

运载火箭测量系统供配电模块化测试技术研究

周 虎¹, 赵帅杰¹, 张明亮¹, 赵 阳¹, 高 飞¹, 徐 昕^{2,3}

(1. 上海航天电子技术研究所, 上海 201109;

2. 中国航天科技集团 商业火箭有限公司, 上海 201109; 3. 南京航空航天大学, 南京 210016)

摘要: 针对现役运载火箭测量系统供配电拓扑庞大、电气耦合复杂引起的地面测试困难、效率低等问题, 提出一种运载火箭测量系统供配电模块化测试系统; 首先, 通过标准化接口将系统解耦为电源、信号采集、数据处理及通信模块, 构建测量系统供配电模块化测试平台; 其次, 基于隔离放大控制、多通道采集、高精度数据校验、电源冗余补偿等方法, 设计供配电控制电路、模拟量采样电路, 完成测量系统的供配电控制和状态监控; 最后, 基于 Windows 呈现基础框架, 采用 C 语言开发上位机测量系统供配电控制软件, 实现运载火箭测量系统模块独立测试与集成测试, 提高运载火箭测量供配电系统工作的可靠性; 在实验室开展供配电模块测试系统功能性验证试验, 试验结果表明, 该系统有效、可靠, 标准化接口设计与可扩展性为复杂航天系统测试提供了新思路, 具有重要的工程应用价值。

关键词: 运载火箭; 测量系统; 供配电测试; Windows 呈现基础; 模块化

Research on Power Supply and Distribution Modular Test Technology of Launch Vehicle Measurement System

ZHOU Hu¹, ZHAO Shuaijie¹, ZHANG Mingliang¹, ZHAO Yang¹, GAO Fei¹, XU Xin^{2,3}

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

2. China Aerospace Science and Technology Commercial Launch Vehicle Group Co., Ltd., Shanghai 201109, China;

3. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the difficult and inefficient ground testing caused by large power supply and distribution topology and complex electrical coupling in the active launch vehicle measurement system, a power supply and distribution modular testing system based on the launch vehicle measurement system is proposed. Firstly, decouple this system into a power supply, signal acquisition, data processing, and communication module through standardized interfaces, and construct a modular test platform for power supply and distribution testing of the measurement system. Secondly, based on isolation amplification control, multi-channel acquisition, high-precision data verification, and power redundancy compensation methods, design the power supply and distribution control circuit and analog sampling circuit, and complete the power supply and distribution control and state monitoring of the measurement system. Finally, based on the Windows presentation basic framework, use C language to develop power supply and distribution control software of the host computer measurement system, implement independent testing and integration testing for launch vehicle measurement system modules, and improve the reliability of the launch vehicle measurement power supply and distribution system. Functional verification testing of the system was carried out in a certain aerospace electronic laboratory in Shanghai. The test results show that the system is effective and reliable. The standardized interface design and scalability provide new ideas for complex aerospace system testing and have important engineering application value.

收稿日期:2025-02-28; 修回日期:2025-03-31。

作者简介:周 虎(1997-),男,硕士,助理工程师。

通讯作者:张明亮(1991-),男,硕士,工程师。

引用格式:周 虎,赵帅杰,张明亮,等. 运载火箭测量系统供配电模块化测试技术研究[J]. 计算机测量与控制,2025,33(5):134-142.

Keywords: rocket launch vehicle; measurement system; power supply and distribution test; windows presentation foundation; modularization

0 引言

随着我国新一代运载火箭的不断发展，与之相随的是运载火箭测试、发射流程的自动化、集成化及智能化^[1-2]。测量系统作为运载火箭飞行数据采集与传输的关键部分，通常由遥测分系统、中继分系统、图像分系统、外测分系统、安控分系统、直测分系统和落区残骸定位分系统组成^[3]，需在高振动、强电磁干扰等极端环境下完成运载火箭各个阶段动力、姿态、环境参数的精准采集、传输、外弹道测量和安全控制等功能。

供配电系统作为运载火箭电力分配、负载供电、转电的能量枢纽，其为测量系统地面测试阶段、飞行阶段的遥测数据、天基数据的传输提供有力支撑^[4-7]。供配电系统的稳定性直接关系到测量系统数据链路的正常运行。运载火箭测量系统往往采用横向隔离、纵向耦合的供配电系统架构^[8-13]，往往仅在火箭末级配置完整的供配电设备，这为除末级之外的其他部段开展独立测试造成了很大困难^[14-15]。地面供配电测试技术多采用单一功能堆砌、固定化测试流程的分立式架构，存在设备冗余度高、调试周期长、兼容性差等问题。如某型现役地面测试平台，通常由电源模拟器、负载箱、直测参数设备、信号调理设备、程控开关矩阵等独立设备堆叠构成。这种架构导致设备存在大量冗余功能单元，独立设备配置数量多，设备部署占用场地大。在测试流程维度，分立式架构的固定化操作序列严重制约测试效率，如某型运载火箭测量系统联试，需完成多个测试项目切换，每次切换涉及多台设备参数重设、电缆人工插拔，

且调试周期随测试项目复杂度呈指数增长。同时，随着新型运载火箭测量供配电系统复杂度的显著提升，地面供配电测试技术难以满足运载火箭快速迭代、多型号协同测试的需求，亟需一种模块化、智能化的供配电测试系统，以实现测量系统供配电功能的快速测试与全面验证。

基于以上所述，本研究围绕高可靠、低成本、易操作等特性，结合前后端模块化设计理念，设计一种运载火箭测量供配电模块化测试系统。该系统以供配电控制组合为核心，通过标准化接口解耦为电源、信号采集、数据处理及通信模块，采用多通道采集、高精度数据校验等方法，设计供配电控制电路、模拟量采集电路等完成测量系统的供配电控制和状态采集。基于 Windows 呈现基础框架，采用 C# 语言开发上位机测量系统供配电主控软件，通过 TCP/IP 协议下达供配电控制指令，测量系统综合试验阶段下实现供配电模块独立测试与集成测试，提高运载火箭测量系统供配电工作的可靠性。

1 测量供配电系统整体架构

运载火箭测量系统往往采用横向隔离、纵向耦合的全箭统一供配电系统架构，由箭上电池提供直流电源，并由配电器统一配电控制，各单机自带电源变换器进行内部电源变换^[3,16-22]。运载火箭测量系统供配电整体架构如图 1 所示。

由图 1 可知，测量系统与供配电系统接口主要包括安全控制器、数据采集器、换流转接器、数据综合器、图像压缩器、脉冲相参应答机、发射机等测量系统单机

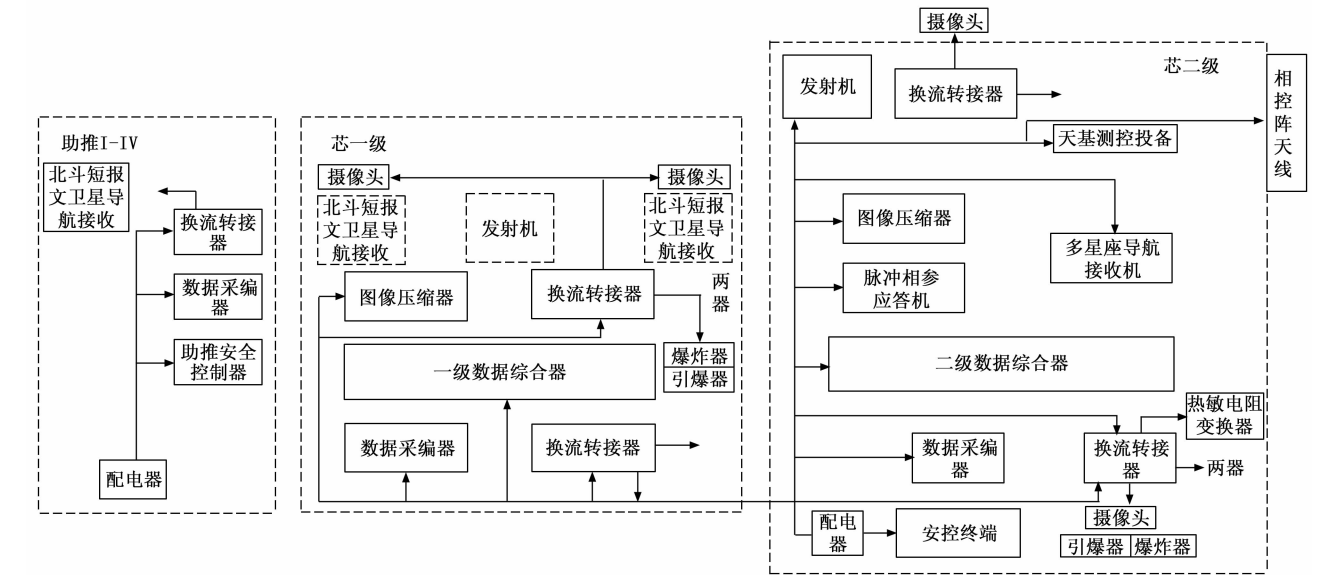


图 1 运载火箭测量系统供配电整体架构

设备供电接口, 分布于运载火箭助推 I-IV、芯一级及芯二级连接处。根据运载火箭测量系统供配电接口特征, 采用模块化、智能化设计理念, 构建分层式、可拓展的测试架构, 设计快速适配、高精度测试、实时状态监测的测量供配电模块化测试系统。其主要包括供配电控制组合、直流电源、等效配电器、模拟负载、配套电缆及上位机等部分。

运载火箭测量供配电模块化测试系统主要用于测量系统综合试验, 完成对测量系统箭上设备供电、断电的控制, 发送模拟起飞、安全自毁和转电信号, 对供配电运行情况的监控, 以及接收显示箭上安控引爆信号输出等功能。测量供配电模块化测试系统原理架构如下:

1) 供配电控制组合采用标准化接口, 接收上位机控制指令, 对箭上产品供电、断电、发送起飞、安全自毁、紧急断电和转电指令, 接收配电器发出的转电完成、供电电压回采等信号, 显示于供配电控制组合前面板。

2) 冗余直流电源是为提高系统供电可靠性而设计的多电源架构, 其核心功能是通过主备电源的协同工作, 确保在主电源故障时无缝切换至备用电源, 进而保障测量供配电测试系统的连续运行。冗余直流电源设置为 2 组, 其将输入的 AC220V 电压转换成箭上配电器等设备额定工作电压, 通过地面电缆连接至供配电控制组合。

3) 等效配电器模拟箭上处于芯级位置、助推位置的配电器, 通过精确的电阻、电容、电感等参数组合, 复现箭上配电器的电气特性, 用于配合模拟负载完成供配电设备的功能自检。

4) 等效配电器接收地面供配电设备发出的供电、断电、紧急断电和转电指令, 发送转电完成、供电电压回采给地面供配电设备; 接收供配电设备发出模拟地面电源和箭上电池供电电压, 分多路提供给箭上测量系统

使用。

5) 模拟负载模拟箭上测量系统供电负载, 用于考核供配电控制功能, 配合等效器完成供配电设备的功能自检。

6) 配套电缆为测量供配电系统中供电、模拟量、数字量、无源触点等信号传输的关键介质, 连接供配电控制设备、配电器、等效配电器、模拟负载和箭上测量系统单机等。

2 测量供配电测试系统硬件设计

2.1 原理设计

运载火箭测量供配电模块化测试系统硬件集成于地面测发控系统前端机柜中, 由供配电控制组合、等效配电器、冗余程控直流电源、模拟电子负载、KVM 等组成, 大部分均为通用设备或货架产品, 可实现快速替换, 且所有设备均具备以太网接口, 可通过网络通信实现远程控制。

供配电测试系统硬件原理框图如图 2 所示。该系统采用模块化设计, 采用标准化接口解耦为电源、信号采集、数据处理及通信模块, 配置于供配电控制组合、等效配电器、冗余直流电源及模拟电子负载。等效配电器包括芯级配电器 2、助推配电器 5; 冗余直流电源包括地面电源 1、地面电源 2、地面电源 3 及地面电源 4。供配电测试系统各组合之间通过配套电缆互联, 实现供配电测试的数据交互与协同控制。

以下对测量供配电测试系统中的各个组合及工作原理进行详细阐明。

2.2 供配电控制组合设计

供配电控制组合作为运载火箭测量供配电模块化测试系统的核心单元, 用于测量系统综合试验阶段, 对测量系统的供配电模块进行全链路验证, 其核心任务形式化描述为:

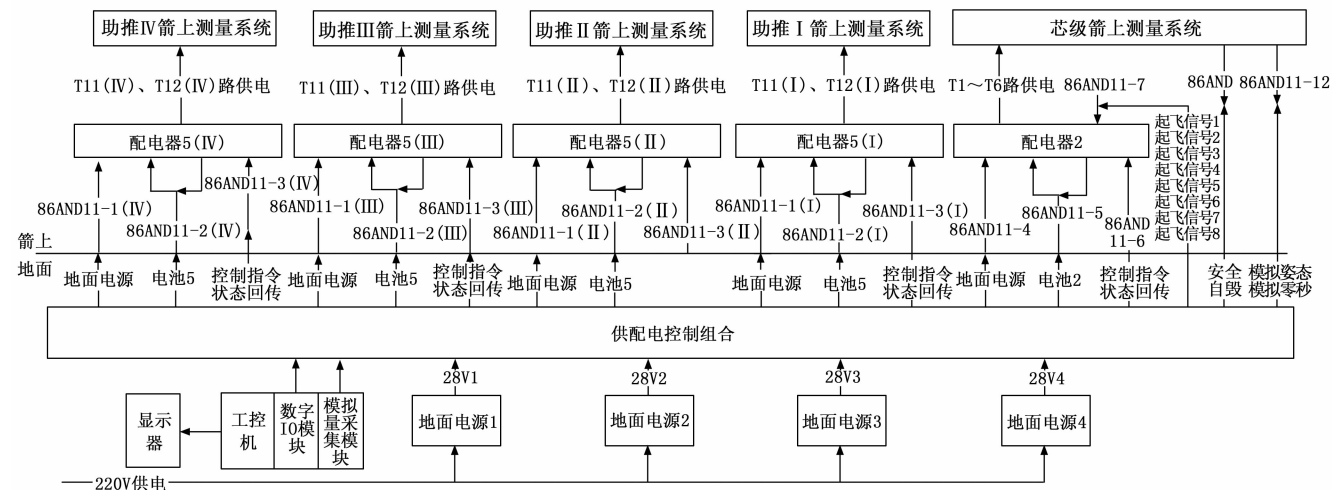


图 2 带配电器情况下运载火箭测量供配电测试系统原理图

电流等物理量转化为数字信号。通过在供电线路上串接电流传感器进行电流信号的转换，转换后的电压、电流信号进行放大、隔离、滤波等信号调理，连接至数据采集卡进行数据采集读取。地面供电电压、电流采集原理图如图 4 所示。为保证采集精度可调节负载大小或者改变输出电压大小，采集至少 5 个点的电压、电流值，并使用最小二乘法进行数据校准。

2.3 等效配电器设计

等效配电器模拟箭上处于芯级位置、助推位置的配电器，通过精确的电阻、电容、电感等参数组合，复现箭上配电器的电气特性，并配合模拟负载完成测量系统供配电测试设备的功能自检。等效器配电器响应供配电控制组合发出的配电指令，并回传转电完成、供电电压回采等信号。

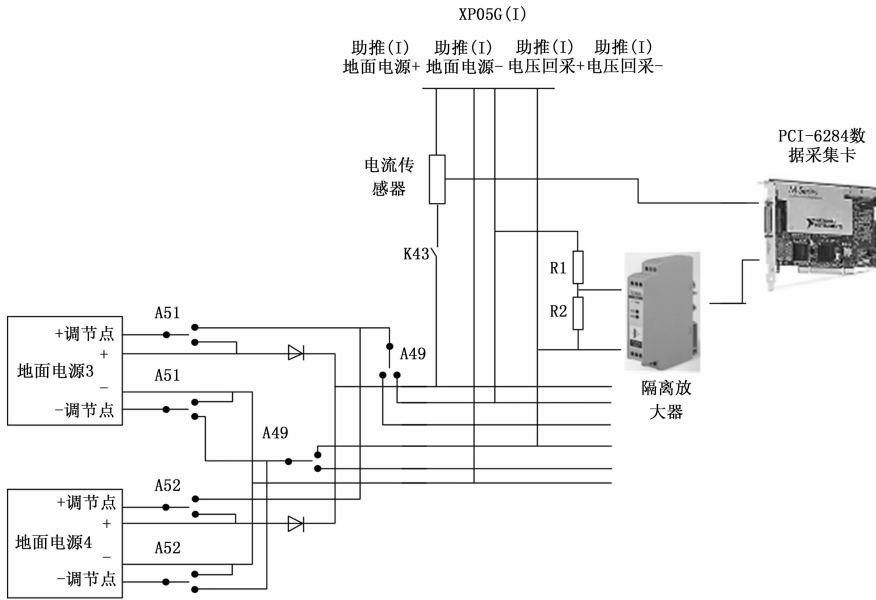


图 4 地面供电电压、电流采集原理图

等效器 2、等效器 5 电气原理图如图 5、图 6 所示。由等效器 5 的内部原理图可知，地面电源通过等效器 5

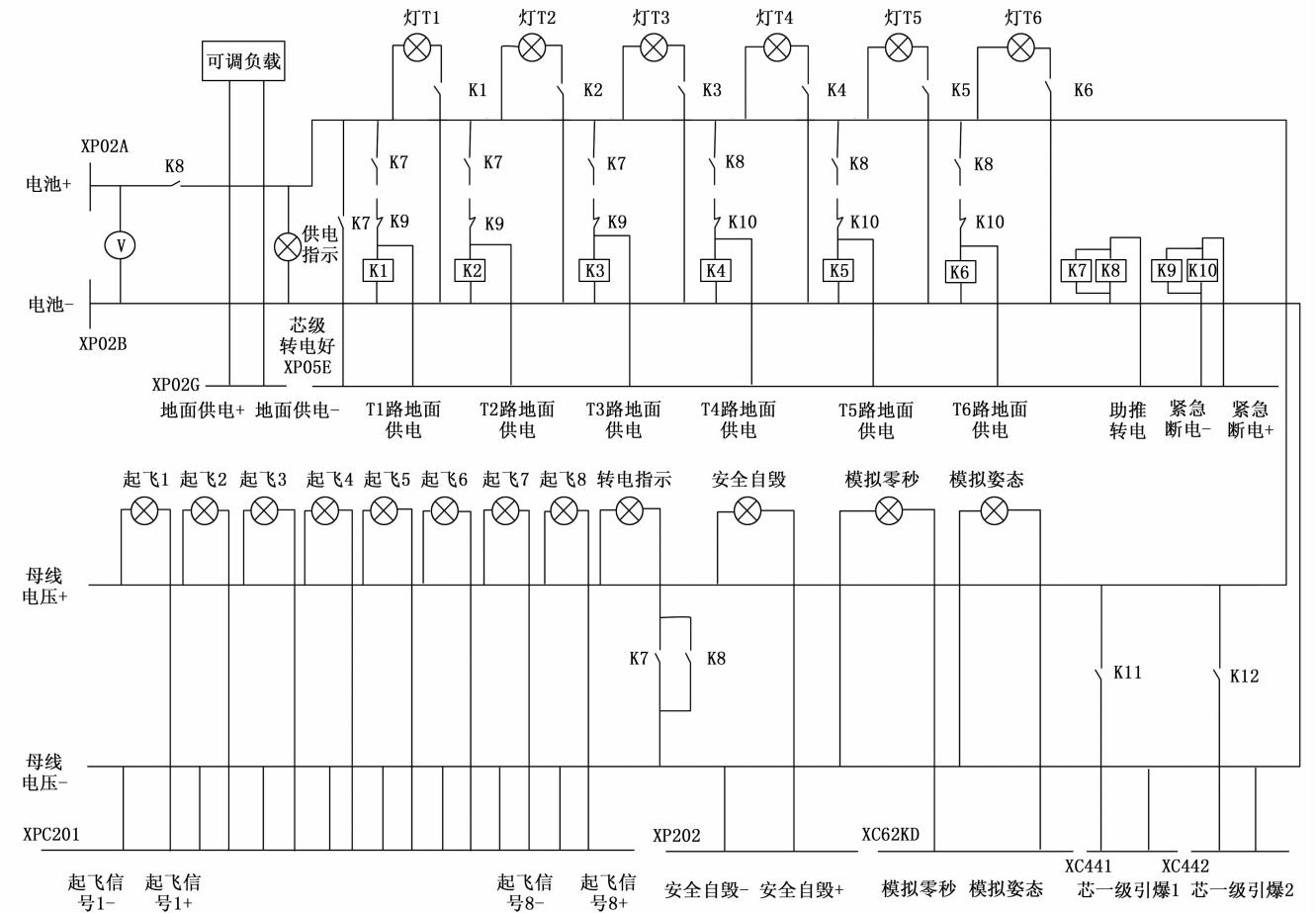


图 5 等效器 2 电气原理图

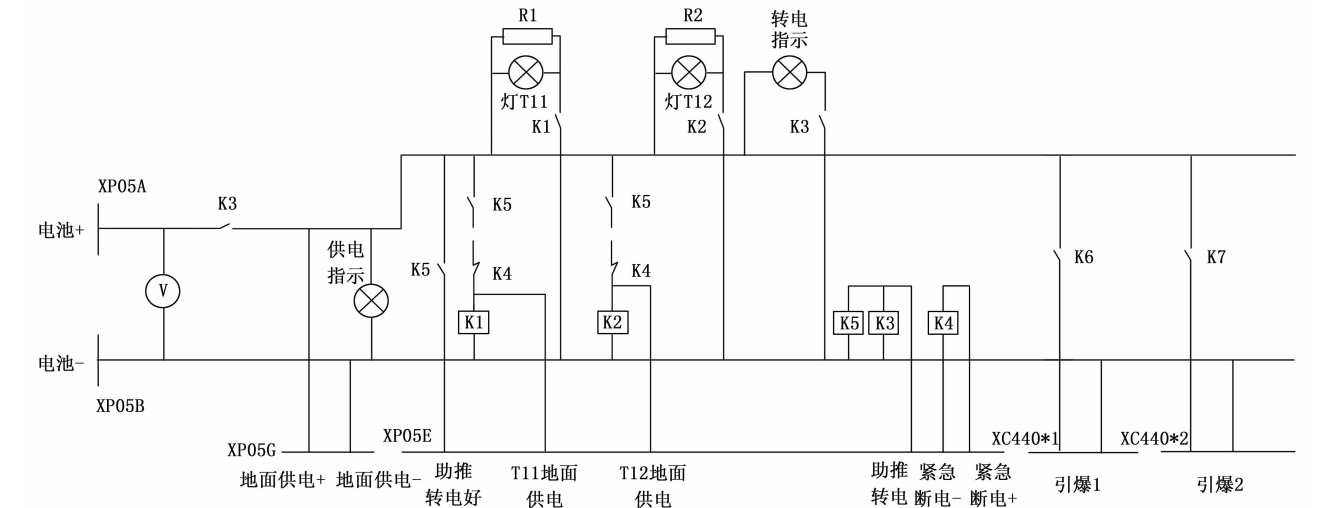


图 6 等效器 5 电气原理图

的接插件 XP05G 接入，电池通过等效器 5 的 XP05A 接入，指令信号输入、输出通过 XP05E 进行连接。

等效器内部功率负载选用黄金铝壳功率电阻，根据负载功率要求，等效器里面选用 8 Ω/200 W 的功率电阻。

等效器内功率继电器 K3 的控制信号为助推转电 (28 V)，选择线圈额定工作电压为 28 V 的继电器，其型号为 JQX-1140M-028-24-I (J)。该型继电器具备 40 A 单刀单掷触点切换能力，且自带消反二极管，以保证等效器工作安全。

2.4 配套电缆设计

线缆采用可溶性聚四氟乙烯绝缘电线电缆，型号选用 AF-250-250 V，导体为绞合镀银铜芯。内层镀银铜丝编织层、中层高密度铝箔绕包层，构建可溶性聚四氟乙烯绝缘电线电缆，信号传输稳定、连接器连接可靠，且具有卓越的耐高温性能，优良的抗化学性、耐潮、耐磨、阻热等性能。

3 系统软件设计

测量系统供电配电控制软件用于测量系统综合试验阶段，对测量系统箭上设备供电、断电，发送模拟起飞、安全自毁和转电信号等，对测量系统供电配电运行情况进行监控，旨在确保测量系统设备状态的正确性、高效性和可靠性。

测量系统供电配电控制软件采用模块化、分层架构设计，将测试系统划分为数据采集层、数据处理层、控制逻辑层和用户交互层。数据采集层用于硬件设备间通信，通过高精度传感器实时采集电压、电流等供电参数；数据处理层用于对采集数据进行滤波、误差校准、

计算和存储，确保数据的准确性和实时性；控制逻辑层用于控制指令、故障诊断、远程控制等核心功能，内置多级安全防护策略，并通过逻辑控制算法预设逻辑自动响应操作指令，提升测试系统的自动化水平；用户交互层提供图形化界面，用直观的数字表头、颜色指示灯和按钮等显示设备状态，支持实时数据展示、报警管理和紧急控制操作。测量系统供电配电控制软件以“高内聚、低耦合”的设计原则，模块独立封装、动态加载接口即插即用，功能扩展灵活、维护高效便利，为测量供电配电测试系统的稳定运行提供坚实基础。测量系统供电配电控制软件整体架构如图 8 所示。

测量系统供电配电控制软件具备的主要功能如下：

- 1) 数据实时显示功能：控制器将模拟量采集通道、离散量输出通道数值存入寄存器，经过组帧、单播或组播、解析显示至上位机供电配电控制软件界面，并以 100 ms 周期更新电压、电流等模拟量参数；
- 2) 状态监测功能：提供用户交互界面，集成多模态交互控件，使用虚拟表头、指示灯、按钮等控件显示箭上供电配电控制指令状态，实时监测供电配电设备工作状态；
- 3) 冗余切换功能：主界面设置“芯级电源主机控制”“芯级电源主机采集”“芯级电源副机控制”“芯级电源副机采集”“助推电源主机控制”“助推电源主机采集”“助推电源副机控制”“助推电源副机采集”按钮，实现地面直流电源冗余切换功能；
- 4) 逻辑控制功能：将部分控制操作生成自动控制算法，以自动逻辑的方式执行，如转电后地面电源断电、紧急断电地面电源断电等，实现测量系统供电配电逻辑

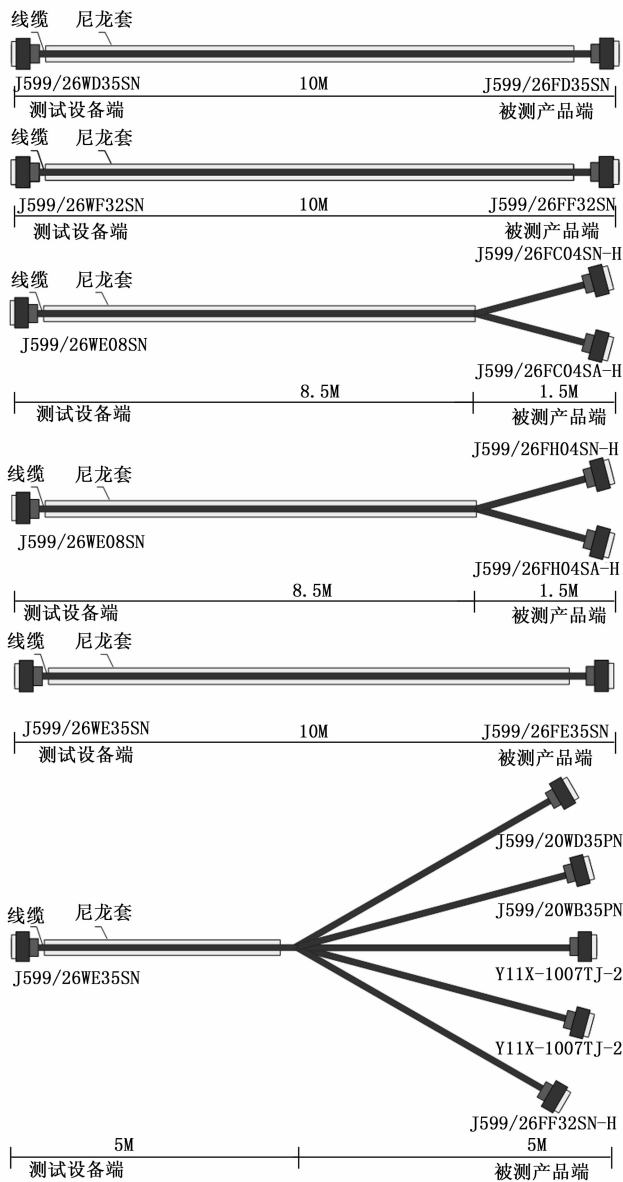


图 7 测量供配电测试系统配套电缆

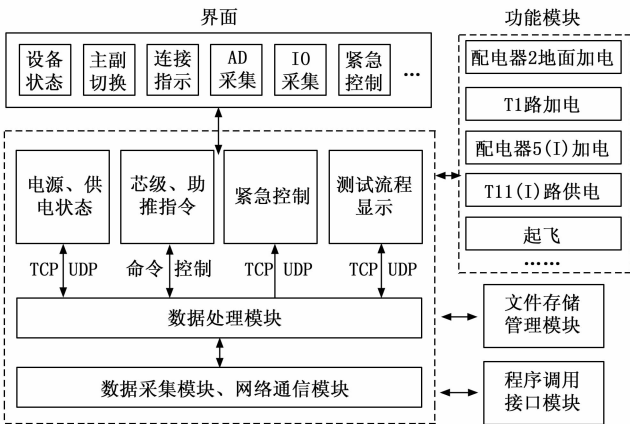


图 8 供配电主控软件整体架构

辑控制功能；

5) 故障诊断功能：接收并解析直流电源组播的故障代码，硬件层基于 FPGA 实现级阈值触发，配置动态时间规整算法，电源状态异常以声光形式予以报警，实现测量系统供电故障诊断功能；

6) 数据存储功能：初始化成功后，通过多线程管道架构实现全量数据的实时存储。软件运行过程中自动记录电压、电流等实时采样数据，通过统一接口的方式将 UDP 数据、TCP 数据、控制指令、日志信息等实时存储至本地文件，并通过时间戳标记和多重校验保障数据完整性，实现系统操作的可追溯性。

4 设计结果及验证

4.1 供电控制组合设计结果

测量系统供电控制组合整体高度为 8U，可上 19 英寸标准机架，后面板设置电源开关、XXS05G (I) 等航插插座等。测量系统供电控制组合内部设置大功率继电器、分流器、隔离输入输出模块、电路端子板等器件。测量系统供电控制组合实物如图 9 所示。

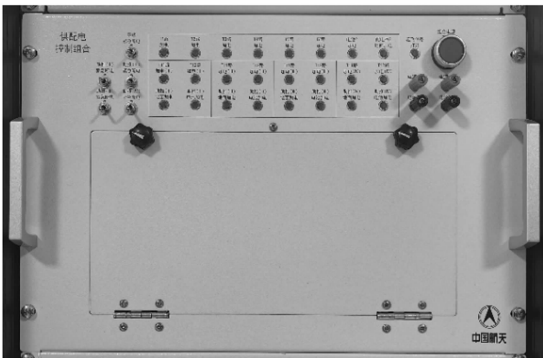


图 9 测量系统供配电控制组合实物图

4.2 等效配电器设计结果

测量系统等效配电器 2、等效配电器 5 高度 2U，具备独立放置条件。组合正面设置指示灯、电压表、助推按钮、引爆按钮等，后面板设置电源开关、XP05A、XP05G 等航插插座等。等效配电器内部设置功率继电器、黄金铝壳功率电阻等。等效配电器 2、等效配电器 5 实物如图 10 所示。

4.3 测量系统供电控制软件设计结果

测量系统供电控制软件采用模块化架构，支持多型号火箭测试兼容性与快速迭代需求。供电控制软件集成数据显示、状态监控、冗余切换、逻辑控制、故障诊断及数据存储功能，供电控制软件主控界面具有良好的可操作性，用户可根据需求发送相应的供电控制

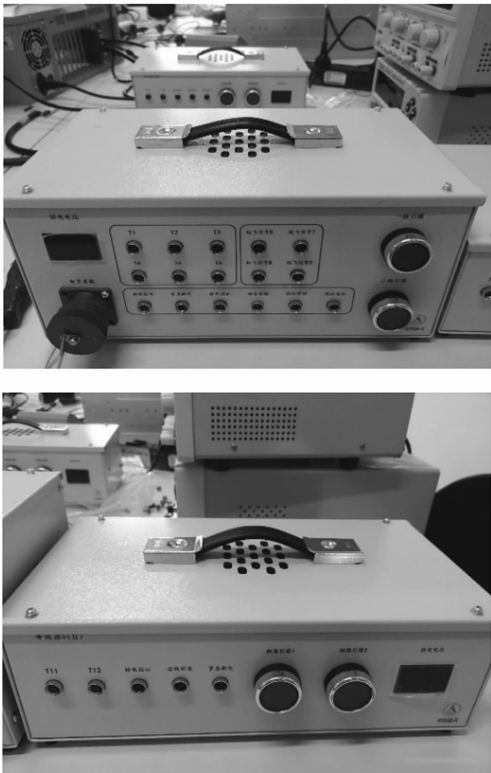


图 10 等效配电器 2、等效配电器 5 实物图

指令，测试信息以流程屏的形式显示。芯级供电控制指令包括配电器 2 地面加电、电池 2 加电、T1 路—T6 路加电、起飞、安全自毁通、模拟零秒通、模拟姿态通、芯级紧急断电通等；助推供电控制指令包括配电器 5 (I) —配电器 5 (IV) 加电、T11 (I) —T11 (IV) 路供电、T12 (I) —T12 (IV) 路供电、电池 5 (I) —电池 5 (IV) 加电、助推 (I) —助推 (IV) 紧急断电、助推 (I) —助推 (IV) 转电通等。测量系统供配电控制软件主控运行界面如图 11 所示。

测量系统供配电控制软件运行过程中，软件程序实时刷新当前操作、电源状态、芯级供电状态、助推供电状态，以流程屏形式显示控制指令、测试数据，并将界面操作、控制指令以及接收数据等存储至本地，以实现数据的可回溯、可追踪；测量系统部分供配电控制指令蕴含内部逻辑，供配电控制软件以自动逻辑的形式发送执行指令，提高了供配电测试系统的运行效率，保证了测量系统供配电控制测试的可靠性。

4.4 实验验证及结果分析

在上海某航天电子实验室开展运载火箭测量供配电测试系统的联合调试，验证测量系统供配控制组合、等效配电器及供配电控制软件的有效性。测量供配电测试系统设备联试运行状态如图 12 所示。

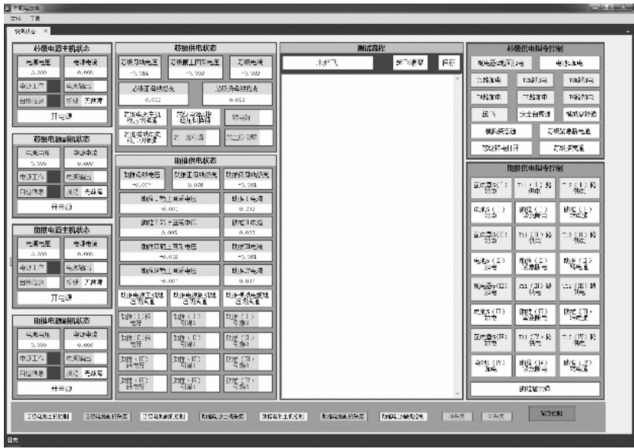


图 11 测量系统供配电控制软件主控运行界面

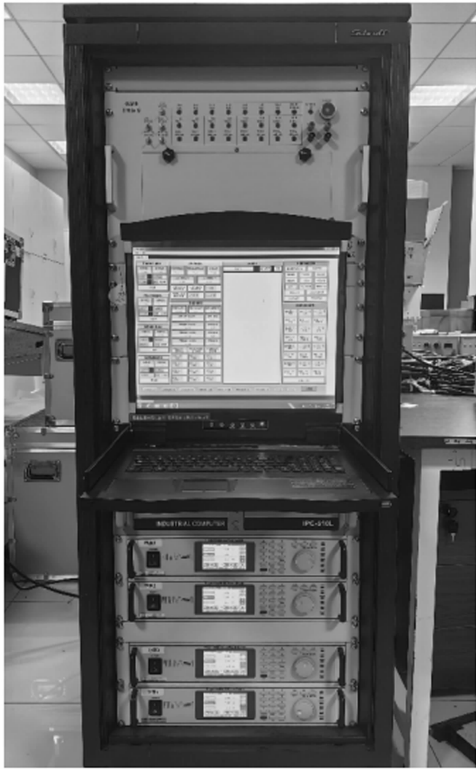


图 12 测量供配电测试系统联试运行图

为验证运载火箭测量供配电模块化测试系统的有效性，设计了一系列实验方案，包括供配电稳定性测试、负载模拟测试和故障注入测试。实验结果表明，测试系统能够准确测量供配电模块的各项性能指标，模拟量采集精度表现优异，能够满足供配电模块对电气参数的测量要求。在负载模拟测试中，系统成功模拟了多种工作状态，验证了供配电测试模块在不同负载条件下的稳定性。故障注入测试显示，测试系统能够快速识别并定位故障，平均故障诊断时间小于 2 秒。

通过对比实验数据与理论分析结果,发现测试系统的性能与设计指标高度吻合。在实际应用中,该测试技术成功检测出某型号运载火箭测量系统供配电模块的潜在缺点,为改进设计提供了重要依据。实验结果表明,该模块化测试技术具有高精度、高可靠性和高灵活性的特点,能够满足运载火箭测量系统供配电模块的测试需求,为运载火箭发射任务提供了有力保障。

5 结束语

本文针对运载火箭测量系统供配电测试困难、效率低等问题,设计了一种测量供配电模块化测试系统,实现测量系统综合试验阶段对供配电功能的模块独立测试与集成测试。该系统提供良好的上位机供配电控制软件,具有集成度高、测试速度快、操作维护方便、可靠性高等优点。运载火箭测量供配电测试系统成功应用于我国多型运载火箭,并取得良好的测试效果。

为适应未来可重复使用运载火箭、卫星星座批量化测试及深空探测器测试等多领域航天系统任务,需持续推动测试智能化、装备轻量化及标准全球化举措,使供配电模块化测试技术朝着高精度、智能化、全自主方向演进,为人类探索宇宙边界提供不竭动力。

参考文献:

- [1] 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(中英文), 2021, 8 (1): 17-26.
- [2] 洪刚,李红兵,范鑫,等. 新一代固液捆绑运载火箭研制及创新[J]. 上海航天(中英文), 2022, 39 (5): 1-7.
- [3] 宋征宇. 运载火箭地面测试发射与控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016.
- [4] 周虎,王辉,李刚,等. 一种面向运载火箭电气系统的模块化分级供配电体制[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2024, (3): 93-99.
- [5] 梁宇坤,王晓君,张佳宁. 统一化、多适应性的测控通信系统供配电系统设计[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2023, (2): 126-130.
- [6] SONG J, GAO K, WANG X, et al. Design of a field programmable gate array based test launch and control system for hybrid vehicle[J]. Measurement, 2016, 90: 215-223.
- [7] ZHANG Y, WANG J, LI R, et al. Design and Application of EMI Filter Between Multi-Servo Systems Under Unified Power Supply and Distribution[C] //2023 IEEE 7th International Symposium on Electromagnetic Compatibility (ISEMC). IEEE, 2023: 1-5.
- [8] 支晶. 运载火箭测发控系统远距离供配电设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [9] 梁宇坤,王晓君,毕显婷. 基于一体化、通用化、自动化的测量系统地面测发控设计[J]. 导弹与航天运载技术, 2022, (2): 80-83.
- [10] 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.
- [11] 彭越,牟宇,宋敬群. 中国下一代运载火箭电气系统技术发展研究[J]. 宇航总体技术, 2020, 4 (2): 13-24.
- [12] 辛高波,王猛,丁秀峰,等. 运载火箭冗余分级智能供配电技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (10): 137-140.
- [13] 张佳宁,吴燕茹,祝伟,等. 新一代运载火箭一体化供电测控系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (9): 39-42.
- [14] 任月慧,张宏德,彭越,等. 运载火箭测发控技术未来发展与展望[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (6): 1-4.
- [15] 王子瑜,范瑞祥,程堂明,等. 中国新一代中型运载火箭地面测发控系统架构及发展方向[J]. 导弹与航天运载技术, 2022, (2): 91-97.
- [16] 刘来方. 运载火箭测量系统综合化设计与实现[J]. 现代电子技术, 2024, 47 (8): 171-174.
- [17] 徐勇,郭红杰,何允钦,等. 液体姿轨控发动机高空模拟试验测量系统的设计与评估[J]. 宇航学报, 2024, 45 (12): 2038-2052.
- [18] 王良军,颜晓明,林子瑞,等. 长征四号系列火箭电气技术演进与展望[J]. 上海航天(中英文), 2023, 40 (S1): 66-73.
- [19] 王国辉,张金刚,耿胜男,等. 运载火箭新一代测量系统发展设想与关键技术分析[J]. 宇航总体技术, 2020, 4 (1): 1-7.
- [20] CHAI Y, LI S. Intelligent Testing, Control and Decision-making for Space Launch[M]. John Wiley & Sons, 2016.
- [21] CHEN Q, LIU Z, ZHANG X, et al. Design of System Circuit Subsystem (SCS)[J]. Spacecraft Power System Technologies, 2020: 105-146.
- [22] PIATAK D J, SEKULA M K, RAUSCH R, et al. Overview of the space launch system transonic buffet environment test program[C] //53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2015: 1-9.