

一体化、模块化的综合控制系统 供配电设备方案设计

徐宫健¹, 李秋芳¹, 王薇², 傅季安¹, 郭照峰¹

(1. 北京航天测控技术有限公司, 北京 100041;

2. 火箭军装备部驻北京地区第一军事代表室, 北京 100076)

摘要: 供配电设备是综合控制系统的重要组成部分, 为综合控制系统提供直流供电, 以及对综合控制系统所属设备进行配电控制; 采用供配电一体化设计, 将供电和配电功能集成在一个军用加固机箱里, 有效控制了体积和重量, 提高了功率密度, 在设备小型化和智能化方面有所突破; 供电部分采用了模块化设计, 各电源模块内部采用相同的功能电路, 提高了产品的标准化和互换性, 提高了设备的维修保障性。

关键词: 一体化; 模块化; 综合控制系统; 供配电; 方案设计

Design of Power Distribution Scheme for Integrated Control System on Integration and Modularity

XU Gongjian¹, LI Qiufang¹, WANG Wei², FU Ji'an¹, GUO Zhaofeng¹

(1. Beijing Aerospace Measurement & Control Technology Co., Ltd., Beijing 100041, China;

2. First Military Representative Office of the Rocket Army Equipment Department in Beijing, Beijing 100076, China)

Abstract: Power distribution equipment is an important component of the integrated control system, it provides DC power supply for the integrated control system, and controls the distribution of equipment belonging to the integrated control system; The equipment adopts integrated design, integrating power supply and distribution functions into a military reinforced box, which effectively controls its volume and weight, and improves its power density, achieving breakthroughs in equipment miniaturization and intelligence; The power supply adopts modular design, and each module uses the same functional circuit, which improves the standardization and interchangeability of products, and it increases the maintenance guarantee of equipment.

Keywords: integration; modularity; integrated control system; power distribution; scheme design

0 引言

供配电设备是综合控制系统中的重要组成部分, 主要用于为综合控制系统提供直流供电, 以及对综合控制系统所属设备进行供配电控制。本文对综合控制系统所属供配电系统向小型化、智能化、标准化方向发展进行设计研究, 保证整个综合控制系统供配电的安全、可靠^[1-4]。

1 供配电方案设计原理

供配电设备采用一体化设计思想, 将供电功能和配电功能集成在一个军用加固机箱里, 实现对综合控制系统供配电的统一管理。

供电部分主要功能是将 19~32 V 直流输入转换为两组 24 V 隔离输出, 且每组输出功率不小于 1 500 W; 具有输出过压、过流保护功能; 将电源模块的实时电压、电流及工作状态等参数通过 RS485 通讯传输给配电控制。

配电部分由配电控制模块、采集调理模块和控制器模

块三部分组成。主要功能是具备程控或手动控制 7 路输出通道继电器的通断, 实现对用电设备的配电控制。具备将回路的继电器的开关状态和电源组一和电源组二的电压、电流等参数上传至主控制器模块, 并通过网络上传给上位机。具备通过面板指示灯显示电源输出情况和配电输出状态^[5-6]。

供配电设备总体设计方案如图 1 所示。电源输入电压从输入接口给供配电设备供电, 当电源开关闭合时, 继电器吸合, 电源模块开始工作, 每三个电源模块的输出并联在一起, 形成两组 (各 1 500 W) 输出, 并在面板上显示其输出状态。两组输出经配电控制后分别给 7 路设备供电, 可以分别独立控制每一路的输出, 7 路设备分别对应一个状态指示灯, 输出接通后相应指示灯点亮。

7 路用电设备的功率要求为, 控制计算机 1 不小于 300 W, 信息组合 1 不小于 600 W, 语音设备不小于 100 W, 信息组合 2 不小于 600 W, 卫通伺服与功放不小于 600 W,

收稿日期: 2023-09-19; 修回日期: 2023-10-09。

作者简介: 徐宫健(1987-), 女, 大学本科, 工程师。

引用格式: 徐宫健, 李秋芳, 王薇, 等. 一体化、模块化的综合控制系统供配电设备方案设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 167-172, 187.

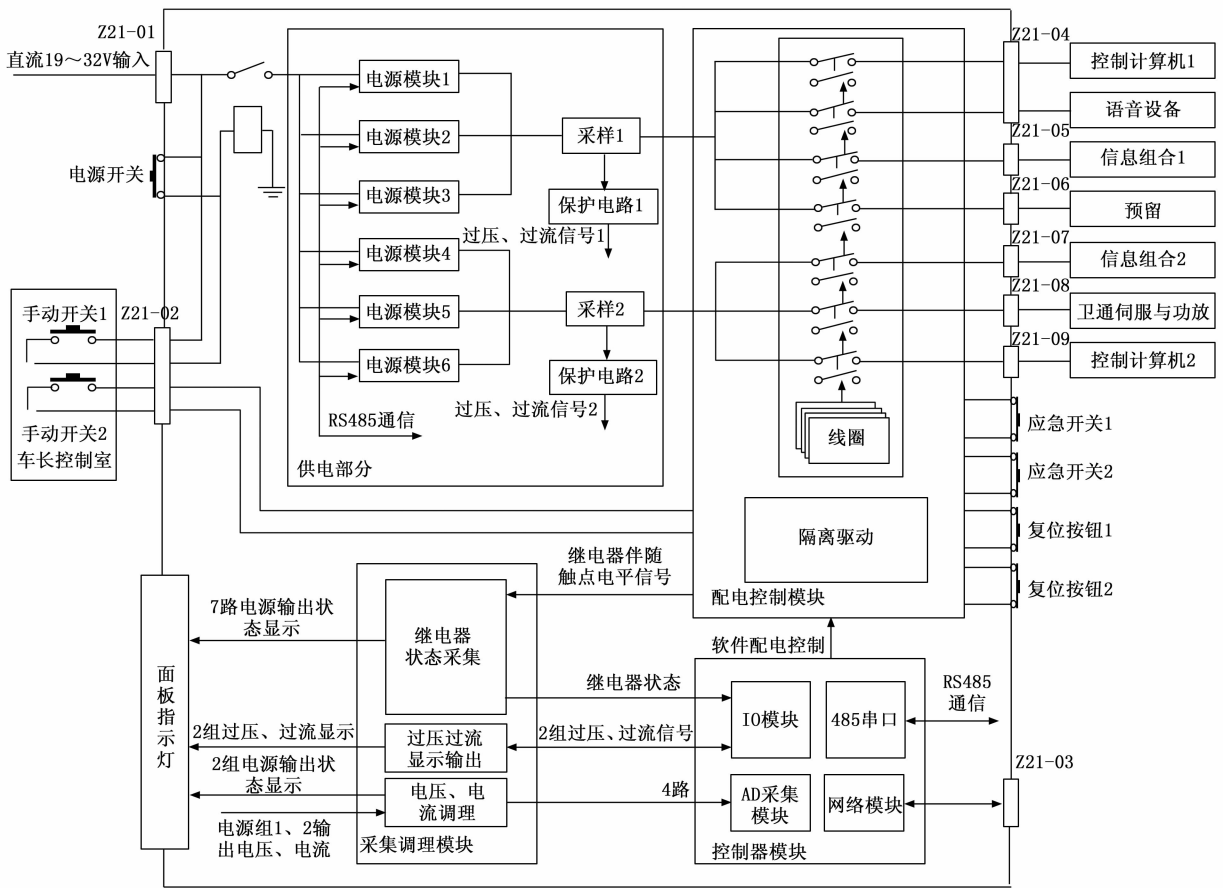


图 1 供电设备原理框图

控制计算机 2 不小于 300 W，预留不小于 300 W。

2 详细方案设计

2.1 供电部分设计

供电内部包含了 6 个隔离电源模块，将每个电源模块设计额定输出功率为 500 W，每 3 个电源模块并联为一组，采用均流输出，实现两组独立电源通道（两路之间不共地），每组功率 1 500 W。为了提高电源的可靠性、通用性和标准化程度，电源模块的结构设计及电路设计完全相同，可以互换^[7]。

同时对每组电源输出设计了过压、过流保护功能。当输出电压达到 26 ± 1 V 或输出电流达到 66 ± 1 A 时，进行输出过压或过流保护，电源模块停止工作；同时电源模块具有复位功能，当过压或过流消失后按下复位按钮，电源模块恢复正常工作。

2.1.1 单电源模块电路设计

电源模块的工作原理如图 2 所示，包含输入滤波、功率转换、控制电路、辅助电源和输出滤波等。

输入滤波电路包括了低通滤波电路、高通滤波电路和 EMI 滤波器。低通滤波电路的作用是平滑输入电压的脉动以及保证在输入电压短暂中断时电源仍能正常工作；高通滤波电路的作用是滤除外界噪声经电源线耦合进来的高频

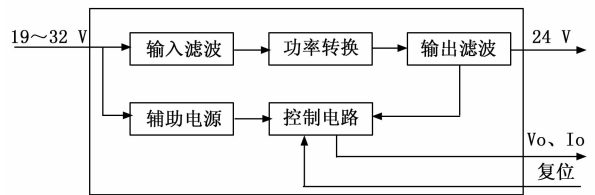


图 2 电源模块原理框图

传导辐射干扰；EMI 滤波器的作用是抑制后级功率变换单元产生的共模噪声通过电源线向外扩散，避免影响同一个供电系统中的其它用电设备，同时降低共模位移电流对电源线造成的差模干扰，增强电磁兼容性^[8-11]。

辅助电源的作用是将输入 24 V 供电转换为 ± 12 V 和 +5 V 输出，给电源模块控制电路供电。

输出滤波采用了无源滤波设计，可以有效过滤共模噪声、开关频率的高次谐波以及功率二极管的恢复噪声等频率较高的干扰信号。

下面详细介绍功率转换和控制电路设计。

2.1.1.1 功率转换单元设计

功率转换单元是整个电源模块的核心，主要完成输入直流电压到输出直流电压的隔离转换，对整个电源模块的可靠性、输出效率、电磁兼容性等方面有直接而重要的影

响,很大程度上决定了电源的整体品质。因此在设计过程中,继承军用型号电源的成功经验,选择成熟可靠的电路方案。

1) 主电路设计: 电源主拓扑采用了交错并联的单端正激电路形式,其结构如图 3 所示。电路主要由两部分结构完全相同的双管正激变换器组成,每路变换器包括功率开关管、变压器、磁复位单元、无源吸收电路、整流器、二阶滤波器部分,2 路变换器相差 180° 交替工作,并在整流二极管后并联输出^[12-13]。

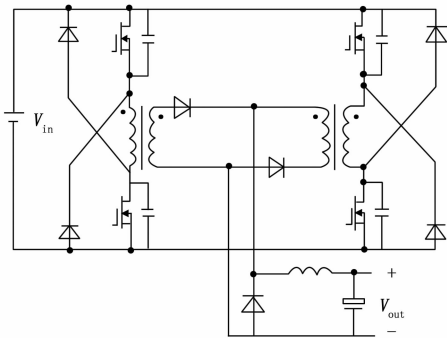


图 3 功率转换器主拓扑结构图

由于变换器的功率开关管不存在直通现象,大大提高了开关管的安全系数,电源的整体可靠性较高;两路变换器交错并联,相位上互差 180° 相位角,这样避免了单个双管正激电路工作占空比不能大于 50% 的缺点,提高了滤波电感的工作频率,减小了损耗,降低了输出纹波;功率变压器处于单边激磁状态,因此磁损较低,提高了整体变换效率;在功率开关管关断瞬间,功率开关管与其并联的电容形成通路,降低了其源-漏极之间的电压变化率,减少了开关噪声,提高了电磁兼容性。

2) 驱动控制策略设计: 由于开关功率变换器通常采用脉冲宽度调制方式工作,在电源的输出电压非常低或负载电流非常小的情形下,变换器的占空比较小,开关管的栅极驱动脉冲也很窄。此脉冲经由栅极充放电电阻与栅极电容形成的一阶滤波器作用,将引起上升沿延迟和幅度的下降。一旦驱动脉冲的电压幅值临近场效应管的导通电压阈值时,由于驱动能力不足, MOSFET 将在线性区和开关区频繁切换,导致效率降低并带来强烈的电磁噪声干扰,并且影响反馈控制回路的稳定性。在传统双管正激电路中,上下管的 2 路驱动脉冲在相位上是完全同步的,因此上述驱动脉冲过窄的问题依然存在。

本电源采用新颖的交迭相位驱动 (Phase-Overlapping-Drive) 技术,有效避免了上述问题,其工作原理如图 4 所示,原始脉冲 V_{gB} ($t_0 \sim t_2$) 经纯滞后环节处理后,生成脉冲 V_{gA} ($t_1 \sim t_3$),分别驱动功率变换器的上、下开关管。两路脉冲共同为高电平期间 ($t_1 \sim t_2$),变换器方能自源侧向负载侧传送能量。采用此驱动技术后,低压模块的低端输出电压可低至 0.2 V,高压模块的低端输出电压可低至 1.0 V,从而实现了电源的大范围稳定输出。

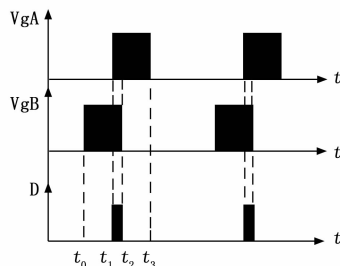


图 4 交迭相位驱动示意图

2.1.1.2 控制电路设计

控制电路以 FPGA 为核心构成,主要功能包括对电源的输出变量及状态进行采样和检测;根据输出设定值和实际值的变化,通过实时运算和闭环反馈来维持输出电压的稳定。

控制电路构成如图 5 所示。A/D 转换器对电源的实际输出电压、电流信号进行实时采样后,得到离散化的数字量值,并与设定值进行比较与运算,得到的结果经数字调节控制器处理后,由 PWM 发生器输出宽度可变的控制脉冲。由于此脉冲信号的占空比在 $0 \sim 100\%$ 之间变化,而正激变换器的最大工作占空比不能超过 50%,所以该信号需经 2 分频处理后进行脉冲分配,将 1 路重复频率为 f 的开关信号转换为 2 路重复频率为 $f/2$ 、相位相差 180° 的开关信号,作为 2 路控制信号的原始脉冲,各自延迟后组成 4 路控制信号,分别送给 2 路功率变换器的上下开关管,进而控制电源输出电压和电流的大小。A/D 转换器输出的电压电流采样值,以及电源的实际工作状态由通讯接口上报给上位机,并在前面板进行实时显示^[14-16]。

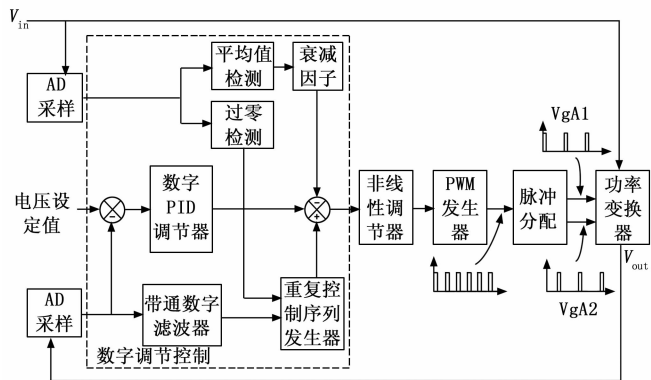


图 5 控制电路原理框图

为提高电源的输出编程精度和动态响应,在设计中采用了前馈-数字 PID-重复控制相结合的复合控制方法,大大改进了传统单一调节器的控制性能。输出电压 V_{out} 经过 A/D 转换得到的数字量与电压设定值比较,其差值送给数字 PID 调节器进行比例-积分-微分调节,同时输出电压通过 100 Hz 带通滤波器取出其低频脉动成分,并由重复控制序列发生器处理后,与 PID 调节器的输出叠加。而输入电压 V_{in} 的直流脉动电压经平均值运算和一定比例衰减后,

与 PID 调节器的输出相减，并最终经非线性调节器处理后生成输出控制量。当负载电流变化引起输出电压改变时，数字 PID 调节器可以快速响应这种变化，并立即进行占空比补偿，使得输出电压恢复稳定。当输入直流电压发生变化时，前馈环节可以直接针对变化量的大小而改变输出控制量的大小。

由于输入电压中可能含有规则变化的低频脉动成分，重复控制序列发生器可对这种有规律的扰动进行预判，并在每个工频周期进行适当的补偿，从而降低了输出电压中低频成分的影响。

2.1.2 保护电路设计

每组电源输出均具有过压、过流保护功能^[17-18]。电源模块并联汇流后增加电压、电流检测电路，当产生过压或过流信号时，电源模块关断输出。电源模块具有复位功能，当过压或过流消失后按下复位按钮，电源恢复正常工作。

输出过压（过流）保护电路如图 6 所示，将输出电压信号作为比较器 N1 的同相端电压，比较器 N1 的反相端为基准电压，当同相端电压高于反相端的基准电压时，N1 输出高电平，触发可控硅 V1 导通，V1 导通后将 V7 基极电压拉低，V7 关断，此时 Monoff 悬空，电源模块输出将关断。由于可控硅为单向控制器件，因此此保护状态将被锁定，除非电源重新加电或者按下复位按钮电源才能恢复工作。

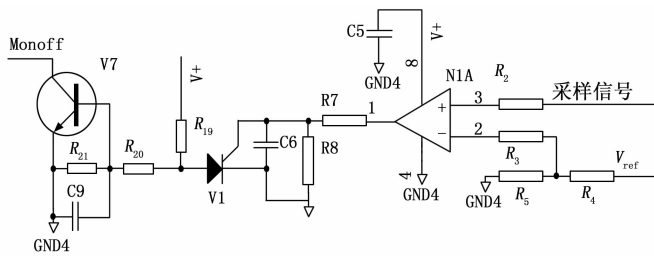


图 6 过压（过流）保护电路

2.2 配电部分设计

配电部分由配电控制模块、采集调理模块和控制器模块三部分组成。主要功能是具备够程控或手动控制 7 路输出通道继电器的通断，实现对用电设备的配电控制。具备将回路的继电器的开关状态和电源组一和电源组二的电压、电流等参数上传至主控制器模块，并通过网络上传给上位机^[19-20]。可通过面板指示灯显示电源输出情况和配电输出状态。

2.2.1 配电控制模块

配电控制方式分为三种，分别是手动开关配电控制，应急开关配电控制和软件配电控制。

2.2.1.1 手动开关配电控制功能

手动开关有两个，手动开关 1 直接给电源部分配电，手动开关 2 对控制计算机 1、语音设备、信息控制组合 1、信息控制组合 2、卫通伺服与功放、控制计算机 2 和预留等 7 路进行一键配电控制。

由于第一组电源与第二组工作方式相同，因此以第一

组为例说明该部分的实现原理，如图 7 所示。手动开关 2 闭合后，控制继电器的常开触点吸合，第 1 路~第 4 路的继电器线包产生驱动电流，相对应的 4 路输出继电器导通。同时控制继电器的另外一组常开触点也同步吸合。

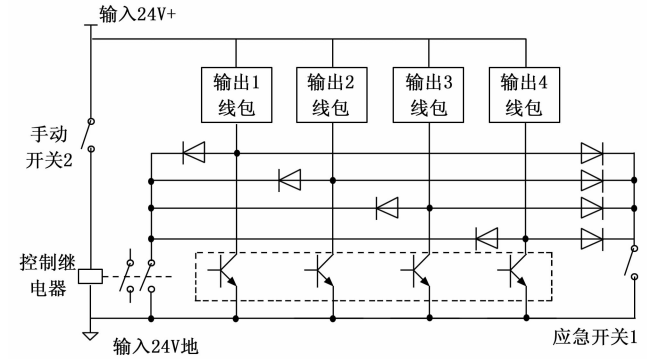


图 7 配电控制单元方案简图

2.2.1.2 应急开关控制功能

应急开关共两个，其中应急开关 1 可以实现对第一组电源负载进行一键应急配电控制；应急开关 2 可以实现对第二组电源负载设备进行一键应急配电控制。

实现原理如图 7 所示。为提高可靠性，尽量减少元器件数量和中间环节，每个应急开关均采用两组双刀双掷低压开关触点并联方式工作，对各个输出继电器组进行直接通断控制，而未采用控制继电器间接控制的模式。触点并联一方面降低了每个触点的电流定额，另一方面实现了连接点的冗余^[21]。

2.2.1.3 软件配电控制功能

软件配电控制功能指控制器通过接收上位机控制指令，实现对控制计算机 1、语音设备、信息控制组合 1、信息控制组合 2、卫通伺服与功放、控制计算机 2 和预留等用电设备的配电控制。软件配电具有保持功能，配电指令发送至配电控制模块后，模块内部将配电状态锁存，当控制器发生故障复位或者死机时，配电控制模块保持原输出状态。

控制器通过数字量输出控制光耦进行传递，控制各路按照指定加电顺序依次输出。对用电设备，软件配电控制可分别独立控制每一路输出，采用了达林顿阵列进行驱动，配电驱动部分的工作原理如图 8 所示。当软件控制信号为低电平时，继电器线包未导通，继电器处于断开状态，对应路的用电设备断电。当软件控制信号为高电平时，继电器线包导通，继电器处于接通状态，对应路的用电设备加电。

2.2.2 采集调理模块

采集调理模块的功能包括采集电源组一和电源组二输出的电压和电流，采集 7 路配电继电器通断情况等。

1) 两组电源输出电压电流采集：对电流进行采样时，在其输出线上串联电流型霍尔传感器，霍尔传感器将电流转换成电压信号提供给控制器的 AD 采集模块；对电源组输出电压采用高精度电阻进行分压，后经运算放大器及光

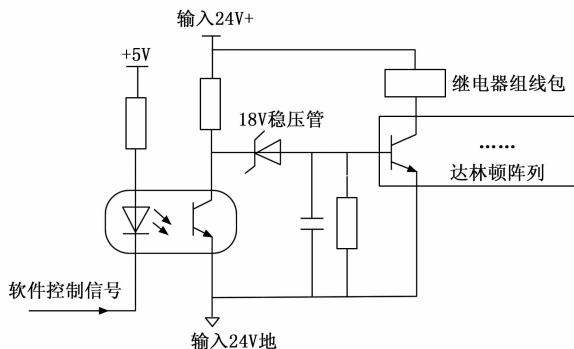


图 8 配电控制原理简图

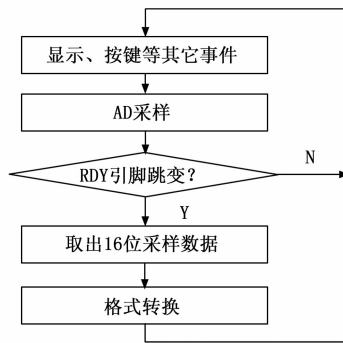


图 9 主程序循环流程图

耦进行隔离转换后提供给控制器的 AD 采集模块, 同时点亮面板电源指示灯。

2) 7 路继电器状态采集: 继电器通断情况通过继电器伴随触点进行采集, 当继电器输出时, 伴随触点闭合, 输出 +5 V 至控制器的 IO 采集模块, 同时点亮面板状态指示灯。

2.2.3 控制器模块

制器模块主要功能是实现与上位机、配电控制模块和采集调理模块的通信功能。为保证系统可靠性, 控制器选用 Cortex M4 系列 ARM 处理器作为主控芯片 STM32F407。其具有 1 路 100 M 以太网网口、1 路 RS485 通信 (隔离) 及 24 路 IO 接口, 满足使用需求。

3 软件设计

3.1 电源软件设计

电源软件主要完成两大功能。一是电压电流采集功能, 通过 A/D 转换器将两路模拟信号转换为数字量。二是 RS485 通讯功能, 将电源模块的电压、电流等信息传输给配电部分。

由于电压电流采集对实时性要求不是很高, 因此通过循环查询方式完成。当程序判断 A/D 转换芯片的相应管脚电平出现跳变时, 则表明有新的转换数据出现, 处理器可通过移位操作将数据取走, 经过特定格式转换后程序进入下一个查询循环。如果在当前查询周期内芯片的相应管脚电平未出现跳变, 则程序继续处理状态显示或按键等其它事件。该程序实现的流程如图 9 所示。

为提高通讯响应的实时性, RS485 通讯的接收和发送采用中断方式完成。一旦微处理器的 UARTS 接收引脚检测到下降沿跳变时, 表明配电部分开始发送命令, 所有模块均立即跳转到串行通讯接收中断例程中, 接收中断的流程如图 10 所示。如果接收到的指令为广播指令, 则电源执行指令内容后, 无需做其他处理, 直接返回中断前的程序入口处。如果不是广播指令, 而且地址与自身地址不符, 程序也将返回中断前的程序入口处。如果命令与电源自身地址相符合, 则电源立即执行指令内容, 并准备好欲返回数据字符, 同时将发送中断请求的相应寄存器位置位。这样程序跳转出接收中断例程后, 一旦查询到发送中断请求

位被置位, 将立即进入发送中断例程中。

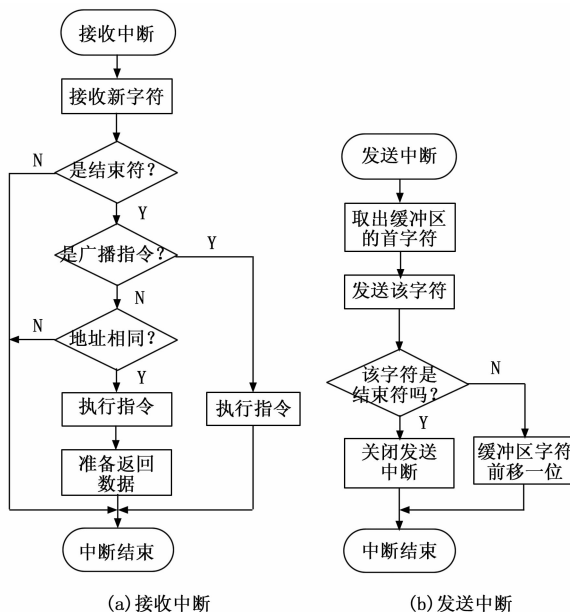


图 10 中断程序流程图

发送中断的流程如图 10 所示。处理器取出待返回数据缓冲区的首个字符, 并通过 Tx 引脚发送出去。若此字符为结束符则关闭发送中断, 以防止下一个无效中断发生。否则如果该字符不是结束符, 则表明待返回字符串尚未发送完毕, 程序将余下字符串在缓冲区内全部前移一位, 并跳出此次中断例程。待到上一个字符发送完毕后, 处理器自动产生下一个发送中断, 如此循环进行直到结束符也发送完毕为止。

3.2 配电控制软件设计

配电控制软件采用模块化设计^[19], 软件模块包括配电控制模块、信息采集模块和网络通信模块等, 主要功能如下。

3.2.1 配电控制功能

配电控制功能实现对控制计算机 1、语音设备、信息控制组合 1、信息控制组合 2、卫通伺服与功放、控制计算机 2 和预留。通过网络接收控制指令, 实现对配电模块输出的控制。

3.2.2 信息采集功能

对电源部分输出的两路电压和电流进行采集,同时能够采集每个控制输出的通断情况,通过信号调理进入到 AD 模块,然后通过网络通信将信号按照预定的通信协议进行传输,实现信息采集功能。

3.2.3 网络通信功能

通过网络通信的方式传输上位机的控制指令和嵌入式 PC 采集到的数据。按约定格式组成数据通信帧,通过网络实时向上位机发送;软件支持将采集到的数据以相同格式的文本/二进制格式存盘,用户可通过软件对数据是否在本地进行缓存进行配置。

4 结构设计

机箱采用一体化设计,整体为 19 英寸(1 英寸 = 2.54 cm)标准插箱式设计。整机结构分为上下两部分,上面是配电部分,下面是供电部分。下面的供电部分由 6 个可抽拉的电源模块组成。外形结构如图 11 所示。

电源模块结构如图 12 所示。电源模块前面板设置了 4 个安装孔,通过螺钉与整机机箱固定。模块的前面板两边安装有屏蔽条,使两个模块之间的缝隙压实,模块采取六面密封屏蔽的结构方式来减弱电磁泄露。电源模块结构设计采用机箱插拔式的形式方便拆卸,当电源模块出现故障时,只需换掉故障模块即可,并且每个模块设置独立的电源开关,更换过程中不影响其它模块正常工作。

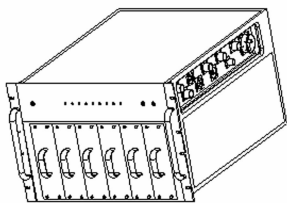


图 11 整机外观图

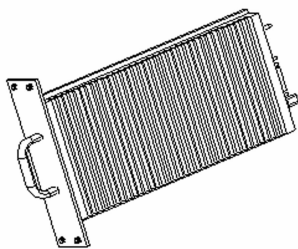


图 12 电源模块外观图

5 实验结果与分析

该供电设备已在某型号地面设备试验中得到充分验证,设计要求 2 组 24 V 供电,每组输出功率不小于 1 500 W,具备过压、过流保护功能,具备手动开关配电控制、应急开关控制、软件配电控制以及信息采集功能。实际设计结果为 2 组 24 V \pm 0.5 V 供电,每组输出功率大于 1 500 W,第一组过压、过流保护点分别为 26.22 V 和 66.20 A,第二组过压、过流保护点分别为 26.21 V 和 65.45 A,其它各项功能均满足设计要求。

采用一体化设计后设备实际尺寸为 483.00 mm \times 310.40 mm \times 550.0 mm(宽 \times 高 \times 深),空间占用少。电源的模块化设计便于拆卸,也使得维修更加方便快速。

6 结束语

本文详细介绍了综合控制系统供电一体化设计方案。通过供电一体化设计,实现装备的小型化和轻量化;通

过电源的模块化设计,提高了产品的标准化和互换性,提高了设备的维修保障性。

参考文献:

- [1] 刘飞,姚旺,欧连军. 新型航天器电气综合一体化架构研究[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(5): 263-266.
- [2] 周涛,徐洋,胡海峰,等. “长征八号”运载火箭电气系统一体化设计技术[J]. 深空探测学报, 2021, 8(1): 17-24.
- [3] 陈长风,苏国正,魏永峰. 一种基于某电子对抗车的供电一体化方案设计[J]. 移动电源与车辆, 2022(4): 26-28.
- [4] 魏建峰,刘晓斌,原芳,等. 弹发射车智能电源管理系统设计[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(1): 126-129.
- [5] 孙杰,孙兆伟,赵阳. 微型航天器模块化设计及其关键技术研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(12): 263-266.
- [6] 李绍民,邹加壮,赖厚川,等. 智能配电设备的设计[J]. 移动电源与车辆, 2023(2): 18-23.
- [7] 温星曦,殷聪如,桑尚铭. 通用化、高可靠性航天器供电测试设备的实现[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(4): 76-79.
- [8] 梁宇坤,王晓君,张佳宁. 统一化、多适应性的测控通信系统供电电子系统设计[J]. 导弹与航天运载技术, 2023, 393(2): 126-130.
- [9] 张小东,王强,邓桐彬. 车载智能供电控制设备的设计与实现[J]. 通信电源技术, 2016, 33(4): 85-90.
- [10] ZHAO Z, LI A Q, DIAO W H. Design of universal power supply and distribution ground test system based on modularity[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2369(1): 1-6.
- [11] 蔡晓东,杜青,夏宁,等. 嫦娥五号探测器供电系统设计与验证[J]. 宇航学报, 2021, 42(8): 1015-1025.
- [12] 支树播,张宇环,冯悦,等. 单端正激交错并联变换器工作模态分析与设计[J]. 电源技术, 2019, 41(1): 19-22.
- [13] 姚志树,白雪飞,徐顺清. 基于 ARM 控制的单端正激双向 DC-DC 变换器的设计[J]. 电源技术, 2014, 38(12): 2343-2345.
- [14] 韩亮,张宏德,彭越. 运载火箭地面一体化测发控系统的设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(6): 5-8, 34.
- [15] 叶思楠. 基于 Powerlink 的箭载配电器关键技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2023: 38-60.
- [16] 周建平,张鹏飞. 智能功率模块在武器装备配电系统中的应用[J]. 舰船电子工程, 2010, 30(9): 183-186.
- [17] 邹青. 高度安全可靠的潜射导弹遥测供电测控系统[J]. 舰船科学技术, 2004, 26(3): 54-56.
- [18] 张小东,王强,邓桐彬. 车载智能供电控制设备的设计与实现[J]. 通信电源技术, 2016, 33(4): 85-90.
- [19] 张洪光. 航天器供电测试设备硬件模块化、软件配置化设计思路[J]. 航天器工程, 2010, 19(1): 72-76.
- [20] 门伯龙,张若林,周楠. 航天器供电测试系统通用化设计[J]. 宇航计测技术, 2018, 48(6): 57-62.
- [21] 赵岩,杨友超,张翔,等. 航天器高可靠智能供电系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(8): 2776-2781.