

# 指挥控制系统测试流程设计与功能实现研究

张利彬, 张 熙, 张 明, 张安齐

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

**摘要:** 针对指挥控制系统的测试环节多、测试目的难界定、在线测试难实现等问题, 从其功能定位、组成架构、应用模式和全寿命周期等方面, 对指挥控制系统测试需求进行分析, 并从测试目的确定、测试项目设定、测试参数选取、测试方法设计、测试流程设计和测试结果评定等方面, 对指挥控制系统测试流程设计和功能实现开展专题研究, 提出一套适用于指挥控制系统的通用测试系统和测试流程, 并在型号工程中得以实现应用, 极大地提高了系统的测试覆盖性, 为指挥控制系统的在线测试和长期加电值班提供技术指导。

**关键词:** 指挥控制系统; 测试项目; 测试参数; 测试设计; 测试流程

## Research on Test Process Design and Function Realization of Command and Control System

ZHANG Libin, ZHANG Xi, ZHANG Ming, ZHANG Anqi

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of too much test links, test purpose difficult to define and test online hard to realize in the command and control system, based on the aspects of the functional positioning, the composition architecture, the usage mode, and the life cycle management, the test requirements of the command and control system are analyzed. The test process and function realization of the command and control system are specially investigated by the aspects of test purpose, items settings, parameters selection, method design, process design and evaluation of test results. The general test system and test method for the command and control system are proposed, which are already applied to the project engineering. The test coverage can be greatly improved, which can provide the technical support for the online test and on duty for a long time.

**Keywords:** command and control system; test items; test parameters; test design; test process

### 0 引言

指挥控制系统作为复杂装备的信息传递载体, 肩负着指挥信息的上传下达、系统间信息交换传递以及装备控制等功能, 其在互联互通的基础上实现各要素间资源共享和协同, 保障复杂装备体系功能的一体化实现。随着装备实战化需求日益紧迫, 指挥控制系统软硬件集成程度、系统组实现架构及应用方式也较传统指挥控制系统有了较大变化。指挥控制系统的集成程度越来越高、系统架构越来越复杂、通信手段越来越多样化, 虽然带来了性能指标的提, 但也带来测试环节多、测试目的难界定、在线测试难实现等突出问题, 特别是在面对长期加电值班的实战化需求, 对系统在线测试、自动测试的需求日趋迫切, 亟需开展指挥控制系统测试流程的专题研究, 以满足装备发展对系统测试覆盖性的迫切需求。

随着高新技术的广泛应用, 系统的技术和结构复杂性显著增加, 传统的由设计专家和使用人员在研制阶段根据

工程经验权衡设计测试流程编排方案的方法存在较大困难和不足, 集中表现在: 测试时间长、效率低、费用高、维修保障资源浪费等, 严重阻碍了战斗力和保障力的快速形成, 增加了系统全寿命周期费用。针对类似指挥控制系统等复杂系统测试的相关研究, 国内学者分别从不同的工程需求开展大量针对性的研究工作。马瑞萍<sup>[1]</sup>等提出采用相关性模型的方法对系统测试流程进行优化设计, 提高系统测试效率, 缩减测试时间; 代绪强<sup>[2]</sup>等提出了采用模块化设计和综合集成设计思路构建综合测试系统, 并从供配电安全性测试、计算机测试和网络通信测试等方面, 提出综合测试系统的实现策略, 为提高指挥控制硬件平台检验效率和开展大型复杂指挥控制系统测试工作进行了探索。陈志新<sup>[3]</sup>等针对信息化作战分布、同步以及协同决策指挥的需求, 提出了指挥流程的构建方法和控制模型。基于态势变化、任务时限以及事件触发等机制, 设计了指挥流程控制软件。通过流程定义编排、流程引擎以及流程支撑服务

收稿日期: 2022-04-21; 修回日期: 2022-04-27。

作者简介: 张利彬(1984-), 男, 河南安阳人, 硕士, 高级工程师, 主要从事运载火箭指挥信息系统和健康管理系统设计方向的研究。

引用格式: 张利彬, 张 熙, 张 明, 等. 指挥控制系统测试流程设计与功能实现研究[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(6): 79-83.

等模块设计,实现了指挥信息有序传递和紧密衔接。徐亮<sup>[4]</sup>等针对舰载指控系统构件的特点,给出了构件依赖关系矩阵的定义和生成方法,提出了一种基于依赖关系矩阵的舰载指控系统构件集成测试方法。冯卫永<sup>[5]</sup>等针对现行海军舰船数据链设计鉴定测试方法的不足,基于指控系统从数据链战术应用角度出发,面向海军舰船作战系统使命任务,提出了海军舰船数据链设计鉴定的评价指标体系及其测试方法,对客观、科学、有效地评估海军舰船数据链战术数据传输能力有着重要实践参考价值。华南理工大学徐思琰<sup>[6]</sup>等依托国内某大型指控信息系统软件系统测试项目,通过深入分析其软件架构,研究总结了现代大型指控信息系统软件的体系结构特点、主要核心功能及系统测试环境;通过分析新一代大型指控信息系统软件的研制模式和开发方法,深入总结了适合现代大型指控信息系统软件的系统测试设计方法,提出综合运用基于构件技术的架构测试对象网等安全性和可靠性分析技术,进行测试设计和分析隔离故障,并针对大型指控信息系统软件的核心功能,分别给出了测试方法;通过总结大量软件缺陷数据,并结合自身多年测试经验,提出了故障密度和需求满足性两种适合大型指控信息系统软件测试结果分析与评价的方法,并提炼了余种大型指控信息系统软件的典型故障模式。以上研究者的研究,都是根据自身工程实践,从各自的专业角度对指控控制系统的测试进行了专题研究,为后续同行的深入研究提供了丰厚的技术积累。

本文结合指挥控制系统的使用特点,从其功能定位、组成架构、应用模式和全寿命周期等方面开展需求分析,并从测试目的确定、测试项目设定、测试参数选取、测试方法研究、测试流程设计和测试结果评定等方面开展专题研究,最终提出一套适用于指挥控制系统离线测试和在线测试的通用测试系统和测试流程,确保指挥控制系统测试工作能够满足测试覆盖性指标要求、提高系统测试检验效率、提高装备的实战化水平。

## 1 需求分析

### 1.1 功能定位需求

指挥控制系统作为复杂装备实现核心控制的关键功能系统<sup>[7]</sup>,功能包括指令下发、流程控制、执行控制、通信控制和状态监测等重要功能,为复杂装备系统提供共用的软硬件平台,承载着多层级互联互通、数据利用、装备控制、信息协同、辅助决策等功能任务,任何一个功能的丧失都将影响任务的顺利执行。目前尚没有相应的测试手段,既能实现系统测试全面覆盖,又能够不影响正常功能运行,因此有必要针对不同功能需求对测试项目和测试手段进行专题研究,以实现各个功能测试的可达性和完好性。

### 1.2 组成架构需求

指挥控制系统的组成架构日趋复杂,采用标准化、模块化、通用化和组合化的形态已成为一种主流<sup>[8]</sup>,其涉及

计算、信号处理、有线/无线通信、定位导航、信息安全等多个专业,在系统上采用了“分布式+集中式”的架构,将系统内计算、存储、通信等资源进行一体化整合,形成虚拟化资源池,实现集中式管理及分配,各客户端设备作为分布式终端接入到资源池内部。从硬件组成上来讲,包括供配电、计算、存储、有线通信(如以太网、光纤、被复线、1553B等总线)、无线通信链路(北斗、卫通、超短波、宽带等)等,构成不同的信息传输链路和控制链路<sup>[9]</sup>。因而需要依据系统组成特点,对相应的测试项目和测试手段进行研究,以实现系统测试的针对性、全面性和科学性。

### 1.3 应用模式需求

指挥控制系统需要适应复杂装备系统的多个应用模式和任务剖面:在应用模式上,指挥控制系统需要满足单级独立控制、多级集中控制、多席位互换和远程应急控制等多个使用模式<sup>[10]</sup>;在通信链路上,采用宽窄带融合、有线/无线多信道融合通信等,实现信息传输的多路冗余和可达性;在软件应用上,涉及多种流程控制、关键节点控制和执行对象的特定控制,还需满足多个席位的操作使用需求,因此,以服务实战化服为核心,针对不同的应用模式,设计特定的测试项目,保证系统测试的准确性和可行性。

### 1.4 全寿命周期的需求

指挥控制系统涉及需求论证、研制生产、系统集成、交装服役和维护维修等全寿命周期,在不同的生命周期阶段,其侧重的测试项目、测试参数均有所不同。在需求论证阶段,需要根据测试性设计在系统及单机中提前预设测试点<sup>[11]</sup>;在研制生产阶段,需要对单机的所有功能性能指标进行全面测试和考核;在系统集成阶段,需要对系统互联、软硬件接口和功能指标等进行测试;在交装服役阶段,需要对功能链路完好性、通信指标可达性和关键链路在线状态进行测试<sup>[12]</sup>。因此需要根据系统不同的阶段特点,进行测试项目的特定设计,避免以一概全,以实现测试目的、测试时机和测试对象的匹配性。

## 2 测试项目的设计

### 2.1 从测试目的进行设定

依据测试目的进行指挥控制系统测试项目的设定<sup>[13]</sup>,自顶而下可分为分系统测试、子系统测试、单机测试和功能模块设计等层级。分系统测试的目的是考虑各子分系统之间的协同合理性和正确性,以及子系统之间工作流程畅通性;子系统测试作为支撑分系统的重要组成部分,是测试单机之间的软硬件接口的正确性,以及通信、传输和处理等多要素信息链路的正确性;单机测试更多是在单机出厂之前,重点考核单机设计方案的正确性、单机各项功能性能指标的满足情况;功能模块重点测试单个专用模块的性能指标和环境适应性满足情况<sup>[14]</sup>。依据测试目的的考核对象不同,设计模块、单机、子系统和分系统等不同的测

试项目进行考核。

### 2.2 从测试时机进行设定

依据测试时机进行指挥控制系统测试项目的设定, 根据时间顺序可分为单机(功能模块)出厂试验、子系统综合试验、分系统匹配试验、系统出厂试验和交付使用等不同时机, 单机(功能模块)出厂试验依据专用的测试工装, 在不同环境试验项目中开展分组测试; 子系统综合试验依据试验大纲开展不同功能链路测试; 分系统匹配试验主要用于不同子系统之间的功能完好性测试; 系统出厂试验重在考核复杂装备的整体性能; 交付使用期间的测试更关注整体功能的实现。围绕产品研制的不同时机剖面, 设计专用工装、装置等开展不同的测试项目进行考核。

### 2.3 从测试对象进行设定

依据测试对象进行指挥控制系统测试项目的设定, 根据系统组成可分为计算类、存储类、有线通信类、无线通信类、音视频类、时统类、软件类等对象, 测试项目可分为硬件本身和链路测试、软件协议与业务测试、全流程全剖面测试等。系统测试对象分为单机功能性能测试、链路级(有线、无线)测试、系统级多节点测试、链路切换测试、热备切换测试、连续加电测试等。依据系统组成对象的不同, 设计硬件链路、软件流程等开展不同的测试项目进行考核。

## 3 测试参数的选取设计

由于指挥控制系统涉及多个专业领域耦合、应用模式多样、信息交互链路复杂等显著特点, 以往的测试手段, 更多是通过某种专用测试设备对被测设备进行测试, 这种测试平时方法更多依靠获取单机的参数, 对系统性能指标进行评估, 并不能真实反应单机对象在整个系统中发挥的实际作用, 且这种测试工况并不能覆盖单机在系统中的实际工况; 这种对单机对象的测试往往会造成测试设备众多繁杂且不易维护, 同时模糊了单机测试与系统测试之间的界面。本节从指挥控制系统链路测试出发, 在开展系统测试时有必要对测试参数进行选取设计, 以缩短测试周期、提高测试效率, 提高系统测试覆盖性<sup>[15]</sup>。着重对系统层级的测试参数选取进行设计, 按照功能链路分类, 重点选取计算链路层、存储链路层、通信网络层和应用业务层等不同特点进行测试参数选取。

针对计算链路层级的测试, 重点选取各个终端计算资源的 CPU 利用率、内存占有率、终端启动时间、各终端软件启动时间、不同终端之间的信息交互反应时间、终端抗毁应用服务迁移时间和终端接入网络时间等。

针对存储链路层级的测试, 重点选取数据写入/导出速率、数据同步速度、数据备份速度、数据容灾速度、数据恢复速度、数据完整性和数据导出时间等。

针对功能链路层级的测试, 重点选取通信网络丢包率、冗余链路切换时间、无线网络通信时延、北斗短消息成功

率、守时/授时精度、多点/多级组网性能指标、音视频指挥效率等参数。

通信网络丢包率分为有线通信网络和无线通信网络, 丢包率测试根据被测试信道的带宽以及业务需求的数据包长度相结合完成, 获取丢包率指标。

冗余链路切换测试分为主备链路测试以及不同优先级链路测试, 主备链路测试主要指的是组成系统的骨干冗余以太网或光纤网络, 通过特定的测试手段获取冗余网络之间的切换时间。不同优先级链路切换测试的考核指标主要是不同链路的切换时间和响应速度。

通信时延体现在无线网络方面, 主要体现在系统内无线通信手段如短波、超短波、宽带等信息的传输效率, 将信道能力、应用场景以及业务需求结合起来, 考核通信传输效率<sup>[16]</sup>。

北斗短消息成功率, 主要考核北斗二代、三代在户外环境下北斗短消息的接收、发送成功率。

守时/授时精度, 主要完成在单个系统内部守时精度以及接收外部授时信息能力; 多个及多级节点接的授时、备份接替等能力。

多点/多级组网性能是为模拟实际场景下多个或者多级指挥控制系统大规模组网并存时系统的功能性能<sup>[17]</sup>。主要参数为多级节点内通信带宽、传输时延、信道切换等指标。

音视频指挥指标主要是音频、视频数据的传输, 话音、视频图像的清晰度、时延等参数。

针对应用业务层的测试, 重点选取部署时间、重新启动时间、交互信息响应时间、信息交互正确性、数据传输顺序等参数。

## 4 测试系统的设计实现

本文提出一种基于 VPX 架构的通用测试系统用以实现指挥控制系统的系统测试, 其以一台具备覆盖指挥控制系统所有测试功能的 VPX 架构测试机箱为核心, 能够实现电源信号、数字信号、模拟信号、总线信号、射频信号、音视频、存储信息等进行全面的测试及数据记录分析, 同时支持测试功能的后续扩展(增加功能板卡)<sup>[18]</sup>。硬件架构如图 1 所示。

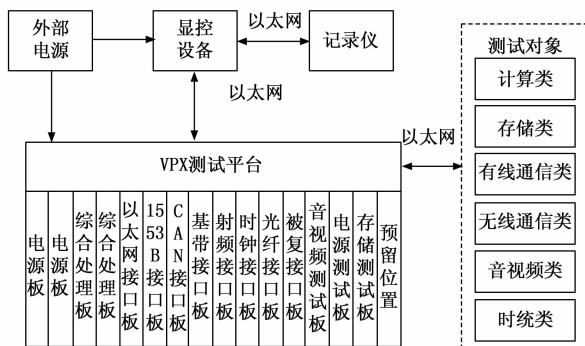


图 1 测试平台组成框图

#### 4.1 VPX 测试平台

VPX 测试平台以 6U 的 VPX 架构机箱为基础平台, 各功能模块以 VPX 板卡形式插入到 VPX 测试机箱中。机箱背板采用统一化的接口设计, 便于测试模块扩展及互换。测试平台内含电源模块、综合控制板、综合处理板、以太网接口板、1553B 接口板、CAN 接口板、基带接口板、射频接口板、时钟接口板、光纤接口板、被复接口板、音视频测试板、电源测试板、存储测试板等组成。测试平台能够实现光纤信号、以太网信号、1553B 信号、CAN 总线信号、射频信号、音视频信号等数据的测试工作。

有线通信测试用于实现有线通信接入单元(包括光纤信号、以太网信号、1553B 信号、CAN 总线信号等)的控制、其数据的接收, 数据的处理, 以及接收测试指令和反馈测试结果到 VPX 测试平台。

无线通信测试用于对无线通信设备(区域宽带、超短波等)的测试, 用于射频处理板信号分析, 接收通路射频信号的模数转换, 发射通道射频信号的数模转换和射频信号发射通路衰减与接收通路增益控制。

电源模块测试分别为交流电流电压、电流测试与直流电压、电流测试。

#### 4.2 显控设备

显控设备是 VPX 测试平台的客户端操作设备, 是一台具备较高数据处理能力的计算机, 通过以太网与 VPX 测试平台实现数据互联。在其上部署测试操作软件平台, 实现测试项目、测试阶段的选择、测试进程的显示、测试对象、测试权限、测试数据的管理等工作。

#### 4.3 记录仪

记录仪实现向测试人员信息、各被测系统信息、测试结果数据的高可靠存储及快速调用。通过存储系统实现不同型号系统测试数据存储以及同一型号不同批次系统的测试数据存储, 建立一个的庞大的指挥控制系统测试数据库。通过大量测试过程, 建立指挥控制系统的主要数据包络, 不断进行数据迭代、数据挖掘, 最终形成一个智能化的指挥控制系统测试平台, 以指导后续不同型号的指挥控制系统的测试工作。

#### 4.4 测试对象

测试对象包含指挥控制系统内的计算类、存储类、有线通信类、无线通信类、音视频类和时统类等多种类产品, 在系统离线(地面)测试时, 依据不同产品种类设置不同的测试接口, 通过测试用例的不同设置完成不同产品的测试内容; 在系统在线(上装)测试时, 依据特定的在线测试流程, 在不影响系统正常功能的前提下, 实现对各个组成部分功能的全面测试。

### 5 测试流程的设计实现

按照“通用化、信息化、智能化”的理念, 开展指挥控制系统的测试项目和测试流程的设计, 以实现系统链路的信息测试, 同时, 考虑海量测试数据的高效利用, 按

照标准格式自动输出测试报告, 极大程度上提升了数据分析的效率, 提高测试的智能化水平<sup>[19]</sup>, 如图 2 所示。

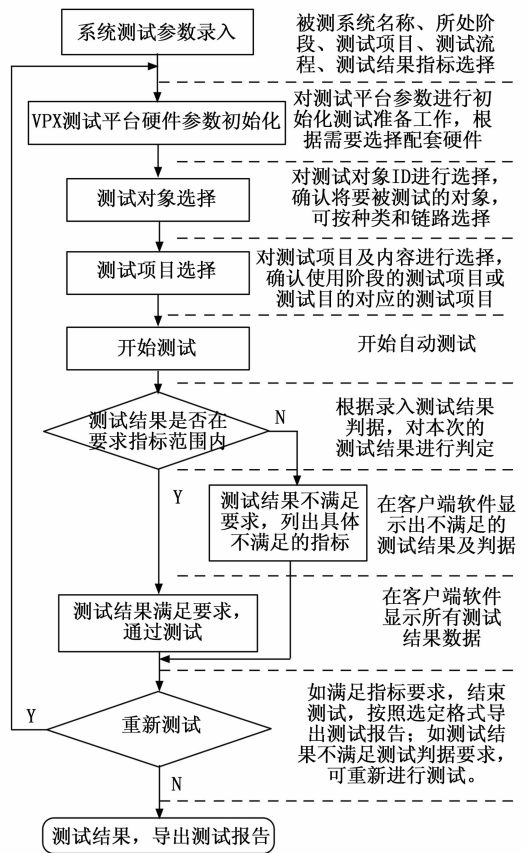


图 2 测试流程步骤图

1) 建立测试项目库: 根据系统应用需求, 将指挥控制系统的测试阶段、测试项目、测试对象、测试人员、测试流程、测试结果判据等数据录入至测试项目数据库。

2) 对测试平台进行初始化操作: 对测试平台进行初始化操作, 根据测试对象选择不同的硬件模块和软件模块。

3) 测试对象选择: 针对测试对象进行选择, 可根据对象种类和对象链路来选择。

4) 测试项目选择: 针对被测对象的测试需求、所处阶段、测试需求参数, 推荐多组测试项目, 可结合测试目的, 确定测试项目。

5) 开始测试, 测试结果判定: 点击开始测试, 测试平台开始自动按照测试项目进行测试并生成测试结果。

6) 测试结果判读: 测试平台得出测试结果后, 将测试结果与知识库中的测试判读数据进行比对。如测试数据符合测试判据, 则通过本次测试; 若测试结果不符合测试判据, 则将不符合测试项结果及判据记录入知识库中, 并显示给测试人员。针对不符合项提出处置建议, 以指导查找原因。

7) 测试报告导出: 完成测试过程后, 测试平台将按照测试人员导入的测试模板生成测试报告。

## 6 测试结果的评定

在获得指挥控制系统系统各项测试项目的测试结果后, 需要对测试结果进行分析, 并对测试结果的有效性进行评定, 进而形成一套针对性的指挥控制系统评价指标体系。

针对测试结果的评定需要从以下几个方面开展:

1) 对各个测试项目的全面性和参数选取的正确性进行确认, 确保测试对象的全覆盖、测试工况的可实现、测试参数的可采集、测试数据的可分析和测试结论的可信性。

2) 根据系统功能、性能指标要求进行测试结果对标, 对于每个指标、每个工况的测试有效性进行确认, 并对测试结果的有效性给出明确结论。

3) 采用横向对比和纵向比对的方法, 利用数据挖掘、智能推理算法等技术手段对“单次、单对象、单链路和单次反应时间”等进行分析确认, 即对同一个项目的多次数据进行分析, 对同一个对象不同阶段的测试结果进行分析, 对同一个链路上的不同对象的性能指标进行分析, 对同一个测试项目上各种工况的反馈时间进行分析, 甄别出本次测试项目的有效性和准确性。

4) 通过多次测试分析, 形成一套指挥控制系统的综合评定方法和评定指标体系, 可以根据不同的测试项目, 形成一套测试目的、测试工况、测试数据和测试结论相匹配的一套测试评定方法, 用以指导后续指挥控制系统的各项测试工作。

## 7 结束语

本文通过从指挥控制系统的功能定位、组成架构、应用模式、全寿命周期等多个角度对其测试需求进行了分析, 并从测试目的确定、测试项目设定、测试参数选取、测试方法设计、测试流程设计和测试结果评定等方面, 对指挥控制系统测试流程设计和功能实现开展专题研究, 最终提出一套适用于指挥控制系统的通用测试系统和测试流程, 实现了指挥控制系统的通用化、信息化和智能化测试, 为后续指挥控制系统测试工作提供参考, 为指挥控制系统的在线测试和长期加电值班提供技术指导。

## 参考文献:

- [1] 马瑞萍, 等. 大型复杂系统测试流程优化设计 [J]. 自动化应用, 2015, 9: 22-25.
- [2] 代绪强. 指挥控制硬件平台综合测试系统及实现技术 [J]. 指挥信息系统与技术, 2013, 12 (6): 90-94.
- [3] 陈志新, 等. 指挥信息系统流程控制技术 [J]. 指挥信息系统与技术, 2013, 6 (3): 20-24.
- [4] 徐亮, 等. 一种舰载指控系统构件集成测试方法 [J]. 计算机与数字工程, 2010 (6): 54-58.
- [5] 冯卫永. 基于指控系统的数据链战术能力测试研究 [J]. 舰船电子工程, 2011, 31 (12): 159-161, 174.
- [6] 徐思琰. 大型指控信息系统软件系统测试设计与实施 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- [7] 贾璐, 等. 指挥信息系统效能评估数据中心建设方法 [J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38 (6): 96-99.
- [8] 窦赛, 等. 柔性测试技术在复杂装备测试中的应用 [J]. 现代电子技术, 2011, 34 (9): 141-144.
- [9] 韩应都. 基于柔性测试技术的空空导弹自动测控平台设计 [J]. 现代电子技术, 2014, 37 (13): 33-35.
- [10] 高天虹, 汪海波. 基于柔性测试技术的测试系统 [J]. 兵工自动化, 2009, 28 (5): 85-86.
- [11] 黄靖博. 分布式自动化测试平台的研究与设计 [D]. 上海: 复旦大学, 2013.
- [12] 赵文, 等. 基于柔性测试技术的发射装置通用测试平台设计 [J]. 测控技术, 2018, 37 (s): 10-13.
- [13] 同江, 等. 下一代自动测试系统在我国航天测试体系结构中的应用 [J]. 航天控制, 2011, 4 (2): 75-80.
- [14] 俞育新. 舰艇指控设备集成测试系统的研究 [J]. 舰船电子工程, 2010 (2): 159-164.
- [15] 夏克寒, 等. 导弹测试流程优化系统设计与实现 [J]. 导弹与航天运载技术, 2012 (2): 43-46.
- [16] 郭莉珍, 等. 某 C3I 系统指挥与通信能力检测方案与思考 [J]. 山西电子技术, 2012, 5: 34-36.
- [17] 刘晓丹, 等. 基于数据驱动的自动化测试平台设计 [J]. 科学技术与工程, 2008, 2: 779-782.
- [18] 罗华峰, 等. 舰空导弹测试项目优化方法研究 [J]. 现代防御技术, 2010, 6 (38): 31-38.
- [19] 刘福军, 等. 下一代自动测试系统体系结构研究进展 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (2): 339-341.
- [20] 杨钦宁, 余浩平, 庞羽佳. 基于改进 Mask R-CNN 的卫星目标部位检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (11): 12-17.
- [21] 申燕萍. 基于 CNN 深度学习的机器人抓取位置检测方法 [J]. 计算机测量与控制, 2020, 28 (8): 67-71.
- [22] SIMONYAN K, ZISSERMAN A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition [J]. arXiv preprint arXiv: 1409.1556, 2014.
- [23] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Deep residual learning for image recognition [C] // Proceedings of the IEEE Conference On Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 770-778.
- [24] 岳梦云, 王伟, 张羲格. 人工智能在中国航天的应用与展望 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (6): 1-4, 12.
- [25] DENG Y H, LIU X L, ZHENG Z H, et al. A new active contour modeling method for processing-path extraction of flexible material [J]. Optik: Zeitschrift fur Licht-und Elektronoptik; Journal for Light-and Electronoptic, 2016, 127 (13): 5422-5429.

(上接第 78 页)