



# 中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1462—2014

---

## 直流电子负载校准规范

Calibration Specification for DC Electronic Loads



2014-04-21 发布

2014-07-21 实施

---

国家质量监督检验检疫总局 发布

# 直流电子负载校准规范

Calibration Specification for DC Electronic Loads

JJF 1462—2014

归口单位：全国电磁计量技术委员会

主要起草单位：广东省计量科学研究院东莞计量院

广东省计量科学研究院

参加起草单位：中茂电子（深圳）有限公司

上海兰斯汀仪表研究所

本规范委托全国电磁计量技术委员会负责解释

**本规范主要起草人：**

李春龙（广东省计量科学研究院东莞计量院）

叶峻江（广东省计量科学研究院东莞计量院）

吴海益（广东省计量科学研究院）

**参加起草人：**

周晏加（中茂电子（深圳）有限公司）

田世维（中茂电子（深圳）有限公司）

朱庆发（上海兰斯汀仪表研究所）

何洪波（广东省计量科学研究院东莞计量院）



## 目 录

引言 .....	( III )
1 范围 .....	( 1 )
2 引用文件 .....	( 1 )
3 术语和计量单位 .....	( 1 )
3.1 直流电子负载 .....	( 1 )
3.2 恒定电流模式 .....	( 1 )
3.3 恒定电流模式负载调整率 .....	( 1 )
3.4 恒定电阻模式 .....	( 1 )
3.5 恒定电压模式 .....	( 1 )
3.6 恒定电压模式负载调整率 .....	( 2 )
3.7 恒定功率模式 .....	( 2 )
3.8 动态（电流）负载模式 .....	( 2 )
3.9 电流上升速率 .....	( 2 )
3.10 电流下降速率 .....	( 2 )
3.11 动态电流加载时间 .....	( 2 )
3.12 动态电流卸载时间 .....	( 2 )
3.13 输入电阻 .....	( 2 )
3.14 短路电阻 .....	( 2 )
3.15 最低工作电压 .....	( 2 )
4 概述 .....	( 2 )
5 计量特性 .....	( 3 )
5.1 直流电压 .....	( 3 )
5.2 恒定电压 .....	( 3 )
5.3 直流电流 .....	( 3 )
5.4 恒定电流 .....	( 3 )
5.5 恒定电阻 .....	( 3 )
5.6 直流功率 .....	( 3 )
5.7 恒定功率 .....	( 3 )
5.8 动态电流上升速率与下降速率 .....	( 4 )
5.9 动态电流加载时间与卸载时间 .....	( 4 )
5.10 恒定电流模式的电流稳定度 .....	( 4 )
5.11 恒定电压模式或恒定电流模式的负载调整率 .....	( 4 )
5.12 短路电阻 .....	( 4 )
5.13 输入电阻 .....	( 4 )
5.14 最低工作电压 .....	( 4 )

---

6	校准条件	(4)
6.1	环境条件	(4)
6.2	测量标准及其他设备	(4)
7	校准项目和校准方法	(5)
7.1	校准项目	(5)
7.2	校准方法	(5)
8	校准结果表达	(13)
8.1	校准证书	(13)
8.2	数据修约	(13)
9	复校时间间隔	(13)
附录 A	测量不确定度评定示例	(14)
附录 B	校准原始记录格式	(16)
附录 C	校准证书内页格式	(19)



## 引 言

本规范依据国家计量技术规范 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》编制。与 JJF 1001《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本校准规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。





# 直流电子负载校准规范

## 1 范围

本规范适用于直流电子负载校准，具有直流电子负载功能的电源测试系统或电池测试系统相应项目的校准也可以参照本规范，本规范不适用于交流电子负载的校准。

## 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 315—1983 直流数字电压表（试行）

JJG 598—1989 直流数字电流表（试行）

GB/T 13978—2008 数字多用表

GB/T 14714—2008 微小型计算机系统设备用开关电源通用规范

GB/T 17478—2004 低压直流电源设备的性能特性

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

## 3 术语和计量单位

下列术语和定义适应于本规范。

### 3.1 直流电子负载 DC electronic load

由电子功率器件组成用以吸收由另一器件或电力系统供应的直流功率的设备。

注：大部分直流电子负载能模拟用电设备的四种用电模式，包括恒定电流模式、恒定电压模式、恒定电阻模式和恒定功率模式，或通过程序控制对四种模式进行动态组合。大部分直流电子负载在工作时可具备电压测量、电流测量、功率测量功能。

### 3.2 恒定电流模式 constant current mode (CC)

直流电子负载吸收恒定电流的工作模式。在此模式下，无论输入电压是否改变，直流电子负载按电流设定值吸收恒定的电流。

### 3.3 恒定电流模式负载调整率 CC mode regulation

当输入电压在允许的范围变化时，直流电子负载恒定电流设定值保持在控制极限内的能力。

### 3.4 恒定电阻模式 constant resistance mode (CR)

直流电子负载模拟为电阻的工作模式。在此模式下，电流服从欧姆定律随着输入电压的改变而改变，直流电子负载输入端口被等效为一个恒定的电阻。

### 3.5 恒定电压模式 constant voltage mode (CV)

直流电子负载吸收恒定电压的工作模式。在此模式下，直流电子负载将调节吸收的电流使输入端口电压维持在恒定电压设定值上。

### 3.6 恒定电压模式负载调整率 CV mode regulation

当输入电流在规定的范围变化时，直流电子负载恒定电压设定值保持在控制极限内的能力。

### 3.7 恒定功率模式 constant power mode (CP)

直流电子负载吸收恒定功率的工作模式。在此模式下，直流电子负载将调节吸收的电流，使功率维持在恒定功率设定值上。

### 3.8 动态（电流）负载模式 dynamic load mode

直流电子负载动态工作于两种不同恒定电流间的工作模式。在此模式下，直流电子负载控制电流按规定的速率和时间在两种负载电流间进行反复切换（见图1）。

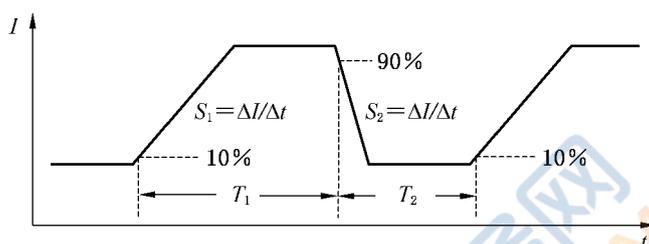


图1 动态（电流）负载模式示意图

### 3.9 电流上升速率 ( $S_1$ ) current rise slew rate

电流由设定值的10%上升到90%的斜率。

### 3.10 电流下降速率 ( $S_2$ ) current fall slew rate

电流由设定值的90%下降到10%的斜率。

### 3.11 动态电流加载时间 ( $T_1$ ) dynamic current load time

直流电子负载工作于动态电流模式时电流由低变高并保持稳态至结束的时间。

### 3.12 动态电流卸载时间 ( $T_2$ ) dynamic current unload time

直流电子负载工作于动态电流模式时电流由高变低并保持稳态至结束的时间。

### 3.13 输入电阻 input resistance

直流电子负载在空载 (load off) 或恒定电流设定值为零时端口的电阻。

### 3.14 短路电阻 short circuit resistance

直流电子负载在模拟短路状态时 (short on) 端口的电阻。

注：直流电子负载短路电阻与工作电流有关，通常给出典型值或最大值。

### 3.15 最低工作电压 low voltage operation

给定电流值下，电子负载可正常工作的最低电压。

注：直流电子负载可正常工作的最低电压与其输入电流大小有关，通常指最大电流下的最低工作电压。

## 4 概述

直流电子负载能模拟直流设备的不同用电状态，从而测量各种直流设备的电源性能。电子负载内部功能控制电路控制电子功率器件的功耗，吸收并消耗被测电源的电能起到负载的作用。通过直流电子负载的功能控制电路，能模拟直流电源的恒定电流、恒定电压、恒定功率、恒定电阻的工作状态。模拟负载的同时提供直流电压、直流电流和

直流功率测量功能。直流电子负载是测量直流电源的常用设备。其结构原理如图 2 所示。

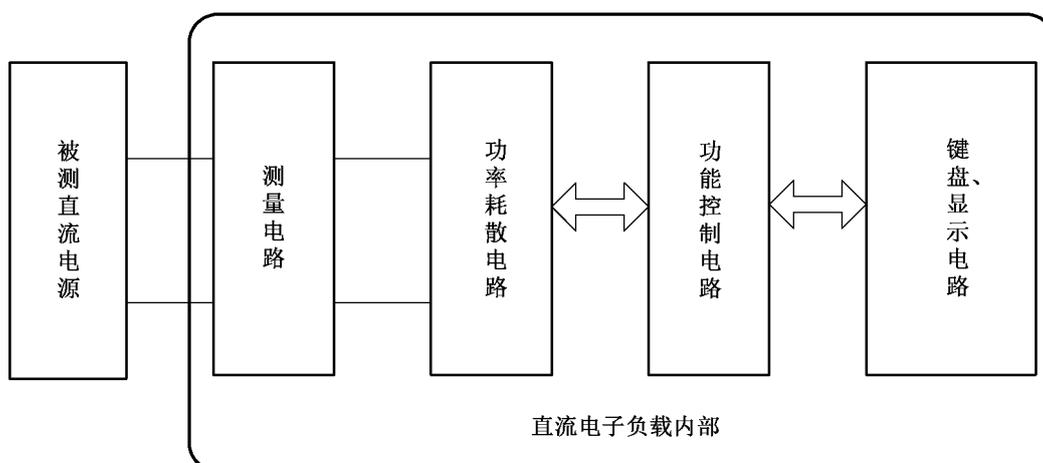


图 2 直流电子负载结构框图

## 5 计量特性

直流电子负载不同的量程允许有不同的准确度等级，其准确度等级与最大允许误差一般可以由表 1 给出。

表 1 直流电子负载准确度等级与最大允许误差

准确度级别	0.01 级	0.02 级	0.05 级	0.1 级	0.2 级
最大允许误差	$\pm 0.01\%$	$\pm 0.02\%$	$\pm 0.05\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.2\%$
准确度级别	0.5 级	1 级	2 级	5 级	10 级
最大允许误差	$\pm 0.5\%$	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	$\pm 5\%$	$\pm 10\%$

### 5.1 直流电压

直流电压显示范围： $(0.1 \sim 1\ 000)$  V，其准确度等级与最大允许误差见表 1。

### 5.2 恒定电压

恒定电压设定值范围： $(0.1 \sim 1\ 000)$  V，其准确度等级与最大允许误差见表 1。

### 5.3 直流电流

直流电流显示范围： $1\ \text{mA} \sim 1\ 000\ \text{A}$ ，其准确度等级与最大允许误差见表 1。

### 5.4 恒定电流

恒定电流设定值范围： $1\ \text{mA} \sim 1\ 000\ \text{A}$ ，其准确度等级与最大允许误差见表 1。

### 5.5 恒定电阻

恒定电阻设定值范围： $0.1\ \Omega \sim 100\ \text{k}\Omega$ ，其准确度等级与最大允许误差见表 1。

### 5.6 直流功率

直流功率显示范围： $1\ \text{mW} \sim 30\ \text{kW}$ ，其准确度等级与最大允许误差见表 1。

### 5.7 恒定功率

恒定功率设定值范围： $1\ \text{mW} \sim 30\ \text{kW}$ ，其准确度等级与最大允许误差见表 1。

### 5.8 动态电流上升速率与下降速率

动态电流上升速率 ( $S_1$ ) 与下降速率 ( $S_2$ ) 设定值范围:  $0.1 \text{ mA}/\mu\text{s} \sim 10 \text{ A}/\mu\text{s}$ , 其误差不大于被校仪器技术说明给出的值。

### 5.9 动态电流加载时间与卸载时间

动态电流加载时间 ( $T_1$ ) 与卸载时间 ( $T_2$ ) 设定值范围:  $10 \mu\text{s} \sim 10 \text{ s}$ , 其误差不大于被校仪器技术说明给出的值。

### 5.10 恒定电流模式的电流稳定度

直流电子负载工作于恒定电流模式时, 保持周围环境条件不变, 直流电子负载恒定电流模式的设定值不作任何调整, 在规定时间间隔  $300 \text{ s}$  内, 其电流最大变化量一般不超其最大允许误差。

### 5.11 恒定电压模式或恒定电流模式的负载调整率

恒定电流模式或恒定电压模式的负载调整率一般不超过设定值的最大允许误差。

### 5.12 短路电阻

短路电阻不大于被校仪器技术说明给出的值。

### 5.13 输入电阻

输入电阻不小于被校仪器技术说明给出的值。

### 5.14 最低工作电压

最低工作电压不大于被校仪器技术说明给出的值。

注: 具体计量特性参照被校直流电子负载的技术要求。以上要求不是用于合格性判别, 仅供参考。

## 6 校准条件

### 6.1 环境条件

环境温度:  $15 \text{ }^\circ\text{C} \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

环境相对湿度:  $30\% \sim 75\%$ 。

电源电压:  $(220 \pm 22) \text{ V}$ 。

电源频率  $(50 \pm 1) \text{ Hz}$ 。

环境周围无影响仪器正常工作的干扰和机械振动及其他影响量。

被检电子负载散热口周边留有  $0.5 \text{ m}$  空间, 或说明书规定值。

### 6.2 测量标准及其他设备

标准设备扩展不确定度 ( $k = 2$ ) 应小于直流电子负载最大允许误差的  $1/3$ , 分辨力应小于直流电子负载最大允许误差的  $1/5 \sim 1/10$ 。可使用稳流稳压电源或二次电池作为测量用电源, 其容量应大于被校准电子负载的  $100\%$ 。测量动态特性的测量系统上升时间应小于被校电子负载动态特性上升时间的  $1/3$  以上。根据采用的校准方法, 选择以下可以满足校准要求的标准设备。

- a) 数字多用表;
- b) 直流电源 (带稳压稳流功能);
- c) 直流电流电压转换器;

- d) 直流标准电压源；
- e) 直流标准电流源；
- f) 四端标准电阻器（按电流要求选择合适的阻值）；
- g) 交直流电流分流器或交直流电流探头；
- h) 多量程电流表；
- i) 数字示波器（带宽 100 MHz 以上）。

## 7 校准项目和校准方法

### 7.1 校准项目

直流电子负载校准项目见表 2。实验室应根据客户要求，选择校准其中的项目。

表 2 直流电子负载校准项目一览表

序号	项目名称	计量特性的条款	校准方法的条款
1	直流电压	5.1	7.2.3.1
2	恒定电压	5.2	7.2.3.2
3	直流电流	5.3	7.2.3.3
4	恒定电流	5.4	7.2.3.4
5	恒定电阻	5.5	7.2.3.5
6	直流功率	5.6	7.2.3.6
7	恒定功率	5.7	7.2.3.7
8	动态电流上升速率与下降速率	5.8	7.2.3.8
9	动态电流加载时间与卸载时间	5.9	7.2.3.9
10	恒定电流模式的电流稳定度	5.10	7.2.3.10
11	恒定电流模式或恒定电压模式的负载调整率	5.11	7.2.3.11
12	短路电阻	5.12	7.2.3.12
13	输入电阻	5.13	7.2.3.13
14	最低工作电压	5.14	7.2.3.14

### 7.2 校准方法

#### 7.2.1 外观

外观检查内容包括：制造厂名或商标、出厂编号、仪器名称、型号；直流电子负载外形结构、外露件是否损坏或脱落，机壳、端钮等是否碰伤或松动现象；转换开关、调节机构是否能正常转动；供电电源电压、频率标志、接地端钮等是否正确。

#### 7.2.2 通电检查

通电后各开关和按键应能正常工作，各种显示应正常，设定的值应与说明书相对应。

#### 7.2.3 校准点选择和校准过程

在规定的条件下，标准设备与被校准仪器经预热、预调或自校准后对各项目进行校准。部分直流电子负载不具备表 2 中的所有项目，校准项目应根据直流电子负载具有的项目进行选择。

校准点的选取：

a) 恒定电压、恒定电流、恒定功率、直流电压、直流电流、直流功率每量程至少选择 3 个校准点，应包含量程的中间点和接近量程上下限点。

b) 恒定电阻，若为定值电阻则每个电阻值均为校准点；若为连续可调的，每量程至少选择 3 个校准点。

c) 对动态特性的校准，动态电流模式电流设定为最大电流量程的 0% 和 100%。

注：为满足客户预期用途，可根据用户要求选择校准点。

### 7.2.3.1 直流电压

#### a) 直流标准电压源法

按图 3 连接，直流电子负载置空载。按校准点调节直流标准电压源输出电压  $V_s$ ，对应直流电子负载显示值为  $V_x$ ，直流电压误差用公式 (1) 计算。

$$\Delta_v = V_x - V_s \quad (1)$$

式中：

$\Delta_v$ ——直流电子负载直流电压误差（或恒定电压设定值误差），V；

$V_x$ ——直流电子负载电压显示值（或恒定电压设定值），V；

$V_s$ ——标准电压值，V。



图 3 直流标准电压源法接线图

#### b) 直流数字电压表法

按图 4 连接，直流电子负载置空载。按校准点调节直流电源电压，直流数字电压表测得标准电压值  $V_s$ ，直流电子负载显示值为  $V_x$ 。直流电子负载直流电压误差用公式 (1) 计算。

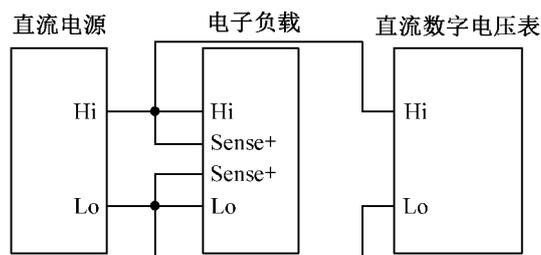


图 4 直流数字电压表法接线图

注：带有远程电压测试端子（Vsense）的电子负载应与远程电压端子并联进行校准。

## 7.2.3.2 恒定电压

按图 4 连接，电子负载置恒定电压模式并加载。调节直流电源电压为直流电子负载电压量程的上限，以避免电子负载过载。从零开始调节直流电源的电流，使直流电子负载吸收的功率接近该量程满功率的 10%。直流数字电压表测得直流电子负载端口标准电压值  $V_s$ ，直流电子负载恒定电压设定值为  $V_x$ 。直流电子负载恒定电压设定值误差用公式 (1) 计算。

## 7.2.3.3 直流电流

## a) 直接比较法

直流电子负载置恒定电流模式，按图 5 连接。调节直流电源电流为直流电子负载电流量程的上限，以避免电子负载过载。从零开始调节直流电源的电压，使直流电子负载吸收的功率接近该量程满功率的 10% 或略高于最低工作电压进行校准。直流数字电流表测得输入电流标准值  $I_s$ ，对应直流电子负载电流显示值  $I_x$ ，直流电子负载电流显示值误差按公式 (2) 计算。

$$\Delta_I = I_x - I_s \quad (2)$$

式中：

$\Delta_I$ ——直流电子负载直流电流显示值误差（或恒定电流设定值误差），A；

$I_x$ ——直流电子负载直流电流显示值（或恒定电流设定值），A；

$I_s$ ——电流标准值，A。



图 5 电流测量接线图

## b) 直流电流/电压转换器法

直流电子负载置恒定电流模式，按图 6 连接直流电流/电压转换器接至直流电子负载和直流电源。从零开始调节直流电源的电压，使直流电子负载吸收的功率接近该量程满功率的 10% 或略高于最低工作电压进行校准。电子负载电流显示值  $I_x$ ，数字直流电压表测得直流电流/电压转换器电压端的电压标准值  $V_s$ ，电流标准值按直流电流/电压转换器比例系数  $K$  计算： $I_s = KV_s$ ，直流电子负载电流显示值误差用公式 (2) 计算。

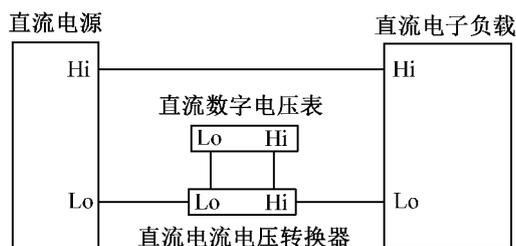


图 6 直流电流/电压转换器法接线图

## c) 标准电阻器法

直流电子负载置恒定电流模式，按图 7 连接直流数字电压表、四端标准电阻器、直流电子负载和直流电源，根据被校直流电流值选择合适阻值的四端标准电阻器。从零开始调节直流电源的电压，使直流电子负载吸收的功率接近该量程满功率的 10% 或略高于最低工作电压进行校准。电阻标准值为  $R_s$ ，用直流数字电压表测量标准电阻器电位端的电压值  $V_s$ ，电流标准值按  $I_s = V_s / R_s$  计算，电子负载电流显示值  $I_x$ ，直流电子负载直流电流显示值误差用公式 (2) 计算。

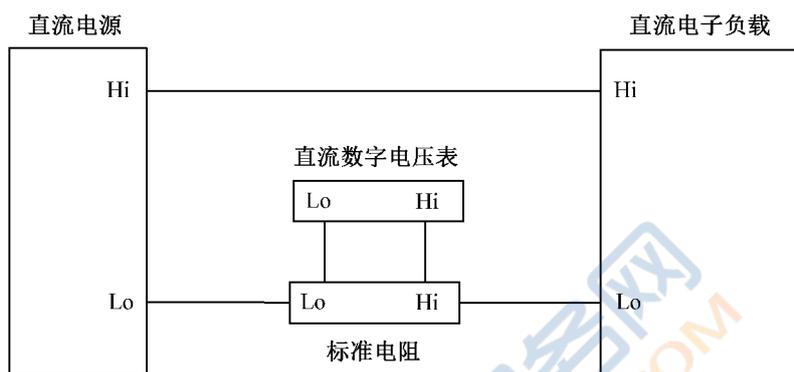


图 7 标准电阻器法接线图

## d) 直流标准电流源法

电子负载设为短路并加载，按图 8 连接。按校准点调节直流标准电流源输出电流标准值  $I_s$ ，对应电子负载电流显示值  $I_x$ ，则电流显示值误差用公式 (2) 计算。

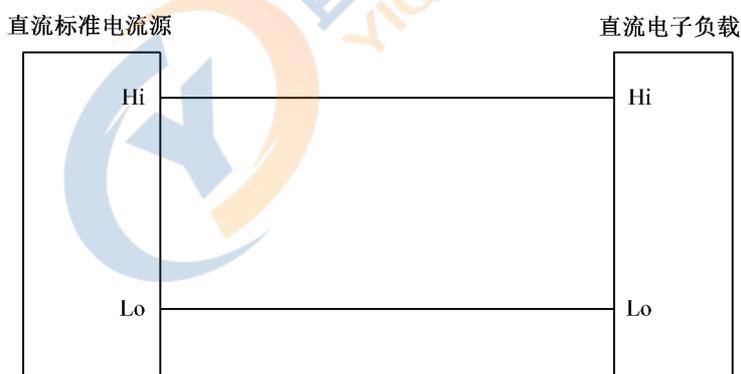


图 8 标准电流源法接线图

## 7.2.3.4 恒定电流

## a) 直接比较法

置直流电子负载为恒定电流模式并加载，按图 5 连接。从零开始调节直流电源的电压，使直流电子负载吸收的功率接近该量程满功率的 10% 或略高于最低工作电压进行校准。直流数字电流表测得输入电流标准值  $I_s$ ，恒定电流设定值为  $I_x$ ，直流电子负载恒定电流设定值误差按公式 (2) 计算。

## b) 直流电流/电压转换器法

置直流电子负载为恒定电流模式并加载，按图 6 连接。从零开始调节直流电源的电压，使直流电子负载吸收的功率接近该量程满功率的 10% 或略高于最低工作电压进行

校准。直流数字电压表测得电压标准值  $V_s$ 。电流标准值按直流电流/电压转换器比例系数  $K$  计算： $I_s = KV_s$ ，电子负载恒定电流设定值  $I_x$ 。直流电子负载恒定电流设定值误差按公式（2）计算。

#### c) 标准电阻器法

置直流电子负载为恒定电流模式并加载。按图 7 连接直流数字电压表、四端标准电阻器、直流电子负载和直流电源，根据被校直流电流值选择合适阻值的四端标准电阻器。从零开始调节直流电源的电压，使直流电子负载吸收的功率接近该量程满功率的 10% 或略高于最低工作电压进行校准。电阻标准值为  $R_s$ ，直流数字电压表测得标准电阻器电位端的电压标准值  $V_s$ ，电流标准值按  $I_s = V_s / R_s$  计算，电子负载电流设定值  $I_x$ ，则直流电子负载恒定电流设定值误差按公式（2）计算。

#### 7.2.3.5 恒定电阻

置直流电子负载为恒定电阻模式，按 7.2.3.2 和 7.2.3.4 连接电源、电子负载、直流数字电压表和电流测量单元，同时测量输入到直流电子负载的电流标准值和电压标准值。从零开始调节直流电源的电压，使直流电子负载吸收的功率接近该量程满功率的 10% 或略高于最低工作电压进行校准。测得电子负载端口的电流标准值  $I_s$  和电压标准值  $V_s$ ，恒定电阻设定值误差用公式（3）计算。

$$\Delta_R = R_x - \frac{V_s}{I_s} \quad (3)$$

式中：

$\Delta_R$ ——恒定电阻设定值误差， $\Omega$ ；

$R_x$ ——恒定电阻设定值， $\Omega$ ；

$I_s$ ——电流标准值，A；

$V_s$ ——电压标准值，V。

注：部分直流电子负载使用电导为计量单位。

#### 7.2.3.6 直流功率

置直流电子负载为恒定功率模式，按 7.2.3.2 和 7.2.3.4 连接电源、电子负载、直流数字电压表和电流测量单元。调整直流电源的电压为直流电子负载预期使用的电压或电压量程的 90%。测得输入到直流电子负载端口的电流值  $I_s$  和电压值  $V_s$ ，则直流功率显示值误差用公式（4）计算。

$$\Delta_P = P_x - V_s \times I_s \quad (4)$$

式中：

$\Delta_P$ ——直流功率显示值（或恒定功率设定值）误差，W；

$P_x$ ——直流功率显示值（或恒定功率设定值），W；

$I_s$ ——直流电流标准值，A；

$V_s$ ——直流电压标准值，V。

#### 7.2.3.7 恒定功率

置直流电子负载为恒定功率模式，按 7.2.3.2 和 7.2.3.4 连接电源、电子负载、直流数字电压表和电流测量单元。调整直流电源的电压为直流电子负载预期使用的电压或

电压量程的 90%。测得输入到直流电子负载端口的电流标准值  $I_s$  和电压标准值  $V_s$ ，则恒定功率设定值误差用公式 (4) 计算。

### 7.2.3.8 动态电流上升速率 ( $S_1$ ) 和下降速率 ( $S_2$ )

置直流电子负载为动态电流负载模式，按图 9 连接。卸载电流值  $I_{low}$  设为电流量程的 0%，加载电流值  $I_{high}$  设为电流量程的 100%，适当设置加载时间  $T_1$  和卸载时间  $T_2$ 。上升速率  $S_1$  和下降速率  $S_2$  在各量程上选最大值校准。数字示波器连接交直流电流探头或交直流分流器在测试连线的负端线路上测量动态电流波形。示波器读取直流电子负载电流波形由 10% 上升至 90% 的上升时间标准值  $t_1$  和由 90% 下降到 10% 的下降时间标准值  $t_2$ ，按公式 (5) 和公式 (6) 计算动态电流上升速率和下降速率误差。

$$\Delta_{S1} = S_1 - (I_{high} - I_{low}) \times 80\% / t_1 \quad (5)$$

式中：

$\Delta_{S1}$ ——动态电流上升速率误差，A/s；

$S_1$ ——上升速率设定值，A/s；

$I_{low}$ ——电子负载卸载电流设定值，A；

$I_{high}$ ——电子负载加载电流设定值，A；

$t_1$ ——电流上升时间标准值，s。

$$\Delta_{S2} = S_2 - (I_{high} - I_{low}) \times 80\% / t_2 \quad (6)$$

式中：

$\Delta_{S2}$ ——动态电流下降速率误差，A/s；

$S_2$ ——下降速率设定值，A/s；

$I_{low}$ ——电子负载卸载电流设定值，A；

$I_{high}$ ——电子负载加载电流设定值，A；

$t_2$ ——电流下降时间标准值，s。

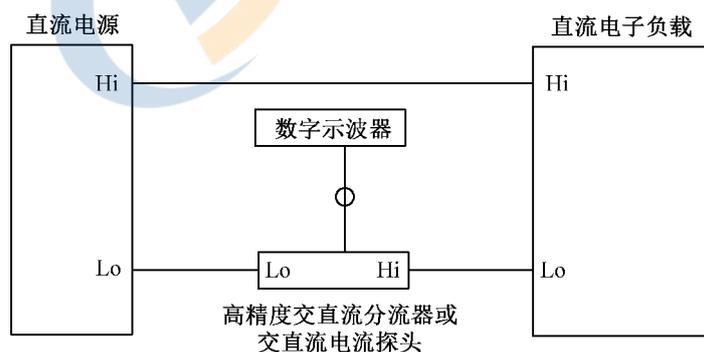


图 9 动态特性接线图

### 7.2.3.9 动态电流加载时间 ( $T_1$ ) 与卸载时间 ( $T_2$ )

置直流电子负载为动态电流负载模式，按图 9 连接。动态电流负载卸载电流值  $I_{low}$  设为电流量程的 0%，加载电流值  $I_{high}$  设为电流量程的 100%。加载时间  $T_1$  和卸载时间  $T_2$  在最小量程的 10% 点校准。数字示波器连接交直流电流探头或交直流分流器在测试连线的负端线路上测量动态电流波形。读取动态电流加载时间标准值  $T_{s1}$  和卸载时间标准值  $T_{s2}$ ，动态电流加载时间和卸载时间误差用公式 (7) 和公式 (8) 计算。

$$\Delta_1 = T_1 - T_{s1} \quad (7)$$

式中：

$\Delta_1$ ——动态电流加载时间误差，s；

$T_1$ ——动态电流加载时间设定值，s；

$T_{s1}$ ——动态电流加载时间标准值，s。

$$\Delta_2 = T_2 - T_{s2} \quad (8)$$

式中：

$\Delta_2$ ——动态电流卸载时间误差，s；

$T_2$ ——动态电流卸载时间设定值，s；

$T_{s2}$ ——动态电流卸载时间标准值，s。

#### 7.2.3.10 恒定电流模式的电流稳定度

置直流电子负载为恒定电流模式，恒定电流设定为最大电流量程的 90%，按 7.2.3.4 连接直流电源、电子负载、电流测量单元，测量电子负载的输入电流。在规定的间隔 300 s 内，每 30 s 记录一次电流的标准值，恒定电流模式的电流稳定度用公式 (9) 计算。

$$s = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_0} \times 100\% \quad (9)$$

式中：

$s$ ——规定时间间隔内恒定电流模式的电流稳定度，%；

$I_{\max}$ ——规定时间间隔内电流标准值的最大值，A；

$I_{\min}$ ——规定时间间隔内电流标准值的最小值，A；

$I_0$ ——直流电子负载恒定电流设定值，A。

#### 7.2.3.11 恒定电压模式或恒定电流模式的负载调整率

##### a) 恒定电压模式负载调整率

置直流电子负载为恒定电压模式，按 7.2.3.2 连接，选最高电压量程（或用户预期使用的量程）进行校准。电子负载恒定电压设定为满量程的 90%，直流电源工作于恒流状态，调节直流电源电流从零增加至电子负载最大允许电流的 90%，直流数字电压表测得电子负载正常工作后端口电压最大值  $V_{\max}$  和最小值  $V_{\min}$ 。恒定电压模式负载调整率用公式 (10) 计算。

$$S_V = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_0} \times 100\% \quad (10)$$

式中：

$S_V$ ——恒定电压模式负载调整率，%；

$V_{\max}$ ——直流电子负载端口电压的最大值，V；

$V_{\min}$ ——直流电子负载端口电压的最小值，V；

$V_0$ ——恒定电压设定值。

##### b) 恒定电流模式负载调整率

置直流电子负载为恒定电流模式，按 7.2.3.4 连接，在最大电流量程（或用户预期

使用的量程) 进行校准。电子负载恒定电流设定为满量程的 90%，直流电源工作于恒压状态，从直流电子负载的最低工作电压增加至电子负载最大允许电压的 90%，电流测量单元测得电子负载正常工作后的电流最大值  $I_{\max}$  和最小值  $I_{\min}$ 。电子负载恒定电流模式负载调整率用公式 (11) 计算。

$$S_1 = \left| \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_0} \right| \times 100\% \quad (11)$$

式中：

$S_1$ ——直流电子负载恒定电流模式负载调整率，%；

$I_{\max}$ ——直流电子负载的电流最大值，A；

$I_{\min}$ ——直流电子负载的电流最小值，A；

$I_0$ ——恒定电流设定值，A。

#### 7.2.3.12 短路电阻

启动直流电子负载的短路功能，按 7.2.3.2 和 7.2.3.4 连接直流电源、电子负载、直流数字电压表和电流测量单元。由零开始调整直流电源的电流至直流电子负载技术说明给出的典型短路电流值，同时测量直流电子负载端口的电流标准值  $I_s$  和电压标准值  $V_s$ ，短路电阻值用公式 (12) 计算。

$$R_x = \frac{V_s}{I_s} \quad (12)$$

式中：

$R_x$ ——短路电阻值， $\Omega$ ；

$V_s$ ——端口电压标准值，V；

$I_s$ ——端口电流标准值，A。

注：部分直流电子负载的技术说明未给出测量短路电阻的短路电流典型值，校准时使用直流电子负载允许使用的最大电流。

#### 7.2.3.13 输入电阻

置直流电子负载为空载或将恒定电流设置为零，按 7.2.3.2 和 7.2.3.4 连接直流电源、电子负载、直流数字电压表和电流测量单元。调整直流电源电压至直流电子负载允许使用的最高电压，同时测量直流电子负载端口的电流标准值  $I_s$  和电压标准值  $V_s$ 。输入电阻值用公式 (13) 计算。

$$R_x = \frac{V_s}{I_s} \quad (13)$$

$R_x$ ——输入电阻值，k $\Omega$ ；

$V_s$ ——电子负载端口的电压标准值，V；

$I_s$ ——电子负载端口的电流标准值，mA。

#### 7.2.3.14 最低工作电压

置电子负载为恒定电流模式并加载，按图 10 连接直流电源、电子负载和直流数字电压表，电子负载恒定电流设定为量程的 100% 或技术说明给出的典型电流。从零开始调节直流电源的电压，观察直流电子负载的电流显示值，当电流显示值达到设定值时记

录其端口电压，该电压为典型电流值下的最低工作电压。

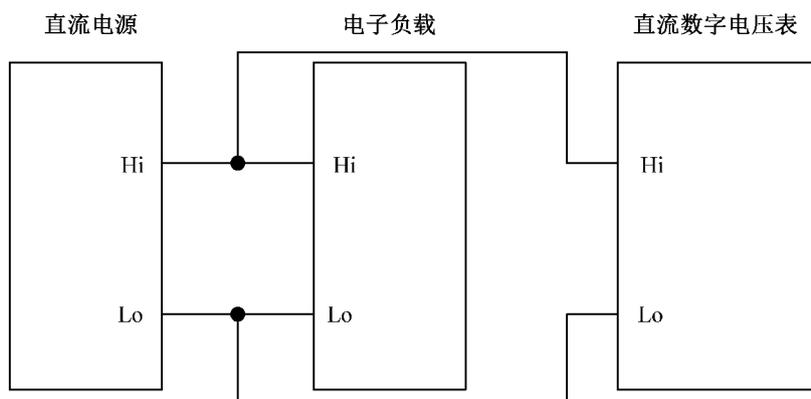


图 10 最低工作电压测试接线图

## 8 校准结果表达

### 8.1 校准证书

校准结果应在校准证书（报告）上反映，校准证书（报告）应至少包括以下信息：

- a) 标题，如“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) 证书或报告的唯一性标识（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) 对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) 校准证书和校准报告签发人的签名、职务或等效标识；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

校准原始记录格式见附录 B，校准证书（报告）内页格式见附录 C。

### 8.2 数据修约

被校准电子负载的误差数据计算后，应采用四舍五入及偶数法则进行修约，末位数修约到被校仪器基本误差极限的 1/10 位。

## 9 复校时间间隔

建议复校时间间隔为 1 年。送校单位也可根据实际使用情况，自主决定复校时间间隔。

## 附录 A

## 测量不确定度评定示例

## 直流电子负载直流电压测量不确定度评定

## A.1 引言

直流电子负载校准的主要指标有 14 项参数，其中直流电压测量是最主要的参数之一。

本附录以直流电压测量值的测量不确定度评定为例，说明直流电子负载校准项目的测量不确定度评定的程序。由于校准方法和所用仪器设备相同或近似，其他项目校准结果的测量不确定度评定也是相同或近似的。

## A.2 直流电压测量不确定度评定

## A.2.1 测量方法

测量原理框图如图 A.1。将直流电子负载设置空载，调节标准电压源，得到直流电子负载直流电压测量值的测量结果与标准值比较，直流电压测量值误差按公式 (A.1) 计算。

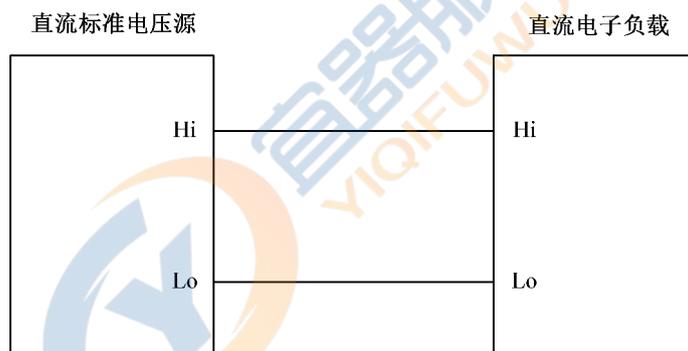


图 A.1 直流电压测量示值校准的接线图

## A.2.2 测量模型

$$\Delta_v = V_x - V_s \quad (\text{A.1})$$

式中：

$\Delta_v$ ——被校直流电子负载电压显示值误差；

$V_x$ ——被校直流电子负载电压显示值；

$V_s$ ——直流标准电压源标准值。

## A.2.3 不确定度来源

a) 被校直流电子负载直流电压读数变化引入的不确定度分量  $u(V_x)$ ；

b) 标准电压源最大允许误差引入的不确定度分量  $u(V_s)$ ；

## A.2.4 标准不确定度评定

a) 被校直流电子负载读数变化引入的标准不确定度  $u(V_x)$

测量读数变化引入的标准不确定度通过多次重复测量进行 A 类评定。用贝塞尔公式 (A.2) 计算实验标准差得到的结果如表 A.1 所示。

$$u(V_x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (V_{xi} - \bar{V})^2}{n-1}} \times 100\% \quad (\text{A.2})$$

式中：

$\bar{V}$ ——被校直流电子负载直流电压测量多次读数值的平均值；

$V_{xi}$ ——被校直流电子负载电压测量示值第  $i$  次读数值。

$n$ ——重复测量的次数，此处  $n=10$ 。

表 A.1 电子负载电压显示值 10 V 重复测量数据

第 $i$ 次测量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
电压示值	10.001	10.001	10.000	10.001	10.001	10.001	10.001	10.001	10.001	10.001

根据表 A.1 中的数据，可由公式 (A.2) 计算出电压测量示值读数变化的实验标准差

$$s(V_x) = 0.316 \text{ mV}$$

校准时取单次测量结果，故测量重复性引入的不确定度为：

$$u(V_x) = s(V_x) = 0.316 \text{ mV}$$

b) 标准电压源最大允许误差引入的标准不确定度分量  $u(V_s)$

按 B 类进行评定。以 10 V 电压值为例，根据某型号多功能校准仪技术指标，其最大允许误差为  $\pm 0.00055 \text{ V}$ ，则分散区间的半宽度为  $a = 0.00055 \text{ V}$ ，估计为均匀分布，包含因子  $k = \sqrt{3}$ ，则多功能校准仪最大允许误差引入的标准不确定度为：

$$u(V_s) = \frac{a}{k} = \frac{0.00055 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 0.318 \text{ mV}$$

#### A.2.5 合成标准不确定度

直流电子负载直流电压测量不确定度来源及数值汇总于表 A.2 中。

表 A.2 不确定度分量一览表

不确定度来源	评定方法	分布	$k$ 值	标准不确定度	灵敏系数
测量读数变化	A 类	正态		0.316 mV	1
标准直流电压源的最大允许误差	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.318 mV	-1

合成标准不确定度：

$$u_c(V) = \sqrt{c_1^2 u^2(V_x) + c_2^2 u^2(V_s)} = 0.448 \text{ mV}$$

#### A.2.6 扩展不确定度

取包含因子  $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k \times u_c(V) = 2 \times 0.448 \text{ mV} = 0.896 \text{ mV} \approx 0.9 \text{ mV}$$

## 附录 B

## 校准原始记录格式

## 直流电子负载校准原始记录格式

共 3 页，第 1 页

证书编号 \_\_\_\_\_ 记录编号 \_\_\_\_\_  
 委托单位 \_\_\_\_\_ 委托单位地址 \_\_\_\_\_  
 型号规格 \_\_\_\_\_ 出厂编号 \_\_\_\_\_  
 制造单位 \_\_\_\_\_ 校准依据 \_\_\_\_\_  
 校准环境条件：温度 \_\_\_\_\_ °C 相对湿度 \_\_\_\_\_ % 校准地点 \_\_\_\_\_  
 校准日期 \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日 复校时间 \_\_\_\_\_ 年 \_\_\_\_\_ 月 \_\_\_\_\_ 日  
 校准员 \_\_\_\_\_ 核验员 \_\_\_\_\_

## 主要标准器

序号	标准器名称	型号规格	编号	不确定度或准确度等级 或最大允许误差	证书编号	有效期至

## 1. 直流电压

量程	显示值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 2. 恒定电压

量程	设定值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 直流电子负载校准原始记录格式

共 3 页, 第 2 页

证书编号 \_\_\_\_\_

记录编号 \_\_\_\_\_

## 3. 直流电流:

量程	显示值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 4. 恒定电流

量程	设定值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 5. 恒定电阻

量程	设定值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 6. 直流功率:

量程	显示值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 7. 恒定功率

量程	设定值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 直流电子负载校准原始记录格式

共 3 页, 第 3 页

证书编号 \_\_\_\_\_

记录编号 \_\_\_\_\_

## 8. 动态电流上升速率与下降速率

量程	设定值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 9. 动态电流加载时间与卸载时间

量程	设定值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 10. 恒定电流模式的电流稳定度

量程	最大值	最小值	稳定度	技术要求	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 11. 恒定电压模式或恒定电流模式的负载调整率

量程	最大值	最小值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 12. 短路电阻

量程	电压标准值	电流标准值	电阻标准值	技术要求	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 13. 输入电阻

量程	电压标准值	电流标准值	电阻标准值	技术要求	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 14. 最低工作电压

量程	输入电流	最低工作电压	技术要求	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 附录 C

## 校准证书内页格式

## C.1 校准证书内页（第 2 页）格式

证书编号 ××××××-××××

校准机构授权说明				
校准环境条件及地点：				
温 度		℃	地 点	
相对湿度		%	其 他	
校准所依据的技术文件（代号、名称）：				
校准所使用的主要测量标准：				
名 称	测量范围	不确定度/ 准确度等级	检定/校准 证书编号	证书有效期至

注：

1. ×××××仅对加盖“×××××校准专用章”的完整证书负责。
2. 本证书的校准结果仅对所校准的对象有效。
3. 未经实验室书面批准，不得部分复印证书。

第×页 共×页

## C.2 校准证书校准结果页格式

证书编号 ××××××—××××

## 校准结果

## 1. 直流电压

量程	显示值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 2. 恒定电压

量程	设定值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 3. 直流电流

量程	显示值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 4. 恒定电流

量程	设定值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 5. 恒定电阻

量程	设定值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 6. 直流功率

量程	显示值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 7. 恒定功率

量程	设定值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 8. 动态电流上升速率与下降速率

量程	设定值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 9. 动态电流加载时间与卸载时间

量程	设定值	标准值	误差	允许误差	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 10. 恒定电流模式的电流稳定度

量程	最大值	最小值	稳定度	技术要求	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 11. 恒定电压模式或恒定电流模式的负载调整率

量程	最大值	最小值	负载调整率	技术要求	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 12. 短路电阻

量程	电压标准值	电流标准值	电阻标准值	技术要求	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 13. 输入电阻

量程	电压标准值	电流标准值	电阻标准值	技术要求	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

## 14. 最低工作电压

量程	输入电流	最低工作电压	技术要求	校准结果不确定度 ( $k=2$ )

校准结果不确定度的评估和表述均符合 JJF 1059.1—2012 的要求。

敬告：

1. 被校准仪器修理后，应立即进行校准。
2. 在使用过程中，如对被校准仪器的技术指标产生怀疑，请重新校准。
3. 根据客户要求和校准文件的规定，通常情况下 12 个月校准一次。

校准员：\_\_\_\_\_

核验员：\_\_\_\_\_

第×页 共×页

