、被校直流机载电源特性模拟器脉动电压分辨力引入不确定度 $u_3$ 。

C.4.2 功率分析仪测量误差引入的不确定度分量 $u_1$ 

功率分析仪脉动幅值时需要测量直流机载电源特性模拟器输出电压的最大值和最小值。功率分析仪在 300V 量程的测量误差为 $\pm (0.1\% \text{读数} + 0.05\% \text{量程})$ ，符合均匀分布。由于直流机载电源特性模拟器输出电压的最大值和最小值是由功率分析仪同时测得，两者引入的测量不确定度完全相关，则功率分析仪测量误差引入的不确定度分量 $u_1$ 为：

$$u_1 = \frac{0.1\% \times 3.76V}{\sqrt{3}} \approx 0.004V$$

C.4.3 被校直流机载电源特性模拟器脉动幅值测量重复性引入的不确定度分量 $u_2$ 

表 C.4 脉动幅值重复性测试数据

| 第 i 次<br>测量 | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 测量值<br>/V   | 3.76 | 3.77 | 3.76 | 3.76 | 3.75 | 3.76 | 3.75 | 3.74 | 3.75 | 3.76 |

用单次测量值作为校准结果时，被校直流机载电源特性模拟器脉动幅值测量重复性引入的不确定度按 A 类评定，用贝塞尔公式计算标准偏差为：

$$u_2 = s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 0.008V$$

$x_i$ ——为脉动幅值第 i 次测量值；

$\bar{x}$ ——为脉动幅值多次测量值的平均值。

C.4.4 被校直流机载电源特性模拟器分辨力引入不确定度分量 $u_3$ 

被校直流机载电源特性模拟器脉动电压分辨力为 0.01V，由此引入的不确定度按 B 类

评定。服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则直流机载电源特性模拟器分辨力引入不确定度：

$$u_3 = \frac{0.01V}{2\sqrt{3}} = 0.003V$$

#### C.4.5 合成标准不确定度

由于被校直流机载电源特性模拟器的分辨力和测量重复性存在重复，在合成标准不确定度将二者中较小值舍去。不确定度分量互不相关，合成标准不确定度约为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \approx 0.009V$$

#### C.4.6 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ ，则扩展不确定度为

$$U = ku_c \approx 0.018V$$

### C.5 直流瞬变电压持续时间不确定度评定

以直流机载电源特性模拟器输出 28V 直流电压，在 28V 稳定后，输出 22V 瞬变电压持续 20ms，然后回到 28V 稳态电压为例，使用数字示波器校准瞬变电压持续时间。

#### C.5.1 不确定度来源分析

不确定度来源有测量重复性引入的不确定度分量、人员读数不准引入的不确定度分量、示波器时间测量误差引入的不确定度分量。

#### C.5.2 被校直流机载电源特性模拟器瞬变电压持续时间重复性引入的不确定度分量 $u_1$

表 C.5 瞬变电压持续时间重复性测试数据

| 第 i 次测量   | 1      | 2      | 3      |
|-----------|--------|--------|--------|
| 持续时间 (ms) | 20.010 | 20.015 | 19.998 |

校准时取最大值作为测量结果，校准结果分散性大，试验标准偏差采用极差法计算；测量值重复性引入的不确定度分量为：

$$u_1 = \frac{20.015ms - 19.998ms}{1.69} \approx 0.01ms$$

相对不确定度分量 $u_1$

$$u_1 = \frac{0.01ms}{20ms} \times 100\% = 0.05\%$$

#### C.5.3 人员读数不准引入不确定度分量 $u_2$

在持续时间测量中，人员须在示波器图中分辨瞬变电压持续时间的起始点和终止点。测量 20ms 持续时间时，示波器的偏转因数在 5ms/div，人员可分辨每格的 2%，人员确定瞬变电压持续时间起始点的不确定度 $u_{21}$ 和终止点的不确定度 $u_{22}$ 按 B 类评定，服从均匀分布，区间半宽度皆为 0.05ms，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则：

$$u_{21} = u_{22} = \frac{0.05ms}{\sqrt{3}} = 0.028ms$$

人员读数不准引入不确定度分量

$$u_2 = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} = 0.040\text{ms}$$

相对不确定度分量 $u_2$

$$u_2 = \frac{0.040\text{ms}}{20\text{ms}} \times 100\% = 0.20\%$$

#### C.5.4 示波器时间测量误差引入的不确定度分量 $u_3$

由示波器的校准溯源证书中时间测量不确定度 $U_{rel}=0.3\%$ ,  $k=2$ , 则不确定度分量:

$$u_3 = 0.15\%$$

#### C.5.5 合成标准不确定度

由于测量重复性包含了人员在确定瞬变电压持续时间的起始点、终止点时引入的误差, 在合成标准不确定度将测量重复性引入的不确定度分量 $u_1$ , 人员读数误差引入的不确定度分量 $u_2$ 二者中较小值舍去。 $u_2$ 、 $u_3$ 互不相关, 合成标准不确定度约为

$$u_c = \sqrt{u_2^2 + u_3^2} = 0.25\%$$

#### C.5.6 扩展不确定度

取包含因子 $k = 2$ , 则扩展不确定度为

$$U_{rel} = ku_c = 2 \times 0.25\% = 0.5\% (k = 2)$$

