

航天器大功率直流电源数字均流方法

杜璞玉¹, 陈卓^{1,2}, 高飞¹, 王剑¹, 瞿浩¹

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109;

2. 上海交通大学 计算机科学与工程系, 上海 200240)

摘要: 针对航天器大功率直流电源系统电源模块的均流问题, 提出了直流电源系统数字均流方法; 该方法以供配电主控软件为均流核心, 将各直流电源模块进行并联输出, 通过以太网与各直流电源模块进行数据交互, 采集各直流电源输出电流, 通过均流算法调节直流电源输出电压, 以达到电源均流的目的, 此方法在现有直流电源的基础上, 设计了大功率直流电源并联硬件电路, 包含输入控制单元、远端补偿电路和输出控制单元, 软件上设计供配电主控软件, 包含均流控制功能、供配电流程功能和电源模块监控功能; 通过实际硬件环境试验表明, 该方法均流精度高、响应速度快、故障控制能力强, 在航天电源领域具备较高的实用价值。

关键词: 直流电源; 数字均流; 航天器; 大功率; 电流采样

Digital Sharing Method For Spacecraft High-power DC Power Supply

DU Puyu¹, CHEN Zhuo^{1,2}, GAO Fei¹, WANG Jian¹, QU Hao¹

(1. Shanghai Aerospace Electronic Technology Institute, Shanghai 201109, China;

2. Department of Computer Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: To address the current sharing problem of power modules in spacecraft high-power digital current (DC) power supply systems, a digital current sharing method for DC power supply system is proposed. The main control software of power supply is taken as the current sharing core to output each DC power module in parallel, exchange the data with various DC power module through Ethernet, and collect the output current of each DC power supply. The output voltage of the DC power supply is adjusted through the current sharing algorithm to achieve the goal of power supply current sharing. Based on existing DC power supply, a high-power DC power supply parallel hardware circuit is designed, it includes the input control unit, remote compensation circuit, and output control unit. In the software of the system, the power supply and distribution main control software is designed, including the current sharing control function, power supply and distribution process function, and power module monitoring function. Through actual hardware environment experiments, the results show that this method has high current sharing accuracy, fast response speed, and strong fault control ability, and it has a high practical value in the field of aerospace power supply.

Keywords: DC power supply; digital current sharing; spacecraft; high-power; current sampling

0 引言

随着空间技术的不断发展, 航天器的体积越来越大, 所搭载的设备数量和功率相比于以往有很大的提升, 以我国首个空间站为例, 其梦天舱在地面测试过程中主要依靠地面直流电源为整个航天器正常测试提供稳定的能源供给^[1], 该舱结构复杂, 电气设备数量较多, 需要通过两个功率通道为舱和电池组进行稳压供电, 工作状态下对功率消耗较大, 工作模式多变, 对地面供电有着高压、大电流以及供电智能化的需求, 常规的电源供电方案无法满足空间站复杂多变的需求, 采用电源的并网连接是解决电源大功率输出以及提高供电可靠性的行之有效的方案, 电源的单路输出供电有以下几个缺点, 首先工作电源将会承担整

个航天器的供电需要, 电源的设计需要满足大功率输出的需求, 给电源方案的设计以及产品器件的选择带来不小的困难^[2-3], 其次单电源模式存在单点问题, 一旦电源发生故障, 航天器的供电将会被中止, 这在测试使用过程中是无法接受的, 最后单台地面直流电源由于电力特性的限制, 无法满足整个航天器功率特性的需求, 采用多台电源并联运行提供大功率输出是该解决该问题的一个方向^[4], 以多个电源模块共同承担负载功率, 解决单路输出存在的问题。

多台电源并联虽然可以解决大功率输出的问题, 但电源并联系统存在着平衡负载的问题, 由于最终并联输出端的电压差问题, 系统内各电源模块很容易出现某些电源模

收稿日期: 2024-01-17; 修回日期: 2024-02-08。

作者简介: 杜璞玉(1991-), 男, 硕士, 工程师。

通讯作者: 陈卓(1993-), 男, 硕士, 工程师。

引用格式: 杜璞玉, 陈卓, 高飞, 等. 航天器大功率直流电源数字均流方法[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(6): 319-325.

块承担全部负载，而其余电源模块零负载的情况，会造成使用过程中的各种问题，因此电源并联系统的关键点在于保证电源模块的输出电流一致，使得系统内各电源所承担的负载功率大致均衡，为实现这一点，通常采用相同的电源模块以相同的电压进行输出，避免输出端电压的不一致，由于直流电源工艺水平的限制，电源并联系统各模块的静态特性和动态特性不可避免地存在差异，导致最终输出端电压并不完全相同，各模块承担的电流不均匀的现象是不可避免的，当直流电源高负载运行的时候，模块中开关器件将承受更大的电流应力，降低开关器件的寿命，提升损坏的风险，同时可能会触发电源的过流保护^[5-6]。需要采用均流控制方法对系统进行控制。

大功率直流电源系统是航天器综合测试基础保障之一，对供电的稳定性和可靠性都有很高的要求，以支撑航天器的长期加电测试，本文研究的重点是提供一种直流电源并联系统的均流方案，解决航天器测试过程中的大电流、大功率供电问题，增加供电电源模块的冗余性，保证航天器地面测试过程中的供电。

1 均流方法与系统结构

1.1 均流方法

目前主流的均流方法从原理上可以分为输出阻抗法、主从模块设置法、平均电流法、最大电流法、热应力自动均流法和数字均流等^[7]。

输出阻抗法通过电路调整输出阻抗达到均流的目的，但是这种方法均流精度较低。

主从模块法通过主模块控制从模块电压达到均流目的，均流精度高，但电路依赖主模块，冗余度较低。

平均电流法与最大电流法类似，通过均流母线计算各电源模块的平均电流值，各模块以此为基准进行输出，但冗余度较低，母线和电源模块故障均会造成系统异常^[8]。

热应力自动均流法根据电源模块采样的温度和电流进行调节，实现均流目的，但受环境影响较大^[9]。

数字均流以软件算法克服传统的均流方法的缺点，实现高精度的均流控制，与传统的均流方法相比，采用数字电源以及均流软件控制的数字均流方法不需要增加额外的均流硬件电路，通过网络或总线的方式采集直流电源的电压电流信息，避免不同直流电源之间的干扰，当部分电源出现异常时，可进行适应性均流调整，控制灵活，冗余度高^[10-11]。

基于上述均流方法的比较，将数字均流方法作为航天器大功率直流电源并联系统设计的核心。数字均流技术的原理是采用通信的方式实时获取各电源模块的电压、电流、电源状态等数据，通过软件计算系统平均电流，比较各模块电流与系统平均电流的误差，通过相应的均流调整算法对各电源模块的电压值进行调整，从而实现各电源模块输出功率一致^[12-14]。数字均流可以针对并联系统中的某一电源模块直接调节，而不用担心影响与其并联的其它模块的正常运行，保证了并联电源系统中各电源模块的电气独立

性，当并联电源系统中的某一个模块出现故障时，数字均流可以快速关闭故障电源输出，同时对剩余模块重组，进行均流控制，容错性相比于模拟电路更高，以软件实现均流控制具备均流精度高，易于实现等优点。

1.2 系统结构

大功率直流电源数字均流系统由供配电主控设备、数字电源子模块以及网络交互设备组成。数字均流实现基本原理为通过供配电主控软件动态地对并联电源系统中各电源模块的输出电压进行调节，从而使得其并联输出端的电压值尽可能地接近，实现均流输出。

大功率直流电源数字均流系统的核心为供配电主控设备和数字电源模块。其中供配电主控设备位于控制大厅内，通过网络远程实现对数字电源模块的采样以及调节，供配电主控软件位于该设备内部，是整个均流系统的控制主体所在，软件包含均流控制模块、人机交互模块、数据存储模块以及采样模块；数字电源模块位于航天器附近，多台数字电源模块通过均流并联电路共同组成并联输出系统，使用电缆与航天器连接，从而保障航天器地面测试阶段的大功率输出以及在不同实验阶段的电压调节，数字电源模块包含电源控制模块、电源采样模块、补偿采样电路以及通信模块。

根据系统的功能层次，可以划分为接口、硬件和软件 3 个层次，每个层次均包含多个系统功能子模块，其组成如图 1 所示。

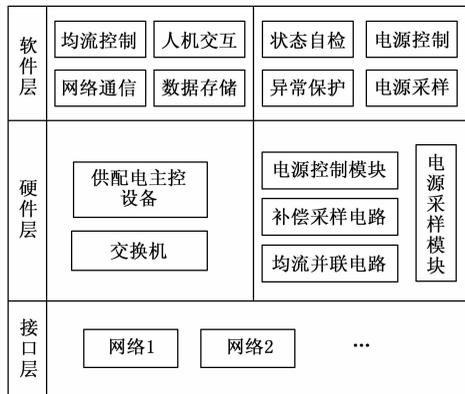


图 1 系统组成图

接口层主要负责供配电主控设备与各个电源子模块之间的通信，供配电主控软件指令的发出和各模块状态的回采均通过网络接口传输，指令包含均流调压指令、电源输出关闭指令，状态包含电压状态、电流状态以及设备状态，供配电主控设备和各个电源子模块均采用 RJ45 以太网接口，二者之间通过多个交换机相连，在直流电源数字均流系统中，支持电源子模块网络接口的动态调整，供配电主控软件会根据设备网络的实时连接情况对均流系统进行控制。

硬件层主要包含供配电主控设备以及电源模块两部分。供配电主控设备为上位计算机，供配电主控软件运行于其

上,是整个电源系统的控制中枢,通过交换机与电源模块相连;电源模块包含多个电源子模块,采用均流并联电路向航天器提供输出,每个电源子模块均具备 MCU 单元(Microcontroller Unit, 微控制单元),每个 MCU 单元包含控制模块和采样模块,能够实现对自身电源的电压调整、电源输出以及过压、过流参数设置,同时将自身电源状态回传至供电主设备;由于输出端电缆较长,输出端电压存在压降,为提高输出端的采样精度,设计了补偿采样电路。

软件层主要包含供电主控软件以及电源控制软件两个软件。供电主控软件负责整个大功率直流电源系统的控制以及调配,包含均流控制模块、人机交互模块、网络通信模块以及数据存储,能够对整个供电系统进行控制同时显示当前供电系统所有状态,软件具备电源均流系统自检流程、自动供电流程和紧急断电流程,以便指挥进行自动化测试;电源控制软件运行于各电源子模块的 MCU 单元中,为嵌入式软件,包含状态自检、异常保护、电源控制和电源采样等模块,通过 LWIP 协议与外部进行通信。

2 系统硬件设计

基于数字均流的大功率直流电源结构主要包含大功率直流电源模块及后端供电主控软件,如图 2 所示。大功率直流电源模块将 380V 交流电进行转换后,通过电缆和脱插与航天器进行连接,向航天器提供配电支持,模块内部包含多个直流电源,以并联的方式连接在一起,各个直流电源均具备数字控制采样的功能;供电主控软件位于供电主控设备上,通过以太网的方式与大功率直流电源模块进行数据交互,对整个数字均流系统进行控制,均流算法运行于供电主控软件中。

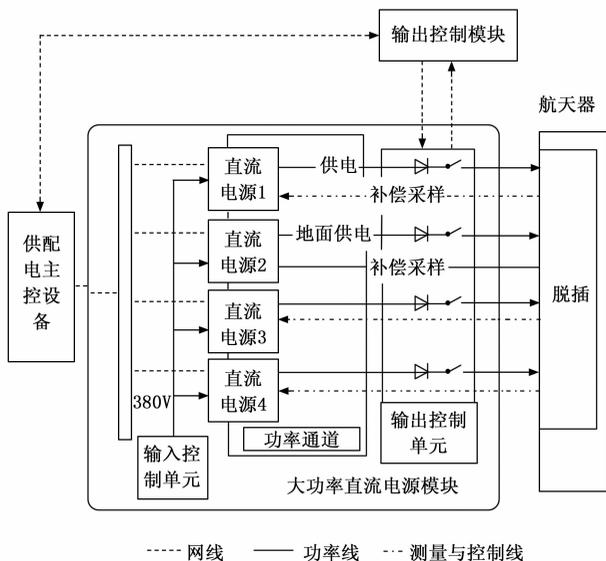


图 2 直流电源系统结构图

输出控制单元。输入控制单元负责接收 380 V 的交流电,采取保护措施后,给功率通道中的直流电源模块供电;功率通道由稳压直流电源构成,该电源为高精度可编程直流电源,具备数据交换能力,负责向输出控制单元输出直流电;输出控制单元负责直接连接航天器,控制各个供电通道的通断,对输出端的电流电压进行采集并传输至供电主设备软件。

后端供电主控软件作为电源系统的主控制核心,通过 NIVISA 通信协议与直流电源模块进行通信,获取各电源模块的输出电压、输出电流等参数,供电主控软件使用均流算法计算出各直流电源模块应该调整的电压输出值,对直流电源模块进行控制,从而实现对整个直流电源系统的均流控制。

2.1 远端补偿电路设计

系统中电源模块工作于恒压模式,每台电源输出电流高达 35 A,通过长电缆传输至航天器,由于长电缆本身的电阻阻值不可忽略,航天器负载端的输入电压必然会小于电源模块的设置电压,因此采用电源远程补偿技术,保证直流电源实际输出到负载端电压符合要求,同时使得直流电源在并联输出前的电压尽量一致,在硬件上使得系统内直流电源所负载的功率相近。

4 台电源模块并联远程补偿工作如图 3 所示。4 台电源模块独立并联输出,电源均工作在远程补偿模式, V+, V- 为输出功率端子, S+, S- 为补偿测量端子, V+ 和 S+ 接到航天器负载正端, V- 和 S- 接到航天器负载负端。

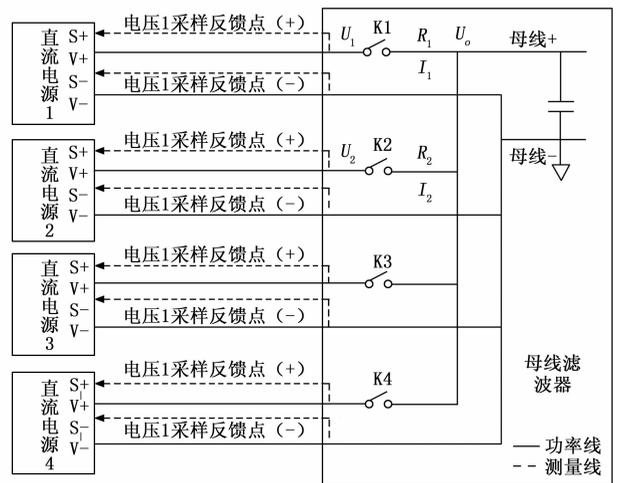


图 3 远端补偿电路图

以直流电源 1 和直流电源 2 为例,其远程补偿采样点电压为 U_1 、 U_2 ,并联后母线实际输出电压为 U_0 ,直流电源 1 输出点到并联连接点的电流和阻抗分别为 I_1 、 R_1 ,直流电源 2 输出点到并联连接点的电流和阻抗分别为 I_2 、 R_2 。

则两台直流电源的采样点电压和实际输出电压之间关系可表达如下:

$$U_1 = U_0 + I_1 \times R_1 \quad (1)$$

大功率直流电源模块包括输入控制单元、功率通道、

$$U_2 = U_o + I_2 \times R_2 \quad (2)$$

两台直流电源之间的电流差可表示如下：

$$\Delta I = \frac{U_1 - U_o}{R_1} - \frac{U_2 - U_o}{R_2} \quad (3)$$

当直流电源并联向航天器供电时，由于直流电源和输出电缆的固有差异性，其输出采样点电压和阻抗不可能完全相同，由公式 (3) 可知，不同通路之间的输出电流并不相同，在实际应用中，采样点到并联连接点的阻抗 R_1 、 R_2 数值较小，导致直流电源输出电压或者负载发生变化时，不同通路之间输出电流差异会变得较大，当 4 台直流电源并联在一起时，很容易发生单台直流电源负载过大的情况。

因此在硬件设计电路的基础上，使用数字均流技术对并联电源系统的各电源模块进行调节，保证各个电源模块所分担的航天器负载功率一致。

2.2 输出控制单元设计

输出控制单元是整个供电系统输出的关键设备，与航天器通过脱插直接相连，直接控制航天器加电和断电，并实现电源模块的远程补偿功能，具备冗余的程控指令接口、面板开关指令接口、状态和电压信号接口。输出控制单元具备远控模式和本控模式。远控模式下由供电主控设备远程控制，当接收到主控设备发来的配电指令，控制供电继电器动作，闭合或者断开四路直流供电，当接收到主控设备发来的补偿指令，控制补偿继电器动作，切换本地补偿或者远程补偿模式；本控模式可直接操作设备面板按钮。

航天器进行加电或者断电动作时，为了获得更为精准的补偿采样电压，需要切换本地补偿和远端补偿模式，电源补偿模式如图 4 所示，图中 $V+$ 、 $V-$ 为供电功率线， $S+$ 、 $S-$ 为采样线。K1 为供电接触器；K2、K3 为本地/远程补偿切换继电器；PTC 为电源内部的电阻。

当进行航天器加电时，初态为本地补偿模式。K1 为断开，即功率线为断开；K2、K3 位于本地补偿端，即断开远端采样线。供电主控设备加电控制采用固定操作流程。供电接通：先接通功率线，闭合 K1；再接通远端采样线，即切换 K2、K3 至远程补偿端。面板手动按钮作为加电备用控制方式，必须在不带载的情况下操作。加电时切换到远程补偿状态，闭合 K1，同时将 K2、K3 至远程补偿端。

当进行航天器断电时，初态为航天器上电且为远程补偿模式。K1 为闭合，功率线接通状态；K2、K3 位于远程补偿端，处于接通远端采样线状态。供电主控设备断电控制采用固定操作流程。供电断开：先断开远端采样线，切换 K2、K3 至本地补偿端；再断开功率线，即断开 K1。面板手动按钮作为断电备用控制方式，必须在不带载的情况下操作。断电时切换到远程补偿状态，即断开 K1，同时将 K2、K3 至本地补偿端。

3 系统软件设计

3.1 软件总体设计

供配电主控软件运行在供配电设备上，负责所有的航天器供配电功能实现，通过网络接口与外部进行通信，主

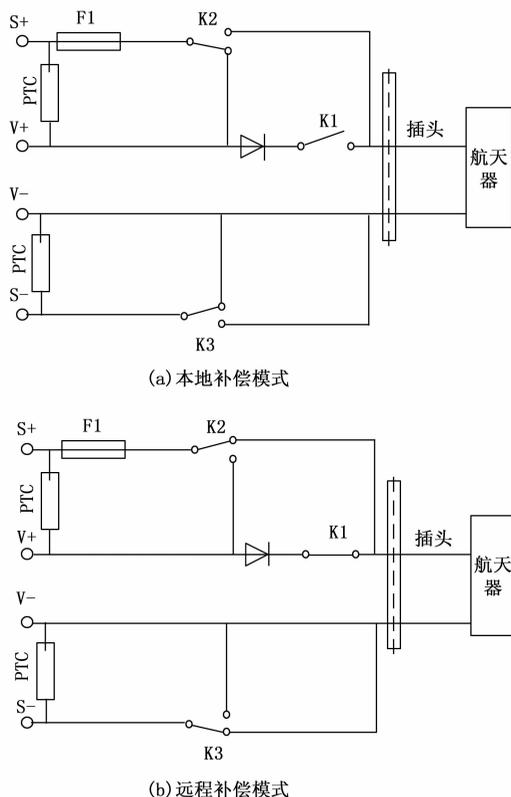


图 4 电源补偿模式原理图

要包含均流控制功能、供配电流程功能和电源模块监控功能。软件在设计时遵循层次化、模块化以及解耦化原则，便于开发与调试^[15-16]。软件层次架构如图 5 所示。

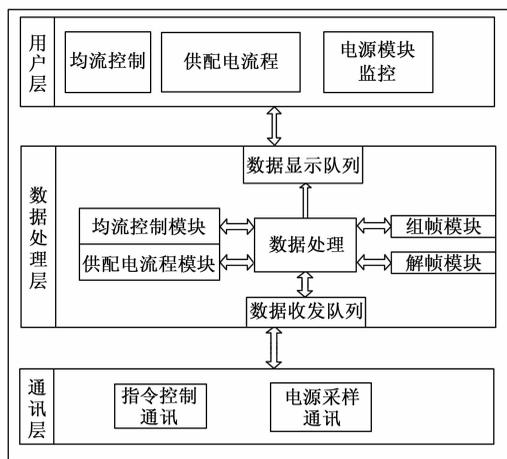


图 5 软件总体框架图

均流控制功能负责整个航天器加电过程中的各直流电源输出调控，是供配电主控软件的核心。当系统状态准备完毕，具备向航天器加电条件时，均流控制模块会对接收到的电源模块电压、电流和电源状态进行分析比对，通过均流算法按固定频率对不同的电源模块分别进行增加电压、维持不变和降低电压的调整，从而保持各个电源模块所负

载的功率相近, 当均流模块检测到参与均流的电源出现过压、过流或者其它异常状态时, 会自动将故障电源踢出均流队列, 在均流模块界面中可以对均流频率、电压步进幅值和参与均流的电源进行配置。

供配电流程模块负责航天器的自动供配电功能, 负责为航天器在加电过程中跟随测试流程进行电源输出、电压调整等动作, 采用模块化设计, 将电源设定、电源查询和输出控制等功能细分为单个指令子功能, 可通过指令子功能配置航天器供电流程、紧急断电流程和航天器电压切换流程。

电源模块监控功能负责接收直流电源模块的模拟量信息和状态信息, 是人机交互的重要部分, 包含电源通道选择、电压电流显示、远控本控和电源状态的显示, 同时可对电源异常状态及电压电流超限状态进行报警提示。

3.2 软件通信设计

使用数字均流的方法对直流电源系统进行均流, 如何制定通信协议和交互方式进行实时可靠的数据交换是均流系统设计重点^[17]。

主控制软件与直流电源系统进行数据交互主要有以下 3 种数据流:

- 1) 主控制软件需要获取各直流电源的电压、电流等参数, 通过均流计算对各直流电源进行调整^[18-20];
- 2) 主控制软件需要获取各电源的状态信息, 当发现有过压、过流、过温、电源故障时, 及时对故障电源进行处置, 并对剩余直流电源进行重新均流。
- 3) 直流电源模块可以接收主控制模块发来的电压、过压保护、过流保护等设置指令, 对模块输出电压等状态进行调整。

如图 6 所示, 本文设计的直流电源系统是一个分布式的系统, 系统内的电源模块彼此独立, 各模块之间无通信连接, 参与均流的电源模块具备动态扩展的能力, 因此数字均流的通讯方式必须具备实时、远程、易接入、易退出等特点, 便于前后分离的供配电主控计算机通过网络方式进行实时性、可靠的控制。

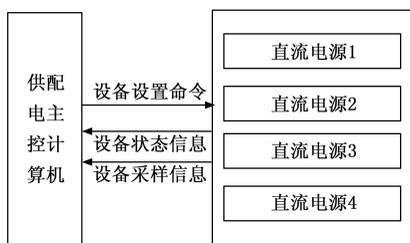


图 6 数字均流系统信息流图

供配电主控软件通过对 NI-VISA 协议的二次封装的方式, 实现对直流电源系统的控制和采样。

其中数据采样为主动式采样, 通过主控软件主动向电源发起查询指令, 读取电源返回参数获得, 采样频率与均流频率相一致; 电源参数设置由主控软件向电源发送控制

指令, 并通过采样参数确认指令执行是否合格。

与直流电源通信的接口具体包括:

- 1) 打开电源: 通过输入不同的直流电源地址, 打开设备, 实现对设备的操控, 地址为字符串类型, 地址可在直流电源模块近端通过面板设置;
- 2) 设置保护电压 OVP: 防止电源对航天器上较为灵敏的器件输入过高的电压;
- 3) 设置保护电流 OCP: 通过限制最大输出电流, 避免大电流对航天器和电源本身造成破坏;
- 4) 控制输出电压: 通过均流算法计算后, 针对单台直流电源输出电压进行调整;
- 5) 查询输出电流: 获取每台电源的输出电流值, 以便主控软件进行均流计算;
- 6) 查询电源状态: 获取每台电源的当前状态, 主控软件可对故障软件进行处置并重新进行均流;
- 7) 关闭电源: 通过输入不同的直流电源地址, 关闭电源控制, 电源地址为字符串类型。

3.3 数字均流模块设计

基于数字均流的原理, 开发了供配电主控软件, 该软件实现均流的过程如图 7 所示, 具体如下:

- 1) 设置电源输出电压 U_0 , 均流步进电压 ΔU , 最大允许误差 I_c , 均流频率 F ; 监测各直流电源输出电流 I_0 , 电源状态;
- 2) 检查各直流电源状态是否正常输出, 当存在过压、过流、故障的情况, 停止电源输出并关闭异常电源, 将异常电源剔除均流电源组, 对剩余电源重组均流电源组;
- 3) 当均流电源组电源数量小于两台的时候, 停止均流, 电源数量大于等于 2 台时, 均流继续执行;
- 4) 计算得到均流电源组平均输出电流 I_{avg} , 将平均电流与各直流电源输出电流进行比较, 得到最大偏差电流 ΔI_{max} 和对应的最大偏差直流电源, 对该偏差最大的直流电源进行调整, 调整方式为增大或减小电源输出电压间接实现对电流的调整;
- 5) 当 $\Delta I_{max} < I_c$, 即偏差在允许范围内时, 对电源输出电压不做调整, 当 $\Delta I_{max} > I_c$ 时, 如果输出电流小于平均电流, 则按步进值增加电源输出电压, 如果输出电流大于平均电流, 则按步进值减小电源输出电压;
- 6) 调整完毕后, 进入下一轮的均流过程, 均流频率为 F , 经过多次调整, 最终使得直流电源系统可以稳定地实现均流输出。

4 试验验证及结果分析

为验证航天器大功率直流电源系统的均流效果, 在等效器环境下使用电子负载模拟航天器负载变换情况进行了均流实验, 直流电源系统通过供电长电缆与电子负载进行连接。实验采用 4 台远程可编程高精度直流电源组成并联系统, 电源远端程控精度为 4 mV, 输出采样端精度为 0.05 A, 采用 4 台电子负载, 2 台 PLK-5 kW 电子负载, 2 台 PLK-2.5 kW 电子负载。

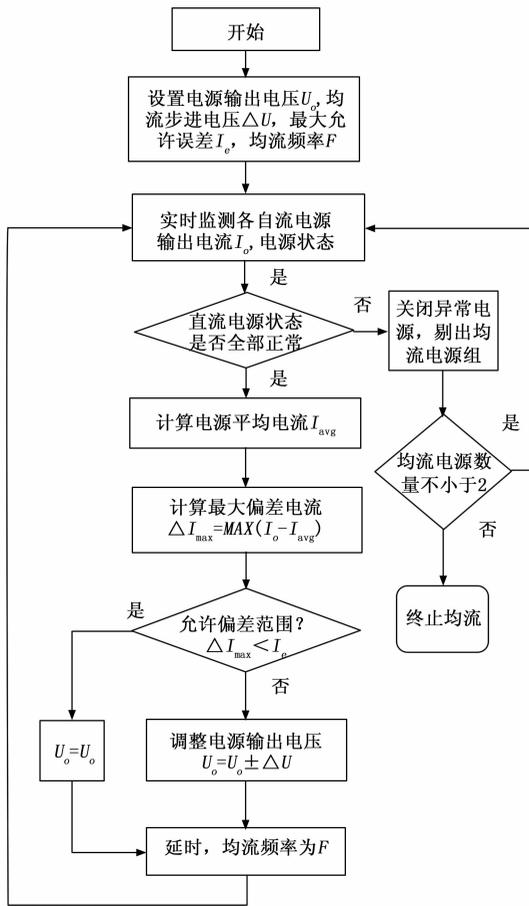


图 7 均流控制流程图

同时设计了单电压变化均流实验、单负载变化均流实验、直流电源故障模拟均流实验及步进电压变化均流实验共 4 项实验分别模拟真实环境下 4 种工况, 验证数字均流的均流性能及效果:

4.1 单电压变化均流实验

航天器真实输出电压在 80~106 V 之间, 本实验考核直流电源输出电压在该范围的变化时的系统均流性能。直流电源输出电压调整通过后端供电主控软件发送指令的方式调整, 参与均流的直流电源为 4 台, 电子负载功率设定为 5 kW, 步进电压为 6 mV, 电流最大允许误差设置为 1 A, 均流频率设置为 10 Hz。

试验结果见表 1。

表 1 单电压变化均流结果

| 输出电压/V | 总输出电流/A | 均流收敛时间/s |
|--------|---------|----------|
| 80 | 62.5 | 1.11 |
| 90 | 55.5 | 1.23 |
| 100 | 50.5 | 1.22 |
| 106 | 47.1 | 1.25 |

4.2 单负载变化均流实验

航天器所搭载单机功率并非恒定的, 在不同的试验环

境、不同测试项目下, 所需功率变化很大, 本实验考核负载变化时系统均流性能。负载的变化通过电子负载进行调整, 参与均流的直流电源为 4 台, 直流电源输出设定为 100 V, 步进电压为 6 mV, 电流最大允许误差设置为 1 A, 均流频率设置为 10 Hz。

试验结果见表 2。

表 2 单负载变化均流结果

| 负载功率/kW | 总输出电流/A | 均流收敛时间/s |
|---------|---------|----------|
| 1 | 10.2 | 1.17 |
| 4 | 39.8 | 1.26 |
| 7 | 70.1 | 1.35 |
| 10 | 101.2 | 1.09 |

4.3 直流电源故障模拟均流实验

本实验考核直流电源系统中电源模块异常时的均流能力。直流电源异常通过手动关闭直流电源进行模拟, 参与均流的直流电源为 4 台, 最大可关闭数量为 2 台, 直流电源输出设定为 100 V, 负载为 5 kW, 步进电压为 6 mV, 电流最大允许误差设置为 1 A, 均流频率设置为 10 Hz。

试验结果见表 3。

表 3 直流电源故障模拟均流结果

| 电源故障数量/台 | 总输出电流/A | 均流收敛时间/s |
|----------|---------|----------|
| 0 | 49.8 | 1.31 |
| 1 | 50.3 | 1.27 |
| 2 | 50.2 | 1.57 |

4.4 步进电压变化均流试验

本实验考核均流调整时步进电压对均流效果的影响, 由于电源程控精度为 4 mV, 所以电源步进电压调整值从 5 mV 开始。直流电源步进电压可以通过软件界面直接设置, 参与均流的直流电源为 4 台, 直流电源输出设定为 100 V, 负载为 5 kW, 步进电压为 6 mV, 电流最大允许误差设置为 1 A, 均流频率设置为 10 Hz。

试验结果见表 4。

表 4 步进电压变化均流结果

| 步进电压值/mV | 总输出电流/A | 均流收敛时间/s |
|----------|---------|----------|
| 5 | 50.2 | 2.23 |
| 6 | 50.1 | 1.27 |
| 8 | 50.2 | 0.87 |
| 10 | 49.9 | 0.82 |
| 20 | 50.2 | ∞ |
| 30 | 50.1 | ∞ |

4.5 结果分析

通过上述试验验证, 可以得出如下结论:

- 1) 大功率直流电源均流系统可以针对不同的电压、不同的负载功率自适应进行均流调节, 保证不同电源负载功率的均衡性;

2) 均流控制能够适应部分电源卸载或故障无输出时的工况,即在4台直流电源组中,当1~2台电源正常卸载或故障时,其他电源能够继续保持均流输出;

3) 当对均流系统的步进电压、均流频率设置合适的情况下,均流收敛时间在大部分工况下小于2s;

4) 均流控制参数中步进电压值过小,则均流收敛慢,过大,则无法收敛到稳态值,最终无法均流。

5 结束语

针对航天器测试阶段的地面电源大功率供电问题,本文提出了基于数字均流技术的直流电源并联供电方法,使得系统内各电源模块平均分摊电流,该方法具备通用性强、架构简单、均流精度高等优点,同时具备较强的故障容错能力,是未来航天电源的发展方向。本文设计的数字均流方法,目前已经过某型号综测试验验证,均流效果理想,具备较高的工程实用价值。

参考文献:

[1] 王庆成. 航天器电测技术 [M]. 1版. 北京: 中国科学技术出版社, 2007.

[2] 张天芳. 开关电源的并联运行及其数字均流技术 [J]. 淮海工学院, 2006, 15 (1): 29-32.

[3] 王涵. 基于数字均流技术的大功率直流电源并联系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

[4] 吴美金, 邵琼, 王秉臣, 等. 电源并联均流技术在航天器测试中的应用 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (19): 177-183.

[5] 吴锡渊. 并联直流电源系统的均流及交错控制研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

[6] 周阳. 基于DC-DC模块并联的智慧电源系统研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2016.

(上接第261页)

[10] 付昱曦, 李红莲, 王赏玉, 等. 建筑节能分析用典型年数据的获取方法 [J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2021, 53 (1): 147-154.

[11] 陈思伊. 西安地铁车站热环境评价及设计温度研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.

[12] 住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB50157-2013 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[13] 吴嘉钰. 利用活塞风降低地铁站通风空调系统能耗的潜力研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.

[14] 武创. 基于BP神经网络的重庆市轨道交通客流预测分析 [D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

[15] GHOLAMI R, FAKHARI N. Support vector machine: principles, parameters, and applications [M]. United States: Academic Press, 2017: 515-535.

[16] WANG Y, LI X. Unorganized ventilation in subway stations with platform screen doors [J]. Building and Environment, 2017, 125 (15): 556-564.

[17] YANG L, ZHANG Y, XIA J. Case study of train-induced airflow inside underground subway stations with simplified field

[7] 万英英, 郑列. 大功率直流电源并联均流技术研究 [J]. 现代计算机研究与开发, 2018, 10 (1): 16-19.

[8] 方唱凯, 王卫国, 郭显鑫. 国外星载大电流直流开关电源均流技术综述 [J]. 航天器工程, 2021, 30 (2): 128-135.

[9] 王朴, 崔文和, 梁贵芬. 卫星电源系统放电调节模块并联均流技术研究 [J]. 电源技术, 2014, 38 (10): 1979-1982.

[10] 王明玥, 温鑫鑫, 于洪泽, 等. 一种高频开关电源系统的并联均流控制方法 [J]. 电气传动, 2019, 49 (1): 68-82.

[11] 张强, 张敬南, 姚绪梁, 等. 双均流母线的均流电路及其控制方法 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35 (2): 202-207.

[12] 王燕. 基于载波频率的高频电流传感器均流控制系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (8): 111-115.

[13] 王庆, 生斌, 同朴超. 一种新型大功率直流电源的均流技术 [J]. 电力电子技术, 2023, 57 (12): 36-39.

[14] 段洵宇. 基于数字均流的大功率低频发射机电源并联系统研究与设计 [D]. 北京: 中国舰船研究院, 2023.

[15] 金天贺, 韩丙同, 张小廷, 等. 基于LXI总线的热电偶采集系统设计与应用验证 [J]. 计算机测量与控制, 2023, 31 (10): 247-254.

[16] 王有春, 许昕, 谢芳, 等. 基于ZYNQ的全冗余高速箭地通信装置设计 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (7): 213-222.

[17] 刘天翔, 邹晓渔, 戴钱坤. 大功率雷达电源并联均流技术的研究 [J]. 计算机仿真, 2012, 29 (1): 21-24.

[18] 杜炜, 王聪, 何安然. 一种新型均流技术在并联Buck变换器中的应用 [J]. 电力电子技术, 2011, 1 (1): 9-14.

[19] 张亮, 陈润睿. 平均电流法均流在数字DC/DC电源中的应用 [J]. 电源技术, 2012, 6 (1): 858-897.

[20] 刘健, 程红丽, 王立, 等. 电流跟踪数字控制的Buch DC-DC变换器 [J]. 电工技术学报, 2011, 8 (1): 50-56.

[21] test methods [J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 37: 275-287.

[18] 鲜少华. 屏蔽门地铁站公共区空调负荷影响因素分析 [J]. 都市轨道交通, 2014, 27 (5): 104-107.

[19] 龚冀杰. 地铁区间隧道温度特性及其对站台环境的影响 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.

[20] 辛伟宁. 活塞风与机械风耦合作用下的地铁站台热环境研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2009.

[21] GAMAL M, SADEK N, RIZK M R M, et al. Delay compensation using Smith predictor for wireless network control system [J]. Alexandria Engineering Journal, 2016, 55 (2): 1421-1428.

[22] YANG X S. Harmony search as a metaheuristic Algorithm [J]. Springer Berlin Heidelberg, 2009, 191: 1-14.

[23] LEE S, HWANGBO S, KIM J T, et al. Gain scheduling based ventilation control with varying periodic indoor air quality (IAQ) dynamics for healthy IAQ and energy savings [J]. Energy and Buildings, 2017, 153 (15): 275-286.

[24] 董欣然. 基于改进和声算法的三维模型 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2021.