

一种卫星半实物模拟训练等效器的设计与实现

郭新闻¹, 庞建国¹, 李田甜², 李二峰¹, 荆晓荣¹

(1. 太原卫星发射中心, 太原 030027; 2. 北京东方计量测试研究所, 北京 100086)

摘要: 由于在实装上进行卫星地面测试的日常训练可能会造成设备的严重损耗, 不能用真实卫星作为日常训练对象; 通过分析大量卫星的供电特性, 设计半实物供电设备模拟器, 用其代替真实部件引入闭环回路, 实现卫星内部供电分系统的实物等效; 以计算机为核心实现数据采集及数据处理系统, 并可实时接收遥控指令、模拟生成遥测数据, 配合地面测试系统响应测试流程; 硬件实物仿真设计了数据采集、信号产生等硬件板卡, 实现配电等效、指令等效、测量等效的功能; 模拟器整体设计以PXI总线为接口, 满足了系统的模块化及通用化设计, 可方便实现其他模拟器的组合及扩展; 经过现场运行表明及用户实际测试表明, 该设备可完全替代卫星供电分系统实现卫星电气性能模拟, 有效配合地面测试人员的日常训练。

关键词: 等效器; 模拟训练; 卫星测试

Design and Implementation of Satellite Hardware in the loop Simulation Training Equivalent

Guo Xinwen¹, Pang Jianguo¹, Li Tiantian², Li Erfeng¹, Jin Xiaorong¹

(1. Taiyuan Satellite Launch Center, Taiyuan 030027, China;

2. No. 514 Insitute, China Academy of Space Technology, CASC, Beijing 100086, China)

Abstract: Because the daily training of satellite ground test on real installation may cause serious loss of equipment, real satellite cannot be used as the daily training object. By analyzing the power supply and distribution characteristics of a large number of satellites, a semi physical power supply and distribution equipment simulator is designed to replace the real components and introduce a closed-loop, so as to achieve the physical equivalent of the internal power supply and distribution subsystem of satellites. The data acquisition and data processing system is realized with the computer as the core, and it can receive remote control instructions in real time, generate telemetry data by simulation, and cooperate with the response test process of the ground test system. Hardware physical simulation design consists of data acquisition, signal generation and other hardware cards, to achieve the distribution equivalent, command equivalent, measurement equivalent functions. The overall design of the simulator takes PXI bus as the interface, which meets the modular and general design of the system, and can facilitate the combination and expansion of other simulators. The field operation and user test show that the equipment can completely replace the satellite power supply and distribution subsystem to realize the simulation of satellite electrical performance and effectively cooperate with the daily training of ground testers.

Keywords: equivalent unit; simulation training; satellite test

0 引言

在卫星测试过程中, 如何尽快地熟悉卫星结构及性能、掌握卫星的测试方法, 理解卫星测试内容并执行正确判读, 是日常训练的重要内容^[1]。但是, 由于在实装上进行训练可能会造成设备的严重损耗, 受环境条件和协同单位、设备、经费等条件的制约, 在卫星地面测试的日常训练任务中, 不可能使用真实卫星作为日常训练对象, 这些都控制了日常训练的频度和强度。

本套卫星模拟训练系统面向日常训练时期, 包含对测试人员进行卫星测试过程教学、模拟测试训练的功能。模拟测试系统的设计遵循操作与感官上符合实际测试的原则, 模拟系统最大程度地与真实卫星测试系统相吻合。本文中

的卫星模拟等效器是以计算机为核心的数据采集和处理系统, 实现了供电分系统的模拟仿真, 同时为了满足各种仿真测试的需要, 配置信号产生及转接设备实现仿真功能^[2]。

本文从卫星半实物等效模拟器的系统构架、硬件设计、软件构架等多方面全方位地描述了该系统的设计及实现过程。实际应用证明, 该系统可有效配合卫星地面测试设备完成训练测试任务。

1 整体设计

卫星半实物模拟训练等效器使用通用PXI机箱作为硬件平台, 内部插入等效模块实现供电分系统的实物等效功能, 在PXI零槽控制器中部署模拟器中心控制软件, 负责中心调度, 完成遥测数据实时组帧、遥测工程值修改、遥控接收机解析、各个硬件等效模块控制及数据采集。在本模拟器中还集成图像采集器, 实现图像采集及下传的功

收稿日期: 2020-04-15; 修回日期: 2020-05-08。

作者简介: 郭新闻(1978-), 男, 山东武城人, 硕士, 高级工程师, 主要从事航天器测试与发射方向的研究。

能。整机系统如图 1 所示。

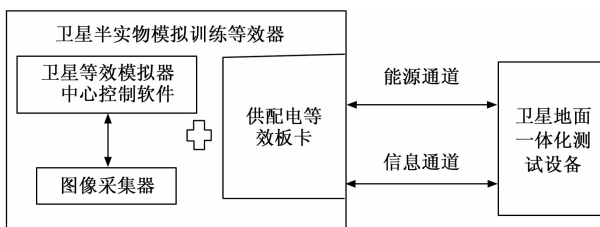


图 1 整机系统框图

供电等效器是用于检查卫星地面供电、有线控制、有线测量功能和通路的设备，检查总控、太阳阵模拟器、稳压源以及地面供电电缆的供电功能、控制功能、采集测量功能以及通路正确性。供电等效功能包含指令等效模块、测量等效模块、配电等效模块：

- 1) 指令等效模块：实现有线指令的接收，验证指令功能的正确性，向中心控制模块反馈接收指令情况；
- 2) 配电等效模块：模拟卫星供电过程，验证采集供电过程电流、电压功能，向中心控制模块反馈卫星供电情况；
- 3) 测量等效模块：模拟卫星内部产生的电信号包含模拟量及状态量，配合地面信号采集设备，实现地面信号采集验证功能。

中心控制软件为系统的调度中心，从数据库中读取原始遥测工程值，工程值全部来源于大量各型号的真实卫星测试过程中保存下来的遥测数据，数据中包含星务分系统、控制分系统、热控分系统等各个分系统的遥测数据。通过对原始遥测数据的实时组帧、动态重构、变量修改，以及对实物等效器的控制和数据采集，完成卫星模拟器对于星务、控制等各个分系统的数据模拟功能^[3]。

卫星模拟等效器与地面一体化测试系统（真实卫星地面测试设备）间具有能源流通道及信息流通道，分别用于传输为低频电信号及网络数据。图像信息通过网络实现下传功能。

2 系统模拟流程

卫星模拟器可以配合地面测试设备完成测试序列的执行，具体步骤如下，其流程如图 2 所示。

- 1) 星地间正确连接所有线缆，射频线缆、低频线缆、网络通道；
- 2) 模拟器上电系统初始化，具体包括各等效模块检测、参数初始化、网络参数初始化、摄像头初始化等；
- 3) 模拟器中心控制软件启动遥测组帧，将数据库中的原始遥测数据按照固定帧长、固定时间间隔、固定码速率下传至地面测试系统；
- 4) 地面测试系统启动测试序列的执行，依次执行测试序列中执行单元发送遥控指令，卫星模拟器接收遥控指令，根据不同的遥控指令执行不同的操作，具体操作包含以下

几种类型：

- (1) 改变遥测数据中相应工程值的数据；
- (2) 控制指令等效模块，检测地面供电设备是否发送指令；
- (3) 控制测量等效板卡，输出模拟量及状态量信息；
- (4) 控制配电等效板卡，检测地面供电设备是否为星上正常供电。

例如，实际测试用例中：地面测试序列执行卫星加电序列，执行“太阳阵模拟器输出 30V/1A 信号”，该模拟信号通过低频电缆连接到卫星等效模拟中的配电等效模块，配电等效模块检测接收的电压值及电流值，通过遥测数据将检测到的数值下传至地面测试系统，地面测试系统根据阈值范围判断遥测数据中该工程值是否有异常，从而实现星地系统测试的闭环测试。等效器与地面测试设备配合测试流程如图 2 所示。

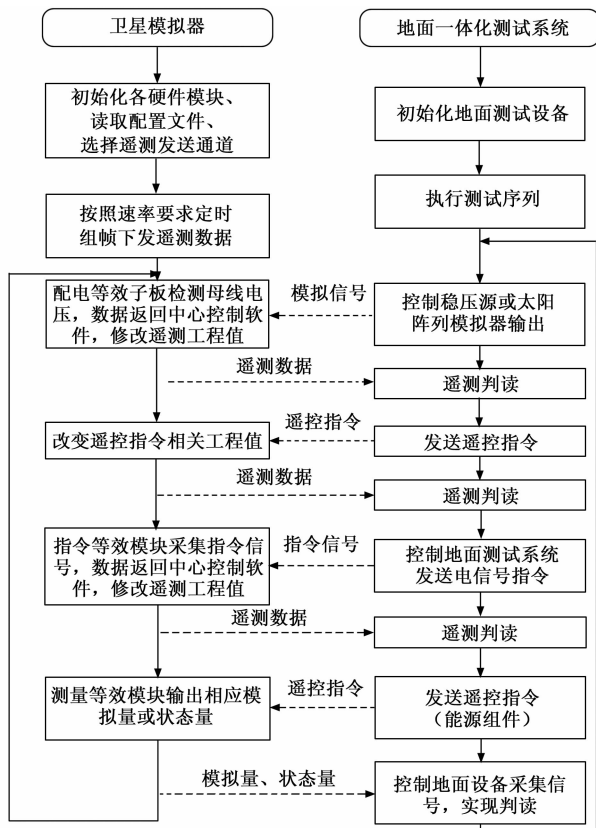


图 2 系统流程图

3 供电等效模块设计

供电等效模块包含指令等效板卡、配电等效板卡、测量等效板卡三部分。每块板卡均采用 3U 标准 PXI 结构尺寸。对外接口分为地面上传信号、下传地面信号，其中地面上传信号包含指令信号、模拟供电，下传地面信号包含模拟信号及状态量信号。硬件框图如图 3 所示。

3.1 指令等效板卡设计

指令等效板卡功能为模拟卫星接收有线指令，并监测

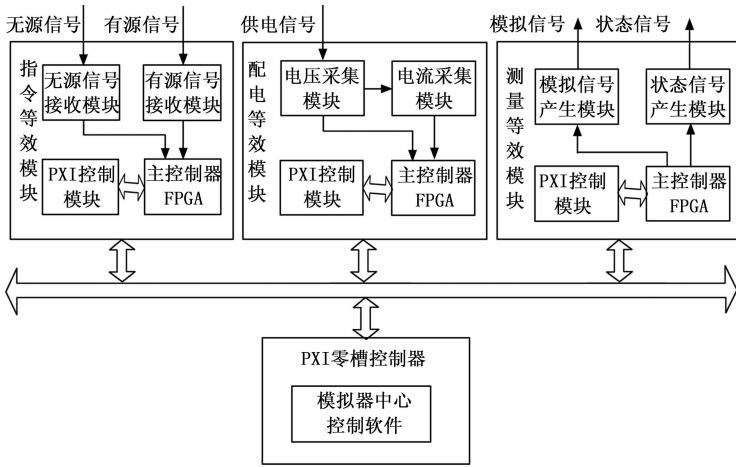


图 3 模拟器硬件框图

指令的内容及正确性。主要包括有源指令信号接收电路、无源指令信号接收电路、FPGA 控制电路、PXI 接口电路^[4]。主要指标如表 1 所示。

表 1 指令等效子板技术指标

信号类型	输入信号	路数
有源信号	双线,电压范围 5~28V,脉冲或开关	8
无源信号	双线,无源,脉冲或开关	8

3.1.1 有源指令信号接收电路

在卫星地面测试中,有源指令信号一般为 5~28 V 的开关信号或脉冲信号,输入的有源脉冲信号和开关信号通过光耦继电器探测,本项目选用的光耦为 AC38。光耦继电器是固态继电器的一种,当输入量(激励量)的变化达到规定要求时,在电气输出电路中使被控量发生预定的阶跃变化的一种器件。它具有控制系统(又称输入回路)和被控制系统(又称输出回路)之间的互动关系^[5]。光耦继电器的突出特点是具有隔离作用,故在电路中起着自动调节、安全保护、转换电路等作用,保护与之连接的设备不互相干扰。

电路中通过调节限流电阻 R 的值决定光耦继电器导通的输入电压的范围,若进入管脚的电流大于动作电流,则光耦闭合。在光耦与 FPGA 通路中输入 3.3 V 电源, FPGA 探测电路的通断来监测信号的输入。FPGA 根据 PXI 总线接收中心控制软件下传的采集指令,进行相关信号采集,将采集到的信号通过 PXI 总线返回中心控制软件,并根据遥测数据组帧协议将采集到的相应信号信息完成遥测数据组帧下传。

3.1.2 无源信号接收电路

通过 FPGA 的触发管脚,实现对无源信号的检测功能,在信号接收通路中输入 3.3 V 电源, FPGA 通过探测输入电压,实现对接收电路状态的监测,并将信号接收状态信息通过 PXI 总线接口上传到控制器,完成遥测信息组帧

下传。

3.1.3 PXI 接口电路

PXI 接口功能的实现,采用 PXI 接口芯片加 FPGA 控制的接口方案。PXI 总线是在 PCI 总线协议的基础上制定出来的,继承了 PCI 总线上所有信号并保持其所有通信时的电气规范,采用专用接口芯片 PCI9054 完成接口协议^[6]。FPGA 负责与接口芯片之间的本地端口进行通信,实现本地总线时序控制功能,从而控制管理 PXI 总线中的触发信号、参考时钟等扩展信号,以及进行其他的时序操作和控制。

3.2 配电等效板卡设计

配电等效板卡主要功能为实现模拟配电负载,通过测试电流、电压参数监测地面一体化测试系统的配电通路状态,将等效器配电状态反馈中心控制软件,地面一体化测试系统中集成了稳压源及太阳阵列模拟器,可实现卫星供电功能。配电等效子板可实现电压测量范围 0~30 V,电流测量范围 0~10 A,共有 3 路通道。

3.2.1 电压采集电路

被测电压通过前端信号调理电路实现降压以及滤波功能^[7-8],然后通过 14bit 模数转换器进行采集。设计采用 14 bit 的 AD,对应输入电压范围为 10 V,可分辨电压约为 0.6 mV,可充分保证电压采集准确度^[6]。通过元件性能和技术要求误差量级的比对,通过最终修正可保证测量结果达到±0.2%,保证电压测量指标要求。保证对各电压状态采集信息的可靠性。

3.2.2 电流采集电路

将霍尔电流 IC 芯片串接在电流通路中,霍尔电流 IC 检测电流,输出对应的电压信号。通过 ADC 采集电压信号, FPGA 接收 ADC 转换后的数字信号并通过 PXI 总线上传到上位机显示、保存。电流采集电路主要采用电流隔离电流传感器 IC 芯片 ACS725LLCTR-10AU-T,电流测量范围为 0~10 A,电压输出电压信号与输入电流的关系为 264 mV/A,变化 0.1 A 对应的输出电压变化量为 26.4 mV,经 ADC 电路转换为数字信号输入 FPGA。

3.3 测量等效板卡

测量等效板卡的主要功能为模拟星上有线遥测信号的传输,以检测星与地面设备的通信是否正常,星上传输的信号主要有三种,模拟量、有源状态量和无源状态量。测量等效模块采用 3U 标准 PXI 结构尺寸,主要包括有模拟量输出电路、状态量输出电路、FPGA 控制电路、PXI 接口电路。主要指标如表 2 所示,信号产生硬件如图 4 所示。

表 2 测量等效子板技术指标

序号	输出信号	信号参数	路数
1	模拟量	5V/28V	4
2	5V/-5V 状态量	响应时间≤200ms	8
3	无源开关状态量		

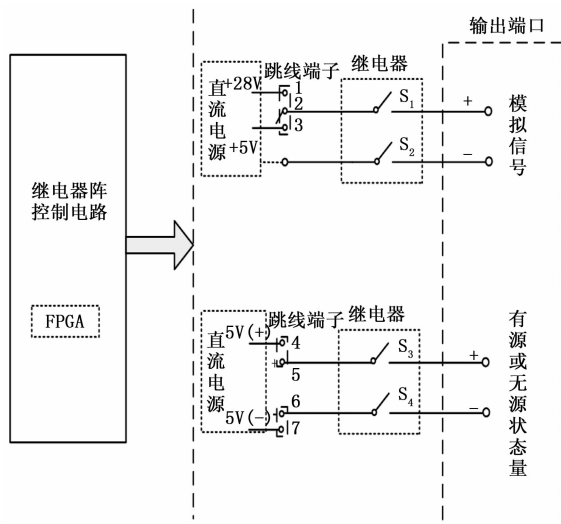


图 4 测量等效信号产生框图

3.3.1 模拟量输出电路

模拟信号发生电路主要由继电器阵列, 直流电源模块, FPGA 控制电路组成。使用前根据所需要的模拟量大小, 将跳线端子的 1 针和 2 针短接输出 28 V 模拟量, 将跳线端子的 3 针和 2 针短接输出 5 V 模拟量, 继电器 S1 控制输出通断。使用时根据控制软件发送的控制指令, 经过 PXI 总线传输给 FPGA, FPGA 根据收到的指令控制相应继电器, 输出相关模拟量。

3.3.2 状态量输出电路

状态量输出电路主要由继电器阵列, 直流电源模块, FPGA 控制电路组成。使用前根据所需要的状态量信号大小, 将跳线端子的 4 针和 5 针短接可以输出 5 V 状态量, 将跳线端子的 6 针和 7 针短接可以输出 -5 V 状态量。然后通过中心控制软件下发控制指令, 经过 PXI 总线传输给 FPGA, FPGA 控制模块接收相关指令后, 由 FPGA 控制继电器 S3、S4 即可输出相关路数的有源状态量, 将 2 针和 3 针短接并控制继电器通断即可输出开关状态量。

4 卫星模拟器中心控制软件设计

卫星等效模拟器中心控制软件运行在 PXI 零槽控制器中, 与各个硬件模块通过 PXI 实现通信及控制功能。卫星等效模拟器中心控制软件实现模拟器中心调度, 控制各个硬件模块并组帧产生遥测模拟数据。本软件采用模块化设计分为数据处理模块、数据库模块、硬件板卡驱动模块、图像采集器控制模块、网络通讯模块、界面显示模块^[9]。软件构架如图 5 所示。

1) 数据处理模块。负责模拟卫星遥控单元功能, 接收地面测试终端发送的遥控数据, 对收到的指令和数据包进行解码, 根据不同的遥控指令, 执行包括更改遥测工程值、调用硬件驱动函数实现板卡功能等操作, 更改完成的遥测工程值存入数据库相应位置。从数据库中获取卫星遥测数据, 产生包含姿控、热控、电源数字仿真模块数据的遥测

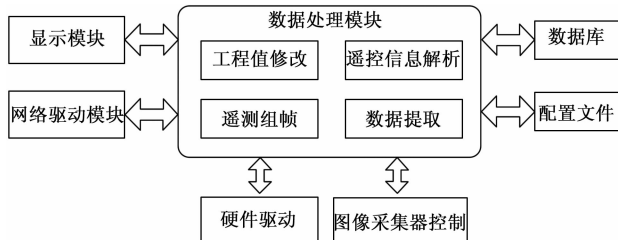


图 5 中心控制软件构架

帧, 遥测格式编排与真星完全一致, 并将遥测帧发送给地面测试系统。数据信息的发送采用循环读取的功能, 保证数据流的连续性;

2) 数据库模块。数据库用于存储卫星原始遥测数据, 在卫星模拟器中, 除供电实物等效外, 其他系统没有真实的硬件等效设备, 在本系统设计时将卫星遥测数据作为固定值存于数据库中, 在模拟过程中从数据库中取出遥测值, 组帧, 下发至地面测试系统, 模拟卫星真实运行状态。对于供电系统实时采集的数据存入数据库相应工程值的位置中替代原始数据。

3) 硬件板卡驱动模块。负责调用驱动函数, 实现各个等效板卡的通信。

4) 图像采集控制模块。控制图像采集器, 实现图像采集, 并将采集到的图像实时通过物理通道下传至地面测试系统;

5) 显示界面模块。负责将卫星状态、重要参数、测试项目、关键数据等信息显示于显示屏上。重要参数可通过配置文件, 由用户自行配置, 软件根据配置项中的参数信息, 在界面显示相应的参数信息。图像采集器实时采集到的图片在界面右下角实时显示。硬件板卡的连接状态在界面中用绿色指示灯显示, 若硬件自检正常, 则显示绿灯, 否则显示红灯。

软件显示分为三个区域: 1) 界面上方显示各个硬件模拟器件的自检状态, 若自检正常则亮绿灯, 若自检失败则亮红灯, 提示操作人员进行硬件故障检查; 2) 界面左下方显示卫星模拟器当前的重要参数, 共可显示 10 条参数信息, 具体显示哪些参数内容可在配置文件中修改, 系统根据配置文件中的参数内容, 在界面中动态显示参数信息; 3) 界面右下方为图像采集器显示区域, 动态显示采集器采集到的图像信息。本系统中任务周期为 1 s, 即每秒为 1 个循环, 产生 4 帧遥测数据, 每帧 128 字节^[10]。

5 试验结果与分析

为了验证该模拟训练等效器功能的正确性和有效性, 搭建了地面测试系统。地面测试系统包含稳压电源、模拟量采集设备、状态量采集设备、开关量控制设备。地面测试系统控制自动化测试序列, 完成供电系统自动化测试, 测试项目如表 2 所示。

6 结束语

本文中研制的卫星等效模拟器解决了缺少真实卫星情况

表 2 验证项目

序号	地面测试系统	等效模拟器	结果
1	地面稳压源及太阳阵列模拟器输出供电信号	配电等效模块采集电压	采集值通过遥测信号正确返回
2	地面测试设备发送电信号指令	指令等效模块采集指令	指令采集正确,遥测值返回正常
3	发送遥控指令	测量等效模块输出相关模拟量及状态量	地面信号采集正确

下测试人员的日常训练问题。经过实际应用表明,本系统中所有信号源及信号采集功能与真实卫星状态一致,可有效配合地面测试系统,完整自动化执行测试序列,加快了测试人员对真实卫星的熟悉过程。并且设备中各功能模块设计了多路测试通道,以及更宽的测试范围,可覆盖其他型号卫星的模拟需求,有较高的通用性。设备使用 PXI 总线作为整机构架,提高了设备的可扩展性,今后可根据需求灵活实现卫星其他分系统模拟器的扩展。

(上接第 111 页)

根据表 2~3 可知,本文提出的基于区块链技术的智能监控可疑动态物体定位系统的运行轨迹可以在短时间内确定运行轨迹,确定运行轨迹位置,对直线轨迹及曲线轨迹的定位时间平均值分别为 9.175 s 及 8.727 s,而虽然传统系统也能够确定运行轨迹,但是花费时间过长,不具备实时性,降低定位准确性。

综上所述,本文提出基于区块链技术的智能监控可疑动态物体定位系统的运行轨迹在定位时间和定位准确性始终优于传统系统,定位性能更好,更适合应用在实际生活中。

5 结束语

为提升对可疑运动物体的智能监控和定位能力,本文设计了一种基于区块链技术的智能监控可疑动态物体定位系统的系统,根据区块链技术详细设计了其核心处理器、硬盘及导航硬件设备,介绍了嵌入式操作系统等软件设备。设置对比实验,证明了本文研究系统的准确性和高效率性,能够准确定位可疑物体的位置,并追踪其运动路径,具有较高的使用价值。

参考文献:

[1] 韩冬,张程正浩,孙伟卿,等.基于区块链技术的智能配售电交易平台架构设计[J].电力系统自动化,2019,43(7):132-142.

[2] 乔蕊,董仕,魏强,等.基于区块链技术的动态数据存储安全机制研究[J].计算机科学,2018,45(2):57-62.

[3] 祁兵,夏琰,李彬,等.基于区块链激励机制的光伏交

参考文献:

[1] 夏薇.基于 HLA 的某型机动指挥分布式训练模拟系统设计[J].火力与指挥控制,2009,34(6):136-140.

[2] 郑博.小卫星设备模拟器研制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

[3] 杨永安.基于半实物的 S 频段卫星测控仿真系统平台设计[J].中国工程科学,2004,6(12):85-90.

[4] 谭左红,田增山.基于 FPGA+DSP 的高速基带信号处理平台的设计[J].科学技术与工程,2014,14(3):239-242.

[5] 李霆霆.高速光耦隔离放大器技术研究[D].武汉:华中科技大学,2013.

[6] 龚潺.基于 PXI 的卫星地面测试信号采集控制系统[J].电子测量技术,2015,38(8):129-132.

[7] 李立.卫星供配电测试设备信号调理技术[J].测控技术,2014,34(7):55-58.

[8] 朱秋扬.小卫星供配电测试系统研制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

[9] 朱杰.卫星模拟器技术分析及应用[J].仪器仪表学报,2008(s8):514-517.

[10] 方华.卫星测控星务全数字仿真软件设计和实现[D].上海:上海交通大学,2010.

[1] 易机制设计[J].电力系统自动化,2019,43(9):132-139.

[4] 王文明,施重阳.基于区块链技术的智能合约实验平台[J].实验技术与管理,2019,36(3):86-91.

[5] 袁玉堂,李晓森,刘智勇.基于区块链技术电子健康档案信息系统的探讨[J].中国卫生信息管理杂志,2018,15(2):161-165.

[6] 孙国梓,冒小乐,陈鼎洁,等.基于区块链技术的电子数据存储系统[J].西安邮电大学学报,2018,23(4):82-87.

[7] 李萌,刘文奇,米允龙.基于区块链的公共数据电子证据系统及关联性分析[J].智能系统学报,2019,14(6):1127-1137.

[8] 许扬,刘雪梅.基于区块链的开放科学生态系统研究进展[J].中华医学科研管理杂志,2020,33(1):2-8.

[9] 李刚,孟欢,周国亮,等.基于区块链技术的微网能量管理探析与方案设计[J].电力建设,2018,39(2):43-49.

[10] 柴洪.基于区块链“去中心化”企业智能管理系统研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2019,41(1):61-66.

[11] 周致成,李立新,郭松,等.基于区块链技术的生物特征和口令双因子跨域认证方案[J].计算机应用,2018,38(6):1620-1627.

[12] 乔静炜,肖红,李穗生,等.智能制造 CPS 中基于节点有效度的共识算法[J].电子技术应用,2019,45(4):118-121.

[13] 王磊,赵晓永.基于区块链机制的云计算环境下服务组合策略的研究[J].计算机应用研究,2019,36(1):81-86.

[14] 闵新平,李庆忠,孔兰菊,等.许可链多中心动态共识机制[J].计算机学报,2018,41(5):1005-1020.

[15] 施琴儿.动态图上基于 2-HOP COVER 的 TOP-K 最短路径算法[J].计算机应用与软件,2019,36(4):210-216.