



中华人民共和国国家标准

GB/T 39346—2020

空间霍尔电推进功率处理单元测试方法

Space hall electric propulsion power processing unit test method

2020-11-19 发布

2021-06-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 I

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语、定义和缩略语..... 1

 3.1 术语和定义 1

 3.2 缩略语 2

4 一般要求 2

 4.1 测试设备 2

 4.2 测试场地 2

 4.3 测试环境条件 2

 4.4 测试人员 2

5 功率处理单元及其测试项目 3

 5.1 功率处理单元系统构成 3

 5.2 功率处理单元构成 3

 5.3 测试项目 3

6 测试方法 6

 6.1 总体功能和性能测试 6

 6.2 电压源模块性能测试 9

 6.3 电流源模块性能测试 12

 6.4 脉冲电压源模块性能测试 14



前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准由全国宇航技术及其应用标准化技术委员会(SAC/TC 425)提出并归口。

本标准起草单位:中国航天科技集团有限公司第九研究院第七七一研究所、中国航天科技集团有限公司第八研究院第八一一研究所。

本标准主要起草人:张新平、廖岩、成渭民、张建渝、张敏、石磊磊、魏立秋、杨旭、蔡正、崔小川、李智、赵宇平、杨阳、宋丹。



空间霍尔电推进功率处理单元测试方法

1 范围

本标准规定了空间霍尔电推进功率处理单元(以下简称“功率处理单元”)的功能和主要性能参数的测试方法。

本标准适用于功率处理单元的测试。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 13722—2013 移动通信电源技术要求和试验方法

GB/T 14714—2008 微小型计算机系统设备用开关电源通用规范

3 术语、定义和缩略语

3.1 术语和定义

GB/T 13722—2013 及 GB/T 14714—2008 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1.1

输出电压准确度 accuracy of output voltage

电源模块输出电压实测值相对于设定值的准确度,按式(1)计算。

$$A_{V1} = \frac{|\Delta V_1|}{V_1} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

式中:

A_{V1} ——电源模块输出电压准确度,以%表示;

ΔV_1 ——电源模块输出电压设定值和实测值的差值,单位为伏特(V);

V_1 ——电源模块输出电压设定值,单位为伏特(V)。

3.1.2

输出电流准确度 accuracy of output current

电源模块输出电流实测值相对于设定值的准确度,按式(2)计算。

$$A_{I1} = \frac{|\Delta I_1|}{I_1} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

式中:

A_{I1} ——电源模块输出电流准确度,以%表示;

ΔI_1 ——电源模块输出电流设定值和实测值的差值,单位为安培(A);

I_1 ——电源模块输出电流设定值,单位为安培(A)。

3.1.3

最小控制步距 minimum control interval

在保证输出电压/电流线性度的前提下,可以设置的最小输出电压/电流步距幅值。

3.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

PPU	功率处理单元(Power Processing Unit)
FU	滤波单元(Filter Unit)
DICU	数字接口与控制单元(Digital Interface and Control Unit)
TSU	推力器切换单元(Thruster Switching Unit)

4 一般要求

4.1 测试设备

4.1.1 测试设备组成

测试设备由大功率直流电源、数字万用表、示波器、电流钳、绝缘电阻表、单元测试仪(或上位机)、模拟负载、霍尔电推进器、真空环境设备等组成:

- 大功率直流电源、数字万用表、示波器、电流钳、绝缘电阻表等。
- 单元测试仪:功率处理单元的地面测试设备,代替上位机完成对功率处理单元的输出控制、信号采集、切机,模拟上位机指令及实现自动运行功能。条件具备时可直接使用上位机。
- 模拟负载:指电子负载、滑动变阻器等。若采用滑动变阻器,需外接电压、电流检测设备。
- 霍尔电推进器:功率处理单元的实际负载,功率处理单元的功能是给霍尔电推进器各用电部件供电。使用霍尔电推进器负载进行测试时,霍尔电推进器需在真空环境中工作,工作真空度应优于 5×10^{-3} Pa。
- 真空环境设备:为功率处理单元与霍尔电推进器的整机联试提供真空环境,如真空罐等。

4.1.2 测试设备要求

所有测试仪器(表)、设备、测量工装(含表头适配器)等,应经计量检定合格并在有效期内,其量程、精度满足测试要求。

4.2 测试场地

测试场地一般应满足以下要求:

- 测试工作台应平整;
- 测试工作台内侧应提供经稳压处理后的 220 V 交流电源插座,其中地线应与大地可靠相连;
- 测试工作台外侧下方应提供接地良好的防静电腕带插座。

4.3 测试环境条件

除另有规定外,所有测试应在下列环境条件下进行:

- 温度: $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- 相对湿度: $30\% \sim 75\%$;
- 大气压力: $(101.325 \pm 4)\text{ kPa}$ 。

4.4 测试人员

测试人员一般应满足以下要求:

- 测试操作人员应经过上岗培训,熟练掌握单元测试设备的使用方法,清楚各种测试项目及数据

判读准则；

- b) 测试人员在测试前应做好准备工作：穿着防静电服和防静电鞋，佩戴防静电手套和防静电腕带，并使防静电腕带的插头与工作台上的防静电腕带插座接触可靠。

5 功率处理单元及其测试项目

5.1 功率处理单元系统构成

功率处理单元系统包含功率处理单元(PPU)、推力器切换单元(TSU)、滤波单元(FU)、霍尔电推进器。其中,TSU 用于一台功率处理单元连接多台霍尔电推进器时使用,若一台功率处理单元只连接一台霍尔电推进器,则可不使用 TSU。

功率处理单元及其系统构成如图 1 所示。

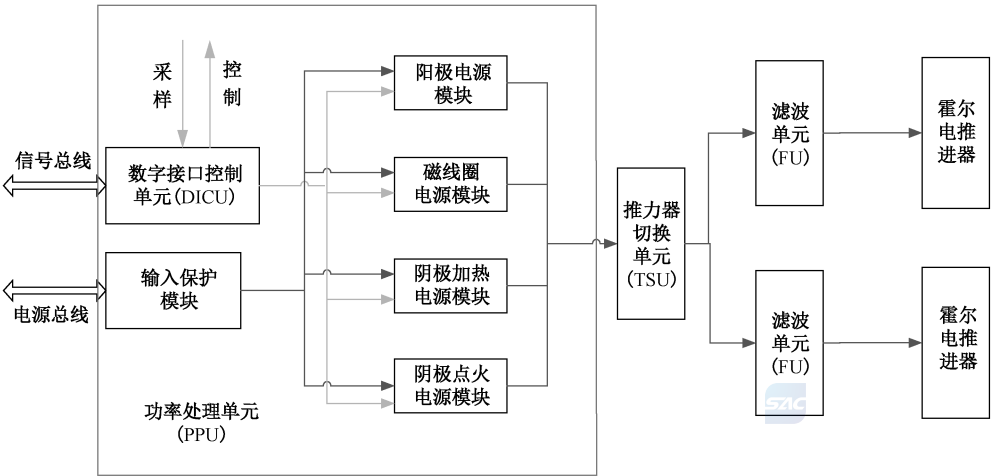


图 1 功率处理单元及其系统构成

5.2 功率处理单元构成

功率处理单元主要功能是对航天器的一次功率母线电能进行功率变换分配后按照时序要求提供给霍尔电推进器各用电部件,同时将内部各模块的数据上传上位机。

功率处理单元(PPU)包含阳极电源模块、阴极加热电源模块、磁线圈电源模块、阴极点火电源模块、输入保护模块、数字接口与控制单元(DICU)等全部或部分种类内部功能模块,同种类模块数量可为多个。

5.3 测试项目

5.3.1 总体功能和性能测试

总体功能和性能测试包括：浪涌电流、整机效率、供电母线反射纹波电压、反射电流纹波、共模电流、母线冲击电流、阳极电源模块输出冲击电流、阳极电流振荡抑制率、点火时序控制流程等测试,其中前三项测试主要用在模拟负载情况,后六项测试主要用在霍尔电推进器负载情况。

5.3.2 各功能模块性能指标测试

功率处理单元各功能模块性能指标测试介绍如下：

- a) 功率处理单元的阳极电源模块是带模拟量基准控制的电压源,需要测试的项目包括:输出电压准确度、效率、负载稳定度、电压稳定度、过流保护点、短路电流及短路母线冲击电流、输出电压最小控制步距、输出电压采样精度、输出电流采样精度、切换、输出 $V-I$ 特性曲线、输入母线电压采样精度、输入母线电流采样精度、功率器件温升、输入电压拉偏。阳极电源模块采用限功率输出方式,输出 $V-I$ 特性如图 2 所示(图中 I_{O1} 为阳极电源模块额定输出电流, I_{O2} 为过流保护点电流, I_{O3} 为短路电流)。该部分测试主要用在模拟负载情况。

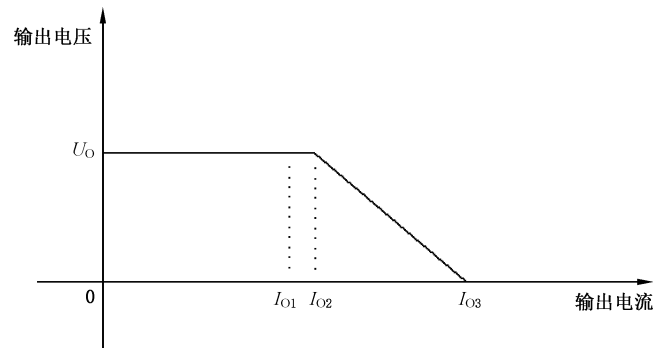


图 2 阳极电源模块输出 $V-I$ 特性

- b) 阴极加热电源模块、磁线圈电源模块是带模拟量基准控制的电流源,需要测试的项目包括空载输出最大电压值、输出电流范围、最大输出功率、输出电流准确度、稳流精度、输出电流最小控制步距、效率、输出电压采样精度、输出电流采样精度、切换、功率器件温升、输入电压拉偏等。该部分测试主要用在模拟负载情况。
- c) 阴极点火电源模块为脉冲电压源或直流电压源,需要测试的项目包括空载输出电压误差、空载电压脉冲(周期、脉宽)、恒流输出、短路保护功能、输出电压采样精度、输出电流采样精度、切换、功率器件温升、输入电压拉偏等。该部分测试主要用在模拟负载情况。若阴极点火模块为直流电压源,则不需要测试空载电压脉冲(周期、脉宽)。

5.3.3 测试项目表

功率处理单元测试项目列表如表 1(测试项目种类和顺序可根据实际情况进行调整)。



表 1 功率处理单元测试项目

序号	类别	测试项目
1	总体功能和性能测试	浪涌电流
2		整机效率
3		供电母线反射纹波电压
4		反射电流纹波
5		共模电流
6		母线冲击电流
7		阳极电源模块输出冲击电流
8		阳极电流振荡抑制率
9		点火时序控制流程
10		输入电压拉偏

表 1（续）

序号	类别		测试项目
11	各功能模块性能指标测试	电压源模块性能测试	输出电压准确度
12			效率
13			负载稳定度
14			电压稳定度
15			过流保护点
16			短路电流及短路母线冲击电流
17			输出电压最小控制步距
18			输出电压采样精度
19			输出电流采样精度
20			切换
21			输出 $V-I$ 特性曲线
22			输入母线电压采样精度
23			输入母线电流采样精度
24			功率器件温升
25			输入电压拉偏
26		电流源模块性能测试	空载输出最大电压值
27			输出电流范围
28			最大输出功率
29			输出电流准确度
30			稳流精度
31			输出电流最小控制步距
32			效率
33			输出电压采样精度
34			输出电流采样精度
35			切换
36			功率器件温升
37			输入电压拉偏
38		脉冲电压源模块性能测试	空载输出电压误差
39			空载电压脉冲(周期、脉宽)
40			恒流输出
41			短路保护功能
42			输出电压采样精度
43			输出电流采样精度
44			切换
45			功率器件温升
46			输入电压拉偏

6 测试方法

6.1 总体功能和性能测试

6.1.1 浪涌电流

测试设备和仪器按照图 3 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,在直流母线电源和功率处理单元之间导线上夹上电流探头。功率处理单元执行“母线开”动作,通过测试设备(如示波器等)读取功率处理单元开机浪涌电流。

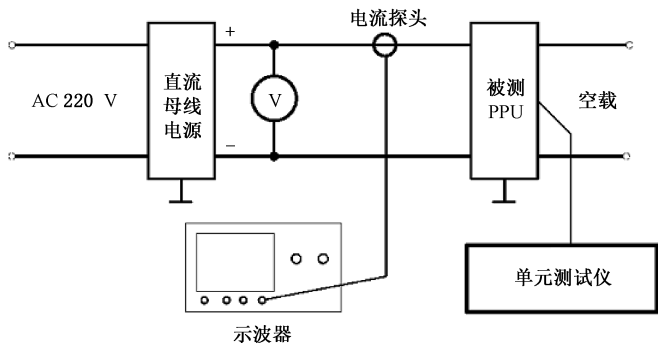


图 3 浪涌测试连接示意图

6.1.2 整机效率

测试设备和仪器按照图 4 连接,调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)和负载设定功率处理单元输出为额定工况。读取功率处理单元输入电压、电流和负载电压、电流。按式(3)计算功率处理单元整机效率。

$$\eta_1 = \frac{P_{O1}}{V_{in} \times I_{in}} \times 100\%$$

.....(3)

式中:

η_1 ——整机效率,以%表示;

P_{O1} ——总负载功率,单位为瓦特(W);

V_{in} ——功率处理单元输入电压,单位为伏特(V);

I_{in} ——功率处理单元输入电流,单位为安培(A)。

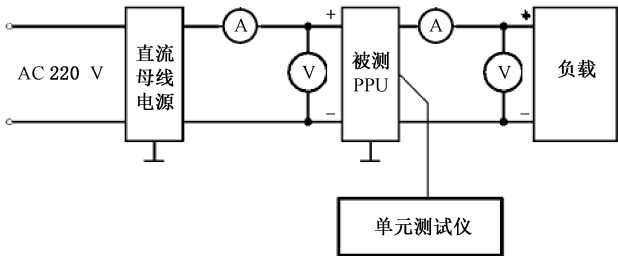


图 4 整机效率测试连接示意图

6.1.3 供电母线反射纹波电压

测试设备和仪器按照图 5 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)和负载设定功率处理单元输出为额定工况。通过测试设备(如示波器等)记录功率处理单元供电母线反射电压纹波,测量时功率处理单元输入电压测试端口需外接一支 0.1 μ F 的瓷介电

容(示波器选择交流挡,带宽设置不小于 20 MHz)。

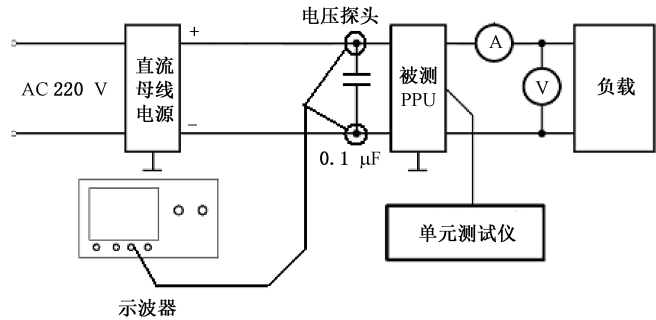


图 5 供电母线反射纹波电压测试连接示意图

6.1.4 反射电流纹波

测试设备和仪器按照图 6 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,调节地面氙气供给量,使霍尔电推进器工作在额定功率状态,通过单元测试仪(或上位机)控制功率处理单元内部各电源模块的工作时序,使霍尔电推进器稳定放电工作,通过测试设备(如示波器等)记录功率处理单元母线反射电流纹波(示波器带宽设置 ≥ 20 MHz)。

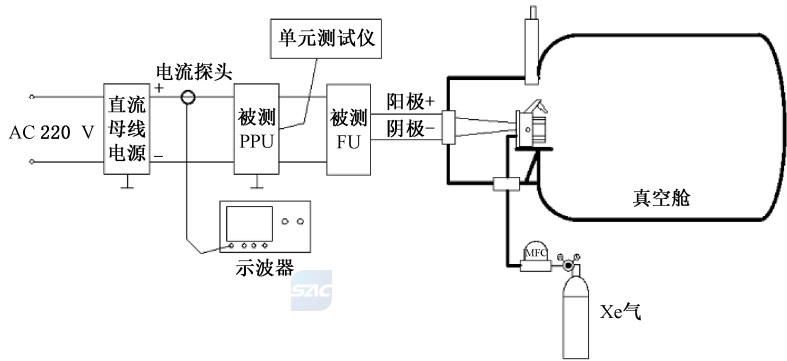


图 6 反射电流纹波测试连接示意图

6.1.5 共模电流

测试设备和仪器按照图 7 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,调节地面氙气供给量,使霍尔电推进器工作在额定功率状态,通过单元测试仪(或上位机)控制功率处理单元内部各电源模块工作时序,使霍尔电推进器稳定放电工作,通过测试设备(如示波器等)记录功率处理单元母线共模电流。

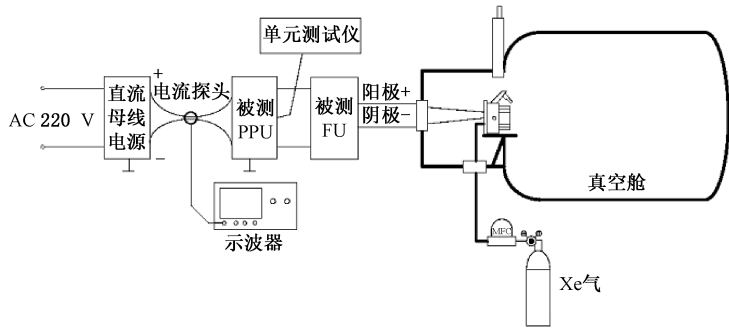


图 7 共模电流测试连接示意图

6.1.6 母线冲击电流

测试设备和仪器按照图 8 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,调节地面氙气供给量,使霍尔电推进器工作在额定点火参数下,通过单元测试仪(或上位机)控制功率处理单元内部各电源模块工作时序,在霍尔电推进器点火成功的瞬间,通过测试设备(如示波器等)记录功率处理单元母线冲击电流。

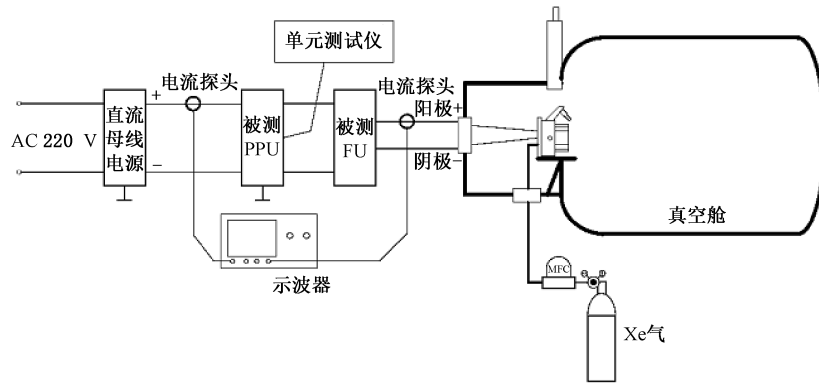


图 8 电流冲击测试连接示意图

6.1.7 阳极电源模块输出冲击电流

测试设备和仪器按照图 8 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,调节地面氙气供给量,使霍尔电推进器工作在额定点火参数下,通过单元测试仪(或上位机)控制功率处理单元内部各电源模块工作时序,在霍尔电推进器点火成功的瞬间,通过测试设备(如示波器等)记录功率处理单元阳极电源模块输出冲击电流。

6.1.8 阳极电流振荡抑制率

测试设备和仪器按照图 9 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,调节地面氙气供给量,使霍尔电推进器工作在额定功率状态,通过单元测试仪(或上位机)控制功率处理单元内部各电源模块工作时序,使霍尔电推进器稳定放电工作,通过测试设备(如示波器等)记录滤波单元输入侧和输出侧电流振荡峰-峰值(示波器带宽设置 ≥ 100 kHz),按式(4)计算滤波模块对阳极电流振荡抑制率。

$$A_{RR} = \frac{I_d}{I_{df}} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

A_{RR} ——阳极电流振荡抑制率,以%表示;

I_d ——滤波单元输入侧电流峰峰值,单位为安培(A);

I_{df} ——滤波单元输出侧电流峰峰值,单位为安培(A)。

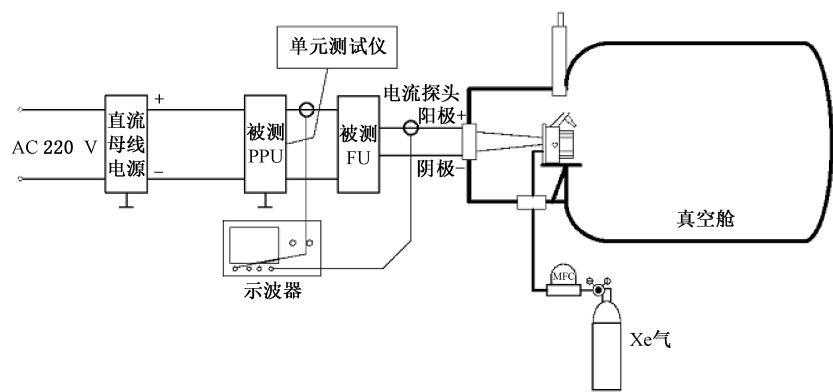


图 9 阳极电流振荡抑制率测试连接示意图

6.1.9 点火时序控制流程

根据空间霍尔电推进功率处理单元系统的工作模式和各功能模块的工作时序,编写点火时序控制流程。上位机运行点火时序控制流程,完成功率处理单元内部各模块的开关机时序控制、主备份切换控制以及数据采集等功能。通过运行点火时序控制流程,检测各功能模块输出状态并监测遥测参数,可以实现控制单元指令测试、切换测试、软件测试以及系统匹配测试等。

6.1.10 输入电压拉偏

调节直流母线电源,将功率处理单元的输入电压在要求范围内分别拉偏到最大或最小,重新测试 6.1.1~6.1.9 的测试项目。

6.2 电压源模块性能测试

6.2.1 输出电压准确度

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,负载设定为额定负载,通过单元测试仪(或上位机)将功率处理单元电压源模块设定为不同的输出电压,通过电压表读取实际输出电压值,输出电压准确度按式(1)计算。

6.2.2 效率

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)和负载设定功率处理单元电压源模块输出为额定工况,读取负载电压、电流和电源模块输入电压、电流,按式(5)计算功率处理单元电压源模块的效率。

$$\eta_2 = \frac{P_{O2}}{V_{in} \times I_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (5)$$

式中:
η₂ ——电压源模块效率,以%表示;
P_{O2} ——负载功率,为负载电压电流乘积,单位为瓦特(W);
V_{in} ——电压源模块输入电压,单位为伏特(V);
I_{in} ——电压源模块输入电流,单位为安培(A)。

6.2.3 负载稳定度

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)将功率处理单元电压源模块输出电压设定为额定值,通过负载设定功率处理单元

电压源模块的负载电流,读取电压源模块额定负载电流下的电压值 V_2 并得到全负载范围内输出电压与额定负载电流下输出电压的最大电压差值 $|\Delta V_2|$,按式(6)计算负载稳定度。

$$S_i = \frac{|\Delta V_2|}{V_2} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

S_i ——电压源模块负载稳定度,以%表示;

ΔV_2 ——电压源模块全负载范围内输出电压与额定负载电流下输出电压的最大电压差值,单位为伏特(V);

V_2 ——电压源模块额定输出电压值,单位为伏特(V)。

6.2.4 电压稳定度

测试设备和仪器按照图 4 连接,通过单元测试仪(或上位机)和负载设定功率处理单元电压源模块输出为额定工况,调节直流母线电源,读取电压源模块在输入电压范围内输出电压与额定输入电压下输出电压的最大电压差值,按式(7)计算电压稳定度。

$$S_v = \frac{|\Delta V_3|}{V_3} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中:

S_v ——电压源模块电压稳定度,以%表示;

ΔV_3 ——电压源模块输入电压范围内输出电压与额定输入电压下输出电压的最大电压差值,单位为伏特(V);

V_3 ——电压源模块输入电压为额定值时的输出电压值,单位为伏特(V)。

6.2.5 过流保护点

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)将功率处理单元电压源模块输出电压设定为额定值,通过负载调节功率处理单元电压源模块输出电流,当电压源模块输出电压下降为额定输出电压的 90%时,即为电源的过流保护点(图 2 中的 I_{O2})。

6.2.6 短路电流及短路母线冲击电流

测试设备和仪器按照图 10 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)将功率处理单元电压源模块输出电压设定为额定值,通过负载设定功率处理单元电压源模块的负载电流为额定电流和短路电流两挡,使功率处理单元工作在额定负载状态,调节负载,使功率处理单元负载电流从额定电流跃变到短路电流(输出电压下降为额定值的 10%以下视为短路),此时通过电流探头分别抓取电压源模块短路电流峰值和宽度、母线冲击电流峰值和宽度(宽度指电流从初始值回到初始值的时间)。

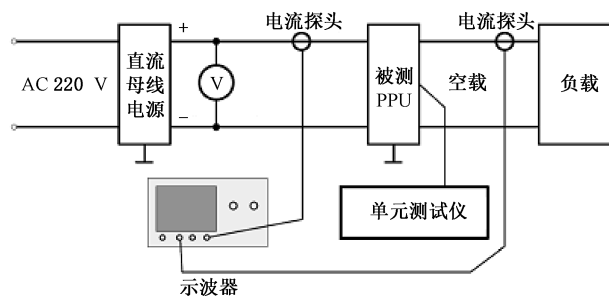


图 10 短路电流及短路母线冲击电流测试

6.2.7 输出电压最小控制步距

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,将负载设定为额定负载电流,通过单元测试仪(或上位机)设定电压源模块输出电压的控制步距,通过负载电压表读取步距幅值。按照 3.1.3 的最小控制步距定义测试输出电压最小控制步距。

6.2.8 输出电压采样精度

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,将负载设定为额定负载电流,通过单元测试仪(或上位机)将功率处理单元电压源模块设定为不同的输出电压,读取单元测试仪(或上位机)的电压采集数据和负载电压表显示数值,按式(8)计算采样精度。

$$S_{V4} = \frac{|\Delta V_4|}{V_4} \times 100\% \dots\dots\dots (8)$$

式中:
 S_{V4} ——电压源模块输出电压采样精度,以%表示;
 ΔV_4 ——单元测试仪(或上位机)的电压采集数据和负载电压表显示数值的差值,单位为伏特(V);
 V_4 ——电压源模块最大输出电压值,单位为伏特(V)。

6.2.9 输出电流采样精度

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)将功率处理单元电压源模块输出电压设定为额定值,通过负载设定电压源模块的负载电流,读取单元测试仪(或上位机)的电流采集数据和负载电流表显示数值,按式(9)计算采样精度。

$$S_{I2} = \frac{|\Delta I_2|}{I_2} \times 100\% \dots\dots\dots (9)$$

式中:
 S_{I2} ——电压源模块输出电流采样精度,以%表示;
 ΔI_2 ——单元测试仪(或上位机)的电流采集数据和负载电流表显示数值的差值,单位为安培(A);
 I_2 ——电压源模块最大输出电流值,单位为安培(A)。

6.2.10 切换测试

通过外加指令信号,完成电压源模块的主备份或多路输出切换测试。

6.2.11 输出 V-I 特性曲线

电压源模块采用限功率输出方式,输出 V-I 特性如图 2 所示。测试设备和仪器按照图 4 连接,调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)将功率处理单元电压源模块输出电压设定为额定值,通过负载设定功率处理单元电压源模块的负载电流,读取电压源模块在过流区(图 2 斜线部分)的输出电压值,描点得到电压源模块的输出 V-I 特性曲线。

6.2.12 输入母线电压采样精度

测试设备和仪器按照图 4 连接。通过单元测试仪(或上位机)将功率处理单元电压源模块输出电压设定为额定值,将负载设定为额定负载电流。将直流母线电源调节为不同的输出电压,读取单元测试仪(或上位机)的输入母线电压采集数据和功率处理单元的输入电压测试端显示数值,按式(10)计算采样精度。

$$S_{V5} = \frac{|\Delta V_5|}{V_5} \times 100\% \dots\dots\dots (10)$$

式中：

S_{V_5} ——输入母线电压采样精度，以%表示；

ΔV_5 ——单元测试仪(或上位机)的输入母线电压采集数据和功率处理单元的输入电压测试端显示数值的差值，单位为伏特(V)；

V_5 ——功率处理单元最大输入电压值，单位为伏特(V)。

6.2.13 输入母线电流采样精度

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源，使功率处理单元的输入电压为额定值，通过单元测试仪(或上位机)将功率处理单元电压源模块输出电压设定为额定值，通过负载设定电压源模块为不同负载电流，读取单元测试仪(或上位机)的输入母线电流采集数据和功率处理单元的输入电流测试端显示数值，按式(11)计算采样精度。

$$S_{I_3} = \frac{|\Delta I_3|}{I_3} \times 100\% \quad \dots\dots\dots (11)$$

式中：

S_{I_3} ——输入母线电流采样精度，以%表示；

ΔI_3 ——单元测试仪(或上位机)的输入母线电流采集数据和功率处理单元的输入电流测试端显示数值的差值，单位为安培(A)；

I_3 ——功率处理单元最大输入电流值，单位为安培(A)。

6.2.14 功率器件温升

测试设备和仪器按照图 4 连接。在真空环境(环境压力不大于 1.3×10^{-3} Pa)，最高工作温度下，调节直流母线电源，使功率处理单元的输入电压为额定值，通过单元测试仪(或上位机)和负载，设定电压源模块工作在最大负荷功率，此时监测发热较严重(一般为 ≥ 0.3 W)功率器件壳温并转换为结温，记录热平衡后温升。

6.2.15 输入电压拉偏

调节直流母线电源，将功率处理单元的输入电压在要求范围内分别拉偏到最大或最小，重新测试 6.2.1~6.2.3、6.2.5~6.2.11、6.2.13~6.2.14 的测试项目。

6.3 电流源模块性能测试

6.3.1 空载输出最大电压值

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源，使功率处理单元的输入电压为额定值，将功率处理单元电流源模块空载，通过单元测试仪(或上位机)开启电流源模块，利用负载电压表读取电源实际输出电压。

6.3.2 输出电流范围

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源，使功率处理单元的输入电压为额定值，负载设定为额定负载电阻值，通过单元测试仪(或上位机)将电流源模块分别设定为最小、最大输出电流，利用负载电流表读取电流源模块输出的最小、最大电流值。

6.3.3 最大输出功率

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源，使功率处理单元的输入电压为额定值，通过单

元测试仪(或上位机)将电流源模块输出电流设定为额定值,逐渐增大负载电阻值至电流源模块输出最大功率,利用负载电压、电流表读取此时的电压电流值,其乘积即为电流源模块的最大输出功率。

6.3.4 输出电流准确度

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,负载设定为额定负载电阻值,通过单元测试仪(或上位机)设定电流源模块的输出电流,利用负载电流表读取实际输出电流值,按式(2)计算输出电流准确度。

6.3.5 稳流精度

稳流精度是用来衡量电流稳定性的参数。测试设备和仪器按照图 4 连接,调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)将功率处理单元电流源模块输出电流设定为额定值,将负载在电流源模块恒流输出范围内设定为不同负载电阻值,检测输出电流。按式(12)计算稳流精度。

$$S_{I_4} = \frac{|\Delta I_{4max}|}{I_4} \times 100\% \dots\dots\dots (12)$$

- 式中:
- S_{I_4} —— 电流源模块稳流精度,以%表示;
 - ΔI_{4max} —— 电流源模块在恒流范围内带不同阻值的负载电阻时,输出电流设定值和实测值的最大变化差值,单位为安培(A);
 - I_4 —— 电流源模块输出电流设定值,单位为安培(A)。

6.3.6 输出电流最小控制步距

调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,将负载设定为额定负载电阻值,通过单元测试仪(或上位机)设定电流源模块输出电流的控制步距,通过负载电流表读取步距幅值。按照 3.1.3 的最小控制步距定义测试输出电流最小控制步距。

6.3.7 效率

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)和负载设定电流源模块输出为额定工况,读取负载电压、电流和电源模块输入电压、电流,按式(13)计算电流源模块的效率。

$$\eta_3 = \frac{P_{O3}}{V_{in} \times I_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots (13)$$

- 式中:
- η_3 —— 电流源模块效率,以%表示;
 - P_{O3} —— 负载功率,为负载电压电流乘积,单位为瓦特(W);
 - V_{in} —— 电流源模块输入电压,单位为伏特(V);
 - I_{in} —— 电流源模块输入电流,单位为安培(A)。

6.3.8 输出电压采样精度

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)将电流源模块设定为额定输出电流,通过负载为电流源模块设定不同的负载电阻,读取单元测试仪(或上位机)的电压采集数据和模拟负载电压表显示数值,按式(8)计算采样精度。

6.3.9 输出电流采样精度

测试设备和仪器按照图 4 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,将负载设定为额定负载电阻值,通过单元测试仪(或上位机)将电流源模块设定为不同的输出电流,读取单元测试仪(或上位机)的电流采集数据和负载电流表显示数值,按式(9)计算采样精度。

6.3.10 切换

通过外加指令信号,完成电流源模块的主备份或多路输出切换测试。

6.3.11 功率器件温升

测试设备和仪器按照图 4 连接。在真空环境(环境压力不大于 1.3×10^{-3} Pa),最高工作温度下,调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)和负载,设定电流源模块工作在最大负荷功率,此时监测发热较严重(一般为 ≥ 0.3 W)功率器件壳温并转换为结温,记录热平衡后温升。

6.3.12 输入电压拉偏

调节直流母线电源,将功率处理单元的输入电压在要求范围内分别拉偏到最大或最小,重新测试 6.3.1~6.3.11 的测试项目。

6.4 脉冲电压源模块性能测试

6.4.1 空载输出电压误差

测试设备和仪器按照图 11 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,将功率处理单元脉冲电压源模块空载,通过单元测试仪(或上位机)控制脉冲电压源模块输出电压,通过测试设备(如示波器等)记录输出电压值,按式(1)计算电压误差。

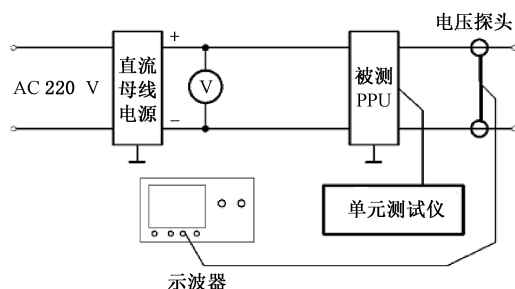


图 11 空载电压脉冲测试连接示意图

6.4.2 空载电压脉冲(周期、脉宽)

测试设备和仪器按照图 11 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,将功率处理单元脉冲电压源模块空载,通过单元测试仪(或上位机)控制脉冲电压源模块输出电压,通过测试设备(如示波器等)记录空载电压脉冲周期和脉宽。

6.4.3 恒流输出

测试设备和仪器按照图 12 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)将脉冲电压源模块输出电压设定为额定值,通过模拟负载设定脉冲电压源模块负载电阻值,开启脉冲电压源模块,通过测试设备(如示波器等)读取实际恒流输出值(示波器带宽设定 \geq

20 MHz,采用光标法读取电流值)。

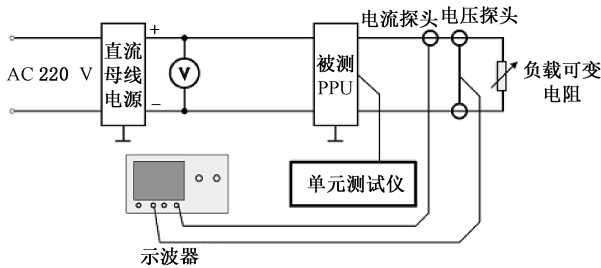


图 12 恒流输出测试连接示意图

6.4.4 短路保护功能

测试设备和仪器按照图 12 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)将脉冲电压源模块输出电压设定为额定值,采用输出线瞬间短接的方式测试脉冲电压源模块是否具有短路保护功能。

6.4.5 输出电压采样精度

测试设备和仪器按照图 12 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)将脉冲电压源模块输出电压设定为额定值,通过模拟负载设定脉冲电压源模块负载电阻值,利用测试设备(如示波器等)读取脉冲电压源模块的实际输出电压(示波器带宽设定 ≥ 20 MHz,采用光标法读取电压值),同单元测试仪(或上位机)的采样值比较,按式(8)计算电压采样精度。

6.4.6 输出电流采样精度

测试设备和仪器按照图 12 连接。调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)将脉冲电压源模块输出电压设定为额定值,通过模拟负载设定脉冲电压源模块负载电阻值,利用测试设备(如示波器等)读取脉冲电压源模块的实际输出电流(示波器带宽设定 ≥ 20 MHz,采用光标法读取电流值),同单元测试仪(或上位机)的采样值比较,按式(9)计算电流采样精度。

6.4.7 切换

通过外加指令信号,完成脉冲电压源的主备份或多路输出切换测试。

6.4.8 功率器件温升

测试设备和仪器按照图 12 连接。在真空环境(环境压力不大于 1.3×10^{-3} Pa),最高工作温度下,调节直流母线电源,使功率处理单元的输入电压为额定值,通过单元测试仪(或上位机)和模拟负载,设定脉冲电压源模块工作在最大负荷功率,此时监测发热较严重(一般为 ≥ 0.3 W)功率器件壳温并转换为结温,记录热平衡后温升。

6.4.9 输入电压拉偏

调节直流母线电源,将功率处理单元的输入电压在要求范围内分别拉偏到最大和最小,重新测试 6.4.1~6.4.8 的测试项目。