

基于固态配电技术的机载测试系统配电管控单元设计

吴 凡 祁晓鹏 孙 奔
(中国飞行试验研究院 西安 710089)

摘 要: 为满足复杂机载测试系统配电管控需求,本文设计了一种基于固态配电技术的机载测试系统配电管控单元,可实现远程负载功率监控、智能配电保护等功能。采用小型化、模块化设计保证配电方案灵活扩展,单台管控单元设有 9 路 SSPC 通道,可根据飞行器测试需求,独立接入负载。利用 SSPC 可编程特点进行配电保护、开关远程投切等智能管控控制。经理论论证和实践验证,该配电管控单元可适用多种机载环境,设计方案可大幅提升机载测试工作效率和质量,在增加测试工作容错率、减少人为差错、提高维护效率等方面具有重大意义。

关键词: 机载测试;智能配电;SSPC;远程管控

中图分类号: TN709;TP213 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.5020

Design of power distribution control unit for airborne test system based on solid-state power controller technology

Wu Fan Qi Xiaopeng Sun Ben
(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: This paper designs a power distribution control unit for airborne test systems based on solid-state power controller technology, tailored to meet the power distribution control requirements of complex airborne test systems. The unit features remote power monitoring and intelligent power distribution protection capabilities. The adoption of miniaturized and modular design ensures flexible expansion of the power distribution scheme. Each control unit is equipped with 9 SSPC channels, which can be independently connected to the circuit according to the testing requirements of the aircraft. Intelligent control and management, such as power protection and remote switching, are carried out by taking advantage of the programmable feature of SSPC. With theoretical demonstration and practical verification, this power distribution control unit can be applied to various airborne environments. The design can significantly enhance the efficiency and quality of flight testing work and is of great significance in increasing the fault tolerance, reducing errors, and improving maintenance efficiency.

Keywords: airborne test; intelligent power distribution; solid-state power controller; remote control

0 引 言

随着我国航空事业快速发展,各类先进飞行器鉴定需求日益增加,为满足先进飞行器鉴定需求,机上不得不加装更多测试设备,构成复杂机载测试系统^[1-2]。传统基于接触器等硬件开关的配电系统在智能化、可靠性等方面难以满足新形势下复杂机载测试系统的配电需求,采用固态配电技术实现智能配电成为航天器的发展趋势^[3]。

美国空军自 20 世纪 90 年代初就提出在飞机上实现兆瓦级发电功率的目标^[4],将以固态功率控制器(solid-state

power controller, SSPC)为代表的一系列技术用于航空航天飞行器上。以计算机控制技术和 SSPC 为基础,实现远程负载功率控制、自动配电保护等。随着该技术日益成熟,机载配电系统逐步向模块化、小型化、智能化发展。以上优势对提高复杂机载测试系统的配电维护效率意义重大。在模块化与小型化方面,相较于飞行器原机系统,机载测试系统属于加装系统,其安装位置与空间较为受限,因此机载测试设备具有更迫切的小型化需求;加之不同种类飞行器鉴定涉及的测试数据量大小有别导致机载测试系统负载设备数量差别较大,机载测试设备模块化有利于测试方案灵活

扩展。文献[5]设计了一种高精度模拟式 SSPC,用较少的硬件电路实现了反时限过流保护电路的高精度拟合,兼具小型化和高性价比的特点。文献[6]对两种 SSPC 原型装置进行了对比研究,通过实验比较传导损耗、最大结温、功率密度、重量和体积等,认为单 MOSFET 模块器件是未来飞行器 SSPC 首选解决方案。文献[7]设计了一种新型大功率直流 270 V 固态功率控制器,采用集成式复用充放电电阻网络拓扑缩小了控制器体积,提升了可靠性。文献[8]针对卫星供电系统集成化及智能化测试需求,提出了一种集中供电监控的供配电测试设备方案,实现了测试设备模块化和小型化。在智能化方面,机载测试系统对于远程智能配电控制具有迫切需求,远程控制能够极大提高飞行器试飞保障效率,智能配电则降低了机载测试系统的黑盒性,可一定程度上提升试飞工作质量。文献[9]提出以机载采集数据为基础,结合先进算法和智能计算设备,实现对军用飞机的供配电系统故障诊断与健康健康管理。文献[10]利用生成对抗网络和社会蜘蛛算法进行太阳能配电系统故障智能检测和分类,其结果表明该检测方法在多个性能指标上均优于现有方法。文献[11]提出了一种基于云计算的配电所远程监控与故障诊断系统,用于替代人工巡检,不仅提高了配电所运维效率,减少了故障停运时间,也为电力系统的安全稳定运行提供了有力保障。文献[12]研究了配电系统低压开关的智能检测方案,实现了自动接线、一键切换电源、自动检测等无人化配电控制,极大地提升了维护效率,降低了安全隐患。上述固态配电技术在多个工业领域的推广,特别是在航空航天器的配电系统中采用固态配电控制方案对本文工作具有重要启发意义。

本文设计了一种基于固态配电技术的机载测试系统配电管控单元,可将配电电源输入 28 V DC 通过固态功率控制器转换输出供配电,配电管控单元采用小型化、模块化设计实现配电方案灵活扩展,利用 SSPC 可编程特点实现供配电及保护、开关远程投切控制等配电智能化管控功能。经理论论证和实践验证,该方案可大幅提升机载测试工作效率和质量,在增加飞行器鉴定测试工作容错率、减少人为差错、提高维护效率等方面具有重大意义。

1 配电管控单元设计

1.1 总体方案设计

配电管控单元总体方案设计如图 1 所示,可接入机上配电 28VDC 主电源输入,同时也可接入辅助电源用于应急供电;通过 SSPC 转换输出供配电,对后级负载实现配电及保护功能;具备 LAN 通信功能,可将 SSPC 通道状态上传至上位机,并接收控制指令实现通道通断控制。

典型的机载测试系统^[13]由遥测子系统、通用采集子系统、传感器子系统、记录子系统等构成。部分设备,如采集系统中的机载定位数据采集器、记录子系统中记录器等,需在主电源切除情况下保证应急供电,因此方案设有应急



图 1 配电管控单元总体方案设计

Fig. 1 Design of power distribution control unit

供电线路;机载设备配电控制需求除上下电控制外,记录子系统中还应设有信号控制线路,用于操纵数据记录启停等,因此方案还保留有由继电器控制的信号线路。

按照小型化和模块化设计需求,配电管控单元主要由 SSPC 板卡、输入输出连接器、外壳组成,其结构如图 2 所示。SSPC 板卡采用通用组件板卡,具有 9 路 SSPC 通道,其中 1 路通道用于信号线路,接有 4 路继电器,其余通道均用于设备供电,可根据飞行器测试需求,独立接入电源电路。外壳使用铝合金材料,紧固件使用奥氏体不锈钢,零部件表面采用导电氧化+黑色静电喷涂处理;输入输出接口使用配对电连接器型号,故障应急情况下可通过转接件对接输入输出端口,对测试系统进行直接供电。

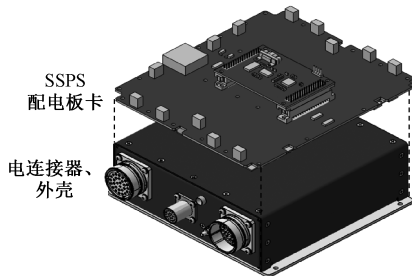


图 2 配电管控单元结构示意图

Fig. 2 Structure of power distribution control unit

1.2 SSPC 配电板卡设计

SSPC 配电板卡结构如图 3 所示。板卡由控制单元解析上位机下达的控制指令,执行各通道通/断的操作;控制单元实时采集并记录各通道工作状态,按设置执行配电保护,并按指令周期上传工况、故障、日志等信息至上位机。

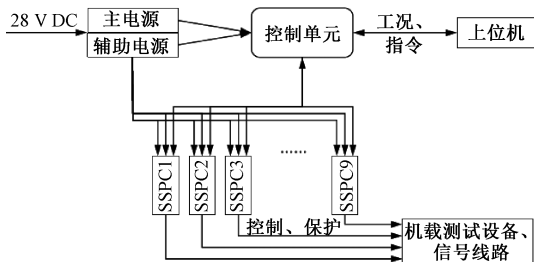


图 3 SSPC 配电板卡结构框图

Fig. 3 Structure of SSPC board

单通道硬件电路设计如图 4 所示,主由光耦驱动电路、

MOS 管驱动电路、工况采集电路(电压/电流模拟量、开路/短路跳闸保护电路等组成。SSPC 通道的额定

功率设计参考机载测试系统功耗最大的遥测子系统^[14]配电需求上限,工作电压为 18 V DC~36 V DC,额定电流 ≥ 30 A。

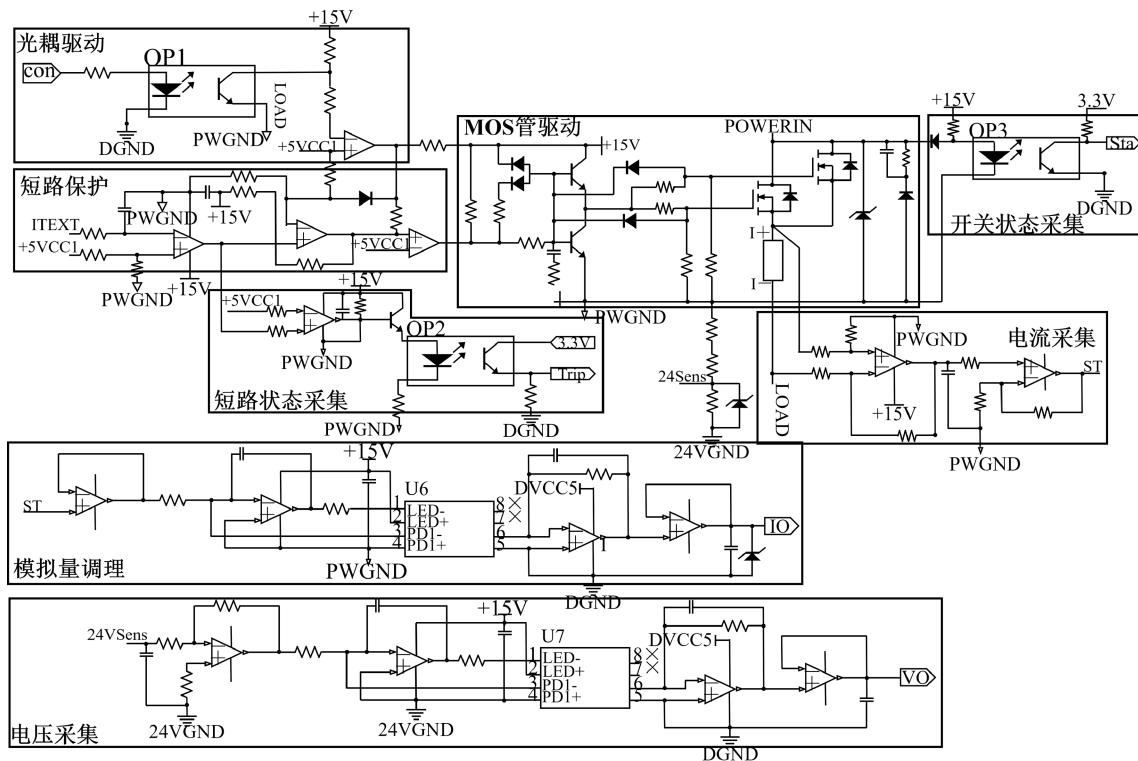


图 4 单通道硬件电路原理图

Fig. 4 Schematic diagram of single SSPC channel circuit

上位机发送控制指令后,控制单元施加电压信号驱动光耦工作。光耦正常工作时,按照 3.3 V 控制信号电压计算,可得发光二极管的驱动电流约为 10 mA,光耦驱动电流仿真结果如图 5 所示。

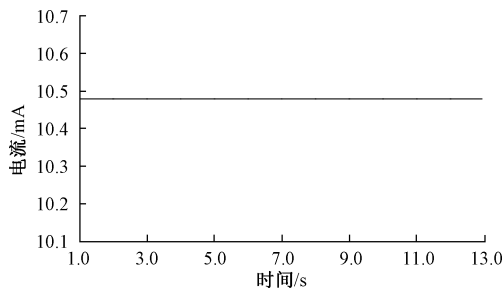


图 5 光耦驱动电流仿真结果

Fig. 5 Simulation of OC current

MOS 管驱动电路原理图如图 6 所示,采用 N 沟道场效应管双管并联分流,耐受能力为 100 V/180 A,导通时电阻为 3 m Ω 。MOS 管两端并联 RCD 保护缓冲电路,防止瞬时冲击造成部件损坏。电路正常工作时,控制信号处输出高电平,将两路 MOS 管栅极电平拉高,此时电路导通,外界输入功率电流通过两路 MOS 管接通负载。当电路异常工作时,控制信号处输出电平为低电平,MOS 管关断,

停止对负载供电。

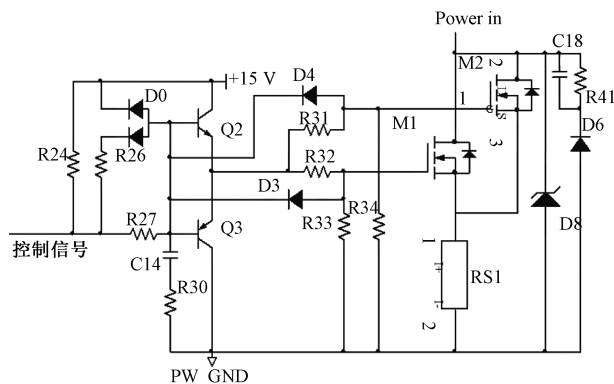


图 6 MOS 管驱动电路原理图

Fig. 6 Schematic diagram of MOSFET circuit

以 28 V/30 A 功率输入计算双管分流的理论功率损耗,采样电阻 $R_{S1} = 4$ m Ω , $P_{\text{损}} = 2 \times (0.5 \times I_{R_{S1}})^2 \times R_{DS} + I_{R_{S1}}^2 \times R_{S1} = 3.4375$ W;以 8 倍额定电流瞬时过载进行计算, $P_{\text{过}} = 2 \times (0.5 \times 8 \times I_{R_{S1}})^2 \times R_{DS} + (8 \times I_{R_{S1}})^2 \times R_{S1} = 220$ W。在瞬时 8 倍过载情况下,单管最大瞬时功率损耗 30 W,采样电阻最大瞬时功率 160 W,电路会在 250 μ s 内完成跳闸保护,这段时间热量还未累积 MOS 管就已关断,因此 MOS 管和采样电阻无损坏风险。MOS 管驱动电压

仿真结果以及不同功率输入下效率计算分别如图 7 和表 1 所示。

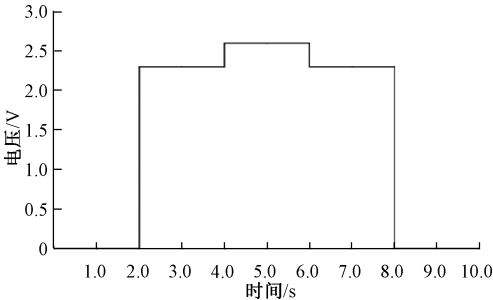


图 7 MOS 管驱动电压仿真结果

Fig. 7 Simulation of MOSFET voltage

表 1 MOS 管效率计算

Table 1 Efficiency calculation of MOSFET

输入功率 /W		额定情况		过载情况(瞬时)	
		损耗 /W	效率 /%	损耗 /W	效率 /%
28 V/30 A	600	3.437 5	99.43	220.0	63.33
28 V/15 A	360	2.587 5	99.28	165.6	54.00
28 V/10 A	240	1.150 0	99.52	73.6	69.33
28 V/5 A	120	0.287 5	99.76	18.4	84.67

电压模拟量采集时,输入电压由电阻分压后,经过两级运放调理,通过一级跟随器和光耦外围电路输入到线性光耦输入端,传输增益 $K=1$,隔离输出后,再经过光耦外围电路和一级跟随器以 3.3 V 稳压管进入控制芯片。电阻分压仿真结果如图 8 所示,模拟量采集精度为 0.1 V,采集频率 2 Hz。

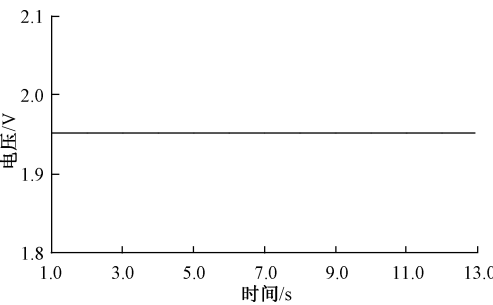


图 8 电压采样值仿真结果

Fig. 8 Simulation of voltage sampling

短路状态通过采集短路跳闸电路第一级比较器输出,将采集电压与基准电压进行比较,用比较器输出来控制三极管通断实现光耦通断,从而判断短路状态。短路状态采集电路在短路时采集到低电平,电路输出低电平;未短路时则采集到高电平,电路输出高电平。MOS 管通断状态利用 SSPC 通道通断来控制光耦通断,使输出信号高低电平发生变化,从而判断通断状态。开关状态采集电路在通道开通时光耦关断,电路输出高电平,通道关断时光耦开

通,电路输出低电平。保护电路将 MOS 管两端电压输入值与保护参考值+5VCC1 经比较器比较后输出电平比较。MOS 管正常工作时,输入值小于参考值,比较器输出高电平到 MOS 管驱动电路,通道开通。MOS 管过流或短路时异常时,输入值大于参考值,比较器输出低电平到 MOS 管驱动电路,通道关断。

1.3 SSPC 控制模块设计

SSPC 控制模块结构如图 9 所示,主要由辅助电源电路、控制单元、看门狗和时钟电路组成。辅助电源为各功能电路供电,芯片内部集成有串行总线控制器,各外部接口(具体如表 2 所示)按其使用需求设有隔离接口电路。SSPC 控制模块主要负责数据运算与信息处理,控制单元采用 5 V 供电,内核工作电源和端口电源采用低压差线性稳压器将 5 V 电源转换为 3.3 V,模拟量采集与供电电源接地用磁珠单点连接。

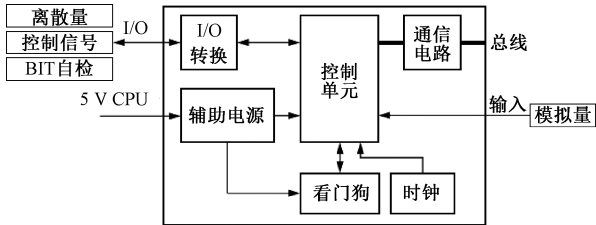


图 9 SSPC 控制模块结构框图

Fig. 9 Structure of SSPC control module

表 2 ARM 接口列表

Table 2 Interface of ARM

接口名称	源	目的	用途
离散量输入	采集电路	ARM	采集状态量
离散量输出	ARM	控制电路	控制信号、看门狗喂狗
模拟量输入	采集电路	ARM	采集模拟量
LAN	ARM	上位机	上位机通讯
RS422 通讯	ARM	调试机	数据读写、软件升级
RAM 接口	外部 RAM	ARM	RAM 数据读写
FLASH 接口	外部 FLASH	ARM	FLASH 数据读写

控制单元采用基于 ARM Cortex-M4 处理器的通用型控制板开发,使用超大规模集成电路技术^[15]把中央处理器、存储器、I/O 口、中断等电路集成到芯片内部微型计算机,接口列表如表 2 所示。ARM 内部的控制软件用于实现配电控制、配电保护、工况采集、BIT 自检与日志存储功能,具体控制参数为:接通时间 ≤ 10 ms,断开时间 ≤ 10 ms,短路保护时间 ≤ 250 μ s,过流保护启动时间 ≤ 200 ms,采集周期 1 s。控制单元还设有保护复位功能,可对产生保护的通道重新上电,通过设置复位次数、间隔等保护关键设备。

2 设计验证

2.1 热仿真分析

配电管控单元每通道额定负载 30 A,高温工作环境

条件为主要风险项,对 SSPC 配电板卡的热仿真分析结果如表 3 所示,仿真条件为环境温度 70℃,额定带载 120 A。

表 3 SSPC 功率板卡热仿真结果

Table 3 Thermal simulation results SSPC power board			
名称	最高温度 /℃	最低温度 /℃	工作温度 上限/℃
模块电源	115.07	106.83	125
MOS 管	143.36	82.55	175
线性电源	113.88	90.30	125

功率板卡温度分布云图如图 10 所示,高温区域主要集中在 MOS 管部位。

从上述热仿真分析结果可得,各模块在 70℃ 环境温度工况条件下,稳态工作时的温度均未超出允许工作温度,可满足机载环境使用需求。

2.2 电磁兼容分析

飞行器上电磁环境复杂,所有机载测试设备电磁兼容性均需要符合 GJB151B—2013 有关标准,以下对配电管控单元电磁兼容性进行分析验证。

电磁干扰主要集中在接口滤波电路上进行处理,选择共模滤波与差模滤波结合的滤波网络,从而抑制更广频段的共模和差模干扰。使用图 11 接口滤波电路处理电磁干扰,采用两级滤波电路十五阶滤波器设计,用于电源模块

400~500 kHz 开关频率和高频谐波。使用纳米晶材质磁环,保证最大共模电感量和共模阻抗,阻断共模干扰向外传导。通过 Y 电容实现共模干扰的低阻,使共模干扰返回机壳;通过共模电感的漏感作为差模电感,实现差模干扰的高阻,阻断差模干扰向外传导;通过 X 电容实现差模干扰的低阻,使差模干扰返回电源内部。

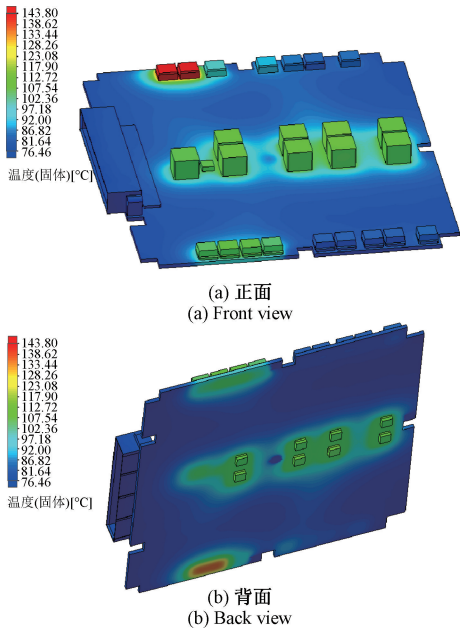


图 10 SSPC 功率板卡温度分布云图

Fig. 10 Temperature distribution map of SSPC power board

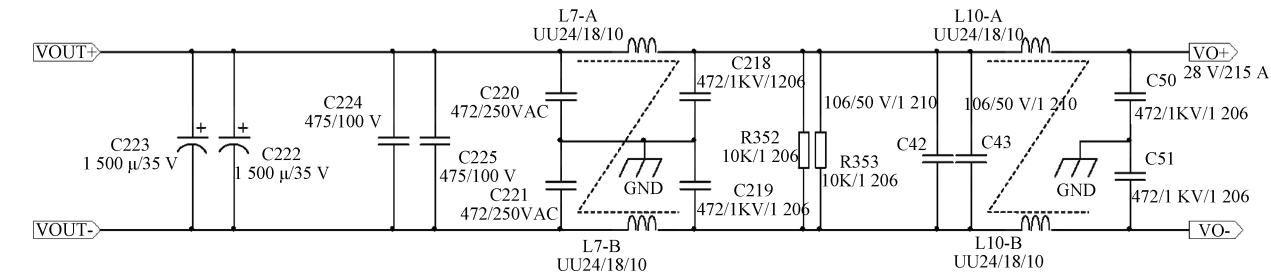


图 11 滤波电路原理图

Fig. 11 Schematic diagram of filter circuit

机壳结构也可屏蔽一定程度的电磁干扰。机壳为 1.5 mm 厚度铝合金,表面导电氧化处理。根据图 12 仿真结果,机壳在 0~2.5GHz 频段的屏蔽效能不低于 80 dB。参考当前机载测试系统中其他配电装置使用经验^[16],预计能够完全屏蔽自身产生的电磁干扰,同时阻止外部电磁干扰。

经电磁兼容试验验证,以上滤波电路与机壳结构设计能够使配电管控单元符合 GJB151B—2013 中第 CE102、CE107、CS101、RE102 和 RS103 项相关要求,电磁兼容性能达到目前机载测试设备中非天线设备的同等水平。

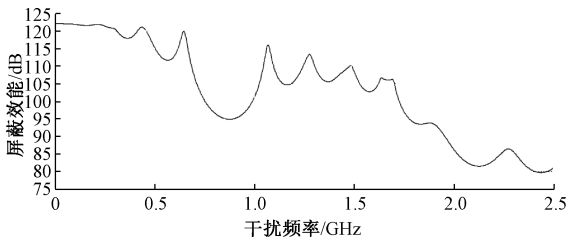


图 12 机壳屏蔽效能仿真曲线

Fig. 12 Simulation of chassis shielding effectiveness

- based on AUTBUS[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(11): 176-181.
- [3] 赵建伟,李化义,张明,等. 航天器大功率固态配电关键技术研究[J]. 航天器工程, 2024, 33(3): 40-47.
ZHAO J W, LI H Y, ZHANG M, et al. Research on key technologies of high-power solid state distribution for spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2024, 33(3): 40-47.
- [4] 蒋原,李擎,苗磊,等. 多电机断路器电弧机理及灭弧技术研究综述[J]. 工程科学学报, 2023, 45(4): 611-620.
JIANG Y, LI Q, MIAO L, et al. Overview of the arc mechanism and extinguishing in the circuit breaker of a more-electric aircraft [J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(4): 611-620.
- [5] 董浩轩,赵建伟,赵雷,等. 一种航天器高精度模拟式固态功率控制器设计[J]. 航天器工程, 2024, 33(5): 76-81.
DONG H X, ZHAO J W, ZHAO L, et al. Design of high-precision analog solid-state power controller for spacecraft[J]. Spacecraft Engineering, 2024, 33(5): 76-81.
- [6] HUANG Z, YANG T, ADHIKARI J, et al. Development of high-current solid-state power controllers for aircraft high-voltage DC network applications [J]. IEEE Access, 2021 (9): 105048-105059.
- [7] 韩再焜,赵涛,侯刚,等. 大功率直流 270 V 固态功率控制器设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2024, 45(6): 100-109.
HAN Z K, ZHAO T, HOU G, et al. Design of high-power DC 270 V solid-state power controller [J]. Journal of Gun Launch & Control, 2024, 45(6): 100-109.
- [8] 何晶,郭英辉,白颖利,等. 一种智能供配电测试设备的设计与实现[J]. 电源技术, 2025, 49(1): 231-234.
HE J, GUO Y H, BAI Y L, et al. Design and implementation of an intelligent power supply and distribution test equipment [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2025, 49(1): 231-234.
- [9] 艾凤明,梁兴壮,董润,等. 军用飞机供配电系统故障预测与健康管理关键技术[J]. 航空科学技术, 2023, 34(2): 86-95.
AI F M, LIANG X ZH, DONG R, et al. Key technologies of prognostic and health management of military aircraft power supply and distribution system [J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(2): 86-95.
- [10] CAO H H, ZHANG H P, GU CH L, et al. Fault detection and classification in solar based distribution systems in the presence of deep learning and social spider method[J]. Solar Energy, 2023, 262: 111868.
- [11] 史亚光. 基于云计算的 10 kV 配电所远程监控与故障诊断系统设计[J]. 电气技术与经济, 2025(5): 33-36.
SHI Y G. Design of remote monitoring and fault diagnosis system for 10 kV distribution substations based on cloud computing [J]. Electrical Equipment and Economy, 2025(5): 33-36.
- [12] 张敏,方健,莫文雄,等. 基于智能检测平台的配网中低压开关检测技术[J]. 电工技术, 2022 (21): 171-174.
ZHANG M, FANG J, MO W X, et al. Detection technology for medium-low voltage switches in distribution network based on intelligent detection platform [J]. Electric Engineering, 2022 (21): 171-174.
- [13] 王仲杰. 网络化机载测试系统的集成与测试[J]. 中国测试, 2017, 43(3): 135-138.
WANG ZH J. Integration and testing of networked airborne testing system [J]. China Measurement & Test, 2017, 43(3): 135-138.
- [14] 中国飞行试验研究院. 一种机载用 L+S 频段融合遥测收发系统及方法: CN202311764905.1[P]. 2024-04-26.
Chinese Flight Test Establishment. An airborne L+S band fusion telemetry transceiver system and method: CN202311764905.1[P]. 2024-04-26.
- [15] 黄志鹏,李兴权,朱文兴. 超大规模集成电路布局的优化模型与算法[J]. 运筹学学报, 2021, 25(3): 15-36.
HUANG ZH P, LI X Q, ZHU W X. Optimization models and algorithms for placement of very large scale integrated circuits [J]. Operations Research Transactions, 2021, 25(3): 15-36.
- [16] 艾铁柱,赵君,闫稳,等. GJB151B 标准部分解析及常规机载电子设备电磁兼容设计[J]. 中国新通信, 2021, 23(12): 148-149.
AI T ZH, ZHAO J, YAN W, et al. Partial analysis of GJB151B standard and electromagnetic compatibility design of conventional airborne electronic equipment [J]. China New Telecommunications, 2021, 23(12): 148-149.

作者简介

吴凡(通信作者), 硕士, 工程师, 主要研究方向为飞行试验机载测试技术。

E-mail: wufan2022@foxmail.com

祁晓鹏, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行试验机载测试技术。

E-mail: qxp0822@qq.com

孙奔, 硕士, 工程师, 主要研究方向为飞行试验机载测试技术。

E-mail: 1635621342@qq.com